

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten
für Flugzeugtriebwerks-Rotoren**

Dipl.-Ing.

Alexander Götzfried

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Uihlein
Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Die Dissertation wurde am 08.01.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 15.04.2013 angenommen.

Alexander Götzfried

**Analyse und Vergleich fertigungstechnischer
Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 277

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2013

ISBN 978-3-8316-4310-3

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München. Die beschriebenen Forschungsarbeiten wurden teilweise in Kooperation mit der MTU Aero Engines GmbH durchgeführt.

Zunächst gilt mein Dank den Leitern dieses *iwb*, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, da sie mir die Anfertigung der vorliegenden Arbeit überhaupt ermöglicht haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh danke ich zudem für die Unterstützung und die Förderung meiner Arbeit auch über meine Institutszeit hinaus. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Uihlein, Honorarprofessor an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und Leiter des Projektes *Studie zur Fertigung und Montage von Turbinenbliskens für hohe Belastungen* von Seiten der MTU Aero Engines GmbH, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und die sehr angenehme Zusammenarbeit während der gesamten Projektlaufzeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank den ehemaligen Kolleginnen und Kollegen in zweifacher Hinsicht. Zum einen für die konstruktiven, fachlichen Diskussionen besonders im Geschäftsfeld Fertigungstechnik und im Forschungsfeld Qualitätslenkung. Zum anderen dafür, dass ich mich immer sehr gerne an meine Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *iwb* Anwenderzentrum Augsburg zurück erinnern werde.

Den Studierenden, die meine Forschung begleitet haben, danke ich für ihr Interesse und ihr Engagement. Den Mitarbeitern der MTU Aero Engines GmbH, die mich während der Projektlaufzeit begleitet haben, möchte ich für die Gastfreundschaft und die konstruktive Projektarbeit danken.

Bei meiner Verlobten, meiner Familie und meinen Freunden bedanke ich mich ganz herzlich für den großartigen Rückhalt und die zeitlichen Freiräume, um diese Arbeit erstellen zu können. Ohne den Ausgleich, den sie mir gegeben haben, könnte ich heute nicht das Vorwort meiner Dissertation schreiben.

Augsburg, im Juli 2013

Alexander Götzfried

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation der Arbeit	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Flugzeugtriebwerks-Rotoren	4
1.3.1 Prinzipieller Aufbau von Flugzeugtriebwerken	4
1.3.2 Konventionelle Bauweise von Rotoren	5
1.3.3 Bliskbauweise von Rotoren	6
1.4 Vorgehensweise	10
2 Stand der Wissenschaft und Technik	13
2.1 Allgemeines	13
2.2 Fertigungstechnische Prozessketten	13
2.2.1 Begriffsdefinition.....	13
2.2.2 Erstellung fertigungstechnischer Prozessketten	18
2.2.3 Strukturierung fertigungstechnischer Prozessketten	20
2.2.4 Strukturmaßnahmen zur Anpassung fertigungstechnischer Prozessketten	22
2.3 Grundlagen qualitätsrelevanter Aspekte.....	24
2.3.1 Qualität und Qualitätsmanagement	24

2.3.2	Produkt- und Prozessqualität	27
2.3.3	Toleranzmanagement	29
2.3.4	Qualitätsplanung mittels der FMEA.....	35
2.4	Grundlagen wirtschaftlicher Aspekte.....	37
2.4.1	Allgemeines	37
2.4.2	Kostenrechnung	38
2.4.3	Bestimmung von Materialkosten.....	43
2.4.4	Bestimmung von Platzkosten	44
2.5	Grundlagen des Variantenmanagements	49
2.6	Die aktuellen Ansätze zur Prozesskettenbetrachtung.....	51
2.6.1	Kostenorientierte Ansätze	51
2.6.2	Qualitätsorientierte Ansätze	54
2.6.3	Thematisch übergreifende Ansätze	56
2.7	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	59
3	Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau	63
3.1	Allgemeines	63
3.2	Definition des Betrachtungsraumes.....	63
3.3	Struktur der Methodik	65
3.4	Datenmanagement der Prozesskettenbetrachtung.....	68
3.4.1	Allgemeines	68
3.4.2	Datenquellen.....	68
3.4.3	Datenabbildung.....	71
3.4.4	Strukturierung von Prozessketten.....	72
3.5	Zusammenfassung	74

4	Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte	77
4.1	Allgemeines	77
4.2	Toleranzmanagement für Prozessketten	77
4.2.1	Vorgehensweise	77
4.2.2	Adaption eines bekannten Toleranzsystems.....	78
4.2.3	Aufbau eines neuen Toleranzsystems.....	79
4.2.4	Abgleich von Toleranzen und Abweichungen auf Prozessebene.....	82
4.3	Beschreibung von Fehlerpotenzialen.....	85
4.3.1	Vorgehensweise	85
4.3.2	Bestimmung und Auswahl potenziell kritischer Prozesse.....	86
4.3.3	Ermittlung möglicher Fehler.....	87
4.3.4	Bestimmung der Fehlerauswirkungen	87
4.3.5	Bestimmung der Fehlerursachen	87
4.3.6	Bestimmung des Fehlerpotenzials	88
4.3.7	Ableitung von Maßnahmen	89
4.3.8	Aggregation	90
4.4	Zusammenfassung	90
5	Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte.....	93
5.1	Allgemeines	93
5.2	Rohteilkosten	94
5.2.1	Bedeutung der Rohteilkosten.....	94
5.2.2	Kosten für Materialeinsatz.....	95
5.2.3	Wertschöpfung beim Urformen.....	97
5.3	Platzkosten.....	97

5.3.1	Allgemeines	97
5.3.2	Einflussgrößen der Platzkosten	98
5.3.3	Maschinenkosten	103
5.3.4	Personalkosten.....	103
5.3.5	Rüstkosten	104
5.4	Zusammenfassung	105
6	Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten	107
6.1	Allgemeines	107
6.2	Betrachtung von Prozesskettenvarianten.....	107
6.3	Variantenbetrachtung mittels Skalierungsgrößen	109
6.3.1	Vorgehensweise.....	109
6.3.2	Definition von Skalierungsgrößen.....	110
6.3.3	Überführung in fertigungstechnisch relevante Parameter	112
6.3.4	Beschreibung der Rotorveränderungen mittels Skalierungsgrößen	113
6.3.5	Beschreibung der Einflussgrößen der Fertigungsprozesse mittels Skalierungsgrößen	114
6.3.6	Abgleich anhand der Skalierungsgrößen.....	115
6.3.7	Quantifizierung durch Kostenwachstumsgesetze.....	116
6.4	Zusammenfassung	120
7	Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk	121
7.1	Allgemeines	121
7.2	Betrachtungsgegenstand <i>Turbinenblisk</i>	121
7.3	Alternative Prozessketten	123

7.4	Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte	125
7.4.1	Toleranzmanagement.....	125
7.4.2	Fehlerpotenziale.....	127
7.5	Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte	129
7.6	Betrachtung von Rotorvarianten.....	133
7.7	Fazit des Anwendungsbeispiels.....	135
8	Schlussbetrachtung.....	137
8.1	Nutzen der Methodik	137
8.1.1	Allgemeines	137
8.1.2	Reduzierung des Entwicklungsaufwandes	138
8.1.3	Vermeidung unternehmerischer Risiken	139
8.2	Zusammenfassung der Arbeit	139
8.3	Ausblick auf weitere wissenschaftliche Arbeiten.....	142
9	Literaturverzeichnis	145
10	Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel <i>gefügte Turbinenblik</i>	161
10.1	Prozesskette für den konventionellen Rotor	161
10.2	Prozesskette für die direkte Turbinenblik	162
10.3	Prozesskette für die indirekte Turbinenblik	163
10.4	Daten für die Fehlerpotenzialbetrachtung	164
10.5	Daten für die Berechnung der Rohteilkosten	167
10.6	Prozessdaten für die Referenzanwendung	168
10.7	Daten für die Variantenbetrachtung	173

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

a	Annus (Jahr)
bzgl.	bezüglich
Blisk	Blade integrated disk (deutsch: Rotor, bei dem Scheibe und Schaufeln eine integrale Einheit bilden)
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
ca.	circa
CIP	Continuous Improvement Process (deutsch: kontinuierlicher Verbesserungsprozess)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CROTA	Cost- and Riskoptimising Tolerance Allocation (deutsch: kosten- und risikoorientierte Toleranzgestaltung)
d. h.	das heißt
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DRBFM	Design Review Based on Failure Mode (deutsch: Konstruktionsänderung auf Grundlage von Fehlermöglichkeiten)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
€	Euro
etc.	et cetera (deutsch: und weitere)
e. V.	eingetragener Verein
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (deutsch: Fehler-Möglichkeiten- und -Einflussanalyse)
f./ff.	folgende/fortfolgende

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

FP	Fehlerpotenzial
GE	Geldeinheit (fiktiv)
i. d. R.	in der Regel
ISO	International Organization for Standardization
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
NO _x	Stickstoffoxide
PK	Prozesskette
%	Prozent
S.	Seite
QFD	Quality Function Deployment
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
VST	Verarbeitungsstückmenge
z. B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheit (fiktiv)

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	-	<i>axiale Richtung</i>
A_{ar}	mm^2	<i>Fläche in der ar-Ebene</i>
A_{at}	mm^2	<i>Fläche in der at-Ebene</i>
A_{rt}	mm^2	<i>Fläche in der rt-Ebene</i>
EM	kg	<i>Einsatzmasse</i>
φ_{fU}	-	<i>Änderung des Vorschubs pro Umdrehung beim Längsdrehen</i>
φ_L	-	<i>Änderung der Länge beim Längsdrehen</i>
φ_{LD}	-	<i>Änderung der Kosten beim Längsdrehen</i>
φ_{nD}	-	<i>Änderung der Drehzahl beim Längsdrehen</i>
FP_F	-	<i>Fehlerpotenzial eines Fehlers</i>
FP_P	-	<i>Fehlerpotenzial eines Prozesses</i>
FP_{Pk}	-	<i>Fehlerpotenzial einer Prozesskette</i>
f_U	mm/U	<i>Vorschub beim Längsdrehen</i>
k	-	<i>Laufvariable</i>
K_A	€/a	<i>kalkulatorische Abschreibung einer Maschine pro Jahr</i>
K_E	€/a	<i>Energiekosten einer Maschine pro Jahr</i>
K_F	€/a	<i>Flächenkosten einer Maschine pro Jahr</i>
K_I	€/a	<i>Instandhaltungskosten einer Maschine pro Jahr</i>
K_M	€	<i>Kosten für Materialeinsatz</i>
K_M	€	<i>Maschinenkosten eines Prozesses</i>
K_P	€	<i>Personalkosten eines Prozesses</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

K_R	€	Rüstkosten eines Prozesses
K_Z	€/a	kalkulatorische Zinsen einer Maschine
L	mm	Länge des Vorschubweges beim Längsdrehen
l_a	mm	Länge in axialer Richtung
l_r	mm	Länge in radialer Richtung
l_t	mm	Länge in tangentialer Richtung
m	-	Laufvariable
M_0	mm	Schließmaß einer Toleranzkette
M_0	mm	Schließmaß einer Toleranzkette
M_1	mm	Lagerbreite
M_2	mm	Hülsenbreite
M_3	mm	Zahnradbreite
M_4	mm	Wellenabsatz
M_5	mm	Nutbreite
M_6	mm	Breite des Sicherungsrings
MASS	€/h	Personalstundensatz (<u>M</u> itarbeiter <u>s</u> tundens <u>a</u> tz)
MEK	€	Materialeinzelkosten
MGK	€	Materialgemeinkosten
MK	€	Materialkosten eines Funktionsträgers
mk	€/kg	massespezifische Kosten für den Materialeinsatz
M_i	mm	Einzelmaß einer Toleranzkette
MSS	€/h	<u>M</u> aschinen <u>s</u> tundens <u>a</u> tz
n	-	Laufvariable
n_D	U/min	Drehzahl beim Längsdrehen

q	-	<i>Laufvariable</i>
r	-	<i>radiale Richtung</i>
R_A	-	<i>Kennziffer für die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers</i>
R_B	-	<i>Kennziffer für die Bedeutung eines Fehlers</i>
R_E	-	<i>Kennziffer für die Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers</i>
RPZ	-	<i>Risikoprioritätszahl</i>
t	-	<i>tangentiale Richtung</i>
T_1	<i>mm</i>	<i>kleine Maßtoleranz</i>
T_2	<i>mm</i>	<i>große Maßtoleranz</i>
t_{LD}	<i>min</i>	<i>Prozesszeit für das Längsdrehen</i>
t_M	<i>min</i>	<i>Maschinenzeit eines Prozesses</i>
t_P	<i>min</i>	<i>Personalzeit eines Prozesses</i>
t_R	<i>min</i>	<i>Rüstzeit eines Prozesses</i>
v	-	<i>Laufvariable</i>
V	<i>mm³</i>	<i>Volumen</i>
w	-	<i>Laufvariable</i>
x	<i>mm</i>	<i>Länge der Nut</i>
y	<i>mm</i>	<i>Tiefe der Nut</i>
z	<i>mm</i>	<i>Breite der Nut</i>

1 Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

„In einer Zeit der globalen Vernetzung sind Industrie und Handel mehr denn je auf schnelle Flugverbindungen zwischen Ländern und Kontinenten angewiesen“ (DFS 2008). Langfristig ist deshalb davon auszugehen, dass der Luftverkehr auf globaler Ebene deutlich zunimmt (DFS 2008). Nach einem Rückgang des weltweiten Passagier- und Frachtgeschäftes durch die Auswirkungen der Wirtschaftskrise im Jahr 2009 konnte ein erhebliches Wachstum, vor allem in Asien, aber auch in Europa verzeichnet werden. In Deutschland wurden im Jahr 2010 neue Höchststände in Bezug auf die Anzahl der Passagiere und die Menge der Luftfracht verzeichnet (DFS 2011). Die Luftfahrt ist „eine Wachstumsbranche und hat somit eine Schlüsselfunktion für ein gesundes Wirtschaftswachstum“ (LBA 2009). Dies lässt sich beispielsweise durch ihren Beitrag zur globalen Mobilität, die Schaffung von Arbeitsplätzen für hochqualifiziertes Personal und den Hochtechnologiecharakter begründen (EUROPEAN COMMISSION 2011).

Dennoch stellt sich die aktuelle Marktsituation für Luftfahrtunternehmen schwierig dar. Ein Zivilflugzeug soll sicher, sauber und bezahlbar sein (YAKINTHOS ET AL. 2007). Darüber hinaus sind auch in dieser Branche „erfolgreiche Produkte (...) eine wichtige Voraussetzung für eine prosperierende Wirtschaft“ (LINDEMANN 2009). Insbesondere der Umweltschutz tritt immer mehr in den Vordergrund und bildet einen zentralen Aspekt bei der Entwicklung neuer Luftfahrzeuge (EUROPEAN COMMISSION 2011). So sollen im Vergleich zum Jahr 2000 bis 2050 durch neue Technologien die CO₂-Emissionen eines Flugzeugs um 75 % und die NO_x-Emissionen um 90 % pro befördertem Passagier und geflogenem Kilometer reduziert werden (EUROPEAN COMMISSION 2011). Über den ökologischen Aspekt hinaus sind Fluggesellschaften zudem mit steigenden Treibstoffpreisen und wachsendem Konkurrenzdruck konfrontiert, wodurch die Forderung nach effizienten Flugzeugen gestärkt wird (LBA 2009). Künftig sollen deshalb durch die Realisierung neuer Technologien Flugzeuge ökonomischer, ökologischer und sicherer werden. Um dies zu erreichen, steht dabei z. B. der Leichtbau durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen und nietenfreien Strukturen im Fokus. Zukünftige Flugzeugtriebwerke sollen im Vergleich zu heutigen zuverlässiger sein und dabei geringere Betriebskosten sowie deutlich weniger Emissionen verursachen (WELLS ET AL. 2001). Zukunftsweisende Technologien hierfür sind unter anderem komplexe Schaufelgeometrien und neuartige Rotoren mit integralen Schau-

1 Einleitung

feln, sogenannte Blisks (Blade integrated disks; femininum, da im Deutschen „Scheibe“) (ABELE & REINHART 2011). Aufgabenstellungen ergeben sich aus der Entwicklung solcher ressourceneffizienter Produkte, der anwendungsorientierten Gestaltung von Methoden und Werkzeugen sowie der Forderung nach deren Skalierbarkeit. Hinzu kommt allgemein die zunehmende Individualisierung von Kundenwünschen, ein Trend, der für zahlreiche Neuentwicklungen verantwortlich ist (ZÄH 2003). Daraus ergeben sich auch Forschungsbedarfe im Hinblick auf die Herstellung ressourceneffizienter Produkte. Dabei sind insbesondere die Formgebung und Funktionseinstellung in kombinierten Prozessen, Fertigungskonzepte für Leichtbauprodukte, das Lebenszyklusdesign und die technologieübergreifende Prozesskettengestaltung hervorzuheben (ABELE & REINHART 2011). Letztere ist von „wesentlicher Bedeutung für die Beherrschung der wirtschaftlichen und zugleich ökologischen Fertigung multifunktionaler, ressourceneffizienter Produkte“ (ABELE & REINHART 2011).

Insgesamt ist festzuhalten, dass großer Bedarf an der Verbesserung der Ressourceneffizienz von Flugzeugen besteht. Ein großes Potenzial bieten dabei innovative Triebwerkstechnologien wie z. B. neuartige Rotorkonzepte. Um diese realisieren zu können, ist neben der Produktentwicklung selbst die Gestaltung geeigneter Prozessketten zu deren Herstellung notwendig. Dadurch werden die Sicherstellung der Qualität der Produkte und gleichzeitig eine wirtschaftliche Fertigung unterstützt. Die vorliegende Arbeit greift dies auf und gibt eine methodische Hilfestellung vor dem Hintergrund der im nächsten Abschnitt aufgezeigten Zielsetzung.

1.2 Zielsetzung

In diesem Abschnitt wird die Zielsetzung zur Prozesskettenbetrachtung von Rotoren im Triebwerksbau definiert. Die hierfür notwendige Methodik ist dabei als planmäßiges Vorgehen zu verstehen, das sich aus einer Anzahl verschiedener Methoden bzw. Hilfsmittel zusammensetzt und diese zur Erreichung der Aufgabenstellung in geeigneter Weise kombiniert (PAHL 2005). Im Rahmen dieser Arbeit sollen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- **Priorisierung:** Die Ergebnisse der Methodik sollen einen direkten Vergleich von Fertigungsalternativen ermöglichen. Im Hinblick auf den ganzheitlichen Charakter sind hierfür die gesamten Prozessketten als Vergleichsobjekte heranzuziehen.

- **Integration:** Die Methodik soll vornehmlich für die Anwendung im Rahmen einer Produktentwicklung ausgelegt und in diese eingebunden werden. Es soll jedoch auch der serienbegleitende Einsatz der Methodik insgesamt oder in Teilen möglich sein.
- **Datenmanagement:** Die Prozesskettenbetrachtung für Rotoren von Flugzeugtriebwerken erfordert die Ermittlung, Verarbeitung und Abbildung einer Vielzahl von Daten. Die Methodik soll mögliche Informationsquellen und deren Verwendung aufzeigen, um fundierte Ergebnisse zu erreichen.

Über diese Teilziele hinaus sind bezüglich der inhaltlichen Fokussierung der Prozesskettenbetrachtung unterschiedliche Randbedingungen zu beachten:

- **Wirtschaftliche Aspekte:** Die Methodik soll wirtschaftlich relevante Größen innerhalb der Produktherstellung berücksichtigen und über die gesamte fertigungstechnische Prozesskette hinweg abbilden können.
- **Qualitätsrelevante Aspekte:** Die Methodik soll die Einflüsse der Gestaltung der fertigungstechnischen Prozesskette auf die Rotorqualität darstellen. Dies beinhaltet sowohl die Ableitung von Anpassungsmöglichkeiten der Prozesskette an die Anforderungen im Hinblick auf die Maßhaltigkeit als auch die Betrachtung prozessbedingter Quellen für Qualitätsmängel am Rotor.
- **Integration von Rotorvarianten:** Die Methodik soll die Abhängigkeit qualitätsrelevanter und wirtschaftlicher Aspekte vom Betrachtungsgegenstand abbilden können, d. h. es soll ermöglicht werden, die Ergebnisse für die Herstellung verschiedener Rotorvarianten zu vergleichen.

Insgesamt stellen die für eine Referenzanwendung sowie mögliche Rotorvarianten parallel zu betrachtenden Aspekte *Qualität* und *Kosten* die inhaltliche Fokussierung dar. Das hierfür notwendige Datenmanagement ist bereitzustellen und die Methodik in den Produktentwicklungsprozess einzubinden. Dadurch soll eine frühzeitige Priorisierung von Fertigungsalternativen ermöglicht werden.

Bevor die im Rahmen dieser Arbeit angewendete Vorgehensweise zur Erreichung der genannten Ziele aufgezeigt wird, stellt der nachfolgende Abschnitt den Rotor als Komponente eines Flugzeugtriebwerkes, seine Bauweisen sowie die für die Produktion benötigten Fertigungsverfahren vor, um zu verdeutlichen, wie unterschiedlich die Prozessketten möglicher Fertigungsalternativen sein können.

1.3 Flugzeugtriebwerks-Rotoren

1.3.1 Prinzipieller Aufbau von Flugzeugtriebwerken

Als *Flugzeugtriebwerke* im Rahmen dieser Arbeit sind luftatmende Triebwerke zu verstehen, die einen Verdichter und eine Turbine besitzen. Dies können sowohl Turbostrahl- als auch Wellenleistungstriebwerke sein. Erstere erzeugen ihren Schub ausschließlich „durch die aerothermodynamische Beschleunigung des sie durchströmenden Gases“, letztere übertragen die Leistung auf eine Welle, um den Antrieb von z. B. Hubschrauberrotoren, Propellern oder Generatoren zu ermöglichen (BRÄUNLING 2009). Beide zeichnen sich dadurch aus, dass der Druck der einströmenden Luft nicht nur durch den Staudruck entsteht, sondern durch einen oder mehrere *Rotationsverdichter* erhöht wird, bevor die Entzündung zusammen mit Kraftstoff in der Brennkammer erfolgt. Der Antrieb eines Rotationsverdichters wird durch eine *Turbine* realisiert, die nach der Brennkammer angeordnet und über eine Welle mit dem Verdichter verbunden ist. Zur Erhöhung der Effizienz werden in modernen Triebwerken, wie Abbildung 1 zeigt, mehrere Verdichter und Turbinen auf unterschiedlichen Druckniveaus eingesetzt (Nieder-, Mittel- und Hochdruckteil).

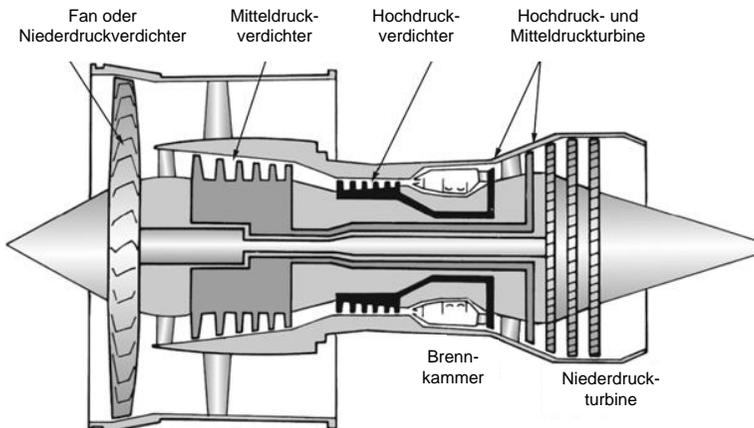


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Mehrwellen-Turbofan-Triebwerks mit Nieder-, Mittel- und Hochdruckteil (BRÄUNLING 2009)

Die einzelnen Verdichter und Turbinen wiederum können aus einer oder auch mehrerer *Stufen* aufgebaut sein, wobei eine Stufe immer aus einem *Stator* und einem *Rotor* besteht. Der *Stator* (auch *Leitrad* genannt) besitzt Schaufeln, die mit dem feststehenden Gehäuse verbunden sind. So wird die Luft gezielt auf die Schaufeln des nachfolgenden *Rotors* (auch *Lauftrad* genannt) geleitet, der über eine Scheibe mit der Welle des Triebwerks verbunden ist.

Die Herstellung der durch thermische und mechanische Belastungen hoch beanspruchten Triebwerks-Rotoren ist eine schwierige Fertigungsaufgabe. Prinzipiell existieren zwei Bauweisen, die sich in der Art der Kraftübertragung zwischen der Scheibe und den Schaufeln unterscheiden. Beim *konventionellen Rotor* erfolgt sie form- und kraftschlüssig, bei einer *Blisk* stoffschlüssig. Im Folgenden werden beide Bauweisen sowie die für ihre Produktion eingesetzten Fertigungsverfahren erläutert.

1.3.2 Konventionelle Bauweise von Rotoren

Rotoren in *konventioneller Bauweise* bestehen aus mehreren Bauteilen, die einzeln hergestellt und am Ende einer Prozesskette in einem Montageschritt zusammengesetzt werden. Die Kraftübertragung zwischen den Schaufeln und der Scheibe erfolgt form- und kraftschlüssig über die sogenannten Tannenbaumprofile (Abbildung 2).

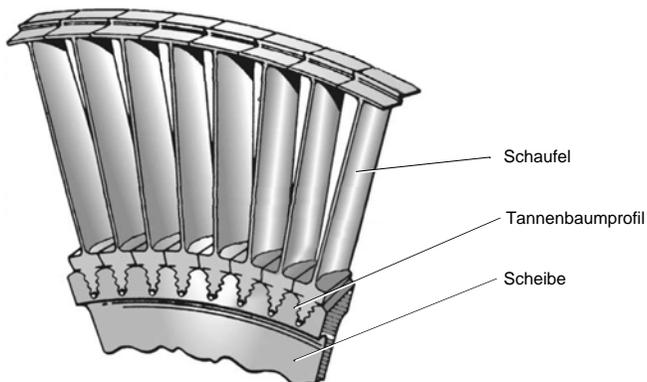


Abbildung 2: Verbindung zwischen den Schaufeln und der Scheibe bei einem konventionellen Rotor (BRÄUNLING 2009)

Zur Herstellung der Profile kommen unterschiedliche Fertigungsverfahren zum Einsatz. So werden die Schaufelfüße mittels *Profilschleifen* bearbeitet. In diesem Prozess werden Schleifscheiben mit dem negativen Profil der herzustellenden Kontur eingesetzt, um die gewünschte Formgebung zu erreichen. Aufgrund der geometrischen Komplexität sind dabei stets mehrere Prozessschritte notwendig, um die Endkontur des Schaufelfußes aus dem Rohteil zu fertigen. Auf Scheibenseite werden die Konturen als Nuten mittels *Räumen* eingebracht. Dabei wird mit dem entsprechenden formgebenden Werkzeug jede Nut einzeln hergestellt, wobei mit dem Vor- und dem Nachräumen zwei Prozessschritte notwendig sind, um die Toleranzanforderungen zu erfüllen (ADAM 1998).

Charakteristisch für die konventionelle Bauweise ist, dass die formschlüssige Verbindung über die Tannenbaumprofile mit Spiel ausgeführt wird, sodass die Schaufeln nicht starr mit der Scheibe verbunden sind. Dadurch können sie sich durch die Fliehkraft im Betrieb radial ausrichten und die Belastung der Schaufelfüße durch Biegemomente bleibt gering (BRÄUNLING 2009). Eine feste Schaufelverbindung lässt dies nicht zu, was ein Grund für höhere Toleranzanforderungen bzgl. der Schaufelblattstellung bei der Bliskbauweise von Rotoren ist, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

1.3.3 Bliskbauweise von Rotoren

Bei einer *Blisk* bilden die Schaufeln und die Scheibe des Rotors im Gegensatz zum konventionellen Rotor eine integrale Einheit (Abbildung 3). Ein Vorteil besteht dabei in der geringeren Masse. Diese ergibt sich aus dem Wegfall der einzelnen Schaufelfüße, die von der Scheibe aufgenommen werden müssen (BRÄUNLING 2009).

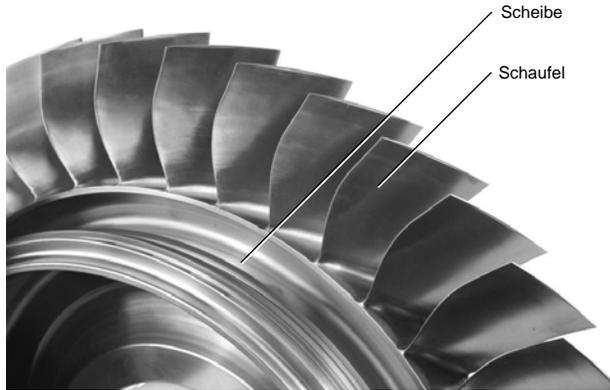


Abbildung 3: Rotor in Bliskbauweise mit integralen Schaufeln (MTU 2012A)

Zudem kann durch die stoffschlüssige, flächige Verbindung der Kraftfluss optimiert werden, sodass eine belastungsgerechtere Gestaltung möglich ist als bei der konventionellen Bauweise (PROKOPCZUK 2011). Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass eine höhere Anzahl an Schaufeln auch bei einem kleinen Rotordurchmesser realisiert werden kann, da bei einem konventionellen Rotor die Schaufelfüße und die Scheibennuten nicht beliebig verkleinert werden können (BRÄUNLING 2009).

Für die Herstellung einer Blisk gibt es zwei verschiedene Vorgehensweisen. Zum einen ist es möglich, ein Rohteil zu verwenden, welches das gesamte Volumen des fertigen Rotors umschließt, und das Material aus den Zwischenräumen der Schaufeln zu entfernen (Abbildung 4 links). Zum anderen können, wie beim konventionellen Rotor, die Schaufeln und die Scheibe einzeln gefertigt werden. Diese werden dann allerdings nicht zusammengesetzt, sondern in einem Schweißprozess gefügt (Abbildung 4 rechts) (UIHLEIN 2010).

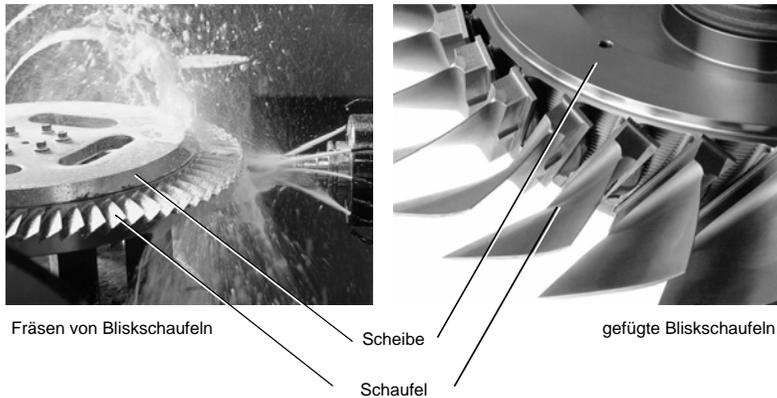


Abbildung 4: Fräsen von Bliskschaufeln (links, MTU 2012C) und Blisk mit gefügten Schaufeln (rechts, MTU 2012D)

Die Auswahl der Vorgehensweise für die Herstellung einer Blisk hängt von ihrer späteren Lage im Flugzeugtriebwerk ab. So nimmt die Schauffellänge i. d. R. sowohl auf Turbinen- als auch auf Verdichterseite zur Brennkammer hin ab. Je länger die Schaufeln sind, desto größer ist das zu zerspannende Volumen bei der Vorgehensweise der *Bliskherstellung mittels Fräsen*. Mit steigender Schauffellänge sinkt deshalb die Wirtschaftlichkeit einer solchen Blisk-Fertigung. Sie ist somit im Vergleich zu einem konventionellen Rotor nur begrenzt gegeben.

Deshalb wurden, zunächst insbesondere für den Einsatz im Verdichter, *gefügte Blisks* entwickelt. Das Problem bei dieser Lösungsmöglichkeit ist, dass die im Flugzeugtriebwerks-Bau eingesetzten Werkstoffe individuelle Eigenschaften für die jeweils auftretenden Belastungsarten besitzen, die während des gesamten Herstellungsprozesses bis zur fertigen Blisk am Ende der Prozesskette beibehalten werden müssen. Kritisch ist dabei insbesondere das Fügen der Schaufeln auf die Scheibe mittels Schweißen, da die hohe Energieeinbringung zu einer lokalen Verschlechterung der Materialeigenschaften in der Füge- und/oder der Wärmeinflusszone führen kann. Etabliert haben sich für diesen Anwendungsfall deshalb die unterschiedlichen Ausprägungen des Reibschweißens, wie z. B. das lineare Reibschweißen oder das Rotationsreibschweißen (PROKOPCZUK 2011). Diese Fügeverfahren zeichnen sich durch eine verhältnismäßig geringe und kurze Wärmeinbringung aus, die erreicht wird, indem die Werkstoffe nur bis knapp unterhalb ihrer Schmelztemperatur erhitzt und die Fügeflächen zusätzlich durch Druckbeaufschlagung zusammengepresst werden.

Allerdings sind für den Einsatz dieser Verfahren umfassende vorbereitende und nachbereitende Tätigkeiten notwendig. Insbesondere die ebenen Fügeflächen müssen mittels Fräsen und/oder Schleifen hergestellt werden. An der Schaufel ist dies die Unterseite des Fußes, an der Scheibe die Mantelfläche, aus der einzelne Fügeflächen herausgearbeitet werden müssen. Zusätzlich müssen Spannmöglichkeiten gegeben sein, um die hohen Prozesskräfte beim Reibschweißen übertragen zu können. Insbesondere an der Schaufel ist dies ein Problem, da das Schaufelblatt nicht beschädigt werden darf. Deshalb sind gegebenenfalls Aufmaße, wie in Abbildung 4 rechts zu sehen, erforderlich, die nach dem Fügen zusätzlich entfernt werden müssen. Darüber hinaus sind weitere Prozessschritte an der Blik notwendig, um z. B. beim Fügen ausgedrücktes Material zu entfernen, die endgültige Kontur des Übergangs zwischen Schaufel und Scheibe herzustellen, den Werkstoff in der Fügezone zu homogenisieren oder die bearbeiteten Oberflächen zu verfestigen.

Ein zusätzlicher Vorteil *gefügter Bliks* gegenüber *gefrästen Bliks*, außer der höheren Wirtschaftlichkeit bei großen Schaufellängen, besteht darin, dass für die Schaufeln und die Scheibe unterschiedliche Werkstoffe verwendet werden können (UHLEIN ET AL. 2010). Verdichter-Rotoren bestehen im Allgemeinen aus nur einem Material, in der Turbine hingegen trifft dies nur auf Stufen mit kleinem Durchmesser, z. B. für den Einsatz in Hubschraubertriebwerken, zu. Für die zivile Luftfahrt sind jedoch größere Turbinen-Rotoren erforderlich, bei denen aufgrund der unterschiedlichen Belastungsarten durch thermische und mechanische Einflüsse verschiedene Werkstoffe für die Schaufeln und die Scheibe eingesetzt werden müssen (PROKOPCZUK 2011). Bislang werden deshalb ausschließlich *gefräste und gefügte Verdichterbliks* sowie *kleine Turbinenbliks*, die als Einheit gegossen werden, in Serie produziert. *Gefügte Turbinenbliks* hingegen befinden sich derzeit noch in der Entwicklung, da das Fügen der Schaufeln und der Scheibe aus unterschiedlichen Werkstoffen ein fertigungstechnisches Problem darstellt, das nicht nur das Schweißen an sich betrifft, sondern auch die vor- und nachgelagerten Prozesse und somit die gesamte Prozesskette beeinflusst.

Darauf basierend wird nachfolgend die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit aufgezeigt, die dazu dienen soll, die Entwicklung neuer Rotoren, insbesondere gefügter Turbinenbliks, dahingehend zu unterstützen, dass alternative Prozessketten analysiert und bewertet werden können.

1.4 Vorgehensweise

Um die gestellten Anforderungen und Randbedingungen zu erfüllen, wird bzw. werden ausgehend von der Zielsetzung der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik wiedergegeben, daraus der Handlungsbedarf abgeleitet und anschließend die Gesamtmethodik sowie die Einzelmethoden dargestellt. Zudem wird deren Validierung anhand eines Anwendungsbeispiels aufgezeigt. Insgesamt gliedert sich die Arbeit wie in Abbildung 5 dargestellt in acht Kapitel. Die jeweiligen Inhalte werden nachfolgend erläutert.

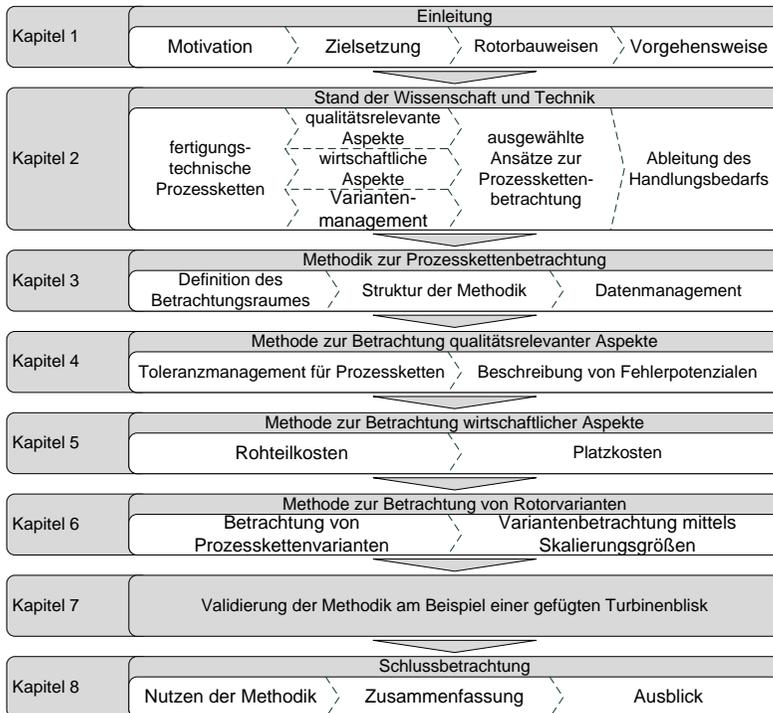


Abbildung 5: Vorgehensweise zur Entwicklung und Validierung der Methodik zur Analyse und zum Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren

Kapitel 1 beinhaltet die grundlegenden Voraussetzungen für diese Arbeit. Ausgehend von der Motivation zur Entwicklung der Methodik werden die Gesamtzielsetzung sowie die hierfür notwendigen Inhalte definiert.

Kapitel 2 gibt den derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik für die relevanten Themengebiete wieder. Zunächst werden grundlegende Begrifflichkeiten dieser Arbeit aufgezeigt sowie bestehende Möglichkeiten zur Erstellung, Strukturierung und Anpassung fertigungstechnischer Prozessketten erläutert. Die anschließende Darstellung qualitätsrelevanter Aspekte adressiert Qualitätsmanagement im Allgemeinen und im Besonderen die Methode FMEA (Failure Modes And Effects Analysis) sowie die Ansätze der Toleranzanalyse und -synthese. Ferner werden die Grundlagen der Prozesskettenbetrachtung hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte beleuchtet. Hierzu werden aus dem Themengebiet der Kostenrechnung die relevanten Methoden für die Bestimmung bauteilbezogener Kosten in der Produktion erläutert. Es folgt eine kurze Einführung in das Variantenmanagement von Bauteilen. Außerdem werden ausgewählte Forschungsarbeiten für Prozesskettenbetrachtungen aufgezeigt, die wirtschaftliche und/oder qualitätsrelevante Aspekte beinhalten. Von diesen Inhalten ausgehend erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfes.

In Kapitel 3 wird darauf aufbauend die entwickelte Methodik vorgestellt. Sie besteht aus mehreren Einzelmethoden, um qualitätsrelevante und wirtschaftliche Vergleichsgrößen zunächst für eine Referenzanwendung zu ermitteln und diese anschließend auf Rotorvarianten zu extrapolieren. Durch deren Verknüpfung entsteht eine Vorgehensweise zur ganzheitlichen Prozesskettenbetrachtung mit der Möglichkeit des quantitativen Vergleichs von Fertigungsalternativen für Flugzeugtriebwerks-Rotoren. Anschließend wird vor den Detaillierungen der einzelnen Methoden in den Kapiteln 4, 5 und 6 das übergreifende Datenmanagement zur Ermittlung, Verarbeitung und Darstellung aller benötigten Informationen beschrieben.

In Kapitel 4 wird die Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte erläutert. Zum einen wird hierbei als Grundlage für die Vergleichbarkeit von Prozessketten eine Vorgehensweise zu deren Anpassung an gegebene Toleranzanforderungen entwickelt, zum anderen wird eine Möglichkeit zur Identifizierung und quantifizierten Beurteilung fertigungstechnischer Fehlerpotenziale präsentiert.

Kapitel 5 beleuchtet das Schema zur Berechnung der bauteilbezogenen Fertigungskosten, bestehend aus monetären Aufwänden für das Rohmaterial und für die Bearbeitung. Insbesondere die Ermittlung von Prozesszeiten sowie die maß-

1 Einleitung

geblichen Einflüsse und Randbedingungen des Flugzeugtriebwerks-Baus werden erläutert.

Kapitel 6 fokussiert die Betrachtung von Rotorvarianten, sodass Abhängigkeiten der Fertigungskosten und der Fehlerpotenziale von geometrischen Parametern ermittelt werden können. Dazu werden in einer Methode standardisierte Skalierungsgrößen eingeführt. Dadurch kann die Kalkulation trotz der geometrischen Komplexität von Triebwerksrotoren mittels Kostenwachstumsgesetzen aufwandsarm durchgeführt werden.

Kapitel 7 beschreibt die Validierung der Methodik. Diese erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner zur Entwicklung eines neuartigen Rotors. Es werden sowohl die Ergebnisse der Einzelmethoden als auch die Resultate der Methodik erläutert.

Kapitel 8 stellt zunächst den erzielbaren Nutzen durch die Anwendung der Methodik heraus, bevor abschließend die gesamte Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche, zukünftige Forschungstätigkeiten gegeben wird.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Allgemeines

In Kapitel 1 wurde die Notwendigkeit zur Entwicklung emissionsreduzierender Triebwerkstechnologien erläutert und daraus die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet, die Produktentwicklung aus produktionstechnischer Sicht zu unterstützen. Im Folgenden werden nach der Definition von Begrifflichkeiten die relevanten Grundlagen dargestellt, um Fertigungsalternativen anhand von Prozessketten quantitativ vergleichen zu können.

2.2 Fertigungstechnische Prozessketten

2.2.1 Begriffsdefinition

Da die Begriffe *Prozess* und *Prozesskette* weit gefasst sind und entsprechend unterschiedlich in der Literatur Anwendung finden, werden zunächst Konkretisierungen vorgenommen, wie diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Dabei ist zunächst die Unterscheidung zwischen Technologie, Verfahren und Prozess zu treffen.

Technologie wird im Allgemeinen definiert „als die Wissenschaft von der Technik“, wobei die beiden Begriffe häufig fälschlicherweise als Synonyme verwendet werden (ROPOHL 2009). Fertigungstechnologien dienen nach KNOCHE (2005) zur „Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern, die sowohl Halbzeuge als auch Bestandteile von technischen Gebilden sein können“.

Fertigungsverfahren sind gemäß DIN 8580 (2003) „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten, festen Körpern; sie schließen die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften ein“. Sie werden in die Hauptgruppen Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaft ändern unterteilt, die ihrerseits wiederum in Gruppen und Untergruppen gegliedert werden. So ist Fräsen beispielsweise ein Verfahren der Hauptgruppe Trennen und der Untergruppe Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden. Abbildung 6 veranschaulicht die Aufteilung und die Einordnung dieses Verfahrens gemäß der Nomenklatur.

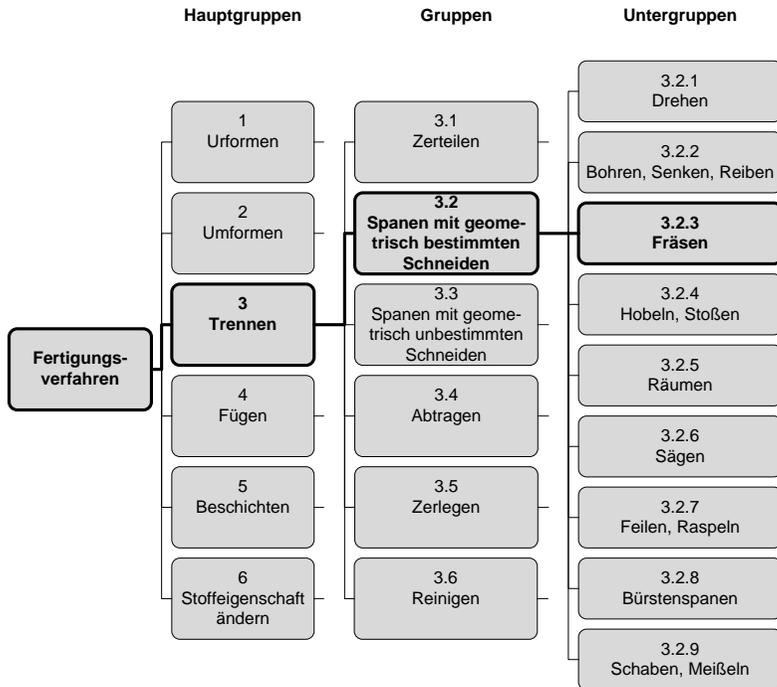
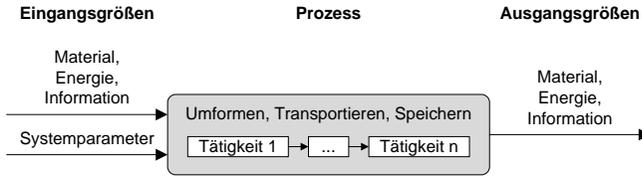


Abbildung 6: Einordnung des Fertigungsverfahrens Fräsen nach DIN 8580 (2003)

Demgegenüber stellt ein *Prozess* gemäß SCHMIDT (2002) eine „zeitabhängige Zustandsänderung in einem System“ dar, die Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen umwandelt. Ein *System* ist hierbei nach HIELSCHER (2008) als eine Anzahl von Elementen zu verstehen, die „untereinander in Beziehung“ stehen. Ein System ist durch eine Systemgrenze von seiner Umwelt getrennt, interagiert mit dieser jedoch über verschiedene Schnittstellen (DAENZER & HABERFELLNER 2002). Eine Konkretisierung des Prozessbegriffs im Sinne der Produktionstechnik wird in DIN EN ISO 9000 (2005) gegeben, wonach ein Prozess definiert ist als ein „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“ (vgl. Abbildung 7). Konkret stellt der Fertigungsprozess „den Schwerpunkt der betrieblichen Leistungserstellung“ dar (WILLMS 2008).



Legende

n = Anzahl der Tätigkeiten im Prozess

Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Prozesses in Anlehnung an DIN EN ISO 9000 (2005) und SCHMIDT (2002)

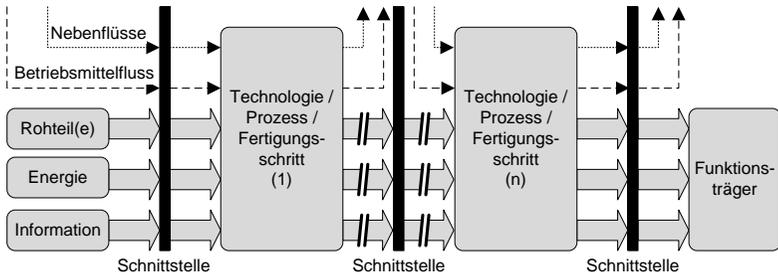
Die Eingangsgrößen sind nach DIN 19226 (1994) dadurch charakterisiert, dass sie auf den Prozess einwirken, ohne selbst von ihm beeinflusst zu werden. Eine Strukturierung kann durch die Zuweisung der Kategorien Material, Energie und Information vorgenommen werden (HIELSCHER 2008). Des Weiteren stellen sie in Abhängigkeit der Beeinflussbarkeit Stellgrößen oder Störgrößen des Prozesses dar. Die in Abbildung 7 gezeigten Systemparameter sind „Größen, deren Werte das Verhalten des Systems bei gegebener Struktur kennzeichnen“ (DIN 19226 1994). Im Sinne der Produktionstechnik können diese als Prozessparameter interpretiert werden. Deren Werte beeinflussen maßgeblich das Prozessergebnis und somit letztendlich die Produktqualität. Ein Fertigungsprozess ist somit ein Kombinationsprozess produktiver Faktoren (SCHNEEWEIß 2002). Durch die quantitative Beschreibung von deren Einfluss auf die Zielgröße und der Wechselwirkungen untereinander wird ein Prozess beherrschbar (WILLMS 2008).

Die Abgrenzung der Begriffe *Prozess*, *Verfahren* und *Technologie* ist nicht einheitlich definiert. In der Literatur erfolgt sie meist anhand des Detaillierungs- bzw. Konkretisierungsgrades (vgl. FALLBÖHMER 2000; KNOCH 2005; MÜLLER 2007). So wird in KNOCH (2005) beispielsweise dargelegt, dass „Fertigungstechnologie (..) als Überbegriff für mehrere Maschinentypen verwendet (wird), die nach dem gleichen Technologieprinzip arbeiten“. Technologie und Verfahren werden dabei häufig als Synonyme verwendet (MÜLLER 2007). Demgegenüber ist ein Produktionsprozess die Konkretisierung eines Produktionsverfahrens oder einer Produktionstechnologie (MÜLLER 2007). Er ist „durch definierte Betriebsmittel sowie konkrete Prozessparameter festgelegt und bezieht sich i. d. R. auf einen spezifischen Produktionsschritt an einem Produkt“ (MÜLLER 2007). Ein Prozess ist demnach die Bearbeitung des Bauteils auf eine bestimmte Art und Weise und stets einem Arbeitsplatz zugeordnet, er lässt sich jedoch bei Bedarf

entsprechend in einzelne Tätigkeiten untergliedern (DIN EN ISO 9000 2005). Der Fokus der vorliegenden Arbeit erfordert eine detaillierte Beschreibung der produktionstechnischen Vorgänge zur Umwandlung der Rohteile in einen Flugzeugtriebwerks-Rotor. Hierfür ist der Begriff *Prozess* am besten geeignet und wird deshalb im Folgenden einheitlich verwendet.

Der Begriff *Prozesskette* ist nicht allgemeingültig definiert und wird in der Literatur uneinheitlich verwendet (HIELSCHER 2008). Nach VDI 2221 (1993) wird eine Prozesskette als ein System verstanden, das aus Folgen von Aktivitäten besteht. Für den Themenkomplex der Produktionstechnik werden fünf Anwendungsbereiche für Prozessketten unterschieden (SCHÄFER 2003). Dies sind die Betriebsorganisation, die Produktgestaltung, die Logistik, die Daten- und Informationsverarbeitung sowie die Fertigungstechnik. Für die vorliegende Arbeit ist lediglich der zuletzt genannte Bereich relevant, sodass die Begriffe *Prozesskette* und *fertigungstechnische Prozesskette* gleichbedeutend verwendet werden.

Die Betrachtung *produktionstechnischer Ketten* ist notwendig, da zur Herstellung der meisten Produkte und Halbzeuge je nach Betrachtungsebene die Kombination mehrerer Technologien, Prozesse bzw. Fertigungsschritte notwendig ist (KNOCHE 2005). Diese werden sequenziell vom sogenannten Funktionsträger, d. h. einem Einzelteil, einer Produktkomponente oder einem Produkt, durchlaufen und es werden dabei die notwendigen Funktionselemente hergestellt (FALLBÖHMER 2000). Eine produktionstechnische Kette ist ein zusammenhängender Ablauf von Tätigkeiten, bei dem jedes Element die Bauteile, Informationen oder Energien des vorherigen Elements verarbeitet (HIELSCHER 2008). Dies beinhaltet neben dem Materialfluss zum einen auch einen Betriebsmittelfluss für Werkzeuge sowie Spann-, Prüf- und Messmittel, der individuell oder übergreifend sein kann. Zum anderen sind Nebenflüsse vorhanden, welche die zur Durchführung der Tätigkeiten benötigten Betriebsstoffe wie auch die entstandenen Abfälle beinhalten (HIELSCHER 2008). Somit lässt sich eine produktionstechnische Kette wie in Abbildung 8 darstellen.



Legende

n = Anzahl der Elemente der produktionstechnischen Kette

Abbildung 8: Aufbau einer produktionstechnischen Kette nach HIELSCHER (2008)

Als Ausprägungen produktionstechnischer Ketten gelten diese Eigenschaften und Definitionen ebenso für Technologieketten (vgl. KNOCHE 2005; FALLBÖHMER 2000), Prozessketten (vgl. MÜLLER 2007) und Fertigungsketten (vgl. TROMMER 2001), deren Struktur analog aufgebaut ist. Unterschiede bestehen jedoch wiederum im Detaillierungsgrad, d. h. die über die Schnittstellen weitergegebenen Inhalte variieren. Technologieketten weisen dabei den höchsten Abstraktions- und Fertigungsketten den höchsten Detaillierungsgrad auf. Dies verdeutlicht Abbildung 9.

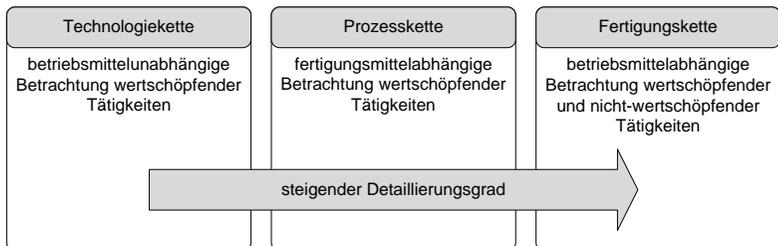


Abbildung 9: Vergleich der Betrachtungsebenen von Technologiekette, Prozesskette und Fertigungskette nach FALLBÖHMER (2000)

Eine Technologiekette ist somit eine abstrakte Kombination von Fertigungsverfahren, die von einem Funktionsträger in einer definierten Reihenfolge durchlaufen werden. Die Detaillierung zu einer Prozesskette erfolgt durch die Berücksichtigung der verwendeten Fertigungsmittel. Durch die zusätzliche Integration nicht

wertschöpfender Tätigkeiten sowie die Berücksichtigung aller Betriebsmittel entsteht eine Fertigungskette (FALLBÖHMER 2000). Die vorliegende Arbeit fokussiert die Prozessebene, weshalb im Folgenden die Erstellung von Prozessketten als Ausprägung produktionstechnischer Ketten erläutert wird.

2.2.2 Erstellung fertigungstechnischer Prozessketten

Die Erstellung fertigungstechnischer Prozessketten umfasst zwei Hauptaufgaben: Zum einen sind geeignete Technologien für die Herstellung der geforderten Merkmale des Funktionsträgers zu definieren und zum anderen sind diese fertigungsmittelbezogen in einem Produktionsablauf anzuordnen. Voraussetzung für eine anforderungsgerechte Prozesskette ist die detaillierte Analyse der Produktionsaufgabe (EVERSHEIM 1996B). Für deren vollständige Beschreibung ist die Erfassung geometrischer, materialbezogener, zeitbezogener sowie ablauforganisatorischer Daten notwendig (EVERSHEIM & SPUR 1996) (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 10: Daten zur Beschreibung einer Produktionsaufgabe nach EVERSHEIM (1996A)

Insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung können für die Erfüllung der Anforderungen mehrere Lösungen existieren, die sich z. B. hinsichtlich der Geometrie unterscheiden. Vor diesem Hintergrund stellen unterschiedliche Produktbeschreibungen eine Quelle für Fertigungsalternativen dar. Diese Informationen werden anschließend verwendet, um einzelnen Merkmalen des Funktionsträgers fertigungstechnische Prozesse zuzuordnen, die eine möglichst kostengünstige Produktion in kurzer Zeit bei hoher Qualität ermöglichen. Für diesen

komplexen Vorgang existieren in der Literatur zahlreiche, etablierte Vorgehensweisen (vgl. z. B. AKADEMISCHER VEREIN HÜTTE E. V. 1996; EVERSHEIM 1996B; REFA 1990; VDI 2221 1993) und innovative Ansätze (vgl. z. B. FALLBÖHMER 2000; HUBER 1995; KNOCH 2005; MÄRZ 2011; MERGET 2004; MÜLLER 2007; MORYSON 2004; TROMMER 2001; VAN VLIET 2001; WANG ET AL. 2007).

Neben einer methodischen Unterstützung wird z. B. in FENG & SONG (2003) ein übergreifender, computergestützter Ansatz aufgezeigt, Produktionsprozesse inklusive der Fertigungsmittel und deren Kenngrößen abzubilden. Entsprechend den unterschiedlichen Betrachtungsebenen sowie Anwendungszeiträumen werden für die Erstellung fertigungstechnischer Ketten zumeist die Begriffe Technologie-, Produktionssystem- oder Produktionsplanung und Arbeitsvorbereitung verwendet. Eine langfristig vorausschauende Ausrichtung dient dabei der strategischen, eine kurzfristige der operativen Planung (REINHART ET AL. 2011). Die Erstellung fertigungstechnischer Prozessketten ist letzterer zuzuordnen. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt deshalb die entsprechende Vorgehensweise zur operativen Planung. Als Basis dient dabei die Beschreibung der Produktionsaufgabe gemäß Abbildung 10 für die Analyse des Bauteilspektrums, wobei die Zeitwerte erst im Verlauf der operativen Planung definiert werden.

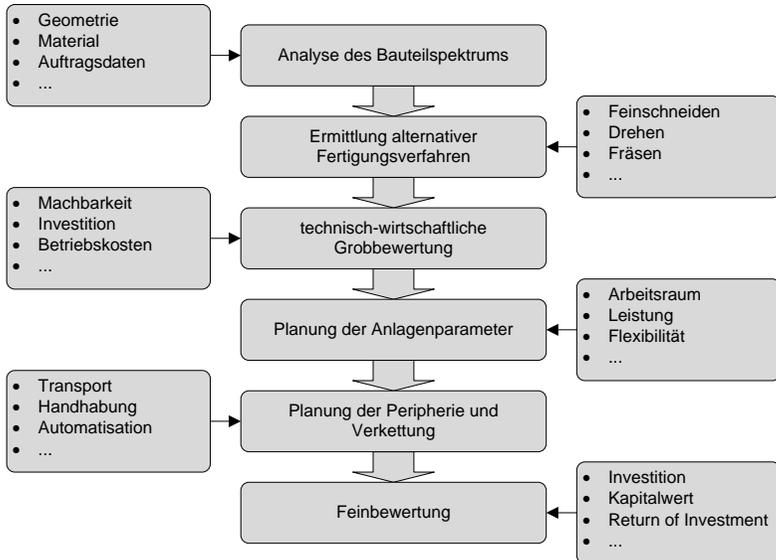


Abbildung 11: Vorgehensweise zur operativen Planung nach EVERSHEIM (1996A)

Die Planung erfolgt dabei, wie dargestellt, mit steigendem Detaillierungsgrad auf den in Abschnitt 2.2.1 definierten Betrachtungsebenen Technologie, Prozess und Fertigungsschritt. Die jeweilige Lösung ist meist nicht eindeutig, da z. B. für die Herstellung eines Merkmals des Funktionsträgers die Anwendung unterschiedlicher produktionstechnischer Verfahren oder Technologien möglich ist. Die Technologieplanung stellt somit neben der Produktbeschreibung eine zweite Ursache für Fertigungsalternativen dar.

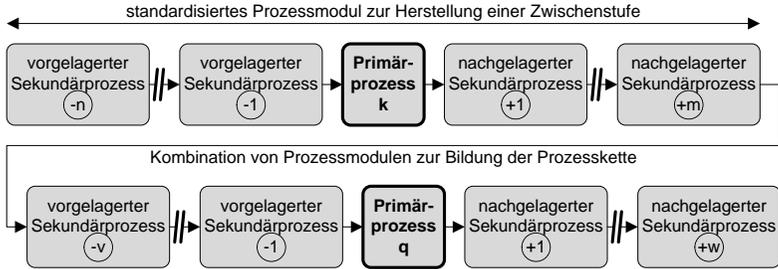
Mit zunehmender Informationsdichte nimmt auch die Datenmenge insgesamt zu, sodass gegebenenfalls Maßnahmen zu deren Strukturierung erforderlich werden. Bei der Betrachtung von Prozessketten wird dadurch zudem der Vergleich von Alternativen erleichtert, wie im folgenden Abschnitt aufgezeigt wird.

2.2.3 Strukturierung fertigungstechnischer Prozessketten

Etablierte Strukturierungsansätze wie z. B. nach SPIES (1997) oder NEUHAUSEN (2001) haben ihren Ursprung in der Entwicklung modularer Produkte. SPIES (1997) verwendet unabhängige Produktmodule, die frei miteinander kombiniert werden können, sodass variantenreiche Serienprodukte wirtschaftlich hergestellt

werden können. NEUHAUSEN (2001) dagegen fasst mehrere Ansätze zusammen, um Produkte zu modularisieren und damit die notwendigen Prozesse zu planen. Durch die Übertragung dieser Ergebnisse auf die Produktionsplanung mittels eines Umrüstkonzeptes wird die Betrachtung fertigungstechnischer Fragestellungen ermöglicht (WESTKÄMPER 2001). Ein anderer Ansatz besteht darin, fertigungsbezogene Daten des Funktionsträgers für die ganzheitliche Betrachtung zu strukturieren, indem Informationen über Fertigungsalternativen von der Bauteilebene ausgehend in einer Modul- bzw. auch in einer Produktebene aggregiert werden (TROMMER 2001).

Vor diesem Hintergrund ist für eine Prozesskettenbetrachtung die Ebene der Prozessmodule von besonderer Relevanz. In Anlehnung an die von MÜLLER (2007) beschriebenen Verfahrensmodule stellt im Rahmen dieser Arbeit ein Prozessmodul eine standardisierte Abfolge von Prozessen dar, die gemeinsam durchgeführt werden. Sie bestehen zum einen stets aus einem zentralen, primären Prozess, der maßgeblich zur Wertschöpfung beiträgt (MÜLLER 2007). Zum anderen folgt aus dessen Durchführung die Notwendigkeit für weitere, sekundäre Prozesse, die diesem zugeordnet werden und das Bauteil für den Primärprozess vor- bzw. nachbereiten (vgl. Abbildung 12). So können beispielsweise in einem Anwendungsfall einem Schweißprozess (Primärprozess) das Reinigen der Fügeflächen (vorgelagerter Sekundärprozess) und die Prüfung der hergestellten Verbindung (nachgelagerter Sekundärprozess) zur Absicherung der Bauteil- bzw. Prozessqualität zugeordnet werden und bilden zusammen ein Prozessmodul.



Legende

k, q = beispielhafte Primärprozesse

n = Anzahl der vorgelagerten Sekundärprozesse für Primärprozess k

m = Anzahl der nachgelagerten Sekundärprozesse für Primärprozess k

v = Anzahl der vorgelagerten Sekundärprozesse für Primärprozess q

w = Anzahl der nachgelagerten Sekundärprozesse für Primärprozess q

○ = Position in Relation zum Primärprozess

Abbildung 12: Standardisierte Prozessmodule in Anlehnung an REINHART ET AL. (2007)

Kennzeichnend ist, dass Prozessmodule in sich geschlossen sind. Dies bedeutet, dass stets die identische Kombination aus Primär- und Sekundärprozessen notwendig ist. Bei der Betrachtung alternativer Prozessketten ermöglicht dies ein einfaches Austauschen von im Vorfeld erstellten Prozessmodulen ohne Veränderungen auf der Detaillierungsebene der Einzelprozesse. Die Voraussetzung zur Kopplung besteht darin, dass die Eingangsgrößen des ersten Prozesses eines Moduls den Ausgangsgrößen des letzten Prozesses im vorherigen Modul entsprechen (MÜLLER 2007). Dies gilt in gleicher Weise für die Sequenzierung der Prozesse innerhalb eines Prozessmoduls (FALLBÖHMER 2000; KNOCH 2005; TROMMER 2001).

2.2.4 Strukturmaßnahmen zur Anpassung fertigungstechnischer Prozessketten

Die Modularität ermöglicht eine flexible Anpassung bzw. Verbesserung von Prozessketten. Die Zielgrößen können dabei variieren, sie sind jedoch stets auf die „optimale Erfüllung der Unternehmensaufgabe“ ausgerichtet (SCHUH 1998). Dies wird z. B. durch eine Verkürzung der Durchlaufzeiten, eine Senkung der Herstellkosten und/oder eine Erhöhung der Produktqualität sichergestellt. Erreicht wird dies durch verschiedene Strukturmaßnahmen, die, wie in Abbildung 13 dargestellt, entweder einen einzelnen Prozess oder eine Prozessfolge verän-

dem und so das Ergebnis hinsichtlich der Zielgrößen beeinflussen (MÜLLER 2007).

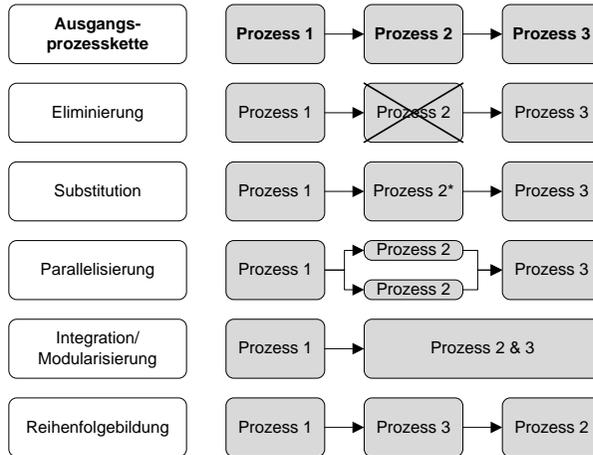


Abbildung 13: Strukturmaßnahmen zur Verbesserung von Prozessketten nach SCHUH (1998) und MÜLLER (2007)

Vor der Umsetzung von Strukturmaßnahmen ist stets der erzielbare Nutzen den mit der Realisierung verbundenen Aufwänden gegenüberzustellen. Beispielsweise bedarf die Senkung der Fertigungskosten durch Substitution eines Prozesses meist einer Investition. Strukturmaßnahmen können somit neben der Produktbeschreibung und der Technologieplanung eine dritte Ursache für die Entstehung von Fertigungsalternativen darstellen. Vor dem Hintergrund der ganzheitlichen Betrachtung sind hierfür die gesamten Prozessketten vor und nach Anwendung der Strukturmaßnahme einander gegenüberzustellen. Auf dem Grundgedanken der Anpassung von Prozessketten aufbauend existieren in der Literatur verschiedene Ansätze der Verbesserung von Prozessketten. Diese fokussieren entweder einzelne, z. B. qualitätsorientierte Aspekte oder bieten die Möglichkeit zur multi-kriteriellen Optimierung (DENKENA ET AL. 2006). Die vorliegende Arbeit adressiert sowohl qualitätsbezogene als auch wirtschaftliche Zielgrößen, ohne jedoch die zur Anpassung von Prozessketten notwendigen Vorgänge selbst zu fokussieren. Relevant sind ausschließlich deren Ergebnisse in Form alternativer Prozessketten, die im Hinblick auf ihre Qualität und ihre Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Die für diese beiden Aspekte relevanten Inhalte werden im Folgenden erläutert.

2.3 Grundlagen qualitätsrelevanter Aspekte

2.3.1 Qualität und Qualitätsmanagement

In DIN EN ISO 9000 (2005) wird Qualität definiert als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“. Inhärente Merkmale bezeichnen in diesem Zusammenhang feste Eigenschaften eines Funktionsträgers. Ursächlich für den hohen Abstraktionsgrad dieser Aussage sind u. a. die Komplexität und Vielschichtigkeit des Qualitätsbegriffs, der zudem ständigen Veränderungen unterliegt (ERASMUS 2008; KAMISKE & BRAUER 1999; SIMON 2009; KOCH 2011). Wie in Abbildung 14 dargestellt, wurden in der Vergangenheit verschiedene Sichtweisen in den Fokus gerückt (MASING 2007).

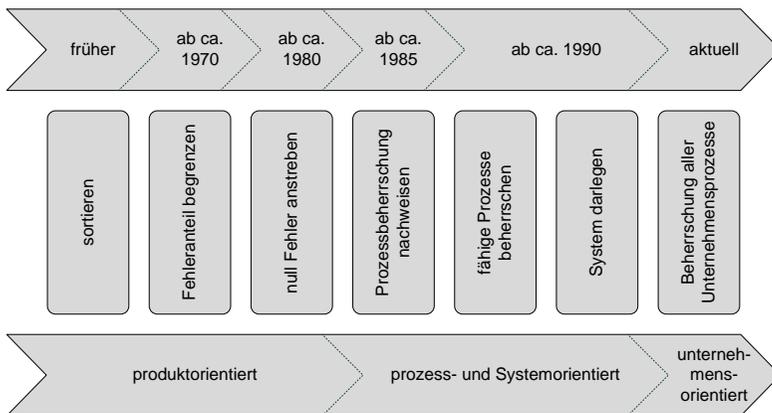


Abbildung 14: Wandel des Qualitätsverständnisses im Laufe der Zeit nach MASING (2007)

Früher (d. h. vor 1970) stand vornehmlich die Prüfung der Anforderungserfüllung durch das Produkt im Vordergrund. Das Qualitätswesen war somit hauptsächlich ein Kontrollinstrument (BERNARDS 2006). Inzwischen gilt es als entscheidend, die Gesamtheit der dem Kunden angebotenen Leistung über das eigentliche Produkt hinaus zu betrachten (KAMISKE & BRAUER 1999). Allerdings zeigen unterschiedliche Aussagen, dass bis heute kein allgemeingültig einheitliches Qualitätsverständnis existiert (BRUHN 2008). Ein wichtiger Schritt war jedoch die Vereinheitlichung der Begriffsdefinitionen auf internationaler Ebene. Alle qualitätsrelevanten Themen werden seitdem im deutschen Sprachgebrauch

nicht mehr unter dem Oberbegriff *Qualitätssicherung* zusammengefasst, sondern als *Qualitätsmanagement* bezeichnet (PFEIFER 1993). Nach DIN EN ISO 9000 (2005) sind dies „aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich Qualität“, wobei unter Organisation Unternehmen, Institutionen etc. verstanden werden. Eine Gliederung erfolgt durch die definierten Teilbereiche Qualitätsplanung, -lenkung, -sicherung und -verbesserung, die im Folgenden aufgezeigt werden.

Qualitätsplanung ist gemäß JURAN & GODFREY (1999) das strukturierte Vorgehen, sowohl Produkte als auch Dienstleistungen so zu entwickeln, dass diese letztendlich die Kundenbedürfnisse erfüllen. PFEIFER (1993) spricht von der „Gesamtheit der planerischen Tätigkeiten vor Produktionsbeginn“ und schließt dabei auch die Betrachtung „der technischen Realisierbarkeit sowie der materiellen, personellen und finanziellen Ressourcen des Unternehmens“ ein. In GEIGER (2007) wird die Qualitätsplanung spezifiziert als „Auswählen, Klassifizieren und Gewichten der Qualitätsmerkmale sowie schrittweises Konkretisieren aller Einzelanforderungen“. Allen Definitionen gemein ist die Fokussierung auf eine Anwendung während der Produktentwicklung. Werkzeuge der Qualitätsplanung sind beispielsweise die Methoden Quality Function Deployment (QFD) oder Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), die beide der frühzeitigen Identifizierung und Beseitigung möglicher Fehler dienen (AKAO 1990; KOCH 2011).

Qualitätslenkung stellt laut DIN EN ISO 9000 (2005) den Teil des Qualitätsmanagements dar, der auf die Erfüllung von Qualitätsanforderungen ausgerichtet ist. In GEIGER (2007) wird bemängelt, dass dadurch zwar das Ziel, nicht jedoch der Inhalt der Qualitätslenkung festgelegt wird. Nach LEONHARD & NAUMANN (2005) umfasst dieser Teilbereich alle „vorbeugenden, überwachenden und korrigierenden Tätigkeiten bei Realisierung der Einheit zur Erfüllung der Forderung an ihre Beschaffenheit“ umfasst. Die Qualitätslenkung ist somit weitreichend und beinhaltet sowohl unmittelbare, d. h. auf aktuelle Produkte ausgerichtete, als auch mittelbare, d. h. auf zukünftige Produkte ausgerichtete, Komponenten bzw. Werkzeuge (vgl. Abbildung 15).

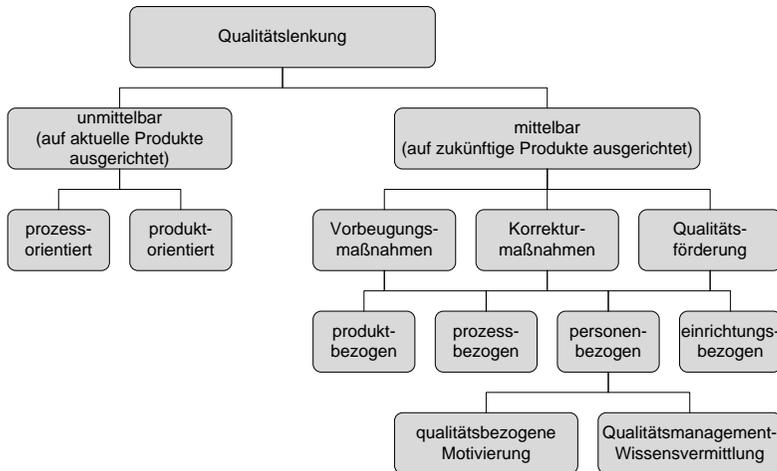


Abbildung 15: Komponenten der Qualitätslenkung nach GEIGER (2007)

Qualitätssicherung wird in DIN EN ISO 9000 (2005) bezeichnet als der „Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden“. In PFEIFER (1993) wird in diesem Zusammenhang betont, dass die Qualitätssicherung über das reine Prüfen von Produktmerkmalen am Ende eines Prozesses hinausgeht, da die Umsetzung eines durchgängigen Qualitätssicherungssystems organisatorischer, technischer und personeller Maßnahmen bedarf, die sich über verschiedene Bereiche eines Unternehmens erstrecken.

Qualitätsverbesserung wird in KAMISKE & BRAUER (1999) als übergeordneter Bestandteil des Qualitätsmanagements beschrieben, unter dem alle Bestrebungen hinsichtlich der „Steigerung von Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit der Prozesse innerhalb eines Unternehmens“ zusammengefasst sind. Ziel der Qualitätsverbesserung ist die „Erhöhung der Eignung zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen“ (DIN EN ISO 9000 2005). Eine der bekanntesten Strategien ist dabei die Qualitätsverbesserung nach dem japanischen Begriff Kaizen (IMAI 1986). Kaizen steht dabei nicht für eine direkt anwendbare Methode, die im Bedarfsfall eingesetzt wird, sondern für das Streben nach kontinuierlicher Verbesserung und ist auch als Continuous Improvement Process (CIP) oder Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) bekannt (KAMISKE & BRAUER 1999). Der Erfolg des Ansatzes ist maßgeblich von der ganzheitlichen Orientierung abhängig, d. h. inwieweit

alle „Elemente in einem Wirkungszusammenhang konsequent miteinander kombiniert“ werden (KOCH 2011).

Insgesamt repräsentiert der Begriff *Qualität* ein weitreichendes Themengebiet, weshalb der entscheidende Faktor die umfassende Betrachtung aller relevanten Aspekte im Unternehmen ist. Deren Gesamtheit wird als Qualitätsmanagement bezeichnet, das im Hinblick auf die Produktionstechnik den Bezug zwischen Produkt und Fertigung schafft (Qualitätsplanung), die Produktion als Ganzes und nicht einzelne Prozesse betrachtet (Qualitätslenkung und Qualitätssicherung) sowie die Nachhaltigkeit der Tätigkeiten gewährleistet (Qualitätsverbesserung).

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die fertigungstechnische Prozessqualität im Rahmen der Leistungserstellung inklusive der Wechselwirkungen durch deren Abbildung in Prozessketten. Inwiefern das Ziel der Anforderungserfüllung durch den Funktionsträger bzw. das Produkt von den eingesetzten Fertigungsverfahren abhängt, wird im nächsten Abschnitt erläutert. Zur Vertiefung der anderen Bereiche des Qualitätsmanagements wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. IMAI 1986; KAMISKE & BRAUER 1999; MASING & PFEIFER 2007; PFEIFER 1993).

2.3.2 Produkt- und Prozessqualität

Die Qualität eines Produktes ist die Relation zwischen den Anforderungen des Kunden und deren Erfüllung in Bezug auf definierte Merkmale. Bei einem fertigungstechnischen Prozess stellen die Spezifikationen in Konstruktionszeichnungen die Anforderungen dar. In welchem Maße die Ausführung diese erfüllt, definiert die Qualität einer Tätigkeit (MASING 2007). Unter der Voraussetzung, dass die Spezifikationen den Kundenanforderungen entsprechen, hängt die Produktqualität direkt von der der Prozesse ab. Abbildung 16 verdeutlicht den Zusammenhang.

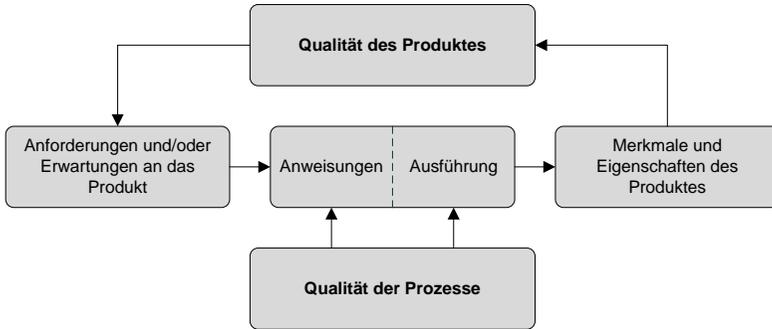
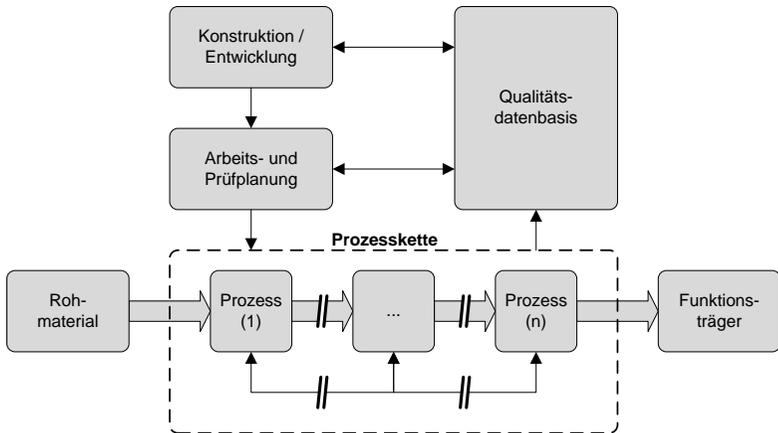


Abbildung 16: Produktqualität und Prozessqualität nach MASING (2007)

Aufgrund von Störeinflüssen, die neben Steuergrößen auf jeden Prozess einwirken, beinhalten dessen Ausgangsgrößen stets eine gewisse Abweichung von der Anforderung (KAMISKE & BRAUER 1999). Außerdem ist, wie in Abschnitt 2.2.1 (S. 13 ff.) dargestellt, in der Realität meist mehr als nur ein einziger Prozess und somit eine fertigungstechnische Prozesskette zur Herstellung der Merkmale eines Funktionsträgers notwendig. Fertigungstechnisch bedingte Abweichungen vom Idealzustand gehen dabei als Eingangsgröße in den nachfolgenden Prozess mit ein. Dies bedeutet, dass sie sich über die Prozesskette hinweg aufsummieren können, sodass der Gesamterfüllungsgrad der Produktqualität in der Regel mit der Anzahl der sequenziell zu durchlaufenden Schritte sinkt (PFEIFER 1993; WESTKÄMPER 1996). Um dennoch die produktbezogenen Anforderungen erfüllen zu können, ist eine Erweiterung des Aufgabenbereiches der Qualitätsprüfung ausgehend vom Absichern der Produktqualität hin zum Nachweis der Produkt- und Prozessqualität notwendig (PFEIFER 1996). Dazu sind vorbeugende und umfassende Maßnahmen über verschiedene Unternehmensbereiche hinweg erforderlich, die durch Regelkreise des integrierten Qualitätsmanagements ermöglicht werden (vgl. Abbildung 17).



Legende

n = Anzahl der Elemente der Prozesskette

➡ = Materialfluss

→ = Informationsfluss

Abbildung 17: Regelkreis zur umfassenden Absicherung der Produkt- und Prozessqualität nach PFEIFER (1996)

Die Qualitätsprüfung dient dabei als „Sensor zur Erfolgskontrolle der Planung im operativen Bereich“ (PFEIFER 1996). Dies zeigt deren Bedeutung, impliziert aber gleichzeitig die Notwendigkeit einer Qualitätsplanung, die die in Abbildung 17 dargestellten Bereiche Konstruktion/Entwicklung sowie Arbeits- und Prüfplanung umfasst. Hierfür erlauben das Toleranzmanagement, die Planung der Einhaltung geometrischer Anforderungen und die Betrachtung möglicher Fehler die vorausschauende Untersuchung etwaiger Qualitätsmängel. Aufgrund der Eignung dieser beiden Hilfsmittel für die Integration in einen prozesskettenorientierten Ansatz werden sie in den folgenden Abschnitten 2.3.3 und 2.3.4 näher erläutert.

2.3.3 Toleranzmanagement

Der Begriff des *Toleranzmanagements* ist in Analogie zu *Qualitätsmanagement* zu sehen. Er umfasst alle Tätigkeiten hinsichtlich der Betrachtung zulässiger Abweichungen des Funktionsträgers von den an ihn gestellten Anforderungen (BOHN 1998). Die Notwendigkeit hierfür resultiert aus der Tatsache, dass aufgrund von systematischen und zufälligen Störgrößen fertigungstechnische Pro-

zesse stets mit Abweichungen gegenüber dem Ideal behaftet sind (HOCHMUTH ET AL. 1998). Sie sind somit nur in begrenztem Maße in der Lage, die gestellten Anforderungen in Bezug auf definierte Merkmale des Funktionsträgers zu erfüllen (BEHRENS 2011). Eine Toleranz stellt dabei die maximal zulässige Abweichung vom funktionsorientierten Soll dar, die keine oder kaum negative Auswirkungen hat (MERGET 2004). Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten hinsichtlich der Anforderungen werden Toleranzen, wie in Abbildung 18 dargestellt, unterteilt (MERGET 2004; VON PRAUN 2003; TRUMPOLD ET AL. 1997).

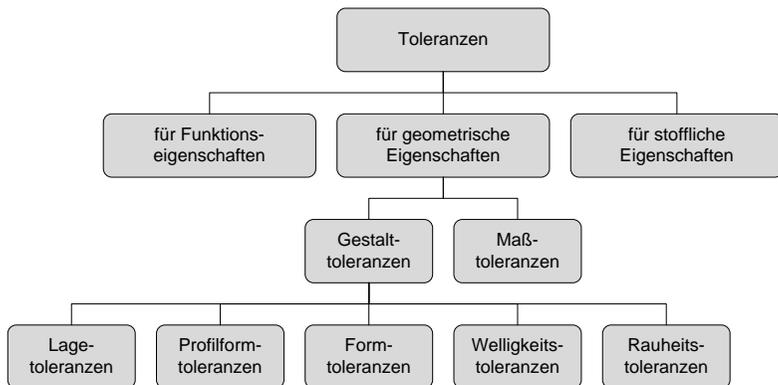
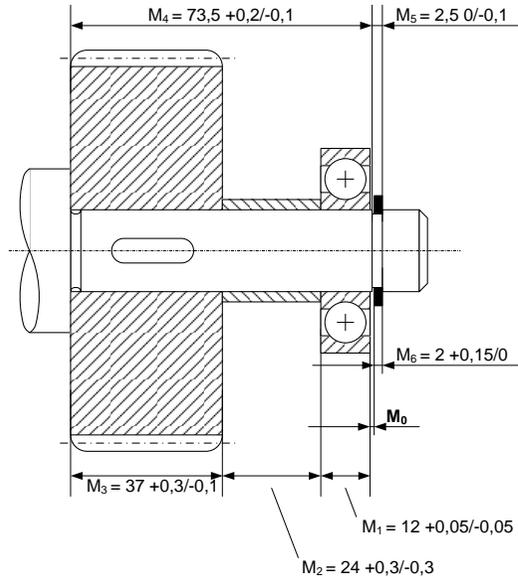


Abbildung 18: Einteilung der Toleranzen nach VON PRAUN (2003)

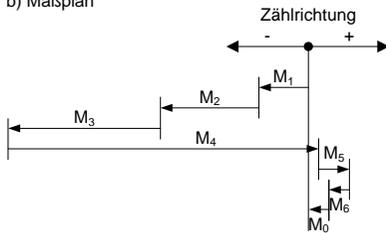
Im Produktentwicklungsprozess müssen Toleranzen sowohl für das Gesamtprodukt als auch für dessen Baugruppen und Einzelteile sowie deren Fertigungsstufen entlang der Prozesskette definiert werden, weshalb der Vorgang der Tolerierung äußerst komplex ist (MERGET 2004). Die Vorgaben zur Funktionserfüllung lassen sich dabei meist nicht durch eine einzelne Toleranz definieren, vielmehr beeinflussen sich mehrere gegenseitig (JORDEN 2009). Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Elementen ergeben sich sogenannte Maßketten. Diese stellen im Rahmen der vorliegenden Arbeit stets geometrische Verhältnisse wie in Abbildung 19 dar, allgemein wird der Begriff jedoch auch z. B. für physikalische Zusammenhänge verwendet (MERGET 2004).

2.3 Grundlagen qualitätsrelevanter Aspekte

a) beispielhafte Einbausituation eines Zahnrades (alle Angaben in mm)



b) Maßplan



c) Maßgleichung

$$M_0 = -M_1 - M_2 - M_3 + M_4 + M_5 - M_6$$

Legende

M_0 : Schließmaß	M_4 : Wellenabsatz
M_1 : Lagerbreite	M_5 : Nutbreite
M_2 : Hülsenbreite	M_6 : Sicherungsring
M_3 : Zahnradbreite	

Abbildung 19: Beispielhafte Maßkette für die Einbausituation eines Zahnrades (a), zugehöriger Maßplan (b) sowie Maßgleichung (c) in Anlehnung an KLEIN (2006)

Die Auslegung von Maßketten lässt sich abhängig von den Randbedingungen und der Zielsetzung als Toleranzanalyse oder -synthese durchführen (JORDEN 2009). Beide Methoden nehmen Schlüsselpositionen hinsichtlich der Produkt- und Prozessentwicklung ein und werden im Folgenden erläutert (ZHANG & WANG 1993).

Bei der *Toleranzanalyse* werden die zu betrachtenden Einzeltoleranzen als vorgegeben angesehen. Das Ziel ist die Berechnung des resultierenden Schließmaßes, sodass Auswirkungen fertigungsbedingter Abweichungen auf den Funktionsträger beurteilt werden können (JORDEN 2009).

Hierfür wird bei der *arithmetischen Toleranzanalyse* der ungünstigste Fall betrachtet, d. h. bei jedem Einzelmaß wird von der maximal zulässigen Abweichung in einer einheitlichen Richtung ausgegangen. Die Art der Verknüpfung wird von der Geometrie des Funktionsträgers vorgegeben. Im einfachsten Fall beziehen sich alle auf dieselbe Richtung, sodass sich eine lineare Maßkette ergibt (MERGET 2004) (vgl. Abbildung 19).

Das arithmetische Schließmaß M_0 entspricht gemäß Gleichung (1) in diesem Fall der Summe aller k Einzeltoleranzen M_i :

$$M_0 = \sum_{i=1}^k M_i \quad (1)$$

In der Realität sind insbesondere bei komplexen Produkten wie Flugzeugtriebwerks-Rotoren nichtlineare Maßketten auch höherer Ordnung möglich. Stets wird jedoch der ungünstigste Fall betrachtet, um die sortierungsfreie Austauschbarkeit aller Elemente einer Baugruppe zu gewährleisten (TRUMPOLD ET AL. 1997). Dies führt zur engen Auslegung von Toleranzen, obwohl die Eintrittswahrscheinlichkeit des betrachteten Extremfalls in der Realität gering ist (JORDEN 2009; KLEIN 2006). Daraus ergeben sich vor allem zwei Nachteile. Erstens nimmt das Schließmaß durch die bei jedem Prozess notwendigen Einzeltoleranzen mit steigender Prozesskettenlänge zu. Zweitens werden unnötige Kosten verursacht, da Fertigungskosten im Allgemeinen mit der Toleranzforderung zunehmen (EHRENSPIEL ET AL. 2007; MANNEWITZ 1996; MERGET 2004). D. h. engere Toleranzen führen zu höheren Fertigungskosten.

Deshalb ist aus wirtschaftlicher Sicht eine *statistische Tolerierung* anzustreben (DENZER 2006). Diese berücksichtigt die Tatsache, dass ein hergestelltes Merkmal eines Funktionsträgers eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung besitzt. Dies bedeutet, dass die Werte einer großen Anzahl eines gefertigten Merkmals statistisch verteilt sind (JORDEN 2009). Stehen keine realen Messwerte zur Verfügung, um die Art und die Parameter der Verteilung zu bestimmen, so können idealisierte Verteilungen, wie z. B. die Normal-, die Gleich- oder die Rechteckverteilung angenommen werden, wobei Erstere einen beherrschten Serienprozess

widerspiegelt (KLEIN 2006; MERGET 2004). Wird eine Normalverteilung zugrunde gelegt, so ist bei der statistischen Betrachtung stets ein zulässiger Fehleranteil zu definieren, da diese aus mathematischer Sicht keine Grenzen aufweist (PFEIFFER 1993). In der Praxis hat sich dabei ein Bereich von sechs Standardabweichungen der Normalverteilungen bewährt (JORDEN 2009).

Im Vergleich zur arithmetischen Berechnung ist die statistische Toleranzanalyse mit einem erhöhten Aufwand zur Durchführung verbunden, der insbesondere mit der geometrischen Komplexität des Funktionsträgers und der Anzahl der Einzelmaße steigt. Deshalb existieren dafür verschiedene unterstützende Ansätze. Ein etabliertes Werkzeug ist die Monte-Carlo-Simulation, bei der Werte gemäß vorgegebener Wahrscheinlichkeitsverteilungen zufällig kombiniert werden. Dem Nachteil, dass die Ermittlung der besten Lösung dabei nicht zielgerichtet ist, kann z. B. mit einer Methode begegnet werden, die das Optimierungsproblem löst (SIVA KUMAR & STALIN 2009). Ebenso existiert eine Möglichkeit, automatisiert Maßketten zu identifizieren und Toleranzen zu bestimmen (BOUAZIZ & MASMOUDI 2006). Auch eine mathematische Lösung ist möglich, welche allerdings mit hohem Berechnungsaufwand verbunden ist (GAO ET AL. 1995). Außerdem sind die computergestützte Bildung einer Gesamtverteilung und die sogenannte quadratische Toleranzanalyse zu nennen (MANNEWITZ 1996; MERGET 2004). Dabei wird mittels des Grenzwertsatzes und des Abweichungsfortpflanzungsgesetzes das Schließmaß berechnet. Laut dem Grenzwertsatz ist die Summe unabhängig von den Ausgangsverteilungen ab fünf Einzelmaßen immer normalverteilt. Das Abweichungsfortpflanzungsgesetz besagt, dass die Varianz der Summe der Einzelmaße gleich der Summe der Einzelvarianzen ist.

Die zur *Toleranzanalyse* umgekehrte Vorgehensweise ist die *Toleranzsynthese*. Hierbei wird die maximal zulässige Abweichung des Schließmaßes vorgegeben, um z. B. die Funktionserfüllung des Produktes zu gewährleisten, und auf die Einzeltoleranzen aufgeteilt (JORDEN 2009). Für eine eindeutige Lösung ist meist eine zusätzliche Zielgröße notwendig, da oftmals mehrere alternative Aufteilungen technisch realisierbar sind. Dabei lassen sich die in Abbildung 20 aufgeführten Möglichkeiten unterscheiden (MERGET 2004).

2 Stand der Wissenschaft und Technik

gleichmäßige Aufteilung	Bestimmung der Einzeltoleranzen mittels Division des Schließmaßes durch die Anzahl der Einzeltoleranzen
proportionale Aufteilung	Aufteilung des Schließmaßes auf Einzeltoleranzen entsprechend deren Anteil am Schließmaß
Aufteilung nach ISO-Toleranzen	Zuweisung einer einheitlichen Toleranzklasse für alle Einzeltoleranzen, sodass geforderte Schließtoleranz unterschritten wird ----- anschließende Aufweitung von Einzeltoleranzen, beginnend mit der kleinsten, sodass geforderte Schließtoleranz nicht überschritten wird
Aufteilung nach Kosten	Aufweitung von Einzeltoleranzen durch statistische Betrachtung unter der Voraussetzung, dass eine Sortierprüfung zur Gewährleistung der Montierbarkeit vorangestellt wird

Abbildung 20: Möglichkeiten zur Aufteilung der Abweichung eines Schließmaßes auf die Einzelmaße nach MERGET (2004)

Hierbei treten meist die wirtschaftlichen Aspekte in den Vordergrund (VON PRAUN 2003). Die Toleranzsynthese kann somit sowohl der Verbesserung oder Optimierung der Funktionserfüllung des Produkts als auch der Reduktion seiner Fertigungskosten dienen (ZHANG ET AL. 2010). Die für eine wirtschaftliche Betrachtung notwendige quantitative Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen Fertigungskosten und geometrischen Maßtoleranzen erfolgt durch sogenannte Toleranz-Kosten-Modelle. Die Art des Zusammenhangs wird dabei vor allem durch die Technologie an sich, die zu fertigende Losgröße, das Material des Werkstücks, den Nennmaßbereich und die Toleranz beeinflusst (VON PRAUN 2003). Zur Ermittlung der Abhängigkeiten ist die Nutzung von vorhandenem produktionstechnischem Wissen von essenzieller Bedeutung (YEO ET AL. 1998). Anwendung finden beispielsweise in einer Serienproduktion aufgezeichnete Maschinendaten, die durch Expertenwissen ergänzt werden, sodass eine Datenbasis zur Verfügung steht, die nur bei Bedarf erweitert oder angepasst wird (DIMITRELLOU ET AL. 2007). Im Allgemeinen ist die Einhaltung engerer Toleranzgrenzen mit höheren Aufwänden in der Produktion und somit höheren Fertigungskosten verbunden (DONG ET AL. 1994). Weiterführende Ansätze bauen auf Toleranz-Kosten-Modellen auf, indem z. B. die Zusammenhänge zwischen der Funktionserfüllung des Produkts, dessen Fertigungskosten sowie den definierten Konstruktionsgrößen und deren Toleranzen mathematisch beschrieben werden,

um robuste Toleranzverteilungen zu identifizieren (ZHANG ET AL. 2010). Eine andere Art von Toleranzkosten, deren Bestimmung ebenfalls in der Literatur beleuchtet wird, stellen monetäre Aufwendungen für die Überprüfung der Einhaltung geometrischer Toleranzanforderungen dar. Damit verbunden ist das Risiko von Fehlentscheidungen, d. h. die Abweisung guter und die Annahme fehlerhafter Funktionsträger (MORONI ET AL. 2011).

Die gemeinsame Aufgabe der Toleranzanalyse und der -synthese ist die Auslegung einer Prozesskette hinsichtlich geforderter Toleranzen. Die Vorgehensweisen unterscheiden sich dadurch, dass entweder die Zieltoleranz vorgegeben ist und diese auf die Einzeltoleranzen verteilt wird oder dass ausgehend von der Prozesskette die erreichbare Gesamtabweichung ermittelt wird. Das Ergebnis unterliegt dabei immer einer statistischen Wahrscheinlichkeit, da Fertigungsprozesse stets durch Störgrößen beeinflusst werden und somit alle hergestellten Merkmale nicht exakt sind. Deshalb ist es Aufgabe der im nächsten Abschnitt dargestellten Methode der FMEA, mögliche Fehler, d. h. Abweichungen außerhalb einer Toleranz, zu identifizieren und zu beurteilen.

2.3.4 Qualitätsplanung mittels der FMEA

Die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ist ein systematisches Vorgehen, um Risiken in Form etwaiger Fehler zu analysieren und zu beurteilen. Sie ist somit Teil des Themengebietes *Risikomanagement*, das alle „Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ umfasst (DIN ISO 31000 2011). Die FMEA ist möglichst früh im Entwicklungsprozess einzusetzen, da hier die wirtschaftliche Beeinflussbarkeit am größten ist (DIN EN 60812 2006). Je nach Fokus werden drei Arten der FMEA unterschieden, die methodisch jedoch identisch sind. Es können neben dem Gesamtsystem der Entwicklung (System-FMEA) und dem Produkt (Produkt-FMEA) auch die eingesetzten fertigungstechnischen Prozesse (Prozess-FMEA) und damit die Prozesskette untersucht und beurteilt werden (KROONDER 2007). Die Prozess-FMEA dient insbesondere der Abschätzung von Risiken, die aus den eingesetzten Verfahren resultieren, und der Reduzierung notwendiger Änderungen nach dem Beginn der Serienproduktion (KAMISKE & BRAUER 1999). Zudem ermöglicht die FMEA, eine Wissensbasis über Fehlerzusammenhänge und Qualitätseinflüsse zu bilden (PFEIFER 1993). Die zentrale Kenngröße einer FMEA ist die Risikoprioritätszahl (RPZ), welche aus drei separat zu bewertenden Teilkriterien ermittelt wird (VDI 2247 1994). Der Ablauf der Beurteilung im Rahmen einer FMEA ist in Abbildung 21 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

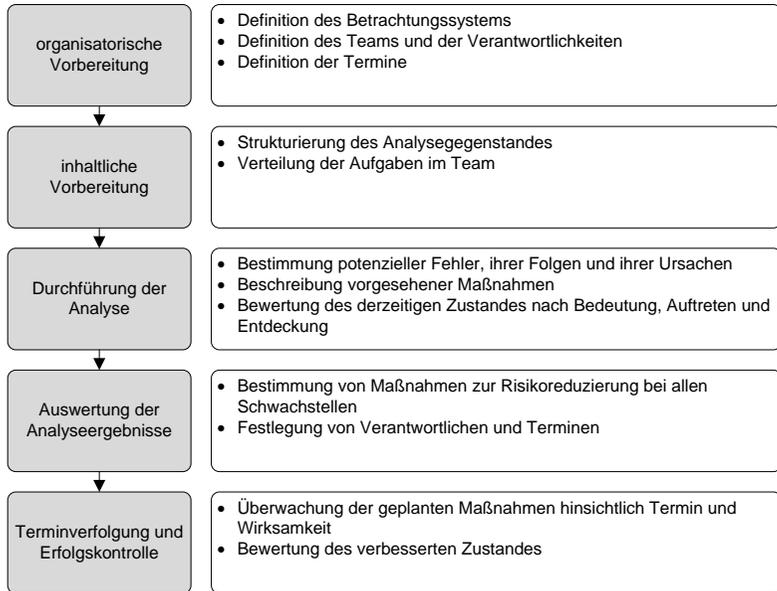


Abbildung 21: Vorgehensweise zur Durchführung einer FMEA in Anlehnung an PFEIFER (1993) und KAMISKE & BRAUER (1999)

In der *organisatorischen Vorbereitung* wird zunächst das Betrachtungssystem festgelegt, d. h. im Falle der Prozess-FMEA der zu untersuchende Prozess. Anschließend wird ein Team zusammengestellt, das aus Mitgliedern besteht, die das notwendige Wissen unterschiedlicher Fachdisziplinen wie Konstruktion, Einkauf, Fertigung etc. bereitstellen (DIN EN 60812 2006).

Die *inhaltliche Vorbereitung* dient der Strukturierung des Betrachtungssystems und der Systematisierung des Vorgehens. Dazu werden die einzelnen Teilfunktionen des Betrachtungssystems sowie dessen Schnittstellen zum Gesamtsystem aufgezeigt und die Aufgaben innerhalb des Teams verteilt (PFEIFER 1993).

Für den Kern der Methode, die *Durchführung der Analyse*, existiert ein standardisiertes Formblatt, das alle Informationen inklusive den Randbedingungen und Ergebnissen umfasst. Zunächst werden potenzielle Fehler sowie deren Folgen und Ursachen identifiziert. Jedem Fehler werden dann Kennwerte für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Fehlers (R_A), dessen Bedeutung (R_B) und die Wahrscheinlichkeit seiner Entdeckung (R_E) zugewiesen. Meist wird hierfür je-

weils ein Wertebereich von 1 bis 10 verwendet, es sind jedoch auch andere Skalen möglich (DIN EN 60812 2006). Ein niedriger Wert steht dabei für ein geringes, ein hoher für ein großes Risiko. Die Verdichtung zur RPZ (Risikoprioritätszahl) erfolgt gemäß Gleichung (2) durch Multiplikation der drei Kennwerte, sodass sich ein Wertebereich von 1 bis 1000 ergibt (PFEIFER 1993):

$$RPZ = R_A \cdot R_B \cdot R_E \quad (2)$$

Im Rahmen der *Auswertung der Analyseergebnisse* kann anhand der RPZ eine Rangfolge zur Beseitigung der Fehlerrisiken gebildet werden (KAMISKE & BRAUER 1999). Teilweise werden Schwellenwerte festgelegt, unterhalb derer das Risiko als akzeptabel angesehen wird. Aufgrund der Subjektivität der Beurteilung der Risikozahlen ist dies jedoch kritisch zu sehen (PFEIFER 1993). Stattdessen sollte für jeden möglichen Fehler die Entscheidung über Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung individuell getroffen werden. Im Bedarfsfall sind ein Verantwortlicher zu benennen und ein Zieltermin festzulegen.

Die *Terminverfolgung und Erfolgskontrolle* nach der Durchführung der Maßnahmen zur Beseitigung der potenziellen Fehlerquellen dient der Überprüfung der Wirksamkeit. Zur quantitativen Beurteilung werden die Kennwerte neu ermittelt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mittels der FMEA mögliche Fehler eines Systems (Produkt, Konstruktion, Fertigungsprozess) identifiziert, deren Kritikalitäten anhand der Risikoprioritätszahl beurteilt sowie Maßnahmen zur Beseitigung und deren Ergebnis dokumentiert werden können. Nach der Einführung der relevanten Bereiche des Toleranzmanagements sowie der Methode der FMEA zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte fertigungstechnischer Prozessketten werden im folgenden Abschnitt die wirtschaftlichen Grundlagen adressiert.

2.4 Grundlagen wirtschaftlicher Aspekte

2.4.1 Allgemeines

Der Begriff *Kosten* kann als in Geld bewerteter Verzehr von Gütern und Dienstleistungen zur Erstellung und zum Absatz der betrieblichen Erzeugnisse und zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft verstanden werden (DIN 32990-1

1989; VDI 2234 1990). Nicht zuletzt aufgrund des hohen Aufwandes hinsichtlich der Sicherstellung der Erfüllung von Qualitätsanforderungen sind Kosten im Flugzeugtriebwerks-Bau von entscheidender Bedeutung. Ein Ziel des Kostenmanagements ist es deshalb, „durch konkrete Maßnahmen die Kosten von Produkten, Prozessen und Ressourcen so zu beeinflussen, dass ein angemessener Unternehmenserfolg erzielt und die Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig verbessert wird“ (FRANZ 1997). Die Gesamtkosten eines Unternehmens werden je nach Zielsetzung auf verschiedene Arten untergliedert. Kriterien können, wie in Abbildung 22 dargestellt, die Art der Verrechnung, die Abhängigkeit vom Beschäftigungsgrad, die Art der Verursachung oder die Stelle der Kostenentstehung sein (EHRLENSPIEL ET AL. 2007; VDI 2234 1990).

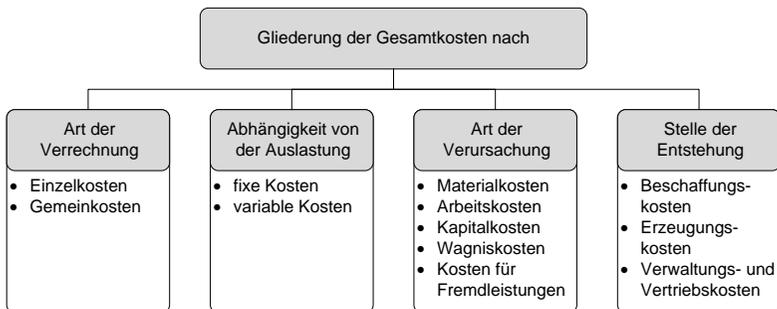


Abbildung 22: Gliederungsmöglichkeiten für die Gesamtkosten eines Unternehmens nach VDI 2234 (1990)

Unabhängig vom gewählten Kriterium stellt die Bestimmung der monetären Größen mittels Kostenrechnung eine der Hauptaufgaben bei der Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte dar.

2.4.2 Kostenrechnung

Die Quantifizierung des Werteverzehrs in der betrieblichen Leistungserstellung findet im Rahmen der Kostenrechnung statt (GÖTZE 2010). Letztere ist Teil des betrieblichen Rechnungswesens und besitzt im Wesentlichen drei Ziele. Diese sind die ständige Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der Betriebsprozesse sowie die Bestimmung voraussichtlicher Kosten (Vorkalkulation) und tatsächlich angefallener Kosten (Nachkalkulation) (VDI 2234 1990; COENENBERG 1997). Dabei ist es für die Gesamtbetrachtung des Unternehmens notwendig, alle monetären

Aufwände strukturiert zu erfassen (Kostenarten), diese, sofern sie nicht direkt einer Leistungserstellung zuordenbar sind, auf die vorhandenen Unternehmensbereiche (Kostenstellen) aufzuteilen und abschließend den Ergebnissen der Leistungserstellung (Kostenträgern) zuzuordnen (GÖTZE 2010). Die entsprechende Vorgehensweise ist in Abbildung 23 dargestellt.

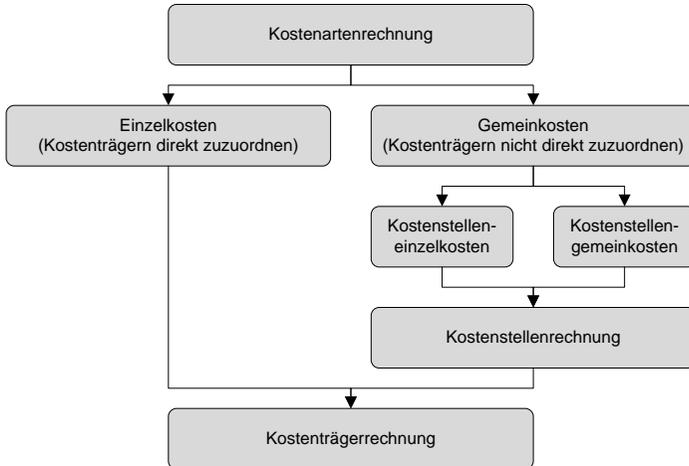


Abbildung 23: Teilbereiche der Kostenrechnung nach VDI 2234 (1990)

Zusätzlich wird, abhängig vom Zeitpunkt der Berechnung im Hinblick auf die Produkterstellung, zwischen Vor- und Nachkalkulation unterschieden.

Für den angestrebten Vergleich von Fertigungsalternativen ist zunächst die Definition des relevanten Informationsumfangs notwendig. Abbildung 24 stellt hierzu unterschiedliche Sichtweisen auf die produktbezogenen Herstellkosten dar. Allen liegt dieselbe Datenbasis zugrunde, die jedoch abhängig von der Zielsetzung unterschiedlich betrachtet wird (vgl. EHRENSPIEL ET AL. 2007). Nachfolgend werden ausschließlich die für die Arbeit relevanten Teile der Kostenrechnung diskutiert, zur Vertiefung der anderen wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. COENENBERG 1997; EHRENSPIEL ET AL. 2007; GÖTZE 2010; WARNECKE ET AL. 1996).

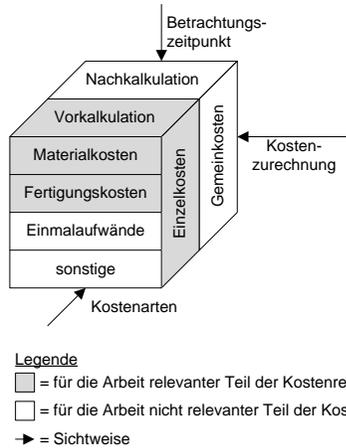
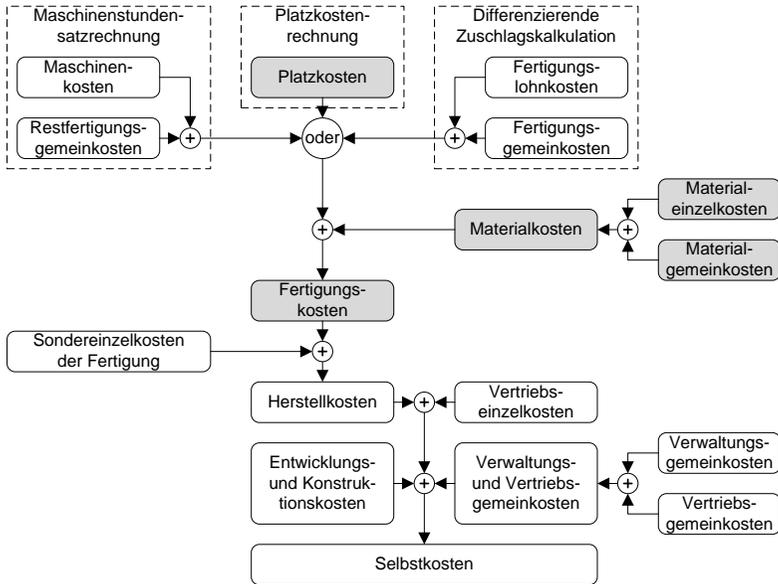


Abbildung 24: Sichtweisen auf die produktbezogenen Herstellkosten in Anlehnung an EHRENSPIEL ET AL. (2007)

Der Kern der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf die wirtschaftlichen Aspekte besteht darin, Kosten für einen Funktionsträger durch Betrachtung von Prozessketten zu ermitteln. Somit liegt der Fokus auf der Kostenträgerrechnung zur Bestimmung der produktbezogenen, monetären Aufwendungen, deren Hauptanteile Material- und Fertigungskosten sind (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Da Vergleiche alternativer Prozessketten in der Planungsphase stattfinden, ist eine zukunftsorientierte Ausrichtung der Inhalte notwendig, weshalb die Methoden der Vorkalkulation angewendet werden (GÖTZE 2010). Dies wird oftmals auch als Kostenschätzung bezeichnet. Darunter werden alle Maßnahmen zur Bestimmung und Vorhersage der Kosten von Aktivitäten verstanden, bevor diese ausgeführt werden (HALEVI 2001). Mit der differenzierenden Zuschlagskalkulation, der Maschinenstundensatz- und der Platzkostenrechnung existieren drei etablierte Kalkulationsverfahren für die Berechnung der Bearbeitungskosten.

Für die *differenzierende Zuschlagskalkulation* werden Gemeinkostenarten wie z. B. für Material oder Bearbeitung gebildet. Der charakteristisch niedrige Aufwand bei der Berechnung wird durch einen geringen Detaillierungsgrad erzielt. Bei einer Serienfertigung mit großen Stückzahlen ist der damit verbundene Informationsverlust gering, allerdings ist diese Methode nicht für die Anwendung bei einer Mischfertigung oder einer kapitalintensiven Fertigung geeignet (EHRENSPIEL ET AL. 2007).

Bei der *Maschinenstundensatz- und der Platzkostenrechnung* bilden Gruppen ähnlicher Anlagen oder einzelne Maschinen Kostenstellen, was eine verursachungsgerechtere Betrachtung erlaubt als mittels der Gemeinkosten (EHRLENSPIEL ET AL. 2007). Allerdings ist der Berechnungsaufwand aufgrund dieser Differenzierung höher. Die zeitabhängigen monetären Aufwände der Maschinenverwendung (Maschinenstundensatz) werden dabei aus der kalkulatorischen Abschreibung, den kalkulatorischen Zinsen, den Raum- sowie den Energie- und den Instandhaltungskosten bestimmt (VDI 2234 1990). Für die Platzkostenrechnung, auch Arbeitsstundensatzrechnung genannt, werden zusätzlich zu den Maschinen- auch Lohn- und Lohnnebenkosten berücksichtigt (MÜLLER 2007; WARNECKE ET AL. 1996). In Abbildung 25 sind die Kalkulationsverfahren einander gegenübergestellt und in das Schema zur Berechnung der Selbstkosten eingeordnet.



Legende

- = für die Arbeit relevante Kosten
- = für die Arbeit nicht relevante Kosten

Abbildung 25: Schema zur Berechnung der Selbstkosten einschließlich der Kalkulationsverfahren für Bearbeitungskosten nach EHRENSPIEL ET AL. (2007) und MÜLLER (2007)

Vor dem Hintergrund der im Abschnitt 1.2 „Zielsetzung“ definierten Anforderung des wirtschaftlichen Vergleichs von Prozessketten wird der Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit auf die Fertigungskosten begrenzt, welche aus den Material- und den Platzkosten bestimmt werden. Da die Alternativen dieselben Anforderungen erfüllen sollen, beschränken sich die Unterschiede auf die Fertigungskosten. Somit kann der Aufwand zur Anwendung der Methodik durch das Weglassen identischer Kostenanteile eingegrenzt werden. Dies ist insbesondere dahingehend vorteilhaft, dass mehrere Fertigungsalternativen betrachtet werden sollen und Prozessketten für Rotoren im Flugzeugtriebwerks-Bau viele Elemente beinhalten. Zudem adressiert die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik den unternehmensinternen, vornehmlich technischen Vergleich von Fertigungsalternativen, weshalb den Gemeinkosten eine untergeordnete Rolle zuzuschreiben ist. Dennoch können z. B. im Fall einer Angebotskalkulation für externe Zwecke

die erzielten Ergebnisse um die notwendigen Aspekte ergänzt werden. Nach der Definition der relevanten wirtschaftlichen Größen wird die quantitative Ermittlung in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.4.3 Bestimmung von Materialkosten

Materialkosten im Allgemeinen sind der monetär bewertete Verbrauch von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen (GÖTZE 2010). Sie entstehen durch „Beschaffung, Lagerung und Verbrauch von Materialien im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung“ (VDI 2234 1990). Unter dem Begriff *Materialien* sind hierbei Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe zu verstehen.

Rohstoffe bilden die Hauptbestandteile des späteren Funktionsträgers. Dies beinhaltet sowohl Rohteile, die mittels eines urformenden Verfahrens hergestellt und durch eine Prozesskette in ein Produkt umgewandelt werden, als auch komplexe Zukaufteile. Da die monetären Aufwände hierfür direkt einem Kostenträger zugeordnet werden können, stellen sie für Rohstoffe Material-Einzelkosten dar (VDI 2234 1990).

Hilfsstoffe gehen ebenso in den Funktionsträger ein, spielen jedoch sowohl aus Sicht der Funktionserfüllung des Produkts als auch in Bezug auf dessen monetären Wert eine geringe Rolle und werden deshalb meist nicht direkt zugeordnet, sondern über Zuschläge in den Gemeinkosten berücksichtigt (VDI 2234 1990). Beispiele für Hilfsstoffe sind Lotmaterial oder Klebstoff für einen Fügeprozess oder auch Schrauben und anderes Kleinmaterial.

Betriebsstoffe gehen nicht in den Funktionsträger ein, werden jedoch zur Leistungserstellung benötigt. Dies sind vornehmlich Ressourcen wie elektrische Energie oder Druckluft zum Betrieb der Produktionsanlagen, aber auch z. B. Kühlschmiermittel für die spanende Bearbeitung. Die monetären Aufwände hierfür sind meist nicht einem Kostenträger zuzuordnen und stellen deshalb Gemeinkosten dar (VDI 2234 1990).

Die gesamten Materialkosten (*MK*) für einen Funktionsträger, bestehend aus diesen drei Stoffarten, berechnen sich entsprechend Gleichung (3) als Summe der ihm zurechenbaren Materialeinzelkosten (*MEK*) und den prozentualen Materialgemeinkosten (*MGK*) (EHRENSPIEL ET AL. 2007):

$$MK = MEK + MGK \quad (3)$$

Den für die vorliegende Arbeit relevanten Anteil bilden hierbei die Materialeinzelkosten. Die aus betriebswirtschaftlicher Sicht notwendige Verteilung nicht direkt zurechenbarer Kosten durch verbrauchte Materialmengen auf Kostenträger wird vor dem Hintergrund der Prozesskettenbetrachtung zum Vergleich von Fertigungsalternativen nicht weiter fokussiert. Betriebs- und teilweise auch Hilfsstoffe sind jedoch durch deren Einfluss bei der Berechnung der zeitabhängigen Kosten einer Maschine berücksichtigt. Die Bestimmung der Materialeinzelkosten erfolgt gemäß Gleichung (4):

$$MEK = \frac{\text{Mengenverbrauch}}{\text{Kostenträger}} \cdot \frac{\text{Kosten}}{\text{Mengeinheit}} \quad (4)$$

In einer bestehenden Serienproduktion kann der Mengenverbrauch über Ansätze wie die Inventurmethode (Vergleich von Anfangs- und Endbestand eines Zeitraumes), die Rückrechnung (Betrachtung produzierter Mengen und der vorher bekannten Stücklisten für Rohmaterial je Einheit) oder die Skontrationsmethode (Aufzeichnung von Bestandsmengen und Materialentnahmescheinen) erfasst werden (GÖTZE 2010). Da diese im Rahmen einer Vorkalkulation nicht anwendbar sind, muss während der Planung in der Produktentwicklungsphase auf andere Methoden zurückgegriffen werden. Beispielsweise können im Falle von Zukaufteilen vergleichbare, bereits existierende Elemente als Referenz dienen oder die Kosten anhand des aus Design- und CAD-Daten ermittelten Materialvolumens und einem volumenspezifischen Kostensatz bestimmt werden. Insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung spielt dabei Erfahrungswissen von Experten eine entscheidende Rolle.

2.4.4 Bestimmung von Platzkosten

Die Platzkosten eines Prozesses setzen sich aus Anteilen für das Rüsten sowie für die Maschinen- und Personalbelegung zusammen, die jeweils separat berechnet und anschließend, wie in Abbildung 26 dargestellt, aufsummiert werden. Die Datengrundlage besteht jeweils aus der Zeit und dem dazugehörigen Stundensatz.

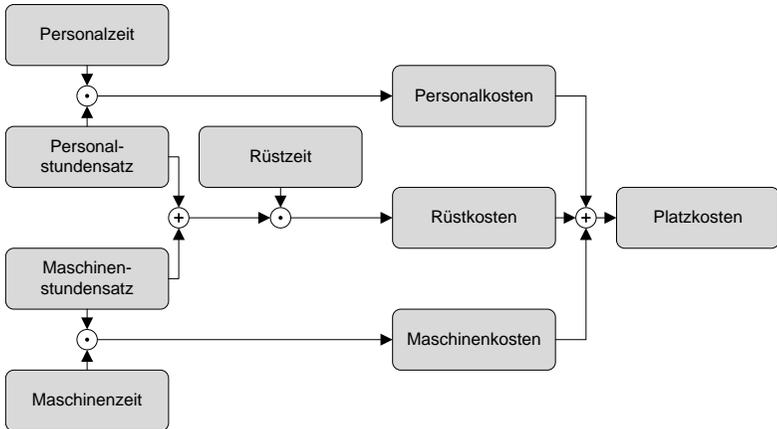


Abbildung 26: Struktur zur Berechnung der Platzkosten nach KRAUSS ET AL. (2011)

Die Aufteilung in Maschinen- und Personalkosten ist notwendig, da sich die Prozesszeiten dahingehend unterscheiden können, dass nicht während der gesamten Maschinenzeit Personal benötigt wird. Dies tritt insbesondere bei automatisierten Prozessen auf, ebenso wie bei Mehrstellenarbeit, d. h. bei „Erfüllung der Arbeitsaufgabe eines Arbeitssystems an mehreren gleichzeitig eingesetzten Betriebsmitteln“ (REFA 1997). Im Folgenden werden die drei einzelnen Anteile beschrieben.

Maschinenkosten (K_M) stellen den Werteverzehr dar, der durch die Ressourcenbelegung im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung entsteht. Die Quantifizierung erfolgt nach Gleichung (5) auf Basis der Faktoren Maschinenzeit (t_M) und Maschinenstundensatz (MSS):

$$K_M = t_M \cdot MSS \quad (5)$$

Die Ermittlung von Maschinenzeiten bzw. Prozesszeiten im Allgemeinen stellt oftmals ein Problem dar. In der Literatur sind hierzu zahlreiche Ansätze zu finden (vgl. AFT 2001; EHRENSPIEL ET AL. 2007; HEINZ & OLBRICH 1994; KAMINSKY 1980; LUCZAK ET AL. 2010; MÜLLER 2007; RAO 2011; TROMMER 2001). Sie lassen sich in *kontinuierliche Beobachtungen*, *Stichproben* und *rechnerisch-analytische Verfahren* gliedern (LUCZAK ET AL. 2010). Insbesondere in der Planungsphase spielen Sonderformen wie das Schätzen durch Experten, das Ver-

2 Stand der Wissenschaft und Technik

gleichen mit historischen Daten oder die Ermittlung durch parametrische Beschreibung eine große Rolle (MÜLLER 2007).

Zur Bestimmung des Maschinenstundensatzes (*MSS*) werden, wie Gleichung (6) zeigt, alle Kosten einer Anlage innerhalb eines Abrechnungszeitraums auf die Nutzung verteilt (WESTKÄMPER ET AL. 2010; VDI 2234 1990):

$$MSS = (K_A + K_Z + K_F + K_E + K_I) \cdot \frac{\text{Nutzungsdauer}}{\text{Jahr}} \quad (6)$$

Die zu berücksichtigenden Größen im Einzelnen sind in den Gleichungen (7) bis (11) dargestellt:

- Lineare kalkulatorische Abschreibungen:

$$K_A = \frac{\text{Wiederbeschaffungswert}}{\text{Gesamtnutzungsdauer}} \quad (7)$$

- Kalkulatorische Zinsen:

$$K_Z = \frac{\text{Wiederbeschaffungswert}}{2} \cdot \frac{\text{Zinssatz}}{\text{Jahr}} \quad (8)$$

- Flächenkosten:

$$K_F = \text{Anlagengrundfläche} \cdot \frac{\text{Flächenkostensatz}}{\text{Jahr}} \quad (9)$$

- Energiekosten:

$$K_E = \frac{\text{Kosten}}{\text{Energieeinheit}} \cdot \frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{Jahr}} \quad (10)$$

- Instandhaltungskosten:

$$K_I = \text{Wiederbeschaffungswert} \cdot \text{Instandhaltungsfaktor} \quad (11)$$

Für die nähere Betrachtung der einzelnen Größen sowie deren Bestimmung wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. AURICH ET AL. 2008; COENENBERG 1997; DENKENA & EIKÖTTER 2011; GÖTZE 2010; SCHILDBACH & HOMBURG 2009; VDI 2234 1990; VDI 3258 1964; WARNECKE ET AL. 1996).

Vor dem Hintergrund der Luftfahrtindustrie ist als entscheidender Faktor zur Senkung der auslastungsunabhängigen Kosten wie Abschreibung, Zinsen und Flächenkosten eine hohe Nutzungszeit hervorzuheben. Diese ist definiert als der Zeitraum, in dem die Anlage „mit vollem Leistungsvermögen“ produziert (VDI 3423 2011). Ausgehend von einem Jahr als Betrachtungszeitraum wird die zur Verfügung stehende Nutzungszeit, wie in Abbildung 27 dargestellt, durch produktionsfreie Zeiten sowie geplante und ungeplante Stillstände aufgrund organisatorischer und technischer Ausfallzeiten reduziert (vgl. VDMA 66412-1 2009; WARNECKE ET AL. 1996; WIESER 2009).

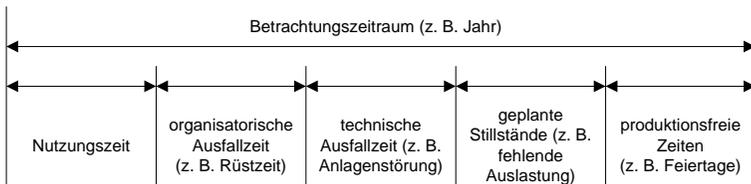


Abbildung 27: Aufteilung eines Betrachtungszeitraumes in Nutzungszeit und Stillstände einer Anlage in Anlehnung an VDMA 66412-1 (2009)

Produktionsfreie Zeiten sind abhängig von verschiedenen Faktoren wie z. B. der Anzahl gesetzlicher Feiertage oder der Arbeitszeit pro Woche je Mitarbeiter. Die Einflüsse der anderen Stillstände und Ausfallzeiten drücken sich in der etablierten Kenngröße der Verfügbarkeit aus. Sie ist definiert als die „Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalles in einem Zustand zu sein, dass sie eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllen kann, dass die erforderlichen äußere-

ren Hilfsmittel bereitgestellt sind“ (DIN 31051 2003). Eine hohe Verfügbarkeit bedeutet somit wenige technische Stillstände und reduziert in Kombination mit geringen organisatorischen Ausfallzeiten und geplanten Stillständen den Maschinenstundensatz.

Personalkosten (K_P) können analog zu den für die Aufwände der Maschinennutzung beschriebenen Sachverhalten nach Gleichung (12) anhand der Zeit der Beschäftigung (t_P) und eines Personalstundensatzes ($MASS = \underline{\text{Mitarbeiterstundensatz}}$) berechnet werden. Letzterer ist meist unternehmensweit festgelegt und kann für wirtschaftliche Betrachtungen, wie im Rahmen dieser Arbeit angestrebt, übernommen werden (MÜLLER 2007):

$$K_P = t_P \cdot MASS \quad (12)$$

Rüstkosten (K_R) entstehen durch „das Vorbereiten des Arbeitssystems für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe“ (REFA 1997). Dies beinhaltet sowohl organisatorische Abläufe wie die Auftragsannahme als auch technische Vorgänge wie das Bereitstellen notwendiger Werkzeuge und Betriebsmittel. Die Bestimmung erfolgt nach Gleichung (13) durch Multiplikation der Rüstzeit (t_R) mit der Summe aus den Stundensätzen für Personal ($MASS$) und Maschine ($MSS = \underline{\text{Maschinenstundensatz}}$):

$$K_R = t_R \cdot (MASS + MSS) \quad (13)$$

Da Rüstvorgänge meist pro Arbeitsauftrag einmalig ausgeführt werden, ist gerade bei der Herstellung kundenindividueller Produkte die Rüstkostenverringerung eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung der Herstellkosten (EHRENSPIEL ET AL. 2007; REFA 1997). Aufgrund der kleinen Stückzahlen von Rotoren für Flugzeugtriebwerke trifft diese Aussage darüber hinaus insbesondere auch auf die in dieser Arbeit beleuchtete Aufgabenstellung zu.

Es kann zusammengefasst werden, dass zur Bestimmung der Platzkosten die Stundensätze für Personal und Maschine sowie die Prozesszeiten für Personal, Maschine und Rüsten zu ermitteln sind. Somit sind zusammen mit den Materialkosten alle notwendigen wirtschaftlichen Informationen definiert. Im nächsten Abschnitt werden einige grundlegende Begrifflichkeiten aus dem Themengebiet des Variantenmanagements aufgezeigt.

2.5 Grundlagen des Variantenmanagements

Im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung für Rotoren von Flugzeugtriebwerken ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Typen von Varianten notwendig, weshalb die Begrifflichkeiten und Grundlagen der Thematik zum besseren Verständnis in diesem Kapitel aufgegriffen werden.

Die Herstellung von Varianten in Form ähnlicher Produkte basiert vor allem darauf, dass durch eine auf den Kunden zugeschnittene Leistung ein entscheidender Wettbewerbsvorteil erreicht werden kann (ZÄH ET AL. 2002). Vor dem Hintergrund des steigenden Kundenanspruchs in Bezug auf die Individualisierung von Produkten stehen Unternehmen deshalb zunehmend dem Problem gegenüber, einerseits die daraus resultierende Komplexität beherrschen zu müssen und andererseits dennoch eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen.

Alle entsprechenden Maßnahmen und Strategien wie z. B. der modulare Aufbau von Produkten werden unter dem Begriff des *Variantenmanagements* zusammengefasst (LINDEMANN ET AL. 2006). Der Themenkomplex umfasst dabei alle Möglichkeiten, die Variantenvielfalt innerhalb eines Unternehmens zu beeinflussen. Das vornehmliche Ziel ist es, das „Kosten-Nutzen-Optimum der Variantenvielfalt“ zu erreichen (KUNZ 2005). Als Varianten werden dabei „Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“ bezeichnet (DIN 199-1 2002). Für die Betrachtung von Prozessketten sind jedoch nicht nur ähnliche Gegenstände in Form von Funktionsträgern relevant. Auch alternative fertigungstechnische Prozessketten sind als ähnlich anzusehen. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit das erweiterte Verständnis von *Varianten* als *technische Systeme* verwendet, die dem gleichen Zweck dienen und sich in mindestens einer Beziehung oder einem Element unterscheiden (FRANKE 2002). Darüber hinaus finden sich in der Literatur zahlreiche weitere Definitionen und Aspekte zum Verständnis des Variantenbegriffs. Eine Übersicht hierzu bietet z. B. RENNER (2007).

Allen gemein ist jedoch, dass bei der Betrachtung von Varianten stets eine Anzahl verwandter Systeme eine Familie bildet, z. B. besteht eine Produktfamilie aus einer Menge von Produktvarianten (PONN & LINDEMANN 2011). In Abhängigkeit davon, wie die Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen einer Familie beschaffen sind, werden Varianten, wie in Abbildung 28 dargestellt, gegliedert (ZENNER 2006). Die Relevanz der einzelnen Elemente im Hinblick auf die Betrachtung alternativer Prozessketten für Rotoren von Flugzeugtriebwerken wird nachfolgend erläutert.

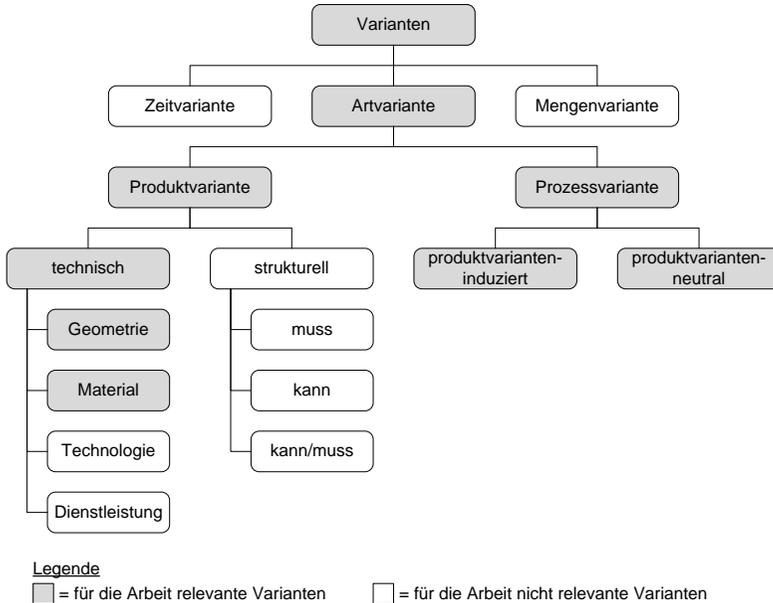


Abbildung 28: Gliederung von Varianten nach MENGE (2001) und ZENNER (2006)

Dem Vergleich der Fertigungsalternativen im Rahmen dieser Arbeit liegt die Annahme zugrunde, dass alle Prozessketten den identischen Rotor als Ausgangsgröße besitzen. Somit stellen sie produktvarianten-neutrale Prozessvarianten dar. Diese lassen sich von den produktvarianten-induzierten dadurch abgrenzen, dass die Unterschiede zwischen den Prozessvarianten nicht auf Produktvarianten zurückgeführt werden können (MENGE 2001).

Darüber hinaus soll die Berücksichtigung von ähnlichen Rotoren (Produktvarianten) in der Methodik erfolgen, wobei der Betrachtungsraum auf Unterschiede bezüglich der Geometrie und der verwendeten Werkstoffe begrenzt wird. Dabei ist zu beachten, dass Veränderungen von Maßen oder Materialien Auswirkungen auf wirtschaftliche oder qualitätsrelevante Einflussfaktoren der Prozesse haben können. Somit sind für diese Arbeit auch produktvarianten-induzierte Prozessvarianten von Relevanz.

Allerdings ist der Kern des Variantenmanagements, die Beherrschung der Komplexität kundenindividueller Produkte zu ermöglichen, nicht Inhalt der vorlie-

genden Arbeit. Vielmehr dient die etablierte Einteilung nach Abbildung 28 lediglich der Erläuterung, welche Arten von Varianten für die Methodik zur Prozesskettenbetrachtung von Rotoren für Flugzeugtriebwerke unterschieden werden.

Zusammen mit den Begriffsdefinitionen, den allgemeinen Erläuterungen sowie den Grundlagen der qualitätsrelevanten und der wirtschaftlichen Aspekte wurden alle für die Methodik relevanten Inhalte beschrieben. Darauf aufbauend werden im nachfolgenden Abschnitt aktuelle, die das Thema der Arbeit berührende, wissenschaftliche Beiträge zur Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten aufgezeigt.

2.6 Die aktuellen Ansätze zur Prozesskettenbetrachtung

2.6.1 Kostenorientierte Ansätze

Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen (TROMMER 2001)

Die Arbeit von TROMMER (2001) adressiert die planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Fertigungsalternativen im Rahmen der Produktentwicklung auf der Betriebs- bzw. Fertigungsmitelebene. Im Gegensatz zu technologie- oder prozessbasierten Ansätzen werden auch indirekt wertschöpfende Tätigkeiten wie Handhabungs- und Transporttätigkeiten berücksichtigt. Dies erfordert die Möglichkeit, Entscheidungsgrundlagen dem jeweiligen Informationsstand anzupassen, damit eine iterative Detaillierung der Planung erfolgen kann. So werden anfangs qualitative Kriterien zur Reduzierung der Anzahl möglicher Fertigungsfolgen verwendet und mit steigendem Reifegrad der Entwicklung durch quantifizierbare Größen ergänzt.

Zur Generierung der Alternativen wird das zu entwickelnde Produkt anhand relevanter Merkmale beschrieben. Für diese werden, ausgehend von ihren Spezifikationen, schrittweise geeignete Technologien, Prozesse und Betriebsmittel bestimmt. Um die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten gering zu halten, ist der Betrachtungsraum zunächst auf wertschöpfende Tätigkeiten beschränkt. Mittels Matrizen kann automatisiert eine grobe Vorauswahl der Alternativen getroffen werden, die verbliebenen werden anschließend im Hinblick auf die gestellte Produktionsaufgabe überprüft. Anschließend erfolgt die Generierung der Fertigungsfolgen kombinatorisch oder nach Anwendervorgaben. Die notwendigen

indirekt wertschöpfenden Tätigkeiten werden abschließend anhand technischer und logistischer Zusammenhänge integriert. Zur Priorisierung der Fertigungsalternativen werden zwei Möglichkeiten aufgezeigt.

Stehen lediglich qualitative Informationen zur Verfügung, findet eine multikriterielle Bewertung statt. Hierbei werden zunächst geeignete Zielkriterien wie z. B. Kosten, Qualität oder Ökologie definiert und gegeneinander gewichtet. Jeder Fertigungsalternative werden anschließend Erfüllungsgrade hinsichtlich jedes Kriteriums zugewiesen. Durch geeignete Abbildung können auch unscharfe Werte oder Wertebereiche berücksichtigt werden. Die Identifizierung der am besten geeigneten Alternative erfolgt durch den Vergleich ihrer aufsummierten Erfüllungsgrade.

Eine Möglichkeit der Quantifizierung wird durch die sukzessive Ergänzung ausgewählter Daten gegeben. Die Methode basiert auf der Platzkostenrechnung, die sowohl zeitliche als auch monetäre Aspekte umfasst (vgl. Abschnitt 2.4.4, S. 44 ff.). Hierbei werden neben wertschöpfenden auch Handhabungs-, Transport- und Lagertätigkeiten berücksichtigt.

Die Methode bietet die Möglichkeit zur Bewertung von Fertigungsalternativen in einer frühen Phase der Produktentwicklung. Sowohl verschiedene Aspekte in beschreibender Form als auch unscharfe Angaben können verarbeitet werden. Allerdings werden qualitätsrelevante Aspekte lediglich zu Beginn der Methodik aufgegriffen, indem anfangs eine Prüfung der technischen Realisierbarkeit einer Fertigungsalternative vorgenommen wird. Wenn diese gegeben ist, werden weitere Kriterien betrachtet. Eine Quantifizierung erfolgt jedoch ausschließlich für die Fertigungskosten und -zeiten. Darüber hinaus ist die Berücksichtigung von Prüfschritten für den Anwendungsfall von Rotoren für Flugzeugtriebwerke zwingend notwendig, da diese einen entscheidenden Anteil an den Prozessketten ausmachen. Gemäß TROMMER (2001) ist zwar die grundlegende Möglichkeit zur Integration gegeben, eine weitere Betrachtung erfolgt jedoch nicht.

Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen (MÜLLER 2007)

In MÜLLER (2007) wird eine Methodik vorgestellt, um Fertigungsalternativen in Form von Verfahrensketten produktions- und entwicklungsbegleitend zu generieren und zu bewerten. Hierfür wird zunächst vorbereitend das vorhandene Wissen über die relevanten Fertigungsverfahren gesammelt und strukturiert. Dies ist vornehmlich für alle sogenannten Primärverfahren, d. h. wertschöpfenden Ver-

fahren, durchzuführen. Dabei wird die Betrachtung nicht nur auf im Unternehmen vorhandene Technologien begrenzt, sondern explizit zur Förderung von Innovationen auf neue ausgeweitet. Anschließend werden den zur Herstellung des betrachteten Bauteils notwendigen Produktionsaufgaben mögliche Fertigungsverfahren zugewiesen. Meist stellt die Lösung keine eindeutige Verfahrenskette dar, weshalb die daraus resultierenden Alternativen unter Berücksichtigung von Fertigungskosten, Einmalaufwänden sowie qualitativen Aspekten bewertet werden.

Letztere stellen Nutzwerte hinsichtlich der Kriterien Prozesssicherheit, Wandlungsfähigkeit, Arbeitssicherheit und Ergonomie, Grad der Standardisierung und technisches Risiko dar. Die Betrachtung der Einmalaufwände erfolgt anhand von aufwandsorientierten Kapitalwerten, d. h. die Einnahmeseite wird nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen ist aufgrund der Tatsache möglich, dass lediglich Alternativen verglichen werden, aus denen identische Einnahmen resultieren. Die Bestimmung der Fertigungskosten basiert auf der Multiplikation von Verfahrenszeiten mit Stundensätzen für Maschine und Personal. Für die Ermittlung der Verfahrenszeiten werden drei Datenquellen vorgeschlagen. Diese sind Schätzungen von Experten als Erfahrungswissen, Vergleichsarbeitspläne als historische Daten sowie mathematische Funktionen, mit deren Hilfe sich z. B. Verfahrenszeiten für die spanende Bearbeitung aus dem zu zerspanenden Volumen ermitteln lassen (vgl. EHRENSPIEL ET AL. 2007). In MÜLLER (2007) wird dabei die Bedeutung der entwicklungsbegleitenden iterativen Konkretisierung der Daten parallel zum Entwicklungsfortschritt betont. Der abschließende Vergleich der ermittelten Fertigungsalternativen erfolgt anhand der Nutzwerte und der Fertigungskosten.

Die in MÜLLER (2007) vorgestellte Methodik erlaubt eine umfassende Betrachtung von Fertigungsalternativen in der Planungsphase, beginnend bei der Generierung von Prozessketten über deren Optimierung bis hin zur Bewertung. Den Kern der Arbeit bilden vornehmlich monetäre Aspekte. Technische Risiken der einzelnen Fertigungsalternativen durch mögliche Fehlerquellen sind lediglich als ein Kriterium zur qualitativen Bewertung in Form von Nutzwerten berücksichtigt.

2.6.2 Qualitätsorientierte Ansätze

Entwicklung einer Methode zum Aufdecken von potentiellen Fehlern in der Konstruktion (HENZE 2008)

Mit dem Ziel einer Null-Fehler-Qualität für Bauteile der mechanischen Fertigung wird in HENZE (2008) ein detaillierter Vergleich verschiedener Methoden der präventiven Fehlervermeidung durchgeführt. Dabei stehen insbesondere die FMEA, das QFD und das DRBFM (Design Review Based on Failure Mode) im Fokus. Deren Anwendung erfordert jedoch stets einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand. In Verbindung mit dem oft unklaren Aufwand-Nutzen-Verhältnis werden die Methoden deshalb vor allem in kleinen und mittelständischen Unternehmen gar nicht oder nur unzulänglich eingesetzt. Zudem stellt die geringe Flexibilität etablierter Methoden ein Hindernis dar. Einerseits vereinfachen die Standardisierung und das Bereitstellen einheitlicher Werkzeuge wie Formblätter die Abläufe und reduzieren den Aufwand der Durchführung, andererseits ist dadurch eine Anpassung an die gegebene Aufgabenstellung kaum möglich. Ein weiteres Problem ist der hohe Dokumentations- und Änderungsaufwand, der oftmals zu einer geringen Motivation der Anwender führt. Ferner sind mangelnde Methodenakzeptanz, fehlende Informationskonsistenz sowie Unsicherheiten bei der Ausführung der Methoden als Hindernisse für den Einsatz von Methoden der präventiven Qualitätstechniken aufzuführen.

Der in HENZE (2008) beschriebene Lösungsansatz besteht aus drei Aspekten. Dies sind der einfache und selbsterklärende Aufbau, die Pflicht zum Nachweis durchgeführter Maßnahmen und die unternehmensübergreifende Betrachtung der funktionalen Zusammenhänge. Das im Rahmen der Methodik erarbeitete Hilfsmittel zur Erreichung des Null-Fehler-Konzepts ist ein Fragenkatalog, der aus einer Stückliste und dem eigentlichen Fragebereich besteht. Die Stückliste dient der Strukturierung der Aufgabenstellung, indem das betrachtete Produkt über mehrere Ebenen untergliedert wird, sodass Schnittstellen und Wechselwirkungen transparent aufgezeigt werden. Der Fragenbereich enthält individuell zu gestaltende, separate Abschnitte für die Bereiche Konstruktion, Fertigung sowie Montage. Vor dem motivationspsychologischen Hintergrund wird ein inhaltlicher Spannungsbogen durch aufeinander abgestimmte Fragestellungen geschaffen, um die Qualität der Antworten zu erhöhen. Eine nachgeschaltete Maßnahmenabfrage dient der Absicherung der Ergebnisse.

Der größte Vorteil des entwickelten Fragebogens ist in seiner Flexibilität zu sehen. Die Beschränkung auf eine methodische Struktur, die stets anwendungs-

spezifisch erweitert wird, ermöglicht einen weiten Anwendungs- und Betrachtungsraum, der auch Wechselwirkungen einzelner Elemente beinhaltet. Durch die offene Gestaltung steigt der Aufwand der Fragenbeantwortung mit der Komplexität des Betrachtungsgegenstandes. Gegen eine Anwendung im Flugzeugtriebwerks-Bau spricht deshalb das niedrige zu erwartende Nutzen-Aufwand-Verhältnis. Dies ergibt sich aus der Vielzahl einzubeziehender Fachgebiete (Konstruktion, Fertigung, Strukturmechanik, Aerodynamik und Werkstoffe etc.) sowie den komplexen geometrischen Zusammenhängen bei Rotoren und den langen Prozessketten für deren Fertigung.

Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten (HIELSCHER 2008)

Vor allem durch steigende Kundenanforderungen sind zunehmend fertigungstechnische Prozessketten nahe den technischen und physikalischen Grenzen notwendig (WESTKÄMPER & WARNECKE 1994). In HIELSCHER (2008) wird in diesem Zusammenhang explizit die ganzheitliche Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten adressiert, um die Prozessfähigkeit zu gewährleisten und die Bauteilqualität zu erhöhen. Klassische Fehleranalysemethoden beschränken sich meist auf einen einzelnen Prozess, weshalb die Abbildung von Wechselwirkungen zwischen Prozessen und somit die Zuordnung von Ursachen zu auftretenden Fehlern kaum möglich ist. Einen Lösungsvorschlag zur übergreifenden Betrachtung bietet die Vorgehensweise zur fehlerbasierten Optimierung der gefertigten Bauteilqualität nach HIELSCHER (2008).

Hierfür wird zunächst bei Auftreten eines Fehlers ein detaillierter Soll-Ist-Vergleich in Form einer empirischen Bauteilanalyse durchgeführt. Zur Eingrenzung der Fehlerursache werden die Funktionen des Gesamtproduktes seinen Einzelkomponenten zugeordnet und die Anforderungen an diese in einem Strukturmodell dargestellt. Deren tatsächlicher Erfüllungsgrad wird durch messende oder prüfende Tätigkeiten in der Fertigung aufgenommen und es werden die Abweichungen festgehalten. Somit sind Art und Größe des Optimierungsbedarfs definiert. Unter dem Blickwinkel der Produktion wird die der Produktherstellung zugrunde liegende fertigungstechnische Prozesskette empirisch analysiert. Aus einer Grobmodellierung werden durch Expertenwissen qualitätsrelevante Fertigungsparameter identifiziert, die durch verschiedene Systeme (z. B. Betriebs- oder Maschinendatenerfassung) beobachtet werden können. Mögliche Zusammenhänge zwischen diesen Daten und den potenziellen Fehlerursachen werden unter Verwendung geeigneter statistischer Methoden analysiert. Für die Auswahl

wird eine kennzahlbasierte Systematik anhand eines Eignungsgrades bereitgestellt. Die Ergebnisinterpretation erfolgt durch Experten, indem mögliche Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge anerkannt werden oder nicht. Trifft Ersteres zu, sind anschließend Optimierungsmöglichkeiten zu erarbeiten, im zweiten Fall sind weitere Analysen zur Ursachenidentifizierung durchzuführen.

Die Methodik nach HIELSCHER (2008) bietet die Möglichkeit, Fehler am Produkt gezielt zu untersuchen, diesen mögliche Ursachen in der Prozesskette zuzuordnen und die Produktqualität so zu erhöhen. Dazu sind allerdings zum einen Daten aus einer laufenden Fertigung notwendig, weshalb die Methodik im Produktentwicklungsprozess vor dem Serienanlauf nicht angewendet werden kann. Zum anderen ist eine Rückverfolgbarkeit der Fehler nur eingeschränkt gegeben, weshalb die Interpretation der Analyseergebnisse einen hohen Aufwand erfordert.

2.6.3 Thematisch übergreifende Ansätze

Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen (WILLMS 2008)

Im Gegensatz zu den bisher aufgezeigten Ansätzen unterscheiden sich Prozessalternativen nach der Definition von WILLMS (2008) nicht durch den Einsatz verschiedener Technologien oder Verfahren, sondern durch die Variation ihrer Parameter. Das Ziel ist die Toleranzsynthese zur Optimierung wahlweise hinsichtlich des Ausschusses, der Fertigungszeit oder der Fertigungskosten.

Der Ansatz von WILLMS (2008) besteht aus Modulen, die in einem Rahmensystem zusammengefasst werden. Auch hier bildet die Zuordnung von zu fertigenden Produktmerkmalen und Fertigungsprozessen zueinander den ersten Schritt. Die Bewertung möglicher Verfahren über verschiedene Detaillierungsebenen erfolgt anhand qualitätsbezogener Merkmale. Die Generierung der daraus resultierenden Fertigungsverkettung basiert auf bereits bekannten Methoden unter Berücksichtigung unscharfer Daten (vgl. z. B. FALLBÖHMER 2000; KNOCH 2005; MÜLLER 2007; TROMMER 2001). Allerdings werden keine Alternativen erzeugt, sondern die zuvor identifizierten Prozesse in geeigneter Weise in einer Prozesskette angeordnet. Die Alternativen werden anschließend durch Veränderung von systematischen Einflüssen eines Fertigungsschrittes gebildet, wobei zufällige Störgrößen ebenso berücksichtigt werden. Mit steigender Länge der Prozesskette nimmt die Anzahl der möglichen Alternativen bei meist mehreren Stellgrößen je Element zu, weshalb eine Reduzierung mittels statistischer Ver-

suchsplanung und eines Grenzwertalgorithmus vorgenommen wird. In der Fertigungshistorie werden anschließend die unterschiedlichen Ergebnisse der verbliebenen Prozessalternativen in Bezug auf die Anforderungen des zu fertigenden Produkts dargestellt. Die resultierenden Merkmalsstreuungen erlauben die Identifizierung risikobehafteter Fertigungsprozesse, die durch niedrige Fähigkeitskennwerte gekennzeichnet sind. Besonders kritische Alternativen werden eliminiert, die verbleibenden aus monetärer Sicht beleuchtet. Die Grundlage hierfür bildet die etablierte Platzkostenrechnung. Berücksichtigt werden dabei sowohl Material- als auch Fertigungskosten. Die Auswahl der am besten geeigneten Lösung erfolgt abschließend anhand der Größen Zeit, Kosten und Ausschuss mit anwendungsspezifischer Gewichtung.

In WILLMS (2008) wird eine Möglichkeit zur Bildung von Alternativen auf einer detaillierten Betrachtungsebene aufgezeigt. Die Bestimmung der optimalen Werte für alle Stellgrößen einer Prozesskette ist ein großes Problem. Im Flugzeugtriebwerks-Bau ist die Einflussnahme jedoch aufgrund oftmals zertifizierter Prozesse nur eingeschränkt möglich. Zudem werden detaillierte Informationen hinsichtlich des Produktdesigns und der konstruktiven Umsetzung als Eingangsdaten benötigt, was die Anwendung dieses Ansatzes in den frühen Phasen der Produktentwicklung erschwert. Zudem ist die sequenzielle Betrachtung qualitätsrelevanter und monetärer Aspekte für den Flugzeugtriebwerks-Bau nicht geeignet.

Simultane Auswahl von Konstruktions- und Fertigungstoleranzen sowie alternativen Produktionsprozessen (SIVAKUMAR ET AL. 2011)

Zahlreichen etablierten Ansätzen zur Toleranzsynthese liegt die Verwendung von Toleranz-Kosten-Modellen zugrunde. Dabei werden die Kosten einzelner Fertigungsprozesse oder Merkmale des Funktionsträgers als Funktion der jeweils zu erfüllenden geometrischen Anforderungen abgebildet und diejenige Kombination von Einzeltoleranzen mit den niedrigsten Fertigungskosten gesucht. Allerdings wird lediglich binär zwischen *Funktionserfüllung* und *Fehler* unterschieden. Das Ziel des Ansatzes nach SIVAKUMAR ET AL. (2011) ist deshalb eine multikriterielle Optimierung, bei der der Verlust an Qualität des Funktionsträgers durch Abweichung vom Idealzustand als kontinuierliche Funktion wiedergegeben wird. Die gleichzeitige Betrachtung der Funktionserfüllung des Produktes und der damit verbundenen Fertigungskosten wird dabei durch die Anwendung mehrerer Methoden und mathematischer Algorithmen realisiert. Dies ermöglicht die Auswahl von Toleranzen im Hinblick auf geringe Kosten und wenig Qualitätsverlust sowie die Definition geeigneter Fertigungs- und Montageprozesse. Zur Anwendung

werden im ersten Schritt mathematische Funktionen für die Zielgrößen definiert. Für die anschließende multikriterielle Optimierung werden verschiedene Algorithmen kombiniert. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass nicht nur lokale, sondern auch globale Optima einer oder mehrerer Funktionen ermittelt werden können. Auf eine Detaillierung der Algorithmen wird aufgrund der geringen Relevanz für die vorliegende Arbeit verzichtet. Insgesamt ermöglicht der Ansatz unter bestimmten Voraussetzungen eine Optimierung sowohl hinsichtlich qualitätsrelevanter als auch wirtschaftlicher Aspekte. Die Anwendung ist jedoch als komplex und aufwändig einzustufen und erfordert eine geeignete Informationsdichte, die erst im späteren Verlauf einer Produktentwicklung zur Verfügung steht. Somit stellt diese Arbeit einen vielversprechenden Ansatz zur ganzheitlichen Toleranzsynthese dar. Eine Anwendbarkeit für die Zielsetzung der Prozesskettenbetrachtung von Rotoren im Flugzeugtriebwerks-Bau ist jedoch aufgrund der Komplexität der Methode und der notwendigen Daten nicht gegeben.

Quality-Stream-orientierte Toleranzallokation (BEHRENS 2011)

Das Ziel von BEHRENS (2011) ist die automatisierte Minimierung der Kosten für geometrische Toleranzen. Dabei sind sowohl die technische als auch die organisatorische Komplexität der Produktstruktur bzw. der Tolerierung zu berücksichtigen. Der Betrachtungsraum umfasst ausschließlich Maßtoleranzen und deren Verknüpfung in wechselwirkenden Toleranzketten, jedoch keine Form- oder Lagetoleranzen. Um die Auswirkungen der Tolerierung über den gesamten Produktlebenszyklus darstellen zu können, dient das Aachener Qualitätsmanagement-Modell als Grundlage. Dessen Kern ist der sogenannte Quality-Stream, der die Gesamtheit der qualitätsschöpfenden Maßnahmen innerhalb eines Unternehmens darstellt. In Anlehnung an den Begriff der Wertschöpfung sind dies alle Tätigkeiten, bei denen auf die Produktqualität bezogen der Wert der Ausgangsgröße den der Eingangsgröße übersteigt. Dies sind insbesondere die Qualitätsbildung, -sicherung und -verbesserung. So wird das Wissen aus allen Phasen des Produktlebenszyklus in den Produktentwicklungsprozess eingebunden. Gleichzeitig finden dadurch auch die Möglichkeiten der vorhandenen Technologien und Betriebsmittel Berücksichtigung.

Die Umsetzung der entwickelten Methode CROTA (Cost- and Riskoptimising Tolerance Allocation) erfolgt computergestützt in vier Phasen. In der ersten werden alle technisch sinnvollen Toleranzketten auf Basis von CAD-Daten gebildet. Mittels deren Verknüpfung anhand mehrfach auftretender Einzeltoleranzen entsteht ein Toleranznetz. In der zweiten Phase, der Technologie- und Kostenanaly-

se, erfolgt die Bestimmung der Toleranzkosten. Als Datenbasis werden „diverse betriebliche Datenbanken und Relativkostenkataloge“ verwendet, sodass in den meisten Fällen keine Toleranzkostenschätzungen notwendig sind (BEHRENS 2011). In der dritten Phase bildet ein Optimierungsalgorithmus auf Basis der zuvor erzeugten Toleranz-Kosten-Dimensions-Relationen die kostengünstigsten Toleranzallokationen. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Berücksichtigung unscharfer Daten. Die letzte Phase, die Ergebnisaufbereitung, thematisiert unternehmerische Fragestellungen, die zusätzlich in die Auswahl der optimalen Lösung einfließen.

Der Vorteil der Methode nach BEHRENS (2011) ist die Transparenz der Berechnung gegenüber z. B. einer Monte-Carlo-Simulation, da alle Zusammenhänge definiert werden. Allerdings ist dies mit erheblichem Aufwand verbunden. Die Tatsache, dass CAD-Daten der betrachteten Funktionsträger vorliegen müssen, schließt zudem eine Anwendung in den frühen Phasen der Produktentwicklung aus. Darüber hinaus ist der Einsatz im Flugzeugtriebwerks-Bau aufgrund der hohen technischen Komplexität der Rotoren und der kleinen Datenbasis für Fertigungstoleranzen durch z. B. geringe Stückzahlen mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden.

2.7 Ableitung des Handlungsbedarfs

In den Abschnitten 2.1 bis 2.6 wurde aufgezeigt, dass für den Themenkomplex der Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten eine Vielzahl klassischer Methoden und innovativer Ansätze existiert. Allen gemein sind die grundlegenden Elemente Erstellung, Optimierung bzw. Verbesserung und Bewertung.

Die *Erstellung* fertigungstechnischer Prozessketten beinhaltet die Überführung von Produktanforderungen in eine Abfolge von Prozessen. Hierbei sind zunächst für alle zu fertigenden Merkmale geeignete produktionstechnische Verfahren zu identifizieren und anschließend in einer geeigneten Reihenfolge anzuordnen. Meist existiert für diese Zielsetzung zunächst keine eindeutige Lösung, da zum einen oftmals mehrere alternative Fertigungsverfahren für ein bestimmtes Merkmal eingesetzt und zum anderen diese auch in der Abfolge unterschiedlich angeordnet werden können.

Inhalt der *Optimierung* bzw. *Verbesserung* ist deshalb die Konkretisierung und Anpassung von Prozessketten hinsichtlich mindestens einer zusätzlichen Zielgröße. In der Literatur überwiegen monetäre Aspekte, die entweder als Ferti-

gungs- oder Herstellkosten direkt im Vordergrund stehen oder indirekt betrachtet werden, indem beispielsweise qualitätsrelevante Aspekte wie Toleranzketten kostenoptimal ausgelegt werden. Als Maßnahmen zur Optimierung einer Prozesskette stehen unterschiedliche Strukturmaßnahmen bereit, die entweder einen einzelnen Prozess oder übergreifend mehrere Prozesse beeinflussen.

Die *Bewertung* und der *Vergleich* alternativer Prozessketten sind qualitativ oder quantitativ anhand der Zielgrößen der Optimierung bzw. Verbesserung durchführbar. Als mögliche wirtschaftlich relevante Größen sind hierbei Material-, Fertigungs- und Investitionskosten zu nennen. Für die Bestimmung von Fertigungskosten einer Prozesskette findet vornehmlich die Platzkostenrechnung Anwendung. Sie stellt eine detaillierte Abbildung der Prozesse dar, ist jedoch mit erheblichem Aufwand bei der Datenbeschaffung verbunden. Deshalb werden in den frühen Phasen der Produktentwicklung meist vereinfachte Modelle angewendet. Die Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte erfolgt vornehmlich durch Methoden der Qualitätsplanung, d. h. der präventiven Fehlervermeidung und des Toleranzmanagements, da die Toleranzfestlegung einzelner Prozesse maßgeblich die Höhe der Fertigungskosten beeinflusst.

Insgesamt kann die Aussage getroffen werden, dass die Prozesskettenbetrachtung einen wertvollen Beitrag für produktionstechnische Fragestellungen liefert. Sie ermöglicht die Abbildung verketteter Prozesse und ihrer Wechselwirkungen, was die übergreifende Bewertung und den umfassenden Vergleich zur Verfügung stehender Fertigungsalternativen in der Produktentwicklung und auch der Prozessoptimierung erlaubt. Die zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten verdeutlichen die hohe Relevanz dieses Themengebietes. Gleichzeitig sind sie jedoch auch ein Indiz für dessen Umfang und Komplexität. Deshalb werden entweder einzelne Aspekte wie z. B. die Generierung von Fertigungsalternativen detailliert untersucht oder übergreifende Betrachtungen auf abstrakter Ebene aufgezeigt. Es konnte kein Lösungsansatz identifiziert werden, der der gestellten Zielsetzung der Auswahlunterstützung von Fertigungsalternativen im Flugzeugtriebwerks-Bau gerecht wird. Es ist eine angepasste Methodik notwendig, zu deren Realisierung die folgenden Handlungsbedarfe identifiziert werden konnten.

- Es sind genau die benötigten Inhalte zu integrieren und dabei die Anforderungen der Branche zu berücksichtigen. Hierfür sind bestehende Methoden, sofern vorhanden, zu adaptieren und zu ergänzen.
- Der Detaillierungsgrad der Prozesskettenbetrachtung muss flexibel an die Anforderungen angepasst werden können.

- Die Verwendung von Informationen und Daten unterschiedlicher Genauigkeiten aus unterschiedlichen Quellen muss möglich sein.

Nachfolgend werden diese drei Punkte näher erläutert.

Die *benötigten Inhalte* ergeben sich daraus, dass einerseits im Vergleich mit anderen Bereichen die Ansprüche an die Qualität im Flugzeugtriebwerks-Bau aufgrund des sicherheitskritischen Anwendungsgebietes der Produkte hoch sind (ZÄH ET AL. 2010). Andererseits ist dennoch eine wirtschaftliche Herstellung notwendig, weshalb beide Aspekte in gleichem Maße als zwei voneinander unabhängige Bewertungsgrößen für Fertigungsalternativen betrachtet werden müssen. Außerdem ergeben sich durch die eingesetzten Werkstoffe, die Stückzahlen insgesamt und pro Zeiteinheit, die verwendeten Fertigungstechnologien sowie die allgemeinen und rechtlichen Vorschriften Voraussetzungen, die sich auch auf die Produktionstechnik auswirken und deshalb für die Methodik zu berücksichtigen sind. Diese können wie folgt zusammengefasst werden (ADAM 1998):

- Aufgrund der verwendeten Werkstoffe unterscheidet sich die Anwendung klassischer Technologien, z. B. der spanenden Bearbeitung, von der anderer Branchen.
- Es existiert eine Reihe spezieller Fertigungstechnologien für den Flugzeugtriebwerks-Bau, die nahezu ausschließlich dort eingesetzt werden.
- Im Vergleich zu anderen Branchen stellt der Flugzeugtriebwerks-Bau hohe Anforderungen an die Absicherung der Produktqualität in der Fertigung und deren Erhalt über die gesamte Bauteillebensdauer hinweg.
- Zur Einhaltung der daraus resultierenden Vorgaben bzgl. Maßtoleranz, Gestalttreue und Oberflächengüte sind besondere Maßnahmen erforderlich.
- Abgesehen von der Schaufelfertigung ist die Produktion von niedrigen Stückzahlen sowohl absolut als auch pro Zeiteinheit geprägt.
- Bereits zugelassene Triebwerke unterliegen aufgrund des Aufwandes für die Dokumentation und die Zertifizierung einer hohen Änderungsstabilität. Dies gilt auch für die Fertigungsprozesse zur Herstellung der Bauteile und Komponenten.

Diese Rahmenbedingungen wirken sich in erheblichem Maße auf die Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten aus.

Die Betrachtungsebene kann nicht klar in die bekannten Ansätze eingeordnet werden. Nach FALLBÖHMER (2000) unterscheidet sich eine Prozesskette von einer Fertigungsfolge dadurch, dass Letztere zusätzlich die Handhabung der

Werkstücke sowie Prüffolgen beinhaltet. Für den Flugzeugtriebwerks-Bau sind jedoch Handhabungsprozesse aufgrund geringer Stückzahlen und hoher Prozesszeiten wenig relevant. Prüffolgen hingegen sind von entscheidender Bedeutung, da unter Umständen eine Technologie nicht eingesetzt werden kann, wenn die Prüfbarkeit der gefertigten Merkmale nicht gegeben ist. Somit lässt sich für den Flugzeugtriebwerks-Bau keine Einordnung in die klassischen Betrachtungsebenen *Prozesskette* und *Fertigungsfolge* vornehmen, sondern der notwendige Detaillierungsgrad muss individuell gestaltet werden.

Ein weiteres Problem ist die *Größe der für die Prozesskettenbetrachtung zur Verfügung stehenden Datenbasis*. Die Anwendung klassischer Fertigungstechnologien unterscheidet sich von der in anderen Branchen. Zudem existieren Verfahren, die ausschließlich im Flugzeugtriebwerks-Bau eingesetzt werden (ADAM 1998). In Verbindung mit den niedrigen Stückzahlen insgesamt und auch pro Zeiteinheit fehlt oftmals die notwendige Datenbasis, um Informationen für die Prozesskettenbetrachtung eines neuen Rotors durch den Vergleich mit bekannten Prozessen zu gewinnen. Deshalb ist zum einen die starke Einbindung des Erfahrungswissens notwendig. Zum anderen muss eine Möglichkeit für die Abbildung unscharfer Daten sowie deren schrittweise, entwicklungsbegleitende Konkretisierung aufgezeigt werden.

Im folgenden Kapitel wird auf Basis der Zielsetzung und des Handlungsbedarfes eine Methodik für die Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten für Rotoren von Flugzeugtriebwerken vorgestellt.

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

3.1 Allgemeines

In Kapitel 3 wird zunächst der Betrachtungsraum der Arbeit begrenzt. Anschließend wird die Methodik zur Prozesskettenanalyse und -bewertung für den Flugzeugtriebwerks-Bau vorgestellt. Abschnitt 3.4 erläutert das allen Einzelmethoden dieser Arbeit zugrunde liegende Datenmanagement. Hierzu zählt die Ermittlung der zur Prozesskettenbetrachtung erforderlichen Informationen inklusive der hierfür zur Verfügung stehenden Datenquellen. Außerdem ist es notwendig, verschiedene Möglichkeiten zur Abbildung von Informationen zu integrieren und die alternativen Prozessketten zu strukturieren.

3.2 Definition des Betrachtungsraumes

Vor dem Hintergrund des Bedarfs an einer angepassten Möglichkeit zur Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren und der damit verbundenen Rahmenbedingungen der Branche wird zur Konkretisierung der Methodik zum einen eine inhaltliche Abgrenzung und zum anderen eine zeitliche Einordnung ihrer Anwendung im Produktentwicklungsprozess vorgenommen.

Wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, existiert im Umfeld der Technologie- und Prozessplanung eine Vielzahl etablierter Methoden und wissenschaftlicher Ansätze (vgl. z. B. DENKENA ET AL. 2010; FALLBÖHMER 2000; HUBER 1995; KNOCHE 2005; LINDEMANN 2009; MÜLLER 2007; TROMMER 2001; MÄRZ 2011; WIK 2005). Zur Thematik der Erstellung von Prozessketten wird deshalb auf diese Arbeiten verwiesen. Mit Hilfe der zu entwickelnden Methodik werden fertigungstechnische Prozessketten untersucht, um diese objektiv bewerten zu können und so den fundierten Vergleich von Alternativen zu ermöglichen. Damit lässt sich die zeitliche Einordnung des Betrachtungsraumes, wie in Abbildung 29 dargestellt, vornehmen.

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

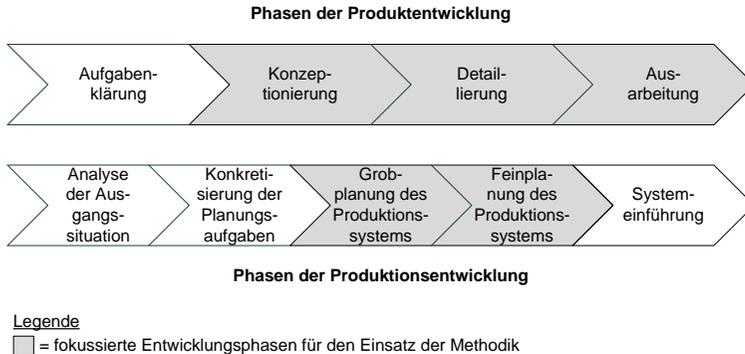


Abbildung 29: Zeitliche Abgrenzung des Betrachtungsraumes in Anlehnung an VDI 2243 (2002)

Aufgrund der Möglichkeit zur Reduzierung der Entwicklungskosten durch die frühzeitige Auswahl geeigneter produktionstechnischer Ketten ist prinzipiell eine frühe Einbindung der Prozesskettenbetrachtung in die Produktentwicklung anzustreben (REINHART ET AL. 2009B). In deren erster Phase (Aufgabenklärung) finden zunächst die Analyse der Ausgangssituation und die Anforderungsermittlung des Produktes statt. Hierbei ist bereits eine erste Ergänzung der Prozessplanung um die Gegenüberstellung grober Prozessketten möglich (SALOMONS ET AL. 1993). Zu empfehlen ist jedoch die Anwendung ab der zweiten Phase (Konzeptionierung), wenn eine entsprechende Informationsdichte vorliegt. Durch den entwicklungsbegleitenden Charakter und die hierfür notwendige Flexibilität ist die Unterstützung bis zum Serieneinsatz möglich. Auch die Betrachtung der Potenziale von Verbesserungsmaßnahmen einer bestehenden Produktion ist denkbar. Der Fokus liegt jedoch auf dem Zeitraum bis zur Festlegung der Prozesskette für den Serieneinsatz.

Inhaltlich wird die Gültigkeit der Methodik auf Rotoren von Flugzeugtriebwerken beschränkt. Diese bilden als eine Klasse mindestens halbähnlicher, komplexer Produkte einen Schwerpunkt innerhalb des Flugzeugtriebwerks-Baus. Komplexität ist hierbei als ein Merkmal der Überschaubarkeit, des Umfangs, der Handlichkeit und der inneren Vermaschung eines Systems zu verstehen (PATZAK 1982). Dies stellt sich in der Anzahl und den Arten der Elemente eines Bauteils sowie deren Wechselwirkungen dar (MÜLLER 1998). Zu unterscheiden sind allgemein die Markt-, die Organisations-, die Prozess- und die Produktkomplexität (LINDEMANN ET AL. 2009). Für die vorliegende Arbeit ist aufgrund der Geomet-

rie der Elemente eines Rotors vornehmlich Letztere relevant, da die Produktgestaltung prioritär strukturmechanischen und aerodynamischen Kriterien folgt. Dem entsprechend werden hohe Anforderungen an die Produktionstechnik gestellt, um die komplexen Formen zu realisieren. Mit diesen verbunden ist eine große Wertschöpfung in der Produktion. Zusätzlich, aufgrund der hohen Rohmaterialkosten, ist die umfangreiche Betrachtung der Produktionstechnik in der Produktentwicklung vor der Realisierung als sinnvoll zu erachten. Eine Anwendung der Methodik für andere Triebwerkskomponenten oder auch Produkte anderer Branchen ist nicht ausgeschlossen. Die Methodik ist jedoch für Rotoren ausgelegt. Dies beinhaltet die Berücksichtigung branchenspezifischer Anforderungen, die die Anwendbarkeit existierender Lösungen einschränken und die somit ursächlich sind für den wissenschaftlichen Handlungsbedarf.

Mit dem in diesem Abschnitt erläuterten Betrachtungsraum der Methodik, der Zielsetzung und dem Handlungsbedarf sind alle Anforderungen an die Methodik und die Rahmenbedingungen definiert. Im Folgenden wird die daraus abgeleitete Struktur der Methodik aufgezeigt, bevor anschließend das übergreifende Datenmanagement und die enthaltenen Einzelmethoden detailliert werden.

3.3 Struktur der Methodik

Die Basis für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik bilden bereits erstellte mögliche Prozessketten zur Herstellung eines Rotors mit definierter Geometrie aus definierten Werkstoffen. Dieser wird als *Referenzanwendung* bezeichnet. Die Fertigungsalternativen werden vor dem Hintergrund der hohen Qualitätsansprüche einerseits und dem Ziel der wirtschaftlichen Fertigung andererseits miteinander verglichen.

Der Fokus bei den wirtschaftlichen Aspekten liegt auf den bauteilbezogenen Fertigungskosten als erste Vergleichsgröße. Diese setzen sich aus den Rohteil- und den Prozesskosten zusammen. Zu berücksichtigen sind hierbei insbesondere die Fertigungsbedingungen des Flugzeugtriebwerks-Baus, wie z. B. die Auswirkungen der geringen Stückzahlen.

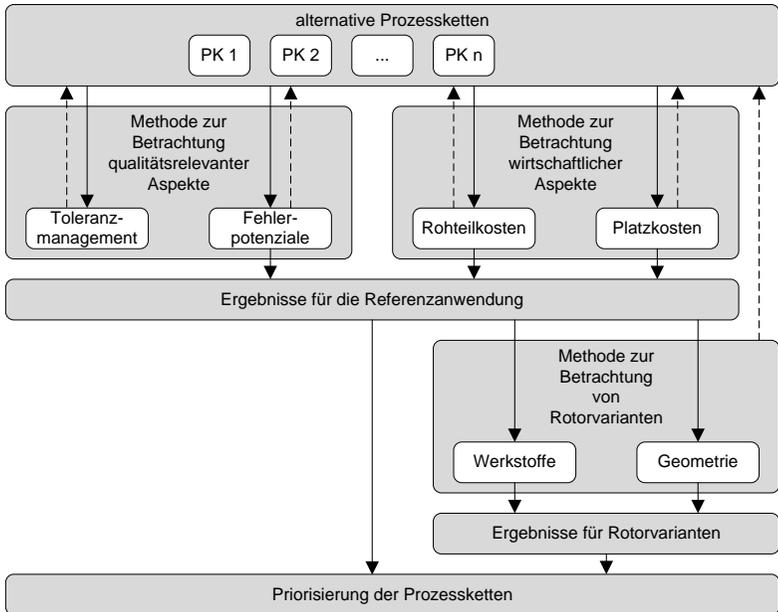
Die Betrachtung der qualitätsrelevanten Aspekte adressiert zum einen die Einhaltung von Maßtoleranzen in der Prozesskette als Voraussetzung zur Erfüllung der Fertigungsaufgabe. Zum anderen werden potenzielle Fertigungsfehler identifiziert und es wird das mit diesen hinsichtlich der Bauteilqualität verbundene Risiko in quantifizierter Weise als zweite Vergleichsgröße herangezogen.

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

Die Priorisierung der Prozessketten erfolgt anhand der ermittelten Vergleichsgrößen zunächst für die Referenzanwendung. Anschließend werden im Rahmen der Betrachtung von Rotorvarianten die Ergebnisse auf ähnliche oder halbähnliche Rotorvarianten extrapoliert. Dies ist vor dem Hintergrund einer zukunftsorientierten Weiterentwicklung der Produktionstechnik, z. B. durch die Investition in neue Anlagen oder die Integration innovativer Fertigungsverfahren, notwendig.

Ein zusätzlicher Aspekt der Struktur der Methodik ergibt sich aus der iterativen Anwendung sowohl der Gesamtmethodik als auch der Einzelmethoden. Das Ziel der Unterstützung der Produktentwicklung bringt mit sich, dass durch den stetigen Informationszuwachs hinsichtlich des zu entwickelnden Rotors selbst, aber auch hinsichtlich der Produktionstechnik eine wiederholte Anpassung und Detaillierung der Prozessketten notwendig ist. Zudem resultieren aus den Ergebnissen der einzelnen Methoden oftmals Veränderungen mindestens einer Prozesskette, sodass eine erneute, ganzheitliche Betrachtung erforderlich wird. Aufgrund der stetigen Konkretisierung während der Entwicklung können, wie in den jeweiligen Abschnitten aufgezeigt, verschiedene Datenquellen und -abbildungen berücksichtigt werden, die sich nicht gegenseitig ausschließen, sondern nach Bedarf ergänzen.

Abbildung 30 zeigt die beschriebene Struktur der Methodik mit den drei Einzelmethoden und deren Inhalte sowie die notwendigen Verknüpfungen inklusive möglicher Iterationen.



Legende

PK = Prozesskette

n = Anzahl der alternativen Prozessketten

- - -> = evtl. Iteration durch Strukturänderung mindestens einer Prozesskette

Abbildung 30: Struktur der Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für Rotoren von Flugzeugtriebwerken

Die einzelnen Methoden werden separat für jede alternative Prozesskette angewendet, die Zusammenführung und die Gegenüberstellung erfolgen anschließend durch den Vergleich der Ergebnisse. Die Betrachtungen der qualitätsrelevanten und der wirtschaftlichen Aspekte sind unabhängig voneinander und lassen sich somit parallel durchführen. Allerdings können aufgrund der Ergebnisse einer Einzelbetrachtung Verbesserungspotenziale der Prozessketten und somit auch übergreifende Änderungen resultieren, was die Forderung nach der iterativen Anwendung der Methodik bestärkt.

Das Toleranzmanagement unterscheidet sich von der Fehlerpotenzial- und der Kostenbetrachtung dadurch, dass dessen Ergebnis nicht direkt in den Vergleich der Alternativen mit einfließt, sondern ausschließlich der Anpassung und Verbesserung der Prozessketten dient. Dies ist darin begründet, dass im ersten Schritt

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

die Einhaltung der geforderten Toleranzen als Voraussetzung der Eignung einer Prozesskette für die Herstellung des Rotors zu überprüfen ist. Ist diese erfüllt, wird im zweiten Schritt eine Angleichung der alternativen Prozessketten vorgenommen, sodass diese die Anforderungen in ähnlichem Maße erfüllen.

Ferner ist zu betonen, dass die notwendigen Arbeitsinhalte stets vor dem Hintergrund des individuellen Anwendungsfalles kritisch zu prüfen sind. Aufgrund der Größe und Komplexität des Betrachtungsraumes durch Wechselwirkungen sowohl auf Prozess- als auch auf Prozesskettenebene kann eine Anpassung an die Zielsetzung und die Rahmenbedingungen sinnvoll sein. So kann z. B. zusätzlich eine Gewichtung zwischen qualitätsrelevanten und wirtschaftlichen Aspekten erfolgen und die Detaillierung der einzelnen Betrachtungen entsprechend unterschiedlich sein. Es sind jedoch stets alle Methoden zu berücksichtigen, um die Aussagekraft der Methodik zu gewährleisten und fundiert eine Priorisierung der alternativen Prozessketten durchführen zu können.

Der folgende Abschnitt adressiert die für alle Einzelmethoden relevanten Themen *Datenquellen und -abbildung* sowie *Strukturierung der Prozessketten* in allgemeiner Weise. Spezifische Detaillierungen werden, sofern notwendig, in den anschließenden Kapiteln zu den Einzelmethoden separat vorgenommen.

3.4 Datenmanagement der Prozesskettenbetrachtung

3.4.1 Allgemeines

Das Datenmanagement dient dazu, alle notwendigen Informationen in geeigneter Weise bereitzustellen und zu verwalten. Die geplante Verwendung der Methodik während der Produktentwicklung erfordert dabei die Identifizierung möglicher Informationsquellen sowie gegebenenfalls die Abbildung unscharfer Daten, um zusätzlich Chancen und Risiken quantifizieren zu können und damit die Planungssicherheit zu erhöhen. In den Abschnitten 3.4.2 bis 3.4.4 werden die für alle Betrachtungen relevanten Datenquellen, Möglichkeiten der Datenabbildung und die Strukturierung von Prozessketten erläutert.

3.4.2 Datenquellen

Ein wesentliches Problem der Prozesskettenbetrachtung ist die Bereitstellung der benötigten Daten. Sowohl bei der Anwendung während der Produktentwicklung

als auch für die Untersuchung etwaiger produktionstechnischer Verbesserungsmaßnahmen sind zukünftige Prozesse abzubilden, die sich in der jeweiligen Form nicht im Serieneinsatz befinden. Somit muss zunächst eine entsprechende Datengrundlage geschaffen werden. Hierfür stehen verschiedene Informationsquellen zur Verfügung. So gliedert beispielsweise MÜLLER (2007) die Möglichkeiten zur Ermittlung von Prozesszeiten für die Berechnung von Herstellkosten in solche, die auf Erfahrungswissen, auf historischen Daten oder auf mathematischen Funktionen beruhen.

Diese Kategorien lassen sich auch auf weitere Daten und Informationen sowohl wirtschaftlicher als auch qualitätsrelevanter Art anwenden. Mathematische Funktionen können hierbei übergeordnet als parametrische Darstellungen angesehen werden. Im Zuge dieser Verallgemeinerung ist festzuhalten, dass die hierfür benötigten Eingangsgrößen ebenfalls wiederum aus historischen Daten oder Erfahrungswissen resultieren. Deshalb erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich die Unterscheidung zwischen Schätzung (Erfahrungswissen) und Vergleich (historische Daten) als grundlegende Datenquellen. Sie werden im Folgenden allgemein beschrieben, notwendige Konkretisierungen der einzelnen Datenquellen, z. B. zur Ermittlung von Verfahrenszeiten oder Toleranzen, werden in den jeweiligen Kapiteln zu den einzelnen Methoden der Prozesskettenbetrachtung vorgenommen.

Die *Schätzung* basiert auf der meist personenbezogenen Erfahrung im Hinblick auf einzelne Prozesse und repräsentiert die Meinung eines einzelnen oder mehrerer Experten. Insbesondere im Flugzeugtriebwerks-Bau liegen für viele verwendete Fertigungsverfahren langjährige Erfahrungen im Serieneinsatz vor, weshalb die darauf beruhende Schätzung für die vorliegende Arbeit eine wichtige Basis darstellt. Die Erfassung dieses Wissens in Bezug auf einzelne Technologien erfolgt z. B. in Form von Experteninterviews, die geeignet aufbereitet werden (vgl. BIMAZUBUTE 2005). Die Genauigkeit der Schätzung hängt dabei maßgeblich von den zur Verfügung stehenden Informationen ab, weshalb die Durchführung mehrerer Iterationen mit Fortschreiten der Produktentwicklung notwendig ist. Insbesondere bei der Untersuchung des Einsatzes von im Unternehmen bekannten Fertigungsverfahren für neue Anwendungen ist die Methode der Expertenschätzung vorteilhaft, da hierzu lediglich unternehmensinterner Informationsaustausch erforderlich ist und somit der Datenschutz gewährleistet ist. Bei neuen Fertigungsverfahren hingegen muss die Schätzung durch unternehmensexterne Experten, z. B. eines Anlagenherstellers, erfolgen. Geheimhaltung und Datenschutz haben dabei jedoch oftmals zur Folge, dass aufgrund wenig konkreter

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

Eingangsparameter lediglich ungenaue Schätzungen möglich sind. Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor der Schätzung ist die im Ergebnis enthaltene Subjektivität des Experten. Deshalb sind auf diese Weise gewonnene Informationen im Laufe der Produktentwicklung durch objektive Methoden wie beispielsweise Simulation oder Vergleich bzw. im Rahmen experimenteller Versuche zu validieren. Insgesamt sind die Vorteile der Schätzung in der Schnelligkeit und dem geringen Aufwand zu sehen. Demgegenüber stehen außer den genannten Nachteilen die Notwendigkeit des umfangreichen Erfahrungswissens, das nur langfristig aufgebaut werden kann, und die oftmals objektiv nicht fundierten Ergebnisse (EHRENSPIEL ET AL. 2007).

Für den *Vergleich* wird nicht Erfahrungswissen als Gesamtheit, sondern gezielt die Analogie zu vorhandenen Daten genutzt, um neue Informationen durch Anpassung an andere Rahmenbedingungen zu gewinnen. Die diesem Sachverhalt zugrunde liegende Methode der Such- oder Ähnlichkeitskalkulation wurde vornehmlich für den Vergleich ähnlicher Produkte entwickelt, ist jedoch ebenso für die Betrachtung fertigungstechnischer Prozesse geeignet (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Voraussetzung ist stets die Ähnlichkeit des vorhandenen und des zu untersuchenden Elements. Ähnlichkeit ist allgemein als Übereinstimmung in bestimmten Eigenschaften definiert (KONOPKA & WERMKE 2010). Je mehr übereinstimmende Eigenschaften vorliegen bzw. je geringer die Abweichungen sind, desto höher ist die Zuverlässigkeit des Vergleichs und desto geringer ist das Risiko einer Fehleinschätzung. Unter der Voraussetzung eines vergleichbaren Bauteils oder Prozesses ist so mit geringem Aufwand ein verlässliches Ergebnis erreichbar. So kann beispielsweise für eine Bearbeitung eines neuen Rotors ein bereits existierender Prozess als Referenz verwendet werden, der eine ähnliche Bearbeitung des gleichen Materials mit den gleichen Betriebsmitteln darstellt. Dadurch kann von der bekannten Prozesszeit auf die neue geschlossen werden. Ist lediglich ein geringes Maß an Ähnlichkeit gegeben, kann die Verwendung statistischer Methoden die Planungssicherheit erhöhen. Im Gegenzug bedeutet dies jedoch einen erheblichen Mehraufwand. Hierbei wird z. B. nicht die Zeitdauer eines einzelnen, bereits durchgeführten Prozesses verwendet, um die eines neuen zu ermitteln. Stattdessen werden hierfür statistische Kennwerte wie das arithmetische Mittel aus mehreren Bearbeitungen herangezogen. Um eine geeignete Datenbasis zu schaffen, kann es notwendig sein, Parameter einzuführen, die die Prozesszeit beeinflussen, wie z. B. das zu zerspanende Volumen bei einer Fräsbearbeitung. Dadurch erhöht sich die Vergleichbarkeit, da die Informationen aus den Referenzprozessen homogenisiert werden. Soll z. B. ein bisher nicht verwendetes Material zum Einsatz kommen, ist kein direkter Vergleich möglich.

In diesem Fall wird durch die Betrachtung mehrerer bekannter Prozesse als Referenz zunächst der Einfluss des Parameters *Material* qualitativ oder quantitativ bestimmt und darauf aufbauend anschließend die neue Prozesszeit ermittelt. Etablierte Ausprägungen dieser Vorgehensweise sind beispielsweise die Kilokosten- oder die Materialkostenmethode (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Insbesondere bei statistischen Betrachtungen mit begrenzter Vergleichbarkeit kann es sinnvoll sein, statt eines einzelnen, konkreten Wertes für die Zielgröße deren mögliche Ausprägungen anzugeben. Neben diskreten Werten können dies ein Wertebereich oder eine Wahrscheinlichkeitsverteilung sein. Die unterschiedlichen Formen der Datenabbildung werden im nächsten Abschnitt erläutert.

3.4.3 Datenabbildung

Vor allem in den frühen Phasen der Produktentwicklung ist es notwendig, unscharfe Daten wiedergeben zu können, da oftmals für wichtige Informationen keine fixen Werte definiert werden können (FALLBÖHMER 2000). Um diesem Anspruch gerecht zu werden, bietet die entwickelte Methodik in allen Aspekten der Prozesskettenbetrachtung die Möglichkeit, Daten auf geeignete Weise abzubilden. Besonders bei der computergestützten Umsetzung ist diese Anforderung von Relevanz. In Anlehnung an FALLBÖHMER (2000) wurde die Unterscheidung zwischen den in Abbildung 31 visualisierten Möglichkeiten der Datendarstellung getroffen.

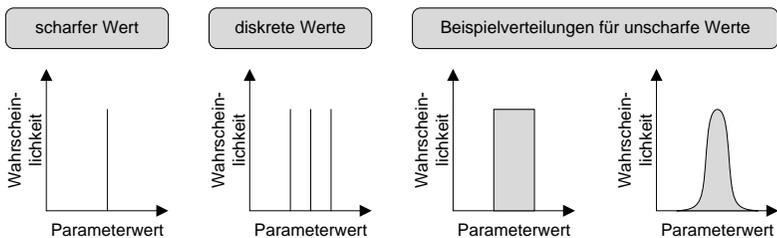


Abbildung 31: Darstellung scharfer und unscharfer Daten nach FALLBÖHMER (2000)

Jede benötigte Information sowohl monetärer (z. B. Materialkosten) als auch qualitätsrelevanter Art (z. B. Höhe eines Fehlerrisikos) lässt sich als scharfer Wert oder in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung wiedergeben. Neben quantitativen Größen können durch die Verwendung diskreter Werte oder einer fuzzy-basierten Beschreibung auch qualitative Größen abgebildet werden (REIN-

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

HART ET AL. 2009A). Vorteilhaft gegenüber scharfen Werten ist die zusätzliche Information über mögliche Chancen und Risiken des Ergebnisses. Diese können dadurch abgeschätzt und es können, sofern notwendig, entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden (LEVARDY 2006). Durch die Verwendung verschiedener Verteilungen können dabei unterschiedliche Charakteristiken von Unsicherheiten wiedergegeben werden (REINHART ET AL. 2011).

Vor dem Hintergrund des entwicklungsbegleitenden Einsatzes sind unscharfe Daten vor allem in den frühen Phasen der Produktentwicklung von Bedeutung. Mit zunehmender Informationsdichte sinkt die Unschärfe der Informationen, sodass auch die Risiken und Chancen der Ergebnisse abnehmen. Grundsätzlich ist im Hinblick auf die Aussagekraft die Darstellung durch eine Verteilung vorteilhaft gegenüber scharfen Werten, allerdings ist dies mit erheblichem Mehraufwand in der Durchführung verbunden. Für jede Information müssen mehrere Verteilungsparameter statt eines einzelnen Wertes ermittelt werden. Dies bedeutet auch eine komplexe Umsetzung der Methodik im Hinblick auf die Nutzung, d. h. die Verarbeitung, Speicherung und Wiedergabe der Informationen. Zudem ist im Gegensatz zu Berechnungen mit scharfen Werten die im Rahmen der ganzheitlichen Betrachtung notwendige Überlagerung mehrerer unscharfer Daten ein aufwändiger mathematischer Vorgang. Alternativ kann hierfür auf sogenannte Monte-Carlo-Simulationen zurückgegriffen werden. Aufgrund der notwendigen Implementierungen sind jedoch auch für diese stets Nutzen und Aufwand des Einsatzes unscharfer Datenabbildungen einander gegenüberzustellen. Die Strukturierung der Prozessketten dient deshalb zum einen der Vereinfachung der Datenabbildung durch Eliminierung redundanter Informationen. Zum anderen ist sie essenziell für den entwicklungsbegleitenden Einsatz der Methodik, da hierdurch die Flexibilität der iterativen Anpassung gewährleistet wird.

3.4.4 Strukturierung von Prozessketten

Als Inhalt der Methodik wurde der entwicklungsbegleitende Vergleich alternativer Prozessketten definiert, der für die vorliegende Arbeit zwei Aspekte hinsichtlich der Strukturierung von Prozessketten impliziert. Dies sind die Bildung von Betrachtungsebenen sowie die Trennung von inhaltlichen Daten und der Information über den Aufbau der Prozessketten.

Die Abbildung der Prozessketten im Rahmen der Methodik erfolgt vornehmlich entsprechend den in Abschnitt 2.2 (S. 13 ff.) aufgezeigten Definitionen und Vorgehensweisen. Insbesondere die Gliederung durch die Bildung von Strukturele-

3.4 Datenmanagement der Prozesskettenbetrachtung

menten gemäß Abbildung 12 (S. 22) ist von entscheidender Bedeutung, da die Prozessketten zur Herstellung von Rotoren abhängig vom Detaillierungsgrad viele Elemente beinhalten. Im Rahmen der Detaillierung des Rotors und seiner Merkmale im Verlauf der Produktentwicklung werden ebenso die produktionstechnischen Informationen konkretisiert. Dadurch vergrößert sich die Datenbasis, da vorhandene Elemente der Prozesskette durch mehrere detailliertere ersetzt oder neue hinzugefügt werden.

Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden deshalb zum einen Elemente, die stets gemeinsam in unveränderlicher Art und Reihenfolge eingesetzt werden, zu einer Einheit zusammengefasst (z. B. Prozesse zu einem Prozessmodul). Grundlegend hierzu ist eine exakte Definition von Eingangs- und Ausgangsgrößen, sodass die Kopplungsbedingung erfüllt und die Kompatibilität der Module gewährleistet ist. Zum anderen werden zur Strukturierung Prozessketteninformationen und inhaltliche Daten separiert. Dafür werden alle Tätigkeiten, Prozesse und Prozessmodule als zentrale Datenbasis, z. B. in Form einer Datenbank, gespeichert (vgl. Abbildung 32).

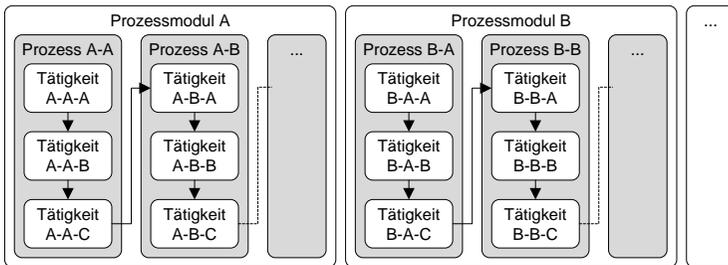


Abbildung 32: Zentrale Datenbasis aller Prozessketten

Die Beschreibung einer Prozesskette umfasst dann lediglich eine Auflistung ihrer Elemente in der entsprechenden Reihenfolge als Verweis auf die eigentliche Information innerhalb der zentralen Datenbasis (vgl. Abbildung 33).

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

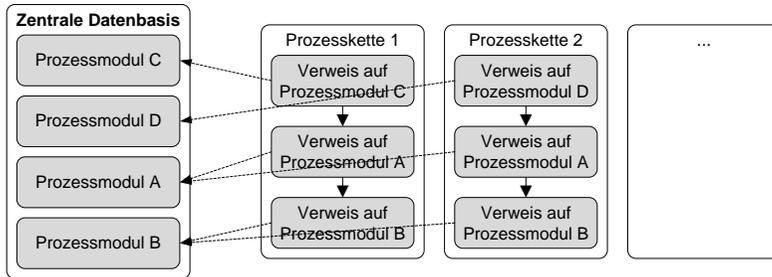


Abbildung 33: Beschreibung der Prozessketten durch Verweise auf die zentrale Datenbasis

Durch die Zentralisierung werden Redundanzen vermieden, die sich zum einen durch wiederkehrende Elemente innerhalb einer Prozesskette und zum anderen durch Ähnlichkeiten zwischen alternativen Prozessketten ergeben würden. Ändert sich eine Information z. B. einer Tätigkeit, so wird diese Änderung ausschließlich in der Datenbasis vorgenommen. Durch die Referenzierung der Prozessketten auf die Datenbasis sind Änderungen sofort erkennbar und wirken sich prozesskettenübergreifend auf das Ergebnis aus. Die beschriebene Separation dient der Vermeidung von Fehlern in Form identischer Elemente mit z. B. unterschiedlichen Kosten in zwei verschiedenen Prozessketten. Die Handhabung der Daten wird auf diese Weise vereinfacht und die Flexibilität durch einen geringeren Anpassungsaufwand erhöht.

Die in diesem Abschnitt ausgeführten Inhalte bezüglich des Datenmanagements kommen vornehmlich in der praktischen Umsetzung bzw. der Durchführung der Prozesskettenbetrachtung zum Tragen. Sie sind für alle Aspekte der Prozesskettenbetrachtung, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden, gleichermaßen gültig, d. h. sowohl für die Beschreibung wirtschaftlicher als auch qualitätsrelevanter Informationen.

3.5 Zusammenfassung

Um den in Abschnitt 2.7 aufgezeigten Handlungsbedarf abzudecken, wurden in diesem Kapitel zunächst einige Rahmenbedingungen und dann die Struktur der entwickelten Methodik sowie das für alle Einzelmethoden geltende Datenmanagement aufgezeigt.

Die angestrebte Prozesskettenbetrachtung zielt in erster Linie auf den Einsatz parallel zum Produktentwicklungsprozess ab, d. h. in diesem Rahmen auftretende Fertigungsalternativen sollen analysiert und bewertet werden können, wenngleich auch der Einsatz zur Beurteilung einer Verbesserungsmaßnahme bei bestehenden Fertigungsprozessen möglich sein soll. Insgesamt werden drei Methoden miteinander verknüpft. Allen gemein ist, dass die notwendigen Daten mittels Schätzung und/oder Vergleich gewonnen werden und dass alle Informationen durch scharfe Werte oder unscharfe Wahrscheinlichkeitsverteilungen wiedergegeben werden können. Die Strukturierung der Prozessketten nach einem einheitlichen Schema vereinfacht deren Handhabung und erhöht die Flexibilität.

Die Inhalte der *ersten Methode* sind das Toleranzmanagement zur Anpassung der alternativen Prozessketten an die gestellten Anforderungen und die Fehlerpotenziale als Kenngrößen für die Qualität.

In der *zweiten Methode* werden die bauteilbezogenen Fertigungskosten aus den Rohteil- und den Platzkosten bestimmt, die als Kenngröße für den wirtschaftlichen Vergleich der Prozessketten dienen.

Der Zweck der *dritten Methode* ist die Extrapolation der Ergebnisse der ersten beiden Methoden, ausgehend von einem Rotor mit definierter Geometrie und aus definierten Werkstoffen, auf mögliche Produktvarianten.

In den nachfolgenden drei Kapiteln werden die drei Methoden detailliert erläutert, bevor in Kapitel 7 die Anwendung der Gesamtmethodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblik aufzeigt wird.

3 Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau

4 Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte

4.1 Allgemeines

Qualitätsrelevante Aspekte sind im Flugzeugtriebwerks-Bau von besonderer Bedeutung und deshalb der Inhalt einer Methode zur Ermittlung der Kenngrößen für die Prozesskettenbewertung. Dabei wird zum einen das Toleranzmanagement adressiert, um die Prozesskette an gegebene Rahmenbedingungen und Anforderungen bzgl. Maßtoleranzen anzupassen. Zum anderen wird das aus einer Prozesskette resultierende Fehlerpotenzial, d. h. das Risiko fertigungstechnischer Fehler, bestimmt, um parallel zur monetären Bewertung die Alternativen auf Basis qualitätsrelevanter Aspekte anhand dieser Kenngröße vergleichen zu können. Die beiden Teilbereiche, Toleranzmanagement und Fehlerpotenziale, werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.2 Toleranzmanagement für Prozessketten

4.2.1 Vorgehensweise

Die Produktqualität entlang einer Prozesskette wird stets von mehreren Prozessen beeinflusst (GOCH & DIJKMAN 2009). Die Basis für das Toleranzmanagement im Zuge der Prozesskettenbetrachtung bilden deshalb die vorgegebenen Zieltoleranzen des Rotors in Verbindung mit der zur Herstellung durchlaufenen Prozesskette. Zusätzlich werden Rahmenbedingungen wie die angestrebte Aufteilung der Toleranzen, statistische Daten über erreichbare Prozessabweichungen sowie die Beschreibungen der Rotormerkmale benötigt. Ausgehend davon beinhaltet die Methode mit der Adaption eines bekannten und dem Aufbau eines neuen Toleranzsystems zwei Vorgehensweisen, um den angestrebten Abgleich von geforderten Toleranzen und erreichbaren Abweichungen auf Prozessebene zu ermöglichen. In den frühen Phasen der Produktentwicklung wird ein ähnlicher Rotor als Referenzobjekt ermittelt und es werden dessen Toleranzketten adaptiert. Bei ausreichender Informationsdichte werden anhand der Anforderungen und der Prozesskette des neuen Rotors direkt die Toleranzketten erstellt. Anschließend werden sowohl eine Toleranzanalyse als auch eine -synthese durchgeführt. Durch den prozessindividuellen Vergleich der geforderten Fertigungstoleranzen und der

4 Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte

erreichbaren Abweichungen lassen sich Verbesserungspotenziale und -bedarfe innerhalb der Prozesskette identifizieren und entsprechende Maßnahmen ableiten. Abbildung 34 zeigt den beschriebenen Ablauf, dessen Elemente im Folgenden eingehend erläutert werden.

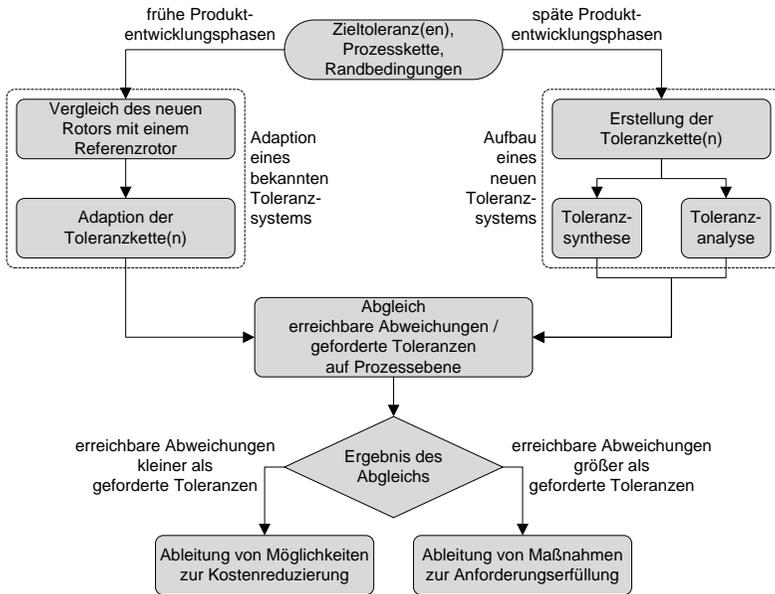


Abbildung 34: Entwickeltes Schema des Toleranzbetrachtung der Prozessketten

4.2.2 Adaption eines bekannten Toleranzsystems

In den frühen Phasen der Produktentwicklung ist aufgrund der geringen Informationsdichte eine Erstellung der Toleranzketten meist noch nicht möglich. Deshalb wird stattdessen der *Vergleich des neuen Rotors mit einem Referenzrotor* durchgeführt. Im ersten Schritt ist hierfür ein Referenzrotor zu definieren, der dem neuen Rotor möglichst ähnlich ist. Vergleichskriterien hierbei sind dessen Anforderungen, d. h. beispielsweise Vorgaben hinsichtlich der Geometrie, der verwendeten Werkstoffe und der Leistungsdaten. Dabei können auch Elemente des Rotors separat, und damit einzelne Abschnitte der Prozesskette, verglichen werden, wie z. B. die Fertigung bestimmter Merkmale. Entscheidend ist jeweils die

Sicherstellung der Vergleichbarkeit, d. h. die Ein- und Ausgangsgrößen der Vergleichsprozesse müssen möglichst ähnlich sein.

Im Anschluss an die Definition der zu vergleichenden Elemente erfolgt die *Adaption der Toleranzkette* bzw., sofern notwendig, der Toleranzketten, d. h. die Toleranzsysteme des Referenzrotors und des neuen Rotors werden miteinander verglichen und es werden Unterschiede hinsichtlich der Bemaßung aufgezeigt. Aufgrund der hohen Variabilität der Prozesse und ihrer Verknüpfungen sowie der gestellten Anforderungen etc. kann für die Adaption keine allgemeingültige Vorgehensweise festgelegt werden. Die Fragestellungen sind jedoch stets, welche Merkmale durch welchen Prozess hergestellt werden, wie genau diese gefertigt werden müssen und wie das Bezugssystem der Bemaßung definiert ist. Anschließend müssen prozessspezifisch die Unterschiede zwischen der Referenz und dem neuen Rotor identifiziert und deren Auswirkungen, sofern möglich, quantitativ bestimmt werden. Dadurch wird der anschließende Abgleich von erreichbaren Abweichungen und geforderten Toleranzen auf Prozessebene ermöglicht. Vor der Beschreibung dieses Schrittes wird eine andere Betrachtung der Toleranzketten dargestellt, die vornehmlich in den späteren Phasen der Produktentwicklung Anwendung findet.

4.2.3 Aufbau eines neuen Toleranzsystems

Der Aufbau eines neuen Toleranzsystems beginnt mit der *Erstellung der Toleranzketten*, welche die Wechselwirkungen zwischen fertigungsbedingten Einzeltoleranzen abbilden. Diese nehmen entlang der Prozesskette Einfluss auf mindestens ein Produktmerkmal. Die Durchführung dieses Schrittes kann manuell oder computergestützt mit bekannten Methoden und Softwarelösungen erfolgen. Eine manuelle Betrachtung ist jedoch aufgrund der geometrischen Komplexität von Triebwerksrotoren und des damit verbundenen Zeitaufwandes lediglich mit starken Vereinfachungen bzw. geringem Detaillierungsgrad durchführbar (PRABHAHARAN ET AL. 2004). Dabei sind die klassischen Methoden der Erstellung von Maßketten anzuwenden (vgl. z. B. JORDEN 2009; KLEIN 2006). Im Hinblick auf die Untersuchung mehrerer alternativer Prozessketten sowie die entwicklungsbegleitende Zielsetzung und die damit einhergehenden iterativen Anpassungen empfiehlt sich deshalb eine computergestützte Toleranzkettenbetrachtung. Hierfür werden auf dem Markt verschiedene Softwarelösungen angeboten. Neben entsprechenden Erweiterungsmodulen für CAD-Programme sind auch plattformunabhängige Alternativen verfügbar. Darüber hinaus zeigen z. B. STUMVOLL (2009) und WALDNER (2007) auf die Konstruktionsweise von Flug-

4 Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte

zeugtriebwerken angepasste Methodiken zur Toleranzbetrachtung auf. Zusätzlich zur Problemstellung durch die komplexen Geometrien der einzelnen Elemente und des gesamten Rotors ist das Erstellen von Toleranzketten im Flugzeugtriebwerks-Bau aufgrund oftmals langer Prozessketten mit großem Aufwand verbunden. Sofern möglich, kann die Zerlegung der Toleranz- in Teilketten, entsprechend der Vorgehensweise zur Strukturierung von Prozessketten, zur Reduzierung der Komplexität der Problemstellung beitragen.

Ausgehend von der Toleranzkette werden anschließend parallel eine Toleranzanalyse und -synthese durchgeführt, d. h. es wird sowohl von der geforderten Toleranz auf die Prozessabweichungen geschlossen als auch umgekehrt. Im Rahmen der *Toleranzanalyse* werden die Abweichungen der Einzelprozesse entlang der Prozesskette zu Werten bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Werten für die Zieltoleranz aggregiert. Für die Beurteilung der Abweichungen von Einzelprozessen stehen zwei mögliche Informationsquellen zur Verfügung, woraus sich zwei verschiedene Vorgehensweisen zur Abweichungsermittlung ergeben (vgl. Abbildung 35).

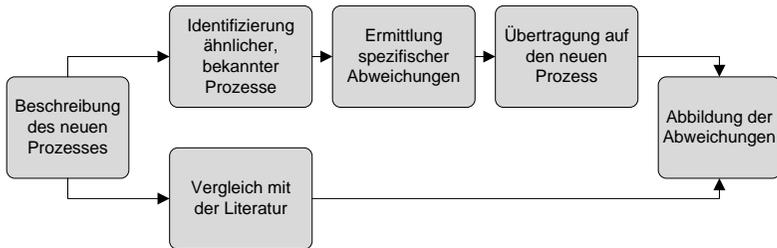


Abbildung 35: Alternative Vorgehensweisen zur Ermittlung von Prozessabweichungen

Für viele Fertigungsverfahren sind Angaben über stabil einhaltbare, maßliche Abweichungen in der Literatur vorhanden und können verwendet werden, allerdings muss die Vergleichbarkeit aufgrund der in Abschnitt 2.7 (S. 59 ff.) erläuterten Besonderheiten des Flugzeugtriebwerks-Baus geprüft werden (vgl. z. B. EVERSHEIM & SPUR 1996). Ferner können, sofern vorhanden, unternehmensinterne Vergleichswerte herangezogen werden. Letztere sind zu bevorzugen, da hierbei unternehmensabhängige Randbedingungen und betriebsmittelspezifische Einflüsse berücksichtigt werden können. Langfristige Möglichkeiten einer geeigneten Informationsbasis bieten beispielsweise die Maschinen- und Betriebsdaten-

erfassung oder Systeme zur computergestützten Qualitätssicherung (vgl. HIELSCHER 2008).

Beim Vergleich werden für jedes Element der Toleranzkette zunächst ähnliche, im Unternehmen etablierte Prozesse bestimmt und deren prozessspezifische Abweichungen ermittelt. Diese werden auf den neuen Prozess unter Berücksichtigung etwaiger fertigungstechnischer Unterschiede übertragen. Aufgrund geringer Stückzahlen und hoher Variantenvielfalt von Rotoren im Flugzeugtriebwerks-Bau ist die Bildung einer repräsentativen Datenbasis auch hier oftmals nicht möglich. Zudem sind lediglich Messwerte nutzbar, jedoch keine Prüfergebnisse. Der Unterschied besteht darin, dass Messwerte quantitative Aussagen über ein Qualitätsmerkmal darstellen, d. h. die Abweichungen werden quantifiziert dokumentiert. Prüfergebnisse hingegen beinhalten lediglich eine Aussage bezüglich der Erfüllung der Anforderung (PFEIFER 1993). Sofern keine unternehmensinterne Datenbasis zur Verfügung steht, sind Werte aus der Literatur oder die Schätzung durch Experten zu verwenden (vgl. z. B. EVERSHEIM & SPUR 1996). Ergebnis der Toleranzanalyse sind in jedem Fall erreichbare Werte oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Werte im Hinblick auf die definierten Zielgrößen.

Die *Toleranzsynthese* wird parallel zur Toleranzanalyse durchgeführt und verteilt im Gegenzug die geforderten Zieltoleranzen auf die einzelnen Elemente der Toleranzkette, d. h. auf die einzelnen Prozesse der Prozesskette. Wie in Abschnitt 2.3.3 (S. 29 ff.) aufgezeigt, kann hierbei die Aufteilung grundsätzlich gleichmäßig, proportional, nach ISO-Toleranzen oder nach Kosten, vorgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit der zuletzt genannten Möglichkeit der Vorzug gegeben. Hierbei bilden Toleranzkostenkurven die Basis für die Toleranzfestlegung der Einzelprozesse. Die Bereitstellung dieser Informationen ist oftmals schwierig (GERTH & PFEIFER 2000). Für etablierte Verfahren sind sie der Literatur zu entnehmen (vgl. z. B. EHRENSPIEL ET AL. 2007). Eine geeignete Datengrundlage vorausgesetzt, ist bei der Definition der Einzeltoleranzen insbesondere auf Kostensprünge zu achten. So bedeutet in Abbildung 36 eine Verkleinerung der zulässigen Toleranz von T_2 auf T_1 , etwa um die Montierbarkeit zweier Bauteile zu gewährleisten, eine geringe Erhöhung der Wertigkeit bei gleichzeitig erheblichem monetären Mehraufwand.

4 Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte

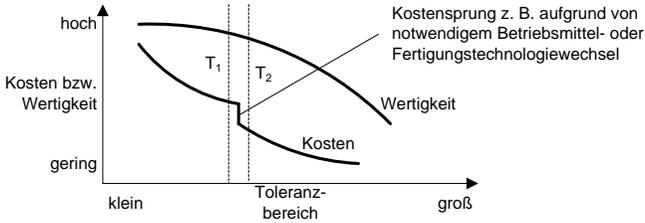


Abbildung 36: Beispielhafte Verläufe für Wertigkeit und Toleranzkosten nach STUMVOLL (2009)

Aufgrund besonderer Geometrien und Technologien ist im Flugzeugtriebwerks-Bau jedoch für viele Prozesse Erfahrungswissen notwendig. Dies bedeutet, dass die Verbindung zwischen Wertigkeit und Kosten durch Einschätzung eines Experten realisiert wird (vgl. Abschnitt 3.4.2, S.68 ff.). Die Erstellung unternehmensinterner Kostenkurven ist langfristig sinnvoll, um die Toleranzsynthese bei zukünftigen Produktentwicklungen aufwandsarm durchführen zu können und subjektive Einflüsse der Schätzung zu eliminieren. Die Ergebnisse sind Toleranzvorgaben für jeden Einzelprozess.

4.2.4 Abgleich von Toleranzen und Abweichungen auf Prozessebene

Ergebnis sowohl der Adaption eines bekannten als auch des Aufbaus eines neuen Toleranzsystems sind zum einen die aus der Prozesskette hinsichtlich der Zieltoleranz resultierenden Gesamtabweichungen. Zum anderen stehen dadurch prozessspezifische Informationen über die Anforderungen hinsichtlich der Maßtoleranz sowie über die mit dem gewählten Fertigungsverfahren und Betriebsmitteln erreichbaren maßlichen Abweichungen zur Verfügung.

Der Abgleich zwischen geforderten Toleranzen und erreichbaren Abweichungen im nächsten Schritt dient der Anpassung der Prozesskette an die gegebenen Zieltoleranzen. Dies ist notwendig, da nur durch Berücksichtigung funktionaler wie auch fertigungstechnischer Einflüsse die Festlegung optimaler Toleranzanforderungen möglich ist (JOURDAN 2003). So kann zum einen aus dem Vergleich der geforderten Zieltoleranzen und der Gesamtabweichungen die globale Aussage abgeleitet werden, ob mittels der vorhandenen Prozesskette Merkmale zu genau oder zu ungenau gefertigt werden. Zum anderen erlaubt dies die Anpassung der Einzelprozesse. Dabei lassen sich die in Abbildung 37 dargestellten Fälle unterscheiden.

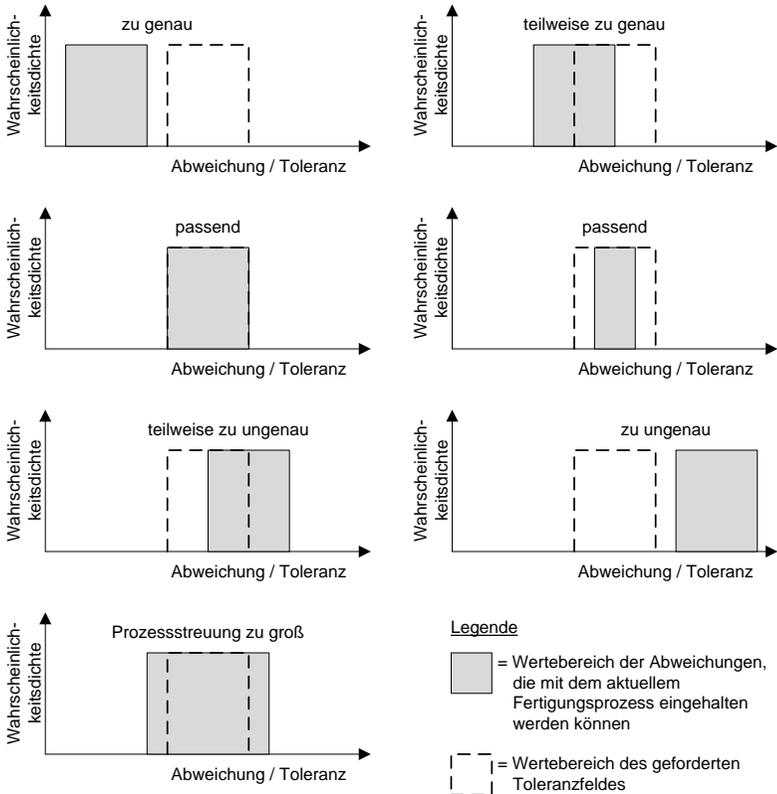


Abbildung 37: Abgleich von geforderten und erreichbaren Toleranzen auf Einzelprozessebene in Anlehnung an TROMMER (2001)

Bei zu ungenauer Fertigung oder zu großer Prozessstreuung kann die Funktionserfüllung des Rotors nicht sichergestellt werden. Bei zu genauer Fertigung kann z. B. eine weniger präzise Fertigungsanlage mit geringerem Maschinenstundensatz verwendet werden, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Prioritär nicht allein aufgrund der Notwendigkeit der Funktionserfüllung, sondern auch aufgrund des Sicherheitsanspruches im Flugzeugtriebwerks-Bau, ist die Einhaltung der Toleranzanforderung und damit die sichere Funktion des Rotors. Um eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen Toleranz und Abweichung zu erreichen, werden in Abhängigkeit des Ausgangszustandes geeignete Maßnahmen zur Anpassung der Prozesskette definiert, die im Folgenden erläutert werden.

4 Methode zur Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte

Maßnahmen zur Anforderungserfüllung werden durchgeführt, wenn die erreichbaren Prozessabweichungen ganz oder teilweise größer sind als die geforderten Toleranzen. Möglichkeiten hierfür sind die in Abschnitt 2.2.4 (S. 22 f.) beschriebenen Strukturmaßnahmen zur Optimierung von Prozessketten. Je nach Größe der Unterschiede zwischen Abweichung und Toleranzfeld sind geringfügige Prozessverbesserungen, wie z. B. ein anderes Betriebsmittel oder Werkzeug, das die Kosten lediglich geringfügig erhöht, ausreichend. Aufwändiger hingegen sind Strukturmaßnahmen an der Prozesskette, z. B. in Form einer Substitution des betreffenden Prozesses durch einen besser geeigneten. Eine weitere Möglichkeit ist die Integration eines zusätzlichen Prozesses in die Prozesskette, um den geforderten Toleranzen gerecht zu werden. Um beispielsweise eine Anforderung bzgl. der Oberflächenrauheit eines Funktionselements zu erreichen, kann zusätzlich zu einer spanenden Bearbeitung mittels Fräsen ein anschließendes Schleifen in die Prozesskette integriert werden.

Die Untersuchung von *Maßnahmen zur Kostenreduzierung* wird durchgeführt, wenn die vorhandenen Prozessabweichungen ganz oder teilweise kleiner sind als die geforderten Toleranzen. Auch hier finden die Strukturmaßnahmen zur Optimierung von Prozessketten aus Abschnitt 2.2.4 (S. 22 f.) Anwendung, allerdings mit dem Ziel, das vorhandene Potenzial zu nutzen, um die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette zu verbessern, d. h. die Fertigungskosten für den Rotor zu senken. Ist z. B. die spanende Bearbeitung einer Oberfläche durch Schlichten auf einer Fräsanlage vorgesehen, die geforderte Oberflächenrauheit lässt sich jedoch auch durch Schruppen realisieren, so kann dies genutzt werden, um die Prozesszeit zu verkürzen und damit die Platzkosten zu senken.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Toleranzmanagement einen entscheidenden Beitrag zur Prozesskettenbetrachtung im Flugzeugtriebwerks-Bau liefert, da hieraus Strukturänderungen der Prozesskette resultieren können, die sich sowohl auf die Betrachtung qualitätsrelevanter wie auch wirtschaftlicher Aspekte auswirken. Zudem wird aufgrund einheitlicher Anforderungen dadurch die Vergleichbarkeit der Prozessketten erhöht. Aus diesen Gründen ist die Toleranzbetrachtung als vorbereitende Maßnahme für den Vergleich zu sehen. Die Bedeutung der Einhaltung der Reihenfolge ist allerdings aufgrund der im Rahmen einer Produktentwicklung iterativen Anwendung der Methodik als gering anzusehen. Im Folgenden wird als zweite Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte die Ermittlung des Fehlerpotenzials als Kenngröße für den Vergleich alternativer Prozessketten dargestellt.

4.3 Beschreibung von Fehlerpotenzialen

4.3.1 Vorgehensweise

Der zweite Aspekt der Qualitätsbetrachtung umfasst die Identifizierung, Beschreibung und Bewertung möglicher fertigungstechnischer Fehler in der Prozesskette. Die Grundlage hierfür bildet die an die Zielsetzung dieser Arbeit angepasste Methode der FMEA (vgl. Abschnitt 2.3.4, S. 35 f.). Ein Fehler ist in diesem Kontext allgemein als Nichterfüllung einer Anforderung definiert (DIN EN ISO 9000 2005). Die Durchführung einer Prozess-FMEA, deren Betrachtungsgegenstand im Allgemeinen Einzelprozesse sind, ist meist mit hohem Aufwand verbunden. In Kombination mit der angestrebten ganzheitlichen Betrachtung einer Prozesskette und ihrer Elemente ist eine Reduzierung des Aufwandes notwendig. Deshalb wird zunächst in einer Vorauswahl die Anzahl der zu betrachtenden Prozesse mittels eines Bewertungssystems auf die Zahl der kritischen reduziert. Anschließend sind prozessspezifisch Fehler und gegebenenfalls Fehlergruppen zu ermitteln und zu beschreiben, ebenso die jeweiligen Ursachen und Folgen hinsichtlich des Bauteils. Zur quantitativen Bewertung wird das Fehlerpotenzial als Kennzahl eingeführt und ermittelt. Anschließend wird die Information zunächst über einzelne Prozesse und dann über die gesamte Prozesskette hinweg verdichtet. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte dieser in Abbildung 38 dargestellten Vorgehensweise näher erläutert.

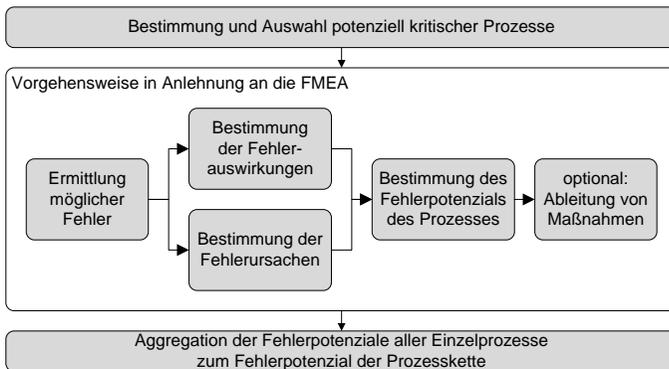


Abbildung 38: Entwickeltes Schema zur Beschreibung von Fehlerpotenzialen

4.3.2 Bestimmung und Auswahl potenziell kritischer Prozesse

Die Bestimmung und Auswahl potenziell kritischer Prozesse stellt einen vorbereitenden Schritt dar und dient der Reduzierung des Durchführungsaufwandes, da eine detaillierte Betrachtung aller Elemente aller alternativen Prozessketten zeitintensiv ist. Deshalb werden lediglich einzelne detailliert betrachtet, die in einer Matrix anhand der Bekanntheit des jeweiligen Fertigungsverfahrens und anhand von dessen Art der Anwendung bei der Herstellung des neuen Rotors ausgewählt werden. Die Einordnung der Prozesse erfolgt nach dem in Abbildung 39 dargestellten Schema, das nachfolgend erläutert wird.

		Fertigungsverfahren		
		im Unternehmen etabliert	etabliert	neu
Anwendungsfall	im Unternehmen etabliert	0	1	2
	etabliert	1	2	3
	neu	2	3	4

Abbildung 39: Matrix zur Beurteilung der Kritikalität von Prozessen

Gegenstand der Beurteilung ist der Neuheitsgrades des Prozesses. Dies beinhaltet zum einen, inwieweit Erfahrungen hinsichtlich der eingesetzten Fertigungstechnologie unternehmensintern oder -extern vorhanden sind. Zum anderen wird dargestellt, ob das Verfahren bereits in ähnlicher Weise eingesetzt wurde, sodass dabei gewonnene Erfahrungen auf den neuen Rotor übertragbar sind. Die *Kritikalität* des Prozesses, d. h. die Wahrscheinlichkeit eines fertigungstechnischen Fehlers, steigt jeweils mit dem Neuheitsgrad. Das geringste Risiko birgt eine im Unternehmen gängige Bearbeitung auf bekannte Art und Weise. Die höchste Kritikalität weist ein neuartiges Fertigungsverfahren auf, das sich in der Entwicklung befindet und erstmals für den betrachteten Anwendungsfall eingesetzt werden soll. Entsprechend ist ein Kritikalitätswert als Grenze zu definieren, bei dessen Überschreiten Prozesse detailliert zu betrachten sind. Abhängig von der Prozesskette und der daraus resultierenden Aufwand der Durchführung kann diese individuell festgelegt werden.

4.3.3 Ermittlung möglicher Fehler

Im ersten Schritt der Detailbetrachtung erfolgt die Ermittlung möglicher Fehler. Im Rahmen von Experteninterviews wird das hierfür notwendige Erfahrungswissen eingebracht. Die identifizierten Fehler sind gegebenenfalls zur besseren Strukturierung in Fehlergruppen zusammenzufassen. Beispielsweise können bei Schweißprozessen übergeordnet geometrische Abweichungen und fügetechnische Fehler in der Schweißverbindung differenziert werden. Entscheidend ist, alle Fehler zu erfassen und zu dokumentieren, da nur so ein fundiertes Ergebnis gewährleistet werden kann.

4.3.4 Bestimmung der Fehlerauswirkungen

Bei der anschließenden Bestimmung der Fehlerauswirkungen ist zunächst zu beurteilen, welche Auswirkungen auf die Funktionserfüllung des Rotors zu erwarten sind. Da bei Vorliegen eines Fehlers mindestens eine Anforderung an das Bauteil nicht erfüllt ist, ist entsprechend Nacharbeit notwendig oder das Bauteil als Ausschuss zu entsorgen. Nacharbeit ist allgemein definiert als eine „Maßnahme an einem fehlerhaften Produkt, damit es die Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000 2005). Aus Fehlern am Produkt resultieren somit evtl. auch fertigungstechnische Konsequenzen. D. h. es sind über die geplanten Prozesse hinaus weitere Tätigkeiten notwendig. Diese werden als Fehlerfolgen dokumentiert, da sie zusätzliche Aufwendungen verursachen. Im Vergleich dazu ist Ausschuss definiert als ein „fehlerhaftes Produkt, für das Entsorgung vorgesehen ist“ (DIN 55350-11 2008). Gründe hierfür sind, dass Nacharbeit entweder technisch nicht möglich ist oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchgeführt wird. Im Falle von Ausschuss als Fehlerfolge ist dies entsprechend festzuhalten.

4.3.5 Bestimmung der Fehlerursachen

Neben den Auswirkungen steht die Bestimmung der Ursachen im Fokus, da im Falle eines hohen Fehlerpotenzials als Ergebnis geeignete Gegenmaßnahmen idealerweise zur Abstellung der Ursache zu definieren sind. Zudem kann eine Beschreibung von Folgen ausgehend von vorher definierten Ursachen die Durchführung der Bestimmung des Fehlerpotenzials erleichtern. So ist es beispielsweise hilfreich, aus einer bekannten Prozessstörung mögliche Fehler am Rotor abzuleiten. Die Definition der Fehlerursachen wird dabei nach Bedarf auf der Ebene

der einzelnen Fehler oder der Fehlergruppen vorgenommen und die Ergebnisse werden dokumentiert.

4.3.6 Bestimmung des Fehlerpotenzials

Die Bestimmung des Fehlerpotenzials orientiert sich zur Quantifizierung an der Vorgehensweise der FMEA, bei der die sogenannte Risikoprioritätszahl (RPZ) durch Multiplikation der Risiko-Kennwerte für Auftreten und Bedeutung des Fehlers mit der Wahrscheinlichkeit seiner Entdeckung vor Auslieferung an den Kunden gebildet wird (vgl. Abschnitt 2.3.4 S. 35 ff.).

In Abgrenzung dazu wird im Rahmen der Methodik zur Prozesskettenbetrachtung die Entdeckung beim Einzelprozess nicht gesondert als dritte Größe bewertet. Diese Beschränkung auf die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers und dessen Bedeutung wird beispielsweise auch im Risikomanagement verwendet. Die Darstellung erfolgt dann üblicherweise in Form einer Risikomatrix, deren Achsen die beiden Kennwerte bilden. Für die Untersuchung einer gesamten Prozesskette wird jedoch einer Kenngröße im Sinne der FMEA im Vergleich zu einer mehrdimensionalen Abbildung der Vorzug gegeben. Zudem ist die Entdeckung von Fehlern aus Bearbeitungsprozessen indirekt als Auftretenswahrscheinlichkeit bei nachfolgenden Prüfprozessen berücksichtigt. So stellt ein nicht entdeckter Fertigungsfehler bei einer qualitätssichernden Tätigkeit einen Fehler des Prüfprozesses dar. Die Bewertung beschränkt sich somit auf die Auftretenswahrscheinlichkeit (R_A) und die Bedeutung (R_B). Deren Produkt bildet nach Gleichung (14) die Kenngröße Fehlerpotenzial (FP_F) für einen einzelnen Fehler:

$$FP_F = R_A \cdot R_B \quad (14)$$

Für die Quantifizierung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die Erste ist in Anlehnung an die FMEA die Schätzung durch Vergabe der Zahlen 1 bis 10, wobei 1 eine sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. Bedeutung darstellt und 10 eine sehr hohe. Damit ergibt sich für das Fehlerpotenzial ein Wertebereich von 1 bis 100. Die Grenze, ab der ein Fehler als kritisch eingestuft wird und somit Gegenmaßnahmen zu ergreifen sind, ist variabel. Für den Wertebereich der FMEA von 1 bis 1000 wird meist 125 als Grenze definiert, was einer mittleren Bewertung aller Kriterien entspricht. Mit der Reduzierung der Anzahl der Faktoren wird für die Fehlerpotenzialbetrachtung ein Grenzwert von mindestens 25 vorgeschlagen, allerdings ist diese Grenze, wie auch in Abschnitt

2.3.4 (S. 35 ff.) erläutert, veränderbar und an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Neben der Schätzung durch Experten stellt für die Bestimmung der Kennwerte der Vergleich mit ähnlichen Prozessen eine zweite Möglichkeit dar. Sofern hierfür z. B. detaillierte Qualitätsdaten aus einer ähnlichen Serienproduktion verfügbar sind, können diese Informationen z. B. in Form von Statistiken über Fehlerhäufigkeiten oder Ausfallraten in den Wertebereich 1 bis 10 umgerechnet oder direkt verwendet werden. Insbesondere in den späteren Phasen der Produktentwicklung wird dadurch ein höherer Detaillierungsgrad der Bewertung erreicht. Unabhängig davon wird nach Gleichung (15) zur Bestimmung des Fehlerpotenzials eines Einzelprozesses (FP_p) abschließend das arithmetische Mittel aus den Potenzialen aller ermittelten Fehler (FP_{Fi}) des jeweiligen Prozesses gebildet:

$$FP_p = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k FP_{Fi} \quad (15)$$

Neben scharfen Werten können ebenso unscharfe Daten berücksichtigt werden, indem für die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Bedeutung Wertebereiche hinterlegt werden (vgl. Abschnitt 3.4.3, S. 71 ff.). Dies erlaubt die Anwendung der Methodik gemäß dem präventiven Charakter in den ersten Phasen der Produktentwicklung, in denen vorwiegend ungenaue Informationen vorliegen. Durch die Abbildung möglicher Schwankungen der Fehlerpotenziale wird zudem die Planungssicherheit erhöht. Allerdings ist die Verwendung unscharfer Daten mit erheblichem Mehraufwand verknüpft, da keine einfache Berechnung mehr möglich ist, sondern z. B. eine Monte-Carlo-Simulation für die nachfolgenden Schritte der Aggregation angewendet werden muss.

4.3.7 Ableitung von Maßnahmen

Nach der Bestimmung des Fehlerpotenzials folgt für als kritisch bewertete Fehler die Ableitung von individuellen Maßnahmen zur Verbesserung, die entsprechend dokumentiert werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Senkung der Auftretenswahrscheinlichkeit zur Eliminierung von Ursachen, da die Folge meist kaum beeinflussbar ist. Zudem ist die Vermeidung der Korrektur vorzuziehen. Derartige Maßnahmen können Prozessverbesserungen durch die Wahl geeigneter Parameter sein, ebenso kann jedoch auch die Anwendung der in Abschnitt 2.2.4 (S. 22 f.) vorgestellten Strukturmaßnahmen notwendig sein. Zu berücksichtigen

ist, dass daraus resultierende Änderungen der Prozesskette sich auf die anderen Aspekte der Prozesskettenbetrachtung, d. h. auf das Toleranzmanagement und auch auf die wirtschaftliche Betrachtung sowie deren Ergebnisse, auswirken können.

4.3.8 Aggregation

Im letzten Schritt wird durch Aggregation nach der Bestimmung der Fehlerpotenziale einzelner kritischer Prozesse (FP_F) das Gesamtfehlerpotenzial der Prozesskette (FP_{Pk}) ermittelt. Dazu werden die Fehlerpotenziale der Prozesse entlang der Prozesskette für die Anzahl der Elemente (n) entsprechend Gleichung (16) aufsummiert:

$$FP_{Pk} = \sum_{m=1}^n FP_{Fm} \quad (16)$$

Nicht detailliert betrachtete Prozesse erhalten das niedrigste Fehlerpotenzial, das mit dem gewählten Wertebereich möglich ist, und fließen somit ebenso in die Kennzahl mit ein. Dadurch wird die Tatsache widerspiegelt, dass jeder Prozess ein Risiko beinhaltet. Lange Prozessketten bedeuten somit ein tendenziell höheres Fehlerpotenzial. Eine Ausnahme bilden in der Prozesskette enthaltene organisatorische Tätigkeiten. Diese fließen aufgrund der technischen Ausrichtung nicht in das Fehlerpotenzial ein.

4.4 Zusammenfassung

Die Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte umfasst das Toleranzmanagement und die Bestimmung von Fehlerpotenzialen. Ersteres beinhaltet zwei Vorgehensweisen, die in den unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung Anwendung finden, um die Prozessketten an die gestellten Anforderungen anzupassen.

Die Bestimmung der Fehlerpotenziale beginnt mit der Auswahl kritischer Prozesse anhand ihrer Neuheitsgrade. In Anlehnung an die Methode der Prozess-FMEA werden die einzelnen Fehler sowie deren Ursachen und Auswirkungen ermittelt. Anschließend werden die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Fehlerbedeutung quantifiziert und daraus das Potenzial zunächst des einzelnen Fehlers

berechnet. Alle relevanten Fehler werden abschließend innerhalb eines Prozesses sowie entlang der Prozesskette aggregiert.

Mit dem Fehlerpotenzial der gesamten Prozesskette steht eine quantitative Kennzahl zur Verfügung. Für die Methode wird dabei nicht der Anspruch erhoben, dass ihre alleinige Anwendung zur Planung und Absicherung der Bauteil- und der Fertigungsqualität eines Rotors im Flugzeugtriebwerks-Bau ausreicht. Sie ist vielmehr unterstützend und als Bewertungsgegenstand für den quantitativen Vergleich von Prozessketten aus qualitätsrelevanter Sicht zu verstehen.

Im folgenden Kapitel wird gemäß der Methodik die zweite inhaltliche Ausrichtung, d. h. die Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte in Form der bauteilbezogenen Fertigungskosten, erläutert.

5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

5.1 Allgemeines

Die Betrachtung von Prozessketten aus wirtschaftlicher Sicht richtet sich auf die Ermittlung der produktbezogenen, monetären Aufwendungen. Diese setzen sich, wie in Abschnitt 2.4.4 (S. 44 ff.) erläutert, aus Material- und Platzkosten zusammen.

Platzkosten sind die Summe der Kosten für Personal sowie Betriebsmittel während der eigentlichen Bearbeitung und für die als Rüsten bezeichnete Vorbereitung der Durchführung. Jeder der drei Kostenteile wird aus einer Zeit und den dazugehörigen zeitabhängigen Kosten, dem Stundensatz, berechnet. Beeinflusst werden diese von der Losgröße (Anzahl nacheinander gefertigter, identischer Werkstücke) und der Verarbeitungsstückmenge (Anzahl der gleichzeitig im Prozess befindlichen Werkstücke).

Materialkosten setzen sich aus Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe zusammen (vgl. Abschnitt 2.4.3, S. 43 f.). Da die Ermittlung der beiden letzten Anteile aufwändig ist und diese im Flugzeugtriebwerks-Bau nur geringfügig die Gesamtkosten beeinflussen, fokussiert die Methodik ausschließlich die Rohteilkosten. Diese werden aus einem Betrag für den Materialeinsatz und der Wertschöpfung beim Urformen der Rohteile berechnet. Abbildung 40 zeigt das Schema zur Berechnung der Fertigungskosten, bestehend aus den genannten Anteilen.

5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

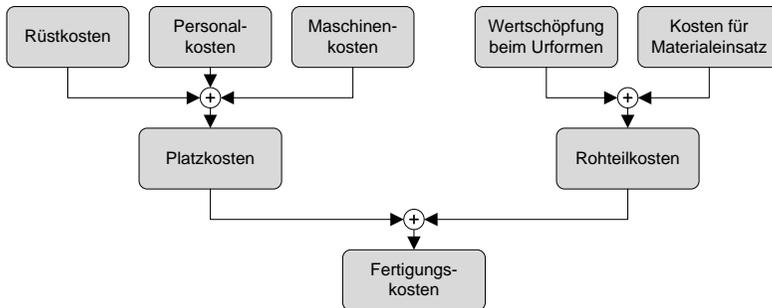


Abbildung 40: Schema zur Berechnung der Fertigungskosten

Die dargestellten Elemente werden in den folgenden Abschnitten im Einzelnen detailliert. Dabei wird insbesondere aufgezeigt, welche Einflussgrößen im Flugzeugtriebwerks-Bau von Bedeutung und dementsprechend bei der Auslegung der Prozessketten zu beachten sind.

5.2 Rohteilkosten

5.2.1 Bedeutung der Rohteilkosten

Im Allgemeinen wird der Anteil der Material- an den Fertigungskosten eines Produktes vornehmlich durch die gefertigte Stückzahl und seine Komplexität bestimmt. Bei in großen Stückzahlen hergestellten und einfachen Produkten ist er üblicherweise besonders hoch (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Dies gilt jedoch aufgrund der verwendeten Werkstoffe und der hohen Qualitätsanforderungen ebenso für Rotoren von Flugzeugtriebwerken.

Die Berechnung der Rohteilkosten basiert nach dem Vorgehen der Kilokostenkalkulation auf der Annahme, dass Masse und Einkaufspreis eines Rohteils direkt proportional zueinander sind (vgl. EHRENSPIEL ET AL. 2007). Entgegen der etablierten Vorgehensweise werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht die gesamten Rohteilkosten, sondern lediglich die Kosten für den Materialeinsatz auf diese Weise berechnet. Als Besonderheit im Flugzeugtriebwerks-Bau kann die Wertschöpfung beim Urformen der Rohteile, insbesondere der Schaufeln, für den Vergleich alternativer Prozessketten als konstant angesehen und somit einfach addiert werden (vgl. Abbildung 41).

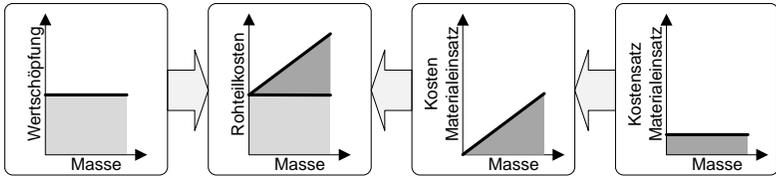


Abbildung 41: Schema der Zusammensetzung der Rohteilkosten beim Urformen

Das Urformen bildet, wie in Abbildung 6 (S. 14) gezeigt, eine der Hauptgruppen der Fertigungsverfahren und ist nach DIN 8580 (2003) als „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes“ definiert. Es stellt somit den ersten Schritt jeder fertigungstechnischen Prozesskette dar, im Rahmen dieser Arbeit erfolgt jedoch lediglich die Berücksichtigung der Ausgangsgrößen der relevanten urformenden Verfahren in Form der Rohteile.

Die Wertschöpfung ist als Grundbetrag zu verstehen, der stets in gleicher Höhe zu berücksichtigen ist. Der theoretische Fehler, dass auch ohne Masse Kosten anfallen, wird aufgrund der nicht vorhandenen Relevanz in der praktischen Anwendung akzeptiert. Im Gegenzug erhöht die Trennung von Kosten für Wertschöpfung und Materialeinsatz die Transparenz der Prozesskettenbetrachtung durch die zusätzliche Detaillierung der Rohteilkosten.

Nachfolgend werden die beiden Kostenanteile, Materialeinsatz und Wertschöpfung beim Urformen, sowie weitere Aspekte für deren Bestimmung erläutert.

5.2.2 Kosten für Materialeinsatz

Für die Berechnung der Kosten des Materialeinsatzes (KM) wird die Einsatzmasse (EM) mit den massespezifischen Kosten (mk) gemäß Gleichung (17) multipliziert:

$$KM = EM \cdot mk \quad (17)$$

Die *Einsatzmasse* entspricht dabei der Masse an Material, die für die Herstellung des Rohteils notwendig ist. Dies beinhaltet zusätzlich zur Rohteilmasse prozessbedingte Materialverluste beim Urformen. Diese können je nach eingesetztem Verfahren einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Informationen über die hierfür notwendigen prozentualen Zuschläge zur Rohteilmasse können meist durch Erfahrungswissen bereitgestellt werden. Die Rohteilmasse

5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

selbst wird anhand von CAD-Daten oder Designentwürfen bestimmt oder in den frühen Phasen der Produktentwicklung geschätzt.

Massespezifische Kosten für den Materialeinsatz gängiger Werkstoffe können aus Tabellenwerken wie z. B. VDI 2225-2 (1997) abgeleitet werden. Allerdings umfassen diese meist nicht die im Triebwerksbau verwendeten Legierungen, sodass auch hierfür wiederum auf Erfahrungswissen zurückzugreifen ist. Hauptinflussparameter auf massespezifische Kosten für den Materialeinsatz sind neben dem Werkstoff selbst die Abnahmemenge, das eingesetzte urformende Verfahren sowie die aktuelle Marktsituation, da die Preise für Legierungselemente in der Regel starken Schwankungen unterworfen sind. Deshalb ist insbesondere für langfristige Planungen im Flugzeugtriebwerks-Bau die Verwendung unscharfer Daten zur Abbildung von Massekostensätzen sinnvoll und notwendig, wie sie auch im Rahmen von Risikobewertungen verwendet werden (vgl. REINHART ET AL. 2011).

Eine weitere Besonderheit im Flugzeugtriebwerks-Bau sind stets notwendige Rohteilaufläufe bei Rotorscheiben. Beispielsweise ist eine 100%-Prüfung des gesamten Volumens mittels Ultraschall vorgeschrieben, um mögliche Fehlstellen identifizieren zu können. Hierfür ist jedoch verfahrensbedingt die Einhaltung einer einfachen Geometrie notwendig, weshalb, wie in Abbildung 42 schematisch dargestellt, die Rohteilgeometrie wesentlich größer sein muss als die Fertigteilgeometrie.

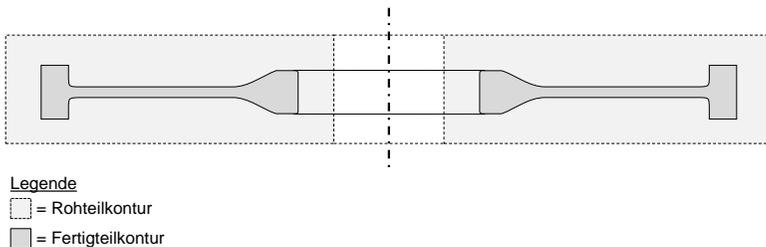


Abbildung 42: Schematische Darstellung von Rohteil- und Fertigteilgeometrie einer Rotorscheibe

Daher sind die Auswirkungen von Geometrieänderungen oder die Unterschiede geometrischer Bauteilvarianten im Hinblick auf die Rohteilkosten im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung im Flugzeugtriebwerks-Bau stets kritisch zu prüfen. So müssen z. B. Maßnahmen zur Materialeinsparung am fertigen Rotor nicht

zwingend vorteilhaft für die Rohteilkosten sein. Die ganzheitliche Betrachtung ist deshalb unbedingt erforderlich.

5.2.3 Wertschöpfung beim Urformen

Die hauptsächlichen Einflussgrößen der Wertschöpfung beim Urformen sind das eingesetzte Fertigungsverfahren wie Gießen oder Schmieden sowie die Fertigungsmenge. Geringe Geometrieabweichungen ähnlicher Rohteile, wie sie für den Vergleich alternativer Prozessketten notwendig sind, können dabei insofern vernachlässigt werden, als dass sie sich kaum in den Aufwänden widerspiegeln. Die Höhe der Wertschöpfung ist für ein bestimmtes Rohteil masseunabhängig und wird deshalb für den jeweiligen Rohteiltyp innerhalb geringer Geometrieabweichungen als konstant angenommen. Werden beispielsweise die Rohteilkosten zweier Varianten einer gegossenen Turbinenschaufel für denselben Einsatzzweck miteinander verglichen, die ausschließlich in der Fußgeometrie voneinander abweichen, wird zwar der Unterschied in der Einsatzmasse berücksichtigt, die Wertschöpfung jedoch als identisch betrachtet. Dies wird damit begründet, dass die Änderung des vorwiegend durch die Formherstellung beeinflussten Aufwandes beim Gießen vernachlässigbar gering ist.

Im Flugzeugtriebwerks-Bau machen die Rohteilkosten der Rotoren einen erheblichen Anteil der bauteilbezogenen Fertigungskosten aus. Allerdings bieten sich nur wenige Möglichkeiten, im Rahmen der Betrachtung fertigungstechnischer Prozessketten Einfluss auf deren Höhe zu nehmen, da sowohl die Wertschöpfung als auch der Kostensatz für den Materialeinsatz größtenteils außerhalb des Betrachtungsraumes der Methodik definiert werden. So ist z. B. die geplante Stückzahl des neuen Rotors eine entscheidende Einflussgröße, aus der sich jedoch keine Unterschiede zwischen den zu bewertenden Fertigungsalternativen ergeben. Demgegenüber sind die Parameter der Bearbeitungskosten als wichtige Größen der Prozesskettenbetrachtung anzusehen, wie im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

5.3 Platzkosten

5.3.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 2.4.4 (S. 44 ff.) erläutert, existieren verschiedene Kalkulationsmethoden zur Berechnung von Bearbeitungskosten. Die Betrachtung der

Kosten der Prozessketten im Flugzeugtriebwerks-Bau im Rahmen dieser Arbeit wird mittels der Platzkostenrechnung realisiert. Dazu werden zunächst die Kosten der Einzelprozesse bestimmt und anschließend entlang der Prozesskette für den Rotor aufsummiert. In den nächsten Abschnitten folgen Beschreibungen der relevanten Einflussgrößen und die Berechnungsschemata der Rüst-, Personal- und Maschinenkosten.

5.3.2 Einflussgrößen der Platzkosten

5.3.2.1 Stundensätze

Stundensätze sind die Kosten pro Zeit für die Belegung von Fertigungsmitteln. Deren Höhe wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Für die Berechnung der Platzkosten ist die Betrachtung von Stundensätzen für Personal und Maschinen notwendig.

Personalstundensätze sind unternehmensspezifisch festgelegt und werden nicht im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung ermittelt. Vielmehr sind sie als Eingangsgröße für die Berechnung der Platzkosten zu sehen. Meist existieren in Abhängigkeit von der notwendigen Qualifikation unterschiedliche Stundensätze für Personal in der Produktion. Die arbeitsplatzspezifische Zuweisung ist häufig ebenso fix definiert. Die Beeinflussung der Personalkosten erfolgt damit ausschließlich durch Variation der Maschinen- und Personalzeiten.

Die grundlegende Berechnung der *Maschinenstundensätze* ist in Abschnitt 2.4.4 (S. 44 ff.) dargestellt. Basierend darauf können im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung die zeitabhängigen Kosten aller verwendeten Anlagen bestimmt werden. Meist existieren jedoch unternehmensspezifische Kalkulationsmethoden, die berücksichtigt werden müssen. Deshalb werden für die Prozesskettenbetrachtung, sofern vorhanden, bereits kalkulierte Maschinenstundensätze zur Anwendung gebracht. Zu betonen ist der Einfluss der jährlichen Nutzungszeit auf den Maschinenstundensatz, da sich die fixen, jährlichen Kosten einer Anlage in Form der kalkulatorischen Abschreibung auf die jährliche Anzahl der Stunden verteilen, die die Anlage in Betrieb ist. Charakteristisch für den Flugzeugtriebwerks-Bau sind im Vergleich zur theoretisch möglichen Belegungszeit niedrige Auslastungsgrade der Anlagen, da oftmals Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, die nur für bestimmte Anwendungen benötigt werden. In Verbindung mit niedrigen Stückzahlen führt dies zu hohen Maschinenstundensätzen. Im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau ist deshalb explizit

auf möglichst hohe Auslastungsgrade zu achten. Hierfür ist unter Umständen auch eine temporäre Erweiterung des eigentlichen Betrachtungsraumes erforderlich. So kann eine fertigungstechnische Prozesskette mit unternehmensweiter Sicht aufgrund besserer Auslastung vorhandener Anlagen vorteilhaft sein, obwohl bei Betrachtung des im Fokus stehenden Rotors eine andere wirtschaftlicher erscheint.

5.3.2.2 Prozesszeiten

Die Bestimmung von Prozesszeiten ist ein komplexer und aufwändiger Vorgang. Neben der Anzahl der zu betrachtenden Prozesse erschweren vor allem unterschiedliche Detaillierungsgrade insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung die Durchführung (MÜLLER 2007). Grundsätzlich besteht eine Vielzahl von Methoden zur Zeitermittlung (vgl. z. B. LUCZAK ET AL. 2010; MÜLLER 2007; REFA 1997; TROMMER 2001). Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Aufteilung, wie in Abbildung 43 dargestellt, vorgenommen.

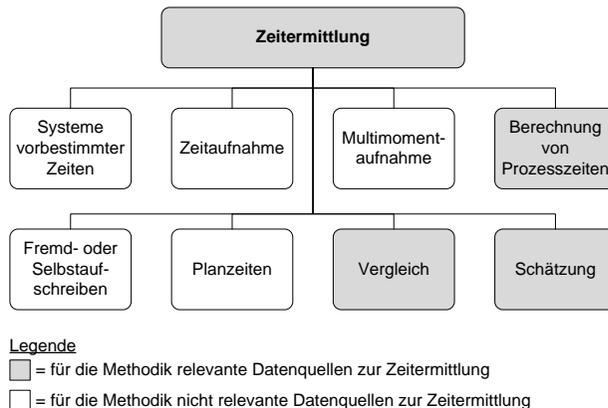


Abbildung 43: Methoden der Zeitermittlung in Anlehnung an REFA (1997)

Selbst- bzw. Fremdaufschreibung sowie Multimoment- und Zeitaufnahme sind ausschließlich zur Verbesserung bestehender Prozesse geeignet und werden deshalb in dieser Arbeit nicht näher beleuchtet. Die Methode der *Systeme vorbestimmter Zeiten* ist hauptsächlich auf manuelle Tätigkeiten ausgelegt und für die Betrachtung gesamter Prozessketten aufgrund des hohen Detaillierungsgrades der Beschreibung der Tätigkeiten mit hohem Aufwand verbunden. Auf Standardpro-

5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

zessen beruhende Planzeiten sind für den Anwendungsbereich des Flugzeugtriebwerks-Baus vor dem Hintergrund der geringen Stückzahlen ungeeignet. Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb auch zur Zeitermittlung die Methoden *Vergleich* und *Schätzung* eingesetzt. Die Berechnung von Prozesszeiten als parametrische Darstellung ist, wie in Abschnitt 3.4.2 (S. 68 ff.) beschrieben, dem Vergleich zuzuordnen, da in diesem Fall fundierte Ergebnisse aus bekannten Fertigungsverfahren als Datenbasis für die Bestimmung der Werte der Parameter dienen. Aufgrund der höheren Genauigkeit ist der Vergleich, sofern möglich, stets der Schätzung vorzuziehen. Vor allem bei neuen Fertigungsverfahren oder Anwendungen ist jedoch die Schätzung zur Zeitermittlung unabdingbar. Darüber hinaus ist die fortführende Detaillierung der Prozessbeschreibungen parallel zur Produktentwicklung entscheidend für die sinnvolle Betrachtung der Fertigungsalternativen.

Die Detaillierung zu schätzender Informationen erfolgt dadurch, dass diese stets in der genauesten zur Verfügung stehenden Betrachtungsebene durchgeführt wird. Mit zunehmender Konkretisierung der Prozesse, der Bildung von Prozessmodulen und der Ergänzung sekundärer Schritte werden die Schätzungen entsprechend angepasst. So kann auch die Unterteilung in einzelne Elemente die Genauigkeit erhöhen. Beispielweise kann die Zeit für eine spanende Bearbeitung mittels Fräsen als Summe von Einzelzeiten für die Herstellung einzelner Merkmale geschätzt werden.

Die Detaillierung der durch Vergleich zu ermittelnden Eingangsinformationen wird durch die Einführung von Parametrisierungen realisiert. In den frühen Phasen der Produktentwicklung werden anhand ähnlicher Prozesse zunächst pauschale Aussagen über Prozesszeiten getroffen. Diese werden anschließend sukzessive durch funktionale Zusammenhänge ersetzt. Hierbei ist anzumerken, dass Maschinenzeiten vieler fertigungstechnischer Verfahren als mathematische Funktion abgebildet werden können. Beispielsweise ist, wie in Gleichung (18) dargestellt, die Maschinenzeit beim Längsdrehen (t_{LD}) abhängig von der Länge des Vorschubweges (L), der Drehzahl (n_D) und dem Vorschub pro Umdrehung (f_U) (EVERSHEIM & SPUR 1996):

$$t_{LD} = \frac{L}{n_D \cdot f_U} \quad (18)$$

Die für eine solche Berechnung benötigten Eingangsdaten werden zum einen von den Eigenschaften des herzustellenden Merkmals, wie des Gesamtvorschubwe-

ges, bestimmt, zum anderen von den Parametern des angewendeten Fertigungsverfahrens, wie der Drehzahl oder dem Vorschub pro Umdrehung. Letztere sind wiederum abhängig von verschiedenen Faktoren, wie z. B. dem zu bearbeitenden Werkstoff sowie dem Betriebsmittel und dem Werkzeug. Zu beachten ist, dass die Komplexität der Betrachtung und insbesondere auch der Aufwand der Datenbeschaffung mit dem Detaillierungsgrad steigen, sodass die Erhöhung der Aussagekraft genauerer Daten stets abgewogen werden muss.

Unabhängig von der Art der Datenherkunft besteht im Zuge der Anwendung der Methodik die Möglichkeit, alle Prozesszeiten gemäß Abschnitt 3.4.3 (S. 71 ff.) durch unscharfe Daten abzubilden. Insbesondere bei der Schätzung von Prozesszeiten durch Experten hat sich in der Praxis die Definition von Minimum und Maximum als hilfreich erwiesen. So kann z. B. eine Gleichverteilung mit diesen beiden Werten als Grenzen für die Prozesskettenbetrachtung wiedergegeben werden.

5.3.2.3 Losgröße

Unter *Losgröße* wird im Rahmen dieser Arbeit die Fertigungslosgröße verstanden, die die „Anzahl gleichartiger Produkteinheiten angibt, die ohne Umrüstung des Betriebsmittels von ihm nacheinander bearbeitet wird“ (OLFERT & RAHN 2004). Sie stellt, wie in Abbildung 44 aufgezeigt, eine Einflussgröße der bauteilbezogenen Fertigungskosten dar, da sich die Rüstkosten auf alle Bauteile eines Loses aufteilen.

5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

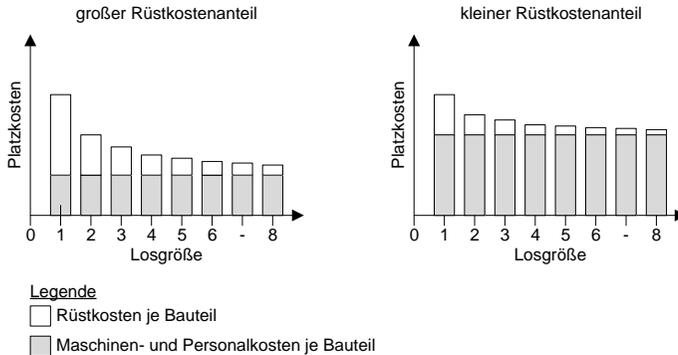


Abbildung 44: Einfluss der Losgröße auf die Platzkosten nach EHRENSPIEL ET AL. (2007)

Im Flugzeugtriebwerks-Bau sind kleine Losgrößen vorherrschend. Der Möglichkeit zur Verringerung der Rüstkosten durch die Fertigung in größeren Losen stehen die Lagerhaltungskosten sowie das Kapital gegenüber, das durch die Bevorratung von Rohteilen mit hohen Materialwerten gebunden wird. Dabei verhindern lange Lieferzeiten in Verbindung mit der benötigten Flexibilität in der Fertigung kurzfristige Bestellungen.

5.3.2.4 Verarbeitungsstückmenge

Die Verarbeitungsstückmenge ist die Anzahl von Bauteilen, die gleichzeitig einen Prozess durchlaufen. Sie stellt einen wichtigen Einflussfaktor auf die bauteilbezogenen Maschinen- und Personalkosten dar, da sich die aus Gesamtzeit und Stundensatz berechneten Kosten gleichmäßig auf alle Bauteile der Verarbeitungsstückmenge verteilen. Prozesse, die von mindestens zwei Bauteilen parallel durchlaufen werden, werden als *Chargenprozesse* bezeichnet. Ein hierfür typisches Beispiel im Flugzeugtriebwerks-Bau ist eine Wärmebehandlung in einem Ofenprozess. Innerhalb der Prozessketten von Rotoren können die Anforderungen an das Werkstoffgefüge der Bauteile nur durch entsprechende Wärmebehandlungen erreicht werden. Hierfür werden Öfen eingesetzt, deren Betrieb aufgrund sehr langer Prozesszeiten aus wirtschaftlicher Sicht nur bei Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Arbeitsraumes sinnvoll ist. Deshalb wird im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung bei dem Einsatz solcher Fertigungsverfahren stets die technisch maximal mögliche Verarbeitungsstückmenge geprüft.

Nach der Darstellung der einzelnen Einflussgrößen werden nachfolgend die Berechnungsschemata der Anteile der Platzkosten erläutert.

5.3.3 Maschinenkosten

Maschinenkosten sind die Kosten für den anteiligen Einsatz von Betriebsmitteln, die auf ein Bauteil für die Durchführung eines Prozesses zu dessen Herstellung entfallen. Sie werden durch Multiplikation der anteiligen Maschinenzeit mit dem dazugehörigen Maschinenstundensatz berechnet (vgl. Abbildung 45).

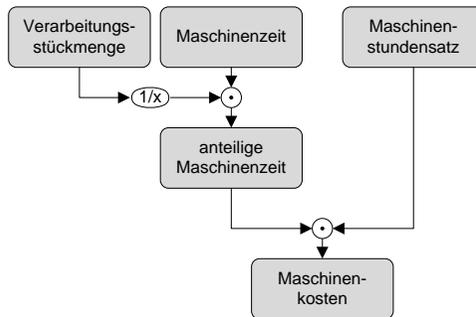


Abbildung 45: Schema zur Berechnung der Maschinenkosten

Für die Bestimmung der Maschinenzeit als gesamte Belegungszeit des Fertigungsmittels existieren, wie erläutert wurde, verschiedene etablierte Ansätze, die im Rahmen der vorgestellten Methodik anwendungsfallspezifisch eingesetzt werden können. Um die anteilige Maschinenzeit je Bauteil zu erhalten, wird diese durch die Verarbeitungsstückmenge dividiert.

5.3.4 Personalkosten

Personalkosten repräsentieren die monetären Aufwendungen für den Einsatz menschlicher Arbeitsleistung. Deren Berechnung erfolgt, wie in Abbildung 46 dargestellt, durch die Multiplikation der Zeit mit dem dazugehörigen Stundensatz (vgl. Abschnitt 5.3.2.1, S. 98 f.).

5 Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

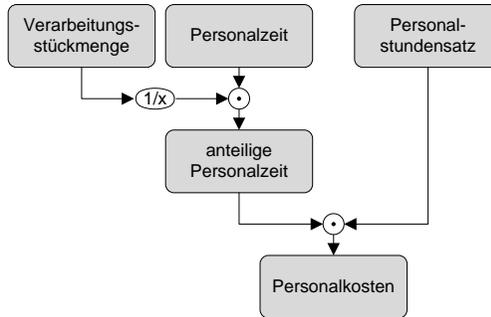


Abbildung 46: Schema zur Berechnung der Personalkosten

Für die Bestimmung der Zeit existieren zwei etablierte Methoden. Entweder wird eine separate Personalzeit mit den Möglichkeiten nach Abschnitt 5.3.2.2 (S. 99 ff.) ermittelt oder es wird die Maschinenzeit des Prozesses als Grundlage verwendet und mit einem sogenannten Personalfaktor multipliziert. Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund ihrer größeren Flexibilität der direkten Bestimmung von Personalzeiten der Vorzug gegeben. Als weiterer Faktor bei der Berechnung der Personalkosten fließt wiederum die Verarbeitungsstückmenge ein, sodass sich für den einzelnen Rotor eine anteilige Personalzeit ergibt.

5.3.5 Rüstkosten

Rüstkosten werden durch Maßnahmen zur Vorbereitung eines Betriebsmittels auf seinen Einsatz notwendig (REFA 1997). Sie werden in der vorgestellten Methodik, wie in Abschnitt 2.4.4 (S. 44 ff.) dargelegt, durch Multiplikation der anteiligen Rüstzeit mit der Summe der Stundensätze für Personal sowie Maschine berechnet (vgl. Abbildung 47)

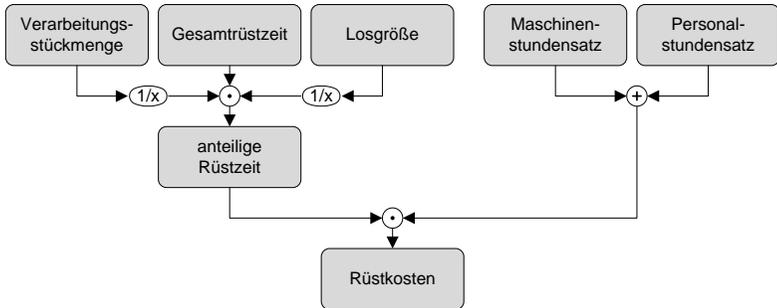


Abbildung 47: Schema zur Berechnung der Rüstkosten

Grundlage für die Bestimmung der anteiligen Rüstzeit ist die Gesamtrüstzeit, die durch die Verarbeitungsmenge und die Losgröße dividiert wird, sodass sich die Zeit ergibt, die dem einzelnen Bauteil zugerechnet werden kann. Zu beachten ist, dass diese lediglich eine Hilfsgröße für die Berechnung darstellt. Eine Veränderung der Losgröße oder der Verarbeitungsmenge verändert nicht real die Dauer des Rüstvorgangs, sondern lediglich die anteilige Rüstzeit.

5.4 Zusammenfassung

Die Methode zur Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte richtet sich auf die Bestimmung der bauteilbezogenen Fertigungskosten, die sich aus den Rohteil- und den Platzkosten zusammensetzen. Die Rohteilkosten werden durch Addition der Wertschöpfung beim Urformen und der masseabhängigen Kosten für den Materialeinsatz berechnet. Besonderes Augenmerk ist bei der Prozesskettenbetrachtung für Rotoren bzw. im Flugzeugtriebwerks-Bau allgemein auf den Kostensatz für den Materialeinsatz sowie die Beachtung evtl. notwendiger Aufmaße der Rohteile zu legen.

Nach der Detaillierung der Methoden zur Ermittlung der quantitativen Kenngrößen für den Vergleich der alternativen Prozessketten in Form der Betrachtung qualitätsrelevanter und wirtschaftlicher Aspekte wird im nachfolgenden Kapitel die Methode vorgestellt, mit der die Ergebnisse für eine bestimmte Referenzanwendung auf weitere Rotorvarianten extrapoliert werden können, um die Eignung alternativer Prozessketten zu prüfen.

6 Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten

6.1 Allgemeines

In den beiden vorhergehenden Kapiteln wurden Methoden zur Prozesskettenbetrachtung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und qualitätsrelevanter Aspekte aufgezeigt. Betrachtungsgegenstand ist dabei stets ein Rotor mit definierter Geometrie und definierten Werkstoffen für ein bestimmtes Triebwerk. Im Hinblick auf die Ausrichtung der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik als planungsbegleitendes Hilfsmittel ist es jedoch notwendig, darüber hinaus die Eignung der alternativen Prozessketten zur Herstellung ähnlicher Rotoren als Produktvarianten (vgl. Abschnitt 2.5, S. 49 ff.) zu untersuchen. So ist zum einen im Flugzeugtriebwerks-Bau die Einführung einer neuen Fertigungstechnologie meist nur dann wirtschaftlich, wenn diese in Prozessketten für mehrere Bauteile eingesetzt wird. Zum anderen wird die Möglichkeit eröffnet, geeignete Triebwerksanwendungen in Bezug auf Geometrie und Werkstoffe für einen neuen Rotor zu identifizieren. Deshalb wird im Folgenden eine Methode aufgezeigt, um die Prozesskettenbetrachtung für die Aspekte *Fehlerpotenzial* und *Fertigungskosten* über ein Referenzszenario hinaus auf ähnliche Rotoren zu erweitern. Die Betrachtung von Rotorvarianten erfolgt auf der Basis von Prozesskettenvarianten.

6.2 Betrachtung von Prozesskettenvarianten

Die Eingangsgrößen sind die Unterscheidungsmerkmale der Rotorvarianten. Die Ausgangsgrößen sind die Veränderungen der inhaltlichen Aspekte der Prozesskettenbetrachtung (vgl. Abbildung 48). Der Kern der Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten ist deshalb eine Vorgehensweise zur quantitativen Ermittlung der Abhängigkeiten der wirtschaftlichen und qualitätsrelevanten Kenngrößen von Parametern für Rotorvarianten.

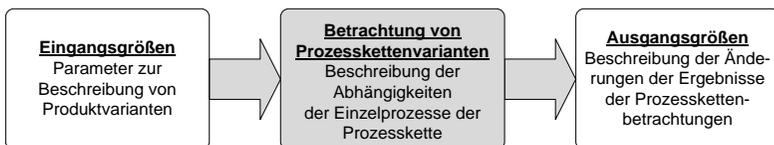


Abbildung 48: Schema zur Betrachtung von Prozesskettenvarianten

6 Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten

Dabei werden im Hinblick auf die Beschaffenheit ähnlicher Bauteile im Flugzeugtriebwerks-Bau Rotorvarianten berücksichtigt, die sich durch die eingesetzten Werkstoffe bzw. durch eine skalierte Geometrie, d. h. eine identische Konstruktion mit unterschiedlichen Maßen, voneinander unterscheiden. Die Toleranzbetrachtung wird dabei nicht integriert, da diese als der Variantenbetrachtung vorgelagert zu verstehen ist, um die Prozessketten an eine Referenzanwendung anzupassen. Die Handhabung eines parametrischen Toleranzmodells für die komplexen geometrischen Zusammenhänge im Flugzeugtriebwerks-Bau ist zudem nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand realisierbar. Abbildung 49 zeigt qualitativ die relevanten Betrachtungen von Prozessketten für Rotorvarianten, die durch die gewählten Ein- und Ausgangsgrößen differieren.

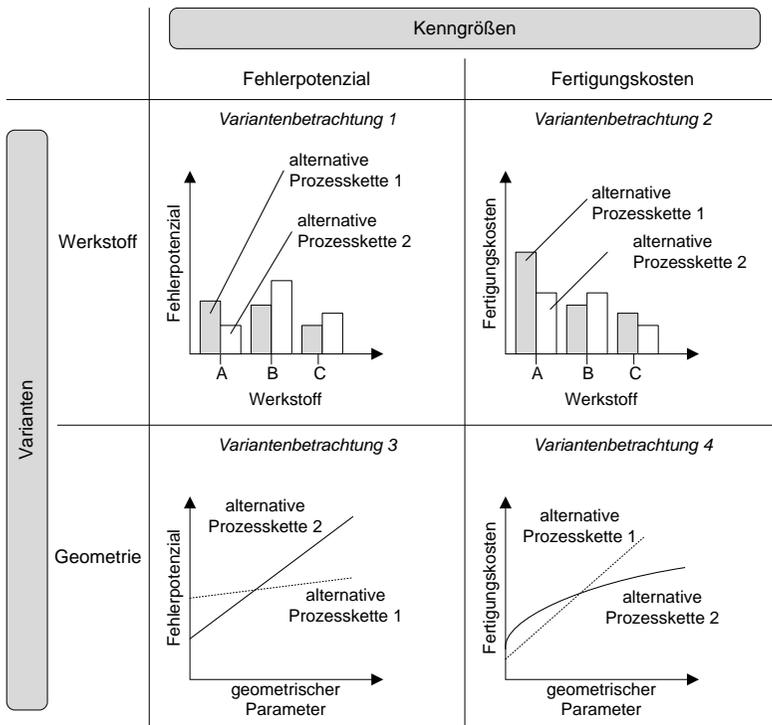


Abbildung 49: Arten der Variantenbetrachtung

Insgesamt sind vier verschiedene Arten der Variantenbetrachtung innerhalb der Methode definiert. Die Ergänzung durch weitere ist grundsätzlich möglich, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgeführt.

6.3 Variantenbetrachtung mittels Skalierungsgrößen

6.3.1 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen Variantenparametern als Eingangsgröße und wirtschaftlicher bzw. qualitätsrelevanter Zielgröße ist stets identisch, allerdings erfordern komplexe Zusammenhänge die Einführung von Zwischenelementen als Hilfsmittel. So können z. B. Abhängigkeiten der Fehlerpotenziale vom verwendeten Werkstoff (Variantenbetrachtung 1 in Abbildung 49) durch die Veränderungen der Auftretenswahrscheinlichkeiten und Fehlerbedeutungen direkt für die Einzelprozesse und somit auch für die Prozesskette insgesamt aufgezeigt werden. Dagegen sind Abhängigkeiten der Fertigungskosten für geometrische Rotorvarianten auf Prozessebene (Variantenbetrachtung 4 in Abbildung 49) aufgrund der Komplexität von Rotoren i. d. R. nicht direkt erfassbar. Im Folgenden wird für die Variantenbetrachtung 4 die in Abbildung 49 gezeigte Vorgehensweise erläutert. Diese ist ebenso in reduzierter Form für die drei anderen Arten der Variantenbetrachtung anwendbar, wobei durch die individuelle Reduzierung bzw. Eliminierung einzelner Schritte der Aufwand der Durchführung reduziert werden kann.

Die Basis für die Variantenbetrachtung bildet neben den notwendigen Parametern die Prozesskette mit den Beschreibungen der einzelnen Prozesse aus den Methoden zur Betrachtung der wirtschaftlichen und der qualitätsrelevanten Aspekte (Kapitel 4 und 5). Sofern notwendig, sind im ersten Schritt die Parameter der Rotorvarianten in fertigungstechnisch relevante Parameter zu überführen. Anschließend werden sowohl die Fertigungsprozesse als auch die Variantenparameter, d. h. die Unterscheidungsmerkmale, mit den im Vorfeld definierten Skalierungsgrößen verknüpft. Im nächsten Schritt erfolgt zur Reduzierung des Aufwandes bei der Anwendung der Methode die Auswahl relevanter Abhängigkeiten zwischen den Fertigungsprozessen und den Variantenparametern anhand der Skalierungsgrößen. Die identifizierten Zusammenhänge werden durch Kostenwachstumsgesetze quantifiziert, sodass die Veränderung der Zielgröße, d. h. der Fertigungskosten oder des Fehlerpotenzials, in Abhängigkeit der Eingangsgrößen, d. h. der geometrischen Parameter, dargestellt werden kann.

6 Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten

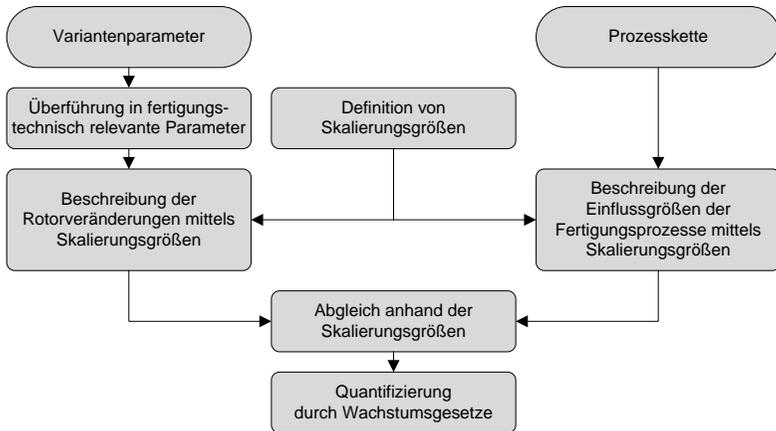


Abbildung 50: Vorgehensweise zur Betrachtung von Bauteilvarianten

In den folgenden Abschnitten 6.3.2 bis 6.3.7 werden die einzelnen Elemente der Vorgehensweise anhand der Betrachtung der Fertigungskosten für geometrische Rotorvarianten erläutert.

6.3.2 Definition von Skalierungsgrößen

Der grundlegende Ansatz der Skalierungsgrößen ist die Beschreibung der Richtungen und Arten der geometrischen Änderungen des Rotors bei Variation eines Konstruktionsparameters mittels einer begrenzten Anzahl an geometrischen Größen. Diese stellen gleichzeitig auch die hauptsächlichsten Abhängigkeiten der Kosten einzelner Prozesse dar. Dazu werden, wie in Abbildung 51 aufgezeigt, insgesamt sieben ein-, zwei- und dreidimensionale Skalierungsgrößen gebildet. Das Koordinatensystem besteht dabei aus einer Achse in Richtung der Triebwerksachse (a), einer Achse in radialer Richtung des Rotors (r) und einer Achse in tangentialer Richtung zum Umfang (t). Der Nullpunkt wird jeweils für das zu betrachtende Merkmal des Rotors individuell gesetzt.

6.3 Variantenbetrachtung mittels Skalierungsgrößen

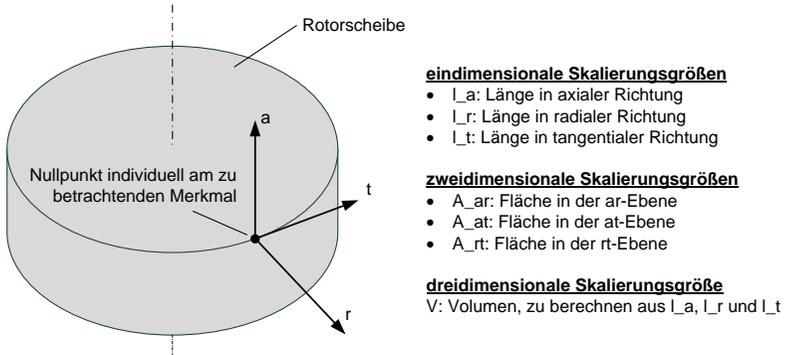


Abbildung 51: Skalierungsgrößen für die Betrachtung geometrischer Varianten

Jedem Variantenparameter wird im Folgenden mindestens eine Skalierungsgröße zugewiesen. Ebenso wird untersucht, welchen Skalierungsgrößen die Einflussfaktoren auf die Fertigungskosten der einzelnen Prozesse entsprechen. Muss beispielsweise die Mantelfläche der Rotorscheibe auf einer Drehmaschine bearbeitet werden, so sind die Fertigungskosten dafür unter anderem abhängig von der Scheibendicke (Länge der Scheibe in axialer Richtung). Diesem Prozess *Bearbeitung_Mantelfläche* wird deshalb die Skalierungsgröße l_a zugewiesen, ebenso dem geometrischen Variantenparameter *Scheibendicke*. Nach diesem Schema werden allen Fertigungsprozessen und allen Variantenparametern Skalierungsgrößen zugewiesen. Damit kann durch einfachen Abgleich der zugewiesenen Skalierungsgrößen festgestellt werden, ob ein Fertigungsprozess von einem Variantenparameter beeinflusst wird oder nicht. Die Skalierungsgrößen sind im Rahmen dieser Methodik nicht als mathematisch exakte Beschreibung zu verstehen, um automatisiert kostenvariable Modelle zu erstellen, sondern vielmehr als Mittel zur Unterstützung bei der manuellen Definition von Abhängigkeiten, um die Handhabung der Problemstellung der Variantenbetrachtung für Rotoren zu vereinfachen.

Anzumerken ist, dass die Einführung der Skalierungsgrößen in erster Linie zur Betrachtung geometrischer Varianten erforderlich ist. Wie erläutert wurde, ist die Komplexität der Problemstellung bei der Betrachtung von Werkstoffvarianten geringer. In diesem Fall wird eine direkte Verknüpfung von Ein- und Ausgangsgrößen empfohlen, da der Werkstoff selbst den einzigen Variantenparameter darstellt und die Fragestellung der Werkstoffabhängigkeit der einzelnen fertigungstechnischen Prozesse verhältnismäßig einfach zu beantworten ist.

6.3.3 Überführung in fertigungstechnisch relevante Parameter

Die Überführung in fertigungstechnisch relevante Parameter dient der Umwandlung gegebener Parameter in solche, die im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung verwendet werden können.

Im Falle der geometrischen Skalierung umfasst die Beschreibung alle Informationen, die notwendig sind, um den Rotor geometrisch eindeutig zu definieren. Deren Ermittlung ist nicht Inhalt der Methode, vielmehr stellen sie für diese Arbeit Eingangsdaten dar, die z. B. aus einem parametrischen CAD-Modell in der Produktentwicklung generiert werden können. Zur exakten Festlegung einer Rotorgeometrie ist aufgrund ihrer Komplexität eine Vielzahl von Parametern notwendig.

Deshalb werden z. B. Parameter eines herzustellenden Merkmals, sofern möglich, zusammengefasst oder fertigungstechnisch nicht relevante Größen eliminiert. Beispielsweise ist für die Konstruktion des Schaufelfußes eines konventionellen Rotors eine Vielzahl geometrischer Definitionen notwendig, um dessen Form exakt zu beschreiben. Aus fertigungstechnischer Sicht ist die Form jedoch unerheblich für die Platzkosten, da für das Schleifen der Schaufelfüße Profilschleifscheiben verwendet werden und somit die Bearbeitungszeit lediglich von der Differenz zwischen Rohteil- und Fertigteilmaß abhängig ist. Dies bedeutet, dass einige maßliche Parameter im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung vernachlässigt werden können. Auch müssen bei der Konstruktion eines Rotors oft Freiformgeometrien beschrieben werden. Deren exakte Definition ist komplex, für die Bearbeitung kann jedoch z. B. ausschließlich das sich ergebende Volumen von Bedeutung sein, sodass die Parameter zusammengefasst werden können.

Bei der Betrachtung von Werkstoffvarianten ist dieser Schritt der fertigungstechnischen Beschreibung meist nicht notwendig, da die Anzahl der Variantenparameter in den meisten Fällen ohnehin klein ist. Eine denkbare Ausnahme ist eine Baugruppe aus vielen Einzelteilen unterschiedlicher Materialien. Im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung für den Flugzeugtriebwerks-Bau ist diese Möglichkeit jedoch nicht relevant.

6.3.4 Beschreibung der Rotorveränderungen mittels Skalierungsgrößen

Auf der Basis der fertigungstechnischen Beschreibung ist jedem geometrischen Parameter mindestens eine Skalierungsgröße zuzuweisen, die dessen Einfluss wiedergibt. So entspricht z. B. ein Längenmaß in der Konstruktion einer Änderung entlang einer definierten Raumrichtung, d. h. einer eindimensionalen Skalierungsgröße. Über diese hinaus werden außerdem die beiden Flächen als Skalierungsgrößen zugewiesen, deren Schnittgerade in dieser Raumrichtung verläuft. Zuletzt ist dem Längenmaß auch das Volumen des Bauteils als dreidimensionale Skalierungsgröße zuzuweisen.

Dieses Zuweisungsschema soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Abbildung 52 zeigt schematisch eine Scheibe eines Rotors, in die eine Nut eingebracht werden soll, die durch die Variantenparameter Nutlänge (x), Nuttiefe (y) und Nutbreite (z) definiert ist.

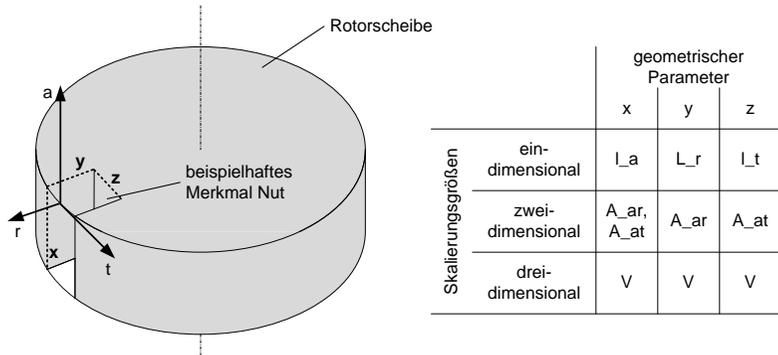


Abbildung 52: Beispielhafte Skalierungsgrößen der geometrischen Parameter einer Nut

Die Position der Nut sowie weitere Bemaßungen sind zur Erläuterung des Prinzips nicht relevant, weshalb auf diese Angaben verzichtet wird. Allen drei Parametern werden die entsprechenden eindimensionalen Skalierungsgrößen, die Flächen und das Volumen zugeordnet, da z. B. bei Variation der Nutbreite z die Ausdehnung der Nut in t -Richtung, die in der at -Ebene liegende Fläche des Nutgrunds und das Volumen der Nut verändert werden. Auf die Angabe der Veränderung der Flächen in der rt -Ebene wird verzichtet, da wie abgebildet eine Durchgangsnut hergestellt werden soll.

Allgemein kann die Aussage getroffen werden, dass stets die Veränderungen am Rotor bei Variation eines Parameters im Fokus stehen. Bei eindimensionalen geometrischen Parametern sind stets auch zwei- und dreidimensionale Skalierungsgrößen zu prüfen. Ein als Fläche definierter Variantenparameter kann lediglich die entsprechende Ebene und das Volumen, ein dreidimensionaler Variantenparameter nur das Volumen als Skalierungsgröße erhalten.

6.3.5 Beschreibung der Einflussgrößen der Fertigungsprozesse mittels Skalierungsgrößen

Der Zweck dieses Methodenbausteins ist die Abbildung von Abhängigkeiten der Fertigungskosten einzelner Prozesse von den Skalierungsgrößen. Dabei werden sowohl Material- als auch Platzkosten berücksichtigt.

Erstere sind, wie in Abschnitt 5.2 (S. 94 ff.) erläutert, vorrangig von der Einsatzmasse des Rohteils und damit von der dreidimensionalen Skalierungsgröße *Volumen* abhängig. Zu beachten ist dabei aufgrund der in Abbildung 42 (S. 96) dargestellten Problematik, dass die Rohteilkonturen verwendet und deren Abhängigkeiten von der Skalierungsgröße *Volumen* abgebildet werden.

Änderungen der Platzkosten ergeben sich bei Variation geometrischer Größen durch die in Abschnitt 5.3.2.2 (S. 99 ff.) erläuterten parametrischen Abhängigkeiten der Prozesszeiten vieler Fertigungsverfahren. Davon ausgenommen sind solche, deren Maschinen-, Personal- und Rüstzeiten unabhängig von der Variante konstant sind. Ein Beispiel hierfür sind Wärmebehandlungen, bei denen die Zeitdauer durch einen materialspezifischen Ofenzyklus bestimmt wird. Dies bedeutet, dass die Prozesszeit und damit die Platzkosten der Wärmebehandlung für geometrische Rotorvarianten unter der Annahme eines definierten Betriebsmittels konstant sind, nicht jedoch bei der Betrachtung von Werkstoffvarianten. Die Prozesszeiten anderer Fertigungsverfahren hingegen sind von ein-, zwei- oder dreidimensionalen Parametern abhängig. Dementsprechend werden diesen die jeweiligen Skalierungsgrößen zugewiesen. So stellt z. B. beim Längsdrehen gemäß Gleichung (18) (S. 100) bei den konstanten prozessspezifischen Parametern Drehzahl und Vorschub pro Umdrehung die Länge des Vorschubweges die Haupteinflussgröße dar. Damit würde diesem Prozess die eindimensionale Skalierungsgröße in Raumrichtung des Vorschubes zugewiesen werden.

Der Herstellung der Nut aus Abbildung 52 wird beispielhaft unter der Voraussetzung einer fräsenden Bearbeitung die dreidimensionale Skalierungsgröße Volu-

men zugewiesen, da die Maschinenzeit und damit die Platzkosten dieses Fertigungsverfahrens bei alleiniger Änderung der Bauteilgeometrie vorrangig vom zerspanenden Volumen (V) abhängig sind (vgl. Abbildung 53).

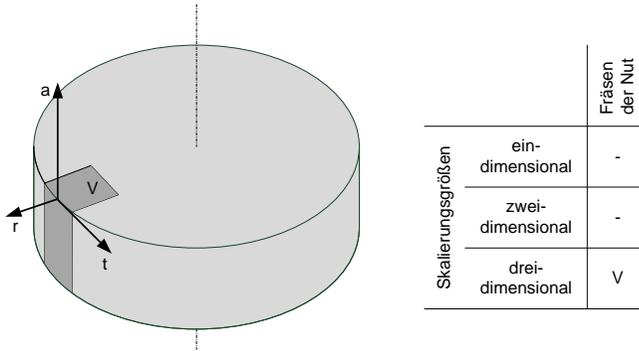


Abbildung 53: Beispielhafte Skalierungsgröße „ V “ für die Herstellung einer Nut mittels Fräsen

6.3.6 Abgleich anhand der Skalierungsgrößen

Nach der Zuweisung der Skalierungsgrößen auf Prozess- und Variantenseite wird zwischen jeder möglichen Kombination von Fertigungsverfahren und Variantenparameter abgeglichen, ob diese gemeinsame Skalierungsgrößen besitzen. Ist dies der Fall, so liegt eine Abhängigkeit der Fertigungskosten von geometrischen Parametern vor. Dadurch wird ebenso erkennbar, welche Kombinationen unabhängig voneinander sind und somit bei der Quantifizierung nicht berücksichtigt werden müssen. Diese Zuordnung wird durch die Darstellung in Matrixform visuell unterstützt und durchgeführt (Abbildung 54). Zusätzlich zum Beispiel der Nut ist die bereits erläuterte, von geometrischen Parametern unabhängige Wärmebehandlung zur Verdeutlichung der Systematik abgebildet.

6 Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten

					geometrischer Parameter		
					x	y	z
		1D			l_a	r_r	l_t
		2D			A_{ar}, A_{at}	A_{ar}	A_{at}
		3D			V	V	V
Fertigungsprozess	Nutfräsen	-	-	V	ja	ja	ja
	Wärmebehandlung	-	-	-	nein	nein	nein

Legende

ja = Prozess wird von Variantenparameter beeinflusst

nein = Prozess wird von Variantenparameter nicht beeinflusst

Abbildung 54: Matrix zum Abgleich der Skalierungsgrößen

Durch den Vergleich der Skalierungsgrößen wird eine Zuordnung vorgenommen, indem für jedes Feld der Matrix die Übereinstimmung der Skalierungsgrößen von geometrischem Parameter und Fertigungsprozess geprüft wird. Ist mindestens eine Übereinstimmung von ein-, zwei- oder dreidimensionalen Skalierungsgrößen vorhanden, wird das Feld entsprechend gekennzeichnet, z. B. mit „ja“. Ist keinerlei Übereinstimmung vorhanden, so wird das Feld mit „nein“ markiert. Auf diese Weise wird visualisiert, dass beispielsweise ein geometrischer Parameter, dem die Skalierungsgröße l_a zugewiesen wurde, keinesfalls die Platzkosten eines Prozesses, der von einer Länge in l_r -Richtung abhängig ist, beeinflussen kann. Nicht relevante Paarungen müssen demnach nicht weiter betrachtet werden, die anderen hingegen sind im Folgeschritt zu quantifizieren. Vorteilhaft an diesem Prinzip ist zudem, dass aufgrund seiner Einfachheit die Vergleiche in der Umsetzung der Methodik aufwandsarm computergestützt durchgeführt werden können.

6.3.7 Quantifizierung durch Kostenwachstumsgesetze

Im letzten Schritt der Vorgehensweise werden die identifizierten Abhängigkeiten detailliert, indem der Zusammenhang quantifiziert abgebildet wird. Hierfür werden die Kurzkalkulation mit Kostenwachstumsgesetzen und die Relativkosten-

6.3 Variantenbetrachtung mittels Skalierungsgrößen

methode angewendet. Kostenwachstumsgesetze beschreiben den monetären Zusammenhang zwischen ähnlichen Produkten, d. h. Varianten wie in Abschnitt 2.5 (S. 49 ff.) beschrieben. Hierbei ist zum einen die Unterscheidung zwischen geometrischer Ähnlichkeit und Halbähnlichkeit sowie zum anderen zwischen der Anwendung summarischer und differenzierter Kostenwachstumsgesetze zu treffen (Abbildung 51) (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Ähnliche Produkte zeichnen sich dadurch aus, dass sich alle Parameter proportional und voneinander abhängig ändern, bei Halbähnlichkeit sind sie unabhängig voneinander. Zwei Würfel unterschiedlicher Größe sind beispielsweise ähnlich, da bei Variation einer Kantenlänge die anderen ebenfalls gleichermaßen verändert werden. Hingegen sind Quader halbähnlich, da die Breite unabhängig von der Höhe und der Tiefe variiert werden kann. Bei differenzierter Betrachtung erfolgt die Abbildung der Wachstumsgesetze für einzelne Merkmale oder Fertigungsprozesse, bei summarischer bildet der Funktionsträger eine Einheit, die insgesamt abgebildet wird.

		Kostenwachstumsgesetze	
		summarisch	differenziert
Produkt-varianten	geometrisch ähnlich	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung • gleiche Kostenwachstumsgesetze 	<ul style="list-style-type: none"> • indirekte Abbildung • gleiche Kostenwachstumsgesetze
	geometrisch halbähnlich	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung • unterschiedliche Kostenwachstumsgesetze 	<ul style="list-style-type: none"> • indirekte Abbildung • unterschiedliche Kostenwachstumsgesetze

Legende

= für die Methode relevante Art der Kurzkalkulation mit Kostenwachstumsgesetzen

= für die Methode nicht relevante Art der Kurzkalkulation mit Kostenwachstumsgesetzen

Abbildung 55: Einteilung der Möglichkeiten zur Kurzkalkulation mit Kostenwachstumsgesetzen in Anlehnung an EHRENSPIEL ET AL. (2007)

Die im Rahmen der Methodik angestrebte ganzheitliche Betrachtung von Prozessketten für den Flugzeugtriebwerks-Bau erfordert die Berücksichtigung geometrischer Halbähnlichkeiten, d. h. die die Rotoren beschreibenden Parameter besitzen nicht alle dasselbe, sondern jeweils ein individuelles Kostenwachstumsgesetz. Die indirekte Abbildung der Zusammenhänge zwischen geometrischen Parametern und den Kosten wird gewählt, da hierdurch Veränderungen der Kostenstruktur erkennbar werden und deren Ursachen transparent nachvollzogen werden können. Zudem ist für eine direkte Abbildung eine umfangreiche Datenbasis unterschiedlicher Rotoren notwendig, aus der durch Vergleiche Kosten-

6 Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten

wachstumsgesetze gebildet werden können. Diese ist im Rahmen der entwicklungsbegleitenden Prozesskettenbetrachtung nicht immer gegeben.

Gemäß dieser Einordnung wird für jede durch den vorangegangenen Vergleich identifizierte Abhängigkeit ein Kostenwachstumsgesetz abgeleitet. Dabei stehen die Prozesszeiten im Fokus, wobei auch hier eine entwicklungsbegleitende, iterative Detaillierung notwendig ist, d. h. zu Beginn wird ein grobes Wachstumsgesetz für die Prozesskosten aufgestellt, mit fortschreitender Entwicklung kann z. B. die Separation in Maschinen-, Personal- und Rüstkosten erfolgen. Exemplarisch wird im Folgenden die Ermittlung des Kostenwachstumsgesetzes für das Beispiel des Längsdrehens aus Abschnitt 5.3.2.2 (S. 99 ff.) erläutert. Gemäß Gleichung (18) (S. 100) sind die Maschinenzeit (t_{LD}) und damit die Maschinenkosten beim Längsdrehen abhängig von der Länge des Vorschubweges (L), der Drehzahl (n_D) und dem Vorschub pro Umdrehung (f_U) (EVERSHEIM & SPUR 1996). Die Änderung der Kosten (φ_{LD}) wird somit gemäß Gleichung (19) durch die Änderungen der Länge des Vorschubweges (φ_L), der Drehzahl (φ_{nD}) und des Vorschubes pro Umdrehung (φ_{fU}) bestimmt:

$$\varphi_{LD} = \frac{\varphi_L}{\varphi_{nD} \cdot \varphi_{fU}} \quad (19)$$

Unter der Annahme einer konstanten Drehzahl und eines konstanten Vorschubes ergibt sich das in Gleichung (20) abgebildete Kostenwachstumsgesetz, das die Änderung der Kosten des Längsdrehens in Abhängigkeit der Änderung des Vorschubweges wiedergibt:

$$\varphi_{LD} = \varphi_L \quad (20)$$

Dies bedeutet, dass z. B. eine Verdopplung des Vorschubweges eine Verdopplung der Maschinenkosten verursacht. Die Beschreibung des Kostenwachstums erfolgt allgemein über den Exponenten des Zusammenhangs. In Gleichung (20) ist dieser 1, was einem linearen Kostenwachstum entspricht. Abbildung 56 zeigt weitere exemplarische Verläufe von Kostenwachstumsgesetzen mit verschiedenen Exponenten.

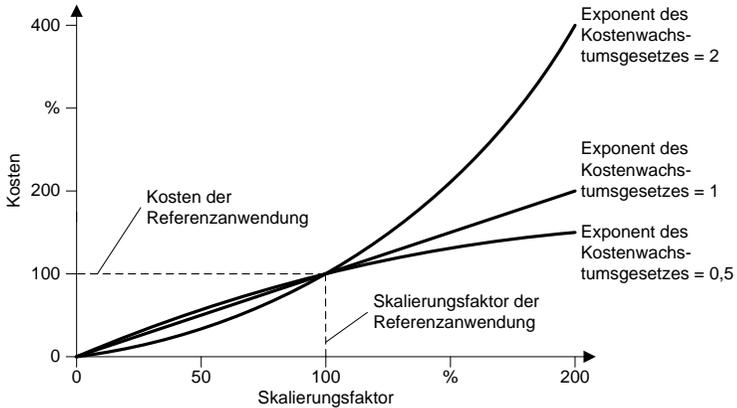


Abbildung 56: Exemplarische Verläufe von Kostenwachstumsgesetzen nach EHRENSPIEL ET AL. (2007)

Das Kostenwachstum kann stets mit absoluten Beträgen oder wie in Abbildung 56 relativ mit Bezug auf eine Referenz angegeben werden. Ein Vorteil dieser Relativkosten gegenüber anderen Berechnungsverfahren ist vor allem bei Weitergabe der Informationen die Wahrung des Datenschutzes bei gleichem Informationsgehalt (EHRENSPIEL ET AL. 2007). Ferner ist die Unabhängigkeit der Relativwerte von Veränderungen der Einflussgrößen vorteilhaft. So bleibt ein relativ angegebenes Kostenwachstumsgesetz für Rohteilkosten trotz ständig schwankender Materialpreise gleich. Absolute Beträge hingegen unterliegen in diesem Beispiel ständigen Veränderungen, was in Abbildung 56 einer Verschiebung der Kurven auf der Ordinate entspricht.

Nach dem in Abschnitt 6.3.7 aufgezeigten Schema werden alle Abhängigkeiten zwischen geometrischen Parametern und den Zielgrößen quantifiziert und in der Matrix anhand des Exponenten des Kostenwachstumsgesetzes (vgl. Abbildung 54) dokumentiert. Abschließend werden die Kostenwachstumsgesetze der Prozesse und Rohteile zu einem Gesamtkostenwachstumsgesetz aggregiert, das die Abhängigkeit der Fertigungskosten von einem geometrischen Parameter festlegt. Eventuell vorhandene Wechselwirkungen zwischen einzelnen geometrischen Parametern sind durch ein geeignetes Konstruktionsmodell zu berücksichtigen, das jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit steht. Dies bedeutet, dass auf Konstruktionsseite zu berücksichtigen ist, dass z. B. die axiale Länge des Schaufelfußes der axialen Länge der Scheibe entsprechen muss.

6.4 Zusammenfassung

Die Methode zur Betrachtung von Bauteilvarianten dient der Extrapolation der Ergebnisse der wirtschaftlichen und qualitätsrelevanten Inhalte über eine Referenzanwendung hinaus auf mindestens halbähnliche Rotoren. Der Zweck besteht somit darin, die Eignung einer Prozesskette für die Produktion unterschiedlicher Rotoren zu überprüfen, sodass einerseits z. B. neue Fertigungsverfahren wirtschaftlich angewendet werden können, indem die Auslastung neuer Anlagen durch die Herstellung mehrerer Rotorvarianten gewährleistet wird. Andererseits können für neue Prozessketten geeignete Anwendungen identifiziert werden, indem beispielsweise eine Rotorgröße gewählt wird, bei der der wirtschaftliche Vorteil dieser Fertigungsalternative maximal ist. Die aufgezeigte Methode zur Betrachtung von Rotorvarianten mit der Darstellung der Ergebnisse in Form von Kostenwachstumsgesetzen hilft dabei, dieses Maximum zu finden.

Insgesamt können mit der in diesem Kapitel erläuterten Vorgehensweise vier Arten der Variantenbetrachtung durchgeführt werden. Zielgrößen sind dabei mit dem Fehlerpotenzial und den Fertigungskosten die quantitativen Kenngrößen der alternativen Prozessketten. Die Eingangsgrößen sind die Variantenparameter, die ähnliche Rotoren beschreiben, die sich hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe oder der geometrischen Maße unterscheiden. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge werden insbesondere bei der monetären Betrachtung geometrischer Varianten standardisierte Skalierungsgrößen als Zwischenelemente verwendet. So lassen sich Abhängigkeiten aufwandsarm identifizieren und anschließend durch die Methode der Kurzkalkulation mit Kostenwachstumsgesetzen quantifizieren.

Mit der Erläuterung der einzelnen Methoden in diesem und den beiden vorangehenden Kapiteln wurden alle notwendigen Sachverhalte zu der Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für Rotoren von Flugzeugtriebwerken beschrieben. Im folgenden Kapitel wird deren Anwendung mit dem Ziel der Veranschaulichung eines ganzheitlichen Vergleichs von Fertigungsalternativen anhand eines Anwendungsbeispiels beschrieben.

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk

7.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird ein umfangreiches Anwendungsbeispiel der Methodik zur Prozesskettenbetrachtung von Rotoren im Flugzeugtriebwerks-Bau beschrieben. Sie konnte im Rahmen der entwicklungsbegleitenden Tätigkeit zum einen validiert werden und zum anderen wurden entsprechende Problemstellungen aufgegriffen, um das erforderliche Gesamtkonzept zu realisieren und einzelne Aspekte zu ergänzen bzw. zu detaillieren. In Abschnitt 7.2 wird zunächst die Turbinenblisk als Referenzprodukt vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 7.3 die alternativen Prozessketten aufgezeigt, bevor in den Abschnitten 7.4 bis 7.6 die Anwendung der einzelnen Methoden und die jeweiligen Resultate der durchgeführten Prozesskettenbetrachtung erläutert werden. Abschnitt 7.7 fasst abschließend die für dieses Anwendungsbeispiel erzielten Ergebnisse zusammen.

Aus Gründen des Datenschutzes und der Geheimhaltung sind die in Kapitel 7 enthaltenen Informationen anonymisiert, sodass keine Rückschlüsse auf tatsächliche Absolutwerte, z. B. der Fertigungskosten einer gefügten Turbinenblisk, möglich sind. Die Anpassung der Datenbasis erfolgte jedoch derart, dass die Aussagekraft der Methodik uneingeschränkt gültig ist.

7.2 Betrachtungsgegenstand *Turbinenblisk*

Eine *Turbinenblisk* ist ein Rotor in Bliskbauweise für den Einsatz in der Turbine, d. h. dem Teil des Triebwerks hinter der Brennkammer. Eine Blisk (Blade integrated disk) stellt dabei ein neuartiges Rotorkonzept im Flugzeugtriebwerks-Bau dar. Im Vergleich zu konventionellen Rotoren sind Schaufeln und Scheibe nicht formschlüssig verbunden, sondern bilden, wie Abbildung 57 zeigt, eine integrale Einheit. Vorteilhaft an dieser Bauweise ist insbesondere die geringere Masse des Rotors, die sich aufgrund des Wegfalls einzelner Schaufelfüße ergibt (BRÄUNLING 2009). Darüber hinaus werden auch die Effizienz des Triebwerks und dessen Zuverlässigkeit erhöht (QI ET AL. 2011).

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk

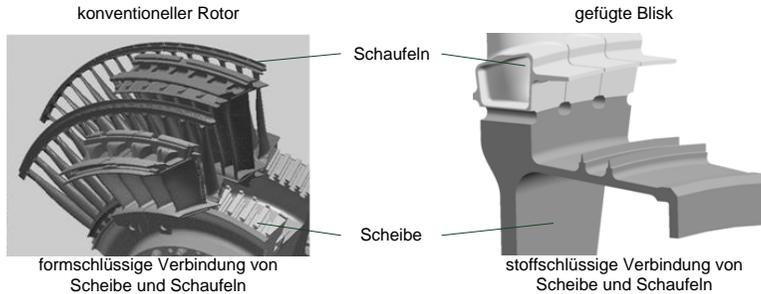


Abbildung 57: Vergleich der Schaufel-Scheibe-Verbindung eines konventionellen Rotors (links, MTU 2012B) mit einer gefügten Turbinenblisk (rechts, MTU 2007)

Eine Blisk kann zum einen im Gesamten aus einem Rohteil hergestellt werden, d. h. durch Entfernung der Zwischenräume der Schaufeln z. B. mittels Fräsen oder elektrochemischer Bearbeitung. Zum anderen besteht insbesondere bei Rotoren mit längeren Schaufeln die Möglichkeit, zur Senkung der Fertigungskosten die Einzelteile separat herzustellen und anschließend mittels Schweißen auf die Scheibe zu fügen (ADAM 1998). Für den Einsatz einer Blisk im Turbinenbereich sind aufgrund technischer Anforderungen im Gegensatz zu einer Verdichterblick unterschiedliche Werkstoffe für Scheibe und Schaufeln erforderlich, sodass die Herstellung aus einem Rohteil nicht möglich ist. Die Verbindung der Bauteile mittels Schweißen stellt mit der notwendigen Werkstoffkombination und der Schaufelgeometrie im Turbinenbereich eine besonders schwierige Fertigungsaufgabe dar. Deshalb wurden im Rahmen der Produktentwicklung einer gefügten Turbinenblisk anhand eines Rotors eines existierenden Flugzeugtriebwerkes mehrere Design- und Fügekonzepte erarbeitet. Der Vergleich der fertigungstechnischen Alternativen der Turbinenblisk mit einem konventionellen Rotor aus produktionstechnischer Sicht wurde entwicklungsbegleitend unter Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik durchgeführt. Im Folgenden werden die berücksichtigten Prozessketten zweier Turbinenbliskkonzepte und die des konventionellen Rotors als Referenz erläutert.

7.3 Alternative Prozessketten

Die nachfolgenden Abbildungen stellen schematisch die drei relevanten Prozessketten dar. Deren Kenntnis ist zum Verständnis der Ergebnisse der Prozesskettenbetrachtung notwendig. Der Begriff „Bearbeitung“ steht jeweils stellvertretend für eine Abfolge von Prozessen bzw. Prozessmodulen. Detaillierte, aber anonymisierte Prozessketten können dem Anhang (Abschnitte 10.1, 10.2 und 10.3) entnommen werden.

Abbildung 58 zeigt die schematische Prozesskette eines konventionellen Rotors. Die Bearbeitungen der Einzelteile beinhalten vornehmlich das Profilschleifen der sogenannten Tannenbaumfußprofile der Schaufeln sowie das Räumen der Nuten als Gegenprofile in der Scheibe. Nach der Fertigstellung der Einzelteile werden Schaufeln und Scheibe zusammengesetzt. Eine weitere Bearbeitung des Rotors findet nicht statt.

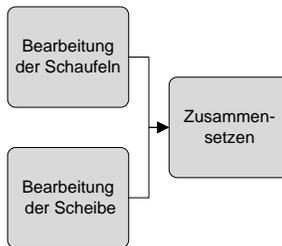


Abbildung 58: Schematische Prozesskette des konventionellen Rotors

Die in Abbildung 59 aufgezeigte Prozesskette der direkt gefügten Turbinenblik unterscheidet sich in der Struktur kaum von der des konventionellen Rotors. *Direkt gefügt* bedeutet, dass die Schaufeln ohne ein Zwischenstück auf die Scheibe gefügt werden. Das Rohteil der Scheibe für eine Turbinenblik unterscheidet sich dabei dadurch von dem für einen konventionellen Rotor, dass es konzeptbedingt dünner ausgeführt werden kann und damit weniger Einsatzmasse erforderlich ist. Zusätzlich entfallen bei den Schaufeln die Schaufelfüße. Zunächst werden die Einzelteile auf das Fügen vorbereitet, indem die notwendigen Flächen durch mechanische Bearbeitung hergestellt werden. Anschließend werden die Schaufeln seriell, d. h. jede einzeln, radial auf die Scheibe geschweißt. Im Gegensatz zum konventionellen Rotor ist eine Bearbeitung der Turbinenblik, unter anderem wegen sekundärer Folgeprozesse im Prozessmodul *Schweißen*, zwingend notwendig.

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk

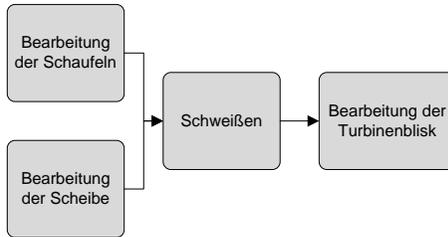


Abbildung 59: Schematische Prozesskette der direkt gefügten Turbinenblisk

Das direkte Fügen mittels Pressschweißen stellt zum einen aufgrund der geometrischen Rahmenbedingungen und zum anderen durch die Werkstoffkombination eine schwierige Fertigungsaufgabe dar. Darüber hinaus führen weitreichende Auswirkungen schweißtechnischer Fehler u. a. zu hohen Nacharbeitskosten und/oder einem hohen Fehlerpotenzial.

Um diesen beiden Problemen in zwei getrennten Prozessen begegnen zu können und so das technische Risiko zu mindern, wird bei der indirekt gefügten Turbinenblisk ein Zwischenstück aus dem gleichen Material wie das der Scheibe zwischen Schaufel und Scheibe eingebracht. Dazu erfolgt zunächst die Vorbereitung der Fügeflächen von Zwischenstück und Schaufel. Anschließend werden in einem ersten Schritt die beiden Bauteile paarweise mittels Pressschweißen verbunden. Dadurch ist eine gute Zugänglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung der kritischen Fügeverbindung gegeben. Erst im zweiten Schritt werden alle Schaufeln mit angefügtem Zwischenstück parallel mit der vorbereiteten Scheibe in einem Prozess verschweißt (vgl. Abbildung 60). Abschließend werden an der Blisk die notwendigen Endbearbeitungen durchgeführt.

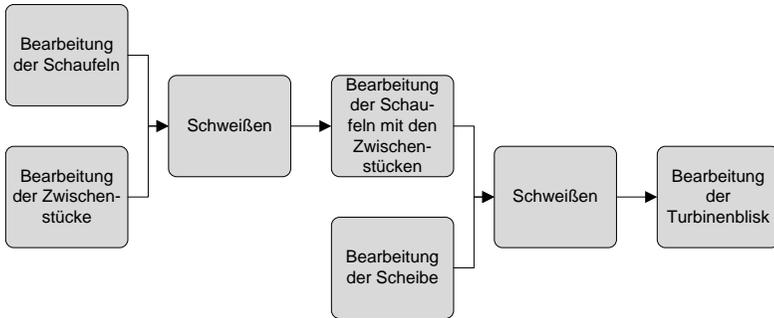


Abbildung 60: Schematische Prozesskette der indirekt gefügten Turbinenblisk

Die drei vorgestellten Prozessketten wurden für eine ausgewählte Referenzanwendung in einem Triebwerk für die zivile Luftfahrt unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und qualitätsrelevanter Aspekte verglichen und anschließend wurden die Ergebnisse im Rahmen der Variantenbetrachtung extrapoliert.

7.4 Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte

7.4.1 Toleranzmanagement

Gemäß der in Abbildung 34 (S. 78) dargestellten Vorgehensweise zur Betrachtung des Toleranzmanagements wurde zunächst die Stellung des Schaufelblattes im Strömungskanal als Zieltoleranz definiert. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass die maximal zulässigen Abweichungen denen des konventionellen Rotors entsprechen.

Die Toleranzsysteme von Turbinenblisk und konventionellem Rotor unterscheiden sich dadurch, dass beim Zusammensetzen des konventionellen Rotors Spiel zwischen Schaufel und Scheibe verbleibt und somit eine Selbstausrichtung der Schaufel im späteren Betrieb im Gegensatz zur verschweißten Schaufel der Turbinenblisk möglich ist. Deshalb sind bei der Turbinenblisk zum einen die beim Schweißen auftretenden Prozessabweichungen, zum anderen die Maß- und Formabweichungen der jeweiligen Fügeflächen entscheidend. Während der Fügeprozess an sich und die Bearbeitung der Scheibe hinsichtlich des Toleranzmanagements kaum Möglichkeiten der Anpassung der geforderten Toleranzen und der erreichbaren Abweichungen auf Prozessebene bieten, bildet die Schaufel mit

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblik

dem Schaufelfuß ein komplexes Toleranzsystem, weshalb insbesondere dieses im Fokus der Betrachtung stand. Aufgrund der geringen Informationsdichte hinsichtlich der neuartigen Fügeprozesse und der Konstruktionsdaten der Varianten wurde nach der entwickelten Methode die Vorgehensweise für die frühen Phasen der Produktentwicklung gewählt und das Maßsystem der Herstellung von Schaufeln für konventionelle Rotoren adaptiert.

Bei der Turbinenblik insgesamt wird die Gesamtabweichung durch mehrere Bearbeitungsschritte und bei der indirekt gefügten Turbinenblik zusätzlich durch einen Schweißvorgang beeinflusst. Mit den vorhandenen Toleranzen als Referenz wurde auf Prozessebene die Herstellung der einzelnen Funktionsflächen verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass ein hoher Anteil des Maßsystems adaptiert werden kann. Allerdings musste für die Turbinenblik aufgrund des Entfalls des bisherigen Bezugssystems am Schaufelfuß ein neues definiert werden. Dieses wurde derart festgelegt, dass die hierfür benötigten Merkmale durch die bereits ohnehin enthaltenen Prozesse ausgehend vom Rohteil gefertigt werden. Anschließend kann die Schaufel der Turbinenblik in Anlehnung an den konventionellen Rotor hergestellt werden, sodass das unternehmensintern bestehende Erfahrungswissen in der Bearbeitung von Schaufeln für konventionelle Rotoren sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht genutzt werden kann. Dabei bestehen für das Toleranzmanagement keine Unterschiede zwischen direkt und indirekt gefügter Turbinenblik. Für die letztere Variante ist die Betrachtung der Schaufel vor und nach dem Fügen des Zwischenstücks separat möglich, da zwei ähnliche Bezugssysteme jeweils mit dem Rohteil der Schaufel als Basis verwendet werden können. Dies bedeutet, dass die Prozesse vor dem Fügen des Zwischenadapters keinen Einfluss auf die Gesamtabweichungen der Schaufelmerkmale besitzen.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die vorhandenen Prozesse und Prozessmodule der mechanischen Bearbeitung zur Herstellung des Bezugssystems geeignet sind und somit keine zusätzlichen Prozesse zur Einhaltung der geforderten Toleranzen notwendig sind. Im Gegenzug konnten jedoch ebenso keine signifikanten Potenziale zur Kostenreduzierung identifiziert werden. Die Ergebnisse des Toleranzmanagements für die direkte und die indirekte Turbinenblik sind dabei gleich, auch wenn die Prozessketten differieren. Der Grund hierfür ist, dass ausschließlich die jeweils letzten Fertigungsschritte relevant sind, in denen sich die Prozessketten nicht signifikant unterscheiden.

7.4.2 Fehlerpotenziale

Zur Ermittlung der Fehlerpotenziale wurden aus den beiden alternativen Prozessketten der Turbinenblisk gemäß dem Schema aus Abbildung 39 (S. 86) die Fügeprozesse als kritische Prozesse identifiziert und detailliert betrachtet. Deren Neuheitsgrad ergab sich daraus, dass der Anwendungsfall *Turbinenblisk* beim Fügen bislang unbekannt war, wohingegen alle anderen Prozesse zumindest in ähnlicher Weise bereits eingesetzt wurden. Aufgrund des vorhandenen Erfahrungswissens hinsichtlich der Fertigung konventioneller Rotoren durch die langjährige Serienproduktion wurde auf eine Detaillierung einzelner Elemente dieser Prozesskette verzichtet. Dennoch wurde gemäß der Methodik allen Prozessen, insofern sie keinen organisatorischen Hintergrund, wie z. B. das Anmelden eines Fertigungsauftrages, besitzen, das Fehlerpotenzial 1 zugewiesen.

Somit ist das Fehlerpotenzial von der Anzahl der Prozesse abhängig. Dadurch ließ sich die Unterscheidung treffen, welche Werte auf die Prozesskettenlänge zurückzuführen sind, wenn jeder Prozess mindestens den Wert 1 als Fehlerpotenzial besitzt, und welche zusätzlichen Risiken durch den Neuheitsgrad der Fertigungsverfahren oder deren Anwendung verursacht werden. Damit ergaben sich die in Abbildung 61 dargestellten Ergebnisse.

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk

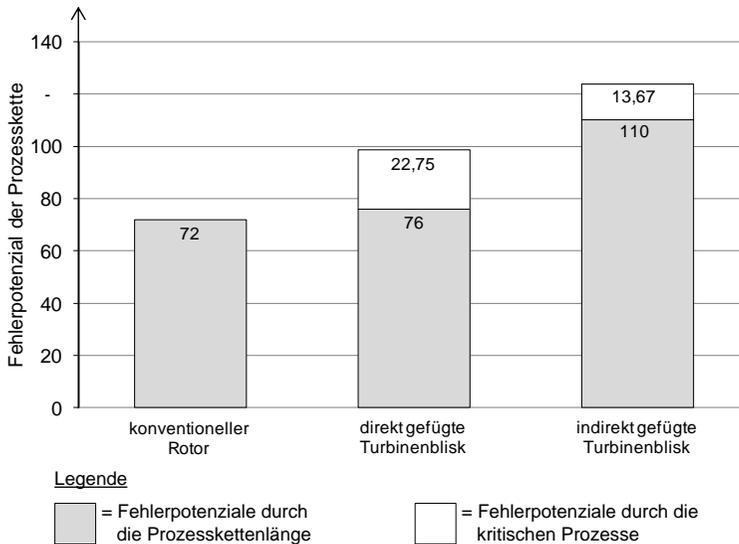


Abbildung 61: Vergleich der Fehlerpotenziale der Prozessketten von konventionellem Rotor, direkt gefügter Turbinenblisk und indirekt gefügter Turbinenblisk

Insgesamt weisen beide alternativen Prozessketten der Turbinenblisk aufgrund des Neuheitsgrades des Rotorkonzeptes an sich und des damit fehlenden Erfahrungswissens höhere Fehlerpotenziale auf als die des konventionellen Rotors. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der beiden alternativen Prozessketten zur Herstellung einer gefügten Turbinenblisk, dass die indirekte insgesamt ein höheres Fehlerpotenzial besitzt als die direkte. Dies kann durch die Kombination der beiden Anteile *Prozesskettenlänge* und risikobehaftete *Einzelprozesse* erklärt werden.

Entsprechend dem Grundgedanken der indirekten Turbinenblisk, der darin liegt, die beiden schweißtechnischen Problemstellungen der Werkstoffkombination und der geometrischen Rahmenbedingungen zu trennen und so das technische Risiko zu vermindern, ist das Fehlerpotenzial, das sich jeweils aus den detailliert betrachteten, kritischen Fügeprozessen ergibt, bei der indirekten Turbinenblisk geringer. Bei der direkten führten insbesondere die weitreichenden Konsequenzen eventueller Fertigungsfehler in Form aufwändiger Nacharbeit an der Turbinenblisk zu großen Werten bei den Fehlerauswirkungen und damit zu hohen

Fehlerpotenzialen. So ist das Fehlerpotenzial der Fügeprozesse bei der indirekten Turbinenblik trotz des Einsatzes der Zwischenstücke und der damit verbundenen zweiten Schweißoperation niedriger als bei der direkten Turbinenblik. Allerdings sind damit zusätzliche Fertigungsschritte notwendig. Während das durch die Prozesskettenlänge verursachte Fehlerpotenzial der direkten Turbinenblik lediglich vier Punkte über dem des konventionellen Rotors liegt, hebt dieser Anteil das Fehlerpotenzial der indirekten Turbinenblik über das der direkten.

Somit konnte nach der Anwendung der Methode zur Fehlerpotenzialbetrachtung die Aussage getroffen werden, dass die Turbinenblik aufgrund des Neuheitsgrades ein erhöhtes Fehlerpotenzial gegenüber dem konventionellen Rotor aufweist. Die Aufteilung der fügetechnischen Problemstellungen bietet in dieser Hinsicht durch die damit einhergehende Verlängerung der Prozesskette keinen Vorteil.

7.5 Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte

Die Eingangsdaten für die wirtschaftliche Betrachtung nach dem Schema der Material- und der Platzkosten in Abbildung 40 (S. 94) wurden, soweit möglich, durch den Vergleich mit bekannten Prozessen ermittelt. Insbesondere für die neuartigen Prozesse wie das Fügen von Schaufeln und Scheibe mussten jedoch in Abstimmung mit Technologieexperten Schätzungen vorgenommen werden. Um den Aufwand bei der anfangs hohen Zahl fertigungstechnischer Alternativen gering zu halten und somit die kontinuierliche Anpassung und Detaillierung der Prozessketten zu ermöglichen, wurden zunächst unscharfe Daten in Form der jeweils minimalen und maximalen Fertigungskosten verwendet. Unterschiede ergaben sich hauptsächlich durch die Schätzungen der Prozesszeiten sowie die Berücksichtigung möglicher Reduzierungen der Maschinenstundensätze durch die Erhöhung der Auslastung bestehender Anlagen bei der Serienproduktion einer Turbinenblik. Die wirtschaftliche Bewertung wurde iterativ in Verbindung mit der stetigen Detaillierung der Prozessketten im Projektverlauf durchgeführt, bis die erläuterten Prozessketten der direkt und indirekt gefügten Turbinenblik als Alternativen definiert werden konnten. In Abbildung 62 sind deren Fertigungskosten im Vergleich zu denen des konventionellen Rotors dargestellt.

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk

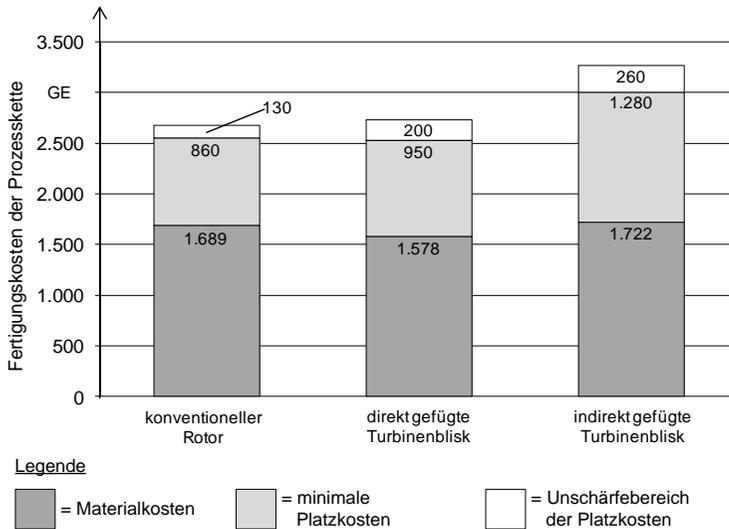


Abbildung 62: Vergleich der Fertigungskosten von konventionellem Rotor, direkt gefügter Turbinenblisk und indirekt gefügter Turbinenblisk

Wie ersichtlich ist, betragen die minimalen Fertigungskosten der direkten Turbinenblisk bei Gesamtkosten von rund 2.700 GE lediglich 21 Geldeinheiten mehr als die des konventionellen Rotors, die der indirekten hingegen sind 453 Geldeinheiten höher. Dieses Resultat ist auf verschiedene Einflüsse bzw. Unterschiede zurückzuführen, die nachfolgend für die beiden Bestandteile *Material-* und *Platzkosten* aufgezeigt werden.

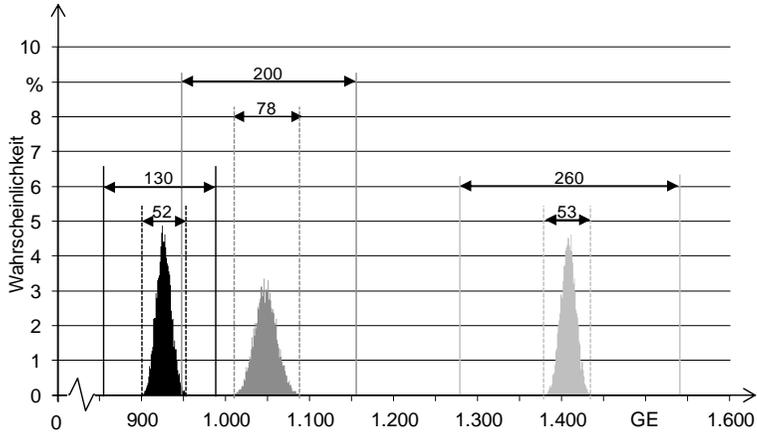
Die Wertschöpfung beim Urformen für die beiden Rohteile Schaufeln und Scheibe wurde jeweils für alle drei Prozessketten als identisch angenommen. Die Kosten des Materialeinsatzes hingegen sind sowohl bei der direkten als auch bei der indirekten Turbinenblisk aufgrund der geringeren Scheibendicke und des Entfalls der Schaufelfüße geringer als beim konventionellen Rotor. Allerdings liegen die Materialkosten der indirekten Turbinenblisk durch die zusätzlich benötigten Zwischenstücke über denen des konventionellen Rotors.

Die Platzkosten des konventionellen Rotors werden hauptsächlich durch das kostenintensive Profilschleifen der Schaufelfüße verursacht. Die Bearbeitung der Bliskschaufeln mit einfacher Geometrie ist kostengünstiger, allerdings sind die

Platzkosten der Schweißprozesse wesentlich höher als die des Zusammensetzens beim konventionellen Rotor. Dies ist auf die höheren Maschinenstundensätze der notwendigen Anlagen zurückzuführen. Darüber hinaus verursacht die Verwendung der Zwischenstücke bei der indirekten Turbinenblisk erheblichen Zusatzaufwand. Somit sind deren minimale Platzkosten 420 Geldeinheiten höher als die des konventionellen Rotors, wohingegen die der direkten Turbinenblisk 90 Geldeinheiten höher sind.

Um über diese Erkenntnisse hinaus die Planungssicherheit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer gefügten Turbinenblisk zu erhöhen, wurde die statische Betrachtung der minimalen und maximalen Fertigungskosten in ein Modell zur Kostensimulation überführt. Letztere stellt die Erweiterung einer Materialflusssimulation dar, bei der „in Ergänzung zu den sonst üblichen Leistungsdaten, wie Durchlaufzeiten, Bestände, Terminabweichungen und Kapazitätsauslastungen, zusätzlich Auswertungen unter kosten- und betriebswirtschaftlichen Aspekten durchgeführt werden“ (VDI 3633-7 2001). Alle Prozessketten wurden in einem Simulationsmodell abgebildet, das die Berücksichtigung unscharfer Werte mittels frei definierbarer Wahrscheinlichkeitsverteilungen z. B. für die einzelnen Prozesszeiten ermöglicht. Da die Kostensimulation im Rahmen der Prozesskettenbetrachtung lediglich als Hilfsmittel zur Berücksichtigung unscharfer Daten diente, wird zur Vertiefung der Thematik der Kostensimulation auf die weiterführende Literatur verwiesen (vgl. z. B. BANGSOW 2008; FELDMANN ET AL. 2003; NEUHÄUSER 2008; VDI 3633-7 2001; WUNDERLICH 2002). Bei der Implementierung der Prozessketten wurden sowohl Rüst- als auch Maschinen- und Personalzeiten durch Gleichverteilungen abgebildet, deren Grenzwerte den Werten der minimalen und der maximalen Fertigungskosten entsprechen. Abbildung 63 stellt vergleichend die Ergebnisse der statischen Betrachtung und der Simulation der Platzkosten einander gegenüber. Letzteren liegen die Platzkosten von jeweils 10.000 simulierten Turbinenblisks zugrunde.

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk



Legende

■ = konventioneller Rotor

■ = direkt gefügte Turbinenblisk

■ = indirekt gefügte Turbinenblisk

— = Ergebnis der statischen Betrachtung: Intervall minimaler und maximaler Platzkosten

--- = Ergebnis der Kostensimulation: Vertrauensbereich 99,7 %

Abbildung 63: Vergleich der Ergebnisse der statischen Betrachtung und der Simulation der Platzkosten

Sowohl beim konventionellen Rotor als auch bei den alternativen Prozessketten der Turbinenblisk konnte eine deutliche Erhöhung der Planungssicherheit durch die Kostensimulation erreicht werden. Als Vergleichsgröße wurde für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen jeweils ein Vertrauensbereich von 99,7 % ermittelt, d. h. das Intervall, in dem die Platzkosten mit dieser Wahrscheinlichkeit liegen. Dies entspricht einem Bereich von sechs Standardabweichungen um das arithmetische Mittel. Insgesamt konnten die Platzkosten durch die Abbildung der Informationen als Wahrscheinlichkeitsverteilung in einem Modell zur Kostensimulation genauer bestimmt werden als im Rahmen der statischen Betrachtung. Des Weiteren wurde durch die Verkleinerung der möglichen Werte deutlich, dass für eine gefügte Turbinenblisk mit großer Wahrscheinlichkeit höhere Platzkosten zu erwarten sind als für einen vergleichbaren konventionellen Rotor. Bei der indirekten Turbinenblisk zeigt sich zudem wiederum der monetäre Zusatzaufwand durch die Verwendung der Zwischenstücke.

Nach der Anwendung der Methode zur Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte und der dadurch erkannten Nachteile der indirekten Turbinenblik hinsichtlich der Fertigungskosten wurden die für die Referenzanwendung ermittelten Ergebnisse für geometrische Rotorvarianten extrapoliert, um Triebwerksanwendungen zu identifizieren, bei denen die Vorteile der gefügten Turbinenblik in größerem Maße zum Tragen kommen.

7.6 Betrachtung von Rotorvarianten

Die Betrachtung von Varianten der Turbinenblik fokussierte sich auf die Beurteilung der monetären Auswirkungen geometrischer Veränderungen. Ziel war die Untersuchung der Eignung einer Turbinenblik für andere Flugzeugtriebwerke als die der Referenzanwendung. Für die Definition einer gefügten Turbinenblik und ihrer geometrischen Varianten war eine Vielzahl von Größen festzulegen, die entsprechend der Vorgehensweise in Abbildung 50 (S. 110) zunächst zu zehn fertigungstechnisch relevanten, geometrischen Parametern verdichtet wurden, sodass die Zuweisung der Skalierungsgrößen zu den Variantenparametern und den insgesamt 156 Fertigungsprozessen erfolgen konnte. Mit dem anschließenden Vergleich konnte die Anzahl der Abhängigkeiten, die durch Kostenwachs-tumsgesetze zu quantifizieren waren, je nach geometrischem Parameter auf höchstens 30 eingeschränkt werden. Beispielhaft ist in Abbildung 64 das Ergebnis für die Variation des geometrischen Parameters *Scheibendurchmesser* aufgezeigt. Der betrachtete Bereich wird dabei durch die Eignung des angestrebten Rotorkonzeptes nach links und rechts begrenzt. Für die Darstellung der Werte wurde jeweils das arithmetische Mittel der im Vorfeld errechneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Fertigungskosten bestimmt. Die Ergebnisse für die anderen betrachteten Variantenparameter sind dem Abschnitt 10.7 (S. 173 ff.) im Anhang dieser Arbeit zu entnehmen.

7 Validierung der Methodik am Beispiel einer gefügten Turbinenblisk

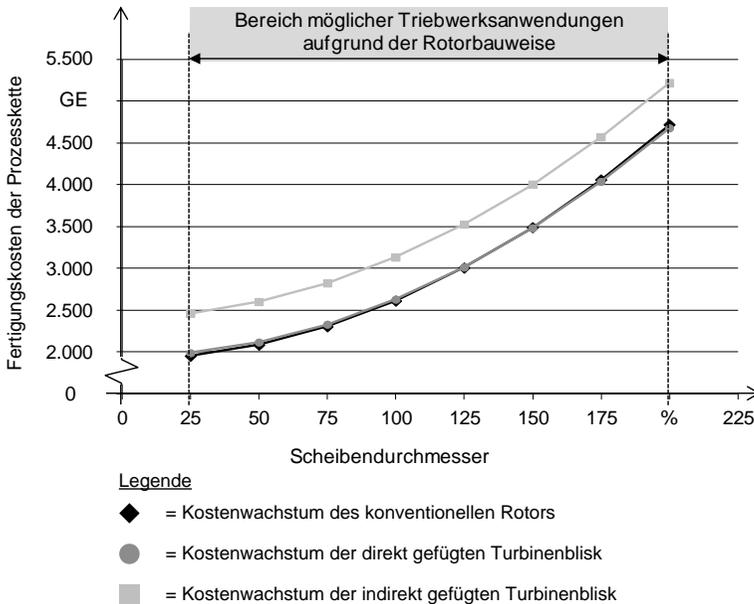


Abbildung 64: Veränderungen der Fertigungskosten bei Variation des Scheibendurchmessers

Insgesamt zeigt sich für alle drei Prozessketten, d. h. für die des konventionellen Rotors und die der direkt und der indirekt gefügten Turbinenblisk, ein progressives Kostenwachstum für die Variation des Scheibendurchmessers. Dieses resultiert aus den maßgeblich volumenbezogenen Abhängigkeiten der Rohteilkosten und der Platzkosten einiger kostenintensiver Prozesse. Eine Verdoppelung des Scheibendurchmessers führt z. B. zu einer Vervielfachung des Volumens, sodass sich auch die Kosten für den Materialeinsatz vervierfachen. Der nahezu über den gesamten relevanten Bereich konstante Unterschied der Fertigungskosten zwischen den alternativen Prozessketten zeigt, dass die hierfür entscheidenden Prozesse nicht maßgeblich vom Scheibendurchmesser beeinflusst werden. Somit gilt die für die Referenzanwendung aufgezeigte Priorisierung aus der wirtschaftlichen Betrachtung auch für Rotorvarianten anderer Geometrie. Ähnliches konnte für die anderen untersuchten geometrischen Parameter festgestellt werden. Dies ist ein Indiz dafür, dass diejenigen Prozesse, auf die die Differenz der Fertigungskosten zwischen den alternativen Prozessketten zurückzuführen ist, weitgehend unabhängig von der Geometrie des Rotors sind.

Zusammenfassend kann deshalb die Aussage getroffen werden, dass sich keine wesentliche Veränderung der Kostenunterschiede zwischen konventionellem Rotor sowie direkt und indirekt gefügter Turbinenblik für andere Triebwerksanwendungen ergibt.

7.7 Fazit des Anwendungsbeispiels

Im Rahmen des Anwendungsbeispiels *Turbinenblik* konnte der Nutzen der Gesamtmethodik und der Einzelmethoden aufgezeigt werden, indem zwei alternativen Prozessketten für eine gefügte Turbinenblik mit der eines konventionellen Rotors anhand der Kenngrößen *Fehlerpotenzial* und *Fertigungskosten* verglichen wurden. Die im Fokus stehende wirtschaftliche Betrachtung wurde außerdem durch den Vergleich der Toleranzsysteme ergänzt. Unscharfe Daten in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen konnten im Rahmen einer Kostensimulation zur Erhöhung der Planungssicherheit eingebunden werden. Abschließend wurden geometrische Varianten hinsichtlich der Veränderung der Fertigungskosten untersucht.

Die Turbinenblik als innovative Technologie für den Flugzeugtriebwerks-Bau bietet aus technischer Sicht großes Potenzial zur Massereduzierung und damit zur Erhöhung der Ressourceneffizienz. Aus produktionstechnischer Sicht ist die Beherrschung der verwendeten Fügeverfahren entscheidend. Sie beeinflussen maßgeblich die resultierenden Abweichungen der Schaufelblattstellung im Strömungskanal, die Fehlerpotenziale durch die hohe Bedeutung von Fügefehlern für die Turbinenblik und die Platzkosten. Für eine zukünftige Serienfertigung ist deshalb im Rahmen der weiteren Produktentwicklung die Qualifizierung und Beherrschung dieser Fertigungsprozesse zu fokussieren. Für die Ergebnisse der Prozesskettenbetrachtung ist zu beachten, dass den Daten eines konventionellen Rotors Erfahrung aus jahrzehntelanger Serienproduktion zugrunde liegt, während sich die gefügte Turbinenblik und deren Fertigungsprozesse in der Entwicklung befinden. Mit zunehmender Erfahrung sind jedoch Verbesserungen sowohl hinsichtlich qualitätsrelevanter als auch wirtschaftlicher Kriterien möglich.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Nutzen der Methodik

8.1.1 Allgemeines

Vor dem Hintergrund, dass sich die Produktionsumgebung allgemein schnell verändert (ZÄH ET AL. 2011), und mit der Zielsetzung, den Vorgang der Produktentwicklung zu unterstützen, lassen sich zwei Vorteile durch die Anwendung der vorgestellten Methodik zur Prozesskettenbetrachtung unterscheiden. Zum einen kann direkt der Entwicklungsaufwand reduziert werden, zum anderen wird das Risiko unternehmerischer Fehlentscheidungen verringert. Beides hilft, einen Ausweg aus dem sogenannten Dilemma der Produktentwicklung nach EHRENSPIEL ET AL. (2007) zu finden, das in Abbildung 65 dargestellt ist.

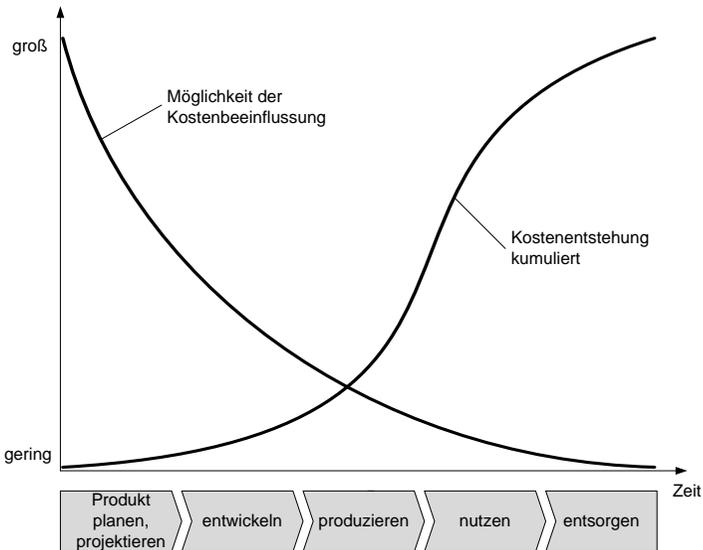


Abbildung 65: Kostenbeeinflussung und Kostenentstehung während des Produktlebenszyklus nach EHRENSPIEL ET AL. (2007)

Die Problematik besteht darin, dass in den frühen Phasen der Produktentwicklung ein hoher Anteil der Kosten festgelegt wird, die später durch Produktion,

Produkteinsatz und Recycling entstehen. Dies bedeutet, dass Kosten nicht ohne Einschränkung kurzfristig beeinflussbar sind (ZÄH 2003). Deshalb wird eine möglichst frühe und hohe Informationsdichte in der Produktentwicklung angestrebt. Im Folgenden wird erläutert, inwiefern die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik dazu beitragen kann, dieser Problemstellung zu begegnen.

8.1.2 Reduzierung des Entwicklungsaufwandes

Bei der Konzeption eines zukünftigen Produktes wird oftmals eine Vielzahl von Entwürfen generiert, welche zu bewerten sind. Zielführend ist hierbei eine möglichst umfassende Betrachtung durch die Berücksichtigung der relevanten Aspekte. Bezogen auf einen Rotor im Flugzeugtriebwerks-Bau sind dies vor allem die Fachgebiete der Aerodynamik, der Strukturmechanik, der Werkstoffkunde und der Produktionstechnik. Die entwickelte Methodik erlaubt im Hinblick darauf bereits anhand erster Entwürfe von Prozessketten mit geringem Detaillierungsgrad den Vergleich unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und qualitätsrelevanter Aspekte. Die notwendigen Voraussetzungen hierfür werden durch die flexible Strukturierung der Prozessketten (vgl. Abschnitt 3.4.4, S. 72 ff.) inklusive der iterativen Detaillierung und durch die Möglichkeit zur Berücksichtigung unscharfer Daten bereit gestellt. Dadurch können sowohl die Fehlerpotenziale (vgl. Abschnitt 4.3, S. 85 ff.) als auch die Fertigungskosten (vgl. Kapitel 5, S. 93 ff.) quantifiziert betrachtet werden. Aufgrund der kleinen Datenbasis ist die Verwendung von unscharfen Daten in dieser Phase empfehlenswert, um Chancen und Risiken sowohl monetärer Art als auch in Bezug auf die Bauteilqualität abbilden zu können. Somit wird eine fundierte Bewertung der Design- und damit der Fertigungsalternativen aus Sicht der Produktionstechnik ermöglicht. Mit fortschreitender Eingrenzung der Lösungsmöglichkeiten können die jeweils verbleibenden Alternativen weiter detailliert sowie um das Toleranzmanagement und die Berücksichtigung von Rotorvarianten, wie für das Anwendungsbeispiel erläutert, ergänzt werden.

Durch die Methodik kann somit der Aufwand der Produktentwicklung dahingehend reduziert werden, dass frühzeitig sowohl Fehlerpotenziale als auch Fertigungskosten unter Verwendung von Unsicherheiten aufgezeigt werden können. Somit ist eine fundierte Eingrenzung des Lösungsraumes durch Reduzierung der Anzahl der Fertigungsalternativen möglich.

8.1.3 Vermeidung unternehmerischer Risiken

Die Verringerung des Risikos einer Fehlentscheidung ist für alle technischen Systeme im Falle einer Problemstellung mit alternativen Lösungsmöglichkeiten von zentraler Bedeutung (FROMM 2009). Daraus resultiert ein zweiter Vorteil der Anwendung der Methodik, da sie dazu beiträgt, eine geeignete Prozesskette für die Serienproduktion eines neuen Rotors zu identifizieren bzw. zu entwickeln. Eine unzureichende Auslegung der Produktion bzw. eine Fehlentscheidung in Form der Auswahl einer ungeeigneten Prozesskette kann, abgesehen von erhöhten Produktionskosten, weitreichende Folgen haben. Insbesondere der Qualitätsanspruch der Luftfahrtbranche tritt hierbei in den Vordergrund. Beispielsweise führte im Jahr 2010 eine defekte Ölleitung zum Bruch einer Rotorscheibe und letztlich dem Defekt eines Triebwerks an einem Airbus A380 (STOCKINGER 2011). Über den Schaden am Triebwerk hinaus mussten aus Sicherheitsgründen alle im Einsatz befindlichen Triebwerke dieses Typs einer Inspektion unterzogen werden (EASA 2010). Letztlich zahlte der Triebwerkshersteller in einem Vergleich 70 Millionen Euro an die betroffene Fluggesellschaft (SPIEGEL ONLINE GMBH 2011). Dieser Schaden war zwar nicht auf einen Produktionsfehler eines Rotors zurückzuführen, doch das Versagen der Rotorscheibe ist trotzdem ursächlich für die erheblichen Schäden. Dies zeigt die möglichen Folgen unzureichender Produktqualität bei Rotoren von Flugzeugtriebwerken. Einen wesentlichen Beitrag zu deren Sicherung liefert die Herstellung mit einer geeigneten fertigungstechnischen Prozesskette. Die vorgestellte Methodik kann bei deren Gestaltung unterstützen, indem die Betrachtung von Fehlerpotenzialen sowie das Toleranzmanagement adressiert werden und gleichzeitig der Aspekt der wirtschaftlichen Produktion integriert wird.

8.2 Zusammenfassung der Arbeit

Mit dem aktuell stetig wachsenden Umweltbewusstsein und immer höheren Kraftstoffpreisen wächst auch die Forderung nach effizienten Flugzeugen. Dies stellt die Luftfahrtindustrie im Allgemeinen und die Triebwerkshersteller im Speziellen vor eine schwierige Aufgabe. Lösungsmöglichkeiten bieten neue Technologien wie beispielsweise der Leichtbau durch den Einsatz von Verbundmaterialien oder integrale Rotoren, die sich durch die stoffschlüssige Verbindung von Schaufeln und Scheibe auszeichnen. Zur Fertigung derartiger Produkte besteht auf dem Gebiet der Produktionstechnik vielfältiger Forschungsbedarf, wie z. B. im Hinblick auf die technologieübergreifende Prozesskettengestaltung.

8 Schlussbetrachtung

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist deshalb eine Methodik zur Prozesskettenbetrachtung für Rotoren von Flugzeugtriebwerken. Im Fokus steht die Unterstützung bei der Auswahl zwischen Fertigungsalternativen, indem wirtschaftliche und qualitätsrelevante Aspekte für eine Referenzanwendung sowie deren Varianten anhand fertigungstechnischer Prozessketten abgebildet werden.

Um diese Zielsetzung zu erfüllen, wurde zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik der relevanten Themengebiete dargestellt. Die Basis für diese Arbeit bilden fertigungstechnische Prozessketten. Deshalb wurden methodische Möglichkeiten für deren Erstellung, Strukturierung und Verbesserung diskutiert. Das vielfältige Themengebiet der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde im Sinne der Kostenrechnung auf die bauteilbezogenen, monetären Aufwände für Material und Herstellung eingegrenzt und die entsprechenden Grundlagen wurden erläutert. Auf der Seite der qualitätsrelevanten Aspekte wurde einleitend der Zusammenhang von Bauteil- und Prozessqualität erörtert und so die Fokussierung auf die FMEA als Methode der Qualitätsplanung sowie die auf Toleranzanalyse und die Toleranzsynthese vorgenommen. Ferner wurden die für diese Arbeit relevanten Inhalte des Variantenmanagements vorgestellt. Als Zwischenfazit aus der Betrachtung zum Stand der Technik sowie aus den Inhalten aktueller Forschungsarbeiten, die die Betrachtung von Prozessketten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und qualitätsrelevanter Aspekte adressieren, konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass für das Themengebiet der Prozesskettenbetrachtung viele etablierte Methoden und innovative Ansätze existieren, die Lösungsmöglichkeiten für unterschiedliche Fragestellungen bieten. Allerdings zeigte sich ebenso, dass die Vielfalt der möglichen Inhalte für eine Prozesskettenbetrachtung groß ist und bisher keine Arbeiten bekannt waren, die genau die für den Flugzeugtriebwerks-Bau relevanten Inhalte umfassen und dabei dessen Anforderungen gerecht werden.

Aus dieser Tatsache wurde der Handlungsbedarf der Arbeit abgeleitet. Er bestand darin, für die Teilaspekte der wirtschaftlichen und qualitätsbezogenen Prozesskettenbetrachtung bestehende Methoden zu adaptieren und zu ergänzen sowie alle Teilaspekte in einer Methodik für Rotoren von Flugzeugtriebwerken zusammenzuführen. Zudem sollte aufgezeigt werden, wie die erzielten Ergebnisse auf andere Rotorvarianten übertragen werden können.

Als Basis wurden zunächst grundlegende Elemente für die entwicklungsbegleitende Anwendung der Methodik erarbeitet. Hierzu zählen die Datenermittlung durch Vergleich und Schätzung, die optionale Abbildung aller Informationen

durch unscharfe Werte, um Chancen und Risiken abschätzen zu können, sowie die flexible Strukturierung der Prozessketten, um die iterative Detaillierung zu vereinfachen. Anschließend wurden die Einzelmethoden der beiden inhaltlichen Ausrichtungen und der Variantenabbildung diskutiert.

Als erste Methode wurde für die qualitätsrelevanten Aspekte eine Vorgehensweise zur Betrachtung geometrischer Toleranzen erarbeitet, die deren Vergleich mit erreichbaren Abweichungen auf Prozessebene ermöglicht. Hierfür stehen mit der Adaption bekannter Maßketten einerseits sowie der Erstellung und Analyse neuer Maßketten mittels Toleranzanalyse und Toleranzsynthese andererseits zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Durch beide werden mögliche bzw. notwendige Anpassungen der Prozesskette identifiziert, sodass entweder Kostensenkungspotenziale durch die Weitung von Einzeltoleranzen genutzt werden können oder Verbesserungen zur Einhaltung der geforderten Toleranzen vorgenommen werden müssen. Zudem wurde für die Betrachtung qualitätsrelevanter Aspekte in Anlehnung an die FMEA eine Methode entwickelt, Risiken durch Fertigungsfehler anhand von deren Auftretenswahrscheinlichkeit und der Fehlerbedeutung quantifiziert zu erfassen und somit den Vergleich von alternativen Prozessketten in Bezug auf eventuelle Fertigungsfehler zu ermöglichen.

Für die wirtschaftlichen Aspekte wurde als zweite Methode die Ermittlung der relevanten bauteilbezogenen Fertigungskosten fokussiert. Diese setzen sich aus den Rohteilkosten in Form der Aufwände für Materialeinsatz und Wertschöpfung beim Urformen sowie den Rüst-, Maschinen- und Personalkosten zusammen. Letztere werden jeweils aus der Zeit des Vorgangs und den dazugehörigen zeitabhängigen Kosten für Betriebsmittel und Personal berechnet. Für die Anwendung der Methode wurden insbesondere die Ermittlung der Prozesszeiten und die im Flugzeugtriebwerks-Bau maßgeblichen Einflüsse auf die Höhe der Aufwände erläutert. Über die Losgröße und die Verarbeitungsstückmenge hinaus ist vor allem die Auslastung der Betriebsmittel vor dem Hintergrund geringer Stückzahlen sowohl insgesamt als auch pro Zeiteinheit von besonderer Bedeutung.

Als dritte Methode wurde ein Vorgehen entwickelt, um die Extrapolation der Ergebnisse über eine Referenzanwendung hinaus für geometrisch und hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe mindestens halbähnliche Rotoren zu realisieren. Sie basiert auf der Kalkulation mit Kostenwachstumsgesetzen. Aufgrund der geometrischen Komplexität der Rotoren von Flugzeugtriebwerken wurden standardisierte Skalierungsgrößen als Verbindungselement zwischen Variantenpara-

metern und Einflussgrößen auf die Kosten eingeführt, sodass eine aufwandsarme Anwendung möglich ist.

Alle drei Methoden wurden zu einer ganzheitlichen Methodik zusammengeführt, die durch die Möglichkeit zur Berücksichtigung unscharfer Daten und der flexiblen Strukturierung der Prozessketten entwicklungsbegleitend eingesetzt werden kann. Die Toleranzbetrachtung dient der Anpassung der Prozessketten an die Vorgaben und Randbedingungen des Bauteils. Die Fehlerpotenzialuntersuchung und Platzkosten stellen quantitative Kenngrößen einer Prozesskette dar und können als Maßstab für den Vergleich von Fertigungsalternativen herangezogen werden. Die Berücksichtigung von Bauteilvarianten erlaubt zudem Betrachtungen über eine bestimmte Referenzanwendung hinaus.

Die Anwendung der entwickelten Methodik konnte im Rahmen einer industriellen Zusammenarbeit erfolgreich durchgeführt werden. Für die Entwicklung einer gefügten Turbinenblisk als neuartiger Rotor konnten zwei alternative Prozessketten sowohl aus Sicht der qualitätsrelevanten als auch der wirtschaftlichen Aspekte betrachtet und verglichen werden. Stets mit der Prozesskette eines konventionellen Rotors als Referenz wurden die einzelnen Methoden sowie die Gesamtmethodik angewendet. Als Ergebnis konnte eine klare Empfehlung für die Priorisierung der Alternativen aus produktionstechnischer Sicht abgegeben werden.

8.3 Ausblick auf weitere wissenschaftliche Arbeiten

Die entwickelte Methodik bildet einen Rahmen für die Prozesskettenbetrachtung von Rotoren im Flugzeugtriebwerks-Bau. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass alle hierfür relevanten Aspekte berücksichtigt werden. Der monetäre Wert dieser Produkte und die an sie gestellten Qualitätsanforderungen rechtfertigen einen verhältnismäßig hohen Aufwand in der Planungsphase. Dennoch gilt es zukünftig, die Abläufe weiter zu standardisieren und zu vereinfachen sowie weitere Hilfsmittel zur Unterstützung zu entwickeln.

Eine softwaretechnische Umsetzung, die alle Aspekte beinhaltet, ist kaum realisierbar und aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung nicht unbedingt zielführend. Denkbar sind jedoch aufeinander abgestimmte Einzellösungen, wie sie durch die statische Betrachtung der Fertigungskosten und das Modell zur statistischen Kostensimulation aufgezeigt wurden. Letzteres wurde standardisiert aufgebaut, sodass es für nahezu beliebige Prozessketten einsetzbar ist. Ähnliche Lösungen sind für die anderen Methoden ebenso denkbar. Ein Problem hierbei

stellen die verschiedenen Möglichkeiten der Datenabbildung inklusive der Berücksichtigung unscharfer Werte dar. Deshalb muss eine möglichst einfache, aber dennoch allgemeingültige Informationsbeschreibung gefunden werden. Dadurch könnte die Transparenz der Ergebnisse erhöht und somit die Priorisierung der Fertigungsalternativen vereinfacht werden.

Darüber hinaus ist der Nutzen weiterer Detaillierungen der Methodik als solches bzw. der Einzelmethoden zu prüfen. Zur Standardisierung der Anwendung ist eine genaue Beschreibung der durchzuführenden Arbeitsschritte für die Methoden wünschenswert. Hindernisse hierbei sind jedoch die Größe des Betrachtungsraumes und die vielfältigen Einflüsse der Methodik sowie die spezifischen Anforderungen des jeweiligen Rotors. Bisherigen Erfahrungen zufolge engen weitere Konkretisierungen stets den möglichen Anwendungsraum ein, was wiederum den Nutzen der Methodik mindert. Eine Lösung dieses Problems würde eine erhebliche Verbesserung darstellen.

Als eine weitere Möglichkeit der Fortführung der Forschungsarbeit wird die Übertragung bzw. Erweiterung der Methodik auf andere Produkte und Branchen gesehen. Voraussetzung hierfür ist die Identifizierung geeigneter Anwendungsfälle, die ähnliche Rahmenbedingungen aufweisen, um den Anpassungsaufwand der Methodik gering zu halten. Darüber hinaus ist auch die Reduzierung auf einzelne Teilaspekte oder Methoden denkbar. Die Anwendbarkeit muss bisher für den Einzelfall geprüft werden. Zukünftig sind hierfür Richtlinien zu erarbeiten, um die industrielle Anwendung der Methodik zu fördern.

Insgesamt bildet die vorliegende Arbeit die Basis für umfangreiche Prozesskettenbetrachtungen zur Unterstützung der Produktentwicklung. Aufgaben weiterer Forschungsarbeiten sollten die Standardisierung der Methodik und die Erweiterung des möglichen Anwendungsraumes auf andere Produkte als Rotoren sein.

9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011.
ISBN: 978-3-446-42595-8.

ADAM 1998

Adam, P.: Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken. Basel: Birkhäuser 1998. ISBN: 3-7643-5971-4.

AFT 2001

Aft, L. S.: Work measurement and methods improvement. In: Zandin, K. B. (Hrsg.): Maynard's industrial engineering handbook. New York: McGraw-Hill 2001, S. 5.3–5.22. ISBN: 978-0-07-041102-9.

AKADEMISCHER VEREIN HÜTTE E. V. 1996

Akademischer Verein Hütte e. V. (Hrsg.): Produktion und Management. Berlin: Springer 1996. ISBN: 0-387-59360-8.

AKAO 1990

Akao, Y.: Quality function deployment. New York: Productivity Press 1990.
ISBN: 1-56327-313-6.

AURICH ET AL. 2008

Aurich, J.; Schweitzer, E.; Gu, Z.; Naab, C.: An Approach to Life Cycle Cost Estimation for new developed Manufacturing Processes. In: CIRP (Hrsg.): 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Sydney, 17.-18.03.2008. Sydney: Eigendruck University of New South Wales 2008, S. 258–263. ISBN: 1-877040-67-3.

BANGSOW 2008

Bangsow, S.: Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk. München: Carl Hanser 2008. ISBN: 3-446-41490-8.

BEHRENS 2011

Behrens, C.: Quality-Stream-orientierte Toleranzallokation. Diss. RWTH Aachen (2011). Aachen: Apprimus 2011. ISBN: 3-86359-018-X. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 7/2011).

BERNARDS 2006

Bernards, M.: Modulare Prüfplanung. Diss. RWTH Aachen (2005). Aachen: Shaker 2006. ISBN: 978-3-8322-4798-0. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 3/2006).

BIMAZUBUTE 2005

Bimazubute, R.: Die Nachbereitung von Experteninterviews im expertenzentrierten Wissensmanagement. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (2005).

BOHN 1998

Bohn, M.: Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess – Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien. Diss. Universität Karlsruhe (1998).

BOUAZIZ & MASMOUDI 2006

Bouaziz, Z.; Masmoudi, F.: Manufacturing simulation: Computer aided tolerancing for process planning. International Journal of Simulation Modelling 5 (2006) 1, S. 5–15.

BRÄUNLING 2009

Bräunling, W. J.: Flugzeugtriebwerke. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-76370-3.

BRUHN 2008

Bruhn, M.: Qualitätsmanagement für Dienstleistungen. 8. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-642-13809-6.

COENENBERG 1997

Coenenberg, A. G.: Kostenrechnung und Kostenanalyse. 3. Aufl. Landsberg am Lech: Moderne Industrie 1997. ISBN: 3-478-39393-0.

DAENZER & HABERFELLNER 2002

Daenzer, W. F.; Haberfellner, R.: Systems engineering. 11. Aufl. Zürich: Industrielle Organisation 2002. ISBN: 978-3-85743-998-8.

DENKENA & EIKÖTTER 2011

Denkena, B.; Eikötter, M.: Life-cycle based technology planning and assessment of machine tools within the aviation industry. In: CIRP (Hrsg.): 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems. Madison (Wisconsin), 01.-03.06. 2011.

DENKENA ET AL. 2010

Denkena, B.; Eikötter, M.; Schürmeyer, J.; Goesmann, R.; Apmann, H.; Lüнемann, M.: Technologieplanung und -bewertung mittels Prozesskettensimulation. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 7/8, S. 638–643.

DENKENA ET AL. 2006

Denkena, B.; Rudzio, H.; Brandes, A.: Methodology for Dimensioning Technological Interfaces of Manufacturing Process Chains. CIRP Annals – Manufacturing Technology 55 (2006) 1, S. 497–500.

DENZER 2006

Denzer, V.: Methodik zur funktions-, fertigungs- und prüfgerechten Bemessung und Tolerierung. Tönning: Der Andere Verlag 2006. ISBN: 3-89959-501-7.

DFS 2008

DFS: CDA – Continuous Descent Approach.

DFS 2011

DFS: Luftverkehr in Deutschland – Mobilitätsbericht 2010.

DIMITRELLOU ET AL. 2007

Dimitrellou, S. C.; Diplaris, S. C.; Sfantsikopoulos, M. M.: Cost-competent tolerancing in CAD. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 35 (2007) 5-6, S. 519–526.

DIN 32990-1 1989

DIN 32990-1: Kosteninformationen – Begriffe zu Kosteninformationen in der Maschinenindustrie. Berlin: Beuth 1989.

DIN 19226 1994

DIN 19226: Regelungstechnik und Steuerungstechnik. Berlin: Beuth 1994.

DIN 199-1 2002

DIN 199-1: Technische Produktdokumentation – CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Berlin: Beuth 2002.

DIN 8580 2003

DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 31051 2003

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 55350-11 2008

DIN 55350-11: Begriffe zum Qualitätsmanagement. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN 60812 2006

DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Berlin: Beuth 2006.

DIN EN ISO 9000 2005

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2005.

DIN ISO 31000 2011

DIN ISO 31000: Risikomanagement – Grundsätze und Leitlinien. Berlin: Beuth 2011.

DONG ET AL. 1994

Dong, Z.; Hu, W.; Xue, D.: New production cost-tolerance models for tolerance synthesis. Journal of Engineering for Industry 116 (1994) 2, S. 199–206.

EASA 2010

EASA: Airworthiness Directive No. 2010-0008R1: Engine – Intermediate Pressure Shaft Coupling Splines – Inspection.

EHRENSPIEL ET AL. 2007

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. 6. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-74223-4.

ERASMUS 2008

Erasmus, J. H.: Qualitätsmanagement in global verteilten Wertschöpfungsprozessen. Aachen: Shaker 2008. ISBN: 3-8322-7668-8.

EUROPEAN COMMISSION 2011

European Commission: Flightplan 2050 – Europe's vision for aviation. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2011. ISBN: 978-92-79-19724-6.

EVERSHEIM 1996A

Eversheim, W.: Planung von Produktionssystemen. In: Akademischer Verein Hütte e. V. (Hrsg.): Produktion und Management. Berlin: Springer 1996, S. 10-36–10-72. ISBN: 0-387-59360-8.

EVERSHEIM 1996B

Eversheim, W.: Prozeßorientierte Unternehmensorganisation. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-540-58135-9.

EVERSHEIM & SPUR 1996

Eversheim, W.; Spur, G.: Produktionstechnologie – Einführung. In: Akademischer Verein Hütte e. V. (Hrsg.): Produktion und Management. Berlin: Springer 1996, S. 11-1–11-14. ISBN: 0-387-59360-8.

FALLBÖHMER 2000

Fallböhrer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Diss. RWTH Aachen (2000). Aachen: Shaker 2000. ISBN: 3-8265-7794-9. (Berichte aus der Produktionstechnik 23/2000).

FELDMANN ET AL. 2003

Feldmann, K.; Christoph, F.; Wunderlich, J.: Kostensimulation erleichtert die Technologieauswahl. VDI-Z 145 (2003) 3, S. 25–28.

FENG & SONG 2003

Feng, S. C.; Song, E. Y.: A manufacturing process information model for design and process planning integration. Journal of Manufacturing Systems 22 (2003) 1, S. 1–15.

FRANKE 2002

Franke, H.-J.: Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. München: Carl Hanser 2002. ISBN: 3-446-21730-4.

FRANZ 1997

Franz, K.-P.: Kostenmanagement – Wettbewerbsvorteile durch systematische Kostensteuerung. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1997. ISBN: 3-7910-1088-3.

FROMM 2009

Fromm, H. B.: Bewertung innovativer Instandhaltungsszenarien in den frühen Phasen des Innovationsprozesses in der Luftfahrt. Diss. Technische Universität Darmstadt (2009). Aachen: Shaker 2009. ISBN: 978-3-8322-8691-0. (Innovation Fertigungstechnik).

GAO ET AL. 1995

Gao, J.; Chase, K. W.; Magleby, S. P.: Comparison of Assembly Tolerance Analysis by the Direct Linearization and Modified Monte Carlo Simulation Methods. In: ASME (Hrsg.): Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences. Boston (Massachusetts), 17.-20.09.1995, S. 353–360.

GEIGER 2007

Geiger, W.: Qualitätsmanagement bei immateriellen Produkten. In: Masing, W.; Pfeifer, T. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement. München: Carl Hanser 2007, S. 917–940. ISBN: 978-3-446-40752-7.

GERTH & PFEIFER 2000

Gerth, R. J.; Pfeifer, T.: Minimum cost tolerancing under uncertain cost estimates. IIE Transactions 32 (2000) 6, S. 493–503.

GOCH & DIJKMAN 2009

Goch, G.; Dijkman, M.: Holonic quality control strategy for the process chain of bearing rings. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 1, S. 433–436.

GÖTZE 2010

Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement. 5. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-11823-4.

HALEVI 2001

Halevi, G.: Handbook of production management methods. Oxford: Butterworth-Heinemann 2001. ISBN: 978-0-750-65088-5.

HEINZ & OLBRICH 1994

Heinz, K.; Olbrich, R.: Planzeitermittlung. München: Carl Hanser 1994. ISBN: 3-446-17597-0.

HENZE 2008

Henze, L.: Entwicklung einer Methode zum Aufdecken von potentiellen Fehlern in der Konstruktion. Diss. Technische Universität Chemnitz (2008).

HIELSCHER 2008

Hielscher, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten. Diss. Technische Universität Kaiserslautern (2008). Kaiserslautern: Technische Universität 2008. ISBN: 978-3-939432-74-6. (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK 03/2008).

HOCHMUTH ET AL. 1998

Hochmuth, R.; Meerkamp, H.; Schweiger, W.: An approach to a general view on tolerances in mechanical engineering. (Hrsg.): Integrated Product Development – IPD 98, 2nd International Workshop. Magdeburg/Barleben, 17.-18.09.1998, S. 65–76.

HUBER 1995

Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung. Diss. Technische Universität München (1995). Berlin: Springer 1995. ISBN: 978-3-540-58773-6. (*iwf* Forschungsberichte 83).

IMAI 1986

Imai, M.: Kaizen (Ky'zen). New York: McGraw-Hill 1986. ISBN: 0-07-554332-X.

JORDEN 2009

Jorden, W.: Form- und Lagetoleranzen. 6. Aufl. München: Carl Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-41778-6.

JOURDAN 2003

Jourdan, F. A.: Computerunterstützte Toleranzfestlegung zur Qualitätssicherung und Optimierung der Fertigungskosten. Diss. ETH Zürich (2003).

JURAN & GODFREY 1999

Juran, J. M.; Godfrey, A. B.: Juran's Quality Handbook. 5. Aufl. New York: McGraw-Hill 1999. ISBN: 0-07-138687-4.

KAMINSKY 1980

Kaminsky, G.: Praktikum der Arbeitswissenschaft. 2. Aufl. München: Carl Hanser 1980. ISBN: 3-446-13014-4.

KAMISKE & BRAUER 1999

Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z. 3. Aufl. München: Carl Hanser 1999. ISBN: 3-446-21217-5.

KLEIN 2006

Klein, B.: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 3-486-57850-2.

KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Diss. RWTH Aachen (2004). Aachen: Shaker 2005. ISBN: 3-8322-3799-2. (Berichte aus der Produktionstechnik 5/2005).

KOCH 2011

Koch, S.: Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 3-642-01121-7.

KONOPKA & WERMKE 2010

Konopka, A.; Wermke, M.: Duden – das Bedeutungswörterbuch. 4. Aufl. Mannheim, Zürich: Duden 2010. ISBN: 978-3-411-04104-6. (Der Duden in zwölf Bänden 10).

KRAUSS ET AL. 2011

Krauss, H.; Eschey, C.; Götzfried, A.; Teufelhart, S.; Westhäuser, S.; Zäh, M. F.; Reinhart, G.: Modellgestützte und hierarchische Prozesskettenbetrachtung für die additive Fertigung. RTejournal – Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1, (E-Journal).

KROONDER 2007

Kroonder, M.: Qualitätssicherungsvereinbarungen. In: Masing, W.; Pfeifer, T. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement. München: Carl Hanser 2007, S. 575–595. ISBN: 978-3-446-40752-7.

KUNZ 2005

Kunz, A.: Planung variantenreicher Produkte. Diss. ETH Zürich (2005).

LBA 2009

LBA: Jahresbericht 2008.

LEONHARD & NAUMANN 2005

Leonhard, K.-W.; Naumann, P.: Managementsysteme - Begriffe. Berlin: Beuth 2005. ISBN: 3-410-32961-7.

LEVARDY 2006

Levardy, V.: Model-based Framework for the Adaptive Development of Engineering Systems. Diss. Technische Universität München (2006).

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 3-642-01423-2.

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural complexity management. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-87889-6.

LINDEMANN ET AL. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: Individualisierte Produkt-Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-25506-0.

LUCZAK ET AL. 2010

Luczak, H.; Bruder, R.; Schlick, C.: Arbeitswissenschaft. 3. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 3-540-78332-6.

MANNEWITZ 1996

Mannewitz, F.: Rechnerunterstützte Toleranzgebung und -optimierung. Konstruktion 48 (1996), S. 205–211.

MÄRZ 2011

März, R. H.: Methodik zur prozessorientierten Generierung und Bewertung standortgerechter Fertigungssysteme. Diss. Technische Universität Darmstadt (2011). Aachen: Shaker 2011. ISBN: 978-3-8440-0123-5. (Innovation Fertigungstechnik).

MASING 2007

Masing, W.: Unternehmen im Wettbewerb. In: Masing, W.; Pfeifer, T. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement. München: Carl Hanser 2007, S. 3–14. ISBN: 978-3-446-40752-7.

MASING & PFEIFER 2007

Masing, Walter; Pfeifer, Tilo (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-40752-7.

MENGE 2001

Menge, M.: Ein Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der auftragsbezogenen Einzel- und Kleinserienfertigung komplexer Produkte. Diss. Technische Universität Braunschweig (2001). Essen: Vulkan 2001. ISBN: 3-8027-8662-9. (Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig).

MERGET 2004

Merget, M.: Kostenoptimierung durch Toleranzvariation im Simultaneous Engineering. Diss. RWTH Aachen (2003). Aachen: Shaker 2004. ISBN: 3-8322-2575-7. (Berichte aus der Produktionstechnik 8/2004).

MORONI ET AL. 2011

Moroni, G.; Petrò, S.; Tolio, T.: Early cost estimation for tolerance verification. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 195–198.

MORYSON 2004

Moryson, R.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Diss. ETH Zürich (2004). Düsseldorf: VDI 2004. ISBN: 3-18-338820-0. (Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren 388).

MTU 2007

MTU Aero Engines GmbH: Zur Veröffentlichung freigegebenes Symbolbild einer gefügten Turbinenblisk - 2007.

MTU 2012A

MTU Aero Engines GmbH: Bilddatenbank Pressefotos: Blisk des neuen Hochdruckverdichters, der in Antrieben für künftige Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge zum Einsatz kommen soll - 2012.

MTU 2012B

MTU Aero Engines GmbH: Bilddatenbank Pressefotos: Computer-Animation der schnelllaufenden Niederdruckturbine des Technologieprogramms ATFI - 2012.

MTU 2012C

MTU Aero Engines GmbH: Bilddatenbank Pressefotos: Fräsen einer Hochdruck-Verdichterscheibe in Bliskbauweise bei der MTU AENA - 2012.

MTU 2012D

MTU Aero Engines GmbH: Bilddatenbank Pressefotos: Linear reibgeschweißter Blisk eines Niederdruckverdichters des EJ200; die Schaufelfüße sind noch unbearbeitet - 2012.

MÜLLER 1998

Müller, M.: Qualitätscontrolling komplexer Serienprodukte. Diss. RWTH Aachen (1997). Aachen: Shaker 1998. ISBN: 978-3-8265-3528-4. (Berichte aus der Produktionstechnik 8/98).

MÜLLER 2007

Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Diss. Technische Universität München (2007). München: Utz 2007. ISBN: 3-8316-0750-8. (*iwb* Forschungsberichte 209).

NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Diss. RWTH Aachen (2001).

NEUHÄUSER 2008

Neuhäuser, D.: Ansatz zur Verknüpfung von Materialflusssimulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung. In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (Hrsg.): 4. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik an der Technischen Universität Chemnitz. Chemnitz, 09.-10.10.2008, S. 33–40.

OLFERT & RAHN 2004

Olfert, K.; Rahn, H.: Lexikon der Betriebswirtschaftslehre. 5. Aufl. Ludwigshafen: Kiehl Friedrich 2004. ISBN: 3-470-45605-4.

PAHL 2005

Pahl, G.: Konstruktionslehre. 6. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-22048-0.

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin: Springer 1982. ISBN: 978-3-540-11783-4.

PFEIFER 1993

Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken. München: Carl Hanser 1993. ISBN: 3-446-16526-6.

PFEIFER 1996

Pfeifer, T.: Phasen des Qualitätsmanagements. In: Akademischer Verein Hütte e. V. (Hrsg.): Produktion und Management. Berlin: Springer 1996, S. 13-13–13-18. ISBN: 0-387-59360-8.

PONN & LINDEMANN 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. 2. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-20579-8.

PRABHAHARAN ET AL. 2004

Prabhakaran, G.; Asokan, P.; Ramesh, P.; Rajendran, S.: Genetic-algorithm-based optimal tolerance allocation using a least-cost model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 24 (2004) 9-10, S. 647–660.

PROKOPCZUK 2011

Prokopczuk, P.: Neue Herstellungsverfahren für integral beschaufelte Rotoren. Diss. Technischen Universität München (2011).

QI ET AL. 2011

Qi, H. Y.; Xie, J.; Pan, D.; Li, S. L.; Yang, X. G.: Tensile Strength of Forged Ti-6Al-4V Welded Joints by Electronic Beam Welding. Advanced Materials Research 255-260 (2011), S. 132–136.

RAO 2011

Rao, R. V.: Advanced modeling and optimization of manufacturing processes. London: Springer 2011. ISBN: 978-0-85729-014-4.

REFA 1990

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Aufl. München: Carl Hanser 1990. ISBN: 3-446-15967-3.

REFA 1997

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation – Datenermittlung. München: Carl Hanser 1997. ISBN: 978-3-446-19059-7.

REINHART ET AL. 2009A

Reinhart, G.; Krebs, P.; Zaeh, M. F.: Holistic Risk Evaluation for Global Producing Companies. In: Zäh, M. F.; ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München: Utz 2009, S. 951–960. ISBN: 978-3-83160-933-8.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G.; Müller, S.; Lau, C.; Baron H.-U.: Process planning by integrated design and evaluation of technology chains using a standard erp-system. Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2007. Las Vegas (Nevada): 2007.

REINHART ET AL. 2009B

Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Rimpau, C.: Cycle-Oriented Production Structure Monitoring. In: Zäh, M. F.; ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München: Utz 2009, S. 693–701. ISBN: 978-3-83160-933-8.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Schindler, S.; Krebs, P.: Strategic Evaluation of Manufacturing Technologies. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Braunschweig, 02.-04.05.2011. Berlin: Springer 2011, S. 179–184. ISBN: 978-3-642-19691-1.

RENNER 2007

Renner, I.: Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Diss. Technische Universität München (2007). München: Dr. Hut 2007. ISBN: 978-3-89963-567-6.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. 3. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009. ISBN: 978-3-86644-374-7.

SALOMONS ET AL. 1993

Salomons, O. W.; Kappert, J.; Van Slooten, F.; van Houten, F.; Kals, H. J. J.: Computer Support in the (Re)Design of Mechanical Products. In: Knowledge Based Hybrid Systems (Hrsg.): Proceedings of the IFIP TC5/WG5.3/IFAC International Working Conference on Knowledge Based Hybrid Systems in Engineering and Manufacturing. Budapest, 20.-22.04.1993. Amsterdam: North-Holland 1993. ISBN: 0-444-81484-1.

SCHÄFER 2003

Schäfer, L.: Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten. Diss. Universität Kaiserslautern (2003).

SCHILDBACH & HOMBURG 2009

Schildbach, T.; Homburg, C.: Kosten- und Leistungsrechnung. 10. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius 2009. ISBN: 3-8282-0444-9.

SCHMIDT 2002

Schmidt, G.: Prozessmanagement. 2. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 978-3-540-43170-1.

SCHNEEWEIß 2002

Schneeweiß, C.: Einführung in die Produktionswirtschaft. 8. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 978-3-540-43192-3.

SCHUH 1998

Schuh, G.: Partizipative Prozessanalyse und Geschäftsprozessoptimierung. In: Schuh, G. (Hrsg.): Motion-Change-Management. Aachen: Shaker 1998, S. 107–124. ISBN: 3-8265-3879-X.

SIMON 2009

Simon, W.: Managementkonzepte von A bis Z. Offenbach: GABAL 2009. ISBN: 3-86936-018-6.

SIVA KUMAR & STALIN 2009

Siva Kumar, M.; Stalin, B.: Optimum tolerance synthesis for complex assembly with alternative process selection using Lagrange multiplier method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44 (2009) 3-4, S. 405–411.

SIVAKUMAR ET AL. 2011

Sivakumar, K.; Balamurugan, C.; Ramabalan, S.: Simultaneous optimal selection of design and manufacturing tolerances with alternative manufacturing process selection. Computer-Aided Design 43 (2011) 2, S. 207–218.

SPIEGEL ONLINE GMBH 2011

Spiegel Online GmbH: 70 Millionen Euro für ein explodiertes Triebwerk. <<http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/0,1518,769743,00.html>> - 01.05.2012.

SPIES 1997

Spies, J.: Montagegerechte Produktgestaltung am Beispiel des komplexen Gross-Serienproduktes Automobil. Diss. ETH Zürich (1997).

STOCKINGER 2011

Stockinger, A.: Computer aided robust design, Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (2010). Düsseldorf: VDI 2011. ISBN: 978-3-18-340901-3. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 409).

STUMVOLL 2009

Stumvoll, A.: Methoden statistischer Toleranzanalyse bei der Entwicklung von Turbomaschinen. Diss. Technische Universität München (2009). München: Dr. Hut 2009. ISBN: 978-3-86853-286-9. (Luftfahrt).

TROMMER 2001

Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2001. ISBN: 978-3-8265-8698-9. (Berichte aus der Produktionstechnik 15/2001).

TRUMPOLD ET AL. 1997

Trumpold, H.; Beck, C.; Richter, G.: Toleranzsysteme und Toleranzdesign. München: Carl Hanser 1997. ISBN: 3-446-17757-4.

UIHLEIN 2010

Schutzrecht WO 2010/094273 A2 (26.08.2010). MTU Aero Engines GmbH. Pr.: PCT/DE2010/000184 18.02.2010

Uihlein, T.: Herstellung einer Turbinenblisk mit einer Oxidations- bzw. Korrosionsschutzschicht.

UIHLEIN ET AL. 2010

Schutzrecht WO 2011/054342 A1 (12.05.2011). MTU Aero Engines GmbH. Pr.: PCT/DE2010/001280 30.10.2010

Uihlein, T.; Steinhardt, E.; Kraus, J.; Stiehler, F.: Blisk, Gasturbine und Verfahren zur Herstellung einer derartigen Blisk.

VAN VLIET 2001

van Vliet, J. W.: Design for manufacturing. Diss. TU Delft (2001).

VDI 3258 1964

VDI 3258: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen. Düsseldorf: VDI 1964.

VDI 2234 1990

VDI 2234: Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur. Berlin: Beuth 1990.

VDI 2221 1993

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

VDI 2247 1994

VDI 2247: Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. Berlin: Beuth 1994.

VDI 2225-2 1997

VDI 2225-2: Konstruktionsmethodik technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Tabellenwerk. Berlin: Beuth 1997.

VDI 3633-7 2001

VDI 3633-7: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Kostensimulation. Berlin: Beuth 2001.

VDI 2243 2002

VDI 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Berlin: Beuth 2002.

VDI 3423 2011

VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Berlin: Beuth 2011.

VDMA 66412-1 2009

VDMA 66412-1: Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen. Berlin: Beuth 2009.

VON PRAUN 2003

von Praun, S.: Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess. Diss. Technische Universität München (2002). München: Utz 2003. ISBN: 978-3-8316-0202-5. (*iwb* Forschungsberichte 171).

WALDNER 2007

Waldner, D.: Optimierung der Spiele und Spalte im Konstruktionsprozess von Flugtriebwerken. Diss. Technische Universität München (2007). München: Dr. Hut 2007. ISBN: 978-3-89963-581-2. (Luftfahrt).

WANG ET AL. 2007

Wang, L.; Feng, H.-Y.; Cai, N.; Jin, W.: An effective approach for distributed process planning enabled by event-driven function blocks. In: Wang, L.; Shen, W. (Hrsg.): Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing. New York: Springer 2007, S. 1–30. ISBN: 978-1-84628-751-0.

WARNECKE ET AL. 1996

Warnecke, H.-J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.; Voegele, A. A.; (Keine Angabe): Kostenrechnung für Ingenieure. 5. Aufl. München: Carl Hanser 1996. ISBN: 3-446-18695-6.

WELLS ET AL. 2001

Wells, G.; Morgan, S.; Masse, B.; Scheugenpflug, H.: EEFAE - efficient and environmentally friendly aero engine - technology platform. Air & Space Europe 3 (2001) 3–4, S. 163–165.

WESTKÄMPER 1996

Westkämper, E.: Strategisches Qualitätsmanagement. In: Akademischer Verein Hütte e. V. (Hrsg.): Produktion und Management. Berlin: Springer 1996, S. 13–13-13. ISBN: 0-387-59360-8.

WESTKÄMPER 2001

Westkämper, E.: Modulare Produkte – Modulare Montage. wt Werkstattstechnik online 91 (2001) 8, S. 479–482.

WESTKÄMPER & WARNECKE 1994

Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Zero-defect manufacturing by means of a learning supervision of process chains. Annals of the CIRP 43 (1994) 1, S. 405–408.

WESTKÄMPER ET AL. 2010

Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.; Dinkelmann, M.; Haag, H.: Einführung in die Fertigungstechnik. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0835-6. (Fertigung).

WIESER 2009

Wieser, J.: Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2008). Aachen: Shaker 2009. ISBN: 3-8322-7882-6. (Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe 146).

WIK 2005

Schutzrecht EP 1746475A1 Patent (24.01.2007). MTU Aero Engines GmbH. Pr.: 05015604.1 19.07.2005

Wik, J.: Verfahren zur Generierung von Prozessketten.

WILLMS 2008

Willms, H.: Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Diss. RWTH Aachen (2008).

WUNDERLICH 2002

Wunderlich, J.: Kostensimulation: Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (2002).

YAKINTHOS ET AL. 2007

Yakinthos, K.; Missirlis, D.; Palikaras, A.; Storm, P.; Simon, B.; Goulas, A.: Optimization of the design of recuperative heat exchangers in the exhaust nozzle of an aero engine. Applied Mathematical Modelling 31 (2007) 11, S. 2524–2541.

YEO ET AL. 1998

Yeo, S. H.; Chen, H.; Ngoi, B. A.: Process sequence optimization based on a new cost-tolerance model. Journal of Intelligent Manufacturing 9 (1998) 1, S. 29–37.

ZÄH 2003

Zäh, M. F.: Megatrends in der Produktionstechnik – Herausforderungen für Gesellschaft, Wissenschaft und Ausbildung. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium. München: Utz 2003, S. 267–297. ISBN: 978-3-83160-222-3.

ZÄH ET AL. 2010

Zäh, M. F.; Krol, T. A.; Ott, M.; Schilp, J.: Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Materialien bei Schichtbauverfahren. In: Reinhart, G.; Zaeh, M. F. (Hrsg.): Seminar Rapid Manufacturing. Augsburg, 08.07.2010. München: Utz 2010, S. 1-1–1-19. ISBN: 978-3-89675-097-6.

ZÄH ET AL. 2002

Zäh, M. F.; Lindemann, U.; Gahr, A.; Pulm, U.; Ulrich, C.; Wagner, W.: Massenproduktion mit Losgröße 1. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 5, S. 269–272.

ZÄH ET AL. 2011

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Karl, F.; Lindemann, U.; Biedermann, W.: DSM-Based Evaluation of Assembly Manufacturing Resources. In: Eppinger, S. D. et al. (Hrsg.): Invest on visualization. Cambridge, MA, USA, 14.-15.09.2011. München: Carl Hanser 2011, S. 435–448. ISBN: 978-3-446-43037-2.

ZENNER 2006

Zenner, C.: Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. Diss. Universität des Saarlandes (2006).

ZHANG & WANG 1993

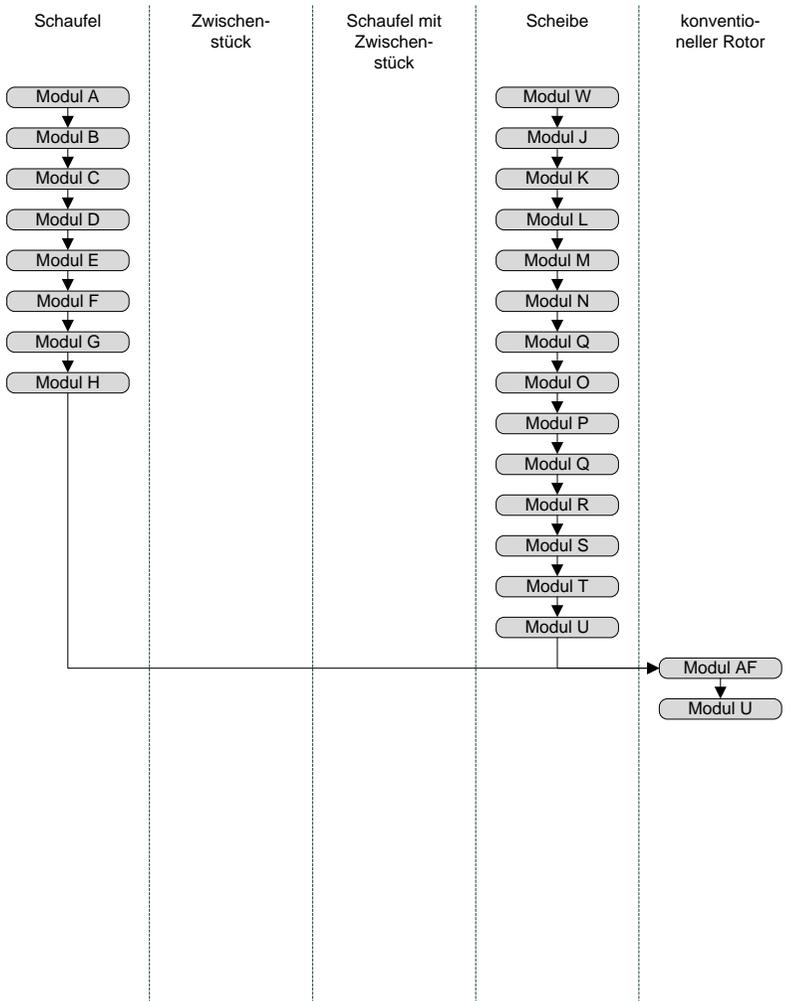
Zhang, C.; Wang, H.: Integrated tolerance optimisation with simulated annealing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 8 (1993) 3, S. 167–174.

ZHANG ET AL. 2010

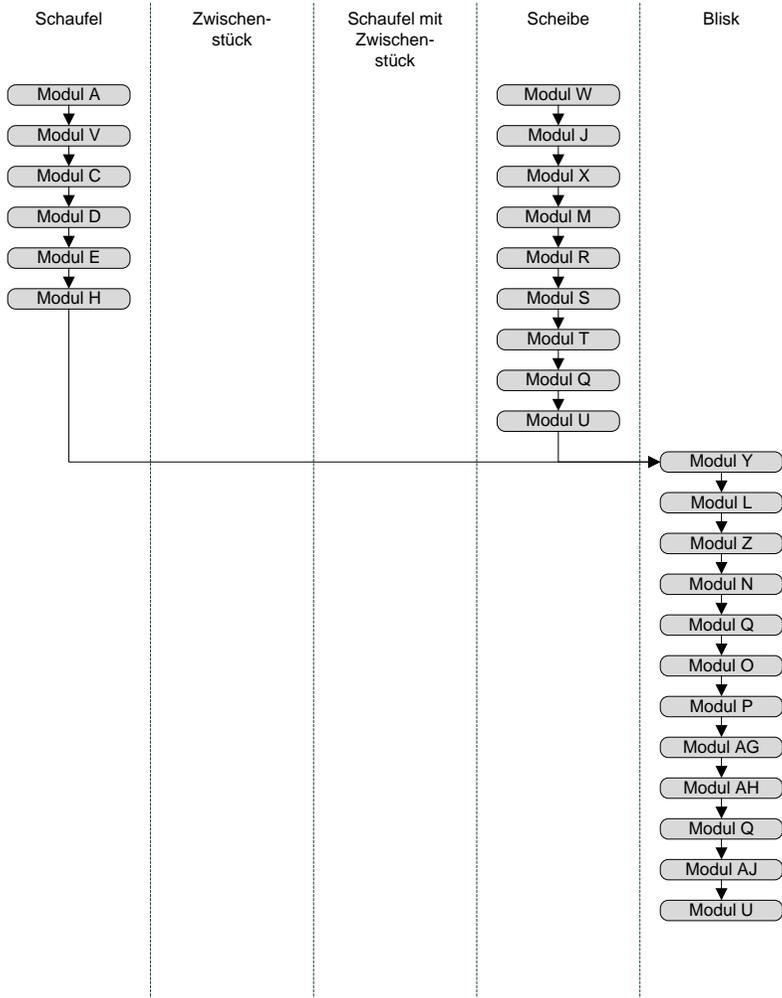
Zhang, J.; Li, S.; Bao, N. S.; Zhang, G. J.; Xue, D. Y.; Gu, P. H.: A robust design approach to determination of tolerances of mechanical products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 195–198.

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblik

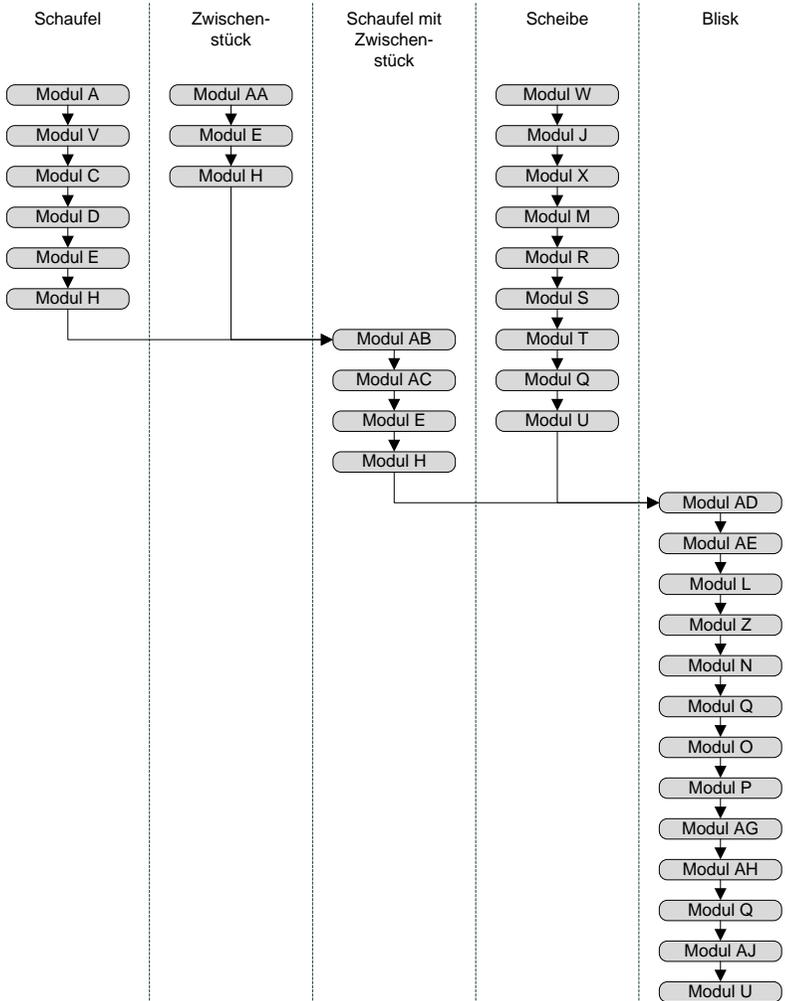
10.1 Prozesskette für den konventionellen Rotor



10.2 Prozesskette für die direkte Turbinenblisk



10.3 Prozesskette für die indirekte Turbinenblick



10.4 Daten für die Fehlerpotenzialbetrachtung

Fehlerpotenzial Modul_Y_Prozess_3

Fehlergruppe	potenzielle Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	R _A	R _B	FP _F	empfohlene Maßnahmen
Fehlergruppe_Y3_A	Fehler_Y3_A_A	Fehlerfolge_Y3_A_A	Fehlerursache_Y3_A_A	8	5	40	Maßnahme_Y3_A_A
Fehlergruppe_Y3_B	Fehler_Y3_B_A	Fehlerfolge_Y3_B_A	Fehlerursache_Y3_B_A	3	10	30	Maßnahme_Y3_B_A
	Fehler_Y3_B_B	Fehlerfolge_Y3_B_B	Fehlerursache_Y3_B_B	3	10	30	Maßnahme_Y3_B_B
	Fehler_Y3_B_C	Fehlerfolge_Y3_B_C	Fehlerursache_Y3_B_C	1	10	10	Maßnahme_Y3_B_C
Fehlergruppe_Y3_C	Fehler_Y3_C_A	Fehlerfolge_Y3_C_A	Fehlerursache_Y3_C_A	2	8	16	Maßnahme_Y3_C_A
	Fehler_Y3_C_B	Fehlerfolge_Y3_C_B	Fehlerursache_Y3_C_B	2	8	16	Maßnahme_Y3_C_B
	Fehler_Y3_C_C	Fehlerfolge_Y3_C_C	Fehlerursache_Y3_C_C	2	8	16	Maßnahme_Y3_C_C
Fehlerpotenzial FP_F Modul_Y_Prozess_3							23

R_A ... Auftretenswahrscheinlichkeit
 unwahrscheinlich = 1
 sehr gering = 2 - 3
 gering = 4 - 6
 mäßig = 7 - 8
 hoch = 9 -10

R_B ... Bedeutung
 kaum wahrnehmbar = 1
 unbedeutend = 2 - 3
 mäßig schwerwiegend = 4 - 6
 schwerwiegend = 7 - 8
 äußerst schwer wiegend = 9 -10

**FP_F ... Fehlerpotenzial des Fehlers
 (FP_F = R_A · R_B)**
 hoch <= 100
 mittel <= 25
 gering <= 6
 kein = 1

Fehlerpotenzial Modul_AB_Prozess_3

Fehlergruppe	potenzielle Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	R _A	R _B	FP _F	empfohlene Maßnahmen
Fehlergruppe_AB3_A	Fehler_AB3_A_A	Fehlerfolge_AB3_A_A	Fehlerursache_AB3_A_A	8	1	8	Maßnahme_AB3_A_A
	Fehler_AB3_B_A	Fehlerfolge_AB3_B_A	Fehlerursache_AB3_B_A	3	4	12	Maßnahme_AB3_B_A
	Fehler_AB3_B_B	Fehlerfolge_AB3_B_B	Fehlerursache_AB3_B_B	3	4	12	Maßnahme_AB3_B_B
Fehlergruppe_AB3_B	Fehler_AB3_B_C	Fehlerfolge_AB3_B_C	Fehlerursache_AB3_B_C	1	4	4	Maßnahme_AB3_B_C
	Fehler_AB3_C_A	Fehlerfolge_AB3_C_A	Fehlerursache_AB3_C_A	2	1	2	Maßnahme_AB3_C_A
	Fehler_AB3_C_B	Fehlerfolge_AB3_C_B	Fehlerursache_AB3_C_B	2	1	2	Maßnahme_AB3_C_B
Fehlergruppe_AB3_C	Fehler_AB3_C_C	Fehlerfolge_AB3_C_C	Fehlerursache_AB3_C_C	2	1	2	Maßnahme_AB3_C_C
	Fehlerpotenzial FP_F Modul_AB_Prozess_3						
	6						

R_A ... Auftretenswahrscheinlichkeit

= 1
 unwahrscheinlich = 2 - 3
 sehr gering = 4 - 6
 gering = 7 - 8
 mäßig = 9 - 10
 hoch

R_B ... Bedeutung

kaum wahrnehmbar = 1
 unbedeutend = 2 - 3
 mäßig schwerwiegend = 4 - 6
 schwerwiegend = 7 - 8
 äußerst schwerwiegend = 9 - 10

**FP_F ... Fehlerpotenzial des Fehlers
 (FP_F = R_A · R_B)**

hoch <= 100
 mittel <= 25
 gering <= 6
 kein = 1

Fehlerpotenzial Modul_AD_Prozess_11

Fehlergruppe	potenzielle Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	R _A R _B	FP _F	empfohlene Maßnahmen
Fehlergruppe_AD11_A	Fehler_AD11_A_A	Fehlerfolge_AD11_A_A	Fehlerursache_AD11_A_A	1 10	10	Maßnahme_AD11_A_A
	Fehler_AD11_A_B	Fehlerfolge_AD11_A_B	Fehlerursache_AD11_A_B	1 6	6	Maßnahme_AD11_A_B
	Fehler_AD11_A_C	Fehlerfolge_AD11_A_C	Fehlerursache_AD11_A_C	1 10	10	Maßnahme_AD11_A_C
	Fehler_AD11_A_D	Fehlerfolge_AD11_A_D	Fehlerursache_AD11_A_D	1 6	6	Maßnahme_AD11_A_D
Fehlergruppe_AD11_B	Fehler_AD11_B_A	Fehlerfolge_AD11_B_A	Fehlerursache_AD11_B_A	1 8	8	Maßnahme_AD11_B_A
Fehlergruppe_AD11_C	Fehler_AD11_C_A	Fehlerfolge_AD11_C_A	Fehlerursache_AD11_C_A	1 6	6	Maßnahme_AD11_C_A

Fehlerpotenzial FP_F Modul_AD_Prozess_11 **7,87**

R_A ... Auftretenswahrscheinlichkeit
 unwahrscheinlich = 1
 sehr gering = 2 - 3
 gering = 4 - 6
 mäßig = 7 - 8
 hoch = 9 - 10

R_B ... Bedeutung
 kaum wahrnehmbar = 1
 unbedeutend = 2 - 3
 mäßig schwerwiegend = 4 - 6
 schwerwiegend = 7 - 8
 äußerst schwer wiegend = 9 - 10

**FP_F ... Fehlerpotenzial des Fehlers
 (FP_F = R_A · R_B)**
 hoch <= 100
 mittel <= 25
 gering <= 6
 kein = 1

10.5 Daten für die Berechnung der Rohteilkosten

	Rohteilkosten der Scheibe [GE]		Rohteilkosten der Schaufeln [GE]		Kosten der Zwischenstücke [GE]	Kosten für sonstige Zukaufteile [GE]
	Kosten Materialeinsatz	Wertschöpfung Urformen	Kosten Materialeinsatz	Wertschöpfung Urformen		
konventioneller Rotor	178	389	644	267	0	211
direkt gefügte Turbinenblisk	156	389	544	267	0	222
indirekt gefügte Turbinenblisk	156	389	544	267	144	222

10.6 Prozessdaten für die Referenzanwendung

Modul	Prozess	Platzkosten [GE]		Losgröße	Menge je Rotor	VST	Ritzzeit [ZE]		Personalzeit [ZE]		Maschinenzeit [ZE]		MASS [GE]	MSS [GE]		Fehlerpotenzial FPp
		min	max				min	max	min	max	min	max				
Modul_A	Modul_A_Prozess_1	15,48	15,48	350	70	200	0,00	0,00	126,33	126,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_A_Prozess_2	26,87	36,86	350	70	200	0,00	0,00	0,00	0,00	321,33	321,33	21,00	14,33	19,67	1,00
	Modul_A_Prozess_3	9,27	9,27	350	70	200	0,00	0,00	75,67	75,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_A_Prozess_4	8,17	8,17	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_B	Modul_B_Prozess_1	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	10,33	14,00	0,00
	Modul_B_Prozess_2	20,22	24,50	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	10,33	14,00	1,00
	Modul_B_Prozess_3	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	10,33	14,00	0,00
	Modul_B_Prozess_4	20,22	24,50	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	10,33	14,00	1,00
	Modul_B_Prozess_5	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	10,33	14,00	0,00
	Modul_B_Prozess_6	20,22	24,50	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	10,33	14,00	1,00
Modul_C	Modul_C_Prozess_1	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	10,33	14,00	0,00
	Modul_C_Prozess_2	28,39	32,67	350	70	1	0,00	0,00	0,67	0,67	1,00	1,00	21,00	10,33	14,00	1,00
	Modul_C_Prozess_3	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	10,33	14,00	0,00
	Modul_C_Prozess_4	20,22	24,50	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	10,33	14,00	1,00
Modul_D	Modul_D_Prozess_1	24,50	24,50	350	70	1	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_D_Prozess_2	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_D_Prozess_3	15,94	18,67	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	6,67	9,00	1,00
	Modul_D_Prozess_4	32,28	35,00	350	70	1	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	21,00	6,67	9,00	1,00
Modul_E	Modul_E_Prozess_1	8,17	8,17	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	21,00	6,67	9,00	1,00
	Modul_E_Prozess_2	4,62	4,62	350	70	150	14,67	14,67	22,00	22,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_E_Prozess_3	7,88	10,81	350	70	150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,67	21,00	14,33	19,67	1,00
	Modul_E_Prozess_4	8,17	8,17	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	21,00	6,67	9,00	1,00
Modul_F	Modul_F_Prozess_1	0,11	0,11	350	70	150	0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_F_Prozess_2	0,05	0,05	350	70	150	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_F_Prozess_3	2,82	2,82	350	70	150	14,67	14,67	11,00	11,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_F_Prozess_4	9,70	13,31	350	70	150	0,00	0,00	0,00	0,00	87,00	87,00	21,00	14,33	19,67	1,00
	Modul_F_Prozess_5	0,05	0,05	350	70	150	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_F_Prozess_6	7,89	7,89	350	70	150	2,33	2,33	47,33	47,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_F	Modul_F_Prozess_7	2,73	2,73	350	70	150	36,00	39,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_F_Prozess_8	40,88	76,94	350	70	150	0,00	0,00	0,00	0,00	366,67	503,00	21,00	14,33	19,67	1,00

Modul	Prozess	Platzkosten [GE]		Losgröße	Menge je Rotor	VST	Rüstzeit [ZE]		Personalzeit [ZE]		Maschinenzeit [ZE]		MASS [GE]		MSS [GE]		Fehlerpotenzial FPp
		min	max				min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Modul_G	Modul_G_Prozess_1	0,47	0,55	350	70	300	3,67	3,67	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	17,33	23,67	0,00	
	Modul_G_Prozess_2	0,17	0,20	350	70	300	1,33	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	17,33	23,67	1,00	
	Modul_G_Prozess_3	8,95	10,43	350	70	300	4,33	4,33	56,33	56,33	56,33	56,33	21,00	17,33	23,67	1,00	
	Modul_G_Prozess_4	0,21	0,21	350	70	300	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
	Modul_G_Prozess_5	3,22	3,61	350	70	40	0,67	0,67	3,33	3,33	3,33	3,33	21,00	11,33	15,33	1,00	
Modul_H	Modul_H_Prozess_1	13,09	14,91	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	12,67	17,33	1,00	
	Modul_H_Prozess_2	8,17	8,17	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	0,00	0,00	1,00	
	Modul_H_Prozess_3	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
	Modul_H_Prozess_4	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
Modul_J	Modul_J_Prozess_1	12,02	13,75	10	1	1	1,33	1,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	13,67	18,67	1,00	
	Modul_J_Prozess_2	0,10	0,12	10	1	1	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	38,67	53,00	0,00	
	Modul_J_Prozess_3	41,83	52,91	10	1	1	0,67	0,67	34,00	34,00	46,33	46,33	21,00	38,67	53,00	1,00	
Modul_K	Modul_K_Prozess_1	9,13	10,77	10	1	1	1,33	1,33	13,33	13,33	13,33	13,33	21,00	19,67	27,00	1,00	
	Modul_K_Prozess_2	14,10	16,52	10	1	1	1,33	1,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00	
	Modul_K_Prozess_3	14,03	16,45	10	1	1	0,33	0,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00	
	Modul_K_Prozess_4	2,07	2,34	10	1	1	0,67	0,67	3,67	3,67	3,67	3,67	21,00	12,33	16,67	1,00	
	Modul_K_Prozess_5	19,70	22,94	10	1	1	1,00	1,00	34,00	34,00	34,00	34,00	21,00	13,67	18,67	1,00	
	Modul_K_Prozess_6	27,43	31,38	10	1	1	1,33	1,33	47,33	47,33	47,33	47,33	21,00	13,67	18,67	1,00	
	Modul_K_Prozess_7	33,08	38,77	10	1	1	1,33	1,33	48,67	48,67	48,67	48,67	21,00	19,67	26,67	1,00	
Modul_L	Modul_L_Prozess_1	26,52	31,09	10	1	1	1,33	1,33	39,00	39,00	39,00	39,00	21,00	19,67	26,67	1,00	
	Modul_L_Prozess_2	7,71	7,71	10	1	1	0,33	0,33	22,00	22,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
	Modul_L_Prozess_3	5,07	5,50	10	1	1	1,33	1,33	11,00	11,00	11,00	11,00	21,00	6,33	8,67	1,00	
	Modul_L_Prozess_4	5,52	5,52	10	1	1	1,00	1,00	15,67	15,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
	Modul_L_Prozess_5	0,43	0,43	10	1	5	0,33	0,33	6,00	6,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
Modul_M	Modul_M_Prozess_1	0,92	1,26	10	1	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	15,00	20,67	1,00	
	Modul_M_Prozess_2	2,45	2,45	10	1	1	0,00	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00	
	Modul_M_Prozess_3	2,92	3,17	10	1	1	0,00	0,00	6,33	6,33	6,33	6,33	21,00	6,67	9,00	1,00	
	Modul_M_Prozess_4	2,92	3,17	10	1	1	0,00	0,00	6,33	6,33	6,33	6,33	21,00	6,67	9,00	1,00	

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblisk

Modul	Prozess	Platzkosten [GE]		Losgröße	Menge je Rotor	VST	Rüstzeit [ZE]		Personalzeit [ZE]		Maschinenzeit [ZE]		MASS [GE]	MSS [GE]		Fehlerpotenzial FPp
		min	max				min	max	min	max	min	max		min	max	
Modul_O	Modul_O_Prozess_1	0,36	0,36	10	1	5	0,33	0,33	5,00	5,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_O_Prozess_2	0,02	0,02	10	1	5	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	12,33	17,00	1,00
	Modul_O_Prozess_3	1,39	1,58	10	1	5	1,00	1,00	12,00	12,00	12,00	12,00	21,00	12,33	17,00	1,00
	Modul_O_Prozess_4	0,02	0,02	10	1	1	0,67	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_P	Modul_P_Prozess_1	11,23	12,85	10	1	1	1,00	1,00	19,33	19,33	19,33	19,33	21,00	13,67	18,67	1,00
	Modul_P_Prozess_2	2,58	2,58	10	1	1	0,33	0,33	7,33	7,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_P_Prozess_3	2,57	2,57	10	1	1	0,00	0,00	7,33	7,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_P_Prozess_4	1,05	1,05	10	1	1	0,00	0,00	3,00	3,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_Q	Modul_Q_Prozess_1	0,10	0,13	10	1	5	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	1,33	21,00	21,67	29,67	1,00
	Modul_Q_Prozess_2	2,31	2,50	10	1	1	0,00	0,00	5,00	5,00	5,00	5,00	21,00	6,67	9,00	1,00
	Modul_Q_Prozess_3	0,02	0,02	10	1	1	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	15,00	20,33	1,00
	Modul_Q_Prozess_4	2,10	2,10	10	1	1	0,00	0,00	6,00	6,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_R	Modul_R_Prozess_1	2,34	2,73	10	1	1	0,00	0,00	3,67	3,67	3,67	3,67	21,00	17,33	23,67	1,00
	Modul_R_Prozess_2	0,93	0,93	10	1	1	0,00	0,00	2,67	2,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_R_Prozess_3	6,68	7,67	10	1	1	1,33	1,33	11,00	11,00	11,00	11,00	21,00	15,00	20,33	1,00
	Modul_R_Prozess_4	0,82	0,82	10	1	1	0,00	0,00	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_S	Modul_S_Prozess_1	4,01	4,35	10	1	1	1,33	1,33	8,67	8,67	8,67	8,67	21,00	6,33	8,67	1,00
	Modul_S_Prozess_2	5,53	5,53	10	1	1	1,33	1,33	15,67	15,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_S_Prozess_3	2,07	2,34	10	1	1	0,67	0,67	3,67	3,67	3,67	3,67	21,00	12,33	16,67	1,00
	Modul_S_Prozess_4	0,82	0,82	10	1	1	0,00	0,00	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_T	Modul_T_Prozess_1	1,31	1,31	10	1	1	0,67	0,67	3,67	3,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_T_Prozess_2	2,36	1,33	10	1	1	1,33	1,33	3,67	3,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_T_Prozess_3	29,96	29,49	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,67	0,67	21,00	19,67	26,67	1,00
	Modul_T_Prozess_4	15,94	16,67	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	6,67	9,00	1,00
Modul_U	Modul_U_Prozess_1	25,18	29,52	10	1	1	7,33	7,33	38,33	38,33	38,33	38,33	21,00	17,67	24,33	1,00
	Modul_U_Prozess_2	25,18	29,52	10	1	1	7,33	7,33	38,33	38,33	38,33	38,33	21,00	17,67	24,33	1,00
	Modul_U_Prozess_3	66,25	76,48	10	1	1	7,33	7,33	91,00	91,00	91,00	91,00	21,00	22,33	30,33	1,00
	Modul_U_Prozess_4	14,10	16,52	10	1	1	1,33	1,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00
Modul_V	Modul_V_Prozess_1	14,03	16,45	10	1	1	0,33	0,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00
	Modul_V_Prozess_2	14,03	16,45	10	1	1	0,33	0,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00
	Modul_V_Prozess_3	14,03	16,45	10	1	1	0,33	0,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00
	Modul_V_Prozess_4	14,03	16,45	10	1	1	0,33	0,33	20,67	20,67	20,67	20,67	21,00	19,67	26,67	1,00

Modul	Prozess	Platzkosten [GE]		Losgröße	Menge je Rotor	VST	Rüstzeit [ZE]		Personalzeit [ZE]		Maschinenzeit [ZE]		MASS [GE]		MSS [GE]		Fehlerpotential FPp
		min	max				min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Modul_Y	Modul_Y_Prozess_1	0,86	0,86	700	70	70	1,33	1,33	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_Y_Prozess_2	1,81	2,47	700	70	70	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	21,00	21,67	29,67	1,00	1,00
	Modul_Y_Prozess_3	79,52	130,59	700	70	1	34,00	34,00	1,00	1,33	1,00	1,33	21,00	44,00	60,00	22,57	22,57
	Modul_Y_Prozess_4	16,06	29,20	700	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,33	0,67	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_Y_Prozess_5	16,06	29,20	700	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,33	0,67	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_Y_Prozess_6	11,06	12,11	700	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	7,00	9,67	1,00	1,00
	Modul_Y_Prozess_7	0,86	0,86	700	70	70	1,33	1,33	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_Y_Prozess_8	1,81	2,47	700	70	70	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	21,00	21,67	29,67	1,00	1,00
	Modul_Y_Prozess_9	1,51	1,71	700	70	1	26,33	26,33	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	13,33	18,00	0,00	0,00
	Modul_Y_Prozess_10	2,97	5,58	700	70	300	0,00	0,00	0,00	0,00	53,33	73,00	21,00	14,33	19,67	1,00	1,00
	Modul_Y_Prozess_11	16,26	22,31	700	70	300	0,00	0,00	0,00	0,00	291,67	291,67	21,00	14,33	19,67	1,00	1,00
Modul_Z	Modul_Z_Prozess_1	45,48	61,70	10	1	1	3,67	3,67	24,67	33,67	111,67	111,67	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_Z_Prozess_2	13,82	14,57	10	1	1	7,33	7,33	33,33	33,33	33,33	33,33	21,00	3,33	4,67	1,00	1,00
	Modul_Z_Prozess_3	0,00	0,00	10	1	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Modul_AA	Modul_AA_Prozess_1	23,96	29,49	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,67	0,67	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_AA_Prozess_2	15,94	19,67	350	70	1	0,00	0,00	0,33	0,33	1,00	1,00	21,00	6,67	9,00	1,00	1,00
Modul_AB	Modul_AB_Prozess_1	0,91	0,91	350	70	70	1,33	1,33	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_AB_Prozess_2	1,81	2,47	350	70	70	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	21,00	21,67	29,67	1,00	1,00
	Modul_AB_Prozess_3	83,20	135,18	350	70	1	34,00	34,00	1,00	1,33	1,00	1,33	21,00	44,00	60,00	6,00	6,00
	Modul_AB_Prozess_4	23,96	29,49	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,67	0,67	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_AB_Prozess_5	16,31	29,49	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_AB_Prozess_6	11,23	12,30	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_AB_Prozess_7	0,91	0,91	350	70	70	1,33	1,33	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_AB_Prozess_8	1,81	2,47	350	70	70	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	21,00	21,67	29,67	1,00	1,00
	Modul_AB_Prozess_9	3,01	3,42	350	70	1	26,33	26,33	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	13,33	18,00	0,00	0,00
	Modul_AB_Prozess_10	2,97	5,58	350	70	300	0,00	0,00	0,00	0,00	53,33	73,00	21,00	14,33	19,67	1,00	1,00
	Modul_AB_Prozess_11	16,26	22,31	350	70	300	0,00	0,00	0,00	0,00	291,67	291,67	21,00	14,33	19,67	1,00	1,00
Modul_AC	Modul_AC_Prozess_1	39,26	60,60	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	1,67	1,67	21,00	19,67	26,67	1,00	1,00
	Modul_AC_Prozess_2	16,31	19,25	350	70	1	3,67	3,67	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	19,67	27,00	1,00	1,00
	Modul_AC_Prozess_3	0,00	0,00	350	70	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_AC_Prozess_4	1,49	1,57	350	70	70	0,00	0,00	3,67	3,67	3,67	3,67	21,00	3,33	4,67	1,00	1,00

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblisk

Modul	Prozess	Platzkosten [GE]		Losgröße	Menge je Rotor	VST	Rüstzeit [ZE]		Personalzeit [ZE]		Maschinenzeit [ZE]		MASS [GE]	MSS [GE]		Fehlerpotenzial FPp
		min	max				min	max	min	max	min	max		min	max	
Modul_AD	Modul_AD_Prozess_1	11,90	11,90	10	1	1	0,00	0,00	34,00	34,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_2	2,50	2,50	10	1	1	1,33	1,33	7,00	7,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	0,00
	Modul_AD_Prozess_3	1,32	1,81	10	1	1	0,00	0,00	0,00	0,00	3,67	3,67	21,00	21,67	29,67	1,00
	Modul_AD_Prozess_4	3,05	3,05	10	1	1	0,33	0,33	8,67	8,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_5	25,60	25,60	10	1	1	1,33	1,33	73,00	73,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_6	12,06	15,03	10	1	1	1,33	1,33	11,00	11,00	11,00	11,00	21,00	44,00	60,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_7	3,03	3,03	10	1	1	0,00	0,00	8,67	8,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_8	12,06	15,03	10	1	1	1,33	1,33	11,00	11,00	11,00	11,00	21,00	44,00	60,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_9	2,10	2,10	10	1	1	0,00	0,00	6,00	6,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_10	1,75	1,75	10	1	1	0,00	0,00	5,00	5,00	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_11	12,06	15,03	10	1	1	1,33	1,33	11,00	11,00	11,00	11,00	21,00	44,00	60,00	7,67
	Modul_AD_Prozess_12	1,28	1,28	10	1	1	0,00	0,00	3,67	3,67	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_13	0,90	0,90	10	1	1	2,33	2,33	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
	Modul_AD_Prozess_14	0,86	0,86	10	1	1	1,33	1,33	2,33	2,33	0,00	0,00	21,00	21,67	29,67	1,00
	Modul_AD_Prozess_15	1,81	2,47	10	1	1	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	21,00	21,67	29,67	1,00
	Modul_AD_Prozess_16	2,01	2,29	10	1	4	34,33	34,33	0,33	0,33	0,33	0,33	21,00	13,33	18,00	0,00
	Modul_AD_Prozess_17	17,42	23,90	10	1	4	0,00	0,00	0,00	0,00	291,67	291,67	21,00	14,33	19,67	1,00
Modul_AE	Modul_AE_Prozess_1	4,96	5,82	10	1	1	3,67	3,67	7,33	7,33	7,33	7,33	21,00	17,67	24,33	1,00
Modul_AE	Modul_AE_Prozess_2	4,96	5,82	10	1	1	3,67	3,67	7,33	7,33	7,33	7,33	21,00	17,67	24,33	1,00
Modul_AF	Modul_AF_Prozess_1	2,57	2,57	10	1	1	0,00	0,00	7,33	7,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_AF	Modul_AF_Prozess_2	145,02	145,02	10	1	1	0,00	0,00	414,33	414,33	0,00	0,00	21,00	0,00	0,00	1,00
Modul_AG	Modul_AG_Prozess_1	6,15	6,83	10	1	1	5,00	5,00	11,67	11,67	11,67	11,67	21,00	9,33	12,67	1,00
Modul_AG	Modul_AG_Prozess_2	9,39	10,42	10	1	1	2,33	2,33	18,33	18,33	18,33	18,33	21,00	9,33	12,67	1,00
Modul_AG	Modul_AG_Prozess_3	5,12	5,69	10	1	1	1,33	1,33	10,00	10,00	10,00	10,00	21,00	9,33	12,67	1,00
Modul_AH	Modul_AH_Prozess_1	11,44	12,70	10	1	1	6,33	6,33	22,00	22,00	22,00	22,00	21,00	9,33	12,67	1,00
Modul_AJ	Modul_AJ_Prozess_1	85,38	100,36	10	1	1	24,67	24,67	125,33	125,33	382,67	382,67	21,00	6,33	8,67	1,00

10.7 Daten für die Variantenbetrachtung

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze									
		Scheibendurchmesser		geometrischer Parameter 2		geometrischer Parameter 3		geometrischer Parameter 4		geometrischer Parameter 5	
		I_r	A_r	I_r	A_r, A_r	I_a	A_ar, A_at	I_r	A_r, A_r	I_r	A_r, A_at
	1D										
	2D										
			3D								
				V	V						
Rohteilkosten der Scheifein				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
Rohteilkosten der Zwischenstücke				0	0	0	0	0	1	1	1
				0	0	0	0	0	1	1	1
Rohteilkosten der Scheibe				0	0	0	0	0	0	0	0
				2	2	0	0	0	0	0	0
Kosten der Zukaufteile				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
Modul_A				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
Modul_B				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0	0	0	0

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblisk

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze									
		Scheibendurchmesser		geometrischer Parameter 2		geometrischer Parameter 3		geometrischer Parameter 4		geometrischer Parameter 5	
		L_r	A_r	L_r	A_r	L_a	A_r	L_r	A_r	L_r	A_r
		Modul_C	Modul_C_Prozess_1	V		V					
Modul_C_Prozess_2	0			0		0		0		0	
Modul_C_Prozess_3	0			0		0		0		0	
Modul_C_Prozess_4	0			0		0		0		0	
Modul_D	Modul_D_Prozess_1	0		0		0		0		0	
	Modul_D_Prozess_2	0		0		0		0		0	
	Modul_D_Prozess_3	0		0		0		0		0	
	Modul_D_Prozess_4	0		0		0		0		0	
Modul_E	Modul_E_Prozess_1	0		0		0		0		0	
	Modul_E_Prozess_2	0		0		0		0		0	
	Modul_E_Prozess_3	0		0		0		0		0	
	Modul_E_Prozess_4	0	A_ar	1		1		1		1	
Modul_F	Modul_F_Prozess_1	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_2	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_3	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_4	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_5	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_6	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_7	0		0		0		0		0	
	Modul_F_Prozess_8	0		0		0		0		0	

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblisk

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze									
		Scheibendurchmesser		geometrischer Parameter 2		geometrischer Parameter 3		geometrischer Parameter 4		geometrischer Parameter 5	
		L _J	A _{rt}	L _J	A _{ar} ,A _{rt}	L _a	A _{ar} ,A _{at}	L _J	A _{ar} ,A _{rt}	L _J	A _{rt} ,A _{at}
			1D								
	2D										
	3D				V					V	
Modul_M	Modul_M_Prozess_1				0	0	0	0	0	0	0
	Modul_M_Prozess_2				0	0	0	0	0	0	0
	Modul_M_Prozess_3				0	0	0	0	0	0	0
	Modul_M_Prozess_4				0	0	0	0	0	0	0
	Modul_M_Prozess_5				0	0	0	0	0	0	0
Modul_N	Modul_N_Prozess_1		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_N_Prozess_2		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_N_Prozess_3		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_N_Prozess_4		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
Modul_O	Modul_O_Prozess_1		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_O_Prozess_2		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_O_Prozess_3		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_O_Prozess_4		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
Modul_P	Modul_P_Prozess_1		A _{rt}		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_P_Prozess_2		A _{rt}		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_P_Prozess_3		A _{rt}		0	0	0	0	0	0	0
Modul_Q	Modul_Q_Prozess_1		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_Q_Prozess_2		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_Q_Prozess_3		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
Modul_R	Modul_R_Prozess_1		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
	Modul_R_Prozess_2		A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0
			A _{rt}		2	0	0	0	0	0	0

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblisk

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze					
Scheibendurchmesser	1J	geometrischer Parameter 2		geometrischer Parameter 3		geometrischer Parameter 4	geometrischer Parameter 5
		A_ar	A_rt	A_ar	A_at	A_ar	A_at
Modul_Y	Modul_Y_Prozess_1						
	Modul_Y_Prozess_2						
	Modul_Y_Prozess_3						
	Modul_Y_Prozess_4	l_i					
	Modul_Y_Prozess_5		V				
	Modul_Y_Prozess_6		A_at				
	Modul_Y_Prozess_7						
	Modul_Y_Prozess_8						
	Modul_Y_Prozess_9						
	Modul_Y_Prozess_10						
	Modul_Y_Prozess_11						
Modul_Z	Modul_Z_Prozess_1	l_a					
	Modul_Z_Prozess_2	l_a					
	Modul_Z_Prozess_3	l_a					
Modul_AA	Modul_AA_Prozess_1		A_at				
	Modul_AA_Prozess_2						
				2D			
					3D		

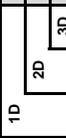
		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze							
Scheibendurchmesser	1D	geometrischer Parameter 2		geometrischer Parameter 3		geometrischer Parameter 4		geometrischer Parameter 5	
		l_{1f}	$A_{ar, A_{1f}}$	l_{2a}	$A_{ar, A_{2a}}$	l_{3f}	$A_{ar, A_{3f}}$	l_{4f}	$A_{ar, A_{4f}}$
Modul_AB									
		3D	V	V			V		
	Modul_AB_Prozess_1		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_2		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_3		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_4	l_{1f}	0	0	1	0	0	0	1
	Modul_AB_Prozess_5		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_6		0	0	1	0	0	0	1
	Modul_AB_Prozess_7	A_{at}	0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_8		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_9		0	0	0	0	0	0	0
Modul_AC	Modul_AB_Prozess_10		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_11		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AC_Prozess_1		0	0	0	0	0	0	0
	Modul_AC_Prozess_2		0	0	0	0	0	0	0
Modul_AC_Prozess_3		0	0	0	0	0	0	0	
Modul_AC_Prozess_4		0	0	0	0	0	0	0	

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblisk

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze				
Scheibendurchmesser	geometrischer Parameter					geometrischer Parameter
	1	2	3	4	5	
	l _r	A _{ar} , A _{rt}	l _a	A _{ar} , A _{rt}	l _r	A _{rt} , A _{at}
Modul_AD	Modul_AD_Prozess_1	l _r	A _{ar} , A _{rt}	l _a	A _{ar} , A _{rt}	l _r
	Modul_AD_Prozess_2	V	V		V	
	Modul_AD_Prozess_3	0	0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_4	0	0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_5	0	0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_6	0	0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_7	0	0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_8	l _r	1	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_9		0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_10		0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_11	l _r	1	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_12		0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_13	l _r	1	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_14		0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_15		0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_16		0	0	0	0
	Modul_AD_Prozess_17		0	0	0	0

		Exponenten der Kostenwachsstums Gesetze									
		geometrischer Parameter 6		geometrischer Parameter 7		geometrischer Parameter 8		geometrischer Parameter 9		geometrischer Parameter 10	
		I_a	I_r	A_it	A_it	I_r	I_r	A_it	A_it	I_r	I_a
Modul_C	Modul_C_Prozess_1										
	Modul_C_Prozess_2										
	Modul_C_Prozess_3										
	Modul_C_Prozess_4										
Modul_D	Modul_D_Prozess_1										
	Modul_D_Prozess_2										
	Modul_D_Prozess_3										
	Modul_D_Prozess_4										
Modul_E	Modul_E_Prozess_1										
	Modul_E_Prozess_2										
	Modul_E_Prozess_3										
	Modul_E_Prozess_4										
Modul_F	Modul_F_Prozess_1										
	Modul_F_Prozess_2										
	Modul_F_Prozess_3										
	Modul_F_Prozess_4										
	Modul_F_Prozess_5										
	Modul_F_Prozess_6										
	Modul_F_Prozess_7										
	Modul_F_Prozess_8										
		1D		2D		3D					

		Exponenten der Kostenwachtums Gesetze									
		geometrischer Parameter 6		geometrischer Parameter 7		geometrischer Parameter 8		geometrischer Parameter 9		geometrischer Parameter 10	
		I_a	A_at	I_r	A_rt	I_r	A_rt	I_r	A_rt	I_r	A_rt
Modul_Y	Modul_Y_Prozess_1										
	Modul_Y_Prozess_2										
	Modul_Y_Prozess_3										
	Modul_Y_Prozess_4	I_t									
	Modul_Y_Prozess_5			V							
	Modul_Y_Prozess_6		A_at								
	Modul_Y_Prozess_7										
	Modul_Y_Prozess_8										
	Modul_Y_Prozess_9										
	Modul_Y_Prozess_10										
	Modul_Y_Prozess_11										
Modul_Z	Modul_Z_Prozess_1	I_a									
	Modul_Z_Prozess_2	I_a									
	Modul_Z_Prozess_3	I_a									
Modul_AA	Modul_AA_Prozess_1		A_at								
	Modul_AA_Prozess_2										



10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblik

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze										
		1D		2D		3D		6	7	8	9	10
		A_at		A_it		A_it		l_a	l_r	l_r	l_r	l_a
		V		V		V		A_at	A_it	A_it	A_it	
Modul_AB	Modul_AB_Prozess_1							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_2							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_3							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_4	l_t						0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_5		V					0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_6		A_at					0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_7							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_8							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_9							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_10							0	0	0	0	0
	Modul_AB_Prozess_11							0	0	0	0	0
Modul_AC	Modul_AC_Prozess_1		V					0	0	0	0	0
	Modul_AC_Prozess_2		V					0	0	0	0	0
	Modul_AC_Prozess_3							0	0	0	0	0
	Modul_AC_Prozess_4							0	0	0	0	0

10 Anhang – Datenbasis für das Anwendungsbeispiel gefügte Turbinenblik

		Exponenten der Kostenwachstumsgesetze									
		geometrischer Parameter 6		geometrischer Parameter 7		geometrischer Parameter 8		geometrischer Parameter 9		geometrischer Parameter 10	
		l _a	l _r	A _{rt}	V	l _r	A _{rt}	V	l _r	A _{rt}	V
		1D									
		2D									
		3D									
Modul_AE	Modul_AE_Prozess_1			A _{rt}							
	Modul_AE_Prozess_2			A _{rt}							
Modul_AF	Modul_AF_Prozess_1										
	Modul_AF_Prozess_2										
Modul_AG	Modul_AG_Prozess_1										
	Modul_AG_Prozess_2										
	Modul_AG_Prozess_3										
Modul_AH	Modul_AH_Prozess_1										
Modul_AJ	Modul_AJ_Prozess_1										

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlweißungen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilbereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppler:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
250 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingler:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eirener:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
114 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Gribsch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickeneder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmehranalytische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernad Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Loucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mürtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbigen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkopplenden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlintensens
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Münzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Rühstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorförmlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3

