

Monetäre Bewertung des belastungsbasierten Leasings für Werkzeugmaschinen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Patrick Andreas Stanula, M.Sc.

aus Hofgeismar

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tag der Einreichung: 13.12.2021

Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2022

Darmstadt 2022

D17

Stanula, Patrick Andreas: Monetäre Bewertung des belastungsbasierten Leasings für
Werkzeugmaschinen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-233754

Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2022

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Vorwort des Herausgebers

Das Leasing kostenintensiver Werkzeugmaschinen ist eine Alternative zum kreditfinanzierten Kauf und verspricht Vorteile. Das klassische Leasing leidet jedoch unter dem Prinzipal-Agenten-Problem: Der Leasingnehmer ist an einer hohen Auslastung der Maschine interessiert, der Leasinggeber an deren Werterhalt. Die Intensität der Nutzung einer Maschine ist dem Leasinggeber jedoch nicht bekannt, so dass er das Risiko des Wertverlusts in die Leasingrate eingepreist. Das belastungsbasierte Leasing verspricht die Auflösung dieses Problems, indem die durch den Leasingnehmer verursachte Belastung und damit der Wertverlust in die Leasingrate integriert wird.

Trotz möglicher Vorteile ist weder in der Theorie noch in der Praxis ein solches Modell im Detail beschrieben. Für die Vertragspartner ergibt sich aktuell die Schwierigkeit, die monetäre Vorteilhaftigkeit im Vorfeld zu bestimmen, da der tatsächliche Wertverlust einer Maschine durch ihre (Ab-)Nutzung nicht quantifizierbar ist. Aus diesem Grund befasst sich die vorliegende Dissertation mit der Bewertung des belastungsbasierten Leasings für Werkzeugmaschinen als Grundlage einer Investitionsentscheidung.

Dazu wird ein belastungsbasiertes Leasingkonzept konzeptionell und mathematisch entwickelt, wobei der Amortisationsanteil der Leasingrate durch die Abnutzung der Werkzeugmaschine bestimmt wird. Die Entwicklung eines Simulationsmodells auf Basis historischer Instandhaltungs- und Betriebsdaten ermöglicht die Modellierung und Bewertung unsicherer Maschinenbelastung und Leasingraten. Es wird angenommen, dass sich durch die Verrechnung der Belastung für den Leasingnehmer ein Anreiz entsteht, sein Nutzungsverhalten zu verändern. Mit Hilfe der Bewertungsmethode wird gezeigt, dass höhere erwartete Restwerte und niedrigere Instandhaltungskosten über den Lebenszyklus der Maschine zu erwarten sind. So kann das belastungsbasierte Leasing für den Leasingnehmer zu niedrigeren Leasingraten und Lebenszykluskosten führen. Gleichzeitig verspricht es durch das gesunkene Restwertrisiko und die gesteigerte erwartete Gewinnmarge Vorteile für den Leasinggeber. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen einen Grundstein für den Einsatz des belastungsbasierten Leasings und ermöglichen Leasinggebern und -nehmern einen strukturierten und praxisorientierten Zugang zu datenbasierten Geschäftsmodellen.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich gilt mein besonderer Dank, nicht nur für die wissenschaftliche Betreuung, sondern insbesondere für das entgegengebrachte Vertrauen und die Offenheit der Erschließung eines interdisziplinären Forschungsgebiets der Produktionsforschung. Auch Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf danke ich für das fachliche Interesse an meiner Arbeit sowie die Übernahme des Korreferats.

Die Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts *Pay-per-Stress*. Allen beteiligten Partnern, insbesondere Thomas Moser und Prof. Dr. Arne Buchwald, gilt mein Dank für die fachlichen Diskussionen, die wertvollen Beiträge und die Unterstützung. Mein Dank gilt zudem meinen Kolleginnen und Kollegen am PTW, die meine Zeit am Institut zu etwas ganz Besonderem gemacht haben. Insbesondere den Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe Management industrieller Produktion (MiP) und der Gruppe TEC danke ich. Stellvertretend für das Support-Team am PTW möchte ich Christine Sutton, Annette Heb und Boris Prinzisky danken, welche mich stets engagiert und hervorragend bei allen Belangen unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt außerdem Dr.-Ing. Amina Ziegenbein, mit der ich das Forschungsfeld der Datengestützten Wertstrom- und Geschäftsmodellinnovation erschließen durfte. Für den anregenden Austausch zu technischen Themen rund um Werkzeugmaschinen, Zerspanung und auch betriebswirtschaftliche Fragestellungen bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Timo Scherer, Dr.-Ing. Christopher Praetzas und Dr.-Ing. Oliver Kohn.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Manfred und Teresa, gilt besonderer Dank für den Rückhalt, die Unterstützung und das unerschütterliche Vertrauen in jeder Phase meines Lebens- und Ausbildungswegs. Sie haben mir mein Studium und die Promotion ermöglicht, indem sie stets hinter mir standen und den notwendigen Mut verliehen. Mein größter und herzlichster Dank gilt meiner Frau Kristina und unserem Sohn Leonard! Ihre Unterstützung und Fürsorge während der gesamten Zeit gaben mir erst den Halt und die Motivation, diese Arbeit überhaupt fertigstellen zu können.

Frankfurt am Main, Februar 2023

Patrick Stanula

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1 Untersuchungsgegenstand spanende Werkzeugmaschine	7
2.1.1 Aufbau, Funktion und Betrieb	8
2.1.2 Belastung, Verschleiß und Ausfälle.....	10
2.1.3 Bestimmung des Abnutzungsvorrates.....	16
2.1.4 Ex ante Modellierung von Ausfällen und Abnutzungsvorrat	19
2.1.5 Lebenszykluskosten der Werkzeugmaschine	26
2.2 Flexible Bezahlmodelle in der Industrie	27
2.2.1 Leasingmodelle	27
2.2.2 Wertverlust und Restwertermittlung	32
2.2.3 Pay-per-X-Modelle	39
2.3 Ansätze zur Bewertung von Bezahlmodellen	48
2.3.1 Bewertungsmethoden von Bezahlmodellen	48
2.3.2 Investitionsentscheidung.....	51
2.3.3 Entscheidungen unter Unsicherheit	53
2.3.4 Simulationsbasierte Bewertung.....	55
3 Zielsetzung und Forschungskonzeption	60
3.1 Diskussion des Stands der Technik und Wissenschaft	60
3.2 Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen	61

3.2.1	Zielsetzung der Arbeit.....	62
3.2.2	Aufgaben zur Zielerreichung.....	63
3.2.3	Prämissen der Bewertungsmethode	64
3.2.4	Konzeptioneller Ansatz der Bewertungsmethode	66
4	Konzeptionelles Design	68
4.1	Vorgehen zur Modellentwicklung	68
4.2	Untersuchungsgegenstand belastungsbasiertes Bezahlmodell	70
4.3	Bewertung der Investition	74
4.3.1	Risikoprofil und Dominanzkriterium.....	75
4.3.2	μ - σ -Prinzip.....	77
4.4	Anreizwirkung	78
4.4.1	Anreizwirkung auf die Leasingrate	79
4.4.2	Anreizwirkung auf die Lebenszykluskosten	81
4.5	Kostenberechnung.....	83
4.5.1	Instandhaltungsereignisse	84
4.5.2	Amortisationskosten.....	86
4.5.3	Kapitalkosten	89
4.5.4	Übersicht des Kostenrechnungssystems	90
4.5.5	Technische Umsetzung des Kostenrechnungssystems	91
4.6	Simulationskern	92
4.6.1	Ereignisdaten	93
4.6.2	Simulation der Ereignisdaten.....	94
4.6.3	Simulation des Abnutzungsvorrates.....	100
4.7	Abbildung der Anreizwirkung	105
4.7.1	Modifikation der Ereignisse	105
4.7.2	Modifikation des stochastischen Prozesses	107
4.8	Aggregation der Modellelemente und Anwendung.....	107
5	Realisierung am Industriebeispiel.....	111
5.1	Beschreibung des industriellen Anwendungsfalls.....	111

5.1.1	Maschine und Anwendungsfall.....	111
5.1.2	Datenaufnahme und -vorbereitung.....	112
5.1.3	Spezifikation der Kostenfaktoren	113
5.2	Bezahlmodell und Bewertungsmodell.....	116
5.2.1	Aufbau und Ablaufstruktur des Modells	116
5.2.2	Simulation der Ereignisse.....	117
5.2.3	Simulation von Abnutzung und Wertverlust	118
5.2.4	Investitionsbewertung und Kostenberechnung	119
5.2.5	Datenbasierte Validierung und Verifikation	119
6	Experimentelle Anwendung der Bewertungsmethode.....	122
6.1	Experimentelles Design	122
6.2	Szenario 1: Leasingraten	123
6.2.1	Zeitwerte	124
6.2.2	Leasingraten.....	127
6.2.3	Investitionsentscheidung.....	128
6.3	Szenario 2: Lebenszykluskosten	131
6.3.1	Instandhaltungskosten	131
6.3.2	Lebenszykluskosten	133
6.3.3	Investitionsentscheidung.....	135
7	Evaluation der experimentellen Anwendung.....	141
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	141
7.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	143
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	145
8.1	Zusammenfassung und kritische Würdigung	145
8.2	Ausblick und zukünftige Forschungstätigkeiten	147
	Literaturverzeichnis	149
	Studentische Arbeiten.....	185
	Veröffentlichungen	187
A	Anhang	189

A.1 Grundlagen	189
A.1.1 Baugruppen und Funktion der Werkzeugmaschine	189
A.1.2 Studien zu Ausfällen von Komponenten der Werkzeugmaschine	190
A.1.3 Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinen.....	191
A.1.4 Anwendungsbeispiele der Zuverlässigkeitsanalyse.....	191
A.1.5 Abgrenzung des Leasings zu anderen Finanzierungsformen	193
A.1.6 Vertragsformen im Leasing.....	194
A.1.7 Vor- und Nachteile von Leasing	196
A.1.8 Besonderheiten von Ereignisdaten.....	197
A.1.9 Multivariate Regressionsmodelle der Zuverlässigkeitsanalyse	198
A.1.10 Zusammenhänge der Zuverlässigkeitsmodelle	200
A.1.11 Funktionen konkurrierender Risiken und gemischter Verteilungen ..	200
A.1.12 Anwendungen der Risikomischungen im Maschinenbau	201
A.1.13 Verfahren zur Auswahl der Ausfallverteilung.....	201
A.2 Modellspezifische Erläuterungen	202
A.2.1 Modellierung im Anwendungsfall.....	202
A.2.2 Modellierung der Anreizwirkung	215
A.3 Untersuchungsergebnisse	216
A.3.1 Instandhaltungskosten: Untergliederung.....	216
A.3.2 Lebenszykluskosten: Untergliederung.....	218
A.3.3 Full-Service-Leasing.....	219

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zusammenfassung von Motivation und Problemstellung (eigene Darstellung basierend auf [STÄ20b; VER21]) (Abbildung Maschine: DMG)	3
Abbildung 2 Beschreibung des Anwendungsfalls in Anlehnung an [STA20b; BOS21] (Abbildung Maschine: DMG).....	4
Abbildung 3 Aufbau der Arbeit und Forschungsprozess nach [ULR84].....	6
Abbildung 4 Verknüpfung von Fertigungsarten und Fertigungsprinzipien nach [WES06].....	8
Abbildung 5 Komponenten und Achsen der Werkzeugmaschine [HIR16] (Quelle Maschine: DMG)	9
Abbildung 6 Exemplarische zeitliche Betriebszustände einer spanenden Werkzeugmaschine in der Klein- (links) und Großserie (rechts) nach [NEY93]	9
Abbildung 7 Einflussfaktoren auf den Verschleiß und die Lebensdauer einer Werkzeugmaschine.....	12
Abbildung 8 Charakteristischer Signalverlauf zur Beschreibung des Verschleißfortschrittes (links) und Belastungsintegral (rechts) am Beispiel eines Kugelgewindetriebs nach [HUF12; KOH21; SCH10]	15
Abbildung 9 Ausfallursachen von Werkzeugmaschinen nach Baugruppen.....	16
Abbildung 10 Verläufe beispielhafter Abnutzungsvorräte mit einer Phase (1), drei Phasen (2) und zwei Phasen (3) nach [LEI18; BAU20]	17
Abbildung 11 Datenquellen für die Modellierung von Ausfällen und Abnutzungsvorrat in Anlehnung an [JÜR06].....	20
Abbildung 12 Übersicht potenzieller Modelle und Modellklassen der Ausfallmodellierung.....	21
Abbildung 13 Beispielhafte Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren nach [ABE09; BLE10; DER11].....	26
Abbildung 14 Das Leasingdreieck nach [BEI12; GRU19].....	30

Abbildung 15 Bestimmung des Zeitwertes einer Maschine in Anlehnung an [INS99].	37
Abbildung 16 Exemplarische kumulierte Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen über einen Zeitraum von 20 Jahren nach [FLE07a]	59
Abbildung 17 Forschungsziele der vorliegenden Arbeit.....	62
Abbildung 18 Eingangs- und Ergebnisgrößen des Modells je Umsetzung	67
Abbildung 19 Ansätze der Systemanalyse nach [VER14]	69
Abbildung 20 Gruppen der Komponenten nach Verschleißart [STA20b]	71
Abbildung 21 Veranschaulichung der stochastischen Dominanz nach [LAU18].....	76
Abbildung 22 Bewertung des Bezahlmodells mit der Monte-Carlo-Simulation in Anlehnung an [STA21b] und [HER64]	76
Abbildung 23 Indifferenzkurvensysteme im μ - σ -Diagramm nach [LAU18]	78
Abbildung 24 Phasenmodell der Lebenszykluskosten nach VDMA 34160 [VDMA 34160] (links) und die Anpassung an die Bewertung im Leasing (rechts).....	82
Abbildung 25 Direkte und indirekte Leasingkosten im Modell	84
Abbildung 26 Exemplarischer Verlauf des Abnutzungsvorrates nach [STA20b].....	87
Abbildung 27 Informationsbeziehungen zur Kostenbestimmung.....	91
Abbildung 28 Ablaufstruktur des Simulationsmodells für das belastungsbasierte Bezahlmodell.....	92
Abbildung 29 Ablaufstruktur des Simulationsmodells für das Leasing	92
Abbildung 30 Beispielhafte Darstellung von Ausfalldaten nach [REL20]	93
Abbildung 31 Badewannenkurve nach [BIR17]	95
Abbildung 32 Formen der pdf der Weibull-Verteilungen für $\eta=1,0$ nach [DIN EN 61649].....	97
Abbildung 33 Vorgehen für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen und Interpretation	100
Abbildung 34 Bestimmung der kumulierten Belastung in Abhängigkeit der Ereignisse	105

Abbildung 35 Qualitative Ausfallverteilungen (MFM) einer direkt- belastungsabhängigen Komponenten mit und ohne Anreizwirkung.....	106
Abbildung 36 Ablauf der Modellnutzung und -anpassung zur Bewertung der Investitionsentscheidung.....	108
Abbildung 37 Darstellung des prototypischen Simulationsmodells.....	116
Abbildung 38 Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov Tests am Beispiel der Ausfallverteilung der Baugruppe Motorspindel (links: Verteilung der zufälligen Ausfälle; rechts: Verteilung der Verschleißausfälle)	121
Abbildung 39 Zeitwertverlauf der Baugruppe Spindel (oben: SQ-LR-B, unten: AW-LR- B)	124
Abbildung 40 Zeitwertverlauf der Baugruppe Vorschubachse (oben: SQ-LR-B, unten: AW-LR-B)	125
Abbildung 41 Histogramme der Restwerte beider Komponenten in beiden Anwendungsfällen	126
Abbildung 42 Verlauf der Leasingraten über die Grundmietzeit in beiden Szenarien	127
Abbildung 43 Histogramm der Leasingraten über die Grundmietzeit in beiden Szenarien.....	128
Abbildung 44 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung der Leasingraten.....	129
Abbildung 45 Risikonutzenfunktionen der alternativen Investitionsentscheidungen im Szenario 1.....	130
Abbildung 46 Instandhaltungskosten über die Grundmietzeit	132
Abbildung 47 Histogramm zu den Instandhaltungskosten im Jahr.....	133
Abbildung 48 Lebenszykluskosten eines Simulationsdurchlaufes für beide Szenarien	135
Abbildung 49 Histogramm zu den LZK im Jahr	136
Abbildung 50 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung der LZK.....	137

Abbildung 51 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung der Instandhaltungskosten	138
Abbildung 52 Risikonutzenfunktionen der alternativen Investitionsentscheidungen in Szenario 2.....	139
Abbildung 53 Mathematische Zusammenhänge der Funktionen der Zuverlässigkeitsanalyse [DAV20]	200
Abbildung 54 Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Baugruppe Spindel inklusive MFM-Modell	213
Abbildung 55 Histogramm und theoretische Verteilungsfunktion (pdf und cdf) der gemischten Verteilung aus zwei 2-Parameter Weibull-Verteilungen der Baugruppe Spindel.....	213
Abbildung 56 Instandhaltungskosten im Detail über die Grundmietzeit in AW	216
Abbildung 57 Instandhaltungskosten im Detail über die Grundmietzeit in SQ	217
Abbildung 58 LZK über die Grundmietzeit für alle Szenarien (AW und SQ der LZK)..	218
Abbildung 59 Risikonutzenfunktionen der alternativen Investitionsentscheidungen beim Full-Service-Vertrag	219
Abbildung 60 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung von Full-Service-Verträgen.....	219

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Risikoübernahme bei Pay-per-X-Modellen	42
Tabelle 2 Vorteile und Unsicherheiten in Performanz-basierten Verträgen [STA10] ..	44
Tabelle 3 Strategien der Beeinflussung im Rahmen der Informationsasymmetrie	45
Tabelle 4 Pay-per-X-Bezahlmodelle im Maschinenbau inklusive Risiken für den Leasinggeber	47
Tabelle 5 Vor- und Nachteile der MC-Simulation der Risikoanalyse [BUS18; VDI 4008- 6]	57
Tabelle 6 Anforderungen nach [STA20b] und Realisierung im Modell	70
Tabelle 7 Vorteile und Motivation eines belastungsbasierten Bezahlmodells	74
Tabelle 8 Definition der Anreizwirkung auf die Bestandteile der Leasingrate.....	79
Tabelle 9 Definition der Anreizwirkung auf die Mietbemessungsgrundlage.....	80
Tabelle 10 Definition der Anreizwirkung auf die Belastung der Komponentengruppen	80
Tabelle 11 Notwendige Informationen zur Berechnung der Amortisation	88
Tabelle 12 Klassische Phasen der Ausfallrate [DIN EN 61649]	95
Tabelle 13 Arten der Risikomischung nach [DIN EN 61649; WAN19]	98
Tabelle 14 Interpretation der Verteilungen und Zuordnung zur Komponentengruppe	100
Tabelle 15 Datenbasierte Zuordnung der Ereignisse zu Baugruppen im Industriebeispiel	112
Tabelle 16 Deterministische Kostenfaktoren im Industriebeispiel	114
Tabelle 17 Stochastische Kostenfaktoren im Industriebeispiel.....	114
Tabelle 18 Randbedingungen des Leasings im Industriebeispiel	114
Tabelle 19 Leasingbestandteile im Industriebeispiel	115
Tabelle 20 Mietbemessungsgrundlage der Baugruppen im Industriebeispiel	115

Tabelle 21 Modellierung der Ausfallverteilungen je Baugruppe im Industriebeispiel und Zuordnung zur Komponentengruppe nach Verschleißart	118
Tabelle 22 Parametrisierung im Anwendungsfall.....	119
Tabelle 23 WACC im Industriebeispiel.....	119
Tabelle 24 Datenbasierte Validierung: Objekte und Methoden	120
Tabelle 25 Experimentelles Design: Versuchskombinationen mit Abkürzungen.....	122
Tabelle 26 Entscheidungskriterien im Rahmen der Experimente	123
Tabelle 27 Kennzahlen der Zahlungsreihen der LZK.....	134
Tabelle 28 Baugruppen und Funktion der Werkzeugmaschine nach [HIR16; BRE19; DIN 69651]	189
Tabelle 29 Kurzübersicht zur Abgrenzung der Leasingfinanzierung nach [GRU19] ...	194
Tabelle 30 Vor- und Nachteile von Leasing für den Leasingnehmer nach [GAB01; GRU19]	196
Tabelle 31 Herausforderungen der Datenbasis.....	197
Tabelle 32 Eigenschaften historischer Ereignisdaten der Instandhaltung	198
Tabelle 33 Visualisierungsverfahren zur Auswahl der Ausfallverteilung nach [MAT21]	201
Tabelle 34 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Ausfälle aller Komponenten im Industriebeispiel	207
Tabelle 35 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Kosten aller Komponenten im Industriebeispiel	209
Tabelle 36 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Ausfalldauern aller Komponenten im Industriebeispiel	210
Tabelle 37 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Dauer der Instandhaltungstätigkeiten aller Komponenten im Industriebeispiel.....	211
Tabelle 38 Tagesweise geschätzte Belastung	214
Tabelle 39 Monatsweise geschätzte Belastung	214
Tabelle 40 Manipulation der Parameter der Ausfallverteilung.....	215

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AfA	Absetzung für Abnutzung
AD	Anderson-Darling Test
AICs	Akaike-Information-Criterion
AW	Anreizwirkung
BAZ	Bearbeitungszentrum
BIC	Baysian-Information-Criterion
cdf	Cumulative Density Function
CFM	Competing Failure Modes
CNC	Computerized Numerical Control
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
ERP	Enterprise Ressource Planning
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KSS	Kühlschmierstoff
LZK	Lebenszykluskosten
MC	Monte-Carlo
MFM	Mixed Failure Modes
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MTTA	Mean-Time-to-Accident
MTBF	Mean-Time-between-Failure

MTTF	Mean-Time-to-Failure
MTTR	Mean-Time-to-Repair
PAB	Prinzipal-Agenten-Beziehung
PAP	Prinzipal-Agenten-Problem
PAT	Prinzipal-Agenten-Theorie
pdf	Probabilist Density Function
PKW	Personenkraftwagen
PSS	Produkt-Service-System
RUL	Remaining Useful Lifetime
SQ	Status Quo
TCO	Total-Cost-of-Ownership
TTF	Time-to-Failure
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
WACC	Weighted Average Cost of Capital
ZÜS	Zustandsüberwachungssystem

Indizes (wenn nicht unten genannt)

ab	Lineare Abschreibung
ANZ	Anzahlungen und Zwischenfinanzierung
aus	Austausch
aw	Anreizwirkung
bel	Belastungsbasiertes Bezahlmodell
direkt	Direkte Instandhaltungskosten
EK	Eigenkapital
fremd	Fremdleistungskosten

FK	Fremdkapital
g	Klassisch abgeschriebene Komponente
IHP	Instandhaltungspersonal
indirekt	Indirekte Instandhaltungskosten
k	Belastungsbasierte Komponente
material	Materialkosten
kom	Komponente
lea	Leasing
netto	Netto
personal	Personalkosten
sq	Status Quo
teil	Teilamortisation
ver	Verschleiß
voll	Vollamortisation
zuf	Zufällig

Große lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A ₀	Euro	Anfangsauszahlung
A	Euro	Auszahlung
AG		Abnutzungsgrenze
AK	Euro	Anschaffungskosten
AT	Euro	Amortisation / Tilgung
B	Euro	Wiederbeschaffungswert
BV		Belastungsvorrat
E	Euro	Einzahlung

F		Kumulierte Verteilungsfunktion / kumulative Fehlerwahrscheinlichkeit
I		Investitionsentscheidung
IH	Euro	Instandhaltungskosten
IZ	Euro	Investitionszulage
K_0	Euro	Kapitalwert
KK	Euro	Kosten der ausgetauschten Komponenten
KW		Korrekturwert (Sprungfunktion)
L_n	Euro	Liquidationserlös
LK	Euro	Lohnkosten
LR	Euro	Leasingrate
MBG	Euro	Mietbemessungsgrundlage
MG	Euro	Gewinnmarge
MK	Euro	Marge zur Abdeckung von Kosten
MR	Euro	Marge zur Abdeckung des Risikos
MSZ	Euro	Mietsonderzahlung
N		Anzahl Simulationsdurchläufe
P		Produkt
R		Risikoprofil / Zuverlässigkeitsfunktion
RW	Euro	Restwert
SK_{still}	Euro	Stillstandkosten
T	Tage	Ereigniszeitpunkt als Zufallsvariable
T_{IH}	Stunden	Instandhaltungsdauer
TG	Tage	Grundmietzeit
V	Euro	Verzinsung
VM	Euro	Marktwert

W		Leistungsvorrat / Abnutzungsvorrat
X		Indikator
\vec{X}		Vektor aller Komponentenindikatoren
ZW	Euro	Zeitwert

Kleine lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	Euro	Abschreibungsbetrag in t
bk		Belastungsklasse
f		Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
i	Prozent	Zinssatz
mg		Summe aller klassisch abgeschriebenen Komponenten
mk		Summe aller belastungsbasiert abgeschriebenen Komponenten
n		Anzahl
t	Tage	Zeitpunkt
\bar{v}		Anzahl Ereignisse aus n
w		Wahrscheinlichkeitsverteilung

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α		Anteil des Zeitwertfaktors am Wertverlust
β		Formparameter
γ		Lageparameter
Γ		Gamma-Verteilung

η	Skalenparameter
$\eta(t)$	Formfunktion des Gamma-Prozesses
θ	Badewannenfunktion
λ	Ausfallrate
μ	Erwartungswert, arithmetisches Mittel
σ	Standardabweichung
Φ	Präferenzfunktion
ψ	Korrekturfaktor des Abnutzungsvorrates

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Das verarbeitende Gewerbe nimmt in Deutschland mit 7,4 Mio. Beschäftigten und einem Jahresgesamtumsatz von 2,1 Bio. € eine zentrale Rolle ein. [STA19] Dabei entfallen etwa 1 Mio. Beschäftigte und 228 Mrd. € Jahresumsatz auf den deutschen Maschinenbau, [STA21a] wobei der größte Anteil dem Werkzeugmaschinenbau zuzuordnen ist. [VER21] Dem Werkzeugmaschinenbau kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da mit Hilfe von Werkzeugmaschinen Investitions- und Verbrauchsgüter hergestellt werden. [HIR16; VER21] Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes sind einem steigenden Wettbewerbsdruck ausgesetzt, welcher sich auf international-kompetitiven Märkten [STA21a; VER21] durch hohe Qualitätsbedürfnisse, kürzer werdende Produktlebenszyklen und steigenden Kostendruck manifestiert. [ADO14]

Die Anschaffungskosten einer Werkzeugmaschine können für Unternehmen, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), eine finanzielle Herausforderung darstellen. [VER16; KRA20] In volatilen Märkten und unsicheren Zeiten sind flexible Bezahlmodelle eine Alternative zum Kreditkauf und versprechen Vorteile für Hersteller und Nutzer. [GAB01; GRU19] Unter dem Begriff Bezahlmodell werden in dieser Arbeit alle Modelle der Finanzierung eines Investitionsgutes unabhängig vom Eigentumsverhältnis aufgefasst. Leasing ist in Deutschland und der Europäischen Union eine etablierte Finanzierungsform für Investitionsgüter wie Werkzeugmaschinen. [KRA20; BUN21b] Mit einer Leasingquote von 14 % im verarbeitenden Gewerbe [STÄ20a] und 7 % aller Maschinenbauerzeugnisse [STÄ20b] ist die Durchdringung im Vergleich zu anderen Finanzierungsmodellen wesentlich. Dabei steigt die absolute Summe der Leasinginvestition im verarbeitenden Gewerbe seit 2008 stetig, [STÄ20a] während Leasingquoten stagnieren oder gar zurückgehen. [STÄ20b] Im Vergleich zur Gesamtinvestition verliert das Leasing somit an Marktanteilen.

Um Wettbewerbsvorteile zu erhalten und auszubauen, ist eine kontinuierliche Innovation notwendig. [AHA13; BUS16] Dabei erweitern Unternehmen ihre Innovationsstrategie von der Produkt- und Prozessinnovation hin zu einer Service- und Geschäftsmodellinnovation. [VDM16; SAR21] Letztere hat zum Ziel, die dominante Logik der

Wertschöpfung in Frage zu stellen, um bestehende oder bisher unbekannte Kundenbedürfnisse zu erfüllen. [BET95; OST13] Hieraus sollen schwer zu imitierende Wettbewerbsvorteile entstehen, welche über die Entwicklung von neuen Funktionen, Qualitätsoptimierung oder Kostenreduzierung hinausgehen. Dieser Ansatz birgt durch seine ungewissen Erfolgsaussichten jedoch Risiken. [LIN13; BUS16] Eine zentrale Komponente eines jeden Geschäftsmodells ist das Ertrags- bzw. Bezahlmodell. [OST13]

Als Alternative zum klassischen Leasing sind im Zuge der Digitalisierung flexiblere Bezahlmodelle auf Basis spezifischer Indikatoren entstanden, sog. Pay-per-X Modelle. [SAR21; USK21] In diesen Modellen ist die Leasingrate nicht fix, sondern ergibt sich aus einem gemessenen Indikator X . Ein bekanntes Modell ist das Pay-per-Use, bei welchem die Leasingrate durch die Nutzungszeit bestimmt wird. Derartige Ansätze werden in der Leasingbranche viel diskutiert [RÜS21], stellen jedoch u. a. aufgrund von Anreizproblemen zwischen Leasinggeber und -nehmer eine Randerscheinung dar. [GLA18] Dieses sog. Prinzipal-Agenten-Problem (PAP) entsteht dadurch, dass der Leasinggeber als Eigentümer der Maschine deren Wert möglichst erhalten will, um einen hohen Wiederverkaufserlös zu erzielen. Jedoch strebt der Leasingnehmer eine möglichst hohe Auslastung der Maschine zur Erfüllung seiner eigenen Ziele an. Dies wiederum kann zu überdurchschnittlichen Belastungen und Wertverlust der Maschine führen. [STA20b] Ein potenzielles Fehlverhalten aus Sicht des Leasinggebers wird in der Risikomarge der Leasingrate eingepreist. [GAB01; GLA18; GRU19]

Auf der einen Seite stehen durch die Digitalisierung neue Indikatoren als Basis der Bezahlung zur Verfügung. Auf der anderen Seite besteht eine Nachfrage nach effizienten Finanzierungsmodellen, welche in der Lage sind, die PAP aufzulösen und neue Absatzmärkte für Leasinggeber zu eröffnen (siehe Abbildung 1). Um die Nachfrage des Marktes durch die neuen Möglichkeiten im Rahmen der Digitalisierung zu befriedigen, wird in der vorliegenden Arbeit ein belastungsbasiertes Bezahlmodell vorgestellt, welches die Belastung der Maschine als Kostenindikator X nutzt. Dadurch kann die aus der Belastung resultierende Abnutzung der Werkzeugmaschine eingepreist und die Anreize der Vertragspartner abgestimmt werden. [STA20b; BOS21]

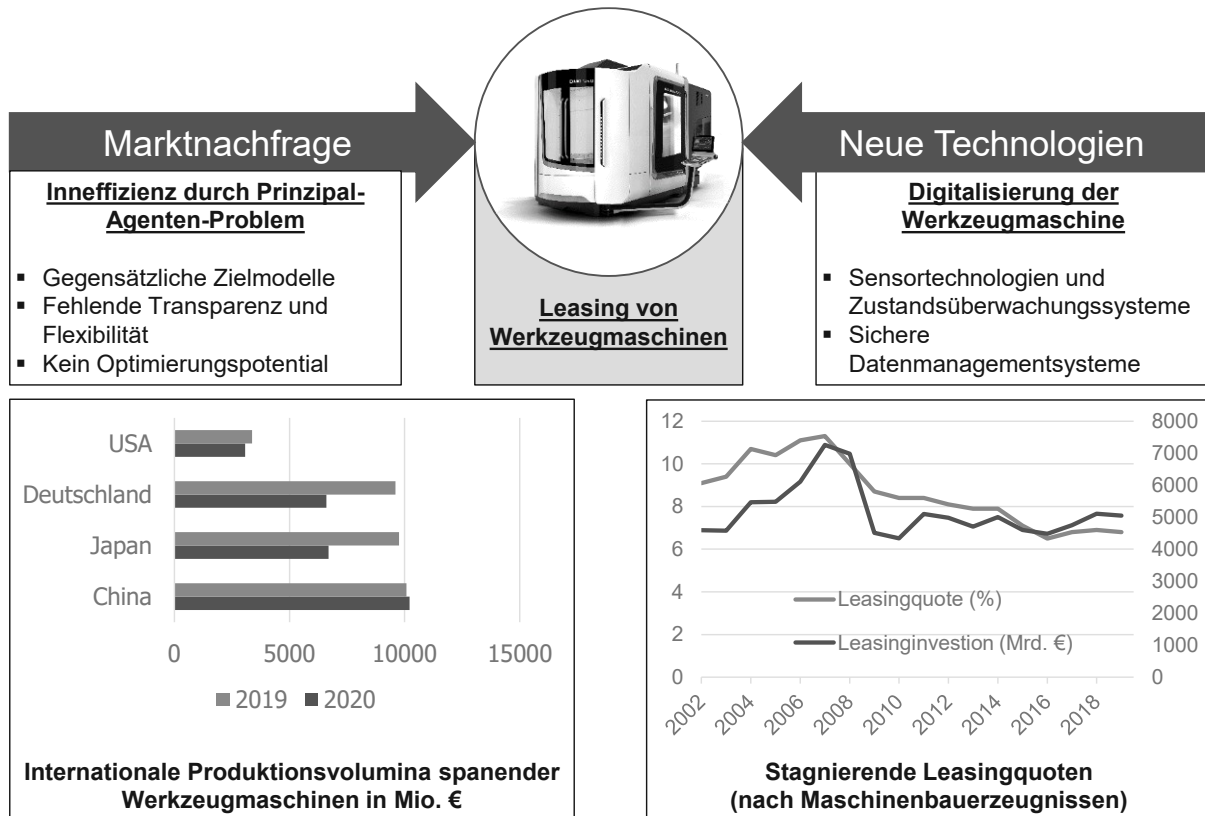


Abbildung 1 Zusammenfassung von Motivation und Problemstellung (eigene Darstellung basierend auf [STÄ20b; VER21]) (Abbildung Maschine: DMG)

Ohne eine transparente und nachvollziehbare ex ante (im Voraus) Bewertungsmöglichkeit ist der potenzielle Leasingnehmer nicht bereit ein belastungsbasiertes Bezahlmodells anzunehmen¹. Dem Leasingnehmer muss es möglich sein, die resultierenden Zahlungsströme im Vergleich zu bestehenden Alternativen bewerten zu können. [STA21b] Eine solche Bewertung ist aufgrund des nicht-trivialen Zusammenhangs zwischen Abnutzung und Belastung nur unter Unsicherheit möglich. [BAU20] Da sich die Anreize für den Leasingnehmer durch das direkte Einpreisen der Belastung und damit die Nutzung der Maschine verändern wird, ist mit weiteren entscheidungsrelevanten Einflüssen auf die Lebenszykluskosten zu rechnen. Hier sind die Instandhaltungskosten zu nennen, welche durch eine geringere Belastung verringert werden. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Bewertungsansatzes unter Unsicherheit für den Leasingnehmer. [STA21b]

¹ Diese Einschätzung entspringt mehreren Expertengesprächen mit allen Akteuren des Leasinggeschäftes (Leasinggeber, Leasingnehmer, Maschinenhersteller) im Rahmen des Forschungsprojektes *Pay-per-Stress*

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Bewertungsmethode zur ex ante Bestimmung der monetären Vorteilhaftigkeit eines belastungsbasierten Bezahlmodells am Beispiel des Werkzeugmaschinenbaus. Nutzer der Methode ist der Leasingnehmer. Dieser soll einerseits in die Lage versetzt werden, das Bezahlmodell im Rahmen seiner Investitionsentscheidung gegenüber Alternativen zu bewerten und eine informierte Entscheidung zu treffen. Andererseits soll es dem Leasinggeber ermöglichen, das entwickelte Modell gemäß den betriebswirtschaftlichen Anforderungen des Leasingnehmers umzusetzen.

Die Möglichkeiten der Ausgestaltung des belastungsbasierten Bezahlmodells sind aufgrund der Freiheitsgrade der Vertragsgestaltung nicht in ihrer Gesamtheit beschreibbar. Deswegen orientiert sich das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell am klassischen Leasing. [STA20b; BOS21] Die Belastung der Maschine dient als Zahlungsindikator X. [STA20b; KOH21] Zur Bewertung des Bezahlmodells gilt die Hypothese, dass der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Belastung, Abnutzung und Wertverlust der Maschine über den Belastungsindikator in der erforderlichen Genauigkeit dargestellt werden kann. [KOH21]

Da der Anwendungsfall der Bewertung maßgeblich Einfluss auf die Modellierung des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs hat, wird dieser skizziert (Abbildung 2). Der An-

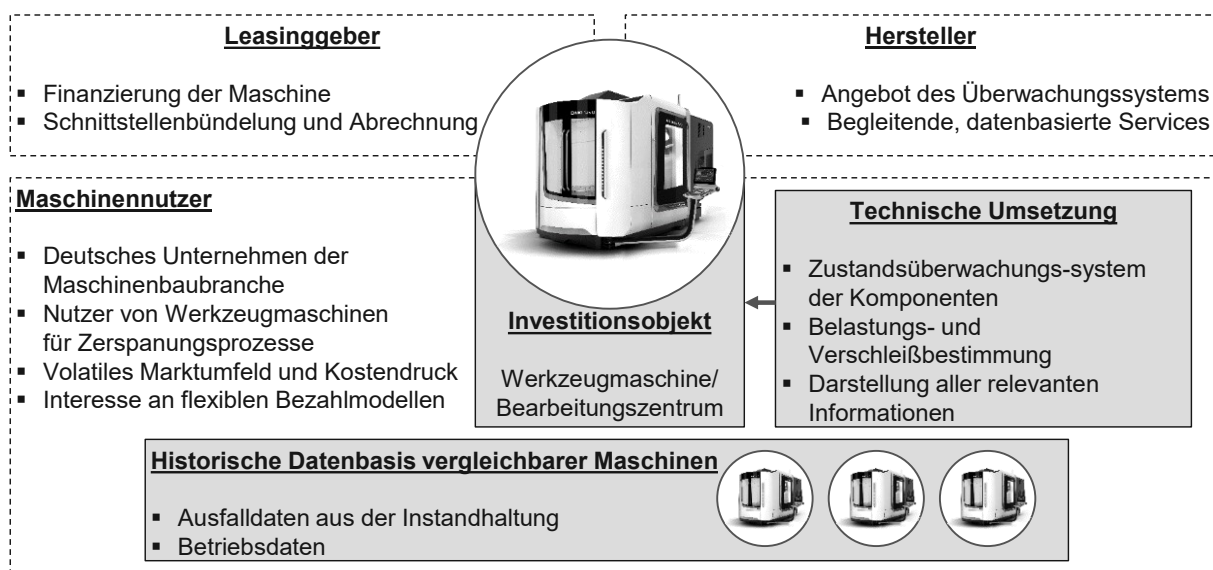


Abbildung 2 Beschreibung des Anwendungsfalles in Anlehnung an [STA20b; BOS21] (Abbildung Maschine: DMG)

wendungsfall beschreibt die Investitionsentscheidung eines deutschen Maschinenbauunternehmens für die Anschaffung einer Werkzeugmaschine mit begrenzter Nutzungsdauer. Der Entscheidungsträger ist risikoavers und trifft die Entscheidung für ein Bezahlmodell auf Basis monetärer Kennzahlen. Wegen der begrenzten Nutzungsdauer wird Leasing erwogen. Die Funktionsfähigkeit der technischen Umsetzung zur Bestimmung von Belastung und Abnutzung während der Nutzungsphase wird angenommen. Ausfall- und Betriebsdaten können auf Basis historischer Daten bestehender Werkzeugmaschinen herangezogen werden. Auf dieser Basis lassen sich Vergleichsrechnungen durchführen. Der Anwendungsfall kann nach Rücksprache mit den Praxisexperten als repräsentativ angenommen werden.

Der geschilderten Zielsetzung folgend, wird im Rahmen dieser Arbeit zum einen ein dem Anwendungsfall entsprechendes, belastungsbasiertes Bezahlmodell beschrieben. Zum anderen erfolgt die Entwicklung einer sich hiernach orientierenden Bewertungsmethode aus der Perspektive des potenziellen Leasingnehmers.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist, wie in Abbildung 3 dargestellt, in acht Kapitel gegliedert. Im zweiten Kapitel wird der Stand der Technik und Wissenschaft des Untersuchungsgegenstands beschrieben. Hierzu wird die Werkzeugmaschine als verschleißendes System eingeführt und die in der Literatur und Praxis bekannten Bezahlmodelle benannt und diskutiert. Anschließend wird das Pay-per-X-Modell hergeleitet sowie mögliche Ansätze zur ex ante Bewertung eines belastungsbasierten Modells gesammelt und diskutiert. In Kapitel 3 werden die Erkenntnisse zusammengefasst, die Zielsetzung der Arbeit hieraus abgeleitet sowie der Untersuchungsgegenstand des belastungsbasierten Bezahlmodells als Basis dieser Arbeit konzeptualisiert. Im vierten Kapitel wird das Bewertungsmodell mit seinen Systemkomponenten hergeleitet und beschrieben. Außerdem wird der Einsatz des Modells erläutert. In Kapitel 5 wird die prototypische Implementierung für den Anwendungsfall als computer-ausführbares Simulationsmodell beschrieben, welches in Kapitel 6 Anwendung findet. Dabei werden die Ergebnisse unterschiedlicher Szenarien als Vergleich zu bestehenden Bezahlmodellen beschrieben. Auf Basis der Ergebnisse wird im siebten Kapitel der Bewertungsansatz evaluiert und kritisch diskutiert. Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung und kritischen Würdigung der Ergebnisse und der Darstellung zukünftiger Forschungstätigkeiten ab.

Die Arbeit folgt dem Forschungsprozess nach [ULR84] und [SCH13], dessen Schritte den Kapiteln in Abbildung 3 zugeordnet sind.

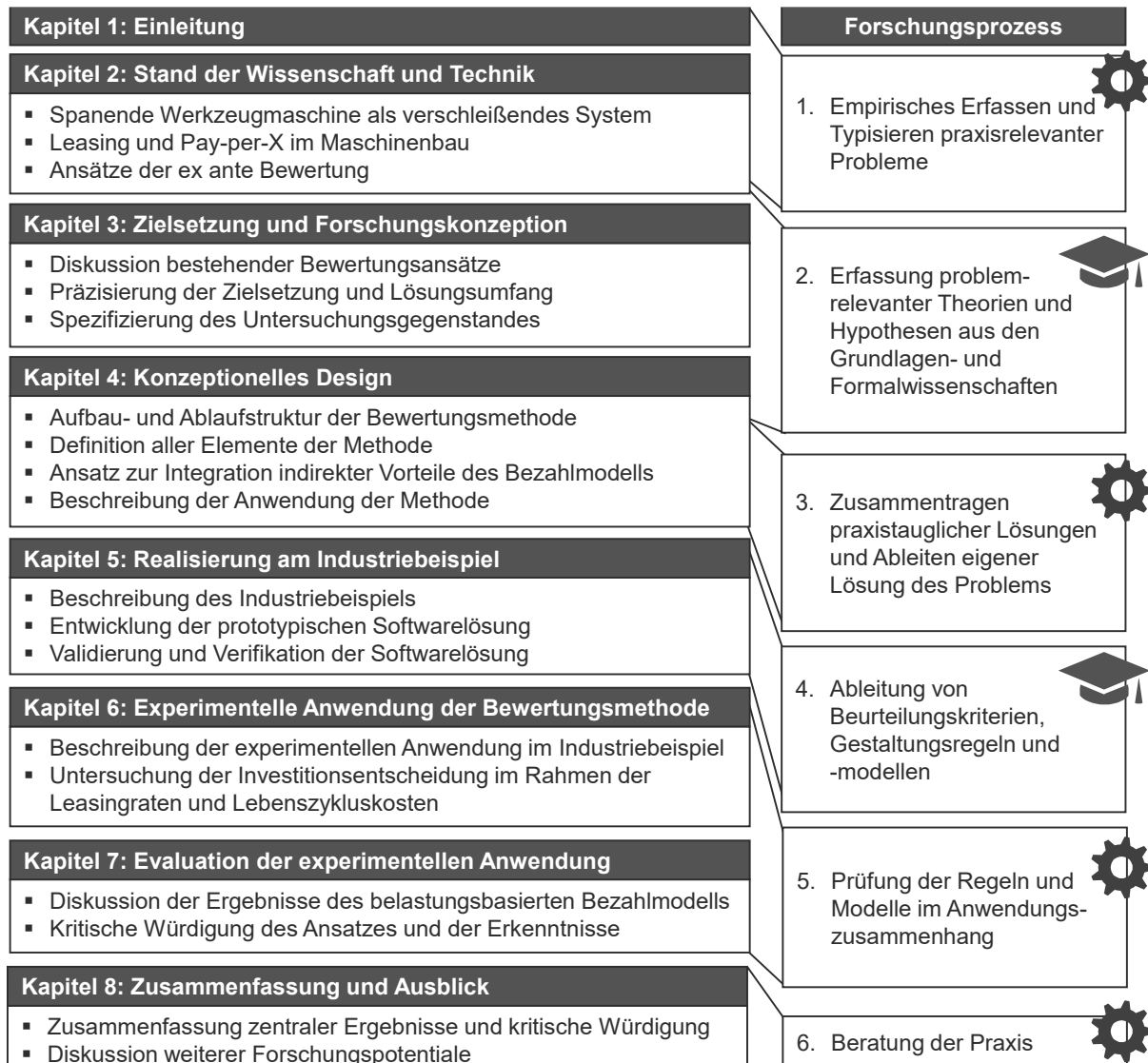


Abbildung 3 Aufbau der Arbeit und Forschungsprozess nach [ULR84]

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Wissenschaft und Technik für die Ausarbeitung der Bewertungsmethode vorgestellt. Ziel des Kapitels ist es, die wesentlichen Grundlagen und Bestandteile der Bewertungsmethode zu identifizieren und zu beschreiben. Dabei wird zunächst die Werkzeugmaschine als Leasingobjekt eingeführt, daraufhin bestehende Bezahlmodelle und deren Bewertung erläutert.

2.1 Untersuchungsgegenstand spanende Werkzeugmaschine

Die spanende Werkzeugmaschine ist der Fokus der vorliegenden Arbeit. Sie ist das Leasingobjekt. Eine weit verbreitete Definition nach DIN 69 651 [DIN 69651] beschreibt die Werkzeugmaschine als „Mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtung, die durch relative Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug eine vorgegebene Form am Werkstück oder eine Veränderung einer vorgegebenen Form an einem Werkstück erzeugt“. Werkzeugmaschinen lassen sich nach den mit ihnen durchzuführenden Fertigungsverfahren einteilen, [HIR16; GRO18] wobei die vorliegende Arbeit sich auf Zerspanprozesse mit geometrisch bestimmter Schneide fokussiert. [DIN 8589-0; DIN 8589-1]. Ein weiterer Aspekt, der zur Einteilung von Werkzeugmaschinen herangezogen wird, ist deren Automatisierungsgrad, welcher sich an der Steuerungs- und Automatisierungstechnik orientiert. [HIR16] Werkzeugmaschinen mit niedrigem Automatisierungsgrad zeichnen sich durch Antriebe für Schnitt- und Vorschubbewegung aus, die durch den Maschinenbediener gesteuert werden. Die systematische Verknüpfung mehrerer Werkzeugmaschinen in Verbindung mit einer automatischen Fertigungssteuerung stellt den höchsten Automatisierungsgrad dar.

Der Einsatz einer Werkzeugmaschine kann nach [WES06] durch Fertigungsart und Fertigungsprinzip beschrieben werden. Die Fertigungsart definiert die Häufigkeit, mit der ein Bauteil bzw. eine Variante gefertigt wird. Das Fertigungsprinzip beschreibt die räumlichen und organisatorischen Strukturen. In Abbildung 4 sind mögliche Kombinationen aus Fertigungsart und -prinzip dargestellt, woraus sich unterschiedliche Produk-

		Fertigungsprinzipien					
		Baustellenfertigung	Werkstättenprinzip	Fertigungszellen	Flexible Systeme	Fließprinzip ohne Takt	Fließprinzip mit Takt
Fertigungsarten	Einmalfertigung	x	x				
	Wiederholfertigung	x	x	x			
	Variantenfertigung		x	x	x		
	Serienfertigung				x	x	x
	Massenfertigung				x	x	x

hoch niedrig

hoch
Nicht-Produktivzeit

Abbildung 4 Verknüpfung von Fertigungsarten und Fertigungsprinzipien nach [WES06]

tivzeiten ergeben. [EBE16] Der notwendige Automatisierungsgrad der Werkzeugmaschine hängt hierbei maßgeblich von der Diversität der Fertigungsaufgaben ab, wobei mit dem Automatisierungsgrad auch die Komplexität der Maschine und der Kapitaleinsatz steigen. [WES06]

2.1.1 Aufbau, Funktion und Betrieb

In Abhängigkeit von Automatisierungsgrad und Ausführung der Werkzeugmaschine besteht diese aus unterschiedlichen Komponenten. Als Bestandteil einer modernen industriellen Produktionsumgebung müssen Werkzeugmaschinen zahlreichen technischen und betriebswirtschaftlichen Anforderungen gerecht werden. Hinzu kommen gesetzliche Vorschriften, etwa die Benutzersicherheit und Umweltverträglichkeit betreffend. [BRE19] Um diesen Anforderungen, unter Berücksichtigung der zu realisierenden Funktionen, gerecht zu werden, sind Werkzeugmaschinen i. d. R. modular aufgebaut. Dies ermöglicht es, auf individuelle Kundenwünsche einzugehen und die Module dennoch in größerer Serie herzustellen. [HIR16]

Eine Werkzeugmaschine besteht i. d. R. aus den in Abbildung 5 aufgeführten Hauptbaugruppen, welche jeweils eine bestimmte Funktion erfüllen. Eine detaillierte Liste der Baugruppen ist Anhang A.1.1 zu entnehmen. Die Liste ist nicht erschöpfend. (vgl. [HIR16; BRE19]). Die Baugruppen der Haupt- und Nebenantriebe bestimmen maßgeb-

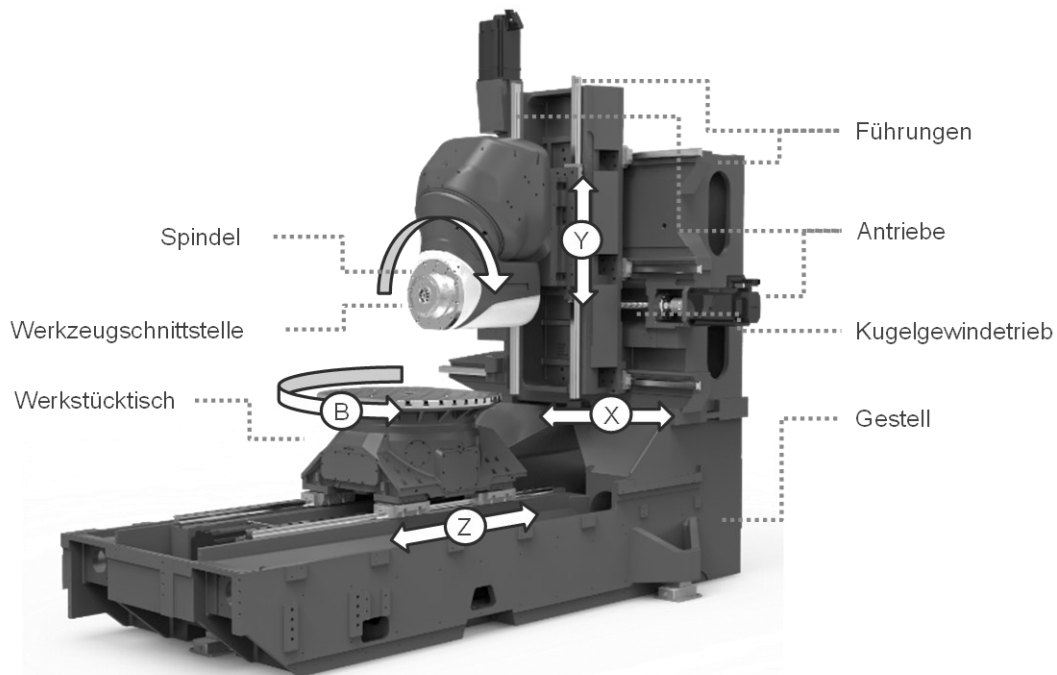


Abbildung 5 Komponenten und Achsen der Werkzeugmaschine [HIR16] (Quelle Maschine: DMG)

lich die Produktivität der Werkzeugmaschine und sind entsprechend der fertigungstechnischen Anforderungen genau abzustimmen. Die Hauptspindelbaugruppe hat zudem großen Einfluss auf die Werkstückqualität und untersteht damit besonderen Anforderungen. [HIR16]

Der Betrieb einer Werkzeugmaschine hängt von der Fertigungsart und dem Fertigungsprinzip ab. Die Betriebszustände können nach der Auslastung einer Maschine definiert werden. Gemäß VDI Richtlinie 3423:2011 [VDI 3423] werden die Zeiten der Verfügbarkeit definiert. Laut einer Studie auf Basis von 11.000 im Einsatz befindlicher Werkzeugmaschinen sind diese durchschnittlich 522 Stunden im Monat eingeschaltet und davon

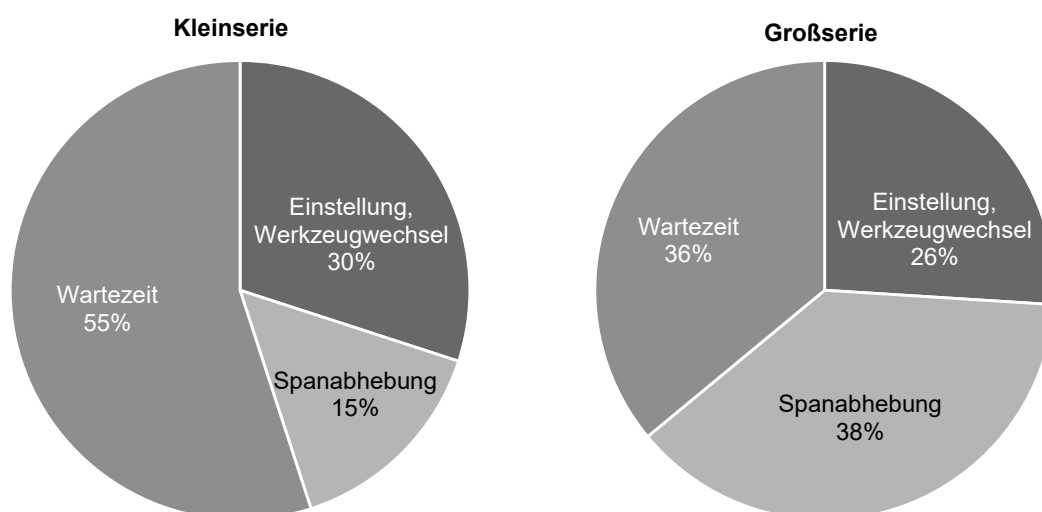


Abbildung 6 Exemplarische zeitliche Betriebszustände einer spanenden Werkzeugmaschine in der Klein- (links) und Großserie (rechts) nach [NEY93]

147,5 Stunden in Bearbeitung. [MOR12] In Abbildung 6 werden die Ergebnisse der Studie nach [NEY93] dargestellt, in welcher die zeitliche Verteilung von Betriebszuständen zwischen einer Klein- und einer Großserie verglichen wird. Der Anteil der produktiven Zeit ist in beiden Fällen gering im Vergleich zu den nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten. In der Kleinserie ist dieser mit 15 % als besonders niedrig einzustufen. [BRE10; WIT13] Die Verteilung der Betriebszustände kann stark variieren und ist von zahlreichen Faktoren abhängig, welche entweder durch die Maschine definiert sind oder durch den Werkzeugmaschinennutzer beeinflusst werden.

2.1.2 Belastung, Verschleiß und Ausfälle

Die Belastung und die Abnutzung einer Werkzeugmaschine sind abhängig von zahlreichen Faktoren und haben Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Beide Begriffe lassen sich im Kontext der Instandhaltung einführen. Instandhaltung ist nach DIN EN 13306 die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustandes dient“. [DIN EN 13306] Die Funktionsfähigkeit, welche der Betrachtungseinheit durch eine stoffliche-technische Beschaffenheit in der Entstehungsphase verliehen wird [ZHA90], beschreibt die Fähigkeit zur Funktionserfüllung. [DIN EN 13306] Die Nutzung der Betrachtungseinheit im Rahmen allgemeiner anerkannter Regeln (bestimmungsgemäße Verwendung) führt unvermeidbar zur Abnutzung der Einheit. [DIN 31051] Neben dieser regulären Abnutzung, welche prinzipiell vorhergesagt werden kann, ist die außergewöhnliche Abnutzung zu nennen, welche zufällig eintritt und nicht vorhersagbar ist (z. B. Überlastung durch Kollision). [ZHA90]. Verliert die Einheit ihre Funktionsfähigkeit, wird dieses Ereignis als Ausfall bezeichnet. [DIN 31051; DIN EN 13306] Dieser kann als Driftausfall infolge einer kontinuierlichen Abnutzung oder als Sprungausfall, hervorgerufen durch eine sprunghafte Abnutzung, auftreten. Üblich sind Mischformen. [EIC90]

Der Abnutzungsvorrat beschreibt den Vorrat eines Objektes zur möglichen Funktionserfüllung unter bestimmten Bedingungen bis zur festgelegten Abnutzungsgrenze. [DIN 31051] Die Bestimmung des Abnutzungsvorrates technischer Einheiten, die einer regulären Abnutzung unterliegen [MAT16], erfordert die Berücksichtigung von Kriterien, welche den Abnutzungsvorrat beschreiben. [BAU20] Das Betriebsprofil beschreibt, un-

ter Berücksichtigung von Betriebsstunden, die Nutzung des Objektes im Zeitraum erfolgter Belastung oder Übergängen. Das Profil hat dabei einen Einfluss auf den Abnutzungsvorrat. [DIN EN 13306]

Die Maßnahmen der Instandhaltung können nach [DIN 31051; DIN EN 13306] Einfluss auf den Abnutzungsvorrat haben bzw. diesen sichtbar machen:

- Instandhaltung: Erhalt oder die Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustands und aktive Veränderung des Abnutzungsvorrates.
- Wartung: Verzögerung des Abbaus des Vorrates, während die Inspektion die maßgeblichen Merkmale des Objektes auf Konformität prüft.
- Instandsetzung: Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit eines fehlerhaften Objektes
- Verbesserung: Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit des Objektes

Die Zuverlässigkeit eines Objektes ist dabei nach DIN EN IEC 60300-1 „als Fähigkeit zu funktionieren, wie und wann gefordert“ definiert. [DEU21]

Die Ziele der Instandhaltung richten sich nach denen des Unternehmens und streben u. a. die Maximierung der Verfügbarkeit und Minimierung der Instandhaltungskosten an. [ALC00; BIE85] Verfügbarkeit ist die „Fähigkeit eines Objektes [...], unter gegebenen Bedingungen und wenn erforderlich in einem Zustand zu sein, eine geforderte Funktion [...] zu erfüllen, vorausgesetzt, dass die erforderlichen externen Ressourcen bereitgestellt sind.“ [DIN 31051] Die Instandhaltungskosten stellen einen wichtigen Bestandteil der Lebenszykluskosten einer Werkzeugmaschine dar. [ABE09; BLE10; DER11] Sie können nach [ALC00] in direkte und indirekte Kosten untergliedert werden. Direkte Kosten sind tätigkeitsbezogen und der Maßnahme an sich zuzuordnen, bspw. Betriebsmittelverbräuche in Form von Personalkosten oder Materialkosten. [BEC00] Indirekte Kosten beschreiben die Auswirkungen auf den Produktions- (z.B. ungenutzte Betriebsverbräuche) und Absatzbereich (z.B. Erlösminderungen durch Auftragsverlust) [BIE08] Die Instandhaltungsstrategie ist das Vorgehen des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele [DIN EN 13306] und beschreibt, welche Maßnahmen mit welcher Intensität an welchen Objekten zu welchem Zeitpunkt durchgeführt werden. [BIE08] Im Fall von Werkzeugmaschinen ist eine Abkehr von reaktiven, hin zu präventiven Strategien festzustellen. [BAU20; DIN EN 13306]

Strukturierung von Belastung

Werkzeugmaschinen und deren Komponenten sind Belastungen ausgesetzt, die zu Abnutzungen führen. Diese lassen sich durch chemische und physikalische Vorgänge der Reibung, Korrosion, Ermüdung, Alterung, Kavitation oder Bruch nach [DIN 31051; EIC90] beschreiben. Die Belastungen, welche zu Verschleiß und Ausfällen führen können, werden nach [STÄ17] und [ABE06] in maschinenbedingte, prozessbedingte, werkstückbedingte, einsatzbedingte, menschliche und wirtschaftliche Belastungen untergliedert. Im Rahmen dieser Arbeit werden als Betriebslast alle Einflussfaktoren definiert, welche einen negativen Einfluss auf den Abnutzungsvorrat der Komponente aufweisen. [ABE06; STA20b] In Abbildung 7 werden die Einflussfaktoren dargestellt, welche unterschiedlich auf die einzelnen Komponenten wirken können.

Die maschinenbedingten Faktoren ergeben sich aus Struktur, Konstruktion, Kühlschmierart, Automatisierungsgrad und dynamischem Verhalten der Werkzeugmaschine. [HIR16; STÄ17] Identische Maschinen können bei gleichen Betriebsbedingungen unterschiedlich verschleifen. [SI17; BAU20] Das liegt ferner an ungleichen Materialstrukturen, variierender Komponentenqualität und Variationen, die während der Montageprozesse auftreten. Die Konstruktionsweise der Maschine hat einen nur bedingt beeinflussbaren Einfluss auf die Belastungen. [DEW19]

Der Einsatz der Werkzeugmaschine erzeugt Belastungen. Prozessbedingte bzw. technologische Faktoren beziehen sich auf den Zerspanprozess und lassen sich in einem

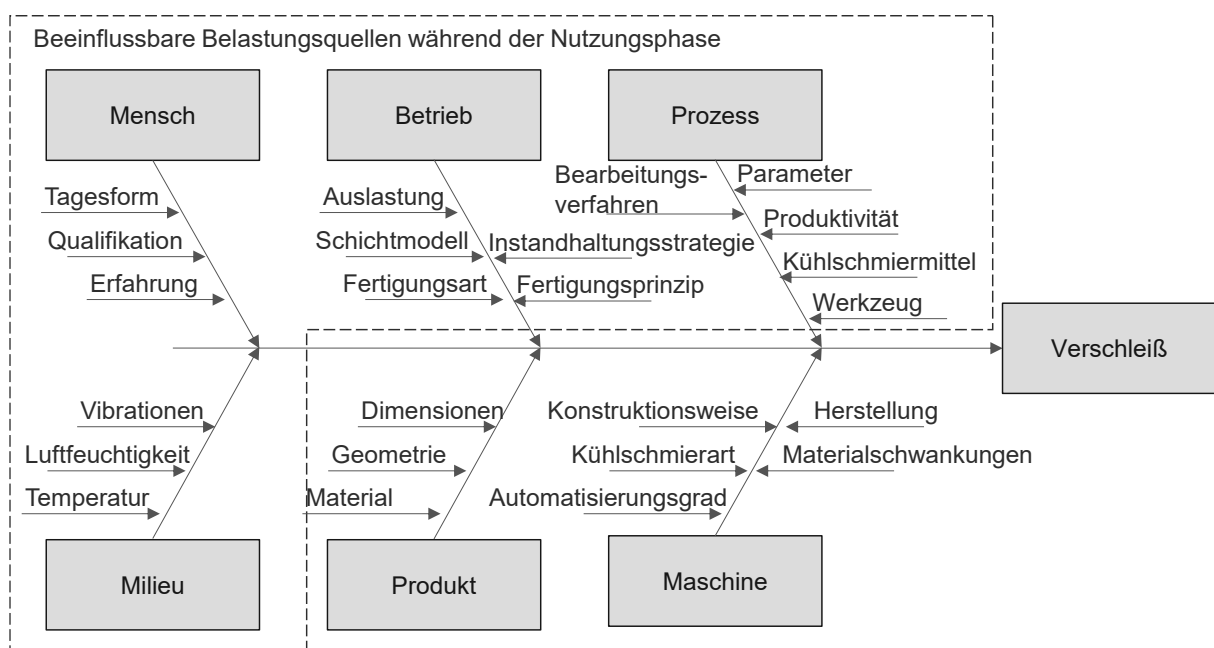


Abbildung 7 Einflussfaktoren auf den Verschleiß und die Lebensdauer einer Werkzeugmaschine

wirtschaftlich-technischen Rahmen lang- und kurzfristig durch den Nutzer der Maschine beeinflussen [HIR16; STÄ17; BAU20] Grundsätzlich sind hierbei das Bearbeitungsverfahren, d. h. die Fertigungstechnologie und die Auswahl der Prozessparameter, etwa die Schnittgeschwindigkeit, zu nennen. [ABE06] Um die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu gewährleisten, sind die Prozessparameter so zu wählen, dass Produktivität und Nutzungsvorratsverbrauch der Maschine zur optimalen Erfüllung der Zielgrößen Kosten, Zeit und Qualität führen. [ABE06]

Produktbedingte Faktoren beziehen sich auf das hergestellte Produkt [STÄ17] Hierbei haben das Werkstückmaterial und dessen Eigenschaften (bspw. Festigkeit) einen Einfluss auf die Belastungen. [HIR16] Die Komplexität der Werkstückgeometrie sowie die Anzahl und Vielfältigkeit der Prozesse wirken sich bspw. auf die Häufigkeit von Werkzeugwechseln aus. Daneben sind die Werkstückmasse und -größe zu beachten. [STÄ17] Milieubedingte Faktoren beschreiben das Umfeld, in welchem die Werkzeugmaschine betrieben wird. Hierzu gehören thermische und chemische Belastungen, welche auf die Umgebungstemperatur oder die Luftfeuchtigkeit zurückzuführen sind. Betriebs- bzw. einsatzbedingte Faktoren beschreiben organisatorische Aspekte der Produktionsabläufe und determinieren unter anderem die Dauer und die Variabilität der Belastungen. [STÄ17] Das Schichtmodell und die Auslastung der Maschine sowie die Fertigungsart und das Fertigungsprinzip beeinflussen die Belastung. [STÄ17] Die Instandhaltungsstrategie und alle damit inbegriffenen Prozesse spielen eine maßgebliche Rolle. [JAR06; ABE06] Zu den menschlichen Faktoren gehört bspw. die Mitarbeiterqualifikation. [ABE06] Typische Einflussfaktoren sind auf die Fehlbedienung der Werkzeugmaschine und die Fehlkonfiguration zurückzuführen. [ABE06] Die Wahrscheinlichkeit einer Fehlbedienung steigt bei geringerer Qualifizierung und Erfahrung. [SCH18a]

Es ist festzuhalten, dass Betriebsbelastungen nicht immer klar definierbar sind. [ABE06] Neben dem Zerspanprozess sind organisatorische und menschliche Einflüsse während der Nutzungsphase anpassbar, wobei die zeitlichen Horizonte variieren. Fertigungsprozesse lassen sich kurzfristig, Mitarbeiterqualifikation, Fertigungsart und Instandhaltungsstrategie jedoch nur mittelfristig anpassen. Ein Bestandteil der Belastung ist bereits durch das Fertigungsprinzip, die zu fertigenden Produkte, die Maschine und das Milieu determiniert.

Verschleiß von Werkzeugmaschinen

Generell lassen sich verschiedene Arten und Mechanismen des Verschleißes mechanischer Komponenten beschreiben. [SOM18] Es wird zwischen Verschleiß des Grundwerkstoffs und der Oberfläche bzw. Grenzschicht unterschieden, welche mechanisch-thermischen und tribologischen Beanspruchungen unterliegen können. [KRA79; CZI10] Letztere wirken über die Kontaktfläche durch Normal- und Tangentialkräfte und berücksichtigen komplexe und irreversible Prozesse in der Grenzschicht. Der Zusammenhang von Belastung und Verschleiß ist nicht einfach zu bestimmen. [ABE06]

Exemplarisch wird das Phänomen des Verschleißes anhand des Wälzlagers beschrieben, das häufig in Baugruppen einer Werkzeugmaschine verbaut ist. Das Lager ist ein genormtes Maschinenelement, welches bei betriebsgerechter Auslegung in den wenigsten Fällen infolge eines Schadens ausgetauscht werden muss. [BRO87] Ein Werkstoff- oder Herstellfehler ist i. d. R. auszuschließen. Verschleiß ist häufig auf den Schmierstoff, Verunreinigungen oder Überbeanspruchungen zurückzuführen. [ENG79; KÖT85; BRO87; SOM18] Hierbei können je nach Drehzahl, Kräften und Temperaturen tribochemische Reaktionen, Adhäsion, Oberflächenzerrüttung und Abrasion auftreten. Durch Verunreinigungen des Lagers können größere, harte Partikel Eindrücke in der Lauffläche hinterlassen, während kleine, harte Partikel abrasiven Verschleiß hervorrufen. [SOM18]

Zustandsüberwachungssysteme (ZÜS) helfen bei der Ermittlung des Verschleißzustands. Im Fall des Wälzlagers können Schwingungszustandsüberwachungen genutzt werden, um Schwingungsanregungen, die beim Überrollen von durch Verschleiß entstandenen Schädstellen auftreten, zu detektieren. [HUF12] Abbildung 8 stellt den charakteristischen Zustandsverlauf über den Lebenszyklus einer Komponente dar, welcher sich in drei Bereiche untergliedert. Der erste Bereich beschreibt den Gut-Zustand, der zweite Bereich beschreibt den Schädigungsbeginn und den langsamen Schädigungsfortschritt. Erst spät beginnt der dritte Bereich, in welchem die Schädigung sehr stark zunimmt und durch das ZÜS erkannt werden kann.

In [HUF12] wird das Belastungsintegral vorgestellt, welches auf der Lebensdauerberechnung und der Theorie des Abnutzungsvorrates von mechanischen Komponenten basiert. [DIN 50100; DIN 26281] Es beschreibt den Verbrauch des Abnutzungsvorrates und kann über prognostizierte Lastkollektive für die Ermittlung der Restlebensdauer

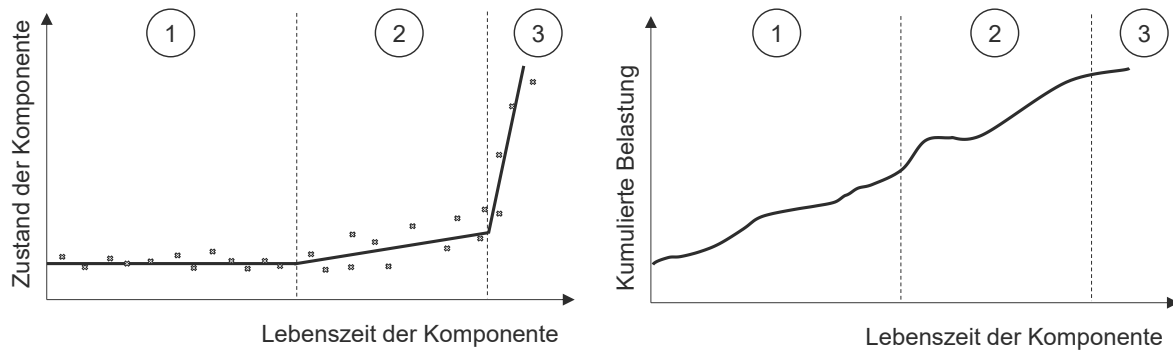


Abbildung 8 Charakteristischer Signalverlauf zur Beschreibung des Verschleißfortschrittes (links) und Belastungsintegral (rechts) am Beispiel eines Kugelgewindetriebs nach [HUF12; KOH21; SCH10]

herangezogen werden.² Abbildung 8 rechts zeigt ein beispielhaftes Belastungsintegral, welches die kumulierten Belastungen an der jeweiligen Komponente darstellt. In [KOH21] wird dieses Vorgehen aufgegriffen und auf den Anwendungsfall des belastungsbasierten Leasingmodells überführt. Hierfür werden Belastungsprofile für den Leasingzeitraum entwickelt und damit der Abnutzungsvorrat und der damit zusammenhängende Wertverlust der Komponenten beschrieben. Die kumulierte Belastung steigt stetig, während die zustandsbasierte Beschreibung des Verschleißfortschrittes einen exponentiellen Anstieg aufweist.

Ausfall von Komponenten

Die Komponenten einer Werkzeugmaschine fallen aufgrund ihrer Belastung und ihres Verschleißverhaltens unterschiedlich aus. Dabei zeigen sich verschiedene Verteilungen der Ausfallhäufigkeit und deren Auswirkungen auf die Kosten. Abbildung 9 stellt Verteilungen von Ausfallursachen beispielhaft dar. Es zeigt sich, dass einige Komponenten (bspw. die Elektrik/Elektronik) seltener durch Verschleiß ausfallen als andere. In [FLE07c] werden Ausfallursachen eines Werkzeugmaschinenanwenders auf Basis von Datensätzen des Maschinenherstellers analysiert. In [WIE09] werden über einen Zeitraum von 7 Jahren 33 Universaldrehmaschinen untersucht, wobei insbesondere die Automatisierungstechnik einen großen Anteil an den Ausfällen besitzt. In [PLA04] werden in einem Werkzeugmaschinenkollektiv die Ausfälle insbesondere den Steuerungs-

² Bereits in der Dissertation von Huf wird auf die potenzielle Nutzung des Integrals für Betreibermodelle eingegangen, in welchen das Belastungsintegral als Verbrauchsgröße genutzt werden kann. Dieser beschreibt mittels einer einzelnen Zahl den Zustand einer Komponente und den Nutzungsverlauf.

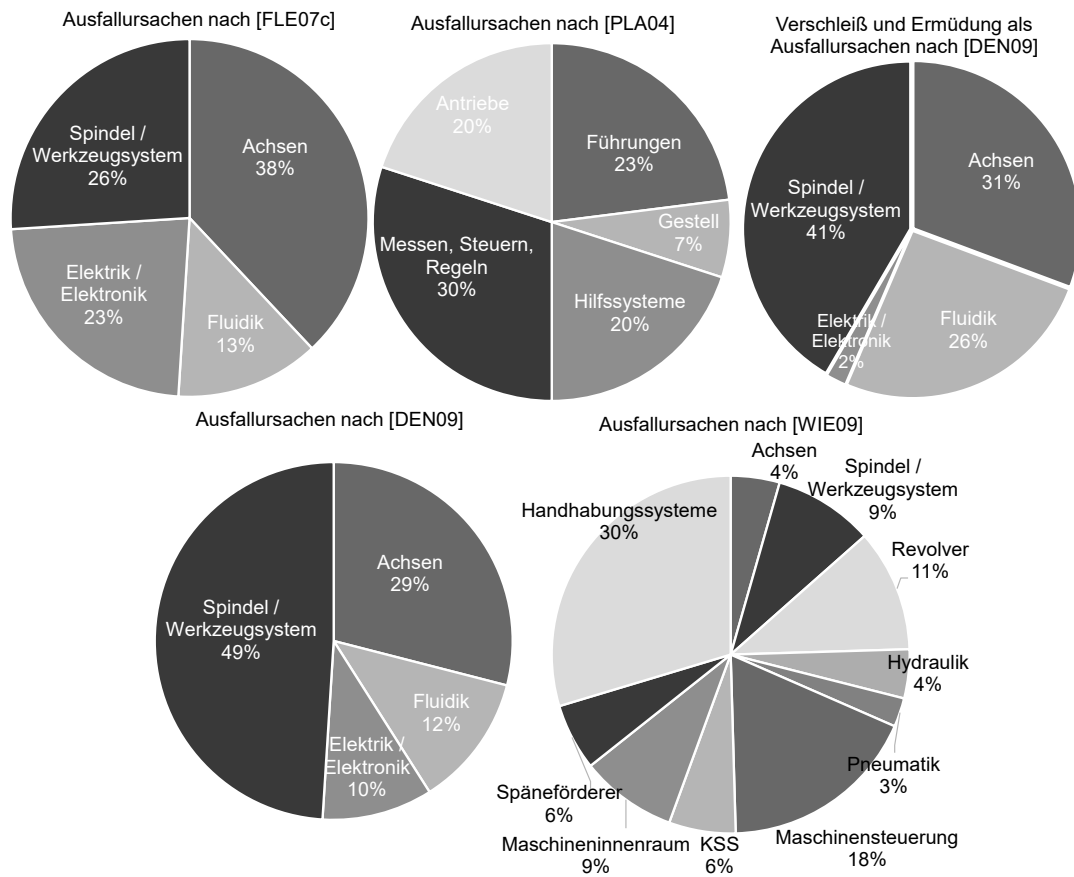


Abbildung 9 Ausfallursachen von Werkzeugmaschinen nach Baugruppen

und Hilfssystemen zugeschrieben. In [DEN09] werden mangelhafte Instandsetzung, Bedienfehler, Verschleiß/Ermüdung, Materialfehler und Konstruktionsfehler als Ausfallursachen identifiziert. Weitere Studien werden im Anhang A.1.2 beschrieben.

Die Ausfallhäufigkeit bei gleichen Betriebsmitteln kann bei unterschiedlichen Anwendern stark voneinander abweichen. [ABE09] Trotz der schwierigen Vergleichbarkeit der Studien ist zu erkennen, dass insbesondere Komponenten der Automatisierung für einen hohen Anteil der Ausfälle der Werkzeugmaschinen verantwortlich sind. Folgend soll auf die Möglichkeiten der Modellierung von Ausfällen und Abnutzung eingegangen werden.

2.1.3 Bestimmung des Abnutzungsvorrates

Die aktuellen Entwicklungen der Digitalisierung der Produktion ermöglichen die Erfassung von Prozessdaten, die Analyse umfangreicher Datenmengen und die Integration der Analyseergebnisse in unternehmerische Entscheidungen. [JES18; LEN18] Für die Beurteilung des Abnutzungsvorrates eines Objektes über die Zeit ist eine Zustandsüberwachung (engl. Condition Monitoring) durch ein entsprechend geeignetes System

notwendig. [VAC06] Dabei werden Signale gemessen, welche in Korrelation zum Abnutzungsvorrat stehen. Eine direkte Messung des Vorrates wäre mit erheblichem Aufwand verbunden. [BAU20] Der Abnutzungsvorrat ist durch einen numerischen Index von 0 – 1 (oder 0 – 100 %) abbildbar, wobei 1 einen vollen Vorrat und 0 einen aufgebrauchten Vorrat beschreibt. [BAU20; DIN 31051] Der Kehrwert des Abnutzungsvorrates ist der Verschleißfortschritt. [BAU20] Der zeitliche Verlauf des Abnutzungsvorrates kann unterschiedliche Formen annehmen. Wie in Abbildung 10 dargestellt, kann dieser linear oder exponentiell monoton fallend verlaufen (bspw. Werkzeug-Schneidplatte), über einen längeren Zeitraum konstant bleiben, innerhalb eines kurzen Zeitraums degradieren oder auch einen Verlauf mit drei Phasen annehmen (bspw. Wälzlager Innenlauffläche). [LEI18; BAU20] Zur Bestimmung des Abnutzungsvorrates sind je nach Anwendungsfall Anforderungen an die Datenbasis und abgeleiteter Indizes zu definieren, bspw. die monotone Bewegung des Verlaufs. [LIA14b; LEI18]

Moderne ZÜS sind digital in die Prozesse der Produktion eingebettet³. [YAN17; XU17; BAU20] Ein Verfahren zur Ausgestaltung eines ZÜS wird in [DIN ISO 17359] beschrieben. Im ersten Schritt werden eine Kosten-Nutzen-Analyse, ein Anlagenaudit und Gefährdungsaudit durchgeführt, um eine Auswahl der zu überwachenden Komponenten zu treffen. Nicht alle Komponenten sind für eine Überwachung und die Ermittlung des Abnutzungsvorrates geeignet. Zum einen müssen Komponenten über die Zeit verschleifen, zum anderen muss dieser Verschleiß messbar sein. [BAU20] Die Ausfallrate

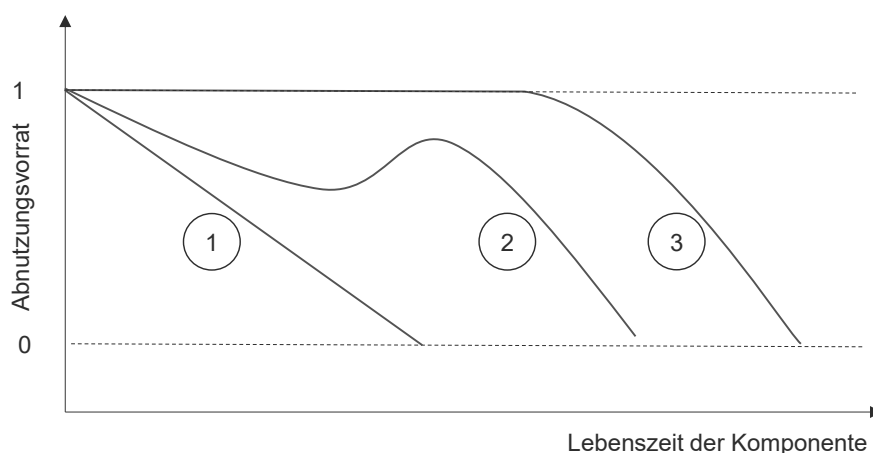


Abbildung 10 Verläufe beispielhafter Abnutzungsvorräte mit einer Phase (1), drei Phasen (2) und zwei Phasen (3) nach [LEI18; BAU20]

³ Die Systeme bestehen aus Sensorik, Rechenressourcen in eingebetteten Systemen, Speicher und Schnittstellen zu anderen Systemen im Sinne des Internets der Dinge (engl. Internet of Things, IoT).

von elektronischen Komponenten wird beispielweise als konstant angenommen (neben potenziellen Frühausfällen) und kann kaum überwacht werden. [SUN10] Neben der Möglichkeit der Überwachung muss auch der wirtschaftliche Nutzen den Aufwand übersteigen. Hierbei sind zahlreiche Ansätze denkbar (vgl. die Vier-Felder-Matrix aus [LEE14] und [VEP17; BAU20], die ABC-Analyse aus [STÄ17] und die Pareto-Analyse aus [TSA09; ZHA13a]). In [DIN ISO 17359] wird eine Kosten-Nutzen-Analyse zu Beginn der Umsetzung vorgeschlagen. Hierbei werden die Lebenszykluskosten, die Kosten von Produktionsverlusten, Folgeschäden sowie Kosten für Gewährleistung und Versicherung in die Überlegung mit aufgenommen. [DIN EN 60300-3-3]

Die Auswahl und Ausgestaltung der Überwachungsmethode definiert, auf welche Weise die Parameter an den ausgewählten Komponenten gemessen werden. [DIN ISO 17359] Die Bestimmung der Datenaufnahme und -analyse folgt, um die erfassten Daten durch geeignete Analyseverfahren in den diagnostizierten Abnutzungszustand umzuwandeln. [DIN EN 60300-3-3] Die potenzielle Nutzung der Daten erfolgt auf aufeinander aufbauenden Umsetzungsausprägungen: [DIN ISO 17359; BAU20]

- Überwachung ist der Prozess des Abgleichs der Daten mit dem erwarteten Verhalten der Komponente. [DIN ISO 17359]
- Fehlerdiagnose beschreibt „alle Maßnahmen zur Fehlererkennung, Fehlerortung und Ursachenfeststellung“ [DIN EN 13306]
- Prognose beschreibt die „Vorhersage über das Abnutzungsverhalten eines Objektes [...], die mit Hilfe der Abnutzungsmechanismen aus den bekannten oder angenommenen Belastungen der zukünftigen Bedarfsforderungen ermittelt wird, ausgehend von einem Istzustand des Objektes“. [DIN 31051]

Die Prognose ist eine in die Zukunft gerichtete Tätigkeit, während die Diagnose gegenwartsbezogen ist. Mit der Information der zukünftigen Nutzung der Komponente lässt sich die Restnutzungsdauer (engl. Remaining Useful Life, RUL) auf Komponentenebene bestimmen. [SIK11; BAU20]

Daten des ZÜS werden nicht regelmäßig über einen längeren Zeitraum gespeichert und stehen demnach nicht für die ex ante Nutzung zur Verfügung. Für eine ex ante Modellierung des Abnutzungsvorrates sind andere Datenquellen notwendig. Eine Diskussion zu ZÜS von Werkzeugmaschinen ist Anhang A.1.3 zu entnehmen.

2.1.4 Ex ante Modellierung von Ausfällen und Abnutzungsvorrat

Für eine ex ante Bewertung des Bezahlmodells ist die Modellierung von Ausfällen und Abnutzungsvorrat auf Basis historischer Datenquellen notwendig, welche folgend diskutiert werden. Darauf aufbauend werden zum einen Modelle vorgestellt, welche die Zeit bis zu den Ausfällen simulieren. Zum anderen werden Modelle diskutiert, welche den Abnutzungsvorrat über die Zeit simulieren. Die Datenbasis für den zweiten Fall ist eine andere als für den ersten Fall, da nicht die Zeit bis zum Ereignis bestimmt wird, sondern das Objektverhalten bis zum Ereignis. Die Kombination beider Ansätze kann bei beschränkten historischen Daten vorteilhaft sein und wird in dieser Arbeit genutzt.

Historische Datenquellen

Im Kontext der Instandhaltung und des Zuverlässigkeitsmanagements sind historische Datenquellen verwendbar, welche zur Bestimmung des Abnutzungsvorrates genutzt werden können. Nach [DIN 60300-3-2] lassen sich Datenquellen nach deren Herkunft strukturieren. Die Datenquellen lassen sich hauptsächlich in Hersteller- und Nutzerdaten einteilen (vgl. Abbildung 11). Auf Seiten des Maschinenanwenders werden folgende Datenquellen im Anwendungsfall definiert: [FLE06; TAO18; KAR19; DIN 60300-3-2]

- Betriebsdaten: Unter realen Betriebsbedingungen unkontrolliert aufgezeichnete Daten zum Betrieb der Maschine, welche teilweise unsichere Datenqualität aufweisen, da u. U. inhomogene Bedingungen vorliegen und Daten potenziell unvollständig sind.
- Instandhaltungsdaten: Ausfalldaten als Ereignisse über die Zeit der jeweiligen Maschine oder der jeweiligen Baugruppe oder Komponente

Daneben können öffentliche Quellen [DEP95; NAV98; MOS93], Zertifizierungen von Unternehmen, rechtliche Anforderungen oder Forschungsergebnisse weitere Informationen liefern. [TAO18] Akteure im Geschäftsumfeld des Unternehmens sind weitere potenzielle Informationsquellen. Hierzu zählen Versicherungen (Ausfallkosten), Leasinggeber (Wertentwicklung der Maschine) oder Komponentenhersteller (Simulationsdaten und Ausfallauswertung).

In der Praxis ist die Datenverfügbarkeit für technische Systeme ein Problem. Besonders Ausfalldaten sicherheitskritischer Systeme, wie Werkzeugmaschinen, sind nicht immer vorhanden. Dies liegt an der Individualität der Systeme, fehlender Systematik bei der

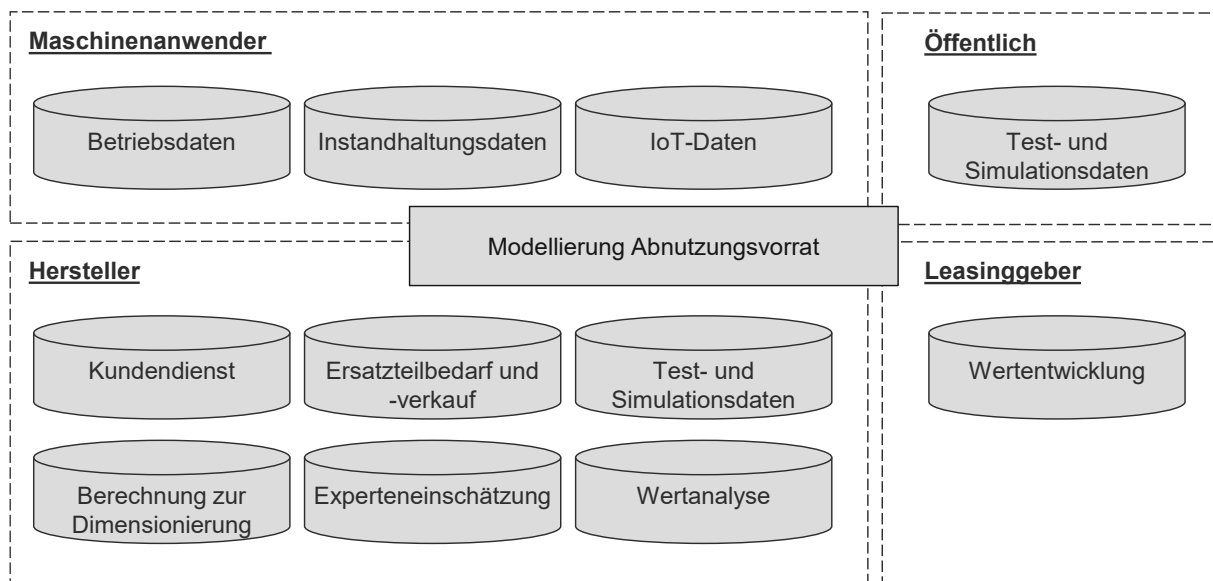


Abbildung 11 Datenquellen für die Modellierung von Ausfällen und Abnutzungsvorrat in Anlehnung an [JÜR06]

Datensammlung präventiver Instandhaltungsstrategien und der relativen Neuheit von ZÜS. [AIZ15; BAU20] Zur datenbasierten Modellierung von Ausfällen müssen Daten dennoch möglichst vollständig die Ausfälle und die Abnutzung auf der Komponentenebene beschreiben. [BAU20] Dies ist durch eine einzige Datenquelle oft nicht realisierbar.

Modellierung von Ausfällen bzw. Ereignissen

Die Art der Modellierung der Zeit bis zum Ausfall bzw. Ereignis ist abhängig von der Verfügbarkeit der Daten. Zur Bestimmung der Restlebensdauer technischer Systeme existieren zahlreiche Ansätze. [SIK11; WAN19] Es gibt zahlreiche theoretische und praxisorientierte Übersichten und Taxonomien zu den Modellen (vgl. Abbildung 12 als Zusammenfassung aus [SIK11; MAT20; AIZ15; WAN19]). Die strukturierte Auswahlentscheidung eines Modells ist notwendig, damit die vorhandenen Informationen möglichst umfänglich ausgenutzt werden.

Bei geringer Datenlage und bestehendem Expertenwissen kommen häufig erfahrungsbasierte Modelle zum Einsatz. Experten leiten hierbei automatisierte Wenn-Dann-Regeln ab, mit denen der aktuelle Zustand der Maschine abgeglichen wird. Da diese Regeln von den Experten beeinflusst werden können, schwierig zu formalisieren sind und bei komplexeren Systemen häufig versagen, wird von der Anwendung dieser Modellart abgeraten. Vorteile dieser Modelle sind deren Nachvollziehbarkeit und Einfachheit der Umsetzung. [LIA14a]

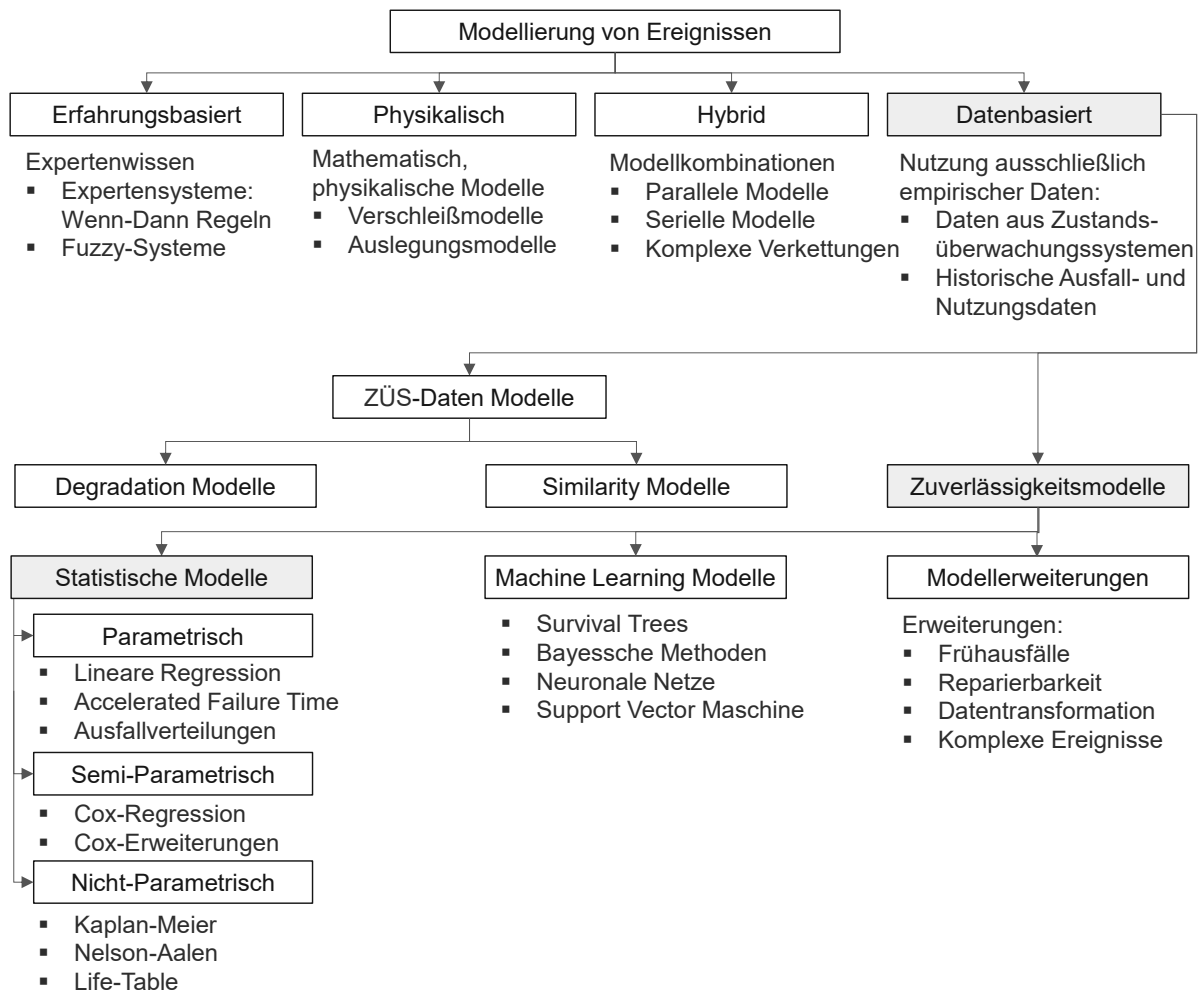


Abbildung 12 Übersicht potenzieller Modelle und Modellklassen der Ausfallmodellierung

Ist das Verschleißverhalten auf Basis ingenieurwissenschaftlichen Wissens formalisierbar, dann sind modellbasierte Verfahren (auch physikalische Modelle) nutzbar. Hierfür sind ein bestehendes ingenieurwissenschaftliches Modell, Daten von Überwachungssystemen sowie aktuelle Verschleißmessungsinformationen erforderlich. Ein Vorteil dieses Ansatzes liegt in der umfänglichen Interpretierbarkeit. [ABI19; WAN19] Für einige Komponenten sind bereits physikalische Modelle bekannt. [HUF12] Auf Komponentenebene lassen sich modellbasierte Verfahren einfacher umsetzen als auf Systemebene, auf der Zusammenhänge sehr komplex werden. [ABI19]

Datenbasierte Modelle eignen sich zur Umsetzung auf Systemebene (bspw. Werkzeugmaschine), wenn genügend aussagekräftige Daten des Überwachungssystems zur Verfügung stehen. [ABI19] Bei Vorhandensein statistisch aussagekräftiger Ausfalldaten kann auf Modelle der Zuverlässigkeitsanalyse (engl. Survival- oder Reliability-Modelle) zurückgegriffen werden. [AIZ15] Stehen Datenquellen für physikalische und datenbasierte Modelle zur Verfügung, sind die Vorteile der jeweiligen Ansätze gegeneinander

abzuwiegen. Entsprechen die Ergebnisse der einzelnen Modellklassen nicht den Anforderungen, stellen Hybrid-Modelle eine weitere Option dar. Hybrid-Modelle kombinieren die Datenquellen und fusionieren die Ergebnisse aus den zuvor genannten Modellen (parallele Modelle) oder nutzen die Ergebnisse eines Modells als Eingangsgröße eines weiteren Modells (serielle Modelle). [LIA14a; WAN19]

Die Analyse von historischen Ausfalldaten ist Bestandteil einer Vielzahl von Instandhaltungssystemen von Unternehmen, weshalb in dieser Arbeit vertieft auf diese Modelle eingegangen wird (vgl. [GOR10; AIZ15; WAN19]). In Abbildung 12 sind die anwendbaren Modelle nach dem Auswahlprozess von [AIZ15] grau hinterlegt, die bei der beschränkten Datenlage im Anwendungsfall (Betriebsdaten und Instandhaltungsdaten) genutzt werden können.

Statistische Modelle der Zuverlässigkeitsanalyse

Die Modelle der Zuverlässigkeitsanalyse basieren auf Ereignisdaten (auch Time-to-Failure-Daten)⁴. [KAR19] Ein Ereignis beschreibt in der Statistik das Ergebnis eines Experimentes und wird folgend als T definiert (Time-to-Failure = $TTF = T$). Im Bereich der Zuverlässigkeitsanalyse kann das ein Ausfall, ein Garantiefall oder der Austausch einer Komponente sein. [KAR19] Die Zeit bis zum Ausfall ist verknüpft mit der Verfügbarkeit der betrachteten Komponente und wird in den Modellen als Zufallsvariable betrachtet. [BLI11; KLE12; BIR17; KAR19] Hierbei wird der Zustand bei Zeitpunkt $t=0$ i. d. R. als neu oder so gut wie neu betrachtet. Dabei muss t nicht unbedingt ein Maß für die Zeit sein, sondern kann auch für die Anzahl von Zyklen, die zurückgelegte Wegstrecke oder auch eine weitere Kennzahl stehen, welche mit dem Verschleiß der Komponente⁵ korreliert. [DIN EN 61649]

Die Zeit bis zum Ausfall kann entweder bis zum (ersten) Ausfall einer instandsetzbaren Komponente gemessen werden oder als Maß von „neu“ bis zu jedem Ausfall einer instandsetzbaren Komponente. Dabei wird bei wiederholtem Ausfall einer Komponente in einem Betrachtungszeitraum davon ausgegangen, dass eine Instandsetzungsmaßnahme die Komponenten „so gut wie neu“ instand setzt (engl. as-good-as-new). Das

⁴ Die Charakteristika werden in Kapitel 4 näher erläutert.

⁵ In diesem Zusammenhang steht der Begriff Komponente für die zu betrachtende Einheit, welche als ganze ausfallen kann. Diese kann von unterschiedlicher Komplexität sein und sich aus Subkomponenten zusammensetzen. Als System wird in dieser Arbeit die höchste Integrationsstufe der Komponenten verstanden. [BIR17]

bedeutet, dass die Zuverlässigkeit dieser Komponente mit der einer neuen Komponente zu vergleichen ist. [DIN EN 61649] Der erwartete Ausfallzeitpunkt zweier gleicher Komponenten in unterschiedlichen Maschinen ist nicht gleich. Werden n Komponenten über einen Zeitraum ab $t=0$ zur Erfüllung einer Aufgabe genutzt, werden hiervon $\bar{v} \leq n$ Komponenten in diesem Zeitraum ausfallen. [BIR17] Die Zufallsvariable des Ausfallzeitpunktes T kann durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion repräsentiert werden. Das Ziel dabei ist die Modellierung der Zeit bis zum Ausfall auf Basis der Wahrscheinlichkeit. [KAR19] In Anhang A.1.4 werden Anwendungsbeispiele im Werkzeugmaschinenbau diskutiert. In der Praxis werden Modelle aus Gründen der Datenverfügbarkeit statt auf Komponentenebene oft auf Systemebene entwickelt, auch wenn die Modellierung auf Ebene der Komponenten erfahrungsgemäß bessere Ergebnisse generiert. [SIK11]

Werden Komponenten und Fehlerarten nicht richtig identifiziert, führt das in realen Systemen oft zu einer Exponentialverteilung, in welcher das Risiko des Ausfalls unabhängig von der Nutzungszeit der Maschine ist. Hier ist eine Berechnung der Restlebensdauer nicht möglich. Das passiert auch bei zuverlässigen und langlebigen Systemen oder solchen, die aus vielen Subsystemen bestehen. [SIK11]

In der Praxis werden im Vergleich zu den Modellen oft vereinfachende Kennzahlen genutzt, etwa die Dauer bis zum Ausfall einer Komponente, welche bei n gleichen, voneinander unabhängigen, nicht reparierbaren Komponenten mit der durchschnittlichen Lebensdauer $MTTF$ (Mean-Time-to-Failure) beschrieben wird [BIR17]:

$$MTTF = \frac{\sum_{x=1}^n T_x}{n}, \quad n \rightarrow \infty \quad (2.1)$$

Für unterschiedliche Fehlerverteilungen kann sich die gleiche $MTTF$ ergeben. Eine ausschließliche Betrachtung der $MTTF$ führt zu Informationsverlust. [KAP14; KAR19] Für reparierbare Systeme wird die mittlere Zeit zwischen Fehlern (Mean-Time-between-Failure, $MTBF$) genutzt, die die durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen als den mathematischen Erwartungswert der Zeit zwischen Ausfällen beschreibt. [DIN EN 13306] Vereinfacht kann $MTTF=MTBF$ angenommen werden. Die durchschnittliche Wiederherstellungszeit $MTTR$ (Mean-Time-to-Repair) beschreibt den Erwartungswert der Wiederherstellungszeit. [DIN EN 13306] Für eine korrekte Berechnung der $MTTR$ müssen zahlreiche Faktoren, etwa die Lieferzeit von Ersatzteilen, berücksichtigt werden. Vereinfacht wird die Stillstandzeit der Komponente genutzt. [BIR17] Des Weiteren

kann die *MTTA* (Mean-Time-to-Accident) genannt werden, welche besonders im Sicherheits- und Risikomanagement eine wichtige Rolle spielt. [BIR17]

Modellierung des Abnutzungsvorrates

Die Modellierung des Abnutzungsvorrates hat zum Ziel, den Verlauf der irreversiblen Abnutzung eines Objektes über die Zeit bis zum Fehler bzw. zur Abnutzungsgrenze darzustellen. [SHA17] Die Datenbasis unterscheidet sich hierbei von der von Zuverlässigkeitsmodellen, da nicht die Zeit, sondern das Objektverhalten bis zum Ereignis modelliert wird. Solche Daten entstammen zum Beispiel ZÜS, [SHA17] welche zur Modellierung in Unternehmen historisch nicht vorliegen. [BAU20] Die Modellierung der Abnutzung stellt einen perfekt diagnostizierten Zustandswert dar. Das bedeutet, dass der Zustandswert des Modells zu jedem Zeitpunkt die Abnutzung des realen Systems ohne Abweichung darstellt. [ASA14; JON17]

Abnutzungsvorratsmodelle lassen sich in datenbasierte und physikalisch, modellbasierte Ansätze untergliedern. [YE15; ZHA15; SHA17] Erstere nutzen statistische Methoden, während letztere den physikalischen Ausfallmechanismus mathematisch beschreiben. Physikalische Ansätze wie von [KOH21] oder [HUF12] benötigen eine Schätzung der zukünftigen Nutzung der Maschine, um über Belastungsintegrale den Abnutzungsvorrat zu beschreiben. Dabei ist die Abbildung von zufälligen Fehlern schwierig. Solche Modelle fokussieren i. d. R. einzelne (Sub-)Komponenten, woraus eine hohe Komplexität bei der Modellierung von Systemen resultiert. Für den bestehenden Anwendungsfall werden datenbasierte Modelle genutzt, da der Leasingnehmer nicht in der Lage ist, ein komplexes physikalisches Modell zu erstellen. [SHA17; CHE17] Betriebsdaten werden als Datenbasis definiert, für welche sich stochastische Prozesse zur Modellierung der Abnutzung eignen. [SHA17]

Ein stochastischer Prozess beschreibt eine Folge von Zufallsvariablen, die die zeitliche und räumliche Entwicklung eines Zufallssystems definiert. [BAS20] Die Auswahl eines spezifischen stochastischen Prozesses ist abhängig von der Datenbasis und den Anforderungen an die Modellierung. General-Path-Modelle beschreiben vereinfacht den Verschleiß als Funktion der Zeit mit fixen und variablen Effekten, [LU93] etwa durch Kombination einer linearen Funktion mit Zufallsparametern einer Verteilungsfunktion [FRE09; BIA15; XU16]. Der Wiener-Prozess (auch brownische-Bewegung oder Gauß-Prozess mit Drift) wird häufig zur Modellierung von Verschleiß eingesetzt. [WHI97;

WAN10b; SHA17] Dieser ist definiert durch die Verschleißrate (Driftparameter), den Volatilitätsparametern, die brownsche Bewegung und eine monoton steigende Funktion der Zeit, wobei der Prozess in $t=0$ mit null determiniert ist. Der Drift kann als lineare oder nicht-lineare Funktion definiert werden. Störterme sowie Einflussfaktoren können integriert werden (Volatilitätsparameter). Die brownsche Bewegung wird als Prozess unabhängiger, standardnormalverteilter Zufallszahlen beschrieben (gaußscher Random Walk). Diese Modelle eignen sich jedoch nicht zur Beschreibung monotoner Verschleißverläufe oder von Verläufen mit mehreren Phasen. [SHA17; CHE17]

Ist darüber hinaus der Endpunkt des Prozesses bekannt, kann die brownsche Brücke als bedingte brownsche-Bewegung zur Modellierung der Abnutzung verwendet werden. [CHO09] Der Prozess zwischen Start- und Endpunkt wird zufallsgeneriert erstellt. Als weiteres Verfahren soll der Gamma-Prozess eingeführt werden [ABD75], welcher einen graduellen, monotonen Anstieg von Verschleiß über die Zeit abbildet und vielfach in der Modellierung Anwendung findet. [VAN09; SHA17; GRA02] Dieser Prozess ist relativ leicht verständlich und kann nach dem Vorbild der brownsche Brücke mit bekanntem Endpunkt modelliert werden. [AVR03] Er eignet sich jedoch lediglich zur Beschreibung monoton steigender Prozesse. [SHA17]

Eine weitere Möglichkeit der stochastischen Prozesse sind die Markow-Modelle und ihre Erweiterungen, welche sich insbesondere mittels ihrer Modellierung durch endliche Zustände, welche ein Objekt annehmen kann, von den bisher genannten Modellen abgrenzen. [MOG12; MOG13; SHA17] Die Bestimmung dieser Zustände erweist sich in der Praxis jedoch oft als schwierig. [SHA17] Weiter kann der inverse Gauß-Prozess genannt werden [WAN10a; QIN13; YE14], welcher eine monotone Beschreibung des Verschleißes darstellt. [SHA17; WAN10a] Dieser ist dem Gamma-Prozess ähnlich. Auch der Poisson-Zählprozess kann für die Modellierung herangezogen werden. Dieser Prozess kumuliert (zählt) Ereignisse über die Zeit, dessen Abstände zufallsverteilt sind. [BAS20] Die genannten Modelle können durch Erweiterungen angepasst werden. Hierzu gehört der sog. zufällige Schock, welcher einen Sprungausfall darstellt. [KLU02; HU20] Eine weitere Erweiterung ist die Modellierung der Abhängigkeit zwischen Komponenten eines Systems. [SHA17]

Zusammenfassend kann die Zeit bis zum Ausfall T und der Verschleißfortschritt über die Zeit auf zahlreiche Arten modelliert werden. Im Rahmen der Nutzung von Betriebs-

und Instandhaltungsdaten eignen sich statistische Modelle der Zuverlässigkeitsanalyse und stochastische Prozesse. Der stochastische Prozess muss monoton sein, da dieser die Belastung kumuliert. Folgend soll auf die resultierenden Kosten von Ausfällen und Verschleiß eingegangen werden.

2.1.5 Lebenszykluskosten der Werkzeugmaschine

Bei einem Betrachtungszeitraum von etwa zehn Jahren ist festzustellen, dass der Anschaffungspreis einer Werkzeugmaschine nur etwa 30 % der Gesamtkosten darstellt. [ABE09; DER11] Die Betrachtung der Lebenszykluskosten (LZK) ist von zentraler Relevanz für Hersteller, die sich damit nicht nur durch geringe Anschaffungskosten der Maschine am Markt abgrenzen können. Ziel der LZK-Rechnung ist die ökonomische Bewertung eines Investitionsgutes anhand aller Kosten, die während des gesamten Lebenszyklus entstehen. [ABE09; BÜN09] Eine Abgrenzung zum Total-Cost-of-Ownership (TCO) ist in der Literatur nicht klar definiert. Die beiden Begriffe beschreiben

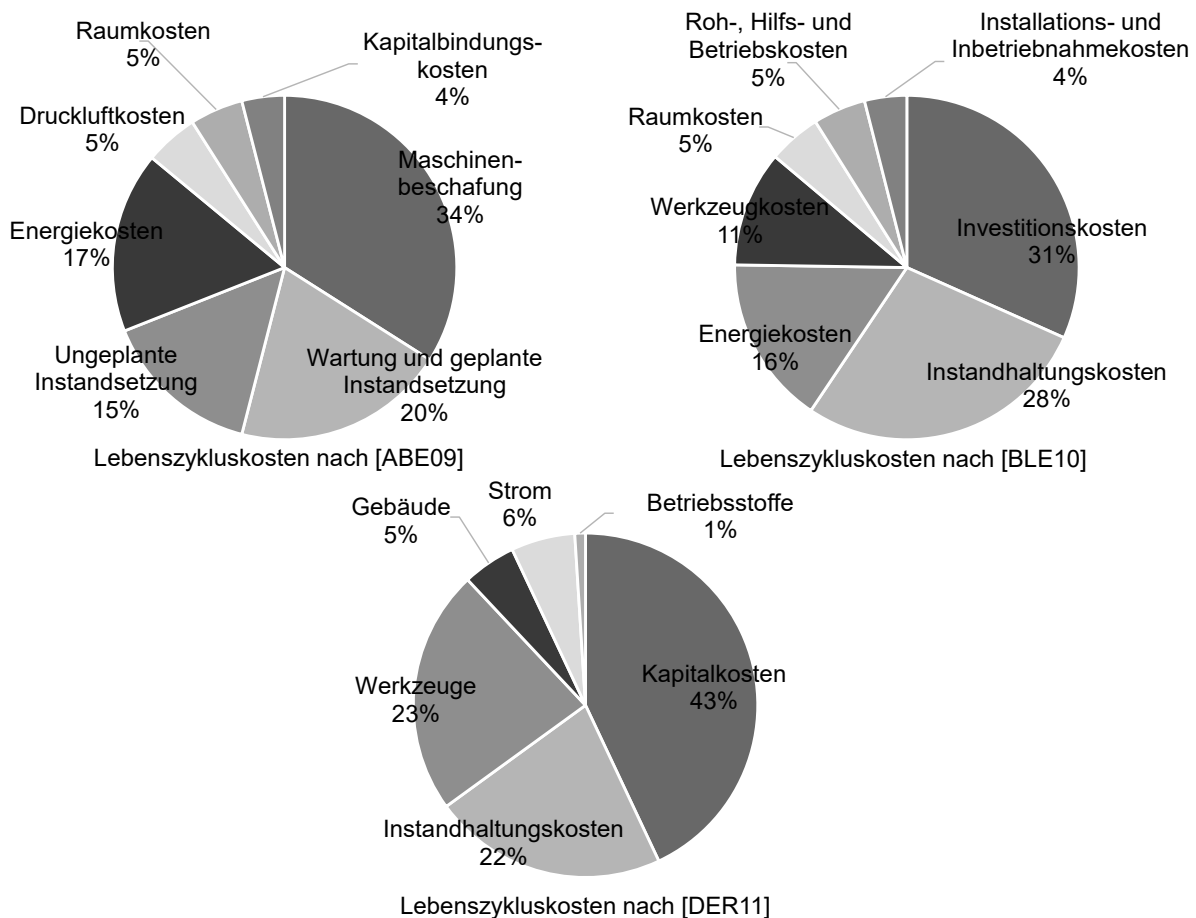


Abbildung 13 Beispielhafte Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren nach [ABE09; BLE10; DER11]

den gleichen Sachverhalt. TCO hat seinen historischen Ursprung in der Computerindustrie, LZK-Rechnung in der Investitionsgüterindustrie. [BÜN09]

Zu den Kosten gehören Instandhaltungs-, Energie-, Betriebsstoff- und Werkzeugkosten. Diese sind maschinen- und nutzungsspezifisch für den Anwender zu bestimmen. [ABE09] Insbesondere beeinflusst das Lastkollektiv die Gesamtkosten der Maschine. [BLE10] Die Berechnung der LZK einer Werkzeugmaschine ist abhängig von der bestehenden Datenlage. [ABE09] In Abbildung 13 sind Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen aufgetragen, wobei neben personalbezogenen- und sonstigen Kosten ein wesentlicher Kostenbestandteil der spanenden Fertigung zuzuordnen ist. [DER11] Neben der reinen Kostenbetrachtung sind Methoden bekannt, welche die Lebenszyklusleistung einer Maschine beschreiben. [ABE09] Zusammengefasst beziehen sich die Kosten für den Maschinenanwender nicht nur auf die Anschaffung. Weitere Kosten überwiegen gemeinhin denen der Anschaffung und eröffnen damit ein Optimierungspotential hinsichtlich des Einflusses des Bezahlmodells.

2.2 Flexible Bezahlmodelle in der Industrie

In diesem Abschnitt werden flexible Bezahlmodelle als Alternative zum kreditfinanzierten Kauf vorgestellt. Hierzu werden zunächst Leasingmodelle als Grundlage der Bezahlmodelle aufgeführt. Darauf aufbauend wird auf den Wertverlust und die Restwertbestimmung eingegangen und im nächsten Schritt die Pay-per-X-Modelle als Weiterentwicklung des Leasings eingeführt.

2.2.1 Leasingmodelle

Definition, Verträge und das Leasingdreieck

Das Leasing ist eine bedeutende Methode der Investitionsfinanzierung und wird seit den 1950er Jahren in Deutschland praktiziert und im Werkzeugmaschinenbau erfolgreich eingesetzt. [BEI12; MAR08a] Eine einheitliche Definition des Begriffs existiert aufgrund der Vielzahl der Ausgestaltungsmöglichkeiten nicht. Unter Leasing wird u. a. „[...] die Vermietung von Anlagegegenständen durch Finanzierungsinstitute und andere Unternehmen verstanden, die das Vermietungsgeschäft gewerbsmäßig betreiben.“ [GAB01] Darunter ist die „[...] zeitlich begrenzte Nutzungsüberlassung von Wirtschaftsgütern gegen Entgelt [...]“ [BEI12] zu verstehen. Der Leasingvertrag ist gesetzlich nicht als eigener Vertragstyp definiert, sondern leitet sich aus dem wirtschaftlichen Gehalt

der vertraglichen Gestaltung ab⁶. [SCH08; BEI12] Anders als bei der Miete werden vertraglich festgesetzte Wartungs- und Instandsetzungsleistungen inklusive Mängelbeseitigung durch den Leasingnehmer durchgeführt. [GRU19] Bei Vertragsende geht das Leasingobjekt zurück an den Leasinggeber oder wird an Leasingnehmer oder Dritte veräußert. [GRU19] Eine weitere Abgrenzung von Leasing zum Kreditkauf, Mietkauf und der Vermietung ist Anhang A.1.5 zu entnehmen.

Leasing kann in Finanzierungsleasing (engl. Finance-Leasing) und operatives Leasing (engl. Operate-Leasing) unterteilt werden, wobei Unterschiede in Bezug auf die Zuschreibung des Investitionsrisikos bestehen. [BEI12] Im Operate-Leasing besteht zu jeder Zeit ein mögliches Kündigungsrecht des Leasingnehmers ohne Verpflichtungen. Eine Vollamortisation⁷ wird in einem solchen, zumeist kurzfristig angelegten Leasing nicht angestrebt. Der Leasinggeber trägt das Investitionsrisiko. [BEI12] Im Gegensatz hierzu ist das Finance-Leasing durch eine feste, durch beide Parteien unkündbare Grundmietzeit definiert⁸. Hierbei gehen Rechte und Pflichten des Eigentümers weitgehend auf den Leasingnehmer über, wozu die Gefahr des Untergangs oder eine Verschlechterung des Leasingobjektes gehören⁹. [GAB01; BEI12] Das Risiko ist vergleichbar dem des Kaufs durch Fremdfinanzierung. [BEI12] Die Vertragsdauer ist mittel- bis langfristig angesetzt. [GAB01] Eine eindeutige Abgrenzung der genannten Begriffe ist nicht möglich, da diese etwa im steuerrechtlichen oder finanzwirtschaftlichen Sinne nicht einheitlich genutzt und international unterschiedlich verstanden werden. [GAB01] Im Folgenden wird unter Leasing das Finance-Leasing verstanden.

Werden während der Grundmietzeit alle Investitionskosten (inklusive der Zinsen) der Finanzierung gedeckt, wird von einem Vollamortisationsvertrag gesprochen, sonst von einem Teilamortisationsvertrag. Die Vertragstypen unterscheiden sich weiterhin in Bezug auf das Wertminderungs- bzw. Restwertrisiko. Dieses liegt bei Vollamortisation beim Leasingnehmer. Bei Teilamortisation ist es wiederum von der Vertragsgestaltung

⁶ Für weitere Informationen zu vertraglichen und steuerrechtlichen Themen sei auf die Leasingerlasse des Bundesministeriums der Finanzen (BMF) verwiesen: Teilamortisationserlass für Mobilien (BMF, Schreiben v. 22.12.1975, IV B 2 - S 2170 - 161/75) und Vollamortisationserlass für Mobilien (BMF, Schreiben v. 19.4.1971, BStBl 1971 I S. 262). Die Erlasse können als Grundlage der Ausgestaltung von Leasingverträgen in Deutschland betrachtet werden.

⁷ Als Amortisation der Investitionskosten wird die Rückführung der Kosten in Form von Leasingraten und weiteren Zahlungen des Leasingnehmers an den Leasinggeber verstanden [GAB01]

⁸ Die Grundmietzeit liegt zwischen 40 - 90 % der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer des Objektes [GAB01]

⁹ Streng genommen sind bei Verlust der Funktionstüchtigkeit der Maschine weitere Leasingraten zu zahlen [BEI12]

abhängig. [GAB01] Die Nutzung des Guts nach Ende der Vertragslaufzeit stellt ein weiteres Kriterium dar. Übersteigt die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer beim Vollamortisationstyp die Grundmietzeit, so können unterschiedliche Vereinbarungen zur Nutzung nach Ablauf dieser Zeit getroffen werden. Gängige Optionen sind die Kaufoption, Verlängerungsoption, keine Option oder sonstige Rechte. [BEI12] Im Fall des Teilamortisationsvertrags sind nach Ende der Vertragslaufzeit ein Andienungsrecht des Leasinggebers, eine Aufteilung der Mehrerlöse oder ein Kündigungsrecht mit Abschlusszahlung durch den Leasingnehmer denkbar. [BEI12] In Anhang A.1.6 wird vertieft auf die Möglichkeiten der vertraglichen Ausgestaltung eingegangen.

Eine besondere Leasingform ist das Full-Service-Leasing. [SCH08] Hierbei werden komplementäre Dienstleistungen mit der Finanzierungsfunktion auf Basis des Leasingobjektes verknüpft. Dies sind i. d. R. Wartungs- und Instandhaltungsdienstleistungen sowie Versicherungen. [MAR08c; HEY08; BEI12] Dabei wird zum einen das Investitionsrisiko vom Leasingnehmer auf den Leasinggeber übertragen bzw. abgeschwächt, zum anderen wird ein absatzpolitisches Ziel verfolgt. Durch die zusätzlichen Dienstleistungen soll der Leasingnehmer zum Abschluss des Vertrags bewegt werden. Die hieraus resultierenden zusätzlichen Aufwände werden in die Leasingrate verrechnet. [MAR08b; BEI12]

Das Leasing wird im Kern durch eine Dreiecksbeziehung zwischen Leasinggeber, Leasingnehmer und Hersteller (auch Zulieferer oder Bereitsteller) des Leasingobjektes definiert. Übernimmt der Hersteller die Funktion des Leasinggebers, wird von Herstellerleasing gesprochen. [GAB01; MAR08b; BEI12] Wie in Abbildung 14 dargestellt, erwirbt der Leasinggeber vom Hersteller das Leasingobjekt und bezahlt dieses (Kaufvertrag), nachdem Bonität und Zahlungsfähigkeit des Leasingnehmers überprüft wurden. Das Objekt wird an den Leasingnehmer geliefert, welcher es nutzen kann. Der Leasinggeber bleibt wirtschaftlicher Eigentümer des Leasingobjektes. [GRU19] Für die Überlassung des Objektes zahlt der Leasingnehmer dem Leasinggeber die Leasingrate (Leasingvertrag). [GAB01] Die Sach- und Preisgefahr liegt beim Leasingnehmer, welcher üblicherweise das Leasingobjekt selbstständig versichert.

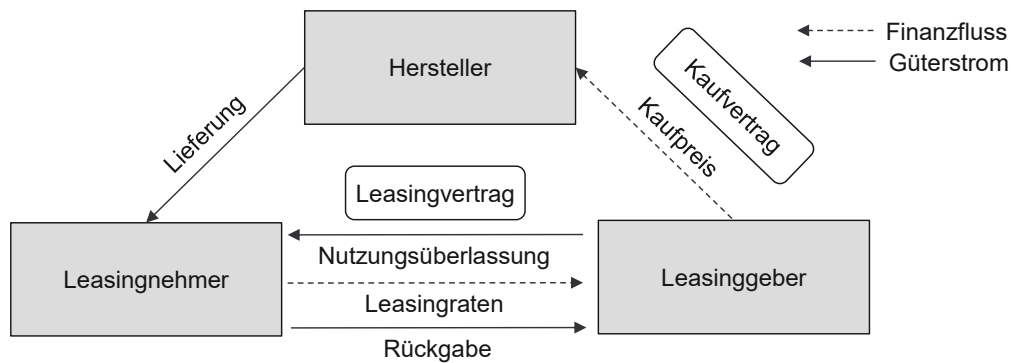


Abbildung 14 Das Leasingdreieck nach [BEI12; GRU19]

Je nach Ausgestaltung des Vertrags hat das Leasing unterschiedliche Vorteile für den Leasingnehmer, bspw. steuerrechtliche und bilanzielle Vorteile. Diese können Tabelle 30 in Anhang A.1.7 entnommen werden.

Bestimmung der Leasingrate

Die Zahlungsverpflichtungen des Leasingnehmers sind je nach Vertragsausgestaltung unterschiedlich, setzen sich aber primär aus den Leasingraten, Mietsonderzahlungen und Zahlungen bei Vertragsende zusammen. [GAB01] Im Folgenden wird auf Leasingraten als Haupteinnahmequelle der Leasinggesellschaften eingegangen und die Leasingrate auf Basis des Voll- und Teilamortisationsansatzes erläutert. Die Leasingrate basiert bei Vollamortisation auf den Anschaffungskosten des Leasinggebers für das Objekt und setzt sich aus der Tilgung und dem Zins zusammen. Die Tilgung führt die Kosten der Anschaffung an den Leasinggeber zurück, wobei der Zins die Entlohnung für die Überlassung auf eine bestimmte Zeit darstellt. [WAR09; BEI12] Diese Entlohnung setzt sich wiederum aus Refinanzierungskosten und einem Kosten-, Risiko- und Gewinnzuschlag zusammen. [GAB01; GRU19] Amortisations- und Zinsanteil der Leasingrate entsprechen dem Tilgungs- und Zinsanteil der Refinanzierung des Leasinggebers, dessen Darlehen über die Leasingraten getilgt wird. Dabei steigt der Anteil der Tilgung über die Mietdauer, wohingegen der Anteil des Refinanzierungszinses inkl. Kosten-, Gewinn- und Risikomarge sinkt. [GAB01]

Bei Teilamortisationsverträgen wird die Leasingrate auf die gleiche Art und Weise ermittelt. Grundlage der Berechnung sind die Anschaffungskosten, die Grundmietzeit, die Refinanzierungsbedingungen und der Restwert des Leasingobjektes. Zur Ermittlung des Restwerts wird häufig der voraussichtliche Marktwert oder der lineare Restbuchwert herangezogen. Während der Grundmietzeit wird der Amortisationsanteil in Höhe

des kalkulierten Wertverlustes (Differenz aus den Gesamtinvestitionskosten und dem Restwert) über die Leasingrate getilgt. Es verbleibt eine Restschuld in Höhe des Restwertes, die je nach Ausgestaltung des Vertrags zu begleichen ist. [GAB01].

Zusammengefasst besteht die Leasingrate LR in Zeitpunkt t bei beiden Varianten nach [GAB01; GRU19] aus den folgenden Bestandteilen:

$$LR_t = AT_t + V_t + MK_t + MR_t + MG_t \quad (2.2)$$

AT	[€]	Amortisation (Tilgung) AT des eingesetzten Kapitals
V	[€]	Verzinsung des eingesetzten Kapitals
MK	[€]	Marge zur Abdeckung von Kosten
MR	[€]	Marge zur Abdeckung des Risikos
MG	[€]	Gewinnmarge

Die Amortisation bzw. Tilgung (1) leitet sich aus der Mietbemessungsgrundlage MBG und den Gesamtinvestitionskosten ab. Die MBG ist definiert als:

$$MBG_{voll} = AK_{netto} + V_{Anz} - MSZ - IZ \quad (2.3)$$

AK_{netto}	[€]	Nettoanschaffungskosten
V_{Anz}	[€]	Zinsen für Anzahlungen und Zwischenfinanzierung
MSZ	[€]	Mietsonderzahlungen
IZ	[€]	Investitionszulagen

Die Nettoanschaffungskosten ergeben sich aus den Bruttoanschaffungskosten und den Anschaffungsneben-, Transport- und Montagekosten, von welchen etwaige Rabatte abgezogen werden. In der Vollamortisation wird dieser Betrag vollständig während der Grundmietzeit TG in der Leasingrate umgesetzt. Bei konstanten Leasingraten ergibt sich damit eine Amortisation von:

$$AT_t = \frac{MGB}{TG} \quad (2.4)$$

Im Teilamortisationsvertrag wird der kalkulierte Restwert vom Anschaffungswert abgezogen. Hiermit zeigt sich der Einfluss des kalkulierten Restwertes auf die Leasingrate. Wird eine lineare Wertminderung des Leasingobjektes angenommen, ist der Amorti-

sationsanteil unabhängig von der Vertragslaufzeit. Damit ergibt sich für die Mietbemessungsgrundlage folgende Gleichung, in welche der Restwert RW abhängig von der Grundmietzeit TG und des Abschreibungsverfahrens ist:

$$MBG_{teil} = AK_{netto} + V_{Anz} - MSZ - IZ - RW_{TG} \quad (2.5)$$

Die Verzinsung des eingesetzten Kapitals V ergibt sich aus dem Betrag, den der Leasinggeber an das refinanzierende Kreditinstitut leisten muss. [GAB01] Die Marge zur Abdeckung von Kosten MK , insbesondere Verwaltungskosten, deckt die allgemeinen Kosten der Leasinggesellschaft ab. Dazu gehören Personalkosten, anteilige Gemeinkosten und die Steuerbelastung durch das Objekt. Daneben sind die Serviceleistungen bei einem Full-Service-Leasing inbegriffen. Die Risiko- und Gewinnmargen MR werden durch den Leasinggeber kalkuliert. Die Risikomarge ist insbesondere bei größeren Leasinggegenständen mit geringerer Objektfungibilität (Marktfähigkeit) relevant. [GAB01] Ein weiterer Aspekt ist die Restwertproblematik, die im nächsten Abschnitt behandelt wird.

Neben den Bestandteilen der Leasingrate kann sich auch die Struktur über die Grundmietzeit ändern. Lineare, degressive oder progressive Leasingraten sind anwendbar, wobei lineare Leasingraten in der Praxis häufig vorzufinden sind. Deren Berechnung erfolgt auf Basis eines Annuitätendarlehens¹⁰ mit einer Restschuld von null Euro bei Vollamortisation bzw. einer Restschuld in Höhe des kalkulierten Restwertes bei Teilamortisation. [GAB01] Die Fälligkeit der Zahlungen wird i. d. R. monatlich und vorschüssig erbracht. [GAB01] Anpassungsklauseln durch den Leasinggeber werden im Folgenden vernachlässigt. [GAB01]

2.2.2 Wertverlust und Restwertermittlung

Eine Werkzeugmaschine verliert über die Zeit an Wert. Der Verschleiß bzw. Verlust des Abnutzungsvorrates spielt dabei eine zentrale Rolle. Nur zum Teil kann der Wertverlust durch den Anwender beeinflusst werden. Folgend sollen die unterschiedlichen Herangehensweisen von Leasinggeber, Leasingnehmer und Sachverständigen bzgl. des Wertverlustes beschrieben werden.

¹⁰ Tilgungsdarlehen mit konstanten Rückzahlungsbeträgen, wobei sich der Anteil von Zins und Tilgung über die Laufzeit verändern.

Leasinggeber: Restwertermittlung des Leasinggegenstandes

Die Ermittlung des Wertverlustes lässt sich von der Restwertermittlung eines Leasinggegenstandes ableiten. In Teilamortisationsverträgen ist der kalkulierte Restwert der Betrag, für den während der Grundmietzeit keine Leasingzahlungen bestehen. Bei hoch angesetztem Restwert sind die Zahlungen geringer als bei niedrig angesetztem Restwert. [GLA16] Der Restwert wird vor Beginn des Vertrags geschätzt, wobei der Zustand erst bei Vertragsende anhand zuvor definierter Bewertungskriterien festgestellt wird. [GAB01; GRU19]

Der Zeitwertverlauf der Maschine wird durch den Leasinggeber kalkuliert und nimmt erfahrungsgemäß einen degressiven Verlauf über die Zeit an. Dabei ist der Wertverlust insbesondere in der Anfangszeit höher. [GAB01] Der Restwert entspricht dabei dem Zeitwert der Maschine bei Vertragsende. Durch das Blankorisiko, d. h. die Differenz zwischen Restobligo¹¹ und den Sicherheiten, tritt der Zeitwert bzw. Marktwert der Maschinen in den Vordergrund. Als Sicherheit wird der Marktwert des Leasinggegenstands herangezogen. [GAB01] Dieser spiegelt nicht den zukünftigen Marktwert, sondern den Wert basierend auf der Abnutzung während des Leasingzeitraums wider. Er ist so bemessen, dass er zusammen mit den bereits während der Grundmietzeit geleisteten Zahlungen die Gesamtkosten des Leasinggebers, einschließlich Neben- und Finanzierungskosten, deckt. [GLA16; GRU19] Nach Definition des Bundesverbandes Deutscher Leasing-Unternehmen ist der Restwert definiert als der „[...] tatsächliche oder kalkulierte Wert des Leasing-Objektes nach Ablauf oder vorzeitiger Auflösung des Leasing-Vertrages [...]“ [BUN21a]. Es werden drei Arten des Restwertes unterschieden: [BUN21a]

- Buchtechnischer Restwert: Restbuchwert, der sich nach den buchhalterischen Bestimmungen zum Zeitpunkt der Beendigung der Laufzeit des Leasingvertrages für das Leasingobjekt in der Bilanz ergibt.
- Kalkulierter Restwert: Durch Leasingnehmer und Leasinggeber ausgegangener Restwert nach Ablauf der vereinbarten Grundmietzeit des Leasingobjektes, der sich aus der vereinbarten Nutzung unter Berücksichtigung der zukünftigen Marktpreisentwicklung ergibt.

¹¹ Der Restobligo ist die „Summe aller noch ausstehenden barwertigen Leasingraten und aller barwertigen Restwertansprüche“ [GLA16]

- Marktwert: Tatsächlicher Wert des Wirtschaftsgutes, der bei der jeweiligen Marktlage zum Zeitpunkt der Veräußerung erzielt werden kann.

Der Restwert spielt zusammen mit dem Zeitwert eine zentrale Rolle im Risikomanagement von Leasingunternehmen. [GLA18] Dessen Ziel ist es, Risiken systematisch zu identifizieren, zu bewerten, zu steuern und zu kontrollieren. Im Rahmen der Risikoidentifikation werden das Adressenausfall-, Marktpreis-, Liquiditäts- und operationelle Risiko sowie Risikokonzentrationen genannt, welche in der Praxis nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. [GLA18] Das Adressenausfallrisiko beschreibt „den Verlust oder entgangenen Gewinn aufgrund des Ausfalls eines Vertragspartners“ [GLA18]. Im engeren Sinne gilt der sogenannte *Unexpected Loss*, welcher als den Erwartungswert übersteigenden Verlust definiert wird. [GLA18] Hierzu gehören das Zahlungsrisiko, welches die nicht fristgerechte Zahlung der Leasingraten umfasst und das Verwertungsrisiko. Letzteres beschreibt zum einen den Ausfall des Leasingnehmers während der Vertragslaufzeit, zum anderen die Wiederverwertungsmöglichkeiten des Leasinggegenstandes auf dem Sekundärmarkt. [HON09; GLA18] Die Wiederverwertung hängt von der Leasingfähigkeit des Gegenstandes ab, welche sich aus Wertstabilität, Fungibilität und die Drittverwendungsmöglichkeit¹² herleitet. [HON09]

Das Restwertrisiko ist eine spezielle Art des Verwertungsrisikos, welches durch die Marktwertverringerung des Objektes einen geringeren Verkaufserlös als den kalkulierten Restwert darstellt¹³. [HON09] Je nach Ausgestaltung des Vertrags trägt entweder der Leasingnehmer oder der Leasinggeber das Restwertrisiko. Während der Laufzeit ist der Leasinggeber der Sorgfalt des Leasingnehmers ausgesetzt. Diese beeinflusst die Funktionsfähigkeit und damit die Verwertungsmöglichkeit. [PÄH89; HON09]

Eine weitere Risikoform ist das Marktpreisrisiko, das insbesondere Zinsen und Restwert beeinflusst. Sie beschreibt die Verlustgefahr durch Marktpreisänderungen und andere preisbeeinflussende Parameter. [GLA18] Das Objektrisiko ist dem Marktpreisrisiko untergeordnet und beschreibt „Risiken bei der Verwertung von Sicherheiten, zum Beispiel technische Überalterung, technischer Defekt, Beschädigungen, aber auch

¹² Verwendung des Objektes ist mit geringen Änderungen von anderen als dem aktuellen Eigentümer nutzbar.

¹³ Nur bei Teilamortisationsverträgen anwendbar, welche nicht vorzeitig gekündigt werden oder kein Andienungsrecht der Leasinggesellschaft beinhalten. [HON09]

Verlust beziehungsweise Untergang des Objektes.“ [GLA18] Es besteht ein Werthaltigkeitsrisiko bei unsachgemäßem Gebrauch oder allgemein veränderter Marktnachfrage, welche sich auf die erzielbare Veräußerungserlöse niederschlägt. Das Objektrisiko steht bei der Bewertung einer Kreditscheidung durch den Leasinggeber im Zentrum des Chancen-Risiko-Verhältnisses. [GLA15] Zerstörung, der Untergang, Beschädigungen, Defekte oder ein erhöhter Verschleiß in Kombination mit der Fungibilität und Werthaltigkeit ergeben das Objektrisiko, welches durch das Blankorisiko quantifiziert werden kann. Die Bewertung des Blankorisikos erfolgt durch Objektspezialisten, die in Zusammenarbeit mit Gutachtern, Leasingobjekte bewerten. [GLA15] Zur Steuerung des Risikos werden u. a. Leasingbedingungen genannt, welche zur regelmäßigen Wartung und Instandsetzung verpflichten. [GLA15]

Leasingnehmer: Kalkulatorische Abschreibung der Werkzeugmaschine

Der Wertverlust einer Werkzeugmaschine kann basierend auf der Abschreibung des Leasingnehmers approximiert werden. Im Zuge der Kostenartenrechnung werden systematisch, überschneidungsfrei und vollständig alle Kosten erfasst, bewertet und eingeordnet, welche im Abrechnungszeitraum entstehen. Diese lassen sich in die menschliche Arbeitsleistung (Personalkosten), mobile und immobile Betriebsmittel (Kapitalkosten) und Werkstoffe (Materialkosten) untergliedern. Der Wertverlust der Maschine kann den Kapital- und Anlagenkosten zugeschrieben werden. Hierbei handelt es sich um gebundenes Kapital des Unternehmens. [BEC16] Um den für das Investitionsgut gezahlten Kaufpreis auf die Jahre der Nutzung zu verteilen, wird dieser durch kalkulatorische Abschreibung über den kalkulatorischen Wertverlust abgebildet. [BEC16] Die Kosten sind den bilanziellen bzw. buchhalterischen Abschreibungen nicht gleichzusetzen¹⁴. Die periodische Abschreibungssumme ergibt sich aus der Abschreibungsbasis (meist Anschaffungspreis) abzüglich des Liquidationswertes am Ende der Nutzungsdauer.

Der Wertverlust soll durch die Abschreibungsmethode möglichst genau dargestellt werden. [ERN17] Die Anwendung des Abschreibungsverfahrens kann entweder zeitbezogen oder leistungsbezogen erfolgen. Zeitbezug nimmt an, dass das Investitionsgut

¹⁴ Bilanzielle Abschreibungen unterliegen den gesetzlichen Regelungen des Handels- und Steuerrechts und sollen durch externe, einheitliche Vorschriften (bspw. AfA-Tabelle) eine willkürliche, unternehmensindividuelle Beeinflussung der Unternehmensgewinne und der Steuern einschränken oder vermeiden.

über einen Zeitraum linear, degressiv oder progressiv an Wert verliert. [BEC16] In der Praxis wird durch die Einfachheit der Rechnung meist der lineare Wertverlust angenommen.

Bei der leistungsabhängigen Abschreibung wird ein Verschleiß angenommen, welcher von der Nutzung abhängt. [BEC16] Die zugrundeliegende Annahme ist, dass mit steigender Belastung bzw. Produktionstätigkeit der Maschine die Höhe der Maschinenabnutzung steigt. Wie in Abschnitt 2.1.3 erläutert, ist der Verschleißfortschritt bzw. Abnutzungsvorrat nicht immer der akkumulierten Leistung gleichzusetzen. Hieraus folgt, dass die leistungsbezogene Abschreibung bei Abnutzungsvorräten mit mehr als einer Phase zu widersprüchlichen Abschreibungen führt. Eine Zuordnung des Verschleißes zur Anzahl produzierter Produkte ist einfacher umzusetzen. [SCH17] Unter der Annahme, dass der Wertverzehr ausschließlich durch die Anzahl der produzierten Produkte determiniert ist, kann der Wiederbeschaffungswert B dem Leistungsvorrat W zugeordnet werden. Der Quotient von B und W ergibt W_t mit der Einheit Euro pro Leistung. Der Quotient multipliziert mit der Leistung in der Periode ergibt den Abschreibungsbetrag a_t :

$$a_t = \frac{B}{W} W_t \quad (2.6)$$

Durch die schwierige Ermittlung des Leistungsvorrates wird diese Form der Abschreibung in der Praxis kaum angewandt. [BEC16] Allgemein wird der Wertverlust zum einen aus der Minderung des sog. Leistungsvorrates beschrieben: [ERN17; SCH17]

- Gebrauchsverschleiß: Abnutzungsbedingter Verschleiß durch Gebrauch
- Zeitverschleiß: Natürlicher, ruhender Verschleiß

Zum anderen verringert sich der Wert durch leistungsunabhängige Faktoren. Der Wiederbeschaffungswert verringert sich u. a. durch:

- Zeitablauf (bspw. Patente)
- Technischer Fortschritt (technische Alterung)
- Wirtschaftliche Überholung (Bedarfsverschiebung)

Diese Faktoren können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, allerdings ist der exakte Zusammenhang nicht herzuleiten. [ERN17; PLI20] Im Sinne der Substanzerhaltung des Unternehmens wird der Wiederbeschaffungspreis am Ende der Nut-

zungsdauer als Basis genutzt. Dieser Preis wird geschätzt, wobei Wertentwicklungslisten für Preisindizes, Erkundigungen bei Lieferanten, statistische Indexzahlen oder sachkundige Schätzungen als Grundlage dienen. [MUM15]

Sachverständige: Bewertung von Maschinen

Für die Bewertung gebrauchter Maschinen und Anlagen sind Leitsätze definiert, welche als Orientierung zur Zeitwertermittlung durch Sachverständige herangezogen werden. [INS99] Wie in Abbildung 15 dargestellt, leitet sich der Zeitwert einer Maschine aus deren Neuwert ab, welcher wiederum auf Grundlage des Anschaffungswertes oder durch Vergleich mit dem Neupreis gleichartiger Maschinen ermittelt wird. Der Zeitwert der Maschine ist komplexer zu bestimmen. Als Basis werden der Neu- oder Anschaffungswert genutzt. Dieser wird durch einen Gebrauchswertfaktor, welcher sich aus Umfang, Zustand und Arbeitsqualität ableitet, sowie durch einen Zeitwertfaktor, der den Wertverlust durch Alterung der Maschine und die Preisentwicklung abdeckt, korrigiert. Für den Gebrauchswertfaktor der Werkzeugmaschine werden angemessene Bewertungsschemata und Messzahlen genutzt. Die Ermittlung des Zeitwertfaktors erfolgt mittels Abschreibungsverfahren, wie der arithmetisch-degressiven Abschreibung¹⁵. [INS99] Der Restwert ist positiv, sofern der Aufwand der Verwertung kleiner

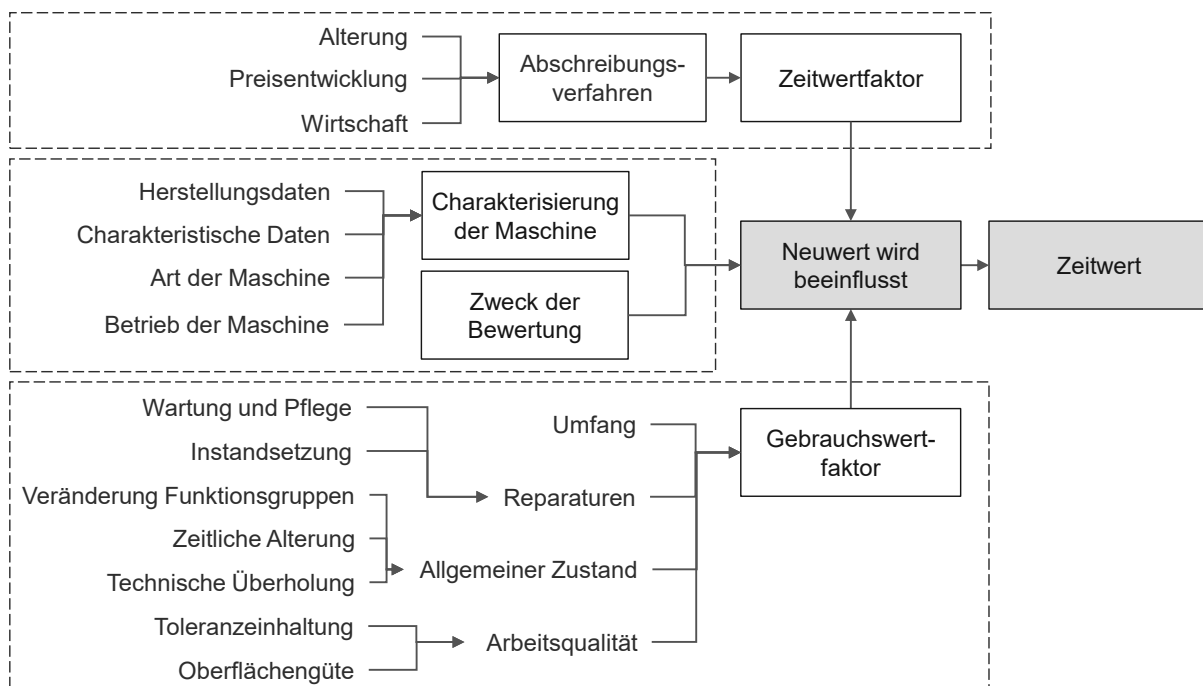


Abbildung 15 Bestimmung des Zeitwertes einer Maschine in Anlehnung an [INS99]

¹⁵ Der Wiederbeschaffungswert der Maschine ergibt sich aus dem Kaufpreis oder dem Wert einer vergleichbaren Maschine auf dem Markt. Der Verkehrswert ergibt sich aus der Lage des Maschinenmarktes. [INS99]

als der zu erreichende Erlös bei Nutzungsende der Maschine ist. Das Mindestmaß hierfür ist i. d. R. die Summe der Werte verwertbarer Teile. [INS99]

Eine Werkzeugmaschine wird durch deren Art (Standard- oder Spezialmaschine), charakteristische Daten (bspw. Arbeitsbereich und Größe), Herstellungsdaten (bspw. Hersteller, Herstellungsjahr) und betriebscharakteristische Daten, zu denen Einsatzgrad und Installationsumfang zählen, beschrieben. Sowohl der Einsatzort sowie die Art der Nutzung (bspw. Serienfertigung oder Werkzeugbau), die auf die Auslastung und dadurch auf den Verschleiß schließen lässt, als auch die Anzahl der Nutzer sind weitere Faktoren. Zusätzlich ist die Betriebszeit einzubeziehen, da eine höhere Nutzungszeit zu höherem Verschleiß führt. Der Einsatzgrad beschreibt die Intensität der Nutzung. [INS99]

Des Weiteren wird der allgemeine Zustand beschrieben, ausgeführte Reparaturen angegeben und die erreichbare Arbeitsqualität ermittelt. Der Zustand definiert sich durch Veränderungen aller Funktionsgruppen der Maschine, etwa Vergrößerung des Spiels an Führungen, zeitliche Alterung und technische, sicherheitsrelevante Überholung. [INS99] Die Instandhaltungsmaßnahmen haben einen positiven Effekt auf den Wert. Die Instandsetzung kann dabei auf Schwachstellen der Maschine hinweisen, aber auch durch den Ersatz neuwertiger Bauteile zur Wertsteigerung führen. Der letzte Bestandteil der Zustandsermittlung bezieht sich auf die erreichbare Arbeitsqualität, welche die Güte der Arbeitsverrichtung beschreibt (bspw. erreichbare Toleranzeinhaltung und Oberflächengüte). [INS99]

Neben dem genannten Vorgehen werden in der Literatur auch spezielle Formen der Restwertermittlung vorgestellt, etwa die Restwertkalkulation aus Maschinenherstellersicht bei Sondermaschinen in [OTT10] oder die technische Beurteilung und Bewertung von Werkzeugmaschinen. [HIR16]

Zusammengefasst beschreibt die Abnutzung nur einen Teil der Wertentwicklung, welche wiederum nur zu einem Teil beeinflusst werden kann. Ein großer Anteil von Einflüssen mindert den Wert der Maschine und ist zugleich nicht beeinflussbar durch den Maschinennutzer.

2.2.3 Pay-per-X-Modelle

Pay-per-X Modelle sind eine Alternative zu klassischen Leasingmodellen, tragen zur Überwindung von Schwächen des klassischen Leasings bei und fokussieren dessen Stärken. [GUS10] Die Entwicklung der Digitalisierung im Zuge der vierten Industriellen Revolution wird oftmals als Grundlage dieser Modelle angesehen, welche die Messung und Übertragung von Daten vom Anwender zum Leasinggeber ermöglichen. [UUS20] Im Sinne der Verschiebung von klassischen Produkt- und Qualitätsinnovationen hin zu ganzheitlichen Geschäftsmodellinnovationen ist das genutzte Bezahlmodell von zentraler Bedeutung. [CHR16] Dabei spielen Produkt-Service-Systeme (PSS), die als Kombination aus tangibles Produkt und intangibles Service bestehen, eine bedeutende Rolle. [TUK04] Das tangible Produkt, als Vehikel für zusätzliche Services, dient der langfristigen Beziehung zum Kunden. [TUK04] Eine zentrale Innovation stellt die Verschiebung vom Produktverkauf zum Verkauf von Ergebnissen bzw. Kundennutzen dar. [ADR15] Dieser Verkauf von Kundennutzen wird auch Pay-per-X genannt. [LAD19] Das Pay-per-X Modell ist in der Literatur und Praxis nicht klar definiert und wird oft mit Begriffen wie Equipment-as-a-Service, Betreibermodell, Subskriptionsmodell, Servicication, leistungsorientierte Verträge (engl. performance based contracts) und auch mit klassischen Finanzierungsmodellen wie Leasingmodellen und Mietmodellen gleichgesetzt. [GUS10; ADR15; LAD19] Diese Arbeit leitet Pay-per-X aus dem klassischen Leasingmodell ab. (vgl. [STA10; GUS10; GEB17b])

Bereits in den 1970er Jahren hat das Unternehmen Xerox ein *Pay-per-Copy* Modell für die vom Unternehmen vertriebenen Drucker angeboten, in dem sich der Zahlungsbetrag nach der Anzahl der gedruckten Seiten richtet. [CHE02] Ein weiteres Beispiel ist das *Power-by-the-hour* Modell von Rolls-Royce, welches Flugzeugantriebe nach der Nutzungsdauer abrechnet. [KIM07] Im Konsumgütermarkt sind Pay-per-X Modelle in vielen Bereichen ein Standard geworden, [GEB17a] wodurch viele Menschen sich im Privaten an automatisierte, individuelle, flexible Services mit minimalen finanziellen Risiken gewöhnt haben. [DEL20; SAR21] Nutzungsorientierte Modelle sind in fast allen Industrien zu finden [LAD19], obwohl Studien deren Profitabilität immer wieder in Frage stellen. [BAL10; BAL15] Gründe für die Verbreitung sind u. a. die technischen Möglichkeiten der Digitalisierung. [BAH16; KAV16; HEI18; BOS21] Diese versetzen den Leasinggeber in die Lage, höhere Risiken einzugehen, bzw. durch die gewonnene Transparenz diese Risiken besser zu beherrschen. [MEN19]

Pay-per-X Modelle sind aktuell eine Randerscheinung. In [ADR15] wurden europaweit Unternehmen der fertigen Industrie befragt. Nur 21 % der Befragten bieten Pay-per-Use-Verträge an, ungefähr 1 % bieten diese regelmäßig an. Dennoch wird von einigen Autoren erwartet, dass flexible Bezahlmodelle sich im Zuge der Industrie 4.0 und durch das veränderte Nutzerverhalten durchsetzen werden. [KOT11; MÜL19] Einige Autoren weisen darauf hin, dass Services in Zukunft gänzlich von Pay-per-X Modellen bezahlt werden. [CUS15; GEB17a]

Im Grunde besteht der Ansatz von Pay-per-X-Modellen darin, Zahlungsströme vorteilhaft zu gestalten und gezielt die Anreize von Leasinggeber und Leasingnehmer (z. T. auch Hersteller) zu steuern. [LIN09; GUS10] Das X steht für einen wirtschaftlich relevanten Indikator, [STA20b] etwa die Nutzungszeit des Leasingobjektes. [UUS20] In einem Pay-per-X-Modell wird dieser Indikator als Berechnungsgrundlage der Zahlungsströme genutzt. I. d. R. wird mehr gezahlt, je weiter fortgeschritten dieser Indikator in der Zeitperiode ist. [STA20b] Daher sollte der Indikator einfach messbar sein und direkt mit der Zielsetzung des Bezahlmodells korrelieren. Anders als beim klassischen Leasing muss dieser Indikator jedoch in jeder Leasingperiode mindestens einmal gemessen werden. Im Kontext des Leasings wird über den Indikator der Anteil der Amortisation AT zum Zeitpunkt t bestimmt. Auch weitere Bestandteile der Leasingrate können beeinflusst werden. Die Mietbemessungsgrundlage MBG wird über die Grundmietzeit nicht gleichmäßig, sondern in Abhängigkeit vom Indikator X verteilt. Unter der Prämisse, dass der kalkulatorische Restwert bei einer Nutzung von X_{TG} als Erwartungswert der Summe aller X_t über die Grundmietzeit erreicht wird, ergibt sich vereinfacht folgender Zusammenhang¹⁶:

$$AT_t(X_t) = MBG \frac{X_t}{X_{TG}}, \text{ wenn } X_{TG} = \sum_{t=0}^{TG} X_t \quad (2.7)$$

Pay-per-X Modelle versprechen spezifische Vorteile für Anwender sowie Anbieter. Anwendern werden Lasten des Eigentums, wie Wartungsarbeiten, genommen. [MAU12; SCH16] Des Weiteren vermindern sich je nach Vertragsausgestaltung Risiken für den

¹⁶ Vereinfacht in diesem Zusammenhang bedeutet, dass der Restwert sich durch die Nutzung nicht verändert bzw. der kalkulatorische Restwert gleich dem realen Restwert ist.

Nutzer, was als ökonomischer Nutzen verstanden wird. [BOC18] Die potenziellen Vorteile des Leasinggebers sind Umsatzwachstum, Ausweitung des Marktanteils und Penetration neuer Märkte¹⁷. [SUN09; SUN05; GEB17a; GEB17b] Weitere Vorteile sind:¹⁸

- Vorteilhafte Preisgestaltung [FIS99; BAI09]
- Geringere Lebenszykluskosten [CUS15]
- Gewinnung umfangreicher Daten der Nutzung (transparente Nutzungshistorie) bspw. für die effiziente Produktaufbereitung für den Zweitmarkt bzw. Verlängerung des Lebenszyklus [SUN05; SUN09]
- Marktanteile in gesättigten Märkten durch Ansprache risikoaverser Kunden mit geringerer Liquidität [SUN09] und innovativer Technologien [STA10]
- Verbesserung der Kundenloyalität durch engere Beziehungen [STA10]
- Minderung der Hürden eines Kaufes durch Wegfall initialer Investitionskosten [GEB17a]

Die monetäre Vorteilhaftigkeit für Anbieter ist schwieriger zu beziffern. In der Literatur wird diese meist aus der Perspektive von Softwareprodukten betrachtet. [JIA07] Eine Übertragung auf Industrieprodukte ist nicht ohne weiteres möglich, da Produktions- und Logistikkosten sowie die eingeschränkte Skalierbarkeit ein anderes Geschäftsmodell darstellen. Hinzu kommen Unsicherheiten hinsichtlich der Instandhaltungskosten. [CUS15] Als Hindernisse der Akzeptanz von Pay-per-X-Modellen werden insbesondere die Komplexität, Zuverlässigkeit, Verantwortlichkeit, mangelndes Vertrauen in den Anbieter, wirtschaftliche Hindernisse als auch Unkenntnis bezüglich des Konzeptes und der Funktion genannt. [GUL16; HAZ17; BOC18; STA20b] Zudem werden längere Amortisationsdauern sowie Unsicherheiten bezüglich der Instandhaltung durch intransparente Nutzung erwartet. [CUS15] Aus der Perspektive des Risikomanagements sind Pay-per-X-Modelle risikoreicher für den Anbieter. [STO15] In Abhängigkeit von der Ausgestaltung des Vertrages werden unterschiedliche Risiken auf den Anbieter übertragen (Tabelle 1), die eingepreist werden.

¹⁷ Eine ausführliche Diskussion zu strategischen Auswirkungen von Pay-per-X sei [GEB17a] zu entnehmen

¹⁸ Eine Diskussion zu Vor- und Nachteilen von Performanz-basierten Verträgen mittels der Prinzipal-Agenten-Theorie lässt sich [STA10] entnehmen.

Tabelle 1 Risikoübernahme bei Pay-per-X-Modellen

Investitionsrisiko	Finanzierung wird übernommen [HÜN03]
Verfügbarkeitsrisiko	Anbieter garantiert Verfügbarkeit [OLI03]
Qualitätsrisiko	Qualität der Lösung hat direkten Einfluss auf die Verfügbarkeit beim Einsatz der Lösung [TOF08]
Marktrisiko	Nutzungsintensität hängt von der Marktlage des Kunden im Zeitverlauf ab [STA10]
Kapazitätsrisiko	Erhöhung der Kapazitäten des Objektes bei steigenden Anforderungen des Kunden liegen im Interesse des Anbieters [THI08]
Prozessrisiko	Störungen in vorgelagerten Prozessen beim Anwender haben Einfluss auf die Nutzung des Objektes [STO15]
Verhaltensrisiko	Abnutzung durch unsachgemäße Nutzung wird durch das Eigentumsverhältnis übernommen [TOF08]

Anreize, Informationsasymmetrie und das Prinzipal-Agenten-Problem

Im Leasingverhältnis hat der Leasinggeber normalerweise wenig bis keine Informationen darüber, wie das Leasingobjekt über die Grundmietzeit genutzt wird und wie sich Zeitwert und Restwert des Objektes verändern. Aus diesem Grund muss der Leasinggeber den Zeitwert schätzen. [STA20b; KAL03] Zudem ist der Verschleißfortschritt erfahrungsgemäß weder durch den Anbieter noch durch Nutzer zu erkennen und der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Belastung und der Entwicklung des Abnutzungsvorrates kaum nachvollziehbar. Dies ist insbesondere aufgrund der konträren Zielsetzungen von Leasinggeber und -nehmer problematisch. Der Leasingnehmer hat das Ziel, mit Hilfe der Werkzeugmaschine eine möglichst hohe und effiziente Maschinenauslastung zur Erreichung der eigenen ökonomischen Ziele zu erzielen. Der potenzielle Mehrverschleiß der Maschine wird in Kauf genommen. Das primäre Interesse des Leasinggebers liegt als Eigentümer hingegen bei der Wertstabilität der Maschine. Da er das Verhalten des Leasingnehmers nur eingeschränkt antizipieren kann, beaufschlagt er die Leasingrate mit einer Risikoprämie. [GLA18; STA20b] Es herrscht die Auffassung, dass in Geschäftsmodellen, in denen der Nutzer nicht gleichzeitig der Eigentümer ist, verantwortungsloser mit dem Eigentum des Vertragspartners umgegangen wird, was sich in einer gesunkenen Effizienz und steigendem Verschleiß niederschlägt.

[BAR12; COH14; BEN19] Hieraus resultiert u. a., dass Produkte dahingehend ausgelegt werden, um der höheren Belastung Stand zu halten. [BAK14; FRA15]

Diese Informationsasymmetrie gepaart mit den gegensätzlichen Zielen der Vertragspartner führt zu Ineffizienzen und wird in der Literatur oft durch die Prinzipal-Agenten-Beziehung (PAB) beschrieben. [KAL03; GLA18; STA20b] Die PAB besteht dann, wenn in einem Vertragsverhältnis eine Partei (der Agent) für eine andere Partei (den Prinzipal) agiert und dabei seinen Wissensvorsprung zur Ausführung seiner Aufgaben ausnutzen kann. [ROS73; SAP91; SHA97] Hierbei besteht ein Abhängigkeitsverhältnis, in welchem der Prinzipal und dessen Ziele von der Arbeit des Agenten, welcher wiederum eigene Ziele verfolgt, abhängig sind. Diese Ziele können von denen des Prinzipals abweichen. Grundsätzlich ist der Prinzipal an hohem Nutzen bei niedriger Bezahlung interessiert, der Agent an niedrigem Aufwand bei hoher Bezahlung. [EIS89; SPR89] Um diesen Zielkonflikt zu lösen, versucht die Prinzipal-Agenten-Theorie (PAT) durch vertragliche ex ante Anreizgestaltung die Ziele von Agenten und Prinzipal anzugleichen. [EIS89; KIM05] Das Bezahlmodell wird als geeigneter Ansatzpunkt gesehen [FIR87; EIS89; SPR89; KIM07] Nach [EIS89] haben ergebnisabhängige Verträge Potential, die Präferenzen beider Parteien zu harmonisieren und Zielkonflikte aufzulösen. Da nicht alle Ergebnisse dem Agenten zugeschrieben werden können, sind solche Verträge nur bei vorhersehbaren Ergebnissen anwendbar. [EIS89] Dabei lassen sich generell drei Arten von Informationsasymmetrien unterscheiden: [ARR91; BER92; HES99; LAF09]

- Hidden Action: der Leasinggeber hat keine Informationen darüber, wie die Maschinen durch den Leasingnehmer genutzt werden
- Hidden Intention: der Leasinggeber kennt die Motive des Leasingnehmers nicht und kann sein Verhalten dadurch auch nicht beeinflussen
- Hidden Characteristics: der Leasingnehmer versteckt nachteilige Charakteristiken (bspw. geplante Intensität der Maschinennutzung)

Auf Basis der Informationsasymmetrie kann sich ein sog. *Moral Hazard* herausbilden. Dies beschreibt ein Risiko, bei welchem sich Leasinggeber durch falsche Anreize unangebracht verhalten, solange diese nicht selbst die Konsequenzen tragen. [HES99; STA10; MAC11] In [ZIP20] werden Anreizsysteme vorgestellt, die zum Ziel haben, das Teilen von Informationen in Wertschöpfungssystemen zu stärken. Dabei wird besonders das Aufteilen von Vorteilen auf Anbieter und Kunden in den Vordergrund gestellt.

In [STA10] werden leistungsorientierte Verträge in der fertigen Industrie untersucht. Im Rahmen der PAT ergeben sich folgende Vorteile und Unsicherheiten¹⁹ (Tabelle 2).

Tabelle 2 Vorteile und Unsicherheiten in Performanz-basierten Verträgen [STA10]

Anbieter (Leasinggeber)	Konsument (Leasingnehmer)
Hochinnovative Produkte lassen sich durch den Übergang von Risiken durch ungewisse Vorteile bei risikobewussten Kunden besser adressieren	Durch das Anpassen von Anreizen kann von den gesunkenen Kosten beim Anbieter durch Effizienzsteigerungen direkt profitiert werden
Durch Anreizsysteme zur Effizienzsteigerung lassen sich Profite des Herstellers signifikant erhöhen	Durch Anreizsysteme zur Effizienzsteigerung lassen sich Produktivität und Qualität verbessern
Durch das Anpassen von Anreizen und Zielen lässt sich die Kundenloyalität verbessern	Bei Output-orientierten Modellen kann es zu Unsicherheit bezüglich der Produktivität und Qualität des Ergebnisses kommen
Unsichere Einnahmen durch unsichere ökonomische Entwicklungen bei Output-orientierten Modellen stehen dem Moral Hazard und Adverse Selection sowie höheren Unsicherheiten bei Instandhaltungskosten bei Verfügbarkeits-orientierten Modellen gegenüber	

Ein Ansatz zur Lösung der Probleme im Rahmen der PAB besteht in der Verminderung der Informationsasymmetrie. Hierdurch wird die Nutzung der Maschine transparenter für den Leasinggeber, während sog. *Hidden Actions* direkt sanktionierbar sind. [HES99; STA10; STA20b] Ein alternativer Ansatz zielt auf die Beeinflussung der initialen Zielsetzung des Leasingnehmers durch vertragliche Anreize ab, sodass diese nicht mehr im Gegensatz zu den Zielen des Leasinggebers stehen. [EIS85; EIS89; STA10; STA20b] Der Einfluss von Pay-per-X auf das Verhalten des Nutzers ist bereits in der Literatur dokumentiert²⁰. [AJZ91; BOC18] Möglichkeiten der Beeinflussung rangieren zwischen bloßer Information bis hin zum Zwang (Tabelle 3). [TAN10]

¹⁹ Weitere Quellen haben den Zusammenhang von PAT und Performanz-basierten Verträgen mit Hilfe von Operations-Research Methoden untersucht. Für eine vertiefte Diskussion sei auf [STA10] verwiesen.

²⁰ Im Forschungsbereich zum *Design von Produkten für nachhaltiges Verhalten* werden Theorien der Psychologie angewandt, um das Verhalten von Individuen durch sog. Artefakte zu untersuchen. Das Verhalten wird dabei insbesondere durch Einstellungen, Absichten, soziale Normen und andere Einflussfaktoren beeinflusst. Weitere Ansätze können aus den Bereichen der Philosophie kommen oder der Theorie der sozialen Praxis. [BOC18]

Tabelle 3 Strategien der Beeinflussung im Rahmen der Informationsasymmetrie

Informationsstrategie	Dem Nutzer werden alle notwendigen Informationen über das System und die Reaktionen bei bestimmten Verhalten gegeben, sodass er sich informiert entscheiden kann.
Nudging ²¹	Subtile Beeinflussung des Verhaltens, um die Verhaltensentscheidung intuitiv zu gestalten [THA08]
Zwang	Ein bestimmtes Verhalten wird durch Bestrafung erzwungen

Solche Strategien sind den Umständen entsprechend einzusetzen. [WEV08] Pay-per-X Modelle können aufgrund ihrer Gestaltung dem Nudging oder der Informationsstrategie zugeordnet werden. In [BOC18] wird am Beispiel von Waschmaschinen gezeigt, dass das Konsumverhalten hin zu einer ökologischeren Nutzung beeinflussbar ist. Nach [TUK04] wird dies insbesondere dadurch erreicht, dass ein Bewusstsein für die Kosten aufgebaut wird. Dieses ist notwendig, um das eigene Verhalten gemäß den eigenen Zielen auszurichten. Das Pay-per-X-Modell führt damit durch dessen Gestaltung zu einer Änderung des Nutzungsverhaltens. Diese hängt von der Art der Anreize ab, welche für Leasinggeber und -nehmer sowie Hersteller vorhanden sind. Auch wenn diese Änderung des Verhaltens nicht explizit geplant oder beabsichtigt ist, tritt sie dennoch auf [THA08] und ist ex ante nutzbar.

Strukturierung bestehender Modelle

Zahlreiche Kostenindikatoren sind denkbar, welche nach [HÜN03; TUK04; LIN09] strukturiert werden können. In [LIN09] werden unterschiedliche Typen von Verträgen im Sinne der PSS von [TUK04] hergeleitet, wobei die Modelle danach gegliedert werden, ob der Indikator sich auf den Input oder Output des Prozesses bezieht. [STA20b] Bei Input-orientierten Modellen wird die Nutzungsintensität mit den zu zahlenden Leasingraten gekoppelt. Unter sonst gleichen Umständen ist es für den Leasingnehmer damit von Vorteil, die Nutzungsintensität so niedrig wie möglich zu halten. Bei Output-orientierten Modellen hängen die Leasingraten vom Prozessoutput ab. Da dieser i. d. R. durch den Kunden des Anwenders definiert ist, ist eine Anreizsteuerung kaum möglich. Der Vorteil für den Leasingnehmer besteht in der Fokussierung auf den Pay-as-

²¹ Ein passender deutscher Begriff ist nicht bekannt. Dieser kann grob mit Schubs oder Stupser übersetzt werden.

you-earn Zusammenhang, wobei nur Kosten entstehen, wenn ein Wert für den eigenen Kunden geschaffen wird. Damit lassen sich die Ausgaben direkt mit Einnahmen decken. Im klassischen Leasing sind im Vergleich dazu die Raten auch dann zu zahlen, wenn die Maschine nicht ausgelastet ist. Hierdurch entstehen für den Leasinggeber jedoch Nachteile, da das Marktrisiko des Leasingnehmers zum Teil übertragen wird. [STA20b]

In Tabelle 4 sind Modelle und deren Risikoübernahme gegenübergestellt. Der Reifenhersteller *Michelin* bietet ein *Pay-per-Kilometer* Modell an [ULA13], während in der Automobilbranche bei Leasing und Versicherung bereits *Pay-as-you-drive* Modelle auf Basis des Fahrverhaltens angeboten werden. [AYU19] Auch im Werkzeugmaschinenbau sind *Pay-per-X* Modelle auf dem Markt zu finden. [STA20b] Von der *Commerzbank* und der *EMAG GmbH & Co KG* wird ein *Pay-per-Use-Kredit* für Werkzeugmaschinen angeboten, welcher im Kern die Rückzahlung eines Investitionskredites an die Nutzungsintensität koppelt. [THE18] Auch andere Institute, wie die *Deutsche Bank* mit ihrem *Asset-as-a-Service* Modell, experimentieren mit vergleichbaren Ansätzen. [BAC21] Durch das Unternehmen *Siemens Financial Services* wird das *Pay-for-performance-Modell* angeboten. Zahlungen bestehen hierbei aus einem Grund- und einem nutzungsabhängigen Betrag. Neben der flexiblen Bezahlung wird insbesondere die Erleichterung des Einstiegs in die Digitalisierung durch moderne Technik beworben. [SIE18]

Bei *DMG MORI AG* werden solche flexiblen Bezahlmodelle als *Equipment-as-a-Service* angeboten und setzen sich auch aus einer monatlichen Grundgebühr und einer variablen Nutzungsgebühr zusammen. Zusätzliche Dienstleistungen, wie Full-Service-Verträge und Versicherungen, werden außerdem angeboten. [TAN21] Weiter sei das *Cutting-by-the-Hour* Modell der *Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH* erwähnt, welches im Kern ein *Pay-per-Use-Modell* ist, in welchem der Kunde für die Bewegung der Vorschubachsen und Spindel zahlt. Es handelt sich um einen Full-Service-Vertrag, in welchem zur Risikominimierung eine halbjährliche große Wartung der Maschine mit einer permanenten Maschinenüberwachung über Sensorik kombiniert wird. [GEB21] Das *Pay-per-Use* Modell der Firma *J.G. Weisser* ist ein Mietmodell, das zusätzliche Services betrachtet und die Auslastung der Hauptspindel als Indikator nutzt. [BRE20] Auch Output-orientierte Modelle lassen sich in der Industrie finden. So bietet *Trumpf GmbH + Co. KG* ein *Pay-per-Part* Bezahlmodell in der Blechbearbeitung an, in welchem nach der

Anzahl gefertigter Teile abgerechnet wird. Die Kosten je Teil werden vertraglich definiert. [MÖL20] *Heidelberger Druckmaschinen AG* bietet ein *Pay-per-Print* Modell an. Auch dieses Modell setzt sich aus eine Basisbetrag und einem flexiblen Teil zusammen. [SCH18b] *Kennametal* hat dieses Modell weitergedacht, indem die Optimierung der Kosten pro Bauteil garantiert wird. [KEN21]

Tabelle 4 Pay-per-X-Bezahlmodelle im Maschinenbau inklusive Risiken für den Leasinggeber

Bezahlmodell		Indikator	Investitionsrisiko	Verfügbarkeitsrisiko	Qualitätsrisiko	Marktrisiko	Kapazitätsrisiko	Prozessrisiko	Verhaltensrisiko
Input	Pay-per-Use	Nutzungsgrad [THE18; BAC21], Betriebsstunden[SIE18], Spindelstunden [BRE20]	x			(x)			x
	Pay-on-Availability	Verfügbarkeit	x	x	x				x
	Pay-per-Stress	Maschinenbelastung [STA20b]	x		(x)	(x)			
Output	Pay-per-Part	Anzahl Blechteile [MÖL20], Anzahl Drucke [SCH18b]	x		(x)	x	x	x	x
	Pay-per-sold-Products	Verkaufte Produkte [STA20b]	x		(x)	x	x	x	x
	Performanz basiert	Kostenoptimierung pro Bauteil [KEN21]	x		(X)	x			x

X = trifft zu, (X) = trifft zum Teil zu

Belastungsbasierte Modelle werden in der Literatur als mögliche Alternative zum Pay-per-Use vorgestellt. [BRE20; BUN21c] In [BRE20] wird das belastungsorientierte Pay-per-Stress Modell als Weiterentwicklung des Pay-per-Use Modells genannt, das primär für schwach beanspruchte Standardmaschinen geeignet ist. Pay-per-Stress hingegen scheint für stark beanspruchte Spezialmaschinen anwendbar, bei welcher die Belastung bepreist werden kann. Auch wenn komplexere Pay-per-X-Modelle, die über die Nutzungszeit hinausgehen, in der Literatur diskutiert werden, ist neben den eigenen Vorarbeiten des Autors aus dem gleichnamigen Pay-per-Stress-Forschungsprojekt kein vergleichbares Modell bekannt. [STA20b; BOS21; KOH21; STA21b] Das Pay-per-Stress-Modell nach [STA20b] nutzt die Belastung auf die Werkzeugmaschine, die deren Ab-

nutzungsvorrat und Wertverlust abbildet, als Indikator. Für die relevanten, verschleißenden Baugruppen der Werkzeugmaschine werden explizite Indikatoren entwickelt und auf Maschinenebene aufsummiert. Das Pay-per-Stress-Modell hat den einzigartigen Vorteil, das Verhaltensrisiko für den Leasinggeber zu minimieren. Es ist jedoch weiterhin zum Teil dem Qualitätsrisiko und dem Marktrisiko ausgesetzt. Das für diese Arbeit genutzte Pay-per-Stress-Modell wird in Kapitel 4.2 auf Basis des Stands der Wissenschaft und Technik genauer beschrieben.

Zusammenfassend fokussieren sich Output-orientierte Modelle auf Maschinen, welche eine geringe Produktvariabilität besitzen. Im Vergleich dazu finden sich Input-orientierte Modelle bei Maschinen, welche eine hohe Produktvariabilität aufweisen. Neben Modellen, die dem Leasing oder der Miete sehr nahe sind, werden auch Kredite nach dem Vorbild von Pay-per-X angeboten. Der Hersteller übernimmt i. d. R. nicht das finanzielle Risiko, sondern ein Finanzierungspartner. Die Höhe der Kosten setzt sich aus einer Mindestnutzung, einer prognostizierten Nutzungsdauer und weiteren Kennzahlen, wie etwa der Bonität des Leasingnehmers, zusammen. Das belastungsbasierte Modell stellt eine Neuheit dar, setzt sich durch spezifische Vorteile von allen anderen Ansätzen ab und ist in dieser Form nicht im Detail bekannt.

2.3 Ansätze zur Bewertung von Bezahlmodellen

In diesem Kapitel werden die Bewertungsmodelle einer Investitionsentscheidung im Rahmen des Pay-per-X-Modells vorgestellt. Hierzu werden im ersten Schritt spezifische Bewertungsmethoden aus den Bereichen des Leasings und der Pay-per-X-Ansätze diskutiert. Daraufhin werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen der Investitionsentscheidung dargelegt und in den Kontext der Lebenszykluskostenrechnung gesetzt. Zuletzt werden Bewertungsmodelle bei Unsicherheit beschrieben.

2.3.1 Bewertungsmethoden von Bezahlmodellen

Folgend werden Bewertungsansätze von Leasingmodellen und flexiblen Bezahlmodellen diskutiert. Leasing wird oft durch einen Vergleich mit dem Kauf durch Kredit bewertet. In [BEI12] wird die Vorteilhaftigkeit des Finanzierungsleasings im Vergleich zum Kreditkauf ausführlich untersucht, indem qualitative wie quantitative Kriterien herangezogen werden. Quantitativ wird dabei durch einen Wirtschaftlichkeitsvergleich mit-

tels Endwertmethode die kritische Leasingrate berechnet, bei welcher der Leasingnehmer indifferent bezüglich der Entscheidung ist. Es wird von sicheren Zahlungsreihen ausgegangen, welche in der Vermögensendwertmethode verrechnet werden.

Da der Investor nicht ausschließlich quantitative Argumente für die Entscheidung nutzt [SCH60; HAR68; TAC99], werden zusätzlich qualitative Kriterien eingeführt [GAB92]. Diese sind von besonderer Bedeutung, wenn die Unsicherheit der Wirtschaftlichkeitsberechnung sehr hoch ist oder die Ergebnisse der Alternativen sehr eng beieinander liegen. [BEI12] Eine Möglichkeit der Integration dieser Faktoren besteht in der Realisierung über eine Nutzenfunktion, welche jedoch stark subjektiv auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst zu interpretieren ist. [SCH60; HAR68] Eine solche Funktion birgt die Gefahr der Fehlentscheidung, da nach [SCH60] ein „Anschein der Wissenschaftlichkeit“ erzeugt wird. In [BEI12] werden die meisten qualitativen Argumente für das Leasing als nicht entscheidungsrelevant eingestuft und demzufolge die Wirtschaftlichkeitsanalyse als alleiniges Entscheidungskriterium herangezogen. [SCH92; DRU92; SCH94] In [GAB01] werden für den Vergleich von Kauf gegen Leasing qualitative und quantitative Kriterien genutzt. Bei dem quantitativen Vergleich werden die Auswirkungen auf die zu versteuernde Gewinnsituation des Leasingnehmers und seine Liquiditätssituation in den einzelnen Perioden untersucht. Als Determinanten eines Vergleichs werden Vergleichsmethoden vorgestellt (bspw. Barwertmethode), mögliche Zielfunktion (bspw. Maximierung der Nettogewinne), der Kalkulationszins, der Planungszeitraum und weitere Prämissen der Vergleichsrechnung erläutert.

In der Literatur werden zudem zahlreiche Ansätze der ökonomischen Bewertung von Pay-per-X-Modellen beschrieben. Einige Autoren befassen sich ausschließlich mit der qualitativen Bewertung dieses Geschäftsmodells. [GAS14; CHR16] Weitere gehen auch auf quantitative Vergleiche ein. Die meisten Methoden beziehen sich dabei auf Softwareprodukte, was der Historie von Pay-per-X geschuldet ist. [STO15] In [YAN20] werden zahlreiche Methoden zum Vergleich von Pay-per-Use und Verkaufsstrategien vorgestellt und diskutiert. Diese erfolgen auf Geschäftsmodell- und nicht auf Objektebene. Im Vergleich dazu werden in [GAI14] und [AGR17] der ökologische Einfluss von Pay-per-Use Modellen untersucht. Die Methoden von [YAN20; AGR17; GIL14] untersuchen Strategien des kombinierten Angebots von Pay-per-X und dem Produktverkauf, wobei [YAN20] die Verfügbarkeit von Produkten genauer untersucht. [LAD19] vergleicht den

Produktverkauf und das Pay-per-Use Modell von Monopolen und Duopolen. Eine Methode zur ökonomischen Bewertung zwischen Leasing und Pay-per-Use Lizenzierung für Softwareprodukte wird in [POS09] vorgestellt. Für die Modellierung wird die potenzielle Nutzung der Software mit Wahrscheinlichkeitsfunktionen abgebildet, wobei jeder potenzielle Nutzer einen maximalen Preis besitzt, welchen er bereit ist zu zahlen. Dieser dient als Grundlage des Vergleichs, wenn der Preis linear abhängig vom Nutzungsgrad ist. Im Vergleich dazu werden in [BAL10; BAL15] für Informationsgüter unterschiedliche Preismodelle mittels Nutzungsfunktionen und deren Bepreisung verglichen. Weitere Quellen vergleichen Pay-per-Use- und nutzenbasierte Preismodelle mit Alternativen [FIS99], etwa in [WEI18] am Beispiel eines Public-Cloud-Anbieters mittels einer Monte-Carlo-Simulation. In [LOW18] werden zahlreiche Preismodelle im Rahmen von Pay-per-Use von Cloud-Services miteinander verglichen. Spezielle Preismodelle von Softwareprodukten und As-a-Service-Preismodelle für Industrieunternehmen werden in [WU15] untersucht.

In der Domäne des Maschinenbaus sind Methoden eines Vergleichs kaum vorhanden. Eine Übertragung ist nicht trivial, da das Angebot i. d. R. aus einem physischen Gut besteht, welches für den spezifischen Kunden hergestellt werden muss und nutzungsunabhängige Fixkosten generiert. [STO15] In [LAN18] wird das aktuelle Geschäftsmodell von Herstellern von Industrierobotern vorgestellt und mit potenziellen Leasing- und Pay-per-Use Modellen qualitativ verglichen. Pay-per-Use wird besonders bei geringen Stückzahlen und gleichzeitiger hoher Produktvarianz als besonders vorteilhaft angesehen. Je höher die Volumina pro Produkt und damit auch die Transition zu einem kontinuierlichen Produktionsfluss mit geringer Produktvarianz, desto sinnhafter sind das klassische Leasing oder der Kauf. [LAN18] In [STO15] werden für Industrieunternehmen unterschiedliche Preisstrategien qualitativ und quantitativ miteinander verglichen. Die Kostenstruktur wird in nutzungsabhängige (bspw. Reparaturkosten) und nutzungsunabhängige Kosten (bspw. Produktionskosten des Gutes) untergliedert. Bei einer analytischen Modellierung des erwarteten Nutzens des Kunden und der Kosten ergibt sich, dass Anbieter mit niedrigen nutzungsunabhängigen Kosten einen Vorteil bei nutzungsabhängigen Bezahlmodellen haben. Hohe nutzungsunabhängige Kosten führen dazu, dass ein minimaler Nutzungslevel eingeführt werden muss. Sämtliche Zahlen werden als deterministisch und ex ante bekannt angenommen, sodass jedem

potenziellen Kunden ein bekannter Nutzen zugeordnet werden kann. [THI08] untersucht das Potential von nutzungsabhängigen Bezahlmodellen bei sog. smarten Produkten im Vergleich zum Kauf. Hierzu wird ein analytisches Modell einer Supply Chain zwischen Maschinenhersteller und Anwender modelliert, das unter anderem die stochastische, normalverteilte Auslastung der Maschine beim Einsatz simuliert. Durch das nutzungsabhängige Modell lassen sich die Schwankungen der Auslastung direkt mit den Kosten vereinbaren.

Zusammengefasst ist die Bewertung von flexiblen Bezahlmodellen eine Entscheidung unter Unsicherheit, deren Risiken jedoch im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation abschätzbar sind. Bei der Bewertung von Leasingmodellen sind diese Modelle bisher kaum im Einsatz, da die Zahlungsströme sich deterministisch berechnen lassen. Pay-per-X Modelle und nutzungsabhängige Modelle werden in der Literatur auf unterschiedliche Art und Weise untersucht, bei welchen die Simulation von Risiken besonders interessant sind. Die Literatur beschäftigt sich meist mit intangiblen Produkten, welche schwer auf den Anwendungsfall der Werkzeugmaschine zu übertragen sind. Die bestehenden Ansätze im Maschinenbau sind nicht zufriedenstellend auf den Anwendungsfall dieser Arbeit übertragbar. Folgend sollen auf Basis dieser Diskussion die für das eigene Bewertungsmodell notwendigen Grundlagen vorgestellt werden.

2.3.2 Investitionsentscheidung

Jedes Unternehmen muss die finanzwirtschaftlichen Ziele der Rentabilität, Liquidität und Sicherheit verfolgen. Rentabilität beschreibt das Verhältnis zwischen Ergebnis- und Bezugsgröße, Liquidität die Fähigkeit eines Unternehmens zu jedem Zeitpunkt seinen Zahlungsverpflichtungen nachzukommen und Sicherheit ist die Begrenzung finanzieller Risiken. [BEC18] Als Investition wird die autonome Anschaffung eines Investitionsobjektes verstanden. [BLO13; BUS18] Alle mit der Beschaffung, Nutzung und Veräußerung bzw. dem Abbruch des Investitionsobjektes verbundenen Ein- und Auszahlungen sind für die wirtschaftliche Bewertung der Investition heranzuziehen. [BUS18] Die Investitionsrechnung ist beschrieben durch Ein- und Auszahlungen, Zahlungszeitpunkte und deren Ungewissheitsgrad. Ihr Ziel besteht darin, die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer Entscheidung gegenüber Alternativen zu beschreiben. Dabei ist das Eigentumsverhältnis beim Investitionsbegriff nicht relevant. [BUS18]

Die Investitionsrechnung lässt sich grundsätzlich in statische und dynamische Verfahren unterscheiden. Statische Verfahren sind durch eine einperiodische Betrachtung charakterisiert und betrachten bspw. Jahresdurchschnittswerte der Kosten einer Maschine. Sie sind einfach und betrachten zeitliche Unterschiede von Zahlungsströmen nicht. [BLO13; BEC18] Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich dynamische Verfahren betrachtet, die durch eine mehrperiodische Betrachtung charakterisiert sind, wobei alle Zahlungsströme des Investitionsobjektes in der Periode, in der sie anfallen, betrachtet werden. Da die Höhe dieser Zahlungsströme von Periode zu Periode variabel ist und Zahlungsbewegungen, die in der Zukunft liegen, als weniger wertvoll gelten, werden diese entweder auf den Zeitpunkt des Investitionsbeginns abgezinst oder auf den Endzeitpunkt der Investitionsdauer aufgezinst. [BEC18] Beispielhaft sind die Kapitalwertmethode, die Methode des internen Zinsfußes, die Annuitätenmethode, der vollständige Finanzplan und das dynamische Endwertverfahren als gängige Ansätze zu nennen. [BEC18]

Exemplarisch soll die Kapitalwertmethode erläutert werden, da diese als der gängigste Ansatz in der Praxis gelten kann. Hier wird der Kapitalwert K_0 einer Investition berechnet, indem alle Einzahlungen E und Auszahlungen A im jeweiligen Zeitpunkt t mit dem geeigneten Zinssatz i diskontiert werden. Dabei ist K_0 die Summe aller Barwerte aller zukünftigen Zahlungsströme inkl. der Anschaffungsanzahlung A_0 und des Liquidationserlöses L_n :

$$K_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n} \quad (2.8)$$

Dabei sind $E_t - A_t$ die Einzahlungsüberschüsse. Zu den Einnahmen werden Nettoeinnahmen aus dem Produktverkauf und der Veräußerung der Anlage zugerechnet (und ggf. Einsparungen der Betriebsausgaben). Zu den Ausgaben gehören die Investitionsausgaben, Betriebsausgaben und entfallene Einnahmen. [BUS18] Die Investitionsalternative mit dem größten Kapitalwert wird als vorteilhaft erachtet.

Die Finanzierungsseite wird über den Zins abgebildet und hat einen großen Einfluss auf die Investitionsentscheidung, da zukünftige Zahlungsströme bei hohem Zins im Vergleich zu heutigen einen geringeren Einfluss auf den Kapitalwert haben.²² Der angegebene Zins beschreibt die Kapitalkosten, welche aus dem Kapitalmarkt abzuleiten sind.²³ Damit spielt die Art der Finanzierung des Unternehmens eine Rolle und kann über die individuellen, gewichteten Kapitalkosten (engl. Weighted Average Cost of Capital, WACC) dargestellt werden. Der Zinssatz setzt sich aus einer Maßzahl für die Zeitpräferenz und einem Risikozuschlag zusammen. Je höher das Risiko, desto höher der Zins. [BUS18] Der einheitliche Zinssatz ist eine Vereinfachung der Realität (identischer Soll- und Habenzins und Unabhängigkeit vom Investitionsrisiko). [BEC18]

Als nachteilig wird bei allen genannten Methoden die Unsicherheit bei der notwendigen exakten Schätzung der Zahlungsströme gesehen. Von der Qualität dieser Schätzung hängt die Qualität der Investitionsentscheidung ab. [BUS18]

2.3.3 Entscheidungen unter Unsicherheit

In der Praxis sind Investitionsentscheidungen meist mit Unsicherheiten behaftet. Der Grad der Ungewissheit spielt eine wichtige Rolle, da eine sichere Einzahlung als höherwertig eingeschätzt wird als eine unsichere gleicher Höhe. [BUS18] Unsicherheit kann in Risiko und Ungewissheit untergliedert werden, wobei das Risiko durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung²⁴ der Umweltzustände beschrieben wird. Sind die Verteilungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht bestimmbar, so wird von Ungewissheit gesprochen. [BAM12; BEC18] Derart unsichere Eingangsgrößen führen zu unsicheren Kapitalwerten. Ansätze zur Integration von Risiko und Ungewissheit in die Entscheidung sind Thema zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen. [BUS18] Hierzu gehören Korrekturverfahren, Szenariotechniken, Sensitivitätsanalysen, Rendite-Risiko-Profile und Risikoanalysen. [HAX98; BUS18; BEC18]

Korrekturverfahren belegen Eingangsgrößen mit Sicherheitsaufschlägen, bspw. den Kalkulationszinssatz oder die Zahlungsströme. Sowohl die Definition der Aufschläge als

²² Eine Diskussion weiterer Annahmen der Kapitalwertmethode sei [BUS18] entnommen

²³ In anderen Worten ist der Zins der Preis für die Überlassung einer Einheit Geld für eine definierte Zeit oder der Preis für die entgangene anderweitige Nutzungsmöglichkeit.

²⁴ Diese können objektiv (empirische Häufigkeitsverteilungen ähnlicher Entscheidungssituationen) oder subjektiv (subjektive Erfahrungen und Überlegungen) bestimmt werden [BEC18]

auch die Verschleierung des diesem Wert beiwohnenden Risikos sind jedoch Herausforderungen. Bei der Szenariotechnik werden unterschiedliche Einschätzungen der Zukunft definiert und jeweils analysiert. Dabei werden i. d. R. positive wie negative Entwicklungen anderen potenziellen Entwicklungen gegenübergestellt, indem die Eingangsgrößen je Szenario gezielt verändert werden. Für jedes Szenario wird eine Investitionsrechnung durchgeführt. Dabei ist es aufwändig, jedes Szenario für sich ex ante zu definieren. [BAU13; BUS18] Die Sensitivitätsanalyse dient der Messung der Empfindlichkeit der Zielgröße bei Beeinflussung von Eingangsgrößen, insbesondere bei Änderung von ungewissen Variablen. Hierbei werden kritische Werte ermittelt, bei denen der Kapitalwert unter null fällt oder die Amortisationszeit einen kritischen Wert überschreitet. [BRÜ11] Das μ - σ -Prinzip stellt die erwarteten Renditen auf Basis von Wahrscheinlichkeiten dar. Ist der Investor risikoneutral, so kann der Kapitalerwartungswert als Entscheidungsgrundlage genutzt werden. Ist dies nicht der Fall, kann als zweiter Parameter die Streuung der Kapitalwerte um den Erwartungswert zur Risikomessung eingeführt werden. Eine solche Entscheidungsgrundlage ist jedoch weiterhin eine starke Vereinfachung der vollständigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und birgt die Gefahr von Fehlinterpretationen. [WOL08] Die Maximierung der Risikonutzenfunktion stellt eine Erweiterung dar, die die Risikoeinstellung des Investors widerspiegelt. [BUS18]

Die Risikoanalyse nutzt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße oder Eingangsgrößen mittels analytischer oder simulationsbasierter Ansätze als Entscheidungsgrundlage. Ist der Kapitalwert direkt als Wahrscheinlichkeitsverteilung benennbar, kann das Risikoprofil²⁵ verwendet werden. Risikoprofile alternativer Investitionen lassen sich direkt miteinander vergleichen. Die Zielgröße der Verteilung einzelner Eingangsgrößen kann durch die Risikosimulation abgeleitet werden. Hierzu sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsgrößen entweder analytisch oder simulativ zusammenzufassen. [BUS18] Durch die Komplexität der analytischen Verfahren bei komplexeren Anwendungsfällen wird der simulative Ansatz empfohlen. [HIL63; HIL65; BUS18; BEC18] Dieser Ansatz soll im Rahmen dieser Arbeit verfolgt werden.

²⁵ Das Risikoprofil gibt die kumulierte Wahrscheinlichkeit an, dass die Zielgröße einen bestimmten Wert überschreitet. Ein Vergleich erfolgt über die stochastische Dominanz 1. und 2. Grades. Mehr dazu in [BUS18]

2.3.4 Simulationsbasierte Bewertung

Die Simulation ist besonders dann nützlich, wenn eine analytische Beschreibung nicht möglich, sehr aufwändig oder zu stark vereinfacht ist. [DOM15] Unter dem Begriff Simulation ist laut [VDI 3633-1b] die Nachbildung „[...] eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell²⁶, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [...]“ [VDI 3633-1b] zu verstehen. Generell lassen sich folgenden Arten der Simulation definieren: Die Monte-Carlo-Simulation, die diskrete Ereignis-Simulation, die kontinuierliche Simulation und die agentenbasierte Simulation. [DOM15] Die diskrete Ereignis-Simulation betrachtet die Modellierung von dynamischen Systemen, indem der Zustand durch zeitabhängige Zustandsvariablen beschrieben wird. Bei der kontinuierlichen Simulation verändern sich die Zustandsvariablen kontinuierlich mit der Zeit. Die agentenbasierte Simulation betrachtet dynamische Systeme mit komplexen Wirkungszusammenhängen der Systemelemente. Diese sind durch heterogenes, sich und gegenseitig beeinflussendes Verhalten der Systemelemente charakterisiert. Die Monte-Carlo-Simulation wird bei der Analyse von statischen, stochastischen Systemen durch sog. Stichprobenexperimente eingesetzt. Durch die Kombination von zufälligen, aufeinander folgenden, unabhängigen Parameterausprägungen werden wiederholt Stichproben möglicher Szenarien aus bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilungen generiert und über die Wirkungszusammenhänge die jeweiligen Ergebnisse aggregiert. [DOM15] Die Anzahl der Wiederholungen hängt von der Komplexität der Verteilungen ab. [BLO13]

Das Simulationsmodell wird durch die Aufbaustruktur beschrieben. Diese setzt sich aus den Modellelementen und deren definierten Relationen zueinander zusammen. Der Zustand der Elemente wird durch eine Kombination möglicher Eigenschaften in Form von Zustandsgrößen, sog. Attributen, beschrieben. Über Eingangs- und Ausgangsgrößen findet ein Informationsaustausch mit der Umwelt statt, welcher über die definierte Systemgrenze²⁷ des Modells erfolgt. [VDI 3633-1a; DIN IEC 60050-351] Entlang der Ab-

²⁶ Nach der VDI-Richtlinie zur Simulation 3633 Blatt 1 ist ein Modell „eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ [VDI 3633-1a].

²⁷ Ein System kann nach DIN IEC Norm 60050-351 als „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“. [DIN IEC 60050-351]

laufstruktur werden definierte Eingangsgrößen durch das Simulationsmodell in quantifizierbare Zielgrößen transformiert. [GUT17] Sowohl Beziehungen als auch der Ablauf dieses Prozesses werden durch die Attribute der Elemente bedingt. Eine Änderung der Attribute führt damit zu einem anderen Simulationsverhalten. Diese sog. Stellgrößen können systematisch verändert (parametrisiert) werden, was die Grundlage zur Durchführung von Experimenten darstellt. Die gezielte Untersuchung des Verhaltens des Simulationsmodells durch Parametrisierung der Stellgrößen auf Basis mehrerer Simulationen durchläufe wird nach [VDI 3633-1b] als Experiment definiert. Als Simulationslauf ist die einmalige, zeitlich definierte Ausführung des Modells mittels definierter Parametereinstellungen beschrieben.

In Simulationen können Zufallszahlen generiert werden, welche das Systemverhalten bei Unsicherheit abbilden. Diese werden i. d. R. durch Verteilungsfunktionen und Zufallsgeneratoren ermittelt. [KOL08] Dadurch unterscheiden sich die Ergebnisse zweier Experimente bei gleichen Parametern. Eine solche stochastische Simulation erfordert zur Realisierung verläSSLicher Ergebnisse eine definierte Anzahl von Simulationsdurchläufen. [BYR13] Die Monte-Carlo-Simulation ist für den Anwendungsfall geeignet.

Monte-Carlo-Simulation

Die sequenzielle Monte-Carlo-Simulation (MC-Simulation) generiert eine große Population von Beispielen durch sequenzielle Zufallsprozesse (inklusive Gewichtung), um das globale Optimum einer Lösung mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund des Gesetzes der großen Zahlen zu approximieren. [BAR20] Die MC-Simulation geht auf [HER64] und [MET49] zurück. Die Vor- und Nachteile dieses Ansatzes lassen sich Tabelle 5 entnehmen.

Eine MC-Simulation bietet sich besonders dann an, wenn das untersuchte System besonders groß ist und komplizierte Randbedingungen zu beachten sind. Dabei werden komplexe Verteilungen von Systemen meist als Komposition der Verteilungen der Systemkomponenten betrachtet. [VDI 4008-6] Werden N unabhängige Simulationsdurchläufe zur Berechnung der Zufallsgröße T durchgeführt, so kann nach dem Gesetz der großen Zahlen der Erwartungswert $E(T)$ der Zufallsgröße hergeleitet werden. Zur Ermittlung weiterer statistischer Charakteristika wird die empirische Verteilungsfunktion beschrieben. [VDI 4008-6] Zur Beurteilung der Genauigkeit bei endlichen N wird der zentrale Grenzwertsatz herangezogen. [VDI 4008-6] Eine Aussage über die notwendige

Anzahl der Simulationsdurchläufe zu treffen, ist schwierig, da diese von der Art der Verteilungen abhängt. Je weiter die Verteilung von der Normalverteilung abweicht und je höher die Anforderungen an die Genauigkeit sind, desto größer muss N gewählt werden. [VDI 4008-6]

Tabelle 5 Vor- und Nachteile der MC-Simulation der Risikoanalyse [BUS18; VDI 4008-6]

Vorteile	Nachteile
Alle Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind anwendbar	Nur Näherungswerte lassen sich ermitteln
Vielzahl von Eingangsfaktoren lassen sich berücksichtigen	Ergebnisbeeinflussung oft unkontrolliert und schwer nachvollziehbar
Auch bei Verteilungen anwendbar, welche analytisch aufwändig zu berechnen sind	Schwache, langsame Konvergenz
Anwendung relativ einfach in bestehenden Kalkulationsprogrammen	Lösung immer nur auf den speziellen Anwendungsfall inkl. Systemparameter interpretierbar

Anwendung der Monte-Carlo-Simulation

Leasinggeber setzen Monte-Carlo-Simulationen im Rahmen der Risikobewertung ein, um Risiken monetär quantifizieren zu können. Dabei werden Einzelrisiken zu einem Gesamtrisiko zusammengefasst. [GLA18] Hierzu werden die wichtigsten Risikofaktoren mittels historischer Daten durch stochastische Prozesse beschrieben. Unter Berücksichtigung dieser Prozesse werden Szenarien gebildet und die Häufigkeitsverteilung der hypothetischen Marktwerte ermittelt, sodass im letzten Schritt die Annahmen der Simulation geprüft werden können. [EIS04; GLA18; OLS19]

Im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse können mittels MC-Simulation komplizierte Wartungs- und Reparaturstrategien sowie beliebige Ausfall- und Reparaturverteilungsfunktionen aller Systemkomponenten betrachtet werden. [VDI 4008-6] So werden in [VDI 4008-6] MC-Simulationen im Rahmen der Simulation des Ausfallverhaltens eines Systems eingesetzt. Das System wird über ein Systemausfallmodell als Kollektiv der Komponenten beschrieben, um den Zusammenhang zwischen den Komponentenzustandsvariablen und der Systemzustandsvariable zu beschreiben. Das Ziel ist die Nachbildung der zufälligen Systemzustandsänderungen über den zeitlichen Verlauf. [VDI 4008-6] In diesem Rahmen sind auch Kosten und Ausfallzeiten stochastische Größen.

Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der Instandhaltungsmodellierung. So wird im Rahmen des Forschungsprojektes LICMA [FLE07b; LEI08] eine belastungsabhängige Restlebensdauer von Maschinenkomponenten ermittelt, bei denen Lastklassen mit exponentiellem Einfluss auf die Schädigung der Komponenten mit dem Ziel der Verbesserung von Lebenszykluskosten und Leistungswerten definiert werden. [FLE08; LAN09c; LAN09b] Der optimale Zeitpunkt der präventiven Instandhaltung wird durch eine MC-Simulation berechnet, indem das langfristig kostenminimale, präventive Instandhaltungsintervall ermittelt wird. Die Simulation generiert zufällige Lebensdauern der Komponenten anhand einer Verteilung, welche mit der verbliebenen Zeit zur Wartung verglichen werden. Dadurch lässt sich ein Vergleich von reaktiver zu präventiver Wartung anstellen. In [LAN09a] werden im Rahmen des selben Projekts die Kosten eines Servicevertrags für Maschinen ermittelt, wobei über die MC-Simulation die Kosten über deren stochastische Verteilungen auf Komponentenebene für die Gesamtmaschinenebene ermittelt werden.

Der Ansatz der MC-Simulation wird im Kontext der Lebenszyklusrechnung sowie der Bestimmung von TCO angewendet. In [WAN12] werden die Lebenszykluskosten von Bauprojekten durch die MC-Simulation im Rahmen des Risikomanagements berechnet. Kostentreiber werden durch Dreiecksverteilungen identifiziert, wobei die Analyse durch eine Sensitivitätsanalyse unterstützt wird. Bei [FLA87] wird am Beispiel von Bauprojekten das wirtschaftliche Risiko in Form von Lebenszykluskosten mittels MC-Simulation ermittelt. Hierzu werden alle Kostenfaktoren separiert, diese durch Risiken beschrieben und jeweils mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet. Eine Aggregation dieser Kosten ergibt die Lebenszykluskostenverteilung in jedem Zeitpunkt.

In [FLE07a] werden mit Hilfe der MC-Simulation die Garantiekosten von Werkzeugmaschinen für den Hersteller über den Lebenszyklus simuliert. Hierzu werden die Verteilungen der Ausfallraten auf Komponentenebene auf Basis historischer Daten oder erfahrungsbasiert entwickelt. Kosten, welche nicht mit der Zuverlässigkeit der Maschine in Beziehung stehen, werden deterministisch berechnet (bspw. Energiekosten). Durch die MC-Simulation werden beide Kostenelemente miteinander verbunden, indem die deterministischen Kosten die Eingangswerte eines jeden Simulationsdurchlaufs sind. Jeder Durchlauf simuliert die Zeit bis zum ersten Ausfall einer der Komponenten und charakterisiert diesen durch die Kosten. Die Zeit wird um MTTR verschoben, für die ausgefallene Komponente wird ein neuer TTF berechnet, die Simulation läuft bis zum

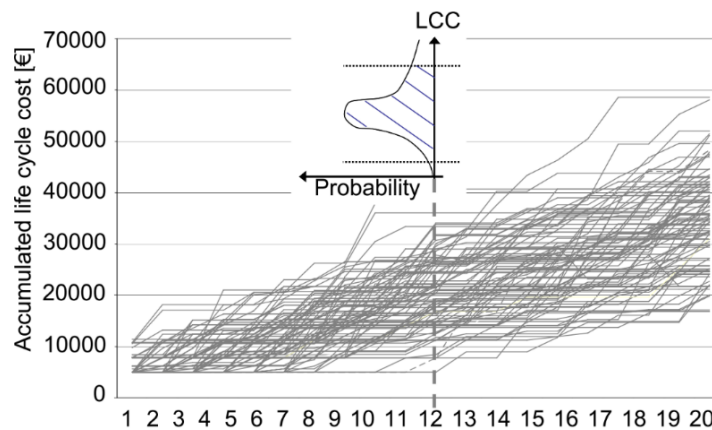


Abbildung 16 Exemplarische kumulierte Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen über einen Zeitraum von 20 Jahren nach [FLE07a]

nächsten Fehler weiter. Dies erfolgt bis zum Endzeitpunkt der Simulation in der definierten Anzahl an Durchläufen. Die Lebenszykluskosten werden mitgeschrieben und hunderte Maschinenleben simuliert (siehe Abbildung 16).

Zur Analyse von Lastklassen der Werkzeugmaschine und dem damit einhergehenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit lässt sich der WeiBayes-Ansatz implementieren, welcher die Ausfallverteilungen auf Basis von Expertenwissen manipuliert. [FLE07a] In [ROD15] wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt, wobei die TCO einer Industrieanlage mit Fokus auf die technische Leistung bewertet wird. Die Anlage wird durch ein Reliability-Block-Diagramm logisch modelliert, welches den Einfluss individueller Ereignisse auf die gesamte Maschine beschreibt. Die Verteilungsfunktionen der TTF und TTR werden von der MC-Simulation zur Generierung von Events und damit der Ermittlung der Verfügbarkeit der Maschine genutzt. Als Zielgröße wird der Kapitalwert berechnet.

Zusammengefasst ist die MC-Simulation zur Beschreibung unsicherer Systeme und ökonomischer Zusammenhänge weit verbreitet. Es lässt sich bei technischen Systemen erkennen, dass i. d. R. einzelne Komponenten modelliert werden. Von besonderem Interesse ist zudem die Integration von Expertenwissen in die Simulation.

3 Zielsetzung und Forschungskonzeption

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik und Wissenschaft zusammengefasst und Handlungsbedarfe hinsichtlich des Konzepts des hier entwickelten belastungs-basierten Bezahlmodells und der Bewertungsmethode abgeleitet. Diese Bedarfe werden daraufhin in der Zielsetzung dieser Arbeit präzisiert. Daraus werden Aufgaben zur Zielerreichung sowie Prämissen für das Bewertungsmodell abgeleitet. Abschließend wird der konzeptionelle Ansatz des Bewertungsmodells beschrieben.

3.1 Diskussion des Stands der Technik und Wissenschaft

Die in Kapitel 2.3 vorgestellten Bewertungsansätze und in Kapitel 2.2.3 eingeführten flexiblen Bezahlmodelle werden folgend mit dem Ziel diskutiert, die Handlungsbedarfe zur Erstellung eines ganzheitlichen Ansatzes zur Bewertung des belastungs-basierten Bezahlmodells abzuleiten.

Das Belastungsbasierte Bezahlmodell

In Literatur und Praxis sind zahlreiche Pay-per-X-Modelle bekannt. Diesen ist es jedoch nur unzureichend möglich, das Prinzipal-Agenten-Problem aufzulösen. Die verschleiß-basierte Abschreibung ist ein bekannter Ansatz, der jedoch keine Anwendung findet. Die Nutzung der Maschinenbelastung als Bemessungsgröße für zu zahlende Beträge stellt wiederum einen vielversprechenden Ansatz dar. Das zugehörige belastungs-basierte Bezahlmodell wird ausschließlich unter Mitwirkung des Autors in der Literatur beschrieben [STA20b; BOS21] und findet in der Praxis bisher keine Anwendung. Der grundsätzliche Aufbau von Bezahlmodellen ist der Literatur zwar zu entnehmen, jedoch ist keine mathematische Beschreibung, die zur Herleitung der Leasingraten heranzuziehen ist, bekannt. Das belastungsbasierte Bezahlmodell basiert auf dem klassischen Leasing, wobei die Bestandteile der Leasingraten sowie die Art der Amortisation durch den neuen Ansatz verändert werden. Letztere ist abhängig von der Belastung der Maschine und unterliegt damit Unsicherheiten.

Bestehende Bewertungsmethoden

Die ex ante Bewertung des belastungs-basierten Bezahlmodells muss die Unsicherheit der Belastung abbilden können, um die Berechnung der Zahlungsreihen zu ermöglichen. Die Bewertungsansätze im Rahmen des Leasings sind dynamisch, aber aufgrund

ihrer deterministischen Natur nicht anwendbar. Eine rein monetäre Bewertung als Entscheidungsgrundlage ist qualitativen Faktoren vorzuziehen. [BEI12] Bewertungsansätze aus dem Bereich der Pay-per-X-Modelle sind nur eingeschränkt anwendbar, da diese i. d. R. die Bewertung intangibler Güter oder die Geschäftsmodellperspektive fokussieren. Der Einfluss der PAB in den Bewertungsmodellen wird häufig nicht betrachtet. Eine Investitionsentscheidung unter Unsicherheit lässt sich über das Verfahren der Risikosimulation unterstützen. Diese nutzt bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf Basis von Erfahrungswissen oder empirischer Daten und wird im Kontext von Werkzeugmaschinen u. a. in der Zuverlässigkeitsanalyse, Instandhaltungsmodellierung sowie Lebenszykluskostenrechnung eingesetzt. In eigenen Vorarbeiten wird ein grundsätzliches Konzept zur Bewertung des belastungsbasierten Bezahlmodells beschrieben. Zentrales Element ist hierbei die Modellierung der Unsicherheiten der Maschinenbelastung und die hieraus resultierenden Effekte auf das Bezahlmodell. [STA21b]

Untersuchungsgegenstand Werkzeugmaschine

Die Werkzeugmaschine ist ein System mit zahlreichen Baugruppen und Komponenten. Diese verschleißten aufgrund der über die Komponentenlebenszeit variierenden Belastungsverläufe sehr heterogen. Die Belastung hat einen signifikanten Einfluss auf den Zeitwert und die LZK der Maschine, insb. Instandhaltungskosten. Ein deterministischer Zusammenhang zwischen Nutzung, Belastung und Verschleiß ist kaum herzuleiten. Es lassen sich auf Ebene der Baugruppen bzw. Komponenten stochastische Zusammenhänge auf Basis historischer Daten beschreiben. Da die Beschreibung aller Komponenten der Maschine sehr komplex ist, ist eine Fokussierung auf relevante Komponenten notwendig. Maschinenanwender haben i. d. R. lediglich Zugriff auf Informationen zu historischen Ausfallzeitpunkten und zu Betriebsprofilen vergleichbarer Maschinen. Trotz der beschriebenen Limitationen ermöglicht dieser Datensatz eine approximiertere Abbildung des Verschleißes über die Belastung. Hieraus lässt sich die Unsicherheit der Maschinenbelastung beschreiben und in eine Bewertungsmethode integrieren.

3.2 Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen

Anknüpfend an die Diskussion bestehender Bewertungsansätze vor dem Hintergrund des Stands der Technik und Wissenschaft wird in diesem Abschnitt die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit in Form von Forschungszielen präzisiert.

3.2.1 Zielsetzung der Arbeit

Aus der Diskussion des Stands der Technik und Wissenschaft ergibt sich, dass die existierenden Ansätze keine Bestimmung der monetären Vorteilhaftigkeit des belastungsorientierten Bezahlmodells, inklusive der Auswirkungen auf die LZK durch Veränderte Anreize, ermöglichen. Vielmehr wird deutlich, dass die Entwicklung eines ganzheitlichen Bewertungsansatzes nötig ist, der die vorgestellten Bestandteile kombiniert. Der Ansatz muss in der Lage sein, die Zahlungsreihen unter Unsicherheit zu bewerten und die Unsicherheit des Maschinenverschleißes auf Basis vorhandener empirischer Daten des Leasingnehmers zu modellieren.

Hieraus leiten sich folgende aufeinander aufbauende Forschungsziele ab:

1. Konzeptionelle und mathematische Beschreibung eines repräsentativen belastungsbasierten Bezahlmodells
2. Entwicklung eines ex ante Bewertungsmodells des belastungsbasierten Bezahlmodells unter Unsicherheit
3. Entwicklung eines ex ante Simulationsmodells der erwarteter Maschinenbelastung bzw. -abnutzung

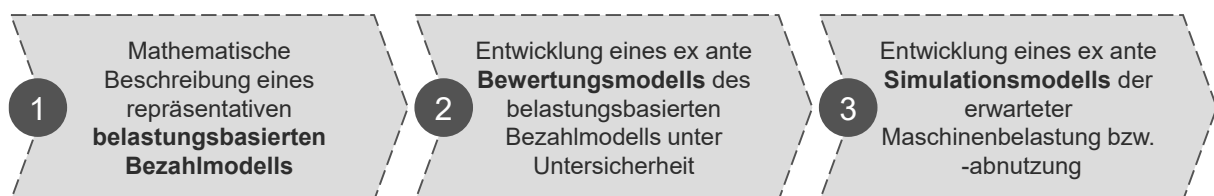


Abbildung 17 Forschungsziele der vorliegenden Arbeit

Die Herleitung des belastungsbasierten Bezahlmodells auf Basis des Stands der Technik erfolgt in Abschnitt 4.2. Darauf aufbauend wird zum einen das Modell zur Bestimmung der erwarteten Zahlungsreihen entwickelt, zum anderen erfolgt die Erstellung des Bewertungsmodells hinsichtlich der Zahlungsreihen. Das Bewertungsmodell baut auf existierenden Verfahren der Investitionsrechnung und der LZK-Analyse auf und vereint diese für den Anwendungsfall. Die Erreichung der Forschungsziele soll Leasingnehmer in die Lage versetzen, das zu entwickelnde Bezahlmodell für den eigenen Anwendungsfall zu konzipieren und die zu erwartenden Zahlungsreihen zu bewerten. Es wird angenommen, dass die eindeutige Beschreibung des belastungsbasierten Bezahlmodells

und die entwickelte Bewertungsmethode einen signifikanten Einfluss auf die Etablierung belastungsbasierter Bezahlmodelle im deutschen Maschinenbau haben werden und damit einen praxisrelevanten Mehrwert darstellen. (vgl. [ULR84; SCH13])

3.2.2 Aufgaben zur Zielerreichung

Basierend auf den Erkenntnissen der Analyse des Stands der Technik und den identifizierten praktischen Rahmenbedingungen und Anforderungen leiten sich die folgenden Aufgaben aus den genannten Forschungszielen ab.

Das Forschungsziel 1 besteht darin, ein belastungsbasiertes Bezahlmodell mathematisch zu formalisieren, welches unter Berücksichtigung der Anforderungen der Praxis in dieser Form angewendet werden kann.

Die Aufgaben des im Rahmen des Forschungsziels 2 entwickelten Bewertungsmodells werden durch zwei Szenarien beschrieben. Szenario 1 fokussiert ausschließlich die resultierenden Leasingraten im Rahmen der Grundmietzeit. Dies ermöglicht den monetären Vergleich zu alternativen Bezahlmodellen unter der Voraussetzung einer vergleichbaren Vertragsbasis. Das Modell wird dann als vorteilhaft gesehen, wenn der absolute erwartete Kapitalwert der Kosten $E(K_{0,bel})$ zum Zeitpunkt $t=0$ geringer ist als der Kapitalwert der Leasingalternative $K_{0,lea}$:

$$|K_{0,lea}| > |E(K_{0,bel})| \quad (3.1)$$

Szenario 2 des Bewertungsmodells integriert die Effekte auf die LZK durch die veränderte Anreizstruktur im Rahmen der Prinzipal-Agenten-Beziehung. Neben den Leasingraten, welche den Anschaffungskosten zugeschrieben werden, werden die Effekte auf die Instandhaltungskosten hinzugenommen. Diese Effekte beruhen auf Hypothesen. Das Modell ist dann vorteilhaft, wenn der absolute erwartete Kapitalwert der LZK $E(K_{0,LZK,bel})$ zum Zeitpunkt $t=0$ geringer ist als der erwartete Kapitalwert der Leasingalternative $K_{0,LZK,lea}$:

$$|E(K_{0,LZK,lea})| > |E(K_{0,LZK,bel})| \quad (3.2)$$

Forschungsziel 3 fokussiert die Entwicklung eines ex ante Simulationsmodells erwarteter Maschinenbelastung und -abnutzung und dem daraus resultierenden Wertverlust der Maschine. Dafür werden Instandhaltungsdaten und Betriebsdaten genutzt, die die Basis für eine datenbasierte Bewertung bilden und häufig in Unternehmen verfügbar

sind. Damit kann die Amortisation der Werkzeugmaschine $AT_{t,bel}$ in Abhängigkeit von der Veränderung des Abnutzungsvorrates wie folgt dargestellt werden:

$$AT_{t,bel} \sim \Delta \text{Abnutzungsvorrat} \quad (3.3)$$

3.2.3 Prämissen der Bewertungsmethode

Folgend werden die Prämissen, unter denen die Bewertungsmethode im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird, zusammengefasst. Diese leiten sich aus der Diskussion aus Kapitel 3.1 und den Expertengesprächen im Rahmen des Pay-per-Stress-Projektes ab.

- Als Untersuchungsgegenstand wird das Bezahlmodell aus [STA20b; BOS21] definiert. Die Orientierung des Bezahlmodells am klassischen Leasing ist zielführend, da dieses bereits am Markt bekannt und akzeptiert ist. Leasingobjekt ist eine Werkzeugmaschine. Der Verschleiß wird durch einen stochastischen Prozess beschrieben.
- Der Fokus liegt auf dem deutschen Leasingmarkt, wobei Leasinggeber und Leasingnehmer in Deutschland ansässig sind. Es wird von der Dreiecksbeziehung ausgegangen, um eine Vermischung mit einer potenziellen Absatzförderung im Herstellerleasing zu vermeiden. Als vertragliche Vorlage dient das Teilamortisationsleasing. Weitere vertragliche Besonderheiten, bspw. Nebenabreden, werden nicht berücksichtigt
- Die Bewertung erfolgt aus Perspektive des Leasingnehmers. Dies ist sinnvoll, da das neue Modell am Markt akzeptiert werden muss. Dabei werden ausschließlich vorhandene Daten des Leasingnehmers genutzt.
- Es werden ausschließlich monetäre Bewertungskriterien in die Entscheidungsfindung aufgenommen. Qualitative Argumentationen werden aufgrund der inhärenten Subjektivität ausgeschlossen. Durch Fokussierung auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse bezweckt.
- In dieser Arbeit werden bilanzierungstechnische und steuerrechtliche Auswirkungen für den Leasingnehmer vereinfacht integriert. Aus Gründen der Modellkomplexität und Verallgemeinerbarkeit werden alle unternehmensspezifischen Effekte über den WACC abgebildet.²⁸

²⁸ Hinzu kann festgehalten werden, dass aus Expertengesprächen im Rahmen des Pay-per-Stress Projektes die bilanziellen Einflüsse als Entscheidungsgrundlage für das Leasing als vernachlässigbar angesehen werden können.

- Der Kalkulationszinssatz wird im Betrachtungszeitraum als konstant angesehen. Soll- und Habenzinssatz weichen im Modell nicht voneinander ab. Beim Leasingnehmer ist der Zinssatz u. a. von seiner Eigenkapitalquote abhängig, [BEC18] welche im Modell über den WACC inkludiert wird.
- Dienstleistungen im Sinne eines Full-Service-Leasingvertrages werden nicht betrachtet, da diese unabhängig von der Art des Bezahlmodells am Markt erworben werden können. Dienstleistungen, welche nicht anderweitig erworben werden können, sind in die Kostenmarge MK der Leasingraten eingepreist.
- Das entwickelte Modell ist ein Partialmodell, bei welchem die Entscheidungen im Rahmen des Bezahlmodells keinen Einfluss auf weitere Geschäftstätigkeiten von Leasingnehmer und -geber haben. Die Integration der Instandhaltungskosten erweitert den Systemrahmen, sodass der Effekt auf die Lebenszykluskosten untersucht wird.
- Verhaltensänderungen des Leasingnehmers im Zuge der Anreizwirkung sind über die Simulationsparameter abbildbar. Hierzu werden bspw. die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen modifiziert. Dies kommt einer Veränderung der Auswirkungen der Belastungen über den Leasingzeitraum auf die Maschine gleich.
- Der Restwert der Maschine wird ausschließlich durch den Abnutzungsvorrat beschrieben. Weitere Faktoren, die den Zeitwert determinieren und ansonsten nicht durch den Leasingnehmer beeinflusst werden können, werden vernachlässigt. Eine Ausnahme bildet die Integration des Zeitwertfaktors zur Bildung des Zeitwerts, welche einen minimalen Wertverlust der Komponente festlegt.
- Der Leasingnehmer wird zu jedem Zeitpunkt als liquide und fähig seinen Verpflichtungen nachzukommen angenommen. Die Berechnung des Liquiditätsrisikos wird damit nicht in das Modell integriert.²⁹ Ein Einfluss auf weitere Risiken wird vernachlässigt.
- Einnahmen im Rahmen der Investitionsentscheidung werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass sich diese bei den Alternativen nicht voneinander unterscheiden. Damit sind sie nicht entscheidungsrelevant. Im Rahmen des

²⁹ Eine Diskussion zu Liquiditätsrisikomesverfahren lässt sich [GLA18] entnehmen.

Modells erfolgt ein Finanzierungsvergleich. Die ökonomische Sinnhaftigkeit der Investition wird nicht geprüft. [GAB01]

- Die technische Funktionsfähigkeit der Systeme zur Zustandsüberwachung, Analyse und Informationsübertragung zur Realisierung des belastungsbasierten Modells wird als gegeben angenommen. Weiter wird die Modellierbarkeit (Ableitung des Abnutzungsvorrates aus der Belastung zur Beurteilung des Wertverlusts) der ausgewählten Komponenten angenommen. Die Kosten des Zustandsüberwachungssystems werden nicht betrachtet. Aus dem Betrag der monetären Vorteilhaftigkeit des belastungsbasierten Modells gegenüber der Alternativen lassen sich jedoch die maximalen Kosten ableiten.

3.2.4 Konzeptioneller Ansatz der Bewertungsmethode

Um die zuvor definierten Forschungsziele und Aufgaben beantworten zu können, wird ein computer-ausführbares Modell erstellt. Dieses wird das unsicherheitsbehaftete Bezahlmodell und dessen Zahlungsreihen darstellen und bewerten. Das computer-ausführbare Modell lässt die Durchführung von Experimenten zu, indem neben fixen Eingangsgrößen etwaige Stellgrößen beeinflusst und Ergebnisgrößen untersucht werden.

Die Stellgrößen sind daten- und hypothesenbasiert und werden in den Umsetzungsprägungen aus Abbildung 18 verändert. Es werden die Umsetzungen strukturiert, um den Einfluss der Stellgrößen auf die Entscheidungsfindung zu untersuchen. Um die monetäre Vorteilhaftigkeit der Bezahlmodelle miteinander zu vergleichen, werden drei Umsetzungen definiert. Die Eingangsgrößen aller Modelle sind weitestgehend identisch, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In Umsetzung 1 wird Leasing modelliert. Dieses besitzt deterministische Leasingraten, wobei nur die Instandhaltungskosten stochastisch verteilt sind. In Umsetzung 2 wird das belastungsbasierte Bezahlmodell modelliert, wohingegen Umsetzung 3 die Anreizwirkung miteinbezieht. Zur Beantwortung von Szenario 1 im Forschungsziel 2 werden ausschließlich die Leasingraten aller drei Umsetzungen miteinander verglichen. Zur Beantwortung von Szenario 2 im Forschungsziel 2 werden die LZK miteinander verglichen. In Abbildung 18 sind die wesentlichen Eingangs-, Ergebnis- und Stellgrößen des Modells dargestellt.

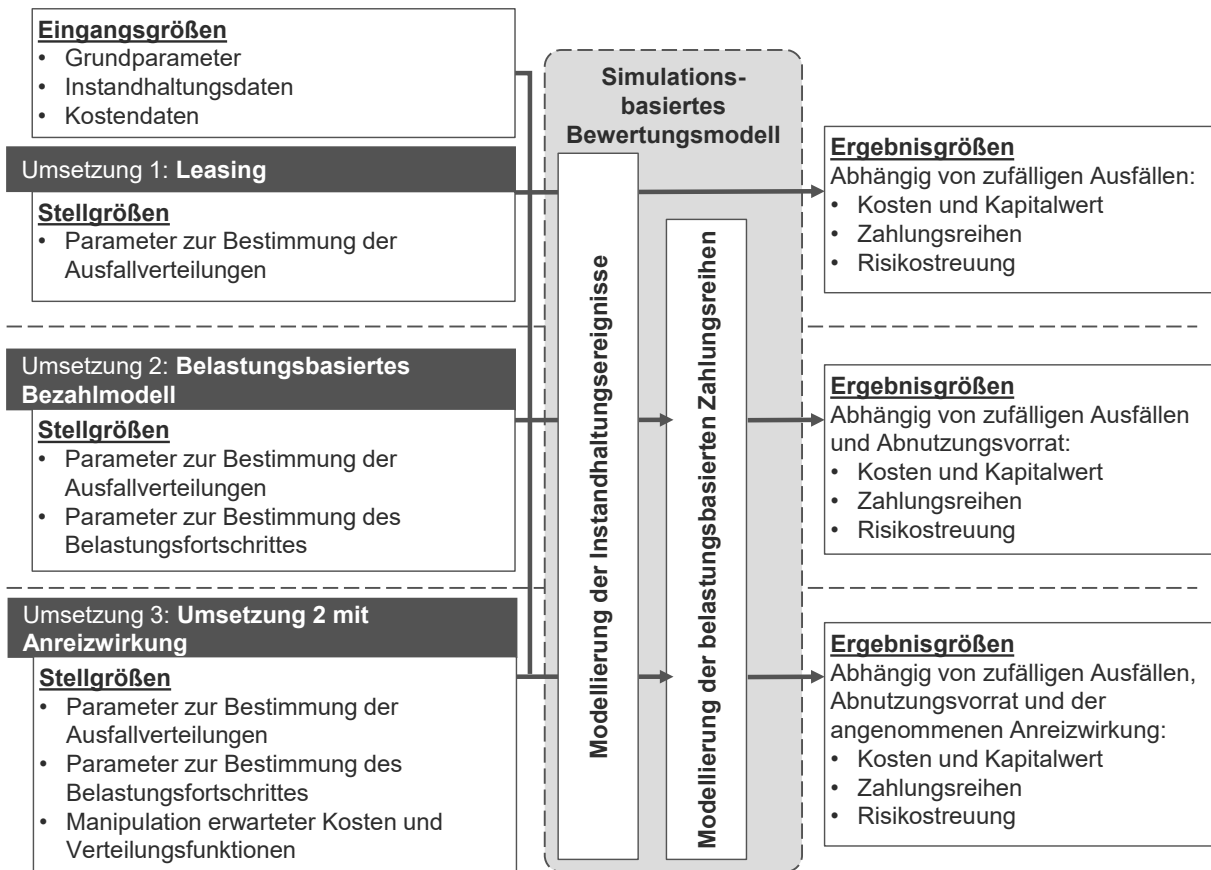


Abbildung 18 Eingangs- und Ergebnisgrößen des Modells je Umsetzung

4 Konzeptionelles Design

Zur Bearbeitung der drei Forschungsziele werden in diesem Kapitel die mathematischen Beschreibungen des Bezahlmodells und das konzeptionelle Design der Bewertungsmethode erarbeitet. Die Bewertungsmethode basiert auf einem computer-ausführbaren Modell, welches die kostenrelevanten Wirkbeziehungen abbildet. Das Modell ist die Abbildung des realen Systems, welches weniger wesentliche Eigenschaften abstrahiert. [ULR76] Das Modell orientiert sich an dem von [STA21b] entwickelten Bewertungsansatz, welches sich in ein Kosten- und ein Abnutzungsmodell gliedern lässt. Dieser Ansatz ermöglicht eine voneinander unabhängige Beschreibung der Teilmodelle.

4.1 Vorgehen zur Modellentwicklung

Die Entwicklung des Bewertungsmodells folgt der Vorgehensweise aus [VDI 3633-1a] und wird folgend beschrieben. Im ersten Schritt der Modellentwicklung werden die Aufgaben sowie das Zielsystem definiert, worauf aufbauend die Systemanalyse durchgeführt wird. Bei der Systemanalyse werden die wesentlichen Wirkungsbeziehungen betrachtet und hieraus das Konzept der Modellierung abgeleitet. Dieses beschreibt auf formale Art und Weise das Modell inklusive seiner Systemgrenzen, Systemelemente und Wirkungsbeziehungen unter Berücksichtigung der notwendigen Modellierungsgenauigkeit. Für die explizite Umsetzung des Konzepts erfolgt die Parametrisierung an den Anwendungsfall in Kapitel 5.

Das Ziel einer Modellbildung besteht darin, ein existierendes oder konzipiertes System experimentierbar zu machen, um über den Einfluss von Eingangsgrößen auf Zielgrößen schließen zu können. [VDI 3633-1a] Daraufhin wird dieses formalisiert und softwaretechnisch umgesetzt. Dabei gilt es, „dass ein System nicht so exakt wie möglich, sondern nur so exakt wie für die vorgegebenen Untersuchungsziele nötig in ein Modell umgesetzt werden soll“ [VDI 3633-1a]. Dies erfolgt durch Analyse und Abstraktion des Systems. Die Analyse gliedert das System entsprechend den Zielen in sinnvolle Ele-

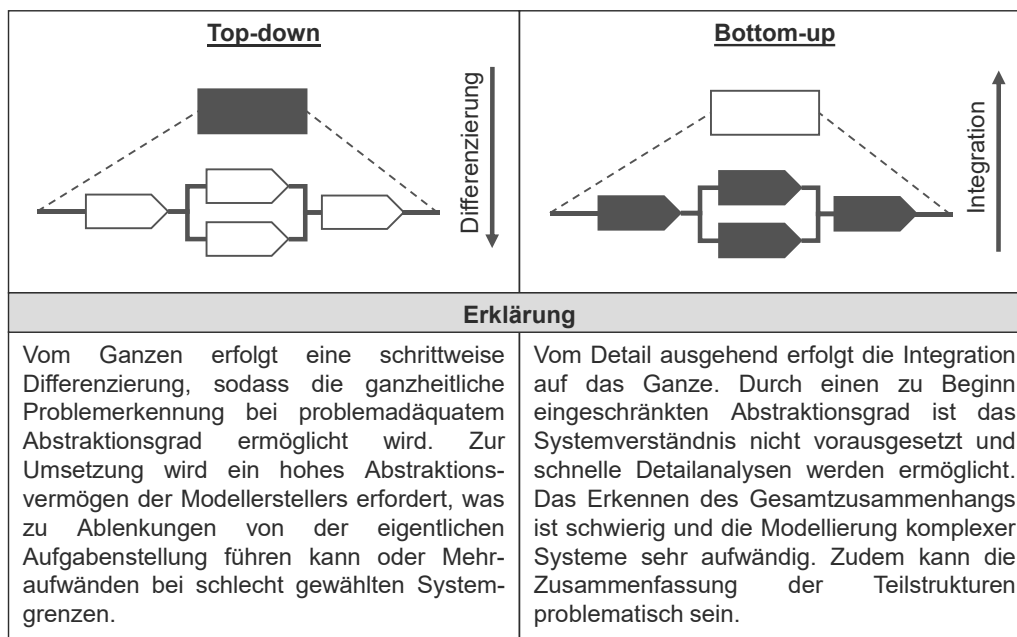


Abbildung 19 Ansätze der Systemanalyse nach [VER14]

mente. Die gleichzeitige Abstraktion beschränkt das Abbild durch Reduktion und Idealisierung³⁰ auf das Wesentliche, sodass der Aufwand der Simulation dem Nutzen gerecht wird.

Top-down bzw. Bottom-up Ansätze stellen zwei grundlegende Vorgehensweisen zur Modellentwicklung dar (siehe Abbildung 19). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Top-Down-Ansatz gewählt, bei welchem vom Ganzen ausgehend, eine inkrementelle Differenzierung und Detailierung erfolgt. Ausgangspunkt der Methodenentwicklung ist hierbei die Investitionsentscheidung und die damit einhergehende Entscheidung des Leasingnehmers für oder gegen ein belastungsbasiertes Modell. Daraus leiten sich die notwendigen Zusammenhänge und Informationsbeziehungen ab, auf deren Grundlage die Elemente des Modells beschrieben werden. Im Folgenden wird der Untersuchungsgegenstand im Detail dargestellt und es werden die Elemente des Bewertungsmodells erläutert.

³⁰ Reduktion ist nach [VER14] der Verzicht auf unwichtige Einzelheiten, als Idealisierung wird das Vereinfachen von unverzichtbaren Einzelheiten verstanden.

4.2 Untersuchungsgegenstand belastungsbasiertes Bezahlmodell

Zur Bearbeitung des ersten Forschungsziels wird das belastungsbasierte Bezahlmodell auf der konzeptionellen Grundlage von [STA20b] mathematisch beschrieben und diskutiert. Das Bezahlmodell leitet sich aus einer Reihe von Anforderungen ab, die in Tabelle 6 aufgeführt sind.

Tabelle 6 Anforderungen nach [STA20b] und Realisierung im Modell

Anforderungen	Realisierung im hier vorgestellten Modell
Akkurate Berechnung des Indikators	Berechnung nach [KOH21] auf Baugruppen- und Komponentenebene auf Basis eines ZÜS [BOS21] nach der Realisierung
Einfache Übersicht der Kosten auf Komponentenebene	Kosten werden auf Baugruppenebene ermittelt und zu Gesamtkosten aggregiert
Berechnung des Indikators muss nachvollziehbar sein	Fokussierung auf die wichtigsten Komponenten und Auswahl möglichst einfacher Berechnungsgrundlagen der Indikatoren
Basisrate, welche unabhängig von der Nutzung ist	Teile der Amortisation erfolgen über eine lineare Abschreibung, weitere Anteile der Leasingraten (bspw. Zinsen) bleiben bestehen

Den Anforderungen folgend wird der Teilamortisationsvertrag des Leasings als Grundlage genutzt. Folgende Gleichung lässt sich auf Basis des Teilamortisationsvertrags (vgl. Gleichung (2.2)) definieren:

$$LR_{t, bel} = AT_{t, bel} + V_t + MK_t + MR_{t, bel} + MG_{t, bel} \quad (4.1)$$

Die Amortisation $AT_{t, bel}$ und die Risikomarge $MR_{t, bel}$ werden verändert. Die weiteren Elemente der Leasingrate können durch die Abhängigkeit von der Belastung als Zahlungsindikator beeinflusst werden. Gemäß der Bestimmung der Amortisationshöhe bei Pay-per-X-Modelle (vgl. Gleichung (2.7)) gilt:

$$AT_{t, bel}(X) = MBG \frac{X_{t, bel}}{X_{TG, bel}}, \text{ wenn } X_{TG, bel} = \sum_{t=0}^{TG} X_{t, bel} \quad (4.2)$$

Dabei ist $X_{t, bel}$ die Belastung zum Zeitpunkt t und $X_{TG, bel}$ die Gesamtsumme der Belastung über alle Zeitpunkte. Diese beschreiben die Belastung, die auf die Maschine wirkt und zum Verschleiß führt. Um die Modellierung der Belastung auf Baugruppenebene zu ermöglichen, wird die Maschine in die zentralen Baugruppen untergliedert.

[STA20b] Es wird für jede Baugruppe ein eigener Indikator beschrieben. Es sind n Indikatoren definiert, wobei jedes $X_{t,k,bel}$ einen Indikator auf Baugruppenebenen beschreibt. Hieraus folgt, dass die Summe aller n Indikatoren auf Baugruppenebene $X_{t,k,bel}$ den Indikator auf Maschinenebene $X_{t,bel}$ ergibt. Somit ergibt sich die folgende Gleichung:

$$X_{t,bel} = \sum_{k=1}^n X_{t,k,bel} \quad (4.3)$$

Um die Komplexität des Modells beherrschen zu können, werden nicht alle Baugruppen in gleicher Weise durch $X_{t,k,bel}$ abgebildet. Wie in Abbildung 20 exemplarisch dargestellt, erfolgt eine Gruppierung der Baugruppen in Abhängigkeit von deren Verschleißverhalten. [STA20b; BOS21] Die Gruppe direkt belastungsbasierter Komponenten fasst alle Baugruppen zusammen, welche direkt durch den Einfluss der Belastung im Fertigungsprozess verschleissen. Zudem sind dies auch die Komponenten, welche monetär den größten Einfluss auf den Wertverfall haben und überwachbar sind. [STA20b; KOH21] Die indirekt belastungsbasierte Gruppe fasst alle Baugruppen zusammen, die nicht direkt durch die Belastung im Fertigungsprozess verschleissen, sondern einem anderweitigen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang unterliegen. Dies sind i. d. R. einfachere Zusammenhänge, etwa der Verschleiß nach der Nutzungszeit einer Baugruppe oder die Anzahl an Werkzeugwechseln. Zu dieser Gruppe zählen auch Komponenten, die keinen großen monetären Einfluss haben oder für die eine belastungsbasierte Modellierung zu komplex ist.

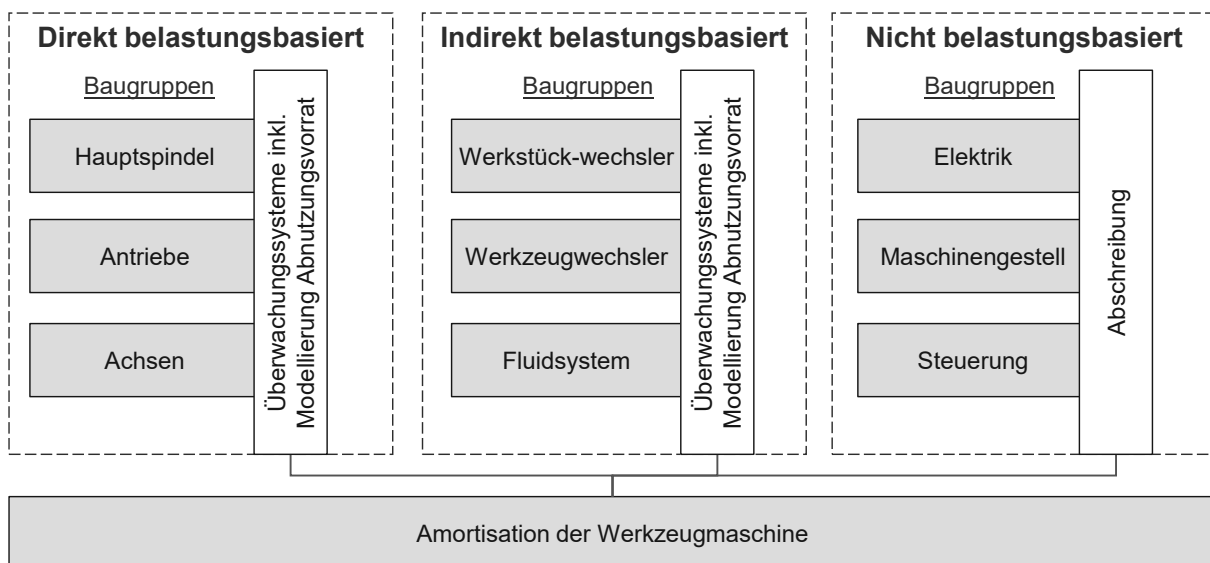


Abbildung 20 Gruppen der Komponenten nach Verschleißart [STA20b]

In der nicht-belastungsbasierten Gruppe sind Komponenten zusammengefasst, die keiner anderen Gruppen zuzuordnen sind. Zum einen sind dies Komponenten, welche einen zu vernachlässigenden Einfluss auf den Wertverfall der Maschine haben. Zum anderen solche Komponenten, deren Verschleißfortschritt nicht auf den Fertigungsprozess zurückzuführen bzw. nicht modellier- oder überwachbar ist (bspw. Elektronikkomponenten). [STA20b; FLE07c] Die Komponenten dieser Gruppe werden über ein Abschreibungsverfahren abgebildet. Damit ist die Amortisation dieser Komponenten ein fixer Anteil zu jedem Zeitpunkt t . [STA20b] Hinzu kommt, dass die Amortisation dieser Gruppe nicht direkt durch die Anreizsteuerung beeinflusst wird. Die zugehörigen Indikatoren werden entsprechend Gleichung (2.4) abgebildet. Damit ergibt sich für den Anteil der Amortisierung zum Zeitpunkt t folgende Gleichung:

$$AT_t(\vec{X}) = \sum_{k=0}^{mk} MBG_k \frac{X_{k,t}}{X_{k,TG_k}} + \sum_{g=0}^{mg} \frac{MBG_g}{TG} \quad (4.4)$$

mk	[-]	Summe aller belastungsbasierten Komponenten
mg	[-]	Summe aller klassisch abgeschriebenen Komponenten
$X_{k,t}$	[-]	Belastung der Komponente k in Zeitpunkt t
X_{k,TG_k}	[-]	Summe der Belastung der Komponente k
\vec{X}	[-]	Vektor der Indikatoren aller Komponenten

Für jede Komponente k gilt:

$$X_{k,TG_k} = \sum_{t=0}^{TG} X_{k,t} \quad (4.5)$$

Im ersten Summanden der Gleichung (4.4) werden alle belastungsbasierten Komponenten zusammengefasst, für welche ein belastungsbasierter Indikator entwickelt wird. Im zweiten Summanden werden alle Komponenten zusammengefasst, welche klassisch abgeschrieben werden. Da die Belastungsindikatoren unabhängig vom Maschinenalter sind, ist der Erwartungswert der belastungsbasierten Abschreibung mit der einer linearen Abschreibung zu vergleichen. Die Mietbemessungsgrundlagen (MBG) beziehen sich jeweils auf die Komponente, wobei gilt:

$$MBG = \sum_{k=0}^{mk} MBG_k + \sum_{g=0}^{mg} MBG_g \quad (4.6)$$

Für die Berechnung der MBG wird der anteilige Wert der Baugruppe an der Maschine herangezogen, welcher sich an Listenpreisen oder Expertenwissen orientiert. Alternativ können Indikatoren einer Komponente stellvertretend für die MBG mehrerer Komponenten definiert werden. Beispielsweise kann der Indikator der Vorschubachse die MBG der Gestellbauteile beinhalten.

Neben der Amortisation sind weitere Veränderungen im belastungsbasierten Bezahlmodell im Vergleich zum klassischen Teilamortisationsvertrag zu erwarten. Durch die Lösung des Prinzipal-Agenten-Problems wird unter sonst gleichen Bedingungen eine Verhaltensänderung des Nutzers erwartet. Dies beeinflusst die Amortisation. Folgende Informationsasymmetriestrategien sind im Rahmen des belastungsbasierten Modells implementiert:

- Informationsstrategie: Der Indikator verleiht Transparenz hinsichtlich des historischen und aktuellen Verschleißzustands. Dadurch lässt sich die Restlebensdauer und der Einfluss der Nutzung auf den Verschleiß verstehen
- Nudging: Die monetäre Zielfunktion des Nutzers verändert sich dahingehend, dass langfristige Kosten im täglichen Geschäft transparent verändert werden können und somit Grundlage für eine intuitive Veränderung des Verhaltens ermöglichen
- Zwang: Moral Hazard wird durch hohe Kosten sanktioniert, wobei der Nutzer der Maschine die Konsequenzen der eigenen Handlungen tragen muss

Durch die Transparenz wird eine Minderung bzw. Eliminierung der Risikomarge $MR_{t, bel}$ erwartet. Die transparente Belastungshistorie kann zu einem höheren Wiederverkaufswert auf dem Sekundärmarkt führen³¹. Das hat einen Einfluss auf die Gewinnmarge MG_t . Die ökonomischen Vorteile können zwischen Leasingnehmer und -geber aufgeteilt werden (vgl. Anhang A.1.5 zu Vertragsausgestaltungen). Die Vorteile des Bezahlmodells sind in Tabelle 7 zusammengefasst³². Die monetären Auswirkungen der genannten Vorteile sind im Bewertungsansatz jedoch nicht vollständig abbildbar.

³¹ Nach Diskussionen mit Experten aus der Leasingbranche kann dieser Faktor zu signifikanten Mehrerlösen führen.

³² Weiterhin gelten die grundsätzlichen Vorteile von Leasingverträgen und Pay-per-X Modellen

Tabelle 7 Vorteile und Motivation eines belastungsbasierten Bezahlmodells

Vorteile Anbieter (Leasinggeber)	Vorteile Konsument (Leasingnehmer)	Vorteile Hersteller
Transparenz bzgl. Verschleißfortschritt und Wertverlust	Transparenz bzgl. Verschleißfortschritt und Wertverlust	Effiziente Dimensionierung der Maschine
Geringes/kein Restwertrisiko und Verhaltensrisiko	Geringere Instandhaltungskosten	Besseres Verständnis von Nutzungsverhalten und -nutzen
Besseres Kundenverständnis	Pay-as-you-earn Effekt	
Höhere Erlöse im Sekundärmarkt nach Grundmietzeit	Langfristige Effizienzsteigerung möglich	

Nachteilig für den Leasingnehmer ist die eingeschränkte Beeinflussbarkeit der Amortisation (vgl. Kapitel 2.1.2). Auch wenn die Benutzung der Maschinen einen signifikanten Einfluss hat, sind nicht alle Formen der Belastung durch den Leasingnehmer beeinflussbar. Das Anreizsystem inkludiert die Belastungsquellen Betrieb, Mensch, Prozess und Milieu. Damit der Indikator einen Anreiz darstellt die Maschine anders zu nutzen, um die Belastung zu minimieren, muss dieser auch dem Verhalten des Leasingnehmers als vorhersehbares Ergebnis zugeschrieben werden können. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass alle Belastungen und Einflüsse, welche nicht vom Leasingnehmer beeinflusst werden, nicht als Anreiz dienen. Da eine klare Trennung des Einflusses der Belastung nicht möglich ist, werden diese in den Indikator integriert. Damit erhöht sich das Risiko des Leasingnehmers, indem das Qualitätsrisiko bei ihm verbleibt.

Der Prozess der praktischen Implementierung des hier vorgestellten Bezahlmodells an einer Werkzeugmaschine kann [STA20b; KOH21] entnommen werden. Die Implementierung hinsichtlich des Geschäftsmodells wird in [STA20b; BOS21] diskutiert.

4.3 Bewertung der Investition

Folgend werden die Ergebnisgrößen der Bewertungsmethode beschrieben und deren Rahmen in Anlehnung an [STA21b] definiert. Damit wird das Forschungsziel 2 erreicht. Die Unsicherheit der Bewertung liegt im Verschleißverhalten der Werkzeugmaschine begründet. Instandhaltungsdaten beschreiben Ereignisse, die während der Nutzungszeit der Maschine eintreten. Diese Ereignisse werden durch weitere unsicherheitsbe-

haftete Daten, wie Dauer des Ausfalls/der Instandhaltungstätigkeiten oder Ersatzteilkosten, charakterisiert. Die Ereignisse werden über Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt, in welchen die Zeit bis zum Ausfall der Komponente T_k als Zufallsvariable definiert ist. [BLI11; KLE12; BIR17; KAR19]

Die Bewertung der Investition erfolgt in zwei Schritten. Der Vergleich der Risikoprofile anhand der stochastischen Dominanz ist die Entscheidungsvorbereitung. Die eigentliche Entscheidung erfolgt im Nachgang aufgrund der subjektiven Risikopräferenz des Entscheiders mittels μ - σ -Prinzip. [HAX85; BUS18; LAU18] Die Bewertung des Risikos wird über Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsgrößen beschrieben. Hierbei lässt sich die Risikosimulation einsetzen, welche aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen einzelner Eingangsgrößen die Verteilung der Zielgrößen ermittelt. [BUS18; VDI 4008-6] Im Rahmen dieser Arbeit wird der Kapitalwert als Zielgröße zur Bewertung der Investition genutzt.

4.3.1 Risikoprofil und Dominanzkriterium

Im ersten Schritt werden die Risikoprofile bestimmt. Ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Kapitalwertes $f(K_0)$ direkt bekannt, so kann hieraus durch Kumulation die Verteilungsfunktion $F(K_0)$ hergeleitet werden, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, dass der Kapitalwert einen gegebenen Wert nicht überschreitet. Das Risikoprofil $R(K_0)$ gibt die kumulierte Wahrscheinlichkeit an, dass der Kapitalwert einen gegebenen Wert mindestens erreicht. [BUS18] Bei einem Vergleich zweier Risikoprofile unterschiedlicher Investitionen wird die stochastische Dominanz zur Vorauswahl herangezogen. In Abbildung 21 ist die stochastische Dominanz erster Ordnung, wobei die Investitionsentscheidung I_1 über alle möglichen Kapitalwerte die Investitionsentscheidung I_2 dominiert, beispielhaft veranschaulicht. Es dominiert eine Investition I_1 eine Investition I_2 , wenn für alle Kapitalwerte alle $K_{01} \geq K_{02}$ mit mindestens einem Wert $K_{01} > K_{02}$ gilt. Damit gilt $E(K_{01}) > E(K_{02})$ für die Kapitalerwartungswerte (stochastische Dominanz 1. Grades). Bei Risikoaversion dominiert I_1 die Alternative I_2 , wenn für alle Zielwerte K_{01i} die von links kumulierte Differenzfläche zwischen den Risikoprofilen stets größer oder gleich (mindestens einen Wert K_{01i} aber größer als) Null ist (Stochastische Dominanz 2. Grades). Die dominierende Investitionsentscheidung ist vorzuziehen. [BUS18; LAU18]

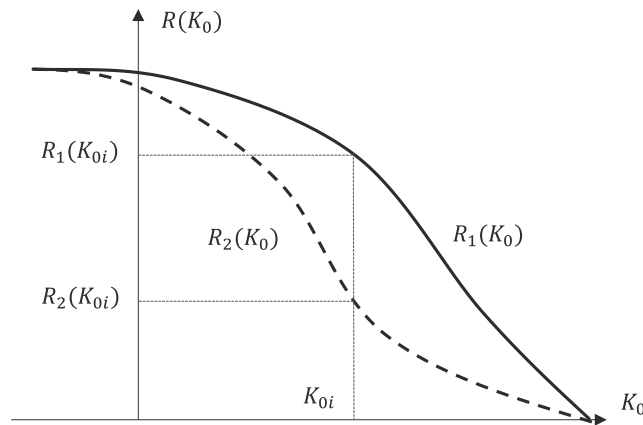


Abbildung 21 Veranschaulichung der stochastischen Dominanz nach [LAU18]

Dem Prozess der Risikosimulation nach [HER64] folgend (Abbildung 22), werden zuerst die unsicheren Eingangsgrößen definiert (1) und deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt (2). Daraufhin werden über einen Zufallsgenerator Zufallszahlen generiert (3). Diese dienen als Eingangswerte für den Simulationskern zur Bestimmung der Belastungen. Im nächsten Schritt wird in jedem Simulationsdurchlauf die Zielgröße berechnet (4). Jeder Simulationsdurchlauf beschreibt eine Grundmietzeit der Maschine, welche durch deterministische oder unsichere Ereignisse und Kosten beschrieben

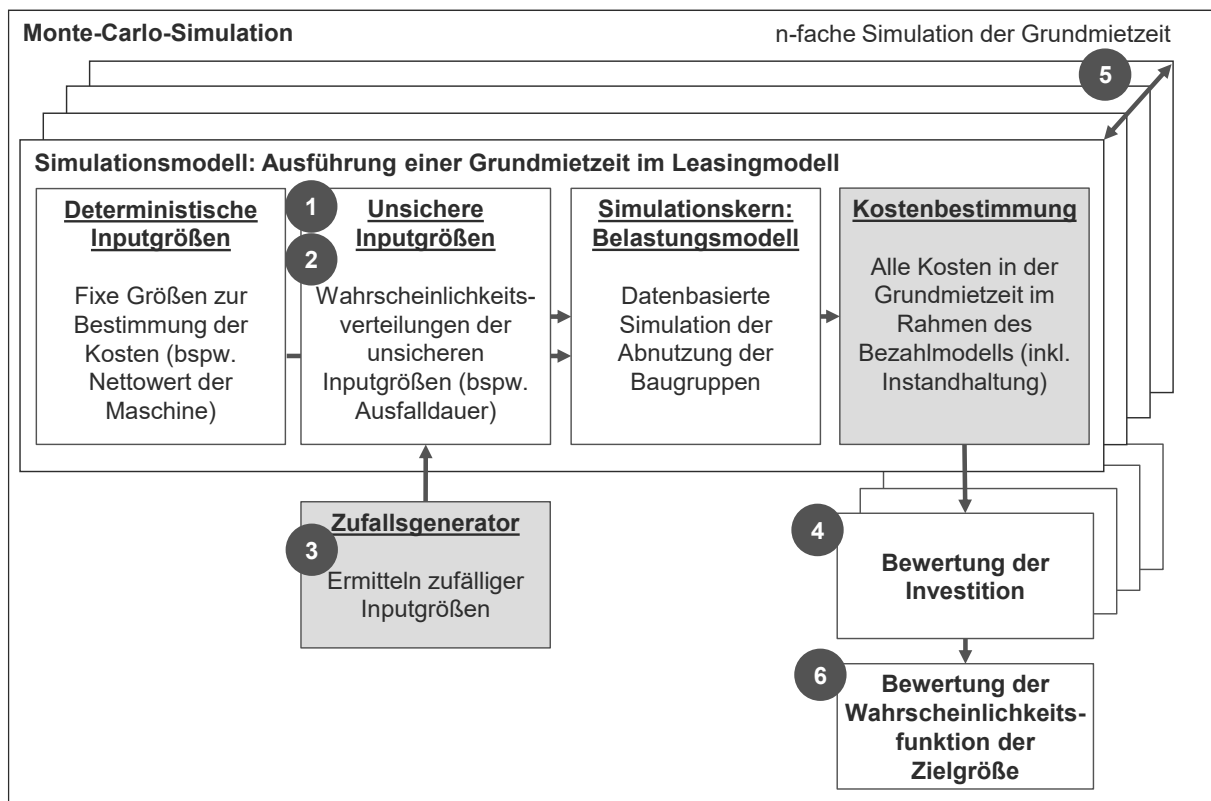


Abbildung 22 Bewertung des Bezahlmodells mit der Monte-Carlo-Simulation in Anlehnung an [STA21b] und [HER64]

wird. Jede simulierte Grundmietzeit ist einzigartig. In einem einzelnen Simulationsdurchlauf ist die Investition vorteilhaft, welche den größten Kapitalwert zum Ergebnis hat (Gleichung (2.8)). Da die Einnahmen nicht betrachtet werden, ist die Zielgröße immer negativ. Die Simulationsdurchläufe werden N -fach wiederholt (5), bis eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und das Risikoprofil des Kapitalwerts zu ermitteln sind (6). Dies erlaubt zum einen die Berechnung des Erwartungswertes und der Streuung, zum anderen die Bestimmung des Risikoprofils des Kapitalwertes. [BUS18] Das Vorgehen wird für alle Entscheidungsalternativen angewendet.

4.3.2 μ - σ -Prinzip

Im zweiten Schritt wird das μ - σ -Prinzip angewendet. Ist der Investor risikoneutral, so dient der Erwartungswert μ der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Kapitalwerte als Auswahlkriterium (Kapitalerwartungswert): [BUS18; LAU18]

$$\max (\mu(K_{0i})) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K_{0ij} \quad (4.7)$$

Hierbei kann bei hohem N näherungsweise das arithmetische Mittel herangezogen werden. Durch die Erweiterung um das Risiko wird die Streuung der Kapitalwerte um den Erwartungswert $\mu(K_{0i})$ gemessen. Das Risiko σ wird definiert durch die Standardabweichung, welche bei großen N definiert ist als:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (K_{0ij} - \mu(K_{0i}))^2} \quad (4.8)$$

Je stärker die Kapitalwerte vom Erwartungswert abweichen, desto höher ist das gemessene Risiko der Investitionsalternative. [BUS18] Risiko und Erwartungswert werden in einem Koordinatensystem abgebildet, was einen Vergleich von Investitionsalternativen ermöglicht. Der Vergleich zweier Investitionen erfolgt anhand des Verhältnisses von Risiko und Erwartungswert, welcher in Form einer Präferenzfunktion abgebildet wird:

$$\Phi(\tilde{x}) = \Phi(\mu, \sigma) \quad (4.9)$$

Diese Funktion beschreibt den Zusammenhang von μ und σ . In der Regel ist der Investor risikoavers, was bedeutet, dass ein niedrigeres Risiko bei gleichen Erwartungswert-

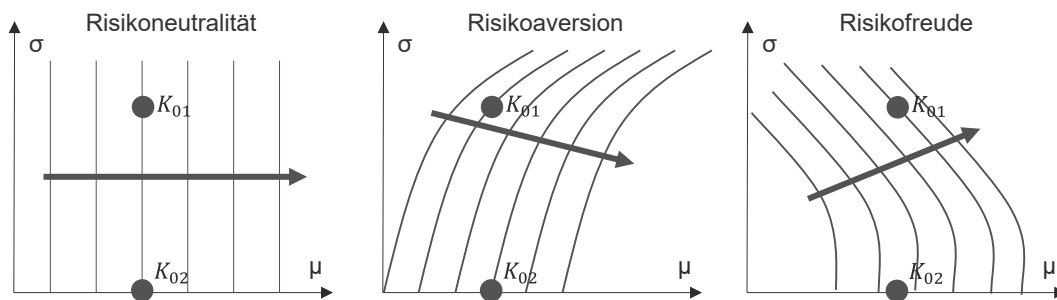


Abbildung 23 Indifferenzkurvensysteme im μ - σ -Diagramm nach [LAU18]

ten präferiert wird. In Abbildung 23 sind Indifferenzkurven der Präferenzfunktion abgebildet, die μ - σ -Kombinationen der Alternativen K_{01} und K_{02} darstellen, die der Entscheider als äquivalent ansieht. [LAU18] Die Pfeile zeigen jeweils die steigenden Risikopräferenzwerte an. Der Entscheider versucht die Risikopräferenz zu maximieren. In der Abbildung ist zu erkennen, dass je nach Risikopräferenzfunktion die Alternativen K_{01} und K_{02} unterschiedlich bewertet werden. Bei Risikoneutralität sind die Alternativen gleichwertig (links), bei Risikoaversion wird K_{02} der K_{01} vorgezogen (Mitte), bei Risikofreude wird hingegen K_{01} der K_{02} vorgezogen (rechts).

Aus der Präferenzfunktion lässt sich das Sicherheitsäquivalent einer unsicheren Investitionsentscheidung ableiten. Das Sicherheitsäquivalent beschreibt eine Investition ohne Risiko ($\sigma=0$) und gleichem Nutzen und kann bei bekannter Funktion aus der risikobehafteten Entscheidungsalternative abgeleitet werden.

Das μ - σ -Prinzip kann im Widerspruch zum Dominanzkriterium stehen, weshalb das Dominanzkriterium zur Vorauswahl dient und die Entscheidung auf Grundlage des μ - σ -Prinzip getroffen wird. [LAU18; BUS18] Die Kombination aus Dominanzkriterium und Risikopräferenz ermöglicht einen objektiven Vergleich alternativer Investitionsentscheidungen. Für die ganzheitliche Bewertung der Investition wird im nächsten Kapitel die Anreizwirkung beschrieben.

4.4 Anreizwirkung

Das belastungsbasierte Bezahlmodell bietet entscheidungsrelevante Vorteile gegenüber dem klassischen Leasing, welche über die Anreizwirkung abgebildet werden. Es wird angenommen, dass sich über das Bezahlmodell und dessen Informationsasymmetriestrategien das Verhalten des Leasingnehmers verändert und das Prinzipal-Agen-

ten-Problem aufgelöst wird. Das hat unmittelbare Auswirkungen auf entscheidungsrelevante Kostenfaktoren. Zur Analyse der Wirkung der Anreize werden folgend die Leasingrate und weitere Kosten im Rahmen der Lebenszykluskosten näher untersucht.

4.4.1 Anreizwirkung auf die Leasingrate

Die Anreizwirkung auf die Leasingrate wird anhand ihrer Bestandteile diskutiert. Zunächst werden die Bestandteile der Leasingrate $LR_{t,bel}$ untersucht. Anschließend erfolgt die gesonderte Betrachtung des Amortisationsanteils $AT_{t,bel}$. Die Festlegung, ob die Bestandteile der Leasingrate eine Anreizwirkung haben, wird unter folgenden Annahmen getroffen (Tabelle 8).

Tabelle 8 Definition der Anreizwirkung auf die Bestandteile der Leasingrate

$AT_{t,bel}$	Anreizwirkung – die Amortisation (Tilgung) des eingesetzten Kapitals wird durch die Anreize beeinflusst, da mit einer geringeren Belastung zu rechnen ist. Damit erhöht sich der Zeitwert der Maschine.
V_t	Keine Anreizwirkung – die Verzinsung des eingesetzten Kapitals wird als unabhängig betrachtet, da diese von der Bonität des Leasingnehmers abhängig ist. Die Bonität wird als unverändert definiert.
MK_t	Keine Anreizwirkung – die Marge zur Abdeckung von Kosten wird im Sinne der Anreizwirkung als unabhängig definiert. Potenziell steigende Kosten durch eine aufwändigere Abrechnung werden vernachlässigt.
$MR_{t,bel}$	Anreizwirkung – die Marge zur Abdeckung des Risikos MR wird im Rahmen der Anreizwirkung verändert, da insbesondere das Restwertrisiko für den Leasinggeber minimiert bzw. eliminiert wird.
MG_t	Keine Anreizwirkung – die Gewinnmarge soll als durch den Leasinggeber gegebener Wert definiert werden, welcher unabhängig vom Bezahlmodell ist.

In Bezug auf die Bestandteile der Mietbemessungsgrundlage (siehe Gleichung (2.5)) als Basis der Amortisationszahlungen werden im Zuge der Anreizwirkung des belastungsbasierten Modells die Annahmen in Tabelle 9 getroffen.

Damit hat ausschließlich der Restwert einen Einfluss auf die Mietbemessungsgrundlage. Alle weiteren Bestandteile werden als unabhängig erachtet bzw. als unverändert zum klassischen Leasing. Der Restwert wird direkt durch die Belastung im Prozess beeinflusst. Wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt, wird der Restwert auch von weiteren Faktoren bestimmt. Datentransparenz hat nicht nur einen positiven Effekt auf die Risikostruktur des Leasinggebers [HON09; GLA18], sondern lässt sich in den Wiederverkaufswert einpreisen. Bei sonst gleichen Bedingungen ist ein Käufer im Zweitmarkt bereit mehr zu

zahlen, wenn die vollständige Historie der Nutzung der Maschine in Form der Belastung nachweisbar ist. Dies wirkt sich positiv auf den Restwert RW_{TG} bzw. den Liquidationserlös L_n am Ende der Grundmietzeit aus.

Tabelle 9 Definition der Anreizwirkung auf die Mietbemessungsgrundlage

AK_{netto}	Keine Anreizwirkung - Die Nettoanschaffungskosten werden nicht beeinflusst
V_{ANZ}	Keine Anreizwirkung - Anzahlungen und Zwischenfinanzierung werden nicht beeinflusst
MSZ	Keine Anreizwirkung - Mietsonderzahlungen werden nicht beeinflusst
IZ	Keine Anreizwirkung - Investitionszulagen werden nicht beeinflusst
RW_{TG}	Anreizwirkung - Restwert wird durch die Anreizwirkung beeinflusst

Neben dem allgemeinen Einfluss auf die Mietbemessungsgrundlage wird auf die drei Komponentenklassen des belastungsbasierten Modells eingegangen, deren Zahlungsreihen auf unterschiedliche Art durch die Anreize beeinflusst werden. In Tabelle 10 wird der Einfluss auf die Klassen beschrieben. Bei den indirekt belastungsbasierten Komponenten ist keine allgemeine Aussage zu treffen, weshalb Einzelfallentscheidungen zu treffen sind. Beispielsweise ist die Anzahl der Werkstückwechsel nicht immer zu beeinflussen, da diese oft durch den Prozess vorgegeben sind. Auch wenn der Anreiz besteht, die Werkzeugwechsel zu minimieren, sind diese durch den Prozess vorge-schrieben und schwer zu verändern.

Tabelle 10 Definition der Anreizwirkung auf die Belastung der Komponentengruppen

Direkt belastungs-basiert	Anreizwirkung - es besteht eine Anreizwirkung, da die Belastungen im Prozess auf den Wertverlust der Komponenten transparent für den Anwender sind und durch Kosten sanktioniert werden.
Indirekt belastungs-basiert	Anreizwirkung - es besteht zum Teil eine Wirkung, da die Belastungen im Prozess auf den Wertverlust der Komponenten transparent für den Anwender sind und durch Kosten sanktioniert werden.
Nicht belastungsba-siert	Keine Anreizwirkung - es besteht keine Wirkung durch die Anreize, da diese Komponenten unabhängig von der Nutzung ausfallen und verschleifen.

Wertverluste auf Komponentenebene werden unterschiedlich beeinflusst. Die resultierenden Abnutzungsvorräte der direkt und indirekt belastungsbasierten Komponentengruppen werden durch eine Kombination aus Informationsstrategie, Nudging und

Zwang (in Form höherer Kosten zum Verursachungszeitpunkt) beeinflusst. Dies erfolgt durch Veränderung des Verhaltens bzw. der Nutzung der Maschine. Es wird angenommen, dass Prozessveränderungen durch die Anreizwirkung zu geringeren Kosten des Leasingnehmers führen und die Effekte auf Komponentenebene nicht entgegengesetzt wirken.³³

Neben den Effekten auf die Amortisation wird die Marge zur Abdeckung des Risikos $MR_{t,bel}$ beeinflusst. Dies lässt sich daraus herleiten, dass das Verhaltensrisiko verringert wird. Für den Leasinggeber lässt sich hieraus das Objektrisiko als Komponente des Marktpreisrisikos besser steuern und vorhersagen. Dazu nimmt der Leasinggeber an, dass durch die Anreizsteuerung der Leasingnehmer in seinem Sinne handelt. Diese Transparenz führt damit zu einer geringeren Risikomarge. Der absolute Wert der Senkung ist schwer definierbar, da dieser vom Risikomanagement des Leasinggebers abhängig ist. [GLA18] Der Expertenmeinung folgend wird vereinfacht eine Eliminierung des Restwertrisikos angenommen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass innerhalb der Leasingrate der Risikozinsanteil und die Amortisation durch die Anreize des belastungsbasierten Leasings verändert werden. Die Höhe des Einflusses beider Elemente wird basierend auf den Erkenntnissen einer Befragung von Branchenexperten angenommen. Hierfür werden Informationen zu ähnlichen Maschinen als Vergleichsbasis herangezogen. Ein solcher Benchmark lässt eine Einschätzung des Einflusses zu. Die Datenbasis wird durch Informationen des Leasinggebers oder des Herstellers erweitert. [STA21b]

4.4.2 Anreizwirkung auf die Lebenszykluskosten

Neben der Leasingrate werden weitere Kostenfaktoren durch das belastungsbasierte Modell beeinflusst und in die Kalkulation mit einbezogen. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen, wird eine Übersicht der potenziellen Kostenfaktoren, welche die LZK einer Werkzeugmaschine beeinflussen, erstellt. [ABE09; BÜN09; ALB09; VDI 2884; DIN EN 60300-3-3] Trotz der Möglichkeit der Transparenzschaffung bei Entscheidungen, zahlreicher Erweiterungen [LAN13; STÄ17] und der Verfügbarkeit von Anwendungsbeispielen in der Literatur [REC18], wird die LZK-Rechnung in der Praxis

³³ Theoretisch kann eine Verbesserung der Belastung einer Komponente zu einer Verschlechterung der Belastung einer anderen Komponente führen. Aus Gründen der Komplexität wird dieser Zusammenhang vernachlässigt.

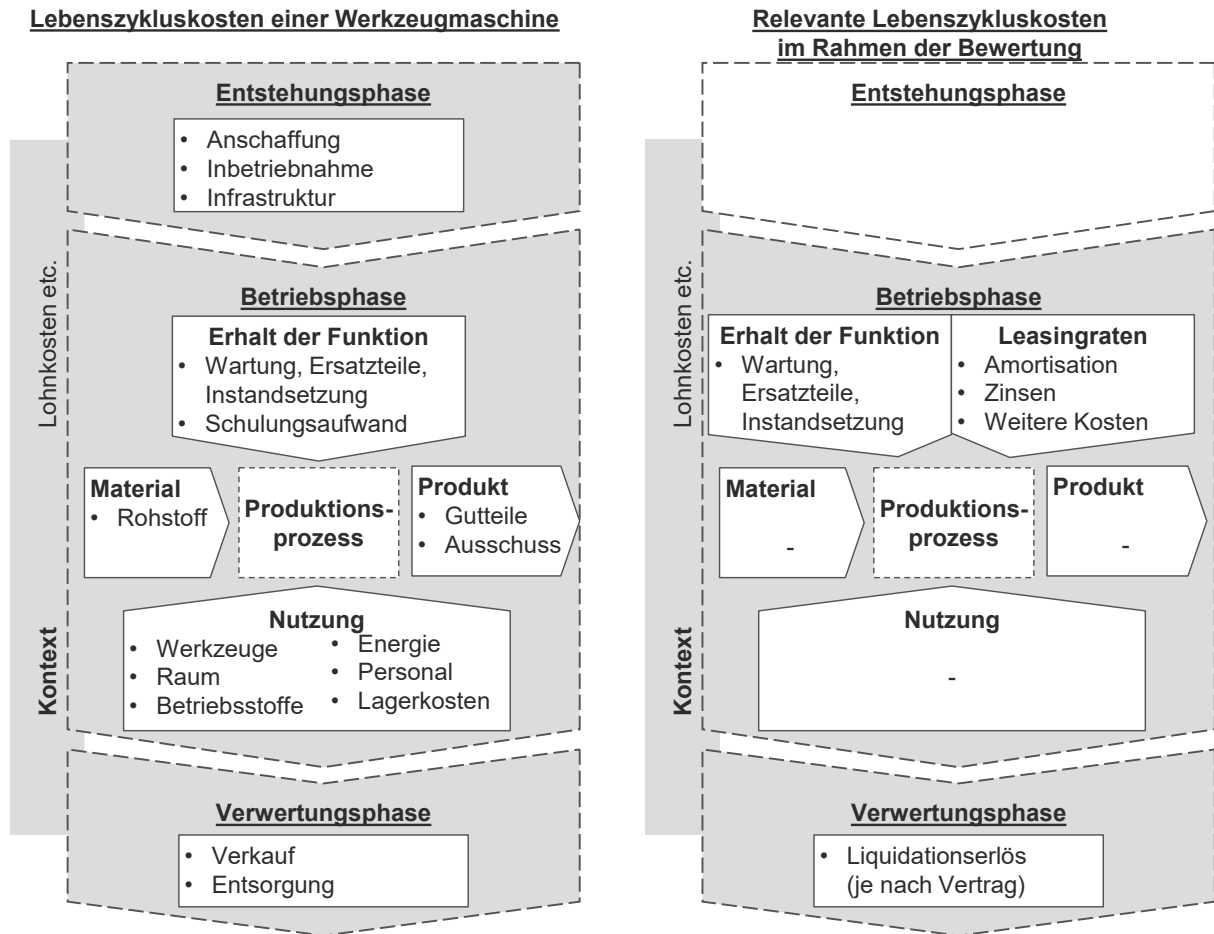


Abbildung 24 Phasenmodell der Lebenszykluskosten nach VDMA 34160 [VDMA 34160] (links) und die Anpassung an die Bewertung im Leasing (rechts)

wenig angewandt. [MAT12; LAN16] Gründe hierfür sind meist der hohe Aufwand sowie die Schwierigkeit der zuverlässigen Kostenantizipation. [MAT12; LAN16]

Die VMDA 34160 [VDMA 34160; VDM12] stellt ein Standardmodell für den Werkzeugmaschinenbau dar und wird für den Anwendungsfall des Leasings aus Leasingnehmerperspektive angepasst (siehe Abbildung 24). Zu diesem Zweck werden ausgewählte Faktoren (bspw. Instandhaltungskosten) in das Bewertungsmodell integriert. Die Entstehungsphase wird nicht betrachtet, da keine Veränderungen der Kosten während der Inbetriebnahme oder im Zusammenhang mit der benötigten Infrastruktur zu erwarten sind. Die Verwertungsphase wird aus Perspektive des Leasingnehmers auf den Restwerverlös (Minder- oder Mehrerlös) reduziert. Die Betriebsphase verändert sich dahingehend, dass hier die Anschaffungskosten über die Leasingraten gezahlt werden. Diese Phase umfasst alle Aufwendungen während der Nutzung der Maschine und wird durch zahlreiche Faktoren des Produktionsprozesses, wie Prozesszeiten oder Produktionsleistungen, beeinflusst. [ABE09] Neben den Investitionskosten sind Aufwendungen für

Instandhaltung, Energie und Werkzeuge relevante Kostentreiber. [ABE09; DER11; BLE10] Um das Modell nicht unnötig komplex zu machen, werden die Energie- und Werkzeugkosten nicht betrachtet, da die industrielle Datenbasis für diese Kosten i. d. R. ungenügend aufbereitet ist. [CHR46; MAT12; HER11] Die Kosten der Betriebsphase sind eng mit den Instandhaltungskosten, die von der Belastung beeinflusst werden, verknüpft und werden gemeinsam modelliert. [ABE06] Aus der Eingrenzung der Kostenelemente ergibt sich für die Betrachtung der entscheidungsrelevanten Lebenszykluskosten folgender Zusammenhang:

$$LZK_t = \sum_{t=1}^n LR_t + \sum_{t=1}^n IH_t + L_n \quad (4.10)$$

LZK_t	[€]	Lebenszykluskosten im Zeitpunkt t
IH_t	[€]	Instandhaltungskosten im Zeitpunkt t
LR_t	[€]	Leasingraten im Zeitpunkt t
L_n	[€]	potenzieller Liquiditätserlös

4.5 Kostenberechnung

Die Ergebnisgrößen beruhen auf einem Kostenrechnungssystem, welches durch eine Zuordnungsvorschrift eindeutig definiert wird. [WUN02] Im Rahmen der Simulation werden für Szenario 1 des Bewertungssystems ausschließlich die direkten Leasingkosten betrachtet. Damit sind alle Kosten inkludiert, welche sich aus der Beschaffung des Leasingobjektes ableiten und den Kapital- und Anlagenkosten im Rahmen der Kostenartenrechnung zuzurechnen sind (Abbildung 25). [BEC16]

Für die Analyse von Szenario 2 des Bewertungssystems sind die entscheidungsrelevanten Material- und Personalkosten inkludiert (indirekte Leasingkosten). Damit sind die direkten Leasingkosten des belastungsbasierten Bezahlmodells durch die Leasingraten und den Liquidationserlös beschrieben:

$$E_{direkt,bel} = \sum_{t=1}^n LR_{t,bel} + L_{n,bel} \quad (4.11)$$

Die indirekten Leasingkosten des belastungsbasierten Modells sind:

$$E_{indirekt,bel} = \sum_{t=1}^n LZK_{t,bel,indirekt} \quad (4.12)$$

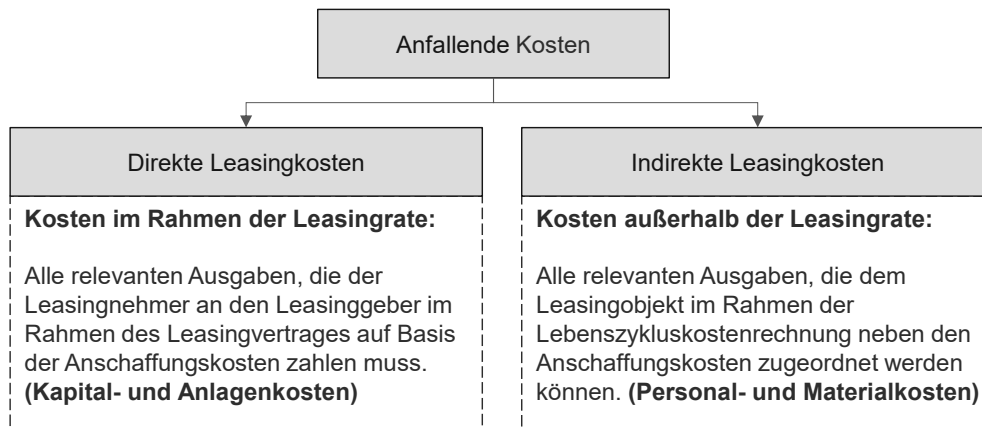


Abbildung 25 Direkte und indirekte Leasingkosten im Modell

wobei $LZK_{t,bel,indirekt}$ die indirekten Lebenszykluskosten in t beschreiben. In den folgenden Abschnitten werden die Bestandteile der Kostenberechnung vorgestellt.

4.5.1 Instandhaltungsereignisse

Zu den Zeitpunkten T_k und T_g fallen die Komponenten k und g aus. Die Kosten, die mit dem Ausfall in Verbindung stehen, werden in IH_t aggregiert und den indirekten Leasingkosten zugeschrieben. Damit beschreibt IH_t alle Instandhaltungskosten aller Komponenten mk und mg als Gesamtheit von k und g :

$$IH_t = \sum_{k=0}^{mk} IH_{t,k} + \sum_{g=0}^{mg} IH_{t,g} \quad (4.13)$$

Wird angenommen, dass t eine Leasingperiode darstellt, so setzen sich die Instandhaltungskosten aus allen Instandhaltungsereignissen j innerhalb dieser Leasingperiode zusammen³⁴:

$$IH_{t,k} = \sum_{i=0}^j IH_{t,k,i} \quad (4.14)$$

Dabei werden die Ereignisse auf Tagesbasis aufgelöst, wodurch an jedem Tag für jede Komponente entweder ein Ereignis stattfindet, das mit Kosten bewertet wird, oder nicht. Die Verteilung der Zufallsvariablen T_k ist empirisch aus der Datenbasis hergeleitet. [STA21b] Die Zusammensetzung der Kosten der Instandhaltung beschreibt die wesentlichen Kostentreiber (vgl. [BEC00; ENG03]) und wird in direkte und indirekte Kosten unterteilt (vgl. [PRO02; BLÜ11; KRÖ14; KÄH17; BUS20]). Damit ergibt sich:

³⁴ Gleiches gilt für die Komponenten mg

$$IH_i = IH_{i,direkt} + IH_{i,indirekt} \quad (4.15)$$

Die direkten Kosten der Instandhaltung ergeben sich aus Personal-, Material- und Fremdleistungskosten:

$$IH_{i,direkt} = IH_{i,personal} + IH_{i,material} + IH_{i,fremd} \quad (4.16)$$

Die $IH_{i,personal}$ werden durch Multiplikation der deterministischen Lohnkosten des Instandhaltungspersonals LK_{IHP} mit der stochastischen Dauer der Instandhaltung T_{IH} in Stunden bestimmt. Es wird angenommen, dass die Tätigkeit von einer durchschnittlich qualifizierten und entlohnten Person durchgeführt wird. Weitere Lohnnebenkosten werden nicht betrachtet. Die Materialkosten ergeben sich aus Kosten und Anzahl n_{aus} der erforderlichen Ersatzteile sowie deren Beschaffungs- und Lagerkosten im Rahmen der Instandsetzung. [KRÖ14] Die Materialkosten werden durch die stochastischen Kosten der ausgetauschten Komponenten KK_{aus} definiert. Die Fremdleistungskosten nach [STR12] sind extern bezogene Wartungs-, Inspektions- und Instandsetzungstätigkeiten und werden durch die Personalkosten LK_{fremd} beschrieben.

Die indirekten Kosten der Instandhaltung werden nach [BIE08] als die Summe der messbaren ungenutzten Verbräuche der stillgelegten Betriebsmittel und dem Erfolgsausfall beschrieben:

$$IH_{i,indirekt} = IH_{i,betriebsmittelverbrauch} + IH_{i,erfolgsausfall} \quad (4.17)$$

Dabei werden die Auswirkungen dem Produktions- und Absatzbereich zugeordnet, welche sich einer direkten Messung entziehen. [BIE90] Der Betriebsmittelstillstand wird fokussiert. Weitere Effekte, wie Verkettungsverluste im Rahmen von Sekundärausfällen, werden nicht betrachtet. Es wird ein pauschaler Kostensatz SK_{still} angenommen. Die Dauer des Ausfalls T_{aus} wird in Tagen angegeben. Die Bestandteile der Instandhaltungskosten sind folgend zusammengefasst:

$$IH_{bel,i,personal} = T_{IH} * LK_{IHP} \quad (4.18)$$

$$IH_{bel,i,material} = n_{aus} * KK_{aus} \quad (4.19)$$

$$IH_{bel,i,fremdleistung} = T_{IH} * LK_{fremd} \quad (4.20)$$

$$IH_{bel,i,still} = T_{aus} * SK_{still} \quad (4.21)$$

T_{IH} [h] Dauer der Instandhaltung

T_{aus}	[Tag]	Dauer des Ausfalls
LK_{IHP}	[€]	Lohnkosten des Instandhaltungspersonals
n_{aus}	[-]	Anzahl der erforderlichen Ersatzteile
KK_{aus}	[€]	Kosten der ausgetauschten Komponente
LK_{fremd}	[€]	Fremdpersonalkosten
SK_{still}	[€]	Stillstandkosten

4.5.2 Amortisationskosten

Das belastungsbasierte Bezahlmodell dieser Arbeit leitet die Amortisationskosten aus der Minderung des Abnutzungsvorrates ab. Für das Bewertungsmodell wird dieser Abnutzungsvorrat auf Komponentenebene modelliert und mit einem Preis belegt, sodass sich für einen definierten Abnutzungsanteil ein monetäres Äquivalent ableitet. Dieser Preis leitet sich aus der Mietbemessungsgrundlage ab. Für die nicht-belastungsbasierten Komponenten sind die Mietbemessungsgrundlage MBG_g und die Grundmietzeit TG zu bestimmen. Als MBG_g wird vereinfacht der erwartete Restwert vom Neuwert der Komponente subtrahiert: (vgl. [INS99])

$$MBG_g = AK_{netto} - RW_{TG} \quad (4.22)$$

Es wird eine lineare Abschreibung angenommen. Bei den direkt und indirekt belastungsbasierten Komponenten wird aus Gleichung (4.4) abgeleitet, dass der Vektor der Indikatoren \vec{X} sowie die MBG_k zur Bestimmung der Amortisation notwendig sind. Die MBG_k ergibt sich aus dem Neuwert der Komponente, welcher in jedem Zeitintervall um den Faktor der Abnutzung gemindert wird. An einem Indikator für eine Komponente $X_{k,t}$ wird dies in Abbildung 26 dargestellt. [STA21b] Dabei ist T_k die Dauer bis zum Ausfall der Komponente. Die maximale kumulierte Belastung bzw. der Abnutzungsvorrat werden mit der MBG_k gleichgesetzt, sodass für den Indikator der Zusammenhang aus Gleichung (4.4) gilt. Wenn Gleichung (4.5) gilt, dann wird in jedem Zeitintervall Δt der Wert des Indikators $X_{k,t}$ abgeleitet, welcher die zu zahlenden Kosten in t bestimmt. So wird in t bei bekanntem T_k und bekannter kumulierter Belastung die geschätzte Restlebensdauer hergeleitet. Hieraus ergibt sich folgender Zusammenhang für den Belastungsvorrat BV_k :

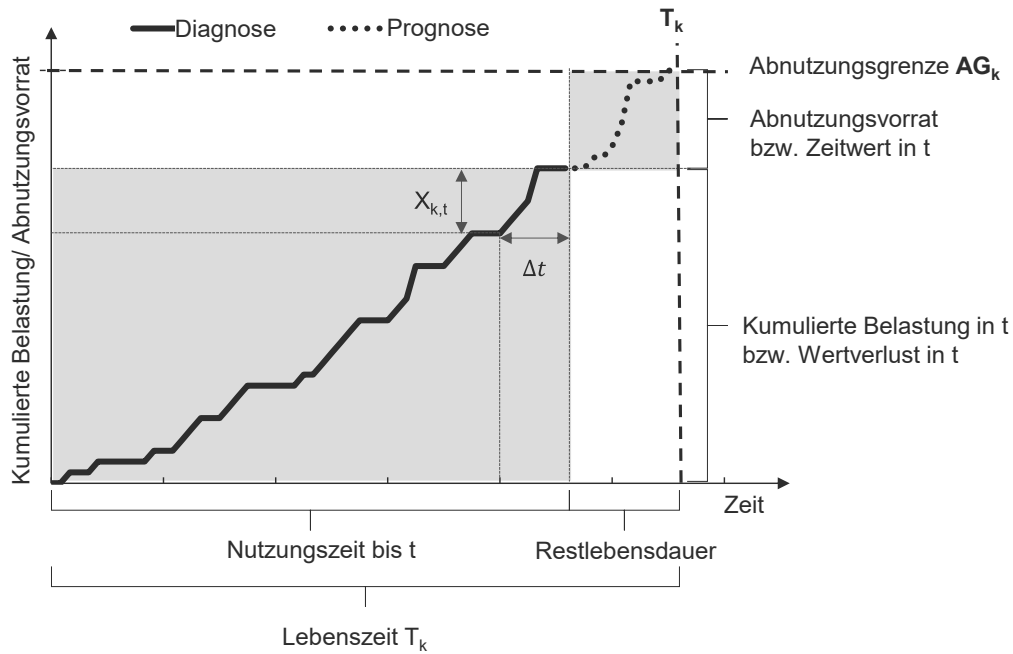


Abbildung 26 Exemplarischer Verlauf des Abnutzungsvorrates nach [STA20b]

$$BV_k(t) = X_{k,TG_k} - \sum_{\tau=0}^t X_{k,\tau} \quad (4.23)$$

Der Zeitwert ZW_k der Komponente in t ergibt sich aus der Differenz der MBG_k und dem kumulierten Wertverlusten nach:

$$ZW_k(t) = MBG_k - \sum_{\tau=0}^t MBG_k \frac{X_{k,\tau}}{X_{k,TG_k}} \quad (4.24)$$

Diese Funktion ergibt sich nur, wenn über die Tätigkeiten im Rahmen der Instandhaltung der Wert der Baugruppe nicht verändert wird. Es wird jedoch angenommen, dass die Instandhaltung, bspw. der Austausch verschlissener Komponenten, den Zeitwert beeinflusst. Weiterhin wird angenommen, dass während jedem Verschleißereignis eine Korrektur stattfindet, deren Höhe über den Wert der Ersatzteile KK_{aus} und dessen Anzahl n_{aus} approximiert wird. Dabei wird die Korrektur anteilig zum Zeitwert addiert. Der Anteil leitet sich aus einem hypothetischen Zeitwertfaktor ab, welcher die maximale Aufwertung der Komponente nach oben beschränkt. Damit ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$ZW_k(t) = MBG_k - \sum_{\tau=0}^t MBG_k \frac{X_{k,\tau}}{X_{k,TG_k}} + \sum_{l=0}^m KW_{k,l}(t) \quad (4.25)$$

Wobei der Korrekturterm $KW_{k,l}(t)$ eine Sprungfunktion darstellt, welche zum Zeitwert zu addieren ist, wobei gilt:

$$KW_{k,l}(t) = \begin{cases} 0 & t < T_k \\ \min \left(MBG_k - \left(\sum_{\tau=0}^{T_k} \frac{MBG_k}{T_{k,ab}} \right) \alpha_k - ZW_k(T_k), KK_{aus,l} * n_{aus,l} \right) & t \geq T_k \end{cases} \quad (4.26)$$

$KW_{k,l}(t)$ [€] Korrekturterm des Zeitwertes der Komponente k

$T_{k,ab}$ [Tag] Dauer der vollen linearen Abschreibung

T_k [Tag] Ausfallzeitpunkt

α_k [€] Anteil des Zeitwertfaktors am Wertverlust

$ZW_k(T_k)$ [€] Zeitwert zum Ausfallzeitpunkt

$KK_{aus,l}$ [€] Kosten der ausgetauschten Komponente

$n_{aus,l}$ [-] Anzahl der erforderlichen Ersatzteile

MBG_k [€] Mietbemessungsgrundlage der Komponente k

Dabei beschreibt $\alpha_k \leq 1$ den Anteil des Zeitwertfaktors am Wertverlust gemessen an der linearen Abschreibung. Diese Beschränkung ist notwendig, da die Komponente sonst durch die Instandsetzung einen unrealistisch hohen Wert annehmen kann. Der Faktor $T_{k,ab}$ beschreibt die Dauer der linearen Abschreibung der Komponente (bspw. nach AfA-Tabelle). Damit ist der Zeitwertfaktor als Wertbegrenzung ein Anteil der linearen Abschreibung und ausschließlich abhängig von der Zeit. α_k leitet sich aus der durch den Leasinggeber erwarteten Gewinnmarge ab und wird so definiert, dass die Differenz aus dem Erwartungswert der Restwerte und dem Abschreibungswert die erwartete Gewinnmarge bildet.

Für die Berechnung der Amortisationsanteile müssen folgende Werte ex ante bekannt sein (Tabelle 11).

Tabelle 11 Notwendige Informationen zur Berechnung der Amortisation

T_k	Dauer bis zum Ausfall der Komponente
MBG_k	Die Mietbemessungsgrundlage der Komponente
X_{k,T_k}	Die maximale kumulierte Belastung der Komponente k, bei welcher die Komponente ausfällt bzw. ausgetauscht werden muss.
$X_{k,t}$	Die kumulierte Belastung im Intervall von t-1 bis t, welche in t als Berechnungsbasis des Amortisationsanteils dient.

Für die Bestimmung von T_k liegen empirische Daten vor. Der Belastungsvorrat lässt sich jedoch auf dieser Datenbasis schwierig herleiten, da die Historie der Belastung bis zum Ausfall nicht bekannt ist. Die Betriebsdaten, die einen Verlauf bis zum Ausfall beschreiben, werden als Annäherung genutzt. Nach [STA21b] werden die Produkte, welche auf der Maschine gefertigt wurden, durch Experten anhand ihres Einflusses auf die Belastung bewertet. Dies ermöglicht eine Annäherung des Kurvenverlaufs, wobei der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang in der Regel komplexer als die Approximation ist. Die Bewertung anhand der Produktbelastung erlaubt die Schätzung einer Verteilung der Belastung je Tag. [STA21b] Die Bestimmung von T_k im Rahmen des Bewertungsmodells wird in Kapitel 4.6.2, die Bestimmung des Verlaufs der Belastung bis zum Ausfall wird in Kapitel 4.6.3 erläutert.

4.5.3 Kapitalkosten

Der Kalkulationszinssatz im Rahmen der Kapitalwertbestimmung bestimmt die Investitionsentscheidung maßgeblich und ist von der Kapitalstruktur des Unternehmens abhängig. Bei unterschiedlicher Finanzierung verändert sich die Zusammensetzung von Eigen- und Fremdkapital. [BUS18] Werden Eigen- und Fremdfinanzierung steuerrechtlich nicht gleich behandelt oder wird der Verschuldungsgrad eines Unternehmens durch die Fremdkapitalaufnahme stark beeinflusst, so wird die Investitionsentscheidung in Kombination mit der Finanzierungsentscheidung getroffen und das Kapitalwertmodell entsprechend angepasst. [BUS18] Der Kalkulationszinssatz wird über die gewichteten Kapitalanteile der Eigen- und Fremdkapitalkostensätze nach Steuern WACC ermittelt und ist definiert als: [BRE18]

$$wacc_s = i_{EK} \frac{VM_{EK}}{VM_{FK} + VM_{EK}} + i_{FK}(1 - s) \frac{VM_{FK}}{VM_{FK} + VM_{EK}} \quad (4.27)$$

i_{EK}	[%]	Eigenkapitalverzinsung
i_{FK}	[%]	Fremdkapitalverzinsung
VM_{EK}	[€]	Marktwert des Eigenkapitals
VM_{FK}	[€]	Marktwert des Fremdkapitals

s [%] Steuersatz für Unternehmensgewinne³⁵

Hierbei wird i_{FK} über den gewichteten Durchschnitt der Kosten aller Fremdkapitalformen des Unternehmens bestimmt. [BEC18] Die Eigenkapitalrendite errechnet sich über das Capital Asset Pricing Modell. [BEC18; BUS18] Die Anteile der beiden Marktwerte sind für das Unternehmen zu bestimmen. [PWC17] schätzt die Eigenkapitalquote deutscher Unternehmen auf etwa 37 %, bei Familienunternehmen etwas tiefer auf 35 %. Der WACC in der industriellen Fertigung wird zwischen 7,1 % bis 8,0 % angesetzt. [KPM20; PWC21]

4.5.4 Übersicht des Kostenrechnungssystems

Die für die Kostenrechnung notwendigen Informationen sind deterministische Eingangsdaten. Für die Berechnung der Leasingraten und der Lebenszykluskosten sind Ergebnisgrößen aus der Modellierung des Abnutzungsvorrates abzuleiten. Die deterministischen Daten werden zusätzlich als Eingangsgrößen für die Modellierung herangezogen. Der Zusammenhang der beiden Informationsgruppen ist Abbildung 27 zu entnehmen.

Aus diesem Zusammenhang leitet sich ab, dass ein Modell der Transformationsprozesse für die Kostenberechnung im Leasingmodell notwendig ist. Nach [VDI 3633-7] wird die Kostenberechnung als Ergänzung der Simulation gesehen. Die Kostenberechnung wird als nachgeschaltetes Kostensimulationsmodul integriert. Dieses Vorgehen ermöglicht die Unabhängigkeit der Kostenberechnung vom Simulationskern. Das ist insbesondere dann relevant, wenn andere Datenquellen und damit andere Ansätze der Modellierung zur Verfügung stehen.

Bei diesem Vorgehen wird eine sogenannte Trace-Datei erzeugt, welche alle kostenrelevanten Ereignisse des Simulationsdurchlaufes beinhaltet. Das Kostenmodell wird im Nachgang angewendet, welches alle kostenrelevanten Ereignisse bewertet. [VDI 3633-7] Zur Bewertung der Kosten wird die Trace Datei so aufbereitet, dass diese mit Kosten belegt werden kann. Auf dieser Basis werden die zuvor definierten Gleichungen zur Kostenbestimmung herangezogen.

³⁵ Der Steuersatz ist für die Berechnung notwendig, da Fremdkapitalkosten von der Steuer abgesetzt werden können und damit zu einem Steuervorteil führen.

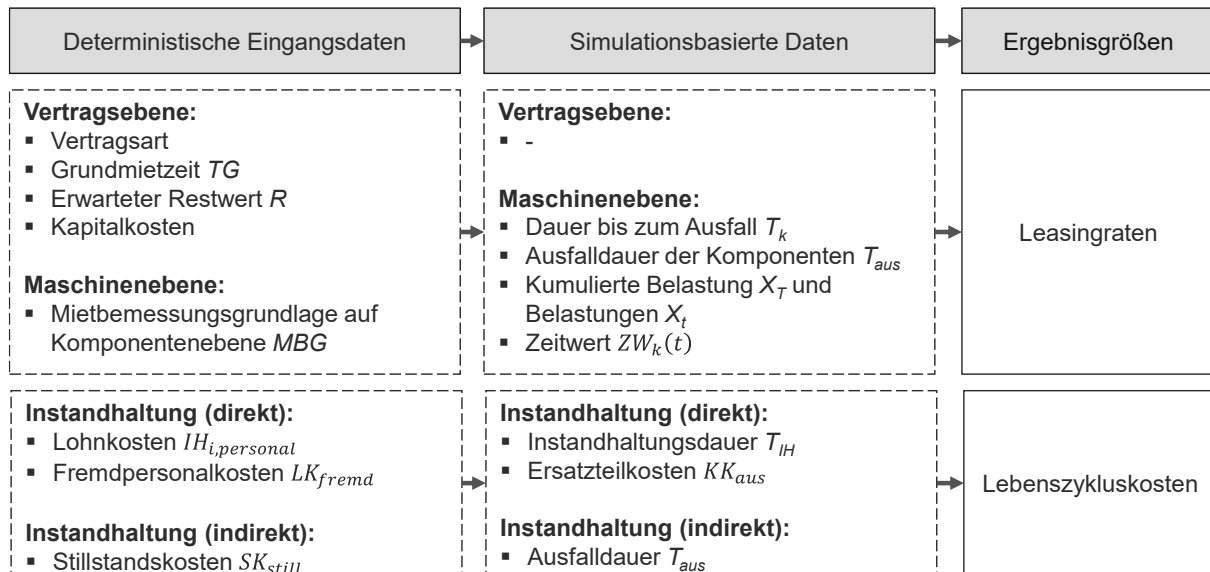


Abbildung 27 Informationsbeziehungen zur Kostenbestimmung

4.5.5 Technische Umsetzung des Kostenrechnungssystems

Das Bewertungsmodell besteht aus dem Kostenberechnungssystem und den zuvor beschriebenen Ansätzen der Investitionsrechnung. Das Kostensimulationsmodell besteht aus dem Kostenberechnungssystem und dem Simulationskern. Der Simulationskern beschreibt den Abnutzungsvorrat und die Ereignisse. Im Folgenden wird das Konzept des Kostensimulationsmodells vorgestellt.

Das Simulationsmodell ist in drei Schritte untergliedert. Im ersten Schritt wird die Trace-Datei als Basis für die Kostenbestimmung generiert. Die Kostenbestimmung erfolgt im zweiten Schritt hinsichtlich der zuvor eingeführten Szenarien, der Leasingraten und der LZK, welche die Trace-Datei und alle kostenrelevanten Ereignisse bewerten. Im dritten Schritt werden diese Ergebnisse bewertet. Es sind neben den deterministischen Eingangsdaten für die Kostenbestimmung simulationsbasierte Daten zu generieren. Im sogenannten Simulationskern werden alle simulationsbasierten Informationen (siehe Abbildung 27) für die Kostenbestimmung ermittelt. Dieser Simulationskern hat zum Ziel, die Grundmietzeit samt des Abnutzungsvorrates und aller Instandhaltungsereignisse zu simulieren. Die Ablaufstruktur des Simulationsmodells bei klassischem Leasing ist Abbildung 29 zu entnehmen, wobei die Simulation der Leasingraten durch die deterministischen Eingangsdaten beschrieben ist. Das Verhalten der Instandhaltung folgt stochastischen Eingangsdaten.

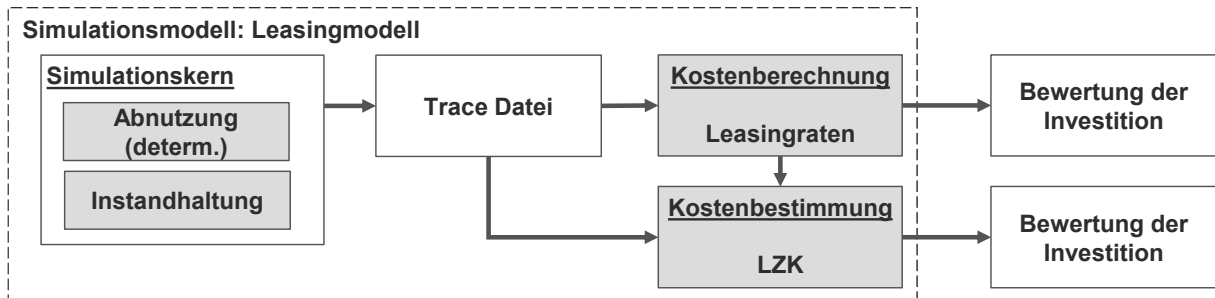


Abbildung 29 Ablaufstruktur des Simulationsmodells für das Leasing

Die Ablaufstruktur des Simulationsmodells für das belastungsbasierte Modell ist Abbildung 28 zu entnehmen. Im Simulationskern werden die Abnutzung und die Instandhaltungsereignisse simuliert. Hierbei stehen beide in direkter Wechselwirkung und werden nicht deterministisch beschrieben. Da die Leasingraten von den Indikatoren abhängig sind, welche wiederum von der Zeitwertfunktion ZW und den Dauern bis zum Ausfall T_k aller Komponenten beeinflusst werden, werden beide integriert betrachtet. Sowohl für das Leasing als auch für das belastungsbasierte Modell werden die Leasingraten und die LZK berechnet. Die Kosten jedes Simulationsdurchlaufes werden nach den definierten Bewertungsansätzen bestimmt.

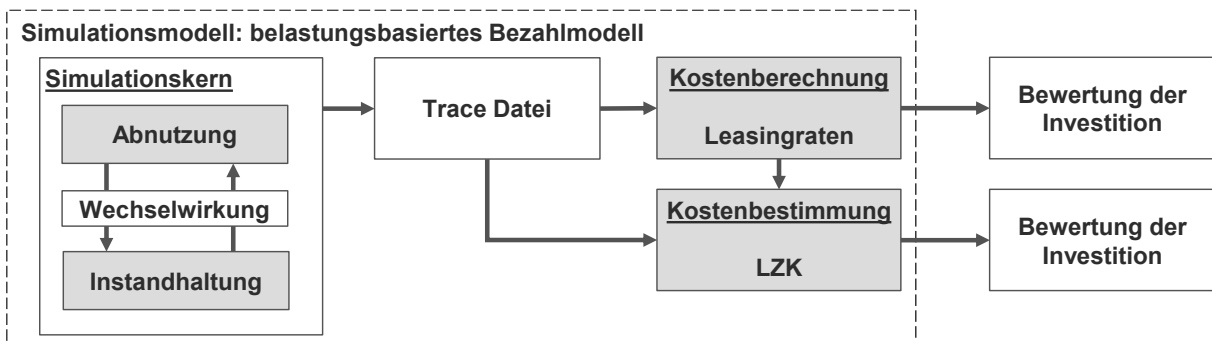


Abbildung 28 Ablaufstruktur des Simulationsmodells für das belastungsbasierte Bezahlmodell

4.6 Simulationskern

Der Simulationskern ist in zwei Elemente aufgeteilt, welche die Instandhaltungsereignisse bzw. die Betriebsdaten als Datenbasis nutzen. Dabei sind die Betriebsdaten für die Modellierung der Ereignisse nicht in ausreichender Qualität und Quantität verfügbar, werden aber für die Bestimmung des Abnutzungsvorrates genutzt. Das Ziel ist die Simulation aller Geschehnisse in einer Leasinggrundmietzeit zur Erzeugung der Trace-Datei. Der Simulationskern des Leasingmodells stellt dabei eine Vereinfachung dar. Im Folgenden werden die Datenbasis und die Elemente inklusive ihrer Wechselwirkung beschrieben.

4.6.1 Ereignisdaten

Die Modellierung der Ereignisse basiert auf empirischen Ereignisdaten vergleichbarer Maschinen des Leasingnehmers. Die Eigenheiten von Ereignisdaten führen zu Herausforderungen, welche klassische Methoden der Statistik nicht ohne größeren Informationsverlust anwendbar machen. Diese Eigenheiten sind die Zensur bzw. Zensierung (engl. *Censoring*) und der Abbruch bzw. Stutzen (engl. *Truncation*). [KLE10] Beobachtungen sind zensiert, wenn der Ausfallzeitpunkt nicht exakt bekannt ist, also der Ausfall einer Komponente nicht im Betrachtungszeitraum stattfindet. Dennoch besteht die Information, dass diese Komponente den Betrachtungszeitraum über nicht ausgefallen ist, ein Ausfall in Zukunft jedoch zu erwarten ist. [KAR19] Zensur kann in drei Gruppen unterteilt werden, die rechte und linke und Intervallzensur, [LEE03; KLE10] wobei im Anwendungsfall die rechte Typ-1 Zensur von Bedeutung ist. [MAR05] Dabei ist die Zeit bis zum Ausfall größer oder gleich der Betrachtungszeit oder die Betrachtungseinheit entzieht sich der Beobachtung (z. B. bei präventivem Austausch der Komponente) [LEE03; KLE10].

Das Stutzen der Daten beschreibt ein Vorfiltern durch bekannte oder unbekanntes Bedingungen. [KAR19] Sind bspw. die Ausfälle schnell behoben und wird der Aufwand der Dokumentation als zu hoch erachtet, kann dies dazu führen, dass Mitarbeiter dies nicht dokumentieren. Ein weiteres Beispiel nach [TAK14] ist die Inbetriebnahme eines neuen Softwaresystems (bspw. ERP-System), in welchem Daten umgezogen werden. In Abbildung 30 sind beispielhafte Verläufe von Ereignisdaten aufgetragen. Komponenten K_3 und K_6 erleben über den gesamten Zeitraum kein Ereignis, sie sind rechts zensiert. Komponente K_4 und K_5 fallen aus, K_1 und K_2 werden bei Ausfall von K_4 ausgetauscht und sind zensiert. Beide Formen der Zensur sind nicht direkt in den Daten zu erkennen, müssen jedoch vor der Modellierung berücksichtigt werden. Weitere Besonderheiten

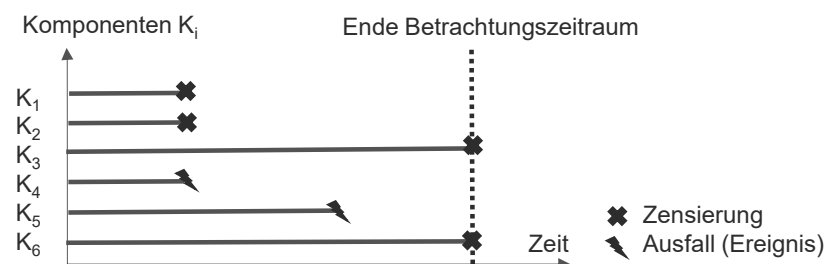


Abbildung 30 Beispielhafte Darstellung von Ausfalldaten nach [REL20]

der Datenbasis, welche im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden, sind Anhang A.1.8 zu entnehmen.

4.6.2 Simulation der Ereignisdaten

Die Simulation der Ereignisse hat zur Aufgabe, ein möglichst realitätsnahes Abbild der Instandhaltungsereignisse während einer Grundmietzeit des Leasingobjektes zu simulieren. Das Leasingobjekt wird in Baugruppen untergliedert und die Ausfälle auf dieser Ebene modelliert. Dabei wird innerhalb der Komponentensimulation eine Unabhängigkeit zwischen den Ereignissen angenommen. Ist die Grundmietzeit aller Baugruppen modelliert, werden diese miteinander in Verbindung gebracht.

Es werden statistische, parametrische Zuverlässigkeitsmodelle genutzt. Die wichtigsten Verteilungen zur Modellierung von Ausfällen sind die Exponentialverteilung, Weibull-Verteilung, Gamma-Verteilung, Extremwert und Normal- und Lognormalverteilung. [KAR19] Sind neben den Instandhaltungsdaten weitere Informationen in ausreichender Qualität vorhanden, sind multivariate Regressionsmodelle einsetzbar (theoretische Diskussion in Anhang A.1.9).

Zuverlässigkeitsmodelle

Auf Basis der Häufigkeitsverteilung der empirischen Ereignisse auf Komponentenebene wird eine theoretische Verteilung hergeleitet. Stehen diese Daten nicht in ausreichender Menge zur Verfügung, können diese über ein Ersatzmodell durch Kombination aus historischen Daten und Expertenschätzungen bestimmt werden (vgl. [PRO02; BLÜ11; KRÖ14; GUT17]).

Für die Zufallsvariable T_k wird bei kontinuierlicher Zeit t die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(t)$ (engl. probability density function, *pdf*) ermittelt. Das Integral über die Zeit bestimmt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Komponente im Zeitintervall $0 < \tau < t$ ausfällt. Diese Größe wird als die monoton steigende kumulative Fehlerwahrscheinlichkeit $F(t)$ (engl. cumulative density function, *cdf*) bezeichnet. Die monoton fallende Zuverlässigkeitsfunktion $R(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t)$ beschreibt den Anteil der Komponenten in t , die noch nicht ausgefallen sind. Das Integral von $f(t)$ von 0 bis ∞ ergibt 1, eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 100 %. [KAP14; KAR19] Die Ausfallrate $\lambda(t)$ (auch momentane Ausfallrate, engl. Hazard Rate) beschreibt die erwartete Anzahl der Ausfälle pro nichtausgefallener Komponente in Zeitpunkt t :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{4.28}$$

Die Ausfallrate kann als Badewannenkurve abgebildet werden. Wie in Abbildung 31 und Tabelle 12 dargestellt, lässt sich die Ausfallrate dabei in drei Bereiche unterteilen. Es wird eine minimale zufällige Ausfallrate λ angenommen. Der Zusammenhang der Funktionen wird in Anhang A.1.10 erläutert.

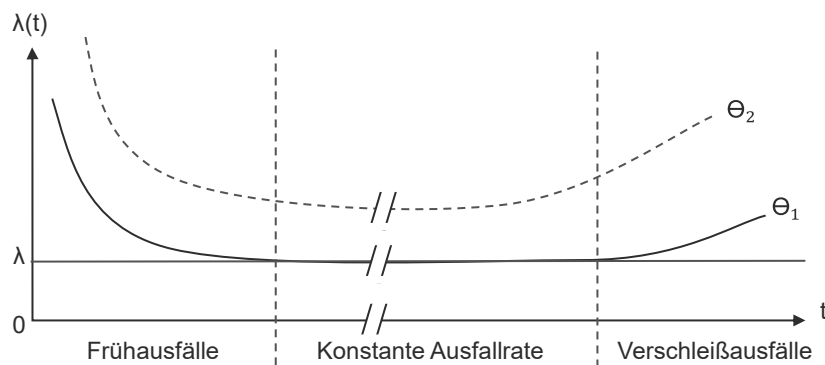


Abbildung 31 Badewannenkurve nach [BIR17]

Der Verlauf der Badewannenkurve kann abschnittsweise durch zwei bis drei Weibull-Verteilungen beschrieben werden. [O'C16] Die gestrichelte Badewannenkurve θ_2 beschreibt eine belastungsbedingte Verschiebung der Badewannenkurve θ_1 . [BIR17] Die Badewannenkurve ist jedoch trotz ihrer Bekanntheit nicht so stark verbreitet, wie angenommen wird [MOU00; ALL01]. Für die Modellierung wird die Badewannenkurve genutzt, um die Ereignisse der Verschleißphase von den anderen Phasen zu isolieren.

Tabelle 12 Klassische Phasen der Ausfallrate [DIN EN 61649]

Frühausfälle (Burn-In Phase)	Ausfallrate sinkt mit t , Frühausfälle werden durch Maßnahmen des Herstellers möglichst reduziert, die Ausfälle sind in dieser Phase zufällig.
Konstante Ausfallrate	Quasi-konstante Ausfallrate, in der Ausfälle poissonverteilt sind und zufällig auftreten. Gründe sind etwa menschliches Fehlverhalten, zufällige Überlastungen oder systemexterne Einflüsse.
Verschleißausfälle	Die Ausfallrate steigt an, da Verschleißeffekte eintreten, bspw. Abnutzung, Ermüdung und gehäufte Beschädigungen.

Ausfallverteilungen

Die Exponential- und Weibull-Verteilung, die maßgeblich in der Simulation genutzt werden, werden im Folgenden näher beschrieben. [KAR19] Die Exponentialverteilung der *pdf* besitzt als einzige Funktion eine konstante Ausfallrate $\lambda(t)$. Die Fehlerwahrscheinlichkeit im gegebenen Intervall ist unabhängig vom Alter der Komponente. Die Komponente „erinnert“ sich an keine Historie. [TOB12] Dieser Zusammenhang wird für die Modellierung von Elektronikkomponenten genutzt. [KAR19] Die Exponentialverteilung hat einen Parameter und kann als Spezialfall der Weibull-Verteilung mit dem Parameter $\beta = 1$ verstanden werden. Die Weibull-Verteilung, benannt nach Waloddi Weibull [WEI51; MUR04], findet eine sehr breite Anwendung, da diverse Ausfallraten abgebildet werden können. [KAR19] Die Weibull-Verteilung kann damit auf Basis von historischen Ausfällen die Veränderungen der Ausfallrate über die Zeit abbilden. Die *pdf* der dreiparametrischen Weibull-Verteilungen ist definiert als:

$$f(t) = \beta \eta^{-\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.29)$$

wobei $\beta > 0$ der Formparameter, $\eta > 0$ der Skalenparameter (charakteristische Lebensdauer) und γ der Lageparameter sind. Exemplarische *pdf* der zweiparametrischen Weibull-Verteilung sind zum Verständnis in Abbildung 32 dargestellt. Die Ausfallrate ist folgendermaßen definiert:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}, t \geq 0 \quad (4.30)$$

Bei $\beta = 1$ ist die Ausfallrate konstant (siehe Exponentialfunktion), die Ausfallrate steigt bei $\beta > 1$ und sinkt bei $0 < \beta < 1$. Durch diese Anpassung ist es möglich, alle drei Phasen der Badewannenkurve zu modellieren. Der Parameter η streckt bzw. staucht die Verteilung über die x-Achse bei gleichem Startpunkt. Der Parameter γ verschiebt die Verteilung auf der x-Achse. Für $\gamma > 0$, wird die Zeit von γ als fehlerfrei angenommen. [KAP14]. Ist $\gamma = 0$ definiert, wird die Verteilung zweiparametrische Weibull-Verteilung genannt. [KAP14; KAR19; DIN EN 61649]

Der Stichprobenumfang bestimmt die Gewissheit der Verteilung. Die Parameter der jeweiligen Verteilung werden mittels beobachteter Daten durch numerische Verfahren

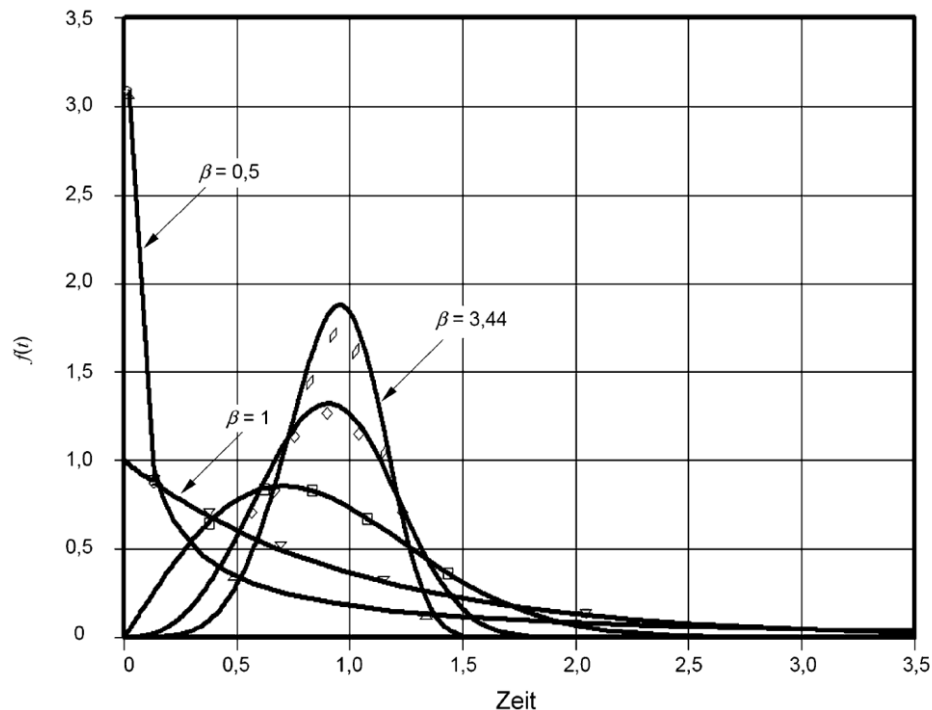


Abbildung 32 Formen der pdf der Weibull-Verteilungen für $\eta=1,0$ nach [DIN EN 61649]

ermittelt. [DIN EN 61649; REL20] Dabei wird mittels einer Maximum-Likelihood-Schätzung (engl. Maximum Likelihood Estimation, MLE^{36}), auf Basis der vorhandenen Daten, die Grundgesamtheit der Daten geschätzt.

Im Fall einer sehr kleinen Datenbasis (2-3 Ausfälle), wird die WeiBayes-Methode angewendet, wobei der Formparameter β aus vorherigen Informationen (bestehenden Verteilungen oder Erfahrungswerten) geschätzt wird (sog. ein-parametrische Weibull-Verteilung). [DIN EN 61649] Hieraus leitet sich ab, dass die Modifikation der Verteilung durch Expertenwissen und bekannte Verteilungen erfolgen kann. Dieser Zusammenhang wird später in der Integration von Belastung im Rahmen der Anreizwirkung genutzt.

Konkurrierende Risiken und gemischte Verteilungen

Zur Darstellung der Badewannenkurve wird auf eine Kombination von Weibull-Verteilungen zurückgegriffen. Dies ermöglicht die Trennung von Verschleiß- und restlichen Ausfällen. Es lassen sich drei Arten der Vermischung definieren (Tabelle 13). [DIN EN 61649; WAN14]

³⁶ Klassische Verlustfunktionen, wie der Mean-Squared-Error, lassen sich nicht anwenden, da zensierte Daten mit diesem Maß nicht erfasst werden.

Tabelle 13 Arten der Risikomischung nach [DIN EN 61649; WAN19]

Konkurrierende Risiken (engl. Competing Failure Modes, CFM)	Vorhandensein mehrerer einander ausschließender, unabhängiger Ausfallmöglichkeiten eines Objektes oder Systems in einer Zeitperiode, wobei alle Einheiten von diesen Ausfällen bedroht sind (homogene Population).
Einfache Mischung (engl. Mixed Failure Modes, MFM)	Die Population besteht aus Subpopulationen, deren Ausfallverhalten sich voneinander unterscheidet (heterogene Populationen).
Konkurrierende Risikomischung	Kombination der beiden zuvor genannten Mischungen, in welcher in den Teilmengen Ausfallarten exklusiv vorkommen und auch mit anderen Teilmengen geteilt werden können.

Ein Beispiel für eine Mischung von konkurrierenden Risiken (CFM) ist der plötzliche Ausfall einer Komponente aufgrund eines Zwischenfalls (z. B. Kollision), welche damit nicht mehr aufgrund von Verschleiß ausfallen kann. [DIN EN 61649; WAN19] Des Weiteren können Subsysteme in einem System um den Ausfall konkurrieren oder unterschiedliche Fehlermodi einer Komponente mit variierender Wahrscheinlichkeit eintreten. [WAN14] Eine solche Mischung ist entweder durch Domänenwissen im Vorfeld zu erklären oder in der *pdf* Verteilung zu erkennen. Eine Verteilung aus konkurrierenden Risiken lässt sich mathematisch als Multiplikation der Überlebensfunktionen beschreiben.

Eine einfache Mischung (MFM) lässt sich in der *pdf* erkennen, da die Verteilung zu einer exponentiellen Verteilung tendiert. Bekannte Subpopulationen sollten im Vorfeld voneinander getrennt werden. [DIN EN 61649] Eine gemischte Verteilung wird durch die Summe der einzelnen *pdf* beschrieben.

Sind die Teilmengen unterschiedlichen, voneinander abhängigen Fehlermodi zuzuordnen, werden mit der Mixed-Weibull Analyse (auch multimodale Weibull-Analyse genannt) die Teilmengen identifiziert. [REL20; MAT21] Am Beispiel der Badewannenkurve wird i. d. R. eine Kombination von Weibull-Verteilungen generiert, welche in Summe die Phasen der Badewanne beschreibt. Dabei werden die Ereignisse der Subpopulationen den Weibull-Verteilungen zugeordnet. Das Verfahren ist dann sinnvoll, wenn über die vorhandene Datenlage keine eindeutige Zuordnung zu den Subpopulationen möglich ist. Dies kann in der Praxis der Fall sein, wenn im Datensatz einer Maschine die Fehler nicht eindeutig Komponenten zugeordnet werden können. Ist eine

eindeutige Zuordnung möglich, so kann für jede Subpopulation direkt eine Verteilung ermittelt werden.

Die gemischten Verteilungen werden in Anhang A.1.11 genauer beschrieben. Im Werkzeugmaschinenbau werden MFM und CFM häufig angewendet. Eine Zusammenfassung unterschiedlicher Anwendungen lässt sich Anhang A.1.11 entnehmen.

In der Praxis ist die Auswahl des passenden gemischten Modells oft nicht eindeutig und ingenieurwissenschaftlich zu begründen. [WAN14] Statistisch lässt sich die Auswahl durch Metriken unterstützen. [BAR13; WAN14] Zur Berechnung der Parameter sei auf [JIA95b; JIA95a; KEC98] verwiesen. Für die Bestimmung der Parameter eines gemischten Modells wird die MLE genutzt.

Auswahl der Verteilung und Interpretation des Ausfallverhaltens

Für jede Baugruppe ist die passende Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit zu bestimmen. Die fokussierten Baugruppen werden durch Expertenwissen und die in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Methoden identifiziert (siehe auch Tabelle 33 in Anhang A.1.13 [MAT21]). [TSA09; ZHA13a; LEE14; STÄ17] Wie in Abbildung 33 zusammengefasst dargestellt, werden auf Basis der empirischen Verteilungsfunktionen (1) verschiedene theoretische Ausfallverteilungen berechnet (2). Es werden visuelle Verfahren und statistische Metriken zur Auswahl der Verteilung angewendet (3). Bei der Auswahl werden die empirischen mit den theoretischen Verteilungen verglichen, sodass eine Auswahl der besten Verteilung erfolgt.

Vorteilhaft ist die kritische Bewertung der theoretischen Verteilung mit Domänenwissen. Bei den statistischen Metriken wird die Passgenauigkeit der Verteilungsfunktionen an die Daten miteinander verglichen. Dies wird mit dem Akaike-Information-Criterion (AICs) [AKA98], dem bayesschen Informationskriterium (engl. Bayesian-Information-Criterion, BIC) [SCH78] und dem Anderson-Darling Test (AD) [AND52] durchgeführt, welche für die Modellauswahl als passend definiert werden. [ENC20b] Des Weiteren werden Hypothesentests der ausgewählten Verteilungsfunktionen durchgeführt. Der Chi-Quadrat-Test [ENC20c] und der Kolmogorov-Smirnov-Test [ENC20a] legen fest, ob die Hypothese, dass der betrachtete Datensatz einer bestimmten Verteilung entspricht, zu verwerfen ist.

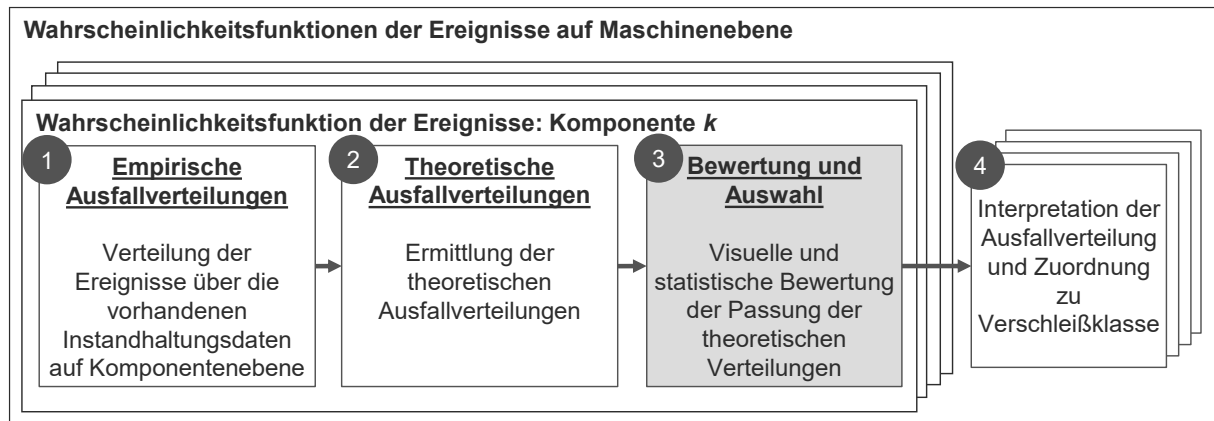


Abbildung 33 Vorgehen für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen und Interpretation

Die Verteilungsfunktion wird im Rahmen des Bezahlmodells interpretiert und die Komponente einer der Gruppen nach Verschleißart zugeordnet (sog. Verschleißklasse) (4). Für die Exponentialverteilung wird festgelegt, dass die Komponente zufällig ausfällt und ein Verschleißausfall auf Basis der Daten nicht erkannt werden kann. Anders ist dies bei der Weibull-Verteilung zu interpretieren. Je nach Anzahl und Wert der Parameter erfolgt eine Interpretation und Zuordnung. Liegt eine gemischte Verteilung MFM vor, so ist von einer Badewannenkurve auszugehen. In Tabelle 14 wird die Zuordnungsvorschrift beschrieben.

Tabelle 14 Interpretation der Verteilungen und Zuordnung zur Komponentengruppe

Exponentialverteilung	Deutet auf zufällige Ausfälle der Komponente hin, sodass diese Komponente den nicht-belastungsbasierten Komponenten zugeordnet wird.
Weibull-Verteilung	Je nach Ausgestaltung der Parameter kann die Komponente den direkt- oder indirekt-belastungsbasierten Komponenten zugeordnet werden. Ist diese sehr ähnlich der Exponentialverteilung, kann die Komponente entsprechend dieser zugeordnet werden (vgl. Abbildung 32)
Gemischte Verteilungen	Wird eine gemischte Verteilung erkannt und folgt diese der Badewannenkurve, so lassen sich zufällige und verschleißbedingte Ausfälle durch eigene Verteilungen beschreiben. Solche Komponenten werden den direkt- oder indirekt-belastungsbasierten Komponenten zugeordnet.

4.6.3 Simulation des Abnutzungsvorrates

Die Simulation des Abnutzungsvorrates erfolgt über ein datenbasiertes Modell. Der Verschleißfortschritt ist nicht direkt aus der historischen Datenbasis zu lesen, sondern wird durch die in Abschnitt 2.1.4 vorgestellten Modelle simuliert. Stehen für die Modellierung ausschließlich Ausfalldaten zur Verfügung, ist eine Abbildung der Degradation empirisch nicht möglich. Dennoch kann auf Basis von Expertenwissen, öffentlichen

Datenquellen und Betriebsdaten der Verlauf des Abnutzungsvorrates geschätzt werden. [STA21b] Es wird angenommen, dass Betriebsdaten und Ausfalldaten zur Verfügung stehen. Sind daneben weitere Quellen zur Beschreibung des Abnutzungsvorrates vorhanden, kann das hier vorgestellte Verfahren angepasst werden.

Approximation des Abnutzungsvorrates mittels Betriebsdaten

Betriebsdaten beschreiben den Gebrauch der Maschine. Das können etwa Belegungs- und Produktionsdaten eines Unternehmens sein, bspw. welche Produkte in welcher Stückzahl auf der spezifischen Maschine zu welchem Zeitpunkt gefertigt wurden. Durch Experten werden die auf der Maschine gefertigten Produkte nach ihrer bei der Fertigung angenommenen Belastung auf die Maschine bewertet. Die Belastung wird dabei auf einer Skala von 0 (keine Belastung) bis 10 (sehr starke Belastung) bewertet. Jedem Produkt wird ein Belastungswert zugeordnet. Dementsprechend werden die Produkte in Belastungsklassen bk untergliedert. Auf diese Weise ist die Belastung durch den Indikator der Komponente entsprechend der folgenden Gleichung zu approximieren:

$$X_{k,t} = \sum_{bk=1}^{10} P_{bk} * X_{bk,t} \quad (4.31)$$

Für alle Belastungsklassen bk werden täglich die gefertigten Produkte dieser Klasse P_{bk} mit dem approximierten Belastungsfaktor der Klasse $X_{bk,t}$ multipliziert. Es wird von einem linearen Zusammenhang zwischen den Belastungsfaktoren X_{bk} und der Belastungsklasse bk ausgegangen.³⁷

Aus Gleichung (4.31) ist abzuleiten, dass die kumulierte Belastung als Indikator eine monoton steigende Funktion darstellt. Hinzu kommt, dass die empirisch hergeleitete Belastung zu jedem Zeitpunkt t über eine Verteilungsfunktion abgebildet wird, womit $X_{k,t}$ als Zufallsvariable darstellbar ist. Entspricht die Verteilung von $X_{k,t}$ einer Gamma-Verteilung, wird zur Beschreibung des Abnutzungsvorrates der Gamma-Prozess verwendet. Wie in Abschnitt 2.1.4 erläutert, wird die Gamma-Verteilung aufgrund ihrer Eigenschaften häufig zur Modellierung der Verschleiß- und Abnutzungsverteilung genutzt. Die gezielte Veränderung der Parameter der Gamma-Verteilung kann zur Darstellung einer theoretischen Belastungsänderung genutzt werden. Als Alternative

³⁷ Es lassen sich auch nicht-lineare Zusammenhänge über eine Funktion von $X_{bk}(bk)$ integrieren bzw. modellbasierte Ansätze mit dem datenbasierten Ansatz kombinieren. Diese Erweiterung wird weiter nicht betrachtet.

hierzu kann der inverse Gauß-Prozess verwendet werden, welcher ähnliche Eigenschaften aufweist. [YE14]

Der Abnutzungsvorrat wird definiert als $W(t)$, wobei $t \geq 0$ und $W(0)=0$ gelten. Die Funktion folgt einem Gamma-Prozess, wenn die inkrementellen Zuwächse $\Delta W(t)$ unabhängig voneinander und gammaverteilt sind. Damit gilt, dass für alle inkrementellen Zuwächse

$$\Delta W(t) = W(t + \Delta t) - W(t) \quad (4.32)$$

die Unabhängigkeit voneinander angenommen wird und die Zuwächse $\Delta W(t)$ wie die Gamma-Verteilung verteilt sind:

$$\Delta W(t) \sim \Gamma(\beta, \Delta\eta(t)) \quad (4.33)$$

Dabei stellen $\Delta\eta(t) = \eta(t + \Delta t) - \eta(t)$ die Formfunktion und β den Skalenparameter der Gamma-Verteilung dar. [ABD75; CHE17] Die *pdf* der Gamma-Verteilung ist definiert als:

$$f_{\Delta W(t)}(y) = \frac{y^{\Delta\eta(t)-1} e^{-y/\beta}}{\beta^{\Delta\eta(t)} \Gamma(\Delta\eta(t))}, y > 0 \quad (4.34)$$

Im Anwendungsfall wird über $\Delta W(t) = X_{k,t}$ die Abnutzung durch die Belastung bis zum Ausfall modelliert. Der Gamma-Prozess betrachtet die Belastung als Zufallsvariable. Dabei wird zum einen eine Unsicherheit bezüglich der zufallsverteilten Belastung aufgrund der gefertigten Produkte abgebildet. Zum anderen ist die Beschränktheit der Belastungsbeschreibung durch die Produkte zu benennen. Neben dem Produkt als Belastungsquelle sind zahlreiche weitere Quellen der Belastung vorhanden (Kapitel 2.1.2), welche zum Teil unabhängig von der Anzahl der Produkte sind. Deren Wechselwirkung ist auf Basis der hier vorhandenen Daten jedoch nicht zu modellieren.

Implementierung der Wechselwirkung

Die Integration des Abnutzungsvorrates in die Simulation der Ereignisse orientiert sich am Modell von [STA21b]. Damit wird die Wechselwirkung zwischen Abnutzungs- und Instandhaltungssimulation beschrieben. Der Abnutzungsvorrat wird ausschließlich für direkt belastungsbedingt verschleißende Komponenten bestimmt. Die Ereignisse dieser Komponenten werden durch die gemischten Verteilungen (MFM) über zwei Weibull-Verteilungen beschrieben. Dabei wird ein Ereignis entweder einem zufälligen Ausfall oder einem verschleißbedingten Ausfall zugeordnet.

Bei Ausfällen aufgrund von Verschleiß wird $W(0)=0$ definiert. Der Ausfallzeitpunkt entspricht dem des generierten Ereignisses T_k . Die Abnutzungsgrenze $W(T_k)$ ist nicht empirisch bekannt. Ist der Ausfall zufällig, tritt das Ereignis per Definition vor dem Verbrauch des gesamten Abnutzungsvorrates ein, wobei $W(T_{k,zuf}) < 1$ gilt. Aufgrund der Art der Generierung der Verschleißausfälle ist es möglich, dass Komponenten auch früh durch Verschleiß ausfallen können. Eine volle Abnutzung ist hier als nicht sinnvoll zu erachten, da eine Komponente über den Leasingzeitraum überproportional häufig abgeschrieben werden würde. Das ist damit zu erklären, dass im Rahmen der Modellierung die Komponente bzw. Baugruppe (bspw. Hauptspindel) als System von Subkomponenten verstanden wird (bspw. Hauptlager). Jeder Verschleißausfall ist jedoch in der Realität einer Subkomponente zuzuordnen. Eine Zuordnung des Ereignisses wird in den Daten auf Komponentenebene getroffen. Das bedeutet, dass der Abnutzungsvorrat einer Subkomponente im Verschleißausfall aufgebraucht ist. Der Abnutzungsvorrat der Komponente als Summe der Subkomponenten ist jedoch nicht zwingend aufgebraucht. Die Modellierung dieses Zusammenhangs wird im folgenden Absatz erklärt.

Um die Abnutzungsgrenze $AG_k=W(T_k)$ bei jedem Ereignis zu bestimmen, wird zunächst definiert, dass eine Baugruppe über die Laufzeit TG mehrere Ereignisse erleben kann. Tritt ein Ereignis zufällig auf, so wird für den Abnutzungsvorrat angenommen, dass $W(T_g) \leq W(T_g+1)$. Das bedeutet, dass der Vorrat nach dem Ereignis und der dazugehörigen Instandhaltungsmaßnahme nicht dem einer neuen Komponente entspricht³⁸. Liegt ein verschleißbedingtes Ereignis vor, wird angenommen, dass $W(T_k+1)=0$ gilt, also die Komponente quasi neu ist. Daraus ergibt sich für $W(t)$, dass dieser von zufälligen Ereignissen unabhängig, von Verschleißereignissen jedoch abhängig ist. Damit ist die Abnutzungsgrenze AG_k in den Verschleißereignissen zu definieren. Da diese jedoch aus den betrachteten empirischen Daten nicht zu ermitteln sind, werden diese anderweitig bestimmt.

Es wird angenommen, dass die angenommene Abschreibung im klassischen Leasing als Erwartungswert der realen Zeitwerte der Komponente zu verstehen ist³⁹. Durch die

³⁸ Diese Annahme bezieht sich nicht auf das Ausfallverhalten, nur auf den simulierten Abnutzungsvorrat.

³⁹ Die Aufwertung des Zeitwertes durch Instandsetzungsmaßnahmen und Ersatzteile wird vernachlässigt. Eine solche Korrektur ist in der Abschreibung des klassischen Leasings nicht inbegriffen.

Tilgung ist diese in der Leasingrate eingepreist. Damit lässt sich die Höhe des Erwartungswertes der belastungsbasierten Leasingraten an dem der klassischen Leasingrate orientieren, sodass gilt:

$$E(LR_{t,bel}) = LR_{t,lea} \quad (4.35)$$

Mittels dieses Zusammenhangs ist die Summe der Abnutzung über alle Ereignisse aller Komponenten in der Mietzeit ermittelbar⁴⁰. Diese wird in Abhängigkeit von der $MTTF_k$ der Ausfälle durch Verschleiß beschrieben, welche mit dem Korrekturfaktor ψ_k multipliziert wird. Aufgrund der iterativen Generierung von Ereignissen erfolgt der Verschleißausfall nach n Zufallsausfällen $T_{k,zuf,\tau}$, sodass für die AG_k bei Verschleißausfall gilt:

$$AG_k = W \left(T_k + \sum_{\tau=1}^n T_{g,\tau} \right) = \frac{T_k + \sum_{\tau=1}^n T_{g,\tau}}{MTTF_k * \psi_k} \quad (4.36)$$

ψ_k	[-]	Korrekturfaktor
$MTTF_k$	[Tag]	Mean-Time-to-Failure des Verschleißausfalls
$T_{g,\tau}$	[€]	Zeit bis zum Zufallsausfall
T_k	[-]	Zeit bis zum Verschleißausfall

Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit von $MTTF_k$, um die Abnutzung mit der empirisch hergeleiteten Ausfallfunktion zu verbinden. Damit lässt sich über $MTTF_k$ das Komponentenverhalten über die Zeit beschreiben. Dieser Zusammenhang impliziert die Hypothese, dass die Abnutzung mit der Nutzungszeit korreliert. Die Berechnung von ψ erfolgt komponentenindividuell für den Ausgangsfall (ohne Anreizwirkung).

Da der stochastische Prozess nicht als Gamma-Brücke umgesetzt ist [HOY10; VAN09], ist der Endpunkt des Gamma-Prozesses zufallsverteilt und nicht deterministisch der Abnutzungsgrenze AG_k gleichgesetzt. Der Prozess wird über die Multiplikation mit einem Korrekturwert skaliert, sodass der Endpunkt des Prozesses gleich der Abnutzungsgrenze AG_k definiert wird.

In Abbildung 34 wird der vorgestellte Zusammenhang zwischen der Simulation der Ereignisse und der Simulation des Abnutzungsvorrates dargestellt. Im Beispiel wird nach

⁴⁰ Die Korrektur um den Risikozins ist hier bereits mit inbegriffen. Alle weiteren Bestandteile der Leasingraten beider Modelle werden als gleich definiert.

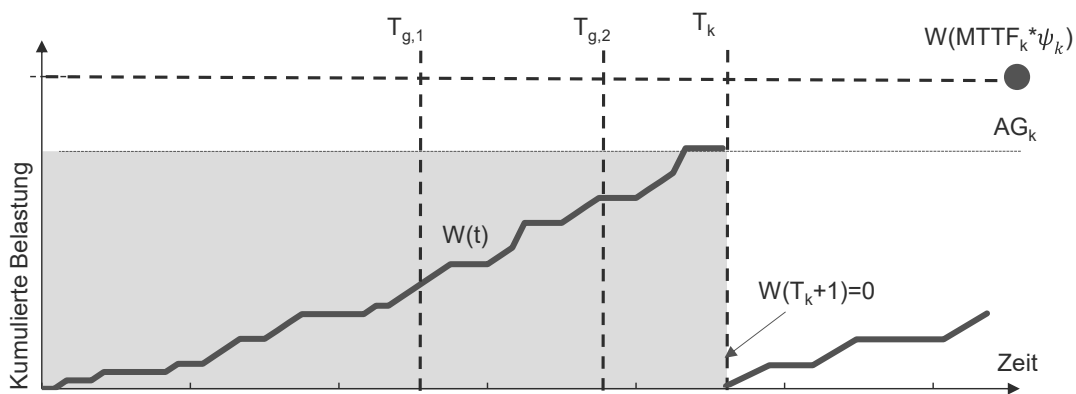


Abbildung 34 Bestimmung der kumulierten Belastung in Abhängigkeit der Ereignisse

zwei zufälligen Ereignissen ein Verschleißereignis erzeugt, bis zu welchem die Funktion $W(t)$ definiert wird. Nach dem Ausfall fällt die Funktion auf den Ausgangswert. Die AG_k leitet sich aus dem Anteil der Gesamtabnutzung ab.

4.7 Abbildung der Anreizwirkung

Die Anreizwirkung führt zu entscheidungsrelevanten Kostenvorteilen. Die Modellierung dieser Vorteile gründet auf einer veränderten Nutzung der Maschine im belastungs-basierten Bezahlmodell. Der Einfluss der Anreize wird auf mehreren Ebenen in die Modellierung integriert. Zum einen können deterministische Eingangsgrößen verändert werden, etwa die Risikomarge (siehe Kapitel 4.4). Zum anderen werden die unsicheren Größen manipuliert.

4.7.1 Modifikation der Ereignisse

Die Integration der Anreizwirkung in die Ereignissimulation hat zum Ziel, den Einfluss einer veränderten Belastung auf die Maschine zu simulieren.^{41,42} Dazu werden die Parameter der entwickelten Wahrscheinlichkeitsverteilungen manipuliert. Damit bilden die Verteilungen nach der Manipulation nicht mehr den Einfluss der historischen Belastung ab.

Das Konzept der Manipulation ist Abbildung 35 zu entnehmen. Es werden ausschließlich die direkt-belastungsabhängigen Baugruppen betrachtet. Diese werden im Modell

⁴¹ Dieses Vorgehen ist nicht notwendig, wenn über die Modellierung der Ereignisse die Belastung direkt integriert wird, etwa bei multivariaten Modellen. Hierbei würde der Faktor der Belastung verändert werden.

⁴² Weiter ist es prinzipiell möglich, die Charakterisierung der Ereignisse zu verändern, bspw. die Verteilung der Dauer des Ausfalls bei größerer Belastung.

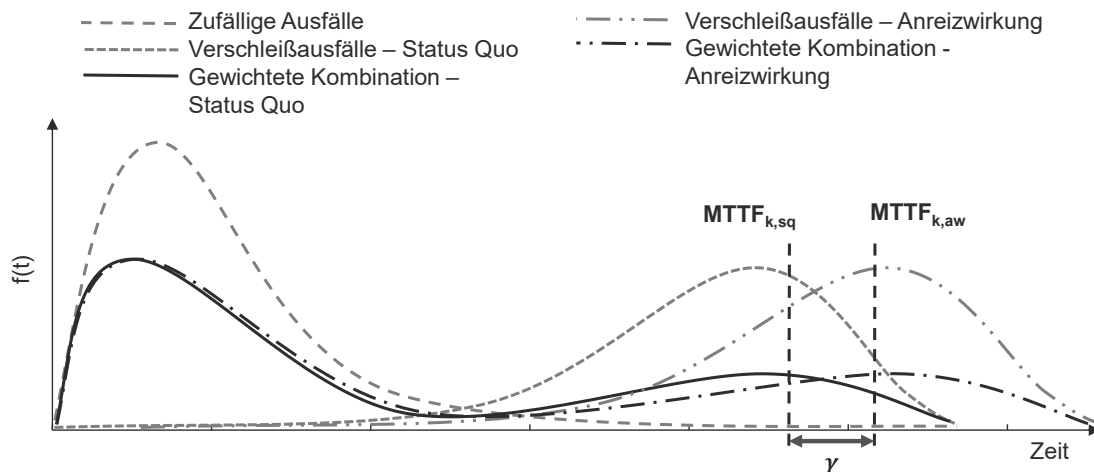


Abbildung 35 Qualitative Ausfallverteilungen (MFM) einer direkt-belastungsabhängigen Komponente mit und ohne Anreizwirkung

durch eine einfache Mischung (MFM) von zwei Weibull-Verteilungen abgebildet⁴³. Hier lassen sich grundsätzlich beide Weibull-Verteilungen verändern. Da in dieser Arbeit der Einfluss der Belastung auf die Abnutzung im Fokus steht, wird ausschließlich die Weibull-Verteilung der Verschleißausfälle betrachtet. Expertenschätzungen werden genutzt, um die bestehenden Modelle zu verändern (vgl. [PRO02; KRÖ14; GUT17; BLÜ11]). Hier lassen sich entweder der Formparameter β oder der Skalenparameter η verändern (siehe WeiBayes-Methode [DIN EN 61649]). Zusätzlich kann die Verteilung in eine 3-parametrische Weibull-Verteilung umgewandelt werden, indem der Lageparameter $\gamma > 0$ definiert wird. Die Manipulation über den Lageparameter stellt eine simple Lösung dar, die zu einer leicht zu interpretierenden Veränderung führt. So bedeutet $\gamma = 50$ eine Verschiebung der Verteilung um 50 Tage nach hinten, ohne die Form der Verteilung zu verändern. Hierbei verschiebt sich die $MTTF_{k,sq}$ (Abbildung des Status Quo) auf die $MTTF_{k,aw}$ (Abbildung der Anreizwirkung) um den Wert von γ . Das Ausmaß der Verschiebung orientiert sich zusätzlich zu der Expertenschätzung an den Verteilungen von Vergleichsmaschinen des betrachteten Unternehmens. Weitere Datenquellen können ähnliche Maschinen weiterer Nutzer und Herstellerinformationen sein.

⁴³ Zur besseren Veranschaulichung werden die Verteilungen der Frühausfälle nicht als Exponentialverteilungen dargestellt (theoretisch ist diese jedoch möglich). Die dargestellte Parametrisierung entspricht qualitativ den in dieser Arbeit genutzten Verteilungen auf Basis der Daten im Anwendungsfall (siehe Abbildung 54).

4.7.2 Modifikation des stochastischen Prozesses

Die Anreizwirkung hat einen Einfluss auf den stochastischen Prozess. Dieser wird zum einen indirekt über die Manipulation der Ereignisverteilung beschrieben, da diese über die Abnutzungsgrenze AG_k den Prozess verändert, zum anderen direkt über die Parameter der zugrundeliegenden Gamma-Verteilung (Gleichung (4.34)). Die Minderung der Abnutzungsgrenze bei geringerer Belastung führt dazu, dass bei der Skalierung des Prozesses auf die Abnutzungsgrenze der Prozess gestaucht wird. Größere Sprünge werden bei gleichem Verlauf abgeschwächt. Das lässt sich damit erklären, dass die Fertigungsprozesse sich in der Regel nicht verändern. Werden beispielweise drei stark belastende Produkte in der Woche produziert, ist mit drei Anstiegen in der kumulierten Belastung zu rechnen. Die Anreizwirkung führt nicht dazu, dass diese drei Anstiege über die gesamte Woche verteilt werden, sondern, dass diese Sprünge ein geringeres Ausmaß annehmen.

Im Vergleich dazu verändert die Manipulation der Form- und Skalenparameter die inkrementellen Zuwächse $\Delta W(t)$ direkt, sodass die Streuung der Zuwächse $\Delta W(t)$ beeinflusst wird. Es kann argumentiert werden, dass die Anreizwirkung im entwickelten Bezahlmodell dazu führt, dass hohe Belastungsspitzen geglättet werden und damit die Streubreite sinkt. Bei der Manipulation der Parameter der Verteilung ist auf Expertenwissen zurückzugreifen. Alternativ lässt sich direkt die Datenbasis manipulieren, woraus sich eine manipulierte Gamma-Verteilung ergibt. Problematisch ist bei diesem Verfahren die Interpretation der Veränderung. Durch diese Veränderung wird ein anderer stochastischer Prozess erzeugt, welcher zum oben genannten Problem führen kann. Aus diesem Grund wird in der Simulation der Anreizwirkung ausschließlich die indirekte Beeinflussung des stochastischen Prozesses implementiert.

4.8 Aggregation der Modellelemente und Anwendung

Im Folgenden soll die Bewertungsmethode aggregiert dargestellt werden. Hierzu sind die zuvor besprochenen Bausteine und deren Ablaufintegration in Abbildung 36 zusammengefasst. Dieser Ablauf stellt die Basis der Anwendung des Modells dar, welches wiederum die Basis für die prototypische Realisierung in Kapitel 5 bildet.

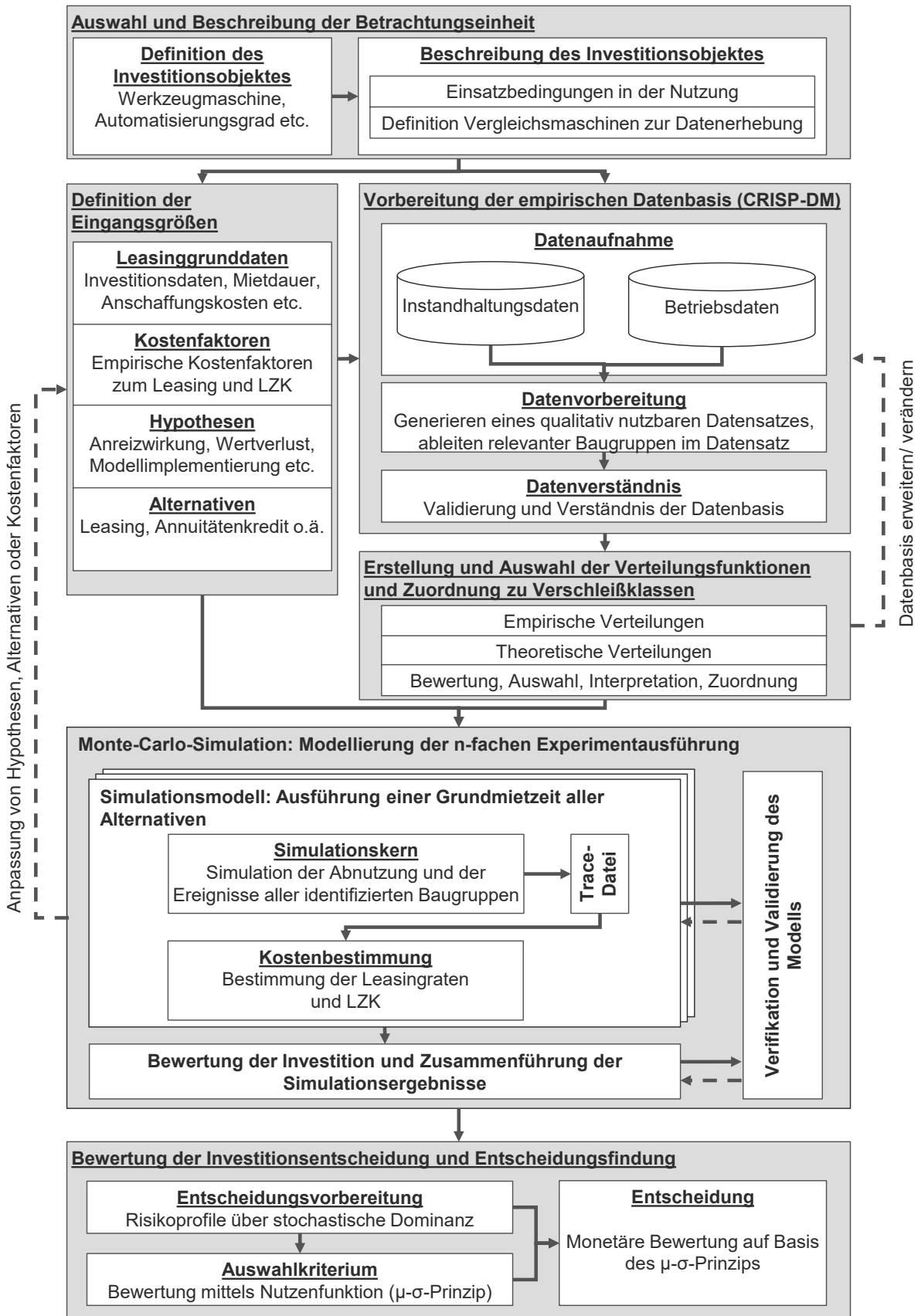


Abbildung 36 Ablauf der Modellnutzung und -anpassung zur Bewertung der Investitionsentscheidung

Der Bewertungsansatz dient der Entscheidung zwischen Investitionsalternativen, wo-

bei die grundsätzliche Entscheidung über die Notwendigkeit der Investition bereits getätigt ist. An erster Stelle wird das Investitionsobjekt definiert und dessen voraussichtliche Einsatzbedingungen beschrieben. Diese legen fest, welche Maschinen den gleichen Einflussfaktoren ausgesetzt und für die Beurteilung historischer Daten geeignet sind. Anschließend erfolgt die Ermittlung, welche Baugruppen der Maschine verbaut sind und überwacht werden sollen.

Nach der Beschreibung des Systemrahmens werden die deterministischen Eingangsgrößen ermittelt. Hierzu gehören alle entscheidungsrelevanten Informationen zu den Grunddaten der Investitionsentscheidung inklusive der Lebenszykluskosten, die Beschreibung relevanter alternativer Bezahlmodelle und die Definition von Hypothesen, welche für die Modellierung notwendig sind. In diesem Schritt sind Experten hinzuzuziehen welche Hypothesen zu der Anreizwirkung (bspw. Verschiebung von Ausfallverteilungen), zukünftiger Auslastung der Maschine, Bewertung der gefertigten Produkte und weitere Modellimplikationen erfahrungsbasiert treffen.

Daraufhin kann die empirische Datenbasis erhoben werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Instandhaltungs- und Betriebsdaten betrachtet. Diese Datenbasis wird in mehreren Schritten für die Modellierung vorbereitet. In Anhang A.2.1 wird der Prozess der Datenvorbereitung, welcher sich an dem Cross-Industry-Process-Modell-for-Data-Mining (CRISP-DM) orientiert, beschrieben. [SHE00; WIR00; HUB18] Liegen die Daten in der geforderten Qualität vor, werden empirische und theoretische Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt. Zu diesen gehören alle stochastischen Eingangsfaktoren, bspw. Ausfalldauern und –kosten. Zudem werden die Ausfallereignisse den Baugruppen zugeordnet und diese wiederum den Verschleißklassen.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen dienen neben den deterministischen Eingangsgrößen als Basis für die MC-Simulation. Hierzu werden die notwendigen Parameter (bspw. Anzahl der Durchläufe) definiert und der Simulationskern sowie das Kostenmodell an den Anwendungsfall adaptiert. In einem iterativen Ansatz wird das belastungsbasierte Bezahlmodell anhand weniger Simulationsdurchläufe verifiziert und mit Hilfe des Leasingmodells validiert. Anschließend werden alle Simulationsdurchläufe für die definierten Szenarien ausgeführt und die Ergebnisse in Form von Zahlungsreihen und Kapitalwerten aggregiert.

Diese Ergebnisse sind die Basis der Investitionsentscheidung. Diese gliedert sich in die Entwicklung der Risikoprofile und die Auswahl der Investitionsalternativen anhand der Nutzenfunktion. Bei einem risikoaversen Entscheider wird neben dem Kapitalerwartungswert die Streuung der Kapitalwerte berücksichtigt. Dabei werden die Leasingraten und die LZK der empirischen Datenbasis betrachtet und die hypothetisch angenommene Effizienzsteigerungen durch die Anreizwirkung berücksichtigt.

5 Realisierung am Industriebeispiel

In diesem Kapitel erfolgt die prototypische Realisierung des belastungsbasierten Bezahlmodells und des Bewertungsmodells anhand des industriellen Anwendungsfalls. Im ersten Schritt wird der Anwendungsfall durch die betrachtete Investitionsentscheidung und das Investitionsobjekt Werkzeugmaschine beschrieben. Hierzu wird auf der Datenbasis der definierten historischen Maschinen ein anwendbares Bezahlmodell beschrieben und die entscheidungsrelevanten Kostenfaktoren definiert. Daraufhin erfolgen die Entwicklung und softwaretechnische Implementierung der Bewertungsmethode. Hierzu werden die notwendigen sicheren und unsicheren Eingangsgrößen bestimmt, das Modell angewandt und abschließend validiert.

5.1 Beschreibung des industriellen Anwendungsfalls

Im Folgenden wird das Industriebeispiel anhand der Werkzeugmaschine, der verfügbaren Daten und der Kostenfaktoren vorgestellt.

5.1.1 Maschine und Anwendungsfall

Zur Validierung wird das Industriebeispiel eines Herstellers von Präzisionsdreh- und Frästeilen im Familienbesitz (Berger Holding GmbH & Co. KG) herangezogen. Als Nutzer von zahlreichen Fräsmaschinen besteht Interesse an einer Finanzierungsflexibilisierung über ein belastungsbasiertes Bezahlmodell. Der Entscheider ist risikoavers, wodurch die Nutzenfunktion nach [DOM05] beschrieben wird durch:

$$\Phi(\gamma, \sigma) = \gamma - 2\sigma \quad (5.1)$$

Die zugrundeliegende Werkzeugmaschine ist ein 5-Achs Universalbearbeitungszentrum (Typ DMC-U). Ein fast baugleiches 5-Achs Universal-Fräs- und Drehbearbeitungszentrum (Typ DMC-FD) wird zur Validierung und Plausibilisierung der Daten und Schätzung der Anreizwirkung herangezogen. Weitere Werkzeugmaschinen wurden im Zuge des Industriebeispiels untersucht, sind jedoch vom Aufbau oder dem Einsatz und damit bzgl. des Belastungsprofils nicht vergleichbar.

Die definierte Maschine dient als Vergleichsmaschine zum untersuchten Investitionsobjekt, dessen Daten zur Modellierung genutzt werden. Diese ist weiterhin im Einsatz, der Datensatz beschreibt die Maschine bis zum Zeitpunkt der Modellierung. Die DMC-U wurde zwischen 11/2001 und 12/2019 ausschließlich zur Fräsbearbeitung genutzt,

während die DMC-FD für Fräs- und Drehbearbeitungen zwischen 12/2006 und 05/2020 im Einsatz war. Für beide Maschinen wird eine maximale Verfügbarkeit von 6.000 Stunden im Jahr angenommen. Die Losgrößen, Materialien und Bearbeitungsprozesse der gefertigten Bauteile variieren. Die DMC-U wird in der Varianten- bis Serienfertigung als flexibles System genutzt. Damit ergeben sich hohe Produktivzeiten bei schwankender Belastung. Für die Integration der Anreizwirkung werden sowohl Expertenwissen als auch Daten der Schwestermaschine und Informationen von Leasinggeber und Maschinenherstellern genutzt.

5.1.2 Datenaufnahme und -vorbereitung

Die Modellierung wird auf Basis des verfügbaren Datensatzes des Unternehmens durchgeführt. Instandhaltungs- und Betriebsdaten stammen aus dem ERP-System des Unternehmens, wobei es innerhalb der Nutzungsdauer zur Umstellung dieses Systems kam⁴⁴.

Für den gesamten Nutzungszeitraum stehen Ausfalldaten zur Verfügung. Auf Basis der Instandhaltungsdaten lassen sich folgende Baugruppen der Werkzeugmaschine identifizieren⁴⁵:

Tabelle 15 Datenbasierte Zuordnung der Ereignisse zu Baugruppen im Industriebeispiel

Spindel	Hauptspindelgruppe inkl. Hauptantrieb, Drehdurchführung, Werkzeugspannsystem und weiterer Subkomponenten
Vorschubachsen	Vorschubantrieb inkl. Führungen, Kugelgewindetrieb
Fluidtechnik	Ver- und Entsorgung der Fluide inkl. Hilfsantriebe, Kühlschmierstoffkreislauf, Pumpen und Schläuche
Pneumatik	Ver- und Entsorgung von Druckluft, Hydraulik inkl. Hilfsantriebe, Ventile und Schläuche
Werkzeugwechsler	Automatisierungsbaugruppe Werkzeugwechsler inkl. Greifer, Werkzeugspeicher bzw. -magazin
Elektronik	Steuerung und Bedienteile einschließlich Sicherheitseinrichtungen, Sensoren und Messsysteme, Elektrik und Maschinensteuerung

⁴⁴ Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass sich der Prozess der Datenaufnahme und die Struktur der Daten verändert haben. Im Anwendungsfall konnte dies im Datensatz korrigiert werden.

⁴⁵ Die Bezeichnung der Baugruppe und die Zusammenfassung in die Baugruppen richten sich nach der Bezeichnung und Zuordnung im Datensatz. Hierdurch sind manche Baugruppen nicht trennscharf bezeichnet.

Beschickung	Automatisierungsbaugruppe der Werkstückaufnahme und -handhabung inkl. Palettenwechsler, -zuführung und Tisch
Strukturbauteile	Gestellbauteile inkl. Maschinenaufstellung, Fundament und Maschineneinhausung bzw. -verkleidung
Peripherie	Komponenten der Peripherie, bspw. Kräne, Späneförderer, Absaugung
Sonstiges	Ereignisse, welche nicht zugeordnet werden können und nicht betrachtet werden (Inbetriebnahme, Umzug etc.)
Gesamte Maschine	Ausfälle, welcher der gesamten Maschine zugeordnet werden (bspw. Unfall)

Instandhaltungsdaten liegen ab November 2001 vor. Damit ist anzunehmen, dass sich die Maschine und deren Komponenten nicht mehr ausschließlich in der Phase der Frühausfälle der Badewannenkurve befinden. Die Aufnahme der Daten erfolgt manuell durch den Mitarbeiter an der Maschine, welcher jeden Ausfall charakterisiert (Ausfall- und Instandhaltungsdauer, Ersatzteilkosten etc.) und über einen Freitext beschreibt. Jedes Ereignis führt zu einem Stillstand der Werkzeugmaschine, kleinere Tätigkeiten sind nicht aufgenommen. Laut Experteneinschätzung des Industriepartners wird die Mehrheit der Daten (ca. 90 %) erfasst.

Die Betriebsdaten sind die zweite verfügbare Datenquelle und ordnen den Maschinen alle gefertigten Aufträge bis zum Jahr 2014 zu. Hieraus lassen sich die gefertigte Produktklasse, der Fertigungsprozess, die Menge der Produkte, die Dauer des Prozesses und das Buchungsdatum bestimmen. Basierend auf diesen Daten wurde die Belastung der Werkzeugmaschine durch Experten des Unternehmens bewertet. Durch Multiplikation der Belastungswerte mit der Anzahl der Produkte wird die Belastung auf die Maschine approximiert. Die Datenvorbereitung wird in Anhang A.2.1 am CRISP-DM Prozess beschrieben.

5.1.3 Spezifikation der Kostenfaktoren

Folgend werden alle relevanten, durch den Industriepartner definierten, Kostenfaktoren beschrieben. Diese sind zum Teil deterministisch, zum Teil stochastisch verteilt. Die deterministischen Kostenfaktoren sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16 Deterministische Kostenfaktoren im Industriebeispiel

LK_{IHP}	Lohnkosten des Instandhaltungspersonals	50 €/h
LK_{fremd}	Personalkosten für externes Instandhaltungspersonal	130 €/h
SK_{still}	Stillstandkosten	80 €/h

Da LK_{fremd} und LK_{IHP} im Datensatz nicht voneinander zu unterscheiden sind, werden diese Kosten durch den Mittelwert zusammengefasst. Die stochastischen Kostenfaktoren auf Komponentenebene leiten sich aus der Datenbasis ab und werden gemäß den Verteilungen aus Anhang A.2.1 beschrieben. Diese Faktoren werden unabhängig voneinander simuliert. Die Anzahl der Ersatzteile n_{aus} ist zu vernachlässigen, da der Datensatz alle Ersatzteile in einem Wert zusammenfasst. Die Modellierung der stochastischen Faktoren wird in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17 Stochastische Kostenfaktoren im Industriebeispiel

KK_{aus}	Aufgrund mangelhafter Datenlage werden einige Baugruppen durch Dreiecksverteilungen abgebildet. Die Modellierung unterliegt damit einer größeren Unsicherheit. Andere wurden über die empirische Verteilungsfunktion modelliert. (Tabelle 35)
T_{aus}	In Tabelle 36 werden die Verteilungen der Ausfalldauern zusammengefasst. Diese Variable ist sehr gut dokumentiert, sodass für alle Baugruppen empirische und theoretische Verteilungen generiert wurden.
T_{IH}	In Tabelle 37 werden die Verteilungen der Instandhaltungsdauer beschrieben. Neben empirisch hergeleiteten Verteilungsfunktionen werden Dreiecksverteilungen genutzt, da für die datenbasierte Modellierung der Datensatz mangelhaft ist.

Neben den zuvor beschriebenen Kosten der Instandhaltung werden folgend die Eingangsgrößen für das Leasingmodell in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18 Randbedingungen des Leasings im Industriebeispiel

Mietbemessungsgrundlage der Maschine	650.000 € (Anschaffungskosten)
Grundmietzeit TG	5 Jahre
Abschluss bei Vertragsende	Rückgabe an Leasinggeber
Erwarteter Restwert der Maschine	Nach AfA-Abschreibung: 7 Jahre
Vertragliche Ausgestaltung	Teilmortisationsvertrag

Die Leasingbestandteile werden in Tabelle 19 beschrieben und sowohl für das klassische Leasing als auch das belastungsbasierte Leasing definiert.

Tabelle 19 Leasingbestandteile im Industriebeispiel

Amortisation (Tilgung) AT_t	Im klassischen Leasing durch die lineare Abschreibung (7 Jahre für alle Komponenten). Im belastungsbasierten Modell aus den Indikatoren der Komponenten.
Verzinsung des eingesetzten Kapitals V_t	2 % bei hoher Bonität
Marge zur Abdeckung von Kosten MK_t	2 %
Marge zur Abdeckung des Risikos MR_t	$MR_{t,lea}$: 10 % auf MBG $MR_{t,bel}$: 0 %
Gewinnmarge MG_t	5 % (leitet sich aus dem erwarteten Restwertmehrerlös ab und ist kein Teil der Raten)

MK_t ist im Anwendungsfall unabhängig vom Bezahlmodell. Die Verzinsung V_t gilt für ein Unternehmen mit hoher Bonität und ist ebenfalls unabhängig vom Bezahlmodell. Die Marge für die Risikoabdeckung wird im Belastungsfall auf 0 % gesetzt, was einer Eliminierung des Restwertrisikos entspricht. Die Gewinnmarge wird durch den Restwertmehrerlös erwirtschaftet und in der Leasingrate nicht beachtet.

Für den Aufbau des Modells werden die Mietbemessungsgrundlagen MBG_k und MBG_g auf Komponentenebene bestimmt. In Tabelle 20 werden die belastungsabhängigen Komponenten aufgelistet. Die Werte aller weiteren Komponenten sind in einem summierten Wert zusammengefasst. Die Werte wurden vom Maschinenhersteller auf Basis der Marktpreise ermittelt.

Tabelle 20 Mietbemessungsgrundlage der Baugruppen im Industriebeispiel

Spindel	40.000 €
Vorschubachsen	60.000 €
Restliche Komponenten	550.000 €

5.2 Bezahlmodell und Bewertungsmodell

Im Folgenden wird das computer-ausführbare Modell in seinen Elementen übersichtsartig beschrieben. Der Abschnitt schließt mit einer datenbasierten Validierung ab.

5.2.1 Aufbau und Ablaufstruktur des Modells

Der Bewertungsansatz wurde in eine computer-ausführbare Logik in der Programmiersprache Python implementiert. [PYT20] Ein Vorteil von Python ist, dass der entwickelte Code kompakt und lesbar ist und sich an der mathematischen Berechnung orientiert. Zudem existieren Schnittstellen zu zahlreichen weiteren Programmiersprachen. [LIN20; PYT20] Die große Beliebtheit der Sprache ermöglicht zudem die Umsetzung potenzieller Erweiterungen und die Integration in weitere Systeme [STA20a].

Der schematische Aufbau des computer-ausführbaren Modells ist in Abbildung 37 dargestellt. Die modulare Programmierung erleichtert das Ersetzen und Erweitern von einzelnen Bausteinen. Die notwendigen Eingaben werden direkt im Python-Code in einer

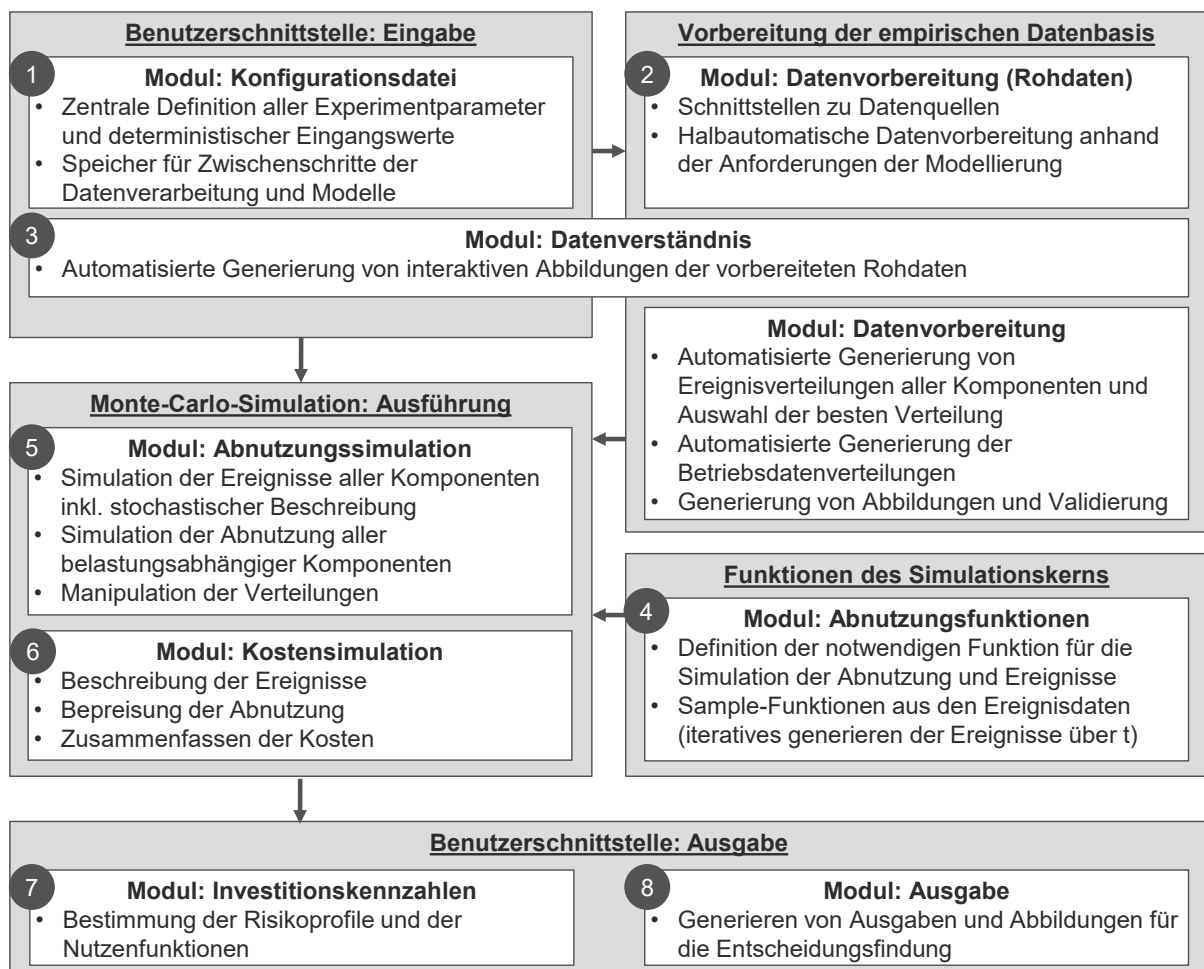


Abbildung 37 Darstellung des prototypischen Simulationsmodells

zentralen Konfigurationsdatei getätigt (1). Die Datenvorbereitung ist halbautomatisch integriert, da eine Standardisierung nur mit großem Aufwand möglich ist (2). Erste Ausgaben von Darstellungen zum Datenverständnis sowie Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden im Modul Datenverständnis generiert (3). Alle weiteren Funktionen für die Modellelemente, insb. des Simulationskerns, sind in mehreren Modulen definiert (4). Die MC-Simulation nutzt diese Funktionen und Verteilungen für die automatische Simulation der Abnutzung und erzeugt die Trace-Datei (5). Auf deren Basis werden die Kosten abgeleitet. (6) Der Nutzer erhält in der Benutzerschnittstelle alle entscheidungsrelevanten Investitionskennzahlen (7) und Abbildungen der Ergebnisgrößen (8).

5.2.2 Simulation der Ereignisse

Im Rahmen der Simulation der Ereignisse werden hauptsächlich die Bibliotheken *reliability* [MAT21] und *lifelines* [DAV20] genutzt. *lifelines* wird für ausgewählte Abbildungen und multivariate Regressionen verwendet, alle weiteren Berechnungen erfolgen mit *reliability*. Die Simulation der Ereignisse und des Abnutzungsvorrates erfordern ein spezielles Datenformat, in welches der Datensatz überführt wird. Hierzu werden maßgeblich die Bibliotheken *pandas* [REB21] und *numpy* [HAR20] genutzt.

Die Ergebnisse der Modellierung und die Zuordnung der Komponenten zu den Gruppen nach Verschleißart sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Es wurden zwölf unterschiedliche Verteilungen für jedes stochastische Element angewendet und mittels Metriken und visueller Methoden verglichen. Zusätzlich wurden gemischte Verteilungen angewendet. Eine genaue Auflistung der Metriken, die jeweiligen Parameter sowie beispielhafte visuelle Methoden sind Anhang A.2.1 zu entnehmen.

Die Modellierung der Anreizwirkung erfolgt durch Manipulation der Parameter der Verteilungen der Dauern bis zum Ausfall. Die Manipulation orientiert sich an den Verteilungen der Vergleichsmaschine DMC-FD. Diese Annahmen wurden zudem mit Daten des Herstellers der Maschine validiert und sind Anhang A.2.2 zu entnehmen. Die Auswahl der Verteilung erfolgt über die in Abschnitt 4.6.2 vorgestellten statistischen und visuellen Verfahren. Die Interpretation der Ausfallverteilungen erfolgt mit Domänenexperten, um diese den Verschleißgruppen zuzuordnen.

Tabelle 21 Modellierung der Ausfallverteilungen je Baugruppe im Industriebeispiel und Zuordnung zur Komponentengruppe nach Verschleißart

Baugruppe	Verteilung der Ereignisse	Zuordnung zu Gruppe
Spindel	MFM	Direkt belastungsbasiert
Vorschubachsen	MFM	Direkt belastungsbasiert
Fluidtechnik	Gammaverteilung	nicht-belastungsbasiert
Pneumatik	Gammaverteilung	nicht-belastungsbasiert
Werkzeugwechsler	Exponentialverteilung	nicht-belastungsbasiert
Elektronik	Gammaverteilung	nicht-belastungsbasiert
Beschickung	Gammaverteilung	nicht-belastungsbasiert
Strukturbauteile	Gammaverteilung	nicht-belastungsbasiert
Peripherie	Gammaverteilung	nicht-belastungsbasiert

5.2.3 Simulation von Abnutzung und Wertverlust

Für die Umsetzung der Abnutzungssimulation über den Gamma-Prozess wird die Python Bibliothek *stochastic* genutzt. Die Implementierung erfolgt über eine diskrete, sequenzielle MC-Simulation. [FLY20] Der Prozess ist gemäß Abschnitt 4.6.3 implementiert. Es werden für jede belastungsbasierte Komponente Gamma-Prozesse simuliert, deren Parameter über die empirischen Verteilungen der approximierten Belastungskennzahl der Betriebsdaten entnommen werden. Die Betriebsdaten im Anwendungsfall werden in Anhang A.2.1 näher beschrieben. Das Vorgehen der Manipulation im Sinne der Anreizwirkung ist Anhang A.2.2 zu entnehmen.

Der Korrekturwert des Zeitwertfaktors α_k (Gleichung (4.26)) wird so gewählt, dass die erwartete Gewinnmarge des Leasinggebers abgedeckt wird. Die Gewinnmarge gleicht der des klassischen Leasings. Da sich die Abnutzung der Komponenten unterschiedlich verhält, wird für jede Komponente ein α_k definiert. Der Korrekturfaktor ψ_k aus Gleichung (4.36) wird so gewählt, dass die Höhe des Erwartungswertes der belastungsbasierten Leasingraten dem Wert der klassischen Leasingrate möglichst entspricht (Gleichung (4.35)). Die Werte der Parametrisierung sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22 Parametrisierung im Anwendungsfall

$\alpha_{spindel}$	0,9
$\alpha_{vorschubachse}$	0,8
$\psi_{spindel}$	3,8122
$\psi_{vorschubsachse}$	2,0396

5.2.4 Investitionsbewertung und Kostenberechnung

Die Kostenberechnung der Leasingraten (Szenario 1) und der LZK (Szenario 2) erfolgt in einem nachgeschalteten Prozessschritt auf Basis der Trace-Datei. Hierzu gehören die Bestimmung von Margen, Amortisation, Zeitwertverläufen aller Baugruppen sowie von Ausfallkosten inklusive der Ausfalldauern und Ersatzteilkosten. Der Risikozinssatz MR wird in der Simulation entweder pauschal angegeben, falls dieser bekannt ist (bspw. durch den Leasinggeber), oder über die Bestimmung eines Unternehmensratings approximiert. [WEI20] Im Anwendungsfall wird der Wert pauschalisiert. Die Gewinnmarge MG und die Marge der Verwaltungskosten MK werden pauschal angegeben, da diese durch den Leasinggeber definiert werden und nicht öffentlich zugänglich sind. Der Abzinsungsfaktor wird über die WACC-Funktion ermittelt. In der Arbeit werden die Ergebnisse in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23 WACC im Industriebeispiel

$wacc_{leasing}$	4,66 %
------------------	--------

5.2.5 Datenbasierte Validierung und Verifikation

Die Ergebnisse des Modells werden im Rahmen der Verifikation und Validierung hinsichtlich ihrer Glaubwürdigkeit dahingehend geprüft, ob das Modell die Fragestellung beantworten kann, für welches es eingesetzt wird. [GUT17] Der Entscheidungsträger erkennt das Modell für glaubwürdig an, wenn dieses für die Entscheidungshilfe als ausreichend präzise identifiziert wird. [CAR89] Hierbei wird unter Verifikation die inhaltlich-technische Korrektheit des Modells verstanden, während Validierung die Genauigkeit der Abbildung des Systems durch das Modell beschreibt. [CAR89] Die Verifikation ist damit die Antwort auf die Frage „Ist das Modell richtig?“ [BAL89] Die Validierung ist

die Antwort auf die Frage „Ist es das richtige Modell?“. [RAB08; BAL89] Die Erbringung eines endgültigen Beweises für die Gültigkeit des Simulationsmodells ist nicht möglich, nur deren Widerlegung. Dies macht eine umfassende Prüfung hinsichtlich der Evidenz notwendig. [SAR10]

Verifizierung und Validierung des computer-ausführbaren Modells untergliedern sich in mehrere Schritte. Zum einen werden die theoretischen Verteilungen der Eingangsdaten und die simulierten Ergebnisse des Kostenmodells validiert. Zum anderen werden die Simulationsergebnisse des Abnutzungsvorrates und des Zeitwertes der Komponenten und die hieraus resultierenden Ergebnisse des Bewertungsmodells validiert. Hierzu werden die Methoden nach [RAB08] eingesetzt. Das Vorgehen der Validierung wird wie in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24 Datenbasierte Validierung: Objekte und Methoden

Objekt der Validierung	Methoden nach [RAB08]
Modellierung der Eingangsdaten	Die Modellierung auf Basis der Daten wird durch den Vergleich mit aufgezeichneten Daten der modellierten Maschine und weiterer Vergleichsmaschinen geprüft. Zudem werden die Ergebnisse mit Experten aus Hersteller- und Anwenderperspektive besprochen. (sog. Validierung im Dialog).
Kostenmodell	Die stochastischen Kosten werden wie oben mit empirischen Daten verglichen. Hierzu stehen zum Teil pauschalisierte Werte zur Verfügung, sodass eine Validierung im Dialog sowie ein Vergleich mit identifizierten Publikationen erfolgt (sog. Schreibtischtest)
Modellierung des Abnutzungsvorrates	Die Validierung des Abnutzungsvorrates lässt sich datenbasiert schwierig umsetzen, da der reale Abnutzungsvorrat inkl. der Belastungen über die Zeit nicht bekannt ist. Die Validierung erfolgt durch einen Vergleich mit Näherungswerten. Diese wurden von Experten aus der Praxis hergeleitet und diskutiert.
Ergebnisse	Die berechneten Kapitalwerte, Gesamtkosten und Leasingraten werden durch den Abgleich mit historischen Daten validiert. Zur Validierung werden im Dialog mit Leasinggebern, Leasingnehmern und Maschinenherstellern die Ergebnisse diskutiert. Zudem werden die Bestandteile der Kostenfaktoren im Schreibtischtest mit Publikationen aus dem Bereich der LZK-Rechnung verglichen.

Exemplarisch erfolgt die Validierung einer theoretischen Ausfallverteilung. Hierzu sind in Abbildung 38 zum einen die theoretischen cdf als Simulationsergebnisse der MFM-Verteilungen am Beispiel Hauptspindel dargestellt. Zum anderen sind die empirischen cdf der zugrundeliegenden Datenbasis dargestellt. Zur Validierung wird der Kolmo-

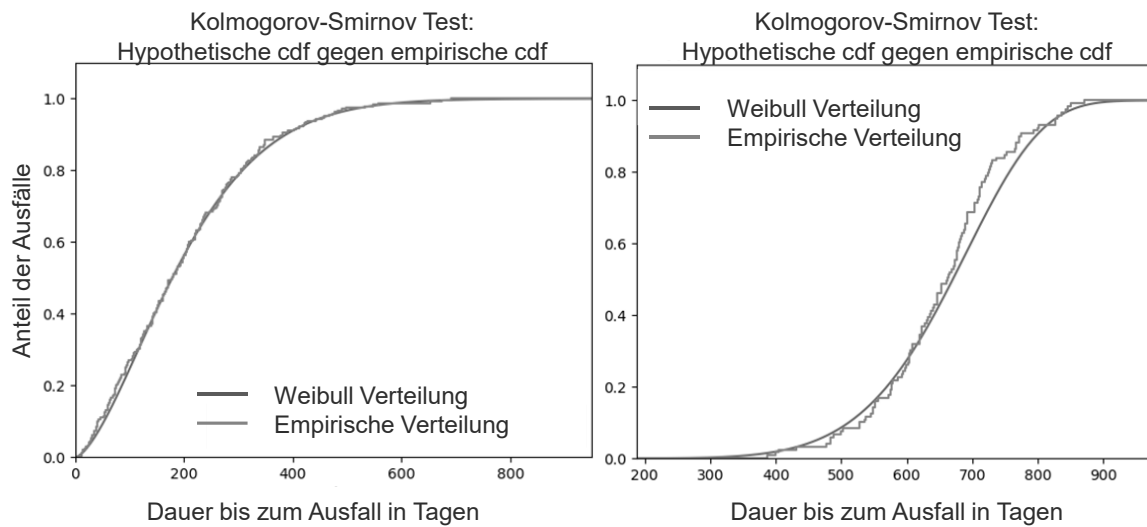


Abbildung 38 Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov Tests am Beispiel der Ausfallverteilung der Baugruppe Motorspindel (links: Verteilung der zufälligen Ausfälle; rechts: Verteilung der Verschleißausfälle)

gorov-Smirnov Test genutzt. Dieser testet, ob die Hypothese, dass der betrachtete Datensatz den beiden 2-parametrischen Weibull-Verteilungen entspringt, zu verwerfen ist. Damit ist die theoretische Verteilungsfunktion definiert. Diese Hypothese konnte bei allen Verteilungen der Ereignisdaten sowie der Betriebsdaten nicht widerlegt werden. Zusammengefasst ist das Modell verifiziert und valide.

6 Experimentelle Anwendung der Bewertungsmethode

Im folgenden Kapitel wird die entwickelte Bewertungsmethode im vorgestellten Industriebeispiel angewendet und die Ergebnisse diskutiert. Das Ziel dieses Kapitels ist es, mit Hilfe des Bewertungsansatzes das belastungsbasierte Bezahlmodell mit alternativen Konzepten zu vergleichen. Damit wird die monetäre Vorteilhaftigkeit untersucht und die Charakteristiken der Zahlungsreihen und Risiken diskutiert.

6.1 Experimentelles Design

Folgend wird das durchgeführte Experiment beschrieben. Die Eingangs- und Stellgrößen sind Kapitel 5.2 zu entnehmen. Ausgehend von Kapitel 3.2.3 werden folgende Parameterkombinationen simulativ abgebildet (Tabelle 25).

Tabelle 25 Experimentelles Design: Versuchskombinationen mit Abkürzungen

Historischer Anwendungsfall (Status Quo, SQ)	Szenario 1: Fokus: Leasingraten (LR)	Klassisches Leasing (L)
		Belastungsbasiertes Modell (B)
	Szenario 2: Fokus: Lebenszykluskosten (LKZ)	Klassisches Leasing (L)
		Belastungsbasiertes Modell (B)
Anwendungsfall mit Anreizwirkung (AW)	Szenario 1: Fokus: Leasingraten (LR)	-
		Belastungsbasiertes Modell (B)
	Szenario 2: Fokus: Lebenszykluskosten (LKZ)	-
		Belastungsbasiertes Modell (B)

Es werden alle experimentellen Kombinationen simuliert und diese untereinander im Rahmen der Investitionsentscheidung und der Zwischenergebnisse (bspw. Effekte auf die Instandhaltungskosten) verglichen und diskutiert. Die Bewertung bezieht sich in jedem Anwendungsfall auf die Entscheidungskriterien aus Tabelle 26. Dabei sind die Zahlungsreihen als Unterstützung einer fundierten Entscheidung zu verstehen. Die primäre Investitionsentscheidung erfolgt auf Grundlage der stochastischen Dominanz und dem μ - σ -Prinzip. Die Kriterien werden über ihre Ausprägungen beschrieben. Dies wird durch die Abbildung der Simulationsergebnisse ergänzt.

Tabelle 26 Entscheidungskriterien im Rahmen der Experimente

Primär: Investitionsentscheidung	Stochastische Dominanz inkl. Kapitalwertverteilungen
	Auswahlkriterium μ - σ -Prinzip inkl. Sicherheitsäquivalent
Sekundär: Kostenvergleich	Zahlungsreihen: Leasingraten
	Zahlungsreihen: Instandhaltungskosten und Lebenszykluskosten
	Zeitwerte und Restwerte der belastungsbasierten Baugruppen

Für jedes Experiment werden $N = 200$ Simulationsdurchläufe durchgeführt. Die Anzahl ergibt sich zum einen aus der vorhandenen Rechenkapazität. Zum anderen werden die generierten Kapitalwertverteilungen untersucht und die Simulation abgebrochen, wenn die erforderliche Genauigkeit erreicht ist. Bei anderen Verteilungen kann sich dieser Wert unterscheiden. Jedes Experiment benötigt eine Rechenzeit von etwa drei Stunden auf einem handelsüblichen mobilen Computer⁴⁶. Damit ist das simulationsbasierte Bewertungsmodell auch in der Praxis anwendbar.

6.2 Szenario 1: Leasingraten

In Szenario 1 wird eine Investitionsentscheidung ausschließlich auf Basis der Leasingraten getroffen. Hierzu werden im ersten Schritt die Zeit- und Restwerte der belastungsbasierten Komponenten ermittelt. Im zweiten Schritt werden die resultierenden Leasingraten bestimmt. Daraufhin erfolgt die Investitionsentscheidung.

Bei der Untersuchung des Status Quo (SQ) wird angenommen, dass die Nutzung der neu erworbenen Maschine der Vergleichsmaschine gleicht. Hierzu wird das Bezahlmodell so parametrisiert, dass es die historische Nutzung abbildet. Die berechneten Parameter sind in Tabelle 22 dargestellt. Die Untersuchung der Anreizwirkung (AW) erfolgt parallel. Hierbei besteht die Hypothese, dass die Nutzung der neu erworbenen Maschine der manipulierten Nutzung auf Basis der Vergleichsmaschine gleicht.

⁴⁶ Intel(R) Core(TM) i7-4600U CPU @ 2.10GHz / 2.69 GHz mit 8,00 GB RAM

6.2.1 Zeitwerte

Der Wertverlust der belastungsbasierten Komponenten kann Abbildung 39 für die Spindel und Abbildung 40 für die Vorschubachse entnommen werden. Die Restwerte sind in Abbildung 41 dargestellt. Der Zeitwert kann nur im belastungsbasierten Leasing angegeben werden. Im klassischen Leasing sind diese Informationen nicht bekannt. Im belastungsbasierten Fall lässt sich über den Zeitwertverlauf der Restwert bestimmen. In den ersten beiden Abbildungen sind für jeden Simulationsdurchlauf die Zeitwertverläufe sowie deren Erwartungswerte (Mittelwerte) dargestellt. Durch die Parametrierung ist der erwartete Restwert im Anwendungsfall SQ um den Aufschlag der Gewinnmarge größer als der Restwert nach AfA-Abschreibung. Dies ist an der Differenz zwischen dem Restwert nach AfA-Abschreibung und dem Mittelwert der Zeitwerte zum Ende der Grundmietzeit zu erkennen.

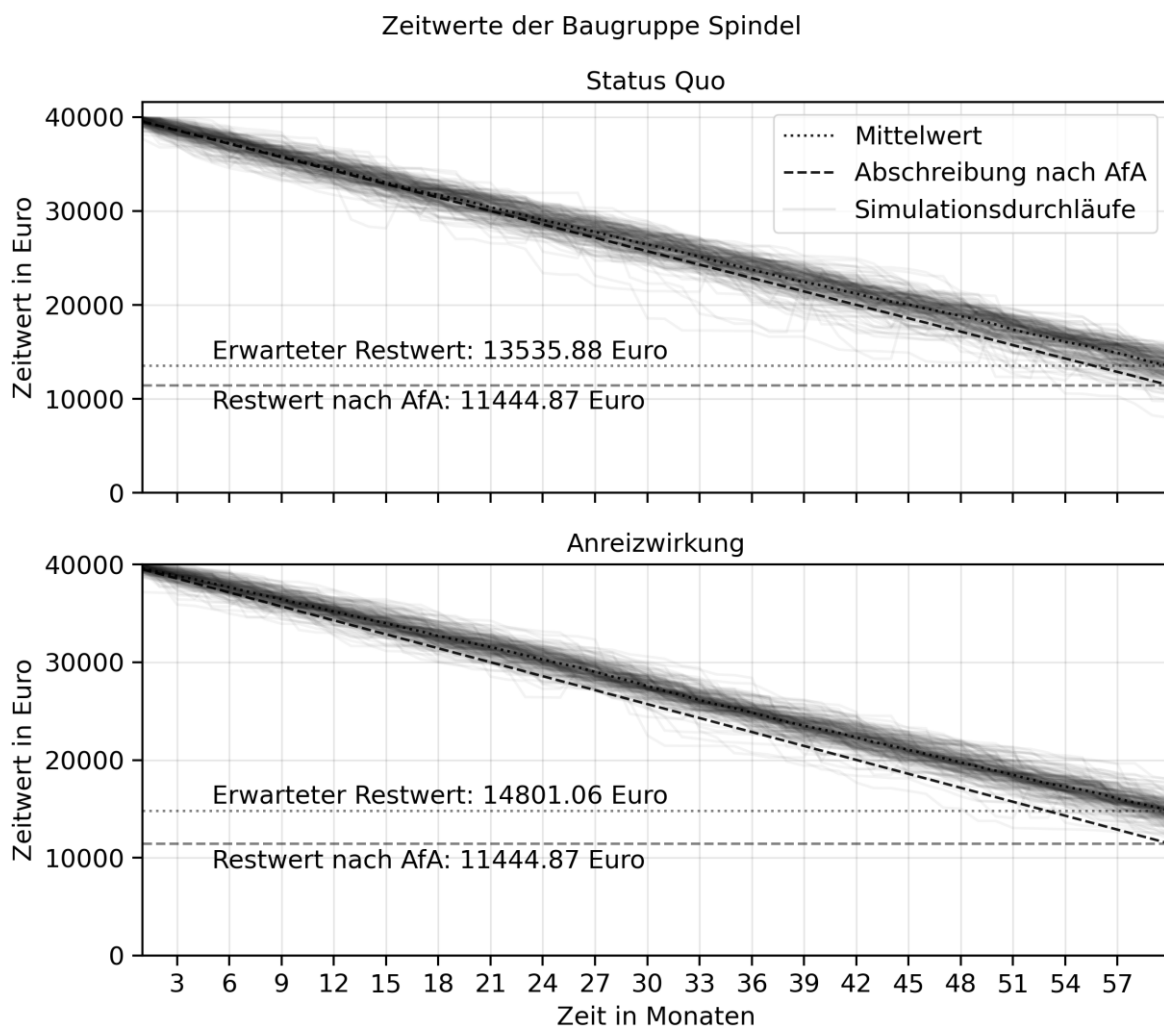


Abbildung 39 Zeitwertverlauf der Baugruppe Spindel (oben: SQ-LR-B, unten: AW-LR-B)

Die Zeitwerte der Baugruppe Spindel sind im historischen Anwendungsfall (SQ) in den meisten Simulationszeitpunkten gegen Ende der Grundmietzeit größer als der Abschreibungswert. Einige Ausreißer, die geringere Zeitwerte aufweisen, sind zu erkennen. Die Streuung steigt mit der Zeit. Im Vergleich hierzu ist im Anwendungsfall der Anreizwirkung (AW) zu erkennen, dass die Streuung geringer ist. Zudem sind weniger Simulationszeitpunkte mit einem geringeren Zeitwert als dem Abschreibungswert vorzufinden. Insgesamt ist der Restwert signifikant größer. Dabei ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen Abschreibungswert und Mittelwert der Simulation mit der Zeit steigt. Es lassen sich für beide Fälle die erwarteten Gewinnmargen ablesen, welche für den historischen Anwendungsfall $MG_{SQ,spindel} = 2.081 \text{ €}$ beträgt und durch die Anreizwirkung $MG_{AW,spindel} = 3.356 \text{ €}$. Im Vergleich zur Spindel sind die Zeitwerte der Vorschubsachse volatiliter. Für beide Anwendungsfälle sind größere Sprünge zu erkennen, welche auf kostenintensivere Instandsetzungsmaßnahmen hindeuten. Wie auch bei der

Zeitwerte der Baugruppe Vorschubsachse

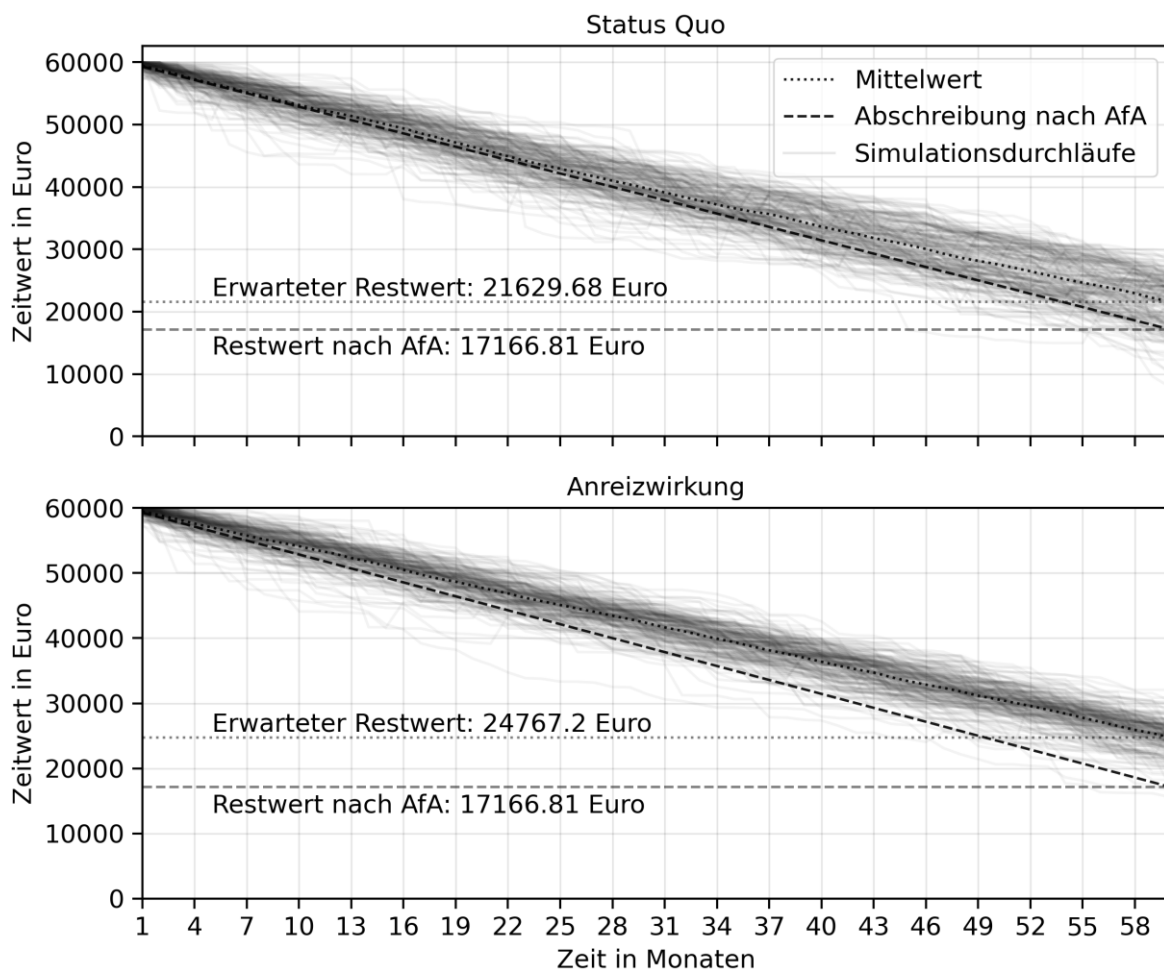


Abbildung 40 Zeitwertverlauf der Baugruppe Vorschubsachse (oben: SQ-LR-B, unten: AW-LR-B)

Spindel ist zu erkennen, dass im Anwendungsfall AW die Streuung im Vergleich mit SQ geringer ist. Des Weiteren ist der Restwert signifikant höher als im SQ-Fall. Auch hier lassen sich die zu erwartenden Gewinnmargen für den Leasinggeber ablesen, welche im Fall SQ $MG_{SQ, vorschubachse} = 4.463 \text{ €}$ und im Fall AW $MG_{AW, vorschubachse} = 7.600 \text{ €}$ beträgt.

Die Restwerte beider Komponenten in beiden Anwendungsfällen sind in Abbildung 41 als Histogramme zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass die Restwerte im AW-Fall für beide Komponenten im Durchschnitt größer sind. Zudem ist eine geringere Streubreite zu erkennen. Damit besitzen die Komponenten und folgendermaßen auch die Werkzeugmaschine im Fall AW einen stabileren Zeitwertverlauf und einen höheren erwarteten Wiederverkaufswert. Dies führt dazu, dass der Leasinggeber durch die Anreizwirkung mit einer höheren Gewinnmarge rechnen kann, da die Maschine zum Ende der Grundmietzeit im Durchschnitt einen höheren Wiederverkaufswert erlangen kann. Zudem sinkt das Objektisiko während der Grundmietzeit. Wird der Leasingnehmer an

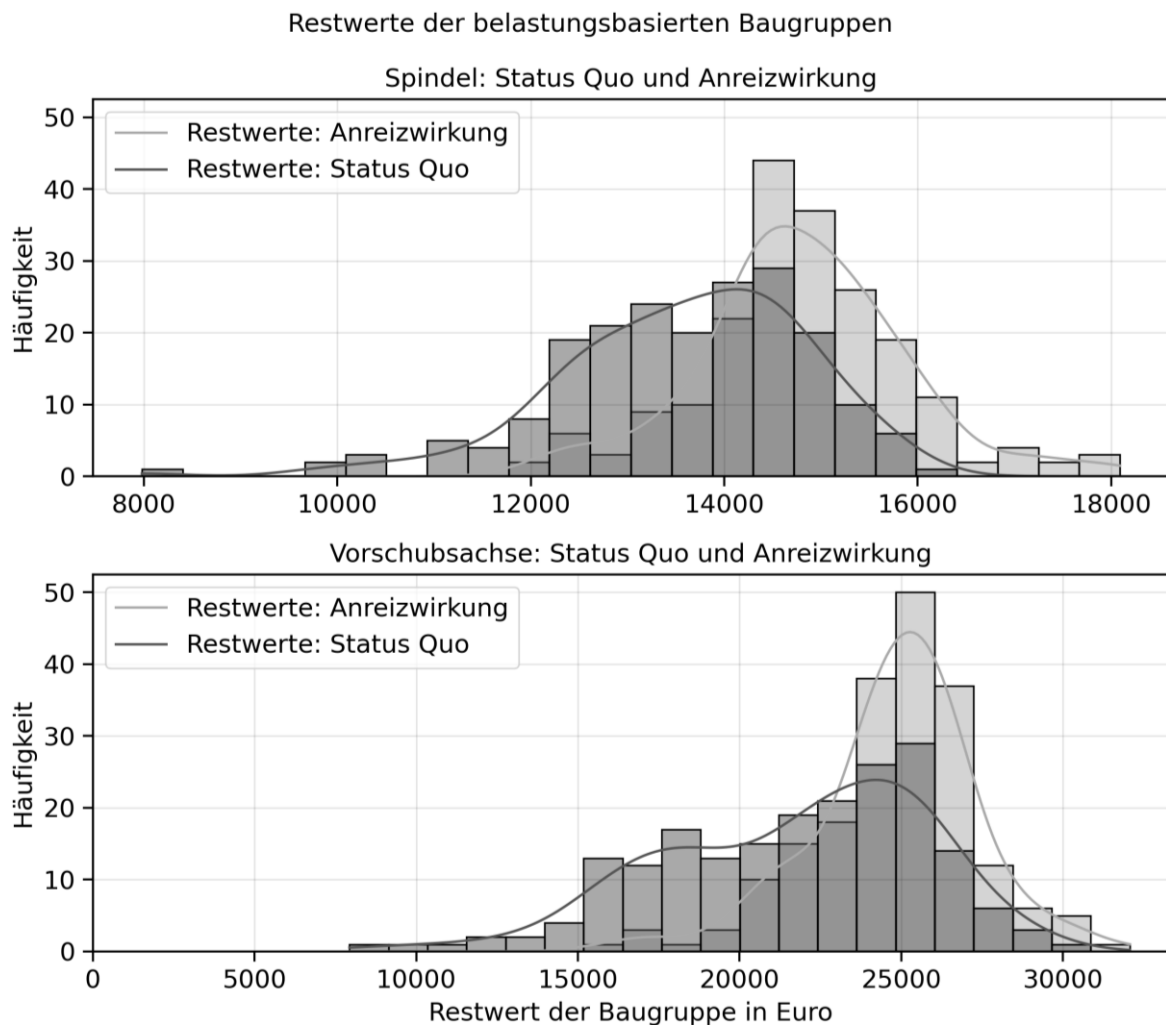


Abbildung 41 Histogramme der Restwerte beider Komponenten in beiden Anwendungsfällen

diesem Vorteil beteiligt, so können sich für ihn günstigere Konditionen im Leasing ergeben.

6.2.2 Leasingraten

In diesem Abschnitt erfolgt eine Diskussion der resultierenden belastungsbasierten Leasingraten in den Anwendungsfällen SQ und AW. In Abbildung 42 sind die Leasingraten des klassischen und des belastungsbasierten Leasings für beide Anwendungsfälle über die Grundmietzeit dargestellt. Hinzu wird die Verteilung der Leasingraten als Histogramm in Abbildung 43 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Leasingraten mit der Zeit keinem Trend folgen, sondern gleichmäßig verteilt sind. In beiden Fällen sind die belastungsbasierten Leasingraten im Schnitt geringer als die Leasingraten im klassischen Leasing. Dies lässt sich durch den Wegfall der Risikomarge erklären, da das Restwertrisiko eliminiert wird. Die Volatilität - gemessen an der mittleren Standardabweichung aller Simulationsdurchläufe - beträgt

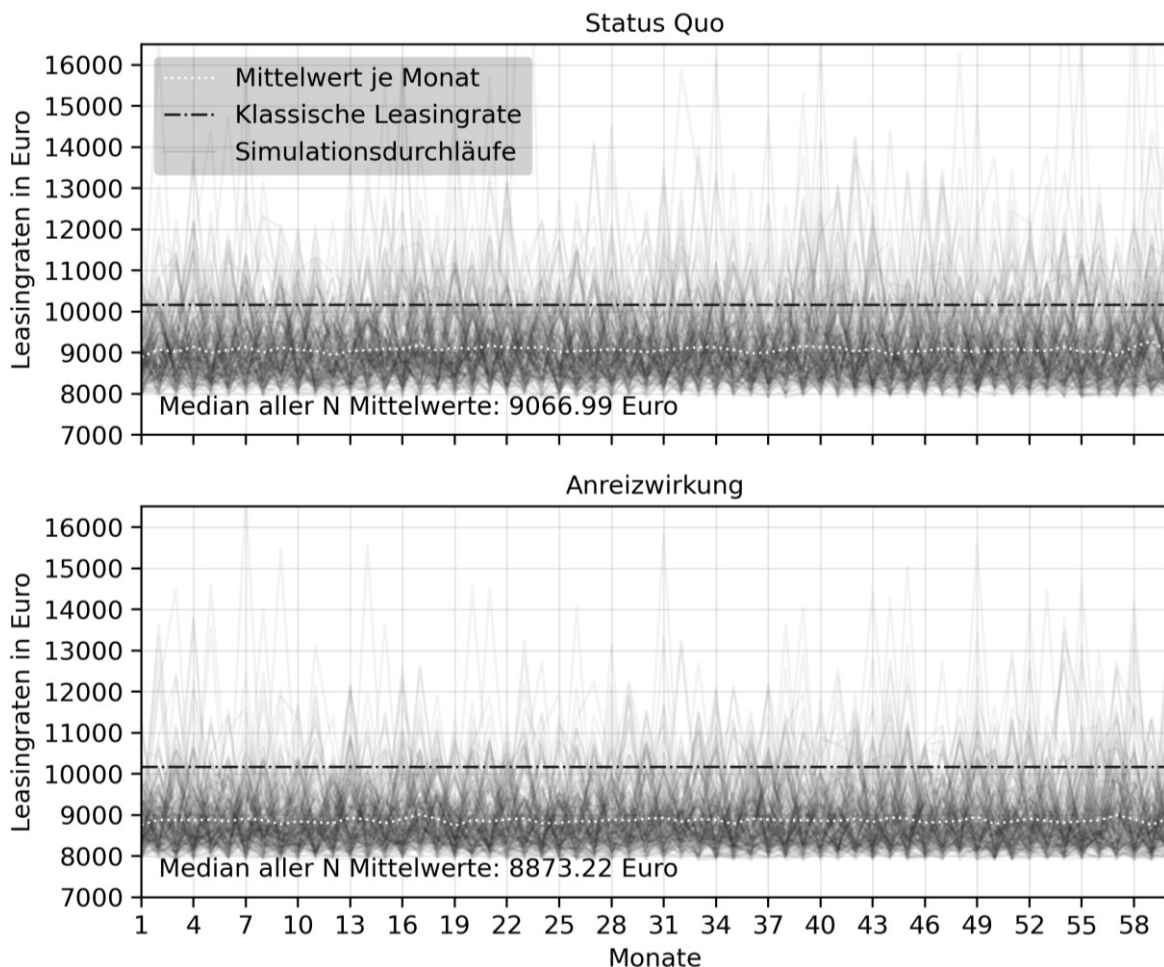


Abbildung 42 Verlauf der Leasingraten über die Grundmietzeit in beiden Szenarien

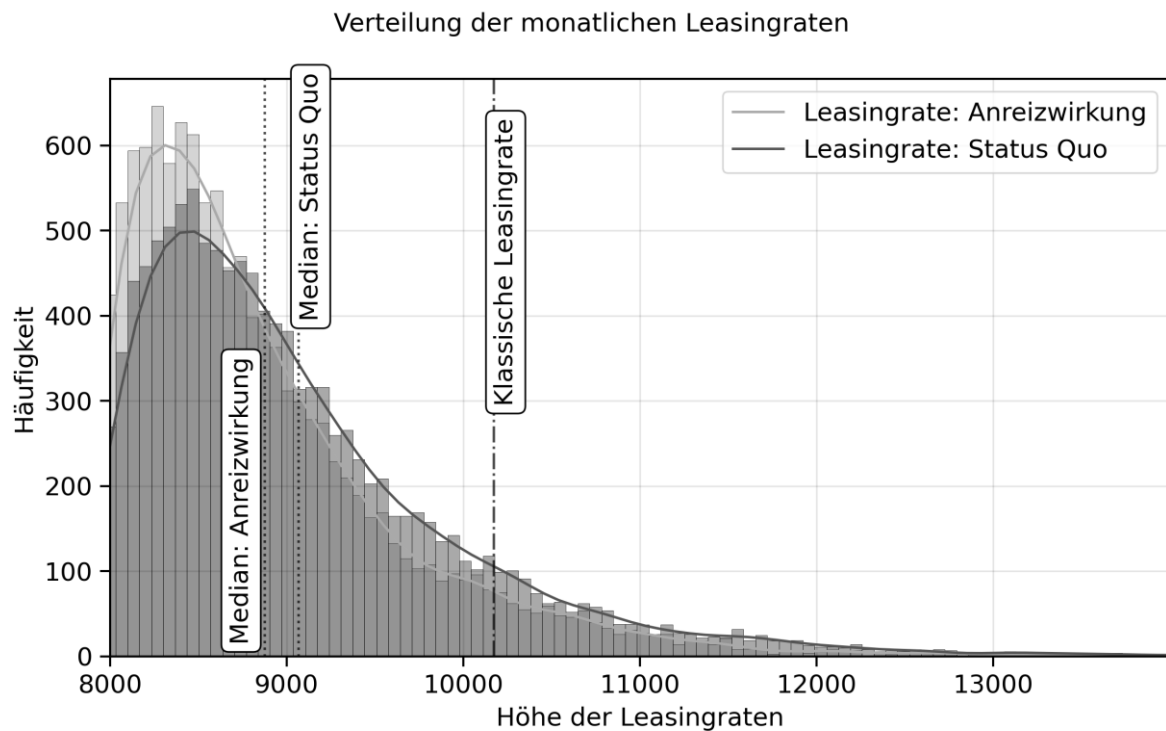


Abbildung 43 Histogramm der Leasingraten über die Grundmietzeit in beiden Szenarien

im Fall AW 824 Euro. Im Vergleich beträgt dieser Wert im Fall SQ 955 Euro. Der Median über die Mittelwerte aller Zahlungsreihen über die Zeit t lässt einen Vergleich zum klassischen Leasing zu, indem dieser einen stetigen Wert der belastungsbasierten Leasingraten über die Zeit beschreibt. Dieser beträgt im Fall AW 8.873 Euro, während der Wert im Fall SQ 9.066 Euro beträgt. Die maximale Leasingrate im Fall SQ beträgt 24.328 Euro. Im Vergleich hierzu beträgt die maximale Leasingrate im Fall AW nur 16.866 Euro. Damit führt die Anreizwirkung zu geringeren Leasingraten und einer geringeren Streuung derselben. Der Zusammenhang ist in Abbildung 43 zu erkennen. Die Leasingrate im klassischen Leasing beträgt 10.171 Euro und übersteigt damit die Medianwerte der Alternativen.

6.2.3 Investitionsentscheidung

Auf Basis der Zahlungsreihen und der damit resultierenden Kosten für den Leasingnehmer lässt sich die datenbasierte Investitionsentscheidung treffen. Diese gliedert sich in die stochastische Dominanz und die Nutzenfunktion.

Risikoprofil und Dominanzkriterium

Die Risikoprofile der Kapitalwertverteilungen der Investitionsentscheidungen auf Basis der Leasingraten sind in Abbildung 44 abgebildet. Die Risikoprofile werden durch den

Kaplan-Meier-Schätzer dargestellt. [KAP58] Das Konfidenzintervall bestimmt sich durch das exponentielle Greenwood-Konfidenzintervall. [GRE26]

Es handelt sich hier um die Profile des belastungsbasierten Leasings für die Fälle SQ und AW. Es ist zu erkennen, dass das Risikoprofil der Investitionsentscheidung im Fall AW gegenüber SQ stochastisch dominant ist. Damit zeigt sich, dass die Anreizwirkung einen positiven Effekt hinsichtlich der Investitionsentscheidung hat. Zudem ist an der Steigung der Kurven zu erkennen, dass die Standardabweichung im Fall AW kleiner ist.

Ein Vergleich mit dem klassischen Leasing kann auf diese Art jedoch nicht erfolgen, da der Kapitalwert deterministisch bekannt und das Risiko gleich 0 ist. In Szenario 1 muss im Umkehrschluss der Vergleich über das μ - σ -Prinzip erfolgen, um eine Entscheidung über die Vorteilhaftigkeit zu treffen.

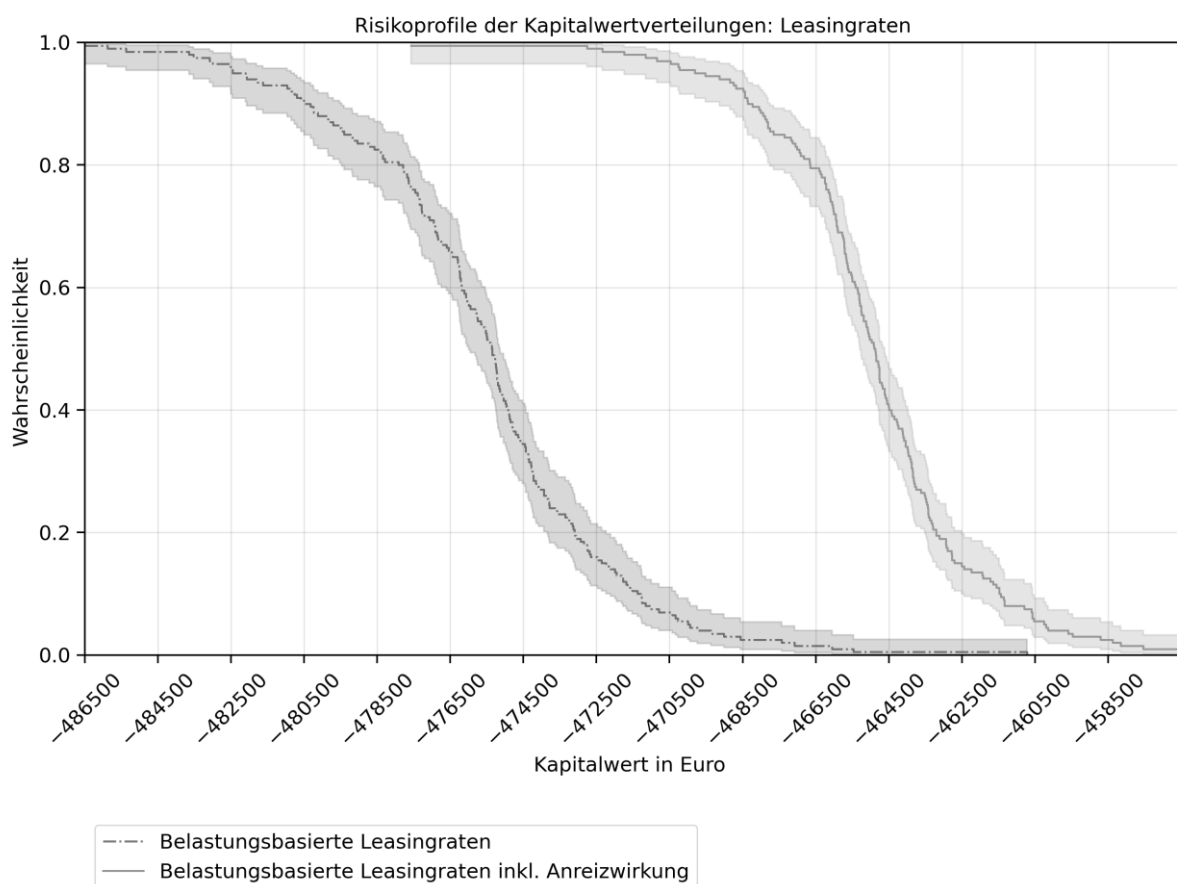


Abbildung 44 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung der Leasingraten

μ - σ -Prinzip

Der Vergleich der Investitionsalternativen erfolgt unter Anwendung des μ - σ -Prinzips. Beide Anwendungsfälle des belastungs-basierten Bezahlmodells und das klassische Leasingmodell werden miteinander verglichen. Auch wenn der Fall AW den Fall SQ dominiert, kann es bei der Justierung der Risikonutzenfunktion abhängig vom Grad der Risikoaversion zu einem anderen Ergebnis führen. Die Risikonutzenfunktionen und μ - σ -Kombinationen der Investitionsalternativen sind Abbildung 45 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass bei gegebener Nutzenfunktion die Alternative des belastungs-basierten Leasings wegen ihres höheren Nutzenwerts vorzuziehen ist. Bei Risikoneutralität erfolgt gleichermaßen die Auswahl der besten Alternative. Das Leasing hat mit -533.321 Euro einen sicheren Kapitalwert. Die belastungs-basierten Modelle sind risikobehaftet. Der Fall SQ ($\mu = -475.636$ Euro, $\sigma = 3.705$ Euro) ist im Vergleich zum Fall AW ($\mu = -464.901$ Euro, $\sigma = 2.851$ Euro) durch ein höheres Risiko und einen geringeren Kapitalerwartungswert charakterisiert. Werden die Risiken und die Erwartungswerte jeweils ins Verhältnis gesetzt, verbessert sich durch die veränderte Nutzung der Maschine das Risiko um 23,05 %. Der Kapitalerwartungswert verbessert sich um 2,26 %.

Zur Bestimmung des Sicherheitsäquivalents jeder Alternative wird diejenige μ - σ -Kombination bestimmt, welche den gleichen Nutzen bei einem Risiko von 0 besitzt. Das Sicherheitsäquivalent im Fall SQ beträgt -483.048 Euro, im Fall AW beträgt es -470.604

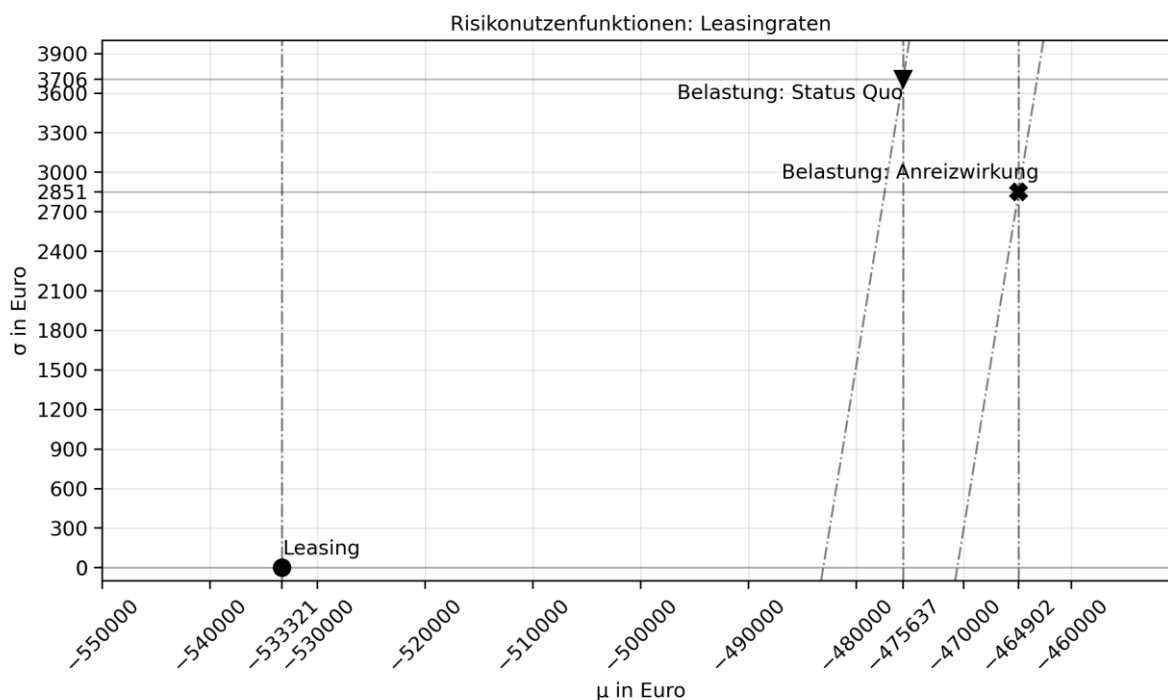


Abbildung 45 Risikonutzenfunktionen der alternativen Investitionsentscheidungen im Szenario 1

Euro. Bei der Bestimmung der Sicherheitsäquivalente ist zu erkennen, dass die Differenz zum Leasing für beide Fälle (SQ: 62.717 Euro; AW: 50.273 Euro) groß ist. Über die Differenz der Sicherheitsäquivalente zum klassischen Leasing lässt sich zudem bei gegebener Nutzenfunktion der Grenzwert der Minderung der Risikomarge definieren, bei welchem der Leasingnehmer noch bereit ist das belastungsbasierte Modell dem klassischen Leasing vorzuziehen. Dabei wird die Differenz der Sicherheitsäquivalente über die Kapitalwertfunktion in einen konstanten Anteil der Leasingrate umgerechnet. Anders ausgedrückt ist der Kapitalwert einer konstanten Zahlungsreihe in Höhe des Grenzwertes gleich der Differenz des Sicherheitsäquivalents. Im Fall SQ beträgt der Grenzwert 958 Euro monatlich, im Fall AW beträgt der Wert 1.196 Euro im Monat. Die definierte Risikomarge des klassischen Leasings im Fall SQ beträgt 1.083 Euro im Monat. Somit kann der Leasinggeber im Fall SQ einen Großteil der Risikomarge beaufschlagen, ohne dass der Leasinggeber das klassische Leasing präferiert. Im Fall AW wird der Wert sogar überschritten. Das bedeutet, dass das belastungsbasierte Modell auch bei Zahlung der gesamten Risikomarge weiterhin als vorteilhaft angesehen wird.

6.3 Szenario 2: Lebenszykluskosten

In Szenario 2 wird eine Investitionsentscheidung auf Basis der entscheidungsrelevanten Lebenszykluskosten getroffen. Die Zeitwerte der belastungsbasierten Komponenten sind identisch zu Szenario 1. Folgend werden die Instandhaltungskosten abgeleitet und diskutiert. Daraufhin erfolgen die Analyse der Lebenszykluskosten sowie die Investitionsentscheidung.

6.3.1 Instandhaltungskosten

Die Instandhaltungskosten ergeben zusammen mit den Leasingraten die Lebenszykluskosten der Werkzeugmaschine. In Abbildung 46 sind die gesamtheitlichen, monatlichen Instandhaltungskosten beider Anwendungsfälle aufgetragen. Eine Untergliederung der Kosten in deren Bestandteile für beide Anwendungsfälle lässt sich Anhang A.3.1 entnehmen. Die Instandhaltungskosten sind unabhängig vom Zeitwert der Werkzeugmaschine und werden ausschließlich von den simulierten Ereignissen und deren Kosten determiniert. Es ist auf den ersten Blick nicht eindeutig zu erkennen, welcher Fall zu geringeren Kosten führt. Dies ist dadurch zu erklären, dass höhere Instandhaltungskosten sehr selten während der Grundmietzeit auftreten. In Anhang A.3.1 ist zu erkennen, dass Austauschteile, welche zum Teil über 30.000 Euro pro Ereignis kosten

können, den größten Kostenpunkt darstellen. In Verbindung mit den hohen Stillstandskosten kann ein Ereignis über 40.000 Euro an Kosten verursachen. Solche Kostenspitzen sind auch im ursprünglichen Datensatz zu erkennen, tauchen jedoch selten auf.

Die Instandhaltungskosten im Anwendungsfall SQ sind für das belastungsbasierte Bezahlmodell sowie für das klassische Leasing gleich. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Instandhaltungskosten bei einem Vergleich dieser beiden Investitionsentscheidungen irrelevant sind. Die Kosten sind ausschließlich im Anwendungsfall AW des belastungsbasierten Modells relevant, da sie sich durch die veränderte Nutzung der Maschine verändern.

Die Standardabweichung im Fall AW beträgt 3.092 Euro. Im Vergleich dazu beträgt dieser Wert im Fall SQ 3.439 Euro. Der Median über alle Mittelwerte aller Zahlungsreihen beträgt im Fall SQ 1.315 Euro, wobei dieser Wert im Fall AW 1.214 Euro beträgt. Die maximalen Instandhaltungskosten über alle Simulationsdurchläufe betragen im Fall SQ

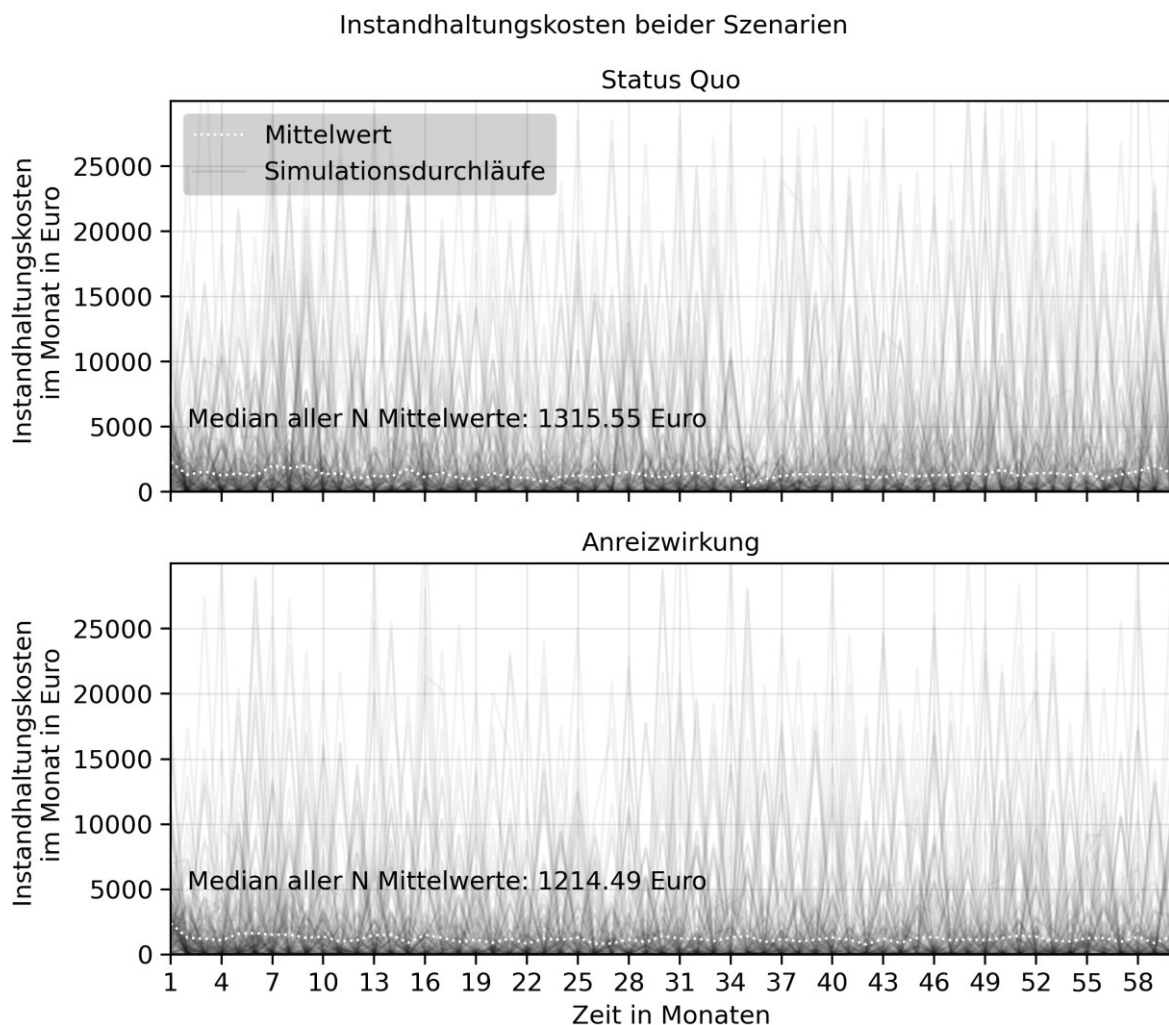


Abbildung 46 Instandhaltungskosten über die Grundmietzeit

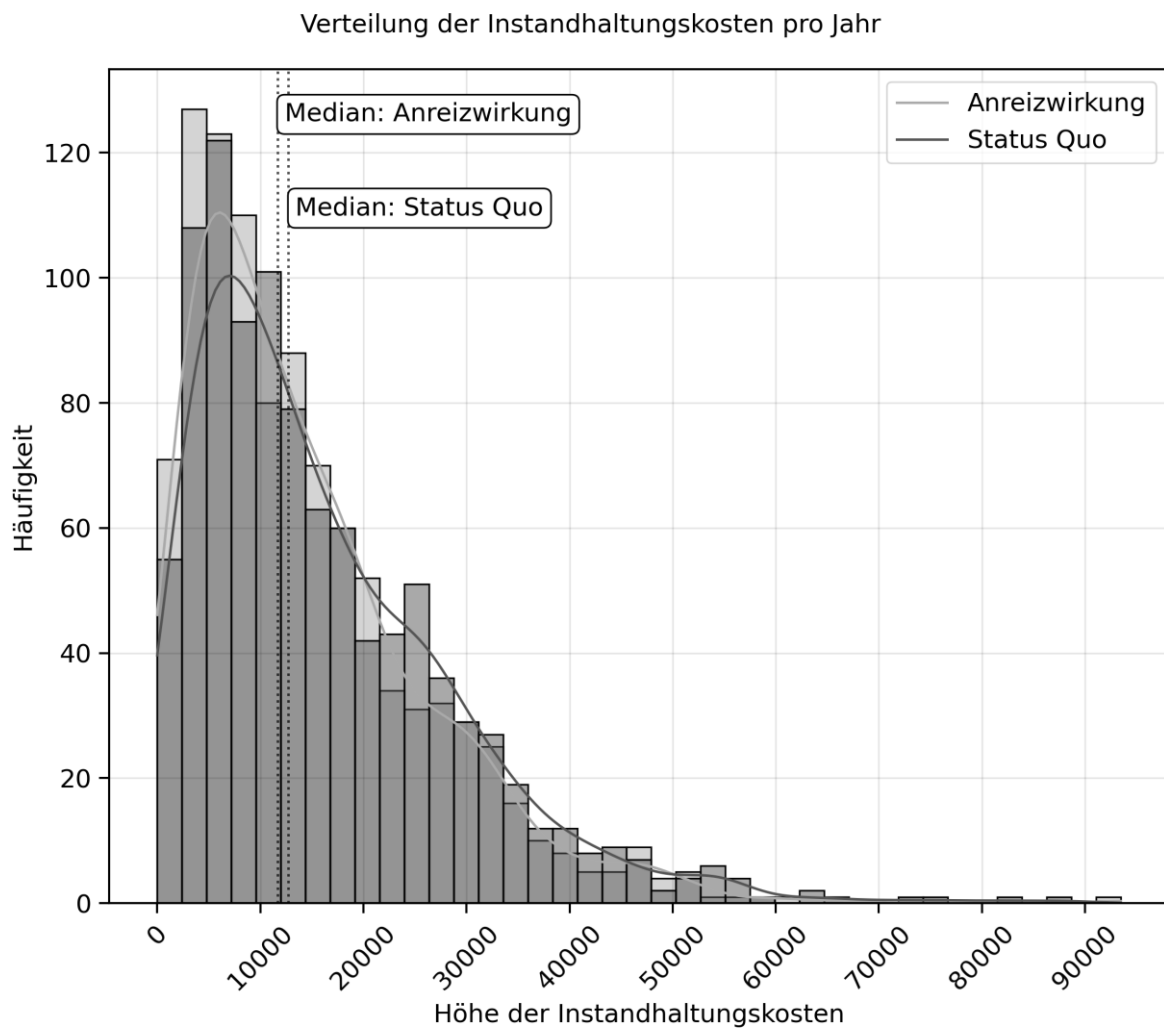


Abbildung 47 Histogramm zu den Instandhaltungskosten im Jahr

46.402 Euro. Geringer fällt der Wert im Fall AW mit 38.083 Euro aus. Damit ist der Fall AW durch geringere Kosten bei geringerem Risiko charakterisiert. In Abbildung 47 sind die Instandhaltungskosten pro Jahr abgebildet. Auch hier ist zu erkennen, dass die Anreizwirkung zu durchschnittlich geringeren Kosten führt. Die Gesamtkosten der Instandhaltung decken sich mit den genannten Kostenanteilen aus der Literatur zu LZK von Werkzeugmaschinen (siehe Abschnitt 2.1.5).

6.3.2 Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskosten bestehen für den betrachteten Fall aus den Leasingraten und den Instandhaltungskosten. In Anhang A.3.2 sind die Zahlungsreihen über die Grundmietzeit für beide Szenarien des klassischen und des belastungsbasierten Leasings dargestellt. In Abbildung 58 ist zu erkennen, dass die LZK des belastungsbasierten Modells in beiden Fällen stärker schwanken als im klassischen Leasingmodell. Die Volatilität,

der Median über die Mittelwerte aller Zahlungsreihen und die maximalen LZK über alle Simulationsdurchläufe sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27 Kennzahlen der Zahlungsreihen der LZK

	Klassisches Leasingmodell			Belastungsbasiertes Leasingmodell		
	Median aller Mittelwerte in Euro	Mittlere Standardabweichung in Euro	Maximalwert in Euro	Median aller Mittelwerte in Euro	Mittlere Standardabweichung in Euro	Maximalwert in Euro
SQ	11.486	3.439	56.573	10.393	3.583	54.408
AW	-	-	-	10.057	3.215	46.831

Im belastungsbasierten Leasing für den Fall AW fallen durchschnittlich geringere Kosten bei geringerem Risiko an. Insbesondere sinkt der Maximalwert der monatlichen LZK stark. Ein Vergleich der beiden Bezahlmodelle zeigt, dass die LZK im Median im belastungsbasierten Modell geringer sind. Die Standardabweichung steigt dagegen an, da im klassischen Leasing ausschließlich die Instandhaltungskosten einfließen, während im belastungsbasierten Fall auch die Leasingraten berücksichtigt werden. Die Maximalwerte im belastungsbasierten Modell sind hingegen geringer. Dies ist dadurch zu erklären, dass in entsprechenden Ereignismonaten die belastungsbasierten Leasingkosten geringer ausgefallen sind als die Leasingrate des klassischen Leasings.

Um den Unterschied zwischen allen Alternativen deutlicher zu machen, wird in Abbildung 48 ein einzelner Simulationsdurchlauf dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Instandhaltungskosten beider Alternativen in den Fällen AW und SQ jeweils gleich simuliert werden. Die Alternativen unterscheiden sich innerhalb der beiden Fälle ausschließlich durch die Leasingraten. Dies erklärt den ähnlichen Verlauf der Alternativen in beiden Fällen. Wird der Fall SQ mit dem Fall AW verglichen, so fallen für Fall SQ die höheren Maximalwerte der LZK auf. Dies ist durch höhere Kosten in der Instandhaltung zu erklären. In beiden Fällen sind die LZK i. d. R. geringer als im klassischen Leasing. Fallen keine oder nur geringe Instandhaltungskosten an, sind die LZK des Leasings wenig volatil. Im Vergleich dazu schwanken die Werte des belastungsbasierten Modells in

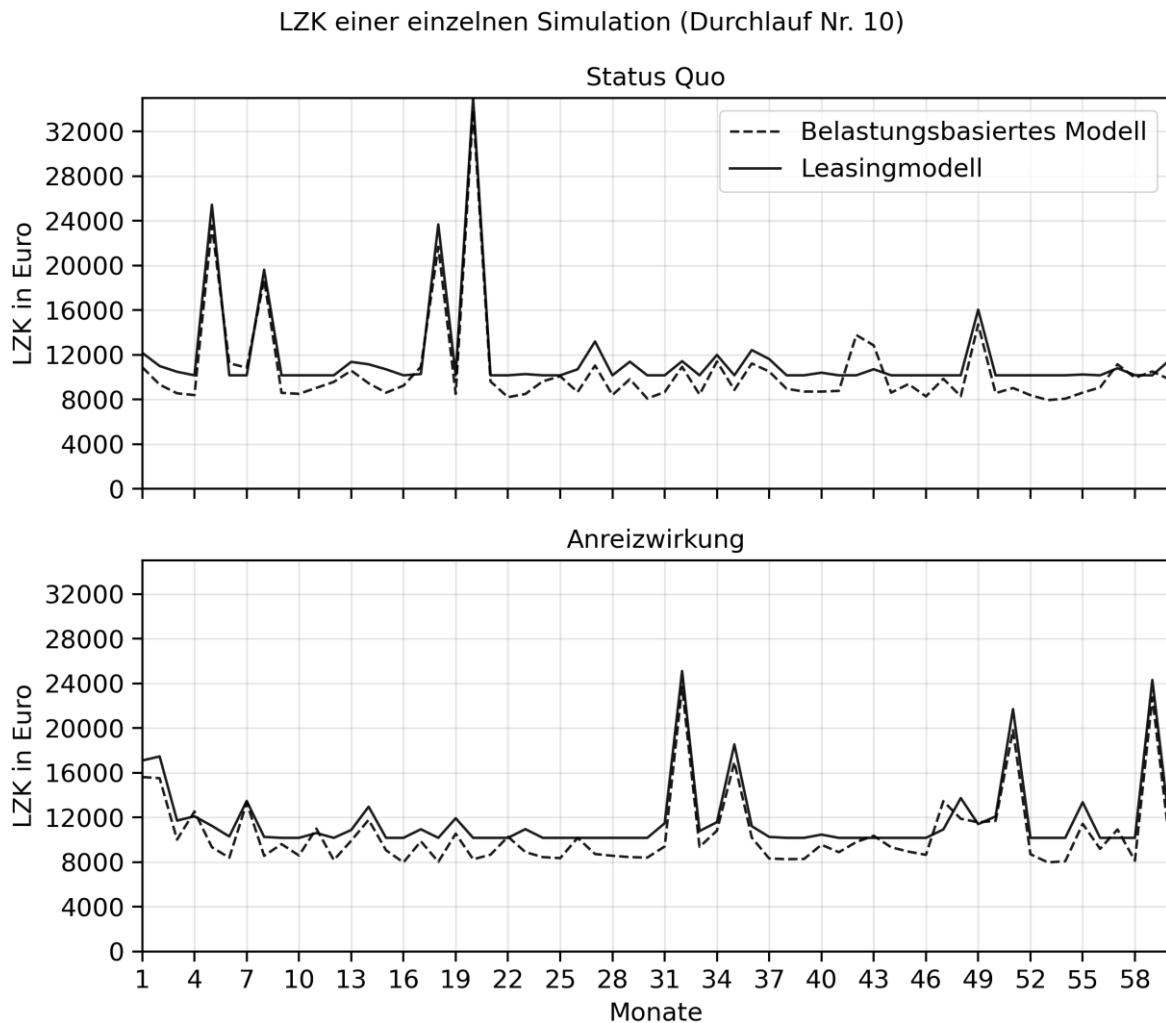


Abbildung 48 Lebenszykluskosten eines Simulationsdurchlaufes für beide Szenarien

jeder Leasingperiode, sodass zum Teil höhere Kosten als im klassischen Leasing verursacht werden.

In Abbildung 49 sind die LZK auf Jahresbasis dargestellt. Hier ist ein eindeutiger Unterschied in den Kosten zwischen dem belastungsbasierten und klassischen Leasingmodell erkennbar. Das belastungsbasierte Modell führt zu geringeren jährlichen LZK. Die Anreizwirkung hingegen führt in beiden Modellen zu geringeren Kosten und einer geringeren Volatilität. Dieser Unterschied ist jedoch weniger deutlich als die Differenz zwischen den Bezahlmodellen.

6.3.3 Investitionsentscheidung

Auf Basis der LZK für den Leasingnehmer lässt sich die Investitionsentscheidung umfassender als im ersten Szenario treffen. Folgend werden die Ergebnisse der stochastischen Dominanz und der Nutzenfunktion diskutiert.

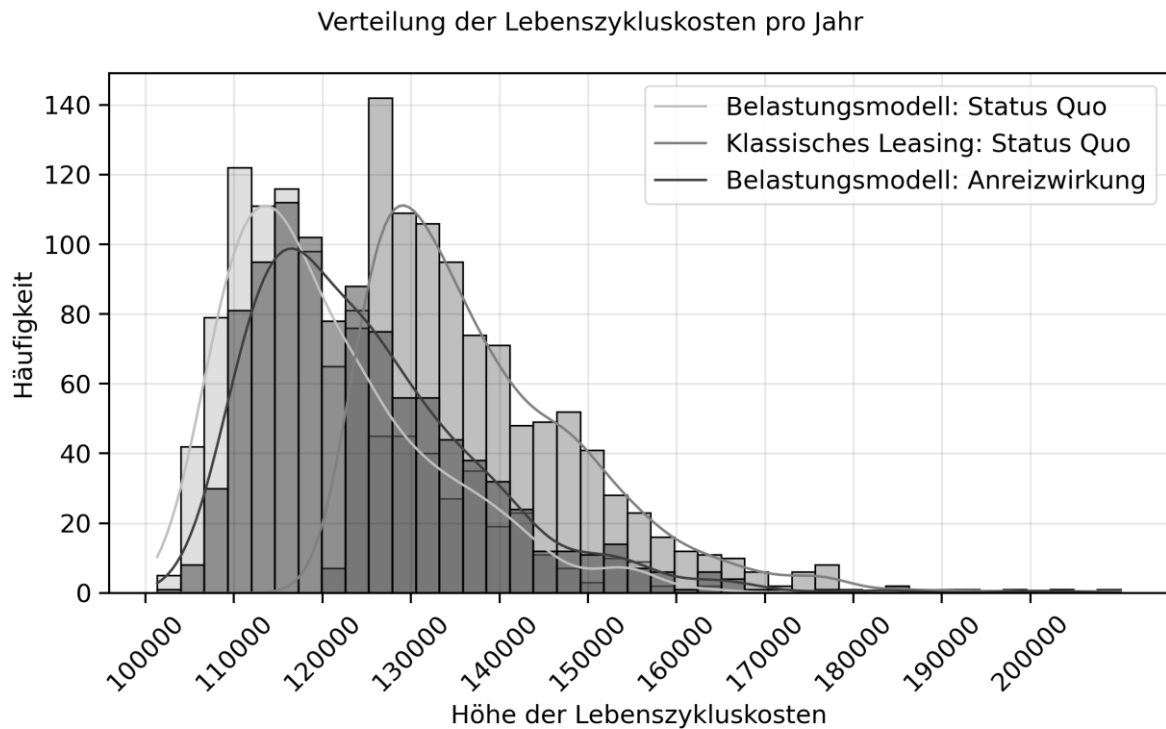


Abbildung 49 Histogramm zu den LZK im Jahr

Risikoprofil und Dominanzkriterium

Die Risikoprofile der Kapitalwertverteilungen der Investitionsalternativen bei Betrachtung der LZK sind in Abbildung 50 abgebildet. Es handelt sich um die Profile des belastungsbasierten Leasings im Anwendungsfall SQ und AW sowie um das Profil der LZK im klassischen Leasing. Es ist zu erkennen, dass das belastungsbasierte Leasing im Fall AW beide Alternativen dominiert. Das Leasing ist die schlechteste Alternative. Nach dem Dominanzkriterium ist damit eine Entscheidung eindeutig zu treffen.

Da sich die LZK aus den Leasingraten und den Instandhaltungskosten zusammensetzen, ist eine Betrachtung der Risikoprofile mit Fokus auf den Kapitalwerten der Instandhaltung von Interesse. In Abbildung 51 werden die Risikoprofile der Kapitalwertverteilungen der Instandhaltungskosten für die Fälle SQ und AW dargestellt. Der Fall AW dominiert den Fall SQ über alle Kapitalwerte. Daraus lässt sich schließen, dass die Instandhaltungskosten durch die Anreizwirkung einen eindeutig entscheidungsrelevanten Einfluss auf die Investitionsentscheidung aufweisen.

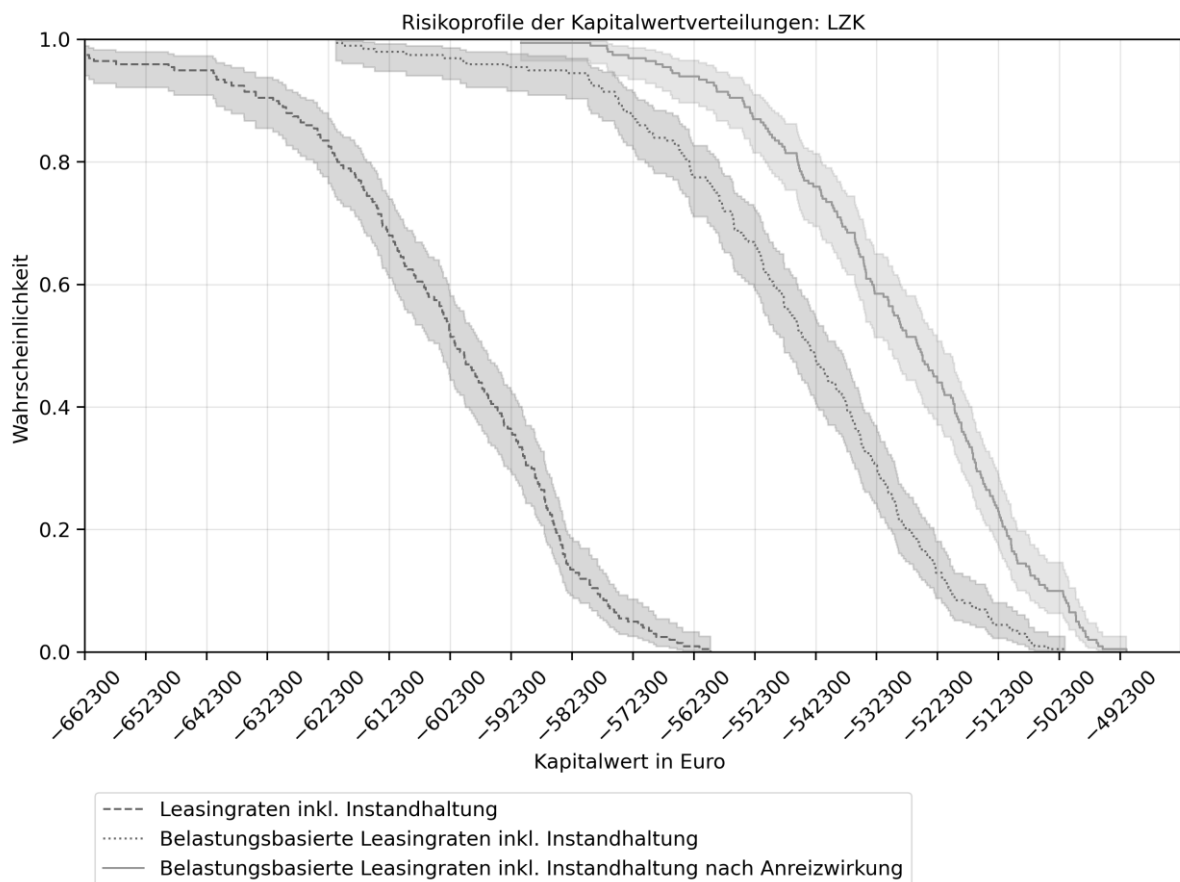


Abbildung 50 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung der LZK

μ - σ -Prinzip

Im zweiten Szenario erfolgt wiederum der Vergleich der Investitionsalternativen über das μ - σ -Prinzip. Es werden beide Anwendungsfälle miteinander verglichen. Das Ergebnis des μ - σ -Prinzips ist Abbildung 52 zu entnehmen. Auch ohne Berücksichtigung der Anreizwirkung ($\mu = -545.966$ Euro, $\sigma = 23.014$ Euro) ist das belastungsbasierte Modell dem klassischen Leasing ($\mu = -603.651$ Euro, $\sigma = 22.651$ Euro) vorzuziehen. Das Risiko des belastungsbasierten Modells ist im Fall SQ jedoch höher als das Risiko im Leasing. Nach Betrachtung der Anreizwirkung ($\mu = -528.385$ Euro, $\sigma = 19.873$ Euro) fällt das Risiko geringer aus. Die gleiche Auswahlentscheidung ist bei Risikoneutralität zu treffen.

Das Sicherheitsäquivalent im klassischen Leasing beträgt -648.953 Euro. Im Fall SQ des belastungsbasierten Modells beträgt es -591.995 Euro und im Fall AW -568.132 Euro. Die Differenzen der Sicherheitsäquivalente des belastungsbasierten Modells zum Leasing betragen im Fall SQ 56.958 Euro und im Fall AW 80.821 Euro. Hieraus lässt sich wiederum der Grenzwert der Minderung der Risikomarge über die

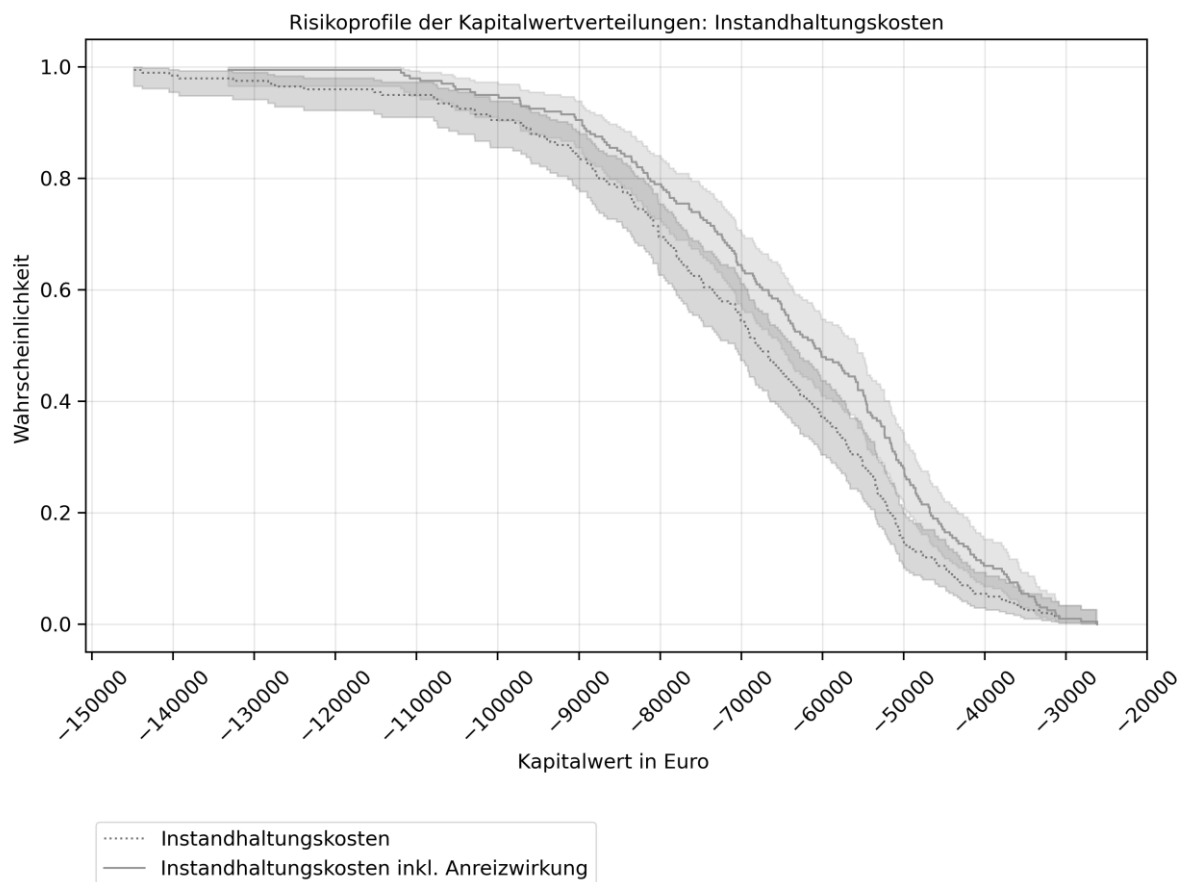


Abbildung 51 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung der Instandhaltungskosten

Kapitalwertfunktion berechnen. Der Grenzwert der Minderung der Risikomarge beträgt im Fall SQ 1.086 Euro monatlich, im Fall AW beträgt der Wert 1.541 Euro. Damit hat der Leasinggeber die Möglichkeit seine Risikomarge auf diesen Wert zu erhöhen, ohne dass der Leasingnehmer das klassische Leasingmodell bevorzugt. Bei einer Risikomarge im klassischen Leasing von 1.083 Euro im Monat übersteigen beide Grenzwerte diesen Betrag. Das bedeutet, dass mit und ohne Betrachtung der Anreizwirkung im Sinne der Auflösung des Prinzipal-Agenten-Problems das belastungsbasierte Bezahlmodell einen Mehrwert für den Leasingnehmer darstellt, welcher über die Eliminierung des Restwertrisikos hinausgeht. Die berechneten Grenzwerte können auch auf andere Weise interpretiert werden. Die Differenz kann als der Wert verstanden werden, welcher mindestens durch die Anreizwirkung verbessert werden muss. Wird etwa die Risikomarge nicht angepasst (oder nur zum Teil), lässt sich hieraus die im Mittel notwendige Minderung der Zahlungsströme durch die veränderte Nutzung der Maschine im Sinne der Anreizwirkung bestimmen.

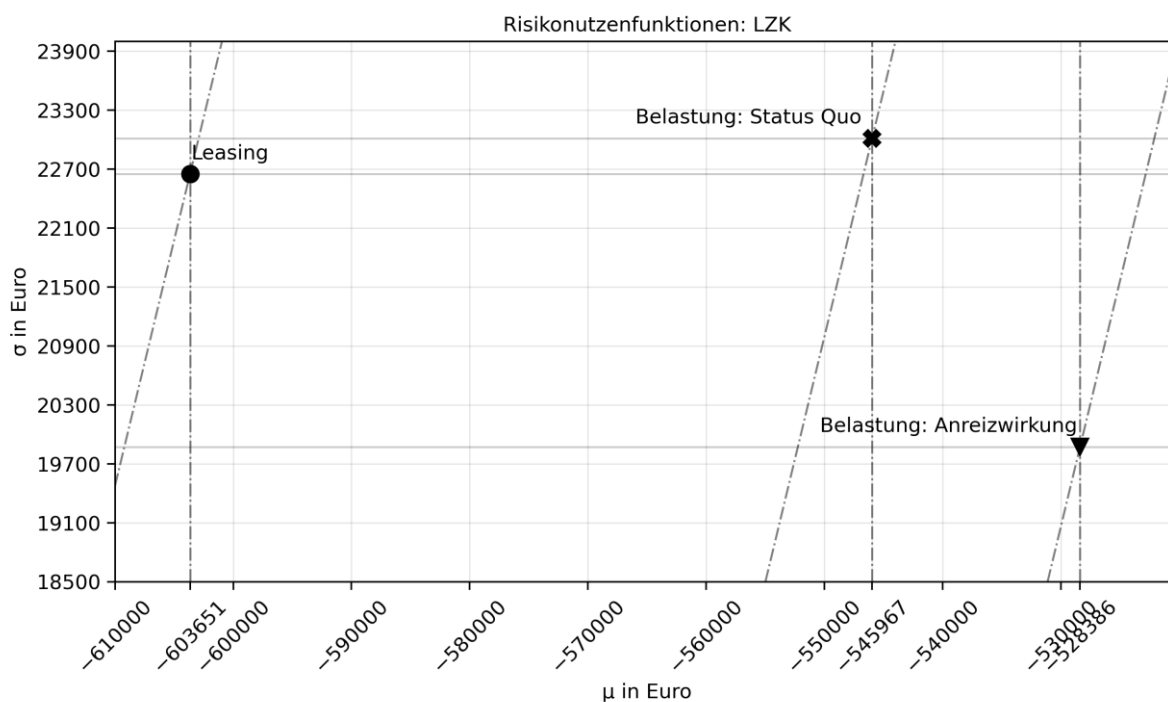


Abbildung 52 Risikonutzenfunktionen der alternativen Investitionsentscheidungen in Szenario 2

Exkurs: Full-Service-Leasing

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 eingeführt, kann das Leasingmodell als Full-Service-Leasing umgesetzt werden. Im betrachteten Anwendungsfall ist es von Interesse, die Instandhaltungskosten als fixen Bestandteil der Leasingraten anzunehmen, da diese Bestandteile durch die Anreizwirkung beeinflusst werden. Es wird folgend ein Vergleich zwischen den Alternativen, umgesetzt als Full-Service-Leasing, durchgeführt. Basis des Vergleichs sind die Modelle der Investitionsentscheidung. Der Betrag der Kapitalwerte im Full-Service-Leasing wird ermittelt, indem der Kapitalwert für die Instandhaltungskosten in jedem Simulationsdurchlauf in beiden Fällen bestimmt wird. Es wird der Erwartungswert dieser Kapitalwerte ermittelt und zu den Kapitalwerten der Leasingraten (siehe Szenario 1) addiert.

In Anhang A.3.3 wird das Risikoprofil der belastungsbasierten Modelle in den Fällen SQ und AW in Abbildung 60 abgebildet. Die Risikonutzenfunktionen der belastungsbasierten Modelle in den Fällen SQ und AW sowie das klassische Full-Service-Leasing werden in Abbildung 58 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anreizwirkung weiterhin zu vorteilhaften Zahlungsreihen führt und das belastungsbasierte Modell dem klassischen Leasing vorzuziehen ist. Die Erwartungswerte der Risikonutzenfunktionen bleiben unverändert, jedoch verändert sich das Risiko in allen Alternativen. Im klassischen Leasing

ist kein Risiko bezüglich des Kapitalwertes verblieben, da alle Kosten deterministisch zu bestimmen sind. Das Risiko gemessen an der Standardabweichung im belastungs-basierten Modell in Fall AW fällt um 17.022 Euro, im Fall SQ um 19.308 Euro und im klassischen Leasing um 22.651 Euro. Das klassische Leasing erfährt durch die Umstel-lung auf einen Full-Service-Vertrag die größten Vorteile hinsichtlich des Risikos. Damit sinkt zudem die Differenz der Sicherheitsäquivalente des belastungs-basierten Modells zum Leasing im Fall SQ auf 50.273Euro und im Fall AW auf 69.564 Euro.

7 Evaluation der experimentellen Anwendung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse der experimentellen Anwendung des Bewertungsmodells zusammengefasst und diskutiert. Hieraus werden Handlungsempfehlungen für die praktische Bewertung, Ausgestaltung und den Einsatz des belastungsbasierten Bezahlmodells für den Leasingnehmer und den Leasinggeber abgeleitet.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im betrachteten Anwendungsfall wird für beide Szenarien gezeigt, dass das belastungsbasierte Leasingmodell dem klassischen Leasingmodell vorzuziehen ist. Dies gilt sowohl für die Annahme, dass das Verhalten des Leasingnehmers im Rahmen der Prinzipal-Agenten-Beziehung unverändert ist, als auch unter Annahme einer anreizbedingten Verhaltensänderung. Es wird zudem gezeigt, dass die Anreizwirkung in beiden Szenarien zu Verbesserungen führt. Dies äußert sich in gesteigerten Restwerten, geringeren Leasingraten und geringeren Instandhaltungskosten. Weiterhin zeigt sich, dass das belastungsbasierte Modell auch ohne die Eliminierung des Restwertrisikos in Form der Risikomarge vorteilhaft für den Leasingnehmer sein kann.

Die Investitionsentscheidung ist in beiden Szenarien eindeutig. Dies äußert sich in der stochastischen sowie der eindeutigen Dominanz des belastungsbasierten Leasings im μ - σ -Prinzip. Eine solche Eindeutigkeit kann nicht verallgemeinert werden. Werden etwa die Vorteile hinsichtlich der Risikomarge geringer eingeschätzt und die Nutzungsveränderung im Rahmen der Prinzipal-Agenten-Beziehung vernachlässigt, kann das Leasingmodell potenziell von Vorteil sein. Die Nutzenfunktion des Leasingnehmers spielt eine besondere Rolle. Ist dieser sehr risikoavers, so ist das klassische Leasingmodell als vorteilhaft anzusehen. Ist der Entscheider risikoneutral oder risikofreudig, kann sich dies zu Gunsten des belastungsbasierten Modells auswirken. Dieser Zusammenhang wird am Beispiel des Full-Service-Leasings aufgezeigt. Dabei sind die deterministischen Instandhaltungszahlungen in Form einer Servicepauschale von Vorteil für das klassische Leasing, da hier das Risiko am stärksten gesenkt werden kann.

Der Verlauf der Zeitwerte und die Erwartungswerte der Restwerte lassen darauf schließen, dass die Anreizwirkung zu signifikanten Vorteilen für das Risikomanagement des

Leasinggebers führen. Die Werkzeugmaschine hat im Schnitt über die gesamte Grundmietzeit einen höheren Wert als im Vergleichsfall. Dieser ist zudem geringeren Schwankungen ausgesetzt. Da dieser Effekt jedoch ausschließlich für die Komponenten, die belastungsbasiert bepreist werden, gilt, schwächt sich der Effekt auf Ebene der gesamten Maschine ab. Die Baugruppen Spindel und Vorschubachse haben einen kombinierten Anteil an der Mietbemessungsgrundlage von 15,38 %. Ob dieser Anteil ausreicht, um eine Anreizwirkung im Sinne der Prinzipal-Agenten-Beziehung herbeizuführen, ist zu hinterfragen. Ist der Anteil der beeinflussbaren Kosten durch eine Nutzungsänderung des Leasingnehmers zu gering, wird diese für ihn als irrelevant interpretiert. Eine explizite Quantifizierung des Anteils ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Dies macht einen Vergleich des klassischen Leasings mit dem Status Quo Vergleich des belastungsbasierten Modells erforderlich.

In Bezug auf die Vorteilhaftigkeit auf Basis der Leasingraten in Szenario 1 wird gezeigt, dass das belastungsbasierte Bezahlmodell, ohne komplementäre positive Effekte, vorteilhaft gegenüber dem klassischen Leasing ist. Dieses Ergebnis besitzt jedoch wiederum keine Allgemeingültigkeit. Wird beispielweise der Anteil der belastungsbasierten Komponenten erhöht, so muss von einer Steigerung der Volatilität der Leasingraten ausgegangen werden. Im Fall eines risikoaversen Leasingnehmers kann dies bewirken, dass das belastungsbasierte Modell als zu risikoreich erachtet und das klassische Leasing bevorzugt wird. Die Anreizwirkung hat einen senkenden Effekt auf Risiko und Erwartungswert der zu zahlenden Leasingraten. Der Leasingnehmer muss im Schnitt bei geringerer Volatilität weniger zahlen. Es ist zu erkennen, dass sich die Leasingraten zwischen den Fällen im Status Quo und der Anreizwirkung nicht so stark voneinander unterscheiden, dass in jedem Zeitpunkt von einer Minderung der Leasingraten ausgegangen werden kann (Abbildung 43). Für bestimmte Zeiträume ist die klassische Leasingrate niedriger als die belastungsbasierten Alternativen. Ist der Leasingnehmer in seiner monatlichen Zahlungsfähigkeit limitiert, kann dies dazu führen, dass die belastungsbasierten Modelle für ihn nicht anwendbar sind.

Der Einfluss der Anreizwirkung auf die Instandhaltungskosten ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen. In Szenario 2 ist das belastungsbasierte Modell von Vorteil. Der Effekt der Anreizwirkung ist stärker ausgeprägt als in Szenario 1. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Differenz zwischen den Anwendungsfällen geringer ausfällt als erwartet

(Abbildung 47). Dies lässt sich dadurch erklären, dass zum einen ausschließlich die Zeitpunkte der Ausfälle manipuliert werden. Die Verteilungen der Kosten sowie die Dauer der Ausfälle und Instandhaltungsmaßnahmen werden nicht verändert. Zum anderen werden ausschließlich die Verteilungen der Instandhaltungsmaßnahmen der belastungsbasierten Komponenten, Spindel und Vorschubsachse, manipuliert. Die Verteilungen und damit die Simulation aller weiteren Komponenten der Werkzeugmaschine bleiben unverändert. Es ist anzunehmen, dass eine Veränderung der Maschinennutzung auch das Ausfallverhalten weiterer Komponenten beeinflusst und dass eine verminderte Belastung zu geringeren Kosten in der Instandhaltung führt. Die Belastung wird in der Modellierung ausschließlich in Form der produzierten Produkte beschrieben. Effekte, die darüber hinausgehen, werden nicht betrachtet. Wird weiterhin angenommen, dass im belastungsbasierten Modell eine vorrausschauende Instandhaltungsstrategie einfacher einzuführen ist, kann von einer größeren Differenz der Kapitalwertverteilungen zwischen belastungsbasiertem und klassischem Modell ausgegangen werden.

7.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Aus der Diskussion der Ergebnisse werden im Folgenden Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet. Diese Handlungsempfehlungen gliedern sich zum einen in den Aufbau des belastungsbasierten Modells, zum anderen in die Bewertung des Einsatzes für die involvierten Vertragspartner.

Für den Leasingnehmer ist die Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten belastungsbasierten Bezahlmodells für den gegebenen Anwendungsfall zu empfehlen. Die Vorteilhaftigkeit dieses Bezahlmodells gegenüber dem klassischen Leasing ist jedoch mittels des hier entwickelten Bewertungsmodells für jeden Anwendungsfall individuell zu prüfen. Eine allgemeine Aussage ist nicht möglich. Dennoch konnte dargestellt werden, welche Vorteile potenziell entstehen können. Die Erkenntnisse hinsichtlich der Vorteile helfen dem Entscheidungsträger bei einer informierten Entscheidung für oder gegen das belastungsbasierte Bezahlmodell. Die Auswahl ist dabei sowohl von der Höhe der Kosten der Werkzeugmaschine als auch dem Anteil der belastungsbasierten Komponenten und deren Kosten abhängig. Die Risikopräferenz des Leasingnehmers beeinflusst die Investitionsentscheidung. Die Präferenz ist im Vorfeld zu bestimmen.

Ist das Risiko zu hoch, kann auf ein Full-Service-Modell ausgewichen oder belastungsbasierte Komponenten linear beschrieben werden. Dieser modulare Aufbau des Bezahlmodells ermöglicht dem Leasinggeber Anpassungen vorzunehmen, um dem Risikoempfinden des Leasingnehmers besser zu entsprechen.

Die Bewertungsmethode auf Basis der Simulation der Abnutzung wird als praxistauglich bewertet, da geringe Anforderungen an die Datenbasis bestehen, die Bewertung in weiten Teilen automatisiert und die Rechenzeit niedrig ist und die Ergebnisse einen Einblick in die definierten, entscheidungsrelevanten Kriterien erlauben. Zudem ermöglicht die Bewertungsmethode einen Einblick in die Vorteilhaftigkeit für den Leasinggeber, sodass diese Informationen in der Vertragsverhandlung für den Leasingnehmer von Nutzen sind. Der Mangel an Daten vergleichbarer Werkzeugmaschinen kann den Einsatz des Modells hemmen. Dieser kann durch Experteneinschätzungen abgefangen werden, die durch Zusammenarbeit mit dem Werkzeugmaschinenhersteller an Qualität gewinnen.

Für den Leasinggeber ergeben sich durch das belastungsbasierte Bezahlmodell zahlreiche Vorteile. Zunächst einmal profitiert er durch das geringere Objektisrisiko, insbesondere durch das geringere Restwertrisiko. Ein gesteigerter erwarteter Restwert führt zu einer höheren erwarteten Gewinnmarge. Diese Erhöhung kann der Leasinggeber entweder einbehalten oder die Vorteile über günstigere Konditionen mit dem Leasingnehmer teilen. Die dadurch gewonnene Flexibilität der Preisgestaltung ermöglicht Wettbewerbsvorteile.

Dabei ist die Ausgestaltung des Bezahlmodells individuell zu prüfen. Da weiterhin ein Teil der Komponenten linear beschrieben wird, ist die Volatilität der Zahlungen begrenzt. Damit ist auch der Einfluss der Verhaltensänderung durch den Leasingnehmer auf die Zahlungen begrenzt. Um einen signifikanten Effekt hinsichtlich der Anreizwirkung zu erreichen, ist der Anteil der belastungsbasiert beschriebenen Komponenten nicht zu klein zu wählen. Bei der Gestaltung des Bezahlmodells sollte daher ein Gleichgewicht gefunden werden, das den individuellen Anwendungsfall des Leasingnehmers berücksichtigt. Das Bewertungsmodell hilft dem Leasinggeber dabei, die erwarteten Zahlungsströme und Kapitalwerte zu bestimmen. Zudem trägt die Simulation zum Verständnis für das Risiko des Bezahlmodells auf Basis des Maschinenverhaltens bei. Für den Leasinggeber ist es zudem ratsam, weitere Vertragsausgestaltungen, bspw. die Vermietung von Werkzeugmaschinen, zu prüfen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird eine kurze Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit gegeben, die gewonnenen Erkenntnisse dargelegt und das Vorgehen der Arbeit kritisch gewürdigt. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Forschungstätigkeiten ab.

8.1 Zusammenfassung und kritische Würdigung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Bewertungskonzept zur ex ante Bestimmung der monetären Vorteilhaftigkeit eines belastungsbasierten Bezahlmodells im Werkzeugmaschinenbau entwickelt. Damit ist der Leasingnehmer in der Lage, eine datenbasierte Investitionsentscheidung zu treffen. Hierzu wird in einem ersten Schritt das belastungsbasierte Bezahlmodell konzeptionell und mathematisch beschrieben, da ein solches Modell weder in der Literatur noch in der Praxis im Detail bekannt ist (Forschungsziel 1). Darauf aufbauend wird das ex ante Bewertungsmodell hergeleitet, welches insbesondere die Unsicherheit der Maschinenbelastung und die damit einhergehenden Leasingraten integriert (Forschungsziel 2). Die Maschinenbelastung wird in einem dritten Schritt über ein Simulationsmodell auf Basis von historischen Datensätzen berechnet (Forschungsziel 3). Diese Schritte werden in einem Ablauf zusammengefasst und das Bewertungsmodell in einem computer-ausführbaren Modell umgesetzt.

Das Bezahlmodell spielt in der Geschäftsmodellinnovation im Rahmen der vierten industriellen Revolution eine zentrale Rolle, wird in der Literatur jedoch wenig behandelt. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit bestehende Modelle beschrieben und hinsichtlich ihrer Risikoverteilung, insbesondere in Anbetracht des Restwertrisikos, untersucht. Das Restwertrisiko des Leasinggebers wird durch das Verhaltensrisiko in Bezug auf den Leasingnehmer beschrieben. Da dieses im Zentrum des Risikomanagements des Leasinggebers steht, wird von einer signifikanten Effizienzsteigerung des Leasingmodells durch eine belastungsbasierte Abrechnung ausgegangen.

Das in dieser Arbeit entwickelte belastungsbasierte Bezahlmodell basiert auf dem im Maschinenbau etablierten Leasingvertrag mit Teilamortisation. Die Leasingrate wird so angepasst, dass die Abnutzung der Werkzeugmaschine direkt über die Tilgung abgegolten wird. Dabei wird angenommen, dass die Tilgung auf Ebene der Baugruppen ermittelt wird, wobei nur derjenige Teil dieser Baugruppen durch die Belastung bezahlt wird, dessen Wertverlust auch direkt der Belastung zugeschrieben werden kann. Ein

solches Vorgehen zieht neben den Veränderungen an der Leasingrate weitere Effekte nach sich, die sog. Anreizeffekte. Anreizeffekte lösen das Prinzipal-Agenten-Problem zwischen Leasinggeber und Leasingnehmer auf. Sie führen zu einer veränderten Nutzung der Werkzeugmaschine, sodass kostensenkende Einflüsse über die Leasingrate hinaus erwartet werden. Diese Effekte werden im Rahmen der Risikomargen und der Lebenszykluskostenrechnung in die Kostenbetrachtung mit aufgenommen. Die Instandhaltungskosten stehen hierbei im Fokus.

Für die Bewertung des Bezahlmodells unter Unsicherheit werden durch eine Monte-Carlo-Simulation N-fach Grundmietzeiten simuliert, wobei jede Grundmietzeit durch den Kapitalwert und die Zahlungsreihen beschrieben wird. Der Kapitalwert basiert auf allen entscheidungsrelevanten Kosten, zum einen auf Ebene der Leasingraten, zum anderen auf Ebene der Lebenszykluskosten. Jede Grundmietzeit führt durch die Unsicherheit der Abnutzung der Maschine zu einem anderen Kapitalwert. Um in Anbetracht dieser Unsicherheit eine Entscheidung treffen zu können, wird im ersten Schritt eine Vorauswahl anhand der stochastischen Dominanz der alternativen Risikoprofile durchgeführt. Auf Basis der Vorauswahl erfolgt die Entscheidung nach dem μ - σ -Prinzip.

Ursache der Modellunsicherheit ist die nicht-deterministische Maschinenbelastung und -abnutzung. Diese wird im sog. Simulationskern modelliert und berechnet. Hierzu wird auf Basis von Ereignis- und Betriebsdaten ein Modell erstellt, welches die Ereignisse und den Abnutzungsvorrat über die Grundmietzeit der Werkzeugmaschine simuliert. Die Ereignissimulation für die belastungsbasierten Komponenten erfolgt durch die Nutzung statistischer, parametrischer Zuverlässigkeitsmodelle auf Basis von Instandhaltungsdaten. Die Abnutzungssimulation nutzt die historischen Betriebsdaten als Approximation der Belastung auf die Maschine. Hieraus lässt sich durch die Kombination des Gamma-Prozesses mit der Ereignissimulation das Abnutzungs- und Ausfallverhalten der Werkzeugmaschine datenbasiert beschreiben. Die Anreizwirkung wird in die Modellierung integriert, indem die theoretischen Verteilungsfunktionen manipuliert werden. Diese Manipulation erfolgt über Expertenwissen bzw. den Vergleich zu Datensätzen vergleichbarer, anders belasteter Maschinen.

Der Bewertungsansatz wird am Beispiel einer Investitionsentscheidung bei der Beschaffung eines Bearbeitungszentrums eines mittelständischen Unternehmens angewendet. Es erfolgt eine individuelle Anpassung des Leasingmodells an den Anwendungsfall und eine Bewertung auf Basis der vorliegenden historischen Daten. Es konnte

gezeigt werden, dass sowohl in Bezug auf die Leasingraten als auch der Lebenszykluskosten das belastungsbasierte Bezahlmodell dem klassischen Leasingmodell vorzuziehen ist. In Anbetracht der Anreizwirkung ist eine Entscheidung eindeutig für das Belastungsmodell zu treffen. Insbesondere werden die Instandhaltungskosten durch die Anreizwirkungen positiv beeinflusst.

Das Vorgehen und die Modellierung sind kritisch zu beurteilen. Auf Ebene der Investitionsentscheidung ist das Leasingmodell mit Teilamortisation als Vergleichsmodell notwendig, um das belastungsbasierte Bezahlmodell herzuleiten. Damit ist das hier entwickelte Bezahlmodell abhängig vom bestehenden Leasingmodell. Des Weiteren ist die Bekanntheit der Nutzenfunktion für den risikokorrigierten Vergleich notwendig. Auch wenn diese Funktion geschätzt wird, kann eine solche Vereinfachung der Risikobewertung der Entscheidung dienen. Auf Ebene der Kostenbewertung ist eine Vereinfachung der Lebenszykluskosten notwendig. Die Einbindung aller Lebenszykluskosten würde die Komplexität zu stark erhöhen. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Anreizwirkung einen Einfluss auf weitere Kostenfaktoren hat.

Auf der Ebene des Simulationskerns ist die Art der Modellierung von Ereignissen und Abnutzung kritisch zu diskutieren. Dadurch dass der Abnutzungsvorrat und die Belastung historisch nicht bekannt sind, orientiert sich die Abnutzung an den Ereignissen, der Nutzungszeit der Maschine und der erwarteten Abnutzung im Rahmen des klassischen Leasingmodells. Die Art und Weise der Korrelation zwischen Abnutzung und Nutzungszeit ist eine Vereinfachung. Die Beschreibung des Abnutzungsverhaltens über den approximierten Belastungswert auf Basis der produzierten Produkte ist hinsichtlich der zahlreichen Belastungsfaktoren eine starke Vereinfachung. So lange jedoch keine historischen Daten bzgl. weiterer Einflussfaktoren vorliegen, kann von dieser Vereinfachung nicht abgewichen werden.

8.2 Ausblick und zukünftige Forschungstätigkeiten

Die vorliegende Arbeit bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitere wissenschaftliche Arbeiten. Aufgrund der Unbekanntheit des belastungsbasierten Bezahlmodells wird im Rahmen dieser Arbeit ein potenziell anwendbares Bezahlmodell definiert. Trotz des Versuches, dieses Modell mit Hilfe von Praxisexperten in Kombination mit der einschlägigen Literatur möglichst praxistauglich zu entwickeln, ist die Umsetzung

dieses Bezahlmodells nicht validiert. Dieser Umstand lässt Raum, in zukünftigen Arbeiten alternative Implementierungen zu untersuchen. Der Full-Service-Vertrag ist ein interessantes Untersuchungsobjekt, da dieser die Auswirkungen auf den Instandhaltungsservice, etwaige Effekte auf Versicherungskonditionen und weitere Kosten zusammenfasst. Neben der Teil-amortisation ließen sich Verträge der Vollamortisation untersuchen. Auch der belastungsbasierte Kredit, die belastungsbasierte Miete oder auch eine Form des belastungsbasierten Operate-Leasings sind denkbar. Gänzlich neue Vertragskonstellationen, welche sich an den Modellen der Softwareindustrie orientieren, sind ebenso denkbar.

Im Rahmen dieser Arbeit wird im Wesentlichen die Perspektive des Leasingnehmers eingenommen. Für zukünftige Arbeiten können die Perspektiven des Leasinggebers und des Maschinenherstellers eingenommen werden. Der Leasinggeber wiederum ist von Interesse, da die Risikoverschiebung zu anderen Leasingraten führen kann. Der Einfluss des Risikos wird in dieser Arbeit vereinfacht dargestellt. Damit ergibt sich die Frage, welcher Anteil der Werkzeugmaschine über die Belastung abgeschrieben werden kann, ohne dass die Volatilität der Zahlungen für den Leasinggeber zu hoch wird bzw. Fehlanreize entstehen.

Die Modellierung der Ereignisse und des Abnutzungsvorrates ist von den zur Verfügung stehenden historischen Daten abhängig. Auch wenn der vorgestellte Ansatz der Abnutzungsmodellierung auf in der Industrie häufig vorzufindenden Daten basiert, schränkt dies die Möglichkeiten der Umsetzung ein. Im Rahmen der Industrie 4.0 kann davon ausgegangen werden, dass in Zukunft weitere Datenquellen historisch zur Verfügung stehen. Hierdurch ließen sich weitere Ansätze, welche die Belastung direkt integrieren, umsetzen. Das erleichtert die Bewertung und schränkt den Interpretationsspielraum von Expertenwissen ein. Daneben besteht die Annahme, dass das Zustandsüberwachungssystem der Werkzeugmaschine eine perfekte Diagnose des realen Abnutzungsvorrates darstellt. Diese Übereinstimmung ist jedoch in der Praxis selten vorzufinden, wodurch die Integration einer Unsicherheit eine interessante Erweiterung des Modells darstellt. Hieraus leitet sich beispielweise die Frage ab, wie gut ein Zustandsüberwachungssystem im Rahmen des Bezahlmodells mindestens sein muss, damit der potenzielle Leasingnehmer dem Modell Vertrauen schenkt.

Literaturverzeichnis

- [ABD75] Abdel-Hameed, M. (1975): A Gamma Wear Process. In: *IEEE Transactions on Reliability* R-24 (2), S. 152-153.
- [ABE06] Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Kreis, M. (2006): Beeinflussbarkeit von Lebenszykluskosten durch Wissensaustausch. Produzieren mit Blick auf die Lebenszykluskosten. In: *wt Werkstattstechnik online* 96 (7/8), S. 447-454.
- [ABE09] Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Kuhrke, B. (2009): Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen. In: Schweiger, S. (Hg.): *Lebenszykluskosten optimieren. Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 51-80.
- [ABE10] Abele, E.; Altintas, Y.; Brecher, C. (2010): Machine tool spindle units. In: *CIRP Annals* 59 (2), S. 781-802.
- [ABI19] Abid, K.; Sayed Mouchaweh, M.; Cornez, L. (2019): Fault Prognostics for the Predictive Maintenance of Wind Turbines: State of the Art. In: Alzate, C. (Hg.): *ECML PKDD 2018 workshops. DMLE 2018 and IoTStream 2018*, Dublin, Ireland, September 10-14, 2018, revised selected papers. Cham: Springer International Publishing, S. 113-125.
- [ADO14] Adolph, S.; Tisch, M.; Metternich, J. (2014): Challenges and approaches to competency development for future production. In: *Journal of International Scientific Publications* (12), S. 1001-1010.
- [ADR15] Adrodegari, F. et al. (2015): From Ownership to Service-oriented Business Models. A Survey in Capital Goods Companies and a PSS Typology. In: *Procedia CIRP* (30), S. 245-250.
- [AGR17] Agrawal, V. V.; Bellos, I. (2017): The Potential of Servicizing as a Green Business Model. In: *Management Science* 63 (5), S. 1545-1562.
- [AHA13] Ahamed, Z.; Kamoshida, A.; Inohara, T. (2013): Organizational Factors to the Effectiveness of Implementing Servitization Strategy. In: *Journal of Service Science and Management* 06 (02), S. 177-185.

-
- [AIZ15] Aizpurua, J. I.; Catterson, V. M. (2015): Towards a Methodology for Design of Prognostic Systems. In: *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, Coronado, California* 7 (1), S.
- [AJZ91] Ajzen, I. (1991): The theory of planned behavior. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50 (2), S. 179-211.
- [AKA98] Akaike, H. (1998): Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In (Hg.): *Selected Papers of Hirotugu Akaike*: Springer, New York, NY, S. 199-213.
- [ALB09] Albrecht, V.; Wetzel, P. (2009): M-TCO — Daimler AG. In: Schweiger, S. (Hg.): *Lebenszykluskosten optimieren. Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 81-95.
- [ALB16] Albertelli, P. et al. (2016): Model-based broadband estimation of cutting forces and tool vibration in milling through in-process indirect multiple-sensors measurements. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82 (5-8), S. 779-796.
- [ALC00] Alcalde Rasch, A. (2000): Erfolgspotential Instandhaltung. Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements, Berlin: Erich Schmidt.
- [ALL01] Allen, T. M. (2001): U.S. Navy Analysis of Submarine Maintenance Data and the Development of Age and Reliability Profiles.
- [AND52] Anderson, T. W.; Darling, D. A. (1952): Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Processes. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 23 (2), S. 193-212.
- [ARR91] Arrow, K. J. (1991): The economics of agency. In: Pratt, J.W. and Zeckhauser, R.J. (Hg.): *Principals and agents: The structure of business*. Boston, MA: Harvard Business School Press, S. 37-51.
- [ASA14] Asadzadeh, S. M.; Azadeh, A. (2014): An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error. In: *Reliability Engineering & System Safety* (124), S. 117-131.

-
- [ATT05] Attardi, L.; Guida, M.; Pulcini, G. (2005): A mixed-Weibull regression model for the analysis of automotive warranty data. In: *Reliability Engineering & System Safety* 87 (2), S. 265-273.
- [AVR03] Avramidis, A. N.; L'ecuyer, P.; Tremblay, P.-A. (2003): Efficient simulation of gamma and variance-gamma processes. In (Hg.): Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.03EX693). 7-10 Dec. 2003, New Orleans, LA, USA, S. 319-326.
- [AYU19] Ayuso, M.; Guillen, M.; Nielsen, J. P. (2019): Improving automobile insurance ratemaking using telematics. Incorporating mileage and driver behaviour data. In: *Transportation* 46 (3), S. 735-752.
- [BAC21] Backhaus, S. (2021): Deutsche Bank legt Pay-per-Use-Kredit auf. Online verfügbar unter: <https://www.dertreasurer.de/news/finanzierung-corporate-finance/deutsche-bank-legt-pay-per-use-kredit-auf-2018181/>. Zuletzt geprüft am: 02.10.2021.
- [BAH16] Bahga, A.; Madiseti, V. K. (2016): Blockchain Platform for Industrial Internet of Things. In: *Journal of Software Engineering and Applications* 09 (10), S. 533-546.
- [BAI09] Baines, T. S. et al. (2009): The servitization of manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 20 (5), S. 547-567.
- [BAK14] Bakker, C. et al. (2014): Products that go round: exploring product life extension through design. In: *Journal of Cleaner Production* (69), S. 10-16.
- [BAL10] Bala, R.; Carr, S. (2010): Usage-based pricing of software services under competition. In: *Journal of Revenue and Pricing Management* 9 (3), S. 204-216.
- [BAL15] Balasubramanian, S.; Bhattacharya, S.; Krishnan, V. V. (2015): Pricing-Information-Goods-A-Strategic-Analysis-of-the-Selling-and-On-demand-Pricing-Mechanisms. In: *Marketing Science* (34), S. 218-234.

- [BAL89] Balci, O. (1989): How to assess the acceptability and credibility of simulation results. In (Hg.): Proceedings of the 21st conference on Winter simulation - WSC '89, New York, New York, USA, S.
- [BAM12] Bamberg, G.; Coenenberg, A. G.; Krapp, M. (2012): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 15., überarb. Aufl., München: Vahlen.
- [BAR12] Bardhi, F., & Eckhardt, G. M. (2012): Access-based consumption: The case of car sharing. In: *J. Consum. Res.* 39 (4), S. 881-898.
- [BAR13] Barabadi, A. (2013): Reliability model selection and validation using Weibull probability plot—A case study. In: *Electric Power Systems Research* (101), S. 96-101.
- [BAR20] Barbu, A.; Zhu, S.-C. (2020): Monte Carlo methods. 1st edition, Puchong, Selangor D.E.: Springer Singapore; Springer.
- [BAS20] Bas, E. (2020): Einführung in Wahrscheinlichkeitsrechnung, Statistik und Stochastische Prozesse, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [BAU13] Baum, H.-G. et al. (2013): Strategisches Controlling. 5., überarb. und erg. Aufl., Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- [BAU20] Baur, M.; Albertelli, P.; Monno, M. (2020): A review of prognostics and health management of machine tools. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107 (5-6), S. 2843-2863.
- [BEC00] Becker, W.; Brinkmann, F. (2000): Kostenrechnung für die Instandhaltung. Ergebnisse einer empirischen Untersuchung, Bamberg: Otto-Friedrich-Univ.
- [BEC16] Becker, W.; Holzmann, R. (2016): Kosten-, Erlös- und Ergebnisrechnung. Einführung für Bachelor-Studierende. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [BEC18] Becker, H. P.; Peppmeier, A. (2018): Investition und Finanzierung, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [BEI12] Beigler, M. (2012): Analyse der Vorteilhaftigkeit zwischen Leasing und kreditfinanziertem Kauf, Wiesbaden: Gabler Verlag.

-
- [BEN19] Benjaafar, S. et al. (2019): Peer-to-Peer Product Sharing: Implications for Ownership, Usage, and Social Welfare in the Sharing Economy. In: *Management Science* 65 (2), S. 477-493.
- [BER92] Bergen, M., Dutta, S. and Walker, O.C. Jr (1992): Agency relationships in marketing: a review of the implications and applications of agency and related theories. In: *Journal of Marketing*, 56 (3), S. 1-24.
- [BET95] Bettis, R. A.; Prahalad, C. K. (1995): The dominant logic: Retrospective and extension. In: *Strategic Management Journal* 16 (1), S. 5-14.
- [BIA15] Bian, L.; Gebraeel, N.; Kharoufeh, J. P. (2015): Degradation modeling for real-time estimation of residual lifetimes in dynamic environments. In: *IIE Transactions* 47 (5), S. 471-486.
- [BIE08] Biedermann, H. (2008): Ersatzteilmanagement. Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen. 2., erw. und aktualisierte Aufl.: Springer-Verlag GmbH.
- [BIE85] Biedermann, H. (1985): Erfolgsorientierte Instandhaltung durch Kennzahlen. Führungsinstrument für die Instandhaltung, Köln: Verlag TUEF Rheinland.
- [BIE90] Biedermann, H. (1990): Anlagenmanagement: Managementwerkzeuge zur Rationalisierung: TÜV Rheinland.
- [BIR17] Birolini, A. (2017): Reliability Engineering. Theory and Practice. 8th ed. 2017, Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- [BLE10] Bleicher, F.; Renger, U.; Lang, H. (2010): Lastkollektiverfassung als Voraussetzung für TCO-Modelle. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (4), S. 277-281.
- [BLI11] Blischke, W. R.; Karim, M. R.; Murthy, D. N. P. (2011): Warranty Data Collection and Analysis, London: Springer-Verlag London Limited.
- [BLO13] Blohm, H.; Lüder, K.; Schaefer, C. (2013): Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. 10th ed., München: Franz Vahlen.

-
- [BLÜ11] Blümel, P. (2011): Kostenorientierte Instandhaltungsplanung basierend auf Maschinenzustandsdaten, Hannover: PZH Produktionstechn. Zentrum.
- [BOC18] Bocken, N. M. et al. (2018): Pay-per-use business models as a driver for sustainable consumption: Evidence from the case of HOMIE. In: *Journal of Cleaner Production* (198), S. 498-510.
- [BOS21] Bossler, L. et al. (2021): Pay-per-Stress – Belastungsorientierte Leasingmodelle im Maschinenbau. In: *Wirtschaftsinformatik & Management* (13), S. 466–475.
- [BRE10] Brecher, C. et al. (2010): Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen im Fokus der Forschung. Effizienzsteigerung durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb. In: *wt Werkstatttechnik online* (100 (7/8)), S. 559-564.
- [BRE18] Brealey, R. A. et al. (2018): Principles of Corporate Finance, 12/e: McGraw-Hill Education.
- [BRE19] Brecher, C.; Weck, M. (2019): Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 9th ed., Berlin, Heidelberg: Vieweg.
- [BRE20] Brecher, C. et al. (2020): Neue Geschäftsmodelle für Werkzeugmaschinen. In: Bergs, T. et al. (Hg.): Internet of Production - Turning Data into Value - Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020, S. 367-375.
- [BRO87] Brockmüller, U. (1987): Wälzlagerschäden und ihre Verhütung. In: *Der Konstrukteur* (7 - 8), S. 54-64.
- [BRÜ11] Brühl, R. (2011): Sensibilitätsanalyse. In: Busse von Colbe, W. (Hg.): Lexikon des Rechnungswesens. Handbuch der Bilanzierung und Prüfung, der Erlös-, Finanz-, Investitions- und Kostenrechnung. 5., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, S. 704-707.
- [BÜN09] Bünting, F. (2009): Lebenszykluskostenbetrachtungen bei Investitionsgütern. In: Schweiger, S. (Hg.): Lebenszykluskosten optimieren. Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 35-50.

- [BUN21a] Bundesverband Deutscher Leasing-Unternehmen e.V. (BDL) (2021): Leasing A-Z. Online verfügbar unter: <https://bdl.leasingverband.de/service/leasing-a-z/all/restwert/>. Zuletzt geprüft am: 01.06.2021.
- [BUN21b] Bundesverband Deutscher Leasing-Unternehmen e.V. (BDL) (2021): Marktbericht 2020. Online verfügbar unter: <https://jahresbericht.leasingverband.de/leasing-markt-und-umfeld/marktbericht-2020/>. Zuletzt geprüft am: 22.09.2021.
- [BUN21c] Bunte, A.; Richter, F.; Diovisalvi, R. (2021): Why It is Hard to Find AI in SMEs: A Survey from the Practice and How to Promote It. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART (2)*, S. 614-620.
- [BUS16] Buschmeyer, A.; Schuh, G.; Wentzel, D. (2016): Organizational Transformation Towards Product-service Systems – Empirical Evidence in Managing the Behavioral Transformation Process. In: *Procedia CIRP (47)*, S. 264-269.
- [BUS18] Busse von Colbe, W.; Witte, F. (2018): Investitionstheorie und Investitionsrechnung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [BUS20] Busse, A. (2020): Ansatz zur quantitativen Bewertung der finanziellen Nutzenpotentiale von Zustandsdiagnosen und-prognosen in der industriellen Instandhaltung. Dissertation.
- [BYI03] Byington, C. S. et al. (2003): In-line health monitoring system for hydraulic pumps and motors. In (Hg.): 2003 IEEE Aerospace Conference, 2003. Proceedings. March 8-15, 2003, Big Sky, Montana, USA, S. 3279-3287.
- [BYR13] Byrne, M. (2013): How many times should a stochastic model be run? An approach based on confidence intervals. In: *Proceedings of the 12th International Conference of Cognitive Modelling (ICCM 2013) (12)*, S. 445-450.
- [CAO17] Cao, H.; Zhang, X.; Chen, X. (2017): The concept and progress of intelligent spindles: A review. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture (112)*, S. 21-52.

-
- [CAR89] Carson, J. S. (1989): Verification and validation: a consultant's perspective. In (Hg.): Proceedings of the 21st conference on Winter simulation - WSC '89, New York, New York, USA, S.
- [CHE02] Chesbrough, H.; Rosenbloom, R. S. (2002): The role of the business model in capturing value from innovation: evidence from Xerox Corporation's technology spin-off companies. In: *Industrial and Corporate Change* (11), S. 529-555.
- [CHE15] Chen, F. (2015): Reliability Analysis of Numerical Control Lathe Based On The Field Data. In: *International Conference on Manufacturing Science and Engineering* (), S. 1018-1024.
- [CHE17] Chen, D.-G. et al. (2017): Statistical Modeling for Degradation Data. 1st edition 2017, Singapore: Springer Singapore.
- [CHO09] Chow, W. C. (2009): Brownian bridge. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 1 (3), S. 325-332.
- [CHR16] Christensen, C. M.; Bartman, T.; van Bever, D. (2016): The hard truth about business model innovation. In: *MIT Sloan Management Review* 58 (1), S. 31.
- [CHR46] Christian, L.; Markus, F.; Eric, S. (0146): Abschätzung der Lebenszykluskosten neu entwickelter Fertigungsprozesse. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (9), S. 720-724.
- [COH14] Cohen, B.; Kietzmann, J. (2014): Ride On! Mobility Business Models for the Sharing Economy. In: *Organization & Environment* 27 (3), S. 279-296.
- [COX72] Cox, D. R. (1972): Regression Models and Life-Tables. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 34 (2), S. 187-220.
- [CUS15] Cusumano, M. A.; Kahl, S. J.; Suarez, F. F. (2015): Services, industry evolution, and the competitive strategies of product firms. In: *Strategic Management Journal* 36 (4), S. 559-575.

- [CZI10] Czichos, H.; Habig, K.-H. (2010): Tribologie-Handbuch. Tribometrie, tribomaterialien, tribotechnik. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [DAV20] Davidson-Pilon, C. et al. (2020): CamDavidsonPilon/lifelines: v0.25.6: Zenodo.
- [DEL20] Deloitte (2020): Der zweite Frühling für den Maschinenbau: Servicedigitalisierung als Wachstumstreiber.
- [DEN09] Denkena, B.; P. Blümel, J. R. (2009): Den Maschinenzustand im Fokus. Instandhaltung von Werkzeugmaschinen unter Verwendung von Zustandsüberwachungssystemen. In: *wt Werkstatttechnik online* 99 (7/8), S.
- [DEP95] Department of Defense (1995): MIL-HDBK 217 F. Reliability Prediction of Electronic Equipment, Washington D.C.
- [DER11] Dervisopoulos, M. (2011): Methode zur lebenszyklusbezogenen Optimierung von Werkzeugmaschinen. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011, Aachen: Shaker.
- [DEU21] (2021): DIN EN IEC 60300-1: Zuverlässigkeitsmanagement. Teil 1: Zuverlässigkeit ermöglichen.
- [DEW19] Dewey, H. H.; DeVries, D. R.; Hyde, S. R. (2019): Uncertainty Quantification in Prognostic Health Management Systems. In (Hg.): 2019 IEEE Aerospace Conference. 02.03.2019 - 09.03.2019, Big Sky, MT, USA, S. 1-13.
- [DIN 26281] (2010): DIN 26281. Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer - Berechnung der.
- [DIN 31051] (2018): DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung.
- [DIN 50100] (2016): DIN 50100: Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile.
- [DIN 60300-3-2] (2005): 60300-3-2: Zuverlässigkeitsmanagement. Teil 3-2: Anwendungsleitfaden - Erfassung von Zuverlässigkeitsdaten im Betrieb (IEC 60300-3-2:2004).

- [DIN 69651] (1981): DIN 69651: Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung - Begriffe.
- [DIN 8589-0] (2003): 8589-0: Fertigungsverfahren Spanen. Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [DIN 8589-1] (2003): DIN 8589-1: Fertigungsverfahren Spanen. Teil 1: Drehen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [DIN EN 13306] (2018): DIN EN 13306. Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung.
- [DIN EN 60300-3-3] (2005): DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004).
- [DIN EN 61649] (2008): DIN EN 61649:2008: Weibull Analyse.
- [DIN IEC 60050-351] (2014): DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch: Teil 351: Leittechnik.
- [DIN ISO 17359] (2018): DIN ISO 17359: Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Allgemeine Anleitungen.
- [DOM05] Domschke, W.; Scholl, A. (2005): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. 3rd ed., Dordrecht: Springer.
- [DOM15] Domschke, W. et al. (2015): Einführung in Operations Research, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [DRO16] Drouillet, C. et al. (2016): Tool life predictions in milling using spindle power with the neural network technique. In: *Journal of Manufacturing Processes* (22), S. 161-168.
- [DRU92] Drukarczyk, J. (1992): Leasing oder Kauf? Entscheidungskriterien bei anstehenden Investitionen. In: Verlag des wissenschaftlichen Instituts der Steuerberater und Steuerbevollmächtigten (Hg.): Recht und Besteuerung der Familienunternehmen. 25. Jahres-Arbeitstagung des deutschen wissenschaftlichen Steuerinstituts. Bonn, S. 81-123.
- [EBE16] Eberspächer, P. (2016): Zustandsmodellbasierte, steuerungsnahe Energieverbrauchsoptimierung von Werkzeugmaschinen. Dissertation, Universität Stuttgart.

- [EIC90] Eichler, C. (1990): Instandhaltungstechnik. 5., bearb. Aufl., Berlin: Verl. Technik.
- [EIS04] Eisele, B.; Laux, H. (2004): Value-at-Risk-basiertes Risikomanagement in Banken. Portefeuilleentscheidungen, Risikokapitalallokation und Risiko-limitierung unter Berücksichtigung des Bankenaufsichtsrechts. Zugl.: Frankfurt am Main, Univ., Diss., 2004. 1. Aufl., Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.
- [EIS85] Eisenhardt, K. M. (1985): Control: Organizational and Economic Approaches. In: *Management Science* 31 (2), S. 134-149.
- [EIS89] Eisenhardt, K. M. (1989): Agency Theory: An Assessment and Review. In: *Advanced Materials Research* 14 (1), S. 57-74.
- [ENC20a] Encyclopedia of Mathematics (2020): Kolmogorov–Smirnov test. Online verfügbar unter: http://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Kolmogorov-Smirnov_test&oldid=47513. Zuletzt geprüft am: 17.12.2020.
- [ENC20b] Encyclopedia of Mathematics (2020): Model selection. Online verfügbar unter: http://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Model_selection&oldid=50933. Zuletzt geprüft am: 17.12.2020.
- [ENC20c] Encyclopedia of Mathematics (2020): Chi-squared test. Online verfügbar unter: http://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Chi-squared_test&oldid=46338. Zuletzt geprüft am: 17.12.2020.
- [ENG03] Engels-Lindemann, M. (2003): Optimierung von Programm- und Budgetentscheidungen der betrieblichen Instandhaltung. Dissertation, Heimsheim: Jost-Jetter Verl.
- [ENG79] Engel, L.; Winter, H. (1979): Wälzlagerschäden. In: *Antriebstechnik* 18 (3), S. 71-74.
- [ERN17] Ernst, C.; Schenk, G.; Schuster, P. (2017): Kostenrechnung Klipp & Klar. 2. Auflage, Berlin: Gabler.
- [FIR87] Firchau, V. (1987): Information Systems for Principal-Agent Problems. In (Hg.): *Agency Theory, Information, and Incentives*: Springer, Berlin, Heidelberg, S. 81-92.

-
- [FIS99] Fishburn, P. C.; M. Odlyzko, A. (1999): Competitive pricing of information goods: Subscription pricing versus pay-per-use.
- [FLA87] Flanagan, R. et al. (1987): Life cycle costing and risk management. In: *Construction Management and Economics* 5 (4), S. S53-S71.
- [FLE06] Fleischer, J.; Weismann, U.; Nigggeschmidt, S. (2006): Calculation and optimisation model for costs and effects of availability relevant service elements.
- [FLE07a] Fleischer, J.; Wawerla, M.; Nigggeschmidt, S. (2007): Machine Life Cycle Cost Estimation via Monte-Carlo Simulation. In: Takata, S.; Umeda, Y. (Hg.): *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*. London: Springer London, S. 449-453.
- [FLE07b] Fleischer, J.; Rühl, J.; Weismann, U. (2007): Life Cycle Performance im Maschinen- und Anlagenbau. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (1-2), S. 55-59.
- [FLE07c] Fleischer, J.; M. Schopp, A. Broos, J. Wieser (2007): Datenbasis für lastabhängige Prozesseingriffe. Modularisierung und Analyse von Ausfallursachen zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen. In: *ZWF* 97 (7/8), S. 491-497.
- [FLE08] Fleischer, J.; Werner, P.; Rühl, J. (2008): Lastabhängige Restlebensdauerprognose von Maschinenkomponenten. Statistisches Modell zur Lebensdauerprognose für die kostenoptimale Wartung von Maschinenkomponenten. In: *Werkstatttechnik online* (7/8), S. 549-554.
- [FLY20] Flynn, C. (2020): stochastic. Revision 0601ba56.
- [FRA15] Fraiberger, S. P.; Sundararajan, A. (2015): Peer-to-Peer Rental Markets in the Sharing Economy: NYU Stern School of Business Research Paper.
- [FRE09] Freitas, M. A. et al. (2009): Using degradation data to assess reliability: a case study on train wheel degradation. In: *Quality and Reliability Engineering International* 25 (5), S. 607-629.

-
- [GAB01] Gabele, E.; Kroll, M. (2001): Leasingverträge optimal gestalten. Vertragsformen, Vor- und Nachteile, steuerliche Analyse. 3., aktualisierte Auflage, Wiesbaden, s.l.: Gabler Verlag.
- [GAB92] Gabele, E.; Kroll, M. (1992): Leasing als Finanzierungsinstrument. Grundlagen Vertragsgestaltung Fallbeispiele, Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint.
- [GAI14] Gaiardelli, P. et al. (2014): A classification model for product-service offerings. In: *Journal of Cleaner Production* (66), S. 507-519.
- [GAS14] Gassmann, O.; Csik, M.; Frankenberger, K. (2014): The business model navigator. 55 models that will revolutionise your business, Harlow: Pearson.
- [GEB17a] Gebauer, H.; Haldimann, M.; Saul, C. J. (2017): Competing in business-to-business sectors through pay-per-use services. In: *Journal of Service Management* 28 (5), S. 914-935.
- [GEB17b] Gebauer, H. et al. (2017): Organizational capabilities for pay-per-use services in product-oriented companies. In: *International Journal of Production Economics* (192), S. 157-168.
- [GEB21] Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH (2021): HELLER4Use.
- [GIL14] Gilbert, S. M.; Randhawa, R. S.; Sun, H. (2014): Optimal Per-Use Rentals and Sales of Durable Products and Their Distinct Roles in Price Discrimination. In: *Production and Operations Management* 23 (3), S. 393-404.
- [GLA15] Glaser, C. (2015): Steuerung von Asset-Risiken im Leasinggeschäft. In: Stenner (Hg.): *Handbuch automobilbanken*: Springer, S. 281-292.
- [GLA16] Glaser, C. (2016): *Leasing A - Z*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [GLA18] Glaser, C. (2018): *Risikomanagement im Leasing*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [GOR10] Gorjian, N. et al. (2010): A review on reliability models with covariates. In: Kiritsis, D. et al. (Hg.): *Engineering Asset Lifecycle Management*. London: Springer, S. 385-397.

- [GOY15] Goyal, D.; Pabla, B. S. (2015): Condition based maintenance of machine tools—A review. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (10), S. 24-35.
- [GRA02] Grall, A.; Bérenguer, C.; Dieulle, L. (2002): A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. In: *Reliability Engineering & System Safety* 76 (2), S. 167-180.
- [GRE26] Greenwood, M. (1926): The Natural Duration of Cancer. In (33), S. 1-26.
- [GRO18] Grote, K.-H.; Bender, B.; Göhlich, D. (2018): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [GRU19] Grundmann, W. (2019): *Leasing und Factoring*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [GUL16] Gullstrand Edbring, E.; Lehner, M.; Mont, O. (2016): Exploring consumer attitudes to alternative models of consumption: motivations and barriers. In: *Journal of Cleaner Production* (123), S. 5-15.
- [GUS10] Gustafsson, A. et al. (2010): Clarifying the concept of performance-based contracting in manufacturing industries. In: *Journal of Service Management* 21 (5), S. 625-655.
- [GUT17] Gutenschwager, K. et al. (2017): *Simulation in Produktion und Logistik*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [HAR20] Harris, C. R. et al. (2020): Array programming with NumPy. In: *Nature* 585 (7825), S. 357-362.
- [HAR68] Hartner, G. (1968): *Die Determinanten der Investitionsentscheidung und ihre Wertigkeit im Entscheidungsprozeß*, Wien.
- [HAX85] Hax, H. (1985): *Investitionstheorie*, Heidelberg: Physica-Verlag HD.
- [HAX98] Hax, H. (1998): Dynamische Investitionsrechnung bei Unsicherheit. In: Busse von Colbe, W.; Pellens, B. (Hg.): *Lexikon des Rechnungswesens*. 4. München, S. 193-196.
- [HAZ17] Hazée, S.; Delcourt, C.; van Vaerenbergh, Y. (2017): Burdens of Access: Understanding Customer Barriers and Barrier-Attenuating Practices in Access-Based Services. In: *Journal of Service Research* 20 (4), S. 441-456.

-
- [HE16] He, X. (2016): Recent development in reliability analysis of NC machine tools. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85 (1-4), S. 115-131.
- [HE18] He, J. et al. (2018): Compilation of NC lathe dynamic cutting force spectrum based on two-dimensional mixture models. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98 (1-4), S. 251-262.
- [HEI18] Heinis, T. B.; Loy, C. L.; Meboldt, M. (2018): Improving Usage Metrics for Pay-per-Use Pricing with IoT Technology and Machine Learning. In: *Research-Technology Management* 61 (5), S. 32-40.
- [HER11] Herrmann, C.; Kara, S.; Thiede, S. (2011): Dynamic life cycle costing based on lifetime prediction. In: *International Journal of Sustainable Engineering* 4 (3), S. 224-235.
- [HER64] Herzt, D. B. (1964): Risk analysis in capital investment. In: *Harvard business review* (42), S. 95-106.
- [HES99] Hess, T. (1999): Implikationen der Prinzipal-Agent-Theorie für das Management von Unternehmensnetzwerken. In (), S.
- [HEY08] Heyd, R. (2008): Leasing im Bilanz- und Steuerrecht. In: Graf von Westphalen, F. (Hg.): *Der Leasingvertrag*. 6. Köln, S. 1-113.
- [HIL63] Hillier, F. S. (1963): The Derivation of Probabilistic Information for the Evaluation of Risky Investments. In: *Management Science* 9 (3), S. 443-457.
- [HIL65] Hillier, F. S.; Heebink, D. V. (1965): For the Decision Maker—An Analytical Approach to Evaluating Risky Capital Investments. In: *California Management Review* 8 (2), S. 71-80.
- [HIR16] Hirsch, A. (2016): *Werkzeugmaschinen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [HON09] Honal, M. (2009): *Loss Given Default von Mobilien-Leasingverträgen*, Wiesbaden: Gabler.
- [HOY10] Hoyle, E. (2010): *Information-based models for finance and insurance*. Dissertation.

- [HU20] Hu, J.; Sun, Q.; Ye, Z.-S. (2020): Condition-Based Maintenance Planning for Systems Subject to Dependent Soft and Hard Failures. In: *IEEE Transactions on Reliability* (1), S. 1-13.
- [HUA16] Huang, T. et al. (2016): Reliability analysis of electrical system of computer numerical control machine tool based on bayesian networks. In: *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 21 (5), S. 635-640.
- [HUB18] Huber, S. et al. (2018): DMME: Data Mining Methodology for Engineering Applications – A Holistic Extension to the CRISP-DM Model. In: *CIRP Conference on Intelligent Computation in Manuf Eng* (12), S.
- [HUF12] Huf, A. (2012): Kumulative Lastermittlung aus Antriebsdaten zur Zustandsbewertung von Werkzeugmaschinenkomponenten. Dissertation.
- [HÜN03] Hünenberg, R.; Hüttmann, A. (2003): Performance as a Basis for Price-setting in the Capital Goods Industry:: Concepts and Empirical Evidence. In: *European Management Journal* 21 (6), S. 717-730.
- [INS99] Institut für Sachverständigenwesen e.V. (1999): Leitsätze für die Bewertung von Maschinen.
- [JAC09] JACOB, E.; Manner, P. (2009): Motorspindelreparatur ist preiswert, erhöht aber die Stillstandszeit.
- [JAR06] Jardine, A. K.; Lin, D.; Banjevic, D. (2006): A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (7), S. 1483-1510.
- [JEO02] Jeong, Y.-H.; Cho, D.-W. (2002): Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (14), S. 1559-1566.
- [JES18] Jeschke, S. et al. (2018): Industrial Internet of Things. Cybermanufacturing Systems. Softcover reprint of the original 1st edition 2017, Cham: Springer International Publishing.
- [JIA07] Jiang, B.; Chen, P.-Y.; Mukhopadhyay, T. (2007): Software Licensing: Pay-Per-Use versus Perpetual.

-
- [JIA95a] Jiang, R.; Murthy, D. (1995): Modeling failure-data by mixture of 2 Weibull distributions: a graphical approach. In: *IEEE Transactions on Reliability* 44 (3), S. 477-488.
- [JIA95b] Jiang, R.; Murthy, D. (1995): Reliability modeling involving two Weibull distributions. In: *Reliability Engineering & System Safety* 47 (3), S. 187-198.
- [JON17] Jonge, B. de; Teunter, R.; Tinga, T. (2017): The influence of practical factors on the benefits of condition-based maintenance over time-based maintenance. In: *Reliability Engineering & System Safety* (158), S. 21-30.
- [KÄH17] Kählert, A. (2017): Specification and Evaluation of Prediction Concepts in Aircraft Maintenance. Dissertation.
- [KAL03] Kaluza, B.; Dullnig, H.; Malle, F. (2003): Principal-Agent-Probleme in der Supply Chain. Problemanalyse und Diskussion von Lösungsvorschlägen, Klagenfurt: Inst. für Wirtschaftswiss.
- [KAL11] Kalbfleisch, J. D.; Prentice, R. L. (2011): The Statistical Analysis of Failure Time Data. 2nd ed., Hoboken: John Wiley & Sons.
- [KAN15] Kan, Y. et al. (2015): Comparison between Bayesian Method and LSE in Estimating MTBF of NC Machine Tools. In (Hg.): 2015 International Conference on Computer Science and Mechanical Automation (CSMA). 23.10.2015 - 25.10.2015, Hangzhou, China, S. 251-257.
- [KAP14] Kapur, K. C.; Pecht, M. (2014): Reliability engineering, Hoboken, New Jersey: Wiley.
- [KAP58] Kaplan, E. L.; Meier, P. (1958): Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. In 53 (282), S. 457-481.
- [KAR19] Karim, M. R.; Islam, M. A. (2019): Reliability and survival analysis, Singapore: Springer Singapore.
- [KAV16] Kavadias, S.; Ladas, K.; Loch, C. (2016): The Transformative Business Model. In: *Harvard business review* 94 (10), S. 91-98.

- [KEC98] Kececioglu, D. B.; Wang, W. (1998): Parameter estimation for mixed-Weibull distribution. In (Hg.): Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1998 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity. 19-22 Jan. 1998, Anaheim, CA, USA, S. 247-252.
- [KEN21] KENNAMETAL (2021): Cost Per Part Program.
- [KIM05] Kim, J.; Mahoney, J. T. (2005): Property rights theory, transaction costs theory, and agency theory: an organizational economics approach to strategic management. In: *Managerial and Decision Economics* 26 (4), S. 223-242.
- [KIM07] Kim, S.-H.; Cohen, M. A.; Netessine, S. (2007): Performance Contracting in After-Sales Service Supply Chains. In: *Management Science* 53 (12), S. 1843-1858.
- [KLE10] Klein, J. P.; Moeschberger, M. L. (2010): Survival analysis. Techniques for censored and truncated data. 2. ed., corr. 3. print, New York, NY: Springer.
- [KLE12] Kleinbaum, D. G.; Klein, M. (2012): Survival Analysis. A Self-Learning Text, Third Edition, New York, NY: Springer Science+Business Media LLC.
- [KLU02] Klutke, G.-A.; Yang, Y. (2002): The availability of inspected systems subject to shocks and graceful degradation. In: *IEEE Transactions on Reliability* 51 (3), S. 371-374.
- [KOH21] Kohn, O. et al. (2021): Development of a Stress Factor as an Indicator for Stress-Based Payment Models for Machine Tools. In: Behrens, B.-A. et al. (Hg.): Production at the Leading Edge of Technology. Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), S. 239-247.
- [KOL08] Kolonko, M. (2008): Stochastische Simulation. Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen. 1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- [KOT11] Kotler, P. (2011): Reinventing Marketing to Manage the Environmental Imperative. In: *Journal of Marketing* 75 (4), S. 132-135.

-
- [KÖT85] Köttritsch, H.; Albert, M.; Schildberger, A. (1985): Wälzlagerschäden. In: Wälzlagertechnik, Teil 1: Expert Verlag.
- [KPM20] KPMG AG (2020): Cost of Capital Study 2020. Global economy - search for orientation?
- [KRA20] Kraemer-Eis, H. et al. (2020): European Small Business Finance Outlook 2020: The impact of COVID-19 on SME financing markets.
- [KRA79] Krause, H. und J. Scholten (1979): Verschleiß – Grundlagen und systematische Behandlung. In: *VDI - Z* 121 (15/16 und 23/24), S. 799-805 und 1221-1229.
- [KRÖ14] Kröning, S. (2014): Integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung mittels Simulationstechnik. Dissertation.
- [KRU90] Kruschwitz, L. (1990): Leasing und Steuern. In: Gebhard, J. (Hg.): Finanzierungsleasing, Steuern und Recht. Eine ökonomische Analyse. Wiesbaden: Gabler, S. 60-273.
- [KRU92] Kruschwitz, L. (1992): Der Einfluß von Steuern auf Leasingraten. In: *DStR* (), S. S. 82-89.
- [KUR97] Kurada S, B. C. (1997): A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. In: *Comput Ind* 34 (1), S. 55-72.
- [LAD19] Ladas, K.; Kavadias, S.; Loch, C. H. (2019): Product Selling Versus Pay-Per-Use Services: A Strategic Analysis of Competing Business Models. In: *SSRN Electronic Journal* (), S.
- [LAF09] Laffont, J.-J.; Martimort, D. (2009): Theory of Incentives. The Principal-Agent Model, Princeton: Princeton University Press.
- [LAN09a] Lanza, G.; Rühl, J. (2009): Simulation of service costs throughout the life cycle of production facilities. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1 (4), S. 247-253.
- [LAN09b] Lanza, G.; Niggeschmidt, S.; Werner, P. (2009): Behavior of dynamic preventive maintenance optimization for machine tools. In (Hg.): 2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium. 26.01.2009 - 29.01.2009, Fort Worth, TX, USA, S. 315-320.

-
- [LAN09c] Lanza, G.; Niggeschmidt, S.; Werner, P. (2009): Optimization of preventive maintenance and spare part provision for machine tools based on variable operational conditions. In: *CIRP Annals* 58 (1), S. 429-432.
- [LAN13] Lanza, G.; Appel, D.; Stricker, N. (2013): TCO 2.0. Ein Weg zu mehr Transparenz und Kommunikation. In: *wt Werkstattstechnik online* (7/8), S. 605-609.
- [LAN16] Lanza, G. et al. (2016): Total Cost of Ownership Betrachtungen von Werkzeugmaschinen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (12), S. 798-801.
- [LAN18] Landscheidt, S. et al. (2018): The future of industrial robot business: Product or performance based? In: *Procedia Manufacturing* (25), S. 495-502.
- [LAU18] Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y. (2018): Entscheidungstheorie, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [LEE03] Lee, E. T.; Wang, J. W. (2003): Statistical methods for survival data analysis. 3. ed., Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [LEE14] Lee, J. et al. (2014): Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 42 (1-2), S. 314-334.
- [LEI08] Leinmüller, M. (2008): Abschlussbericht LICMA. Life Cycle Performance im Maschinen- und Anlagenbau (LICMA).
- [LEI18] Lei, Y. et al. (2018): Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* (104), S. 799-834.
- [LEN18] Lenz, J.; Wuest, T.; Westkämper, E. (2018): Holistic approach to machine tool data analytics. In: *Journal of Manufacturing Systems* 48 (), S. 180-191.
- [LI16] Li, H. et al. (2016): Reliability Evaluation of NC Machine Tools considering Working Conditions. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2016 (), S. 1-11.

- [LI18a] Li, G. et al. (2018): Compilation of load spectrum for NC machine tool's feed system based on the mixture weibull distribution. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1074 (), S. 12046.
- [LI18b] Li, P. et al. (2018): Prognosability study of ball screw degradation using systematic methodology. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* (109), S. 45-57.
- [LIA14a] Liao, L.; Kottig, F. (2014): Review of Hybrid Prognostics Approaches for Remaining Useful Life Prediction of Engineered Systems, and an Application to Battery Life Prediction. In: *IEEE Transactions on Reliability* 63 (1), S. 191-207.
- [LIA14b] Liao, L. (2014): Discovering Prognostic Features Using Genetic Programming in Remaining Useful Life Prediction. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61 (5), S. 2464-2472.
- [LIN09] Lindahl, M.; Sakao, T.; Öhrwall Rönnbäck, A. (2009): Business Implications of Integrated Product and Service Offerings.
- [LIN13] Lindgardt, Z. et al. (2013): Business Model Innovation: When the Game Gets Tough, Change the Game. In: Deimler, M. S. (Hg.): *Own the future. 50 ways to win from the Boston Consulting Group*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, S. 291-298.
- [LIN20] Linge, S.; Langtangen, H. P. (2020): *Programming for Computations - Python. 2*: Springer International Publishing.
- [LIU19] Liu, Y.; Peng, H.; Yang, Y. (2019): Reliability Modeling and Evaluation Method of CNC Grinding Machine Tool. In: *Applied Sciences* 9 (1), S. 14.
- [LOW18] Lowe, D.; Galhotra, B. (2018): An Overview of Pricing Models for Using Cloud Services with analysis on Pay-Per-Use Model. In: *International Journal of Engineering & Technology* 7 (3.12), S. 248.
- [LU93] Lu, C. J.; Meeker, W. Q. (1993): Using Degradation Measures to Estimate a Time-to-Failure Distribution. In: *Technometrics* (), S.

-
- [MAC11] Macho-Stadler, I.; Pérez-Castrillo, J. D. (2011, [20]11): An introduction to the economics of information. Incentives and contracts. 2. ed., repr, Oxford: Univ. Press.
- [MAR05] Marubini, E.; Valsecchi, M. G. (2005): Analysing survival data from clinical trials and observational studies. Repr, Chichester: Wiley.
- [MAR08a] Martinek, M. (2008): Die Entwicklung des Leasings. In: Martinek, M.; Stoffels, M.; Wimmer-Leonhardt, S. (Hg.): Handbuch des Leasingrechts. 2. München, S. 1-9.
- [MAR08b] Martinek, M. (2008): Erscheinungsformen des Leasings,. In: Martinek, M.; Stoffels, M.; Wimmer-Leonhardt, S. (Hg.): Handbuch des Leasingrechts. 2. München, S. 21-33.
- [MAR08c] Martinek Michael, W.-L. S. (2008): Bedeutung und Erscheinungsformen des Kfz-Leasing. In: Martinek, M.; Stoffels, M.; Wimmer-Leonhardt, S. (Hg.): Handbuch des Leasingrechts. 2. München, S. 529-533.
- [MAT12] Mattes, K.; Schröter, M. (2012): Wirtschaftlichkeitsbewertung: Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale von energieeffizienten Anlagen und Maschinen, Kurzstudie. Kurzstudie. In (), S.
- [MAT16] Matyas, K. (2016): Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern. 6., überarbeitete Auflage. Praxisreihe Qualitätswissen: Hanser.
- [MAT20] MathWorks (2020): Three Ways to Estimate Remaining Useful Life. Predictive Maintenance with MATLAB.
- [MAT21] Matthew, R. (2021): MatthewReid854/reliability: v0.5.1. Reliability – a Python library for reliability engineering: Zenodo.
- [MAU12] Maurizio, C. (2012): What Uncertainty? Further insight into why consumers might be distrustful of product service systems. In: *J. Manuf. Technol. Manage.* 23 (6), S. 780-793.
- [MAZ08] Mazzola, M.; Merlo, A.; Aggogeri, F. (2008): Analysis of Machine Tool Failures Using Advanced Reliability Models for Complex Repairable Systems. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition (48777)*, S. 1-9.

-
- [MEN19] Menon, K. et al. (2019): Impact of IIoT Based Technologies on Characteristic Features and Related Options of Nonownership Business Models. In: Fortin, C. et al. (Hg.): *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*. Cham: Springer International Publishing, S. 302-312.
- [MET49] Metropolis, N.; Ulam, S. (1949): The Monte Carlo Method. In: *Journal of the American Statistical Association* 44 (247), S. 335-341.
- [MOG12] Moghaddass, R.; Zuo, M. J. (2012): A parameter estimation method for a condition-monitored device under multi-state deterioration. In: *Reliability Engineering & System Safety* (106), S. 94-103.
- [MOG13] Moghaddass, R.; Zuo, M. J.; Zhao, X. (2013): Modeling Multi-State Equipment Degradation with Non-Homogeneous Continuous-Time Hidden Semi-Markov Process. In (Hg.): *Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques*: IGI Global, S. 151-181.
- [MÖL20] Möller, A. (2020): Pay-per-part: TRUMPF und Munich Re planen neues Geschäftsmodell für die produzierende Industrie.
- [MOR12] Mori, M.; Fujishima, M. (2012): Energy Efficiency Improvement of Machine Tools. In: *Ressourceneffiziente Technologien für den Powertrain* (), S. 581-593.
- [MOS93] Moss, T. R.; Strutt, J. E. (1993): Data Sources for Reliability Design Analysis. In: *Proc Instn Mech Engrs* (207), S.
- [MOU00] Moubray, J. (2000): *Reliability-centered maintenance*. 2. ed., [3.rev.], New York, NY: Industrial Press.
- [MÜL19] Müller, J. M. (2019): Business model innovation in small- and medium-sized enterprises. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 30 (8), S. 1127-1142.
- [MUM15] Mumm, M. (2015): *Kosten- und Leistungsrechnung. Internes Rechnungswesen für Industrie- und Handelsbetriebe*. 2., aktualisierte Aufl., Berlin: Springer Gabler.
- [MUR04] Murthy DNP, Xie M, Jiang R (2004): *Weibull models*, New York: Wiley.

-
- [NAV98] Naval Surface Warfare Center (1998): NSWC-98/LE1. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, West Bethesda.
- [NEY93] Neyer, A.; Rohner, P.; Humm, O. (1993): Elektroantriebe, Bundesamt für Konjunkturfragen: Schriftenreihe RAVEL Industrie, 724.332 d.
- [O'C16] O'Connor, A. (2016): Probability Distributions Used in Reliability Engineering, Maryland: Center for Risk and Reliability.
- [OLI03] Oliva, R.; Kallenberg, R. (2003): Managing the transition from products to services. In: *International Journal of Service Industry Management* 14 (2), S. 160-172.
- [OLS19] Olson, D. L.; Dash Wu, D. (2019): Enterprise Risk Management Models, Berlin Heidelberg: Springer.
- [OST13] Osterwalder, A.; Pigneur, Y. (2013): Business model generation. A handbook for visionaries, game changers, and challengers, New York: Wiley&Sons.
- [OTT10] Ott, G. (2010): Wachstumsfördernde Dienstleistungen zur nachhaltigen Nutzung von hochwertigen Sondermaschinen. Ein Leitfadens für Betreiber und Hersteller von Sondermaschinen, Chemnitz: SITEC Industrietechnologie GmbH.
- [PÄH89] Pähler, U. (1989): Risikopolitik von Leasinggesellschaften: im herstellerunabhängigen Mobilienleasing. Dissertation, Universität zu Köln.
- [PAT17] Patil, R. B. et al. (2017): Reliability analysis of CNC turning center based on the assessment of trends in maintenance data. In: *International Journal of Quality & Reliability Management* 34 (9), S. 1616-1638.
- [PAT19] Patil, R. B.; Kothavale, B. S.; Waghmode, L. Y. (2019): Selection of time-to-failure model for computerized numerical control turning center based on the assessment of trends in maintenance data. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 233 (2), S. 105-117.
- [PLA04] Plapper, V. (2004): Steuerungsintegrierte Überwachung von Vorschubantrieben an Werkzeugmaschinen, Aachen: Shaker.

- [PLI20] Plinke, W.; Utzig, B. P. (2020): Industrielle Kostenrechnung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [POS09] Postmus, D.; Wijngaard, J.; Wortmann, H. (2009): An economic model to compare the profitability of pay-per-use and fixed-fee licensing. In: *Information and Software Technology* 51 (3), S. 581-588.
- [PRO02] Proksch, R. (2002): Modellbasierte Planung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien am Beispiel einer Serienfertigung mit geringer Variantenzahl. Dissertation.
- [PWC17] PWC (2017): Automobilzulieferer auf Kurs. Eine Studie zur Marktstruktur der Automobilzulieferer aus mikro- und Markoperspektive.
- [PWC21] PWC (2021): WACC Branchenvergleich. Online verfügbar unter: <https://pwc-tools.de/kapitalkosten/>. Zuletzt geprüft am: 07.09.2021.
- [PYT20] Python Software Foundation (2020): About Python. Online verfügbar unter: <https://www.python.org/about/>. Zuletzt geprüft am: 07.08.2020.
- [QIN13] Qin, H.; Zhang, S.; Zhou, W. (2013): Inverse Gaussian process-based corrosion growth modeling and its application in the reliability analysis for energy pipelines. In: *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 7 (3), S. 276-287.
- [RAB08] Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [RAF17] Rafiee, K.; Feng, Q.; Coit, D. W. (2017): Reliability assessment of competing risks with generalized mixed shock models. In: *Reliability Engineering & System Safety* (159), S. 1-11.
- [REB21] Reback, J. et al. (2021): pandas-dev/pandas: Pandas 1.3.2: Zenodo.
- [REC18] Rechl, F.; Fottner, J. (2018): Lebenszykluskostenmodell intralogistischer Systeme. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (7-8), S. 493-496.
- [REL20] ReliaSoft (2020): Life Data Analysis. Reference.

-
- [REN12] Ren, G. C.; Yang, Z. W.; Meng, B. M. (2012): Reliability Evaluation on Machining Center Based on Three-Parameter Weibull Distribution. In: *Advanced Materials Research* (430-432), S. 1645-1649.
- [REN14] Ren, L. et al. (2014): Reliability assessment of multiple NC machine tools based on three-parameter Weibull Process model. In (Hg.): 2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). 06.08.2014 - 08.08.2014, Guangzhou, China, S. 628-631.
- [ROD15] Roda, I.; Garetti, M. (2015): Application of a Performance-driven Total Cost of Ownership (TCO) Evaluation Model for Physical Asset Management. In: *Lecture Notes in Control and Information Sciences* (20), S. 11-23.
- [ROS73] Ross, S. A. (1973): The economic theory of agency: The principal's problem. In: *American Economic Review* 63 (5), S. 134-139.
- [RÜS21] Rüsberg, L. (2021): IoT-based Financing. Online verfügbar unter: <https://jahresbericht.leasingverband.de/leasing-markt-und-umfeld/gastbeitrag-von-dr-lars-ruesberg-innovating-innovators/>. Zuletzt geprüft am: 22.09.2021.
- [SAP91] Sappington, D. (1991): Incentives in Principal-Agent Relationships. In: *Journal of Economic Perspectives* 5 (2), S. 45-66.
- [SAR10] Sargent, R. G. (2010): Verification and validation of simulation models. In (Hg.): Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. 05.12.2010 - 08.12.2010, Baltimore, MD, USA, S. 166-183.
- [SAR21] Sarikaya, E. et al. (2021): White Paper Data Driven Production. Application Fields, Solutions and Benefits.
- [SCH08] Schott, K.; Bartsch, A. (2008): Leasing. In: Eilers, S.; Rödding, A.; Schmalenbach, D. (Hg.): Unternehmensfinanzierung. München, S. 537-564.
- [SCH13] Schuh, G.; Warschat, J. (2013): Potenziale einer Forschungs disziplin Wirtschaftsingenieurwesen. acatech DISKUSSION Dezember 2013.

-
- [SCH16] Schaefers, T.; Lawson, S. J.; Kukar-Kinney, M. (2016): How the burdens of ownership promote consumer usage of access-based services. In: *Marketing Letters* 27 (3), S. 569-577.
- [SCH17] Schlink, H. (2017): Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Grundlagen für die Entwicklung technischer Produkte. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler.
- [SCH18a] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H. (2018): Arbeitswissenschaft. 4. Auflage, Berlin, Germany: Springer Vieweg.
- [SCH18b] Schmedding, D. (2018): Heidelberg goes digital! Subscription Economy - New business Model for Heidelberg Druckmaschinen AG.
- [SCH60] Schwarz, H. (1960): Zur Bedeutung und Berücksichtigung nicht oder schwer quantifizierbarer Faktoren im Rahmen des investitionspolitischen Entscheidungsprozesses. In: *BFuP* (), S. 686-698.
- [SCH78] Schwarz, G. (1978): Estimating the Dimension of a Model. In: *The Annals of Statistics* 6 (2), S.
- [SCH92] Scheffler, W.; Hiller, G. (1992): Leasing betriebswirtschaftlich sinnvoll? – Eine kritische Analyse der Argumente zugunsten des Leasing. In: *technologie & management* (), S. 50-54.
- [SCH94] Schimmelschmidt, U. (1994): Finanzierungsleasing. Eine EDV-gestützte Vorteilhaftigkeitsanalyse. Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag.
- [SHA17] Shahraki, A. F. (2017): A Review on Degradation Modelling and Its Engineering Applications. In: *International Journal of Performability Engineering* 13 (3), S.
- [SHA97] Sharma, A. (1997): Professional as Agent: Knowledge Asymmetry in Agency Exchange. In: *Advanced Materials Research* 22 (3), S. 758-798.
- [SHE00] Shearer C (2000): The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. In: *J Data Warehouse* 4 (5), S. 13-22.

-
- [SI17] Si, X.-S.; Zhang, Z.-X.; Hu, C.-H. (2017): Data-Driven Remaining Useful Life Prognosis Techniques, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [SIE18] Siemens Financial Services GmbH (2018): Whitepaper - Pay-for-performance.
- [SIK11] Sikorska, J. Z.; Hodkiewicz, M.; Ma, L. (2011): Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (5), S. 1803-1836.
- [SOM18] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J. (2018): Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen. 3., neu bearbeitete Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [SPR89] Spremann, K. (1989): Agent and principal. In: Bamberg, G. and Spremann, K. (Hg.): Agency Theory, Information and Incentives. Berlin: Springer, S. 3-37.
- [STA10] Stauss, B. et al. (2010): Benefits and uncertainties of performance-based contracting in manufacturing industries. In: *Journal of Service Management* 21 (4), S. 460-489.
- [STA16] Stavropoulos, P. et al. (2016): Tool wear predictability estimation in milling based on multi-sensorial data. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82 (1-4), S. 509-521.
- [STÄ17] Stähr, T.; Lanza, G. (2017): Ausfallanalyse von Werkzeugmaschinen. Total Cost of Ownership 2.0 in Bezug auf den Anwendungsfall. In 107 (7/8), S. 507-510.
- [STA18] Stanula, P.; Ziegenbein, A.; Metternich, J. (2018): Machine learning algorithms in production: A guideline for efficient data source selection. In: *Procedia CIRP* 6 (78), S. 261-266.
- [STA19] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019): Industrie, Verarbeitendes Gewerbe. Kennzahlen der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes 2017.

- [STA20a] Stack Overflow (2020): 2021 Developer Survey. Online verfügbar unter: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2021>. Zuletzt geprüft am: 07.08.2020.
- [STA20b] Stanula, P. et al. (2020): Stress-oriented, data-based payment model for machine tools. In: *Procedia CIRP* 53 (93), S. 1526-1531.
- [STÄ20a] Städtler, A. (2020): Leasing-Quoten nach Leasing-Nehmerbereichen.
- [STÄ20b] Städtler, A. (2020): Leasing-Quoten nach Gütergruppen.
- [STA21a] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige. Jahresbericht für Betriebe im Verarb. Gewerbe.
- [STA21b] Stanula, P. et al. (2021): Economic assessment of stress-based payment models. In: *CIRP Global Web Conference* (103), S. 182-187.
- [STO15] Stoppel, E.; Roth, S. (2015): Consequences of usage-based pricing in industrial markets. In: *Journal of Revenue and Pricing Management* 14 (3), S. 140-154.
- [STR12] Strunz, M. (2012): Instandhaltung. Grundlagen - Strategien - Werkstätten, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [SUN05] Sundin, E.; Bras, B. (2005): Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. In: *Journal of Cleaner Production* 13 (9), S. 913-925.
- [SUN09] Sundin, E.; Lindahl, M.; Ijomah, W. (2009): Product design for product/service systems. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 20 (5), S. 723-753.
- [SUN10] Sun, B. et al. (2010): Benefits analysis of prognostics in systems. In: *2010 Prognostics and system health management conference* (), S. 1-8.
- [TAC99] Tacke, H. (1999): Leasing. 3. Aufl., Stuttgart.
- [TAK14] Takeshi, E.; Shau-Kai, S. (2014): Estimation and model selection for left-truncated and right-censored lifetime data with application to electric power transformers analysis. In: *MPRA Paper* (57528), S. 3171-3189.

-
- [TAN10] Tang Tang (2010): Towards sustainable use: design behaviour intervention to reduce household environment impact, Loughborough: Loughborough University.
- [TAN21] Tanja Figge (2021): DMG MORI launches subscription business with PAYZR. Online verfügbar unter: <https://en.dmgmori-ag.com/resource/blob/564672/7138e2982e5897593ce7b68a18f82781/dmg-mori-launches-subscription-business-with-payzr-pdf-data.pdf>. Zuletzt geprüft am: 06.07.2021.
- [TAO18] Tao, F. et al. (2018): Data-driven smart manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Systems* (48), S. 157-169.
- [THA08] Thaler, R.; Sunstein, C. R. (2008): *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*, New Haven, CT: Yale University Press.
- [THE18] The Financial (2018): Commerzbank the first German bank to offer new databased loans for corporate clients. Online verfügbar unter: <https://www.finchannel.com/business/banksandservices/73811-commerzbank-the-first-german-bankto-offer-new-data-based-loans-for-corporate-clients>. Zuletzt geprüft am: 22.01.2020.
- [THI08] Thiesse, F.; Kohler, M. (2008): An Analysis of Usage-Based Pricing Policies for Smart Products. In: *Electronic Markets* 18 (3), S. 232-241.
- [TOB12] Tobias PA, T. D. C. (2012): *Applied reliability*. 3: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [TOF08] Toffel, M. W. (2008): *Contracting for Servicizing*.
- [TSA09] Tsarouhas, P. H.; Varzakas, T. H.; Arvanitoyannis, I. S. (2009): Reliability and maintainability analysis of strudel production line with experimental data – A case study. In: *Journal of Food Engineering* 91 (2), S. 250-259.
- [TUK04] Tukker, A. (2004): Eight types of product–service system. Eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: *Business Strategy and the Environment* 13 (4), S. 246-260.

- [ULA13] Ulaga, W., Estoquié, F., Gebauer, H., Grab, E., März, S., Soler, P., van der Velden, H. (2013): From product to service: Navigating the transition. In: *IMD* (26), S. 1-4.
- [ULR76] Ulrich, P.; Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium : WiSt : Zeitschrift für Studium und Forschung* 5 (7), S. 304-390.
- [ULR84] Ulrich, H. (1984): Management, Bern: Haupt.
- [USK21] Uski, V.-M. et al. (2021): Review of PPX business models: Adaptability and feasibility of PPX models in the equipment manufacturing industry. In: *IFIP 18th International Conference on Product Lifecycle Management* (18), S.
- [UUS20] Uuskoski, M.; Kärkkäinen, H.; Menon, K. (2020): Rapid Sales Growth Mechanisms and Profitability for Investment Product Manufacturing SMEs Through Pay-Per-X Business Models. In: Nyffenegger, F. et al. (Hg.): *Product Lifecycle Management Enabling Smart X*. Cham: Springer International Publishing, S. 402-415.
- [VAC06] Vachtsevanos, G. (2006): Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems. Vachtsevanos, Hoboken, N.J.: Wiley.
- [VAN09] van Noortwijk, J. M. (2009): A survey of the application of gamma processes in maintenance. In: *Reliability Engineering & System Safety* 94 (1), S. 2-21.
- [VDI 2884] (2005): VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC).
- [VDI 3423] (2011): VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen.
- [VDI 3633-1a] (2014): VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen.
- [VDI 3633-1b] (2014): VDI 3633-1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen.
- [VDI 3633-7] (2001): VDI-Norm 3633-7: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Kostensimulation.

- [VDI 4008-6] (1999): VDI 4008 Blatt 6: Monte-Carlo-Simulation.
- [VDM12] VDMA (2012): Handbuch für das Excel-Berechnungs-Werkzeug zur Berechnung von Lebenszykluskosten in der Investitionsgüterindustrie.
- [VDM16] VDMA; McKinsey&Company (2016): How to succeed: Strategic options for European machinery. Shifting growth patterns, increasing pace of digitization, and organizational change.
- [VDMA 34160] (2006): VDMA Einheitsblatt 34160 3. Version: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.
- [VEP17] Vepa, A. et al. (2017): Prognostics and Health Management for Maintenance - Review Implementation and Tools Evaluation. In: *International Journal of Prognostics and Health Management* (8), S. 1-31.
- [VER16] Verein deutscher Maschinen und Anlagenbauer e.V. (VDMA) (2016): Statistisches Handbuch für den Maschinenbau: VDMA Verlag GmbH.
- [VER21] Verein deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V. (VDW) (2021): Marktbericht 2020. Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie und ihre Stellung im Weltmarkt.
- [WAK19] Wakiru, J. M. et al. (2019): A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* (118), S. 108-132.
- [WAN10a] Wang, X.; Xu, D. (2010): An Inverse Gaussian Process Model for Degradation Data. In: *Technometrics* 52 (2), S. 188-197.
- [WAN10b] Wang, X. (2010): Wiener processes with random effects for degradation data. In: *Journal of Multivariate Analysis* 101 (2), S. 340-351.
- [WAN11a] Wang, Z. M.; Yang, J. G. (2011): Reliability Assessment of Numerical Control Machine Tools Using Weibull Mixture Models. In: *Advanced Materials Research* 181-182 (), S. 161-165.
- [WAN11b] Wang, Z. et al. (2011): Application of three-parameter Weibull mixture model for reliability assessment of NC machine tools: a case study. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 225 (11), S. 2718-2726.

-
- [WAN12] Wang, N.; Chang, Y.-C.; El-Sheikh, A. A. (2012): Monte Carlo simulation approach to life cycle cost management. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 8 (8), S. 739-746.
- [WAN14] Wang, W.; Jiang, M. (): Competing failure or mixed failure models. In (Hg.): 2014 Reliability and Maintainability Symposium. 27.01.2014 - 30.01.2014, Colorado Springs, CO, USA, S. 1-6.
- [WAN18] Wang, C. et al. (2018): An experimental investigation on ultra-precision instrumented smart aerostatic bearing spindle applied to high speed micro-drilling. In: *Journal of Manufacturing Processes* (31), S. 324-335.
- [WAN19] Wang, P.; Li, Y.; Reddy, C. K. (2019): Machine Learning for Survival Analysis. In: *ACM Computing Surveys* 51 (6), S. 1-36.
- [WAN99] Wang, Y. et al. (1999): Failure probabilistic model of CNC lathes. In: *Reliability Engineering & System Safety* 65 (3), S. 307-314.
- [WAR09] Warth, W.; Plenck, T. (2009): Eigentum im Zivil- und Steuerrecht. In: *SteuerStud* (), S. 61-65.
- [WEI18] Weinman, J. (2018): The Economics of Pay-per-Use Pricing. In: *IEEE Cloud Computing* 5 (5), S. 101-c3.
- [WEI20] Weiser, F. (2020): Entwicklung von Simulationsbausteinen eines Modells zur finanziellen Bewertung des belastungsorientierten Leasings von Werkzeugmaschinen. Masterarbeit.
- [WEI51] Weibull, W. (1951): A statistical distribution function of wide applicability. In: *J Appl Mech* (18), S. 293-296.
- [WES06] Westkämper, E.; Decker, M. (2006): Einführung in die Organisation der Produktion, Berlin: Springer.
- [WEV08] Wever, R.; van Kuijk, J.; Boks, C. (2008): User-centred design for sustainable behaviour. In: *International Journal of Sustainable Engineering* 1 (1), S. 9-20.
- [WHI97] Whitmore, G. A.; Schenkelberg, F. (1997): Modelling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation. In: *Lifetime Data Analysis* 3 (1), S. 27-45.

-
- [WIE09] Wieser, J. (2009): Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen. 1. Auflage, Aachen: Shaker.
- [WIR00] Wirth, R.; Hipp, J. (2000): CRISP-DM: Towards a Standard Process Model for Data Mining. In: *Proceedings of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining* (), S. 29-39.
- [WIT13] Wittstock, V.; Kolouch, M.; Paetzold, J. (2013): Statistical evaluation of impact factors to the energy consumption of machine tools. In: *Journal of Machine Engineering* 13 (2), S.
- [WOL08] Wolke, T. (2008): Risikomanagement. 2. Aufl., München.
- [WU15] Wu, D.; Terpenney, J.; Gentzsch, W. (2015): Economic Benefit Analysis of Cloud-Based Design, Engineering Analysis, and Manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137 (4), S. 40903.
- [WUN02] Wunderlich, J. (2002): Kostensimulation: simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme. Dissertation.
- [XIA15] Xiaojuan, C. et al. (2015): Reliability Model for subsystems of CNC Machine Tools based on the Repair Degree. In: *Conference: 2015 6th International Conference on Manufacturing Science and Engineering* (), S.
- [XU16] Xu, Z.; Hong, Y.; Jin, R. (2016): Nonlinear general path models for degradation data with dynamic covariates. In: *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 32 (2), S. 153-167.
- [XU17] Xu, X. (2017): Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92 (5-8), S. 1893-1900.
- [YAN17] Yan, J. et al. (2017): Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance. In: *IEEE Access* (5), S. 23484-23491.
- [YAN18] Yang, Z. et al. (2018): Reliability Modelling of CNC Machine Tools Based on the Improved Maximum Likelihood Estimation Method. In: *Mathematical Problems in Engineering* (1), S. 1-11.

-
- [YAN19] Yang, Z. et al. (2019): Reliability assessment of the spindle systems with a competing risk model. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 233 (2), S. 226-234.
- [YAN20] Yan, P.; Pei, J.; Chinchuluun, A. (2020): Strategic decisions of sales and pay-per-use rentals under incomplete product availability. In: *Journal of Global Optimization* 78 (4), S. 671-691.
- [YAZ95] Yazhou, J.; Molin, W. (1995): Probability distribution of machining center failures.
- [YE14] Ye, Z.-S.; Chen, N. (2014): The Inverse Gaussian Process as a Degradation Model. In: *Technometrics* 56 (3), S. 302-311.
- [YE15] Ye, Z.-S.; Xie, M. (2015): Stochastic modelling and analysis of degradation for highly reliable products. In: *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 31 (1), S. 16-32.
- [YIN11] Yingzhi, Z. et al. (2011): Reliability Analysis for CNC Machine Tool Based on Failure Interaction.
- [YOU16] You, D.; Pham, H. (2016): Reliability Analysis of the CNC System Based on Field Failure Data in Operating Environments. In: *Quality and Reliability Engineering International* 32 (5), S. 1955-1963.
- [ZHA13a] Zhao-jun Yang et al. (2013): Reliability analysis of machining center based on the field data.
- [ZHA13b] Zhao, K.; Steffey, D. (2013): Practical applications of mixture models to complex time-to-failure data. In (Hg.): 2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). 28.01.2013 - 31.01.2013, Orlando, FL, S. 1-6.
- [ZHA15] Zhang, Z. et al. (2015): Degradation modeling–based remaining useful life estimation: A review on approaches for systems with heterogeneity. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 229 (4), S. 343-355.
- [ZHA90] Zhang, S. (1990): Instandhaltung und Anlagenkosten, Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag.

- [ZIP20] Zipfel, A.; Wink, K.; Reinhart, G. (2020): Incentive System Framework for Information Sharing in Value-Adding Networks.
- [ZUP00] Zupan, B. et al. (2000): Machine learning for survival analysis: a case study on recurrence of prostate cancer. In: *Artificial Intelligence in Medicine* 20 (1), S. 59-75.

Studentische Arbeiten

Im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt sind unter meiner wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung studentische Arbeiten betreut worden, die sich mit Teilaspekten der Bewertung belastungsbasierter Bezahlmodelle im Werkzeugmaschinenbau befassen.

- 11/2020 Analyse und Vergleich stressbasierter Zahlungsmodelle im Hinblick auf die traditionellen Leasingmodelle in der Werkzeugmaschinenindustrie (Masterarbeit)
- 08/2020 Entwicklung eines Konzepts zur Simulation von nutzungsabhängigen Verschleißprozessen als Grundlage der Bewertung innovativer Bezahlmodelle (Studienarbeit)
- 08/2020 Entwicklung von Simulationsbausteinen eines Modells zur finanziellen Bewertung des belastungsorientierten Leasings von Werkzeugmaschinen (Masterarbeit)
- 09/2019 Bewertung der Einsatzmöglichkeit belastungsorientierter, datenbasierter Bezahlmodelle in der Serienfertigung (Studienarbeit)
- 08/2019 Entwicklung eines Anreizsystems zur Bewertung nutzungsabhängiger Bezahlmodelle im Maschinenbau (Masterarbeit)
- 07/2019 Innovative Bezahlmodelle im Maschinenbau (Studienarbeit)

Veröffentlichungen

Im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am PTW der Technischen Universität Darmstadt habe ich, in Zusammenarbeit mit Co-Autoren, Teilergebnisse der vorliegenden Dissertation veröffentlicht. Im Folgenden werden diese Veröffentlichungen angegeben.

- 12/2021 Bossler, Lukas; Rogalski, Timo; Stanula, Patrick; Lang, Enno; Kohn, Oliver; Metternich, Joachim; Weigold, Matthias; Krönung, Julia; Buchwald, Arne (2021): Pay-per-Stress – Belastungsorientierte Leasingmodelle im Maschinenbau. In: *Wirtschaftsinformatik & Management*; 13, pages 466–475 (2021).
- 09/2021 Kohn, Oliver; Stanula, Patrick; Lang, Enno; Weigold, Matthias; Metternich, Joachim (2021): Development of a Stress Factor as an Indicator for Stress-Based Payment Models for Machine Tools. In: Behrens, B.-A. et al. (Hg.): *Production at the Leading Edge of Technology. Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, S. 239-247.
- 11/2021 Stanula, Patrick; Kohn, Oliver; Lang, Enno; Metternich, Joachim; Weigold, Matthias; Buchwald, Arne (2021): Economic assessment of stress-based payment models. In: *CIRP Global Web Conference*; 103, S. 182-187.
- 11/2020 Sarikaya, Erkut; Brockhaus, Benjamin; Fertig, Alexander; Walther, Jessica; Stanula, Patrick; Ranzau, Heiko; Weigold, Matthias (2020): *Internet of Production – Bosch Research Report*
Studie im Auftrag der Robert Bosch GmbH - Corporate Research.
- 08/2020 Stanula, Patrick; Praetzas, Christopher; Kohn, Oliver; Metternich, Joachim; Weigold, Matthias; Buchwald, Arne (2020): Stress-oriented, data-based payment model for machine tools;
CIRP Conference on Manufacturing Systems; 53.

A Anhang

A.1 Grundlagen

A.1.1 Baugruppen und Funktion der Werkzeugmaschine

Tabelle 28 Baugruppen und Funktion der Werkzeugmaschine nach [HIR16; BRE19; DIN 69651]

Baugruppe	Funktion
Gestellbauteile (Betten, Ständer, Schlitten u. Ä.) inkl. Maschinenaufstellung, Fundament und Maschineneinhausung und –verkleidung	Aufnahme und Sicherung der gegenseitigen Lage der Baugruppen unter allen Betriebsbedingungen und Abgrenzung zur Umwelt, inkl. Bedienschutz
Führungen für Tische, Schlitten, Stößel u. Ä.	Exakte Realisierung einer Bewegung und Bindung aller weiteren fünf Freiheitsgrade (Positionierung und Ausführung Vorschub- und Schnittbewegungen)
Antriebsbaugruppen	Hauptantrieb: Realisierung der Schnittbewegung (einmalige Spanabnahme bzw. Hauptbewegung) Nebenantrieb (Vorschubantrieb): Realisierung der Vorschubbewegung (Aufrechterhaltung der Spanabnahme inkl. weiterer Bewegungen der Achse) Hilfsantriebe: Bewegungserzeugende Elemente, bspw. Kühlmittelfluss, Werkzeugwechsel oder Hydraulikantrieb
Hauptspindelbaugruppe (auch Hauptspindel oder Spindel)	Letzte Welle des Hauptantriebs in direkter Verbindung zum Werkstück bzw. Werkzeug(-aufnahme), welche die Schnittbewegung realisiert (s.o.)
Werkzeugsystem (Werkzeugschnittstelle, -halter und Werkzeug)	Mechanische Schnittstelle zwischen Hauptspindel und Werkzeug; Werkzeug verwirklicht die mechanische geometrische Gestaltänderung der Werkstücke
Werkstückaufnahme und –handhabungssystem	Handhabung des Werkstücks wie Werkstückwechsel und Verbindung von Werkstück mit dem Maschinentisch
Steuerung und Bedienteile einschließlich Sicherheitseinrichtungen	Steuerung, Messung und Regelung der Maschine durch bspw. NC-Steuerung, SPS, HMI, Sensoren und Messsysteme
Automatisierungsbaugruppen, z.B. Werkzeug- oder Werkstückwechsel- und -speicher-Einrichtungen	Handhabung und Speicher des Werkstücks (Werkstückwechsel) und des Werkzeugs (Werkzeugwechsel)

Ver- und Entsorgung (z.B. für Kühlschmierstoff, Druckluft, Hydraulik, Späne, Dämpfe)	Temperierung und Konditionierung des eigentlichen Bearbeitungsprozesses sowie Abführung von Spänen, Dämpfen etc.
--	--

A.1.2 Studien zu Ausfällen von Komponenten der Werkzeugmaschine

Folgend werden die im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Veröffentlichungen zu Komponentenausfällen von Werkzeugmaschinen vorgestellt. In [WAN99] ist der größte Anteil der Fehler elektrischen und elektronischen Komponenten zuzuordnen (26 % der Ausfälle), gefolgt vom Werkzeugrevolver, der Steuerungseinheit und dem Spannfutter. In [ZHA13a] werden zwölf Werkzeugmaschinen über einen Zeitraum von fünf Jahren betrachtet, wobei mit 18% der Ausfälle das Hydrauliksystem an erster Stelle steht, gefolgt von der Elektrik und dem Werkzeugmagazin. Die Motorspindel nimmt einen Anteil von 9,4 % ein. Auch in [CHE15] werden bei Drehmaschinen die Hydraulik- und Elektronikkomponente als fehlerhafteste Komponenten identifiziert. In [PAT19] werden 50 NC-Drehmaschinen über einen Zeitraum von sieben Jahren analysiert, wobei neben den genannten Komponenten das Drehfutter und das CNC-System als wichtigste Komponente aufgeführt werden. In [ZHA13a] werden zwölf Maschinenzentren betrachtet, wobei Hydrauliksysteme für 18% der Ausfälle verantwortlich sind, gefolgt von Elektronik, Werkzeugmagazin und dem Werkzeugspannsystem. Bei einem Anteil von 9,2 % der Ausfälle ist die Motorspindel mit einem hohen Anteil an der Reparaturzeit hervorzuheben. Auf Ebene des Subsystems wird in [YAN19] am Beispiel der Motorspindel die Lagerung als die wichtigste Komponente auf Basis der Auswertung von 500 Werkzeugmaschinen identifiziert. Die Lagerung, das Motorsystem und das Werkzeugspannsystem führen zu 92 % aller Ausfälle. In [JAC09] werden 85 % aller Spindelschäden dem Lager zugeordnet, wobei etwa 50 % Verschleiß zuzuordnen sind und 50 % Kollision, Schmutz und Schmierung. In [ABE06] wurden 231 Spindelssysteme untersucht, wobei etwa 50 % der Ausfälle auf Betriebslasten zurückzuführen sind. Die restlichen Ausfälle können der Fehlbedienung oder Kollisionen zugeordnet werden. Bei den Lastausfällen lassen sich über 50% der Ausfälle der Lagerung und dem Spannsystem zuordnen. In [CAO17] werden diese Ergebnisse nochmal bestätigt. Hierbei sind ein Großteil der Spindellagerausfälle dem Werkzeugstoß zuzuordnen.

A.1.3 Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinen

Bei der Überwachung der Komponenten einer Werkzeugmaschine für die Nutzung von Diagnose und Prognose lassen sich zahlreiche Komponenten über Zustandsindikatoren beschreiben. [STA18; GOY15; DIN ISO 17359] Die Vorschubachse fällt in der Regel selten aus. Die Reparaturzeit ist jedoch bei einem Ausfall hoch [ZHA13a] und der Verschleiß dieser Komponente hat direkten Einfluss auf die Werkstückqualität. Demzufolge ist eine Überwachung dieser Komponente geeignet. Zur Diagnose und Prognose von Ausfällen sind Modelle in der Literatur vorhanden, welche sich auf den Kugelgewindetrieb fokussieren. [LI18b; HUF12] Andere Getriebeanordnungen werden seltener betrachtet, etwa das Zahnstangen-Ritzel-Antriebssystem. [BAU20] I. d. R. werden Vibrationssignale direkt an der Kugelgewindemutter aufgenommen, um den Abnutzungszustand darzustellen. [BAU20] Die Motorspindel kann auf unterschiedliche Art und Weise überwacht werden. [ABE10] Bei der Prognose fokussieren die meisten Modelle die Vorhersage von Lagerausfällen. Hierbei werden bspw. Vibrationen nahe dem Lager gemessen. [CAO17] Das Hydrauliksystem fällt relativ oft aus, weswegen die Überwachung von Vorteil sein kann. Hierzu zählen unter anderem das Werkzeugwechselsystem, die Schmierung, Hilfsaufgaben, Hydraulik und die Versorgung mit Kühlschmierstoff. [BAU20] Die Prognose bei Hydrauliksystemen und den dazu gerechneten Komponenten ist für Werkzeugmaschinen weniger erforscht, dennoch gibt es u. a. Anwendungen zur Überwachung von Hydraulikölen [WAK19] und Pumpsystemen [BYI03]. Das Werkzeug, auch wenn diese keine Komponente der Werkzeugmaschine an sich darstellt, ist für die Zuverlässigkeit der Maschine von großer Bedeutung. Die Bestimmung der RUL wird in der Literatur ausgiebig beschrieben. [BAU20] Dies liegt vor allem daran, dass ein zustandsbasierter Austausch des Werkzeugs ein erhebliches Einsparpotential in Bezug auf die Werkstückqualität [STA16] und die Verfügbarkeit besitzt [KUR97]. Die Auswahl der Überwachungstechnologie für den industriellen Einsatz erweist sich jedoch als schwierig. [DRO16] Insbesondere erweist sich die Schnittkraft als erfolgsversprechender Indikator, welcher bspw. über den Motorstrom der Spindel gemessen werden kann. [BAU20; WAN18; ALB16; JEO02]

A.1.4 Anwendungsbeispiele der Zuverlässigkeitsanalyse

Bezüglich der Werkzeugmaschine sind zahlreiche Anwendungsfälle in Wissenschaft und Industrie implementiert. [HE16] In [CHE15] werden die historischen Ausfalldaten

von Drehmaschinen auf Komponentenebene modelliert. Für jede Komponente werden Verteilungen berechnet, um hiermit Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Gesamtverfügbarkeit der Maschine zu ermitteln. In [REN12] und [REN14] werden 3-Parameter Weibullverteilungen zur Modellierung von Ausfalldaten von Bearbeitungszentren als Gesamtsystem angewendet. In [ZHA13a] wird die Zuverlässigkeit am Beispiel der Werkzeugmaschine bestimmt. Die Datensammlung ist standardisiert und die wichtigsten Komponenten bei zwölf Maschinen über fünf Jahre werden mittels Pareto-Diagramm der Fehleranzahl definiert. Für diese Komponenten werden die zentralen Fehlerquellen ermittelt. Mittels NHPP (Power-Law-Process) wird das System beschrieben. Am Beispiel von 24 Werkzeugmaschinen werden in [YAZ95] Instandhaltungs- und Nutzungsdaten verwendet, um über Weibull- und Exponentialverteilungen das Ausfallverhalten der gesamten Werkzeugmaschine zu modellieren. In [MAZ08] wird ein Zuverlässigkeitsmodell einer Werkzeugmaschine auf Basis der Subkomponenten mittels Reliability Block Diagramm modelliert. Durch eine Sensitivitätsanalyse werden die Komponenten identifiziert, welche den größten Einfluss auf die Zuverlässigkeit haben. Neben den klassischen Modellen werden Erweiterungen vorgestellt. Unter Beachtung des Reparaturgrades werden in [XIA15] am Beispiel der wichtigsten Subsysteme einer Drehmaschine Modelle entwickelt, welche den Zustand einer Komponente nach dem Ausfall durch eine unvollständige Reparatur modelliert. In [YAN18] wird ein Modell zur Parameterschätzung exemplarisch an einer Werkzeugmaschine und deren Komponenten vorgestellt, welche insbesondere bei kleinen und stark zensierten Datensätzen angewendet werden kann. [YIN11] untersucht die Zuverlässigkeit einer CNC-Werkzeugmaschine hinsichtlich der Fehlerinteraktionen zwischen den Komponenten. Normalerweise wird eine Unabhängigkeit der Ausfallraten angenommen. Es wird am Beispiel gezeigt, dass die Ausfallraten mechanischer wie auch elektrischer Subsysteme voneinander abhängen. In [LIU19] wird am Beispiel von CNC-Rundschleifmaschinen ein Zuverlässigkeitsmodell entwickelt, in welchem die Maschine in die Subkomponenten aufgeteilt wird. Da die Fehlerzeiten der Komponenten Zufallsvariablen darstellen, wird die Zuverlässigkeit mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation ermittelt. In [PAT17] wird am Beispiel einer Drehmaschine die Systemzuverlässigkeit berechnet, indem kritische Komponenten durch ihren Einfluss auf die Lebenszykluskosten fokussiert werden. Unter anderem werden das Spindelsystem und der Werkzeughalter als kritische Kompo-

nennten bestimmt. Bei der LZK-Berechnung kann bestimmt werden, dass die Beschaffungskosten nur 14 % der Lebenszykluskosten ausmachen. Die weiteren Kosten fallen auf Instandhaltungskosten, Betriebskosten und weitere Kosten. In [LI16] wird das Ausfallverhalten einer NC-Werkzeugmaschine durch das semi-parametrische Cox-Modell modelliert, indem die Arbeitsbedingungen der Maschine hinzugenommen werden. Hierbei werden die Schnittkraft, die Anzahl der Werkzeugwechsel, die Schneidflüssigkeit und die Umgebungstemperatur als zentrale Parameter identifiziert. In [KAN15] wird eine bayessche Methode vorgestellt, in welcher Weibull-Parameter durch Experten auf Basis einer bereits bestehenden Verteilung geschätzt werden.

Klassischerweise werden mechanische Komponenten betrachtet, da elektronische Komponenten i. d. R. ein zufälliges Ausfallverhalten aufweisen. [DIN EN 61649] Elektronische Systeme einer Werkzeugmaschine können dennoch modelliert werden. Problematisch ist hier jedoch die hohe Komplexität solcher Systeme, welche aus der Anzahl an Subkomponenten und deren unsicheren Ausfallcharakteristika resultiert. In [HUA16] wird eine Modellierung auf Basis von Bayes-Netzwerken untersucht. In [YOU16] wird die Zuverlässigkeit der Maschinensteuerung auf Basis von Ausfalldaten untersucht.

A.1.5 Abgrenzung des Leasings zu anderen Finanzierungsformen

Folgend wird das Leasing zu weiteren Finanzierungsformen abgegrenzt. In Tabelle 29 sind die Formen zusammengefasst. Die Kreditfinanzierung ist der Außenfinanzierung zuzuordnen, bei welcher dem Unternehmen Fremdkapital zugeführt wird, ohne dass der Fremdkapitalgeber Anteilseigner wird oder sich weitere Rechte aneignet. Es besteht der Anspruch des Kreditgebers auf Zins und Tilgung. Es bestehen jeweils ein Kaufvertrag zwischen Investor und Lieferant sowie ein Kreditvertrag zwischen Investor und Kreditinstitut. Kredite sind immer befristet. [GRU19] Der Mietkauf ist eine Mischform aus Leasing und Kreditkauf und gleicht in den Zahlungen dem Leasing. Der Unterschied liegt darin, dass mit der Zahlung der letzten Rate das Eigentum automatisch auf den Mieter übergeht. Dabei muss der Mieter wie beim Barkauf den Gegenstand von Anfang an bilanzieren. Dies hat unter anderem negative Effekte auf die Steuerlast des Mieters. [GRU19] In der Vermietung wird durch die gegenseitige Vereinbarung gegen Entgelt der Gebrauch zeitweise überlassen. Der Vermieter gewährt dem Mieter den Gebrauch der gemieteten Sache, wobei die Gegenleistung die Zahlung der vereinbarten Miete

ist. Es gelten für das Mietrecht die §§ 535 bis 580a des Bürgerlichen Gesetzbuchs. [GRU19]

Tabelle 29 Kurzübersicht zur Abgrenzung der Leasingfinanzierung nach [GRU19]

	Merkmale
Leasing	<ul style="list-style-type: none"> • Dreiecksbeziehung • Leasinggeber ist wirtschaftlicher Eigentümer des Leasingobjektes • Nutzungsrechte des Leasingnehmers während der Leasinglaufzeit • Zahlung monatlicher Leasingraten durch den Leasingnehmer • Leasingnehmer übernimmt mehr Verantwortung für das Leasingobjekt, z. B. Instandhaltungskosten, Wartung, Wahrnehmung von Mängelbeseitigungsansprüchen • Rückgabe des Leasingobjektes am Ende der Vertragslaufzeit • Andere Vereinbarungen am Ende der Vertragslaufzeit möglich, z. B. Erwerb
Kredit	<ul style="list-style-type: none"> • Rechtsbeziehungen: Kaufvertrag zwischen Investor und Lieferanten, Kreditvertrag zwischen Investor und Kreditinstitut • Befristete Überlassung eines Geldbetrages • Außenfinanzierung • Zuführung von Fremdkapital • Kreditgeber hat Anspruch auf Zins- und Tilgungsleistungen • Kreditgeber übernimmt kein Investitionsrisiko
Mietkauf	<ul style="list-style-type: none"> • Mischform zwischen Kredit und Leasing • Ratenverlauf und Konditionengestaltung wie Leasing • Eigentum am Objekt während der Mietdauer liegt beim Vermieter • Aufschiebend bedingter Eigentumsübergang am Ende der Vertragslaufzeit • Mieter muss Mietgegenstand von Anfang an bilanzieren • Beim Mietkauf ist die Umsatzsteuer mit der ersten Rate für den gesamten Mietkaufpreis fällig
Vermietung	<ul style="list-style-type: none"> • Rechtsbeziehung: Vertrag zur zeitweisen Gebrauchsüberlassung gegen Entgelt • Vermieter ist verpflichtet, dem Mieter den Gebrauch des Mietobjektes zu gewähren • Mieter zahlt die vereinbarte Miete • Eigentümer des Mietobjektes ist der Vermieter • Sach- und Preisgefahr sowie Mängelbeseitigungsrechte übernimmt der Vermieter

A.1.6 Vertragsformen im Leasing

Zu Beginn werden allgemeine Voraussetzungen für alle Vertragsformen vorgestellt. Damit das Leasingobjekt bilanziell dem Leasinggeber zugerechnet wird, muss die Grundmietzeit zwischen 40 und 90 Prozent der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer entsprechen. Die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer entspricht den in den amtlichen

AfA-Tabellen angegebenen Werten. Zudem muss ein Spezialleasing ausgeschlossen werden, welches dann vorliegt, wenn das Leasingobjekt so stark auf den Leasingnehmer zugeschnitten ist, dass eine weitere Verwertung nicht möglich ist. [GRU19] Folgend soll jeweils auf die Vollamortisations- und Teilamortisationsverträge eingegangen werden. [GAB01]

In der Vollamortisation werden folgende typische Vertragstypen unterschieden, welche besonders das Ende der Grundmietzeit regeln: [GAB01; GRU19]

- Optionsloser Vertrag: Leasingobjekt wird bei Laufzeitende an Leasinggeber zurückgegeben, welcher dieses freihändig verwerten kann.
- Vertrag mit Kaufoption: Leasingnehmer hat das Recht (nicht die Verpflichtung), das Leasingobjekt nach der Grundmietzeit zu einem zu Anfang fixierten Betrag zu erwerben. Der Restbuchwert darf dabei nicht den Ausübungspreis überschreiten.
- Vertrag mit Mietverlängerungsoption: Leasingnehmer hat das Recht, die Grundmietzeit zu vorher definierten Konditionen zu verlängern.

Bei Teilamortisationsverträgen werden folgende typische Anschlussverträge genannt: [GAB01; GRU19]

- Vertrag mit Andienungsrecht des Leasinggebers: Der Leasingnehmer ist bei Verlangen des Leasinggebers verpflichtet, das Leasingobjekt nach der Grundmietzeit zu einem vorher definierten Preis (kalkulatorischer Restwert) zu kaufen. Dies ist auch dann der Fall, wenn das Leasingobjekt einen geringeren Marktwert besitzt. Der Leasinggeber kann das Objekt aber auch anderweitig veräußern. Das Restwertrisiko liegt beim Leasingnehmer.
- Vertrag mit Aufteilung des Mehrerlöses: Nach Ablauf der Grundmietzeit wird das Leasingobjekt veräußert. Ist die Differenz aus Restamortisation und Verwertungserlös negativ, wird diese Differenz durch den Leasingnehmer gezahlt (Abschlusszahlung). Ist die Differenz hingegen positiv, so wird der Mehrerlös aufgeteilt. Der maximale Wert des Leasingnehmers beträgt dabei 75 Prozent. Das Restwertrisiko liegt beim Leasingnehmer.
- Kündbarer Vertrag mit Abschlusszahlung und Anrechnung des Verwertungserlöses: Das Leasinggeschäft ist auf unbestimmte Zeit abgeschlossen, wobei der

Leasingnehmer ab 40 Prozent der betriebsgewöhnlichen Abschreibung den Vertrag kündigen kann. Dabei wird wiederum eine Abschlusszahlung in Höhe der Restamortisation gezahlt. Es werden 90 Prozent des Veräußerungserlöses auf diese Zahlung angerechnet, welche dem Leasinggeber zustehen.

- Vertrag mit Restwertrisiko beim Leasinggeber: Die Vertragsgestaltung kommt aus dem PKW-Leasing, in welchem der Leasinggeber durch den transparenten Sekundärmarkt die Restwerte sehr gut schätzen kann. Der Leasinggeber übernimmt das Restwertrisiko. Dazu wird jedoch eine Kilometerbegrenzung eingeführt, die bei Überschreitung pro Kilometer abgerechnet und bei Unterschreitung dem Leasingnehmer gutgeschrieben wird. Hinzu wird ein übermäßiger und außerordentlicher Verschleiß bzw. Wertminderung durch den Leasingnehmer übernommen. Hierzu werden i. d. R. Sachverständige eingesetzt, um Beträge festlegen zu können. Der Leasingnehmer verliert dadurch das Restwertrisiko, jedoch auch die potenzielle Partizipation an Mehrerlösen.

A.1.7 Vor- und Nachteile von Leasing

Tabelle 30 Vor- und Nachteile von Leasing für den Leasingnehmer nach [GAB01; GRU19]

Vorteile	Nachteile
Schonung der Liquidität durch kontinuierlichen Liquiditätsabfluss	Durch das fehlende Eigentum kann bei einer Nichtnutzung das Objekt nicht verkauft werden
Geringere Verwaltungsaufwände	Höhere Gesamtkosten über den gesamten Leasingzeitraum, da Ausfallrisiken und Gewinnmargen des Leasinggebers eingepreist sind
Steuerliche Vorteile ⁴⁷	Bindung während Vertragslaufzeit ohne Kündigungsmöglichkeit und Zahlung von Leasingraten auch bei Nichtnutzung
Technisch aktuelle Maschinen bei kurzen Grundmietzeiten	
Eigenkapitalquote wird geschont, da Leasing bilanzneutral ist ⁴⁸	

⁴⁷ Nur wenn kein automatischer Eigentumserwerb durch den Leasingnehmer vorgesehen wird. Dazu kann insbesondere bei jungen Unternehmen, welche Gewinn erwirtschaften, die Steuerlast gemindert werden [GRU19]

⁴⁸ Die Leasingaufwendungen werden als Betriebsausgaben der Gewinn- und Verlustrechnung zugeordnet.

Pay-as-you-earn Effekt ⁴⁹	
Sichere Finanzplanung auf Basis der kalkulierten Leasingraten	
Keine eigene Entsorgung des Objektes	

Bilanzierungstechnische und steuerrechtliche Auswirkungen für den Leasingnehmer sind individuell zu untersuchen. Eine allgemeine Aussage lässt sich nicht treffen und ist in vielen Fällen auch vernachlässigbar. [BEI12] Auch wenn Leasing positive Effekte auf die Kreditlinie haben kann, werden die positiven Effekte in der Literatur kritisch diskutiert. [BEI12] Die Relevanz der steuerlichen Vorteile werden in [KRU90; KRU92; BEI12] betrachtet.

A.1.8 Besonderheiten von Ereignisdaten

Neben der potenziell mangelhaften Datenqualität durch fehlende Automatisierung der Datenaufnahme (Vollständigkeit, Richtigkeit, Fehler) können folgende Herausforderungen und Eigenschaften genannt werden: [WAN19; KAR19; KLE10]

Tabelle 31 Herausforderungen der Datenbasis

Zweifelhafte Datenqualität, da diese in vielen Fällen nicht automatisiert aufgenommen werden (Vollständigkeit der Daten und Variablen, Richtigkeit, Fehler)
Daten sind in der Regel zensiert, d.h. der exakte Fehlerzeitpunkt ist nicht bekannt bzw. tritt erst nach der Betrachtungszeit auf, dürfen jedoch nicht vernachlässigt werden
Betrachtete Systeme beginnen den Einsatz nicht immer zur selben Zeit
Datenbasis kann sehr klein sein, besonders auf Komponentenebene
Unterschiedliche Datenquellen oder Ebenen der Datenaufnahme
Verteilungen und Analysemethoden sind sehr spezifisch

⁴⁹ Der Pay-as-you-earn Effekt ist zentrales Element im Leasinggeschäft und schon die Liquidität des Leasingnehmers, indem Kosten dann anfallen, wenn Einnahmen generiert werden. Das bedeutet nicht, dass die Höhe der Leasingraten von den Gewinnen oder Umsätzen abhängig ist. Der Effekt ist auch nicht unbedingt leasingspezifisch und kann auch bei Kreditverträgen realisiert werden. [BEI12]

Tabelle 32 Eigenschaften historischer Ereignisdaten der Instandhaltung

Frühausfälle: Frühe Ausfalldaten werden selten aufgenommen, daher sind frühe Ausfälle in laufenden Systemen oft schwer zu beschreiben [WAN19]
Konkurrierende Risiken: Unterschiedliche Ereignisse können potenziell auftreten, jedoch immer nur eines (bspw. Ausfall durch Crash und Ausfall durch Abnutzung) [WAN19; DIN EN 61649]
Wiederkehrende Ereignisse: Ereignis kann mehrere Male auftreten [WAN19]
Interaktionen zwischen Komponenten [YIN11]
Reparierbarkeit von Komponenten [XIA15]
Einfluss des Nutzungsverhaltens [LI16]

A.1.9 Multivariate Regressionsmodelle der Zuverlässigkeitsanalyse

Sind neben den Instandhaltungsdaten weitere Informationen in ausreichender Qualität und Quantität vorhanden, welche den Abnutzungsvorrat oder den Zusammenhang von Belastung und Zeit bis zum Ausfall beschreiben, lassen sich multivariate Modelle anwenden. Dadurch, dass im Rahmen des Anwendungsbeispiels dieser Arbeit solche Daten nicht in ausreichender Qualität und Quantität vorliegen, kann die Anwendung dieser Modelle nur theoretisch beschrieben werden.

Im Bereich der Zuverlässigkeitsmodelle werden Modelle, welche beschreibende Faktoren betrachten (sog. Kovariaten), Regressionsmodelle genannt. [ATT05; KAL11] Diese versuchen die Ausfallrate λ in Abhängigkeit von der Zeit und weiteren Variablen darzustellen. Klassische Regressionsmodelle sind aufgrund der Zensur nicht anwendbar. Es sind zahlreiche Modelle in der Literatur beschrieben. Folgend soll auf zwei grundlegende Modellklassen exemplarisch eingegangen werden. [ATT05; WAN19]

Die erste Klasse umfasst die Proportional Hazard Modelle, in welchen Kovariate einen multiplikativen Effekt auf die Ausfallrate haben. Das semi-parametrische Cox-Modell ist ein bekanntes Proportional Hazard Modell. Die Verteilung der Ereignisse ist hierbei nicht bekannt. Die Kovariaten haben einen proportionalen Effekt auf die Ausfallrate und einen exponentiellen Einfluss auf das Ergebnis. [COX72; KLE12] Zahlreiche Modellerweiterungen sind bekannt, welche spezifisch auf die Datenverfügbarkeit angepasst werden. [GOR10; KLE12; WAN19] Das Time-Dependent-Cox-Modell ist an Kovariate

angepasst, welche sich über die Zeit verändern. I. d. R. werden sogenannte Zählprozesse dargestellt, bspw. die Anzahl der Ereignisse. [KLE12] Daneben können parametrische Modelle verwendet werden, welche insbesondere bei bekannter Verteilung der Ereignisse vorzuziehen sind. Diese haben den Vorteil, dass die Zeit zum Ereignis einfach berechenbar ist. [KLE12; WAN19] Die Modelle nutzen die bereits vorgestellten Ausfallverteilungen, bspw. die Weibull-Verteilung. Die Parameter dieser Modelle werden mithilfe der MLE geschätzt. [LEE03] Die zweite Klasse umfasst die Accelerated-Failure-Time-Modelle, bei welchen Kovariate einen multiplikativen Effekt auf die Zeit zum Ausfall haben. Besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Zeit zum Ereignis und den Kovariaten, lassen sich diese Modelle anwenden [WAN19; KAL11]. Hierbei ist die Zeit zum Ereignis abhängig von den Kovariaten und der zugrundeliegenden Ausfallverteilung.

Die hier vorgestellten Modelle sind nicht abschließend. Bei den multivarianten Modellen lassen sich zahlreiche Modelle im Bereich des maschinellen Lernens aufführen, bspw. Survival-Trees [WAN19]. Diese sind besonders effektiv bei großen Datensätzen mit entsprechend hoher Anzahl an Dimensionen. [ZUP00] Für eine tiefere Diskussion dieser Ansätze ist auf [WAN19] verwiesen. Zu den statistischen Grundlagen der Analysen ist auf [BIR17] verwiesen. Zu einer vertiefenden Diskussion von Zuverlässigkeitsmodellen mit Kovariaten ist auf [GOR10] verwiesen. Eine Analyse zu Vor- und Nachteilen der Modelle kann [SIK11] entnommen werden.

A.1.10 Zusammenhänge der Zuverlässigkeitsmodelle

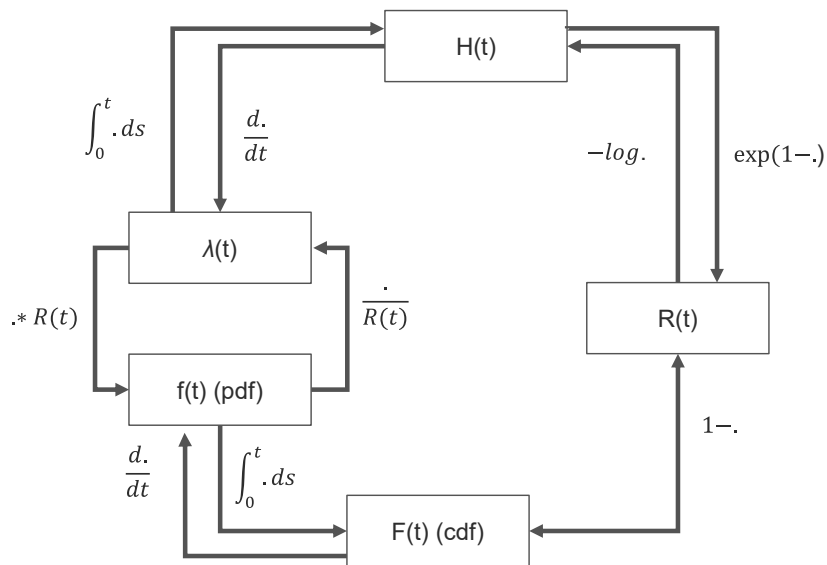


Abbildung 53 Mathematische Zusammenhänge der Funktionen der Zuverlässigkeitsanalyse [DAV20]

A.1.11 Funktionen konkurrierender Risiken und gemischter Verteilungen

Folgend werden die Funktionen der CFM und MFM auf Basis von zwei Weibull-Verteilungen beschrieben:

$$R_{CFM}(t) = R_1(t) * R_2(t) \quad (0.1)$$

$$F_{CFM}(t) = 1 - R_{CFM}(t) \quad (0.2)$$

$$\lambda_{CFM}(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) \quad (0.3)$$

$$H_{CFM}(t) = H_1(t) + H_2(t) \quad (0.4)$$

$$f_{CFM}(t) = \lambda_{CFM}(t) * R_{CFM}(t) \quad (0.5)$$

$$f_{MFM}(t) = p * f_1(t) + (1 - p) * f_2(t) \quad (0.6)$$

$$F_{MFM}(t) = p * F_1(t) + (1 - p) * F_2(t) \quad (0.7)$$

$$R_{MFM}(t) = 1 - F_{MFM}(t) \quad (0.8)$$

$$\lambda_{MFM}(t) = \frac{f_{MFM}(t)}{R_{MFM}(t)} \quad (0.9)$$

$$H_{MFM}(t) = -\log(R_{MFM}(t)) \quad (0.10)$$

Dabei beschreiben die Indizes 1 und 2 die beiden Weibull-Verteilungen der Mischung. Der Faktor p beschreibt den Anteil der jeweiligen Verteilung an der Mischung.

A.1.12 Anwendungen der Risikomischungen im Maschinenbau

Im Maschinenbau lassen sich zahlreiche Beispiele der Nutzung von Modellen der Risikomischung nennen. In [YIN11] wird ein Zuverlässigkeitsmodell für CNC-Werkzeugmaschinen entwickelt, welches auf Fehlerinteraktion zwischen Komponenten basiert. In [WAN11a; WAN11b] wird der Einsatz von gemischten Modellen im Vergleich zu klassischen Verteilungen am Beispiel einer Werkzeugmaschine durch die bessere Abbildung von Subsystemen und deren Fehlermodi vorgezogen. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass die Autoren das Ausfallverhalten der gesamten Maschine mit einer Verteilung darstellen. Ein Ansatz der komponentenweisen Analyse wird in [ATT05] am Beispiel der Automobilindustrie umgesetzt. Hier wird eine gemischte Weibull-Verteilung je Komponente genutzt, welches Früh- und Verschleißausfälle trennt. Zudem wird der Einfluss der Nutzung auf beide Ausfallarten untersucht. Es werden Fahrzeug- und Motorklasse als Variablen mit der Annahme definiert, dass unterschiedliche Fahrzeuge auch unterschiedlich genutzt werden. In [RAF17] wird ein Modell konkurrierender Risiken entwickelt, welches verschleißbedingte Ausfälle und Ausfälle durch sog. Schocks (Sprungausfall) trennt. In [ZHA13b] werden drei Beispiele aufgezeigt, in denen gemischte Modelle erfolgreich angewendet werden. Daneben werden gemischte Modelle auch verwendet, um das Belastungsspektrum einer Maschine zu modellieren. [LI18a; HE18]

A.1.13 Verfahren zur Auswahl der Ausfallverteilung

Tabelle 33 Visualisierungsverfahren zur Auswahl der Ausfallverteilung nach [MAT21]

Histogramme	Darstellung der empirischen Daten in konstant breite Klassen zur Abbildung der Häufigkeitsverteilung ermöglicht ein erstes Verständnis der Ausfallhäufigkeit über die Zeit. Hieraus lassen sich Hypothesen ableiten. Problematisch ist diese Art der Darstellung, da keine zensierten Daten dargestellt werden.
Wahrscheinlichkeitsdiagramm (engl. Probability-Plot)	Darstellung zur Bewertung der Anpassungsfähigkeit der theoretischen Verteilung, wobei die empirische cdf über die Ausfallzeit dargestellt wird. Die Achsen sind so skaliert, dass die theoretische Verteilung linear erscheint. Erscheinen die empirischen Daten als gerade Linie, so werden die Daten gut modelliert. Sind strukturelle Abweichungen zu erkennen, etwa eine S-Kurve, können diese interpretiert werden.

<p>Quantil-Quantil Diagramm (QQ-Diagramm)</p>	<p>Darstellung der Zeit über die Zeit für gemeinsame Quantile zweier Verteilungen, d.h. Darstellung des Anteils der Ausfälle in einer bestimmten Zeit gegeneinander. Ein parametrisches QQ-Diagramm stellt zwei theoretische Verteilungen gegeneinander dar, ein semi-parametrisches QQ-Diagramm stellt die empirische Fehlerverteilung gegen eine theoretische Verteilung dar. Hieraus lässt sich ein grafischer Test der Anpassungsfähigkeit der theoretischen Verteilung erstellen.</p> <p>Zwei gleiche Verteilungen stellen eine gerade Linie von 45 Grad dar. Ist diese steiler oder flacher, so erfolgen die Ereignisse der einen Verteilung früher bzw. später als in der anderen Verteilung.</p>
<p>Wahrscheinlichkeit-Wahrscheinlichkeit Diagramm (PP-Diagramm)</p>	<p>Darstellung des Anteils der Ereignisse einer Verteilung gegen den Anteil einer anderen Verteilung (cdf). Das parametrische PP-Diagramm stellt zwei theoretische Verteilungen gegeneinander dar, das semi-parametrische Diagramm stellt eine theoretische Verteilung in Form der cdf gegen die empirische cdf der Daten dar.</p> <p>Ergibt sich eine gerade Linie von 45 Grad, lässt sich eine gute Anpassungsfähigkeit ableiten. Systematische Abweichungen lassen sich hieraus ableiten.</p>

A.2 Modellspezifische Erläuterungen

A.2.1 Modellierung im Anwendungsfall

Der Prozess der Modellierung im Rahmen des Industriebeispiels orientiert sich am CRISP-DM (Cross Industry Standard Model for Data Mining). [HUB18; SHE00; WIR00] Das Modell kann als Quasi-Standard für die Durchführung von Projekten im Bereich Datenanalyse und Data Mining angesehen werden. Folgend werden die sechs Prozessschritte des Anwendungsbeispiels beschrieben.

Geschäftsverständnis (engl. business understanding)

Im Industriebeispiel wird das Ziel verfolgt, dass belastungsbasierte Bezahlmodell anhand der entwickelten Methode mit Alternativen monetär zu vergleichen, um hierdurch eine Auswahlentscheidung herbeizuführen. Insbesondere werden über den Simulationskern die Instandhaltungsereignisse und der Abnutzungsvorrat auf Basis der empirischen Daten simuliert. Der Anwendungsfall ist in Kapitel 5.1 näher beschrieben.

Datenverständnis (engl. data understanding)

Auf Basis des Geschäftsverständnisses werden Datensätze identifiziert, Daten gesammelt und erste Analysen durchgeführt. Hierzu gehören die Datenbeschreibung, die Datenexploration und die Verifizierung der Datenbasis. Im Rahmen dieser Arbeit kommen ausschließlich Instandhaltungsdaten und Betriebsdaten zum Einsatz. Dies ist durch die Verfügbarkeit der Daten und der Möglichkeit der Modellierung begründet (vgl. Kapitel 2.1.4). Folgend werden beide Datenquellen im Industriebeispiel beschrieben.

Instandhaltungsdaten:

- Die Datenquelle ist das ERP-System des Maschinenanwenders, welches im Jahr 2014 im Unternehmen implementiert wurde. Der Datensatz geht jedoch bis in das Jahr 2001 zurück. Vor 2014 wurden die Instandhaltungsereignisse in einem anderen System zurückgemeldet. Dies ist in den Daten zu erkennen.
- Im Datensatz sind alle Instandhaltungsmaßnahmen hinterlegt, welche bis zur Anschaffung der jeweiligen Maschine dokumentiert sind. Es sind sieben Maschinen unterschiedlicher Hersteller im Datensatz vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Maschinen ausgewählt.
- Der Datensatz wurde als .csv-Datei zur Verfügung gestellt. Dieser enthält vor der Datenbereinigung insgesamt 1927 Einträge. Für die ausgewählten Werkzeugmaschinen sind bei der DMC-U 500 Einträge, bei der DMC-FD 254 Einträge im Datensatz vorhanden. Der Datensatz ist nach Maschinen sortiert, eine direkte Zuordnung zu Baugruppen oder Komponenten ist nicht vorhanden. Weiter sind die Startzeit und Endzeit einer Störung auf Tagesbasis hinterlegt, ob das Ereignis zum Stillstand der Maschine geführt hat und wie lange der Ausfall in Stunden gedauert hat. Daneben wird die Dauer der Instandhaltungstätigkeiten aufgenommen sowie potenzielle Ersatzteilbestellungen mit Kosten der Ersatzteile beschrieben. Die Ausfallursache ist über einen Freitext vorhanden und beschreibt in wenigen Worten die Ursache des Ereignisses. Die Daten sind zum Teil rechts zensiert. Weitere Formen der Zensur lassen sich nicht erkennen.
- Der Datensatz wurde explorativ beschrieben. Hierbei konnte unter anderem bei den ausgewählten Maschinen eine Ausfallverteilung der Gesamtmaschine nach dem Vorbild der Badewannenkurve erkannt werden. Zudem konnten sehr kos-

tenintensive Unfälle identifiziert werden, welche sich insbesondere in den ersten Nutzungsjahren ereigneten. Dies lässt auf einen Lerneffekt der ordnungsgemäßen Nutzung der Maschine schließen. Bei den Kosten der Ereignisse oder Länge der Stillstandzeiten ließen sich keine weiteren Muster erkennen.

- Bei der Verifizierung der Datenqualität sind Probleme aufgefallen. Zum einen sind Lücken im Datensatz vorhanden. Es fehlen zum Teil die Instandhaltungszeiten oder der Endzeitpunkt eines Ausfalls ist nicht hinterlegt. Zum anderen sind zum Teil unrealistische Werte, etwa sehr lange Instandhaltungszeiten, rückgemeldet. Da die Ausfallursache in einem Freitext beschrieben ist, ist die Qualität der Daten hier besonders wichtig. Eine eindeutige Zuordnung zu den Ausfallursachen, Verschleiß oder zufälliger Ausfall, ist in den meisten Fällen nicht möglich. Auch die Beschreibung ist nicht einheitlich und Rechtsschreibfehler erschweren eine automatisierte Analyse. Dennoch lassen sich über die Beschreibung in den meisten Fällen die Ausfälle den Komponenten bzw. Baugruppen zuordnen. Über die Kosten des Ausfalls lässt sich indirekt ermitteln, um welchen Ausfall es sich handelt.

Betriebsdaten:

- Die Datenquelle ist das ERP-System des Maschinenanwenders, welches im Jahr 2014 im Unternehmen implementiert wurde. Der Datensatz bezieht sich nur auf die oben genannten Maschinen. Im Datensatz sind alle Aufträge, welche auf den Maschinen gefertigt wurden, ab 2014 hinterlegt.
- Der Datensatz wurde als .csv-Datei zur Verfügung gestellt. Dieser enthält insgesamt 9278 Einträge. Für die ausgewählten Werkzeugmaschinen sind bei der DMC-U 3168 Einträge, bei der DMC-FD 6111 Einträge im Datensatz vorhanden. Der Datensatz ist tagesweise aufgeschlüsselt und beschreibt je Auftrag das gefertigte Produkt, die notwendigen Prozesse zur Herstellung, die gefertigte Menge sowie die Zeit des Prozesses.
- Der Datensatz wurde explorativ untersucht. So konnten für die Nutzungsdauer, die Losgrößen und weiterer Werte Verteilungen generiert werden. Diese weisen auf unterschiedliche Arten der Nutzung der beiden Maschinen hin.

- Bei der Verifizierung der Datenqualität sind keine Probleme zu erkennen. Der Datensatz ist vollständig und verständlich. Die gefertigten Produkte sind namentlich beschrieben, die potenzielle Belastung auf die Maschine lässt sich nicht direkt ablesen.

Datenvorbereitung (engl. data preparation)

Nachdem der Datensatz verstanden ist, wird dieser im nächsten Schritt für die Modellierung präpariert. Folgend soll nur auf die grundlegende Datenvorbereitung eingegangen werden. Teilweise ist eine Manipulation der Daten für einzelne Funktionen der Modellierung und Simulation notwendig. Diese sollen nicht betrachtet werden.

Instandhaltungsdaten:

- Es werden alle Daten bis zur Inbetriebnahme der Maschinen ausgewählt, damit der Datensatz so groß wie möglich ist. Obwohl 500 Ereignisse groß erscheinen, wird der Datensatz durch Separierung auf Baugruppenebene und nach Bereinigung zur Modellierung wesentlich kleiner.
- Die Bereinigung des Datensatzes ist aufwändig und wurde automatisiert, zum Teil manuell angepasst. Alle Schritte der Bereinigung wurden gemeinsam mit Mitarbeitern des Industriepartners durchgeführt. Hierbei wurden unter anderem folgende Annahmen getroffen:
 - Eindeutige Fehler im Datensatz, etwa die Verschiebung einer Zehnerpotenz, wurden händisch in der Ursprungsdatei angepasst.
 - Für fehlende Einträge zu Stillstandzeiten wurde ein Mindestwert von einem Tag angenommen. Sind keine Zeiten der Instandhaltung eingetragen, kann diese als nicht signifikant und vernachlässigbar angenommen werden.
 - Unrealistische Einträge wurden entfernt. Diese sind jedoch nur in geringer Menge vorhanden.
 - Fehlerhafte Zuordnungen wurden korrigiert
- Die Konstruktion der Daten führt zu einem für die Modellierung nutzbaren Datensatz. Hierzu mussten für alle Aufträge die Einträge im Datensatz zusammengefasst werden. Beispielweise sind für ein Ereignis mehrere Einträge vorhanden, welche sich etwa in der Beschaffung des Ersatzteiles unterscheiden.

- Die Zuordnung der Ereignisse zu den jeweiligen Baugruppen musste nachträglich durchgeführt werden. Hierfür wurde der Freitext nach definierten Begriffen aus einer Nachschlagetabelle automatisiert durchsucht, welche eine Zuordnung gestatten. Mit Experten des Industriepartners wurden die Baugruppen definiert, welche folgende Kriterien erfüllen:
 - Ausreichend viele Ereignisse je Baugruppe, sodass eine Modellierung möglich ist
 - Eindeutige Zuordnung der Ereignisse zur Baugruppe
 - Abgrenzung des Ausfallverhaltens gegenüber anderen Baugruppen, bspw. Zusammenfassen elektronischer Komponenten.
- Die Ereignisse wurden unterschiedlichen Ausfallursachen zugeordnet, bspw. Verschleiß. Dies konnte in vielen Fällen jedoch nicht aus dem Freitext entnommen werden, sodass diese Information eingeschränkt nutzbar ist. Ähnliches gilt für die Information, ob die Komponente getauscht wurde. Diese ist nur sehr lückenhaft vorhanden, vor 2014 fehlt die Information gänzlich. Diese Information kann damit nicht genutzt werden.

Betriebsdaten:

- Eine Bereinigung der Daten war nicht notwendig. Diese konnten in der bestehenden Form genutzt werden.
- Zur Beschreibung der Belastung über die Betriebsdaten wurden die Aufträge bewertet. Hierzu wurden durch Experten des Industriepartners die produzierten Produktklassen hinsichtlich der Belastung auf die Maschine im Produktionsprozess bewertet. Auf einer Skala wurde den Produktklassen ein Belastungswert von 0 – 10 zugeordnet. Dies wurde allen Produkten im Datensatz zugeordnet, sodass über eine approximierete Belastung über die Zeit die Maschinennutzung beschrieben wurde. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Beschreibung der Belastung das Ziel hat, multivariate Ansätze der Modellierung zu nutzen.

Bis zu diesem Punkt ist die Datenvorbereitung sehr spezifisch auf den Datensatz anzuwenden und nicht automatisierbar. Liegt der Datensatz in dieser Form vor, sind die weiteren Schritte automatisiert durchführbar.

Modellierung (engl. modelling)

In der Modellierung werden Verfahren zur Datenanalyse definiert, angewendet und die Ergebnisse bewertet. Folgend werden diese drei Schritte für beide Datenquellen zur Modellierung der Verteilungsfunktionen beschrieben.

Es werden die zuvor definierten parametrischen Modelle genutzt, dessen Parameter bestimmt und die Metriken zur Auswahl des Modells verglichen. Die Modellierung findet in der Programmiersprache Python statt. Alle Ergebnisse werden automatisiert erzeugt und gesammelt. In den folgenden Tabellen werden jeweils die beste Verteilung und die gemischten Verteilungen je Baugruppe zusammengefasst. Bei den gemischten Verteilungen wird die MFM als passend definiert. Der Vergleich der Verteilungen erfolgt auf Basis von AICs und BIC, da diese die Anzahl der Parameter je Verteilung mit in die Berechnung aufnehmen. Je kleiner der Wert, desto besser bildet die theoretische Verteilung die empirischen Daten ab. Im Anschluss werden die theoretischen Verteilungen mit den empirischen Daten visuell verglichen. Über den visuellen Vergleich erfolgt die endgültige Auswahl der Verteilung.

Instandhaltungsdaten:

Tabelle 34 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Ausfälle aller Komponenten im Industriebeispiel

Baugruppe	Verteilung	Parameter	Metriken
Spindel	1-Parameter Exponentialverteilung	$\lambda = 0,002$	AICs = 239,395 BIC = 240,036
	MFM	$\alpha_1 = 225,672$ $\beta_1 = 1,545$ $\alpha_2 = 706,468$ $\beta_2 = 6,954$	AICs = 244,228 BIC = 242,939
Vorschubachsen	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 1603,12$ $\beta = 0,344$ $\mu = 45,999$	AICs = 141,529 BIC = 139,294
	MFM	$\alpha_1 = 284,896$ $\beta_1 = 1,272$ $\alpha_2 = 1366,45$ $\beta_2 = 4,215$	AICs = 170,233 BIC = 156,746

Fluidtechnik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 518,218$ $\beta = 0,562$ $\mu = 6,999$	AICs = 319,676 BIC = 322,19
	MFM	$\alpha_1 = 163,23$ $\beta_1 = 1,002$ $\alpha_2 = 702,05$ $\beta_2 = 2,071$	AICs = 331,325 BIC = 333,882
Pneumatik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 2915,14$ $\beta = 0,323$ $\mu = 45,999$	AICs = 97,932 BIC = 89,769
	MFM	$\alpha_1 = 753,722$ $\beta_1 = 1,293$ $\alpha_2 = 1679,54$ $\beta_2 = 21,312$	AICs ⁵⁰ = - BIC = 99,996
Werkzeugwechsler	1-Parameter Exponentialverteilung	$\lambda = 0,004$	AICs = 432,242 BIC = 433,676
	MFM	$\alpha_1 = 120,965$ $\beta_1 = 1,348$ $\alpha_2 = 640,283$ $\beta_2 = 2,619$	AICs = 434,196 BIC = 439,685
Elektronik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 741,948$ $\beta = 0,382$ $\mu = 3,999$	AICs = 313,501 BIC = 316,184
	MFM	$\alpha_1 = 26,4217$ $\beta_1 = 1,065$ $\alpha_2 = 598,744$ $\beta_2 = 2,037$	AICs = 324,991 BIC = 327,927
Beschickung	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 967,659$ $\beta = 0,402$ $\mu = 4,999$	AICs = 216,674 BIC = 217,327
	MFM	$\alpha_1 = 124,755$ $\beta_1 = 0,708$ $\alpha_2 = 879,378$ $\beta_2 = 1,981$	AICs = 235,449 BIC = 233,312
Strukturbauteile	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 1896,04$ $\beta = 0,307$ $\mu = 63,999$	AICs = 113,959 BIC = 109,751

⁵⁰ AICs kann nicht berechnet werden, da zu wenige Daten zur Verfügung stehen.

	MFM	$\alpha_1 = 231,1920$ $\beta_1 = 1,888$ $\alpha_2 = 2035,527$ $\beta_2 = 17,566$	AICs = 147,187 BIC = 117,585
Peripherie	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 4648,01$ $\beta = 0,215819$ $\mu = 53.999$	AICs = 76,096 BIC = 50,924
	MFM ⁵¹	-	AICs = - BIC = -
Sonstiges ⁵²	-	-	-
Gesamte Maschine ⁵³	-	-	-

Im Falle der Ausfalldauern, der Kosten und Dauern der Instandhaltungstätigkeit sind weniger Informationen im Datensatz vorhanden. Das Generieren von Verteilungsfunktionen für die Kosten des Ausfalls durch Austausch von Komponenten war nicht möglich. Daher werden nach [GUT17] die Verteilungsfunktionen zum Teil über Gleich- oder Dreiecksverteilung angenähert. Weiter können die empirischen Daten den Wert 0 annehmen, welche bei einigen Verteilungen ausgeblendet werden. Diese werden in diesem Fall als zusätzlicher Anteil nach Erstellung der Verteilung separat definiert.

Tabelle 35 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Kosten aller Komponenten im Industriebeispiel

Baugruppe	Verteilung	Parameter	Metriken
Spindel	Dreiecksverteilung	$a = 0$ $c = 3000$ $b = 30000$	-
Vorschubachsen	Dreiecksverteilung	$a = 0$ $c = 3000$ $b = 12000$	-

⁵¹ Zur *Peripherie* werden nur fünf Ausfälle gezählt. Hierdurch lassen sich keine gemischten Modelle ableiten.

⁵² Unter *Sonstiges* fällt im Datensatz nur die Wartung. Damit wird dieser Bestandteil vernachlässigt.

⁵³ Die Ereignisse, welche unter *Gesamte Maschine* subsummiert sind, sind Wartungsarbeiten oder andere Tätigkeiten, welche außergewöhnlich sind nicht mit der Fragestellung der Arbeit in Verbindung zu bringen sind. Daher wird diese Gruppe vernachlässigt.

Fluidtechnik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 5305,463$ $\beta = 0,154$ $\mu = 73,599$	AICs = 42,124 BIC = 3,073
Pneumatik	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 300 b = 1300	-
Werkzeugwechsler	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 933,232$ $\beta = 0,23901$ $\mu = 154,4999$	AICs = 92,738 BIC = 86,976
Elektronik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 10718,370$ $\beta = 0,131$ $\mu = 52,359$	AICs = 39,845 BIC = 2,9770
Beschickung	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 300 b = 2000	-
Strukturbauteile	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 300 b = 3000	-
Peripherie	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 300 b = 1100	-

Im Falle der Ausfalldauern liegen Daten bis auf den Beginn der Maschinennutzung vor. Zudem sind die meisten Ereignisse mindestens durch die Dauer des Ausfalls charakterisiert. Daher werden für die Dauern Ausfallverteilungen generiert (siehe Tabelle 36).

Tabelle 36 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Ausfalldauern aller Komponenten im Industriebeispiel

Baugruppe	Verteilung	Parameter	Metriken
Spindel	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 43,527$ $\beta = 0,232$ $\mu = 0,999$	AICs = 67,897 BIC = 68,215
Vorschubachsen	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 83,967$ $\beta = 0,172$ $\mu = 1,999$	AICs = 32,685 BIC = 28,476
Fluidtechnik	2-Parameter Exponentialverteilung	$\mu = 0,499$ $\lambda = 0,397$	AICs = 89,237 BIC = 90,787

Pneumatik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 9,704$ $\beta = 0,288$ $\mu = 0,499$	AICs = 41,025 BIC = 15,853
Werkzeugwechsler	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 45,534$ $\beta = 0,238$ $\mu = 0,999$	AICs = 120,433 BIC = 123,430
Elektronik	3-Parameter Weibull- verteilung	$\alpha = 1,864$ $\beta = 0,453$ $\mu = 0,499$	AICs = 68,439 BIC = 69,396
Beschickung	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 25,456$ $\beta = 0,274$ $\mu = 0,999$	AICs = 65,725 BIC = 65,667
Strukturbauteile	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 6,337$ $\beta = 0,338$ $\mu = 0,579$	AICs = 41,175 BIC = 16,003
Peripherie	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 24,847$ $\beta = 0,274$ $\mu = 1,499$	AICs = 48,912 BIC = 23,740

Im Falle der Dauer der Instandhaltungstätigkeiten sind Daten ab 2014 vorhanden. Zwischen der Ausfalldauer und der Dauer der Instandhaltung lässt sich keine Korrelation ableiten. Zudem sind Ereignisse vorhanden, bei welchen die Ausfalldauer der Maschine 0 Tage beträgt, die Dauer der Instandhaltung jedoch mehrere Stunden bis Tage. Dies wird so interpretiert, dass diese Instandhaltungsmaßnahmen nicht zum Stillstand der Maschine geführt haben. Durch die wenigen zur Verfügung stehenden Daten werden unter anderem Dreiecksverteilungen genutzt (vgl. [GUT17]), welche zum Teil auf Schätzungen auf Basis weniger Daten beruhen (siehe Tabelle 37). Damit sichergestellt werden kann, dass die Verteilungen realistisch sind, wurden diese mit der zweiten Werkzeugmaschine verglichen. Die Einheit der Dauer ist Minuten.

Tabelle 37 Angaben zu Verteilungen, Parameter und Metriken der Dauer der Instandhaltungstätigkeiten aller Komponenten im Industriebeispiel

Baugruppe	Verteilung	Parameter	Metriken
Spindel	Dreiecksverteilung	$a = 0$ $c = 180$ $b = 500$	-

Vorschubachsen	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 400 b = 1500	-
Fluidtechnik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 656,359$ $\beta = 0,339$ $\mu = 29,999$	AICs = 104,280 BIC = 98,518
Pneumatik	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 240 b = 400	-
Werkzeug- wechsler	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 668,247$ $\beta = 0,367$ $\mu = 14,999$	AICs = 152,357 BIC = 150,810
Elektronik	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 396,026$ $\beta = 0,306$ $\mu = 29,999$	AICs = 91,733 BIC = 85,971
Beschickung	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 1049,690$ $\beta = 0,161$ $\mu = 29,999$	AICs = - BIC = 23,737
Strukturbauteile	3-Parameter Gammaverteilung	$\alpha = 420,416$ $\beta = 0,214$ $\mu = 29,999$	AICs = - BIC = 34,742
Peripherie	Dreiecksverteilung	a = 0 c = 180 b = 600	-

Folgend erfolgt stellvertretend die visuelle Analyse des Ausfallverhaltens der Baugruppe Spindel. Den statistischen Metriken folgend, sollte die Exponentialverteilung ausgewählt werden. Diese würde den Schluss zulassen, dass die Ereignisse zufällig und ohne Gedächtnis auftreten. Im Histogramm der Abbildung 55 lässt sich jedoch erkennen, dass die Verteilung aus zwei Untergruppen besteht, welche verschiedene Ausfallverhalten aufweisen. Das gleiche Verhalten lässt sich auch in den QQ- und PP- und Wahrscheinlichkeitsdiagrammen erkennen, welche eine ungenügende Passung der Exponentialfunktion darstellt. Dabei ist eine S-Kurve im Wahrscheinlichkeitsdiagramm zu erkennen, welche auf eine gemischte Verteilung hinweist. In Abbildung 54 ist das Wahrscheinlichkeitsdiagramm inklusive der cdf des oben beschriebenen MFM-Modells dargestellt. Hieraus wird geschlussfolgert, dass die Baugruppe Spindel durch das MFM-

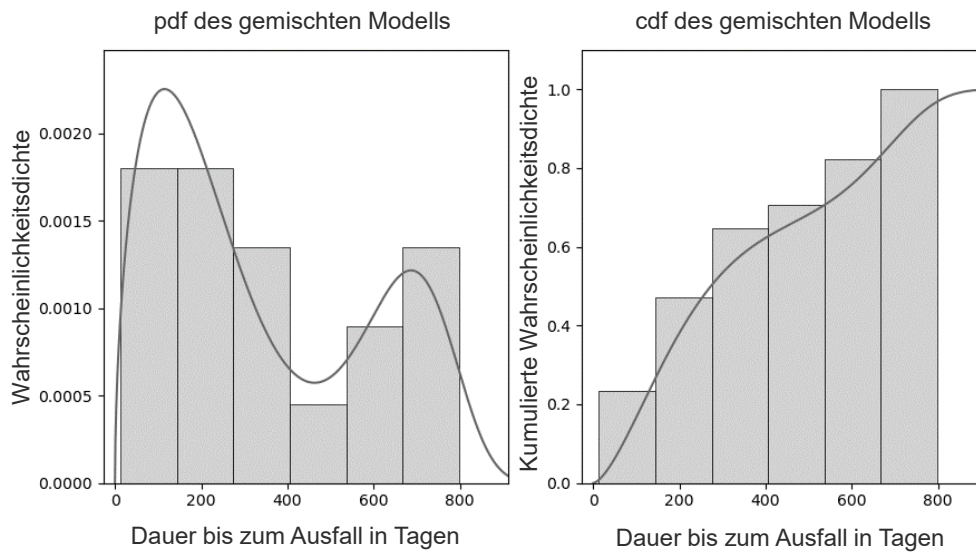


Abbildung 55 Histogramm und theoretische Verteilungsfunktion (pdf und cdf) der gemischten Verteilung aus zwei 2-Parameter Weibull-Verteilungen der Baugruppe Spindel

Modell besser beschrieben wird als durch die Exponentialfunktion. Die gleiche Schlussfolgerung wurde für die Baugruppe der Vorschubachsen abgeleitet.

Betriebsdaten:

Die Betriebsdaten werden auf Tagesbasis ermittelt und geben an, wie viele Produkte am Tag auf der Maschine zurückgemeldet wurden, wie viel Zeit der Fertigungsprozess in Anspruch genommen hat und den Grad der Belastung durch diesen Prozess. In Tabelle 38 sind die Verteilungen und deren Parameter zusammengefasst. Auf Monats-ebene sind die Ergebnisse in Tabelle 39 dargestellt.

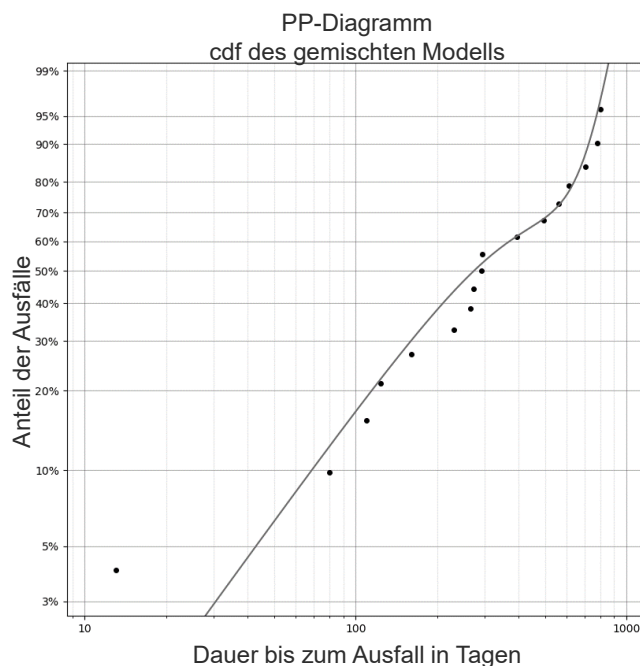


Abbildung 54 Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Baugruppe Spindel inklusive MFM-Modell

Tabelle 38 Tagesweise geschätzte Belastung

Modellierter Wert	Verteilung	Parameter
Anzahl Produkte	3-Parameter Gamma	$\alpha = 19,501$ $\beta = 0,829$ $\mu = 0,999$
Dauer Fertigung	2-Parameter Gamma	$\alpha = 5,278$ $\beta = 2,377$
Geschätzte Belastung	2-Parameter Gamma	$\alpha = 43,745$ $\beta = 1,525$

Tabelle 39 Monatsweise geschätzte Belastung

Modellierter Wert	Verteilung	Parameter
Anzahl Produkte	2-Parameter Normal	$\mu = 280,471$ $\sigma = 110,122$
Dauer Fertigung	2-Parameter Normal	$\mu = 208,314$ $\sigma = 76,616$
Geschätzte Belastung	2-Parameter Normal	$\mu = 1089,830$ $\sigma = 471,905$

Evaluation (engl. evaluation)

In der Evaluation werden die Modelle vor dem Hintergrund der definierten Ziele evaluiert. Hierbei spielt die weitere Nutzung der Modelle eine zentrale Rolle. Die Verteilungen wurden zum einen mit dem Industriepartner validiert, welcher die Maschinen nutzt. Zum anderen wurden die Verteilungen mit dem Hersteller gemeinsam evaluiert. Hierbei wurde geprüft, ob die Verteilungen mit den Informationen und Erfahrungen des Herstellers vergleichbar sind. Es kann festgehalten werden, dass die Verteilungen der genannten Maschinen keine Ausreißer darstellen. Die Validierung der Verteilungen ist Kapitel 5.2.5 zu entnehmen.

Anwendung / Bereitstellung (engl. deployment)

Nachdem die Verteilungen softwaretechnisch implementiert sind, können Ereignisse im Rahmen der Simulation des Anwendungsfalls generiert werden. Des Weiteren werden die Verteilungen dazu genutzt, die Instandhaltungsvorgänge zu charakterisieren. Die Betriebsdaten werden für die Beschreibung der Belastung genutzt.

A.2.2 Modellierung der Anreizwirkung

Anreizwirkung: Ereignissimulation

Die Anreizwirkung im Sinne der Ereignissimulation wird durch die Manipulation der Parameter der MFM der Spindel und der Vorschubachsen aus Tabelle 34 durchgeführt. Hierzu werden in Tabelle 40 ausschließlich die Parameter der Ausfallverteilungen angepasst.

Tabelle 40 Manipulation der Parameter der Ausfallverteilung

Baugruppe	Verteilung	Parameter
Spindel	MFM	$\alpha_1 = 225,672$ $\beta_1 = 1,545$ $\alpha_2 = 706,468$ $\beta_2 = 6,954$ $\mu_2 = 150$
Vorschubachsen	MFM	$\alpha_1 = 284,896$ $\beta_1 = 1,272$ $\alpha_2 = 1366,450$ $\beta_2 = 4,215$ $\mu_2 = 250$

Anreizwirkung: Betriebsdatensimulation

Die Anreizwirkung hinsichtlich der Betriebsdatensimulation wird bereits durch die Manipulation der Ausfallverteilungen implementiert. Es erfolgt dadurch eine indirekte Beeinflussung des stochastischen Prozesses. Der Zusammenhang wird in Abschnitt 4.7.2 erläutert.

Anreizwirkung: Kostenfaktorensimulation

Die unsicheren Kosten können nach dem Vorbild der Manipulation der Ereignisverteilungen verändert werden. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden, da eine Einschätzung auf Grund der mangelnden Datenbasis nicht möglich ist.

A.3 Untersuchungsergebnisse

A.3.1 Instandhaltungskosten: Untergliederung

Instandhaltungskosten Anreizwirkung: Detailansicht

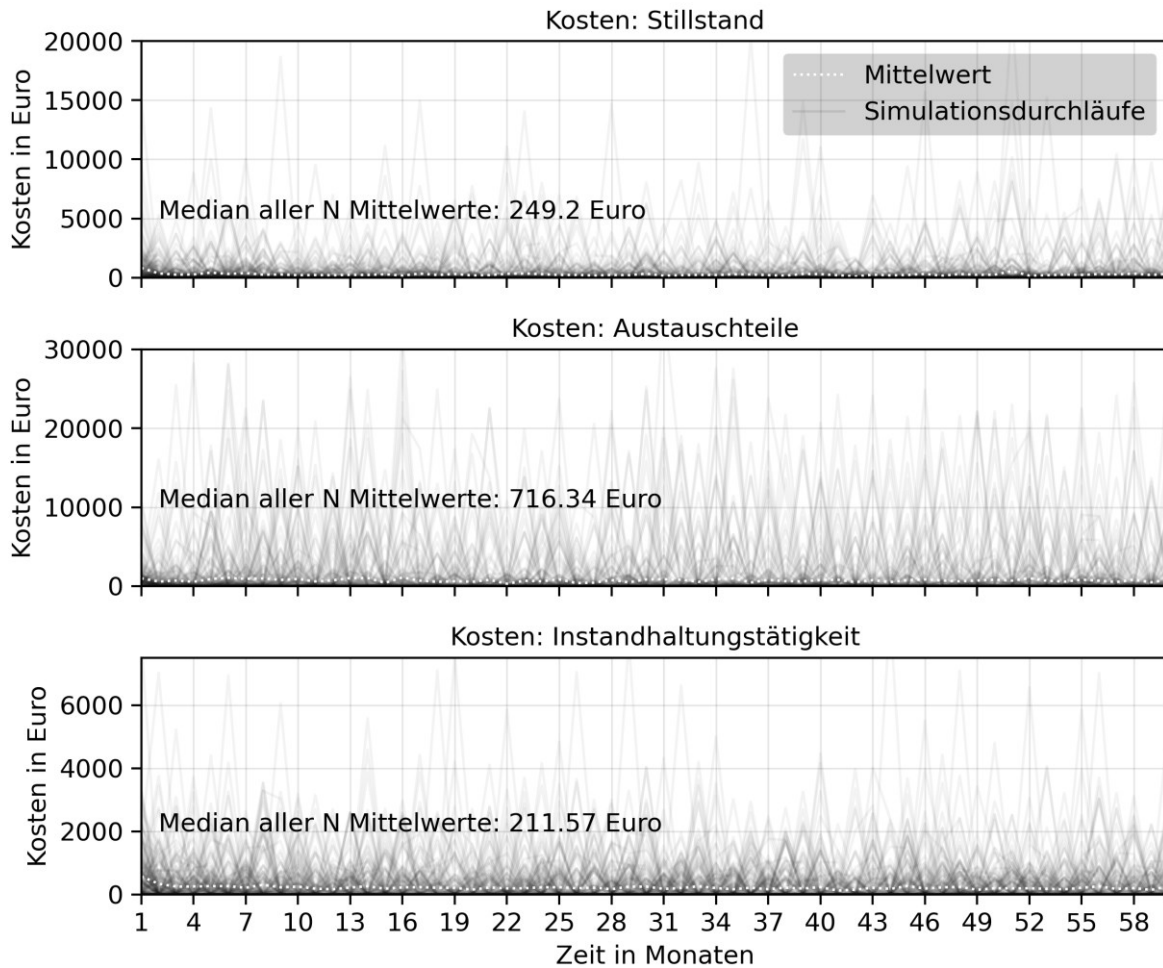


Abbildung 56 Instandhaltungskosten im Detail über die Grundmietzeit in AW

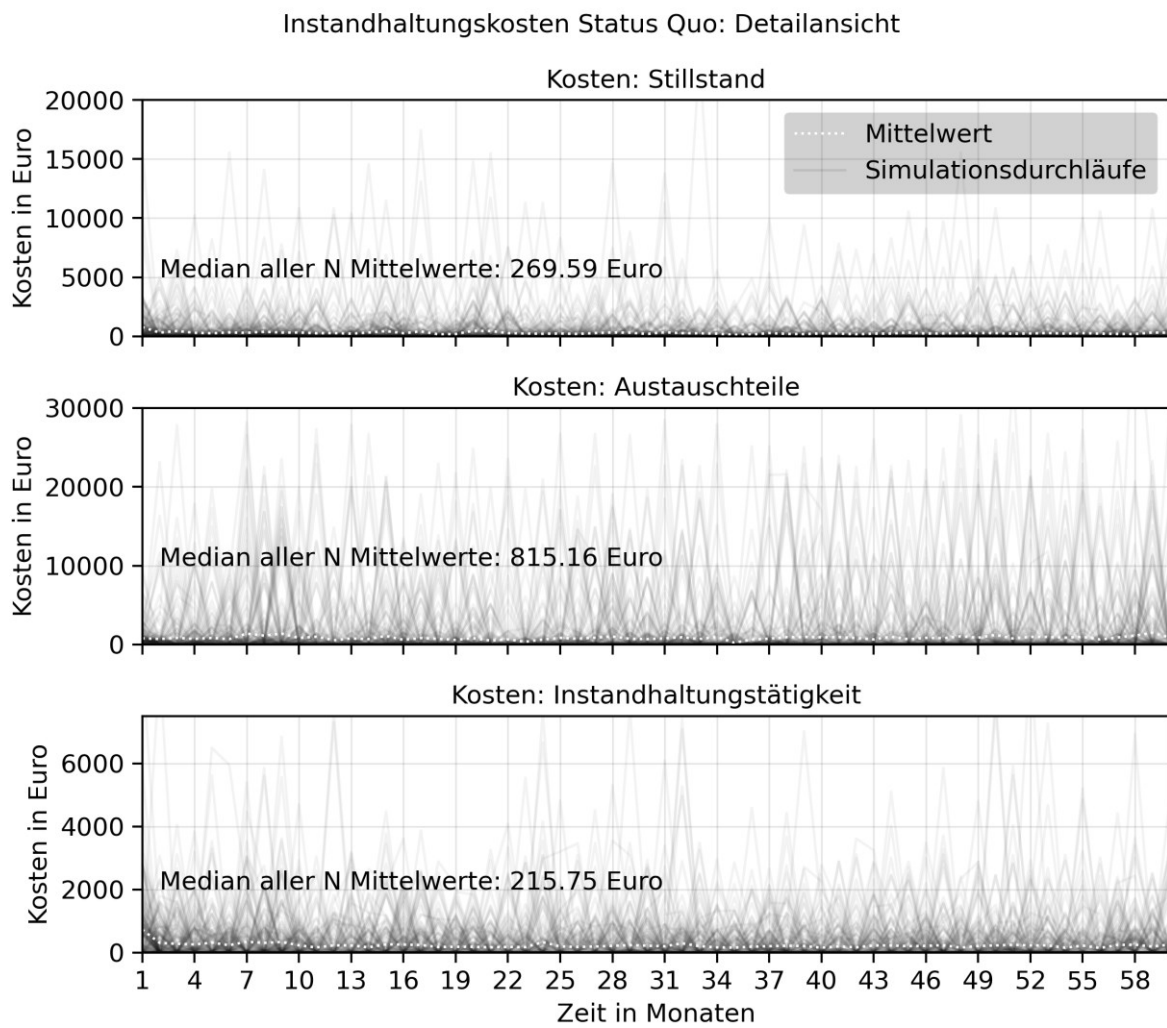


Abbildung 57 Instandhaltungskosten im Detail über die Grundmietzeit in SQ

A.3.2 Lebenszykluskosten: Untergliederung

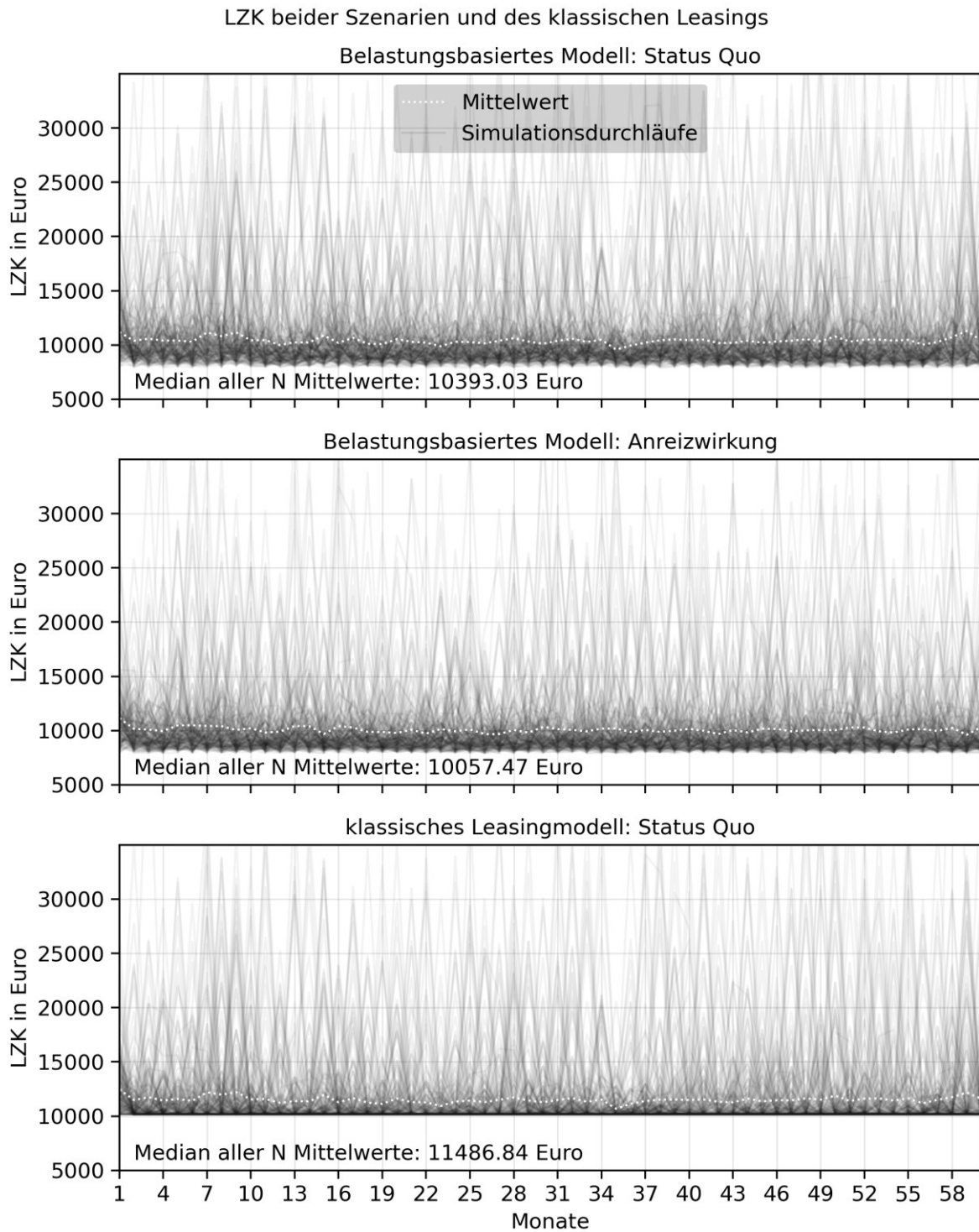


Abbildung 58 LZK über die Grundmietzeit für alle Szenarien (AW und SQ der LZK)

A.3.3 Full-Service-Leasing

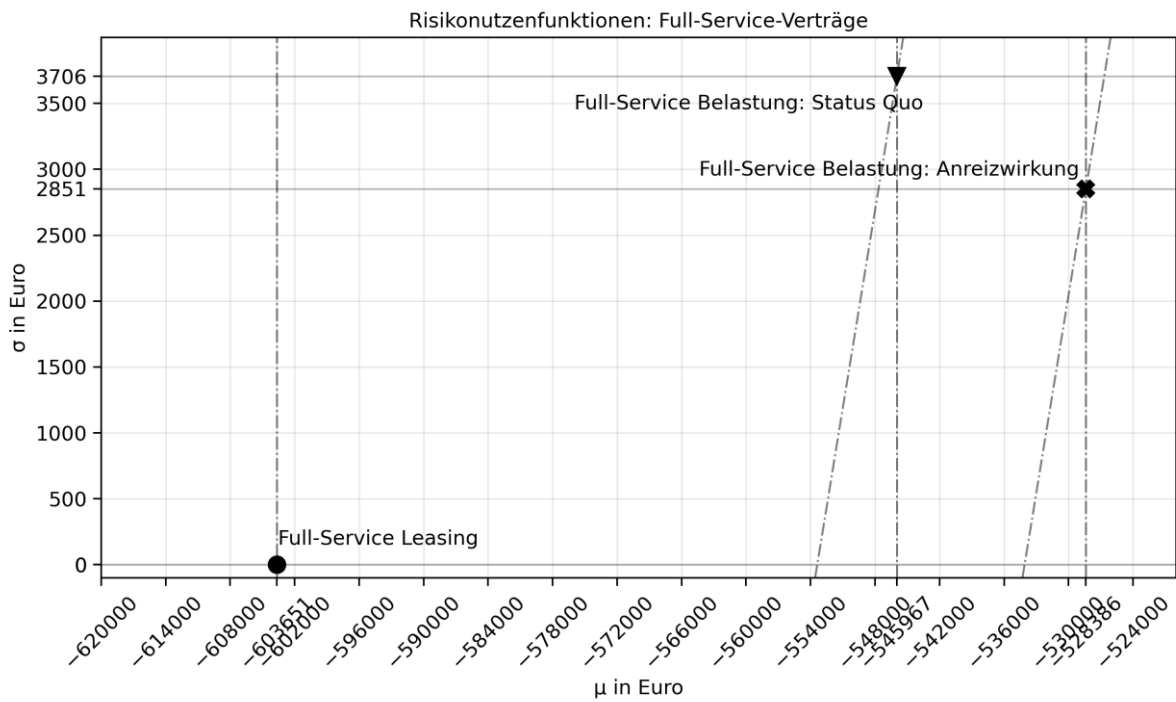


Abbildung 59 Risikonutzenfunktionen der alternativen Investitionsentscheidungen beim Full-Service-Vertrag

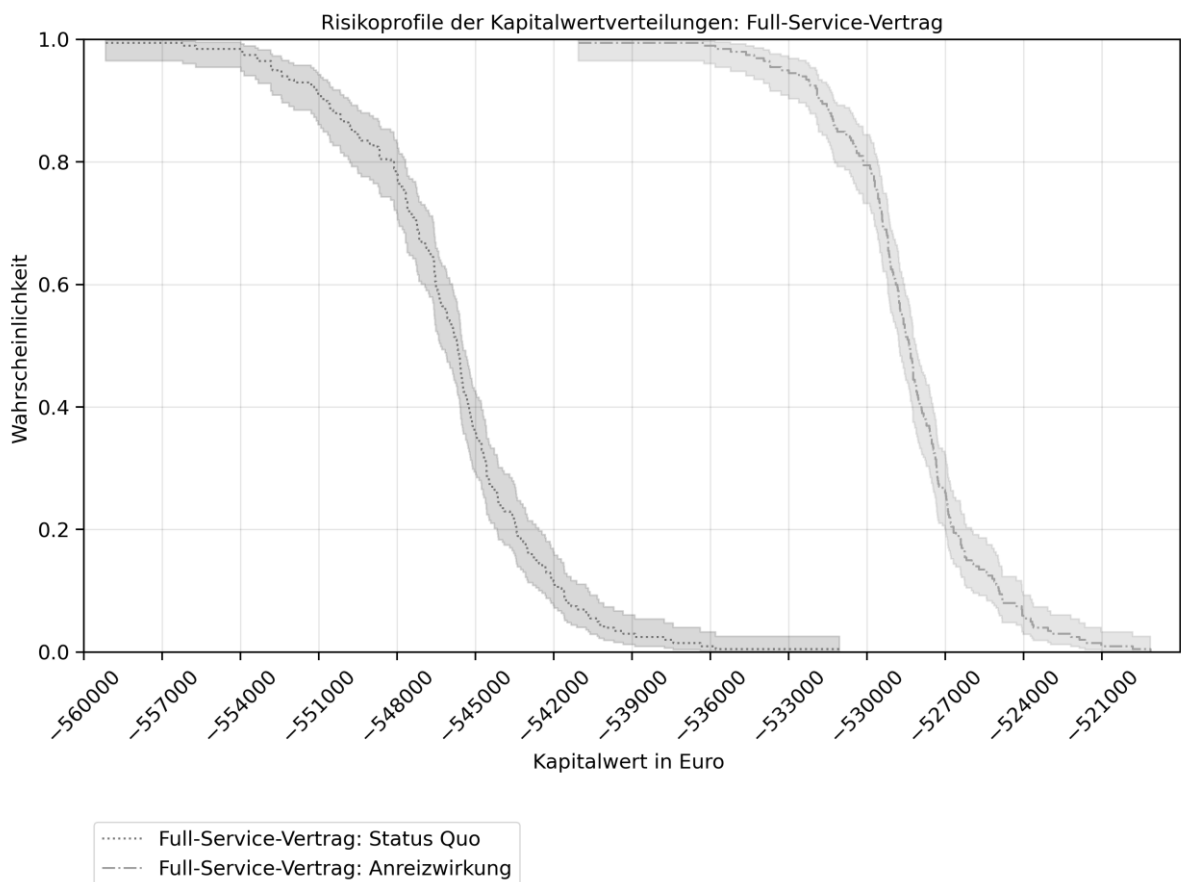


Abbildung 60 Risikoprofile der Kapitalwertverteilung der Anwendungsfälle SQ und AW bei Betrachtung von Full-Service-Verträgen