

# **Eine Methode zur Abschätzung der produktionskostenbezogenen langfristigen Planungsziele ziviler Turboflugtriebwerke**

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der  
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Olivia Arago**

aus Berlin

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Staudacher  
Mitberichter: Prof. Dipl.-Ing. R. Voit-Nitschmann  
Tag der mündlichen Prüfung: 31. März 2011

Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart

2011



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Staudacher für seine stete fachliche Unterstützung und die Möglichkeit diese Dissertation anzufertigen. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Staudacher für das in mich gesetzte Vertrauen, die zahlreichen Gespräche und persönliche Förderung danken.

Herrn Prof. R. Voit-Nitschmann danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und für die Übernahme des Koreferates.

Ich danke den Mitarbeitern des Instituts für Luftfahrtantriebe für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre, die fachlichen und nichtfachlichen Gespräche sowie für eine unvergessliche Zeit. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dr. Thomas Schumann und Herrn Dr. Christian Kasper für die wertvollen Diskussionen und den steten menschlichen Rückhalt bedanken.

Meinen Eltern und Großeltern, insbesondere Maman danke ich für die Unterstützung während meiner Ausbildung und die nachhaltige Ermunterung zu meiner Promotion. Meinem Mann und meinen Kindern danke ich von ganzem Herzen für ihre unermüdliche Unterstützung, Liebe und Motivation.

Stuttgart, im April 2011

Olivia Arago



# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	vii
Nomenklatur.....	ix
Kurzfassung.....	xv
Abstract.....	xvii
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlegende Überlegungen zu Produktionskosten.....	5
2.1.1 Überblick der Kostenabschätzungstechniken.....	5
2.1.2 Klassifizierung der Kostenermittlungsmethoden.....	6
2.1.3 Kostenabschätzungsmethoden für Luftfahrtantriebe.....	9
2.1.4 Erste Untersuchungen mit Hilfe der Regressionsanalyse.....	15
2.2 Aufgabenstellung.....	18
<b>3 Modellbildung.....</b>	<b>21</b>
3.1 Begriffe und Definitionen.....	21
3.2 Produktionskosten beeinflussende Faktoren.....	23
3.3 Definition der Annahmen.....	25
3.3.1 Detaillierte Berechnung und grobe Abschätzung.....	25
3.3.2 Defintion der Systemgrenzen.....	26
3.3.3 Betrachtung der direkten Kosten.....	27
3.3.4 Produkt- bzw. Kostenstruktur.....	27
3.3.5 Die ABC-Analyse.....	29
3.3.6 Bauteilähnlichkeit.....	31
3.3.7 Sonstige Einflussgrößen.....	33
3.4 Das Modell im Gesamtkontext.....	33
3.5 Kostenstruktur.....	35

3.6	Basis-Bauteil Methode.....	36
3.7	Aufbau der Berechnung.....	37
3.8	Produktionskosten- vs. Listenpreisbestimmung .....	38
3.9	Angestrebte Genauigkeit und Verifizierung der Kostenbestimmungsmethode.....	40
3.9.1	Angestrebte Genauigkeit.....	41
3.9.2	Verifizierung – Listenpreis .....	41
<b>4</b>	<b>Modellierung der Fertigungskosten .....</b>	<b>43</b>
4.1	Grundlagen der Fertigungstechnik .....	43
4.2	Fertigungsmethode von Scheiben .....	44
4.2.1	Grundlagen und Fertigung von Triebwerksscheiben .....	44
4.2.2	Drehen .....	48
4.2.3	Räumen .....	48
4.2.4	Fräsen/Bohren.....	49
4.2.5	Schleifen/Honen/Läppen .....	49
4.2.6	Prüfen.....	50
4.2.7	Sonstige Arbeitsschritte .....	50
4.3	Bottom-Up Ansatz .....	51
4.3.1	Gestaltung des Halbzeuges und der Rohgeometrie der Scheibe.....	51
4.3.2	Kostenberechnung Scheibe.....	53
4.3.3	Kostenberechnung Gehäuse .....	58
4.4	Top-Down Ansatz .....	58
4.4.1	Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Bauteilkosten.....	59
4.4.2	Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Modulkosten.....	61
4.5	Zusammenfassung Top-Down und Bottom-Up Ansatz.....	64
<b>5</b>	<b>Modellierung der Materialkosten .....</b>	<b>65</b>
5.1	Eingesetzte Werkstoffe im Triebwerksbau.....	65
5.1.1	Eigenschaften typischer Werkstoffe im Triebwerksbau.....	66
5.2	Herstellung .....	68
5.2.1	Gewinnung.....	68
5.2.2	Schmelze (Ingot).....	68
5.2.3	Schmiede-Prozesse .....	69
5.2.4	Einflussfaktoren auf die Materialkosten .....	69
5.3	Methode zur Bestimmung der Materialkosten .....	70
5.4	Ergebnisse und Validierung der Materialkosten-Methode.....	71
<b>6</b>	<b>Verifizierung des Produktionskostenmodells.....</b>	<b>73</b>
6.1	Verifizierung auf Triebwerks- und Modulebene .....	73
6.2	Verifizierung auf Bauteilebene.....	74

---

6.2.1	Top-Down Ansatz.....	75
6.2.2	Bottom-Up Ansatz.....	76
6.3	Zusammenfassung der Verifizierung .....	76
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>78</b>
7.1	Die Vergleichstriebwerke CFM56-5B6 und V2524-A5 .....	78
7.2	Vergleichbarkeit CFM56-5B6 und V2524-A5 .....	79
7.2.1	Fan, Nieder- und Hochdruckverdichter.....	80
7.2.2	Brennkammer .....	81
7.2.3	Hochdruckturbine .....	82
7.2.4	Niederdruckturbine .....	83
7.2.5	Zusammenfassung .....	83
7.3	Kostenvergleich der beiden Vergleichstriebwerke .....	83
7.3.1	Triebwerksgesamtkosten .....	83
7.3.2	Hochdrucksystem .....	84
7.3.3	Niederdrucksystem.....	87
7.3.4	Schlussfolgerung.....	89
7.4	Ergebnisvergleich Bottom-Up vs. Top-Down Ansatz.....	90
7.4.1	Hochdruckverdichterscheiben – V2524-A5 .....	90
7.4.2	Hochdruckverdichterscheiben – CFM56-5B6 .....	92
7.4.3	Zusammenfassung Vergleich Bottom-Up vs. Top-Down .....	94
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>95</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>99</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>110</b>





# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Typischer Produktlebenszyklus eines Triebwerks [65] .....	2
Abb. 1-2 Technologiekalender [122].....	3
Abb. 2-1 Einteilung der Techniken zur Bestimmung der Produktionskosten [69] .....	6
Abb. 2-2 Regressionsanalyse – Triebwerksschub über Triebwerksgewicht.....	17
Abb. 3-1 Beispiele für Einflussgrößen auf Herstellkosten [61] .....	24
Abb. 3-2 Zulieferkette einer Scheibe aus Titan [99].....	24
Abb. 3-3 Informationsstand bei Produktfertigung im Vergleich zum Vorentwurf.....	26
Abb. 3-4 Die Referenz-Fabrik.....	27
Abb. 3-5 Featurestruktur eines Verdichtertrotors [108] .....	28
Abb. 3-6 Ausschnitt der definierten Produktstruktur der Methode [4].....	29
Abb. 3-7 ABC-Analyse der Bauteilgewichte des E <sup>3</sup> -TW .....	30
Abb. 3-8 Bauteile der Kategorie C am Bsp. der NDT des E <sup>3</sup> -TW [37] .....	31
Abb. 3-9 Bauteilähnlichkeit am Bsp. HDV [4].....	32
Abb. 3-10 Eingliederung des Produktionskostenmodells im Gesamtkontext.....	34
Abb. 3-11 Kostenstruktur nach Fertigungsaspekten am Beispiel einer Triebwerksscheibe.....	35
Abb. 3-12 Basis-Bauteil Methode zur fertigungsspezifischen Kostenbestimmung; Bsp. Scheibe .....	36
Abb. 3-13 Aufbau der Kostenbestimmungsmethode: Ebenen und Modellansätze.....	37
Abb. 3-14 Schub und Gewicht bekannter Triebwerke (TW) .....	38
Abb. 3-15 Listenpreis und Gewicht bekannter Triebwerke einer Schubklasse [4] .....	39
Abb. 3-16 Target Costing - Regulierung des Produktpreises durch den Markt .....	39
Abb. 3-17 -10% DOC für Investitionsentscheidung auf Flugzeug und Triebwerk [80].....	40
Abb. 4-1 Einteilung der Fertigungsverfahren in Hauptgruppen nach DIN8580 .....	43
Abb. 4-2 Herstellung einer Turbinenscheibe aus Nickelbasislegierung bis zum Halbzeug [105].....	45
Abb. 4-3 Durchschnittliche Anteile der kostentreibenden Verfahren an den Fertigungskosten für NDT-Scheiben getrennt nach Fertigungslinien [89] ..	46
Abb. 4-4 Definierte Fertigungsabfolge einer Triebwerksscheibe beim OEM .....	47
Abb. 4-5 Gestaltung von Fertigbauteil (Flug) über Halbzeug zum Rohbauteil (Roh)	52
Abb. 5-1 Werkstoffe in Flugtriebwerken [105].....	66

Abb. 5-2 Verwendung von Werkstoffen in Flugtriebwerken [22] .....	66
Abb. 5-3 Kostenaufbruch für Titanlegierungen [35] und Nickelbasislegierungen [67] .....	69
Abb. 5-4 Kostenvergleich berechnete Kosten vs. Referenzkosten – Titanlegierungen .....	71
Abb. 5-5 Kostenvergleich berechnete Kosten vs. Referenzkosten – Nickellegierungen .....	72
Abb. 6-1 Prozent. Kostenverteilung der Modulkosten für Referenz vs. berechnetes TW .....	74
Abb. 6-2 Hochdruckverdichterscheiben Referenztriebwerk .....	75
Abb. 7-1 Schnittzeichnung CFM56-5B6 .....	78
Abb. 7-2 Schnittzeichnung V2500-A5 .....	79
Abb. 7-3 HDT-Scheiben CFM56-5B6 und V2524-A5 .....	82
Abb. 7-4 Prozentuale Kostenabweichungen der HDV-Scheiben, V2524-A5 .....	90
Abb. 7-5 Buy/Fly Faktoren und prozent. Abweichung der HDV Scheiben, TD vs. BU, V2524-A5 .....	91
Abb. 7-6 Prozentuale Kostenabweichung der HDV Scheiben, CFM56-5B6 .....	93
Abb. 7-7 Buy/Fly Faktoren und prozent. Abweichung der HDV Scheiben, TD vs. BU, CFM56-5B6 .....	93
Abb. A-1 Technologiereifegrade (TRL); NASA [68] .....	110
Abb. A-2 Schematischer Überblick der Herstellungsrouten von Verdichterschaufeln [96] .....	111
Abb. A-3 Schematischer Überblick der Herstellungsrouten von Turbinenschaufeln [96] .....	111

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Analytisches Modell: Verwendete Parameter .....	13
Tab. 4-1 Übersicht der definierten Begriffe und Parameter der Fertigungstechnik ...	44
Tab. 4-2 Parameterbeschreibung Volumenberechnung.....	53
Tab. 4-3 Parameterbeschreibung Materialkostenberechnung.....	53
Tab. 4-4 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Drehen.....	55
Tab. 4-5 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Räumen .....	56
Tab. 4-6 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Bohren.....	57
Tab. 4-7 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Läppen.....	57
Tab. 6-1 Abweichung berechnete vs. Referenzkosten von Scheiben nach TD und BU Ansatz.....	74
Tab. 7-1 Triebwerksdaten CFM56-5B6 und V2524-A5 .....	79
Tab. 7-2 Nebenverhältnisse der Hochdruckverdichterstufen.....	81
Tab. 7-3 Brennkammerdaten CFM56-5B6 und V2524-A5.....	81
Tab. 7-4 Berechnete TW-Kosten vs. Referenzkosten – CFM56-5B6 und V2524-A5..	84
Tab. 7-5 Kostenvergleich des HD-Systems und der entsprechenden Module.....	84
Tab. 7-6 Kostenvergleich des Moduls HDV und der entsprechenden Modul-Bauteile	85
Tab. 7-7 Kostenvergleich des Moduls HDT und der entsprechenden Modul-Bauteile	86
Tab. 7-8 Kostenaufbruch der HDT-Scheiben.....	87
Tab. 7-9 Kostenvergleich des ND-Systems und der entsprechenden Module.....	87
Tab. 7-10 Kostenvergleich des Moduls Fan und der entsprechenden Modul-Bauteile	88
Tab. 7-11 Kostenvergleich des Moduls NDT und der entsprechenden Modul-Bauteile .....	89
Tab. A-1 Typische Titanlegierungen für Scheiben [106].....	112
Tab. A-2 Typische Nickellegierungen für Scheiben [106].....	112
Tab. A-3 Typische Superlegierungen für Lauf- und Leitschaufeln [106] .....	112



# Nomenklatur

## Abkürzungen

ACC	Accessories; Anbauteile und Nebenaggregate
ACE	Assistant Cost Estimator
AV	Added Value; Wertschöpfungsfaktor
BaT	Build and Test; Zusammenbau und Test
BK	Brennkammer
BU	Bottom-Up
ByP	By-Pass; Nebenstromkanal
CAD	Computer Aided Design; Computergestütztes Konstruieren
CMC	Ceramic-Matrix-Composite; Keramik-Matrix Verbundwerkstoff
DIN	Deutsche Industrie Norm
DOC	Direct Operating Cost; direkte Betriebskosten
EIS	Entry Into Service
ESR	Electro Slag Remelting; Elektroschlacke Umschmelzverfahren
ESS	Engine Section Stator; Leitschaufeln im Modul Fan
FAA	Federal Aviation Administration
FOD	Foreign Object Damage; Fremdkörpereinwirkung
GEAE	General Electric Aircraft Engines
GPL	Generic Part List
HD	Hochdruck
HDT	Hochdruckturbine
HDV	Hochdruckverdichter
IMC	Intermediate Case; Zwischengehäuse
LA	Laufschaukel
LCF	Low Cycle Fatigue; Niederzyklische Ermüdung
LE	Leitschaufel
MDT	Mitteldruckturbine
MDV	Mitteldruckverdichter
MMC	Metall-Matrix-Composite; Metall-Matrix Verbundwerkstoff
Nac	Nacelle, Gondel
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Niederdruck
NDV	Niederdruckverdichter
NDT	Niederdruckturbine
Ni	Nickel
OEM	Original Equipment Manufacturer; Originalhersteller
OGV	Outlet Guided Vane; Leitschaufel des Moduls Fan
OPR	Overall Pressure Ratio; Gesamtdruckverhältnis
PMC	Polymer-Matrix-Composite; Polymer-Matrix Verbundwerkstoff
RAND	Research ANd Development

SaB	Shafts and Bearings; Wellen und Lager
SFC	Specific Fuel Consumption; spezifischer Treibstoffverbrauch
Stg	Stage; Stufe
TD	Top-Down
TEC	Turbine Exit Case; Turbinenauslaßgehäuse
Ti	Titan
TRL	Technology Readiness Level; Technologiereifegrad
TW	Triebwerk
VAR	Vacuum Arc Remelting; Vakuumlichtbogenumschmelzen
VB	Vertrauensbereich
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIM	Vacuum Induction Melting; Vakuuminduktionsschmelzen
VVK	Vertriebs- und Verwaltungskosten
VR	Vortex Reducer

**Formelzeichen**

$a_p$	Schnitttiefe	[mm]
$a_{xy}$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]
$a_{yx}$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]
$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$AV$	Wertschöpfungsfaktor	[€/kg]
$b_{xy}$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]
$b_{yx}$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]
$b_z$	Spanungsbreite	[mm]
$C$	Spanraumzahl	[-]
$D$	Durchmesser	[mm]
$D_a$	Außendurchmesser	[mm]
$D_i$	Innendurchmesser	[mm]
$f$	Vorschub	[mm]
$F$	Schub	[kN]
$F$	Prozentualer Faktor	[%]
$F_{tn}$	Prozentanteil Nebenzeit	[%]
$F_{Buy/Fly}$	Verhältnis des Rohteil- zum Halbzeug	[-]
$I$	Design Information	[-]
$K$	Kosten	[€]
$K_{aus}$	Ausschuss- bzw. Nachbearbeitungskosten	[€]
$K_E$	Elementenkosten	[€/kg]
$K_m$	Gemittelter Stundensatz	[€/h]
$K_M$	Maschinen-Stundensatz	[€/h]
$K_{Mat}$	Materialkosten	[€]
$K_{Scheibe\_Mat}$	Materialkosten einer Scheibe	[€]
$K_u$	Sonstige Nebenkosten	[€]
$K_{ver}$	Verbrauchsmittelkosten	[€]
$l$	Länge	[mm]
$l_{ax}$	Länge in axialer Richtung	[mm]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
$m$	Masse	[kg]
$m_{Buy}$	Gewicht des Halbzeug	[kg]
$m_{Fly}$	Gewicht des Fertigbauteils	[kg]
$m_{Roh}$	Bauteilgewicht im Rohzustand	[kg]
$n$	Laufvariable	[-]
$N$	Laufvariable	[-]
$N_{Charge}$	Teileanzahl einer Charge	[-]
$Nb$	Anzahl	[-]
$P$	Preis	[€]
$P_{Mat}$	Materialpreis	[€/kg]
$P_{Vor}$	Vortriebsleistung	[W]
$P_{Strahl}$	Strahlleistung	[W]
$Q$	Zeitspannungsvolumen	[mm <sup>3</sup> ]
$Q_x$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]
$Q_y$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]
$Q_{xy}$	Parameter zur Regressionsanalyse	[-]

---

$R_M$	Maschinenbetriebskosten je Zeiteinheit	[€/h]
$R_p$	Personalkosten je Zeiteinheit	[€/h]
$S_{x \cdot y}^2$	Restvarianz	[-]
$S_{y \cdot x}^2$	Restvarianz	[-]
$t$	Zeit	[h]
$t_{\text{bearb}}$	Bearbeitungszeit zur Durchführung versch. Fertigungsprozesse	[h]
$t_{\text{ein}}$	Einrichtungszeit von Maschinen und Werkzeug	[h]
$t_h$	Hauptzeit	[h]
$t_{\text{leer}}$	Leerlaufzeit, verursacht durch Be- und Entladung der Maschinen	[h]
$t_m$	Gemittelte Zeit	[h]
$t_{\text{min}}$	Minimale Teilung	[-]
$t_n$	Nebenzeit	[h]
$T$	Temperatur	[K]
$T_{\text{Bohr}}$	Bohrtiefe	[mm]
$T_{t4}$	Turbineneintrittstemperatur	[K]
$v$	Geschwindigkeit	[m/s]
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit	[m/s]
$v_f$	Vorschubgeschwindigkeit	[m/s]
$V$	Volumen	[mm <sup>3</sup> ]
$V_Z$	Zerspanvolumen	[mm <sup>3</sup> ]
$w_0$	Geschwindigkeit am Eintritt des Triebwerks	[m/s]
$w_9$	Geschwindigkeit am Austritt des Triebwerks	[m/s]
$x, y, z$	Weg-, Ortskoordinaten	[-,m]
$x$	unabhängige Variable	[-]
$X$	Einflussgröße	[-]
$Y$	Zielgröße	[-]
$z$	Determinierte Zähnezahl	[-]



**griechisch**

$\alpha_{xy}$	Achsenabschnitt auf der Abzisse	[-]
$\alpha_{yx}$	Achsenabschnitt auf der Ordinate	[-]
$\beta_{xy}$	Achsenabschnitt auf der Abzisse	[-]
$\beta_{yx}$	Achsenabschnitt auf der Ordinate	[-]
$\Delta$	Differenz	[-]
$\vartheta$	Nabenverhältnis	[-]
$\Pi$	Druckverhältnis	[-]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\hat{\sigma}$	Abweichung zwischen Zufallsvariablen und der zu erwartenden Funktion	[-]
$\omega$	Winkel	[°]



# Kurzfassung

Aufgrund einer wachsenden Internationalisierung nehmen die Dynamik und die Komplexität in den Märkten zu. Dies bedingt einen kontinuierlichen Wertewandel, bemerkbar durch eine stetige Zunahme der Innovationsdynamik und einem beschleunigten technologischen Wandel der Produkte. Eine Konsequenz dessen sind kürzere Produktlebenszyklen und Produktentwicklungszeiten, was die produzierenden Unternehmen bezüglich der Produktplanung vor erhebliche Herausforderungen stellt. Der Erfolg eines Produktes am Markt wird nicht zuletzt über dessen Verkaufspreis und somit indirekt über dessen Herstellungskosten bestimmt. Es ist daher von essenzieller Bedeutung, bereits in der Vorentwicklungsphase eines Produktes die Kosten zu ermitteln und somit langfristig die Planungsziele festlegen zu können.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Abschätzung der langfristigen produktionsbezogenen Planungsziele vorgestellt. Die Herausforderung bei der Produktionskostenbestimmung zukünftiger Technologien besteht in der zielführenden Vereinfachung der Komplexität der Einflussfaktoren bei gleichzeitig zufriedenstellender Genauigkeit der Kostenergebnisse.

An eine Methode zum Vergleich der Produktionskosten in der Vorauslegungsphase sind Anforderungen unterschiedlichster Art geknüpft. Zum einen soll die Methode dazu dienen, unterschiedliche Konzepte zum Zeitpunkt der Vorauslegung anhand der Produktionskosten abzuschätzen und zu vergleichen. Zum anderen soll sie als unterstützendes Werkzeug bei der Bewertung der Produktionskosten neuartiger gegenüber konventionellen Technologien dienen.

Die Produktionskosten setzen sich aus Material- und Fertigungskosten zusammen. Zur Abschätzung der Materialkosten wird ein Materialkosten-Modell entwickelt. Basis dieses Modells bildet die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe. Weiterhin wird der Wertschöpfungsprozess des Materials über die einzelnen Herstellverfahren analysiert, um die Materialkosten zu berechnen. Die Fertigungskosten beziehen sich auf die Fertigung der Bauteile beim OEM. Dazu werden die bauteilspezifischen Fertigungsschritte untersucht und die entsprechenden Kostenbestimmungsmethoden aufgestellt. Weiterhin soll das Modell neue Fertigungstechnologien sowie neuartige Materialien abbilden können.

Zur Abschätzung der Produktionskosten werden zwei Ansätze verfolgt und im Produktionskostenmodell abgebildet. Dabei handelt es sich um einen verfeinernden Ansatz, den sogenannten *Top-Down Ansatz* und einen aufbauenden Ansatz, den *Bottom-Up Ansatz*. Die dem Modell zu Grunde liegende Produktstruktur ist nach triebwerksauslegungsspezifischen Aspekten erstellt und gliedert sich von der Triebwerks-Ebene über die Modul-Ebene bis hin zur Bauteil-Ebene.

Anhand bekannter Triebwerksgeometrien der Triebwerke CFM56-5B6 und V2524-A5 wurden die Produktionskosten bestimmt. Beim Vergleich mit den angenommenen Produktionskosten liegen die Ergebnisse im Rahmen der geforderten Genauigkeit. Ebenso können die, für die unterschiedlichen Architekturen der Triebwerke, abgeleiteten Auslegungsparameter aus der Leistungsrechnung bestätigt werden. Es kann gesagt werden, dass das erstellte Produktionskosten-Modell die Abschätzung der Produktionskosten unterschiedlicher Triebwerkstechnologien und –architekturen bereits in der Vorentwicklungsphase erlaubt.

# Abstract

A growing internationalization increases the dynamics and complexity in the markets. This requires a continuous change of values, evidenced by the steady increase in the dynamics of innovation and an accelerated technological change of a product. The consequences are shorter product life cycles and product development times, which confront the manufacturing companies in their product planning with significant challenges.

The success of a product on the market is mainly driven by its sales price and thus indirectly determined by its production cost. It is therefore essential to identify already in the pre-development period the production cost and set the production cost-referred planning objectives.

A method is presented for the estimation of the production cost-referred planning objectives. The challenge by estimating production cost of future technologies exists in the simplification of the significant amount of parameters affecting cost while obtaining a satisfying accuracy of the cost results at the same time.

A method to compare the cost of production in the pre-development period is linked with various requirements. On the one hand the method will be used to evaluate different approaches at the time of the pre-development period based on the production cost. On the other hand it should serve as a supporting tool in the evaluation of new compared to conventional technologies.

The production cost consists of manufacturing and material cost. For the determination of the material cost factors a material cost model is developed. Basis of this model forms the chemical composition of the materials as well as the appropriate manufacturing process. Furthermore, the value chain process of the material on the different manufacturing process is analyzed to calculate the cost of materials. The production costs refer to the manufacturing of the construction units with the OEM. In addition, the component specific manufacturing steps are investigated and the appropriate cost regulation methods are set up. Further the model is able to represent new engine technologies, manufacturing processes and new materials.

To calculate the production cost, two approaches are pursued and implemented in the production model. This is a refining approach, the so-called *top-down approach* and a constructive approach, *bottom-up approach*.

The model of the underlying product structure is created after engine development specific aspects with a breakdown beginning from the engine level, down to the module and component level.

Based on known engine geometries of the CFM56-5B6 and V2524-A5 engines, the production costs were calculated. Comparing the calculated results with the estimated production costs, the achieved results are within the required accuracy. In addition, performance parameters derived from the different engine architectures can be mapped. It can be stated that the presented method to model production cost can be used to estimate the production cost of various engine technologies and architectures already in the pre-development period. Thus it is possible to draw conclusions on the production cost referred planning objectives of new products.

# 1 Einleitung

Die Bedeutung technologischer Innovationen nimmt stetig zu. Gleichzeitig kommt es zu Veränderungen des technologischen wie auch des Wettbewerbsumfeldes [85]. Dies stellt produzierende Unternehmen vor erhebliche Herausforderungen im Allgemeinen und insbesondere bezüglich der Planung von Technologien [98].

Durch die wachsende Internationalisierung nehmen die Dynamik und die Komplexität der Märkte zu. Eine Entwicklung der Märkte hin zu Kundenmärkten hat stattgefunden [39]. Der kontinuierliche Wertewandel führt zu einer stetigen Zunahme der Innovationsdynamik [39]. Die Konsequenz dessen sind kürzere Produktlebenszyklen und Produktentwicklungszeiten [119]. Dem beschleunigten technologischen Wandel, dem sich Unternehmen heute gegenüber sehen, werden sie nach [113] auch in Zukunft ausgesetzt sein.

Die Identifizierung des Bedarfs an neuen Technologien erst zu Beginn der Produktentwicklung führt meist zu einem verspäteten Markteintritt des Produktes und somit zu Wettbewerbsnachteilen [75]. Unternehmen müssen sich somit schon weitaus früher mit der Identifizierung des Bedarfs an neuen Technologien auseinandersetzen, um auf potenzielle zukünftige Entwicklungen vorbereitet zu sein. Dies ist die Aufgabe der Technologieplanung. Wie die Marktentwicklung verläuft auch die Planung nicht konstant oder linear. Eine Vielzahl möglicher Szenarien müssen in Betracht gezogen werden. Ziel eines Unternehmens sollte es somit sein, eine große Bandbreite an Handlungsoptionen und Technologien bzw. an Variationsmöglichkeiten frühzeitig zu untersuchen. Diese sollten so aufbereitet sein, dass sie zum Entwicklungsstart zur Verfügung stehen und als nutzbringende Innovationen umgesetzt werden können. Die Zunahme der interdisziplinären Aktivitäten durch Fachgebiete übergreifende Realisierung hat eine weitere Komplexitätserhöhung der Planung und der Technologieentwicklung bewirkt [1]. Die Erhöhung an Komplexität bedingt einen größeren Aufwand zur Erforschung und Entwicklung neuer Technologien. Dies äußert sich in steigenden Kosten. Gleichzeitig haben sich die Innovationszyklen sowie die veranschlagten Entwicklungszeiten verkürzt, und ein allgemeiner Trend zur Kostenreduktion ist in den Unternehmen zu beobachten. Für Unternehmen besteht die Notwendigkeit, Investitionen effektiver und effizienter einzusetzen, um dem steigenden Kostendruck entgegenzuwirken. Investitionen in neue Technologien zahlen sich jedoch nur aus, wenn sie:

- in Produkten und Prozessen eingesetzt werden und eine Innovation darstellen,
- zur Kostenreduktion des Produktes beitragen,
- leistungsfähigere Produkte ermöglichen
- oder zur Erschließung neuer Märkte führen,

d.h. wenn sie aus wirtschaftlicher Sicht Erfolg versprechen.

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses eines Triebwerks wird der Produktlebenszyklus betrachtet. Nach [65] gliedert sich dieser in sechs Phasen. Die Innovationsentscheidung, die vorläufige sowie die endgültige Konzeptdefinition und die Produktrealisierung bilden die Phasen 0 bis 3 des Produktlebenszykluses. Die Phasen 4 bis 6 umfassen die Produktion, den Betrieb und die Entsorgung des Triebwerks (Abb. 1-1). Die angesetzten Entwicklungszeiträume sind kurz. So sind nach [65] exemplarisch sechs Monate für die vorläufige Konzeptdefinitionsphase und lediglich weitere 27 Monate bis zum Produktionsstart zu nennen. Eine Verzögerung durch Produkt- und/oder der Kapazitätenänderungen würde zu erhöhten Kosten, einem verspäteten Markteintritt des Produktes und als weitere Konsequenz zu Wettbewerbsnachteilen führen. Um dies zu vermeiden, müssen bereits zu Beginn des Produktlebenszyklus entsprechende Vorbereitungen und Maßnahmen getroffen werden.

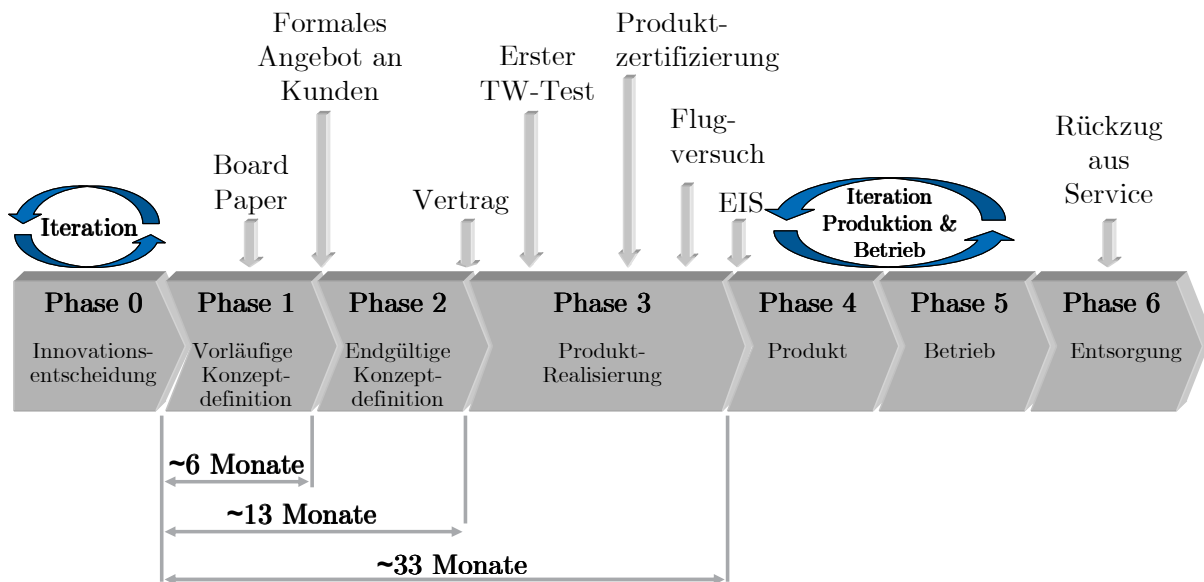


Abb. 1-1 Typischer Produktlebenszyklus eines Triebwerks [65]

Nach [54] muss zu Beginn der Produktentwicklung der technologische Reifegrad 6 (TRL 6: Technology Readiness Level 6) erreicht sein. Die von der NASA [68] entwickelten TRLs auf einer Skala von 1 bis 9, dienen der systematischen Bewertung des Entwicklungsstandes einer Technologie sowie dem konsistenten Vergleich des



Reifegrades verschiedener Technologien zueinander [28] [63]. Die Beschreibung der jeweiligen TRL-Stufen ist aus Abb. A-1 zu entnehmen.

Zur Identifizierung und Bewertung der für ein Unternehmen potenziell relevanten Technologien existieren verschiedene Methoden und Hilfsmittel. Ein wirksames Instrument, welches im Rahmen der Strategieplanung zum Einsatz kommt, stellt nach [122] der Technologiekalender dar. Der Technologiekalender dient einem Unternehmen zur systematischen Planung der zu fertigenden Produkte oder Produktkomponenten und der einzusetzenden Technologien [88]. Unter Berücksichtigung der Zielvorgaben werden die Abläufe der Planung für die Produkte, Produkt- und Produktionstechnologien festgelegt [122] (Abb. 1-2). Der Bedarf an Ressourcen für die Bereiche Forschung, Entwicklung, Produktion und Personal wird aus dem Technologiekalender abgeleitet. Anschließend werden der jeweilige Bedarf nach betriebswirtschaftlichen Aspekten in Kosten und Nutzen bewertet.

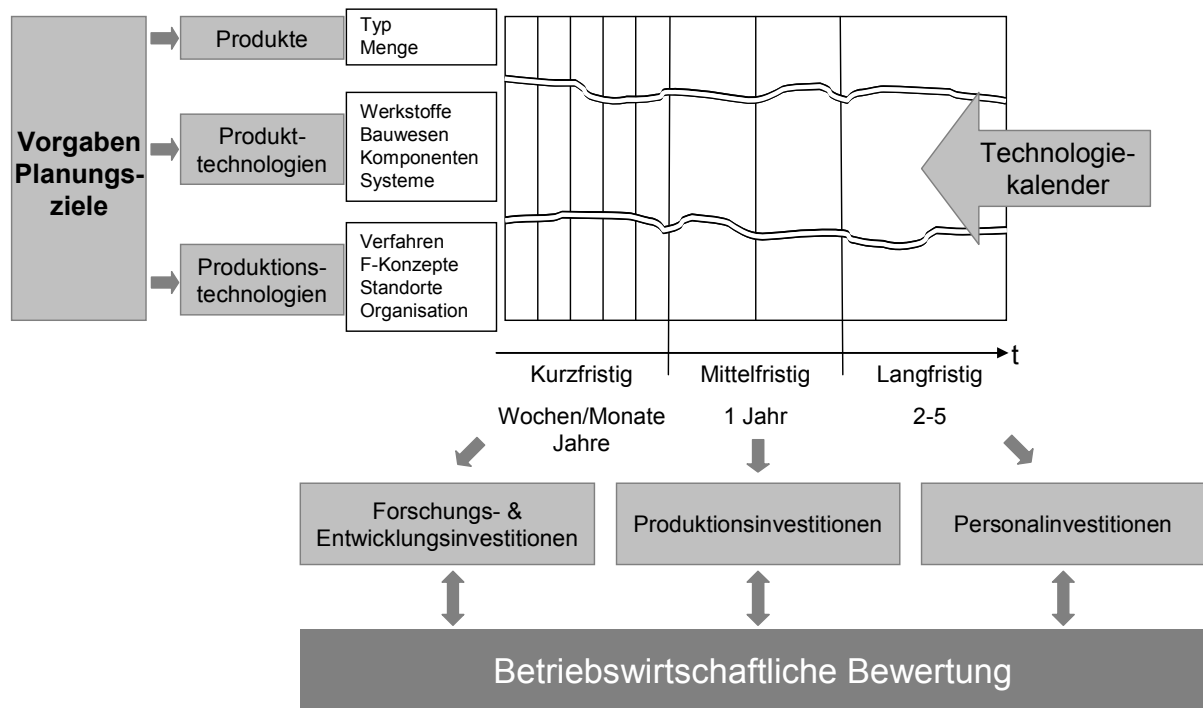


Abb. 1-2 Technologiekalender [122]

Zur Erstellung des Technologiekalenders ist die Formulierung von Planungszielen erforderlich. Planungsziele können technischer oder wirtschaftlicher Natur oder aber auch von ökologischen oder politischen Aspekten getrieben sein. Ein wichtiger Parameter bei der Entscheidungsfindung sind die Produktionskosten. Die Differenz aus dem im Markt erzielbaren Verkaufspreis und den Produktionskosten entspricht dem zu erwartenden Gewinn. Aus den so abgeleiteten Zielkosten müssen bereits in den frühen Entwicklungsphasen Zielkosten für Komponenten und Subkomponenten festgelegt werden.

Zur Ableitung der produktionskostenbezogenen langfristigen Planungsziele von zivilen Turboflugtriebwerken wird ein Modell zur Bestimmung der Produktionskosten benötigt, um unterschiedliche Technologien monetär bewerten und miteinander vergleichen zu können. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines solchen Modells. Das Modell soll unterschiedliche Triebwerkskonfigurationen, zukünftige Technologien und Produktionsprozesse sowie neuartige Materialien abbilden können. Gleichzeitig soll es den Ansprüchen der Vorauslegung genügen, d.h. es muss mit einer geringen Anzahl an Eingabeparametern anwendbar sein, da zu einem solch frühen Zeitpunkt der Produktentstehung nur wenige Informationen über das Produkt bekannt sind.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Grundlegende Überlegungen zu Produktionskosten

Im Folgenden wird ein Überblick über veröffentlichte Kostenabschätzungstechniken vorgestellt. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden und deren Eignung für verschiedene Aufgabenstellungen werden diskutiert. Anschließend wird mittels einer erstellten Regressionsanalyse die Notwendigkeit einer regelbasierten Kostenbestimmungsmethode zur Ableitung langfristiger Planungsziele verdeutlicht. Hieraus wird die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

#### 2.1.1 Überblick der Kostenabschätzungstechniken

Eine Vielzahl an verschiedenen Methoden zur Ermittlung der Produktionskosten ist in der Literatur beschrieben. Ihre Anwendung bezieht sich meist auf ein bestimmtes Stadium des Produktlebens. Mit fortschreitendem Entwicklungsstand nimmt die Anzahl der erforderlichen Eingabeparameter zu. Es existieren Methoden, die auf das gesamte System, komplexere Baugruppen und Module oder nur auf genauer spezifizierte Bauteile, wie z. B. Drehteile [86] angewandt werden können. Darüber hinaus existieren Methoden, die lediglich Teilaspekte der Produktionskosten, wie die Fertigungs- bzw. Materialkosten, sowie wiederum nur Teilaspekte dieser beiden Bereiche, betrachten.

Die Anwendung der meisten Methoden kann sowohl in Form des *Top-Down* und/oder des *Bottom-Up Ansatzes* erfolgen [120]. Beim *Top-Down Ansatz*, auch als retrograder Ansatz [125] bezeichnet, erfolgt die Kostenermittlung durch eine systematische Gliederung ausgehend vom Gesamtsystem bis hin zur untersten Gliederungsebene.

Der Prozess beim *Bottom-Up Ansatz* (progressiver Ansatz) beginnt mit der kostenbezogenen Bewertung von Produktmerkmalen, um dann schrittweise, in den übergeordneten Ebenen, zu immer größeren Einheiten zusammengefasst zu werden.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass charakteristische Eigenschaften berücksichtigt werden, so dass ihr Einfluss auf das Endergebnis nachvollzogen werden kann. Weiterhin können einzelne Aspekte, wie z. B. der Einsatz und die Auswirkung neuer Materialien oder Fertigungsprozesse isoliert untersucht werden. Dieser Ansatz

ermöglicht also eine detaillierte Kalkulation der Kosten. Grundvoraussetzung für diesen Ansatz ist das Vorhandensein der Produktdaten in der benötigten Qualität. Je detaillierter die Struktur, umso größer ist der Zeitaufwand für das Zusammentragen und Aufbereiten der Daten. Als weiterer Nachteil ist zu nennen, dass die benötigten Daten oft erst nach Fertigstellung des Produktes vorliegen [77] [128].

### 2.1.2 Klassifizierung der Kostenermittlungsmethoden

In der Literatur finden sich unterschiedliche Klassifizierung der Methoden wieder, da die Vielzahl an spezifischen Anforderungen an die jeweiligen Kostenermittlungsmethoden keine einheitliche Einteilungen erlaubt [87] [104] [124] [128]. Die nachfolgend vorgestellte Klassifizierung orientiert sich an dem Ansatz von Niazi et al. [69]. Im Gegensatz zu anderen Gliederungsansätzen ist diese Klassifizierung allgemein gehalten und ermöglicht dadurch eine umfangreiche Übersicht der existierenden Kostenermittlungsmethoden.

Eine erste Differenzierung der Kostenermittlungsmethoden erfolgt über die Einteilung in qualitative und quantitative Methoden (Abb. 2-1).

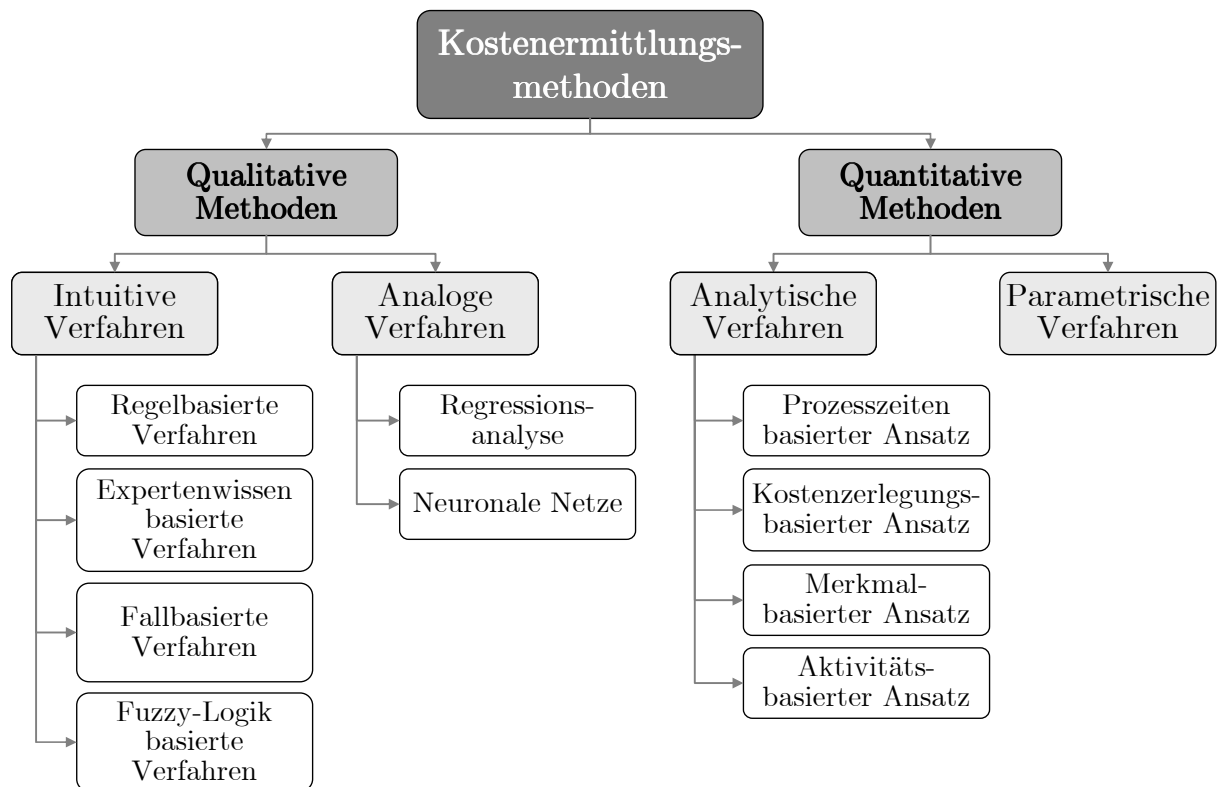


Abb. 2-1 Einteilung der Techniken zur Bestimmung der Produktionskosten [69]

### **2.1.2.1 Qualitative Methoden**

Unter qualitativen, oder auch komparativen, Methoden, werden Techniken zusammengefasst, die auf einem Kostenvergleich bereits existierender, ähnlicher Produkte und/oder auf Expertenwissen, und somit auf Erfahrung, basieren [7]. Bei den auf Expertenwissen beruhenden Methoden, den sogenannten *intuitiven* Verfahren, werden die gewonnenen Erfahrungen aus bereits hergestellten Produkten sowie das Expertenwissen systematisch in Regeln oder Entscheidungsbäumen hinterlegt [96]. Zu den intuitiven Verfahren werden z. B. die fallbasierte Abschätzung [78] [128], die regelbasierte Abschätzung [69] sowie die auf der Fuzzy-Logik basierende Abschätzung [91] [94] [120] gezählt.

Kostenabschätzungstechniken mittels *Analogien* erfolgen meist mit Hilfe von Regressionsanalysen oder unter Verwendung Neuronaler Netze. Beide Techniken basieren auf einer umfangreichen Datengrundlage ähnlicher, bereits hergestellter Produkte. Bei Neuronalen Netzen werden diese mit Hilfe der Datenbasis so “trainiert“, dass kostenrelevante Eigenschaften identifiziert und zur Ermittlung der Produktionskosten auf neue Produkte angewendet werden können.

Die Kostenprognosen mit Hilfe Neuronaler Netze erweisen sich als deutlich genauer im Vergleich zur Regressionsanalyse, da auch unstetige Abhängigkeiten abgebildet werden können. Jedoch sind sowohl die Programmierung, als auch die Handhabung Neuronaler Netze sehr aufwendig [64] [120] [124].

Die lineare Regression ermöglicht in kurzer Zeit qualitative Aussagen über die Datengrundlage zu erhalten. Sie wird angewandt, um einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder bzw. mehreren unabhängigen Variablen herzustellen. Ziel bei diesem statistischen Analyseverfahren ist es, den Korrelationsfaktor von Kosten zu Variablen zu ermitteln, um diesen dann auf das neue Produkt anzuwenden. So können z. B. über das Gewicht [70], das verwendete Material [16] oder über den Schub die Kosten des neuen Triebwerks abgeleitet werden (siehe Kap.2.1.3).

### **2.1.2.2 Quantitative Methoden**

Kennzeichnend für die quantitativen Methoden ist, dass sie auf einer detaillierten und systematischen Analyse des Produktdesigns, der Produktelemente und/oder der Produktionsprozesse basieren. Sie zeichnen sich durch eine höhere Genauigkeit der Kostenabschätzung gegenüber den qualitativen Methoden aus. Allerdings erfordern sie eine detaillierte Kenntnis des Produktes und seiner Fertigungsprozesse. Dies führt dazu, dass ihr Anwendungsbereich fast ausschließlich auf die Endphase der Konstruktion beschränkt ist. Die quantitativen Verfahren, auch als generative [87] [120] [123] oder kalkulatorische Verfahren [104] bezeichneten Techniken, gliedern sich in parametrische und analytische Verfahren.

### **Parametrische Verfahren**

Bei der parametrischen Kostenermittlung werden zunächst die Kostentreiber des Produktes identifiziert. Dazu wird eine Datenbasis ähnlicher, bereits existierender Produkte benötigt. Diese Daten werden zuvor normiert, der Inflationsentwicklung angepasst und eventuell mit einer Lernkurve korrigiert. Anschließend wird mit Hilfe statistischer Verfahren eine Funktion zur Kostenbestimmung in Abhängigkeit eines bzw. mehrerer kostentreibender Parameter ermittelt [127]. Parameter dieser Funktion können z. B. die Anzahl der Teile, das Gewicht, geometrische Abmaße, Leistungsparameter, aber auch andere kostenbeeinflussende Größen sein [76]. Parametrische Verfahren eignen sich für Kostenabschätzung von Derivaten, also Weiterentwicklungen bereits bekannter Produkte. Da sie nur wenige Produktangaben benötigen, können sie bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Entwicklung angewendet werden. Die Ungenauigkeit der ermittelten Kostenprognosen liegt nach [47] bei  $\pm 30\%$ , was als akzeptabel eingestuft wird [47].

Als nachteilig erweist sich bei dieser Abschätzungsmethode, dass keine Kostenaussagen zu neuen Technologien getroffen werden können, da die ermittelten Kostenfunktionen auf Produkt- bzw. Bauteilähnlichkeit basieren. Weiterhin ist, wie bei den qualitativen Verfahren, eine umfangreiche Anzahl an Daten ähnlicher, bereits gefertigter Produkte vonnöten, um belastbare Ergebnisse zu gewährleisten. Hierbei ist anzumerken, dass die Annahme der Produktähnlichkeit, von neuem zu bereits hergestelltem Produkt, ein gewisses Fehlerrisiko birgt [87]. Das Zusammentragen und Aufbereiten dieser Daten sowie die Aufstellung der Kostenfunktion erweist sich in der Praxis meist als aufwendig.

### **Analytische Verfahren**

Die Berechnung der Kosten über analytische Verfahren erfolgt in drei Schritten:

1. Zerlegung des Produktes in kleinere Einheiten bis hin zu einzelnen Elementen.
2. Kostenermittlung der Einheiten bzw. Einzelelementen.
3. Aufsummierung der Kosten der Einheiten bzw. Einzelelementen zu den Gesamtkosten.

Für die Anwendung analytischer Verfahren werden Angaben zu Personalaufwand, Löhne, Prozesse, Maschinenpark, Versicherungsprämien und Steuern, um nur einige zu nennen, benötigt. Kostendaten über ähnliche, bereits gefertigte Produkte sind nicht erforderlich. Die Methode eignet sich hauptsächlich für die letzten Phasen des Produktentwicklungsprozesses, da für die Gliederung des Produktes entsprechend detaillierte Pläne vorhanden sein müssen. Die systematische Gliederung des Produktes und seiner Komponenten kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen.

So kann eine Aufteilung nach Merkmalen, Fertigungsprozessen bzw. Kostentypen vorgenommen werden. Je nach Gliederungskriterium existieren entsprechende analytische Abschätzungsansätze: die prozesszeiten-, die kostenzerlegungs-, merkmals- und aktivitätsbasierende Abschätzung [69] [97] [120].

#### *Der prozesszeitenbasierende Ansatz*

Der auf prozesszeitenbasierende Ansatz zählt zu den ältesten Vorgehensweisen zur Ermittlung der Produktionskosten. Zunächst werden bei diesem analytischen Ansatz die Produktionskosten in Material- und Fertigungskosten zerlegt.

Die Fertigungskosten ergeben sich als Produkt von Betriebskosten der Maschine pro Zeiteinheit und der Fertigungszeit. Letztere setzt sich aus der tatsächlichen Bearbeitungszeit, der Zeit zur Einrichtung des Produktionsprozesses und der Leerlaufzeit zusammen. Die Leerlaufzeit setzt sich aus Be- und Entladevorgängen, Handhabung und Wartung der eingesetzten Maschinen zusammen.

Für die Berechnung der Materialkosten werden werkstoffspezifische Parameter wie Dichte und Materialkostenrate sowie das Rohteilvolumen benötigt. Zahlreiche in der Literatur beschriebene Kostenbestimmungsmethoden dieses Typs sind für spezifische Produktionsverfahren ausgelegt. Beispielfhaft zu nennen sind Methoden für die Kostenbestimmung von Drehteilen [9] oder für Bauteile, die durch zerspanende Verfahren hergestellt werden [13] [121].

#### *Der merkmalsbasierende Ansatz*

Bei diesem Ansatz werden die Kosten eines Produktes über dessen charakteristische Merkmale ermittelt [71] [130]. Merkmale können spezifische Produktionsprozesse, Materialien oder Konstruktionen sein. Der merkmalsbasierende Ansatz bedarf einer klaren, konsequenten und einheitlichen Abgrenzung der Merkmale. Bei der getrennten Betrachtung der Merkmale werden Einflüsse, die sich aus den gegenseitigen Wechselwirkungen untereinander ergeben, nicht berücksichtigt. Die Wechselwirkungen müssen daher separat berücksichtigt werden.

### **2.1.3 Kostenabschätzungsmethoden für Luftfahrtantriebe**

#### ***2.1.3.1 Informationsbasiertes Modell***

Ein auf der Informationstheorie basierendes Modell wurde von Shannon [93] erstellt und im Hause Rolls-Royce plc. untersucht. Bei diesem für Flugtriebwerke entwickelten Modell wird angenommen, dass sich die Kosten eines Produktes proportional zu der Informationsmenge seiner Bauteilzeichnungen verhalten [16]. Dabei wird jedes Bauteil durch die Bemaßungen und den jeweiligen Toleranzangaben, wie in Gl. 2-1 dargestellt, beschrieben [47].

$$I = \sum_{k=1}^N \log_2 \left( \frac{\text{Maß}_k}{\text{Toleranz}_k} \right) \quad \text{Gl. 2-1}$$

Dabei wird I als „Design Information“ bezeichnet. Berücksichtigung finden neben den reinen Geometrieangaben auch Zeichnungsangaben mit Fertigungsrelevanz, wie z. B. Angaben zur Wärmebehandlung. Anschließend können über eine Regressionsanalyse und den „Bit String“ der „Design Information“ die Produktionskosten ermittelt werden [46]. Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist zum einen, dass entsprechende Zeichnungen und Kostenangaben zur Verfügung stehen und zum anderen eine präzise Einteilung der Bauteile in exakte und eng begrenzte Kategorien vorliegt.

#### **Vorteile:**

Diese Methode der parametrischen Produktionskostenvorhersage, basierend auf der Informationstheorie, besitzt eine hohe Genauigkeit, insbesondere dann wenn eine differenzierte Aufteilung der Bauteile vorgenommen wurde und eine große Datenbank an bereits hergestellten Bauteilen zur Verfügung steht [16]. Weiterhin zeichnet sich diese Methode durch ihre einfache Anwendung und eine schnelle Auswertung unterschiedlicher Designoptionen aus. Expertenwissen ist nicht erforderlich.

#### **Nachteile:**

Zur Anwendung dieser Methode der Produktionskostenbestimmung ist ein hoher Informationsgrad des Produktes nötig, der meist erst mit der fertigen Bauteilzeichnung zur Verfügung steht. Auch gestaltet sich die Analyse der Produkte bezüglich des Zusammenhangs von Informationsmenge und Kosten als äußerst aufwändig und sollte direkt in das CAD-System integriert werden. Aus diesen Gründen finden Kostenmethoden dieser Art erst gegen Ende der Konstruktionsphase Verwendung.

Der Einfluss der jeweiligen Fertigungsverfahren auf die Kosten wird bei dieser Methode nicht berücksichtigt. Ebenso können keine Rückschlüsse auf den Einfluss der Materialauswahl auf die Kosten gezogen werden.

#### **2.1.3.2 Komparatives Modell unter Einsatz künstlicher Intelligenz**

Das von GE Aircraft Engines (GEAE) entwickelte Assistant Cost Estimator Program (ACE) basiert auf einem vergleichenden Ansatz. Grundlage bilden die Produktionskosten und -informationen, die in einer Datenbank hinterlegt sind. Über einen Algorithmus wird das Produkt ausgewählt, welches die größte Ähnlichkeit mit dem neuen Produkt aufweist [7]. Die Kostenermittlung erfolgt für einzelne Triebwerksteile getrennt, um anschließend die Gesamtkosten über die



Aufsummierung der Einzelkosten zu erhalten. Dazu werden die Dateninformationen, wie Material- und Fertigungskosten, der bereits existierenden Produkte, systematisch in Kategorien und Subkategorien in der Datenbank (GPL) gespeichert. Abweichungen zwischen neuem und ähnlichem Produkt werden gespeichert. Die Produktionskosten des neuen Teils werden dann, ausgehend von den Produktionskosten des Vergleichsteils, über einen entsprechenden Algorithmus berechnet. Dabei finden die zuvor festgestellten Abweichungen bei der Aufstellung des jeweiligen Algorithmus Berücksichtigung. Wird z. B. eine Turbinenschaufel mit ähnlichen Eigenschaften gefunden, welche kürzer ist als die neue Schaufel, so wird dieser Unterschied in der Länge durch parametrische Gleichungen ausgeglichen.

**Vorteile:**

Auf Grund des vergleichenden Ansatzes zur Kostenermittlung, mit bereits hergestellten Produkten, können die Kosten schnell abgeschätzt werden. Die Identifikation des ähnlichsten Produktes erfolgt durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz und konnte auf Grund dessen so automatisiert werden, dass sich das Modell für Optimierungszwecke sowie für Design-to-Cost-Schleifen eignet. Der Detaillierungsgrad der Produktdesignbetrachtung, der diesem Modell zu Grunde liegt, ist laut [7] ausreichend, um eine gute Abschätzung der Kosten zu erzielen.

**Nachteile:**

Die Genauigkeit der Kostenermittlung dieser Methode hängt stark von drei Faktoren ab:

1. *Größe der Datenbank*

Je mehr Daten in der Datenbank hinterlegt sind, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit ein ähnliches Bauteil zu finden.

2. *Produktvielfalt*

Die Vielfalt an verschiedenen Produktausführungen sollte möglichst groß sein, um unterschiedliche Designvarianten abzudecken.

3. *Güte der Algorithmen*

Die Güte der Gleichung zur Anpassung der Produktionskosten des bereits existierenden Bauteils an das neue Teil hat einen gravierenden Einfluss auf die Genauigkeit der Kostenermittlung.

Zudem erweist sich die Implementierung des Modells als aufwendig und erfordert Expertenwissen. Weiterhin ist als nachteilig einzustufen, dass neue Technologien nur grob kostenspezifisch bewertet werden können. Auch kann dieser Modellansatz nur sinnvoll angewandt werden, wenn die Produktgeometrie bekannt ist. Für

Kostenbetrachtung zum Zeitpunkt der Vorauslegung eignet sich dieses Modell somit nicht.

### ***2.1.3.3 Analytisches Modell auf Basis des Herstellungsprozesses***

Ein mehrdimensionaler Optimierungsansatz bezüglich des Designs von Hochdruckturbinenscheiben wurde an der Universität Southampton in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce plc. und BAE Systems plc. entwickelt [77].

Berücksichtigung bei der Optimierung des Designs finden bei diesem Modell neben den Produktionskosten auch das Gewicht, die Ermüdungsfestigkeit sowie die mechanische Belastbarkeit der Scheibe. Dazu werden zunächst Geometriedaten und spezifische Eigenschaften aus dem CAD-Modell des Produktes ermittelt und geeignete Fertigungsprozesse ausgewählt.

Zur Gewährleistung einer automatischen Optimierung sind Innen- und Außendurchmesser der Turbinenscheibe vorzugeben, da diese Parameter durch die Aerodynamik und den Durchmesser der Niederdruckwelle festgelegt sind. Über weitere Parameter wird die Geometrie der Scheibe beschrieben. Diese können innerhalb vorgegebener Grenzen verändert werden, so dass unterschiedliche Designvarianten entstehen. Jedes mögliche Design wird dann bezüglich Produktionskosten, Lebensdauer und Festigkeit untersucht. Zwischen allen Designs, die die benötigte Festigkeit und die erwünschte Lebensdauer aufweisen, wird mit Hilfe einer Pareto-Analyse das optimale Design bezüglich der Produktionskosten und dem Gewicht ermittelt.

Die Produktionskosten der Scheiben werden über Gl. 2-2 bestimmt. Die Beschreibung der Parameter ist in Tab. 2-1 aufgeführt. Zur Berechnung der Prozesszeiten werden Angaben über das zu entfernende Volumen, der geforderten Oberflächengüte sowie eine Datenbank der Maschinen- und Prozessparameter benötigt.

$$K_{\text{Scheibe}} = (R_P + R_M) \cdot \left( \frac{t_{\text{ein}}}{N_{\text{Charge}}} + t_{\text{leer}} + t_{\text{bearb}} \right) + K_{\text{Mat}} + K_{\text{aus}} + K_{\text{ver}} + K_{\text{u}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Zu den Fertigungskosten werden zudem noch die Materialkosten  $K_{\text{Mat}}$ , die Ausschuss- bzw. Nachbearbeitungskosten  $K_{\text{aus}}$ , die Verbrauchsmittelkosten  $K_{\text{ver}}$  (z. B. für Schmiermittel) und sonstige Nebenkosten  $K_{\text{u}}$  addiert.

Parameter	Benennung und Beschreibung
$K_{\text{Scheibe}}$	Produktionskosten Scheiben
$K_{\text{Mat}}$	Materialkosten
$K_{\text{aus}}$	Ausschuss- bzw. Nachbearbeitungskosten
$K_{\text{ver}}$	Verbrauchsmittelkosten
$K_{\text{u}}$	Sonstige Nebenkosten
$R_{\text{p}}$	Personalkosten je Zeiteinheit
$R_{\text{M}}$	Maschinenbetriebskosten je Zeiteinheit
$N_{\text{Charge}}$	Teileanzahl einer Charge
$t_{\text{ein}}$	Einrichtungszeit von Maschinen und Werkzeug
$t_{\text{leer}}$	Leerlaufzeit, verursacht durch Be- und Entladung der Maschinen
$t_{\text{bearb}}$	Bearbeitungszeit zur Durchführung verschiedener Fertigungsprozesse

**Tab. 2-1 Analytisches Modell: Verwendete Parameter**

### **Vorteile:**

Das Modell eignet sich zur Designoptimierung von Hochdruckturbinenscheiben. Auf Grundlage von CAD-Modellen können schnelle und automatisierte Kostenabschätzungen vorgenommen werden. Die hohe Anzahl an Eingabeparametern erlaubt eine detaillierte Kostenbestimmung.

Zudem ermöglicht die Berücksichtigung der Fertigungskosten eine höhere Genauigkeit als Kostenmethoden, bei denen keine Fertigungsprozesse in die Berechnung mit einfließen. Dateninformationen über bereits hergestellte, ähnliche Produkte sind für die Anwendung dieser Methode nicht erforderlich.

### **Nachteile:**

Umfangreiche Prozessdaten, wie Schnittgeschwindigkeiten, Vorschub, Personalkosten etc., sind erforderlich. Um die Genauigkeit der Abschätzung zu erhöhen, sollten diese Informationen für die jeweiligen sich im Einsatz befindlichen Maschinen und Anlagen vorliegen. Da die Berechnung auf Basis eines CAD-Modells erfolgt, ist die Anwendung dieser analytischen Methode während der Vorentwicklung nicht möglich.

#### **2.1.3.4 Gewichtsbasierendes Modell**

Eine weit verbreitete und häufig angewandete Methode zur Abschätzung der Triebwerkskosten ist die auf dem Gewicht basierende Methode. Nur eine geringe Anzahl an Produktinformationen werden bei diesem einfachen parametrischen Ansatz benötigt [7] [87].

Basierend auf Daten ähnlicher vorhandener Triebwerke wird eine Regressionsanalyse durchgeführt, um die Korrelation zwischen Triebwerksgewicht und Gesamtkosten

aufzustellen. Diese wird dann zur Ermittlung der Kosten auf das Gewicht, des in der Entwicklung befindlichen Triebwerks gleichen Typs, angewandt.

Zur Gewichtsabschätzung des zukünftigen Triebwerks kann das Gewicht in einem ersten Schritt für die einzelnen Triebwerkskomponenten ermittelt werden. Dies ermöglicht die Bestimmung des Komponentengewichts basierend auf den für die Komponente charakteristischen Parametern. Dies können z. B. sein: die Temperatur, das Material oder das Nebenverhältnis [73]. In einem zweiten Schritt erfolgt die Aufsummierung der Komponentengewichte zum Triebwerksgesamtgewicht.

Ausgehend von diesem Kostenbestimmungsansatzes haben sich weitere Ansätze entwickelt, die zusätzlich zum Gewicht weitere kostentreibende Parameter einbeziehen. Im Auftrag der US Air Force wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem das Gewicht mit einem materialspezifischen Faktor, dem sogenannten Maurer Faktor, multipliziert wird [57]. Diese Methode wurde später erweitert, um den Einfluss der Triebwerksleistungsparameter zu berücksichtigen. Ein typischer Parameter der Leistungsrechnung stellt z. B. die Turbineneintrittstemperatur dar.

Die von der RAND Corporation aufgestellte Methode zur Bestimmung der Produktionskosten basiert auf drei Parametern: der Turbineneintrittstemperatur, dem Trockengewicht und dem maximalen Schub. Da diese Methode für die US Air Force entwickelt wurde, basiert sie auf Daten militärischer Triebwerke [128].

Der parametrische Ansatz wurde ebenfalls bei dem kommerziellen Kostenabschätzungsprogramm PRICE H [87] verfolgt. Als primärer Kostentreiber wird das Gewicht verwendet und die Kosten mit Hilfe weiterer Parameter, wie z. B. dem Material angepasst [16] [17].

### **Vorteile:**

Gewichtsbasierende Kostenbestimmungsmethoden sind schnell und einfach durchführbar. Sie können bereits in der Vorentwicklung angewandt werden, da nur eine geringe Anzahl an Eingabegrößen notwendig ist. Durch die Berücksichtigung weiterer Parameter lässt sich die Genauigkeit der Abschätzung erhöhen, so dass laut [70] "akzeptable" Kostenprognosen resultieren.

### **Nachteile:**

Voraussetzung für die Nutzung gewichtsbasierender Methoden ist eine Datenbasis bereits existierender Produkte, um eine vertrauenswürdige Regression zwischen Gewicht und Kosten aufstellen zu können. Angesichts der zum Einsatz kommenden Fertigungsprozesse zur Herstellung eines Triebwerks, stellen diese Methoden eine sehr starke Vereinfachung dar, insbesondere wenn ausschließlich das Gewicht als kostentreibender Parameter in die Kostenbetrachtung aufgenommen wird [7]. Werden zusätzliche Parameter mitberücksichtigt, so steigt der Aufwand zur Bestimmung der Korrelation deutlich. Neue Technologien, Fertigungsprozesse und Materialien können

mit dieser Methode kostenmäßig nicht erfasst werden. Zudem verleitet dieses Modell zu der Annahme, dass Kosteneinsparung vornehmlich mit der Reduzierung an Gewicht einhergeht und leichtere Bauteile günstiger zu produzieren sind. Dies ist im Allgemeinen nicht der Fall, da konstruktive Ausführungen zur Gewichtseinsparung möglicherweise aufwendiger zu fertigen sind und somit höhere Kosten verursachen.

#### 2.1.4 Erste Untersuchungen mit Hilfe der Regressionsanalyse

Vor diesem Hintergrund wurden unterschiedliche Triebwerksfamilien untersucht, um im Vorfeld zu überprüfen, ob es sinnvoll ist eine regelbasierte Methode zur Bestimmung der Produktionskosten von Turboflugtriebwerken zu entwickeln, die es ermöglicht langfristige Planungsziele abzuleiten. Dazu wurden die Korrelationen von Listenpreis zu Schub bekannter Triebwerke mittels einer Regressionsanalyse untersucht.

Bei der Regressionsanalyse handelt es sich um ein statistisches Verfahren, um funktionale Zusammenhänge zwischen unabhängigen Variablen  $x$  und einer abhängigen Variablen  $y$  herzustellen. Dabei handelt es sich bei der Zielgröße  $Y$  um eine Zufallsvariable. Folgende Annahmen gelten für die Abweichungen  $\hat{\sigma}$  zwischen Zufallsvariablen und der zu erwartenden Funktion:

- entsprechen einer Normalverteilung,
- haben den Mittelwert Null,
- weisen eine einheitliche Varianz auf.

Die folgenden Gleichungen basieren auf den Berechnungsgrundlagen in [81]. Ändert sich der Wert  $x$  der Einflussgröße  $X$  so ändert sich der Wert  $y$  der Zielgröße  $Y$  ebenfalls. Die Änderung von  $y$  kann mit Gl. 2-3 ermittelt werden.

$$y = a_{yx} + b_{yx} x \quad \text{Gl. 2-3}$$

Für die Regressionsgerade  $Y$  auf  $X$  (bzw.  $X$  auf  $Y$ ) gilt:

$$E(Y|X = x) = \alpha_{yx} + \beta_{yx} \cdot x \quad \text{Gl. 2-4}$$

Wobei:  $\alpha_{yx}$  = Achsenabschnitt auf der Ordinate  
 $\beta_{yx}$  = Regressionskoeffizient

Zur Bestimmung der Parameter  $\alpha_{yx}$  und  $\beta_{yx}$  werden Gl. 2-5 bis Gl. 2-8 herangezogen. Sie gelten für ein Vertrauens-Bereich von 95% (95%-VB).

$$95\%-VB \text{ f\u00fcr } \alpha_{yx}: \quad a_{yx} \pm t_{n-2;0,05} \sqrt{\frac{s_{y \cdot x}^2 \cdot \sum X^2}{nQ_x}} \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$95\%-VB \text{ f\u00fcr } \beta_{yx}: \quad b_{yx} \pm t_{n-2;0,05} \sqrt{\frac{s_{y \cdot x}^2 \cdot \sum X^2}{Q_x}} \quad \text{Gl. 2-6}$$

$$95\%-VB \text{ f\u00fcr } \alpha_{xy}: \quad a_{xy} \pm t_{n-2;0,05} \sqrt{\frac{s_{x \cdot y}^2 \cdot \sum y^2}{nQ_y}} \quad \text{Gl. 2-7}$$

$$95\%-VB \text{ f\u00fcr } \beta_{xy}: \quad b_{xy} \pm t_{n-2;0,05} \sqrt{\frac{s_{x \cdot y}^2 \cdot \sum y^2}{Q_y}} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Dabei werden  $s_{y \cdot x}^2$  und  $s_{x \cdot y}^2$  als Restvarianzen bezeichnet. Sie stellen die Streuungen um die Regressionsgeraden dar. Die Restvarianzen f\u00fcr den 95%-VB werden \u00fcber Gl. 2-9 bis Gl. 2-10 bestimmt:

$$\frac{s_{y \cdot x}^2}{k_u} \leq \sigma_{y \cdot x}^2 \leq \frac{s_{y \cdot x}^2}{k_o} \quad \text{Gl. 2-9} \quad \frac{s_{x \cdot y}^2}{k_u} \leq \sigma_{x \cdot y}^2 \leq \frac{s_{x \cdot y}^2}{k_o} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Die Werte  $k_u$  und  $k_o$  sind f\u00fcr  $\nu = n - 2$  aus [81] Tabelle A9 zu entnehmen. Die Berechnung der Restvarianzen erfolgt \u00fcber Gl. 2-11 bzw. Gl. 2-12:

$$s_{y \cdot x}^2 = \frac{Q_y - \frac{(Q_{xy})^2}{Q_x}}{n-2} \quad \text{Gl. 2-11} \quad s_{x \cdot y}^2 = \frac{Q_x - \frac{(Q_{xy})^2}{Q_y}}{n-2} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Die Berechnung der Restvarianzen k\u00f6nnen mit Hilfe von Gl. 2-13 bis Gl. 2-15 ermittelt werden:

$$Q_x = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \quad \text{Gl. 2-13} \quad Q_y = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \text{Gl. 2-14}$$

$$Q_{xy} = \sum xy - \frac{(\sum X)(\sum y)}{n} \quad \text{Gl. 2-15}$$

und Gl. 2-16 bis Gl. 2-19:

$$b_{yx} = \frac{Q_{xy}}{Q_x} \quad \text{Gl. 2-16} \quad a_{yx} = \frac{\sum y - b_{yx} \sum x}{n} \quad \text{Gl. 2-17}$$

$$b_{xy} = \frac{Q_{xy}}{Q_y} \quad \text{Gl. 2-18} \quad a_{xy} = \frac{\sum x - b_{xy} \sum y}{n} \quad \text{Gl. 2-19}$$

Ein 95%-VB für die Regressionsgerade lässt sich schätzen über Gl. 2-20 und Gl. 2-21:

$$y = (a_{yx} \pm D) + b_{yx}x \quad \text{mit } D = s_{y \cdot x} t_{v;0,05}, \quad v = n - 2 \quad \text{Gl. 2-20}$$

$$x = (a_{xy} \pm D) + b_{xy}y \quad \text{mit } D = s_{x \cdot y} t_{v;0,05}, \quad v = n - 2 \quad \text{Gl. 2-21}$$

Nach Anwendung der zuvor genannten Gleichungen auf Listenpreis und Schub der unterschiedlichen Triebwerke können die Kosten pro Pfund Schub bestimmt werden. Es ergibt sich ein Wert von 185 \$/lbf für die Triebwerke der Schubklasse von 20.000 bis 40.000 Pfund Schub und 180 \$/lbf für die Schubklasse von 50.000 bis 100.000 Pfund Schub. Somit können die folgenden Aussagen getroffen werden (Abb. 2-2):

- Die Ergebnisse der Kostenangaben in US-\$ pro Pfund Schub sind ungenau.
- Eine Differenzierung in Material- und Fertigungskosten ist nicht möglich.
- Eine Bewertung neuer Technologien ist nicht möglich.

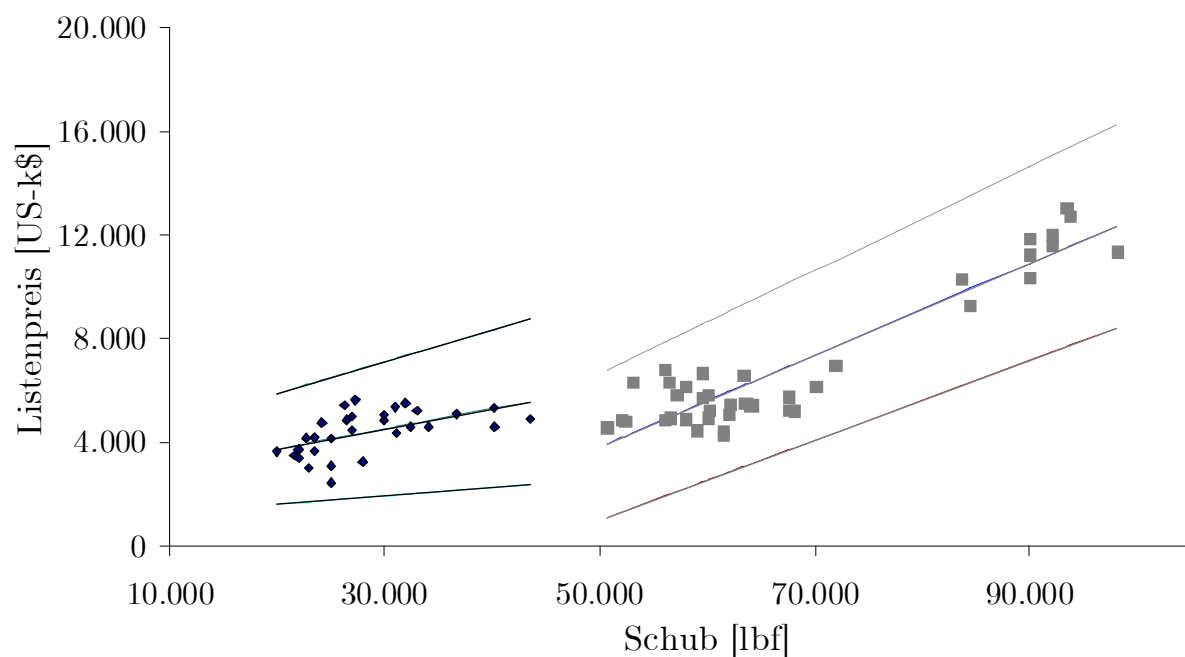


Abb. 2-2 Regressionsanalyse – Triebwerksschub über Triebwerksgewicht

An dieser Stelle wird deutlich, dass einfache Regressionsanalysen für eine Kostenschätzung im Rahmen der Vorentwicklung zwar eine Orientierung geben können, aber für die Planung der Technologiebereitstellung und somit der Aufgaben vor der eigentlichen Produktentwicklung nicht geeignet sind. Sehr detaillierte Verfahren wie in [69] [97] [120] und [127] beschrieben sind jedoch zu aufwendig. Diese in der Literatur beschriebenen Methoden eignen sich nur eingeschränkt zur Ableitung der kostenbezogenen Planungsziele.

## 2.2 Aufgabenstellung

An eine Methode zum Vergleich der Produktionskosten in der Vorauslegungsphase sind Anforderungen unterschiedlichster Art geknüpft. Zum einen soll die Methode dazu dienen, unterschiedliche Konzepte zum Zeitpunkt der Vorauslegung anhand der Produktionskosten abzuschätzen und zu vergleichen. Zum anderen soll sie als unterstützendes Werkzeug bei der Bewertung der Produktionskosten neuartiger gegenüber konventioneller Technologien dienen. So wird in einem frühen Stadium der Entwicklung, an dem nur geringe Information über das zukünftige Produkt bekannt sind, eine Abschätzung der Kosten möglich. Zum Zeitpunkt der Vorauslegung sind meist nur Daten der Leistungsrechnung (Schub, erforderliches Druckverhältnis, max. Treibstoffverbrauch) sowie eingeschränkte Kenntnisse der Architektur, Geometrie oder Materialien festgelegt. Somit muss mit einer geringen Anzahl an bekannten Eingangsgrößen eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht werden. Neue Technologien sowie Fertigungsverfahren und neuartige Materialien müssen abgebildet und abgeschätzt werden. Dies erfordert eine gut durchdachte Produktstruktur, die gegebenenfalls eine Erweiterung der Methode in der Zukunft leicht ermöglicht. Praxisrelevant sind neben der Adaptierbarkeit der Methode auch eine leichte Handhabung und die Anpassung der sich ändernden Kostenfaktoren.

Die Anforderungen an die Methode zum Vergleich der Produktionskosten in der Vorauslegung sind:

- kurze Berechnungszeiten,
- leicht handhabbar,
- wartungsfreundlich,
- zufriedenstellende Genauigkeit,
- adaptierbar,
- erweiterbar,
- modulare Produktstruktur.

Das Modell soll keine Absolutkosten vorhersagen, sondern als vergleichendes Hilfsmittel bei der Bewertung unterschiedlicher Technologien dienen. Ziel ist es eine fundierte Methodik zu erstellen, die Kostentendenzen berechnet und je nach



---

Detailierungsgrad des Kenntnisstandes über das Produkt anwendbar ist. Das Modell soll primär mit einer möglichst geringen Anzahl an Dateninformationen Kosten bestimmen können. Dennoch sollte es die Möglichkeit bieten, mit fortschreitendem Informationsgrad, weitere Eingabeparameter bei der Kostenberechnung zu berücksichtigen. Die zuvor festgelegten Anforderungen entsprechen den Anforderungen, die an ein Modell zum Zeitpunkt der Vorentwicklung gestellt werden, da zu diesem Zeitpunkt nur sehr geringe Dateninformationen bekannt sind.



# 3 Modellbildung

## 3.1 Begriffe und Definitionen

### **Kosten**

Kosten werden in der Betriebswirtschaftslehre als der in Geldeinheiten bewertete Verbrauch von Wirtschaftsgütern und Dienstleistungen, welche zur Erstellung der betrieblichen Leistungen verwendet werden, definiert. Unter Gütern und Dienstleistungen werden nach VDI 2234 [117] Material, Betriebsmittel, Betriebseinrichtungen und Energie sowie menschliche Arbeit, Information und Kapitalnutzung verstanden [117]. Die genaue Definition von Kosten lautet nach DIN89a:

*Kosten sind der in Geld bewertete Verzehr von Produktionsfaktoren und Fremdleistungen sowie öffentlichen Abgaben zum Erstellen und zum Absetzen von Gütern und/oder Diensten.*

### **Wertschöpfung**

Der Einsatz von Gütern im Sinne der betrieblichen Leistungserstellung hat die Produktion eines Objektes und/oder das Erbringen von Dienstleistungen zum Ziel. Dabei wird meist ein Mehrwert durch die Kombination der verwendeten Rohstoffe, der erbrachten Arbeitsleistung und sonstiger Ressourcen der vorhandenen Güter erreicht. Die Erzeugung dieses Mehrwerts, bei der Durchführung von Prozessen oder einzelner Prozessaktivitäten und dem damit entstehenden höheren Wert gegenüber der Summe der Werte der Einsatzfaktoren, wird im Allgemeinen als Wertschöpfung (engl.: Added Value) definiert. Die Wertschöpfung entsteht bei der Erschaffung, Weiterverarbeitung oder beim Handeln von vorhandenen Gütern in Güter mit höherem Nutzen und damit höherem Geldwert. Die Steigerung des Güterwerts durch die Weiterverarbeitung der Güter erfolgt innerhalb des Unternehmens [27]. Die Höhe der Wertschöpfung entspricht somit der Differenz des gesamten Produktionswertes abzüglich der empfangenen Vorleistungen [38] [66]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind vor allem die durch die Produktion verursachten Kosten und deren Wertschöpfung von Interesse.

### **Produktionskosten**

Produktionskosten, auch Herstellkosten genannt, setzen sich nach [59] aus der Summe von Material- und Fertigungskosten zusammen (Gl. 3-1).

$$\text{Produktionskosten} = \text{Materialkosten} + \text{Fertigungskosten} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Darüber hinaus fallen bei der Produktion Kosten an, die nicht in direktem Zusammenhang mit der Produktherstellung gebracht werden können, wie z. B. Verwaltungskosten. Diese Kosten werden in Unternehmen mit den Herstellkosten zu den Selbstkosten zusammengefasst. In dieser Arbeit wird auf die Selbstkosten nicht weiter eingegangen. Unter der Annahme, dass die Selbstkosten von der Technologie unabhängig sind, können sie beim Vergleich verschiedener Technologien vernachlässigt werden.

### **Materialkosten**

Die Materialkosten sind nach VDI 2234 [117] definiert als die Kosten die durch Beschaffung, Lagerung und Verbrauch von Materialien im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung entstehen. Sie werden weiter unterteilt in:

#### *Materialkosten*

Sie umfassen die Kosten für Rohstoffe und Zulieferteile und bilden einen wesentlichen Bestandteil der Produktionskosten.

#### *Hilfsstoffkosten*

Hierzu zählen die Kosten von Reinigungsmaterial, Anstrichfarbe und Verpackungsmaterial. Diese Kosten spielen jedoch eine untergeordnete Rolle, die eine genaue Erfassung nicht rechtfertigt [117]. Die Berücksichtigung dieser Kosten erfolgt in der Regel durch pauschale prozentuale Zuschläge.

#### *Betriebsstoffkosten*

Zur Versorgung von Maschinen werden Betriebsstoffe wie elektrische Energie, Schmier- und Kühlmittelstoffe benötigt. Diese Kosten fließen über Maschinenstundensätze in die Kalkulation mit ein.

### **Fertigungskosten**

Die Fertigungskosten setzen sich aus den Fertigungs-Gemeinkosten und den Lohnkosten zusammen [59]. Dies führt Gl. 3-1 in Gl. 3-2 über:

$$\begin{aligned} \text{Produktionskosten} &= \text{Materialkosten} + \text{Fertigungs Gemeinkosten} \\ &+ \text{Fertigungslohnkosten} \end{aligned} \quad \text{Gl. 3-2}$$

Dabei werden unter Fertigungs-Gemeinkosten die Kosten verstanden, die während der Fertigung anfallen, sich jedoch nicht einem Produkt direkt zuordnen lassen. Dies können z. B. Kosten für Miete, Heizung, Energie usw. sein, VDI 2225 [116]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Fertigungs-Gemeinkosten nicht weiter berücksichtigt, da sie als technologieunabhängig angenommen und somit bei einem Kostenvergleich vernachlässigt werden.

Kosten, die für Arbeiten direkt am Produkt anfallen, werden als Fertigungslohnkosten definiert, VDI 2225 [116]. Dies sind z. B. die Kosten für die Bearbeitung der Einzelteile durch Fertigungsschritte wie Drehen, aber auch die Kosten, die für den Zusammenbau eines Produktes anfallen.

### **Maschinenstundensatz**

Im Maschinenstundensatz sind alle maschinenbezogenen Kosten enthalten. Dies sind z. B. kalkulatorische Abschreibungen, Instandhaltungskosten und Schmiermittelkosten [117].

### **Arbeitsstundensatz**

Der Arbeitsstundensatz ist die Summe aus Maschinenstundensatz und dem Lohn für das Bedienungspersonal je Stunde [117].

## **3.2 Produktionskosten beeinflussende Faktoren**

Bei näherer Betrachtung der Produktionskosten ist festzustellen, dass diese von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst werden, wie in Abb. 3-1 dargestellt. Diese sind nach [61] in drei Bereiche gegliedert, die sich teilweise überschneiden. Die drei Bereiche sind:

- Entwicklung, Konstruktion, Produktplanung, Projektierung, Vertrieb
- Produktion
- Einkauf, Materialwirtschaft, Logistik

Zusätzlich wirken sich die Kapitalausstattung des Unternehmens, gesetzliche Rahmenbedingungen und der Markt auf die Produktionskosten aus. Bedingt durch die Anzahl der Einflussgrößen, stellt die zu beherrschende Komplexität die Herausforderung bei der Modellierung von Produktionskosten dar. Insbesondere da die Produktionskosten stark mit den gegebenen Rahmenbedingungen, wie z. B. Standort, Hersteller und Fertigungsphilosophie, variieren.

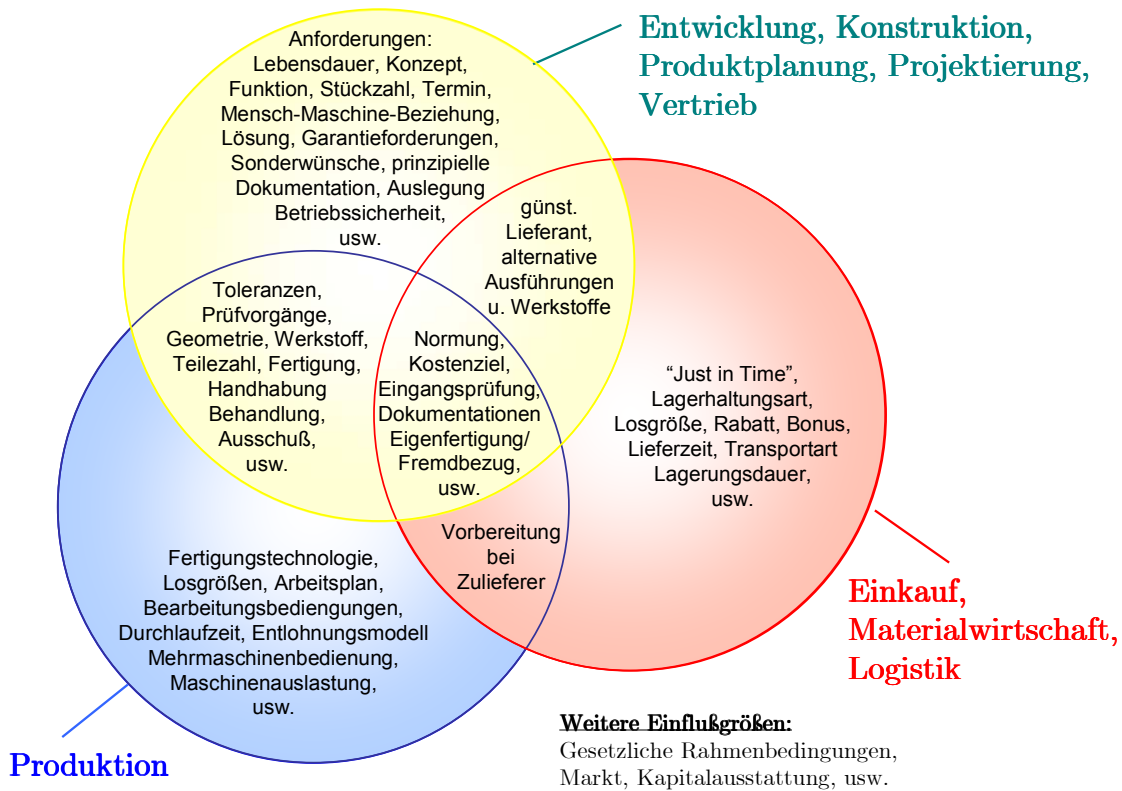


Abb. 3-1 Beispiele für Einflussgrößen auf Herstellkosten [61]

Dies wird am Beispiel der Entstehung einer Triebwerksscheibe aus Titan verdeutlicht. In Abb. 3-2 sind die Kosten für die Herstellung der Titanscheibe über die einzelnen Produktionsschritte in Prozent aufgetragen.

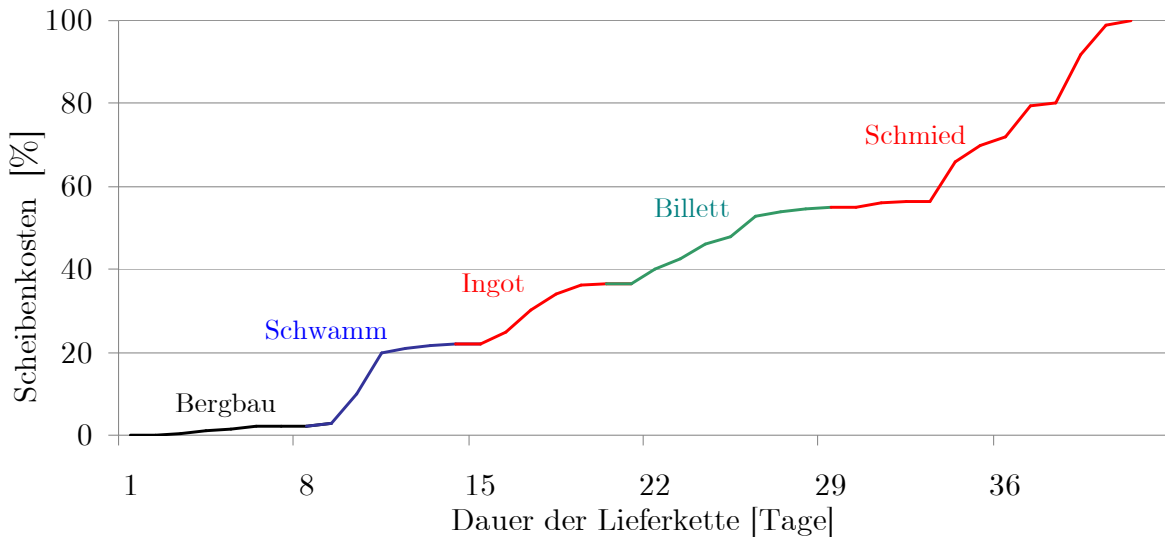


Abb. 3-2 Zulieferkette einer Scheibe aus Titan [99]

Dieses Beispiel zeigt, dass die Wertschöpfung bereits mit der Erzgewinnung beginnt, also zu einem Zeitpunkt an dem noch nicht definiert ist, dass das Endprodukt eine Triebwerksscheibe sein wird. Dies wirft die Fragestellung auf, ab welchem Zeitpunkt

die Herstellung der Triebwerksscheibe beginnt. Insbesondere bei einer kostenvergleichenden Methode ist es von elementarer Bedeutung, zu wissen, ob die Kostenkalkulation eines Produktes, bei der Erzeugung, beim Halbzeug oder erst beim Hersteller (OEM) beginnt, um eine sinnvolle Bewertung und Vergleichsgrundlage der Ergebnisse zu erhalten.

### 3.3 Definition der Annahmen

Ein Modell zur Abschätzung der Produktionskosten, welches zum einen die zahlreichen Einflussfaktoren als Eingangsgrößen sowie unterschiedliche Strukturen an Zulieferketten berücksichtigt, würde zu einem gewaltigen, kaum handhabbaren und zeitintensiven Modell führen, da für jeden einzelnen Parameter genaue Dateninformationen benötigt würden. Das Sammeln und Verwalten der Eingangsfaktoren würde eine anspruchsvolle Datenverwaltung und -betreuung, verbunden mit einem immensen Zeitaufwand bedingen. Die Berücksichtigung aller Faktoren würde zum anderen zu einer Aufsummierung der Ungenauigkeiten der Eingangsdaten führen, ohne eine höhere Qualität der Kostenabschätzung zu ermöglichen. Ein Großteil dieser Faktoren ist zum Zeitpunkt der Vorauslegung zudem nicht bekannt.

Aus diesen Gründen ist eine sinnvolle Reduzierung der Komplexität von elementarer Bedeutung, um den Anforderungen eines Modells zur Abschätzung der Produktionskosten in der Vorauslegung gerecht zu werden. Die Herausforderung hierbei ist, die Anzahl der Eingangsfaktoren derart zu verringern, dass eine leichte Handhabung des Modells in einem zufriedenstellenden Zeitrahmen ermöglicht und gleichzeitig eine hohe Genauigkeit der Kostenabschätzung gewährleistet wird. Somit wurden in einem ersten Schritt folgende Annahmen getroffen und Festlegungen dem Modell zu Grunde gelegt.

#### 3.3.1 Detaillierte Berechnung und grobe Abschätzung

Zum Zeitpunkt der Vorauslegung ist nur ein geringer Teil der Produktinformationen verfügbar. So existieren zu diesem Zeitpunkt bereits Vorentwürfe der wesentlichen Modulbauteile. Unter wesentlichen Modulen werden Module, die in den Kompetenzbereich des Herstellers fallen und Einfluss auf die Kosten haben, verstanden. Dies sind bei Triebwerksherstellern die Module des Kerntriebwerks bestehend aus den Turbomaschinen, wie Verdichter und Turbinen sowie der Brennkammer. Bauteile wie z. B. die Triebwerksgondel oder Pylon werden meist nicht vom Triebwerkshersteller selbst gefertigt. Informationen über diese Produkte, insbesondere kostenrelevante Informationen, stehen dem Triebwerkshersteller somit nur unzureichend zur Verfügung. Um dennoch die Gesamttriebwerkskosten bestimmen zu können, muss sich die Kostenmethode aus einer detaillierten

Kostenberechnung der bekannten wesentlichen Bauteile und einer groben Abschätzung der Kosten der unbekanntesten Bauteile zusammensetzen. Die Reduktion der kostenspezifisch zu erfassenden Bauteile ist in Abb. 3-3 dargestellt.

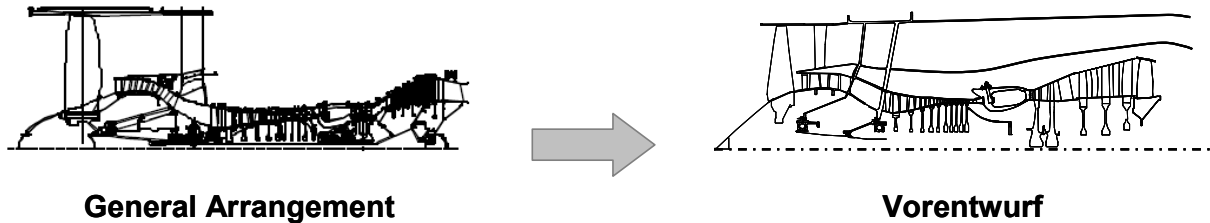


Abb. 3-3 Informationsstand bei Produktfertigstellung im Vergleich zum Vorentwurf

### 3.3.2 Definition der Systemgrenzen

Im Sinne der Komplexitätsreduktion werden die individuell gestalteten Zulieferketten und Fertigungsrouten für ähnliche Bauteile im Folgenden als fix und somit als vorgegeben betrachtet. Weitere Faktoren, die für die Kostenbestimmungsmethode als vorgegeben angenommen werden, sind:

- Maschinenpark
- Fertigungsstrasse
- Zulieferkette
- Materialversorgung
- Technologieniveau
- Werkzeuge, Einspannvorrichtungen, CNC Programme...
- Kostenniveau der Löhne
- Auslastung der Wertschöpfungskette

Folge dieser Annahmen ist, dass die Herstellrouten für die jeweiligen Bauteile festgelegt sind. So durchläuft z. B. der Scheibenrohling bis zu seiner Fertigstellung stets dieselben zuvor definierten Prozesse in der Zulieferkette und innerhalb der internen Fertigung beim OEM.

Einerseits führt dies zu einer starken Restriktion der Wertschöpfungskette, andererseits wird die geforderte Komplexitätsreduzierung durch die Verringerung der Einflussgrößen erreicht. Diese Annahme ermöglicht eine Vergleichsbasis, um unterschiedliche Triebwerkskonfigurationen bezüglich ihrer Produktionskosten zu bewerten. Hierbei wird zwischen zwei Arten von Bauteilen unterschieden, die in die Fertigung des OEM gelangen: Halbzeuge und Einkaufsteile. Unter *Halbzeugen* werden Bauteile verstanden, die im Weiteren einen Fertigstellungsprozess beim OEM durchlaufen. Halbzeuge sind z. B. geschmiedete Rohlinge für Scheiben und Gehäuse. Als *Einkaufsteile* werden Bauteile bezeichnet, die fertig eingekauft werden und keiner weiteren Bearbeitung in der Fabrik des OEMs bedürfen. Dazu zählen Bauteile wie



z. B. Dichtungen und Lager. Schaufeln werden bei der Kostenbestimmungsmethode ebenfalls als Einkaufsteile gehandhabt. Somit sind die Grenzen des im Weiteren näher betrachteten Systems "Referenz-Fabrik" festgelegt. Dies ist in Abb. 3-4 verdeutlicht.

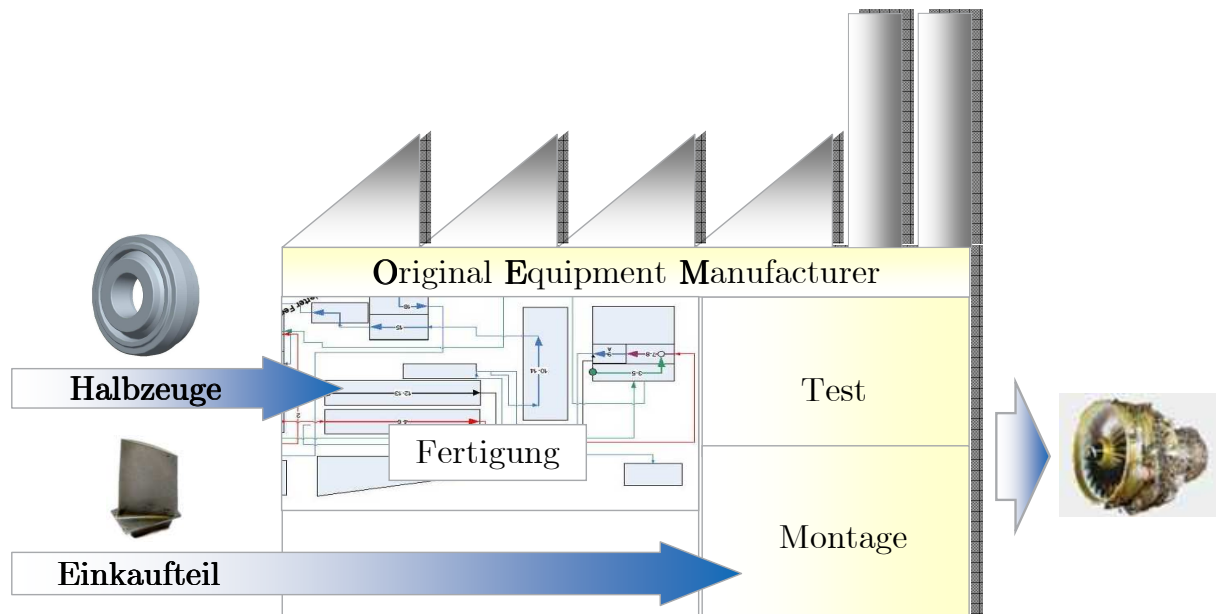


Abb. 3-4 Die Referenz-Fabrik

### 3.3.3 Betrachtung der direkten Kosten

Jegliche Kosten, welche den Produktionskosten nicht direkt zugeordnet werden können, wie z. B. Verwaltungskosten, Mieten, Abschreibungen der Maschinen u. ä., aber auch Lohnkosten sind technologieunabhängig. Sie sind bei einem produktionskostenspezifischen Vergleich verschiedener Technologien vernachlässigbar.

### 3.3.4 Produkt- bzw. Kostenstruktur

Unter Produktstruktur wird nach [31] die Dekomposition eines komplexen Systems in Komponenten, die stets individuell weiter in Subkomponenten zerlegt werden, verstanden. Dies führt zu kleinen überschaubaren Einheiten, die zur Übersichtlichkeit des Gesamtproduktes beitragen. Die Gliederung des Produktes in kleinere Einheiten ermöglicht dessen Komplexität zu beherrschen. Somit ist die Festlegung einer gut durchdachten Produktstruktur bei komplexen Aufgaben, wie die vergleichende Methode zur Produktionskostenbestimmung von Triebwerken, von essenzieller Bedeutung. Entsprechend dem Strukturierungsprinzip kann eine Unterscheidung der Sichten z. B. in objekt- und funktionsorientierte Strukturen, aber auch nach Arbeitspaketen oder zeitlichem Ablauf erfolgen, siehe [49] [51] und [95].

Bei einem objektorientierten Ansatz wird davon ausgegangen, dass ein komplexes Produkt sich aus einer Vielzahl an Subkomponenten zusammensetzt, die als Baugruppen zusammengefasst werden können [12]. Die Baugruppen setzen sich

zusammen aus den einzelnen Bauteilen, die die nächste Hierarchieebene bilden [72]. Die weitere Zerlegung dieser physikalischen Strukturen in die charakteristische Merkmale des Bauteils, sogenannte Features, und in die Parametrisierung der Features, der sogenannten Sub-Features ist in [108] am Beispiel eines Verdichtertorsors visualisiert (Abb. 3-5). Als Feature wurde in diesem Kontext die Definition von [14] übernommen. Nach dieser Definition wird unter einem Feature ein Bauteil oder Objekt verstanden, das aus der definierenden Geometrie und den zugehörigen Eigenschaften besteht. Die Modellierung der Geometrie innerhalb der Feature erfolgt mit Hilfe von Primitivobjekten. Sie stellen die niedrigste Hierarchieebene dar.

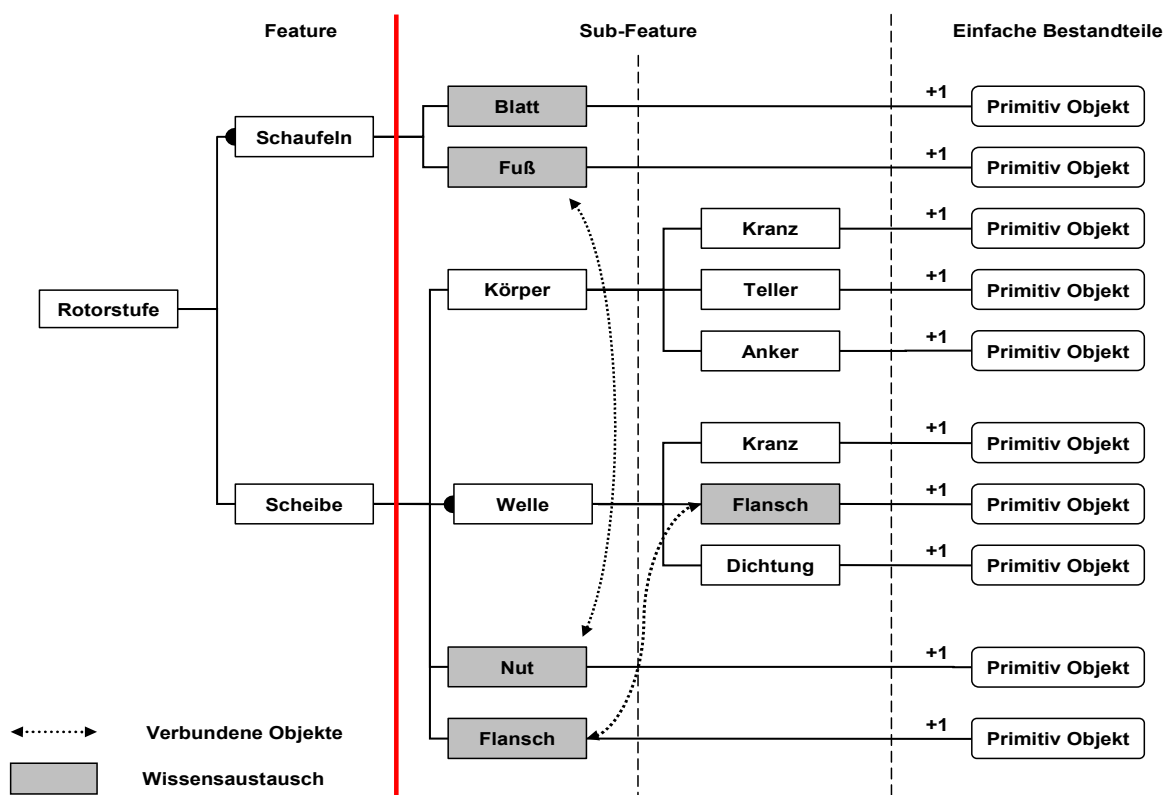


Abb. 3-5 Featurestruktur eines Verdichtertorsors [108]

Eine ähnliche Hierarchieeinteilung ist [50] zu entnehmen. Bei dieser Einteilung wird zusätzlich die Zwischenhierarchieebene "Cluster" eingeführt. Unter einem Cluster wird die Bildung einer Einheit von logisch zusammenhängenden Features verstanden.

Die Produktkostenstruktur für die vorgeschlagene Methode wurde von der in [108] erstellten Struktur abgeleitet, für die Kostenbestimmungsmethode modifiziert und im Sinne der Vorauslegung abstrahiert. Ein Detaillierungsgrad bis zum Primitivobjekt bedingt Dateninformationen, welche zum Zeitpunkt der Vorauslegung meist nicht bekannt sind. Auf die Aufweitung bis hin zur Stückliste wurde, auch aus den zuvor genannten Gründen der Komplexitätsreduzierung, bewusst verzichtet.

Die Struktur der Methode ist dem modularen Charakter eines Triebwerks angepasst und entspricht somit der konstruktiven Triebwerksgliederung. Sie weist die Grundzüge einer objektorientierten Produktstruktur auf und kann Abb. 3-6 entnommen werden. Sie setzt sich aus drei Ebenen zusammen. Die erste Ebene, die Produktebene, bildet das Endprodukt Triebwerk ab. Sie setzt sich aus den Baugruppen (Modulen) der zweiten Ebene zusammen. Die Baugruppen entsprechen dem modularen Aufbau des Triebwerks in Fan, Verdichtern, Brennkammer, Turbinen usw. aber auch Prozessschritte, wie Montage, werden als Baugruppe zusammengefasst und der zweiten Ebene zugeordnet. Die dritte Ebene ist die Bauteilebene. So lässt sich z. B. die Baugruppe Niederdruckverdichter in die Bauteile Leit- und Laufschaufeln, Scheibe und Gehäuse zerlegen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass Bauteile gleicher Art in mehreren Baugruppen verbaut werden. Schaufeln werden sowohl für die Erstellung von Nieder- und Hochdruckverdichter (NDV und HDV) sowie für Nieder- und Hochdruckturbinen (NDT und HDT) benötigt. Der objektorientierte Ansatz der Produktstruktur ermöglicht durch den modularen Charakter nach dem Baukastenprinzip die Modellierung beliebiger Triebwerkskonfigurationen.

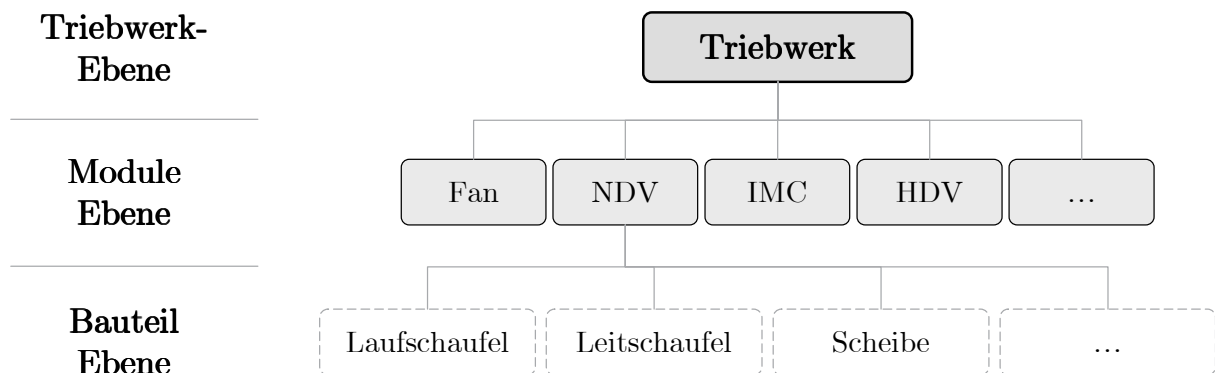


Abb. 3-6 Ausschnitt der definierten Produktstruktur der Methode [4]

### 3.3.5 Die ABC-Analyse

Die ABC-Analyse, auch als Pareto-Analyse bezeichnet [131], wird in diesem Zusammenhang herangezogen, um eine Klassifizierung der Teile bezüglich ihres kostentreibenden Einflusses vorzunehmen. Ziel ist es, die Hauptkostentreiber zu identifizieren. Dabei werden drei Klassen unterschieden, die nach absteigendem Kosteneinfluss geordnet sind. Teile der Klasse A bilden somit den größten Anteil an den Herstellkosten. B-Teile tragen zu einem mittleren und C-Teile nur zu einem geringfügigen Anteil bei. Standardwerte der Klasseneinteilung sind nach [27]:

Klasse A	5% der Teile bilden	75% der Kosten
Klasse B	20% der Teile bilden	20% der Kosten
Klasse C	75% der Teile bilden	5% der Kosten

Eine Vereinfachung der ABC-Analyse stellt die 90/10-Regel (bzw. 80/20-Regel) dar [114]. Sie besagt, dass 10% (20%) der gesamten Bauteile bereits für 90% (80%) der Gesamtkosten verantwortlich sind. Durch die Anwendung der ABC-Analyse wird eine weitere Reduzierung der Modellkomplexität erreicht [6] [114].

Zur Identifizierung der Bauteile der Klassen A und B werden die Bauteilgewichte der Turbomaschinen des E<sup>3</sup>-Triebwerkes untersucht [36] [37]. Die Bauteilgewichte der jeweiligen Turbomaschinenmodule sind in Abb. 3-7 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Summe der Bauteilgewichte des Gehäuses, der Scheiben inklusive der Scheibenarme, der Lauf- und der Leitschaufeln der Turbomaschinenmodule mindestens 87% des jeweiligen Modulgesamtgewichts entsprechen. Diese Aussage wird von [21] bestätigt.

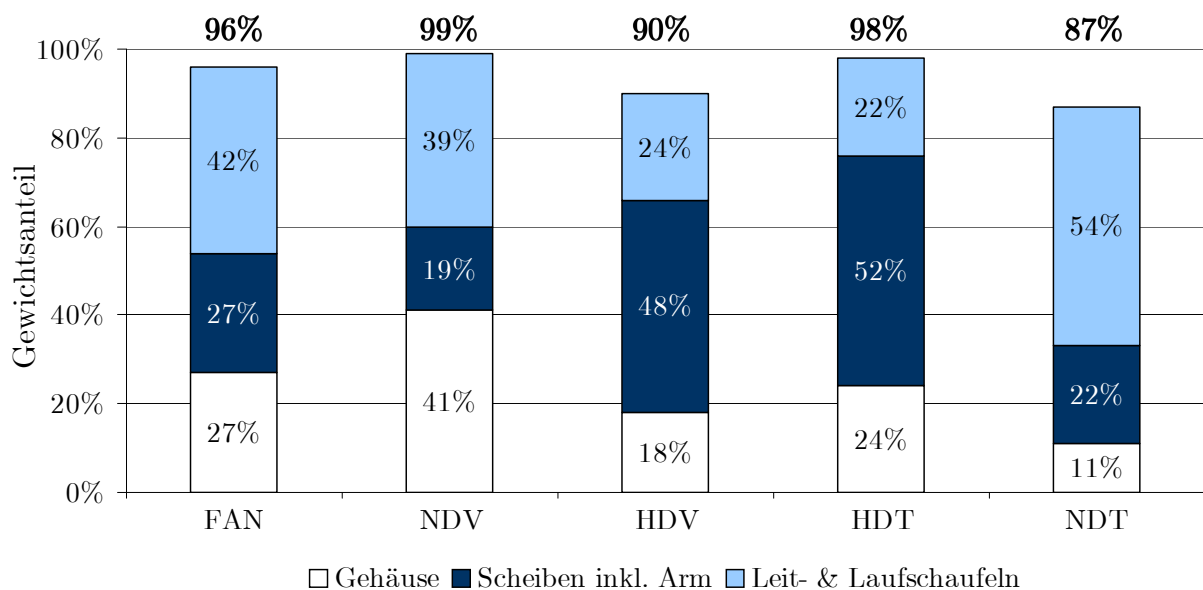


Abb. 3-7 ABC-Analyse der Bauteilgewichte des E<sup>3</sup>-TW

Nicht in Abb. 3-7 dargestellt sind Bauteile, die der Klasse C zugeordnet werden können. Dabei handelt es sich beim Modul Fan um den Spinner mit einem Gewichtsanteil von 2%, das Rückhaltsystem der Fan-Schaufeln (1%) und Fertigformteile wie Schrauben, Bolzen, Muttern und Leitungen (1%). Beim Hochdruckverdichter setzen sich die restlichen 10% aus dem Verstellmechanismus der vorderen Schaufelreihen (4%), dem Kühlluftkanal der 7. Stufe (2%) und den Fertigformteilen (4%) zusammen. Bei der Niederdruckturbine zählen zu den Bauteilen der Kategorie C die Dichtungen der Niederdruckturbine (7%) und Fertigformteile (6%). Beispielhaft sind in Abb. 3-8 die der Kategorie C zugeordneten Bauteile für die Niederdruckturbine hervorgehoben.

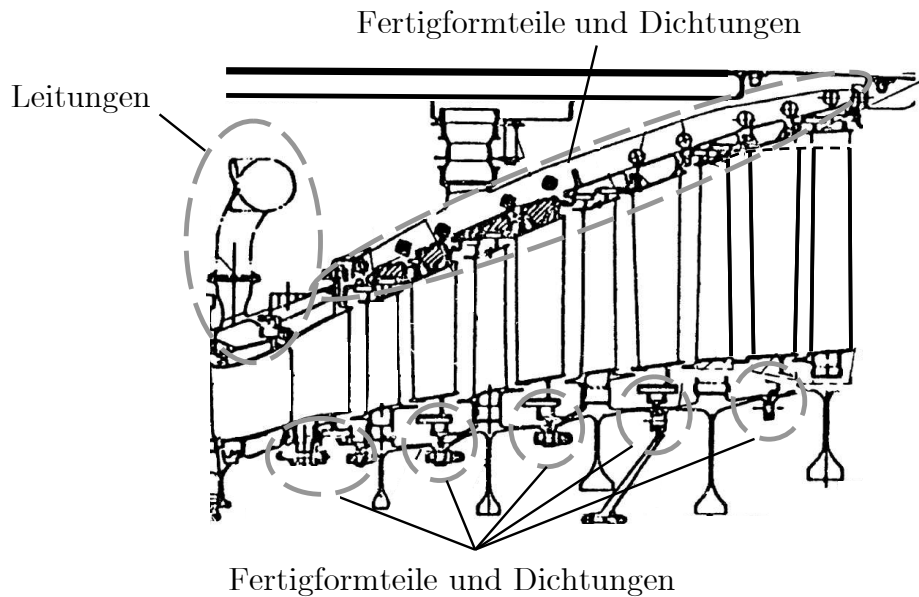


Abb. 3-8 Bauteile der Kategorie C am Bsp. der NDT des E<sup>3</sup>-TW [37]

### 3.3.6 Bauteilähnlichkeit

Die Ähnlichkeit zweier Bauteile unterliegt im ersten Schritt der individuellen Interpretation und beruht somit auf einer rein subjektiven Wahrnehmung [84]. Als Grundlage für eine wissenschaftliche Methode ist somit die Eingrenzung der Bauteilähnlichkeit in eindeutig definierte Kriterien notwendig. So lässt sich laut [30] die Bauteilähnlichkeit im Sinne von Geometrie, Material, Konstruktion, Fertigung oder Funktion differenzieren.

Die vereinfachte Kostenermittlungsmethode der VDI Richtlinie VDI 2225, nutzt ebenfalls die Ähnlichkeit von Bauteilen [116]. Diese Methode beruht auf der Annahme, dass ähnliche Produkte nicht hinsichtlich ihrer absoluten Herstellkosten gleich sind, sich aber bezüglich ihrer Kostenstruktur ähnlich verhalten. So ist die prozentuale Zusammensetzung der Herstellkosten, bestehend aus Materialkosten, Lohnkosten und Fertigungskosten für ähnliche Produkte laut dieser Richtlinie nahezu gleich. Unter ähnlichen Produkten werden hier Produkte verstanden, die bezüglich ihres funktionellen Aufbaus, ihrer Beanspruchung und hinsichtlich ihres Materials Ähnlichkeiten aufweisen und auch in Bezug auf Aufwand und Genauigkeit der Fertigung ähnlich sind.

Bei der hier erarbeiteten Methode wird die Bauteilähnlichkeit von Triebwerksteilen berücksichtigt. Die Anwendung der Bauteilähnlichkeit auf Triebwerksteile ist exemplarisch an den Scheiben des Hochdruckverdichters in Abb. 3-9 dargestellt. Die Eingrenzung der Bauteilähnlichkeit in die drei Hauptkategorien Material, Funktion/Geometrie und Fertigungsmethode, wurde der Kostenmethode zu Grunde gelegt. So werden die Scheiben der vorderen Stufen eines Verdichters meist aus Titan, die hinteren Stufen aus der Nickelbasislegierung Inconel gefertigt. Weiterhin lassen sich Scheiben bezüglich ihrer Fertigungsmethode zusammenfassen in Scheiben, deren

Nut für die Schaufel-Scheibe-Verbindung durch eine räumende Bearbeitung gefertigt und Scheiben, deren Nut durch den Fertigungsschritt Drehen hergestellt werden. Auch bezüglich ihrer Geometrie weisen Scheiben Ähnlichkeit untereinander auf. Die abgebildeten Scheiben lassen sich differenzieren in Scheiben mit und ohne Arm sowie in Scheiben die verschraubt werden und somit Bohrungen aufweisen.

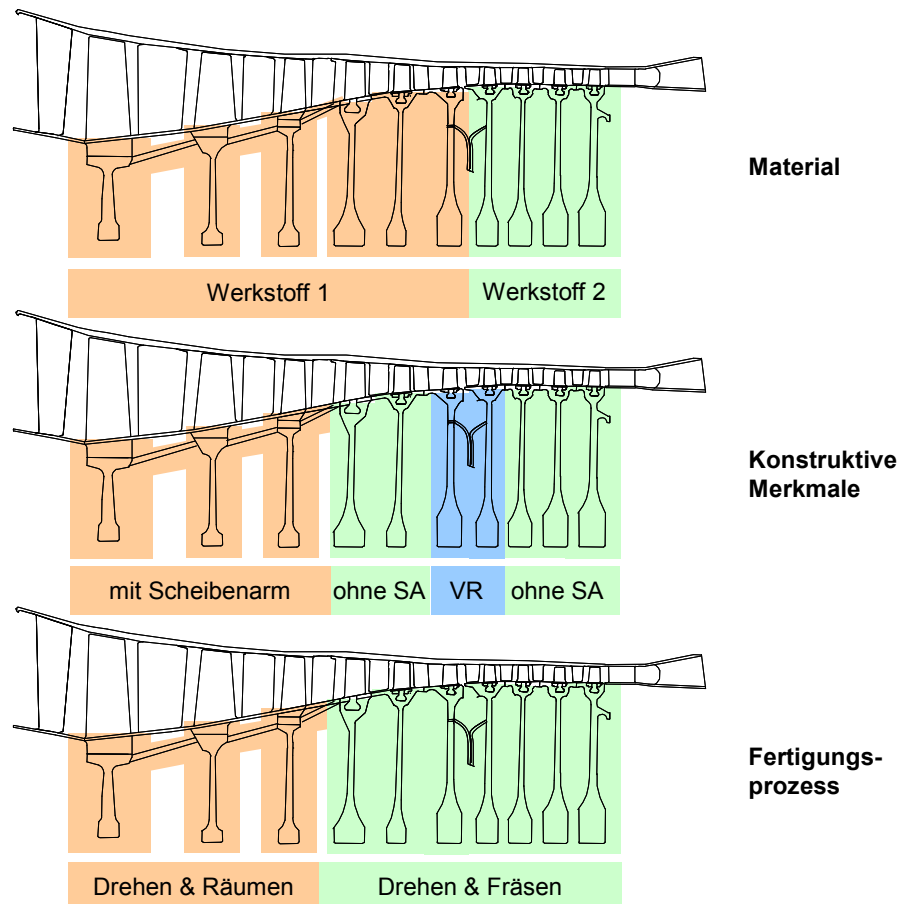


Abb. 3-9 Bauteilähnlichkeit am Bsp. HDV [4]

So können die Kosten verschiedener Bauteile mit ähnlichen Eigenschaften durch eine gemeinsame Methode berechnet werden. Schaufeln und Gehäuse wurden diesbezüglich identifiziert. Beispielhaft zu nennen sind Leit- und Laufschaufeln sowie Verdichter- und Turbinenschaufeln. Weiterhin konnte Ähnlichkeit bei Baugruppen festgestellt werden. Niederdruckverdichter und Hochdruckverdichter bestehen aus den gleichen Bauteilen: Scheiben, Schaufeln und Gehäuse. Die Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Hochdruck- und Niederdruckturbine verhalten sich entsprechend. Die Verwendung ähnlicher Bauteile findet sich auch bei Verdichter und Turbine wieder. Zwar haben diese beiden Baugruppen unterschiedliche Funktionen, aber bestehen ebenfalls beide aus den Bauteilen: Scheibe, Schaufeln und Gehäuse. Die kostenspezifische Berechnung erfolgt über die Merkmale der Bauteile.

### 3.3.7 Sonstige Einflussgrößen

Die zu produzierende Stückzahl eines Bauteiles nimmt Einfluss auf die Produktionskosten [10] [23] [31]. Nach [27] gehört die Stückzahl zu den konstruktiven Hauptkosteneinflüssen. So sind z. B. Mengenrabatte beim Bezug größerer Rohstoff- und Kaufteilmengen möglich [25] [26]. Untersuchung basierend auf den Unterlagen der Boston Consulting zeigen, dass bei Verdopplung der Produktionsmenge von Standardprodukten oder Halbzeugen eine mittlere Kosten-(Preis)-absenkung, von 20% bis 30% inflationsbereinigt zu beobachten ist (Boston-Erfahrungskurve) [112].

Da hier jedoch eine vergleichende Kostenmethode entwickelt wird, die nicht die Bestimmung der Absolutkosten zum Ziel hat, wird die zu produzierende Stückzahl als konstant definiert und findet keine weitere Berücksichtigung. Weiterhin wird der Zugewinn durch den Verkauf von Altmetall, wie Spänen und sonstigem Abfallmaterial, in der Kostenberechnung nicht mitberücksichtigt.

## 3.4 Das Modell im Gesamtkontext

Die Technologieparameter aus dem Produktentwurf, der Fertigungs- und der Materialtechnologie sowie die Rahmenbedingungen der Fabrik, stellen die Eingangsgrößen für das Produktionskostenmodell dar (Abb. 3-10). Aus den Ergebnissen des Produktionskostenmodells werden anschließend die Zielvorgaben für die Planung abgeleitet. Diese müssen den äußeren Rahmenbedingungen genügen. Bei den äußeren Rahmenbedingungen handelt es sich um Kundenspezifikationen, politische wie gesetzliche Rahmenbedingungen und der Marktsituation in Verbindung mit dem anvisierten Verkaufspreis. Werden die Zielvorgaben erfüllt, wird die Technologie bzw. das Produkt weiter vorangetrieben, der fortschreitende Reifegrad über die TRLs bewertet und die Technologie entwickelt. Stellt sich jedoch dabei heraus, dass sich die Technologie unter den gegebenen Umständen nicht verwirklichen lässt, muss überprüft werden, ob sich die Technologie durch Maßnahmen und Investitionen, wie z. B. in Fertigungsmaschinen oder in die Materialforschung, doch noch realisieren lässt. Sollte dies nicht der Fall sein, so kann eine andere Technologie gewählt oder die Bewertung beendet werden. Dies gilt ebenfalls, wenn bereits zuvor Planungsziele und äußere Rahmenbedingungen nicht in Einklang gebracht werden können.

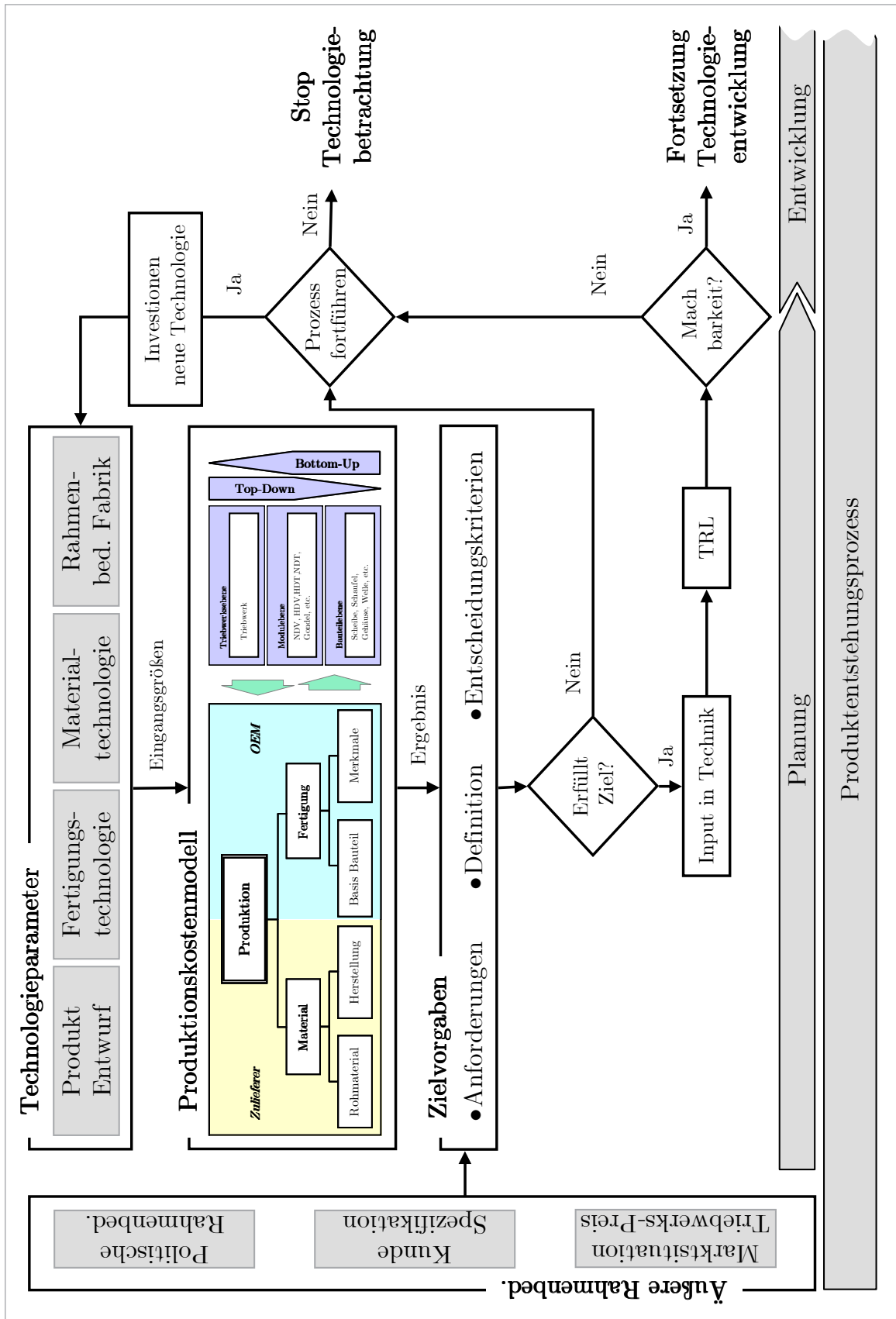


Abb. 3-10 Eingliederung des Produktionskostenmodells im Gesamtkontext



### 3.5 Kostenstruktur

Die Betrachtung der Kostenstruktur eines Bauteils nach Fertigungsaspekten ermöglicht die Aufteilung der Produktionskosten in Material- und Fertigungskosten. In Abb. 3-11 ist dies am Beispiel einer Triebwerksscheibe schematisch dargestellt. Durch eine Trennung der Kostenzuweisung in Material- und Fertigungskosten wird eine doppelte Kostenverbuchung vermieden. Folgende Kostenzuweisung werden für das Kostenmodell festgelegt.

Zu den **Materialkosten** werden alle Kosten gezählt, die von der Erzgewinnung, über Schmelz- und Schmiedeprozesse bis hin zum Halbzeug des Bauteils entstehen. Alle Kosten die beim Zulieferer, und somit vor Eingang des Bauteils beim OEM entstehen, werden als Materialkosten verbucht. Die anfallenden Kosten bei der Bearbeitung und Herstellung der Materialien werden als Herstellkosten bezeichnet, um eine klare Abgrenzung gegenüber den Fertigungskosten festzulegen.

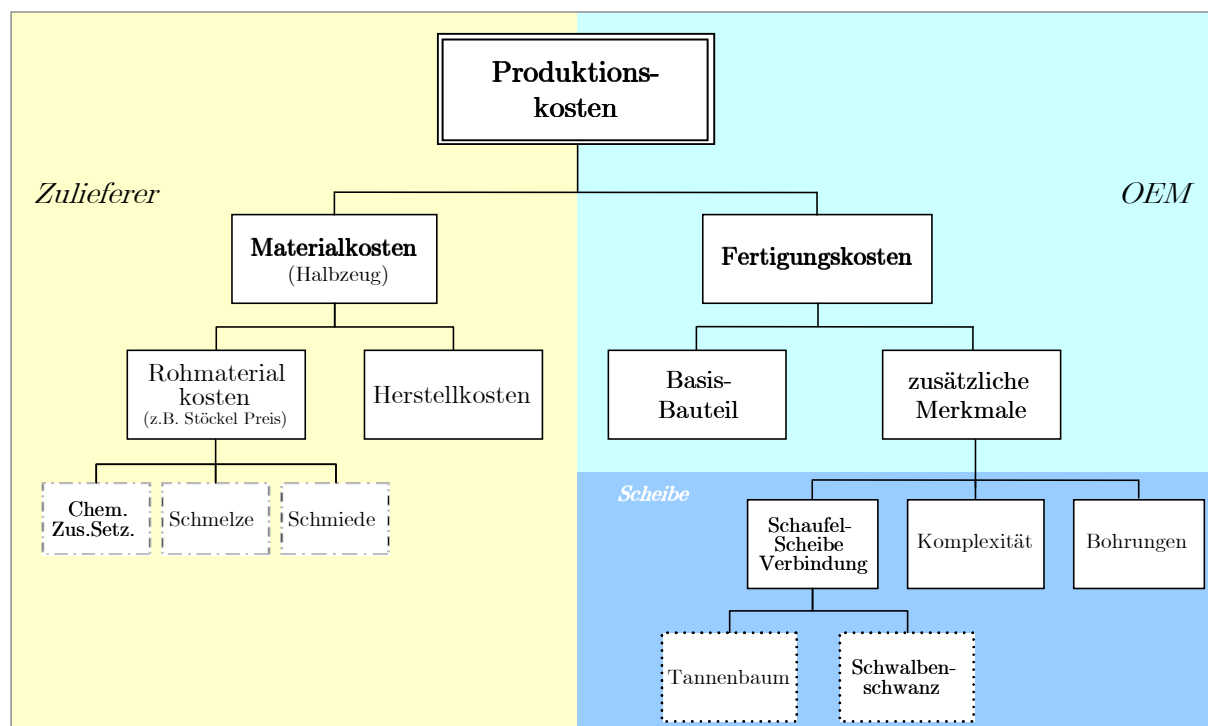


Abb. 3-11 Kostenstruktur nach Fertigungsaspekten am Beispiel einer Triebwerksscheibe

Unter **Fertigungskosten** werden alle Kosten zusammengefasst, die innerhalb der Fertigung des OEM entstehen. Die Fertigungskosten umfassen somit die Kosten ab der Bearbeitung des Halbzeuges bis hin zu seiner Fertigstellung. Dabei werden Bauteile, die bezüglich Geometrie und Fertigung gleiche Eigenschaften aufweisen, in einem Zwischenschritt zusammengefasst und als Basis-Bauteile bezeichnet. Durch anschließende Kostenaddition der charakterischen Bauteilmerkmale werden die

Fertigungskosten des Bauteils bestimmt. Diese Kostenstruktur erlaubt die Kosten der einzelnen Bauteile nach Fertigungsverfahren zu berechnen.

### 3.6 Basis-Bauteil Methode

Die Fertigungskosten des Bauteiles werden über dessen charakteristischen Merkmale ausgehend vom *Basis-Bauteil* über Faktoren bestimmt. Dies ist in Abb. 3-12 exemplarisch für eine Scheibe dargestellt. Dargestellt sind die Kostenstruktur, die typischen Produktionsschritte sowie die jeweiligen Kostenfaktoren.

Ausgehend vom Stöckel wird die Scheibe über mehrere, hier nicht dargestellte, Herstellprozesse zum endkonturnahen Halbzeug fertiggeschmiedet. Die bis zum Halbzeug entstehenden Kosten bilden die Materialkosten der Scheibe. Durch weitere Bearbeitung der Scheibe durch das Verfahren Drehen entsteht die hier als Basis-Bauteil definierte Bauteilgeometrie. Die Basis-Scheibe besitzt bis auf die äußere Kontur keine weiteren Eigenschaften einer fertigen Scheibe. Sie weist weder eine Nut für die Schaufel-Scheibe Verbindung auf, noch hat sie Bohrungen, die z. B. für die Befestigung der vorderen und hinteren Trommel des Hochdruckverdichters benötigt werden.

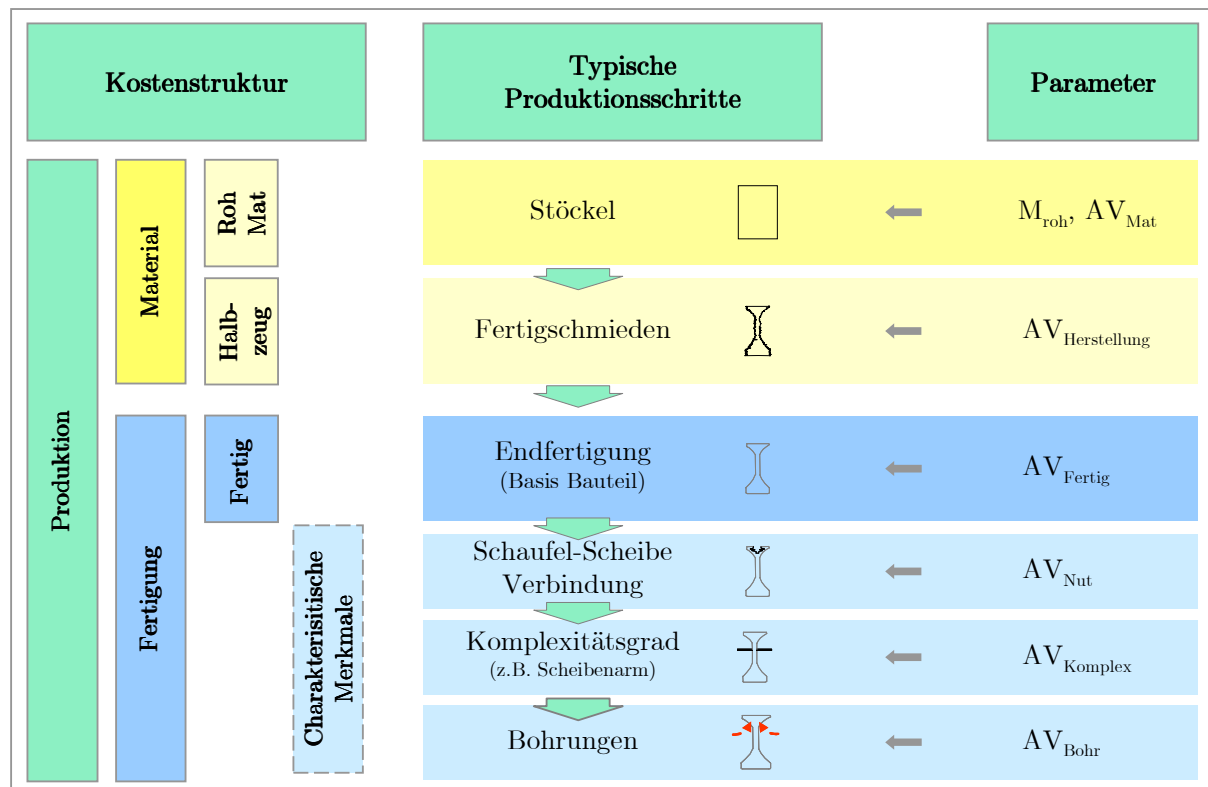


Abb. 3-12 Basis-Bauteil Methode zur fertigungsspezifischen Kostenbestimmung; Bsp. Scheibe

Um den unterschiedlichen konstruktiven Ausführungen von Scheiben kostenbezogen Rechnung zu tragen, werden hierfür die Kostenparameter für die jeweiligen charakteristischen Merkmale der Scheibe eingeführt. Diese sind  $AV_{\text{Nut}}$ ,  $AV_{\text{Bohr}}$  und  $AV_{\text{Komplex}}$ . Zur Bestimmung der anfallenden Kosten bei der Fertigung der Schaufel-Scheibe Verbindung wird der Kostenparameter  $AV_{\text{Nut}}$  verwendet. Er ist abhängig von der konstruktiven Ausführung der Nut, die als Tannenbaum- oder Schwalbenschwanzverbindungen ausgeführt werden kann (Abb. 3-11). Der Kosteneinfluss von Bohrungen, die z. B. zur Befestigung von Scheiben oder zur Luftführung benötigt werden, wird über  $AV_{\text{Bohr}}$  berechnet.  $AV_{\text{Komplex}}$  bewertet den Komplexitätsgrad eines Bauteils. So können z. B. kostenintensive Hinterschneidungen mit diesem Parameter bei der Kostenbestimmung berücksichtigt werden.

### 3.7 Aufbau der Berechnung

Der Modellaufbau entspricht der in Kap. 3.3.4 festgelegten Produktstruktur des Triebwerks bestehend aus der Triebwerks-, der Modul- und der Bauteilebene. Die Bestimmung der Kosten erfolgt, wie in Abb. 3-13 dargestellt, über den *Top-Down* und den *Bottom-Up Ansatz*. Die Gliederung des Triebwerks in Modul- und Bauteilebenen ermöglicht den, in den Modellspezifikationen geforderten, modularem Aufbau des Kostenmodells zur Abbildung jeglicher Triebwerkskonfigurationen. Der *Bottom-Up Ansatz* dient zur detaillierteren Kostenbestimmung der Halbzeuge, die den Fertigungsprozess vollständig beim OEM durchlaufen (Kap. 3.3.2). Bei diesem Ansatz beginnt die Kostenberechnung auf der untersten Produktstrukturebene. Daten und Eigenschaften sowie die Fertigungsparameter fließen in die Berechnung mit ein. Durch die Aufsummierung der jeweiligen Bauteilkosten werden die Modulkosten und letztendlich die Gesamttriebwerkskosten bestimmt.

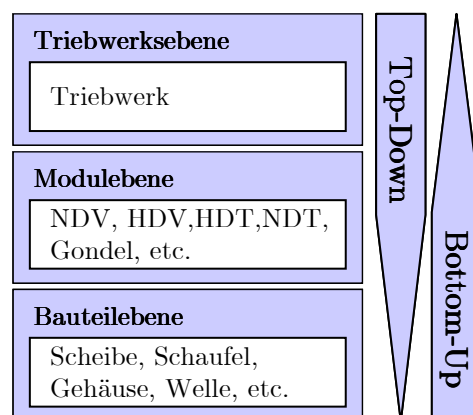


Abb. 3-13 Aufbau der Kostenbestimmungsmethode: Ebenen und Modellansätze

### 3.8 Produktionskosten- vs. Listenpreisbestimmung

Eine Untersuchung der Triebwerksschubs und des Triebwerksgewichts wurde, wie in Abb. 3-14 dargestellt, durchgeführt. Die Untersuchung führt zu folgenden Erkenntnissen:

- Das Triebwerksgewicht steigt mit der Schubanforderung.
- Triebwerke einer Schubklasse variieren bezüglich ihres Gewichts.

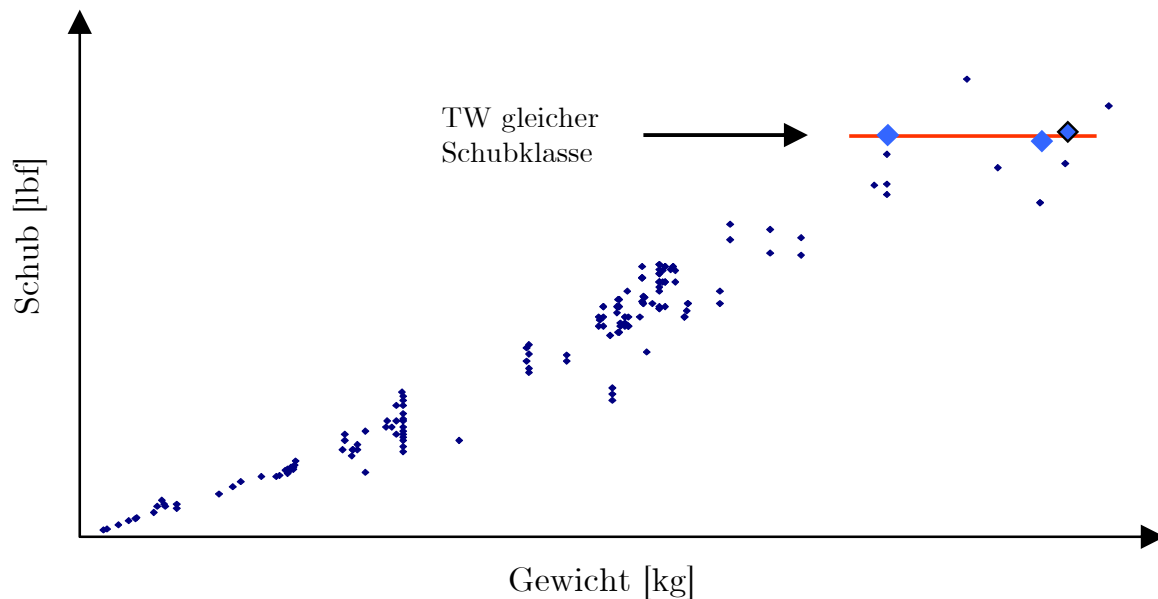


Abb. 3-14 Schub und Gewicht bekannter Triebwerke (TW)

Eine Erklärung zu der Erkenntnis, dass das Triebwerksgewicht innerhalb einer Schubklasse unterschiedlich ist, liefert die Untersuchung des Listenpreises über das Triebwerksgewicht (Abb. 3-15). Aus dieser Untersuchung lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Triebwerke einer Schubklasse können einem Flugzeugtyp zugeordnet werden.
- Innerhalb einer Schubklasse ist der Listenpreis nahezu gleich.
- Triebwerke gleicher Schubklasse und vergleichbarem Listenpreis variieren bezüglich ihres Gewichts.

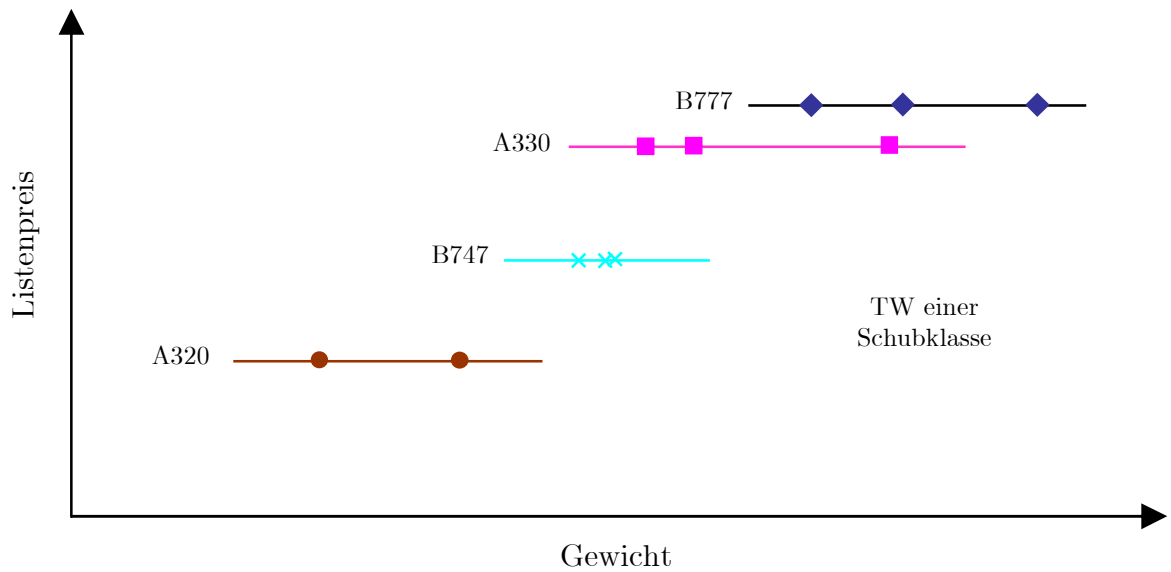


Abb. 3-15 Listenpreis und Gewicht bekannter Triebwerke einer Schubklasse [4]

Diese Aussagen zeigen, dass der Listenpreis eines Triebwerks vom Markt reguliert wird. Bei der Festlegung des Triebwerkpreises spielen die konstruktiven Ausführungen des Triebwerks eine untergeordnete Rolle. Für den Triebwerkshersteller ergibt sich somit die Herausforderung, sein Produkt innerhalb der am Markt erzielbaren Preisgrenze herzustellen (Abb. 3-16). Die Differenz zwischen Produktionskosten und Listenpreis entspricht der Gewinnmarge. Ausgehend vom erzielbaren Produktpreis am Markt und unter Berücksichtigung der Gewinnmarge lassen sich die zulässigen Zielkosten ermitteln [32]. Die Vorgabe der Zielkosten ist von elementarer Bedeutung für die Strategiefestlegung eines Unternehmens.

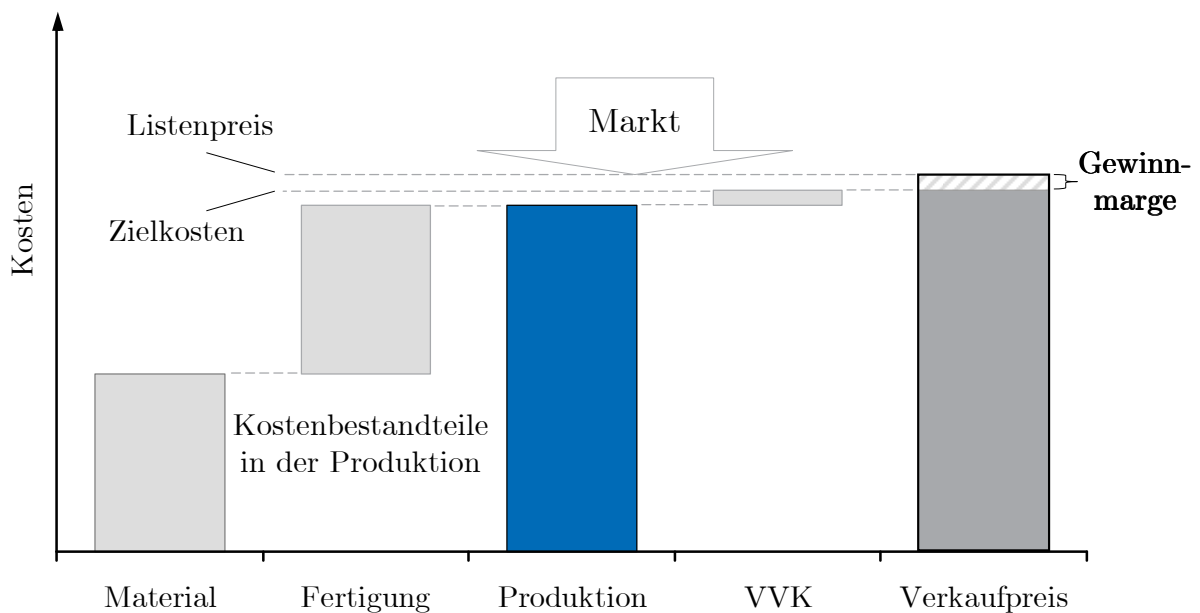


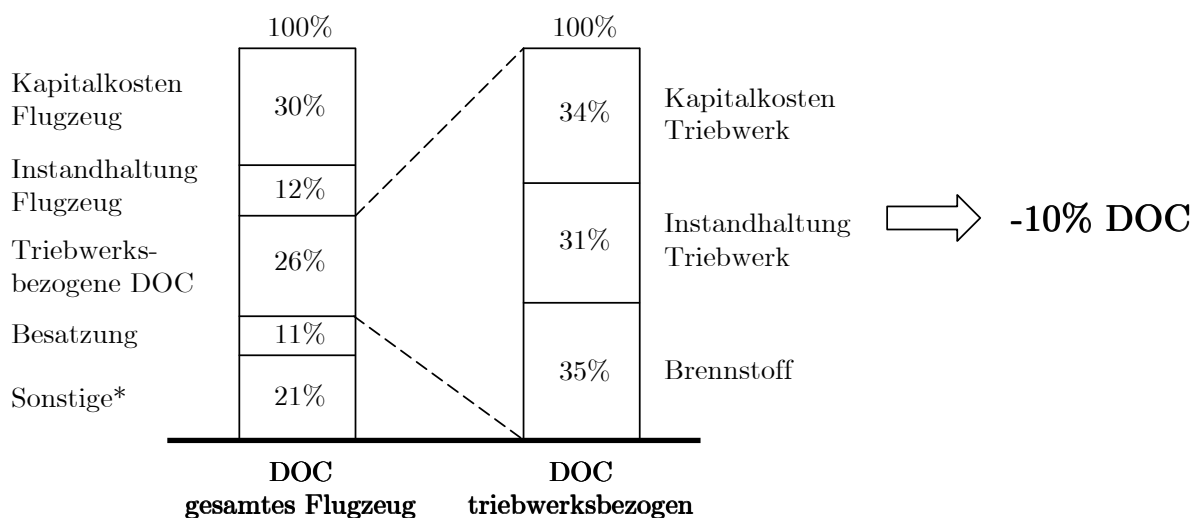
Abb. 3-16 Target Costing - Regulierung des Produktpreises durch den Markt

Diese Regulierung des Produktpreises durch den Markt und die daraus resultierende Ableitung der Zielkosten wird auch als Target Costing bezeichnet [33] [92]. Vor diesem Hintergrund ist es zur Bestimmung der langfristigen Planungsziele notwendig, die Größenordnung der Produktionskostenentwicklung zu ermitteln. Die Festlegung des Verkaufspreises wird über den Markt geregelt. Die so abgeleiteten Gewinnmargen sind für die Entscheidung über die Entwicklung eines Produktes maßgeblich.

### 3.9 Angestrebte Genauigkeit und Verifizierung der Kostenbestimmungsmethode

Die Investitionsentscheidungen von Fluggesellschaften und Flugzeughersteller neue Flugzeugmodelle zu erwerben bzw. neue wettbewerbsfähige Flugzeuge zu entwickeln, basieren stets auf einer Kosten-Nutzen Analyse [58]. Dabei erfolgt die Beurteilung der Kosteneffektivität zwischen zwei zivilen Flugzeugen nach [58] an Hand der direkten operativen Kosten (DOC). So wird nach [55] [41] eine Einsparung von mindestens 10% der flugzeugbezogenen DOC gefordert, um die Entwicklung eines neuen Flugzeugmodells zu rechtfertigen.

Die Zielvorgaben bei der Kosteneinsparung von Vor- auf Nachfolgermodell werden vom Flugzeughersteller an die Subsystemlieferanten und somit auch an den Triebwerkshersteller weitergegeben [43]. Daraus ergibt sich für den Triebwerkshersteller eine ebenfalls mindestens 10%-ige Reduzierung des triebwerksbezogenen Anteils an den DOC bei der Entwicklung eines neuen Triebwerkes. Die triebwerksbezogenen DOC setzen sich, wie aus Abb. 3-17 hervorgeht zu annähernd gleichen Teilen aus Kapitalkosten mit 34%, Instandhaltungskosten mit 31% und Brennstoffkosten mit 35% zusammen [80].



\*Navigations-, Lande- und Bodengebühren, Versicherung

Abb. 3-17 -10% DOC für Investitionsentscheidung auf Flugzeug und Triebwerk [80]

Bei Neuentwicklungen werden nach [41] eine Reduzierung der Brennstoffkosten von -20% [41] und eine Reduktion der Instandhaltungskosten zwischen -10% bis -30% [41] [45] angestrebt.

Aus der Betrachtung der Zielvorgaben geht hervor, dass unter der Annahme einer 30%-igen Reduzierung der Instandhaltungskosten und einer 20%-igen Einsparung der Brennstoffkosten bereits eine Reduzierung, der triebwerksbezogenen DOC um 17% erreicht werden kann. Auswirkungen durch Änderungen in den Kapitalkosten sind dabei noch nicht inbegriffen. Die Kapitalkosten setzen sich aus Anschaffungs-, Leasing-/ Finanzierungs- und Produktionskosten zusammensetzen, wobei die Anschaffungs- und Leasing-/ Finanzierungskosten bei der vergleichenden Kostenabschätzung zweier Triebwerke als konstant angenommen werden.

### 3.9.1 Angestrebte Genauigkeit

Unter der Annahme konstanter prozentualer Finanzierungskosten werden die Kapitalkosten direkt von den erwartenden Stückkosten beeinflusst. Somit muß eine Vorhersagegenauigkeit für die zu erwartenden Stückkosten festgelegt werden, um eine Aussage der Gesamtreduzierung der DOC bei Neuentwicklungen treffen zu können. Während auf Grund der für Investitionsgüter typischen Gewinnmargen im Industriedurchschnitt von 5% [89] eine Genauigkeit der Stückkostenvorhersage im Bereich weniger Prozent angestrebt werden muß, ist festzustellen, dass eine solche Vorhersagegenauigkeit im Bereich der vorwettbewerblichen Technologieplanung nicht möglich und auch nicht notwendig ist. In Anlehnung an die in der VDI-Richtlinie VDI 2225 [116] genannten Genauigkeitsangaben für vereinfachte Kostenermittlungsmethoden wird eine Abweichung von  $\pm 10\%$  als gutes Ergebnis und eine Abweichung von  $\pm 20\%$  noch als akzeptabel eingestuft. Für das hier zu entwickelnde Produktionskostenmodell wird eine Genauigkeit von kleiner  $\pm 10\%$  als Richtwert herangezogen und angestrebt.

### 3.9.2 Verifizierung – Listenpreis

Die Listenpreise einer Vielzahl ziviler Turboflugtriebwerke sind z. B. in [111] zusammengestellt. Um eine Vergleichsbasis der berechneten Produktionskosten auf Triebwerks-Ebene zu einem Referenzwert zu schaffen, muss der bekannte Listenpreis um die Gewinnmarge des Triebwerksherstellers reduziert werden. Laut [3] beträgt die operative Gewinnmarge mindestens 10% des Umsatzes. Herstellerspezifisch variierte diese Marge zwischen 13% und 15% in den Jahren 2007 bis 2009 [2] [79]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die minimale Gewinnmarge von 10% als Berechnungsgrundlage herangezogen. Dies ermöglicht die Verifizierung der Kostenbestimmungsmethode auf Triebwerksebene, indem die berechneten Gesamtproduktionskosten mit

den angenommenen Produktionskosten verglichen werden. Die angenommenen Produktionskosten setzen sich dabei aus dem vorliegenden Listenpreis abzüglich der 10%-igen Gewinnmarge zusammen.



# 4 Modellierung der Fertigungskosten

## 4.1 Grundlagen der Fertigungstechnik

Nach DIN 8580 lassen sich Fertigungsverfahren in Hauptgruppen gliedern. Die sechs Hauptgruppen des Ordnungssystems nach DIN 8580 sind in Abb. 4-1 dargestellt. Der Hauptgruppe 3 "Trennen" werden die Verfahren zur spanenden Bearbeitung von Bauteilen zugeordnet. Diese lassen sich weiter differenzieren in spanende Verfahren mit geometrisch bestimmter bzw. unbestimmter Schneide [8] [34] und [101].

Die Bestimmung der Fertigungskosten orientiert sich an der in DIN 8580 vorgegebenen Systematik der spanenden Fertigungsverfahren. Die einzelnen Fertigungsschritte werden auf Grund ihrer Relevanz bezüglich ihres Kosteneinflusses im Fertigungskostenmodell abgebildet.

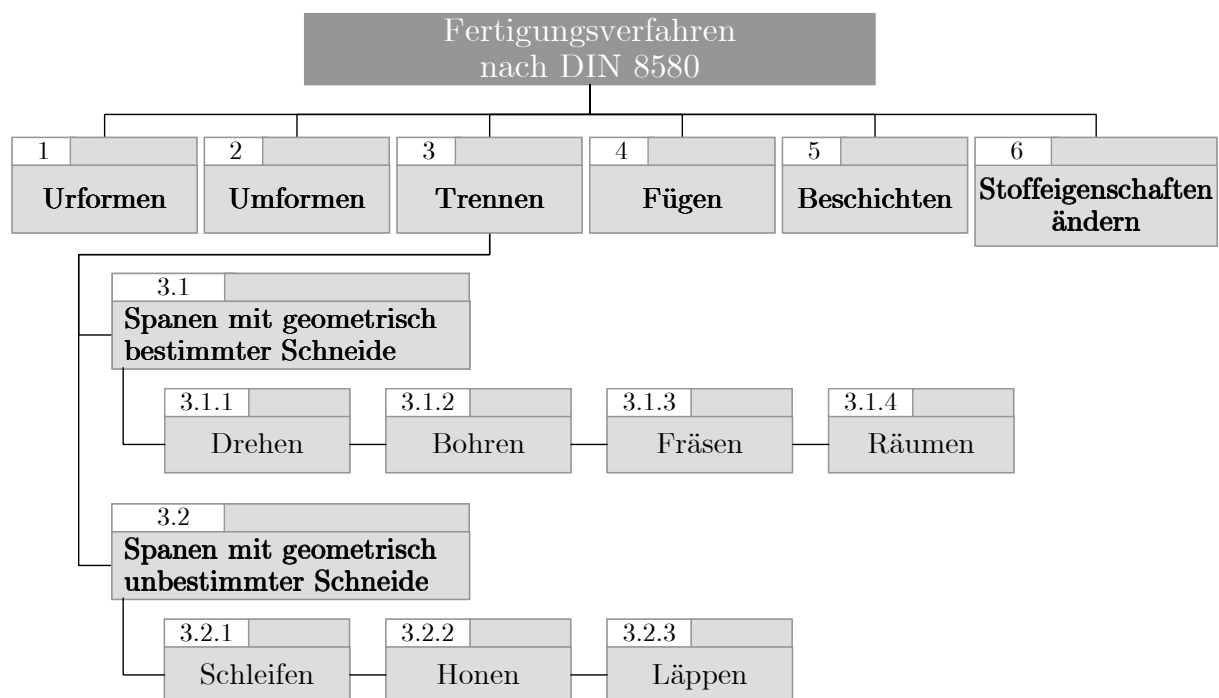


Abb. 4-1 Einteilung der Fertigungsverfahren in Hauptgruppen nach DIN8580

Die in der Zerspantechnik verwendeten Begriffe sind in DIN 6580/81 und DIN 6583/84 festgelegt. Die im Folgenden notwendigen Definitionen sind an die Definitionen der DIN-Normen angelehnt und orientieren sich zusätzlich an den

Ausführungen von [34] [110] und eigens festgelegten Definitionen. Die zur Bewertung der Fertigungskosten in dieser Arbeit verwendeten Begriffe sind in Tab. 4-1 aufgeführt.

Parameter	Einheit	Benennung	Beschreibung
$v_c$	$\frac{mm}{s}$	Schnittgeschw.	Geschwindigkeit des Werkstücks relativ zum Werkzeug am Kontaktpunkt
$v_f$	$\frac{mm}{s}$	Vorschubgeschw.	Geschwindigkeit des Werkstücks relativ zum Werkzeug in Vorschubrichtung
$f$	$mm$	Vorschub	Die zurückgelegte Strecke pro Hub oder Umdrehung des Werkzeugs oder Werkstücks in Vorschubrichtung
$a_p$	$mm$	Schnitttiefe	Die Schnitttiefe des Werkzeugs
$b_z$	$mm$	Spanungsbreite	Die Schnittbreite des Werkzeugs
$V_z$	$mm^3$	Zerspanvolumen	Das durch spanende Verfahren abgetragene Volumen
$Q$	$\frac{mm^3}{s}$	Zeitspanungsvol.	Zerspanntes Volumen pro Zeiteinheit
$t_n$	min	Nebenzeit	Zeit in der die Maschine nicht arbeitet (Umrüsten, neues Werkstück einlegen etc.)
$t_h$	min	Hauptzeit	Zeit in der die Maschine arbeitet (inkl. Zeit in der das Werkzeug verfährt)

Tab. 4-1 Übersicht der definierten Begriffe und Parameter der Fertigungstechnik

## 4.2 Fertigungsmethode von Scheiben

Aufgrund der zuvor durchgeführten ABC-Analyse (Kap. 3.3.5) wurden Scheiben, Schaufeln und Gehäuse als Bauteile der Kategorie A klassifiziert. Sie tragen somit maßgeblich zu den zu erwartenden Fertigungskosten bei. Aus diesem Grund ist die detaillierte Betrachtung der Fertigungskosten von Interesse und wird am Beispiel einer Hochdruckverdichterscheibe durchgeführt.

### 4.2.1 Grundlagen und Fertigung von Triebwerksscheiben

Auf Triebwerksscheiben wirken unterschiedliche Arten an Belastungen, die sich zudem meist gleichzeitig auf die Scheibe auswirken. Dies führt dazu, dass Triebwerksscheiben zu den am stärksten beanspruchten Bauteilen eines Triebwerks zählen. Triebwerksscheiben sind folgenden Belastungen ausgesetzt:

- Fliehkräfte als Folge der Rotationsbewegung,
- Axial- und Biegekräfte aus der aerodynamischen Belastung der Schaufeln,
- Spannungen, die aus Temperatur- und Druckunterschieden resultieren und
- Kreismomente, die im Flugbetrieb ausgelöst durch Flugmanöver (z. B. Kurvenflug), wirken.

Triebwerksscheiben werden nach der Federal Aviation Administration (FAA) als kritische Bauteile eingestuft und zählen zur höchsten Qualitätsklasse [29], da sie im Versagensfall eine unmittelbare Gefahr für das Flugzeug darstellen. Die Fertigung von Triebwerksscheiben unterliegt somit strengen Kriterien und erfordert einen überwachten Fertigungsprozess. Durch die Qualitätsansprüche der Luftfahrtbehörden führen selbst geringe Abweichungen im Herstellprozess, wie z. B. in der Materialzusammensetzung, der Oberflächengüte und/oder der einzuhaltenden Toleranzen, zum Ausschuss des Bauteils. Die kritischen Zonen einer Scheibe sind Bohrungen, der äußere Umfang und Übergänge an Tragflanschen [1].

### Externe Arbeitsvorgänge – vom Rohbauteil zum Halbzeug

Zu Beginn der Scheibenherstellung steht der Rohstoffeinkauf. Für Verdichterscheiben werden meist Titanlegierungen sowie Nickelbasislegierungen für die hinteren Verdichterstufen auf Grund der höheren Temperaturen verwendet. In Abb. 4-2 ist der Herstellungsprozess einer Turbinenscheibe ausgehend vom Gussblock bis hin zum Auslieferungszustand an den Triebwerkshersteller abgebildet. Der Gussblock wird zunächst gestaucht und abgeschreckt bevor der Prozess des Fertigschmiedens durchgeführt wird. Der im Querschnitt deutlich kleinere Gussblock wird anschließend in zylinderförmige Werkstücke, die sogenannten Stöckel, geschnitten.

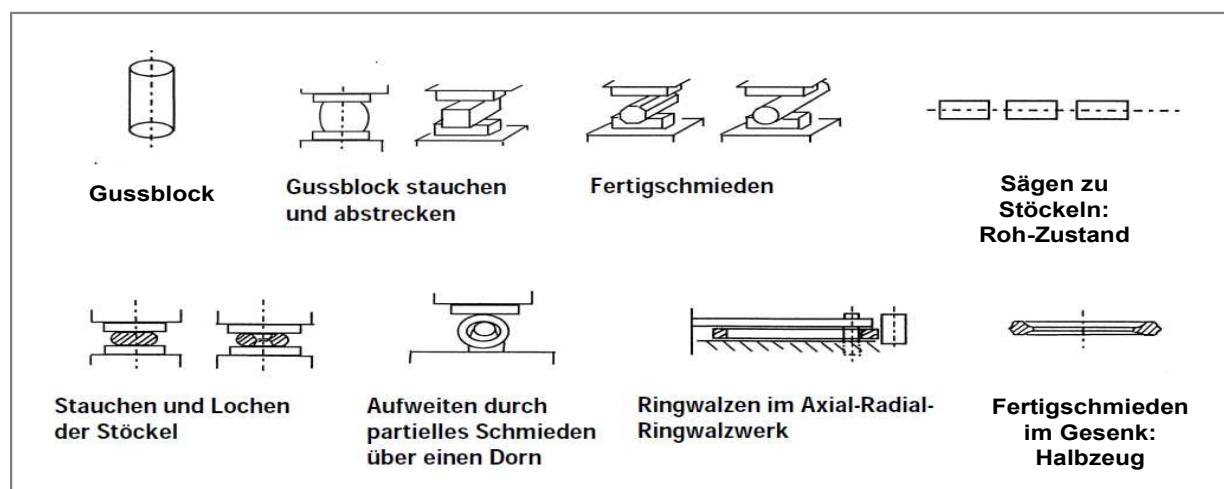


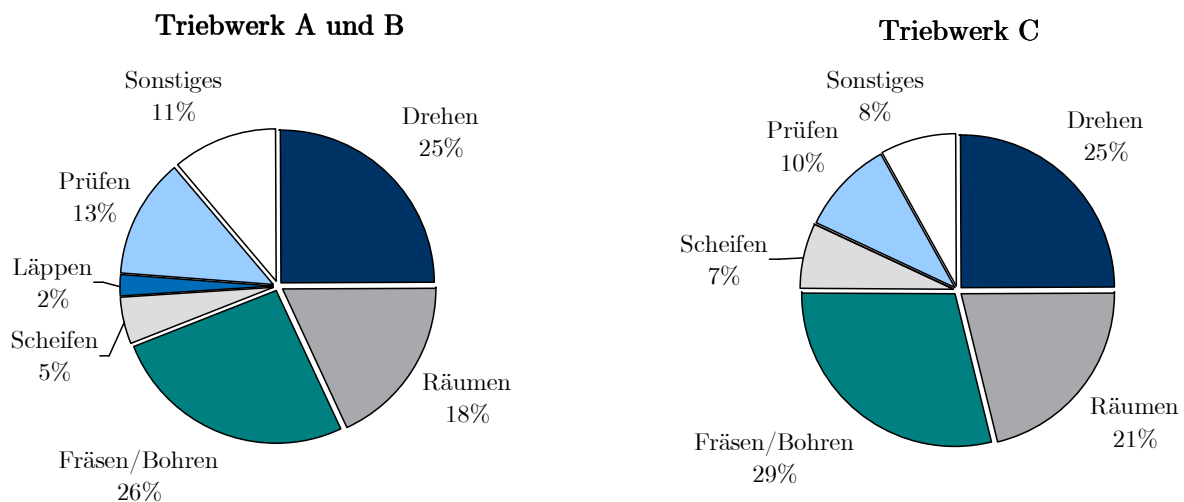
Abb. 4-2 Herstellung einer Turbinenscheibe aus Nickelbasislegierung bis zum Halbzeug [105]

Die Stöckel bilden die Rohkontur der Scheibe und werden daher in dieser Arbeit als Roh-Zustand (Roh) bezeichnet. Sie werden weiteren Bearbeitungsschritten unterzogen. Dies sind das Stauchen und Lochen des Stöckels, das Aufweiten durch partielles Schmieden über einen Dorn und das Walzen im Axial-Radial-Ringwalzwerk. Abschließend wird die Scheibe im Gesenk zur endkonturnahen Verdichterscheibe fertiggeschmiedet. Nach Abdrehen von überschüssigem Material wird der Auslieferungszustand des Halbzeuges an den Triebwerkshersteller erreicht. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt die weitere Bearbeitung des Werkstückes vom Triebwerkshersteller selbst.

### Interne Scheibenfertigung beim OEM – vom Halbzeug zum Fertigbauteil

Die beim OEM ablaufenden Fertigungsprozesse der Scheibe, hier auch als interne Scheibenfertigung bezeichnet, umfassen die Fertigung der Scheibe ab Eintritt in die Fabrik bis hin zum Einbau in das Triebwerk.

Nach [90] stellen die Fertigungsverfahren Fräsen/Bohren, Drehen, Räumen, Prüfen und Schleifen ca. 90% der gesamten internen Fertigungskosten von Niederdruckturbinenscheiben dar. Dabei bilden die Verfahren Fräsen/Bohren und Drehen mit einem jeweiligen Kostenanteil von 25% zusammen die Hälfte der Gesamtkosten (Abb. 4-3).



**Abb. 4-3 Durchschnittliche Anteile der kostentreibenden Verfahren an den Fertigungskosten für NDT-Scheiben getrennt nach Fertigungslinien [89]**

Um diese Untersuchung der kostentreibenden Verfahren auf jegliche Triebwerkscheibe übertragen zu können, wurden Analogien bezüglich der Fertigungsverfahren zwischen Verdichter- und Turbinenscheiben herangezogen. Es konnte festgestellt werden, dass die Fertigungsverfahren dieser Scheiben nahezu identisch sind, lediglich die materialabhängigen Fertigungsparameter, wie z. B. Vorschub und Schnittgeschwindigkeit, variieren. Aus diesem Grund wird angenommen, dass 90% der

Fertigungskosten einer beliebigen Triebwerksscheibe über die oben genannten Fertigungsverfahren zustande kommen. Diese Verfahren sind nach der ABC-Analyse die essenziellen Fertigungsverfahren zur Kostenbestimmung in der Vorauslegung (Kap. 3.3.5) und bilden aus diesem Grund die definierte Fertigungsabfolge beim OEM zur Bestimmung der Fertigungskosten (Abb. 4-4). Zusätzlich werden weitere Verfahren unter dem Punkt *Sonstige Arbeitsschritte* kostenspezifisch erfasst. Wie aus Abb. 4-4 ebenfalls hervorgeht, setzen sich einige Verfahren aus mehreren Fertigungsschritten zusammen, deren Haupt- bzw. Nebenzeit zur Kostenbestimmung verwendet werden. So setzt sich z. B. das Verfahren Drehen aus Schruppen, Schlichten, Rüsten und weiteren Fertigungsschritten zusammen. Nachfolgend wird auf die einzelnen Verfahren genauer eingegangen.

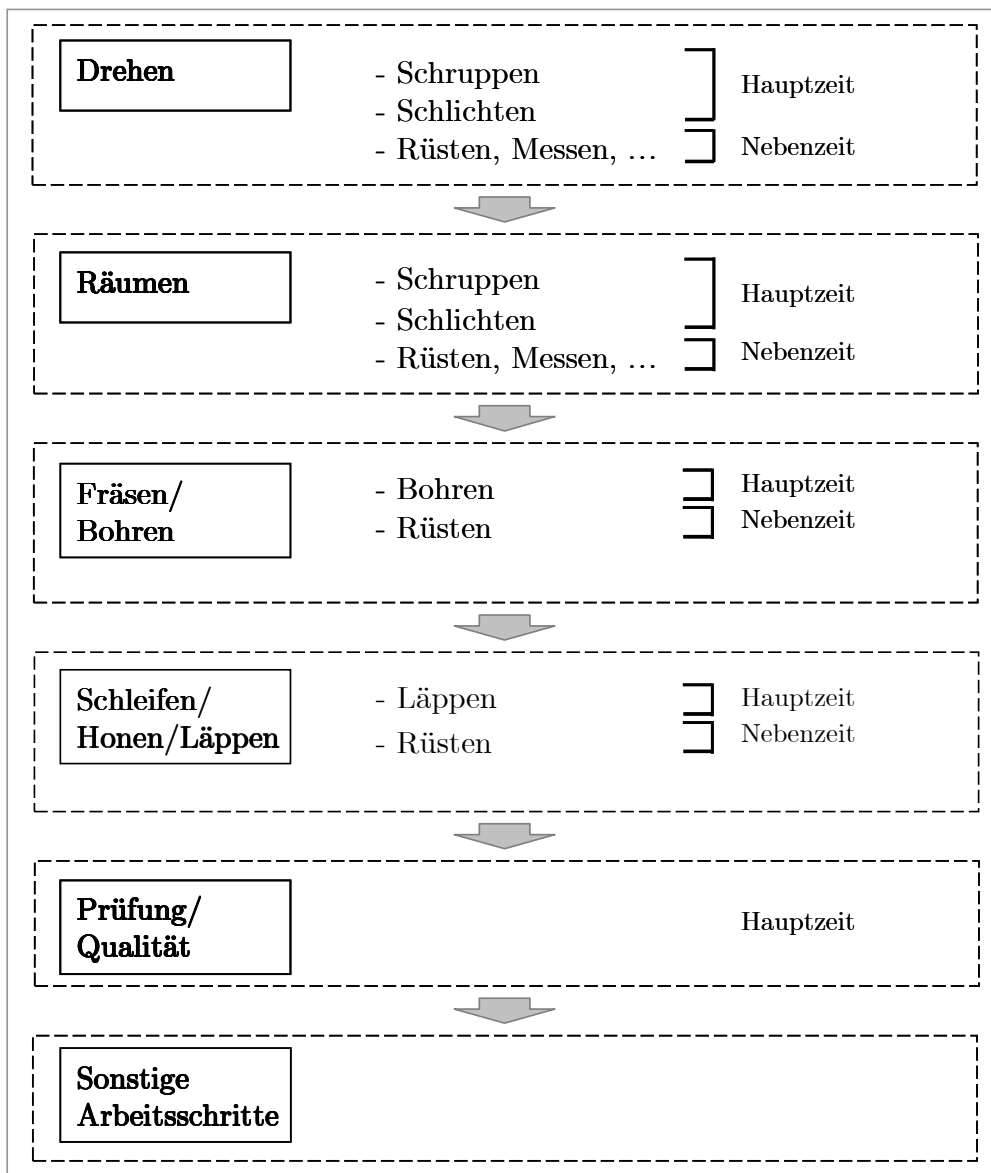


Abb. 4-4 Definierte Fertigungsabfolge einer Triebwerksscheibe beim OEM

### 4.2.2 Drehen

Scheiben gehören zu den rotationssymmetrischen Bauteilen eines Triebwerks, die durch Drehen bearbeitet werden. Das Fertigungsverfahren Drehen setzt sich aus dem Vor- und dem Fertigdrehen zusammen, dem sogenannten Schruppen bzw. Schlichten [101]. Die Einstellung der Fertigungsparameter erfolgt in Abhängigkeit des Bauteilmaterials bzw. dem Schneidstoff des Werkzeuges [82] [83]. Bei der Wahl der Schneidstoffe spielen wirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Günstige Schneidstoffe aus Hartmetall verschleifen aufgrund ihrer geringeren Härte schneller als keramische Schneidstoffe. Letztere weisen sich durch eine hohe Härte aus, sind allerdings in der Anschaffung teurer. Die anwendbaren Schneidstoffe und Fertigungsparameter sind insbesondere für Nickelbasislegierungen limitiert. Fertigungsparameter (Tab. 4-1) zur Bearbeitung von Triebwerksscheiben durch Drehen werden in [1] quantifiziert.

Die als Halbzeug ausgelieferten Scheiben werden in einem ersten Bearbeitungsschritt vorgedreht bzw. geschruppt. Dabei steht im Vordergrund ein möglichst hohes Zerspanvolumen zu erzielen. Die für das Vordrehen benötigte Zeit, wird maßgeblich durch die Schnittgeschwindigkeit bestimmt. Die Parameter Schnitttiefe und Vorschub werden durch die maximalen Schnittkräfte festgelegt. Das Vordrehen erfolgt bis auf eine Restaufmaßdicke vor der fertigen Endkontur. Die MTU Aero Engines GmbH gibt Aufmaßdicken vor Fertigdrehen von  $< 1\text{mm}$  an [24].

Das restliche Aufmaß wird durch Schlichten abgetragen. Bei diesem zweiten Bearbeitungsschritt des Drehens steht nicht ein hohes Zerspanvolumen, sondern die Bearbeitungsgüte im Vordergrund. Insbesondere bei kritischen Bauteilen, wie Scheiben, müssen die Zeichnungsanforderungen, wie z. B. Toleranz und Konzentrität, eingehalten werden. Dies erfordert ein präzises Bearbeiten der Scheibe, um die Güte des Bauteils zu garantieren und Ausschuß zu vermeiden. Deshalb sind Vorschub und Schnitttiefe beim Schlichten geringer als beim Vordrehen. Aus diesen Gründen stellt das Schlichten im Vergleich zum Schruppen einen kostenintensiveren Prozess dar.

Die Bearbeitung von Scheibenarmen erfordert, bedingt durch eine Vielzahl an Schneidvorgängen und Richtungswechsel des Werkzeuges, hohe Haupt- und Nebenzeiten [89]. Diese sogenannten Hinterschneidungen erhöhen die Bearbeitungszeit und bewirken dadurch höhere Fertigungskosten des Bauteils.

### 4.2.3 Räumen

Abhängig von thermischen und mechanischen Belastungen werden die Schaufel-Scheibe Verbindungen als axiale und radiale Schwalben- und/oder Tannenbaumverbindungen realisiert. Axiale Schaufel-Scheibe-Verbindungen finden sich in den Turbinen und in den vorderen Scheiben des Hochdruckverdichters wieder. Die axialen Scheibennuten werden durch Räumen gefertigt [56]. Der Rüstvorgang von Räum-

maschinen ist sehr zeitintensiv [34]. Dies führt zusammen mit den teuren Räumwerkzeugen zu einem verhältnismäßig kostenintensiven Fertigungsprozess im Vergleich zum Drehen. Das Drehen von Schaufel-Scheibe Verbindungen wird bei radialen Nuten angewendet. Fertigungsparameter (Tab. 4-1) zur Bearbeitung von Triebwerkscheiben durch Räumen werden in [1] quantifiziert.

#### 4.2.4 Fräsen/Bohren

Die Fertigungsschritte Fräsen und Bohren können, bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. die Fertigung von Langlochbohrungen, auf der gleichen Maschine durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden diese beiden Fertigungsschritte zusammengefasst. Drei wesentliche Fräs- und Bohrvorgänge sind für die Scheibenfertigung erforderlich:

- Flanschbohrungen;  
(Scheibenverbindung bzw. Wellenanbindung)
- Fräsen- und Bohren von Löchern;  
(Spannungsminderung, Gewichtsreduktion, Kühlluftführung)
- Entgratfräsen;  
(von kritische Flanschbohrungen und Räumnuten)

Die FAA stuft Bohren als kritischen Prozess ein [29]. Unsachgemäß ausgeführte Bohrungen können zum Scheibenversagen führen und stellen somit eine Gefährdung des Flugzeugs dar. Die Anzahl der Tragbohrungen bestimmt maßgeblich die Bearbeitungszeit der Scheibe und somit die anfallenden Kosten durch den Fertigungsschritt Bohren. Nach [89] benötigen Scheiben mit großem Außenradius und dementsprechend höheren mechanischen Belastungen mehr Bohrungen als kleine Scheiben. Ebenfalls steigt die Anzahl der Bohrungen zur Spannungsminderung und Gewichtsreduktion mit zunehmendem Außenradius der Scheibe an.

Beim Fräsen haben die Fräslänge der Scheibennuten sowie die Position der Nut wesentlichen Einfluss auf die Bearbeitungszeit. So muss beim Kantenverrunden die Schneide entlang der gesamten Nut und auf beiden Seiten verfahren [110]. Steht die Nutkante in einem Winkel zur Scheibenachse (Triebwerksachse), so muss der Fräser mehrmals aus unterschiedlichen Richtungen an die Kante heranzufahren. Das mehrfache Verfahren der Schneide führt zu einer längeren Bearbeitungsdauer und zu höheren Kosten des Bauteils. Fertigungsparameter (Tab. 4-1) zur Bearbeitung von Triebwerksscheiben durch Fräsen und Bohren werden in [1] quantifiziert.

#### 4.2.5 Schleifen/Honen/Läppen

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Fertigungsverfahren zählen Schleifen, Honen und Läppen nicht zu den spanenden Verfahren mit bestimmter geometrischer

Schneide, sondern gliedern sich bei den spanenden Verfahren mit unbestimmter geometrischer Schneide ein (Abb. 4-1). Schleifen, Honen und Läppen werden hier zu einem Fertigungsschritt zusammengefasst, da diese Verfahren zum Entgraten der Scheibe eingesetzt werden. Dabei wird Schleifen für das Entfernen von Graten eingesetzt, die beim Bohren und Fräsen von Löchern sowie beim Räumen von Nuten entstehen. Das Entgraten von Nuten mit komplexen Geometrien, wie Tannenbaumverbindungen erfolgt durch Druckfließläppen. Dabei wird eine Polierpaste, bestehend aus Abrasivkörnern und einem Trägermedium, durch die Hohlräume geführt. Das Druckfließläppen eignet sich zum Entfernen von Rauheiten oder Belägen aus schwer zugänglichen Bereichen und Hohlräumen [110]. Fertigungsparameter (Tab. 4-1) zur Bearbeitung von Triebwerksscheiben durch Schleifen werden in [1] quantifiziert.

#### 4.2.6 Prüfen

Das kontinuierliche Prüfen der Bauteile dient der Qualitätssicherung sowie zur Gewährleistung eines zuverlässigen und reproduzierbaren Fertigungsprozesses [34]. Die Bauteile werden während der gesamten Fertigung mehrfach geprüft, um Abweichungen festzustellen und gegebenenfalls frühzeitig korrigieren zu können. Die Überprüfung des spezifikationsgerechten Zustands der Bauteile ist insbesondere bei Scheiben relevant. Sie dient zur Vorbeugung potenzieller Funktionsbeeinträchtigungen, die zum Versagen des Bauteiles führen. Von Bedeutung ist die zerstörungsfreie Prüfung, zu der z. B. folgende Prüfverfahren zählen:

- Eindringrissprüfung
- Wirbelstromprüfung
- Ultraschallprüfung
- Eigenspannungsermittlung

Alle Prüfverfahren werden zur Bestimmung der Fertigungskosten zu einem Fertigungsschritt zusammengefasst.

#### 4.2.7 Sonstige Arbeitsschritte

Die zuvor beschriebenen Fertigungsverfahren zählen nach [89] zu den zeit- und kostenintensivsten Prozessen bei der Fertigung von Scheiben. Weitere Fertigungsverfahren wie:

- Polieren
- Reinigen
- Strahlen und
- Kennzeichnen

werden über einen prozentualen Faktor kostenspezifisch erfasst.



## 4.3 Bottom-Up Ansatz

Die Berechnungsmethode nach dem *Bottom-Up Ansatz* wurde entwickelt, um den Einfluss der unterschiedlichen Fertigungsschritte auf die Kosten zu bewerten und die Hauptkostentreiber zu identifizieren. Die regelbasierte Methode ermöglicht die Ableitung langfristiger Planungsziele bezogen auf die Fertigungskosten.

Diese Methode wurde für Halbzeuge entwickelt. Nach dem *Bottom-Up Ansatz* werden die Kosten zunächst auf Bauteilebene bestimmt, um durch Aufsummieren dann die jeweiligen Modulkosten zu berechnen. Die Produktionskosten des gesamten Triebwerks wiederum ergeben sich aus der Summe aller Modulkosten. Die Kostenberechnung nach dem *Bottom-Up Ansatz* orientiert sich an den DIN-Normen DIN 7523-2 [18], DIN EN 10243-1 [19] und DIN EN 10243-2 [20] zur Gestaltung von Gesenkschmiedestücken und wird am Beispiel einer Hochdruckverdichterscheibe durchgeführt.

### 4.3.1 Gestaltung des Halbzeuges und der Rohgeometrie der Scheibe

Unterschiedliche Anforderungen sind bei der Gestaltung eines Gesenkschmiedestücks zu berücksichtigen. Aus wirtschaftlichen Gründen ist bei der Konstruktion des Bauteils nicht nur auf dessen funktionsgerechte Gestaltung zu achten. Vielmehr sollten auch schmiede- und bearbeitungsbedingte Kriterien bei der Formgebung mit einbezogen werden, um eine fehlerfreie Ausbildung des Schmiedestücks zu gewährleisten.

In DIN 7523-2 [18] werden acht Formelemente zur Gestaltung des Schmiedestücks genannt. Dabei handelt es sich um die Formelemente: Bearbeitungszugaben, Seitenschrägen, Kantenrundungen, Hohlkehlen, Bodendicken, Wanddicken, Rippenbreiten und Rippenkopfradien. Die Gestaltung des Schmiedestückes erfolgt für die hier entwickelte Methode zur Bestimmung der Kosten zum Zeitpunkt der Vorauslegung über drei Formelemente, die wie folgt definiert sind:

- *Bearbeitungszugaben*  
Flächen, die einer spanenden Bearbeitung bedürfen, erhalten eine Bearbeitungszugabe von 4mm senkrecht zur Oberfläche.
- *Seitenschrägen*  
Um das Werkstück aus der Gravur heben zu können, erhalten in Umformrichtung liegende Flächen Seitenschrägen in einem Winkel von 6°.
- *Kantenrundungen*  
Die Umformkraft, um das Material in die Hohlkehlen der Schmiedeform zu pressen, steigt je kleiner die Kantenrundungen sind. Die bei diesem Prozess erzeugten Kerbspannungen können

zu Rissen im Gesenk führen. Für die Kantenrundungen ist ein Radius von  $4^\circ$  festgelegt, dessen Mittelpunkt innerhalb des Schmiedestücks liegt.

In Abb. 4-5 sind die jeweiligen Formzustände dargestellt. Ausgehend von der Fluggeometrie werden die drei Formelemente in der gelisteten Reihenfolge angewendet, um die Schmiedegeometrie, die in dieser Methode gleichzeitig als die Geometrie des Halbzeuges definiert ist, zu erhalten. Die Volumendifferenz von Halbzeug- zu Fluggeometrie entspricht dem Zerspanvolumen. Für die Berechnung der Fertigungs- und der Materialkosten nach dem *Bottom-Up Ansatz* werden folgende weitere Volumina benötigt:

- Fluggeometrie ( $V_{\text{Flug}}$ )
- Fluggeometrie ohne Bohrungen ( $V_{\text{Flug-Bohr}}$ )
- Fluggeometrie ohne Nuten ( $V_{\text{Flug-Nut}}$ )
- Fluggeometrie ohne Nuten und Bohrungen ( $V_{\text{Flug-Nut-Bohr}}$ )
- Schmiedeendgeometrie ( $V_{\text{Halbzeug}}$ )
- Rohteilvolumen vor Schmiedeprozess ( $V_{\text{Roh}}$ )

Für die Bestimmung des Rohvolumens wird aus der maximalen Breite und dem maximalen Durchmesser der Kontur des Halbzeuges das Zylindervolumen des Stöckels berechnet. Dies entspricht dem Rohvolumen vor dem Schmiedeprozess, (Abb. 4-5).

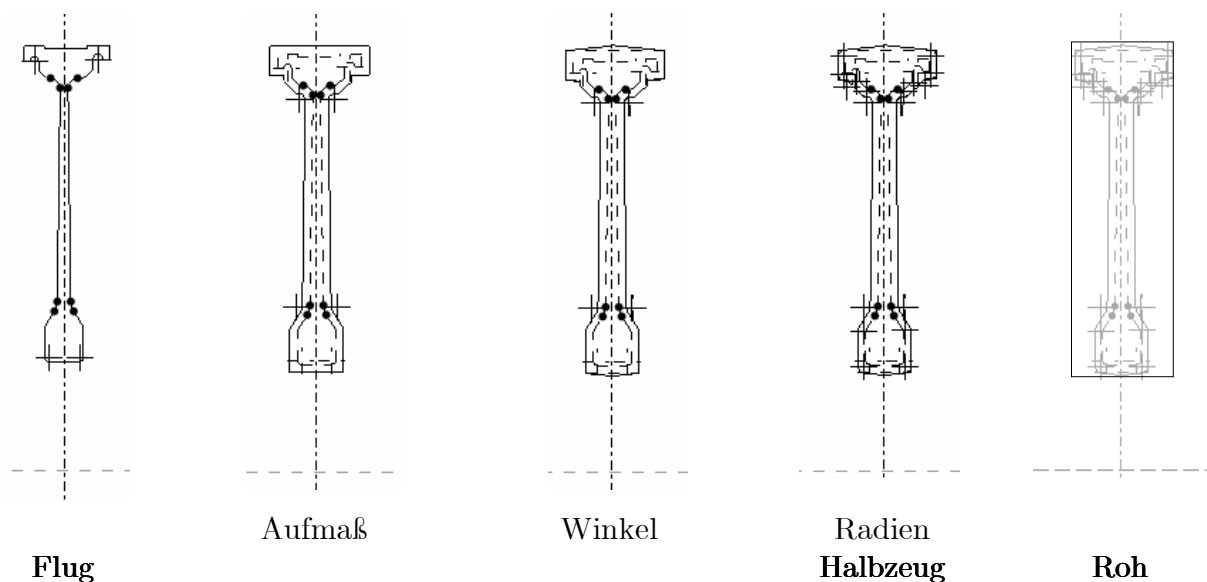


Abb. 4-5 Gestaltung von Fertigbauteil (Flug) über Halbzeug zum Rohbauteil (Roh)

### 4.3.2 Kostenberechnung Scheibe

#### Volumenberechnung

Mit den Gl. 4-1 bis Gl. 4-3 können die Zerspanvolumina der einzelnen Fertigungsschritte berechnet werden. Das abzutragende Volumen beim Drehen berechnet sich somit aus dem Volumen des Halbzeuges abzüglich des Flugvolumens ohne Bohrungen und ohne Nuten (Gl. 4-1). Die benötigten Parameter und deren Einheiten sind Tab. 4-2 zu entnehmen.

$$V_{Z\_Drehen} = V_{\text{Halbzeug}} - V_{\text{Flug-Nut-Bohr}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$V_{Z\_Nuten} = V_{\text{Flug-Nut}} - V_{\text{Flug}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$V_{Z\_Bohr} = V_{\text{Flug-Nut-Bohr}} - V_{\text{Flug-Nut}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Parameter	Symbol	Einheit
Volumen der Fluggeometrie	$V_{\text{Flug}}$	$\text{cm}^3$
Volumen der Fluggeometrie ohne Nuten	$V_{\text{Flug-Nut}}$	$\text{cm}^3$
Volumen der Fluggeometrie ohne Nuten und ohne Bohrungen	$V_{\text{Flug-Nut-Bohr}}$	$\text{cm}^3$
Volumen der Schmiedeendgeometrie (Halbzeug)	$V_{\text{Halbzeug}}$	$\text{cm}^3$
Volumen des Scheibenrohlings	$V_{\text{Roh}}$	$\text{cm}^3$
Zerspanvolumen des Fertigungsprozesses Drehen	$V_{Z\_Drehen}$	$\text{cm}^3$
Zerspanvolumen zum Fertigen der Scheibennut	$V_{Z\_Nut}$	$\text{cm}^3$
Zerspanvolumen des Fertigungsprozesses Bohren	$V_{Z\_Bohren}$	$\text{cm}^3$

Tab. 4-2 Parameterbeschreibung Volumenberechnung

#### Materialkostenberechnung

Aus dem Rohvolumen, der Materialdichte und dem Materialpreis können so die Materialkosten bestimmt werden (Gl. 4-4). Die benötigten Parameter und deren Einheiten sind Tab. 4-3 zu entnehmen.

$$K_{\text{Mat}} = V_{\text{Roh}} \cdot \rho \cdot P_{\text{Mat}} \quad \text{Gl. 4-4}$$

Parameter	Symbol	Einheit
Materialkosten	$K_{\text{Mat}}$	€
Materialdichte	$\rho$	$\text{kg}/\text{cm}^3$
Materialpreis	$P_{\text{Mat}}$	€/kg
Volumen der Scheibenrohlings	$V_{\text{Roh}}$	$\text{cm}^3$

Tab. 4-3 Parameterbeschreibung Materialkostenberechnung

### Fertigungskostenberechnung

Die folgenden Prozesse kommen bei der Fertigung einer Hochdruckverdichterscheibe zum Einsatz:

- Vordrehen (Schruppen),
- Feindrehen (Schlichten),
- Räumen der Nut oder
- Drehen der Nut,
- Bohren,
- Läppen und
- Qualitätskontrolle.

### Kostenberechnung - Drehen

Der Prozess Drehen setzt sich aus den zwei Fertigungsschritten Vor- und Feindrehen zusammen. Beide Schritte werden auch als Schruppen bzw. Schlichten bezeichnet. Zur Berechnung der Bearbeitungszeit der einzelnen Schritte wird das Zeitspanungsvolumen  $Q$  über die Parameter Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , Vorschub  $v_f$  und Schnitttiefe  $a_p$  bestimmt (Gl. 4-5) [126]. Das Zeitspanungsvolumen ist nach [34] das auf eine Zeiteinheit bezogene, vom Werkstück abzuspannende Werkstoffvolumen (Spannungsvolumen). Aus dem Zerspanvolumen und dem Zeitspanungsvolumen wird anschließend die Hauptzeit berechnet, welche das Werkzeug im Einsatz ist. Die Nebenzeit  $F_{tn}$  wird über einen prozentualen Faktor in Bezug auf die Hauptzeit ermittelt. Die Gesamtzeit, bestehend aus Haupt- und Nebenzeit, wird abschließend mit den Maschinenkosten  $K_M$  multipliziert, um die Kosten des jeweiligen Drehprozesses zu berechnen (Gl. 4-6).

$$Q_{\text{Schruppen/Schlichten}} = (v_c \cdot v_f \cdot a_p)_{\text{Schruppen/Schlichten}} \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$K_{\text{Drehen\_Schruppen}} = \left( \frac{V_{Z\_Drehen\_Schruppen}}{Q_{\text{Drehen}}} \right) \cdot \left( 1 + F_{tn\_Schruppen} \right) \cdot K_{M\_Schruppen} \quad \text{Gl. 4-6}$$

$$K_{\text{Drehen}} = K_{\text{Drehen\_Schruppen}} + K_{\text{Drehen\_Schlichten}} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Die Gesamtkosten für den Drehprozess setzen sich aus der Summe der Schrupp- und Schlichtkosten zusammen (Gl. 4-7). Die benötigten Parameter und deren Einheiten sind Tab. 4-4 zu entnehmen. Die Differenzierung zwischen Schruppen und Schlichten wird über die entsprechenden Indizes vorgenommen und ist in der Tabelle aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Parameter	Symbol	Einheit
Zerspanvolumen des Fertigungsprozesses Drehen	$V_{Z\_Drehen}$	$\text{mm}^3$
Zeitspannungsvolumen	$Q$	$\text{mm}^3/\text{min}$
Schnittgeschwindigkeit	$v_c$	$\text{mm}/\text{min}$
Vorschub	$v_f$	$\text{mm}/\text{U}$
Schnitttiefe	$a_p$	$\text{mm}$
Drehprozesskosten	$K_{Drehen}$	€
Prozentanteil Nebenzeit	$F_{tn}$	%
Maschinen-Stundensatz	$K_M$	€/h

**Tab. 4-4 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Drehen**

### Räumen und Drehen der Scheibennut

Bei der Kostenberechnung von Scheibennuten muss zunächst unterschieden werden, ob die Nut über den Prozess Drehen oder Räumen gefertigt wird. Die Erzeugung von Nuten durch Drehen ist vergleichbar mit dem zuvor beschriebenen Fertigungsschritt des Drehens von Scheibenflächen. Aus diesem Grund wird für Nute, die durch den Fertigungsschritt Drehen realisiert werden, auf die zuvor beschriebenen Ausführungen der Kostenberechnung des Drehens verwiesen.

Für die Kostenbestimmung von geräumten Nuten wird in einem ersten Schritt die minimale Teilung  $t_{\min}$  über die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , die Nutlänge  $l_{\text{Nut}}$  sowie die Spanraumzahl  $C$  bestimmt (Gl. 4-8). Die Spanraumzahl ist abhängig vom zu bearbeitenden Werkstoff [129]. Der Quotient von Nutlänge und minimaler Teilung ergibt die determinierte Zähnezah  $z$  (Gl. 4-9). Letztere wird benötigt um das Zeitspannungsvolumen  $Q$  zu berechnen, welches sich zudem noch aus der Zahnbreite  $b_z$ , der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und dem Vorschub  $v_f$  zusammensetzt ( Gl. 4-10).

$$t_{\min} = 3 \cdot \sqrt{v_c \cdot l_{\text{Nut}} \cdot C} \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$z = \frac{l_{\text{Nut}}}{t_{\min}} \quad \text{Gl. 4-9}$$

$$Q = z \cdot b_z \cdot v_c \cdot v_f \quad \text{Gl. 4-10}$$

$$K_{\text{Räumen}} = \left( \frac{V_{Z\_Räumen}}{Q} \right) \cdot (1 + F_{tn}) \cdot K_M \quad \text{Gl. 4-11}$$

Die Gesamträumkosten ergeben sich, wie aus Gl. 4-11 zu entnehmen, aus dem Quotienten von Zerspanvolumen  $V_{Z\_Räumen}$  zu Zeitspanungsvolumen  $Q$ , dem Faktor zur Bestimmung der Nebenzeit  $F_{tn}$  und dem Stundensatz der Maschine  $K_M$ . Die benötigten Parameter und deren Einheiten sind Tab. 4-5 zu entnehmen.

Parameter	Symbol	Einheit
Zerspanvolumen des Fertigungsprozesses Räumen	$V_{Z\_Räumen}$	$\text{mm}^3$
Zeitspanungsvolumen	$Q$	$\text{mm}^3/\text{min}$
Schnittgeschwindigkeit	$v_c$	$\text{mm}/\text{min}$
Vorschub	$v_f$	$\text{mm}/U$
Länge einer Nut	$l_{Nut}$	$\text{mm}$
Minimale Teilung	$t_{min}$	-
Zahnbreite eines Räumzahnes	$b_z$	$\text{mm}$
Determinierte Zähnezahzahl	$z$	-
Spanraumzahl	$C$	-
Prozentanteil Nebenzeit	$F_{tn}$	%
Maschinen-Stundensatz	$K_M$	€/h

Tab. 4-5 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Räumen

## Bohren

Das beim Prozess Bohren zu zerspanende Volumen  $V_{Z\_Bohr}$  wird über die Parameter Bohrdurchmesser  $D_{Bohr}$  und Bohrtiefe  $T_{Bohr}$  berechnet (Gl. 4-12). Das Zeitspanungsvolumen setzt sich aus der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , dem Vorschub  $v_f$  und dem Bohrdurchmesser  $D_{Bohr}$  zusammen (Gl. 4-13) [34]. Die Nebenzeit wird über einen prozentualen Faktor  $F_{tn}$  in Abhängigkeit der Hauptzeit ermittelt. Das Produkt aus Gesamtzeit und Maschinenkosten  $K_M$  ergibt die Bohrkosten  $K_{Bohr}$  (Gl. 4-14). Die benötigten Parameter und deren Einheiten sind Tab. 4-6 zu entnehmen.

$$V_{Z\_Bohr} = \frac{\pi \cdot D_{Bohr}^2}{4} \cdot T_{Bohr} \quad \text{Gl. 4-12}$$

$$Q_{Bohr} = \frac{\pi \cdot D_{Bohr}^2}{4} \cdot v_c \cdot v_f \quad \text{Gl. 4-13}$$

$$K_{Bohr} = K_M \cdot \left[ \frac{V_{Z\_Bohr}}{Q_{Bohr}} \cdot (1 + F_{tn}) \right] \quad \text{Gl. 4-14}$$

Parameter	Symbol	Einheit
Zerspanvolumen des Fertigungsprozesses Bohren	$V_{Z\_Bohr}$	mm <sup>3</sup>
Zeitspannungsvolumen	Q	mm <sup>3</sup> /min
Schnittgeschwindigkeit	$v_c$	mm/min
Vorschub	$v_f$	mm/U
Bohrdurchmesser	$D_{Bohr}$	mm
Bohrtiefe	$T_{Bohr}$	mm
Bohrprozesskosten	$K_{Bohr}$	€
Prozentanteil Nebenzeit	$F_{tn}$	%
Maschinen-Stundensatz	$K_M$	€/h

Tab. 4-6 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Bohren

### Läppen

Die beim Fertigungsprozess Läppen anfallenden Kosten werden über die Hauptzeit, den Faktor zur Bestimmung der Nebenzeit und über die Maschinenkosten berechnet (Gl. 4-15). Die benötigten Parameter und deren Einheiten sind Tab. 4-7 zu entnehmen.

$$K_{L\ddot{a}ppen} = t_h \cdot (1 + F_{tn}) \cdot K_M \quad \text{Gl. 4-15}$$

Parameter	Symbol	Einheit
Hauptzeit	$t_h$	h
Läppkosten	$K_{L\ddot{a}ppen}$	€
Prozentanteil Nebenzeit	$F_{tn}$	%
Maschinen-Stundensatz	$K_M$	€/h

Tab. 4-7 Parameterbeschreibung Fertigungsverfahren Läppen

### Qualitätskontrolle

Die durch die Qualitätsprüfung entstehenden Kosten  $K_{Qualit\ddot{a}t}$  werden über einen gemittelten Stundensatz  $K_m$  aller Prüfverfahren und der mittleren Zeit  $t_m$ , die zur Prüfung einer Scheibe erforderlich ist, bestimmt (Gl. 4-16).

$$K_{Qualit\ddot{a}t} = t_m \cdot K_m \quad \text{Gl. 4-16}$$

### 4.3.3 Kostenberechnung Gehäuse

Die Kostenbestimmung nach dem *Bottom-Up Ansatz* von Gehäusen ist abgeleitet aus den Berechnungsmethoden für Scheiben. Die Bestimmung des Zerspanvolumens bei der Fertigung erfolgt ebenfalls über die zuvor definierten Formelemente. Je nach Gehäuseform werden die benötigten Fertigungsverfahren angewandt. Ausnahme bildet der Prozess des Räumens. Dieser wird bei Gehäusen nicht angewandt.

## 4.4 Top-Down Ansatz

Das Kostenmodell des *Top-Down Ansatzes* setzt sich aus den Ebenen Triebwerks-, Modul- und Bauteilebene zusammen. Es orientiert sich somit an den drei Ebenen, die in Kap. 3.3.4 für ein Modell zur Kostenbestimmung zu einem frühen Zeitpunkt, wie der Vorauslegung, als sinnvoll und zweckmäßig festgelegt worden sind. Weiterhin entspricht es durch seinen modularen Aufbau der Anforderung, unterschiedlichste Triebwerkskonfiguration und neuartige Technologien abbilden zu können. Hierzu wurden folgende Module festgelegt:

- Fan
- Niederdruckverdichter (NDV)
- Zwischengehäuse (IMC)
- Mitteldruckverdichter (MDV)
- Hochdruckverdichter (HDV)
- Brennkammer (BK)
- Hochdruckturbine (HDT)
- Mitteldruckturbine (MDT)
- Niederdruckturbine (NDT)
- Turbinenauslaßgehäuse (TEC)
- Wellen und Lager (SaB)
- Nebenstromgehäuse (ByP)
- Gondel inkl. Schubumkehrer (Nac)
- Anbauteile bzw. Zubehör (ACC)
- Zusammenbau und Test (BaT)

Alle Module setzen sich aus Einzelbauteilen zusammen. Aus der Aufsummierung der Bauteilkosten ergeben sich die jeweiligen Modulkosten und aus der Addition aller Modulkosten die Produktionskosten des gesamten Triebwerks. Ausnahme stellen dabei die Module: *Anbauteile und Zubehör* (ACC) und *Zusammenbau und Test* (BaT) dar. Die Kosten dieser beiden Module werden prozentual zu den Triebwerkskosten bestimmt.

Zunächst werden die Bauteile vorgestellt, die in mehreren Modulen vorkommen und somit mehrfach verwendet werden. Dann wird die Kostenstruktur exemplarisch am Hochdruckverdichter durchgeführt, um die modulare Struktur des Kostenmodells zu verdeutlichen. Anschließend werden die weiteren Module beschrieben.



#### 4.4.1 Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Bauteilkosten

##### Lauf- und Leitrad-schaufeln

Lauf- und Leitrad-schaufeln (LA und LE) kommen in den Modulen Fan, NDV, MDV, HDV, HDT, MDT, NDT, IMC und TEC vor. Bis auf die Fanschaufeln ist die zu Grunde gelegte Berechnung für alle Lauf- bzw. Leitschaufeln gleich, wobei den entsprechenden Merkmalen von Verdichter- und Turbinenschaufeln Rechnung getragen wird (Gl. 4-17).

$$K_{LA/LE} = Nb \cdot \left[ F_{\text{Dämpfer}} + AV_{LA/LE} \cdot (1 + F_{\text{Kühlung}} + F_{\text{Deckband}} + F_{\text{Oberfläche}}) \right] \quad \text{Gl. 4-17}$$

- $F_{\text{Deckband}}$  zur Kostenberücksichtigung des Deckbandes von Laufschaufeln,
- $F_{\text{Kühlung}}$  zur Kostenberücksichtigung der Kühlluftbohrungen von Turbinenschaufeln,
- $F_{\text{Oberfläche}}$  zur Kostenberücksichtigung von Oberflächenbehandlungen und Beschichtungen von Schaufeln
- $F_{\text{Dämpfer}}$  zur Berücksichtigung der Mehrkosten durch Schwingungsdämpfer (Snubber)

Der Wertschöpfungsfaktor  $AV$  ist materialabhängig und für Lauf- und Leitschaufeln unterschiedlich. Der Basis-Bauteil Methode entsprechend (Kap. 3.6) werden vier Faktoren zur Berücksichtigung der Schaufelmerkmale bei der Kostenbestimmung verwendet. Alle Faktoren beziehen sich auf eine einzelne Schaufel. Zur Kostenberechnung der Schaufeln einer Stufe werden sie mit der Stückzahl  $Nb$  multipliziert.

##### Scheiben

Scheiben kommen in den Modulen Fan, NDV, MDV, HDV, HDT, MDT und NDT vor. Sie werden in allen Modulen gleich berechnet, wobei eine Differenzierung in Material- und Fertigungskosten vorgenommen wird.

##### Materialkosten

Die Materialkosten ergeben sich aus dem Materialkostenpreis  $K_{\text{Mat}}$  sowie dem benötigten Materialgewicht des Bauteils im Rohzustand  $m_{\text{Roh}}$  (Gl. 4-18).

$$K_{\text{Scheibe\_Mat}} = K_{\text{Mat}} \cdot m_{\text{Roh}} \quad \text{Gl. 4-18}$$

Da bei einer Kostenabschätzung meist nur die Endgeometrie des Bauteiles bekannt ist, wird der sogenannte Buy/Fly Faktor eingeführt (Gl. 4-19). Dieser berücksichtigt die Differenz von Flug- zu Rohteilvolumen, um  $m_{\text{Roh}}$  zu bestimmen und ist an die

Vorgehensweise in [70] angelehnt. Die Berechnung des Rohteilgewichts erfolgt nach Gl. 4-20.

$$F_{\text{Buy/Fly}} = \frac{m_{\text{Buy}}}{m_{\text{Fly}}} \quad \text{Gl. 4-19}$$

$$m_{\text{Roh}} = F_{\text{Buy/Fly}} \cdot m_{\text{Fly}} \quad \text{Gl. 4-20}$$

Die Materialkosten einer Scheibe ergeben sich somit aus (Gl. 4-21):

$$K_{\text{Scheibe\_Mat}} = K_{\text{Mat}} \cdot F_{\text{Buy/Fly}} \cdot m_{\text{Fly}} \quad \text{Gl. 4-21}$$

### *Fertigungskosten*

Die Berechnung der Fertigungskosten ergibt sich, wie aus Gl. 4-22 zu entnehmen ist, aus der Multiplikation des Fluggewichts des Bauteils sowie dem materialabhängigen Faktor  $AV_{\text{Scheibe}}$ . Der Faktor  $AV_{\text{Scheibe}}$  ist dabei ein Maß für die Kosten, die bei der Fertigung eines Kilogramm Rohmaterials durchschnittlich anfallen.

$$K_{\text{Scheibe\_Fert}} = AV_{\text{Scheibe}} \cdot m_{\text{Fly}} \quad \text{Gl. 4-22}$$

Die Kosten der Scheiben setzen sich aus Materialkosten und Fertigungskosten zusammen (Gl. 4-23):

$$K_{\text{Scheibe}} = K_{\text{Mat}} + K_{\text{Fert}} \quad \text{Gl. 4-23}$$

### **Gehäuse**

Die Kostenbestimmung von Gehäusen erfolgt über Gl. 4-24. Aus Durchmesser und Länge, wird die Mantelfläche des Gehäuses berechnet und mit dem Faktor  $AV_{\text{Gehäuse}}$ , der Material- und Fertigungskosten mit einbezieht, multipliziert.

$$K_{\text{Gehäuse}} = (AV_{\text{Gehäuse}} \cdot A_{\text{Gehäuse}}) = (AV_{\text{Gehäuse}} \cdot l \cdot D \cdot \pi) \quad \text{Gl. 4-24}$$

#### 4.4.2 Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Modulkosten

##### Fan

Die Berechnung des Moduls Fan setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Fan-Laufschaukeln
- Leitschaukeln (OGV und ESS)
- Scheibe
- Gehäuse
- Spinner

Bei der Bestimmung der Fan-Schaukelkosten wird zwischen Material- und Fertigungskosten differenziert. Dabei setzen sich die Materialkosten aus dem Rohmaterialpreis  $K_{\text{Roh}}$ , dem Buy/Fly Faktor und dem Fluggewicht der Schaukel zusammen (Gl. 4-25). Zudem enthält die Gleichung den Faktor  $F_{\text{Oberfläche}}$ , der zusätzliche Kosten z. B. für Schaukelkanten aus Titan zum Schutz vor Vogelschlag oder anderen Einwirkungen von Fremdkörpern (FOD) berücksichtigt.

$$K_{\text{Fan\_Schaufel\_Mat}} = K_{\text{Roh}} \cdot m_{\text{Fan\_Fly}} \cdot F_{\text{Buy/Fly}} \cdot (1 + F_{\text{Oberfläche}}) \quad \text{Gl. 4-25}$$

Die Bestimmung der Fertigungskosten erfolgt über den prozentualen Faktor  $F_{\text{Mat/Fert}}$ , der das Verhältnis von Material- zu Fertigungskosten wiedergibt (Gl. 4-26).

$$K_{\text{Fan\_Schaufel\_Fert}} = K_{\text{Fan\_Schaufel}} \cdot F_{\text{Mat/Fert}} \cdot N_b \quad \text{Gl. 4-26}$$

Anschließend werden Material- und Fertigungskosten addiert, um die Kosten einer Fan-Schaukel zu erhalten (Gl. 4-27). Für die Kostenberechnung aller Fan-Schaukeln müssen diese Kosten mit der Schaukelanzahl  $N_b$  multipliziert werden.

$$K_{\text{Fan\_Schaufel}} = K_{\text{Fan\_Schaufel\_Mat}} + K_{\text{Fan\_Schaufel\_Fert}} \quad \text{Gl. 4-27}$$

Die Kostenbestimmung der Leitschaukeln OGV und ESS, der Fan-Scheibe und des Gehäuses erfolgt über die zuvor beschriebenen Berechnungsmethoden für Schaukeln. Die Gesamtkosten des Fans ergeben sich aus Summe der einzelnen Bauteilkosten:

$$K_{\text{Fan}} = K_{\text{Fan\_Schaufel}} + K_{\text{OGV}} + K_{\text{ESS}} + K_{\text{Scheibe}} + K_{\text{Gehäuse}} + K_{\text{Spinner}} \quad \text{Gl. 4-28}$$

### Verdichter und Turbinen

Die Kostenbestimmung der Module NDV, MDV, HDV und HDT, MDT werden zusammengefasst vorgestellt, da sie sich in ihrem Aufbau nur geringfügig unterscheiden. Zur Bestimmung der Kosten werden zunächst die entsprechenden Bauteilkosten des Moduls pro Stufe berechnet, um anschließend über eine Aufsummierung der Bauteilkosten aller Stufen die Bauteilkosten des Moduls zu erhalten (Gl. 4-29). Dabei setzen sich die Module stets aus folgenden Bauteilen zusammen: Laufschaufeln, Leitschaufeln, Scheiben und Gehäuse. Die Kostenberechnung auf Bauteilebene erfolgt über die Berechnungsmethoden der jeweiligen Bauteile.

$$K_{\text{Modul\_Laufschaufeln}} = K_{\text{Modul\_Laufschaufel\_1}} + K_{\text{Modul\_Laufschaufel\_2}} + \dots + K_{\text{Modul\_Laufschaufel\_n}} \quad \text{Gl. 4-29}$$

Die Summe der Bauteilkosten aller Stufen ergibt die Gesamtkosten des Moduls (Gl. 4-30):

$$K_{\text{Modul}} = K_{\text{Laufschaufeln}} + K_{\text{Leitschaufeln}} + K_{\text{Scheiben}} + K_{\text{Gehäuse}} \quad \text{Gl. 4-30}$$

Eine Ausnahme stellt die Niederdruckturbinen dar. Zur Kostenberechnung dieses komplexen Moduls werden drei weitere Subkomponenten unterschieden, die durch einen prozentualen Faktor beschrieben werden. Dabei handelt es sich um Faktoren, deren Kosten sich jeweils auf das Bauteil beziehen an dem sie befestigt sind. So bezieht sich der Faktor  $F_{\text{Hitzeblech}}$  zur Bestimmung der zusätzlich anfallenden Kosten für das Hitzeblech, auf die Gehäusekosten der Niederdruckturbinen,  $F_{\text{Anlaufbelag}}$  auf die Gesamtkosten der NDT-Laufschaufeln und  $F_{\text{Unterstruktur}}$  auf die Gesamtkosten der NDT-Leitschaufeln (Gl. 4-31 bis Gl. 4-33).

$$K_{\text{NDT\_Hitzeblech}} = K_{\text{NDT\_Gehäuse}} \cdot F_{\text{Hitzeblech}} \quad \text{Gl. 4-31}$$

$$K_{\text{NDT\_Anlaufbelag}} = K_{\text{NDT\_Laufschaufeln}} \cdot F_{\text{Anlaufbelag}} \quad \text{Gl. 4-32}$$

$$K_{\text{NDT\_Unterstruktur}} = K_{\text{NDT\_Leitschaufeln}} \cdot F_{\text{Unterstruktur}} \quad \text{Gl. 4-33}$$

### Brennkammer

Die Berechnung umfasst zur Bestimmung der Brennkammerkosten folgende Bauteile:

- Gehäuse (inneres und äußeres)
- Flammrohr
- Einspritzung
- Diffusor

Die Kostenbestimmung des Gehäuses erfolgt nach der Berechnungsmethode für Gehäuse. Die Kostenberechnung von Brennraum, Einspritzung und Diffusor erfolgt über die Faktoren  $F_{\text{Flamm}}$ ,  $F_{\text{Inj}}$  und  $F_{\text{Diff}}$  (Gl. 4-34). Diese Faktoren beziehen sich auf die Gehäusekosten der Brennkammer, wie exemplarisch für die Kostenbestimmung der Einspritzung in Gl. 4-34 dargestellt ist.

$$K_{\text{BK\_Inj}} = K_{\text{BK\_Gehäuse}} \cdot F_{\text{Inj}} \quad \text{Gl. 4-34}$$

$$K_{\text{BK}} = K_{\text{BK\_Gehäuse\_außen}} + K_{\text{BK\_Gehäuse\_innen}} + K_{\text{BK\_Flamm}} + K_{\text{BK\_Injection}} + K_{\text{BK\_Diffusor}} \quad \text{Gl. 4-35}$$

### TEC und IMC

Die Module IMC und TEC bestehen aus den Komponenten Leitschaufel und Gehäuse. Die Kostenbestimmung dieser Module erfolgt dementsprechend über die Addition der entsprechenden Bauteilkosten.

### Wellen und Lager (SaB)

Über Durchmesser und Länge wird die Mantelfläche der Welle bestimmt. Diese wird den Wertschöpfungsfaktor  $AV_{\text{Welle}}$  skaliert, um die Kosten der Welle zu erhalten (Gl. 4-36).

$$K_{\text{Welle}} = AV_{\text{Welle}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{Welle}}}{1} \quad \text{Gl. 4-36}$$

Die Kostenbestimmung der Lager erfolgt über einen prozentualen Faktor, der sich auf das Modul an dem die jeweilige Lagerung angebracht ist bezieht, wie in Gl. 4-37 exemplarisch für eine Lagerung, deren Kosten sich auf den NDV beziehen, dargestellt ist.

$$K_{\text{Lager\_NDV}} = K_{\text{NDV\_Gehäuse}} \cdot F_{\text{Lager\_NDV}} \quad \text{Gl. 4-37}$$

Die Summe der Wellen- und Gehäusekosten ergeben die Gesamtkosten des Moduls SaB (Gl. 4-38).

$$K_{\text{SaB}} = K_{\text{Welle\_1}} + K_{\text{Welle\_2}} + \dots + K_{\text{Welle\_n}} +$$

$$K_{\text{Lager\_Modul\_1}} + K_{\text{Lager\_Modul\_2}} + \dots + K_{\text{Lager\_Modul\_n}} \quad \text{Gl. 4-38}$$

### Nebenstrom (ByP)

Die Kostenbestimmung des inneren und äußeren Nebenstromgehäuses erfolgt nach der Berechnungsmethode für Gehäuse.

### Gondel (Nac)

Bei der Kostenbestimmung der Gondel werden folgende Subkomponenten unterschieden:

- Gehäuse
- Schubumkehrer

Die Kostenbestimmung des Gehäuses erfolgt nach der Berechnungsmethode für Gehäuse. Die Kosten für den Schubumkehrer werden prozentual über den Faktor  $F_{\text{Reverse}}$ , der sich auf die Gesamtkosten des Gondelgehäuses bezieht, ermittelt (Gl. 4-39). Die Gondelkosten ergeben sich aus der Summe von Gehäuse und Schubumkehrer (Gl. 4-40).

$$K_{\text{Nac\_Reverse}} = K_{\text{Nac\_Gehäuse}} \cdot F_{\text{Reverse}} \quad \text{Gl. 4-39}$$

$$K_{\text{Nac}} = K_{\text{Gehäuse}} + K_{\text{Nac\_Reverse}} \quad \text{Gl. 4-40}$$

### ACC und BaT

Bei der Berechnung des Moduls ACC werden die Kosten bestimmt, die für Anbauteile und Nebenaggregate des Triebwerks anfallen. Diese Kosten werden im Sinne der groben Abschätzung (Kap. 3.3.1) prozentual erfasst und beziehen sich auf die Kosten des Kerntriebwerks.

Das Modul BaT berücksichtigt die Kosten, die beim Zusammenbau der Teile sowie beim Testen entstehen. Diese Kosten werden, wie beim Modul ACC, prozentual berechnet und beziehen sich ebenfalls auf die Kerntriebwerkskosten.

## 4.5 Zusammenfassung Top-Down und Bottom-Up Ansatz

Der *Top-Down Ansatz* ermöglicht durch seinen modularen Aufbau die Berechnung der Produktionskosten für jegliche Triebwerkskonfiguration. Durch die Anwendung des *Bottom-Up Ansatzes* können zudem neuartige Fertigungsverfahren abgebildet und ihr Einfluss auf die Kosten bewertet werden. Das Modell zur Bestimmung der Produktionskosten basierend auf diesen beiden Ansätzen ermöglicht somit die Ableitung langfristiger Planungsziele.

Dem *Top-Down* wie dem *Bottom-Up Ansatz* liegt der Materialkostenfaktor  $K_{\text{Mat}}$  zur Bestimmung der Materialkosten zu Grunde. Dieser Faktor kann aus [106] und [118] entnommen werden. Allerdings geben diese Quellen nur für eine begrenzte Auswahl an Werkstoffen die Kosten pro Kilogramm Material an. Zur Anwendung weiterer Werkstoffe sowie neuartiger Materialien im Produktionskostenmodell besteht die Notwendigkeit ein Materialkostenmodell zu entwickeln.

## 5 Modellierung der Materialkosten

Für die Berechnung der Materialkosten soll der Materialkostenfaktor den Preisentwicklungen am Markt angepasst werden können. Hierzu ist die Angabe in Preis pro Kilogramm €/kg des Materials notwendig. Diese Preisangaben beziehen sich auf die Preise des Stangenmaterials aus dem das Halbzeug gefertigt wird. Preisinformationen über spezielle, in der Triebwerksindustrie benötigte, Halbzeuge, wie z. B. Scheibenrohlinge, sind kaum verfügbar. In der Literatur sind nur begrenzt Angaben von triebwerkstypischen Werkstoffen zu finden. So sind in [106] Preisangaben typischer Titan- und Nickelbasislegierungen aufgeführt. Jedoch beziehen sich diese Preisangaben meist nur auf häufig verwendete Materialien und werden nicht aktualisiert. Dies führt zu der Notwendigkeit eine Methode zur Bestimmung der Rohmaterialkosten zu entwickeln. Dabei wird im Folgenden unter Rohmaterial das Stangenmaterial (Stöckel) verstanden aus dem anschließend der endkonturnahe Scheibenrohling geschmiedet wird.

### 5.1 Eingesetzte Werkstoffe im Triebwerksbau

In Abb. 5-1 sind die im Triebwerk verwendeten Werkstoffe und deren Einsatzorte dargestellt. Dabei werden Titanlegierungen maßgeblich im Verdichterbereich, während Nickellegierungen hingegen für Bereiche höherer Temperaturen eingesetzt werden [105]. Dazu zählen neben den Turbinen auch die hinteren Stufen des Verdichters [118]. Für die Baugruppen Wellen, Getriebeteile und Wälzlager werden vorwiegend Stähle verwendet. Aber auch zur Herstellung von Verdichter- und Turbinengehäusen sowie für tragende Strukturteile werden Stähle eingesetzt [22]. Da die im Triebwerksbau verwendeten Stahlsorten mit denen aus dem Maschinenbau identisch oder zumindest vergleichbar sind, wird auf die Eigenschaften dieses Materials, in der vorliegenden Arbeit, nicht näher eingegangen. Weitere im Triebwerk eingesetzte Werkstoffe sind Leichtmetalle sowie neuartige Verbundwerkstoffe und monolithische, intermetallische Werkstoffe. Sie spielen jedoch nach [105] eine untergeordnete Rolle und werden aus diesem Grund im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

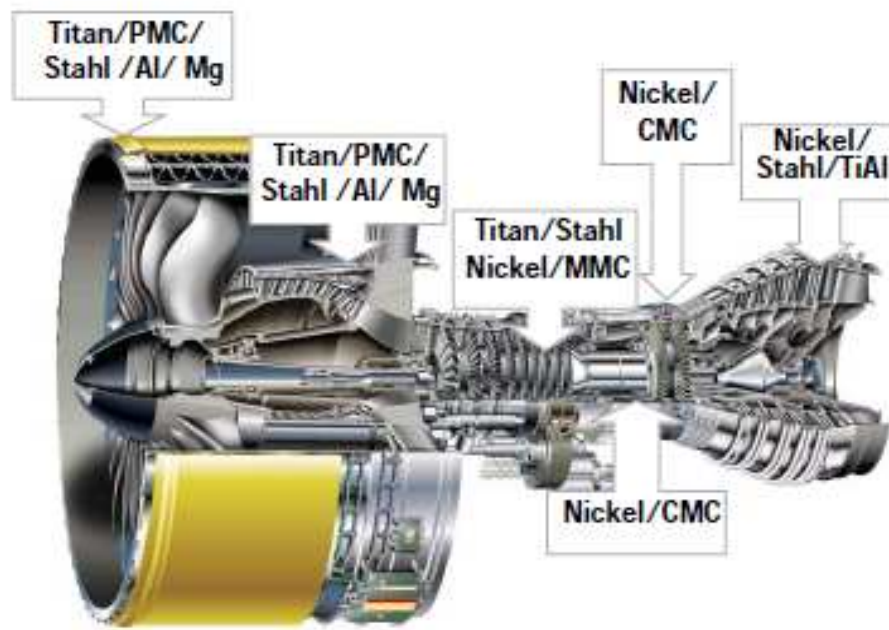


Abb. 5-1 Werkstoffe in Flugtriebwerken [105]

### 5.1.1 Eigenschaften typischer Werkstoffe im Triebwerksbau

**Titanlegierungen** zählen nach [118], neben den Nickellegierungen und hochwarmfesten Stählen, mit einem Volumenanteil von etwa 30% des Triebwerksgesamtvolumens, zu den Standardmaterialien im Triebwerksbau (Abb. 5-2). Seit der Einführung von Titanlegierungen ist der Anteil dieser Werkstoffe auf 36% des Strukturgewichts eines Triebwerks gestiegen [60].

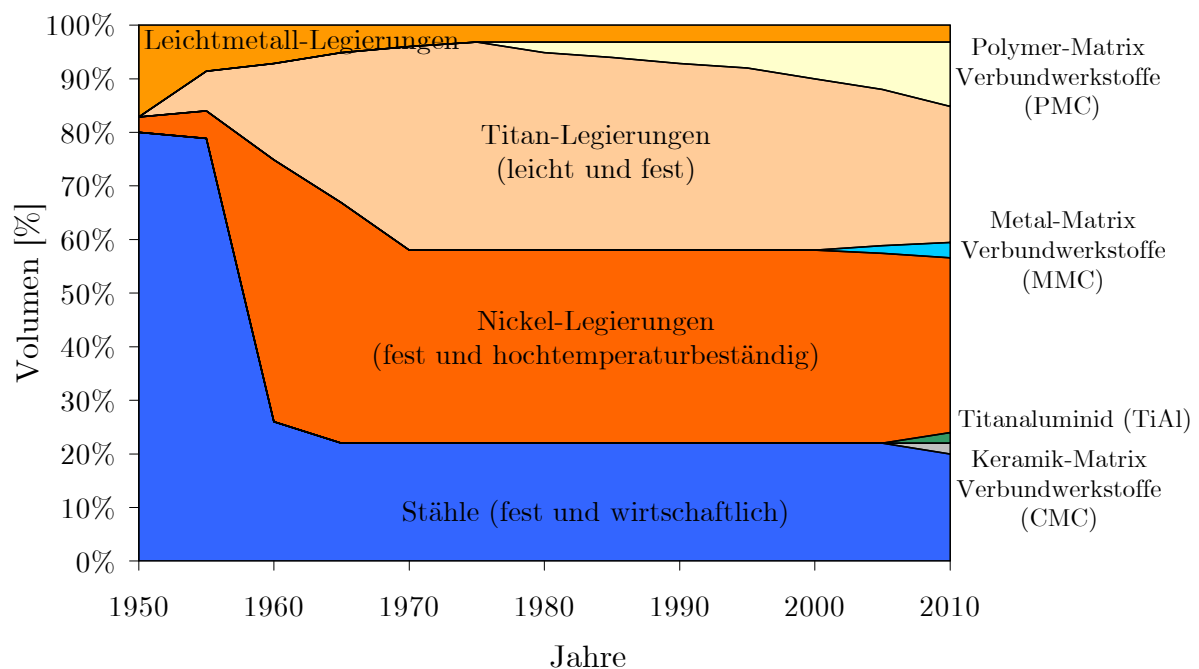


Abb. 5-2 Verwendung von Werkstoffen in Flugtriebwerken [22]



Der Werkstoff Ti-6Al-4V (kurz: Ti64) ist auch heute noch die meist verwendete Titanlegierung im Triebwerk- und Zellenbau [74]. Ti64 gilt als *Standard-Titanlegierung* und wird im Folgenden als Referenzwerkstoff für den Vergleich der berechneten mit den vorliegenden Materialkosten von Titanlegierungen angegeben. Die Herstellung von Titanlegierungen ist, bedingt durch den aufwendigen Gewinnungsprozess (Kroll-Prozess), der notwendigen Mehrfachumschmelzungen (Kap. 5.2) und der thermomechanischen Behandlung, aufwendig und kostenintensiv [100].

Hochlegierte **Nickelbasislegierungen**, auch Superlegierungen (amerik.: Superalloys) genannt, werden in den heißen Triebwerksbereichen eingesetzt. Die geringe Temperaturbeständigkeit von Titanlegierungen führt dazu, dass Nickelbasislegierungen ebenfalls in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters, in denen weit höhere Temperaturen herrschen, verwendet werden [118].

Nickelbasislegierungen werden sowohl als Guß- wie auch als Schmiedelegerungen auf dem Markt angeboten [42]. Hohe statische und dynamische Festigkeit bei Einsatztemperaturen bis zu 750°C zeichnen Schmiedelegerungen aus. Verbunden mit optimalen LCF-Eigenschaften, ein entscheidendes Kriterium bei der Scheibenauslegung, werden Scheiben aus Nickelbasislegierungen vornehmlich als Schmiedelegerungen hergestellt.

Die Legierung Inconel718 (kurz: Inco718 oder IN718) ist die im Triebwerk meist eingesetzte Nickellegierung [105]. Sie gilt als *Standard-Nickellegierung* und wird im Folgenden als Referenzwerkstoff für den Vergleich der berechneten mit den vorliegenden Materialkosten der Nickelbasislegierungen herangezogen. Weitere typische Nickelwerkstoffe für Turbinenscheiben und Schaufeln sind in Tab. A-2 und Tab. A-3 aufgeführt.

Gußlegierungen weisen im Vergleich zu Schmiedelegerungen eine höhere Temperaturbeständigkeit auf. Sie werden heutzutage für die Herstellung von Lauf- und Leitschaufeln der Turbine verwendet, da sie sich durch optimale Kriech- und Zeitstandfestigkeiten bei hohen Gastemperaturen auszeichnen [107]. Neben dem polykristallinen Gefüge, werden sie gerichtet erstarrt oder als Einkristall [40] hergestellt. Für die Einstellung eines gerichtet erstarrten sowie eines einkristallinen Gefüges sind aufwendige und kostenintensive Erstarrungstechniken notwendig.

## 5.2 Herstellung

Für die Herstellung luftfahrtspezifischer Werkstoffe werden aufwendige Verfahren eingesetzt. Dies wird exemplarisch an der Herstellung von Titanlegierungen für Titanscheiben beschrieben, beginnend mit der Erzgewinnung, über die unterschiedlichen Schmelzverfahren bis hin zum fertig geschmiedeten Bauteil, welches anschließend an den Triebwerkshersteller ausgeliefert wird. Für die Herstellung anderer Werkstoffe wird auf [15] verwiesen.

### 5.2.1 Gewinnung

Titan kommt in der Natur nicht in Reinform vor, sondern muss aus den Mineralen Rutil und Ilmenit gewonnen werden. In einem ersten Herstellungsschritt wird Titan-tetrachlorid durch Zugabe von Chlor aus den Mineralen gewonnen. Bei der anschließenden Reduktion durch Zugabe von flüssigem Magnesium, entsteht reines Titanmetall, das auf Grund seines Aussehens auch als Titanschwamm bezeichnet wird [62].

Die beschriebenen Verfahren zur Gewinnung sind aufwendig und dementsprechend kostenintensiv (Abb. 5-3). Der bei der Gewinnung der Elemente entstehende Mehrwert wird bei der Kostenberechnung durch den Wertschöpfungsfaktor  $AV_{\text{Gewinnung}}$  berücksichtigt. Dieser Wertschöpfungsfaktor wird bei der Kostenberechnung entsprechend des jeweiligen Werkstoffes spezifisch angepasst.

### 5.2.2 Schmelze (Ingot)

Aufgrund der hohen Reaktivität von Titan mit Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff, erfolgt das Umschmelzen des Titanschwamms zu einem Gussblock (Ingot) unter Vakuum. Es werden unterschiedliche Reinheitsgrade der Titanlegierungen unterschieden. Um den in der Luftfahrt geforderten Reinheitsgrad 4 der Titanlegierungen zu erhalten, ist mehrfaches Umschmelzen notwendig. Typischer Weise werden drei Verfahren (triple-melt titanium) angewendet. Diese sind:

- das Vakuuminduktions-Schmelzverfahren (VIM) [52],
- das Vakuumlichtbogen-Umschmelzverfahren (VAR) [53],
- das Elektroschlacke Umschmelzverfahren (ESR) [44].

Sie werden über den Wertschöpfungsfaktor  $AV_{\text{Schmelze}}$  bei der Berechnung der Materialkosten berücksichtigt.

### 5.2.3 Schmiede-Prozesse

Beim Schmieden können zwei Schmiedeprozesse unterschieden werden. Das Schmieden von Ingot auf Billet und das Fertigschmieden auf Endnahkontur der Scheibe (Halbzeug). Das Schmieden von Ingot auf Billet hat zum Ziel, den bei der Schmelze gewonnenen Gußblock im Durchmesser so zu reduzieren, dass er den für die Weiterverarbeitung zur Scheibe notwendigen Durchmesser aufweist. Anschließend wird das Billett in Stücke geschnitten und die so gewonnenen Stöckel auf endkonturnahe (Halbzeug) Form der Scheibe geschmiedet [11]. Die Herstellung vom Stöckel bis zum Halbzeug ist bereits in Kap. 4.2.1 beschrieben. Der Einfluss der Schmiedeverfahren auf die Materialkosten wird über den Wertschöpfungsfaktor  $AV_{\text{Schmiede}}$  berücksichtigt.

### 5.2.4 Einflussfaktoren auf die Materialkosten

Die Gewinnung von Titan-Schwamm macht ca. ein Drittel der Materialkosten aus (Abb. 5-3). Das Schmelzen und Schmieden des Werkstoffes umfasst zusammen 2/3 der Materialherstellungskosten. Bei der Schmelze ist die Kostenentstehung auf die aufwendigen und mehrfach durchzuführenden Umschmelzverfahren unter Vakuum zurückzuführen. Weiterhin tragen Abkühlraten und Wärmebehandlung maßgeblich zur Einstellung des Werkstoffgefüges bei. Sie werden je nach Legierungszusammensetzung individuell angepasst [109]. Die Wärmebehandlung der Legierungen kann zu erheblichen Kostenunterschieden unter den Legierungen führen, auch wenn die Legierungen sich in ihrer chemischen Zusammensetzung nur minimal unterscheiden. Die entstehende Wertschöpfung bei den angewendeten Verfahren trägt somit maßgeblich zu den Materialkosten bei. Die Materialkosten betragen 50% der Produktionskosten. Die Fertigungskosten entsprechen den anderen 50% [35].

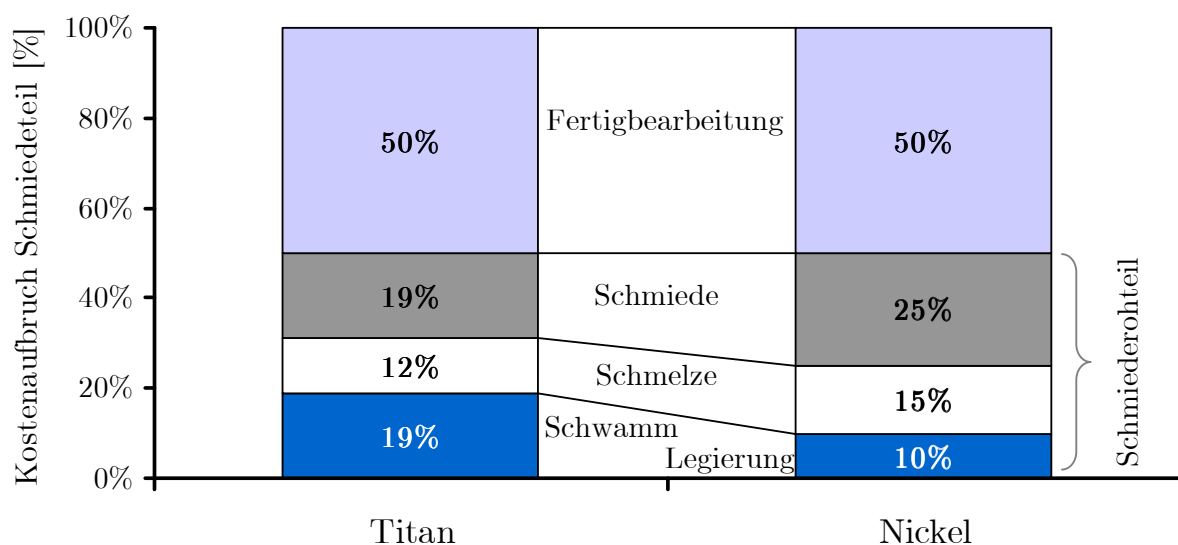


Abb. 5-3 Kostenaufbruch für Titanlegierungen [35] und Nickelbasislegierungen [67]

In Abb. 5-3 ist ebenfalls der Kostenaufbruch eines Schmiedebauteils am Beispiel der V2500 Scheibe der 6. Niederdruckturbinenstufe dargestellt. Bei dem Werkstoff handelt es sich um eine temperaturbeständige Nickelbasislegierung. Die prozentuale Kostenverteilung ist mit der von Titanlegierungen vergleichbar, da die Herstellprozesse Schmelze, Schmiede und Fertigbearbeitung bei beiden Werkstoffen stattfinden. Die Kosten zur Gewinnung der wesentlichen Bestandteile entsprechen 10% der Produktionskosten einer Scheibe. Schmelze und Schmiede umfassen 15% respektive 25% der Produktionskosten. Wie zuvor bei den Titanlegierungen umfassen die Materialkosten etwa die Hälfte der Produktionskosten.

Ein schematischer Überblick der Herstellungsrouten für Verdichter- und Turbinenschaufeln ist in Abb. A-2 und Abb. A-3 dargestellt.

### 5.3 Methode zur Bestimmung der Materialkosten

Die Methode zur Bestimmung der Materialkosten basiert auf der chemischen Zusammensetzung der Legierungen und den Wertschöpfungsfaktoren AV der Materialherstellung. Dabei wird vorausgesetzt, dass ein Einfluss der Zulieferkette auf die Wertschöpfungsfaktoren zu vernachlässigen ist. Informationen über die chemische Zusammensetzung der Legierungen sind in der Literatur verfügbar und werden somit als bekannt vorausgesetzt. Zur Bestimmung der Rohstoffkosten werden ausgehend von der chemischen Zusammensetzung die jeweiligen Massenanteile der Elemente  $m$  mit den entsprechenden Elementenkosten  $K_E$  multipliziert und anschließend aufsummiert:

$$K_{\text{Rohstoffe}} = K_{E1} \cdot m_1 + K_{E2} \cdot m_2 + \dots + K_{En} \cdot m_n \quad \text{Gl. 5-1}$$

Für die Berechnung der Materialkosten ausgehend von der Gewinnung der Elemente über die Schmelze bis hin zum fertiggeschmiedeten Halbzeug werden für die Kostenberechnung drei Wertschöpfungsfaktoren definiert. Die Wertschöpfungsfaktoren  $AV_{\text{Gewinnung}}$ ,  $AV_{\text{Schmelze}}$  und  $AV_{\text{Schmiede}}$  werden mit dem entsprechenden Kostensatz  $K_{\text{Gewinnung}}$ ,  $K_{\text{Schmelze}}$  bzw.  $K_{\text{Schmiede}}$  multipliziert und zu den Rohstoffkosten addiert. Die Kostenberechnung des Werkstoffes erfolgt somit anhand von Gl. 5-2. Für neuartige Werkstoffe und Materialherstellprozesse können die Wertschöpfungsfaktoren angepasst und gegebenenfalls erweitert werden (Gl. 5-3).

$$K_{\text{Werkstoff}} = K_{\text{Rohstoffe}} + K_{\text{Gewinnung}} \cdot AV_{\text{Gewinnung}} + K_{\text{Schmelze}} \cdot AV_{\text{Schmelze}} + K_{\text{Schmiede}} \cdot AV_{\text{Schmiede}} \quad \text{Gl. 5-2}$$

$$K_{\text{Werkstoff}} = K_{\text{Rohstoffe}} + K_1 \cdot AV_1 + K_2 \cdot AV_2 + \dots + K_n \cdot AV_n \quad \text{Gl. 5-3}$$

Die Wertschöpfungsfaktoren leiten sich aus den jeweiligen Verfahren zur Herstellung des entsprechenden Werkstoffes ab. Voraussetzung zur Bestimmung dieser Faktoren ist somit die Kenntnis der entsprechenden Herstellverfahren, sowie der speziellen Abkühlraten und Wärmebehandlungen zur Gefügeeinstellung der jeweiligen Legierungen [109].

## 5.4 Ergebnisse und Validierung der Materialkosten-Methode

Zur Validierung werden für Titan- und Nickelbasislegierungen bekannte Materialkosten [106] aus dem Jahre 2005 verwendet (Tab. A-1, Tab. A-2, Tab. A-3). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, basieren die hier berechneten Materialkosten auf den Kosten der Elemente des Jahres 2005. Die berechneten Materialkosten und die Referenzkosten von Titanlegierungen für Scheiben sind in Abb. 5-4 dargestellt. Zur Validierung wurden die berechneten Kosten für die Standardlegierung Ti64 auf die *Referenz*-Kostenangabe für diesen Werkstoff [106] normiert (Kostendifferenz  $\Delta = 0\%$ ). Die Kostenergebnisse drei weiterer Titanlegierungen wurden mit den Referenzkosten verglichen.

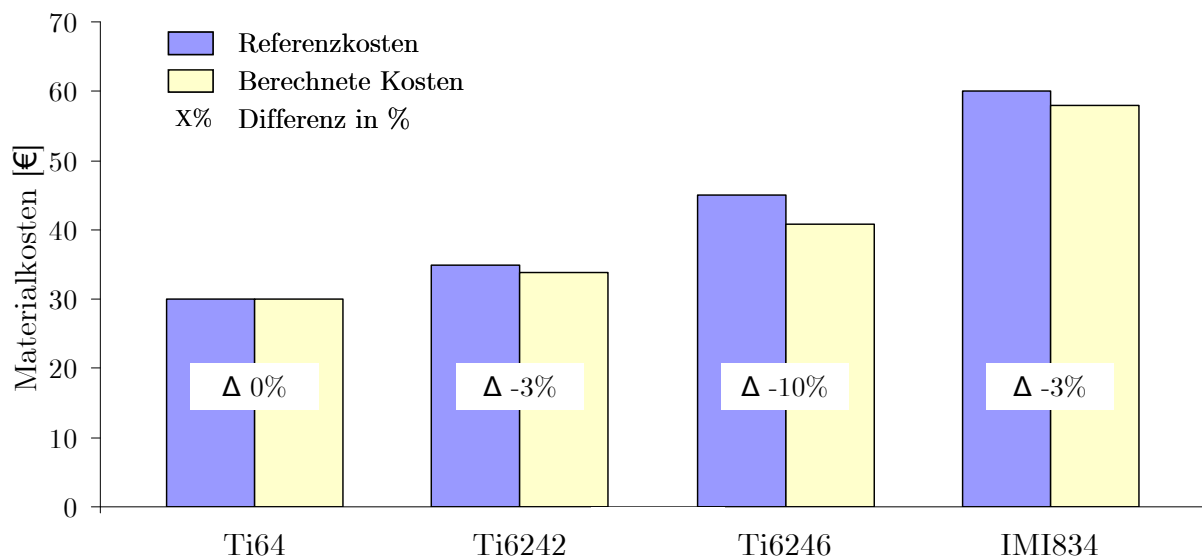
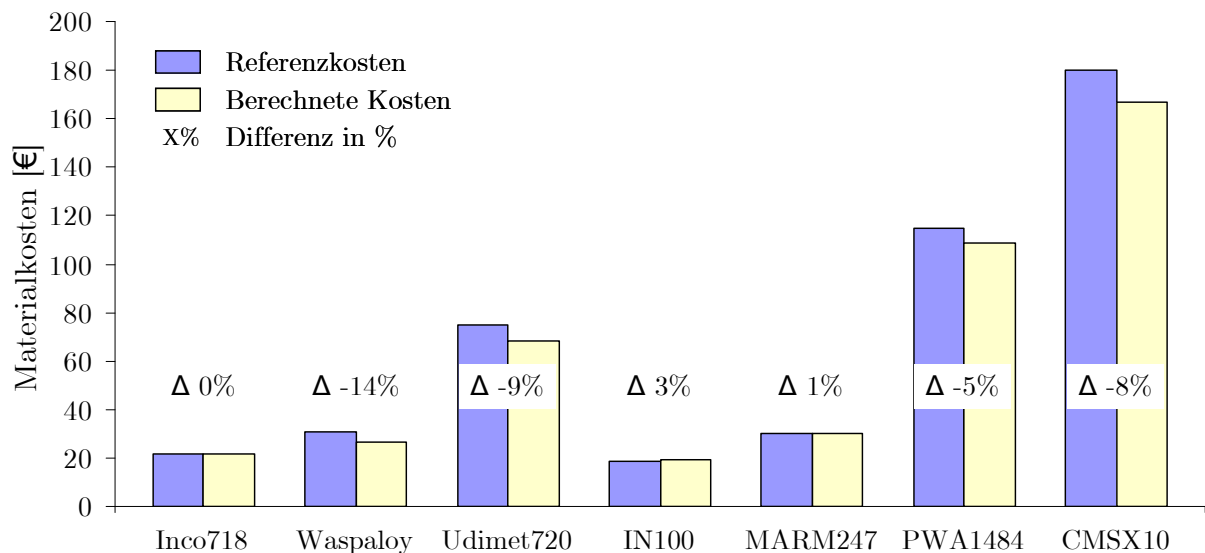


Abb. 5-4 Kostenvergleich berechnete Kosten vs. Referenzkosten – Titanlegierungen

Es kann gezeigt werden, dass die mit der Materialkosten-Methode berechneten Kosten für die weiteren Titanwerkstoffe nur geringfügige Abweichungen zu den Referenzkosten aufweisen. Die Kosten für die Werkstoffe Ti6242 und IMI834 können mit einer Genauigkeit von -3% berechnet werden. Für Ti6246 ist eine Abweichung von -10% festzustellen. Dieser Kostenvergleich zeigt, dass die entwickelte Methode zur Bestimmung der Materialkosten anwendbar ist. Die Ergebnisse können nach der

VDI-Richtlinie zur Bewertung von Kostenschätzungen [116] als sehr gutes Ergebnis eingestuft werden.

Bei einem Vergleich der berechneten Kosten der Nickellegierungen für Scheiben und Schaufeln ist ein ähnliches Ergebnis, wie bei den Titanwerkstoffen zu erkennen. Als Referenzwerkstoff wurde die Standard Nickelbasislegierung Inco718 festgelegt (0%). Die berechneten Kosten liegen bei einer Genauigkeit von -14% bis +3% im Vergleich zu den Referenzkosten (Tab. A-2 und Tab. A-3). Somit kann für Nickellegierungen ebenfalls die Aussage getroffen werden, dass die zu Grunde liegenden Berechnungsmethoden anwendbar sind und die erreichten Genauigkeiten den Anforderungen einer Methode zur Bestimmung der Materialkosten zum Zeitpunkt der Vorauslegung genügen.



**Abb. 5-5 Kostenvergleich berechnete Kosten vs. Referenzkosten – Nickellegierungen**

Es kann festgehalten werden, dass die Materialkostenmethode einen Kostenvergleich unterschiedlicher Werkstoffe miteinander ermöglicht und Kostentendenzen für neuartige Werkstoffe abgeschätzt werden können. Weiterhin kann das Materialkostenmodell als wirtschaftliche Entscheidungshilfe bei der Auswahl zweier technisch verwendbarer Werkstoffe herangezogen werden.

# 6 Verifizierung des Produktionskostenmodells

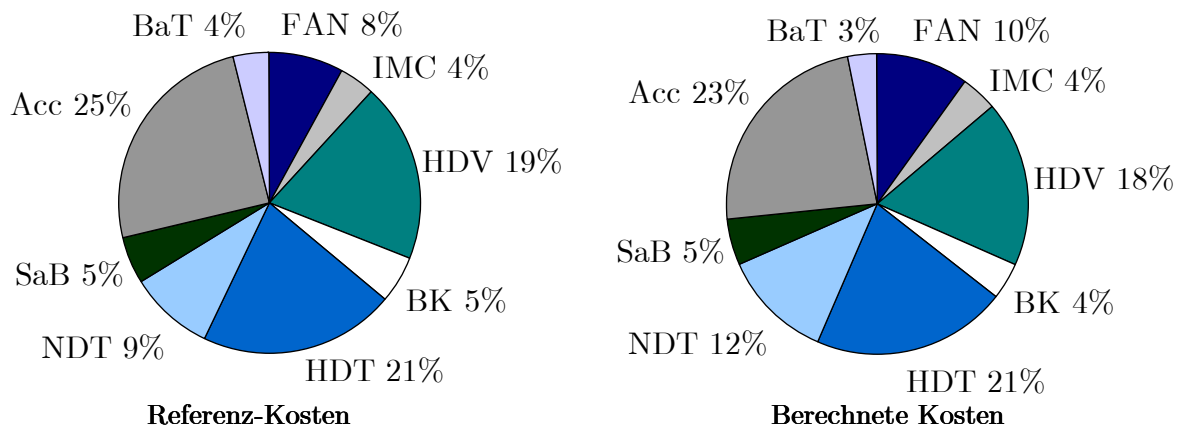
Zur Verifizierung des entwickelten Modells zur Bestimmung der Produktionskosten werden die hiermit berechneten Kostenergebnisse mit den Kosten eines Referenztriebwerks verglichen. Bei dem Referenztriebwerk handelt es sich um ein Zwei-Wellen-Triebwerk mit hohem Nebenstromverhältnis und Strahlmischung der mittleren Schubklasse (82,1 kN bis 93,2 kN). Es ist als Antrieb für Geschäftsreise- und kleinere Linienflugzeuge vorgesehen.

## 6.1 Verifizierung auf Triebwerks- und Modulebene

Für die Verifizierung der Kosten auf Triebwerks-Ebene werden die berechneten Kosten des gesamten Triebwerks mit den angenommenen Produktionskosten verglichen. Die angenommenen Produktionskosten setzen sich aus dem in [111] angegebenen Listenpreis abzüglich der in Kap. 3.9.1 festgelegten 10%-igen Gewinnmarge zusammen. Es wird eine Abweichung von +2% zwischen den berechneten Kosten und den angenommenen Produktionskosten ermittelt. Wird die erfasste Abweichung mit der für das Vorentwicklungstool festgelegten Genauigkeitsanforderung von 10% verglichen ist festzustellen, dass die Vorhersage der Produktionskosten innerhalb der geforderten Genauigkeit liegt (Kap. 3.9.1). Somit entspricht das entwickelte Kostenmodell den vorgegebenen Anforderungen.

Auf Modul-Ebene erfolgt die Verifizierung der Ergebnisse anhand der prozentualen Kostenverteilung der Module zwischen Referenztriebwerk [48] und berechneten Kosten. Wie in Abb. 6-1 dargestellt, ist die Verteilung der berechneten Kosten mit den Werten des Referenztriebwerks vergleichbar. Lediglich die Module Fan und NDT werden mit einer Abweichung von +2% bzw. +3% überschätzt, das Modul Acc wird -2% unterschätzt. Es kann festgehalten werden, dass die prozentuale Kostenverteilung der berechneten Modulkosten mit der Kostenverteilung der Module des Referenztriebwerks vergleichbar ist.

**Abweichung der berechneten Triebwerksgesamtkosten:**  
**2%**



	Fan	IMC	HDV	BK	HDT	NDT	SaB	Acc	BaT
<b>Δ berechnet zu Ref.</b>	2%	0%	-1%	-1%	0%	3%	0%	-2%	-1%

Abb. 6-1 Prozent. Kostenverteilung der Modulkosten für Referenz vs. berechnetes TW

## 6.2 Verifizierung auf Bauteilebene

Für den Hochdruckverdichter des Referenztriebwerks liegt der Kostenaufbruch bis auf Bauteilebene vor. Aus diesem Grund wird die Verifizierung der Methode auf Bauteilebene anhand des Hochdruckverdichters durchgeführt

Die Bestimmung der Produktionskosten von Scheiben kann bei der hier entwickelten Methode sowohl über den *Top-Down* (TD) sowie den *Bottom-Up Ansatz* (BU) erfolgen. Dies erlaubt eine Aussage über die Vergleichbarkeit der beiden Ansätze. Dazu werden die berechneten Scheibenkosten bei beiden Ansätzen auf die Kosten der Scheibe 8 normiert, da diese Scheibe über keine zusätzlichen konstruktiven Merkmale, wie z. B. Scheibenarme und Bohrungen, verfügt. Die prozentualen Abweichungen der einzelnen Scheibenkosten der berechneten Kosten gegenüber den Referenzkosten sind in Tab. 6-1 aufgeführt.

Stufe	Top-Down	Bottom-Up	Stufe	Top-Down	Bottom-Up
	Abweichung			Abweichung	
1	19%	2%	6	17%	-2%
2	2%	6%	7	57%	-3%
3	4%	8%	8	0%	0%
4	36%	3%	9	6%	1%
5	2%	1%	10	45%	3%
<b>Gesamt</b>			19% 4%		

Tab. 6-1 Abweichung berechnete vs. Referenzkosten von Scheiben nach TD und BU Ansatz



### 6.2.1 Top-Down Ansatz

Für den *Top-Down Ansatz* wird bei einem Vergleich aller Scheiben der berechneten Kosten gegenüber den gesamten Referenzkosten der Scheiben des HDVs, die berechneten Kosten mit einer Abweichung von 19% überschätzt. Bei Betrachtung der Kostenergebnisse der einzelnen Scheiben streuen die Kostenabweichungen in einem Bereich von 0% bis 57%. Dabei weisen die Scheiben 4, 7 und 10 mit 36%, 57% und 45% die größten Abweichungen auf. Für die Scheiben 7 und 10 liefert die Betrachtung der konstruktiven Ausführung der Scheiben eine Erklärung (Abb. 6-2). Die vordere und die hintere Verdichtertrommel werden zwischen Scheibe 6 und 7 verschraubt. Zudem ist der sog. Vortex Reducer zwischen diesen beiden Scheiben befestigt. Aus diesem Grund weist Scheibe 7 einen langen Scheibenarm auf. Dieser führt zu einem hohen Volumen und hohem Gewicht des Rohbauteiles. Dieses äußert sich bei der Kostenberechnung über den *Top-Down Ansatz* in der Berechnung der Materialkosten des Bauteils. So setzen sich die berechneten Produktionskosten der Scheibe 7 aus 63% Materialkosten und 37% Fertigungskosten zusammen. Der Anteil der Materialkosten an den Produktionskosten der Scheibe 7 ist somit annähernd doppelt so hoch wie der Anteil der Fertigungskosten. Die Erklärung für die hohe Abweichung der Scheibe 10 ist entsprechend. Scheibe 10 weist einen überdimensionalen Scheibenarm, im Vergleich zu den vorderen Verdichterscheiben, auf. Der Anteil der Materialkosten der Scheibe 10 ist im Vergleich zu den Fertigungskosten doppelt so hoch. Im Vergleich zu Scheibe 7 und 10 weist Scheibe 4 zwar einen kürzeren Scheibenarm auf, aber auch bei dieser Scheibe, führt der Scheibenarm zu einer Abweichung der berechneten Kosten zu den Referenzkosten der Scheibe. Es kann somit festgehalten werden, dass beim *Top-Down Ansatz* Scheiben mit Scheibenarmen bei der Kostenberechnung überschätzt werden. Diese Aussage wird von Scheibe 1, die einen Scheibenarm zur Verbindung an die Welle aufweist und um 19% von den Referenzkosten abweicht, bestätigt. Ausnahme bilden die Scheiben 2 und 3, die ebenfalls mit Scheibenarmen konstruiert worden sind, jedoch lediglich Kostenabweichungen zu den Referenzkosten von 2% bzw. 4% aufweisen.

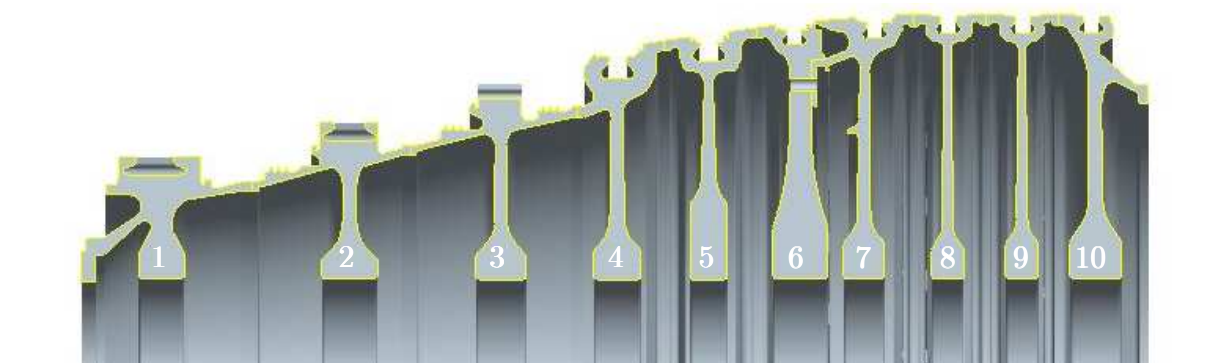


Abb. 6-2 Hochdruckverdichterscheiben Referenztriebwerk

Allerdings weisen diese beiden Scheiben zusätzlich Labyrinthdichtungen auf. Der Kosteneinfluss durch die Fertigung von Labyrinthdichtungen wird bei der Kostenberechnung über den *Top-Down Ansatz* nicht berücksichtigt. So kann angenommen werden, dass die Kostenüberschätzung durch Scheibenarme durch nicht Berücksichtigung der Fertigungskosten für Labyrinthdichtungen kompensiert wird.

### 6.2.2 Bottom-Up Ansatz

Für den *Bottom-Up Ansatz* werden bei einem Vergleich die berechneten Kosten gegenüber den gesamten Referenzkosten der Scheiben des HDVs, die berechneten Kosten aller Scheiben um 4% überschätzt. Bei Betrachtung der Kostenergebnisse der einzelnen Scheiben streuen die Kostenabweichungen in einem Bereich von -3% bis +6%. Verglichen mit dem festgestellten Bereich der Abweichungen über den *Top-Down Ansatz* ist dieser deutlich kleiner.

Kostenabweichungen über 5% der berechneten Werte gegenüber den Referenzkosten weisen Scheibe 2 und 3 auf. Wie beim *Top-Down Ansatz* können die auftretenden Kostenabweichungen der Scheiben 2 und 3 durch das Vorhandensein von Labyrinthdichtungen erklärt werden (Abb. 6-2). Während Scheibe 2 lediglich auf einem Scheibenarm eine Labyrinthdichtung aufweist, ist dies bei Scheibe 3 auf beiden Scheibenarmen der Fall. Somit erklärt sich die höhere Abweichung zu den Referenzkosten der Scheibe 3 im Vergleich zu der Abweichung der Scheibe 2.

Aus Tab. 6-1 ist zu entnehmen, dass die Scheiben 6 und 7 bei der Berechnung unterschätzt werden. Die Scheiben 6 und 7 stellen, wie bereits erläutert, aus konstruktiver Sicht eine Besonderheit dar, die zu Abweichungen bei der Kostenberechnung nach dem *Bottom-Up Ansatz* führen.

Bei der Berechnung der Kosten über den *Bottom-Up Ansatz* wird die Methode zur Bestimmung der Schmiedekontur angewendet. Die Berechnung der anfallenden Materialkosten ist in Folge dessen im Vergleich zur Kostenberechnung über den *Top-Down Ansatz* genauer, insbesondere für Scheiben mit Scheibenarm.

## 6.3 Zusammenfassung der Verifizierung

Es kann festgehalten werden, dass die bestimmten Genauigkeitsbereiche der berechneten Kosten versus den Referenzkosten auf Bauteil-, Modul- und Triebwerksebene den Anforderungen einer Methode zur Bestimmung der Produktionskosten zum Zeitpunkt der Vorauslegung genügen (Kap. 3.9.1). Für die Berechnung der Produktionskosten von Scheiben wird die Berechnung nach dem *Bottom-Up Ansatz* der Berechnung nach dem *Top-Down Ansatz* vorgezogen. Stehen die benötigten Dateninformationen für die Kostenberechnung über den *Bottom-Up Ansatz* nicht zur Verfügung, erfolgt die Kostenbestimmung über den *Top-Down Ansatz*. Die kombinierte Verwendung dieser beiden Berechnungsansätze zur

Kostenbestimmung ermöglicht einen Vergleich der berechneten Kosten und erlaubt zudem die Belastbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

# 7 Ergebnisse und Diskussion

## 7.1 Die Vergleichstriebwerke CFM56-5B6 und V2524-A5

Um die Anwendung des Kostenmodells zu demonstrieren wurden die Triebwerke CFM56-5B6 und die V2524-A5 einer Kostenanalyse unterzogen. Das Triebwerk CFM56-5B6 ist in Abb. 7-1 dargestellt. Es setzt sich aus vier Niederdruckverdichter-, neun Hochdruckverdichterstufen sowie einer Hoch- und vier Niederdruckturbinenstufen zusammen. Weitere technische Daten zum CFM56-5B6 Triebwerk sind in Tab. 7-1 gelistet.

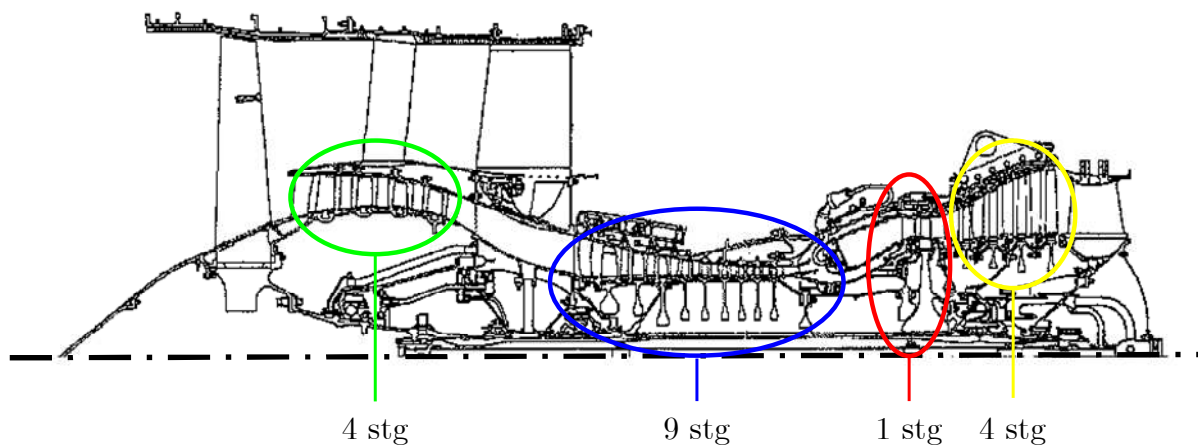


Abb. 7-1 Schnittzeichnung CFM56-5B6

In Abb. 7-2 ist das Triebwerk V2524-A5 dargestellt. Es besteht aus einer Fanstufe, vier Nieder- und zehn Hochdruckverdichterstufen sowie zwei Hoch- und fünf Niederdruckturbinenstufen. Weitere technische Daten des Triebwerks sind in Tab. 7-1 aufgeführt.

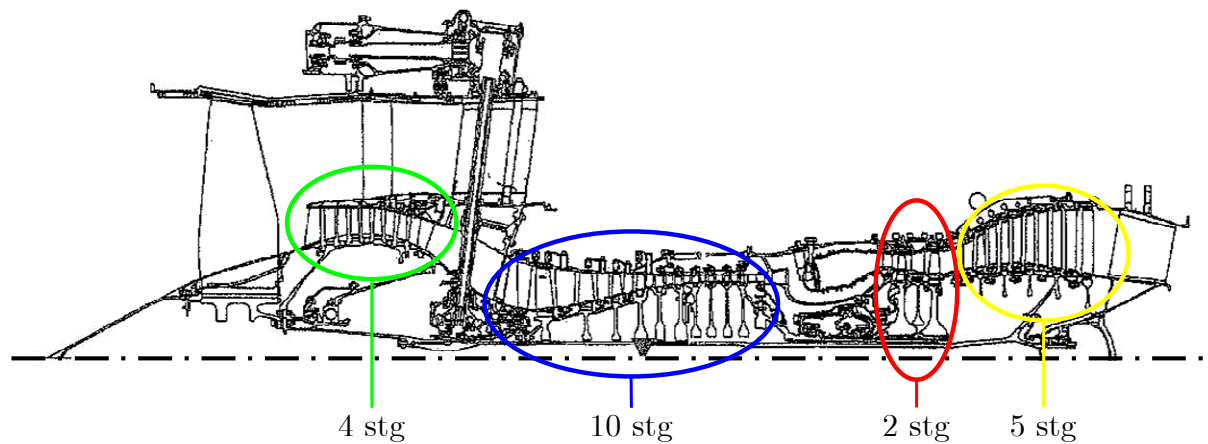


Abb. 7-2 Schnittzeichnung V2500-A5

Beide Triebwerke liefern einen Startschub von 23.500 lb und werden als Antrieb für das Flugzeug A319 angeboten. Sie eignen sich daher gut für eine vergleichende Kostenanalyse.

Referenztriebwerk		CFM56-5B6	V2524-A5
Listenpreis	[€]	3.603.750	3.358.040
Architektur	[-]	(4/9/1/4)	(4/10/2/5)
Fan-Durchmesser	[m]	1,73	1,6
	[in]	68,3	63
Länge	[m]	2,6	3,2
	[in]	102,4	126
Schub max. Take-Off	[kN]	104,5	104,5
	[lb]	23.500	23.500
OPR max. Steigung	[-]	32,6	32,8
ByPass Verhältnis	[-]	5,9	4,9
SFC Reiseflug	[-]	0,596	0,575
ND-Drehzahl	[rpm]	5.200	5.650
HD-Drehzahl	[rpm]	-	14.950
Applikation	[-]	A319	A319

Tab. 7-1 Triebwerksdaten CFM56-5B6 und V2524-A5

## 7.2 Vergleichbarkeit CFM56-5B6 und V2524-A5

Ein Vergleich dieser Triebwerke ermöglicht eine Analyse der Produktionskosten bei unterschiedlichen Triebwerksarchitekturen und gleicher Spezifikation. Beide Triebwerke sind Zwei-Wellen-Triebwerke. Allerdings weisen sie architektonische Unterscheidungsmerkmale in den Turbomaschinen (HDV und Turbinen) sowie in ihren geometrischen Abmaßen auf. So wird der 9-stufige HDV der CFM56-5B6 lediglich durch eine 1-stufige HDT angetrieben, während die HDT der V2524-A5 eine

Stufe mehr zum Antrieb des 10-stufigen HDV besitzt. Auch die NDT der V2524-A5 weist im Vergleich zur CFM56-5B6 mit 5-Stufen ebenfalls eine Stufe mehr auf. Dies erklärt die um 0,6 m größere Länge des Triebwerks der V2524-A5 im Vergleich zur kompakteren Bauweise der CFM56-5B6.

### 7.2.1 Fan, Nieder- und Hochdruckverdichter

Der Fandurchmesser der CFM56-5B6 ist mit 1,73 m größer als der Fan der V2524-A5 mit 1,6 m. Das Nebenstromverhältnis der CFM56-5B6 ist mit 5,9:1 gegenüber dem der V2524-A5 mit 4,9:1 größer. Die Umfangsgeschwindigkeiten an den Blattspitzen des Fans liegen bei beiden Triebwerken bei ca. 470 m/s.

Weiterhin sind Eintrittsdurchmesser, sowie Stirnfläche des Niederdruckverdichters bei der CFM56-5B6 größer. Das Flächenverhältnis beträgt 1,3. Bedingt durch den Schwanenhals der V2524-A5 kehrt sich dieses Verhältnis am Eintritt zum Hochdruckverdichter jedoch zu einem Flächenverhältnis von 0,75 um. Die Anzahl der Niederdruckverdichterstufen ist bei beiden Triebwerken gleich. Beide Triebwerke weisen nahezu dasselbe Gesamtdruckverhältnis auf (CFM56-5B6: OPR = 32,6; V2524-A5: OPR = 32,8). Allerdings besitzt der HDV der CFM56-5B6 eine Stufe weniger. Um das gleiche Gesamtdruckverhältnis zu erreichen, muss die Stufenbelastung der CFM56-5B6 somit höher sein als bei der V2524-A5.

Aus dem kleineren Ringraumquerschnitt, dem größeren Ringraumdurchmesser der CFM56-5B6 in den ersten Hochdruckverdichterstufen folgt, dass das Nabenverhältnis der CFM56-5B6 in den ersten Stufen deutlich größer ist, als das der V2524-A5. Bei der V2524-A5 wird zudem der Innendurchmesser des Ringraums am Eintritt des Hochdruckverdichters mit Hilfe des Schwanenhalses auf 280 mm reduziert, wobei die Ringraumfläche annähernd konstant gehalten wird. Dies führt zu einer Vergrößerung der Ringraum- und der Schaufelhöhe, sowie einer damit verbundenen Reduzierung des Nabenverhältnisses  $v = D_i/D_a$ .

In Tab. 7-2 sind Nabenverhältnis, Schaufelhöhe sowie Schaufelfußbreite für die jeweiligen Stufen der beiden Hochdruckverdichter aufgeführt. Daraus ist ersichtlich, dass die Unterschiede bezüglich der Nabenverhältnisse der beiden Triebwerke mit zunehmender Stufenzahl abnehmen und ab der 6. Stufe sogar eine Umkehrung erfolgt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Ringrauminnendurchmesser der V2524-A5 bis auf 480 mm ansteigt, während der Außendurchmesser konstant gehalten wird. Bei der Auslegung des Hochdruckverdichters der CFM56-5B6 wird der Innendurchmesser des Ringraums über den Verdichter hinweg konstant gehalten. Da zudem der Innendurchmesser der CFM56-5B6 am Verdichtereintritt mit 424 mm bereits um 144 mm größer ist als der des V2524-A5, weisen die HDV-Scheiben ebenfalls größere Durchmesser auf und sind aus Festigkeitsgründen massiver ausgelegt.

Stufe	Nabenverhältnis		Schaufelhöhe		Schaufelfußbreite	
	[-]		[mm]		[mm]	
	V2524-A5	CFM56-5B6	V2524-A5	CFM56-5B6	V2524-A5	CFM56-5B6
1	0,5	0,708	129	88	54	40
2	0,625	0,74	94	67	50	31
3	0,714	0,8	67	51	37	25
4	0,806	0,817	47	42	29	20
5	0,855	0,86	36	33	21	16
6	0,874	0,878	28	28	21	15
7	0,902	0,89	24	22	17	12
8	0,913	0,905	21	19	16	12
9	0,916	0,91	21	19	16	12
10	0,918	-	21	-	16	-

Tab. 7-2 Nabenverhältnisse der Hochdruckverdichterstufen

Die Stufenbelastung der einzelnen Hochdruckverdichterstufen der CFM56-5B6 ist höher, bedingt durch die fehlende Stufe gegenüber der V2524-A5. Dies wirkt sich konstruktiv auf den Ringraumdurchmesser und die Massivität der Scheiben aus. Insbesondere die Scheiben der ersten drei Stufen der CFM56-5B6 sind massiver ausgelegt als die der V2524-A5. Bei beiden Triebwerken besitzen die Scheiben der Stufen 1-3 des Hochdruckverdichters eine axiale Schaufel-Scheibe Verbindung. Diese wird durch Räumen gefertigt. Die vordere und die hintere Verdichtertrommel werden bei beiden Triebwerken zwischen Stufe 6 und 7 verschraubt.

## 7.2.2 Brennkammer

Der Einbauwinkel  $\varpi$  sowie die axiale Länge  $l_{ax}$  der CFM56-5B6 Brennkammer sind größer als bei der V2524-A5. Die Werte sind in Tab. 7-3 aufgeführt. Der größere Einbauwinkel der CFM56-5B6 resultiert aus dem, im Vergleich zur V2524-A5, kleineren, mittleren Ringraumdurchmesser der letzten Hochdruckverdichterstufe sowie dem größeren mittleren Ringraumdurchmesser der ersten Hochdruckturbinenstufe.

Parameter	CFM56-5B	V2500-A5
$\varpi$ [°]	22,5	9
$l_{ax}$ [mm]	268	282

Tab. 7-3 Brennkammerdaten CFM56-5B6 und V2500-A5

### 7.2.3 Hochdruckturbinen

Bei der Hochdruckturbinen werden die unterschiedlichen Technologiekonzepte der beiden Triebwerkshersteller offensichtlich (Abb. 7-3). So weist die CFM56-5B6 eine 1-stufige HDT auf, während die HDT der V2524-A5 zweistufig ausgelegt ist. In [102] wird ausgeführt, dass eine einstufige Hochdruckturbinen potenziell höher aerodynamisch belastet ist, was zu Wirkungsgradverlusten führen kann. Um diese Verluste gering zu halten, wird bei der Auslegung einer einstufigen Turbinen ein maximaler Radius angestrebt. Dies bestätigt der Vergleich der HDT der beiden hier untersuchten Triebwerke. So ist der mittlere Ringraumdurchmesser der HDT der CFM56-5B6 17% größer als bei der V2524-A5. Dies führt zusammen mit der höheren Drehzahl der Hochdruckwelle zu deutlich höheren Umfangsgeschwindigkeiten sowie Fliehkräften und einer damit einhergehenden massiveren Auslegung der CFM56-HDT-Scheibe.

Bedingt durch den sehr geringen Raum zwischen Brennkammer und HDT-Scheibe bei der CFM56-5B6 wurde zum Schutz vor der Hitze der eigentlichen Scheibe eine kleinere Vorlaufscheibe vorgeschaltet. Diese kleinere Scheibe wurde zur Kostenermittlung der HDT ebenfalls berücksichtigt und wird im folgenden Verlauf der Arbeit als Inducer Disc bezeichnet. Auch bei der Ausführung der V2524-A5 HDT findet sich eine zusätzliche Scheibe. Diese fungiert jedoch nicht als Hitzeschild. Ihre Aufgabe ist die Aufnahme der Fliehkräfte der Labyrinthdichtung, welche sich zwischen den zwei HDT-Stufen befindet.

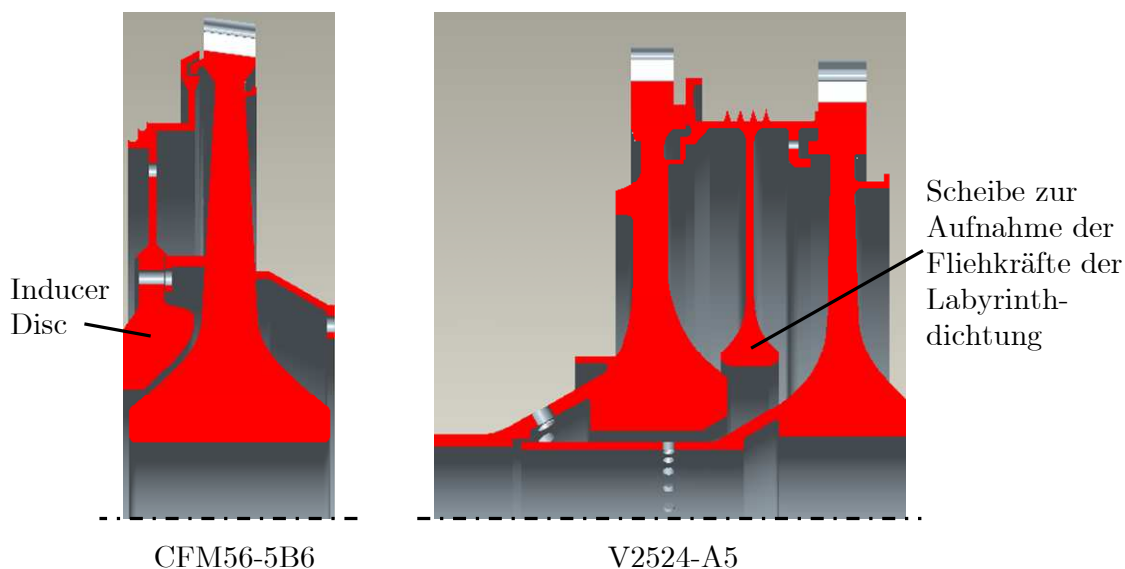


Abb. 7-3 HDT-Scheiben CFM56-5B6 und V2524-A5

Weitere Unterschiede der beiden HDT existieren bezüglich ihrer Lagerung. So ist die Hochdruckwelle der CFM56-5B6 zwischen Hoch- und Niederdruckturbinen gelagert, während die Lagerung der V2524-A5 vor der Hochdruckturbinen fliegend ausgeführt ist.



## 7.2.4 Niederdruckturbine

Die Niederdruckturbine der V2524-A5 besitzt eine Stufe mehr als die der CFM56-5B6 und ist somit länger. Weiterhin weisen beide Turbinen eine unterschiedliche Strömungsführung auf. So erfolgte die Auslegung der CFM56-5B6 Turbine, wie bereits die Auslegung des Hochdruckverdichters, mit konstantem Innendurchmesser des Ringkanals.

Wird die Blattspitzengeschwindigkeit an den Fan-Schaufeln berechnet zeigt sich, dass diese für CFM56-5B6 und V2524-A5 annähernd gleich sind (CFM56-5B6:  $v = 471$  m/s, V2524-A5:  $v = 476$  m/s). Zudem bewirkt die geringere Stufenanzahl der CFM56-5B6 Turbine im Vergleich zur V2524-A5 Turbine eine höhere Belastung je Stufe. Da der Wirkungsgrad der Niederdruckturbine nach [103] mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit der Niederdruckturbine bei gleicher spezifischer Arbeit steigt, kann geschlossen werden, dass der Wirkungsgrad der Niederdruckturbine der CFM56-5B6 schlechter ist als bei der V2524-A5.

## 7.2.5 Zusammenfassung

Aus den Aussagen zur Architektur und den Untersuchungen der Leistungsrechnung lässt sich ableiten, dass die CFM56-5B6 bezüglich Vortriebswirkungsgrad und die V2524-A5 bezüglich thermischen Wirkungsgrad hin ausgelegt sind [5]. Der Vortriebswirkungsgrad wird maßgeblich durch das Niederdrucksystem und der thermische Wirkungsgrad durch das Hochdrucksystem bestimmt.

Somit müssten die Kosten des ND-Systems der CFM56-5B6 im Vergleich zur V2524-A5 höher sein, da die entsprechenden Komponenten des ND-Systems eine optimierte konstruktive Auslegung aufweisen müssen. Analog verhalten sich die Kosten des HD-Systems der V2524-A5. Aus diesem Grund werden die Kosten für das Nieder- und das Hochdrucksystem der beiden Triebwerke im Folgenden miteinander verglichen.

## 7.3 Kostenvergleich der beiden Vergleichstriebwerke

In den folgenden Tabellen beziehen sich die prozentualen Angaben für die Modulkosten und die Bauteilkosten jeweils auf die jeweiligen aufgeführten Kosten des V2524-A5 Triebwerks, welches als Referenz (100%) gesetzt ist.

### 7.3.1 Triebwerksgesamtkosten

In [111] wird der Listenpreis der CFM56-5B6 mit 4,40 Mio US-\$ beziffert. Dies entspricht unter Berücksichtigung der Inflationsrate [115] einem Listenpreis von 3,60 Mio € (2005) und unter Berücksichtigung der 10%-igen Gewinnmarge

angenommene Produktionskosten von 3,24 Mio €. Mit dem entwickelten *Top-Down* Modell werden die Gesamttriebwerkskosten für die CFM56-5B6 auf 3,31 Mio € berechnet. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von +2% (Tab. 7-4).

Für die V2524-A5 werden die angenommenen Produktionskosten entsprechend berechnet und belaufen sich auf 3,17 Mio € (2005). Die berechneten Gesamttriebwerkskosten werden für die V2524-A5 somit um +5% überschätzt.

Die Abweichungen der berechneten zu den angenommenen Produktionskosten liegen innerhalb der angestrebten Genauigkeit von  $\pm 10\%$  und sind somit als sehr gut einzustufen. Weiterhin geben die berechneten Ergebnisse den Trend der Listenpreise wieder, die die CFM56-5B6 teurer als die V2524-A5 einstufen.

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
Listenpreis	3.603.750	3.358.040
angenommene Produktionskosten	3.243.375	3.022.236
berechnete Produktionskosten	3.304.886	3.180.578
Abweichung	2%	5%

Tab. 7-4 Berechnete TW-Kosten vs. Referenzkosten – CFM56-5B6 und V2524-A5

### 7.3.2 Hochdrucksystem

Die Kosten des aus Hochdruckverdichter, Brennkammer und Hochdruckturbine bestehenden Hochdrucksystems werden für die CFM56-5B6 um 10% günstiger als die der V2524-A5 berechnet (Tab. 7-5). Gründe hierfür sind unter anderem die geringere Anzahl an Stufen in HDV und HDT der CFM56-5B6 sowie die geringere Baulänge der Brennkammer.

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
HD-System	635	707
Abweichung	90%	100%
HDV	234	246
Abweichung	95%	100%
BK	63	68
Abweichung	93%	100%
HDT	339	394
Abweichung	85%	100%

Tab. 7-5 Kostenvergleich des HD-Systems und der entsprechenden Module

### Hochdruckverdichter

Der Hochdruckverdichter der CFM56-5B6 wird mit 5% Abweichung zur V2524-A5 geringfügig günstiger berechnet. Dies liegt maßgeblich an der geringeren Stufenanzahl des Hochdruckverdichters der CFM56-5B6 mit 9 Stufen im Vergleich zu den 10 Stufen des HDV der V2524-A5. Aus der Kostenbetrachtung auf Bauteilebene ist ersichtlich, dass die Kosten für Leitschaukeln (LE), Scheiben (Disc) und Gehäuse beider HDV stark unterschiedlich sind (Tab. 7-6).

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
<b>HDV</b>	<b>234.273</b>	<b>245.739</b>
Abweichung	95%	100%
<b>Laufschaufeln</b>	53.619	50.930
Abweichung	105%	100%
<b>Leitschaufeln</b>	67.395	76.922
Abweichung	88%	100%
<b>Scheiben</b>	33.650	50.156
Abweichung	67%	100%
<b>Gehäuse</b>	79.608	67.732
Abweichung	118%	100%

Tab. 7-6 Kostenvergleich des Moduls HDV und der entsprechenden Modul-Bauteile

Der Kostenunterschied der Laufschaufeln (LA) ist marginal und wird somit nicht näher betrachtet. Es kann festgehalten werden, dass die Kosten der Laufschaufeln sich nur geringfügig unterscheiden während die Kostendifferenz der Leitschaufeln bei 12% liegt. Dies liegt darin begründet, dass die letzten beiden Leitschaufelreihen der V2524-A5 aus dem Werkstoff C263 gefertigt werden. Dieses Material ist in Einkauf und Fertigung teurer, als das vergleichsweise günstige Inconel718, welches für die heißen Stufen des HDV der CFM56-5B6 verwendet wird.

Die mit -33% abweichenden Kosten der HDV-Scheiben der CFM56-5B6 sind nicht alleine bedingt durch die geringere Scheibenanzahl. Vielmehr muss die Wellenanbindung der letzten Scheibe zur Hochdruckwelle, der Antriebskonus, berücksichtigt werden. Dieser ist bei der V2524-A5 konstruktiv bedingt größer dimensioniert (Abb. 7-2) im Vergleich zur Wellenanbindung der CFM56-5B6. Dies bedingt einen kalkulatorischen Kostenunterschied von ca. 5.000 € zwischen der letzten V2524-A5 und der letzten CFM56-5B6 Hochdruckverdichterscheibe. Entsprechendes gilt für die Scheibe der 7. Stufe. Die Scheibe 7 ist die erste Stufe der hinteren Verdichtertrommel (Kap. 7.2.1). Auch ist sie bei der V2524-A5 deutlich schwerer als die 7. Stufe der CFM56-5B6, was sich wiederum in doppelt so hohen Produktionskosten äußert. Das Material der Hochdruckverdichterscheiben ist bei beiden Triebwerken gleich.

Im Gegensatz zu Leitschaufeln und Scheiben fallen die Kosten des Gehäuses der CFM56-5B6 deutlich höher aus als die des V2524-A5. Dies erscheint zunächst erstaunlich, da das Gehäuse der V2524-A5, aufgrund einer zusätzlichen Stufe länger ist und somit teurer sein müsste als das Gehäuse der CFM. Allerdings ist der Außendurchmesser der CFM deutlich größer. Unter Berücksichtigung, dass der Durchmesser in der 2. Potenz in das Volumen bzw. in das Gewicht eingeht, sind die höheren Kosten des CFM56-5B6 Gehäuses plausibel.

### **Brennkammer**

Der geringfügige Kostenunterschied von 7% gemäß Tab. 7-5 der beiden Brennkammern ist bedingt durch die geometrischen Abmaße (Durchmesser und Länge). So ist z. B. die axiale Länge der V2524-A5 Brennkammer 6% länger als die der CFM56-5B6. Die Materialien der beiden Brennkammern wurden bei der Berechnung als gleich angenommen.

### **Hochdruckturbine**

Die Hochdruckturbine der CFM56-5B6 wird im Vergleich zur V2524-A5 um 14% günstiger berechnet. Die 1-stufige Ausführung der CFM56-5B6 HDT bedingt im Vergleich zur 2-stufigen HDT der V2524-A5 geringere Kosten der Subkomponenten. So werden die Kosten der Laufschaufeln um 20%, der Leitschaufeln um 8% und das Gehäuse um 42% günstiger berechnet. Die Kostendifferenz der Schaufeln ist bedingt durch die geringere Schaufelanzahl auf Grund der Stufendifferenz. Bezüglich des Gehäuses bewirkt die zusätzliche Stufe der V2524-A5 und der damit einhergehenden größeren Baulänge höhere Gehäusekosten im Vergleich zum Gehäuse der CFM56-5B6.

<b>Kosten [€]</b>	<b>CFM56-5B6</b>	<b>V2524-A5</b>
<b>HDT</b>	<b>338.547</b>	<b>394.031</b>
Abweichung	<i>86%</i>	<i>100%</i>
<b>Laufschaufeln</b>	132.678	165.564
Abweichung	<i>80%</i>	<i>100%</i>
<b>Leitschaufeln</b>	77.760	84.096
Abweichung	<i>92%</i>	<i>100%</i>
<b>Scheiben</b>	118.800	128.317
Abweichung	<i>93%</i>	<i>100%</i>
<b>Gehäuse</b>	9.309	16.054
Abweichung	<i>58%</i>	<i>100%</i>

**Tab. 7-7 Kostenvergleich des Moduls HDT und der entsprechenden Modul-Bauteile**

Die geringe Kostendifferenz der CFM56-5B6 HDT-Scheiben gegenüber den Kosten der zwei Scheiben der V2524-A5 in Höhe von 7%, spiegelt die in Kap. 7.2.3 beschriebenen konstruktiven Ausführungen von 1- und 2-stufigen HDT-Scheiben

wieder. So ist z. B. die einzelne Scheibe der CFM56-5B6 im Durchmesser größer im Vergleich zu den beiden Scheiben der V2524-A5. Dies äußert sich auch in den höheren Kosten der einen CFM56-5B6 Scheibe im Vergleich zu den jeweiligen Scheibenkosten der 1. und 2. Stufe der V2524-A5. Verglichen mit der Summe der Kosten der beiden Scheiben der V2524-A5 sind die Kosten der einzelnen CFM56-5B6 dennoch geringer. Die Kosten der sogenannten Inducer Disc sind bei der CFM56-5B6 aufgrund ihrer massiveren Ausführung höher als bei der V2524-A5.

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
<b>HDT</b>	<b>338.547</b>	<b>394.031</b>
Abweichung	<i>86%</i>	<i>100%</i>
<b>Scheiben</b>	118.800	128.317
Abweichung	<i>93%</i>	<i>100%</i>
<b>Scheibe 1</b>	99.000	62.396
Abweichung	<i>159%</i>	<i>100%</i>
<b>Scheibe 2</b>	-	47.441
Abweichung	-	<i>100%</i>
<b>Inducer Disc</b>	19.800	18.480
Abweichung	<i>107%</i>	<i>100%</i>

Tab. 7-8 Kostenaufbruch der HDT-Scheiben

### 7.3.3 Niederdrucksystem

Das ND-System der CFM56-5B6 wird im Vergleich zur V2524-A5 um 8% teurer berechnet (Tab. 7-9). Gründe hierfür sind der deutliche größere Fan der CFM56-5B6, der 12% teurer berechnet wird, sowie die Kosten der NDT, die um 10% teurer berechnet werden. Die NDT der CFM56-5B6 weist eine Stufe weniger als die der V2524-A5 auf. Allerdings sind die Scheiben größer (Kap. 7.2.4). Die Kostendifferenz der Niederdruckverdichter beläuft sich auf 4%. Diese Abweichung kann im Rahmen der Vorhersagegenauigkeit als gering angesehen werden. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Betrachtung der Kostenverteilung des Niederdruckverdichters verzichtet.

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
<b>ND-System</b>	<b>991</b>	<b>921</b>
Abweichung	<i>108%</i>	<i>100%</i>
<b>Fan</b>	380	338
Abweichung	<i>112%</i>	<i>100%</i>
<b>NDV</b>	211	220
Abweichung	<i>96%</i>	<i>100%</i>
<b>NDT</b>	399	363
Abweichung	<i>110%</i>	<i>100%</i>

Tab. 7-9 Kostenvergleich des ND-Systems und der entsprechenden Module

## Fan

Der größere Fan-Durchmesser der CFM56-5B6 hat eine längere Ausführung der Fan-Schaufeln und eine massivere Bauweise der Fan-Scheibe im Vergleich zur V2524-A5 zur Folge. Die Kosten für die Fan-Schaufeln und die Fan-Scheiben betragen somit jeweils fast 30.000 € mehr als die entsprechenden Bauteile der V2524-A5 (Tab. 7-10). Aufgrund des größeren Fan-Durchmessers werden die Kosten der Leitschaufeln zu Beginn des Haupt- und Nebenstromkanals (ESS, OGV) der CFM56-5B6 ebenfalls höhere berechnet. Weiterhin ist der Durchmesser des Gehäuses der CFM56-5B6 auf Grund des größeren Fan-Durchmessers größer, allerdings ist die Länge des Gehäuses kürzer als bei der V2524-A5. Dies führt dazu, dass die Gehäusekosten des Fans der CFM56-5B6 günstiger berechnet werden.

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
<b>Fan</b>	<b>380.381</b>	<b>337.659</b>
Abweichung	113%	100%
<b>Fan-Schaufeln</b>	56.988	26.607
Abweichung	214%	100%
<b>OGV</b>	8.589	6.000
Abweichung	143%	100%
<b>ESS</b>	9.534	7.151
Abweichung	133%	100%
<b>Scheiben</b>	82.491	54.369
Abweichung	152%	100%
<b>Gehäuse</b>	204.666	227.453
Abweichung	90%	100%
<b>Spinner</b>	18.113	16.079
Abweichung	113%	100%

Tab. 7-10 Kostenvergleich des Moduls Fan und der entsprechenden Modul-Bauteile

## Niederdruckturbine

Die Kosten der Niederdruckturbine der CFM56-5B6 werden mit ca. 36.000 € mehr, d. h. um 10% teurer als die NDT der V2524-A5 berechnet (Tab. 7-11). Dabei verfügt die NDT der CFM56-5B6 um eine Stufe weniger als die V2524-A5 NDT. Dies kann zu einer höheren aerodynamische Belastung je Stufe der CFM56-5B6 Turbine und somit zu einer massiveren Ausführung der Scheiben führen. Dies äußert sich in höheren Kosten der Schaufeln und Scheiben der CFM56-5B6 gegenüber den entsprechenden Kosten der V2524-A5. Die kürzere Bauweise der NDT der CFM56-5B6 bedingt durch die Stufe weniger im Vergleich zur V2524-A5 bewirkt eine um 7% geringere Kostenberechnung des CFM56-5B6 Gehäuses. Die Berechnung der Kosten für Hitzeblech, Anlaufbelag und Unterstruktur erfolgt über einen prozentualen Faktor. Dementsprechend werden die Kosten für das Hitzeblech bei der CFM56-5B6

um 7% günstiger, die Kosten für Anlaufbelag und Unterstruktur mit 14% bzw. 8% teurer berechnet als bei der V2524-A5.

Kosten [€]	CFM56-5B6	V2524-A5
<b>NDT</b>	<b>398.801</b>	<b>362.686</b>
Abweichung	<i>110%</i>	<i>100%</i>
<b>Laufschaufeln</b>	185.115	161.868
Abweichung	<i>114%</i>	<i>100%</i>
<b>Leitschaufeln</b>	143.500	133.455
Abweichung	<i>108%</i>	<i>100%</i>
<b>Scheiben</b>	21.924	18.511
Abweichung	<i>118%</i>	<i>100%</i>
<b>Gehäuse</b>	30.316	32.462
Abweichung	<i>93%</i>	<i>100%</i>
<b>Hitzeblech</b>	1.516	1.623
Abweichung	<i>93%</i>	<i>100%</i>
<b>Anlaufbelag</b>	9.256	8.093
Abweichung	<i>114%</i>	<i>100%</i>
<b>Unterstruktur</b>	7.175	6.673
Abweichung	<i>108%</i>	<i>100%</i>

Tab. 7-11 Kostenvergleich des Moduls NDT und der entsprechenden Modul-Bauteile

### 7.3.4 Schlussfolgerung

Aus dem Kostenvergleich der Triebwerke lässt sich folgern, dass für die CFM56-5B6 die Kosten des ND-Systems höher und die des HD-System geringer sind als die der V2524-A5. Dies bestätigt die zuvor getroffenen Aussagen aus der Leistungsrechnung, dass die Auslegung der CFM56-5B6 hinsichtlich des Vortriebswirkungsgrades und die V2524-A5 hinsichtlich des thermischen Wirkungsgrades optimiert ist. Auch der Vergleich der Scheibenkosten der 1-stufigen CFM56-5B6 mit der 2-stufigen V2524-A5 Hochdruckturbinen erscheint plausibel und realistisch. So wurde die 1-stufige Turbinenscheibe günstiger als die Summe der beiden Scheiben der 2-stufigen Turbinen berechnet, im Vergleich mit den Kosten der einzelnen Scheiben der 2-stufigen Turbinen wurden die Kosten jedoch höher berechnet.

Es kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der vergleichenden Kostenanalyse, mit den aus der Leistungsanalyse abgeleiteten Ergebnissen, ein kohärentes Bild ergeben. Die entwickelte Methode zur Bestimmung der Produktionskosten ermöglicht somit den Kostenvergleich unterschiedlicher Triebwerkskonfigurationen und -technologien und erfüllt die Anforderungen an eine Methode, die zum Zeitpunkt der Vorauslegung Anwendung finden soll.

## 7.4 Ergebnisvergleich Bottom-Up vs. Top-Down Ansatz

Um einen Vergleich der berechneten Scheibenkosten nach dem *Bottom-Up Ansatz* mit dem *Top-Down Ansatz* zu ermöglichen, ist es notwendig eine Vergleichsbasis zu schaffen. Dazu werden die zur Berechnung herangezogenen Gewichte bzw. Volumina der Scheiben beider Triebwerke aus den zuvor erstellten Zeichnungen bestimmt. Auftretende Abweichungen beruhen somit auf den Unsicherheiten folgender Faktoren:

- Top-Down Ansatz:*
- Buy/Fly Faktor
  - Wertschöpfungsfaktoren AV
- Bottom-Up Ansatz:*
- den Maschinenkosten
  - den Fertigungsparametern wie Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, etc.

### 7.4.1 Hochdruckverdichterscheiben – V2524-A5

In Abb. 7-4 sind die prozentualen Abweichungen bezüglich Produktions-, Material- und Fertigungskosten von *Bottom-Up* zu *Top-Down Ansatz* über die Stufen hinweg sowie für die gesamten Scheiben des Hochdruckverdichters der V2524-A5 dargestellt.

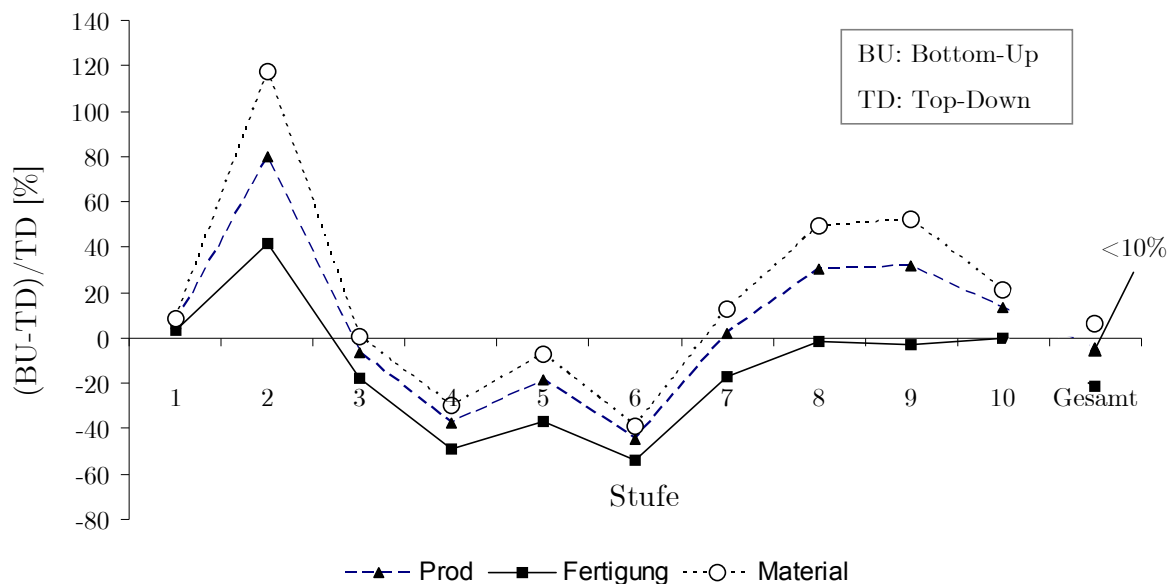


Abb. 7-4 Prozentuale Kostenabweichungen der HDV-Scheiben, V2524-A5

Aus Abb. 7-4 ist ersichtlich, dass die Kostenberechnung für die gesamten Hochdruckverdichterscheiben der V2524-A5, mit einer Abweichung von unter 10%, ein gutes Ergebnis liefert. Allerdings treten bei einem Kostenvergleich der einzelnen Scheiben zueinander starke Unterschiede auf. So weichen die Kostenergebnisse des *Bottom-Up* zum *Top-Down Ansatz* für die Scheiben 2, 4-6, 8 und 9 zum Teil, so



stark voneinander ab, dass diese Scheiben einer genaueren Betrachtung unterzogen wurden.

Dabei weist die Scheibe der Stufe 2 die stärksten Abweichungen, aller hier betrachteten Scheiben, auf. Die Abweichung der Fertigungskosten beträgt 40%. Die Abweichung der gesamten Produktions- bzw. der Materialkosten liegen mit 80% respektive knapp 120% weit höher. Diese starken Abweichungen sind auf die ausladende Scheibengeometrie der 2. Stufe zurückzuführen. Scheibe 2 besitzt zwei lange Scheibenarme in Richtung der 1. und 3. Stufe. Diese Scheibenarme bewirken eine starke Erhöhung des Rohmaterialvolumens und erfordern eine komplexere Fertigung. Der im *Top-Down Ansatz* verwendete Buy/Fly Faktor zur Berechnung der Materialkosten ist eine Funktion des Materials. Er berücksichtigt nicht den Einfluss der Geometrie auf das Rohmaterialvolumen. Weiterhin handelt es sich bei den Buy/Fly Faktoren des *Top-Down Ansatzes* um gemittelte Schätzwerte. Wie aus Abb. 7-5 ersichtlich, ist der Buy/Fly Faktor für Scheibe 2 nach dem *Bottom-Up Ansatz* um 50% höher als beim *Top-Down Ansatz*. Entsprechendes gilt für den Wertschöpfungsfaktor AV zur Berechnung der Fertigungskosten beim *Top-Down Ansatz*. Die ausladende Geometrie der Scheibenarme der 2. Scheibe wird somit im *Top-Down Ansatz* weder bei der Berechnung der Material- noch bei der Berechnung der Fertigungskosten berücksichtigt und führt somit zu einer Unterschätzung der Produktionskosten.

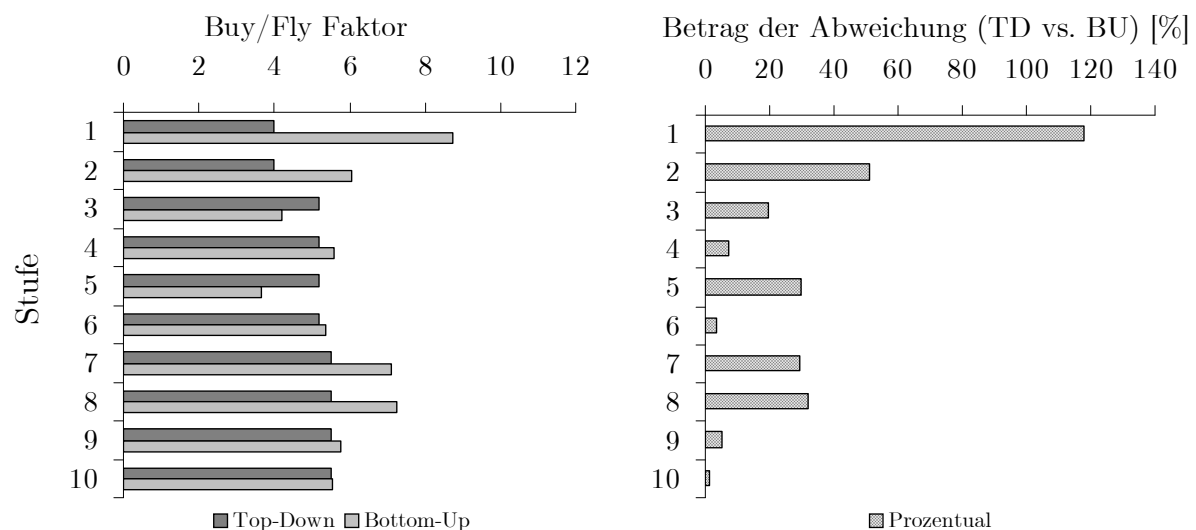


Abb. 7-5 Buy/Fly Faktoren und prozent. Abweichung der HDV Scheiben, TD vs. BU, V2524-A5

Für die Scheiben der vierten bis sechsten Stufe weichen die Fertigungskosten mit bis zu -50% am stärksten ab, die Materialkosten weichen bis zu maximal -40% ab (Abb. 7-4). Dabei weist das negative Vorzeichen darauf hin, dass die Kosten nach dem *Bottom-Up Ansatz* geringer eingeschätzt werden als beim *Top-Down Ansatz*. Für Scheibe 4 und 6 ist der Buy/Fly Faktor maßgeblich für dieses Verhalten

verantwortlich. So wird dieser, wie aus Abb. 7-5 zu entnehmen ist, bei diesen beiden Scheiben beim *Top-Down Ansatz* zu hoch angesetzt. Dies bedeutet, dass die Kontur des Halbzeuges der Scheiben 4 und 6 im Vergleich zu den anderen HDV-Scheiben nahezu der Fluggeometrie entspricht. Daraus ergibt sich ein geringeres Zerspanvolumen und in Folge dessen ein geringerer Fertigungsaufwand und somit geringere Fertigungskosten. Ähnlich ist das Ergebnis der Materialkosten zu bewerten. Der Materialkostenfaktor beim *Top-Down Ansatz* wird für die Scheiben 4 bis 6 überbewertet. Diesbezüglich ist anzumerken, dass diese Scheiben keine Scheibenarme besitzen. Dadurch bedingtes zusätzliches Volumen für das Rohteil, wie im Fall der Scheibe 2, entfällt somit bei der Kostenberechnung über den *Bottom-Up Ansatz*. Geringere Materialkosten sind die Folge.

Für die Abweichungen der Materialkosten der Scheiben 7 bis 9 ist ebenfalls der Unterschied des Buy/Fly Faktors verantwortlich. Im Gegensatz zu den ersten sechs Scheiben des HDV, die aus Titanlegierungen gefertigt sind, bestehen die letzten vier Scheiben aus Inconel718. Der Buy/Fly Faktor für Inconel718 ist beim *Top-Down Ansatz* im Vergleich zu den Methoden zur Berechnung des Aufmaßes im *Bottom-Up Ansatzes* geringer. Weiterhin ist zu beachten, dass die Dichte von Inconel718 ca. doppelt so hoch wie die von Titan ist. Die Masse der hinteren Scheiben ist somit bedeutend höher als die vergleichsweise leichten Titanscheiben. Da zur Materialkostenbestimmung beim *Top-Down Ansatz* das Fluggewicht mit dem Buy/Fly Faktor und dem Materialfaktor in € pro kg multipliziert wird, sich also proportional zu diesen Parametern entwickelt, wirkt sich der Buy/Fly Faktor stärker auf die Kosten aus.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Fertigungskosten beim *Bottom-Up Ansatz* maßgeblich durch die Differenz von Roh- zu Flugmaterialvolumen sowie den verwendeten Fertigungsprozessen bestimmt werden, während beim *Top-Down Ansatz* ausschließlich das Fluggewicht der treibende Parameter ist.

#### 7.4.2 Hochdruckverdichterscheiben – CFM56-5B6

In Abb. 7-6 sind die prozentualen Abweichungen bezüglich Produktions-, Material- und Fertigungskosten von *Bottom-Up* zu *Top-Down Ansatz* über die Stufen hinweg, sowie für die gesamten Scheiben des Hochdruckverdichters der CFM56-5B6, dargestellt. Aus Abb. 7-6 ist ersichtlich, dass die Kostenberechnung beider Ansätze für die gesamten Hochdruckverdichterscheiben der CFM56-5B6 sowie für die einzelnen Scheiben der Stufen 4 bis 8, die Abweichungen zwischen 0% und 20% liegen. Dies ist als ein gutes Ergebnis zu bewerten.

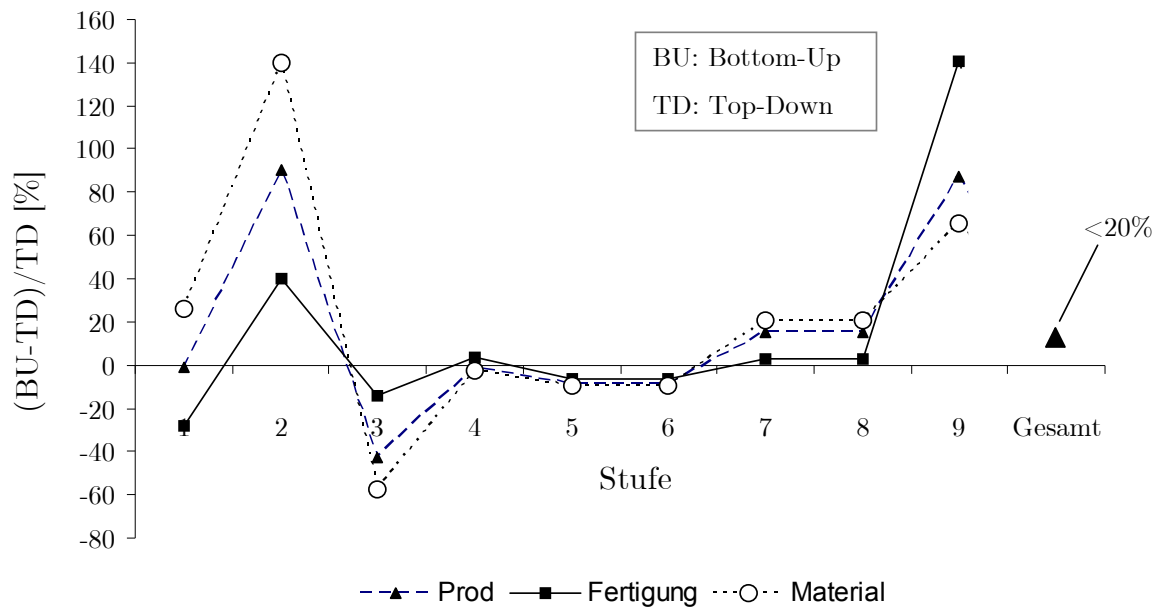


Abb. 7-6 Prozentuale Kostenabweichung der HDV Scheiben, CFM56-5B6

Große Abweichungen sind bei den Scheiben der Stufen 1 bis 3 sowie Scheibe 9 festzustellen. Wie bei der V2524-A5 sind die Gründe hierfür hauptsächlich bei den Scheibenarmen zu suchen. Der Buy/Fly Faktor des *Top-Down Ansatzes* berücksichtigt Veränderungen bezüglich der Scheibengröße nicht adäquat, sondern entspricht lediglich einem Mittelwert. Dies erklärt die geringere Materialkostenbewertung der Scheiben 1 und 2, die beide mit Scheibenarmen ausgestattet sind, sowie die höhere Kostenabschätzung der schmalen Scheibe 3 ohne Scheibenarm, des *Top-Down Ansatzes* gegenüber dem *Bottom-Up Ansatz*. Der Vollständigkeit halber wurden die Buy/Fly Faktoren des *Top-Down* und *Bottom-Up Ansatzes* sowie deren Abweichungen zueinander in Abb. 7-7 für die CFM56-5B6 über den entsprechenden Stufen aufgetragen.

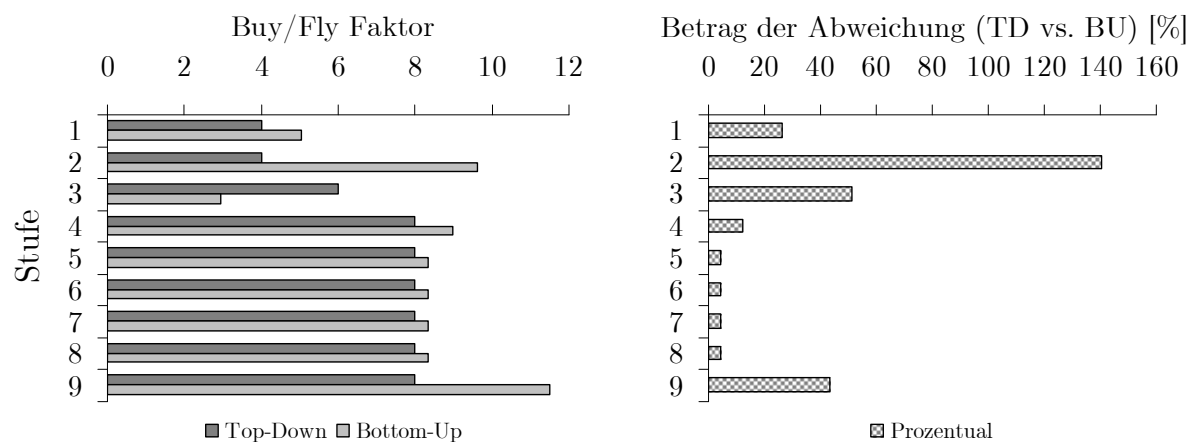


Abb. 7-7 Buy/Fly Faktoren und prozent. Abweichung der HDV Scheiben, TD vs. BU, CFM56-5B6

### 7.4.3 Zusammenfassung Vergleich Bottom-Up vs. Top-Down

Der Vergleich der Kostenergebnisse von *Bottom-Up* und *Top-Down Ansatz* verdeutlicht die erheblichen Unterschiede bei der Kostenberechnung beider Ansätze. Da keine IST-Kosten aus der Fertigung vorliegen, kann weder ein Vergleich mit diesen erfolgen, noch eine Bewertung der beiden untersuchten Ansätze zueinander vorgenommen werden. Jedoch kann festgehalten werden, dass die Kostenergebnisse beider Ansätze

- auf Modulebene ähnlich sind und
- auf Bauteilebene teilweise stark voneinander abweichen.

Als Hauptursache für die zum Teil starken Abweichungen auf Bauteilebene konnten besondere geometrische Ausführungen identifiziert werden. Die beim *Top-Down Ansatz* eingeführten Buy/Fly Faktoren sind Mittelwerte und lediglich abhängig vom verwendeten Material. Der Einfluss der Geometrie fließt somit bei der Berechnung nicht mit ein. Dies erklärt die stark differenzierenden Ergebnisse auf Bauteilebene des *Top-Down* zum *Bottom-Up Ansatz*.

Abschließend ist festzuhalten, dass der *Top-Down Ansatz* sich aufgrund seiner einfachen und schnellen Anwendung dann anbietet, wenn eine Kostenabschätzung auf Modulebene ausreicht. Für eine detailliertere Kostenberechnung ist die Anwendung des *Bottom-Up* dem *Top-Down Ansatz* vorzuziehen. Jedoch werden für die Berechnung nach diesem Ansatz eine höhere Anzahl an Eingabedaten und Geometriegrößen benötigt. Der *Top-Down Ansatz* kann somit den *Bottom-Up Ansatz* auf Modulebene ergänzen. Dies ist dann zielführend, wenn für einzelne Module die zur Berechnung notwendigen Details fehlen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Um weiterhin am Markt bestehen zu können, müssen Unternehmen frühzeitig mit der Beobachtung und Planung neuer Technologien beginnen. Werden neue Technologien und Innovationen zu spät identifiziert, führt dies in der Regel zu einem verspäteten Markteintritt des Produktes und einem damit einhergehenden Wettbewerbsnachteil. Die Bewältigung der hohen Dynamik und Komplexität der Märkte, mit welchen sich Unternehmen konfrontiert sehen, bedarf eines erhöhten Aufwands zur Erforschung und Entwicklung neuer Technologien. Gleichzeitig hat jedoch der kontinuierliche Wertewandel zu einer Verkürzung der Innovationszyklen und veranschlagten Entwicklungszeiten geführt, und ein allgemeiner Trend zur Kostenreduzierung hat in den Unternehmen stattgefunden. Zur erfolgreichen Positionierung neuer Produkte müssen Unternehmen sich somit frühzeitig mit neuen Technologien auseinandersetzen, um auf potenzielle zukünftige Entwicklungen vorbereitet zu sein.

Zur Ableitung der kostenbezogenen langfristigen Planungsziele wurde eine Methode zur Bestimmung der Produktionskosten entwickelt. Diese Methode ermöglicht unterschiedliche Triebwerkskonfigurationen, neue Fertigungsverfahren und neuartige Materialien, bezüglich ihres Einflusses auf die Produktionskosten miteinander zu vergleichen und zu bewerten.

Die Produktionskosten setzen sich aus Material- und Fertigungskosten zusammen. Zur Abschätzung der Materialkosten wurde ein Materialkosten-Modell entwickelt. Basis dieses Modells bildet die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe. Weiterhin wird der Wertschöpfungsprozess des Materials über die einzelnen Herstellverfahren analysiert, um die Materialkosten zu berechnen.

Die bestimmten Wertschöpfungsfaktoren werden mit dem entsprechenden Kostensatz multipliziert und zu den errechneten Rohstoffkosten addiert. Für Nickel- wie auch Titanwerkstoffe wurden die Materialkosten bestimmt und mit bekannten Werkstoffkosten verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Materialkosten für Titanwerkstoffe mit einer Genauigkeit von  $< 10\%$  berechnet werden können. Ähnliches gilt für die Nickel-Basislegierungen. Die berechneten Kosten für drei verschiedene Nickel-Basislegierungen, liegen bei einer Genauigkeit von  $-14\%$  bis  $3\%$  zu den vom Hersteller angegebenen Kosten. Es konnte somit gezeigt werden, dass die mit der Materialkosten-Methode berechneten Kosten nur geringfügige Abweichungen zu den Referenzkosten aufweisen.

Die Fertigungskosten wurden in dieser Arbeit über zwei unterschiedliche Ansätze modelliert. Diese sind einerseits ein *Top-Down Ansatz* und ein *Bottom-Up Ansatz*. Über den *Top-Down Ansatz* wurden ausgehend von der Triebwerksebene hin zur Bauteilebene die Kosten über den sogenannten Buy/Fly Faktor bestimmt, welcher das Fluggewicht zum Rohteilgewicht in Verbindung setzt. Der *Bottom-Up Ansatz* dient zur detaillierteren Kostenbestimmung der Halbzeuge, die die Fertigung des OEM durchlaufen. Ausgehend von der Fluggeometrie werden drei Formelemente angewendet, um die Schmiedegeometrie, die in dieser Methode gleichzeitig als Geometrie des Halbzeuges definiert ist, zu erhalten.

Die Implementierung beider Methoden in das Modell zur Bestimmung der Produktionskosten erfolgte, um sowohl bei geringem Detaillierungsgrad über den *Top-Down Ansatz*, als auch bei höherem Detaillierungsgrad (*Bottom-Up*), eine Abschätzung der Fertigungskosten zu erlauben.

Bei der Verifizierung des Produktionskostenmodells, anhand eines Referenztriebwerks mit bekannten Gesamt- und Bauteilkosten, wurde eine Abweichung der berechneten Gesamttriebwerkskosten zum Referenztriebwerk von  $< 2\%$  festgestellt.

Ein Vergleich der beiden, im Modell hinterlegten Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Fertigungskosten zeigt deutliche Unterschiede in der Genauigkeit der Kostenbestimmung. Eine Berechnung der Verdichterscheiben des Hochdruckverdichters über den *Top-Down Ansatz* weist eine Kostenabweichung von  $19\%$  zu den Referenzkosten auf. Auf Bauteilebene kann dieser Wert noch überschritten werden. Dies liegt in der Geometrie der betrachteten Scheiben begründet, da deren Geometrie beim *Top-Down Ansatz* nur bedingt abgebildet werden kann. Beim *Bottom-Up Ansatz* liegt die Genauigkeit der Kostenberechnung mit  $4\%$  Abweichung im Rahmen der für das Gesamttriebwerk bestimmten Abweichung. Für die Berechnung der Produktionskosten von Scheiben wird die Berechnung nach dem *Bottom-Up Ansatz* der Berechnung nach dem *Top-Down Ansatz* vorgezogen.

Anhand bekannter Triebwerksgeometrien der Triebwerke CFM56-5B6 und V2524-A5 wurden die Produktionskosten bestimmt. Mit dem entwickelten *Top-Down Modell* werden die Gesamttriebwerkskosten für die CFM56-5B6 auf  $3.304.886 \text{ €}$  und für die V2524-A5 auf  $3.180.578 \text{ €}$  berechnet. Für das Triebwerk CFM56-5B6 wurde eine Abweichung von  $+2\%$ , für die V2524-A5 von  $+5\%$  zu den angenommenen Produktionskosten ermittelt. Beim Vergleich mit den angenommenen Produktionskosten liegen die Ergebnisse im Rahmen der geforderten Genauigkeit von  $< 10\%$  Abweichung zu diesen.

Auf Modulebene wurde der Kostenvergleich der beiden Vergleichstriebwerke zueinander durchgeführt, um Konstruktions- und Auslegungsphilosophien gegenüberzustellen und monetär bewerten zu können. Die getroffenen Annahmen, dass die CFM56-5B6 auf den Vortriebwirkungsgrad hin ausgelegt ist und die V2524-

A5 auf den thermischen Wirkungsgrad werden bei dem Kostenvergleich auf Modulebene bestätigt. Die Kosten des Hochdrucksystems der V2524-A5 sind um 10% höher als die des Vergleichtriebwerks. Demgegenüber ist das Niederdrucksystem der CFM56-5B um 8% teurer.

Auch der Vergleich der Scheibenkosten der 1-stufigen CFM56-5B6 mit der 2-stufigen V2524-A5 Hochdruckturbine gibt die Realität wieder. So wurde die 1-stufige Turbinenscheibe günstiger, als die Summe der beiden Scheiben der 2-stufigen Turbine berechnet. Im Vergleich mit den Kosten der einzelnen Scheiben der 2-stufigen Turbine wurden die Kosten jedoch höher berechnet.

Es kann somit gezeigt werden, dass die entwickelte Methode zur Bestimmung der Produktionskosten einen Kostenvergleich unterschiedlicher Triebwerkskonfigurationen und -technologien ermöglicht. Weiterhin können neue Fertigungsverfahren sowie neuartige Werkstoffe kostenspezifisch abgebildet werden. Sie kann zudem genutzt werden, um eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung solcher Technologien durchzuführen und daraus langfristige Planungsziele für die Produktentwicklung abzuleiten. Weiterhin erfüllt die Methode die Anforderung, um zum Zeitpunkt der Vorentwicklung Anwendung finden zu können.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Berechnungsmethodik kann unter Zuhilfenahme von automatisierten Vorauslegungsmodellen eine effektive Methode zur Kostenbestimmung darstellen. Eine direkte Koppelung an Auslegungswerkzeuge der Leistungsrechnung, Vorauslegung und Produktplanung kann die Aussagekraft des Modells noch erweitern. Damit wird ein integrativer Vorauslegungsprozess mit Hinsicht auf die langfristige Produktplanung noch effizienter durchführbar.





# Literaturverzeichnis

- [1] Adam, P.: *Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken*, Birkhäuser Verlag, 1998
- [2] Ad Hoc News: Teile - *MTU Aero Engines Halten*, 2010  
<http://www.ad-hoc-news.de/teile-mtu-aero-engines-halten--/de/Unternehmensnachrichten/21088233>
- [3] AeroBrief: *MTU erhöht Gewinnprognose*, AeroBrief 26/2010 - Aerospace, 2010  
[www.entity38.de/aerobrief/index.php?article\\_id=7025&issue=211](http://www.entity38.de/aerobrief/index.php?article_id=7025&issue=211)
- [4] Arago, O.; Bretschneider, S.; Staudacher, S.: *A Unit Cost Comparison Methodology for Turbofan Engines*, ASME Paper GT2007-27485, Canada, Montréal, 2007
- [5] Arnold, R.: *Konstruktive Auslegung von zivilen Flugtriebwerken der 25.000lbf Schubklasse*, Diplomarbeit, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, 2004
- [6] Askarany, D.; Smith, M.: *The Relationship between Technological Innovation, Activity Based Costing and Business Size*, University of South Australia, 2003
- [7] Bailey, M.W.; Overton, K. S.: *Automated Aircraft Engine Costing using Artificial Intelligence*, AIAA/ASME 26<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, 1990
- [8] Beitz, W.; Grote, K.-H.: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer Verlag, 20. Auflage, 2001
- [9] Ben-Arieh, D.: *Cost Estimation System for Machined Parts*, International Journal of Production Research, Vol- 38, Nr. 17, S. 4481-4494, 2000
- [10] Bloech, J. Bogaschewsky, R.; Götze, U.; Roland, F.: *Einführung in die Produktion*, 5. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-20186-6, 2004
- [11] Boll, C.; Staudacher, S.; Spieler, S.; Gebser, D.: *Supply Chain Simulation and Economical Evaluation of Forged Titanium Discs for Aircraft Engines*, ASME Turbo Expo, GT2005-68310, 2005

- 
- [12] Booch, G.: *Object Oriented Analysis and Design with Applications*, Addison-Wesley, 1982
- [13] Boothroyd, G.; Radovanovic, P.: *Estimating the Cost of Machined Components During the Conceptual design of a Product*, Annals of the CIRP, Vol. 38-1, S. 157-160, 1989
- [14] Brunetti, G.; Golob, B.: *A Feature-based Approach Towards an Product Model Including Conceptual Design Information*, Computer-Aided Design, Vol. 32, p. 877-887, 2000
- [15] Bürgel, R.: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik – Grundlagen, Werkstoffbeanspruchung, Hochtemperaturlegierungen*, Vieweg Verlag, ISBN: 3-528-03107-7, 1998
- [16] Collopy, P.D.; Eames, D.J.H.: *Aerospace Manufacturing Cost Prediction From a Measure of Part Definition Information*, Society of Automotive Engineers, 2001
- [17] Cyrus, J.; Onat, E.: *A Pre-Design Code for Predicting Engine Acquisition Costs*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting, 1980
- [18] DIN 7523 Teil 2: *Gestaltung von Gesenkschmiedestücken – Bearbeitungs-zugaben, Seitenschrägen, Kantenrundungen, Hohlkehlen, Bodendicken, Wanddicken, Rippenbreiten und Rippenkopfradien*, Deutsche Normen, Deutsches Institut für Normungen e.V., 1986, Stand 2007
- [19] DIN EN 10243-1: *Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen – Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen*, Deutsche Normen, Deutsches Institut für Normungen e.V., 2000, Stand 2007
- [20] DIN EN 10243-2: *Gesenkschmiedeteile – Maßtoleranzen – Warm hergestellt in Waagrecht- Stauchmaschinen*, Deutsche Normen, Deutsches Institut für Normungen e.V., 2000, Stand 2007
- [21] Donus, F.; Schaber, R.; Schmidt, K.-J.; Staudacher, S.: *Accuracy of Analytical Engine Weight Estimation During the Conceptual Design Phase*, ASME Turbo Expo, Glasgow, UK, GT2010-23774, 2010
- [22] Drechsler, K.: *Werkstoffe und Fertigungsverfahren der Luft- und Raumfahrttechnik*, Vorlesung, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, SS 2004

- 
- [23] Eckert, F.: *Erstellung eines Material-Relativkosten-Kataloges*, Unveröffentlichte Studienarbeit, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, TU München, 1977
- [24] Eckstein, M.: *Auditorenkolleg: Spanende Fertigung*, MTU Aero Engines GmbH, München, 2008
- [25] Ehrlenspiel, K.; Fischer, D.: *Kostenanalyse von Zahnrädern – Ergebnisse eines FVA-Forschungsvorhabens*, Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 143-154, VDI Berichte 457, 1982
- [26] Ehrlenspiel, K.; Fischer, D.: *Relativkosten von Stirnrädern in Einzel- und Kleinserienfertigung*, Abschlußbericht Teil I und II. FVA Forschungsvorhaben Nr. 61. Heft 116 u. 146, Frankfurt/M.: Forschungsverein, Antriebstech. e.V., 1982 u. 1983
- [27] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*, 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [28] Ericson, A.; Bergström, M.; Johansson, C.; Larsson, T.: *On the Way to Knowledge Awareness in Early Design*, 17<sup>th</sup> CIRP Design Conference, Berlin, 2007
- [29] FAA: *FAR-33.27 Integrity - Turbine, compressor, fan, and turbo supercharger rotors*, Federal Aviation Administration (FAA), 2008
- [30] Fabrycky, W.; Blanchard, B.: *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*, ISBN 0-13-538323-4, Prentice Hall, New Jersey, 1991
- [31] Feldhusen, J.: *Konstruktionslehre I/II*, Vorlesung IKT, RWTH Aachen, 2001
- [32] Fischer, J.; Koch, R.; Hauschulte, K.-B.; Jakuschona, K.; Schmidt-Faber, B.; Kou-I Szu: *Design to Cost – Entwicklungsbegleitende Prozesskostenprognose und Zielkostenermittlung im Produktlebenszyklus*, Vortrag: Fachtagung CAD'94, 1994
- [33] Franz, K.-P.: *Target Costing – Konzept und kritische Bereiche*, Controlling Jg. 5, Heft 3, 1993
- [34] Fritz, A.-H.; Schulze, G.: *Fertigungstechnik*, Springer Verlag, 8. Auflage, 2008

- [35] Froes, F. H.; Gungor, M. N.; Imam, M. A.: *Cost-Affordable Titanium: The Component Fabrication Perspective*, Titanium's Expanding Market – Overview, JOM, Vol. 59, No.6, pp. 28-31, 2007
- [36] General Electric Company: *Flight Propulsion System Preliminary Analysis and Design*, NASA-CR-159583, 1980
- [37] General Electric Company: *Flight Propulsion System Preliminary Analysis and Design*, NASA-CR-167980, 1982
- [38] Gilbert: *Konzepte der betrieblichen Wertschöpfungskette nach Michael Porter. Beschreibung, kritische Analyse und praktische Anwendung in der Unternehmenspraxis*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Philosophische Fakultät I / Wirtschaftswissenschaften, Allgemeine BWL III/, 2005
- [39] Gomerding, A.: *Eine Integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte*, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart, 2007
- [40] Goldschmidt, D.: *Einkristalline Gasturbinenschaufeln aus Nickelbasis-Legierungen - Teil1: Herstellung und Mikrogefüge*, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 25, 311-320, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1994
- [41] Goold, I.: *Airbus, Boeing Mull Options for Next Narrowbody Models*, Air Transport and Cargo Aircraft, 2009  
URL:<http://www.ainonline.com/news/single-news-page/article/airbus-boeing-mull-options-for-next-narrowbody-models-21075/>
- [42] Harada, H.: *High Temperature Materials for Gas Turbines : The Present and Future*, International Gas Turbine Congress, Tokyo, IGTC2003Tokyo KS-2, 2003
- [43] Heisey, Randy.: *717-200: Low Maintenance Costs and High Dispatch Reliability*, AERO, No. 19, S. 18-29, 2002
- [44] Holzgruber, W.; Holzgruber, H.: *Innovative Electroslag Remelting Technologies*, Metallurgical Plant and Technology International (Germany), Vol. 23, No.2, 2000
- [45] Hoeveler, P.: *Airbus Completes Family With A318*, Flugrevue 10/99, 1999
- [46] Hoult, D.P.; Meador, C.L.: *Manufacturing Cost Estimation*, ASME International, S. 716-722, 1997

- 
- [47] Hoult, D.P.; Muter, S.W.: *Cost Comparison of Alternate Designs: An Information Based Model*, College of Engineering, University of New South Wales, Diplomarbeit, 1993
- [48] Institut für Luftfahrtantriebe: *Konzept zum Kostenvergleich ziviler Turboflugtriebwerke im Rahmen der Vorentwicklung*, Kolloquiumsvortrag, 2008
- [49] Irvin K.: *Multi-Disciplinary Design Optimization Using WAVE*, NASA CR—2000-210218, 2000
- [50] Jäger, K.-W.: *Schnittstellen bei CAD/CAE-Systemen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3184010856, 1991
- [51] Karcher, A.: *PDM und Engineering-Informationssysteme*, Vorlesung der Fakultät für Informatik, Universität der Bundeswehr München, 2004
- [52] Kermanpur, A.; Tin, S.; Lee, P. D.; McLean, M.: *Integrated Modeling for the Manufacture of Aerospace Discs: Grain Structure Evolution*, JOM, Vol. 55, No.3, pp. 72-78, 2004
- [53] Kermanpur, A.; Lee, P. D.; Tin, S.; McLean, M.: *Integrated Model for Tracking Defects Through Full Manufacturing Route of Aerospace Discs*, Materials Science and Technology, Vol. 21, No.4, pp. 437-444, 2005
- [54] Kessler, E.; Vankan, W.J.: *Taking Collaborative Engineering to the Sky – Formation Flying With Knowledge Management*, EUCASS, Vorlesung, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, 2010
- [55] Kinder, R.-H.: *Impact of Composites on Future Transport Aircraft – Impact Measured by Aircraft Direct Operating Cost*, Douglas Aircraft Company, N95-29030, 1995
- [56] Klocke, F.: *Fertigungstechnik I*, Vorlesung, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, RWTH Aachen, Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie
- [57] Koenig, M.J.; Barrett, C.W.: *The Use of the Maurer Factor for Estimating the Cost of a Turbine Engine in the Early Stage of Development*, Faculty of the School of Systems and Logistics of the Air Force Institute of Technology, Air University, Diplomarbeit, 1979
- [58] Kroo, I.; Shevell, R.S.: *Aircraft Design: Synthesis and Analysis*, Lecture Series, Stanford University

- 
- [59] Kurz, U.; Hintzen, H.; Laufenberg, H.: *Konstruieren Gestalten Entwerfen*, 3. Auflage, Vieweg Verlag, 2004
- [60] Leyens, C.; Peters, M.: *Titanium and Titanium Alloys - Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH GmbH & Co.KGaA, 2003
- [61] Lindemann, U.: *Kostenmanagement in der Produktentwicklung*, Vorlesung, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, 2005
- [62] Lütjering, G.; Williams, J. C.: *Titanium*, Springer Verlag, ISBN: 3-540-42990-5, 2003
- [63] Mankins, J.C.: *Technology Readiness Level – A White Paper*, NASA, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, 1995
- [64] McKim, R.A.: *Neural Network Applications to Cost Engineering*, Cost Engineering, Vol. 23, Nr. 7, S. 431-444, 1993
- [65] Mösta, F.: *Aircraft Engine Buisness*, Rolls-Royce, Vorlesung, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, 2010
- [66] Müller, D.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure*, Springer Verlag, ISBN: 3184010856, 2006
- [67] MTU Aero Engines GmbH: *Brennpunkt Rohstoffmärkte*, In: Aktuell – zeitung für die Mitarbeiter der MTU Aero Engines GmbH, Ausgabe Okt/Nov, 2005
- [68] NASA Web Site () HRST Technology Assessments Technology Readiness Levels, A chart. URL: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trlchrt.pdf>
- [69] Niazi, A.; Dai, J.S.; L. Senevratne, S.B.: *Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1258, S. 563-575, 2006
- [70] Onat, E.; Tolle, F.F.: *An Extension of Engine Weight Estimation Techniques to Compute Enginge Production Costs*, Boeing Military Airplane Development, NASA Lewis Research Center NADC(1979), Nr. ADA074454, 1979
- [71] Ou-Yang, C.; Ling, T.S.: *Developing an Integrated Framework for Feature-Based Early Manufacturing Cost Estimation*, International Journal of Manufacturing Technology, Vol. 13, S. 618-629, 1997

- 
- [72] *PDM und Engineering-Informationssysteme*, Vorlesungsskript, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 2005
- [73] Pera, R.J.; Onat, E.; Klees, g. W.; Tjonneland, E.: *A Method to Estimate Weight and Dimensions of Aircraft Gas Turbine Engines*, NASA Report, Nr. CR135170, 1977
- [74] Peters, M.; Kumpfert, J.; Leyens, C.: *Titanlegierungen in der Luft- und Raumfahrt*, erschienen in: Titan und Titanlegierungen, Peters, M.; Kumpfert, J.; Leyens, C. (Hrsg.), 1996
- [75] Porter, M.E.: *Wettbewerbsstrategie: Methode zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*, 11. Auflage, Campus Verlag, Frankfurt/Main, New York, 2008
- [76] Rao, A.R.; Keane, A.J.; Scanlan, J.P.: *A Cost Based Methodology for Design Optimization, Proceedings of IDETC/CIE 2005*, ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, September 24-28, Long Beach, California USA, 2005
- [77] Rao, A.R., Scanlan, J.P.; Keane, A.J.: Applying Multiobjective Cost and Weight Optimization to the Initial Design of Turbine Disks, ASME Journal, pp. 1303-1310, 2007
- [78] Rehmann, S.; Guenov, M.D.: *A Methodology for Modelling Manufacturing Costs at Conceptual Design*, Computer & Industrial Engineering, Vol. 35, Nr. 3-4, S. 261-269, 1998
- [79] Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG: *Jahresabschluss zum Geschäftsjahr vom 01.01.2008 bis zum 31.12.2008 – Lagebericht der Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG für das Geschäftsjahr 2008*“, 2009
- [80] Rupp, O.: *Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken*, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, DGLR-JT2001-008, 2001
- [81] Sachs, L.: *Statistische Methoden – Planung und Auswertung*, 7. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-55821-7, 1993
- [82] Sandvik Coromant: *Aerospace Engine*, Sandvik Coromant, Application Guide, 2004
- [83] Sandvik Coromant: *Titanium Machining*, Sandvik Coromant, Application Guide, 2004

- 
- [84] Santini, S.; Jain, R.: *Similarity Matching*, 2nd Asian Conference on Computer Vision, Singapore, 1995
- [85] Savioz, P.: *Technology Intelligence: Concept Design and Implementation in Technology-Based SMEs*, Palgrave, New York, 2004
- [86] Scanlan, J.; Hill, T.; Marsh, R.; Bru, C.; Dunklex, M.; Cleeveley, P.: *Cost Modelling for Aircraft Design Optimisation*, Journal of Engineering Design, Vol. 13, Nr. 3, S. 261-269, 2002
- [87] Scanlan, J.P.; Rao, A.R.; Bru, C.; Hale, P.; Marsh, R.: *The DATUM Project: A Cost Estimating Environment for the Support of Aerospace Design Decision Making*, Journal of Aircraft, Vol. 48, pp.1022-1028, 2006
- [88] Scharer, M.: *Technologiekalender*, Universität Stuttgart, 2000  
Web Site der Universität Karlsruhe URL: [http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/ntechnologiekalender\\_b.html](http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/ntechnologiekalender_b.html)
- [89] Schmiedeberg, A.; Strähle, O.; Bendig, O.: *Wachstumsmotor Service*, Bain & Company, Germany/Switzerland, Inc., 2010
- [90] Schmitz, O.: *Regelbasierte Methode zur Abschätzung der Fertigungskosten von Niederdruckturbinen in der Vorentwicklungsphase ziviler Turboflugtriebwerke*, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Luftfahrtantriebe, 2009
- [91] Schumann, F.J.: *Methoden und Werkzeuge zur Integration der kundengerechten Wertgestaltung in die Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses*, Dissertation, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, 2002
- [92] Seidenschwarz, W.: *Target Costing – Ein japanischer Ansatz für das Kostenmanagement*, Controlling Jg. 3, Heft 4, 1991
- [93] Shannon, C.E.; Sloane, N.J. (Hrsg.); Wyner, A.D. (Hrsg.): *Collected Papers*, IEEE Information Theory Society, New York, 1993
- [94] Shebab, E.M.; Abdallah, H.S.: *Manufacturing Cost Modelling for Concurrent Product Development*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 17, S. 341-353, 2001
- [95] Simon, H.: *The Science of the Artificial*, MIT Press, 1982



- 
- [96] Simsonet, Y.: *Produktionskostenabschätzung von Verdichter- und Turbinenschaufeln in der Vorentwicklungsphase ziviler Turboflugtriebwerke*, Diplomarbeit, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, 2009
- [97] Son, Y.K.: *A Cost Estimation Model for Advanced Manufacturing Systems*, International Journal of Production Research, Vol. 29, Nr. 3, S. 441-452, 1991
- [98] Spath, D.; Dill, C.; Scharer, M.: *Vom Markt zum Markt –Produktentstehung als zyklischer Prozess*, Logis Verlag, Stuttgart, 2001
- [99] Spieler, S.; Staudacher, S.; Gebser, D.: *Positionierung von Triebwerksherstellern in der Zulieferkette von Titanschmiedeteilen*, DGLR-2004-157, Dresden, 2004
- [100] Spieler, S.: *Status der Wertschöpfungskette für Schmiedeteile moderner Turboluftstrahltriebwerke*, Diplomarbeit, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, 2004
- [101] Spur, G.; Stöferke, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik – Band 1 bis 6*, Carl Hanser Verlag, München, 1980
- [102] Staudacher, S.: *Konstruktion von Turboluftstrahltriebwerken*, Vorlesung V2.01, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, WS09/10
- [103] Staudacher, S.: *Turboflugtriebwerke I*, Vorlesung, Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart, SS 2010
- [104] Steffens, K.: *Technik der Luftfahrtantriebe – Kosten, Wirtschaftlichkeit, Umweltfragen*, MTU Aero Engines GmbH, Vorlesung SS2005, RWTH Aachen, 2005
- [105] Steffens, K.: *Technik der Luftfahrtantriebe – Werkstoffe*, Vorlesung, Fakultät der Maschinenwesen, RWTH Aachen, MTU Aero Engines GmbH, SS 2005
- [106] Steffens, K.; Wilhelm, H.: *Werkstoffe, Oberflächentechnik und Fertigungsverfahren für die nächste Generation von Flugtriebwerken - Welche Herausforderungen kommen nach 2000 auf uns zu?*, MTU Aero Engines GmbH, 2005
- [107] Steinhaus, T.: *Validierung des nichtlinearen Verformungsverhaltens von großen Einkristall-Gasturbinenschaufeln aus CMSX-4*, Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2001

- [108] Subel, C.: *Untersuchung einer größeren Variantenvielfalt in Konzeptphasen mit Hilfe eines featur-basierten Geometriemodells am Beispiel von Verdichtertrotoren*, MTU Aero Engines GmbH, XXXV. Kraftwerkskolloquium, Dresden, 2003
- [109] TIMET: *Expertengespräch*, TIMET-Deutschland, Telefonat vom 23.02.2006
- [110] Tschätsch, H.: *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*, Vieweg Verlag, 7. Auflage, 2005
- [111] The Airline Monitor, 2002
- [112] Trechsel, F.: *Produkt/Markt-Strategie – Kernstück jeder Unternehmensstrategie*, Management- Z. 47, S.383-387, 1978
- [113] Tschirky, H.: *Wake-up Call for General Management: It's technology time*, in EITM (Hrsg.): *Bringing Technology into the Boardroom*, Palgrave, Hampshire, 2002
- [114] Ultsch, A.: *Eine Begründung der Pareto-80/20-Regel und Grenzwerte für die ABC-Analyse*, Databionics Research Group, Philipps Universität Marburg, 2001
- [115] U.S. Department of Labor, *Consumer Price Index – All Urban Consumers (CPI-U)*, Bureau of Labor Statistics, Washington, D.C., 2007 URL: <ftp://ftp.bls.gov/pub/special.requests/cpi/cpiiai.txt>
- [116] VDI 2225 Blatt 1: *Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Konstruktionsmethodik – Vereinfachte Kostenermittlung*, VDI (Verein Deutscher Ingenieure), 1997 (Stand: 2007-03)
- [117] VDI 2234: *Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur*, VDI (Verein Deutscher Ingenieure), 1990 (Stand: 2007-03)
- [118] Voggenreiter, H.: *Luftstrahltriebwerke: Werkstoffe für Antriebe*, Vorlesung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Universität Stuttgart, WS 05/06
- [119] Warschat, J.; Ohlhausen, P.: *Einführung*, In: Bullinger, H.-J.; Warschat, J. (Hrsg.): *Forschungs- und Entwicklungsmanagement – Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development*, Teubner, Stuttgart, 1997

- 
- [120] Watson, R.; Curran, R.; Murphy, A.; Cowan, S.: Cost Estimation of Machined Parts within Aerospace Supply Chain, *Concurrent Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2006
- [121] Wei, Y.; Egbelu, P.J.: *A Framework for Estimating Manufacturing Cost from Geometric Design data*, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 13, Nr. 1, S. 50-63, 2000
- [122] Westkämper, E.: *Strategien der Produktion – Strategische Planung in Industriellen Unternehmen*, Vorlesung, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart, 2009
- [123] Weustnik, I.F.; Brinke, E.; Streppel, A.H.; Kals, H.J.: *A Generic Framework for Cost Estimation and Cost Control in Product Design*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, S. 141-148, 2000
- [124] Wierda, L.S.: *Product Cost-Estimation by the Designer*, *Engineering Costs and Production Economics*, 13, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1988, p. 189-198
- [125] Wöhe, G.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, Vahlens Handbücher, Verlag Franz Vahlen München, 23. Auflage, 2008
- [126] Wojahn, U.: *Aufgabensammlung Fertigungstechnik*, Vieweg Verlag, ISBN: 978-3-8348-0228-6, 2008
- [127] Wolter, J.; Fabrycky, B.; Blanchard, S.: *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*, ISBN: 0-13-538323-4, 1991
- [128] Younossi, O.; Arena, M.V.; Moore, R. M.; Lorell, M.; Mason, J.; Graser, J.C.: *Military Jet Engine Acquisition – Technology Basics and Cost-Estimating Methodology*, RAND Project Air Force Prepared for the United States Air Force, ISBN: 0-8330-3282-8, Chapter 4, page 41, 2002
- [129] Zäh, M.; Reinhart, G.: *Formelsammlung Spanende Fertigungsverfahren*, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, 2007
- [130] Zhan, Y.F.; Fuh, J.Y.; Chan, W.T.: *Feature-Based Cost Estimation for Packaging Products Using Neural Networks*, *Computers in Industries*, Vol. 32, S. 95-113, 1996
- [131] Zollondz, H. D.: *Lexikon Qualitätsmanagement*, Oldenburg Verlag, München, 2001, ISBN: 3486243160

# A Anhang

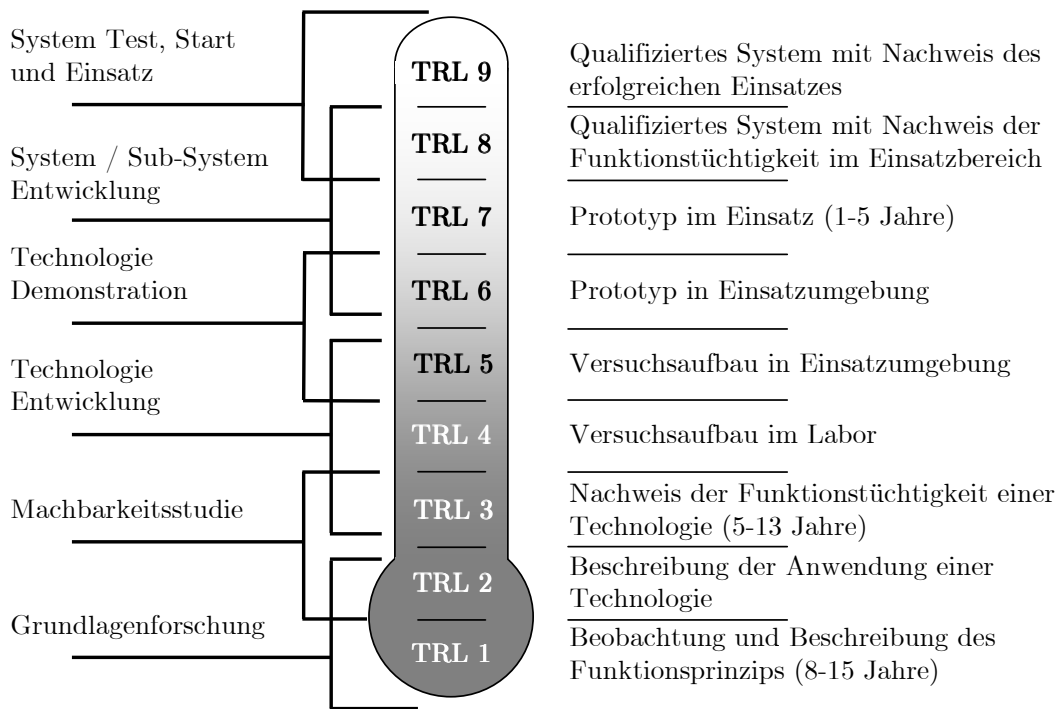


Abb. A-1 Technologiereifegrade (TRL); NASA [68]

Veraltete oder noch nicht in Serie verwendete Herstellprozesse sind in grauer Schrift dargestellt. Zugunsten der Übersichtlichkeit sind Zwischenschritte wie Prüfen und Entgraten nicht dargestellt.

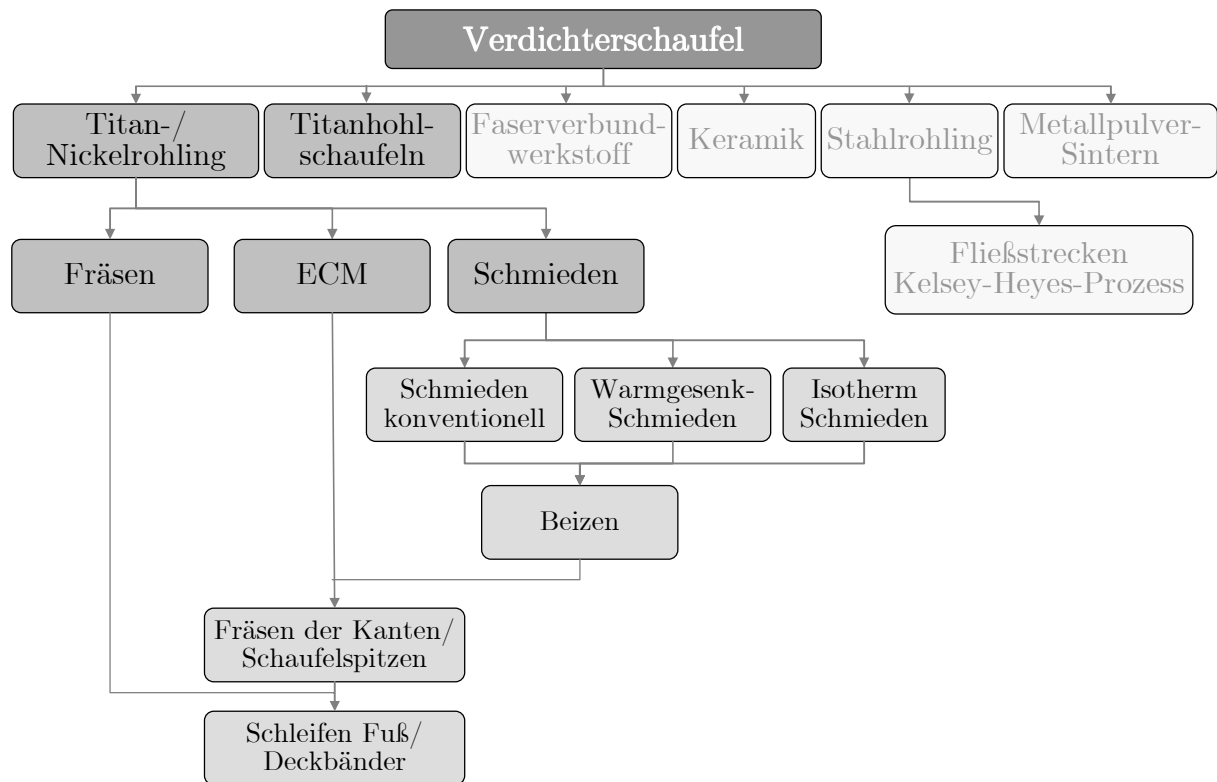


Abb. A-2 Schematischer Überblick der Herstellungsrouten von Verdichterschaufeln [96]

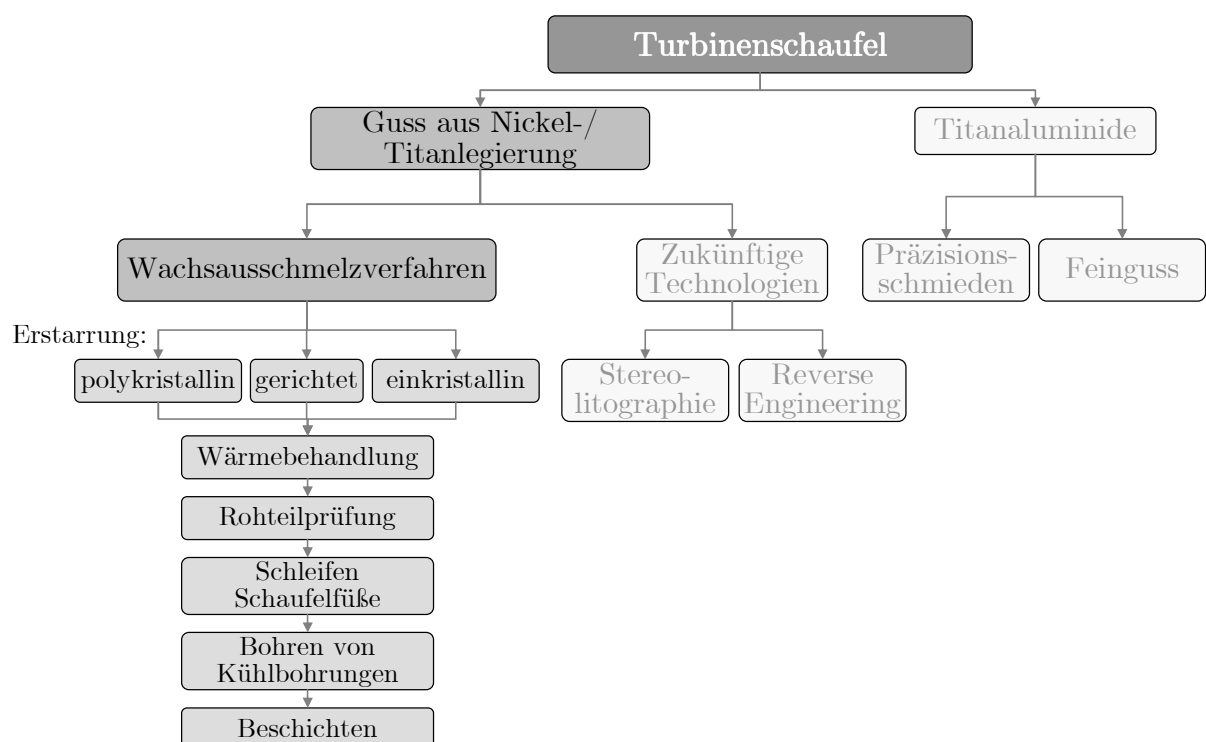


Abb. A-3 Schematischer Überblick der Herstellungsrouten von Turbinenschaufeln [96]

	TI 64	TI 6242	TI 6246
Max. Temperatur (°C)	300	480	400
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	4,43	4,54	4,85
Mech. Eigenschaften			
20°C R <sub>p0,2</sub> (MPa)	880	880	1020
460°C R <sub>p0,2</sub> (MPa)	680	610	700
Preis pro geschm. Vormaterial (€/kg)	30	35	46

Tab. A-1 Typische Titanlegierungen für Scheiben [106]

	Inco718	Waspaloy	Udimet720LI
Max. Temperatur (°C)	650	700	730
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	8,2	8,23	8,08
Mech. Eigenschaften			
20°C R <sub>p0,2</sub> (MPa)	1150	1120	1100-1250
650°C R <sub>p0,2</sub> (MPa)	930	860	1080
Preis pro geschm. Vormaterial (€/kg)	22	31	75

Tab. A-2 Typische Nickellegierungen für Scheiben [106]

	IN100	MAR M 247	PWA1484	CMSX10
Max. Temperatur (°C)	1000	1035	1095	1125
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	7,75	8,54	8,95	9,05
Preis pro geschm. Vormaterial (€/kg)	19	30	115	180

Tab. A-3 Typische Superlegierungen für Lauf- und Leitschaufeln [106]

