

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Strategische Planung von Technologieketten
für die Produktion**

Sebastian Schindler

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Univerität Paderborn

Die Dissertation wurde am 16.01.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.05.2014 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelzeichen	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Untersuchungsrahmen	4
1.2.1 Begriffsdefinitionen	4
1.2.2 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs	10
1.3 Zielsetzung der Arbeit	15
1.4 Praktische Anwendung der Methodik	16
1.5 Aufbau der Arbeit	16
2 Stand der Forschung	19
2.1 Allgemeines	19
2.2 Technologiestrategie produzierender Unternehmen	19
2.3 Arten von Kriterien zur Beurteilung von Technologien	21
2.3.1 Klassifizierung der Arten von Kriterien	21
2.3.2 Modellierung der Arten von Kriterien	23
2.4 Ansätze zur Planung von Technologien	27
2.5 Ansätze zur Planung von Technologieketten	29
2.6 Ansätze zur Planung von Fertigungsfolgen	31
2.7 Ableitung des Handlungsbedarfs	34
3 Anforderungen an die Methodik	39
3.1 Allgemeines	39
3.2 Allgemeine Anforderungen an die Methodik	39
3.3 Praktische Anforderungen für die Anwendung	40
4 Bewertung von Technologien und Technologieketten	43
4.1 Allgemeines	43
4.2 Relevante Bewertungskriterien	43
4.3 Technologiereife	45

4.3.1	Allgemeines	45
4.3.2	Bestehende Ansätze	46
4.3.3	Bewertung der bestehenden Ansätze	51
4.3.4	Bestimmung der Reife	54
4.4	Wirtschaftlichkeit	61
4.4.1	Allgemeines	61
4.4.2	Bestimmung der Wirtschaftlichkeit	61
4.5	Technologiepotenzial	70
4.5.1	Allgemeines	70
4.5.2	Bestimmung des Technologiepotenzials	71
4.6	Technische Machbarkeit	76
4.6.1	Allgemeines	76
4.6.2	Bestimmung der technischen Machbarkeit	77
5	Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten	81
5.1	Allgemeines	81
5.2	Übersicht über die Methodik	81
5.3	Schritt 1: Technologiestrategie und Produktdefinition	83
5.3.1	Allgemeines	83
5.3.2	Definition der Technologiestrategie	83
5.3.3	Definition der Produktionsaufgabe	83
5.4	Schritt 2: Technologieidentifikation und -vorauswahl	86
5.4.1	Allgemeines	86
5.4.2	Technologieidentifikation und -beschreibung	87
5.4.3	Technologiegrobbeurteilung und -vorauswahl	89
5.5	Schritt 3: Generierung von Technologieketten	91
5.5.1	Allgemeines	91
5.5.2	Wechselwirkungen innerhalb der Technologiekette	91
5.5.3	Bestehende Methoden	93
5.5.4	Bewertung der bestehenden Methoden	95
5.5.5	Methode zur Generierung von Technologieketten	98
5.6	Schritt 4: Bewertung der Technologieketten	103
5.7	Schritt 5: Interpretation und Auswahl	106
6	Anwendung der Methodik	109
6.1	Allgemeines	109
6.2	Anwendungsbeispiel	109
6.2.1	Beschreibung des Anwendungsbeispiels	109
6.2.2	Schritt 1: Technologiestrategie und Produktdefinition	109
6.2.3	Schritt 2: Technologieidentifikation und -vorauswahl	111
6.2.4	Schritt 3: Generierung von Technologieketten	112
6.2.5	Schritt 4: Bewertung der Technologieketten	115
6.2.6	Schritt 5: Interpretation und Auswahl	125
6.3	Bewertung der entwickelten Methodik	126

6.3.1	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	126
6.3.2	Beurteilung der Anforderungen	127
6.3.3	Fazit	129
7	Zusammenfassung und Ausblick	131
A	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien	133
B	Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung der Technologiereife des Anwendungsbeispiels	143
C	Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Anwendungsbeispiels	145
D	Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung des Technologiepotenzials des Anwendungsbeispiels	147
E	Betreute Studienarbeiten	149
	Literaturverzeichnis	151

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einflussfaktoren auf ein produzierendes Unternehmen in Anlehnung an ZAEH ET AL. (2009) und WIENDAHL ET AL. (2007)	1
1.2	Zeitliche Entwicklung der Reife und des Wettbewerbspotenzials einer Technologie in Anlehnung an SOMMERLATTE & DESCHAMPS (1985)	3
1.3	Ausschnitt einer Technologiekette zur Fertigung eines Funktionsträgers in Anlehnung an FALLBÖHMER (2000)	6
1.4	Grundaktivitäten des Technologiemanagements und wesentliche Aufgaben der Technologieplanung in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2011c) und KLAPPERT (2006)	11
1.5	Unterschiedliche Planungshorizonte der strategischen und operativen Technologieplanung in Anlehnung an EVERSHEIM (1996)	13
1.6	Vorgehen zur festlegung von Technologiekette, Fertigungsfolge und Produktionsstruktur in Anlehnung an REINHART & SCHINDLER (2012)	14
1.7	Aufbau der Arbeit und Strukturierung der Kapitel .	17
2.1	Vor- und Nachteile der beiden Positionierungsformen der technologischen Führerschaft und der technologischen Präsenz in Anlehnung an CORSTEN ET AL. (2006), DOWLING & HÜSING (2002) und PORTER (1999) . .	21
2.2	Modellierung von Unsicherheiten mittels Fuzzy-Logik und Wahrscheinlichkeitstheorie in Anlehnung an REINHART ET AL. (2011c)	26
2.3	Übersicht über die bestehenden Ansätze zur Bewertung und Planung von Technologien, Technologieketten sowie Fertigungsfolgen	35

3.1	Allgemeine und praktische Anforderungen an die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten	41
4.1	Konzept des Technologielebenszyklus und enthaltene Entwicklungsstufen in Anlehnung an FORD & RYAN (1981) und TIEFEL (2007)	46
4.2	Technology Readiness Level (TRL) der National Aeronautics and Space Administration (NASA) zur Beurteilung der Reife von Komponenten in der Luft- und Raumfahrt in Anlehnung an MANKINS (1995)	47
4.3	Beispielhafte Darstellung eines Reife-Profiles nach BROUSSEAU ET AL. (2009)	49
4.4	Übersicht über die bestehenden Ansätze zur Bestimmung der Reife von Produkten, Projekten und Technologien	52
4.5	Übersicht des Reifemodells zur Bestimmung des jeweiligen Reife-Fortschritts in den sieben Reifegradstufen	57
4.6	Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung der Technologiereife	59
4.7	Transformationsprozess durch eine Technologiekette zur Leistungserstellung in Anlehnung an WÖHE & DÖRING (2010) und SPUR (1998)	62
4.8	Systematisierung der Herstellkosten nach VOEGELE & SOMMER (2012)	63
4.9	Übersicht des Modells zur Bestimmung der Herstellkosten	64
4.10	Abschätzung der Entwicklungskosten für eine Technologiekette auf Basis des Reifemodells	66
4.11	Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit	68
4.12	Bestimmung des Technologiepotenzials anhand technologischer Leistungsparameter in Anlehnung an WALLENTOWITZ ET AL. (2009)	72
4.13	Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung des Technologiepotenzials	74

4.14	Zuordnung der technologischen Leistungsparameter der Technologiekette zur Bestimmung des Technologiepotenzials in Anlehnung an WALLENTOWITZ ET AL. (2009)	75
4.15	Werkstoff-, Produktions- und Produktmerkmale zur Bestimmung der technischen Machbarkeit	78
4.16	Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung der technischen Machbarkeit	79
5.1	Übersicht über die fünf Schritte der Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten	82
5.2	Innovative Produktbestandteile in der Erzeugnis- bzw. Produktstruktur in Anlehnung an die DIN 199 (2002)	85
5.3	Beispiele für die Zuordnung von Technologien und Bauteil-Features anhand der Referenztechnologiekette	86
5.4	Technologiesteckbrief zur Beschreibung von im Rahmen der Technologiefrüherkennung identifizierten Technologien am Beispiel des Planschleifens	88
5.5	Technologieradar für die Grobbewertung der einzelnen Technologien und Zuordnung zu Bauteil-Features in Anlehnung an REINHART ET AL. (2012)	90
5.6	Arten von Wechselwirkungen innerhalb einer Technologiekette	92
5.7	Übersicht über bestehende Ansätze zur Generierung von alternativen Technologieketten	96
5.8	Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Generierung alternativer Technologieketten	98
5.9	Zusammenführung der Modelle der Technologiereife, der Wirtschaftlichkeit und des Technologiepotenzials im Rahmen der Technologiefinbewertung	104
5.10	Histogramm des Eignungsgrads alternativer Technologieketten als Ergebnis der Technologiefinbewertung in Anlehnung an REINHART ET AL. (2011b)	105
5.11	Vergleich der Histogramme der Technologiekettenalternativen	106

5.12	Kippszenario zur Ermittlung der Einflusstärke von Faktoren auf das Bewertungsergebnis am Beispiel Materialpreis	107
6.1	Produktbeschreibung und Bauteil-Features der herzustellenden Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung	110
6.2	Technologiegrobbeurteilung und -vorauswahl der im Rahmen des Technologie-Screenings identifizierten Alternativen zur Herstellung der verschiedenen Bauteil-Features der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung	111
6.3	Abbildung der Wechselwirkungen 1. Art zwischen den Bauteil-Features A bis E der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung	112
6.4	Abbildung der Wechselwirkungen 2. Art zwischen den Technologien T_1 bis T_6 zur Herstellung der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung	113
6.5	Abbildung der Wechselwirkungen 3. Art zwischen den Technologien T_1 bis T_6 zur Herstellung der Bauteil-Features A bis E der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung	114
6.6	Ergebnis der deterministischen Reifebestimmung der einzelnen Technologien der Technologiekette α	116
6.7	Übersicht über die Histogramme der Technologiereife für die einzelnen Technologien und die resultierende Technologiekette α	117
6.8	Ergebnis der deterministischen Reifebestimmung der Technologieketten α , γ und ζ	118
6.9	Übersicht über die Histogramme der Reife für die Technologiekette α , γ und ζ	118
6.10	Übersicht über die deterministische Berechnung der Herstellstückkosten der Technologiekette α	119
6.11	Übersicht über die deterministische Berechnung der Entwicklungskosten der Technologiekette α	120
6.12	Übersicht der Herstell- und Entwicklungskosten der Technologiekette α betrachtet für 10 Perioden	121

6.13	Übersicht über die Histogramme der Herstellstückkosten für die Technologiekette α , γ und ζ	122
6.14	Übersicht über die Histogramme der Kapitalwerte für die Technologiekette α , γ und ζ	123
6.15	Übersicht über die Zuordnung der technologischen Leistungsparameter zu den einzelnen Technologien der Technologiekette α	123
6.16	Übersicht über die Histogramme der Technologiepotenziale für die Technologiekette α , γ und ζ	125
6.17	Übersicht über die Histogramme der Eignungsgrade für die Technologiekette α , γ und ζ	126
6.18	Beurteilung der Erfüllung der an die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten gestellten Anforderungen	128
A.1	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 1: Grundlagenforschung . .	134
A.2	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 2: Machbarkeitsstudie . . .	135
A.3	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 3: Technologieentwicklung .	136
A.4	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 4: Technologiedemonstrator	137
A.5	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 5: Integration in Betriebsmittel (Teil 1)	138
A.6	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 5: Integration in Betriebsmittel (Teil 2)	139
A.7	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 6: Produktionsstruktur (Teil 1)	140
A.8	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 6: Produktionsstruktur (Teil 2)	141

A.9	Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 7: Serieneinsatz	142
B.1	Detaillierte Ergebnisse der Reifebestimmung der einzelnen Technologien und Technologieketten α , γ und ζ des Anwendungsbeispiels	143
B.2	Übersicht über die Histogramme der Technologiereife für die einzelnen Technologien und die resultierende Technologiekette γ	144
B.3	Übersicht über die Histogramme der Technologiereife für die einzelnen Technologien und die resultierende Technologiekette ζ	144
C.1	Übersicht über die deterministische Berechnung der Herstellstückkosten der Technologiekette γ und ζ	145
C.2	Übersicht der Herstell- und Entwicklungskosten der Technologiekette γ betrachtet für 10 Perioden	146
C.3	Übersicht der Herstell- und Entwicklungskosten der Technologiekette ζ betrachtet für 10 Perioden	146
D.1	Übersicht über die Zuordnung der technologischen Leistungsparameter zu den einzelnen Technologien der Technologiekette γ	147
D.2	Übersicht über die Zuordnung der technologischen Leistungsparameter zu den einzelnen Technologien der Technologiekette ζ	147
D.3	Darstellung des Technologiepotenzials der Technologieketten α , γ und ζ anhand der S-Kurve	148

Tabellenverzeichnis

2.1	Merkmale zur Klassifikation von Kriterien in Anlehnung an KREBS (2012), RIMPAU (2010) und MÖLLER (2008)	23
2.3	Übersicht der Möglichkeiten zur Modellierung unterschiedlicher Arten von Kriterien in Anlehnung an KREBS (2012) und REINHART ET AL. (2011c)	24
5.1	Zulässige Produktionsabläufe nach Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. Art	101
5.3	Alternative Technologieketten als Ergebnis der Generierung unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. bis 3. Art	102
6.1	Zulässige Produktionsabläufe für die Herstellung der Wendschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung nach Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. Art	113
6.3	Alternative Technologieketten zur Herstellung der Wendschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. bis 3. Art als Ergebnis der Generierung	115

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AHP	Analytic Hierarchy Process
BF	Bauteil-Feature
BGK	Beschaffungsgemeinkosten
bsph.	beispielhaft
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CMM	Capability Maturity Model
CNC	Computerized Numerical Control
d. h.	das heißt
DGR	Deutsche Gesellschaft für Risikomanagement e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
EK	Entwicklungskosten
engl.	englisch
ESA	European Space Agency
et al.	et alii
FEK	Fertigungseinzelkosten
FGK	Fertigungsgemeinkosten
FK	Fertigungskosten
FSK	Fertigungsstückkosten
ggf.	gegebenenfalls
ggü.	gegenüber

Abkürzungsverzeichnis

HK	Herstellkosten
HSK	Herstellstückkosten
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel
i. W.	im Wesentlichen
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
K. o.	Knocked out
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MA	Mitarbeiter
MEK	Materialeinzelkosten
Mg	Chemisches Zeichen für Magnesium
MGK	Materialgemeinkosten
MK	Materialkosten
MRL	Manufacturing Readiness Level
MSK	Materialstückkosten
MSS	Mitarbeiterstundensatz
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NC	Numerical Control
NPV	Net Present Value
o. Ä.	oder Ähnliches
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSD	Office of the Secretary of Defense
PCMM	Process Capability Maturity Model
PE	Produktentwicklung
PEP	Produktentstehungsprozess
PKD	Polykristalliner Diamant
PLZ	Produktlebenszyklus
PMI	Project Management Institute
PPIM	Process Pair Interface Model

PT	Personentage
ROI	Return on Investment
SE	Simultaneous Engineering
sog.	sogenannte
SOP	Start of Production
SPP	Strategische Produktplanung
Tab.	Tabelle
TFA	Technologiefrühaufklärung
TLZ	Technologielebenszyklus
TM	Technische Machbarkeit
TMA	Technology Maturity Assessment
TP	Technologiepotenzial
TR	Technologiereife
TRC	Technology Readiness Calculator
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens
TRL	Technology Readiness Level
TSS	Technologiestundensatz
TUM	Technische Universität München
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
v. a.	vor allem
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WC-Co	Chemisches Zeichen für Wolframcarbid-Cobalt-Hartmetalle
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Formelzeichen

Griechische Buchstaben

Einige der in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen werden mit verschiedenen Bedeutungen verwendet. Die jeweilige Bedeutung sowie die zugehörige Einheit ergeben sich entweder aus dem Kontext oder werden im Text erläutert.

$\alpha, \beta, \gamma \dots$	Technologieketten
α_L	Lernfaktor
$\varphi_{E,TK}$	Eignungsgrad einer Technologiekette
$\overline{\varphi_E}$	Mittelwert des Eignungsgrad der Technologiekette
φ_{LF}	Potenzial des technologischen Leistungsparameters
φ_{TK}	Potenzial der Technologiekette

Lateinische Buchstaben

$A, B, C \dots$	Bauteil-Feature des herzustellenden Produktes
$a, b, c \dots$	Baugruppen eines Produktes
a	Anzahl relevanter technologischer Leistungsparameter
$A_{i,TK}$	Anforderungen an die Technologiekette
A_t	Auszahlungen der Periode t
Al	Chemisches Zeichen für Aluminium
E_t	Einzahlungen der Periode t
EK_T	Entwicklungskosten der Technologie
EK_{TK}	Entwicklungskosten der Technologiekette
$F_{i,TK}$	Fähigkeiten der Technologiekette i

f_{Work}	Bedienverhältnis
FSK_{TK}	Fertigungsstückkosten der Technologiekette
GW_{LF}	Grenzwert des technologischen Leistungsparameters
HSK_{TK}	Herstellstückkosten der Technologiekette
I	Input eines Transformationsprozesses
i	Laufvariable für die Höhe der Reifegradstufe
i_{NPV}	Kalkulationszinssatz
$i_{NPV,TK}$	Kalkulationszinssatz der Technologiekette
I_t	Investition zum Zeitpunkt t
K_{Energy}	Energiekosten
K_{Invest}	Investitionskosten
K_{Labour}	Personalkosten
$K_{License}$	Lizenzkosten
$K_{Material}$	Kosten für Werk- und Hilfsstoffe
$K_{Service}$	Dienstleistungskosten
K_{Supply}	Kosten für Zulieferteile
$K_{ValueAdd}$	Kosten für bereits erfolgte Wertschöpfung
l	Kantenlänge
M_{BFR}	Bauteil-Feature-Relation-Matrix
M_T	Reife der Technologie
M_{TBFR}	Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix
M_{TK}	Reife der Technologiekette
M_{TR}	Technologie-Relation-Matrix
NPV_{TK}	Kapitalwert der Technologiekette
$M_{Material}$	Werkstoffmerkmale
$M_{Product}$	Produktmerkmale
$M_{Production}$	Produktionsmerkmale
$m_{TRL,i}$	Reife-Fortschritt der Technologie in der Reifegradstufe i
$m_{TRL,TK,i}$	Reife-Fortschritt der Technologiekette in der Reifegradstufe i

Max	Maximaler Wert der Wahrscheinlichkeitsverteilung
MSK_{TK}	Materialstückkosten der Technologiekette
Min	Minimaler Wert der Wahrscheinlichkeitsverteilung
n	n -te Technologie einer Technologiekette
O	Output eines Transformationsprozesses
P_{LF}	Position des technologischen Leistungsparameters
$q_{k,i}$	Gewichtungsfaktor der Bewertungskriterien i
$q_{M,i}$	Gewichtungsfaktor der Reifegradstufe i
$q_{TK,\phi,i}$	Gewichtungsfaktor des technologischen Leistungsparameters i
R_z	Schartigkeit
s	Standweg
u	Stückzahl
u_t	für die Periode t prognostizierte Stückzahl
t_F	Fertigungszeit
T	Betrachtungszeitraum
T_E	Einsatztemperatur
T_i	Technologie i
V_G	Volumen des Hartmetall-Grundkörpers
V_S	Volumen des PKD-Schneideinsatzes
W	Wirtschaftlichkeit
WW	Wahrscheinlichster Wert der Wahrscheinlichkeitsverteilung
x	Zähler für das x -te herzustellende Produkt

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im Zuge der Globalisierung stehen produzierende Unternehmen im weltweiten Wettbewerb zueinander (BULLINGER 2009). Die Wettbewerbsfähigkeit und der Erfolg wird erheblich davon bestimmt, wie Unternehmen im Kontext sich ändernder Rahmenbedingungen, wie gesteigerten Kundenanforderungen (LINDEMANN ET AL. 2003), erzielbaren Materialpreisen (WANNENWETSCH 2010), neu am Markt verfügbaren Produktionstechnologien (LICHTENTHALER 2008) oder dem Vorhandensein von Konkurrenten (PORTER 1999), agieren können.

Abb. 1.1 zeigt eine Übersicht von potenziellen Einflussfaktoren auf produzierende Unternehmen. Während externe Einflussfaktoren, wie die Veränderung der Wettbewerbssituation oder konjunkturelle Einflüsse, aus dem Unternehmensumfeld stammen und i. d. R. nicht verändert werden können (COOPER 1979), sind interne Einflussfaktoren, wie bspw. der Einsatz von im Unternehmen verfügbaren Technologien oder das Know-how der Mitarbeiter, in Grenzen veränderbar und können durch das Unternehmen selbst festgelegt werden (ZAEH ET AL. 2009). Interne Einflussfaktoren sind daher von enormer Bedeutung für die unternehmerische Wettbewerbsfähigkeit (BOLZ 2008). Eine Vielzahl der internen sowie externen Einflussfaktoren ist nicht konstant (ZAEH ET AL. 2009), sondern verändert sich mit der Zeit und unterliegt einer gewissen Unsicherheit, was den Planungsprozess erschwert (LANZA ET AL. 2012).

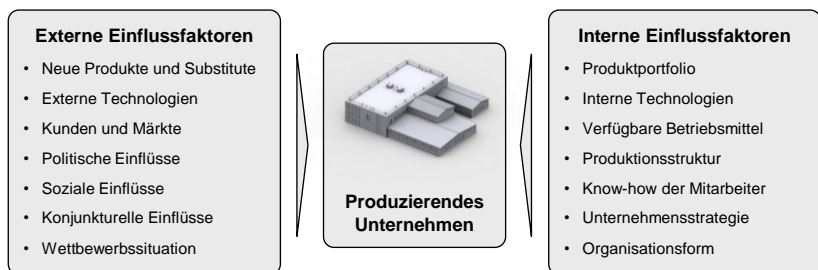


Abb. 1.1: Einflussfaktoren auf ein produzierendes Unternehmen in Anlehnung an ZAEH ET AL. (2009) und WIENDAHL ET AL. (2007)

Beispiele für derartige Einflussfaktoren sind die Innovationszyklen von Produkten und Technologien (NYHUIS ET AL. 2008; GUNDLACH ET AL. 2010), Forderungen nach Nachhaltigkeit (SELIGER 2012), die zunehmende Kombination von Produkten und Dienstleistungen (MEIER & UHLMANN 2012), soziale Einflüsse aus der Gesellschaft, wie gesteigerte Anforderungen an die Ressourceneffizienz von Maschinen und Anlagen (ERHARDT & PASTEWSKI 2010), oder sich ändernde Kundenbedarfe (DU ET AL. 2005).

In der wissenschaftlichen Literatur werden diese dynamischen Rahmenbedingungen als *turbulentes Unternehmensumfeld* bezeichnet (REINHART ET AL. 1999; WIENDAHL ET AL. 2007; ELMARAGHY & WIENDAHL 2009). Um in einem derartig unsicheren Umfeld bestehen zu können, sind v. a. Unternehmen an Hochlohn-Standorten gefordert, ständig zu überprüfen, ob die in der Leistungserstellung eingesetzten Produktionstechnologien zukünftigen Anforderungen genügen (MILBERG 2005; KLOCKE 2009a; SCHUH ET AL. 2011a). Den internen und externen *Technologien* aus Abb. 1.1 kommen eine immense Bedeutung zu, da diese Auswirkungen auf die strategische Ausrichtung eines Unternehmens haben (SPECHT & BERNTSEN 2009; ZAHN 2004; SPATH 2004).

Eine erfolgversprechende Möglichkeit, Wettbewerbsvorteile zu erschließen, ist das Streben nach Technologieführerschaft (PORTER 1999). Hierbei gilt es, Technologien einzusetzen, die einerseits ein realisierbares Potenzial versprechen, sich von der Konkurrenz abzusetzen (GAUSEMEIER ET AL. 2011; ARDILIO & LAIB 2008), andererseits aber ausreichend weit entwickelt und ausgereift sein müssen, um erfolgreich produzieren zu können (WÖRDENWEBER & WICKORD 2008). Die evolutorische Entwicklung dieser Eigenschaften einer Technologie kann in Form eines Technologielebenszyklus beschrieben werden (SOMMERLATTE & DESCHAMPS 1985). Abb. 1.2 zeigt beispielhaft die schematischen Verläufe der Reife und des Wettbewerbs- bzw. Technologiepotenzials.

Je geringer die Reife einer Technologie ist, desto höher sind mit ihrem Einsatz verbundene technische und organisatorische Risiken (VALERDI & KOHL 2004; MANKINS 1995). Werden im Rahmen der Produktion unausgereifte Technologien eingesetzt, können Mehrkosten bspw. durch die Produktion von fehlerhaften Teilen oder den übermäßigen Verbrauch von Ressourcen entstehen (NEUGEBAUER 2008), die es zu vermeiden gilt (BENES & GROH 2010). Für den wirtschaftlichen Einsatz müssen Technologien daher ein angemessenes Maß an Reife aufweisen und ausreichend beherrscht werden (SCHUH ET AL. 2011e). Ein Nachteil ausgereifter Technologien ist jedoch, dass das mit ihnen verbundene Wettbewerbspotenzial äußerst gering ist, da sie keine Differenzierungsmöglichkeit zu konkurrierenden Unternehmen bieten (TIEFEL 2007). In Abhängigkeit des aktuellen Entwicklungsstands können einer Technologie daher unterschiedliche, strategische Rollen zugewiesen werden (SOMMERLATTE & DESCHAMPS 1985).

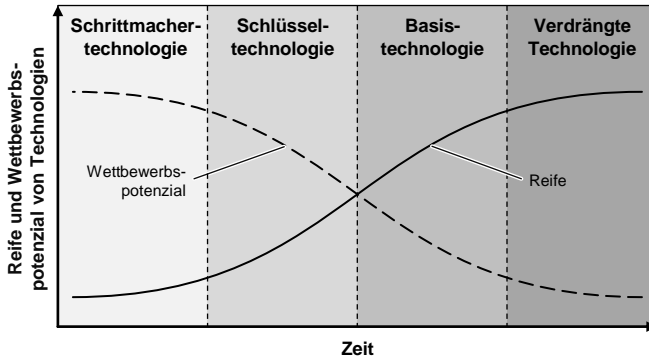


Abb. 1.2: Zeitliche Entwicklung der Reife und des Wettbewerbspotenzials einer Technologie in Anlehnung an SOMMERLATTE & DESCHAMPS (1985)

Während *Schrittmacher-* oder *Schlüsseltechnologien* ein erhebliches Potenzial besitzen, sich vom Wettbewerb abzusetzen, weisen *Basistechnologien* keine Differenzierungsmerkmale auf (HEUBACH ET AL. 2008). Letztere werden i. d. R. durchgehend in einer Branche eingesetzt, da sie frei am Markt verfügbar und für jedes Unternehmen zugänglich sind. Finden *verdrängte Technologien* Anwendung, zu denen am Markt Substitute existieren, welche die Produktionsaufgabe in besserer Art und Weise, d. h. bspw. kostengünstiger oder qualitativ hochwertiger, bewerkstelligen, entstehen sogar Nachteile für das Unternehmen (SCHUH ET AL. 2011e).

Die Technologieführerschaft kann nur erreicht werden, wenn ein signifikanter Wissensvorsprung gegenüber dem Wettbewerb existiert (PORTER 1999). Unternehmen müssen daher danach streben, v. a. neue Technologien in der Produktion einzusetzen (SCHULTE-GEHRMANN ET AL. 2011). Der Wechsel zum richtigen Zeitpunkt zur richtigen Technologie ist aus Wettbewerbssicht entscheidend (ABELE & REINHART 2011; SCHRAFT ET AL. 1996). Um einen maximalen Wissensvorsprung bei kalkulierbarem Risiko zu erzielen, ist festzustellen, ab welchem Zeitpunkt eine neue Technologie einsatzfähig ist. Anschließend muss untersucht werden, wann der Wechsel auf diese neue Technologie vor dem Hintergrund der laufenden Produktion stattfinden sollte (KLAPPERT 2006).

Bei der Herstellung von Produkten kommen i. d. R. eine Vielzahl an Fertigungs- und Montageverfahren zum Einsatz, was zu einem weiteren Aspekt führt, welcher bei der strategischen Technologieplanung zu berücksichtigen ist (EVERSHEIM ET AL. 2005; FIEBIG 2004). Die Reihenschaltung von einzelnen Technologien wird in der wissenschaftlichen Literatur als *Technologiekette* bezeichnet (FALLBÖHMER 2000).

Die einzelnen Verfahren einer Technologiekette beeinflussen sich aufgrund komplexer Wechselwirkungen z. T. gegenseitig (DENKENA ET AL. 2005; SCHUH & KNOCH 2005; BIERMANN ET AL. 2013). Wird zu Beginn der Herstellung eines Bauteils bspw. ein gusstechnisches Verfahren eingesetzt, so sind nachgelagerte Schweißoperationen u. U. nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand möglich (DEINZER & RETHMEIER 2006). Aufgrund dieser Wechselwirkungen und der Auswirkungen auf die Chancen und Risiken innerhalb der Technologiekette kommt der Entscheidung für oder gegen eine einzelne Technologie eine immense Bedeutung zu (HIRT ET AL. 2012; DENKENA & HENNING 2008). Die einzelnen Verfahren einer Technologiekette dürfen daher nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, sondern sind immer im Gesamtverbund zu sehen.

Als Resultat des oben beschriebenen turbulenten Unternehmensumfelds existiert ein sich zeitlich veränderndes Spektrum an momentan und zukünftig verfügbaren Technologien (ZAEH ET AL. 2009; FOSTER 1986), das es bei der Planung einer Technologiekette zu berücksichtigen gilt. Aus strategischer Sicht ist neben der Weiterentwicklung bestehender Technologien daher ständig zu überprüfen, ob die in der Produktion eingesetzten Verfahren und Technologieketten zukünftigen Anforderungen genügen oder ob Alternativen existieren, die die Produktionsaufgabe besser bewerkstelligen (KLAPPERT 2006). Hierzu muss in erster Linie die Eignung von Technologien und Technologieketten in Abhängigkeit des sich zeitlich verändernden Unternehmensumfelds beurteilt werden. Dabei sind die für die strategische Planung von Technologieketten relevanten Einflussfaktoren und Bewertungskriterien zu identifizieren (ABELE & REINHART 2011).

1.2 Untersuchungsrahmen

1.2.1 Begriffsdefinitionen

1.2.1.1 Allgemeines

Im Rahmen der Planung von Technologieketten existiert eine Reihe von Begriffen und Definitionen, die in der wissenschaftlichen Literatur z. T. unterschiedlich verwendet werden. Außerdem werden in der Technologieplanung unterschiedliche Sichtweisen und Detaillierungsgrade (SCHUH ET AL. 2011e) verwendet. Für ein einheitliches Verständnis ist eine klare Definition der Begrifflichkeiten unabdingbar. Daher werden im Folgenden die für diese Arbeit zentralen Begriffe eingeführt und erläutert.

1.2.1.2 Technologie

In der wissenschaftlichen Literatur wird unter einer Technologie das naturwissenschaftliche Wissen verstanden, das notwendig ist, um Lösungswege für technische Probleme zu erarbeiten (PERILLIEUX 1987; BULLINGER 1996; WOLFRUM 2000). Eine Technologie entspricht in erster Linie dem Know-how über die Anwendung und wird in Form einer Technik¹ (z. B. in einer Werkzeugmaschine) physisch umgesetzt (BULLINGER 1994). Je nach Sichtweise lassen sich verschiedene Arten von Technologien unterscheiden und anhand diverser Klassifizierungsansätze² einteilen (VOIGT 2008).

Hinsichtlich der wettbewerbsstrategischen Bedeutung wurden u. a. bereits Schrittmacher-, Schlüssel-, Basistechnologien und verdrängte Technologien eingeführt (siehe Abb. 1.2). Bezüglich des Einsatzgebiets lassen sich Technologien in Produkt- und Produktionstechnologien unterscheiden (BULLINGER 1996; GERPOTT 2005; VOIGT 2008). Produkttechnologien entsprechen dem technischen Wissen, das zur Darstellung von einer oder mehreren Funktionen eines Produkts notwendig ist. Produktionstechnologien (Verfahrens- bzw. Prozesstechnologien) werden zur Herstellung von Produkten oder Komponenten eingesetzt. SPUR (2008) versteht unter einer Produktionstechnologie die Lehre der Umwandlung und Kombination von Produktionsfaktoren in Produktionsprozessen unter Nutzung materieller, energetischer und informationstechnischer Wirkflüsse. Je nach Hersteller- oder Anwendersicht können Produktionstechnologien als Produkttechnologien angesehen werden (VOIGT 2008; SCHUH ET AL. 2011e). Produktionstechnologien werden weiter in Primär- und Sekundärtechnologien unterteilt (MÜLLER 2007). Während Primärtechnologien direkt zur Wertschöpfung am Produkt beitragen, haben Sekundärtechnologien keinen wesentlichen Wertschöpfungsanteil und werden i. d. R. nur für Unterstützungsfunktionen (z. B. Reinigen oder Handhaben) eingesetzt.

Aus Sicht der Fabrikplanung werden Produktionstechnologien in Fertigungs-, Montage- und Logistiktechnologien unterteilt (WIENDAHL ET AL. 2009). Fertigungstechnologien umfassen alle Fertigungsprozesse bzw. -verfahren nach DIN 8580 (2003) und werden in sechs Hauptgruppen unterteilt. Zu den Montagetechnologien zählen sämtliche Verfahren, die für den Zusammenbau von Einzelteilen und Baugruppen notwendig sind (LOTTER 2006). Logistiktechnologien beziehen sich auf die raum-zeitliche Bereitstellung von Objekten im

¹ Eine vertiefte Auseinandersetzung mit den Begriffen Technologie und Technik sowie eine Abgrenzung lassen sich bei PEIFFER & PEIFFER (1992), BINDER & KANTOWSKY (1996), SPUR (1998), LICHTENTHALER (2002) oder SCHÖNING (2006) finden. Der Zusammenhang zwischen Theorie, Technologie, Technik und Innovation wird von SPECHT & BECKMANN (1996) oder LAUBE (2009) beschrieben.

² Eine umfangreiche Übersicht über die Klassifikation und Systematisierung unterschiedlicher Technologiearten liefert GERPOTT (2005).

Rahmen der Beschaffung, der Produktion, der Distribution und der Entsorgung (WIENDAHL ET AL. 2009). Aus Sicht des Einsatzgebietes betrachtet die wissenschaftliche Literatur neben Produkt- und Produktionstechnologien auch noch weitere Technologiearten, wie bspw. Werkstoff- (RUGE & WOHLFAHRT 2007) oder Informationstechnologien (MOCH 2011).

Unter dem Begriff *Technologie* werden in dieser Arbeit Produktionstechnologien zur Herstellung eines Produktes verstanden. Hierzu zählen sowohl Fertigungs- als auch Montagetechnologien³.

1.2.1.3 Technologiekette

Unter dem Begriff der Technologiekette wird in der wissenschaftlichen Literatur die abstrakte, sequentielle Aneinanderreihung von Produktionstechnologien, also Fertigungs- und Montagetechnologien, zur Herstellung eines Funktionsträgers, wie beispielsweise eines Produkts oder einer Komponente, verstanden (FALLBÖHMER 2000; KNOCHE 2005; KLOCKE & WILMS 2007). Abb. 1.3 zeigt, wie die Wertschöpfung an einem Funktionsträger durch eine Technologiekette beginnend mit einem Rohteil oder Halbzeug über definierte Zwischenzustände in einen festgelegten Endzustand erbracht wird. Der Ausgangszustand einer Technologie stellt dabei gleichzeitig den Eingangszustand der nachfolgenden Technologie dar. Die Festlegung einer Technologiekette ist betriebsmittelunabhängig und unternehmensneutral, weshalb Transport-, Handhabungs-, Lager- oder Prüfschritte nicht berücksichtigt werden (TROMMER 2001).

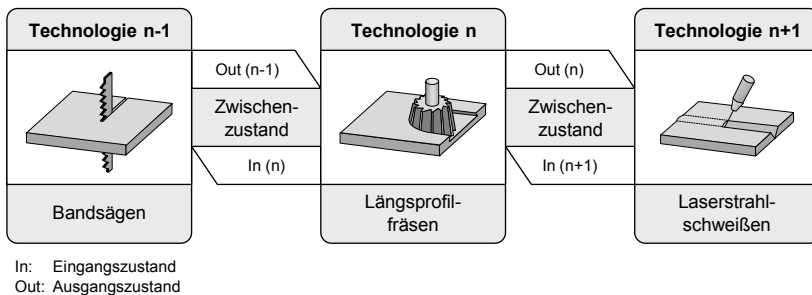


Abb. 1.3: Ausschnitt einer Technologiekette zur Fertigung eines Funktionsträgers in Anlehnung an FALLBÖHMER (2000)

³ Logistiktechnologien, wie sie WIENDAHL ET AL. (2009) vorgeschlagen, werden explizit nicht betrachtet.

In dieser Arbeit entspricht der Begriff *Technologiekette* der Reihenschaltung von einzelnen Produktionstechnologien gemäß der Definition nach FALLBÖHMER (2000). Dabei erfolgt die Verkettung der einzelnen Technologien unabhängig von den einzusetzenden Betriebsmitteln, weshalb keine Lager-, Handhabungs-, Transport- oder Prüfschritte betrachtet werden. Im Rahmen der Produktion eines physischen Produktes sind i. d. R. mehrere Komponenten, welche mit unabhängigen Technologieketten hergestellt werden, zu fügen. Aus diesem Grund können Technologieketten parallel durchlaufen werden, müssen aber den Anforderungen des Fügeprozesses genügen, d. h. sie müssen verbunden werden können.

1.2.1.4 Betriebsmittel

Nach VDI-Richtlinie 2815 werden unter Betriebsmitteln⁴ alle technischen Geräte, Einrichtungen, Maschinen und Anlagen verstanden, die der betrieblichen Leistungserstellung dienen (VDI 2851 1987). Betriebsmittel können in eine Reihe von Arten, wie Ver- und Entsorgungsanlagen, Mess- und Prüf- oder Lagermittel gegliedert werden. Die Realisierung der Produktionsaufgabe basiert auf der Zuordnung der Technologien zu den vorhandenen Betriebsmitteln. Nach WIENDAHL ET AL. (2009) lassen sich Betriebsmittel aus Sicht der Fabrikplanung in Fertigungs-, Montage- und Logistikmittel unterteilen. Fertigungsmittel werden zur Durchführung der Fertigungsaufgaben durch den Einsatz von Fertigungstechnologien verwendet. Während Montagemittel der Realisierung von Montagetechnologien dienen, werden Logistikmittel eingesetzt, um Logistiktechnologien umzusetzen.

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff *Betriebsmittel* die Gesamtheit aller Geräte, Einrichtungen, Maschinen und Anlagen zur Leistungserstellung verstanden, denen Technologien zugeordnet werden können. Hierzu zählen demnach lediglich Fertigungs- und Montagemittel nach WIENDAHL ET AL. (2009).

1.2.1.5 Fertigungsfolge

Fertigungsfolgen basieren grundsätzlich auf zuvor aufgestellten Technologieketten und sind produktionsmittelbezogen, da den einzelnen Technologien konkrete Betriebsmittel (z. B. Fräsen auf dem 5-Achsen-Bearbeitungszentrum)

⁴ Synonym zu „Betriebsmittel“ werden in der wissenschaftlichen Literatur auch die Begriffe Produktionsmittel oder Ressource verwendet. Der Begriff Ressource stellt aus Sicht der Fabrikplanung eine Erweiterung dar, da er zusätzlich menschliche Einsatzkräfte, Geldmittel und Rohstoffe umfasst (WIENDAHL ET AL. 2009).

zugeordnet werden (SCHELL 1996; TROMMER 2001). Fertigungsfolgen berücksichtigen neben den einzelnen Zwischenzuständen auch die im Materialfluss befindlichen Lager-, Handhabungs-, Transport- und Prüfschritte (BRECHER ET AL. 2005). Daher werden Fertigungsfolgen auch als das Bindeglied zwischen Konstruktion und Produktionsplanung bezeichnet, weil erst durch sie die einzelnen Bauteil-Features mit der realen Produktionsumgebung verknüpft werden.

Für den Begriff *Fertigungsfolge* wird in dieser Arbeit die Definition nach TROMMER (2001) verwendet, wonach diese die Zuordnung der einzelnen Technologien einer Technologiekette zu konkreten Betriebsmitteln festlegt und dabei die im Materialfluss befindlichen Lager-, Handhabungs-, Transport- und Prüfschritte beinhaltet.

1.2.1.6 Produktionsstruktur

In der wissenschaftlichen Literatur existiert keine einheitliche Definition des Begriffs der Produktionsstruktur (DOHMS 2001). Durch die Produktionsstruktur wird die Produktion in Bereiche und Segmente untergliedert (ERLACH 2010). Die Produktionsstruktur beinhaltet die organisatorische Zuordnung der Fertigungsart (z. B. Einzel-, Serien- und Massenfertigung) und die Verknüpfung der einzelnen Betriebsmittel (HERNÁNDEZ MORALES 2002). In Abhängigkeit des Detaillierungsgrads bezieht sich die Produktionsstruktur auch auf die räumliche Positionierung von betrieblichen Struktureinheiten, wie bspw. Maschinen oder Arbeitsplätzen (WIENDAHL ET AL. 2009), weshalb sie das Fabriklayout beeinflusst. In dieser räumlichen Struktur werden neben dem Materialfluss auch das Fertigungsprinzip (z. B. Werkstatt-, Fließ- oder Baustellenprinzip) sowie Medien- und Informationsflüsse abgebildet (WIENDAHL ET AL. 2009).

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff *Produktionsstruktur* die räumliche Anordnung und Verknüpfung der eingesetzten Betriebsmittel unter Berücksichtigung der Fertigungsfolge verstanden. Die Produktionsstruktur entspricht aus dieser Sichtweise dem Feinlayout nach der Definition von WIENDAHL ET AL. (2009) bzw. dem Produktionslayout nach der Definition von HERNÁNDEZ MORALES (2002).

1.2.1.7 Reife

Die Begriffe der Reife und der Technologiereife werden in der wissenschaftlichen Literatur im Kontext der strategischen Planung von Produktionstechnologien synonym verwendet (TIEFEL 2007; WÖRDENWEBER & WICKORD 2008), eine klare Definition existiert jedoch nicht. Die Reife gilt als Maß für den Entwicklungsstand einer Technologie.

Somit bildet die Reife einer Technologie deren Leistungsfähigkeit und noch für die Anwendung aufzuwendende Kapazitäten ab (SOMMERLATTE & DESCHAMPS 1985; VALERDI & KOHL 2004; HEUBACH ET AL. 2008). Wie bereits in Abb. 1.2 dargestellt wurde, nimmt die Reife⁵ einer Technologie im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bspw. durch Unternehmen oder Forschungsinstitute im Laufe der Zeit kontinuierlich zu (FORD & RYAN 1981).

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff *Reife* der aktuelle Entwicklungsstand einer Technologie im Bezug auf deren technische und organisatorische Anwendbarkeit in der Serienproduktion verstanden.

1.2.1.8 Technologiepotenzial

Für das Potenzial einer Technologie existiert in der wissenschaftlichen Literatur keine allgemeingültige Definition. REMINGER (1990) versteht unter dem Potenzial einer Technologie sowohl das Risiko als auch die Chance, Wettbewerbsvorteile zu erringen. BULLINGER (1994) beschreibt das Potenzial als die Eigenschaft einer Technologie, sich von Konkurrenten zu differenzieren. Grundsätzlich besitzen Technologien ein hohes Wettbewerbspotenzial, wenn sie im Sinne der Kernkompetenz maßgeblich für den unternehmerischen Erfolg und damit die Entwicklung der Marktposition sind (SCHUH ET AL. 2011e; WÖRDENWEBER & WICKORD 2008; PFEIFFER & DÖGL 1986). BOOS ET AL. (2011) zählen zu dem Potenzial von Technologien die Erzeugung neuer Produkte, die Steigerung der Produktqualität und die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Betriebsmitteln. BULLINGER (1996) hebt die Möglichkeit der Verbesserung von Produkteigenschaften durch den Einsatz von potenzialträchtigen Technologien hervor sowie die Senkung von Durchlaufzeiten und Kosten, was sich positiv auf die Produktivität auswirkt (SCHUH ET AL. 2011b). SCHÖNING (2006) unterscheidet im Bezug auf Technologien das Technologie-, Nutzen- und Marktpotenzial, wobei das Technologiepotenzial die Leistungsfähigkeit beschreibt.

Unter dem Begriff *Technologiepotenzial* werden in dieser Arbeit diejenigen Fähigkeiten und Eigenschaften einer Technologie verstanden, die einen wesentlichen technologischen Nutzen bei deren Anwendung bringen. Das Technologiepotenzial bezieht sich daher ausschließlich auf die technologische Leistungsfähigkeit⁶.

⁵ Anhand der Reife lässt sich die Anwendbarkeit einer Technologie für den wirtschaftlichen Einsatz in der Serienproduktion abschätzen (KRÖLL 2007). Da die Reife negativ mit dem technischen und organisatorischen Risiko, das beim Einsatz einer Technologie besteht, korreliert (WESTKÄMPER & BALVE 2009; NONN 2009; VELLA ET AL. 2010), müssen Unternehmen stets darauf achten, Technologien einzusetzen, die ein Mindestmaß an Reife aufweisen (WOLFRUM 2000).

⁶ Weitere Potenziale von Technologien, wie bspw. die indirekte Beeinflussung von Absatzmärkten, werden hierbei nicht betrachtet.

Dies kann bspw. die Fähigkeit sein, unterschiedliche Materialien bearbeiten oder bestimmte Toleranzen fertigen zu können.

1.2.2 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs

1.2.2.1 Technologieplanung als Teil des Technologiemanagements

WESTKÄMPER & BALVE (2009) definieren das Technologiemanagement als die Organisation von Anwendung neuer technologischer Erkenntnisse zur Unterstützung der Unternehmensziele und -strategien. In ihrem Ordnungsrahmen von Produktion und Management nennen BOOS ET AL. (2011) das Technologiemanagement als einen von neun essentiellen Unternehmensprozessen. Da Technologien einen wesentlichen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen haben, müssen diese schnell und kundenorientiert entwickelt, eingesetzt und rechtzeitig substituiert werden (SCHUH ET AL. 2011b). Dabei ist es das Ziel des Technologiemanagements, benötigte Produkt-, Material und Produktionstechnologien zum richtigen Zeitpunkt und zu verhältnismäßigen Kosten verfügbar zu machen (GAUSEMEIER ET AL. 2006; BULLINGER 1996). Nach BULLINGER (2002) integriert das Technologiemanagement die Planung, Gestaltung, Optimierung, Einsatz und Bewertung von technischen Produkten und Prozessen. Letztere beinhalten im Wesentlichen Technologien zur Erfüllung der Produktionsaufgabe. Eine der Kernaufgaben des Technologiemanagements ist dabei die Bereitstellung von geeigneten Methoden und Vorgehensweisen (ABELE 2006; SPATH 2004).

Abb. 1.4 zeigt die von SCHUH ET AL. (2011c) formulierten Grundaktivitäten des Technologiemanagements sowie die wesentlichen Aufgaben der Technologieplanung (KLAPPERT 2006). Im Rahmen der Technologiefrüherkennung werden frühe Entwicklungen in relevanten Technologiefeldern wahrgenommen (WELLEN-SIEK ET AL. 2011). Darauf aufbauend gilt es in der Technologieplanung, konkrete Vorgaben für die Entwicklung und den Einsatz von Technologien abzuleiten (SCHUH ET AL. 2011d). In der Technologieentwicklung und -verwertung werden die Vorgaben aus der Technologieplanung umgesetzt und die Anwendungstauglichkeit sichergestellt (KLAPPERT ET AL. 2011). Somit operationalisiert die Technologieplanung die von der Technologiestrategie festgelegten Unternehmensziele und repräsentiert das Bindeglied zwischen Technologiefrüherkennung und Technologieentwicklung sowie -verwertung (SCHUH ET AL. 2011b). Die von HAAG ET AL. (2011) beschriebene Technologiebewertung kommt dabei in verschiedenen Phasen und Aspekten der Technologieplanung zur Anwendung.



Abb. 1.4: Grundaktivitäten des Technologiemanagements und wesentliche Aufgaben der Technologieplanung in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2011c) und KLAPPERT (2006)

1.2.2.2 Strategische und operative Technologieplanung

EVERSHEIM (1996) unterteilt die Technologieplanung in eine strategische und eine operative Komponente. Während bei der strategischen Technologieplanung die Effektivität im Vordergrund steht, fokussiert die operative Technologieplanung die Effizienz (SCHRAFT ET AL. 1996). Die von SCHUH ET AL. (2011d) beschriebene Technologieplanung im Rahmen des Technologiemanagements ist vornehmlich der strategischen Technologieplanung zuzuordnen.

Die *strategische Technologieplanung* soll die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens erhalten und ausbauen (FIEBIG 2004). Dies erfolgt in erster Linie durch die Erzeugung von Produkt- und Prozessinnovationen⁷ (BULLINGER ET AL. 2012; SCHRAFT ET AL. 1996). Dazu müssen neu entwickelte Technologien den Übergang von der Invention, also der bloßen Erfindung einer Sache, zur Innovation schaffen (HAUSCHILDT & SALOMO 2011; COOPER 1979). HAUSCHILDT & STAUDT (1996) zählen zu den Erfolgsfaktoren für eine Innovation u. a. das Technologieniveau eines Unternehmens, dessen zentraler Bestandteil neben der Produkttechnologie und der Informationsverarbeitung v. a. die Produktionstechnologie ist. Die strategische Technologieplanung formuliert in diesem Zusammenhang Handlungsanweisungen für den zukünftigen Einsatz von Technologien (EVERSHEIM 1996). Dazu sind zunächst für die Produktion relevante Technologien zu identifizieren und zu analysieren, um auf dieser Basis eine Technologiestrategie formulieren zu können. Typische Beispiele hierfür

⁷ In diesem Zusammenhang ist unter dem Begriff Prozessinnovation der erfolgreiche Einsatz einer neuen Produktionstechnologie zu verstehen.

sind die Pionier- oder die Imitationsstrategie⁸ (KLAPPERT 2006; BULLINGER 1994). Neben der Formulierung und der Entwicklung der Strategie zählt GERPOTT (2005) u. a. aber auch Technologieentscheidungen sowie die Planung der Umsetzung⁹ zu den Aufgaben der strategischen Technologieplanung.

Bei der *operativen Technologieplanung* erfolgt die Umsetzung der in der strategischen Technologieplanung formulierten Zielsetzungen (SCHRAFT ET AL. 1996). Da die operative Technologieplanung die konkrete Umsetzung der Produktionsaufgabe zum Ziel hat, werden hier tendenziell kurzfristige Planungsaufgaben (EVERSHEIM 1996), wie bspw. die Zuordnung von Fertigungsschritten zu Betriebsmitteln (WILLMS 2008), behandelt. EVERSHEIM (1996) unterscheidet in diesem Zusammenhang die Technologiegrob- und -feinplanung. Während die Technologiegrobplanung eine Vorauswahl der vorhandenen Technologiealternativen beinhaltet, wird die abschließende Entscheidung für oder gegen eine Technologie in der Technologiefinplanung getroffen. Da die Gestaltung von Technologieketten der operativen Technologieplanung zuzuordnen ist, wird diese im Rahmen der strategischen Planung bisher nicht thematisiert (FALLBÖHMER 2000). Die vorliegende Arbeit soll daher die Planung von Technologieketten bereits im Rahmen der strategischen Technologieplanung anstoßen, um die vorhandenen Potenziale, wie bspw. die Verbesserung der Planungssicherheit (ABELE & REINHART 2011), zu erschließen.

Abb. 1.5 zeigt die unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Planungshorizonte der strategischen und operativen Technologieplanung. Da die operative Technologieplanung die Festlegung von Technologien für die konkrete Produktionsaufgabe zum Ziel hat, fokussiert sie tendenziell kurzfristige Planungshorizonte. Die für diese Aufgabe notwendigen Informationen, wie zu fertigenden Stückzahlen, einzusetzende Materialien oder die Geometrie der Produkte, sind i. d. R. bekannt und beschrieben (FALLBÖHMER 2000). Deshalb sind die mit der operativen Technologieplanung verbundenen Planungsunsicherheiten zwar vorhanden (TROMMER 2001), jedoch im Vergleich zu strategischen Fragestellungen relativ gering (EVERSHEIM 1996). Aufgrund des kurzfristigen Charakters können für die operative Technologieplanung lediglich die im Unternehmen verfügbaren (internen) Technologien berücksichtigt werden. Da die strategische Technologieplanung auf den langfristigen Planungshorizont hin ausgerichtet ist, sind die mit der Planung verbundenen Unsicherheiten, wie bspw. die Verfügbarkeit von Planungsdaten und -informationen, relativ hoch. Aus langfristiger

⁸ BULLINGER (1994) identifiziert im Wesentlichen die vier Varianten der Pionier-, Imitations-, Nischen- und Kooperationsstrategie, wobei PORTER (1999) im Sinne der Technologieführerschaft die Pionierstrategie hervorhebt. LÖFFLER (2008) unterscheidet weiter die First- und Second-Mover-Strategie, bei denen in Abhängigkeit der Technologiereife ein Aufspringen auf bereits emergierende Trends noch möglich ist (GASSMANN & BADER 2011).

⁹ Diese Beschreibung entspricht der Definition der Technologiegrobplanung aus Sicht von EVERSHEIM (1996).

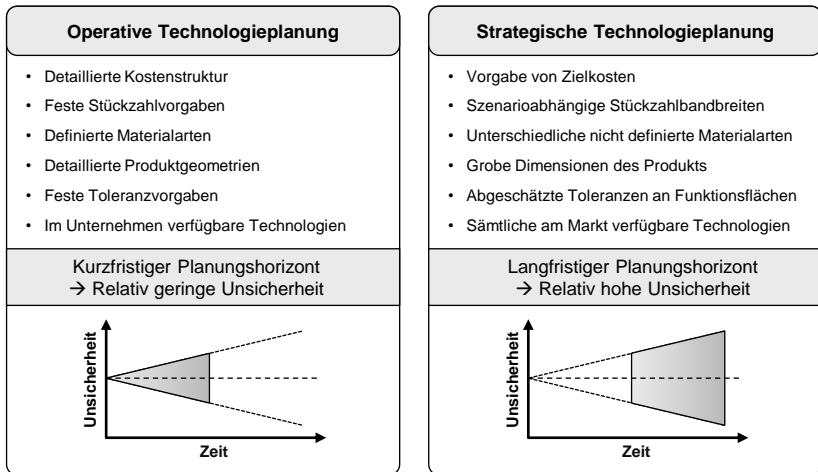


Abb. 1.5: Unterschiedliche Planungshorizonte der strategischen und operativen Technologieplanung in Anlehnung an EVERSHEIM (1996)

Sicht können bspw. Materialien noch nicht genau festgelegt und zu produzierende Stückzahlen oder geometrische Abmessungen der Produkte nur grob abgeschätzt werden (SCHMITZ 1996). Zur Bewältigung der Produktionsaufgabe können im Rahmen der strategischen Technologieplanung neben den internen auch externe Technologien berücksichtigt werden. Diese müssen zum Zeitpunkt der Planung nicht im Unternehmen verfügbar sein, da aufgrund des langfristigen Planungshorizonts noch die Möglichkeit besteht, das für die Anwendung notwendige Know-how aufzubauen und die für die Umsetzung erforderliche Struktur zu schaffen. Dieses Potenzial ist bei der strategischen Planung von Technologieketten zu berücksichtigen, da hierdurch zusätzlich Handlungsoptionen geschaffen werden.

1.2.2.3 Logische Einordnung der Planung von Technologieketten

Um die Rahmenbedingungen bei der strategischen Planung von Technologieketten logisch einordnen zu können, zeigt Abb. 1.6 das Vorgehen zur Gestaltung der Produktionsstruktur, welches in dieser Arbeit in drei wesentliche Schritte eingeteilt wird. Die Planung der Technologiekette stellt den ersten Schritt in der Festlegung der Produktionsreihenfolge dar. In dieser frühen Phase werden in Abhängigkeit der Unternehmensziele alternative Technologien identifiziert

(MÖHRLE & ISENMANN 2008). Diese werden bspw. hinsichtlich deren Auswirkungen auf das zukünftig zu fertigende Produkt oder auf die Fabrik, in der die Produktion erfolgen soll, bewertet und ausgewählt (DENKENA ET AL. 2008). Anschließend werden alternative Technologieketten generiert und die am besten geeignete Alternative ausgewählt (MÜLLER 2007). Die Zuordnung der zu diesem Zeitpunkt produktionsmittelunabhängigen Reihenfolge von Technologien zu den einzelnen Betriebsmitteln, bspw. im Sinne der Fertigungsfolge (TROMMER 2001), findet im zweiten Schritt der Planung statt. Hierbei gilt es festzulegen, wie die verschiedenen Technologien realisiert werden sollen, d. h. auf welchen Industrierobotern, Universalmaschinen oder Bearbeitungszentren sie umzusetzen sind (ZÄH ET AL. 2010).

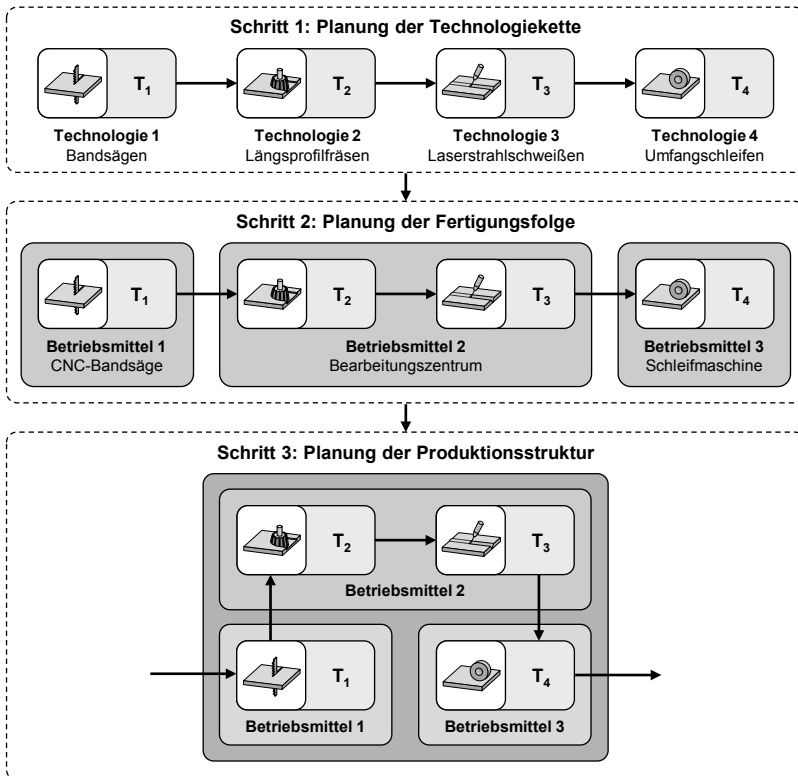


Abb. 1.6: Vorgehen zur festlegung von Technologiekette, Fertigungsfolge und Produktionsstruktur in Anlehnung an REINHART & SCHINDLER (2012)

Die finale Anordnung der einzelnen Betriebsmittel sowie deren Verknüpfung zu Systemen im Sinne des Feinlayouts, wie bspw. zu Fertigungsinseln oder Montagelinien (HERNÁNDEZ MORALES 2002), findet während des dritten Schritts statt. In diesem Rahmen werden insbesondere Material-, Informations- und Medienflüsse berücksichtigt (HEINECKER 2006), um die optimale Gestaltung der Produktionsstruktur zu erhalten (WIENDAHL ET AL. 2009).

In dieser Arbeit wird grundsätzlich die strategische Planung der Technologieketten thematisiert, wobei grundlegende Einflüsse aus der Planung der Fertigungsfolge sowie der Produktionsstruktur berücksichtigt werden sollen, soweit sie relevant sind und in dieser frühen Phase vorliegen.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, produzierende Unternehmen bei der Auswahl der Technologieketten im Rahmen der strategischen Technologieplanung methodisch zu unterstützen. Dabei bezieht sich die Planung der Technologieketten auf die Auswahl der einzelnen Technologien, die Generierung alternativer Technologieketten sowie die finale Gestaltung der am besten geeigneten Lösung.

Im Sinne der Technologieführerschaft nach PORTER (1999) gilt es, bei der Festlegung der Technologieketten v. a. diejenigen Technologien auszuwählen, die ein entsprechendes Technologiepotenzial aufweisen (SCHÖNING 2006). Um das vorhandene Potenzial abrufen zu können, müssen Technologien ausreichend ausgereift sein. So können technische sowie organisatorische Risiken minimiert werden und die Technologie wirtschaftlich in der Produktion eingesetzt werden (VELLA ET AL. 2010; VALERDI & KOHL 2004). Da durch die Auswahl der Technologieketten die zukünftigen produktionstechnischen Weichen gestellt werden, ist diese Entscheidung ein zentraler Aspekt für den wirtschaftlichen Erfolg von produzierenden Unternehmen (ABELE & REINHART 2011; SCHUH ET AL. 2011d).

Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben wurde, ist die Planung von Technologieketten von einer Reihe sich zeitlich verändernder Einflussfaktoren abhängig, welche bei der strategischen Technologieplanung einbezogen werden müssen (FIEBIG 2004). Auf dieser Basis sind die für die Auswahl der Technologien und Technologieketten relevanten Kriterien (im Folgenden Bewertungskriterien) zu identifizieren. Weiter ist zu untersuchen, wie die Bewertungskriterien ermittelt und für eine belastbare Entscheidungsfindung zusammengeführt werden können. Hierbei sind Unsicherheiten, die der strategischen Planung anhaften, zu berücksichtigen und abzubilden (GUNDLACH & BECKER 2010). Vor der Zielsetzung, produzierende Unternehmen bei der strategischen Planung von Technologieketten methodisch zu unterstützen, ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende Teilziele:

- Strategische Planung, d. h. Generierung, Bewertung und Auswahl, von Technologieketten
- Abbildung der mit dem Einsatz einer Technologiekette verbundenen Chancen und Risiken
- Gewährleistung der wirtschaftlichen Anwendbarkeit der zu entwickelnden Modelle und Methoden

1.4 Praktische Anwendung der Methodik

Zielgruppe für die Anwendung der Methodik sind die Technologieplaner von produzierenden Unternehmen. Diesen dient die Methodik, Technologieketten für die Produktion im Rahmen der strategischen Technologieplanung festzulegen und hierbei neue, noch nicht im Unternehmen verfügbare Technologien zu berücksichtigen. Zentraler Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Beurteilung des Entwicklungsstandes der einzelnen Technologien, um technische und organisatorische Risiken abschätzen zu können. Des Weiteren dient die Methodik dazu, verschiedene Technologiekettenalternativen in der strategischen Planung miteinander zu vergleichen und auf Basis einer belastbaren Bewertung die beste Lösung auszuwählen. Da Technologieketten i. d. R. in der Serien-, Sorten- und Massenfertigung festzulegen sind (MÜLLER 2007; WÖHE & DÖRING 2010), fokussiert der Anwendungsbereich der Methodik die Fertigungsprinzipien der Insel-, Gruppen- und Fließfertigung nach WIENDAHL (2010).

1.5 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist sieben Kapitel gegliedert, deren Aufbau in Abb. 1.7 dargestellt ist. In Kapitel 1 wurden bereits die Ausgangssituation und die Motivation für die vorliegende Arbeit beschrieben. Darauf aufbauend wurden der Untersuchungsbereich eingegrenzt und die Zielsetzung beschrieben. Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen der strategischen Technologieplanung und führt die in diesem Rahmen relevanten Arten von Kriterien ein. Schwerpunktmäßig werden bestehende operative und strategische Ansätze zur Planung von Technologien, Technologieketten und Fertigungsfolgen erläutert, um daraus den Handlungsbedarf für diese Arbeit abzuleiten. Auf Basis des Handlungsbedarfs werden in Kapitel 3 allgemeine und praktische Anforderungen an die Methodik und deren Anwendung formuliert. Kapitel 4 führt die im Rahmen der strategischen Planung von Technologieketten relevanten Bewertungskriterien ein und beschreibt anschließend die in dieser Arbeit entwickelten Modelle zu deren Modellierung und Bestimmung. Anschließend wird in Kapitel 5 die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten entwickelt und deren fünf

Schritte detailliert erläutert. Hierbei wird beschrieben bei welchen Schritten die zuvor eingeführten Bewertungskriterien einfließen und wie diese zusammengeführt werden. Neben der Bestimmung und Aggregation der Bewertungskriterien werden alternative Technologieketten generiert, bevor die am besten geeignete Lösung auf Basis einer Analyse und Interpretation der Bewertungsergebnisse ausgewählt wird. In Kapitel 6 wird die Methodik anhand eines Anwendungsbeispiels ausgeführt und praktisch umgesetzt. Hierbei erfolgt eine Bewertung von Aufwand und Nutzen der Methodik anhand der gewonnenen Erfahrungen sowie der zuvor aufgestellten allgemeinen und praktischen Anforderungen aus Kapitel 3. Abschließend fasst Kapitel 7 die vorliegende Arbeit zusammen. Darauf aufbauend werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten beschrieben und Ideen für zukünftige Forschungsaktivitäten dargestellt.

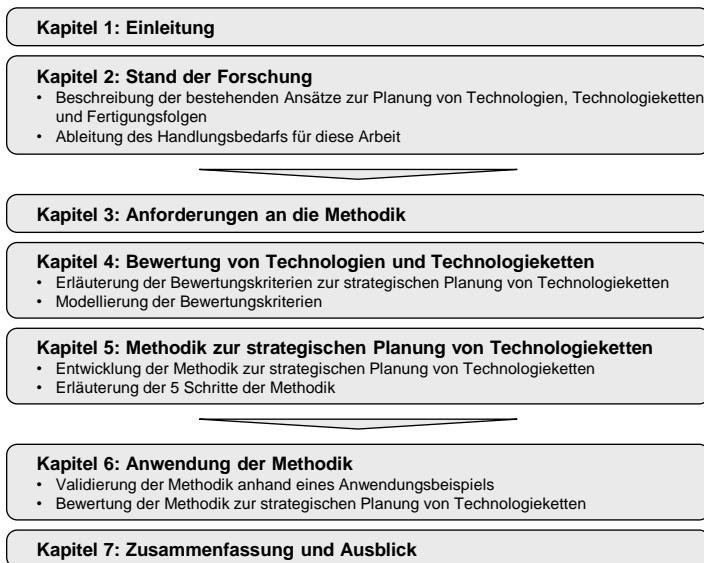


Abb. 1.7: Aufbau der Arbeit und Strukturierung der Kapitel

2 Stand der Forschung

2.1 Allgemeines

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Rahmenbedingen der strategischen Planung von Technologieketten beschrieben und die dabei bestehenden Herausforderungen aufgezeigt. Inhalt dieses Kapitels ist es, zunächst in Abschnitt 2.2 die Grundlage für die Planung, die Technologiestrategie produzierender Unternehmen, zu erläutern. Anschließend werden in Abschnitt 2.3 die für die Planung von Technologieketten existierenden Arten von Kriterien eingeführt und beschrieben. Darauf aufbauend geben die Abschnitte 2.4 bis 2.6 eine Übersicht über bestehende Methoden und Vorgehensweisen der strategischen und operativen Technologieplanung zur Festlegung des Einsatzes von Technologien, Technologieketten und Fertigungsfolgen. Abschließend stellt Abschnitt 2.7 die verschiedenen Ansätze einander gegenüber und leitet den daraus resultierenden Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit ab.

2.2 Technologiestrategie produzierender Unternehmen

Die Technologiestrategie dient der Erreichung der Unternehmensziele sowie der Planung von langfristigen Maßnahmen und Aktivitäten zu deren Umsetzung (SPECHT & BERNTSEN 2009). Nach ALISCH ET AL. (2010) beinhaltet die Technologiestrategie u. a. die Auswahl von Technologiearten und ist somit Voraussetzung für die strategische Technologieplanung (KLAPPERT ET AL. 2011). Unter den Technologiearten sind in diesem Zusammenhang zum einen technologische Schwerpunkte, wie bspw. die Bio- oder Nanotechnologien (VOIGT 2008), und zum anderen die in Abschnitt 1.1 eingeführten strategischen Rollen (Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologien sowie verdrängte Technologien) zu verstehen (SOMMERLATTE & DESCHAMPS 1985). Die Auswahl der relevanten Technologiearten hängt v. a. von der erwünschten Positionierung des Unternehmens im Sinne der technologischen Leistungsfähigkeit ab (DOWLING & HÜSING 2002). Aus Sicht des angestrebten Technologieniveaus, d. h. des Grades der Kompetenz eines Unternehmens in der Anwendung einer Technolo-

gie, werden die beiden Positionen der technologischen Führerschaft¹⁰ und der technologischen Präsenz unterschieden (WOLFRUM 2000).

Die *technologische Führerschaft* verfolgt den Aufbau einzigartiger Kompetenzen¹¹ und Fähigkeiten, um innerhalb kurzer Zeiträume Wettbewerbsvorteile zu generieren, und zielt bei der Entwicklung daher tendenziell auf Schrittmacher- und Schlüsseltechnologien ab (WOLFRUM 2000). Als Technologieführer werden i. d. R. Unternehmen mit der in einem Markt größten technologischen Leistungsfähigkeit bezeichnet (VOIGT 2008). Um dies zu bewerkstelligen, muss das Unternehmen nicht nur eine entsprechende Risikobereitschaft mitbringen, sondern auch in eine umfassende Grundlagenforschung und Technologieentwicklung investieren (RENZ 2004). Die *technologische Präsenz* zeichnet sich dadurch aus, dass Technologien Anwendung finden, welche bereits ausreichend entwickelt sind und sich auf einem sog. durchschnittlichen Technologieniveau befinden (VOIGT 2008). Die hierbei notwendigen Kompetenzen und Fähigkeiten repräsentieren keine Alleinstellungsmerkmale mehr. Aus diesem Grund geht die Technologiepräsenz i. d. R. mit einer Kostenführerschaft oder einer Imitationsstrategie einher (SCHULTE-GEHRMANN ET AL. 2011).

Wie Abb. 2.1 zeigt, sind mit der Entscheidung eines Unternehmens für eine Positionierung bzgl. der technologischen Leistungsfähigkeit eine Reihe von Vor- und Nachteilen verbunden (DOWLING & HÜSING 2002). Während der Technologieführer v. a. Imagevorteile und das Potenzial hoher Gewinnmargen für sich beanspruchen kann, hat die technologische Präsenz v. a. den Vorteil der geringeren technologischen und organisatorischen Risiken. So kann sich bspw. an der technologischen Ausrichtung des Wettbewerbs orientiert, weil die produktionstechnischen Möglichkeiten bereits aufgezeigt wurden (CORSTEN ET AL. 2006). Neben der Positionierung bzgl. der technologischen Leistungsfähigkeit empfiehlt BULLINGER (1994) auch die Festlegung der strategischen Ausrichtung auf Aspekte der Kostenführerschaft. Dies kann bspw. durch die

¹⁰ In diesem Zusammenhang ist der Begriff der Führerschaft von dem aus dem Technologietiming bekannten Technologiepionier bzw. -folger abzugrenzen. Im Rahmen des Technologietiming bezieht sich der Begriff des Technologieführers auf die zeitliche Komponente des ersten Entwicklers einer Technologie bzw. des ersten Markteintritts (SCHULTE-GEHRMANN ET AL. 2011). In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff des Technologieführers ausschließlich auf den Grad der technologischen Leistungsfähigkeit und ist damit eng an die Technologiekompetenzen des Unternehmens geknüpft. Ein Technologieführer in diesem Sinne kann sich auch bewusst für einen späten Markteintritt entscheiden (BURGELMAN & ROSENBLOOM 2000).

¹¹ Produktideen können erst durch den wirtschaftlichen Einsatz von geeigneten Technologien umgesetzt werden. Die Fähigkeit produzierender Unternehmen, diejenigen Technologien, die zur Herstellung und Weiterentwicklung von Produkten notwendig sind, zu beherrschen, wird als Technologiekompetenz bezeichnet (KLOCKE 2002).

Technologische Führerschaft	Technologische Präsenz
<ul style="list-style-type: none">+ Imagevorteile aufgrund von Alleinstellungsmerkmalen+ Potenziell hohe Gewinnmargen+ Aufbau von Imitationsbarrieren möglich+ Erfahrungskurveneffekte nutzbar- Hohe Investitionen- Langfristige Bindung von Ressourcen- Hohes unternehmerisches Risiko durch Unsicherheit ökonomischer und technischer Risiken- Zielobjekt von Imitatoren	<ul style="list-style-type: none">+ Technologische Ausrichtung am Wettbewerber+ Markterschließung des Technologieführers nutzbar+ Geringe Unsicherheit bzgl. Markt-Technologieentwicklung- Geringes Marktpotenzial und niedrigere Gewinnmargen- Imagenachteile- Passives Reagieren

Abb. 2.1: Vor- und Nachteile der beiden Positionierungsformen der technologischen Führerschaft und der technologischen Präsenz in Anlehnung an CORSTEN ET AL. (2006), DOWLING & HÜSING (2002) und PORTER (1999)

Erzielung von Skaleneffekten¹², die Differenzierung (z. B. Erschließung von Synergieeffekten¹³) oder die Fokussierung (z. B. Anpassung der Wertschöpfung an konkrete Marktbedürfnisse) erfolgen.

2.3 Arten von Kriterien zur Beurteilung von Technologien

2.3.1 Klassifizierung der Arten von Kriterien

Der optimale Einsatz einer Technologiekette hängt von deren grundsätzlichen Eignung für die Produktionsaufgabe ab (FALLBÖHMER 2000). Dabei ist die Eignung der Technologiekette nicht konstant, sondern variiert mit den jeweiligen sich z. T. ändernden Rahmenbedingungen in der Produktion (WIENDAHL ET AL. 2007). Diese Rahmenbedingung werden wesentlich von einer Reihe von Kriterien bestimmt (REINHART ET AL. 2011c; ZAEH ET AL. 2009; MILBERG & MÜLLER 2007). Unter dem Begriff *Kriterium* werden in dieser Arbeit sämtliche Merkmale, Parameter, Einflussfaktoren, Variablen, Elemente o. Ä.

¹² Als Skaleneffekte (engl. economies of scale) werden in der wissenschaftlichen Literatur die mit steigender Produktionsmenge sinkenden Herstellstückkosten aufgrund der Verteilung der Fixkosten bezeichnet (DYCKHOFF & SPENGLER 2010).

¹³ Als Synergieeffekte (engl. economies of scope) werden in diesem Zusammenhang das Verteilen von Gemeinkosten auf mehrere Produkte und damit Bereiche sowie Segmente bezeichnet (EWERT & WAGENHOFER 2008).

zusammengefasst, die eine Technologie beschreiben oder beeinflussen und daher im Rahmen der Planung relevant sind. In diesem Zusammenhang ist der Begriff *Bewertungskriterium* abzugrenzen, der zur finalen Beurteilung einer Technologie ermittelt und beurteilt wird. Dabei können verschiedene Kriterien auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden in ein Bewertungskriterium einfließen. Ein Beispiel für ein Bewertungskriterium ist die Wirtschaftlichkeit, die u. a. von dem Kriterium Materialkosten beeinflusst wird (FALLBÖHMER 2000).

Bzgl. der Erfassbarkeit werden in der wissenschaftlichen Literatur quantitative und qualitative Kriterien unterschieden. Während quantitative Kriterien messbar sind (ROSENKRANZ & MISSLER-BEHR 2005), können qualitative Kriterien i. d. R. nur verbal in der Form von *niedrig* oder *hoch* beschrieben (BRIEKE 2009) und nicht direkt in Form von Zahlenwerten erfasst werden (KREBS 2012; URBAN 1998). Beispiele für quantitative Kriterien bei der Planung von Technologien sind die zu Materialpreise oder das herzustellende Bauteilvolumen (MÜLLER 2007). Da quantitative Kriterien durch Zahlenwerte modellierbar sind, können sie durch mathematische Zusammenhänge, wie bspw. Formeln oder Algorithmen, aggregiert werden. Qualitative Kriterien, wie bspw. das Know-how von Mitarbeitern oder das Wettbewerbspotenzial, lassen sich nur schwer messen und liegen meist in der Form von Experteneinschätzungen vor (REINHART ET AL. 2011c; MEYER 2006). Da derartige verbale Aussagen i. d. R. interpretierbar sind und nicht ausreichend präzisiert bzw. verallgemeinert werden können, ist eine Zuordnung zu konkreten Zahlenwerten und eine einfache Verrechnung nur schwer möglich (ZIMMERMANN & ANGSTENBERGER 1993).

Neben quantitativen und qualitativen Kriterien existiert in der wissenschaftlichen Literatur eine Reihe von weitere Klassifikationen. Eine Übersicht, die sich an den Darstellungen von KREBS (2012), RIMPAU (2010) und MÖLLER (2008) zur Klassifizierung von Unsicherheiten¹⁴ orientiert, zeigt Tab. 2.1. Als Unsicherheit, d. h. unsicheres Kriterium, wird ein Kriterium bezeichnet, für das im Gegensatz zu sicheren Kriterien kein eindeutiger Wert prognostiziert werden kann. Als sicheres Kriterium gelten bspw. Investitionskosten für eine Werkzeugmaschine, da hier auf Basis von Angeboten i. d. R. ein fester Wert angenommen werden kann. Dies ist bei unsicheren Kriterien, wie bspw. schwankenden Material- oder Energiekosten, nicht möglich (WÖHE & DÖRING 2010).

¹⁴ Der Begriff der „Unsicherheit“ entstammt ursprünglich der Entscheidungstheorie, bei der eine Entscheidung unter Unsicherheit dadurch charakterisiert wird, dass die Auswirkung der Entscheidung für eine Alternative nicht vollständig bekannt ist (KNIGHT 2005). Unsichere Kriterien sind weiter in quantitative Unsicherheiten, die stochastisch verteilt sind, und qualitative Unsicherheiten, die nicht durch Zahlenwerte darstellbar sind und einen Mangel an begrifflicher Schärfe (sog. linguistische Unsicherheit) aufweisen, zu unterscheiden (KREBS 2012).

Tab. 2.1: Merkmale zur Klassifikation von Kriterien in Anlehnung an KREBS (2012), RIMPAU (2010) und MÖLLER (2008)

Merkm ^{al}	Ausprägung	Beispiel
Erfassbarkeit	quantitativ/qualitativ	Stückzahl/Mitarbeiter-Know-how
Vorhersagbarkeit	sicher/unsicher	Maschineninvest/Materialpreis
Beeinflussbarkeit	unabhängig/abhängig	Mitarbeiterstundensatz/Transportwege
Dynamik	statisch/dynamisch	Flächenbedarf/Wechselkurse
Kontinuität	kontinuierlich/diskret	Energiekosten/Schichtanzahl

Kriterien können grundsätzlich unabhängig voneinander sein, sich aber auch gegenseitig beeinflussen. So hängt der Maschinenstundensatz bspw. von den Energie- oder Werkzeugkosten ab (GÖTZE 2010). Die Stärke der Abhängigkeit von Kriterien variiert i. d. R. (COTTIN & DÖHLER 2009). Weiter können statische und dynamische Kriterien unterschieden werden. Während sich statische Kriterien, wie bspw. der Flächenbedarf für eine Maschine oder Anlage, mit der Zeit nicht verändern, sind dynamische Kriterien zeitabhängig. Beispiele für zeitabhängige Kriterien sind die mit dem Produktlebenszyklus veränderliche Stückzahl (HERRMANN 2010) oder der Wechselkurs einer Währung (BRETZKE 2010). Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit für Kriterien ist die Anzahl an Ausprägungen (ECKLE-KOHLER & KOHLER 2009). Existieren für ein Kriterium endlich viele Zustände bzw. eine feste Anzahl an Ausprägungen, so handelt es sich um ein diskretes Kriterium. Die Personalkosten beim Hinzuziehen einer Schicht sind bspw. diskret verteilt, da hier in Abhängigkeit der Anzahl der für die Schicht benötigten Mitarbeiter nur konkrete Werte eintreten (GUDEHUS 2005). Sind hingegen alle Werte innerhalb eines festgelegten Intervalls gültig, handelt es sich um ein kontinuierliches Kriterium, wie bspw. den Energiekosten. Nachdem die grundsätzlichen Arten von Kriterien klassifiziert wurden, beschreibt der nachfolgende Abschnitt die Möglichkeiten der Modellierung dieser Kriterien.

2.3.2 Modellierung der Arten von Kriterien

In der wissenschaftlichen Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Modellierung der unterschiedlichen Arten von Kriterien. Eine Übersicht über die Möglichkeiten der Modellierung, die sich an den Arbeiten von KREBS (2012) und REINHART ET AL. (2011c) orientiert, zeigt Abb. 2.3.

Tab. 2.3: Übersicht der Möglichkeiten zur Modellierung unterschiedlicher Arten von Kriterien in Anlehnung an KREBS (2012) und REINHART ET AL. (2011c)

Erfassbarkeit	Vorhersagbarkeit	Beeinflussbarkeit	Dynamik	Kontinuität	Modellierungsmöglichkeiten
quantitativ	sicher	unabhängig	statisch	-	Zahlenwert
quantitativ	sicher	unabhängig	dynamisch	kontinuierlich	Funktion
quantitativ	sicher	unabhängig	dynamisch	diskret	Funktion
quantitativ	unsicher	unabhängig	statisch	kontinuierlich	Funktion
quantitativ	unsicher	unabhängig	statisch	diskret	Funktion
quantitativ	unsicher	unabhängig	dynamisch	kontinuierlich	Funktion
quantitativ	unsicher	unabhängig	dynamisch	diskret	Funktion
quantitativ	unsicher	abhängig	statisch	kontinuierlich	Verteilung, Korrelation
quantitativ	unsicher	abhängig	statisch	diskret	Verteilung, Korrelation
quantitativ	unsicher	abhängig	dynamisch	kontinuierlich	Funktion, Korrelation
quantitativ	unsicher	abhängig	dynamisch	diskret	Funktion, Korrelation
qualitativ	unsicher	unabhängig	statisch	-	Fuzzy-Logik
qualitativ	unsicher	unabhängig	dynamisch	kontinuierlich	Fuzzy-Logik, Funktion
qualitativ	unsicher	unabhängig	dynamisch	diskret	Fuzzy-Logik, Funktion
qualitativ	unsicher	abhängig	statisch	kontinuierlich	Fuzzy-Logik, Funktion
qualitativ	unsicher	abhängig	statisch	diskret	Fuzzy-Logik, Funktion
qualitativ	unsicher	abhängig	dynamisch	kontinuierlich	Fuzzy-Logik, Funktion
qualitativ	unsicher	abhängig	dynamisch	diskret	Fuzzy-Logik, Funktion

Hierbei sind in Abhängigkeit der in Tab. 2.1 eingeführten Merkmale zu Klassifikation von Kriterien etablierte Modellierungsformen und -kombinationen zugeordnet. Quantitative sichere Kriterien können durch Zahlenwerte abgebildet und verrechnet werden. Bei einer zeitlichen Abhängigkeit von sicheren Kriterien finden i. d. R. kontinuierliche oder diskrete Funktionen Verwendung. Für die Modellierung quantitativer unsicherer Kriterien¹⁵ existieren eine Reihe von Möglichkeiten (COTTIN & DÖHLER 2009). Dabei sind sowohl unabhängige, als auch abhängige, statische und dynamische sowie stetige oder diskrete Ausprägungsformen darstellbar. Zur Modellierung von quantitativen Unsicherheiten hat sich der Einsatz von Wahrscheinlichkeitsverteilungen¹⁶ etabliert. Dazu werden die Funktionswerte, die das quantitative unsichere Kriterium annehmen kann, anhand einer Verteilungsfunktion abgebildet. In diesem Rahmen werden den einzelnen Funktionswerten des Kriteriums konkrete Wahrscheinlichkeiten zugeordnet (SACHS 2003).

¹⁵ Eine Übersicht über die verschiedenen Techniken und Arten zur Modellierung und Verrechnung quantitativer Unsicherheiten findet sich bei der Deutschen Gesellschaft für Risikomanagement e. V. (DGR 2008) sowie bei ECKLE-KOHLER & KOHLER (2009).

¹⁶ Der Begriff der Wahrscheinlichkeitsverteilung wird in der wissenschaftlichen Literatur auch als sog. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezeichnet (SACHS 2003).

Bei der Modellierung wird i. W. die grundsätzliche Funktions- bzw. Verteilungsart¹⁷ sowie spezifische Parameter, wie bspw. die Standardabweichung oder der Mittelwert im Fall der Normalverteilung, festgelegt. Abb. 2.2 zeigt die Modellierung eines quantitativen unsicheren Kriteriums am Beispiel des Materialpreises, wobei eine an unterschiedlichen Abständen zum wahrscheinlichsten Wert abgeschnittene Normalverteilung verwendet wurde. Auf diese Weise werden sinnvolle Grenzen für den Gültigkeitsbereich gesetzt. Im vorliegenden Fall wurde eine rechtsschiefe Verteilung¹⁸ erzeugt, bei der die Wahrscheinlichkeit niedriger Funktionswerte zwar relativ groß ist, die aber dennoch Ausreißer nach oben hin zulässt. Neben der Modellierung quantitativer Unsicherheiten zeigt Abb. 2.2 auch die Abbildung von qualitativen Kriterien, die nach URBAN (1998) aufgrund ihrer Unschärfe generell unsicher sind. Zur Abbildung qualitativer Kriterien eignet sich die Fuzzy-Logik¹⁹ (KREBS 2012; REINHART ET AL. 2011c), bei der die Unsicherheit durch Zugehörigkeitsfunktionen zu unscharfen Mengen modelliert wird. Auf diese Weise lassen sich qualitative Kriterien in mathematische Modelle fassen, die wiederum in Wahrscheinlichkeitsverteilungen überführt werden können (KREBS 2012).

Abb. 2.2 zeigt als Beispiel für ein qualitatives Kriterium die Mitarbeitermotivation und stellt dar, wie zur Modellierung die Fuzzy-Logik verwendet werden kann. Unter deren Zuhilfenahme können die unterschiedliche Aussagen (z. B. von Experten) zu dem qualitativen Kriterium (z. B. *Die Mitarbeitermotivation ist hoch.*) in entsprechende Prozentwerte überführt werden. Hierbei stellt der Wert des Flächenschwerpunkts den wahrscheinlichsten Wert für das Kriterium, im vorliegenden Fall der Mitarbeitermotivation, dar. Unter Berücksichtigung dieses Flächenschwerpunkts sowie der durch die Dreiecksverteilungen aufgespannten Fläche ist es möglich, auch für qualitative Kriterien eine Wahrscheinlichkeitsverteilung abzuleiten. Die durch die Ausprägungen aufgespannte Fläche für das Kriterium wird auch als *Fuzzy-Set* bezeichnet (BIEWER 1997).

¹⁷ Eine Übersicht über Möglichkeiten der mathematischen Beschreibungen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen geben COTTIN & DÖHLER (2009) oder BOSCH (2011). Die bekanntesten Varianten sind die Gleich- und Normalverteilung, die Exponentialverteilung, die Erlang-, Gamma- und Weibull-Verteilung sowie die Dreiecksverteilung.

¹⁸ Im Rahmen der Beschreibung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird grundsätzlich zwischen symmetrischen (z. B. Normalverteilung) und unsymmetrischen Verteilungen (z. B. Exponentialverteilung) differenziert. Unsymmetrische Verteilungen weisen eine gewisse *Schiefe* auf, die angibt, wie weit sich der Median und der Erwartungswert unterscheiden. Bei *rechtsschiefen* Verteilungen befindet sich der Wahrscheinlichste Wert links vom Median, bei *linksschiefen* Verteilungen rechts davon (KRAPP & NEBEL 2011).

¹⁹ Der Begriff *fuzzy* leitet sich aus Boole'schen Operatoren ab und bedeutet unscharf (STRY & SCHWENKERT 2010; KRAMER 2009). Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der Fuzzy-Logik sowie Möglichkeiten zur Modellierung qualitativer Kriterien findet sich bei KRAMER (2009) und KREBS (2012). Die Fuzzy-Logik wurde von ZADEH (1965) entwickelt und dient der Modellierung sprachlicher Unschärfen und interpretierbarer Ausdrücke, wie „Das Technologiepotenzial wird *hoch* eingeschätzt.“ (KRAMER 2009).

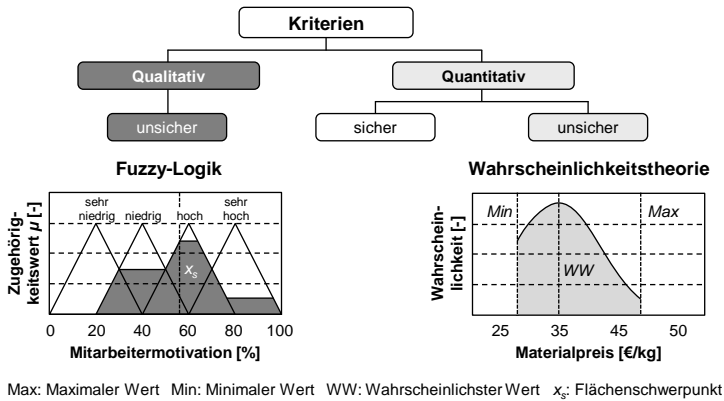


Abb. 2.2: Modellierung von Unsicherheiten mittels Fuzzy-Logik und Wahrscheinlichkeitstheorie in Anlehnung an REINHART ET AL. (2011c)

Neben den einzelnen Kriterien müssen auch evtl. auftretende Abhängigkeiten zwischen den Kriterien betrachtet werden. Diese Abhängigkeiten können grundsätzlich *scharf* oder *unscharf* sein (KREBS 2012; OCKER 2010). Bei einer scharfen Abhängigkeit besteht eine direkte Ursache-Wirkung-Beziehung, die i. d. R. durch eine mathematische Funktion beschrieben wird (KRAPP & NEBEL 2011). Bei Fehlen einer offensichtlichen Ursache-Wirkung-Beziehung oder bei der Existenz eines kausalen Zusammenhangs über ein drittes Kriterium wird die scharfe Abhängigkeit in Form einer sog. Korrelation²⁰ abgebildet (CAPUTO ET AL. 2009; BANKHOFER & VOGEL 2008). Unscharfe Abhängigkeiten²¹ zwischen Kriterien können nicht direkt quantifiziert werden, da diese in Analogie zu qualitativen Kriterien einer nicht darstellbaren Unsicherheit unterliegen (KREBS 2012). Ein Beispiel für eine unscharfe Abhängigkeit ist der Zusammenhang zwischen der Mitarbeitermotivation und der Produktqualität. Ansätze zur Klassifizierung von scharfen und unscharfen Abhängigkeiten sowie Möglichkeiten zu deren Modellierung finden sich bei KREBS (2012).

²⁰ Eine Korrelation beschreibt den statistischen Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Kriterien, wobei der Grad der Linearität der Abhängigkeit von quantitativen Kriterien i. d. R. durch einen sog. Korrelationskoeffizienten beschrieben wird. Dieser variiert zwischen +1 (direkt linear abhängig) und -1 (indirekt linear abhängig) und kann durch mathematische Funktionen berechnet werden (KOHN & ÖZTÜRK 2010; STELAND 2010). Bekannte Vertreter sind der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient oder der Spearman'sche Korrelationskoeffizient (CAPUTO ET AL. 2009).

²¹ Weitere Informationen zu den grundsätzlichen Arten von Abhängigkeiten finden sich bei REINHART ET AL. (2008).

2.4 Ansätze zur Planung von Technologien

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Arbeiten vorgestellt, die in erster Linie die Bewertung, die Entwicklung und die Planung von Technologien beinhalten. Hierbei werden sowohl Ansätze der strategischen als auch der operativen Technologieplanung erläutert.

SCHMITZ (1996) entwickelte eine Methodik zur Planung des Einsatzes innovativer Fertigungstechnologien aus strategischer Sicht, die sich auf sechs definierte Planungsphasen stützt. Angefangen bei der Situationsanalyse, in der der Technologieeinsatz sowie die Innovationsstrategie formuliert werden, liefert die Produktanalyse diejenigen Produkte und Bauteile, bei denen der Einsatz innovativer Fertigungsverfahren einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der Unternehmensziele leistet. Auf Basis der Erfassung der planungsrelevanten Produktinformationen wird im Rahmen der Alternativensuche ein Produkt/Fertigungstechnologie-Möglichkeitsraum aufgespannt. Die technische und wirtschaftliche Konkretisierung geschieht während der Variantenkreation und -reduktion. Auf Grundlage der Fuzzy-Set-Theorie wird in der Bewertung und Strategiefindung ein Bewertungs- und Beurteilungssystem entwickelt, das die Ableitung von Normstrategien ermöglicht. Die Ergebnisse des Planungsprozesses werden schließlich in den Technologiekalender eingetragen (EVERSHEIM ET AL. 1996), der die Synchronisation von Produkt- und Prozessinnovationen unterstützen soll.

Eine Planungsmethodik zur Synchronisation von Produkt- und Produktionsentwicklung im Rahmen der strategischen Technologieplanung wurde von BURGSTAHLER (1997) entwickelt. Dabei erfolgt die Planung anhand festgelegter, ineinander greifender Phasen. Nach der Eingrenzung der Kernkompetenzen werden während der Analyse der Technologiepotenziale das Markt- und Wettbewerbsumfeld untersucht. Die anschließende Festlegung der Innovationsziele basiert auf einem Kennzahlensystem und fließt in den Aufbau der Technologiestrategie ein. Auch BURGSTAHLER (1997) setzt einen Technologiekalender ein, wobei sowohl eine zeitliche als auch eine technische Synchronisation von Produktentstehung und Produktionsentwicklung angestrebt wird. Hieraus lassen sich konkrete Technologieprojekte ableiten, bei deren Durchführung eine periodische Überprüfung der formulierten Strategien stattfindet.

Im Rahmen seiner Arbeit zur potenzialbasierten Bewertung neuer Technologien entwickelte SCHÖNING (2006) eine Methodik zur quantitativen (monetären) Beurteilung von Technologien im Rahmen der strategischen Entscheidung. Eine Planung von Technologien im eigentlichen Sinne findet nicht statt. Auf Basis des Technologie-, des Nutzen- sowie des Marktpotenzials leitet er die Zielgröße seiner Bewertung den erzielbaren Cash-Flow ab. Dabei entspricht das Technologiepotenzial einem Abgleich zwischen den technologischen Leistungsparametern und dem Aufwand für die Technologieentwicklung und -umsetzung

im Unternehmen. Das Nutzenpotenzial berücksichtigt den für Anwender und Anbieter einer Technologie entstehenden Nutzen. Das Marktpotenzial ergibt sich schließlich aus dem durch eine neue Technologie erzielbaren Cash-Flow.

RODERBURG ET AL. (2011) stellen ein standardisiertes Vorgehen zur Entwicklung von innovativen Fertigungstechnologien vor, welches zum Ziel hat, integrative Prozesslösungen, sog. hybride Technologien²², zu erhalten. Auf Basis der Veränderung des Fertigungssystems wird das Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen zu verschiedenen Fertigungstechnologien gebündelt, um auf diese Weise technologische Grenzen zu überwinden (KLOCKE ET AL. 2009). Unter Verwendung der TRIZ-Methode²³ erfolgt ein Abgleich von zukünftigen Produktanforderungen und vorhandenen technologischen Fähigkeiten, wobei zur Kombination des Wissens der unterschiedlichen Fachdisziplinen physikalische, empirische sowie heuristische Modelle Anwendung finden.

In seinem Ansatz zur Auswahl von Fertigungstechnologien konzentriert sich NAU (2012) auf die Betrachtung des Produktionsanlaufs im Rahmen der operativen Technologieplanung. Hierbei fokussiert er die Untersuchung hybrider Technologien als Ausschnitt einer Technologiekette (NAU ET AL. 2011). Die Methodik stützt sich auf eine Zuordnung von Anlaufsznarien, für die eine Analyse des Nutzen-Aufwand-Verhältnisses durchgeführt wird. Um eine Fertigungstechnologie auszuwählen, werden im Wesentlichen zwei Phasen durchlaufen. In der Grobplanungsphase werden zunächst Risiken und Potenziale betrachtet, bevor in der Feinplanungsphase das zu erwartende Hochlaufverhalten der Fertigungstechnologie anhand eines mathematischen Modells abgeschätzt wird.

Neben den hier aufgeführten Ansätzen existieren in der wissenschaftlichen Literatur noch weitere Arbeiten zur Bewertung und Planung von Technologien im weiteren Sinne, die jedoch nicht in den Untersuchungsrahmen dieser Arbeit fallen, weil sie entweder das Wissensmanagement für eine nachhaltige Technologieplanung oder schwerpunktmäßig die Fabrikplanung thematisieren.

²² Der Begriff *hybride Technologie* bezeichnet die Kombination von mindestens zwei unterschiedlichen Technologien in einem Prozessschritt, wobei jede Technologien einen wesentlichen Effekt auf den Prozessschritt hat (LAUWERS ET AL. 2010). Ein Beispiel hierfür ist das sog. Laserunterstützte Fräsen (ZÄH & WIEDENMANN 2011).

²³ TRIZ steht für die *Theorie des erfinderischen Problemlösens* und unterstellt, dass hinter vielen Erfindungen eine vergleichsweise geringe Anzahl an Lösungsprinzipien steht (HERB ET AL. 2000). Nach RODERBURG ET AL. (2011) können diese Gesetzmäßigkeiten und Muster auch zur Entwicklung von Fertigungstechnologien verwendet werden.

2.5 Ansätze zur Planung von Technologieketten

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten beziehen sich im Wesentlichen auf die Bewertung, die Entwicklung und die Planung von Technologieketten. Hierbei werden auch Ansätze zur Auslegung der Schnittstellen zwischen einzelnen Technologien und zur Optimierung von bestehenden Verkettungen erläutert.

FALLBÖHMER (2000) entwickelte eine Methodik zur integrierten Technologieplanung. Ziel seiner Arbeit ist es, die Aufgaben der operativen Technologieplanung mit bei der Gestaltung von Produkten zu berücksichtigen. Der Ansatz basiert auf Produkt- und Technologiedatenmodellen sowie einer Technologiezuordnungsmatrix, die eine systematische Verknüpfung von Fertigungsverfahren und Produktmerkmalen ermöglicht. Aufbauend auf einer Technologievorauswahl und der Identifikation neu zu integrierender Technologien stellt das Generieren alternativer Technologieketten zur Abbildung der gesamten technologischen Wertschöpfungskette den Kern der Methodik dar. Dabei werden v. a. diejenigen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Technologien berücksichtigt, die direkt innerhalb vor- und nachgelagerter Verfahren der Technologieketten auftreten. Die finale Auswahl der Technologiekette basiert auf einer einfachen Bewertung der Machbarkeit und der technischen Eignung.

In seiner Methode zur systematischen, rechnerunterstützten Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung fokussiert MORYSON (2004) die Festlegung von Technologieketten, allerdings werden die zur Fertigung eingesetzten Betriebsmittel bereits mit bei der Planung berücksichtigt. Durch die starke Orientierung an den Feature-basierten Produktmerkmalen und der Beschreibung der Prozesseigenschaften anhand der Umsetzung auf dem jeweiligen Betriebsmittel ist die Methode der operativen Technologieplanung zuzuordnen. Die Bewertung der alternativen Prozessketten findet anhand der Feature-Geometrie, des Werkstoffs, der Abmessungen sowie der Oberflächenrauigkeit statt, wobei die Abhängigkeit zu vor- und nachgelagerten Bereichen der Prozesskette berücksichtigt wird.

JURKLIES (2004) entwickelte eine Methode zur Generierung und Bewertung von Prozessketten für die Herstellung von Druck- und Spritzgießwerkzeugen. Dabei konzentriert sie sich auf die Beurteilung von im Rahmen der Fertigung entstehenden Kosten, die dazu notwendige Zeit und die erzielbare Qualität ausgewählter Fertigungsverfahren. Die Arbeit fokussiert den Werkzeug- und Formenbau und ist schwerpunktmäßig der operativen Technologieplanung zuzuordnen.

KNOCH (2005) ergänzte die Arbeiten von FALLBÖHMER (2000) und TROMMER (2001) durch die Entwicklung eines generischen Modells zur Beschreibung von Fertigungstechnologien, welches die rückwärts gerichtete Generierung von

Technologieketten ermöglicht. Der Ansatz von KNOCHE (2005) hat zum Ziel, den Anwender im Rahmen der operativen Technologieplanung bei der Auswahl und Verkettung von Fertigungstechnologien zu unterstützen. Das generische Modell dient dazu, Fertigungstechnologien anhand derjenigen Veränderungen zu beschreiben, welche sie an einem Werkstück bewirken, und ist in vier Teilmodelle untergliedert. Dabei fließen die drei Teilmodelle der Technologieklassifizierung, der Beschreibung der Einsetzbarkeit von Technologien sowie der Beschreibung des technologischen Transformationsprozesses in das vierte Teilmodell zur Beschreibung der Verkettungsmöglichkeiten von Technologien ein. Bei der Verkettung der Technologien sollen insbesondere komplexe Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Technologien berücksichtigt werden.

DENKENA ET AL. (2005) stellen eine Methode zur Auslegung fertigungstechnischer Prozessketten²⁴ vor, die im Wesentlichen auf die prozessübergreifende Berücksichtigung technologischer Wechselwirkungen abzielt. Das entwickelte Planungsverfahren erfolgt in den vier Schritten der Prozessanalyse, der Schnittstellenmodellierung, der Prozesskettenauslegung und der Implementierung. Nach der Analyse der Fertigungsprozesse, in der Informationen über Werkstück-Charakteristika, Werkzeugmaschinen und Bearbeitungsprozessen auszuwerten sind, werden technologische Wechselwirkungen analysiert. Anschließend können die technologisch-wirtschaftlichen Wechselwirkungen algorithmisch beschrieben werden. Auf dieser Basis lassen sich sowohl Fertigungsprozesse als auch deren Schnittstellen simulieren und festlegen. Die Auswahl erfolgt durch eine multi-kriteriellen Bewertung und wird anhand der Herstellkosten pro Stück über der Losgröße dargestellt.

DENKENA & HENNING (2008) entwickelten einen Ansatz zur Beschreibung und Optimierung technologischer Schnittstellen entlang der Prozesskette. Hierbei fokussieren sie die operative Technologieplanung und beschränken sich auf die Simulation zur Auslegung von Prozessparametern (DENKENA ET AL. 2009). Für die Modellierung der technologischen Schnittstellen verwenden sie die Methode von TÖNSHOFF ET AL. (2002), die aus den vier Schritten der Prozessanalyse, der Modellierung der Schnittstellen, der Optimierung und der Implementierung besteht. Die Auslegung der Prozesskette zeichnet sich dadurch aus, dass die Prozessparameter nicht nur hinsichtlich einzelner Technologien, sondern auch bezüglich der technologischen Schnittstellen optimiert werden. Die finale Auslegung erfolgt unter Berücksichtigung technologischer, ökonomischer sowie ökologischer Gesichtspunkte.

²⁴ Der Begriff *Prozesskette* ist in diesem Kontext der Technologiekette gleichzusetzen, da der Ansatz von DENKENA ET AL. (2005) im Wesentlichen Wechselwirkungen einzelner Technologien kostenspezifisch betrachtet, nicht aber den Bezug zum jeweils verwendeten Betriebsmittel beinhaltet.

In seinem methodischen System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen²⁵ fokussiert WILLMS (2008) die operative Verknüpfung von Fertigungsprozessen entsprechend der Fertigungshistorie. Das methodische System von WILLMS (2008) baut auf den Ansätzen von FALLBÖHMER (2000) sowie TROMMER (2001) auf und ist in acht Module gegliedert. Nach der Charakterisierung des Produktes und der Fertigungsprozesse findet die Generierung der Fertigungsverkettungen statt. Diese bilden die Basis für die Erzeugung von Prozessalternativen, welche sich anhand von Prozessparametern (z. B. Schnittwertparameter) bzw. Stellgrößen (z. B. Wertebereich der Prozessparameter) unterscheiden, aber die gleichen Fertigungsprozesse beinhalten. Durch die Variation der Prozessparameter bzw. Stellgrößen anhand statistischer Modelle wird eine entsprechend hohe Anzahl an Prozessalternativen erzeugt. Auf Basis der Fertigungshistorie wird der Einfluss der Prozessparameter bzw. Stellgrößen auf das Werkstückergebnis ermittelt. Der Identifikation von Risikoprozessen folgt die Ermittlung der Herstellkosten, wobei die Toleranzen entlang der Fertigungsverkettungen unter kostenoptimalen Gesichtspunkten festgelegt werden. Ein Benchmarking der verbleibenden Prozessalternativen anhand von erzielbaren Herstellkosten, -zeiten und zu erwartendem Ausschuss trägt schließlich dazu bei, die optimale Prozessalternative auszuwählen.

In der wissenschaftlichen Literatur existieren noch weitere Arbeiten²⁶, welche punktuell die Analyse und Auslegung von Technologieketten beinhalten, aber sehr spezifisch im Bezug auf den jeweiligen Anwendungsfall sind und daher nicht in den Untersuchungsrahmen dieser Arbeit fallen.

2.6 Ansätze zur Planung von Fertigungsfolgen

In diesem Abschnitt werden Arbeiten vorgestellt, welche die Bewertung, die Entwicklung und die Planung von Fertigungsfolgen beinhalten.

SHELL (1996) entwickelte ein Verfahren, Handhabungs- und Fertigungsfolgen für flexible Fertigungssysteme zu beurteilen. Unter der Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Betriebs- und Logistikmittel werden alternative Fertigungsfolgen im Bezug auf die Produktgestalt bewertet, wobei auch unscharfe Daten integriert werden. Das Verfahren ist in drei Schritte geteilt. Im ersten Schritt wird Herstellbarkeit der zu fertigenden Werkstücke sichergestellt. Anschließend findet im zweiten Schritt die Überprüfung der automatisierten

²⁵ In diesem Zusammenhang ist der Begriff der Fertigungsverkettung oder Fertigungskette als Synonym zur Technologiekette zu verstehen.

²⁶ Erwähnt seien hier die Arbeiten von SCHÄFER (2003) zur Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten und von VAN VLIET (2001) zur Entwicklung und Implementierung einer prozessbasierten Unterstützung des Produktdesigns.

Handhabbarkeit statt. Im dritten Schritt erfolgt schließlich die Bewertung der potentiellen Fertigungsfolgen, bei deren Beurteilung die Griffsicherheit und der Ausschluss von Kollisionen während der Handhabung analysiert wird.

HEITSCH (2000) stellt eine Methode zur multidimensionalen Bewertung von Produktionstechniken vor, wobei der Fokus i. W. auf der Maschinen und Anlagenebene liegt. Zur Beurteilung der Kombination von Technologien und Betriebsmitteln werden ein Prozess-, ein Bewertungs- sowie ein Ablaufmodell eingesetzt. Die Bewertung berücksichtigt dabei ökonomie-, ökologie-, qualitäts- und strategiebezogene Aspekte. Auf dieser Basis lassen sich letztendlich Entscheidungen für technische Investitionen ableiten.

In seiner Arbeit über die operative Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen fokussiert AGOSTINI (2000) spanende Fertigungsprozesse. Die wesentliche Zielsetzung stellt hierbei die Strukturierung der Wechselwirkungen (Interaktionen) von Bearbeitungsschritten dar. Anhand von vier Ordnungstypen teilt AGOSTINI (2000) die Wechselwirkungen von Bearbeitungsobjekten qualitativ ein und leitet anhand eines Optimierungssystems eine ideale NC-Planung ab. Dabei repräsentieren Interaktionen 1. Ordnung technische Basisregeln. Während sich Interaktionen 2. Ordnung auf Lage- und Formtoleranzen beziehen, werden Maschineneinflüsse durch Interaktionen 3. Ordnung berücksichtigt. Interaktionen 4. Ordnung beziehen sich auf das für die Produktionsaufgabe notwendige Erfahrungswissen. Als Ergebnis leitet AGOSTINI (2000) die Zuordnung der Bearbeitungsobjekte zu den Betriebsmitteln (Bearbeitungsmaschinen) im Sinne von Fertigungsfolgen ab. Die Zielgröße der Planung stellt unter Voraussetzung der Realisierung der Bearbeitungsobjekte im Wesentlichen die Durchlaufzeit dar.

TROMMER (2001) baut auf der Vorgehensweise von FALLBÖHMER (2000) auf und erarbeitete eine in sechs Modulen aufgebaute Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung von Fertigungsfolgen. Nach dem Aufbau der Datenmodelle findet zunächst eine Grobanalyse der Fertigungsschritte statt. Anschließend wird die geometrische und technologische Machbarkeit in der Feinanalyse weiter konkretisiert und überprüft. Auf Grundlage der Verknüpfung der Produktionsmittel durch die Generierung alternativer Fertigungsfolgen findet eine dritte Eignungsanalyse statt. Hierbei werden neben den verwendeten Produktionsmitteln auch die indirekt wertschöpfenden Handhabungs- und Transportschritte betrachtet. Die finale Bewertung der Fertigungsfolgen basiert auf einer qualitativen Multi-Kriterien-Bewertung mittels Fuzzy-AHP²⁷. Hierbei werden die Kriterien Qualität, Company-Fit und Ökologie beurteilt. Der Ein-

²⁷ Der Analytic Hierarchy Process (AHP) ist eine auf der Nutzwertanalyse aufbauende Methode zur Unterstützung von Entscheidungen, wobei die einzelnen Teilprobleme hierarchisch gegliedert werden (SAATY 1990).

satz des Fuzzy-AHP soll letztendlich eine anwendbare und widerspruchsfreie Entscheidungsunterstützung gewährleisten (ROMMELFANGER 2006).

MENZEL (2001) stellt eine wissensbasierte Methodik für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse vor, wobei er neben wirtschaftlichen Aspekten v. a. technologische Zielgrößen in den Vordergrund stellt. Das Potenzial von Technologie und Betriebsmittel wird anhand eines wissensbasierten Datenmodells systematisiert und im Hinblick auf das zu fertigende Produktionsprogramm bewertet. Der Fertigungsprozess wird anhand von Prozessschritten, Maschinen und Werkzeugen charakterisiert und in einem dynamischen Simulationsmodell zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit abgebildet, wobei Planungsunsicherheiten Berücksichtigung finden. Auf diese Weise können technologische Alternativen miteinander verglichen und Optimierungsmöglichkeiten in der Prozesskette aufgezeigt werden.

MÜLLER (2007) entwickelte eine Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen, die in vier Schritte aufgebaut ist. Hierbei ist der Begriff der Produktionsalternative der Fertigungsfolge gleichzusetzen, da die Zuordnung von Betriebsmitteln ein wesentliches Ziel der Methodik ist. Im ersten Schritt gilt es, eine Struktur vorzubereiten, die das zu fertigende Produkt auf Bauteil- bzw. Baugruppenebene untergliedert. Anschließend werden im zweiten Schritt alternative, grobe Verfahrensketten zur Herstellung der Produktelemente formuliert, wodurch der Übergang von der Produktentwicklung zur Produktionsplanung vollzogen wird. Der Begriff der Verfahrenskette ist als Synonym zur Bezeichnung der Technologiekette zu verstehen. Im dritten Schritt erfolgt die Bereinigung der Technologieketten um redundante Technologien sowie weitere Optimierungen. Die im vierten Schritt in Partialmodelle aufgebaute, ganzheitliche Bewertung und Auswahl von Alternativen liefern schließlich die am besten geeignete Verfahrenskette für das zu fertigende Produkt.

PACHOW-FRAUENHOFER ET AL. (2009) stellen eine aus zwei Stufen bestehende Methode zur Bewertung von Prozessketten vor. Während in der ersten Stufe der Wertschöpfungsgrad anhand der bestehenden Prozesskette aufgenommen wird, beinhaltet die zweite Stufe die Bewertung auf Basis ausgewählter quantitativer und qualitativer Merkmale, welche produktionstechnische und logistische Anforderungen berücksichtigen. Das Ergebnis wird anhand der Zielgrößen Wirtschaftlichkeit, Flexibilität, Durchlaufzeit und Qualität interpretiert.

TÖNISSEN ET AL. (2012) stellen einen Ansatz zur Modellierung der Eigenschaften von Multi-Technologie-Plattformen vor, wobei sie sich auf den Vergleich mit konservativen Werkzeugmaschinen, die in gängigen Fertigungssystemen verkettet werden, konzentrieren. Unter dem Begriff *Multi-Technologie-Plattform* verstehen TÖNISSEN ET AL. (2012) ein Betriebsmittel, auf dem mehrere Technologien gleichzeitig und nacheinander zum Einsatz kommen können. Durch

die einmalige Aufspannung werden zum einen Nebenzeiten reduziert und zum anderen Qualitätssteigerungen möglich. Aufgrund der Betrachtung ausgewählter Technologien und Betriebsmittel wird in diesem Ansatz schwerpunktmäßig der Ausschnitt einer Fertigungsfolge betrachtet. Die wesentlichen Zielgrößen der Bewertung dieser Betriebsmittel stellen auf Basis der Losgröße sowie der Anzahl notwendiger Prozessschritte die Kosten sowie die Produktivität dar (KLOCKE ET AL. 2011).

BIERMANN ET AL. (2013) stellen ein Rahmenwerk zur Planung und Optimierung von Prozessketten für die Herstellung funktional gradierter Bauteile vor. Dabei stützen sie sich u. a. auf die konkrete Modellierung des Produktes auf Basis eines Voxelmodells und berücksichtigen Wechselwirkungen zum eingesetzten Betriebsmittel. Die Auswahl und Optimierung der einzusetzenden Verfahren in Form der Prozesskette basiert auf einem Expertensystem und ist der operativen Technologieplanung zuzuordnen.

Auch die Methode zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung für die Auswahl der Prozesskette im Kontext funktional gradierter Komponenten von PETERSEN ET AL. (2014) ist der operativen Technologieplanung zuzuordnen und baut auf dem Ansatz von BIERMANN ET AL. (2013) auf. Kern ist die Bewertung der Prozesskette anhand ausgewählter ökonomischer, ökologischer und sozialer Kriterien. Diese werden qualitativ bewertet, auf Basis eines paarweisen Vergleichs gewichtet und durch den Einsatz des AHP ausgewählt.

2.7 Ableitung des Handlungsbedarfs

Die Ausführungen der Abschnitte 2.4 bis 2.6 zeigen, dass bereits eine Vielzahl an Ansätzen zur Bewertung und Planung von Technologien, Technologieketten und Fertigungsfolgen existieren. Diese sollen nachfolgend im Bezug auf den in Abschnitt 1.2.2 beschriebenen Betrachtungsbereich bewertet werden, um daraus den Handlungsbedarf für diese Arbeit abzuleiten. Eine Übersicht über die schwerpunktmäßig analysierten Ansätze auf Basis der jeweiligen Betrachtungsobjekte und der Planungsebene zeigt Abb. 2.3.

Während in der wissenschaftlichen Literatur strategische Fragestellungen bei der Planung von einzelnen Technologien, bspw. durch die Berücksichtigung des Technologiepotenzials (SCHÖNING 2006) oder durch die Synchronisation der Technologieplanung mit den zu entwickelnden Produkten (SCHMITZ 1996), noch betrachtet werden, werden diese v. a. im Rahmen der Verkettung von Technologien nicht berücksichtigt. Die bestehenden Ansätze zur Planung von Technologieketten, wie bspw. FALLBÖHMER (2000) oder KNOCH (2005), und Fertigungsfolgen, wie bspw. TROMMER (2001), PACHOW-FRAUENHOFER ET AL. (2009) oder BIERMANN ET AL. (2013), sind nahezu alle der operativen Technologieplanung zuzuschreiben.

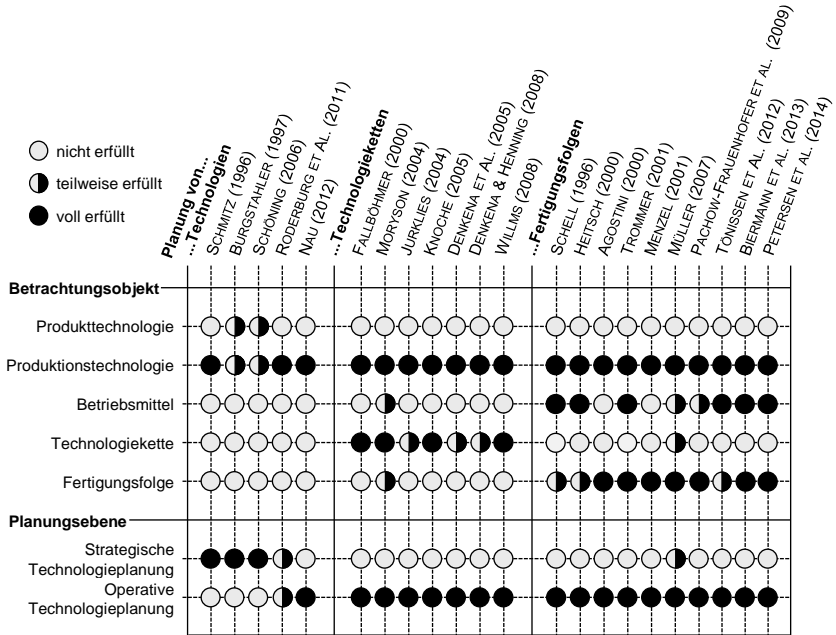


Abb. 2.3: Übersicht über die bestehenden Ansätze zur Bewertung und Planung von Technologien, Technologieketten sowie Fertigungsfolgen

Einzig MÜLLER (2007) tangiert durch seine Einordnung in die frühen Phasen der Produktentwicklung strategische Aspekte, wobei er nicht die für diese Betrachtungsebene zentralen Fragestellungen, wie bspw. die Bestimmung des Entwicklungsstands oder des Technologiepotenzials, betrachtet. Generell wird der Entwicklungsstand von Technologien bzw. Technologieketten nur bei SCHMITZ (1996) und FALLBÖHMER (2000) thematisiert, jedoch bietet keiner der in der wissenschaftlichen Literatur verfügbaren Arbeiten eine Lösung zur Bestimmung der Technologiereife. Insbesondere fehlt es an Modellen und Methoden zur Messung der Reife von Technologieketten (ABELE & REINHART 2011; PETERS & LANZA 2013). Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, ist die Reife aber maßgeblich sowohl für das Wettbewerbspotenzial einer Technologie (SOMMERLATTE & DESCHAMPS 1985) als auch für die mit ihr verbundenen technischen und organisatorischen Risiken (VALERDI & KOHL 2004; MANKINS 1995). Diese Eigenschaften müssen im Rahmen der strategischen Planung von Technologien berücksichtigt und abgebildet werden.

In Abschnitt 1.1 wurden bereits die Rahmenbedingungen bei der Planung von Technologien beschrieben. In diesem Kontext wurde festgestellt, dass Technologien aufgrund der Wechselwirkungen zu vor- und nachgelagerten Prozessen nicht separat betrachtet werden dürfen (DENKENA ET AL. 2005). Da sich die bestehenden Ansätze zur Planung von Technologieketten und Fertigungsfolgen ausschließlich auf die operative Technologieplanung beschränken, ist auch diese Lücke in der strategischen Technologieplanung zu schließen. Hierbei müssen die zur Generierung und Auswahl notwendigen Bewertungskriterien identifiziert werden. In diesem Zusammenhang sind Modelle und Methoden bereitzustellen, die es ermöglichen, die relevanten Bewertungskriterien zu bestimmen, wobei neben den klassischen Bewertungskriterien, wie der Wirtschaftlichkeit (WILLMS 2008) oder der technischen Machbarkeit (FALLBÖHMER 2000), v. a. die Technologiereife berücksichtigt werden muss (VELLA ET AL. 2010). Neben der Reife ist das mit dem Einsatz einer Technologie bzw. einer Technologiekette verbundene Potenzial zu beurteilen (SCHÖNING 2006; REEVES 2000), um festzustellen, inwiefern Vorteile durch den Einsatz einer Technologie generiert werden können. Insbesondere im Bezug auf die Reife sind derzeit aber erhebliche Forschungslücken vorhanden (ABELE & REINHART 2011; PETERS & LANZA 2013), obwohl durch deren korrekte Einschätzung zu tätigen Entwicklungsumfänge besser abgesichert werden könnten (NICK 2008).

Die Analyse der bestehenden Ansätze offenbart, dass keine Modelle oder Methoden existieren, welche die Planung von Technologieketten bereits in der strategischen Planungsphase integrieren. Wechselwirkungen zwischen einzelnen Technologien werden derzeit nur unzureichend berücksichtigt. Des Weiteren ist nicht klar, welche Bewertungskriterien für die Generierung und Auswahl von Technologieketten in der strategischen Technologieplanung beurteilt werden müssen und wie diese zu bestimmen sind. Insbesondere belastbare Vorgehensweisen zur Bestimmung der für den Entwicklungsstand einer Technologie bzw. Technologiekette maßgeblichen Technologiereife fehlen gänzlich. Aus den aufgeführten Gründen besteht für diese Arbeit der Handlungsbedarf, eine Methodik für die strategische Planung von Technologieketten zu entwickeln, welche die aufgeführten Defizite löst. Folgende Teilziele müssen dabei erreicht werden:

- Entwicklung eines Modells und einer Methode zur Bestimmung der Reife von Technologieketten
- Identifikation weiterer für die strategische Planung von Technologieketten relevanten Bewertungskriterien
- Entwicklung von Modellen und Methoden zur Bestimmung der relevanten Bewertungskriterien
- Entwicklung einer Methode zur Generierung von Technologieketten unter Berücksichtigung der in der strategischen Planung vorhandenen Informationen

- Entwicklung einer Methode für die Bewertung und Auswahl von Technologieketten
- Implementierung der entwickelten Modelle und Methoden in einer Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten

3 Anforderungen an die Methodik

3.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, ist es das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, produzierende Unternehmen bei der strategischen Planung von Technologieketten zu unterstützen. Aus diesem Grund wurden in Kapitel 2 die Arten von Kriterien zur Beurteilung von Technologien eingeführt und bestehende Ansätze zur Planung von Technologien, Technologieketten und Fertigungsfolgen analysiert. Hieraus wurde abgeleitet, dass zur Erfüllung der übergeordneten Zielsetzung dieser Arbeit eine Methodik zu entwickeln ist, die es produzierenden Unternehmen ermöglicht, Technologieketten bereits während der strategischen Technologieplanung zu generieren, zu bewerten und auszuwählen. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.7 werden in Abschnitt 3.2 zunächst allgemeine Anforderungen an die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten definiert. Anschließend werden die allgemeinen Anforderungen für die praktische Anwendung in Abschnitt 3.3 formuliert.

3.2 Allgemeine Anforderungen an die Methodik

Die zu entwickelnde Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten muss eine Reihe von allgemeine Anforderungen erfüllen, die sich aus der übergeordneten Zielsetzung dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.3) sowie dem Handlungsbedarf (siehe Abschnitt 2.7) ableiten. Nachfolgend sind die allgemeine Anforderungen an die Methodik aufgeführt:

- *Integration der Unternehmens- und Technologiestrategie:* Die Grundlage zur Anwendung der Methodik stellt die Unternehmensstrategie sowie die daraus abgeleitete Technologiestrategie dar. Nur auf Grundlage der unternehmerischen Ausrichtung lassen sich richtungweisende Entscheidungen bspw. für konservative bzw. risikoarme oder innovative Technologieketten ableiten.
- *Bereitstellung der relevanten Bewertungskriterien:* Für eine Auswahl der am besten geeigneten Technologiekette ist eine belastbare Bewertung der unterschiedlichen Alternativen unabdingbar. Aus diesem Grund sind alle relevanten Bewertungskriterien zu identifizieren und bereitzustellen.

- *Berücksichtigung des Entwicklungsstands der Technologien:* Um im globalen Wettbewerb erfolgreich produzieren zu können, sind v. a. Unternehmen in Hochlohnländern gefordert, innovative Technologieketten einzusetzen. Hierbei müssen die einzelnen Technologien ausgereift genug sein, um technische und organisatorische Risiken zu minimieren. Aus diesem Grund ist die Reife der Technologiekette richtig einzuschätzen.
- *Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Kriterien:* Um die Objektivität der Methodik zu gewährleisten, sind die Bewertungskriterien soweit wie möglich zu quantifizieren. Dennoch existieren gerade im Rahmen der strategischen Planung qualitative Kriterien, wie bspw. das Mitarbeiter-Know-how, welche nicht direkt quantifiziert werden können, aber ggf. abzubilden und bei der Auswahl zu berücksichtigen sind.

3.3 Praktische Anforderungen für die Anwendung

Neben den im vorherigen Abschnitt aufgeführten allgemeine Anforderungen muss die zu entwickelnde Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten auch Anforderungen für deren praktische Anwendung erfüllen. Diese sind nachfolgend aufgeführt und beschrieben:

- *Allgemeingültigkeit der Methodik:* Die zu entwickelnde Methodik soll schwerpunktmäßig für den Einsatz in produzierenden Unternehmen entwickelt werden. Da diese in sehr unterschiedlichen Branchen tätig sind, muss die Allgemeingültigkeit garantiert werden. So müssen bspw. alle Technologien der DIN 8580 sowie sämtliche Produkttypen und -arten darstellbar sein.
- *Skalierbarkeit hinsichtlich des Detaillierungsgrads:* Je nach Unternehmen und Technologie müssen bei der Anwendung der Methodik verschiedene Schwerpunkte gesetzt werden dürfen. Außerdem sind die für die Planung verfügbaren Informationen z. T. schwer zugänglich und unsicher. Aus diesen Gründen ist zu gewährleisten, dass die einzelnen Modelle und Methoden v. a. im Bezug auf die zu berücksichtigenden Bewertungskriterien passende Abstraktionsgrade zulassen und je nach Verfügbarkeit der Informationen skalierbar sind.
- *Modularität der verwendeten Modelle und Methoden:* Die Methodik setzt sich aus einer Reihe von Modellen und Methoden zusammen, um bspw. untergeordnete Fragestellungen, wie die Bestimmung der Technologiereife oder die Generierung alternativer Technologieketten, beantworten zu können. Damit ein durchgängiger Informationsfluss sichergestellt werden kann, sind die Schnittstellen aufeinander abzustimmen und muss die

gesamte Methodik modular gestaltet werden. Außerdem sind die einzelnen Modelle unternehmens- und technologiespezifisch zu gewichten und müssen flexibel kombiniert werden können.

- *Sicherstellung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses*: Um den wirtschaftlichen Einsatz der Methodik bei produzierenden Unternehmen sicherzustellen, muss der Aufwand, der bei der Anwendung der Methodik entsteht, den durch deren Einsatz generierten Nutzen gegenübergestellt werden. Dazu sind die Anwendungsfälle für den sinnvollen Einsatz der Methodik aufzuzeigen und technisch-wirtschaftlich zu bewerten.

Zusammenfassend zeigt Abb. 3.1 eine Übersicht der allgemeine und praktischen Anforderungen, die es im Rahmen der Entwicklung der Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten zu berücksichtigen gilt. Dabei gelten die aufgeführten Anforderungen nicht nur für die Methodik, sondern auch für die darin enthaltenen Modelle und Methoden.



Abb. 3.1: Allgemeine und praktische Anforderungen an die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten

Da im Rahmen der Generierung und Auswahl von Technologieketten sowohl die einzelnen Technologien als auch die alternativen Technologieketten zu bewerten sind, stellen die zur Bewertung notwendigen Kriterien sowie die zur Bestimmung der Bewertungskriterien notwendigen Modelle und Methoden einen zentralen Aspekt der Methodik dar. Aus diesem Grund werden im nachfolgenden Kapitel 4 zunächst die relevanten Bewertungskriterien eingeführt. Außerdem werden die erforderlichen Methoden und Modelle vorgestellt und erläutert. Wo keine adäquaten Lösungen im Stand der Technik existieren, werden die notwendigen Modelle und Methoden neu entwickelt.

4 Bewertung von Technologien und Technologieketten

4.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 1.3 erläutert wurde, beinhaltet die strategische Planung von Technologieketten neben deren Generierung eine detaillierte Bewertung der zur Verfügung stehenden Alternativen, um die am besten geeignete Alternative auszuwählen. Außerdem sind zunächst diejenigen Technologien zu bewerten, die potenziell für die Planung zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund werden im Abschnitt 4.2 die für die strategische Planung von Technologieketten relevanten Bewertungskriterien identifiziert und beschrieben. Anschließend erläutern die Abschnitte 4.3 bis 4.5 die Modelle und Methoden zur Bestimmung der jeweiligen Bewertungskriterien zur Betrachtung von einzelnen Technologien und Technologieketten. Hierbei wird versucht, soweit möglich auf bestehende Ansätze aus der wissenschaftlichen Literatur zurückzugreifen.

4.2 Relevante Bewertungskriterien

In Abschnitt 2 wurde hergeleitet, dass in der wissenschaftlichen Literatur eine Reihe von Ansätzen existieren, mit denen Technologien bewertet werden. Diese unterscheiden sich zum einen in der jeweiligen Betrachtungsebene (strategische oder operative Technologieplanung) und zum anderen in der Art, der Anzahl sowie dem Detaillierungsgrad der berücksichtigten Bewertungskriterien. Daher ist zu untersuchen, welche Bewertungskriterien für die strategische Technologieplanung grundsätzlich betrachtet werden müssen und welche Informationen in dieser frühen Planungsphase zur Bestimmung der Bewertungskriterien vorliegen. Um ein detailliertes Verständnis über die bei der Technologieplanung eingesetzten Methoden zu erhalten, wurden 18 Interviews mit Experten durchgeführt, die sich auf unterschiedlichen Ebenen mit der Planung von Technologien und Technologieketten auseinandersetzen. Die Teilnehmer der Interviews kamen aus produzierenden Unternehmen²⁸, Forschungsinstituten und Beratungen im Bereich des Produktionsmanagements.

²⁸ Bei der Befragung wurden sowohl KMU als auch mittelständische Betriebe und Konzerne einbezogen.

Im Rahmen der ca. dreistündigen Interviews wurden ausgewählte Planungsprojekte retrospektiv analysiert, auf einem Tonband aufgenommen, transkribiert und anschließend ausgewertet. Hierbei konnten wichtige Phasen und Aufgaben während des Technologieplanungsprozesses erörtert werden, um für die erfolgreiche Durchführung relevante Aufgaben und Kriterien zu identifizieren. Als Interviewmethode wurde die Zeitstrahlmethode²⁹ gewählt, um umfassende Einblicke in den Technologieplanungsprozess zu erlangen und in diesem Rahmen wichtige Bewertungskriterien zu finden. Ausgewählte Ergebnisse der Interviews finden sich bei WASTIAN & SCHNEIDER (2005) sowie WASTIAN ET AL. (2009).

Die Interviews zeigten, dass neben den klassischen Bewertungskriterien der technischen Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit die Technologiereife bei der Auswahl eines Produktionsverfahrens berücksichtigt werden muss, da diese maßgeblich für das mit einer neuen Technologie verbundene Risiko ist. Außerdem wurde herausgestellt, dass es derzeit v. a. an objektiven und nachvollziehbaren Modellen und Methoden zur Bestimmung des Entwicklungsstandes sowohl von Technologien als auch von Technologieketten fehlt. In diesem Rahmen wurde auch das in neuen Technologien steckende Potenzial, wie bspw. die Möglichkeit der Reduzierung von Herstellkosten, die Erzeugung oder Verbesserung von Produkteigenschaften oder die Erhöhung der Produktivität, thematisiert. Darüber hinaus wurden weitere Bewertungskriterien aufgeführt, die vornehmlich derzeitiger gesellschaftlicher Trends zuzuordnen sind. Ein Beispiel für derartige Bewertungskriterien ist die Ressourceneffizienz, die vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Verknappung von Rohstoffen für wichtig erachtet wurde.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Interviews wurde eine Umfrage bei 1.900 produzierenden Unternehmen durchgeführt, wobei 80 Antworten zurückgesendet wurden, was einer Rückläuferquote von ca. 4,2% entspricht. Bei der Umfrage gaben 98,8% der Unternehmen an, dass die Prozessstabilität und -sicherheit besonders relevant bei der Auswahl von Technologien sei. Diese Kriterien werden in dieser Arbeit unter der *technischen Machbarkeit* der Produktionsaufgabe durch den Einsatz einer Technologie bzw. Technologiekette zusammengefasst. 65,0% bzw. 97,5% der befragten Unternehmen erachteten die *Technologiereife* wichtig bzw. tendenziell wichtig im Rahmen der Bewertung von Technologien. Als ebenso relevant wurde die Beurteilung von Durchlaufzeiten und Produktionskosten erachtet, welche sich auf die *Wirtschaftlichkeit* von Technologien bzw. Technologieketten auswirkt. 96,3% der Unternehmen erachteten diese

²⁹ Bei der Zeitstrahlmethode nach WASTIAN & SCHNEIDER (2005) wird der Verlauf eines Technologieplanungsprojekts retrospektiv aufgezeichnet. Anschließend werden wichtige Meilensteine und Informationen, beteiligte Akteure und Abteilungen sowie Anforderungen und Problemfelder detailliert besprochen. Auf Basis sog. Höhen- und Tiefenkurven können zentrale Kriterien und Aspekte identifiziert werden.

Kriterien als wichtig bzw. tendenziell wichtig im Rahmen der strategischen Technologieplanung. Ein Großteil der Unternehmen gab des Weiteren an, dass zu erschließende *Technologiepoteziale*, wie bspw. die Flexibilität (90,0%), bei der strategischen Technologieplanung zu berücksichtigen sind. Ausgewählte Ergebnisse der Umfrage finden sich bei KARL ET AL. (2011).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass auf Basis der Umfrage sowie der durchgeführten Interviews im Rahmen der strategischen Bewertung von einzelnen Technologien und Technologieketten in erster Linie die *Technologiereife*, die *Wirtschaftlichkeit*, das *Technologiepotezial* und die *technische Machbarkeit* bestimmt werden müssen. Außerdem muss bei der Auslegung einer Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten in Abhängigkeit des Betrachtungs-falls grundsätzlich das Hinzuziehen weiterer optionaler Bewertungskriterien, wie bspw. der Ressourceneffizienz, ermöglicht werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die identifizierten Bewertungskriterien erläutert und die bestehenden Ansätze zur Bestimmung dieser Bewertungskriterien aus der wissenschaftlichen Literatur eingeführt. Da bei einem Teil der Bewertungskriterien, insbesondere der Technologiereife, keine einsatzfähigen Methoden und Modelle zur Bestimmung existieren, werden die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Lösungen dargestellt und erläutert. Anschließend werden auf Basis der verwendeten Modelle und Methoden die Funktionsweise und das Vorgehen für die strategische Planung von Technologieketten vorgestellt.

4.3 Technologiereife

4.3.1 Allgemeines

Im Kontext dieser Arbeit wurde der Begriff der *Technologiereife* bereits in Abschnitt 1.2 eingeführt. Demnach beschreibt diese den aktuellen Entwicklungsstand einer Technologie und ist ein Indiz für die mit dem Einsatz einer Technologie verbundenen technischen und organisatorischen Risiken. (VALERDI & KOHL 2004). Nachfolgend werden in Abschnitt 4.3.2 zunächst bestehende Ansätze zur Beurteilung der Reife sowohl von Produkt- als auch Produktionstechnologien vorgestellt. Außerdem werden ausgewählte Arbeiten auf dem Gebiet des Projektmanagements beschrieben, bevor in Abschnitt 4.3.3 die existierenden Ansätze zur Bestimmung der Technologiereife bewertet werden. Anschließend werden in Abschnitt 4.3.4 die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Bestimmung der Reife von Technologieketten sowie das zugehörige Modell erläutert.

4.3.2 Bestehende Ansätze

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Bestimmung der Technologiereife befassen, wobei in Abhängigkeit der Relevanz für diese Arbeit stärker auf die jeweils verwendeten Modelle und Methoden eingegangen wird.

Der Begriff der Technologiereife wurde in der wissenschaftlichen Literatur erstmalig im Rahmen des Konzepts des Technologielebenszyklus (TLZ) von FORD & RYAN (1981) eingeführt. Dieser ordnet die Ausbreitung einer Technologie anhand definierter Entwicklungsstufen zeitlich ein. Dabei bezieht sich der Begriff der Technologie auf Produkttechnologien im Sinne dieser Arbeit. Abb. 4.1 zeigt die im TLZ nach FORD & RYAN (1981) enthaltenen sechs Entwicklungsstufen, wobei die Technologiereife die fünfte Phase darstellt, ab der nur noch marginale Weiterentwicklungen zu erwarten sind. Das Konzept des TLZ nach FORD & RYAN (1981) kumuliert den Grad der Ausbreitung einer Technologie³⁰.

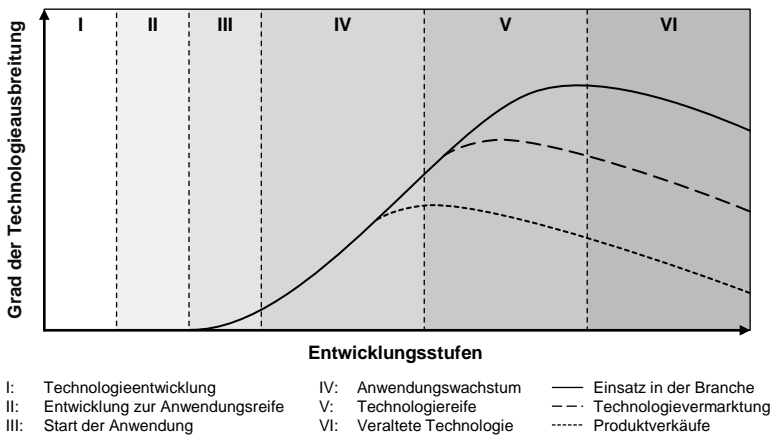


Abb. 4.1: Konzept des Technologielebenszyklus und enthaltene Entwicklungsstufen in Anlehnung an FORD & RYAN (1981) und TIEFEL (2007)

Ein erster Ansatz, die Reife von Technologien systematisch zu bestimmen, ist das Konzept der Technology Readiness Level (TRL) der National Aeronautics and Space Administration (NASA) (MANKINS 1995). Das Konzept der TRL

³⁰ Beim TLZ nach FORD & RYAN (1981) werden als Ausprägungsformen die Produktverkäufe, die unternehmensspezifische Vermarktung sowie der Einsatz einer Technologie in der gesamten Branche angenommen.

Technologiereife	niedrig	TRL 1 Beobachtung und Dokumentation grundlegender Wirkprinzipien
		TRL 2 Formulierung eines Technologiekonzepts und / oder einer Anwendung
		TRL 3 Machbarkeitsstudie analytisch und experimentell kritischer Funktionen und Eigenschaften
		TRL 4 Validierung von Komponenten und / oder Baugruppen in Laborumgebung
		TRL 5 Validierung von Komponenten und / oder Baugruppen in realitätsnaher Umgebung
		TRL 6 Prototyp des Gesamtsystems zur Erprobung in realitätsnaher Umgebung (Boden oder Luft)
		TRL 7 Prototyp des Gesamtsystems zur Demonstration in der Luft
		TRL 8 Aufbau des Gesamtsystems und Qualifizierung durch Tests (Boden oder Luft)
	hoch	TRL 9 Qualifizierung des Gesamtsystems durch erfolgreiche Operationen im Weltraum

Abb. 4.2: Technology Readiness Level (TRL) der National Aeronautics and Space Administration (NASA) zur Beurteilung der Reife von Komponenten in der Luft- und Raumfahrt in Anlehnung an MANKINS (1995)

wurde Ende der 80er Jahre entwickelt und betrachtet Komponenten und Bauteile für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, weshalb es sich ausschließlich auf die Beurteilung von Produkttechnologien bezieht. Abb. 4.2 zeigt eine Übersicht über das Modell der TRL zur Beurteilung der Reife. Demnach durchläuft jede Technologie neun definierte Reifegradstufen (TRL) zunehmender Technologiereife, wobei in jeder Stufe gewisse Entwicklungsumfänge zu leisten sind. Je höher das TRL einer Technologie ist, desto weiter ist ihr Entwicklungsstand. Die Bestimmung der Technologiereife basiert bei dem Konzept der TRL auf der Beantwortung von Fragen zu jeder Stufe. Erst wenn alle Fragen innerhalb eines TRL positiv beantwortet wurden, ist die nächst höhere Stufe erreicht.

Der Beginn der Entwicklung einer Technologie wird in TRL 1 beschrieben und umfasst sämtliche Aktivitäten der Grundlagenforschung, in der grundlegende Wirkprinzipien einer Technologie beobachtet und auf Basis mathematischer oder physikalischer Formeln beschrieben werden. Nachdem in TRL 2 produktionstechnische Anwendungsmöglichkeiten der Technologie identifiziert, eine Technologiekonzept formuliert und erste Machbarkeitsstudien durchgeführt werden, beinhaltet das TRL 3 den Nachweis der analytischen sowie experimentellen Machbarkeit von den sog. kritischen Funktionen einer Technologie. Nachdem die ersten Experimente und Tests der Technologie in TRL 4 noch in einer Laborumgebung stattfinden, umfasst TRL 5 die Erprobung in einer realitätsnahen Umgebung. Anschließend können die Funktionen eines Gesamtprototypen der Technologie in TRL 6 zum ersten Mal in realistischer Umgebung am Boden und in der Luft gemessen und nachgewiesen werden. Der Funktionsnachweis des Gesamtprototypen der Technologie in der Luft wird in TRL 7 durchgeführt. Nachdem in TRL 8 das Gesamtsystem der Technologie aufgebaut und sowohl am Boden als auch in der Luft getestet werden kann, beschreibt TRL 9 die

Qualifizierung dieses Gesamtsystems durch dessen erfolgreichen Einsatz bei Missionen und Operationen im Weltraum (MANKINS 1995; ESA 2008).

Das Konzept der TRL wurde im Folgenden weiter verfeinert. So entwickelte die European Space Agency (ESA) ein aus vier Schritten bestehendes, standardisiertes Vorgehen zu deren Einschätzung. Um das Erreichen eines bestimmten TRL zu dokumentieren, muss in jeder Stufe ein einheitlicher Satz an Informationen gesammelt werden (ESA 2008). Hierbei ist eine umfassende Beschreibung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten notwendig (Schritt 1). Nach der Beschreibung der Anforderungen innerhalb der jeweiligen Stufe (Schritt 2) sind diese zu überprüfen und zu verifizieren (Schritt 3). Abschließend ist eine spätere Realisierbarkeit sicherzustellen (Schritt 4), indem sowohl bestehende technische Risiken als auch noch zu leistende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten abgeschätzt werden. Erst wenn alle vier Schritte erfolgreich durchlaufen worden sind, gilt ein TRL im Sinne des Stage-Gate-Modells³¹ als erreicht.

Den ersten Ansatz, die TRL für die Beurteilung der Reife von Produktionstechnologien einzusetzen, lieferten BROUSSEAU ET AL. (2009). Dabei übertrugen sie in ihrem Technology Maturity Assessment (TMA) die TRL auf die Betrachtung von Micro- und Nanofertigungstechnologien und reduzierten die Anzahl auf 7 Stufen (BROUSSEAU ET AL. 2009, 2010). Auf Basis von Fragebögen wird ein sog. Reife-Profil erstellt, das die Aufwände für Forschung und Entwicklung entlang einer Reife-Skala für die TRL darstellt, d. h. es existiert nicht nur ein einzelner Reifewert, sondern ein Wert für jedes TRL. Abb. 4.3 zeigt ein Reifegrad-Profil eines Mikrofertigungsprozesses und die Zuordnung zu den sieben TRL. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, fallen die Forschungs- und Entwicklungsaufwände mit ansteigendem TRL tendenziell ab. Neben dem Reife-Profil führen BROUSSEAU ET AL. (2009) einen Reife-Index ein. Dieser stellt ein Maß für die Vermarktbarkeit einer Technologie dar und ergibt sich aus der Summe von TRL 5 bis 7. Je höher der Reife-Index ist, desto ausgereifter ist die Technologie und desto sicherer lässt sich der erfolgreiche Einsatz abschätzen.

Das Konzept der TRL wurde vom U. S. Department of Defense im Bezug auf produktionstechnische Fragestellungen erweitert (OSD 2011). Dabei wurden den bekannten TRL zehn Manufacturing Readiness Level (MRL) zugeordnet, wobei die ersten neuen Stufen miteinander gekoppelt sind und die letzte Stufe den Einsatz von Methoden der Schlanke Produktion beinhaltet. Bei den MRL handelt es sich um ein Konzept zur Beurteilung der produktionstechnischen Reife von Waffensystemen. Hierbei soll bspw. überprüft werden, inwiefern ein konkretes Produkt (Waffensystem) überhaupt produziert werden kann. Dazu

³¹ Das Stage-Gate-Modell ist ein Prozessmodell, das im Rahmen des Innovationsprozesses eingesetzt wird, um den Entwicklungsprozess eines Produktes und damit den Fortschritt der Produktreife anhand festgelegter Kontrollpunkte zu optimieren (COOPER 2002).

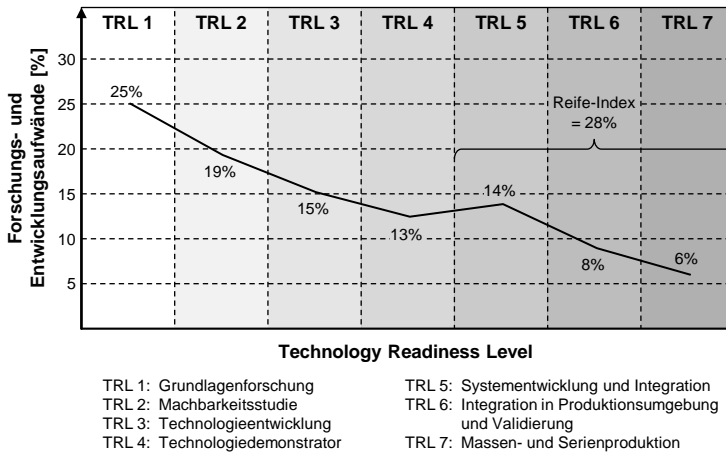


Abb. 4.3: Beispielhafte Darstellung eines Reife-Profiles nach BROUSSEAU ET AL. (2009)

wird analysiert, aus welchen Materialien es besteht, welche Produktionstechnologien zum Einsatz kommen oder wie die Anlaufphase gestaltet werden soll. Das Ziel der MRL ist es, neben der Reife von Produkttechnologien deren Produzierbarkeit anhand eines festen Reifewertes sicherzustellen. Die Beurteilung des Entwicklungsstandes der eingesetzten Produktionsverfahren erfolgt nicht.

Neben den aufgeführten Arbeiten existiert in der wissenschaftlichen Literatur noch eine Reihe weiterer Ansätze, die den Einsatz von TRL beinhalten. So setzen NOLTE ET AL. (2003) die TRL in ihrem Technology Readiness Calculator (TRC) ein, den Projektfortschritt von Software-Entwicklungen zu dokumentieren. In ihrem Technology Risk Management verwenden VALERDI & KOHL (2004) die TRL, um in deren Abhängigkeit die mit einer Technologie verbundenen Risiken qualitativ auf der Basis von Expertenaussagen darzustellen. ARMAN ET AL. (2006) implementieren die TRL bei der Beobachtung von neu entstehenden Technologien. Bei seiner potenzialbasierten Bewertung von Technologien beurteilt SCHÖNING (2006) auf Basis der TRL die grundsätzliche Umsetzungsfähigkeit von Technologieentwicklungen, wobei er die neun Stufen leicht abwandelt, sie aber nicht für den Einsatz bei Produktionstechnologien konkretisiert.

Das Capability Maturity Model (CMM) nach PAULK ET AL. (1993) stellt einen Referenzprozess zur Beurteilung der Reife von Software-Entwicklungsprojekten dar. Bei der Beurteilung der Reife werden hierbei fünf Reifegradstufen (Maturity

Level) verwendet, die im Sinne eines Stage-Gate-Prozesses zu verstehen sind und separate Meilensteine für das Projekt darstellen (COOPER 2002).

Die Methode der Reifegradabsicherung für Neuteile des Verbands der Automobilindustrie (VDA) ist eine Methode für das Projektmanagement im Rahmen von Kunden-Lieferanten-Beziehungen in der Automobilbranche (VDA 2009). Das Ziel hierbei ist es, die Qualität durch eine Abstimmung von Inhalten und Abläufen in der Lieferkette zu verbessern. Die Reifebewertung erfolgt in diesem Ansatz anhand allgemeingültiger Messkriterien zu jeder Stufe.

Eine weitere Methode zur Beurteilung der Reife von Projekten stellt JAHN (2010) in seinem Portfolio- und Reifegradmanagement für Innovationsprojekte zur Multiprojektsteuerung der verschiedenen Abläufe und Prozesse in der frühen Phase der Produktentwicklung vor. Die Reife wird hier als Maß für den Umsetzungsstand der einzelnen Innovationsprojekte innerhalb des zu entwickelnden Fahrzeugs gesehen. Gemessen wird die Reife anhand einer sechsstufigen Skala. Jeder Reifestufe werden Ziele in Form von festen Kriterien zugeordnet.

GOMERINGER (2007) führt zur Beurteilung der Reife von Produkten den internen Technologiereifegrad ein. Dieser besteht im Wesentlichen aus dem Wissen, das noch notwendig ist, um eine Technologie zur Anwendungsreife zu entwickeln. Außerdem wird die Fähigkeit des Unternehmens, die Wissenslücke durch die Verfügbarkeit und aktive Nutzung von Kompetenzen und Infrastruktur zu schließen, berücksichtigt.

In seiner Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung beurteilt KRÖLL (2007) den technologischen Reifegrad, der das Risiko einer Technologie bezüglich der Erreichung der Serienreife beschreibt. Der technologische Reifegrad ergibt sich dabei aus dem Weiterentwicklungspotenzial, der Fertigungsfähigkeit sowie der Zuverlässigkeit einer Technologie. Zur Bewertung verwendet KRÖLL (2007) Unterkriterien, wie bspw. den Zyklus der Automobilbranche oder Patentwachstumsraten, welche im Wesentlichen auf die Betrachtung von Produkttechnologien in der Automobilbranche zugeschnitten sind.

Indikatoren zur Bestimmung der Technologiereife von Produkten finden sich auch bei HEUBACH ET AL. (2008), welche den Technologieentwicklungsprozess beschreiben. Hierbei stützen sie sich auf quantitative Kriterien zur Beurteilung der Technologiereife und fokussieren die Betrachtung von Publikationen, Patenten, Veranstaltungen (z. B. Konferenzen oder Messen), Kapazitäten (z. B. Anzahl an Forschungsgruppen) und Finanzströmen (z. B. Ausgaben für Forschung und Entwicklung).

Die Methode von VELLA ET AL. (2010) zur Bewertung der Technologiereife von Prozessen und Prozesspaaren baut auf den Erkenntnissen von BROUSSEAU ET AL. (2009) auf und besteht aus einem Process Capability Maturity Model

(PCMM) und dem Process Pair Interface Model (PPIM). Das PCMM entspricht im Wesentlichen dem CMM nach PAULK ET AL. (1993) und wurde für die Betrachtung von Mikro- und Nanofertigungstechnologien angepasst. Das PPIM stellt einen qualitativen Ansatz zur Darstellung der Reife von sequentiell aufeinander folgenden Prozessen dar. Hierbei ist die Betrachtung der gesamten Technologiekette nicht möglich, da lediglich die Schnittstellen zweier Prozesse untersucht und bewertet werden.

In der wissenschaftlichen Literatur existieren noch weitere Ansätze zur Beurteilung des Entwicklungsstands von Produktionstechnologien³², welche auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden die Technologiereife beinhalten. Diese Ansätze sind z. T. sehr abstrakt, werden nur für die Beurteilung spezifischer Produktionstechnologien eingesetzt und sind nicht für weitere Produktionstechnologien einsetzbar.

4.3.3 Bewertung der bestehenden Ansätze

Wie aus Abschnitt 4.3.2 deutlich wird, wurde der Begriff der Technologiereife in einer Vielzahl an Ansätzen der wissenschaftlichen Literatur thematisiert. Nachfolgend sollen die aufgeführten Arbeiten hinsichtlich deren Eignung zur Bestimmung der Technologiereife von Produktionsverfahren analysiert und bewertet werden. Eine Übersicht über die Bewertung der existierenden Ansätze zur Bestimmung der Reife von Produkten, Technologien und Projekten hinsichtlich Betrachtungsobjekten und berücksichtigten Eigenschaften und Faktoren zeigt Abb. 4.4.

Das Konzept des TLZ von FORD & RYAN (1981) eignet sich sehr gut, ein grobes Verständnis für den Entwicklungsprozess und den damit verbundenen Reifefortschritt einer Technologie zu erhalten. Allerdings findet weder eine Bestimmung qualitativer und quantitativer Kriterien noch eine scharfe Zuordnung und Abgrenzung der einzelnen Entwicklungsstufen einer Technologie statt. Beispielsweise sind die Ausprägungen von Indikatoren des Modells von FORD & RYAN (1981) für mehrere Phasen identisch (TIEFEL 2007; HÖFT 1992). Darüber hinaus ist die Eignung zur Beschreibung und Analyse der bisherigen Technologieentwicklung sehr beschränkt. Die Eignung zur Prognose der zukünftigen Technologieentwicklung ist aus diesem Grund nicht möglich. Auch

³² Erwähnt seien hier die Arbeiten von KEIL ET AL. (2007) zur Betrachtung von Einfluss- und Erfolgsfaktoren für den Ramp-Up in der Halbleiterindustrie, der Technologiekompass von KNAF & HEUBACH (2008) zur Reifegradbestimmung anhand der Anzahl wissenschaftlicher Publikationen, der Ansatz von PAUL ZOLÉKO (2011) zur reifegradbasierten Planung eines organisatorischen Regelwerkes für die Produktion und die Arbeiten von WECKENMANN ET AL. (2010), die eine Reifegradmethode für die Entwicklung neuer Umformverfahren vorstellen.

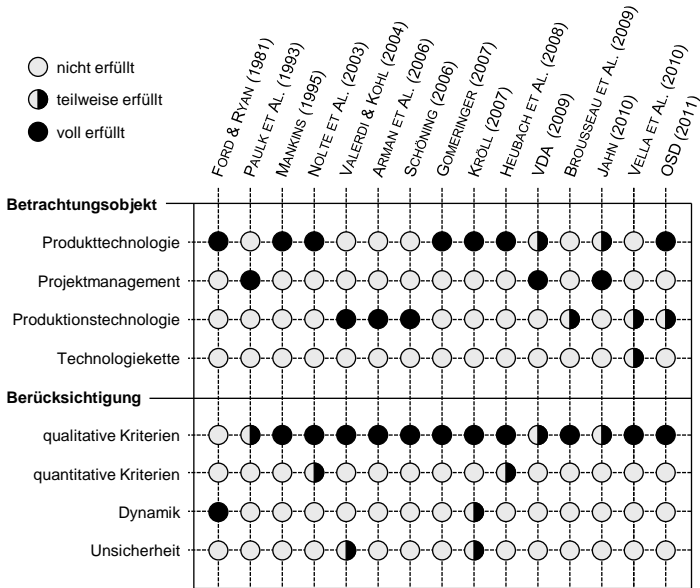


Abb. 4.4: Übersicht über die bestehenden Ansätze zur Bestimmung der Reife von Produkten, Projekten und Technologien

wenn die verschiedenen Entwicklungsstufen aufgeführt werden, sind diese nicht empirisch belegt (TIEFEL 2007). Außerdem werden keine Angaben zum inhaltlichen Umfang der Entwicklungsstufen geliefert, weshalb keine quantitative Bestimmung der Technologiereife möglich wird. Das Konzept der TRL von MANKINS (1995) sowie NOLTE ET AL. (2003) sensibilisiert grundsätzlich für den Entwicklungsprozess und grenzt die existierenden Phasen voneinander ab. Die zur Bestimmung der Reife notwendigen Fragebögen sind dabei sehr technologiespezifisch und fokussieren Produkttechnologien. Daher ist dieses Konzept nicht einfach auf die Betrachtung von Produktionstechnologien übertragbar. Außerdem hängt die Beantwortung der Fragen zumeist von der subjektiven Einschätzung der Experten ab und orientiert sich nicht an quantitativen Werten. Des Weiteren besteht das Ergebnis der Reifebestimmung aus einem festen Wert, dem erreichten TRL, was keine Rückschlüsse auf den gesamten Entwicklungsprozess einer Technologie zulässt. Den Arbeiten von VALERDI & KOHL (2004), ARMAN ET AL. (2006) und SCHÖNING (2006) ist gemein, dass sie die TRL zwar für Produkte oder spezielle Technologien einsetzen, das Konzept aber nicht wesentlich erweitern und für die allgemeingültige Betrachtung von Produktionstechnologien und Technologieketten befähigen.

Während der Ansatz des CMM von PAULK ET AL. (1993), die Methode der Reifegradabsicherung für Neuteile des VDA (2009) und die Arbeiten von JAHN (2010) sich auf das Management von Software- und Entwicklungsprojekten sowie den jeweiligen Reifefortschritt beziehen, betrachten KRÖLL (2007) und GOMERINGER (2007) im Wesentlichen das Entwicklungsstadium von Produkttechnologien. Die Bestimmung der jeweiligen Technologiereife beschränkt sich hier jeweils auf eine rein qualitative Einordnung. Die Indikatoren, die HEUBACH ET AL. (2008) zur Bestimmung der Technologiereife vorschlagen, sind zwar messbar, aber auf einem hohem Abstraktionslevel, weshalb kaum konkrete Schlussfolgerungen möglich sind. Eine strukturierte Vorgehensweise zu deren Identifikation wird nicht angegeben. Die formulierten Kriterien für das Erreichen der nächst höheren Stufe sowie der Einsatz von Meilensteinen der MRL können im Rahmen der Bestimmung der Technologiereife sehr gut verwendet werden. Die MRL sind allerdings nur für Beurteilung der Herstellbarkeit einer konkreten Produkttechnologie (OSD 2011) einsetzbar, weshalb sie nicht direkt auf die allgemeine Bestimmung der Reife von Produktionstechnologien übertragbar sind. Zur Bestimmung des Ergebniswertes werden ausschließlich qualitative Kriterien abgeschätzt.

Den Ansätzen von BROUSSEAU ET AL. (2009) und VELLA ET AL. (2010) ist gemein, dass sie konkrete Produktionstechnologien betrachten. Dabei liefert das TMA von BROUSSEAU ET AL. (2009) nicht nur einen konkreten Ergebniswert, sondern auch eine Reife-Profil, das den Rückschluss auf zukünftige Entwicklungsbedarfe einer Technologie zulässt. Zur Bestimmung der Technologiereife werden lediglich qualitative Aussagen von Experten verwendet. Während sich der Ansatz von BROUSSEAU ET AL. (2009) auf einzelne Technologien beschränkt, betrachten VELLA ET AL. (2010) Schnittstellen von Technologien und Abschnitte einer Technologiekette. Beide Ansätze sind für die Beurteilung von Micro- und Nanofertigungstechnologien einsetzbar und können nicht für die allgemeingültige Bestimmung der Technologiereife weiterer Produktionstechnologien verwendet werden. Dennoch bildet v. a. der Ansatz des TMA eine gute Grundlage für diese Arbeit.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich bestehende Arbeiten bei der Bestimmung der Technologiereife lediglich auf qualitative Kriterien stützen, jedoch wenige Möglichkeiten der Quantifizierung des Entwicklungsstands von Technologien oder Technologieketten existieren. Während zur Betrachtung von Produktionstechnologien vereinzelt Arbeiten identifiziert werden konnten, werden Technologieketten nicht genannt. Ebenso finden sich keine Ansätze, welche die technischen und organisatorischen Risiken, die v. a. einer innovativen Technologie anhaften, ausreichend darstellen. Aus diesem Grund muss eine Methode entwickelt werden, die diese Defizite behebt. Hierzu ist in erster Linie ein belastbares Reifemodell zu erarbeiten, das auch auf Technologieketten anwendbar ist (REEVES 2000; ABELE & REINHART 2011).

4.3.4 Bestimmung der Reife

4.3.4.1 Modell zur Bestimmung der Reife

Um die Reife von Technologien zur Herstellung von Produkten bestimmen zu können, wurde ein allgemeines Reifemodell³³ entwickelt, das auf den Prinzipien der TRL von MANKINS (1995) und dem TMA von BROUSSEAU ET AL. (2009) aufbaut und Aspekte des TLZ von FORD & RYAN (1981) integriert. Hierbei wurden in Analogie zu den einzelnen TRL nach MANKINS (1995) Reifegradstufen definiert, die allgemeingültig für Technologien einsetzbar sind und sich nicht auf spezielle Fertigungs- und Montageverfahren beschränken, wie dies bei BROUSSEAU ET AL. (2009) der Fall ist.

Im Rahmen der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Interviews wurden neben den relevanten Kriterien auch für eine erfolgreiche Technologieentwicklung relevante Phasen und Kriterien für einen zielführenden Durchlauf abgefragt. Auf Basis der Erfahrungen der Experten und basierend auf den TRL nach MANKINS (1995) wurden Reifegradstufen, in welche sich der Entwicklungsstand einer Technologie einteilen lässt, definiert. Auf Basis der Interviews wurde deutlich, dass die einzelnen Reifegradstufen der TRL bei der Betrachtung von Produktionstechnologien von neun auf sieben reduziert werden können. Dies ist konform mit dem Ansatz von BROUSSEAU ET AL. (2009), auch wenn im Rahmen des TMA in den einzelnen TRL bzw. Reifegradstufen andere Inhalte verwendet werden. Nachfolgend werden diese sieben Reifegradstufen zur Abschätzung des Entwicklungsstands einer Technologie inhaltlich beschrieben und erläutert:

1. *Grundlagenforschung*: Die erste Reifegradstufe repräsentiert den Beginn der Entwicklung einer Technologie. In dieser Stufe werden erste Ideen für die produktionstechnische Anwendung der Technologie formuliert und im Wesentlichen grundlegende Wirkmechanismen und -prinzipien beschrieben sowie dokumentiert. Auf Basis von physikalischen und mathematischen Beschreibungen sowie Skizzen sind theoretische Konzepte für die Anwendung der Technologie das Ergebnis dieser Reifegradstufe. Da in dieser Stufe weder virtuelle Untersuchungen (bspw. in Form von Simulationen) noch reale Experimente stattfinden, ist der Einsatz der Technologie rein spekulativ. Auch wenn die Systeme, Komponenten und Zusammenhänge noch auf abstrahiertem Niveau beschrieben werden, sind die prinzipiellen Funktionsweisen einer Technologie am Ende dieser Reifegradstufe bekannt.

³³ Das hier vorgestellte Reifemodell wurde bereits auszugsweise veröffentlicht (REINHART & SCHINDLER 2012; REINHART ET AL. 2011a; REINHART & SCHINDLER 2010a, b).

2. *Machbarkeitsstudie*: Das wesentliche Ziel der zweiten Reifegradstufe ist es, die in der vorherigen Stufe formulierten Theorien und Konzepte zu überprüfen. Dazu werden die relevanten Funktionen der Technologie entweder in Simulationsumgebungen oder in einfachen Experimenten im Labor einzeln getestet. Ebenso erfolgt der Nachweis, dass die einzelnen Funktionen und Wirkprinzipien der Technologie sich nicht gegenseitig ausschließen und gleichzeitig realisiert werden können³⁴. Als Ergebnis dieser Reifegradstufe ist die grundsätzliche Machbarkeit der Technologie zu garantieren und Einflussfaktoren sowie Anforderungen für die spätere Realisierung aufzunehmen.
3. *Technologieentwicklung*: Nachdem die grundlegenden Funktionen der Technologie sichergestellt wurden, werden in der dritten Reifegradstufe alternative Konzepte für die Realisierung der Technologie entwickelt. Hierzu werden die verschiedenen Konzepte miteinander verglichen und die beste Lösung ausgewählt, wobei alle notwendigen Elemente und Komponenten sowie die Gesamtsystemarchitektur definiert werden. Ziel ist es, nach Abschluss dieser Stufe Abhängigkeiten und Interaktionen zwischen der Einsatzumgebung, den Leistungsanforderungen und den einzelnen Komponenten und Systemen der Technologie abzuschätzen. Dazu werden die in der vorherigen Stufe formulierten Einflussfaktoren und Anforderungen unter Einbeziehung mathematischer Modelle, Berechnungen und Simulationen erfasst und überprüft. In diesem Zusammenhang wird das grobe Prozessfenster³⁵ der Technologie auf Basis von Berechnungen und der Simulation des Gesamtsystems formuliert. Bei der Simulation werden bspw. virtuelle Verifizierungen, Funktionsanalysen oder Festigkeitsnachweise durchgeführt. Am Ende dieser Reifegradstufe sind alle Informationen verfügbar, um einen Funktionsprototypen³⁶ der Technologie zu realisieren und umzusetzen.
4. *Technologiedemonstrator*: In der vierten Reifegradstufe wird ein Funktionsprototyp aufgebaut, um die Anwendbarkeit der Technologie in einer Laborumgebung nachzuweisen. Es erfolgen Tests zur Validierung von Komponenten und deren Funktionsnachweis im Gesamtverbund des Pro-

³⁴ Bspw. ist denkbar, dass ein zu realisierender Fügeprozess nur bei bestimmten Temperaturen und Drücken abläuft, bei denen der Aggregatzustand des notwendigen Prozessgases aber nicht darstellbar ist. Derartige Widersprüche müssen für die Anwendung der Technologie zwingend ausgeschlossen werden.

³⁵ Das Prozessfenster der Technologie ist ein multidimensionaler Raum aller relevanten Parameter und gibt die jeweiligen Bereiche für die Funktion der Technologie an. Nach LEHNER (2001) repräsentiert das *Prozessfenster* den Bereich, in dem sämtliche Einflussparameter variiert werden können, ohne den Sollbereich einer Zielgröße zu verlassen.

³⁶ Der Begriff *Funktionsprototyp* wird in dieser Arbeit nach der Definition von EVERSHEIM & KRAUSE (1996a) verwendet und dient der Überprüfung und Optimierung des Arbeits- und Funktionsprinzips.

totypen. Auf diese Weise ist es möglich, das Gesamtsystem zu bewerten und Annahmen aus der vorherigen Stufe zu überprüfen. Hierbei wird das formulierte Prozessfenster aufgenommen und detailliert. In dieser Stufe ist es möglich, die formulierten Anforderungen und Funktionen sowie die Erkenntnisse aus der Simulation im Labor zu testen und zu validieren. Hierbei müssen die Umgebungsbedingungen mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden, um repräsentative Ergebnisse in Bezug auf die zukünftige Produktionsaufgabe zu erhalten.

5. *Integration in Betriebsmittel*: Die Implementierung der Technologie in ein reales Betriebsmittel, wie einer Werkzeugmaschine oder einem Industrieroboter, stellt die fünfte Reifegradstufe dar. Hierbei wird die Technologie unter realen Umgebungsbedingungen eingesetzt und Musterteile im Sinne der DIN 55350 (1986) hergestellt (EVERSHEIM & KRAUSE 1996a). Interaktion der eingesetzten Elemente und Komponenten werden analysiert und das strukturelle Verhalten und Zusammenspiel des Gesamtsystems untersucht. Außerdem wird das Prozessfenster weiter verfeinert und optimale Parameterbereiche festgelegt. In diesem Stadium sind zum ersten Mal Erwartungswerte für technologische und wirtschaftliche Kennzahlen, wie bspw. Prozesszeiten und -kräfte oder Fehlerraten, messbar.
6. *Produktionsstruktur*: In der sechsten Reifegradstufe wird die in einem Betriebsmittel realisierte Technologie in eine Produktionsstruktur integriert und mit vor- und nachgelagerten Technologien verknüpft. Ab diesem Zeitpunkt können sämtliche Einflüsse auf das Prozessfenster betrachtet werden. In dieser Stufe werden vornehmlich Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Technologie in der Produktionsstruktur durchgeführt und Kennzahlen im Bezug auf das Produktionssystem³⁷, wie bspw. Durchlaufzeiten, aufgenommen. Die Produktionsaufgabe wird durch die Erstellung von Mustern dokumentiert und abgesichert.
7. *Serieneinsatz*: In der letzten Reifegradstufe wird die Technologie für die Anwendung in der Serienproduktion befähigt. Da die industriellen Einsatzfähigkeit in dieser Stufe bereits grundsätzlich gegeben ist, werden organisatorische Fragestellungen, wie Schulungsmaßnahmen oder Wartungsintervalle, untersucht. Die Funktionsweise der Technologie wird standardisiert und für den Mitarbeiter aufbereitet. Weiterentwicklung findet nur noch marginal in Form von Rationalisierungseffekten statt.

³⁷ Der Begriff *Produktionssystem* wird in dieser Arbeit nach dem Verständnis von HERNÁNDEZ MORALES (2002) verwendet und verknüpft Fertigungs-, Montage- und Logistiksysteme zur betrieblichen Leistungserstellung im Sinne der Produktionsstruktur. Die Kennzahlen zur Beurteilung der Produktionsstruktur beziehen sich v. a. auf das Zusammenspiel aller am Herstellprozess beteiligten Systeme. Hierzu werden in erster Linie leistungs-, kosten- und nutzenorientierte Kennzahlen verwendet (CISEK 2005).

Abb. 4.5 zeigt das durch die sieben Reifegradstufen aufgespannte Reifemodell. Im Rahmen der Entwicklung einer Technologie muss in jeder Reifegradstufe ein minimaler Reife-Fortschritt erzielt werden, um in den nächst höheren Entwicklungsstand zu gelangen. Bspw. kann eine Simulation des Gesamtsystems in Reifegradstufe 3 erst erfolgen, wenn alle Komponenten im Rahmen der Reifegradstufe 2 ermittelt und ausreichend beschrieben wurden.

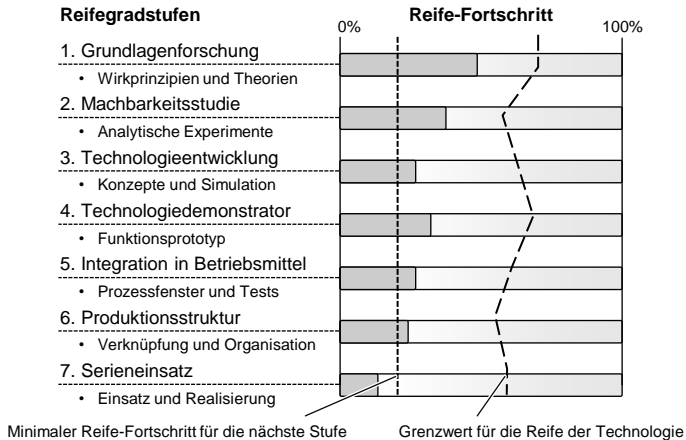


Abb. 4.5: Übersicht des Reifemodells zur Bestimmung des jeweiligen Reife-Fortschritts in den sieben Reifegradstufen

Das Reifemodell lässt nach dem Erreichen des minimalen Reife-Fortschritts aber eine parallele Entwicklung der Technologie in verschiedenen Reifegradstufen zu. Eine vorgelagerte Stufe wird daher nicht zwingend vollständig durchlaufen. So muss bspw. nicht das komplette Prozessfenster bekannt sein, um einen Funktionsprototypen aufzubauen. Um den Reife-Fortschritt für jede Reifegradstufe bestimmen zu können, sind für die jeweilige Stufe Anforderungen, qualitative und quantitative Kriterien sowie zugehörige Grenzwerte zu definieren. Um in der Produktion einsetzbar zu sein, muss die Technologie eine festzulegende Gesamtreife aufweisen, die sich aus den Reife-Fortschritten der unterschiedlich zu gewichtenden Reifegradstufen ergibt. Dabei sind die Kriterien und Fragestellungen der niedrigen Reifegradstufen zunächst unabhängig von der betrachteten Produktionsaufgabe und werden erst ab der Erstellung von Musterteilen in der fünften Reifegradstufe anwendungsfallspezifisch. Sowohl die Grenzwerte als auch die Gewichtungen der einzelnen Reifegradstufen sind in Abhängigkeit der betrachteten Technologie und unternehmensspezifisch einzustellen. Technologiespezifisch können unterschiedliche Reifegradstufen wichtig

für den Entwicklungsstand sein. Hierbei werden höhere Reifegradstufen i. d. R. auch höher bewertet, da diese die reale Anwendung der Technologie und den erfolgreichen Serieneinsatz wesentlich mehr beeinflussen. Abhängig von der Unternehmensstrategie können die Grenzwerte bei einer risikoaversen Entscheidung, wie bspw. der Technologiefolgerschaft, angehoben und bei risikofreudigen Ansätzen, wie bspw. der Technologieführerschaft, abgesenkt werden. Um letztendlich einsatzfähig zu sein, muss die Technologie aber nicht 100-prozentig ausgereift sein. Das Reife-Profil in Abb. 4.5 zeigt die unterschiedlich weit entwickelten Reife-Fortschritte und ist mit ansteigenden Reifegradstufen tendenziell fallend.

Der Mehrwert des in dieser Arbeit entwickelten Reifemodells ist, dass es allgemeingültig für Produktionstechnologien eingesetzt werden kann. Außerdem ist es derart gestaltet, dass es auch die Bestimmung der Reife einer aus mehreren Technologien bestehenden Technologiekette ermöglicht, was im nachfolgenden Abschnitt 4.3.4.2 beschrieben wird. Das Reifemodell liefert nicht nur einen festen Reifewert, sondern dokumentiert den simultanen Reife-Fortschritt in den sieben Reifegradstufen. Bei regelmäßigem Einsatz im Rahmen des Entwicklungsprozesses einer Technologie lässt es sich auch als Dokumentation nutzen und weist auf für diesen Prozess wichtige Reifegradstufen hin. Im Sinne eines *Lessons learned*³⁸ lassen sich so Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess einer Technologie identifizieren.

4.3.4.2 Übersicht über die Methode zur Bestimmung der Reife

Um den Entwicklungsstand einer Technologie ermitteln zu können, muss das Reifemodell mit den Informationen und Daten zu der jeweiligen Technologie parametrisiert werden. Anschließend kann das Reifemodell dazu verwendet werden, die Technologiereife zu bestimmen. Das methodische Vorgehen hierfür ist in Abb. 4.6 dargestellt und besteht aus vier Schritten.

Inspiziert durch die TRL von MANKINS (1995) wurde ein Fragebogen³⁹ entwickelt, der allgemeingültig für Technologien für jede Reifegradstufe spezifische Fragestellungen enthält. Die formulierten Fragen lassen auf den Entwicklungsstand einer Technologie schließen. Im ersten Schritt ist dieser Fragebogen von den Technologieexperten auszufüllen und anschließend auszuwerten. Hierbei ist der Fragebogen um für die jeweils betrachtete Technologie spezifische Fragestellungen und Anforderungen zu erweitern. So sind bspw. sämtliche Parameter zu

³⁸ Der Begriff des *Lessons Learned* stammt aus dem Projektmanagement und beinhaltet u. a. das Sammeln, Bewerten und Verdichten von Erfahrungen in Projekten (PMI 2003).

³⁹ Der Fragebogen zur Bestimmung der Technologiereife ist im Anhang dieser Arbeit im Abschnitt A aufgeführt.

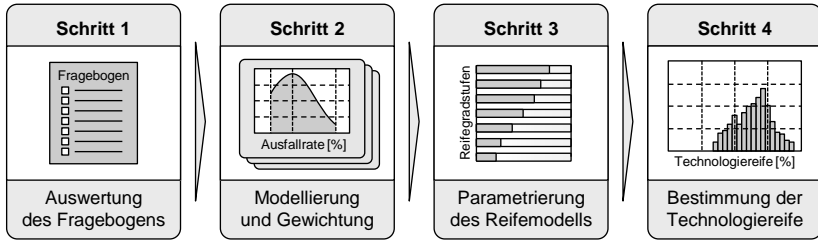


Abb. 4.6: Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung der Technologiereife

integrieren, die für die erfolgreiche Anwendung einer Technologie relevant sind. Da die spezifischen Fragestellungen und Anforderungen nicht allgemeingültig definierbar sind, müssen diese jeweils durch Experten identifiziert und festgelegt werden. Im zweiten Schritt sind die im Fragebogen enthaltenen qualitativen und quantitativen Kriterien unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 2.3.2 aufgeführten Möglichkeiten zu modellieren und innerhalb der jeweiligen Reifegradstufe zu gewichten. Außerdem müssen auch die Reifegradstufen untereinander gewichtet werden, um in Abhängigkeit der Unternehmensziele und der jeweils betrachteten Technologie den richtigen Schwerpunkt zu setzen. Im dritten Schritt ist das im vorherigen Abschnitt beschriebene Reifemodell mit den Kriterien zu parametrisieren und der minimale Reife-Fortschritt für die nächst höhere Stufe einzustellen, wobei auch der Grenzwert für die Gesamtreife der Technologie festzulegen ist. Anschließend kann im vierten Schritt die Technologiereife berechnet werden. Hierzu werden die quantitativen Kriterien sowie die zu beantwortenden Fragen innerhalb einer Reifegradstufe gewichtet und prozentual zusammengeführt. Auf diese Weise werden qualitative Fragestellungen quantifiziert. Da eine Vielzahl der Kriterien des Fragebogens unsicher sind und nicht sicher prognostiziert werden können, liegt das Ergebnis i. d. R. in Form eines wahrscheinlichkeitsverteilten Histogramms⁴⁰ vor, dessen Streuungsbreite Rückschlüsse auf die Unsicherheit bei der Anwendung einer Technologie zulässt. Die Technologiereife M_T ergibt sich aus den Reife-Fortschritten $m_{TRL,i}$ der sieben Reifegradstufen i . Die Gewichtung der Reifegradstufen bezüglich ihres Einflusses auf die Realisierung der Technologie erfolgt durch den Gewichtungs-

⁴⁰ Bei einer analytischen Berechnung liegt das Ergebnis in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung vor. Unter Zuhilfenahme der sog. Monte-Carlo-Simulation erhält man in guter Näherung eine numerische Lösung in Form eines Histogramms, das sich bei ausreichenden Ziehungen der analytischen Lösung annähert. Für die genaue Funktionsweise der Monte-Carlo-Simulation sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (MÜLLER-GRONBACH ET AL. 2012).

faktor $q_{M,i}$. Die Gesamtreife M_T einer Technologie berechnet sich anschließend aus den Differenzen der Reifewerte der einzelnen Stufen $m_{TRL,i}$ zum jeweiligen Reifemaximum (100%) nach folgender Gleichung:

$$M_T = 1 - \left[\sum_{i=1}^7 (1 - m_{TRL,i}) \cdot q_{M,i} \right] \quad (4.1)$$

Die Berechnung der Reife der Technologiekette erfolgt analog zum Vorgehen bei einer einzelnen Technologien. Hierzu werden zunächst die Reife-Fortschritte $m_{TRL,i,j}$ in den einzelnen Reifegradstufen i der n in der Technologieketten enthaltenen Technologien nach folgender Formel ermittelt:

$$m_{TRL,TK,i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n m_{TRL,i,j} \quad (4.2)$$

Anschließend leitet sich die Gesamtreife M_{TK} der Technologiekette aus den Reife-Fortschritten der sieben Reifegradstufen der Technologiekette $m_{TRL,TK,i}$ ab. Die Reifegradstufen werden dabei wiederum mit dem unternehmens- und technologiespezifischen Gewichtungsfaktor $q_{M,i}$ quantifiziert. Die Gesamtreife M_{TK} der Technologiekette entspricht, wie auch die Reife einer einzelnen Technologie, einem Histogramm, das Rückschlüsse auf die mit der Technologiekette verbundene Unsicherheit zulässt, und wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$M_{TK} = 1 - \left[\sum_{i=1}^7 (1 - m_{TRL,TK,i}) \cdot q_{M,i} \right] \quad (4.3)$$

Je größer die Streubreite des Histogramms der Reife einer Technologiekette ist, desto höher ist das mit ihr verbundene Risiko. Der Mittelwert dieser Verteilung gibt grundsätzlich einen Eindruck über den Entwicklungsstand der Technologiekette, für belastbare Aussagen müssen allerdings die einzelnen Reifegradstufen betrachtet werden. Hierdurch lassen sich Engpässe bei der Entwicklung einer Technologie identifizieren. Außerdem kann bei regelmäßiger Berechnung die Entwicklungsgeschwindigkeit ermittelt und so auf den Zeitpunkt für den zukünftigen Serieneinsatz geschlossen werden. Darüber hinaus können beim mehrfachen Einsatz des Modells im Sinne eines *Lessons learned* unternehmens- und technologiespezifisch wichtige Reifegradstufen bei der Entwicklung sowohl einer einzelnen Technologie als auch einer kompletten Technologiekette identifiziert werden.

Detaillierte Informationen zur Berechnung der Technologiereife anhand des Reifemodells finden sich bei REINHART & SCHINDLER (2010a, b). Die Bestimmung der Reife von Technologieketten wird bei REINHART & SCHINDLER (2012) sowie REINHART ET AL. (2011a) erläutert.

4.4 Wirtschaftlichkeit

4.4.1 Allgemeines

Da in der wissenschaftlichen Literatur ausreichend zweckmäßige Methoden zur Verfügung stehen, um die Wirtschaftlichkeit von Technologien aus verschiedenen Sichtweisen zu bestimmen, müssen hierfür keine Modelle und Methoden neu entwickelt werden. Der nachfolgende Abschnitt 4.4.2 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Modelle und Verfahren. Außerdem wird die Logik zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Technologieketten erläutert. Hierzu werden in Abschnitt 4.4.2.1 die in dieser Arbeit verwendeten Modelle zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit vorgestellt. Anschließend erläutert Abschnitt 4.4.2.2 die Methode zur Verknüpfung der Modelle sowie zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Technologieketten.

4.4.2 Bestimmung der Wirtschaftlichkeit

4.4.2.1 Modell zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit

In wissenschaftlichen Literatur existieren zahlreiche Methoden, die Wirtschaftlichkeit einer Technologiekette zu bestimmen. Diese Methoden betrachten die Wirtschaftlichkeit allerdings aus unterschiedlichen Sichtweisen und unterscheiden sich daher teilweise in ihrer Zielgröße. Wie Abb. 4.7 zeigt, wird die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich durch den Transformationsprozess bestimmt und stellt i. A. die Zielerfüllung dem Mitteleinsatz gegenüber (ZANGEMEISTER 2000). Nach WEBER & KABST (2009) kann die Wirtschaftlichkeit W als das Verhältnis von Leistung bzw. Output O zu Kosten⁴¹ bzw. Input I angesehen werden und ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$W = \frac{O}{I} \quad (4.4)$$

⁴¹ Aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellen Kosten den bewerteten sachzielbezogenen Verzehr und Leistungen die bewerteten sachzielbezogenen Erstellungen von Wirtschaftsgütern innerhalb einer Rechnungsperiode dar (MUMM 2008).

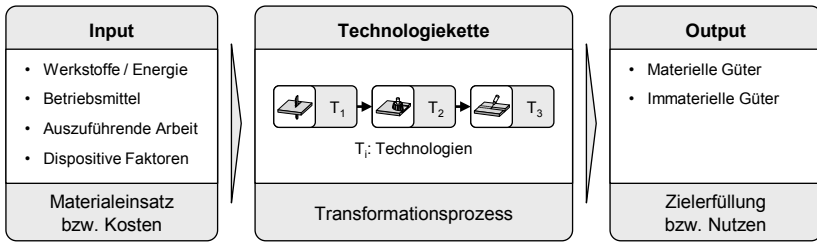


Abb. 4.7: Transformationsprozess durch eine Technologiekette zur Leistungserstellung in Anlehnung an WÖHE & DÖRING (2010) und SPUR (1998)

Hierbei setzt sich der Input I aus den elementaren Produktionsfaktoren⁴² sowie den für die Leitung, die Planung und die Organisation notwendigen dispositiven Faktoren zusammen. Der Output O beinhaltet nach WOLF ET AL. (2010) die durch den Transformationsprozess erzielte Wertschöpfung in Form von Produkten (materielle Güter) oder Dienstleistungen (immaterielle Güter). Ungewollter Output, wie bspw. Emissionen oder produzierter Ausschuss, werden hierbei nicht mit einbezogen⁴³. Das wesentliche Ziel eines Unternehmens ist es, das Verhältnis von Output zu Input zu maximieren und dadurch die Effizienz zu steigern. Aus Sicht der Produktion kann dieses Ziel v. a. dann erreicht werden, wenn die Kosten, d. h. der Input I , reduziert werden (WEBER & KABST 2009). Um die vollständigen für das Unternehmen anfallenden Kosten durch den Einsatz einer Technologiekette beurteilen zu können, sind die Selbstkosten zu betrachten. Diese setzen sich nach VOEGELE & SOMMER (2012) aus den Herstell- und den Sondereinzelkosten des Vertriebs, den Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkosten sowie den Entwicklungskosten zusammen.

Da in dieser Arbeit schwerpunktmäßig Technologieketten für die Herstellung eines konkreten Produktes⁴⁴ miteinander verglichen werden sollen, beschränkt sich die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Alternative in Anlehnung an die VDI 2225 auf die durch sie verursachten Kosten (VDI 2225 1998). Diese Kosten teilen sich im Wesentlichen in für den Einsatz einer Technologie not-

⁴² Zu den elementaren Produktionsfaktoren zählen i. W. die benötigten Materialien und Energien, die eingesetzten Betriebsmittel sowie der Arbeitereinsatz (WÖHE & DÖRING 2010).

⁴³ In Spezialfällen kann der Umgang mit ungewolltem Output durch die Berücksichtigung als benötigter Input abgebildet werden (WEBER & KABST 2009). So sind bspw. mit der Entsorgung von toxischen Abfällen i. d. R. erhebliche monetäre Aufwände verbunden.

⁴⁴ Dieser Arbeit liegt die Annahme zugrunde, dass die zur Auswahl stehenden Technologieketten grundsätzlich in der Lage sind, das Produkt herzustellen, d. h. die erforderliche Leistung zu erbringen.

wendigen Entwicklungskosten und die beim Einsatz anfallenden Herstellkosten für das zu fertigende Produkt auf (AURICH ET AL. 2009). Die *Herstellkosten*⁴⁵ stellen diejenigen Kosten dar, die während des Betriebs einer Technologiekette (Transformationsprozess) für die Produktion einer festzulegenden Stückzahl anfallen. Die *Entwicklungskosten* repräsentieren diejenigen Kosten, die zur Befähigung einer Technologiekette für den Leistungserstellungsprozess notwendig sind. Beispiele hierfür sind Kosten für zu beschaffende Gerätschaften, Maschinen und Systeme oder zu leistende Entwicklungsumfänge in Form von Personal- und Dienstleistungskosten.

Die Ermittlung der Herstellkosten lehnt sich grundsätzlich an die in Abb. 4.8 dargestellte Struktur der Kostenträgerrechnung nach VOEGELE & SOMMER (2012) an. Demnach werden die Herstellkosten *HK* weiter in Material- und Fertigungskosten unterteilt. Die Materialkosten *MK* setzen sich aus den Materialeinzelkosten *MEK* und den Materialgemeinkosten *MGK* sowie den Kosten für Zulieferteile K_{Supply} und Beschaffungsgemeinkosten *BGK* zusammen. Die Fertigungskosten *FK* ergeben sich aus den Fertigungseinzel- *FEK* und -gemeinkosten⁴⁶ *FGK*.



Abb. 4.8: Systematisierung der Herstellkosten nach VOEGELE & SOMMER (2012)

Da insbesondere bei noch nicht im Unternehmen verfügbaren und neuen Technologien das Abschätzen der Herstellkosten schwierig ist (SCHÖNING 2006), werden einige Anpassungen vorgenommen, die nachfolgend erläutert werden. Für den Vergleich von Technologieketten ist v. a. die Betrachtung der Herstellstückkos-

⁴⁵ Die Herstellkosten sind nicht mit den Herstellungskosten zu verwechseln. Der Begriff der *Herstellungskosten* stammt aus dem Steuer- und Bilanzrecht und beinhaltet Verwaltungskosten, nicht aber die kalkulatorischen Kosten (OSSADNIK 2008).

⁴⁶ Während Einzelkosten (z. B. Kosten für Spezialwerkzeuge oder Akkordlöhne) dem Kostenträger direkt zugerechnet werden können, ist dies bei Gemeinkosten (z. B. Mietkosten für das Fabrikgebäude oder Gehälter der indirekten Bereiche) nicht möglich (DYCKHOFF & SPENGLER 2010).

ten HSK zielführend (REINHART ET AL. 2011c), welche die Herstellkosten in Abhängigkeit der zu produzierenden Menge auf das Produkt umlegen. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit nur Einzelkosten betrachtet, welche direkt durch die Technologiekette verursacht werden (OSSADNIK 2008).

Abb. 4.9 zeigt die schematische Übersicht des Modells zur Bestimmung der Herstellkosten und die berücksichtigten Kostenarten und Effekte. In dem Modell werden die Herstellstückkosten HSK in Analogie zur Struktur der Kostenträgerrechnung nach VOEGELE & SOMMER (2012) weiter in Materialstückkosten MSK und Fertigungsstückkosten FSK unterteilt. In den Materialstückkosten MSK sind v. a. die Kosten für die eingesetzten Werk- und Hilfsstoffe $K_{Material}$ sowie die Kosten für die bereits stattgefundenen Wertschöpfung der Zuliefer- und Rohteile $K_{ValueAdd}$ enthalten. Die Materialstückkosten MSK_{TK} können in Abhängigkeit der eingesetzten Technologien und den hierfür notwendigen Hilfsstoffen nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$MSK_{TK} = K_{Material} + K_{ValueAdd} \tag{4.5}$$

In die Fertigungsstückkosten FSK fließen der Technologiestundensatz TSS sowie die enthaltenen Personalkosten auf Basis von Bedienverhältnissen f_{Work} und Mitarbeiterstundensätzen MSS für die Fertigungszeit t_f ein:

$$FSK = t_F \cdot [TSS + MSS \cdot f_{Work}] \tag{4.6}$$

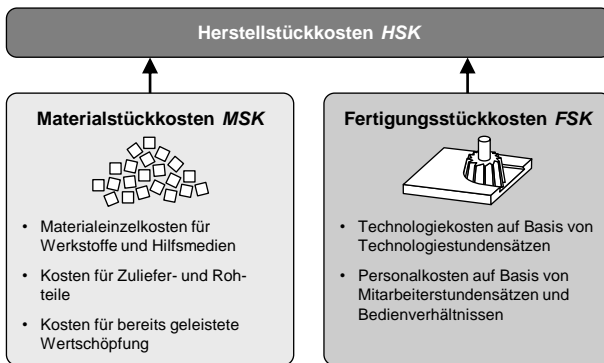


Abb. 4.9: Übersicht des Modells zur Bestimmung der Herstellkosten

Der Technologiestundensatz TSS wird durch eine für die strategische Technologieplanung geeignete Form des Maschinenstundensatzes⁴⁷ ermittelt, wobei in Abhängigkeit der verfügbaren Informationen gewisse Kostenarten, welche bspw. wenig signifikant sind und noch nicht abgeschätzt werden können, nicht in Betrachtung gezogen werden. Im Rahmen der Festlegung des TSS werden die maschinenabhängigen Kostenarten durch Experten abgeschätzt und betriebsmittelunabhängig modelliert. Die Berechnung der durch die n Technologien der Technologiekette verursachten Fertigungsstückkosten FSK_{TK} ergibt sich aus nachfolgender Gleichung:

$$FSK_{TK} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot [TSS_i + MSS_i \cdot f_{WorK,i}] \quad (4.7)$$

WALLENTOWITZ ET AL. (2009) empfehlen zur Ermittlung der durch den Einsatz von Technologien verursachten Herstellstückkosten, sog. Lern- und Erfahrungseffekte zu integrieren, die insbesondere bei dem Einsatz neuer Technologien zu erwarten sind (SCHÖNING 2006). Für die Modellierung ist die Verwendung der Erfahrungskurve zielführend, welche der Hypothese unterliegt, dass sich die Herstellstückkosten mit einer Verdoppelung der Produktionsmenge aufgrund von Erfahrungen um einen bestimmten Lernfaktor α_L reduzieren (EWERT & WAGENHOFER 2008; WESTKÄMPER 2006). Diese Erfahrungen resultieren zum einen aus statischen Effekten, wie bspw. die Fixkostendegression durch das Ansteigen der Stückzahl, und zum anderen aus dynamischen Effekten, wie z. B. Rationalisierungen. Die Erfahrungskurve bildet diesen exponentiellen Zusammenhang vereinfacht ab, wobei angenommen wird, dass der Lernfaktor α_L konstant bleibt (WALLENTOWITZ ET AL. 2009). Demnach berechnen sich die Herstellstückkosten $HSK_{TK}(x)$ für das x -te Produkt zu:

$$HSK_{TK}(x) = [MSK_{TK}(1) + FSK_{TK}(1)] \cdot [1 - \alpha_L]^{\frac{\log(x)}{\log(2)}} \quad (4.8)$$

Hierbei entsprechen $MSK_{TK}(1)$ und $FSK_{TK}(1)$ jeweils den Kosten für das erste produzierte Produkt. Beim Einsatz der Erfahrungskurve und der TSS ist zu gewährleisten, dass Mengeneffekte nicht zweifach in die Berechnung einfließen, da sowohl die Erfahrungskurve, als auch der TSS abhängig von der jeweils produzierten Stückzahl sind.

⁴⁷ Beim Maschinenstundensatz werden die maschinenabhängigen Kosten ermittelt, wobei die Fertigungsgemeinkosten in Abhängigkeit der Maschinenlaufstunden umgelegt werden. Hierbei werden i. d. R. kalkulatorische Abschreibungen und Zinsen, Energie- und Betriebsstoffkosten, Instandhaltungs- und Werkzeugkosten sowie sonstige Kosten berücksichtigt. Ansätze für die Berechnung von Maschinenstundensätzen finden sich bei GÖTZE (2010) oder MUMM (2008).

Das *Modell der Entwicklungskosten* dient dazu, die für den Einsatz einer Technologiekette notwendigen Aufwände für Entwicklungsumfänge abzuschätzen, die v. a. durch den Trend sich verkürzender Technologielebenszyklen stark ins Gewicht fallen (DRESCHER ET AL. 2011). Wie Abb. 4.10 zeigt, orientiert sich das Modell grundsätzlich an dem in Abschnitt 4.3.4 eingeführten Reifemodell.

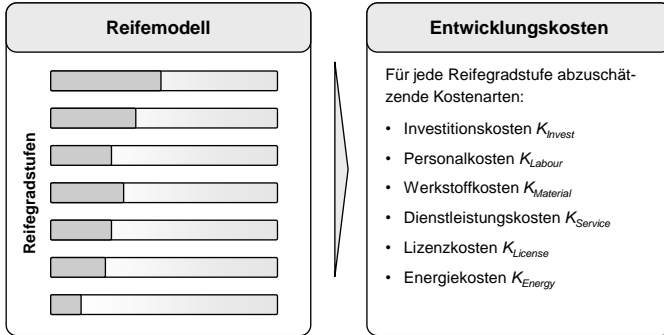


Abb. 4.10: Abschätzung der Entwicklungskosten für eine Technologiekette auf Basis des Reifemodells

Die Abschätzung der Entwicklungskosten kann teilweise durch die Prozesskostenrechnung⁴⁸ ermöglicht werden (VOEGELE & SOMMER 2012). Allerdings kann für jede Reifegradstufe des Reifemodells kein allgemeingültiger, aber trotzdem technologieunabhängiger Prozess definiert werden. Aus diesem Grund werden in Abhängigkeit der Reifebewertung die für jede Reifegradstufe noch ausstehenden Entwicklungskosten nur grob abgeschätzt⁴⁹. Hierbei ist es zielführend, die jeweiligen Kostenarten zu kategorisieren (HEESEN & KUCHENBUCH 2010). Nachfolgend werden die im Modell zur Bestimmung der Entwicklungskosten verwendeten Kategorien kurz erläutert:

- *Investitionskosten* K_{Invest} : Die Entwicklung einer Technologie für den Serieneinsatz verursacht z. T. erhebliche Investitionskosten, da je nach Entwicklungsstand neue Maschinenkomponenten, Versuchsteile oder Demonstartoren aufgebaut und beschafft werden müssen (WAGNER & THIELER 2007).

⁴⁸ Der Einsatz der Prozesskostenrechnung zur Abschätzung von Entwicklungskosten unterstellt, dass es im Entwicklungsbereich Vorgänge gibt, die regelmäßig durchlaufen werden und in Form eines Prozesses definiert werden können.

⁴⁹ Abb. 4.10 dient in diesem Zusammenhang als Checkliste zur Abschätzung der entstehenden Entwicklungskosten.

- *Personalkosten* K_{Labour} : Die in die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eingebundenen Mitarbeiter, wie Versuchingenieure und Techniker, sind anhand der durch ihre Arbeit verursachten Personalkosten zu berücksichtigen (AHSEN ET AL. 2010). Die Personalkosten werden dabei anhand der unterschiedlichen Mitarbeiterstundensätze und der notwendigen Entwicklungszeit⁵⁰ kostenmäßig ermittelt. Hierbei werden in erster Linie Löhne berücksichtigt (OSSADNIK 2008).
- *Werkstoffkosten* $K_{Material}$: Für die Durchführung von Experimenten und Tests, bspw. für die Produktion von Musterteilen, fallen Kosten für Materialien und Werkstoffe an (EHRENSPIEL ET AL. 1998). Diese setzen sich aus den benötigten Verbrauchsgütern, wie Roh-, Hilfs- oder Betriebsstoffen zusammen (GÖTZE 2010).
- *Dienstleistungskosten* $K_{Service}$: Um bei Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten externes Know-how einzubeziehen und sich auf die Kernkompetenzen konzentrieren zu können, werden ein Teil der Entwicklungsumfänge i. d. R. an Beratungen und Dienstleister ausgelagert. Die dafür entstehenden Kosten gilt es bei der Bestimmung der Entwicklungskosten zu berücksichtigen (BERRET 2009).
- *Lizenzkosten* $K_{License}$: Durch den Einsatz von für die Entwicklung notwendigen Entwicklungswerkzeugen, wie bspw. Mess- und Simulationstools, fallen i. d. R. Gebühren für Software-Lizenzen an. Außerdem können durch den Erwerb einer Lizenz auf Schutzrechte Dritter oder eines Patents in bestimmten Reifegradstufen Forschungs- und Entwicklungskosten eingesparrt werden (ABELE ET AL. 2011; GASSMANN & BADER 2011; GERSTEIN 2000).
- *Energiekosten* K_{Energy} : Ebenso wie die Werkstoffkosten fallen bei dem Aufbau und Betrieb von Maschinen und Anlagen, bspw. bei den durchzuführenden Versuchen, Energiekosten an, die es im Rahmen der Bestimmung der Entwicklungskosten abzuschätzen gilt (GEISSDÖRFER 2009).

Um die Entwicklungskosten einer Technologie zu bestimmen, ist es zielführend, diese nicht pauschal, sondern für die oben aufgeführten Kostenarten entsprechend der jeweiligen Reifegradstufe abzuschätzen (AHSEN ET AL. 2010). Die gesamten Entwicklungskosten einer Technologie EK_T ergeben sich aus folgender Formel:

⁵⁰ VOEGELE & SOMMER (2012) schlagen vor, die Zeit für Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Monaten abzuschätzen.

$$EK_T = \sum_{i=1}^7 (K_{Labour,i} + K_{Material,i} + K_{Energy,i} + K_{Invest,i} + K_{Service,i} + K_{License,i}) \quad (4.9)$$

Die Entwicklungskosten der Technologiekette EK_{TK} ergeben sich durch Summation der Entwicklungskosten $EK_{T,i}$ der in ihr enthaltenen n Technologien nach folgender Gleichung:

$$EK_{TK} = \sum_{i=1}^n EK_{T,i} \quad (4.10)$$

4.4.2.2 Übersicht über die Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit

In den vorherigen Abschnitten wurde erläutert, dass die Wirtschaftlichkeit einer Technologiekette anhand der anfallenden Entwicklungs- und Herstellstückkosten bestimmt wird. Das methodische Vorgehen zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit ist in Abb. 4.11 dargestellt und besteht aus vier Schritten.

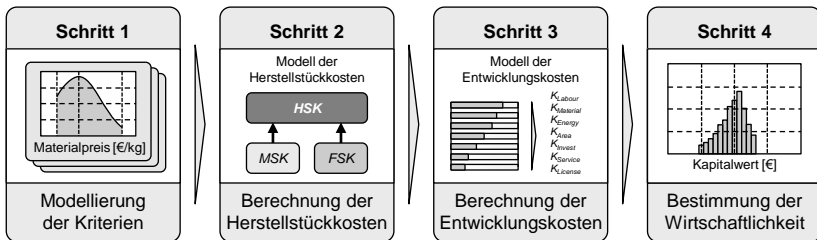


Abb. 4.11: Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit

Im ersten Schritt sind in Analogie zum Vorgehen zur Bestimmung der Technologiereife (siehe Abschnitt 4.3.4) die qualitativen und quantitativen Kriterien zu modellieren. Um die in die Bestimmung der Herstellstückkosten sowie die Ermittlung der Entwicklungskosten eingehenden Kriterien abzubilden, kann auf die in Abschnitt 2.3.2 aufgeführten Modellierungsarten zurückgegriffen werden. Da der Entwicklungsprozess von erheblichen Unsicherheiten gekennzeichnet ist

(WALLENTOWITZ ET AL. 2009), sind diese zu integrieren. Im zweiten Schritt sind zunächst die Herstellstückkosten der Technologiekette zu ermitteln, bevor im dritten Schritt die Abschätzung der Entwicklungskosten der Technologiekette stattfindet. Im vierten Schritt gilt es, die zuvor bestimmten Kosten für eine Technologiekette zusammenzuführen und auf diese Weise die Wirtschaftlichkeit der Technologiekette zu bestimmen. Einnahmen müssen aus den in Abschnitt 4.4.2.1 aufgeführten Gründen nicht betrachtet werden. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass alle durch die Technologiekettentalternativen hergestellten Produkte in gleichen Stückzahlen absetzbar sind und zu dem selben Preis am Markt veräußert werden können. Da sowohl Entwicklungs- als auch Herstellstückkosten über einen längeren Zeitraum hinweg anfallen (WAGNER & THIELER 2007), ist es zielführend, die jeweils anfallenden Kosten über den jeweiligen Zeitraum hinweg abzubilden. Eine Zusammenstellung über dazu benötigte sog. dynamische Verfahren der Investitionsrechnung liefern VOEGELE & SOMMER (2012), WÖHE & DÖRING (2010) oder DAUM ET AL. (2010). Diese eignen sich zur Abbildung der vorliegenden Problemstellung besonders, da sie bei der Berechnung explizit mehrere Perioden berücksichtigen (COTTIN & DÖHLER 2009). Die dynamischen Verfahren lassen sich mit den Verfahren unter Unsicherheit kombinieren (KREBS 2012). Für den vorliegenden Fall wird die Kapitalwertmethode gewählt, da diese in der industriellen Praxis etabliert ist. Grundsätzlich eignen sich aber auch weitere Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung.

Der Kapitalwert⁵¹ NPV einer Investition I_0 , die zum Zeitpunkt $t = 0$ zu tätigen ist, ergibt sich nach WÖHE & DÖRING (2010) aus der Summe der Einzahlungen E_t und der Auszahlungen A_t . Diese werden auf den gegenwärtigen Zeitpunkt durch den Kalkulationszinssatz i_{NPV} über die Betrachtungsperiode T diskontiert. Dabei wird der Kalkulationszinssatz i_{NPV} durch die Unternehmensführung festgelegt und orientiert sich i. d. R. an der Rentabilität oder am Return on Investment (ROI) (WÖHE & DÖRING 2010). Der Kapitalwert NPV wird nach folgender Formel berechnet:

$$NPV = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{E_t + A_t}{(1 + i_{NPV})^t} \quad (4.11)$$

Ein Kapitalwert $NPV \geq 0$ bedeutet, dass sich die getätigte Investition aufgrund der Rückflüsse innerhalb des betrachteten Zeitraums amortisiert. In diesem positiven Fall erwirtschaftet die Investition einen über die Amortisation und die kalkulatorischen Zinsen hinaus gehenden Gewinn. Bei einem Kapi-

⁵¹ Der Kapitalwert wird im Englischen als Net Present Value (NPV) bezeichnet (WÖHE & DÖRING 2010).

talwert $NPV < 0$ lohnt sich die Investition nicht. Da die Technologieketten in dieser Arbeit anhand der durch sie verursachten Kosten beurteilt werden, d. h. keine Einnahmen berücksichtigt werden, resultiert ein negativer Kapitalwert. Daher ist diejenige Alternative vorzuziehen, welche den höheren⁵² Kapitalwert aufweist. Für die Berechnung des Kapitalwertes einer Technologiekette NPV_{TK} sind die abgeschätzten Entwicklungskosten $EK_{TK,t}$ sowie die Herstellstückkosten $HSK_{TK,t}$ mit ihren jeweiligen Eintrittszeitpunkten t über den Betrachtungszeitraum T mit dem Kalkulationszinssatz $i_{NPV,TK}$ zu diskontieren. Dazu müssen die Herstellstückkosten mit den für die Perioden t prognostizierten Stückzahlen u_t multipliziert werden. Der Kapitalwert einer Technologiekette NPV_{TK} ergibt sich demnach nach folgender Gleichung:

$$NPV_{TK} = \sum_{t=1}^T \frac{EK_{TK,t} + (HSK_{TK,t} \cdot u_t)}{(1 + i_{NPV,TK})^t} \quad (4.12)$$

Da eine Vielzahl der modellierten quantitativen und qualitativen Kriterien unsicher sind, liegt der Kapitalwert der Technologiekette am Ende der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit in Form einer wahrscheinlichkeitsverteilten, diskreten Verteilung, bspw. in Form eines Histogramms⁵³, vor.

Weitere Informationen zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Technologien und Technologieketten sowie zur Abbildung von Unsicherheiten finden sich bei REINHART ET AL. (2011b, c).

4.5 Technologiepotenzial

4.5.1 Allgemeines

Das Technologiepotenzial wird in der wissenschaftlichen Literatur zwar vielfach thematisiert (siehe z. B. ARDILIO & LAIB (2008); GOMERINGER (2007); SCHÖNING (2006); PFEIFFER & DÖGL (1986)), eine allgemeingültige und einheitliche Definition existiert jedoch nicht. Wie in Abschnitt 1.2 bereits beschrieben

⁵² Im Sinne der Wirtschaftlichkeit ist grundsätzlich nachzuweisen, dass überhaupt ein positiver Kapitalwert existiert, da die getätigte Investition ansonsten nicht lohnend ist. Dies wird in der vorliegenden Arbeit zur strategischen Planung von Technologieketten vorausgesetzt.

⁵³ An dieser Stelle soll darauf verwiesen werden, dass die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten grundsätzlich auch für deterministische Berechnungen ausgelegt ist. Auch hier können bspw. unter Verwendung der Szenario-Analyse sog. Best- und Worst-Case-Szenarien aufgestellt und abgedeckt werden (BAUM ET AL. 2013). Die Integration von wahrscheinlichkeitsverteilten Kriterien erfolgt in dieser Arbeit aus dem Grund, dass hiermit sämtliche vorstellbaren Szenarien darstellbar sind.

werden im Rahmen dieser Arbeit unter dem Begriff des Technologiepotenzials diejenigen Eigenschaften einer Technologie verstanden, die einen wesentlichen technologischen Nutzen, wie bspw. eine Steigerung der Flexibilität bei der Herstellung unterschiedlicher Stückzahlen oder Werkstoffe, bei deren Anwendung bringen. Indirekte Potenziale, wie die Erschließung neuer Märkte, werden explizit nicht betrachtet, da diese Vorteile im Rahmen der Formulierung der Technologiestrategie zu berücksichtigen sind (SCHULTE-GEHRMANN ET AL. 2011), auf deren Ergebnisse diese Arbeit aufbaut. Zur Bestimmung des Technologiepotenzials kann z. T. auf Modelle und Methoden der wissenschaftlichen Literatur zurückgegriffen werden, die es allerdings auf die Betrachtung von Produktionstechnologien und Technologieketten anzupassen gilt. Der nachfolgende Abschnitt 4.5.2 gibt daher einen Überblick über die Bestimmung des Technologiepotenzials von Technologieketten. Hierzu werden in Abschnitt 4.5.2.1 die in dieser Arbeit verwendeten Modelle zur Bestimmung der Technologiepotenzials im Detail vorgestellt und deren methodische Anwendung in Abschnitt 4.5.2.2 erläutert.

4.5.2 Bestimmung des Technologiepotenzials

4.5.2.1 Modell zur Bestimmung des Technologiepotenzials

Wie in Abschnitt 1.2 eingeführt, beschreibt das Technologiepotenzial⁵⁴ diejenigen Eigenschaften einer Technologie, welche einen technologischen Nutzen durch deren Anwendung erwarten lassen, und stellt somit ein Maß der Attraktivität einer Technologie für ein Unternehmen dar (ARDILIO & LAIB 2008; PFEIFFER & DÖGL 1986). Nach GERSTEIN (2000) ist das Technologiepotenzial ein wesentlicher Faktor zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.

SCHÖNING (2006) bestimmt das Technologiepotenzial im Wesentlichen auf Basis des Nutzenpotenzials und des Marktpotenzials. Das *Nutzenpotenzial* umfasst den erzielbaren Mehrwert der Technologie sowohl für den Anbieter als auch den Anwender. Das *Marktpotenzial* beschreibt den durch eine Technologie erzielbaren Cash-Flow. Aus Sicht dieser Arbeit ist das Technologiepotenzial dem Nutzenpotenzial nach SCHÖNING (2006) gleichzusetzen, wobei die Anwendung der Technologie im Vordergrund steht. Durch die Erschließung des Technologiepotenzials während des Einsatzes können produzierende Unternehmen v. a. Kostenvorteile und Leistungssteigerungen erzielen (SCHÖNING 2006;

⁵⁴ Nach WERMKE ET AL. (2009) beschreibt ein Potenzial grundsätzlich die Gesamtheit aller vorhandenen und verfügbaren Mittel, Möglichkeiten, Fähigkeiten und Energien, d. h. sämtliche Optionen, die theoretisch abrufbar sind.

PFEIFFER & DÖGL 1986). Da die Reduzierung von Durchlaufzeiten und die damit einhergehende Erschließung von Kostenvorteilen, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, bereits im Rahmen der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit abgedeckt werden, fokussiert das Bewertungskriterium des Technologiepotenzials die technologische Leistungsfähigkeit. Aus diesem Grund ist die Verwendung der in der wissenschaftlichen Literatur verfügbaren Ansätze stark eingeschränkt. Die meisten Methoden leiten das Technologiepotenzial aus dem Markt ab und konzentrieren sich auf die Betrachtung von Produkten (ARDILIO & LAIB 2008; PELZER 1999; SCHMITZ 1996).

Die Bestimmung des Technologiepotenzials erfolgt in dieser Arbeit unabhängig vom Markt anhand definierter Parameter für die technologische Leistungsfähigkeit, wie sie WALLENTOWITZ ET AL. (2009) und WIBE (2004) vorschlagen. Die sog. technologischen Leistungsparameter charakterisieren und beschreiben das Leistungsvermögen von Technologien und können, wie Abb. 4.12 schematisch zeigt, als Funktion der Zeit in Form einer S-Kurve abgebildet werden (ALISCH ET AL. 2010; GRAWATSCH 2005).

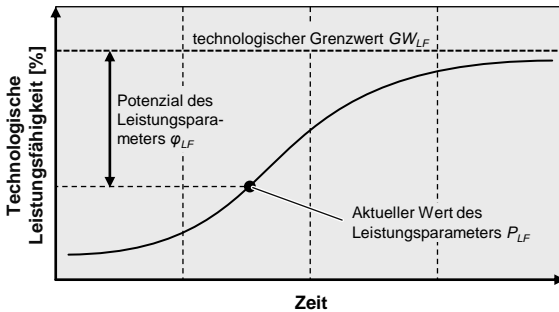


Abb. 4.12: Bestimmung des Technologiepotenzials anhand technologischer Leistungsparameter in Anlehnung an WALLENTOWITZ ET AL. (2009)

Nach HÖCHERL (2000) ergibt sich das Potenzial eines Leistungsparameters φ_{LF} als die Differenz der aktuellen Position eines Leistungsparameters P_{LF} auf seiner S-Kurve zur technologischen Grenze GW_{LF} und wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\varphi_{LF} = GW_{LF} - P_{LF} \quad (4.13)$$

Die Bestimmung des Technologiepotenzials nach diesem Ansatz sollte sich aus Gründen der Komplexität auf die jeweils relevanten Leistungsparameter beschränken (WALLENTOWITZ ET AL. 2009; WARTBURG 2000). Nachfolgend sind

die Kategorien, in die sich die in dieser Arbeit betrachteten Leistungsparameter einteilen lassen, aufgeführt und kurz erläutert:

- *Flexibilität*: Die technologische Flexibilität ist ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl eines Produktionsverfahrens (WIENDAHL ET AL. 2009) und wird in unterschiedliche Flexibilitätsarten, die einen Rückschluss auf die Anwendungsbreite einer Technologie zulassen (PFEIFFER & DÖGL 1986), unterschieden (TONI & TONCHIA 1998). In dieser Arbeit werden schwerpunktmäßig die Stückzahlflexibilität⁵⁵, d. h. die Fähigkeit, die Ausbringungsmenge zu variieren (JACK & RATURI 2002), die Produktartenflexibilität⁵⁶, d. h. die Fähigkeit unterschiedliche Bauformen und Varianten herzustellen (SETHI & SETHI 1990), und die Materialflexibilität, d. h. die Möglichkeiten der Verarbeitung unterschiedlicher Werkstoffe (KOSTE & MALHORTA 1999), betrachtet.
- *Produktqualität*: Technologiespezifisch lassen sich eine Reihe von Eigenschaften des zu fertigenden Produktes und damit die Produktqualität⁵⁷ festlegen (SCHULZE & FRITZ 2010), was eine wesentliche Möglichkeit ist, die technologische Leistungsfähigkeit und damit die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu beeinflussen (SCHLOSKE & THIEME 2009). Die Produktqualität betrachtet daher die sog. primären und sekundären fertigungsbedingten Produkteigenschaften (KLOCKE ET AL. 2008). Die *primären* Produkteigenschaften sind für die Funktion des Bauteils erforderlich, wie bspw. die Einhaltung und Verbesserung der Maßhaltigkeit (NIEMANN ET AL. 2005). Die *sekundären* Produkteigenschaften repräsentieren zusätzliche Funktionen, wie bspw. das Korrosionsverhalten (HAUSCHILDT & STAUDT 1996).
- *Neue Produkteigenschaften*: Der Einsatz innovativer Technologieketten ermöglicht neben der Herstellung des betrachteten Produktes die Erzeugung vollkommen neuer sowohl primärer als auch sekundärer Produkteigenschaften (BULLINGER 1994). Diese zusätzliche Fähigkeiten werden in diesem Kriterium gebündelt. Bei der Bestimmung des Technologiepotenzials muss darauf geachtet werden, dass auch ein Mehrwert im Sinne des Kunden geschaffen wird, da die bloße Betrachtung der Verbesserung eines Leistungsparameters u. U. zu einer Technologieüberqualifikation führen kann (FALLBÖHMER 2000).

⁵⁵ In der wissenschaftlichen Literatur werden die Begriffe der Stückzahl-, der Mengen- und der Volumenflexibilität synonym verwendet (SCHELLMANN 2012; ABELE ET AL. 2008; AURICH ET AL. 2003).

⁵⁶ Die Produktartenflexibilität bezieht sich in dieser Arbeit vornehmlich auf die fertigen geometrischen Formen.

⁵⁷ Allgemein kann die Produktqualität als die Übereinstimmung von Leistungen mit den Ansprüchen der Kunden definiert werden (BENES & GROH 2010).

Das Technologiepotenzial einer Technologiekette ergibt sich letztendlich aus der normierten Summe der Potenziale der Leistungsparameter, welche die Technologiekette beschreiben. Die Relevanz und Auswahl der zu betrachtenden Leistungsparameter kann durch eine sog. Einflussmatrix⁵⁸ beurteilt und ermittelt werden (WALLENTOWITZ ET AL. 2009).

4.5.2.2 Übersicht über die Methode zur Bestimmung des Technologiepotenzials

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits die Verwendung von technologischen Leistungsparametern zur Abbildung des Technologiepotenzials beschrieben. Abb. 4.13 zeigt eine Übersicht der aus vier Schritten bestehenden Methode zur Bestimmung des Technologiepotenzials.

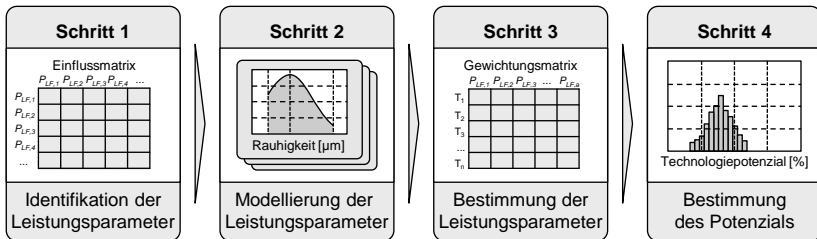


Abb. 4.13: Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung des Technologiepotenzials

Im ersten Schritt sind diejenigen Leistungsparameter zu identifizieren, welche die wesentlichen Eigenschaften und Fähigkeiten der Technologiekette im Bezug auf das zu fertigende Produkt beschreiben. Dabei erfolgt die Identifikation der relevanten Leistungsparameter der Technologiekette auf Basis der Eigenschaften der in ihr enthaltenen Technologien. Die wesentlichen Leistungsparameter einer Technologie werden in erster Linie durch informelle Quellen beschafft, wie bspw. Interviews mit unternehmensinternen und -externen Technologieexperten oder Netzwerken (SPATH ET AL. 2010; REGER 2001), und können sowohl quantitativer als auch qualitativer Natur sein. Aus der identifizierten Menge sind die für die Bestimmung des Technologiepotenzials relevanten Leistungsparameter,

⁵⁸ Die Einflussmatrix ist ein Instrument zur Visualisierung und Analyse von Zusammenhängen in komplexen Systemen (ULRICH & EPPINGER 2000). U. a. eignet sie sich zur Beurteilung der Art und Intensität von Beeinflussungen innerhalb der einzelnen Elemente eines Systems (LINDEMANN 2009).

bspw. durch die Verwendung einer Einflussmatrix (ULRICH & EPPINGER 2000), herauszufiltern. Im zweiten Schritt erfolgt die Modellierung der relevanten Leistungsparameter anhand der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Methoden. Anschließend beinhaltet der dritte Schritt deren Konkretisierung und Gewichtung⁵⁹. Im vierten Schritt werden die Leistungsparameter schließlich aggregiert, um daraus das Technologiepotenzial der Technologiekette auf Basis der in Abschnitt 4.5.2.1 beschriebenen Kategorien *Flexibilität*, *Produktqualität* und *Neue Produkteigenschaften* zu bestimmen.

Wie Abb. 4.14 zeigt, werden die relevanten a Leistungsparameter P_{LF} im Rahmen der Bestimmung des Technologiepotenzials den n in der Technologiekette enthaltenen Technologien zugeordnet und parametrisiert. Hierzu werden die jeweiligen Optimalwerte, d. h. die Werte der Leistungsparameter derjenigen Technologien, welche den geringsten Abstand zu den zugehörigen Grenzwerten GW_{LF} aufweisen, verwendet, um das Technologiepotenzial zu ermitteln. Das Potenzial der Technologiekette φ_{TK} ergibt sich aus der durch den Faktor $q_{TK,\varphi,i}$ gewichteten Summe der Differenzen der jeweiligen Potenziale der Leistungsparameter $P_{LF,i}$ zu ihren Grenzwerten $GW_{LF,i}$ bezogen auf ihre jeweiligen Grenzwerte $GW_{LF,i}$ und die Anzahl relevanter Leistungsparameter a nach folgender Formel:

$$\varphi_{TK} = \frac{1}{a} \cdot \sum_{i=1}^a q_{TK,\varphi,i} \cdot \frac{(GW_{LF,i} - P_{LF,i})}{GW_{LF,i}} \quad (4.14)$$

Technologie	Technologische Leistungsparameter P _{LF}				
	P _{LF,1}	P _{LF,2}	P _{LF,3}	...	P _{LF,a}
Technologie T₁	P _{LF,1,1}	P _{LF,2,1}	P _{LF,3,1}	...	P _{LF,a,1}
Technologie T₂	P _{LF,1,2}	P _{LF,2,2}	P _{LF,3,2}	...	P _{LF,a,2}
Technologie T₃	P _{LF,1,3}	P _{LF,2,3}	P _{LF,3,3}	...	P _{LF,a,2}
...
Technologie T_n	P _{LF,1,n}	P _{LF,2,n}	P _{LF,3,n}	...	P _{LF,a,n}

a: Anzahl technologischer Leistungsparameter
n: Anzahl an Technologien der Technologiekette

Abb. 4.14: Zuordnung der technologischen Leistungsparameter der Technologiekette zur Bestimmung des Technologiepotenzials in Anlehnung an WALLEN-TOWITZ ET AL. (2009)

⁵⁹ Zielführende Methoden hierfür sind die Nutzwertanalyse oder der AHP (SAATY 1990; BECHMANN 1978).

Das Technologiepotenzial der Technologiekette φ_{TK} liegt somit ohne Einheit in Form einer Prozentangabe vor. Aufgrund der modellierten quantitativen und qualitativen Kriterien, welche in das Technologiepotenzial der Technologiekette einfließen, liegt das Ergebnis in Form einer diskreten Verteilung vor. Dies kann bspw. durch ein wahrscheinlichkeitsverteiltes Histogramm, welches die Unsicherheiten, die den einzelnen Leistungsparametern und somit der finalen Zielgröße anhaften, darstellt.

4.6 Technische Machbarkeit

4.6.1 Allgemeines

Im Rahmen der Auswahl von Technologien und Technologieketten ist die Beurteilung der technischen bzw. fertigungstechnischen Machbarkeit obligatorisch, da sie die Produzierbarkeit der herzustellenden Produkte sichergestellt (TROMMER 2001). Die technische Machbarkeit⁶⁰ beschreibt nach SPUR & EVERSHEIM (1996) i. W. die reproduzierbare Realisierbarkeit des Produktes, indem gefordert wird, dass bei bekanntem Werkstoff eine vorgegebene Geometrie in der geforderten Qualität hergestellt werden muss (EVERSHEIM & KRAUSE 1996b). Da die Beurteilung der technischen Machbarkeit für eine spätere Umsetzung zwingend erforderlich ist, muss sie weiteren Untersuchungen, wie bspw. der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit, vorangestellt werden (TROMMER 2001). Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der technischen Machbarkeit im Rahmen der Zuordnung der Technologien zu den einzelnen Produktkomponenten sowie der Technologievorauswahl (FALBÖHMER 2000). Zur Bestimmung der technischen Machbarkeit durch den Einsatz von Technologieketten kann auf Modelle und Methoden der wissenschaftlichen Literatur zurückgegriffen werden. Hierbei müssen die Rahmenbedingungen der strategischen Technologieplanung beachtet werden, da die bestehenden Ansätze ausschließlich der operativen Technologieplanung zuzuordnen sind (siehe Abschnitt 2.7). Der nachfolgende Abschnitt 4.6.2 gibt daher einen Überblick über die Bestimmung der technischen Machbarkeit im Rahmen der strategischen Planung von Technologieketten. Die Abschnitte 4.6.2.1 und 4.6.2.2 führen die notwendigen Modelle ein und erläutern das Vorgehen und die Anwendung der in dieser Arbeit verwendeten Methode.

⁶⁰ Während sich die in Abschnitt 4.3 beschriebene Technologiereife auf den globalen Entwicklungsstand einer Technologie bezieht, ist die technische Machbarkeit auf den jeweiligen Anwendungsfall hin ausgelegt und daher produktspezifisch.

4.6.2 Bestimmung der technischen Machbarkeit

4.6.2.1 Modell zur Bestimmung der technischen Machbarkeit

Wie in Abschnitt 1.2.2.2 beschrieben, sind im Rahmen der strategischen Technologieplanung vorliegenden Informationen und Daten z. T. sehr vage und mit großen Unsicherheiten behaftet, da aus Sicht der strategischen Produktplanung die Produktkonzipierung im Vordergrund steht (GAUSEMEIER ET AL. 2012). Aus diesem Grund können die zu fertigenden Produkte in dieser Phase i. d. R. noch nicht detailliert konkretisiert werden (GAUSEMEIER ET AL. 2009). Das Produkt liegt hier konzeptionell in Form von textuellen Beschreibungen, Skizzen oder Schemata vor (SEIDEL 2005). So ist zwar die prinzipielle Geometrie des Produktes sowie seiner Komponenten und Baugruppen bereits bekannt, liegt aber noch nicht in einer ausreichend detaillierten Form vor. Qualitätsrelevante Anforderungen, wie Maß-, Lage- oder Formtoleranzen, sind i. d. R. nur an funktionsrelevanten Flächen definiert. Außerdem hat in dieser frühen Planungsphase u. U. noch keine Festlegung des Werkstoffs stattgefunden, sondern es stehen verschiedene Material- und Legierungsalternativen zur Auswahl.

In der wissenschaftlichen Literatur existieren eine Reihe von Ansätzen zur Bestimmung der technischen Machbarkeit⁶¹, die allerdings für die operative Planung ausgelegt wurden. Die Beurteilung der technischen Machbarkeit basiert in dieser Arbeit grundsätzlich auf dem Ansatz von FALLBÖHMER (2000). Der Soll-Ist-Abgleich von Anforderungen und Technologiefähigkeiten erfolgt im Gegensatz dazu anhand definierter Ausschlusskriterien⁶². Das Über- oder Unterschreiten dieser Kriterien führt dazu, dass die jeweilige Alternative nicht weiter für die Planung berücksichtigt wird (SCHRAFT ET AL. 1996). Da die Bestimmung der technischen Machbarkeit größtenteils auf vagen Planungsdaten basiert, werden die Ausschlusskriterien durch Unsicherheiten abgebildet.

Zur Ermittlung der technischen Machbarkeit im Rahmen der operativen Technologieplanung empfiehlt FALLBÖHMER (2000), sämtliche zu erschaffenden Produktmerkmale mit den Leistungsfähigkeiten, d. h. im weiteren Sinne den Leistungsparametern, der Technologien abzugleichen. Bei der strategischen Planung ist dies bei den meisten Parametern nicht möglich. Da die fertigungsrelevanten Produktmerkmale hier i. d. R. noch nicht konkretisiert sind (GAUSEMEIER ET AL. 2009), muss eine Fokussierung erfolgen.

⁶¹ Geeignete Ansätze zur Beurteilung der fertigungstechnischen Machbarkeit bieten z. B. FALLBÖHMER (2000), TROMMER (2001) und ESAWI & ASHBY (1998).

⁶² Ausschlusskriterien werden in der wissenschaftlichen Literatur auch als Tabu-, Negativ-, Muss- oder K. o.-Kriterien bezeichnet (SCHRAFT ET AL. 1996). Die Kriterien der Nutzwertanalyse stellen nach GÖTZE (2010) Ausschlusskriterien für Mindest- bzw. Höchstbedingungen dar, deren Erfüllung obligatorisch ist.

In dieser Arbeit werden zur Bestimmung der technischen Machbarkeit als Erweiterung des Ansatzes von (FALLBÖHMER 2000), der ausschließlich Produktanforderungen betrachtet, zwei weitere Kategorien eingeführt, in welche sich die zu beurteilenden Merkmale einordnen lassen. Wie Abb. 4.15 zeigt, sind im Rahmen der strategischen Technologieplanung neben den Produktmerkmalen auch Werkstoff- und Produktionsmerkmale zu berücksichtigen.

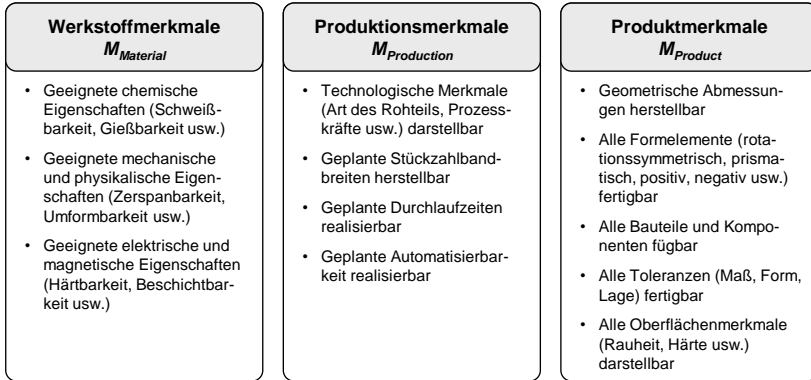


Abb. 4.15: Werkstoff-, Produktions- und Produktmerkmale zur Bestimmung der technischen Machbarkeit

Die Werkstoffmerkmale $M_{Material}$ repräsentieren diejenigen Anforderungen an die Technologiekette, welche direkt aus den verwendeten Materialien und Legierungen resultieren. Die Werkstoffmerkmale stellen dabei sicher, dass die zu produzierenden Komponenten und Bauteile des Produktes grundsätzlich verarbeitbar sind. So werden durch sie die chemischen Anforderungen, wie bspw. die Gießbarkeit bei urformenden Technologien, die mechanischen und physikalischen Anforderungen, wie bspw. die Elastizität bei einer umformenden Technologie, sowie die elektrischen und magnetischen Anforderungen, wie die notwendige Leitfähigkeit bei einer die Stoffeigenschaften ändernden Technologie, überprüft (BERGER & KLOOS 2011). Die Produktionsmerkmale $M_{Production}$ stellen sicher, dass die produktionstechnischen Rahmenbedingungen eingehalten werden. Dies bezieht sich bspw. auf die unternehmensspezifisch zu fertigenden Stückzahlen, einzuhaltende Prozess- und Durchlaufzeiten, die geforderte Automatisierbarkeit der verwendeten Prozesse oder die Verarbeitbarkeit angelieferter Roh- und Zulieferteile. Anhand der Produktmerkmale $M_{Product}$ wird beurteilt, ob alle wesentlichen Formelemente und geometrischen Abmessungen des Produkts grundsätzlich herstellbar sind und sämtliche Komponenten sowie Bauteile miteinander verbunden, d. h. gefügt, werden können. Hierbei sind auch

das Einhalten der abgeschätzten Maß-, Form- und Lagetoleranzen sowie die Erfüllung der Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit sicherzustellen. Erst wenn sämtliche Werkstoffmerkmale $M_{Material}$, Produktionsmerkmale $M_{Production}$ und Produktmerkmale $M_{Product}$ erfüllt werden, gilt die technische Machbarkeit als gewährleistet.

4.6.2.2 Übersicht über die Methode zur Bestimmung der technischen Machbarkeit

In den vorherigen Abschnitten wurde erläutert, dass die technische Machbarkeit obligatorisch für den Prozess der Leistungserstellung ist und in dieser Arbeit anhand von Werkstoff-, Produkt- und Produktionsmerkmalen beurteilt wird. Das methodische Vorgehen zur Bestimmung der technischen Machbarkeit der Technologiekette ist in Abb. 4.16 dargestellt und besteht aus vier Schritten.

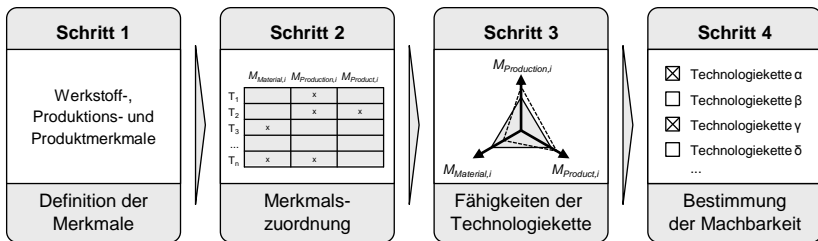


Abb. 4.16: Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Bestimmung der technischen Machbarkeit

Im ersten Schritt erfolgt die Definition der wesentlichen Merkmale, welche die Produktionsaufgabe bzw. das Produkt beschreiben. Hierzu werden neben den einzelnen Werkstoff-, Produkt- und Produktionsmerkmalen auch die jeweiligen Mindest- bzw. Maximalanforderungen bestimmt. Anschließend erfolgt im zweiten Schritt die Zuordnung der identifizierten Merkmale zu den in der Technologiekette enthaltenen Technologien. Dabei kann ein Merkmal durch eine oder mehrere Technologien beeinflusst werden. Im dritten Schritt erfolgt in Anlehnung an die Methode nach FALLBÖHMER (2000) eine Gegenüberstellung der identifizierten Merkmale mit den Fähigkeiten der gesamten Technologiekette. Auf dieser Basis lässt sich im vierten Schritt die technische Machbarkeit einer Technologiekette bestimmen, wobei eine sog. Technologieüberqualifikation, d. h. ein erhebliches Übertreffen der Anforderungen, im Gegensatz zum Ansatz nach FALLBÖHMER (2000) zugelassen wird.

Als Ergebnis der Bestimmung der technischen Machbarkeit können Technologien und Technologieketten ausgewählt werden, welche die durch die Werkstoff-, Produktions- und Produktmerkmale festgelegten Ausschlusskriterien vollständig erfüllen.

5 Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten

5.1 Allgemeines

Die Bewertung nimmt einen wesentlichen Schwerpunkt im Rahmen der strategischen Planung von Technologieketten ein. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 4 detailliert erläutert, welche Bewertungskriterien bei der Planung betrachtet werden müssen, wie diese zu bestimmen und auf welche Weise sie zu modellieren sind. In diesem Kapitel wird darauf aufbauend, die gesamte Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten erläutert, wobei jeweils beschrieben wird, bei welchen Schritten der Methodik die entsprechenden Bewertungskriterien integriert werden müssen. Die grundsätzliche Planung⁶³ von Technologieketten in dieser Arbeit beinhaltet die Generierung von alternativen Technologieketten sowie deren Bewertung und Auswahl. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 5.2 ein Überblick über die in der Methodik enthaltenen Schritte gegeben. Anschließend werden die Schritte im Einzelnen in den Abschnitten 5.3 bis 5.7 erläutert. Hierbei wird besonderer Wert auf die Integration der in Kapitel 4 eingeführten Modelle zur Bestimmung der Bewertungskriterien sowie die Methoden zur Generierung und Auswahl der alternativen Technologieketten gelegt.

5.2 Übersicht über die Methodik

Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.7 beschriebenen Zielsetzung und den daraus abgeleiteten Anforderungen aus Kapitel 3 wurde eine Methode zur strategischen Planung von Technologieketten entwickelt, die aus fünf Schritten besteht. Eine schematische Übersicht über die Methodik zeigt Abb. 5.1. Die wesentlichen Aufgaben und Ergebnisse der Schritte werden nachfolgend kurz erläutert und in den Abschnitten 5.3 bis 5.7 detailliert beschrieben. Im ersten Schritt werden ausgehend von der für das Unternehmen relevanten Technologiestrategie die Rahmenbedingungen für die strategische Planung der Technologiekette gesetzt. Außerdem wird das zu fertigende Produkt und die

⁶³ Nach FRESE ET AL. (1996) beinhaltet die Planung eine systematische gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Geschehens durch eine problemorientierte Suche, Beurteilung und Auswahl von Alternativen.

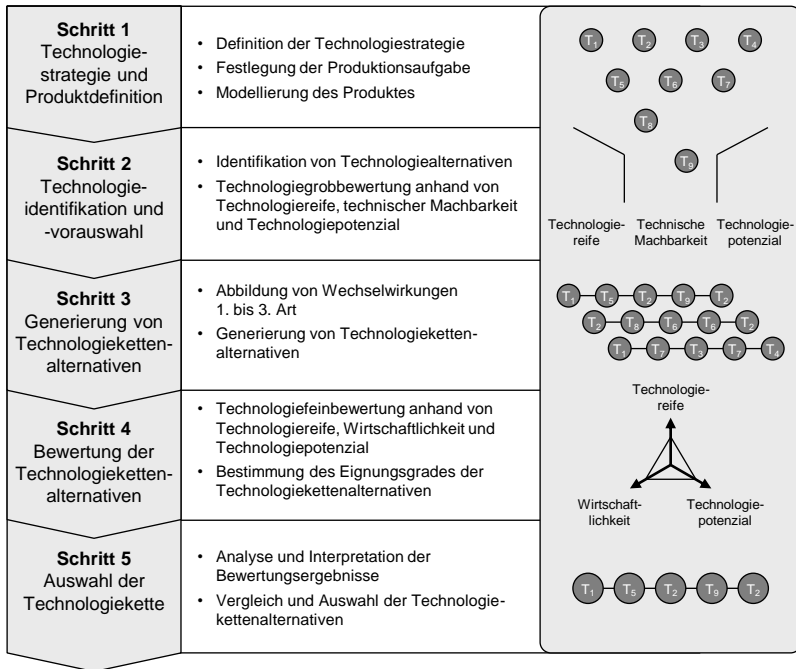


Abb. 5.1: Übersicht über die fünf Schritte der Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten

Produktionsaufgabe beschrieben und abgebildet. Im zweiten Schritt erfolgt aufbauend auf der Identifikation alternativer Technologien aus der Technologiefrüherkennung eine Technologiegrobbewertung, in welcher die potenziell einsatzfähigen Technologien vorausgewählt werden. Diese Technologievorauswahl basiert auf den Bewertungskriterien der technischen Machbarkeit, der Technologiereife sowie des Technologiepotenzials. Aus den gefilterten Technologien werden im dritten Schritt auf Basis der Zuordnung zu den sog. einzelnen Bauteil-Features des zu fertigenden Produktes alternative Technologieketten generiert. Hierbei werden Wechselwirkungen zwischen den Technologien und den Bauteil-Features berücksichtigt. Im vierten Schritt wird im Rahmen der Technologiefinbewertung anhand der Bewertungskriterien der Technologiereife, des Technologiepotenzials sowie der Wirtschaftlichkeit der Eignungsgrad der alternativen Technologieketten ermittelt. Im fünften Schritt erfolgt eine Analyse und Interpretation der Planungsergebnisse, um letztendlich die am besten geeignete Technologiekette auszuwählen.

5.3 Schritt 1: Technologiestrategie und Produktdefinition

5.3.1 Allgemeines

Um die strategische Planung der Technologiekette durchführen zu können, müssen zunächst die für die Produktion existierenden Rahmenbedingungen und Vorgaben geklärt werden. Diese Zielvorgaben ergeben sich aus der vom Unternehmen formulierten Technologiestrategie (SCHULTE-GEHRMANN ET AL. 2011). Außerdem muss das herzustellende Produkt bzw. Produktspektrum definiert und beschrieben werden. Aus diesem Grund beschreibt Abschnitt 5.3.2, wie sich die formulierte Technologiestrategie auf die strategische Technologieplanung auswirkt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.3.3 die Definition und Beschreibung des herzustellenden Produkts.

5.3.2 Definition der Technologiestrategie

In Abschnitt 2.2 wurde bereits die Technologiestrategie produzierender Unternehmen beschrieben. Hierbei wurden insbesondere die technologische Führerschaft und die technologische Präsenz als Grundlage für die strategische Planung von Technologieketten in den Mittelpunkt gestellt. In Abhängigkeit der gewählten Technologiestrategie und der damit verbundenen technologischen Positionierung des Unternehmens sind die in den nachfolgenden Schritten der Methodik enthaltenen Gewichtungskriterien zu parametrisieren. Außerdem wirkt sich die gewählte Technologiestrategie auf die Grenzwerte zur Bestimmung der Bewertungskriterien aus, die dahingehend festzulegen sind, dass die Ziele der Technologiestrategie bestmöglichst erreicht werden. Vom Standpunkt der technologischen Führerschaft aus können aufgrund der höheren Risiken auch größere Schwankungsbreiten der Zielgrößen akzeptiert werden, als dies bei der technologischen Präsenz der Fall ist. Daher unterliegen auch die Ergebnisse der jeweiligen Bewertungskriterien bei der technologischen Führerschaft i. d. R. einer größeren Schwankungsbreite.

5.3.3 Definition der Produktionsaufgabe

Um die Technologiekette planen zu können, sind in erster Linie das zu fertigende Produkt und dessen Bestandteile, d. h. die Produktionsaufgabe, festzulegen und ausreichend zu spezifizieren. Da diese Arbeit in der strategischen Technologieplanung einzusetzen ist, kann das Produkt in dieser frühen Phase u. U. noch nicht detailliert werden (EHRENSPIEL 2009; MÜLLER 2007). Als Grundlage für die strategische Planung von Technologieketten dienen i. W. die ersten beiden Phasen der strategischen Produktplanung (SPP) und der Produktentwicklung

(PE) nach KALLMEYER ET AL. (2001). Diese beinhalten neben der Produktfindung auch die Produktkonzipierung sowie deren Ausarbeitung und Entwurf. Innerhalb dieser Phasen muss die Konkretisierung des Produktes ausreichend weit fortgeschritten sein, um eine belastbare Planungsgrundlage zu bieten. Im Sinne des Simultaneous Engineering⁶⁴ sind hierbei allerdings noch Spielräume⁶⁵ für die Produktgestaltung, wie die Auswahl von Materialien oder Fügekonzepten vorzuhalten. Nachfolgend sind die in Anlehnung an EHRENSPIEL (2009) formulierten Produktinformationen aufgeführt, die von Seiten der SPP und der PE für die vorliegende Planungsaufgabe zwingend erforderlich sind und daher vorhanden sein müssen:

- Erzeugte Produktstruktur
- Ausgearbeitete Anforderungsliste relevanter Produktbestandteile
- Fertiggestellte Entwurfszeichnungen relevanter Produktbestandteile
- Festgelegte Materialarten und -kombinationen

Wie Abb. 5.2 zeigt, orientiert sich die Definition der eigentlichen Produktionsaufgabe i. W. am zu fertigenden Produkt. Dies ist insbesondere dann zielführend, wenn die zu planende Technologiekette speziell für ein konkretes Bauteil auszulegen ist (SCHUH & KNOCH 2005). Die Festlegung der Produktionsaufgabe erfolgt hierbei in erster Linie auf Basis der Erzeugnis- oder Produktstruktur⁶⁶ nach DIN 199 (2002), bei der das Produkt in seine Baugruppen (*a-f* in Abb. 5.2) und Einzelteile (1-10 in Abb. 5.2) zerlegt wird (RAPP 1999). Da eine Technologiekette bei komplexen Produkten, wie bspw. einem Kraftfahrzeug oder einer Werkzeugmaschine, i. d. R. sehr umfangreich ist, sollte sich im Rahmen der strategischen Planung v. a. auf die innovativen Produktbestandteile konzentriert werden. Dies bezieht sich i. W. auf diejenigen Bestandteile, für welche die derzeit eingesetzten Technologien nicht wettbewerbsfähig erscheinen (siehe hellgraue Bereiche in Abb. 5.2). Ebenso müssen diejenigen Bereiche der Produktstruktur betrachtet werden, welche den Kernkompetenzen des Unternehmens zuzuordnen sind und einen wesentlichen Beitrag zur Wertschöpfung

⁶⁴ Simultaneous Engineering (SE) ist ein Ansatz der Arbeitsorganisation zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung, welcher zum Ziel hat, den Zeitraum zwischen Produktidee und Markteinführung (engl. time to market) zu verkürzen, die Entwicklungs- und Herstellkosten zu reduzieren sowie die Produktqualität durch das Einbeziehen sämtlicher an der Produktentwicklung und -gestaltung beteiligten Disziplinen zu erhöhen (EVERSHEIM ET AL. 1995). Auf diese Weise soll das SE dazu beitragen, sowohl Effektivität als auch Effizienz des Produktentstehungsprozesses (PEP) zu verbessern.

⁶⁵ Eine Möglichkeit, derartige Spielräume darzustellen, ist der Einsatz sog. Feature-basierter Modellierungssprachen und -grammatiken (HOISL 2012).

⁶⁶ Die Erzeugnisstruktur eines Produkts dient i. A. der Erstellung von Strukturstücklisten zur Materialbedarfsermittlung (WÖHE & DÖRING 2010).

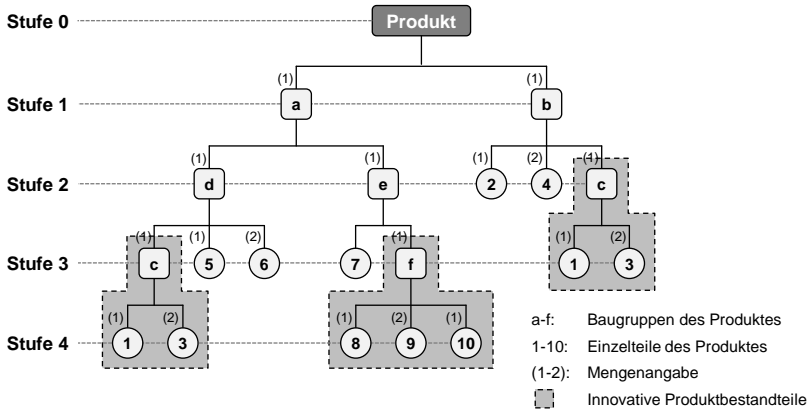


Abb. 5.2: Innovative Produktbestandteile in der Erzeugnis- bzw. Produktstruktur in Anlehnung an die DIN 199 (2002)

am Produkt leisten. Sind die für die Planung relevanten Bereiche der Produktstruktur identifiziert, werden die zu betrachtenden Baugruppen und Einzelteile in sog. Bauteil-Features⁶⁷ zerlegt. Diese Bauteil-Features repräsentieren in dieser Arbeit Wertschöpfungsanteile, welche durch einzelne Technologien oder die Kombinationen mehrerer Technologien realisiert werden können. In diesem Kontext ist ein Bauteil-Feature als ein Zweck oder Funktion zu verstehen, dem die schaffende Technologie bzw. Kombination von Technologien nachkommt (VDI 2803 1996). Erst durch das Erfüllen sämtlicher Bauteil-Features kann die Gesamtfunktion des Produktes sichergestellt werden.

Jedes Bauteil-Feature ist als aktives technologieunabhängiges Substantiv-Verb-Paar zu formulieren, um auf dieser Basis Technologien für die Realisierung zu identifizieren. Dabei muss eine technologie neutrale Formulierung sichergestellt werden, um eine objektive und unabhängige Ideenfindung zu gewährleisten. Auf diese Weise können bspw. dem Substantiv-Verb-Paar *Blech trennen* intuitiv Technologien, wie bspw. Bandsägen, Wasserstrahl- oder Laserstrahlschneiden, zugeordnet werden. Aufgrund der neutralen Formulierung des Bauteil-Features erfolgt die Zuordnung der Technologien ohne eine Festlegung auf ein bestimmtes Verfahren. Neben der Produkt- oder Erzeugnisstruktur (Variante 1) existiert

⁶⁷ Bauteil-Features oder Features teilen ein Produkt in einzelnen Formelemente ein und weisen diesen aufgrund einer Semantik Eigenschaften im Bezug auf die Makrogeometrie (z. B. geometrische Gestalt) und die Mikrogeometrie (z.B. Rauigkeiten) zu (TROMMER 2001; SALOMONS ET AL. 1993).

noch eine zweite Möglichkeit als Grundlage zur Formulierung von Bauteil-Features für die strategische Planung von Technologieketten. Im Rahmen der Produktion variantenreicher Serien- und Massenprodukte, d. h. ähnlicher Produkte, ist die Konkretisierung sämtlicher produktspezifischer Technologieketten sehr zeit- und damit kostenintensiv (EVERSHEIM ET AL. 2005). Daher ist es zielführend, die Planung an einer i. d. R. im Unternehmen vorhandenen sog. Referenztechnologiekette zu orientieren (Variante 2), welche in Abb. 5.3 dargestellt ist. Auch hier ist es möglich, den einzelnen Technologien in weiteren Schritten die Bauteil-Features des zu fertigenden Produktes zuzuordnen. Dazu werden die Wertschöpfungsanteile der einzelnen Technologien der Referenztechnologiekette zunächst analysiert und in Analogie zur ersten Variante in Bauteil-Features in Form von Substantiv-Verb-Paaren, wie bspw. „Fügestelle schaffen“, übersetzt. Diesen lassen sich dann alternative Technologien, wie bspw. Einpressen, Laserstrahl- oder Rollnahtschweißen, zuordnen. Das weitere Planungsvorgehen erfolgt dann analog zur bereits beschriebenen ersten Variante.

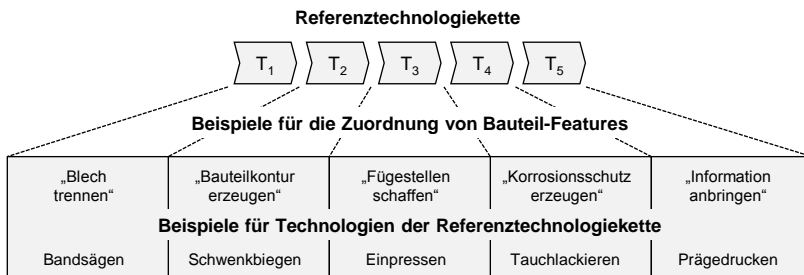


Abb. 5.3: Beispiele für die Zuordnung von Technologien und Bauteil-Features anhand der Referenztechnologiekette

5.4 Schritt 2: Technologieidentifikation und -vorauswahl

5.4.1 Allgemeines

Nach der Festlegung der Technologiestrategie, welche die Rahmenbedingungen für die strategische Technologieplanung vorgibt, und der Definition der Produktionsaufgabe im ersten Schritt (siehe Abschnitt 5.3) gilt es anschließend, potenzielle Technologien zu identifizieren und vorauszuwählen. Hierzu werden zunächst in 5.4.2 ausgewählte Methoden zur Technologiefrüherkennung und -identifikation vorgestellt. Außerdem erfolgt eine Beschreibung der

identifizierten Technologien. In Abschnitt 5.4.3 wird auf dieser Basis die Technologiegrobbewertung, welche die Grundlage für die Technologievorauswahl bildet, erläutert.

5.4.2 Technologieidentifikation und -beschreibung

Die Planung des zukünftigen Einsatzes potenzieller z. T. nicht im Unternehmen vorhandener Technologien setzt deren Identifikation, Beobachtung und Filterung voraus. Insbesondere zur Identifikation existieren in der wissenschaftlichen Literatur eine Reihe von Ansätzen, wobei die Qualität und die Strukturen der Informationsquellen teilweise erheblich variieren (SPATH ET AL. 2010). Einen Übersicht über mögliche formelle und informelle Informationsquellen liefern WELLENSIEK ET AL. (2011). Zur Technologieidentifikation kann v. a. auf Methoden⁶⁸ zurückgegriffen werden, die sich i. W. am Prozess der Technologiefrühaufklärung⁶⁹ (TFA) nach PEIFFER & PEIFFER (1992) orientieren und sich in Abhängigkeit des Unternehmens i. d. R. unterscheiden. Die identifizierten Technologien müssen zunächst ausreichend beschrieben werden. Hierfür werden in dieser Arbeit sog. Technologiesteckbriefe verwendet, wie sie auch WELLENSIEK ET AL. (2011) vorschlagen. Abb. 5.4 zeigt einen bsph. ausgefüllten Technologiesteckbrief, wie er bei der Planung anhand einer Referenztechnologieketten (siehe Abschnitt 5.3.3) zu verwenden ist. Dieser umfasst im oberen Teil sämtliche relevanten Informationen zu einer Technologie. Neben allgemeinen Angaben, wie der Technologiebezeichnung oder den Ansprechpartnern und Verantwortlichen, werden v. a. die Funktionsweise der Technologie anhand von Skizzen und verbalen Beschreibungen dokumentiert. Des Weiteren werden diejenigen Bauteil-Features, die durch die jeweilige Technologie realisiert werden können, sowie zu ihr alternative Technologien festgehalten. Neben der Dokumentation der verwendeten Informationsquellen wird der Technologiesteckbrief eingesetzt, um die Ergebnisse der Technologiegrobbewertung zu dokumentieren. Das Vorgehen bei der Technologiegrobbewertung die Bestimmung der notwendigen Bewertungskriterien wird im nachfolgenden Abschnitt 5.4.3 erläutert.

⁶⁸ Mögliche Ansätze und Vorgehensweisen zur Technologiefrüherkennung und -identifikation liefern bspw. LICHTENTHALER (2008), SPATH ET AL. (2010), LAUBE (2009) oder GRAWATSCHE (2005).

⁶⁹ Die Technologiefrühaufklärung wird in der internationalen Literatur auch als *Technology Intelligence* bezeichnet und umfasst sämtliche Aktivitäten zur Beschaffung, Analyse und Verbreitung von Informationen über technologische Entwicklungen im Unternehmensumfeld (DRACHSLER 2006).

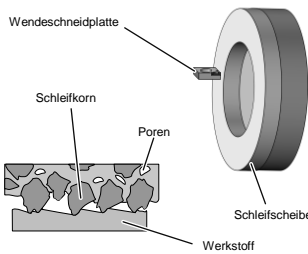
Technologiesteckbrief

Allgemeine Angaben

Technologiebezeichnung <i>T₁ Planschleifen</i>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit <i>Max Mustermann, Technologieexperte, Entwicklung</i>	Datum <i>15.05.2013</i>
---	--	-----------------------------------

Technologiebeschreibung

Bild/Skizze



Kurzbeschreibung

Funktion
Materialerspanung durch mehr oder weniger regellos geformte Körner aus Hartstoffen durch Eingriff mit dem Werkstoff, geometrisch unbestimmte Schneiden

Besonderheiten
werkstoffseitig keine Einschränkungen, auf thermische und mechanische Überlastung der Randzonen achten

Anwendung

Einstellen der geforderten Oberflächengüte, Automobilindustrie, Turbinenbau, Medizintechnik, Werkzeug- und Formenbau, Hartmetallbearbeitung

Bauteil-Features

Gesamtfunktion: *Herstellung einer Wendschneidplatte zur Hartmetallbearbeitung*

Positionen in der Technologiekette: *1 2 3 4 5*

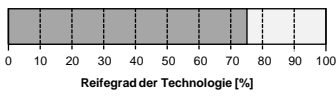
Bauteil-Features: *B: Makrogeometrie erzeugen, C: Aussparung subtrahieren, E: Mikrogeometrie erzeugen*

Alternative Technologie: *T₃ Funkenerodieren, T₄ Laserstrahlabtragen, T₇ Laserstrahlabtragen + Schleifen, T₈ Rotationserodieren + Schleifen, T₉ Läppen, T₁₀ Polieren*

Technologiegrobbewertung

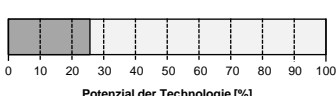
Technische Machbarkeit (TM)	
Werkstoff [-]	<i>Hartmetalle, Al-, Mg-Legierungen</i>
Gewicht [kg]	<i>-</i>
Abmessung [mm]	<i>20-30</i>
Stückzahl [Stk/a]	<i>< 2.000</i>
Schartigkeit [µm]	<i>Rz < 2</i>
	<i>Rz < 0,2</i>

Technologiereife (TR)



Reifegrad der Technologie [%]

Technologiepotenzial (TP)



Potenzial der Technologie [%]

Informationsquellen zur Datenerhebung

Klocke & König (2008): Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren. Springer-Verlag

Friemuth (2002): Herstellung spanender Werkzeuge. Habilitation. Universität Hannover

Eignung

Technologie	TR [%]	TM [-]	TP [-]
Geeignet/Reif	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zu Prüfen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ungeeignet/Unreif	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abb. 5.4: Technologiesteckbrief zur Beschreibung von im Rahmen der Technologiefrüherkennung identifizierten Technologien am Beispiel des Planschleifens

5.4.3 Technologiegrobbewertung und -vorauswahl

Die identifizierten Technologien werden i. d. R. in einer Technologiedatenbank abgelegt (ABELE 2006). Die Dokumentation erfolgt anhand von Steckbriefen. Diese stellen die relevanten Informationen aus der Technologiedatenbank anwenderfreundlich und übersichtlich dar und bilden die Eingangsbasis für die Technologiegrobbewertung. Im Rahmen der strategischen Technologieplanung ist es zielführend, nicht alle Technologien zu betrachten, sondern sich auf die Kernkompetenzen des Unternehmens und die sog. Primärtechnologien zu fokussieren. Unter dem Begriff *Primärtechnologien* werden diejenigen Technologien zusammengefasst, welche einen direkten Beitrag zur Wertschöpfung am Produkt leisten, wie bspw. das Fräsen eines Bauteils. Im Gegensatz dazu repräsentieren *Sekundärtechnologien* nicht direkt wertschöpfende Verfahren, wie z. B. das Entgraten nach einem Schleifprozess. Da Sekundärtechnologien vor- oder nachgelagert zu Primärtechnologien sind, können sie diesen direkt zugeordnet werden (MÜLLER 2007).

Um nicht alle identifizierten Technologien dem Planungsprozess zuzuführen und somit unnötig Aufwände zu erzeugen, wird eine Technologiegrobbewertung durchgeführt. Hierzu werden vorerst nur ausgewählte Bewertungskriterien aus Kapitel 4 betrachtet, da bspw. erst die technische Machbarkeit einer Technologie sichergestellt wird, bevor die relativ aufwendige Betrachtung der Wirtschaftlichkeit erfolgt (TROMMER 2001). Aus diesem Grund sind zunächst die Bewertungskriterien der *Technologiereife* (siehe Abschnitt 4.3), des *Technologiepotenzials* (siehe Abschnitt 4.5) und der *Technischen Machbarkeit* (siehe Abschnitt 4.6) zu bestimmen, um eine Vorauswahl für die spätere Generierung alternativer Technologieketten zu treffen. Hierzu sind die in den jeweiligen Abschnitten erläuterten Modelle zu verwenden, wobei es bei aufwendigen Rechercheaktivitäten ausreichend ist, Experteneinschätzungen einzuholen, da die detaillierte und somit belastbare Bestimmung der jeweiligen Bewertungskriterien im Rahmen der späteren Technologiefinbewertung ohnehin erfolgt.

Das Ergebnis der Technologiegrobbewertung ist im unteren Teil der jeweiligen Technologiesteckbriefe (siehe Abb. 5.4) einzutragen und zu dokumentieren. Um nun eine Technologievorauswahl durchzuführen, werden den in Abschnitt 5.3.3 formulierten Bauteil-Features sämtliche Technologien zugeordnet, welche grundsätzlich in der Lage sind, diese Bauteil-Features zu realisieren. Zur Visualisierung und Analyse der Ergebnisse der Technologiegrobbewertung wird ein sog. Technologieradar⁷⁰ eingesetzt. Dieses wurde entsprechend der vorliegenden

⁷⁰ Das Technologieradar in seiner ursprünglichen Form ist ein Hilfsmittel für Unternehmen und Forschungseinrichtungen, technologische Trends darzustellen und zu beurteilen (LANG-KOETZ ET AL. 2008).

Planungsaufgabe hinsichtlich der Darstellung von Technologiereife und Technologiepotenzial spezifiziert. Abb. 5.5 zeigt bspw. ein für sechs Bauteil-Features ausgelegtes Technologieradar, wobei die herzustellenden Bauteil-Features radial aufgetragen sind.

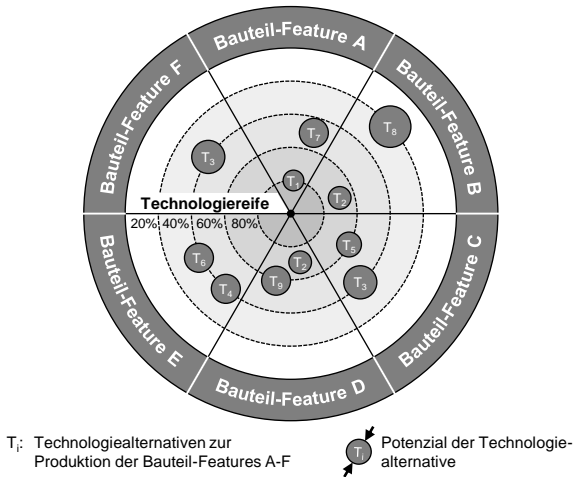


Abb. 5.5: Technologieradar für die Grobbewertung der einzelnen Technologien und Zuordnung zu Bauteil-Features in Anlehnung an REINHART ET AL. (2012)

Die jeweils in einem Kreisausschnitt aufgeführten Technologien sind grundsätzlich in der Lage, das entsprechende Bauteil-Feature herzustellen. Dabei kann eine Technologie mehreren Bauteil-Features zugeordnet werden, solange sie fähig ist, dieses Bauteil-Feature zu realisieren. Der Abstand einer Technologie zum Mittelpunkt des Technologieradars entspricht dem Ergebnis aus der Bestimmung der Technologiereife. Je weiter eine Technologie vom Mittelpunkt entfernt ist, desto geringer ist ihr Entwicklungsstand und umso höher sind mit ihrem Einsatz verbundene technische und organisatorische Risiken. Der Durchmesser einer Technologie sagt aus, wie hoch das mit ihr verbundene Technologiepotenzial eingeschätzt wurde. Da die Technische Machbarkeit ein Ausschlusskriterium für die weitere Planung darstellt (siehe Abschnitt 4.6), wird sie zwar im Technologiesteckbrief dokumentiert (siehe Abb. 5.4), aber nicht explizit im Technologieradar ausgewiesen.

Auf Basis des in Abb. 5.5 dargestellten Technologieradars, sind nun alternative Technologien für jedes Bauteil-Feature auszuwählen. Hierbei ist auf die in Abschnitt 5.3.2 beschriebene Technologiestrategie zu achten, da in dieser die für die Auswahl relevanten Grenzwerte für die Technologiereife und das

erwünschte Technologiepotenzial festlegt wurde. Bei der Technologiegrobbeurteilung muss des Weiteren gewährleistet werden, dass sämtlichen Bauteil-Features ausreichend Technologiealternativen zugewiesen wurden, da erst dann die Produktionsaufgabe erfüllt werden kann.

Weitere Informationen zur Identifikation von Technologien sowie geeignete Methoden für die Technologiefrühaufklärung im Rahmen der strategischen Technologieplanung finden sich bei REINHART ET AL. (2012).

5.5 Schritt 3: Generierung von Technologieketten

5.5.1 Allgemeines

Nachdem im vorherigen Abschnitt 5.4 Technologiealternativen identifiziert und vorausgewählt wurden, gilt es in diesem Abschnitt die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der Technologien zu erörtern und alternative Technologieketten zu generieren. Da hierbei insbesondere Wechselwirkung innerhalb der Technologiekette zu berücksichtigen sind (DENKENA ET AL. 2005), beschreibt Abschnitt 5.5.2 zunächst die verschiedenen Arten von Wechselwirkungen. In den Abschnitten 5.5.3 und 5.5.4 werden bestehende Methoden zur Generierung von Technologieketten vorgestellt und bewertet. Anschließend beschreibt Abschnitt 5.5.5 die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Generierung alternativer Technologieketten.

5.5.2 Wechselwirkungen innerhalb der Technologiekette

In einer Technologiekette bestehen sog. Wechselwirkungen (DENKENA ET AL. 2005). Unter dem Begriff *Wechselwirkung* sind in diesem Zusammenhang direkte Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Technologien zu verstehen, indem sich einzelne Technologien bedingen oder ausschließen. Beim Einsatz einer gusstechnischen Technologie sind bspw. nachgelagerte Schweißoperationen u. U. unmöglich (DEINZER & RETHMEIER 2006). Innerhalb einer Technologiekette bestehen nicht nur Wechselwirkungen zwischen direkt benachbarten vor- und nachgelagerten Technologien (MORYSON 2004), sondern auch über mehrere Technologien hinweg (KNOCH 2005). Aufgrund der Wechselwirkungen sind die einzelnen Technologien einer Technologiekette nicht unabhängig voneinander zu sehen, sondern müssen im Verbund betrachtet werden. AGOSTINI (2000) beschreibt darüber hinaus auch Wechselwirkungen zwischen den Elementen eines Produktes, d. h. den das Produkt repräsentierenden Bauteil-Features (siehe Abschnitt 5.3.3), was sich u. a. auf die Reihenfolge verschiedener Technologien auswirkt. Bei der Planung von Technologieketten sind Wechselwirkungen

daher v. a. im Rahmen der Generierung alternativer Technologieketten zu berücksichtigen (DENKENA ET AL. 2005). Abb. 5.6 zeigt eine Übersicht der in dieser Arbeit grundsätzlichen betrachteten Arten von Wechselwirkungen zwischen Bauteil-Features, zwischen Technologien sowie zwischen Bauteil-Features und Technologien. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese Arten von Wechselwirkungen erläutert und beschrieben.

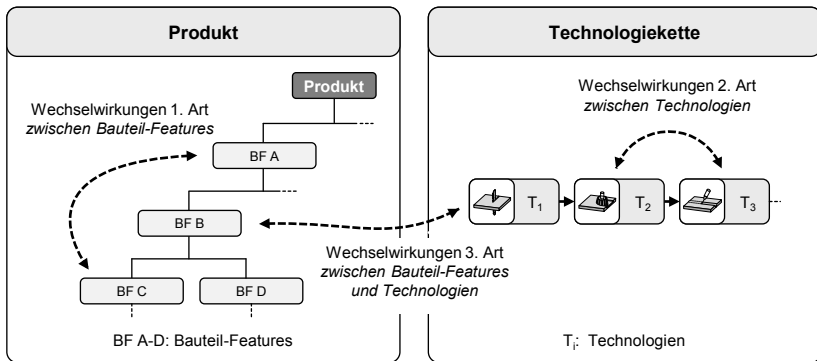


Abb. 5.6: Arten von Wechselwirkungen innerhalb einer Technologiekette

5.5.2.1 Wechselwirkungen zwischen Bauteil-Features

Auf Produktebene lassen sich in erster Linie Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen der Produktstruktur, d. h. im weiteren Sinne auch den Bauteil-Features, welche die verschiedenen Bauteile des Produktes repräsentieren, identifizieren (LINDEMANN & MAURER 2006). Diese werden in Abb. 5.6 als *Wechselwirkungen 1. Art* bezeichnet. In Abhängigkeit der groben Reihenfolge, in welcher diese Bauteil-Features zu realisieren und v. a. zu fügen sind, werden die Möglichkeiten der Anordnung einzelner Technologien innerhalb der Technologiekette eingeschränkt. So kann die finale Gestaltung der Oberfläche eines Produktes i. d. R. erst nach der Schaffung einer Grundstruktur bzw. eines Rohteils erfolgen. Zur Identifikation von Wechselwirkungen 1. Art lassen sich u. a. auch Montagereihenfolgen⁷¹ verwenden (SCHUH 2005).

⁷¹ Hierzu lässt sich bspw. eine vereinfachte Form des Montagevorranggraphen verwenden. Anhand eines Montagevorranggraphen wird die Produktstruktur in einen zeitlich-logischen Montageablauf überführt (BOSSMANN 2007).

5.5.2.2 Wechselwirkungen zwischen Technologien

In der wissenschaftlichen Literatur werden zumeist Wechselwirkungen zwischen einzelnen Technologien thematisiert (MÜLLER 2007; DENKENA ET AL. 2005; AGOSTINI 2000; FALLBÖHMER 2000). Unabhängig von der Reihenfolge der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Bauteil-Features können sich die potenziell einsatzfähigen Technologien gegenseitig bedingen oder ausschließen (MÜLLER 2007). Wie in Abb. 5.6 zeigt, werden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Technologien als *Wechselwirkungen 2. Art* bezeichnet. Bspw. ist hier zu nennen, dass ein umgeformtes Bauteil nicht mehr, oder nur in definierten Grenzen, einer Wärmebehandlung unterzogen werden darf, da ansonsten der Erhalt der geforderten Maßhaltigkeit nicht gewährleistet werden kann. Weitere Beispiele für Wechselwirkungen zwischen Technologien sind das notwendige Entgraten nach dem Schleifen oder das Polieren nach einem Lackierprozess. Wechselwirkungen 2. Art können sowohl zwischen vor- und nachgelagerten Technologien als auch über mehrere Kettenglieder hinweg auftreten (SCHUH & KNOCH 2005).

5.5.2.3 Wechselwirkungen zwischen Technologien und Bauteil-Features

Neben den bereits eingeführten Arten von Wechselwirkungen lassen sich auch Abhängigkeiten zwischen Bauteil-Features und Technologien identifizieren. Wie Abb. 5.6 zeigt, werden diese als *Wechselwirkungen 3. Art* eingeführt. Als Beispiel für Wechselwirkungen zwischen Bauteil-Features und Technologien sind Abhängigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Materialien und Werkstoffe der die Bauteil-Features repräsentierenden Komponenten und Elemente zu nennen. So können bei bestimmten Magnesiumlegierungen zwar Gießtechnologien zum Einsatz kommen, Schweißoperationen sind aber nur schwer realisierbar (DEINZER & RETHMEIER 2006). Des Weiteren bestehen Abhängigkeiten zwischen Bauteil-Features und von ihnen unabhängigen, in der Technologiekette enthaltenen Technologien. So kann eine Komponente durch die Beschaffenheit ihres Rohteils nicht für eine Technologie geeignet sein. Ein Beispiel hierfür ist die Gewährleistung der Einspannbarkeit von Rohteilen bei spanenden Technologien, wie dem Drehen.

5.5.3 Bestehende Methoden

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Generierung alternativer Technologieketten beschäftigen bzw. im unmittelbaren Zusammenhang damit stehen. Diese entstammen größtenteils der operativen

Technologieplanung und wurden in den Abschnitten 2.5 und 2.6 bereits ausführlich beschrieben. Aus diesem Grund wird nachfolgend lediglich auf die jeweilige Logik zur Generierung von Verkettungen eingegangen.

In der Methodik zur strategischen Planung von Fertigungstechnologien von SCHMITZ (1996) werden alternative Komponenten-Fertigungsverfahren-Paare erzeugt. Hierbei werden die verschiedenen Alternativen anhand des konkreten Anwendungsfalls einer Technologie identifiziert, welche anschließend auf Basis technologischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Kriterien reduziert werden.

Im Rahmen der operativen Technologieplanung entwickelte AGOSTINI (2000) einen Ansatz zur die Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen. Diese entsprechen Wechselwirkungen 2. Art und werden von AGOSTINI (2000) weiter in vier Interaktionstypen eingeteilt. Während sich die erste Ordnung auf technologische Basisregeln, wie bspw. Zwangsfolgen, bezieht, repräsentieren Interaktionen zweiter Ordnung Form- und Lagetoleranzen. Maschinenspezifische Abhängigkeit im Sinne einer Fertigungsfolge werden als Interaktionen dritter Ordnung bezeichnet und Interaktionen vierter Ordnung bilden letztendlich subjektives Erfahrungswissen ab. Anhand der verschiedenen Interaktionstypen ergeben sich die Reihenfolgen für Verfahrensketten, welche schließlich in einer Matrix abgebildet werden.

Bei der Methode von FALLBÖHMER (2000) erfolgt die Generierung von Technologieketten auf Basis eines Abgleichs von Produktanforderungen mit Technologiefähigkeiten, welche diese Anforderungen vollständig oder teilweise erfüllen. Dazu verwendet FALLBÖHMER (2000) Netzdiagramme, anhand derer durch ein iteratives Vorgehen sukzessive Technologieketten erzeugt werden. Hierbei werden den Produktanforderungen solange Technologien zugeordnet, bis ein sog. Technologiedefizit⁷² ausgeschlossen werden kann.

Im Rahmen der konstruktionsbegleitenden Generierung von Fertigungsfolgen orientiert sich TROMMER (2001) an bereits vorhandenen Technologieketten und weist den einzelnen Technologien alternative Produktionsmittel auf den Grundlagen der Kombinatorik zu. Auf diese Weise werden automatisiert Fertigungsfolgen entwickelt, die anschließend bewertet werden.

DENKENA ET AL. (2005) stellen eine Methode zur ganzheitlichen Prozesskettenplanung vor. Einen wesentlichen Schwerpunkt hierbei stellen die Auslegung und Implementierung einer realisierbaren Prozesskette, d. h. der Technologiekette,

⁷² Das Technologiedefizit beschreibt, dass eine Technologiekette nicht alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Den Umstand, dass die Produktanforderungen deutlich übertroffen werden, bezeichnet FALLBÖHMER (2000) als Technologieüberqualifikation, wobei diese nicht zwingend negativ auszulegen ist, da durch sie zusätzliche Potenziale erschlossen werden können.

dar. Hierbei orientiert sich das Planungsvorgehen an einer Referenzprozesskette, Alternativen werden nicht generiert. In diesem Zusammenhang werden in erster Linie technologisch-wirtschaftliche Wechselwirkungen beschrieben.

Das generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien von KNOCHEN (2005) beinhaltet ein Modul, in welchem alternative Technologieketten auf Basis einer rückwärtsgerichteten Verkettung generiert werden. Hierbei werden ausgehend vom fertigen Produkt solange Technologien einzelnen Fertigungsschritten zugeordnet, bis ein möglicher Rohteilzustand erreicht ist (SCHUH & KNOCHEN 2005). Das Modell von KNOCHEN (2005) ist derart gestaltet, dass der Anwender durch ein methodisches Vorgehen geleitet wird, alle Pfade der Rückwärtsterminierung zu durchlaufen.

Im Rahmen seiner Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen thematisiert auch MÜLLER (2007) Wechselwirkungen im Rahmen der Zuordnung von Produktanforderungen und Technologien. Dies löst er mit Hilfe der sog. Produkt-Primärverfahren-Matrix⁷³, welche v. a. Informationen zu Abhängigkeiten vor- und nachgelagerter Verfahren in der Technologiekette enthält.

GROSSMANN ET AL. (2012) stellen einen Ansatz zur Modellierung und Analyse technologischer Ketten vor, wobei ihr wesentliches Ziel die Generierung von operativem Technologiewissen ist. Hierbei werden Wechselwirkungen zwischen den zu produzierenden Materialien und den eingesetzten Technologien abgebildet. Die Abbildung der Prozesskette erfolgt formal auf Basis einer Datenbankanbindung.

In ihrem Ansatz zur Planung und Optimierung von Prozessketten für die Herstellung funktional gradierter Bauteile generieren BIERMANN ET AL. (2013) ausgewählte Alternativen auf Basis eines Expertensystems. Auch hier werden Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und den einzelnen Prozessschritten thematisiert.

5.5.4 Bewertung der bestehenden Methoden

Die Ausführungen des vorherigen Abschnitts zeigen, dass in der wissenschaftlichen Literatur bereits eine Reihe brauchbarer Ansätze zur Generierung von Technologieketten existieren. Diese unterscheiden sich jedoch teilweise erheblich

⁷³ Der Begriff *Primärverfahren* ist in diesem Zusammenhang als Synonym zu der in Abschnitt 5.4.3 eingeführten Primärtechnologie zu verstehen. MÜLLER (2007) betont hierbei, dass die Grenze zwischen Primär- und Sekundärverfahren fließend ist und unternehmensspezifisch festgelegt werden muss

in der Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. bis 3. Art und ihrem Automatisierungsgrad. Nachfolgend sollen die aufgeführten Arbeiten daher hinsichtlich deren Eignung zur Anwendung im Rahmen der strategischen Technologieplanung untersucht und bewertet werden. Eine Übersicht über die Bewertung der existierenden Ansätze zur Generierung von Technologieketten zeigt Abb. 5.7.

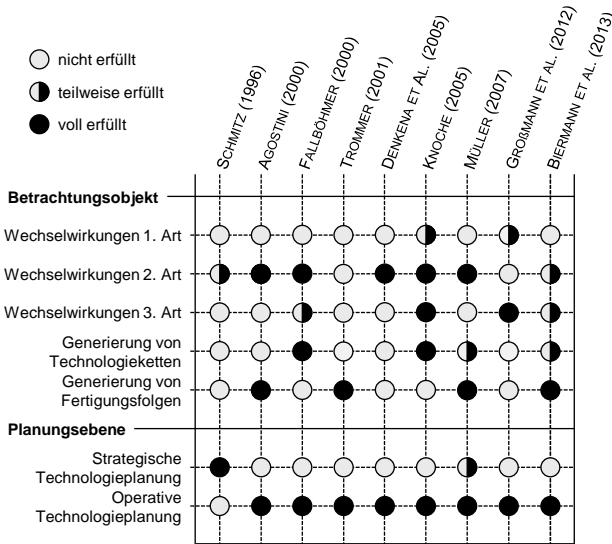


Abb. 5.7: Übersicht über bestehende Ansätze zur Generierung von alternativen Technologieketten

Die Methodik von SCHMITZ (1996) erzeugt zwar einzelne Komponenten-Fertigungsverfahren-Paare, eine Generierung alternativer Technologieketten ist jedoch nicht Gegenstand der Arbeit. Die durch AGOSTINI (2000) entwickelte Darstellung der Interaktionstypen und deren Abhängigkeiten in Form einer Matrix stellt einen systematischen Ansatz dar, der allerdings lediglich für die Generierung betriebsmittelbezogener Fertigungsfolgen anwendbar ist. So stellt auch KNOCHE (2005) fest, dass beim Ansatz von AGOSTINI (2000) Abhängigkeiten über mehrere Kettenglieder hinweg ebenso wenig betrachtet werden, wie Wechselwirkungen 1. und 3. Art. Die Methode von FALLBÖHMER (2000) ermöglicht grundsätzlich eine automatisierbare Zuordnung von Produktanforderungen und Technologiefähigkeiten. Hierbei werden allerdings die in Abschnitt 1.1 beschriebenen Wechselwirkungen bspw. zwischen Technologien ausschließlich dadurch berücksichtigt, dass ergänzende Technologien zu sog. Kerntechnologien gewählt werden. Wechselwirkungen über mehrere Technolo-

gien hinweg werden nicht berücksichtigt (SCHUH & KNOCHÉ 2005; KNOCHÉ 2005). Außerdem werden alternative Technologieketten generiert, es bedarf aber weiterer Optimierungsschritte und Auswahlverfahren, um das tatsächliche Optimum in der Anordnung der einzelnen Technologien zu identifizieren. Eine Betrachtung von Wechselwirkungen 1. Art findet nicht statt.

Die Generierung von Fertigungsfolgen von TROMMER (2001) baut direkt auf zuvor festgelegten Technologieketten auf. Technologieketten selbst stellen somit eine Eingangsinformation für die Methodik dar und werden nicht erzeugt. Aus diesem Grund werden Wechselwirkungen, die lediglich auf den einzelnen Technologien bzw. der Technologiekette beruhen, nicht betrachtet. Der Ansatz von DENKENA ET AL. (2005) nutzt zur Planung der Technologiekette eine Referenzprozesskette und berücksichtigt dabei Wechselwirkungen 2. Art aus technologisch-wirtschaftlicher Sicht. Eine Generierung von alternativen Technologieketten findet ebenso wenig statt, wie die Betrachtung von Wechselwirkungen 1. und 3. Art. Die Arbeit von KNOCHÉ (2005) stellt insbesondere durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen einen brauchbaren Ansatz zur Generierung von Technologieketten dar, wobei schwerpunktmäßig Wechselwirkungen 2. Art und 3. Art betrachtet werden.

Die von MÜLLER (2007) entwickelte Produkt-Primärverfahren-Matrix ordnet den zu fertigenden Produktelementen Verfahren zu. Hierbei sind neben den einzelnen Technologien auch Informationen zu sog. Interdependenzen hinterlegt⁷⁴. Diese Interdependenzen beschreiben die Abhängigkeiten zwischen Primär- und vor- bzw. nachgelagerten Sekundärtechnologien und können als Wechselwirkungen 2. Art interpretiert werden. Die Generierung von Technologieketten erfolgt manuell. Eine Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. und 3. Art findet nicht statt. Außerdem ist die Generierung der Technologiekette beim Ansatz von MÜLLER (2007) für die operative Technologieplanung ausgelegt, weshalb sie für die strategische Planung anzupassen ist. Bei dem Ansatz von GROSSMANN ET AL. (2012) werden im Rahmen einer operativen Technologieplanung zwar Wechselwirkungen 3. Art betrachtet, Abhängigkeiten zwischen Technologien werden allerdings nur rudimentär und zwischen Bauteil-Features gar nicht thematisiert. Eine Generierung alternativer Technologieketten findet nicht statt. BIERMANN ET AL. (2013) generieren auf Basis ihres Expertensystems alternative Prozessketten für die operative Technologieplanung. Auf welche Weise systematisch Alternativen zu erzeugen sind und wie die erwähnten Wechselwirkungen 2. und 3. Art in die Generierung einfließen, ist nicht Schwerpunkt der Forschung.

⁷⁴ Die von MÜLLER (2007) formulierten Interdependenzen bilden ab, inwieweit ein Verfahren für die Realisierung eines Produktelementes überhaupt oder nur bedingt in Frage kommt, da es aufgrund von Abhängigkeiten zu anderen Technologien zwingend erforderlich ist oder ausgeschlossen werden muss.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass insbesondere die Ansätze von KNOCHE (2005) und MÜLLER (2007) eine gute Grundlage für die Generierung von Technologieketten im Rahmen der strategischen Technologieplanung bilden. Allen in Abschnitt 5.5.3 beschriebenen Ansätzen ist gemein, dass sie nicht alle Arten von Wechselwirkungen in ausreichendem Maße berücksichtigen und schwerpunktmäßig der operativen Technologieplanung zuzuordnen sind. Da viele Planungsdaten der operativen Technologieplanung in der strategischen Technologieplanung nicht verfügbar sind (siehe Abschnitt 1.2.2), müssen die geeigneten Ansätze auf diese Anforderungen hin angepasst werden.

5.5.5 Methode zur Generierung von Technologieketten

Auf Basis der zur Verfügung stehenden Technologien sind alternative Lösungen für Technologieketten denkbar, welche anwendungsfallsspezifisch und systematisch generiert werden müssen (SCHUH & KNOCHE 2005). Das methodische Vorgehen zur Generierung alternativer Technologieketten ist in Abb. 5.8 dargestellt und besteht aus vier Schritten.

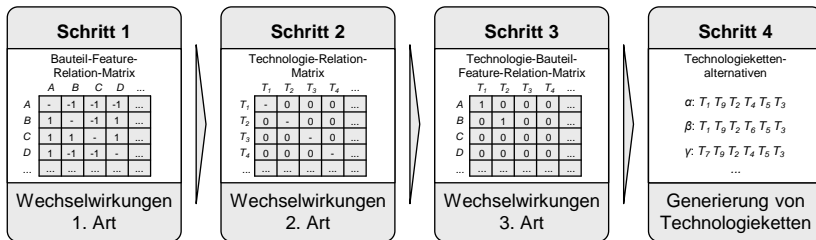


Abb. 5.8: Übersicht über die vier Schritte der Methode zur Generierung alternativer Technologieketten

Im ersten Schritt erfolgt die Abbildung von Wechselwirkungen 1. Art zwischen Bauteil-Features. Während sich der zweite Schritt mit Wechselwirkungen 2. Art zwischen Technologien beschäftigt, berücksichtigt der dritte Schritt die Integration von Wechselwirkungen 3. Art zwischen Technologien und Bauteil-Features. Auf dieser Basis kann im vierten Schritt die Generierung von Technologiekettenalternativen erfolgen. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend detailliert erläutert. Eingangswerte für die Generierung alternativer Technologieketten sind die bereits in Abschnitt 5.4 identifizierten und bereits vorausgewählten Technologien, welche einzelnen Bauteil-Features zugeordnet wurden. Hierzu müssen zunächst die in Abschnitt 5.5.2.1 beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Bauteil-Features, d. h. Wechselwirkungen 1. Art, betrachtet werden,

da diese die Reihenfolge für das Fügen der einzelnen Bauteile und Komponenten beeinflussen und somit den Produktionsablauf beschränken. Die Wechselwirkungen 1. Art werden zunächst in einer Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{BFR} abgebildet, welche die einzelnen Bauteil-Features A bis F einander gegenüberstellt und deren Abhängigkeiten darstellt. Nachfolgend ist die Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{BFR} bspw. aufgeführt⁷⁵:

$$\mathbf{M}_{BFR} = \begin{array}{c|cccccc} & A & B & C & D & E & F \\ \hline A & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ B & -1 & & 1 & -1 & 1 & 1 \\ C & -1 & -1 & & -1 & -1 & 0 \\ D & -1 & 1 & 1 & & 1 & 1 \\ E & -1 & -1 & 1 & -1 & & 0 \\ F & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & \end{array} \quad (5.1)$$

Hier bedeutet „0“, dass keine Wechselwirkung 1. Art vorliegt. Innerhalb einer Zeile gibt „1“ bzw. „-1“ an, dass das Bauteil-Feature der jeweiligen Zeile vor bzw. nach dem Bauteil-Feature der entsprechenden Spalte zu erzeugen ist. So muss Bauteil-Feature B bspw. vor den Bauteil-Features C , E und F und nach den Bauteil-Features A und D hergestellt werden. Die Parametrisierung der Bauteil-Feature-Relation-Matrix erfolgt durch einen sog. paarweisen Vergleich⁷⁶. Dieses manuelle Vorgehen hat den Vorteil, dass sich aus den offensichtlichen Wechselwirkungen zwischen zwei Bauteil-Features weitere Wechselwirkungen ergeben, welche bisher nicht ersichtlich sind. Durch die Darstellung in Matrix-Form können diverse mathematische Algorithmen⁷⁷ eingesetzt werden, um weitere Wechselwirkungen über mehrere Bauteil-Features hinweg zu identifizieren. Somit sind sämtliche Bauteil-Features mit ihren Wechselwirkungen in der Bauteil-Feature-Relation-Matrix hinterlegt. Anschließend muss sichergestellt werden, dass mindestens eine Kombination sämtlicher Bauteil-Features existiert,

⁷⁵ Die Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{BFR} ist hier fiktiv ausgefüllt, um die grundsätzliche Logik erläutern zu können. Die einzelnen Werte der Matrix variieren in Abhängigkeit der jeweiligen Produktionsaufgabe.

⁷⁶ Der paarweise Vergleich oder Paarvergleich ist eine Methode, die dazu dient, die Unterschiede, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen gegebener Objekte darzustellen, um bspw. eine Rangfolge aufzustellen. Der paarweise Vergleich wird i. d. R. bei komplexen Systemen aus mehreren Objekten verwendet, um subjektive Unterschiede aufzulösen (EHRENSPIEL 2009; LINDEMANN 2009).

⁷⁷ Eine praktikable Lösung liefert bspw. LEE (2003) bei der Identifikation von Kreisschlüssen höherer Ordnungen im Rahmen des Axiomatic Design. Das *Axiomatic Design* ist ein Ansatz zur strukturierten Gestaltung von Systemen, wobei die Teillösungen möglichst unabhängig von einander („uncoupled“) sein sollen (SUH 2005).

um die Produktionsaufgabe zu erfüllen. Aufgrund ihrer Eindeutigkeit⁷⁸ ist die Bauteil-Feature-Relation-Matrix schiefssymmetrisch und bildet sämtliche Wechselwirkungen 1. Art ab. Zur Generierung alternativer Technologieketten müssen auf Basis der Kombinatorik sämtliche denkbaren Produktionsabläufe, also Verkettungen von Bauteil-Features, ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der in der Bauteil-Feature-Relation-Matrix abgebildeten Restriktionen ergeben sich im vorliegenden Fall die in Tab. 5.1 aufgelisteten Produktionsablaufalternativen. Die Wechselwirkungen 2. Art werden in der Technologie-Relation-Matrix modelliert, welche die in Abschnitt 5.4 identifizierten Technologien einander gegenüber und abbildet, ob sich die einzelnen Technologien gegenseitig bedingen oder ggf. ausschließen. Nachfolgend ist die Technologie-Relation-Matrix \mathbf{M}_{TR} mit den in Abb. 5.5 eingeführten Technologiealternativen dargestellt⁷⁹:

$$\mathbf{M}_{TR} = \begin{array}{c|cccccccc} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 \\ \hline T_1 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n & 0 & 0 \\ T_2 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ T_3 & 0 & 0 & & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ T_4 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ T_5 & 0 & 0 & -1 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ T_7 & n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ T_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 \\ T_9 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \end{array} \quad (5.2)$$

Analog zur Bauteil-Feature-Relation-Matrix bedeutet der Eintrag „0“, dass keine Wechselwirkungen 2. Art zwischen den beiden referenzierten Technologien vorliegen. Innerhalb einer Zeile gibt „1“ bzw. „-1“ an, dass die Technologie der jeweiligen Zeile vor bzw. nach der Technologie der entsprechenden Spalte in der Technologiekette anzuordnen ist. Aufgrund bestehender Wechselwirkungen 2. Art müssen die Technologien T_2 , T_3 und T_4 bspw. nach der Technologie T_9 positioniert werden. „n“ gibt an, dass der Einsatz der Technologie einer Zeile, die Technologie der jeweiligen Spalte ausschließt. Dies ist bspw. bei der Technologie T_1 der Fall, solange die Technologie T_7 in der Technologiekette eingesetzt wird.

⁷⁸ Der Begriff *eindeutig* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Bauteil-Feature-Relation-Matrix produktspezifisch ist, d. h. sie ist für ein und das selbe Produkt einzigartig und eindeutig, auch wenn mehrere Pfade durch die Bauteil-Feature-Relation-Matrix, d. h. alternative Produktionsabläufe, denkbar und zulässig sind.

⁷⁹ Die Technologie-Relation-Matrix \mathbf{M}_{TR} ist hier fiktiv ausgefüllt, um die grundsätzliche Logik zu erläutern. Die einzelnen Werte der Matrix variieren in Abhängigkeit der jeweils zur Verfügung stehenden Technologiealternativen.

Tab. 5.1: Zulässige Produktionsabläufe nach Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. Art

Produktions- ablauf	Position im Produktionsablauf					
	1	2	3	4	5	6
1	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>F</i>
2	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>C</i>
3	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>C</i>

Nach den Wechselwirkungen 1. und 2. Art sind schließlich noch die in Abschnitt 5.5.2.3 beschriebenen Wechselwirkungen 3. Art zwischen Bauteil-Features und Technologien zu berücksichtigen. Auch hierfür kann die Darstellung in Matrixform verwendet werden. Die dazu eingesetzte Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{TBFR} stellt die einzelnen Bauteil-Features sämtlichen zur Verfügung stehenden Technologien gegenüber⁸⁰:

$$\mathbf{M}_{TBFR} = \begin{array}{c|ccccccccc} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 \\ \hline A & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ B & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ C & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ E & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & n & 0 \\ F & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad (5.3)$$

In der Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix sind unabhängig von der grundsätzlichen Eignung zur Erzeugung eines Bauteil-Features sämtliche Abhängigkeiten darzustellen, welche grundsätzlich zwischen den einzelnen Bauteil-Features und allen in der Technologiekette positionierten Technologien auftreten können. Der Eintrag „1“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Bauteil-Feature durch eine Technologie potenziell erzeugt werden kann. „0“ kennzeichnet die Neutralität zwischen dem jeweiligen Bauteil-Feature und der entsprechenden Technologie, d. h. das Bauteil-Feature kann nicht durch die Technologie hergestellt werden, wird aber auch nicht negativ von ihr beeinflusst. Der Eintrag „n“ bedeutet, dass eine Technologie nicht innerhalb

⁸⁰ Auch die Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{TBFR} ist hier fiktiv ausgefüllt zur Erläuterung der grundsätzlichen Logik. Die einzelnen Werte der Matrix variieren in Abhängigkeit der jeweiligen Produktionsaufgabe.

der Technologiekette eingesetzt werden darf, solange das Produkt das entsprechende Bauteil-Feature beinhaltet. Dies ist im vorliegenden Fall bspw. bei Bauteil-Feature E und Technologie T_8 der Fall. Auf Basis der Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{BFR} , der Technologie-Relation-Matrix \mathbf{M}_{TR} sowie der Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix \mathbf{M}_{TBFR} wurden sämtliche Wechselwirkungen 1. bis 3. Art modelliert. Auf Basis der Kombinatorik lassen sich hieraus sämtliche Technologiekettenalternativen generieren. Anschließend können diese durch die Berücksichtigung der in den Matrizen abgebildeten Restriktionen reduziert werden. Die sich auf dieser Grundlage ergebenden zwölf Alternativen α bis μ sind in Tab. 5.3 dargestellt. Eine Vielzahl der zwölf Alternativen unterscheidet lediglich aufgrund der gewählten Reihenfolge der in der Technologiekette eingesetzten Technologien. Wesentliche Unterschiede sind schwerpunktmäßig durch die Entscheidung zwischen den Technologien T_1 und T_7 zur Realisierung der Bauteil-Feature A sowie den Technologien T_4 und T_6 für die Umsetzung von Bauteil-Feature E festzustellen.

Tab. 5.3: Alternative Technologieketten als Ergebnis der Generierung unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. bis 3. Art

Technologieketten- alternative	Produktions- ablauf	Position in der Technologiekette					
		1	2	3	4	5	6
α	1	T_1	T_9	T_2	T_4	T_5	T_3
β	1	T_1	T_9	T_2	T_6	T_5	T_3
γ	1	T_7	T_9	T_2	T_4	T_5	T_3
δ	1	T_7	T_9	T_2	T_6	T_5	T_3
ϵ	2	T_1	T_9	T_2	T_4	T_3	T_5
ζ	2	T_1	T_9	T_2	T_6	T_3	T_5
η	2	T_7	T_9	T_2	T_4	T_3	T_5
θ	2	T_7	T_9	T_2	T_6	T_3	T_5
ι	3	T_1	T_9	T_2	T_3	T_4	T_5
κ	3	T_1	T_9	T_2	T_3	T_6	T_5
λ	3	T_7	T_9	T_2	T_3	T_4	T_5
μ	3	T_7	T_9	T_2	T_3	T_6	T_5

Die Kombination einzelner Technologien hat unterschiedliche Eigenschaften und Fähigkeiten einer Technologiekette zur Folge (KNOCHE 2005), weshalb diese Unterschiede transparent zu machen sind. Daher wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, wie die weitere Untersuchung der Technologiekettenalternativen im Rahmen der Technologiefinbewertung erfolgt.

5.6 Schritt 4: Bewertung der Technologieketten

Nachdem im vorherigen Abschnitt alternative Technologieketten generiert wurden, sind deren jeweiligen Vor- und Nachteile aufzuzeigen, um so eine belastbare Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Hierzu ist auf die in Kapitel 4 eingeführten Bewertungskriterien zurückzugreifen. Im Gegensatz zur Technologiegrobbewertung von Abschnitt 5.4.3 sind nun die Bewertungskriterien der *Technologiereife*, der *Wirtschaftlichkeit* und des *Technologiepotenzials* zu bestimmen. Da die *Technische Machbarkeit* ein Ausschlusskriterium für die Realisierung der Produktionsaufgabe darstellt (siehe Abschnitt 4.6), ist zu dieser Planungsphase bereits sichergestellt, dass alle Technologieketten dieses Bewertungskriterium erfüllen. Aus diesem Grund muss die technische Machbarkeit nicht erneut in die Bewertung einfließen. Für die Technologiefinbewertung wird auf die in den Abschnitten 4.3 bis 4.5 eingeführten Methoden zur Bestimmung der Bewertungskriterien zurückgegriffen, wobei im Gegensatz zur Technologiegrobbewertung von Abschnitt 5.4.3 die Verwendung der bereitgestellten Modelle obligatorisch ist. Die Aggregation dieser Modelle im Rahmen der Technologiefinbewertung ist schematisch in Abb. 5.9 dargestellt.

Als finale Zielgröße für die Technologiefinbewertung wird der sog. *Eignungsgrad* der Technologiekette eingeführt. In diesem werden die zuvor bestimmten Bewertungskriterien der in Abhängigkeit der unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen sowie der formulierten Technologiestrategie (siehe Abschnitt 5.3.2) gewichtet zusammengeführt. Die Ergebnisse der Bestimmung der Bewertungskriterien liegen aufgrund der eingesetzten Monte-Carlo-Simulation in Form von Histogrammen vor, welche die Unsicherheiten der jeweiligen Bewertungskriterien abbilden. Daher ist auch der Eignungsgrad $\varphi_{E,TK}$ der Technologiekette wahrscheinlichkeitsverteilt. Dieser ergibt sich aus der unternehmensspezifisch durch den Faktor $q_{k,i}$ gewichteten Summe der Verhältnisse der jeweiligen Fähigkeiten $F_{i,TK}$ einer Technologiekette, d. h. den Ergebnissen aus der Bestimmung der Bewertungskriterien, zu den Anforderungen $A_{i,TK}$, d. h. den aus der Technologiestrategie abgeleiteten Grenzwerten für das jeweilige Kriterium:

$$\varphi_{E,TK} = \sum_{i=1}^3 q_{k,i} \cdot \frac{F_{i,TK}}{A_{i,TK}} \quad (5.4)$$

Bei der Auswahl der Technologieketten ist darauf zu achten, dass lediglich Alternativen zulässig sind, deren Quotient aus Fähigkeiten und Anforderungen $\frac{F_i}{A_i} \geq 1$ ist. Eine Integration weiterer unternehmensrelevanter Kriterien,

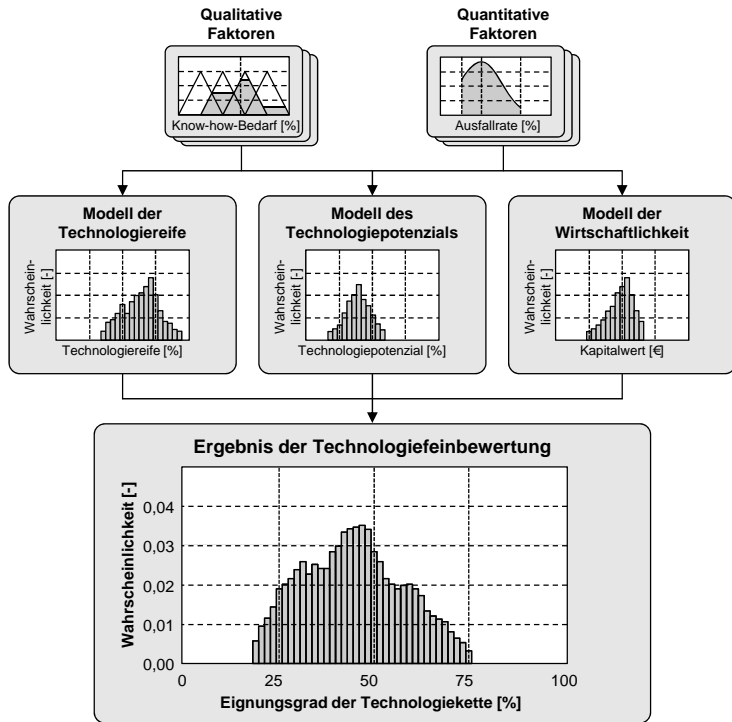


Abb. 5.9: Zusammenführung der Modelle der Technologiereife, der Wirtschaftlichkeit und des Technologiepotenzials im Rahmen der Technologiefinbewertung

wie bspw. der Ressourceneffizienz⁸¹, ist durch die Konstruktion der Formel des Eignungsgrads durch Erweiterung der Bewertungskriterien einfach möglich. Abb. 5.10 zeigt bspw. das Ergebnis der Technologiefinbewertung zweier alternativer Technologieketten α und β . Für einen Vergleich der Technologiekettensalternativen können zunächst die zugehörigen Mittelwerte der Eignungsgrade $\bar{\varphi}_E$ sowie die Streubreite der jeweiligen Histogramme betrachtet werden. Da die Flächen der Wahrscheinlichkeiten unter den Histogrammen in Summe

⁸¹ Hierzu sind entsprechende Bewertungsmodelle zu erstellen und zu integrieren. Im Fall der Ressourceneffizienz kann bspw. auf die Arbeiten von REINHARDT ET AL. (2012) zurückgegriffen werden.

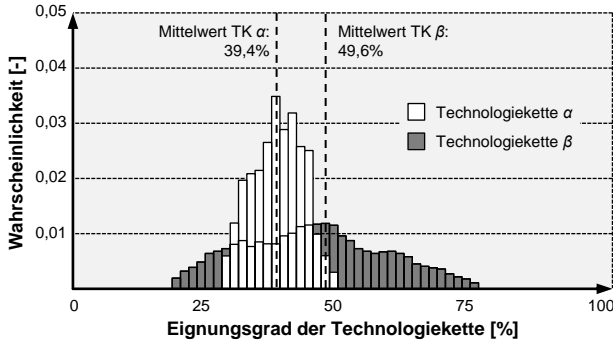


Abb. 5.10: Histogramm des Eignungsgrads alternativer Technologieketten als Ergebnis der Technologiefinbewertung in Anlehnung an REINHART ET AL. (2011b)

den Wert 1 ergeben, kann auf Basis der Streuungsbreite⁸² auf die mit einer Technologiekette verbundene Unsicherheit, d. h. die entsprechende Chance bzw. das Risiko, geschlossen werden (REINHART ET AL. 2008). Die Streuungsbreite der Verteilung korreliert positiv mit der bestehenden Unsicherheit (KREBS ET AL. 2009).

Während der Mittelwert des Eignungsgrad der Technologiekette β $\overline{\varphi_{E,\beta}}$ höher als derjenige von Technologiekette α ist, weist Technologiekette β auch die höhere Streuungsbreite auf. Aus Sicht des Mittelwerts scheint zunächst Technologiekette β die bessere Alternative zu sein. Wie Abb. 5.10 zu entnehmen ist, existieren aber aufgrund der Streuungsbreite auch Ziehungen der Technologiekette β , welche schlechter positioniert sind als die Werte der Technologiekette α . Um die Entscheidung für eine Technologiekette abzusichern, sind daher weitere Untersuchungen anzustellen. Der folgende Abschnitt beschreibt daher, wie die Histogramme der Technologiekettenalternativen analysiert und ausgewertet werden können, um eine belastbare Entscheidung zu erhalten.

Weitere Informationen zur Bewertung von Technologien und Technologieketten im Rahmen der strategischen Technologieplanung finden sich bei REINHART ET AL. (2011c) sowie REINHART & SCHINDLER (2012).

⁸² Die Begriffe *Streuungsbreite*, *Streubreite* und *Streuung* werden in diesem Zusammenhang in der wissenschaftlichen Literatur synonym verwendet.

5.7 Schritt 5: Interpretation und Auswahl

Um eine belastbare Entscheidung für die Einführung einer Technologiekette treffen zu können, müssen die Rahmenbedingungen, unter der die jeweilige Auswahl Gültigkeit besitzt, erörtert werden. Abb. 5.11 verdeutlicht die im Fall der Monte-Carlo-Simulation eintretenden Fragestellungen hierbei. Obwohl Technologiekette β im Mittel die vorteilhaftere Alternative darstellt, so existieren Ziehungen, bei denen Technologiekette α vorteilhafter ist. Aus diesem Grund ist zu analysieren, welche Faktoren einen Einfluss auf das Eintreten dieser Situation haben. Die Stellen, an der eine Alternative besser oder schlechter wird als eine andere, wird als sog. *Kippstelle* bezeichnet. Daher wird die Analyse, welche Faktoren einen Einfluss auf diese Kippstellen haben, in dieser Arbeit als *Kippszenario* bezeichnet.

Zur Identifikation der Kippstellen müssen zunächst diejenigen Faktoren gefunden werden, welche einen relevanten Einfluss auf den Eignungsgrad der Technologieketten haben. Hierzu eignet sich eine Sensitivitätsanalyse⁸³, anhand derer die Beeinflussbarkeit der jeweiligen Bewertungskriterien untersucht werden kann (KREBS 2012; GÖTZE 2010). Außerdem ist es möglich, diejenigen Faktoren zu identifizieren, welche sich am stärksten auf die Streubreite der Eignungsgrade der Technologieketten auswirken. In diesem Zusammenhang kann es Faktoren geben, deren Entwicklung sich unterschiedlich auf die beiden Technologieketten auswirken. Bei diesen Faktoren müssen sog. *Kippszenarien* durchgeführt werden.

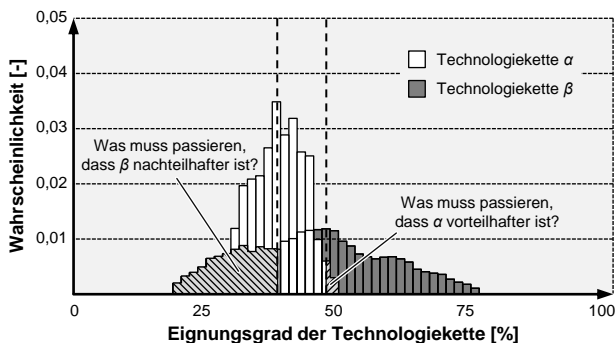


Abb. 5.11: Vergleich der Histogramme der Technologiekettenalternativen

⁸³ Die Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss über die Empfindlichkeit bzw. Stabilität des Ergebnisses einer Berechnung in Abhängigkeit der Eingangsfaktoren (GÖTZE 2010).

Abb. 5.12 zeigt ein derartiges Kippszenario am Beispiel des Faktors Materialpreis, welcher eine Eingangsgröße in die Modelle zur Bestimmung der Bewertungskriterien und damit dem Eignungsgrad darstellt. In der Abbildung ist die Wahrscheinlichkeit aufgetragen, dass Technologiekette α vorteilhafter ist, als Technologiekette β . Wie die Darstellung zeigt, ist dies erst ab einem Materialpreis von ca. 40 €/kg theoretisch möglich. Ab einem Materialpreis von ca. 68 €/kg ist Technologiekette α sogar stets besser als Technologiekette β . Um die Entscheidung für eine Technologiekette zu treffen, sind für alle nach der Sensitivitätsanalyse ausgewählten Faktoren Kippszenarien durchzuführen. Auf Basis der so identifizierten Kippstellen ist es zielführend, die zukünftige Entwicklung dieser Faktoren zu prognostizieren bzw. deren Wertebereich für den Betrachtungszeitraum, für den die strategische Planung der Technologiekette ausgelegt werden soll, abzuschätzen. Durch den finalen Abgleich dieser Wertebereiche mit den Kippstellen kann die am besten geeignete Technologiekettenalternative gewählt werden.

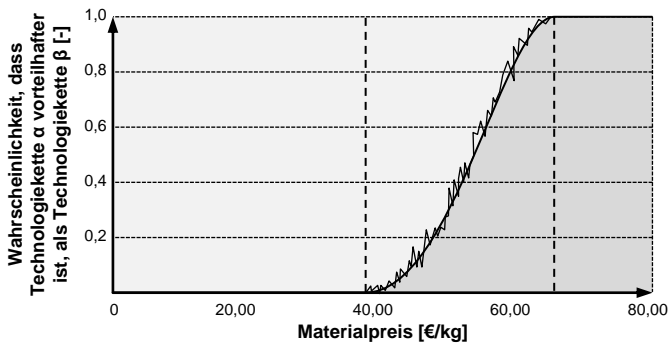


Abb. 5.12: Kippszenario zur Ermittlung der Einflussstärke von Faktoren auf das Bewertungsergebnis am Beispiel Materialpreis

6 Anwendung der Methodik

6.1 Allgemeines

Nachdem in den vorherigen Kapiteln 4 und 5 die in dieser Arbeit eingesetzten Modelle zur Bestimmung der Bewertungskriterien sowie die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten vorgestellt wurden, wird die entwickelte Methodik in diesem Kapitel anhand eines Anwendungsbeispiels nachvollzogen. Anschließend erfolgt eine Überprüfung der Erfüllung der in Kapitel 3 formulierten allgemeinen und praktischen Anforderungen an die Methodik sowie eine technisch-wirtschaftliche Bewertung.

6.2 Anwendungsbeispiel

6.2.1 Beschreibung des Anwendungsbeispiels

Das Anwendungsbeispiel hat zum Ziel, im Rahmen der strategischen Planung alternative Technologieketten für die Herstellung einer Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung zu generieren und die am besten geeignete Alternative auszuwählen. Hierzu werden in den Abschnitten 6.2.2 bis 6.2.6 die einzelnen Schritte der Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten durchlaufen.

6.2.2 Schritt 1: Technologiestrategie und Produktdefinition

Die Generierung und Auswahl der Technologiekette des Anwendungsbeispiels basiert auf der Strategie der technologischen Führerschaft. In Abhängigkeit davon sind die Grenzwerte und Gewichtungen der im Rahmen der Methodik eingesetzten Modelle einzustellen. Abb. 6.1 zeigt die zu produzierende Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung, welche sich im Wesentlichen aus einem Grundkörper aus Hartmetall (z. B. WC-Co) und einem Schneideinsatz aus polykristallinem Diamant (PKD) zusammensetzt. Die im Rahmen der strategischen Planung zu generierende Technologiekette soll in der Lage sein, eine Stückzahl u von ca. 5.000 Wendeschneidplatten pro Jahr zu produzieren. Diese sollen der Dreh- und Fräsbearbeitung von Hartmetallen dienen. Die Abmaße der zu fertigenden Wendeschneidplatten sollen eine Kantenlänge l

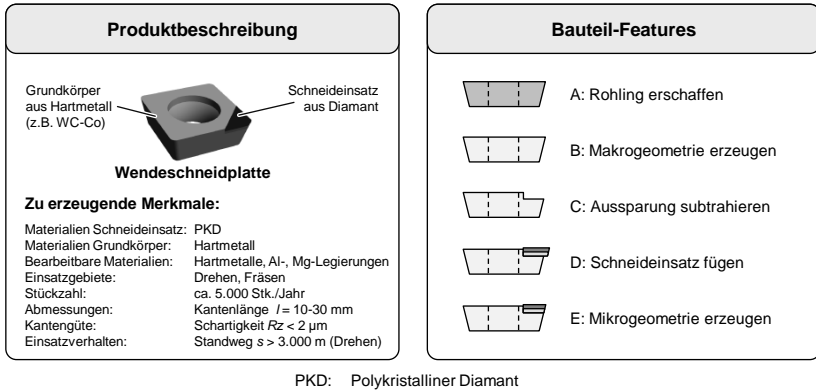


Abb. 6.1: Produktbeschreibung und Bauteil-Features der herzustellenden Wendschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung

zwischen 10 und 30 mm aufweisen. Zur Abschätzung der Materialkosten wird ein Volumen des Hartmetall-Grundkörpers V_G von ca. 540 mm^3 angenommen. Der Schneideinsatz aus PKD wird mit einem Volumen V_S von ca. 10 mm^3 abgeschätzt. Die technologische Führerschaft bezieht sich bei der vorliegenden Produktionsaufgabe in erster Linie auf die zu erzeugende Produktqualität. Als wesentliche Einflussfaktoren hierauf wurden in Anlehnung an KLOCKE & KÖNIG (2008) die zu erzielende Bearbeitungsgenauigkeit, die Schartigkeit Rz , der Standweg s bei Drehbearbeitung sowie die Einsatztemperatur T_E identifiziert. Neben der Produktbeschreibung zeigt Abb. 6.1 die zu realisierenden Bauteil-Features der Wendschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung, welche in Anlehnung an die von FRIEMUTH (2002) beschriebene Prozesskette zur Herstellung von Werkzeugen formuliert wurden. Nach der Erschaffung des Hartmetall-Rohlings (Bauteil-Feature A) aus dem pulverförmigen Ausgangsmaterial ist die Makrogeometrie zu erzeugen (Bauteil-Feature B). Nach der Erzeugung der Form des Hartmetallgrundkörpers ist anschließend die Fügestelle für das Einbringen des PKD-Schneideinsatzes auszuspären (Bauteil-Feature C). Der Schneideinsatz stellt ein Zulieferteil dar, weshalb die Technologiekette zur dessen Herstellung nicht explizit betrachtet werden soll. Nach dem Verbinden von Hartmetallgrundkörper und Schneideinsatz (Bauteil-Feature D), ist im letzten Produktionsschritt die Mikrogeometrie der Wendschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung zu erzeugen (Bauteil-Feature E). Hierzu sind i. W. die Funktionsflächen der Schneide zu realisieren. Die Übergänge zwischen den Bauteil-Features A bis E sind als die von FALLBÖHMER (2000) eingeführten Zwischenzustände zur Auslegung der Technologiekette zu verstehen.

6.2.3 Schritt 2: Technologieidentifikation und -vorauswahl

Für die Umsetzung der im vorherigen Abschnitt formulierten Produktionsaufgabe konnten eine Reihe potenziell einsatzfähiger Technologiealternativen aus der Technologiefrüherkennung übernommen werden, welche in Abb. 6.2 dargestellt sind. Hierbei wurden gemäß der Vorgabe aus Abschnitt 5.4.3 keine Sekundärtechnologien zur Vor- und Nachbearbeitung berücksichtigt.

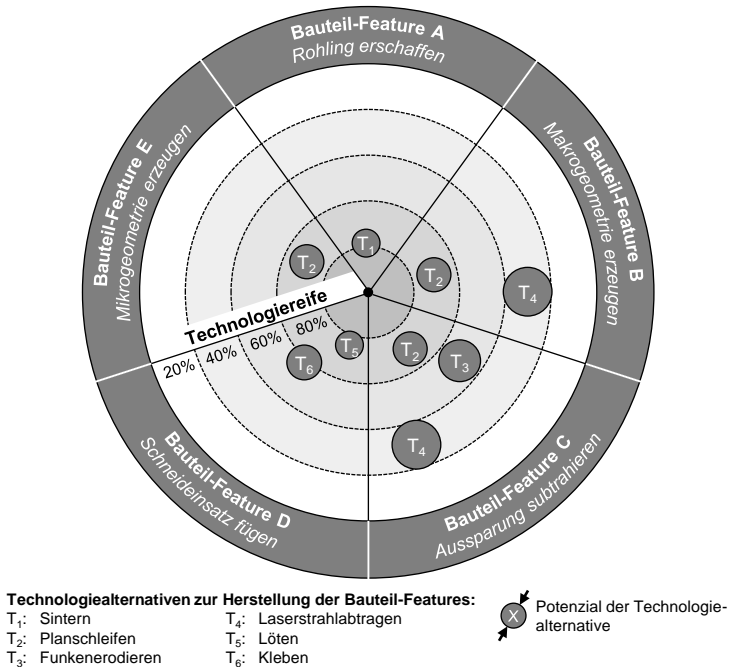


Abb. 6.2: Technologiegrobewertung und -vorauswahl der im Rahmen des Technologie-Screenings identifizierten Alternativen zur Herstellung der verschiedenen Bauteil-Features der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung

Nach der Identifizierung wurden die Technologien den einzelnen Bauteil-Features A bis E der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung zugeordnet. Dazu erfolgte anhand zuvor festgelegter Material-, Produktions- und Produktmerkmale zur Bestimmung der technischen Machbarkeit eine Vorauswahl auf Basis der einzelnen Bauteil-Features, wodurch sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Technologien auf die Alternativen T₁ bis T₆ reduzierte. Zur Darstellung der identifizierten Technologien im Technologieradar von Abb. 6.2

erfolgte die Technologiegrobbewertung der einzelnen Alternativen auf Basis der weiteren Bewertungskriterien der Technologiereife und des Technologiepotenzials (siehe Abschnitt 5.4.3). Neben etablierten Technologien, wie dem Schleifen, wurden auch innovative Technologien, wie bspw. das Funkenerodieren oder das Laserstrahlabtragen, mit in die engere Auswahl aufgenommen. Während für die Bauteil-Feature *A* und *E* nur jeweils eine Option zur Verfügung stand, wurden v. a. für die Erzeugung der Makrogeometrie von Bauteil-Feature *B*, die Erzeugung der Aussparung von Bauteil-Feature *C* sowie für den Fügeprozess von Bauteil-Feature *D* mehrere Technologiealternativen identifiziert, die sich nach der Technologiegrobbewertung teilweise erheblich im Entwicklungsstand und ihrem Technologiepotenzial unterschieden.

6.2.4 Schritt 3: Generierung von Technologieketten

Nachdem die Technologien identifiziert und für die Produktionsaufgabe relevante Bauteil-Features⁸⁴ festgelegt wurden, galt es, alternative Technologieketten für die Herstellung der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung zu generieren. Hierzu wurden nach dem in Abschnitt 5.5.5 beschriebenen Vorgehen zunächst Wechselwirkungen 1. Art zwischen den Bauteil-Features *A* bis *E* diskutiert und aufgenommen. Das Ergebnis ist in der Bauteil-Feature-Relation-Matrix M_{BFR} in Abb. 6.3 dargestellt.

Bauteil-Feature-Relation-Matrix M_{BFR}							
Bauteil-Features			Bauteil-Features				
Substantiv	Verb	Abkürzung	A	B	C	D	E
Rohling	erschaffen	A	-	1	1	1	1
Makrogeometrie	erzeugen	B	-1	-	0	1	1
Aussparung	subtrahieren	C	-1	0	-	1	1
Schneideinsatz	fügen	D	-1	-1	-1	-	1
Mikrogeometrie	erzeugen	E	-1	-1	-1	-1	-

0: keine Wechselwirkung, 1: Zeile vor Spalte, -1: Zeile nach Spalte

Abb. 6.3: Abbildung der Wechselwirkungen 1. Art zwischen den Bauteil-Features *A* bis *E* der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung

Wie die Abbildung zeigt, bauen die Bauteil-Features stark aufeinander auf und können nicht beliebig im Produktionsablauf angeordnet werden. Lediglich die Bauteil-Features *B* und *C* sind unabhängig kombinierbar. Die aus der Bauteil-Feature-Relation-Matrix M_{BFR} abgeleiteten gültigen Produktionsabläufe zeigt

⁸⁴ Die Erzeugung von einzelnen Bauteil-Features kann im Rahmen der Methodik sowohl durch Subtrahieren als auch durch Addieren oder Integrieren erfolgen.

Tab. 6.1: Zulässige Produktionsabläufe für die Herstellung der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung nach Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. Art

Produktions- ablauf	Position im Produktionsablauf				
	1	2	3	4	5
1	A	B	C	D	E
2	A	C	B	D	E

Tab. 6.1. Anschließend galt es, Wechselwirkungen zwischen den identifizierten Technologiealternativen T_1 bis T_6 zur Herstellung der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung aufzunehmen und abzubilden. Diese Wechselwirkungen 2. Art sind in der Technologie-Relation-Matrix M_{TR} in Abb. 6.4 dargestellt. Neben den typischer Weise einzuhaltenden Reihenfolgebedingungen zwischen urformenden, formgebenden und fügenden Technologien schließen sich in erster Linie die fügenden Technologien T_5 und T_6 gegenseitig aus. Für die Generierung alternativer Technologieketten bedeutete dies allerdings keine Einschränkung, da die Technologien T_5 und T_6 jeweils Alternativen für die Herstellung des Bauteil-Features D darstellen. Außerdem wurden aufgrund technologischer Rahmenbedingungen die Technologien T_2 und T_3 in den Bauteil-Features B und C nicht mit dem Laserstrahlabtragen T_4 kombiniert. Die Erzeugung der Makrogeometrie von Bauteil-Feature B und das Subtrahieren der Aussparung von Bauteil-Feature C (siehe Abb. 6.2) stellen beides Schruppprozesse dar.

Technologie-Relation-Matrix M_{TR}							
Technologien		Technologien					
Bezeichnung	Abkürzung	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Sintern	T1	-	1	1	1	1	1
Planschleifen	T2	-1	-	0	0	0	0
Funkenerodieren	T3	-1	0	-	n	0	0
Laserstrahlabtragen	T4	-1	0	n	-	0	0
Löten	T5	-1	0	0	0	-	n
Kleben	T6	-1	0	0	0	n	-

0: keine Wechselwirkung, 1: Zeile vor Spalte, -1: Zeile nach Spalte, n : unzulässige Kombination

Abb. 6.4: Abbildung der Wechselwirkungen 2. Art zwischen den Technologien T_1 bis T_6 zur Herstellung der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung

Im vorliegenden Fall sollte daher für diese Prozessschritte das Laserstrahlabtragen T_4 beibehalten werden⁸⁵. Die Technologie T_4 für das Bauteil-Feature C ist somit nicht mit den beiden Technologien T_2 und T_3 für Bauteil-Feature B kombinierbar. Aus diesem Grund wurde Produktionsablauf 2 von Tab. 6.1 ausgeschlossen und musste nicht mehr separat betrachtet und bewertet werden. Für den Schlichtprozess⁸⁶ im Rahmen der Erzeugung von Bauteil-Feature E wurde das Laserstrahlabtragen T_4 gestrichen, um das Risiko einer thermischen Randzonenschädigung auszuschließen. Bevor Technologiekettenalternativen generiert werden konnten, waren die Wechselwirkungen 3. Art zu modellieren. Diese sind in Abb. 6.5 dargestellt. Wie die ermittelte Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix M_{TBFR} zeigt, sind grundsätzlich sämtliche potenziell einsatzfähigen Technologien T_1 bis T_6 mit den Bauteil-Features A bis E der Wendeschneidplatte zur Hartmetallbearbeitung vereinbar und im Rahmen der Technologiekette einsetzbar. Allerdings stellten die Technologien T_2 , T_3 und T_4 Know-how-intensive Technologien dar, weshalb lediglich zwei dieser Technologiealternativen in einer Technologiekette eingesetzt werden sollten.

Technologie-Bauteil-Feature-Relation-Matrix M_{TBFR}									
Bauteil-Features			Technologien						
Substantiv	Verb	Abkürzung	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Rohling	erschaffen	A	1	0	0	0	0	0	0
Makrogeometrie	erzeugen	B	0	1	0	1	0	0	0
Aussparung	subtrahieren	C	0	1	1	1	0	0	
Schneideinsatz	fügen	D	0	0	0	0	1	1	
Mikrogeometrie	erzeugen	E	0	1	0	0	0	0	

0: keine Wechselwirkung, 1: Zeile vor Spalte, -1: Zeile nach Spalte, n: unzulässige Kombination

Abb. 6.5: Abbildung der Wechselwirkungen 3. Art zwischen den Technologien T_1 bis T_6 zur Herstellung der Bauteil-Features A bis E der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung

Das Ergebnis der Generierung alternativer Technologieketten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen 1. bis 3. Art ist in Tab. 6.3 zusammengefasst. Zur Auswahl standen insgesamt sechs Technologiekettenalternativen α bis ζ . Hierbei konnte festgestellt werden, dass eine Reihe von Technologiekettenalternativen α bzw. β sowie ϵ bzw. ζ existierten, bei deren Anwendung die Herstellung der Bauteil-Features B und C u. U. zusammengefasst werden konnten (BRECHER ET AL. 2013). Außerdem unterschieden sich jeweils zwei Technologiekettenalternativen α und β , γ und δ sowie ϵ und ζ jeweils lediglich

⁸⁵ Beim Schruppprozess handelt es sich um einen großvolumigen Materialabtrag, bei dem die Produktivität im Vordergrund steht (KLOCKE 2009b).

⁸⁶ Beim Schlichtprozess werden geringe Materialmengen abgetragen, um die notwendige Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität des Bauteils zu gewährleisten (KLOCKE 2009b).

Tab. 6.3: Alternative Technologieketten zur Herstellung der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen 1. bis 3. Art als Ergebnis der Generierung

Technologieketten- alternative	Produktions- ablauf	Position in der Technologiekette				
		1	2	3	4	5
α	1	T_1	T_2	T_2	T_5	T_2
β	1	T_1	T_2	T_2	T_6	T_2
γ	1	T_1	T_2	T_3	T_5	T_2
δ	1	T_1	T_2	T_3	T_6	T_2
ϵ	1	T_1	T_4	T_4	T_5	T_2
ζ	1	T_1	T_4	T_4	T_6	T_2

in einer Technologie T_5 bzw. T_6 für das fügende Bauteil-Feature D . Auf Basis unternehmensinterner Präferenzen wurde entschieden, die Technologieketten α , γ und ζ weiterzuverfolgen und detaillierten Untersuchungen zu unterziehen, weshalb im Rahmen der Technologiefinbewertung die Vor- und Nachteilhaftigkeit dieser Technologiekettenalternativen erörtert wurden.

6.2.5 Schritt 4: Bewertung der Technologieketten

Im Rahmen der Technologiefinbewertung waren die im vorherigen Abschnitt ausgewählten drei Technologiekettenalternativen α , γ und ζ detailliert zu untersuchen und zu bewerten. Hierzu waren die in Abschnitt 4 eingeführten Modelle zu verwenden. Im Detail war in diesem Zusammenhang die Bewertungskriterien der Technologiereife, der Wirtschaftlichkeit und des Technologiepotenzials zu bestimmen. Um den Einsatz der benötigten Modelle besser nachvollziehen zu können, wird nachfolgend das Vorgehen, welches in Abschnitt 5.6 theoretisch beschrieben wurde, zunächst bspw. anhand der Technologiekettenalternative α erläutert. Die Technologiekette α war grundsätzlich aus den drei Technologien des Sinterns T_1 für Bauteil-Feature A , des Lötens T_5 für Bauteil-Feature D und des Planschleifens T_2 zusammengesetzt, wobei letzteres für die Bauteil-Features B , C und E Anwendung finden sollte. Gemäß dem Planungsvorgehen wurden zunächst die Entwicklungsstände der einzelnen Technologien bestimmt, um auf die Technologiereife der gesamten Technologiekette schließen zu können. Hierzu wurde jeweils der in Abschnitt 4.3 eingeführte und im Anhang A befindliche Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien verwendet. Das Ergebnisse der Bestimmung der Reife der einzelnen Technologien der Technologiekette α zeigt Abb. 6.6.

Technologiereife M_T							
Gewichtung		T_1 Sintern		T_2 Planschleifen		T_5 Löten	
TRL	q_M	Reife-Fortschritt	M_{T1}	Reife-Fortschritt	M_{T2}	Reife-Fortschritt	M_{T5}
1	5 %	$m_{TRL,1}$ 50%	79 %	$m_{TRL,1}$ 100%	68 %	$m_{TRL,1}$ 100%	91 %
2	5 %	$m_{TRL,2}$ 70%		$m_{TRL,2}$ 100 %		$m_{TRL,2}$ 100 %	
3	15 %	$m_{TRL,3}$ 60 %		$m_{TRL,3}$ 30 %		$m_{TRL,3}$ 100 %	
4	15 %	$m_{TRL,4}$ 100 %		$m_{TRL,4}$ 40 %		$m_{TRL,4}$ 80 %	
5	20 %	$m_{TRL,5}$ 76 %		$m_{TRL,5}$ 80 %		$m_{TRL,5}$ 90 %	
6	20 %	$m_{TRL,6}$ 78%		$m_{TRL,6}$ 90 %		$m_{TRL,6}$ 89%	
7	20 %	$m_{TRL,7}$ 90%		$m_{TRL,7}$ 70 %		$m_{TRL,7}$ 90 %	

M: Reife $m_{TRL,i}$: Reife-Fortschritt in TRL i q_M : Gewichtungsfaktor für Reifegradstufe
 TRL: Technology Readiness Level T_i : Technologien

Abb. 6.6: Ergebnis der deterministischen Reifebestimmung der einzelnen Technologien der Technologiekette α

Auf der linken Seite von Abb. 6.6 sind die Gewichtungen q_M der sieben Reifegradstufen (TRL) aufgeführt. Auf Basis der Bestimmung der Technologiereife⁸⁷ ist das Löten T_5 mit 91% am weitesten entwickelt. Das Sintern T_1 erreichte einen Wert von 79%, gefolgt vom Planschleifen T_2 mit 68%. Positiv fiel grundsätzlich auf, dass bei allen drei Technologien der Reife-Fortschritt v. a. der anwendungsnahen Reifegradstufen 5 bis 7 weit vorangeschritten war. Aus diesem Grund wurden Risiken im Bezug auf die technische und organisatorische Anwendung als vergleichsweise gering eingeschätzt, auch wenn beim Planschleifen noch erheblicher Entwicklungsbedarf im Bereich der Reifegradstufen 3 und 4 identifiziert wurde.

Wie in Abschnitt 4.3.4.2 beschrieben, ergibt sich die Reife der Technologiekette α auf Basis der in ihr enthaltenen Technologien nach Gleichung 4.3 zu:

$$M_{TK,\alpha} = 1 - \left[\sum_{i=1}^7 (1 - m_{TRL,TK,\alpha,i}) \cdot q_{M,i} \right] \tag{6.1}$$

Dabei resultiert der Reife-Fortschritt $m_{TRL,TK,\alpha,i}$ in den sieben Reifegradstufen der Technologiekette α entsprechend der Gleichung 4.2 aus den jeweiligen Entwicklungsständen der Reifegradstufen der in ihr enthaltenen Technologien (T_1 , T_2 und T_5) nach folgendem Zusammenhang:

$$m_{TRL,TK,\alpha,i} = \frac{1}{5} \cdot (m_{TRL,T1,i} + 3 \cdot m_{TRL,T2,i} + m_{TRL,T5,i}) \tag{6.2}$$

⁸⁷ Die hier angegebenen Werte stammen aus der deterministischen Berechnung der Technologiereife.

Abb. 6.7 zeigt die Histogramme der Reife der einzelnen Technologien (T_1 , T_2 und T_5) und der Technologiekette α als Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation. Hierbei wurden die Faktoren, welche in die jeweiligen Fragebögen zur Bestimmung der Technologiereife eingehen, in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert (siehe hierzu Abschnitte 2.3.2 und 4.3.4.2). Wie der Abbildung zu entnehmen ist, unterschieden sich die jeweiligen Mittelwerte der Technologiereife (Mean⁸⁸) z. T. leicht von den deterministischen Ergebnissen. Dies war auf die unsicherheitsbehaftete Berechnung zurückzuführen, da viele der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsfaktoren eine Schiefe aufwiesen. Die Reife der Technologiekette α wies einen Mittelwert von 73 % auf, wobei die gezogenen Werte um $\pm 5\%$ um den Mittelwert schwankten. Für die Anwendbarkeit wurde als minimaler Reife-Fortschritt einer Reifegradstufe 50 % gefordert und als minimaler Wert für die Reife der Technologiekette 70 % vorausgesetzt.

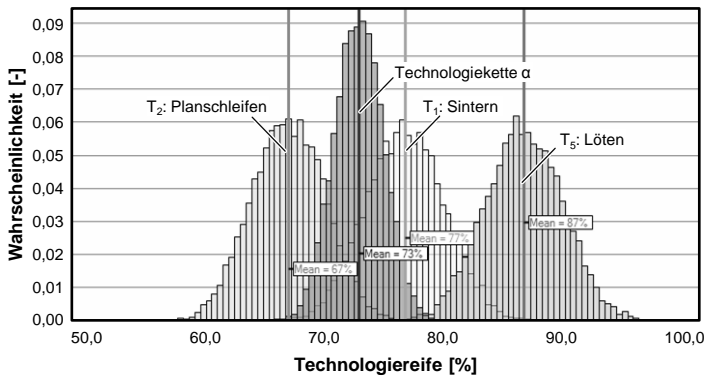


Abb. 6.7: Übersicht über die Histogramme der Technologiereife für die einzelnen Technologien und die resultierende Technologiekette α

Die Ergebnisse der deterministischen Bestimmung der Reife der Technologieketten α , γ und ζ zeigt Abb. 6.8. Hierbei war auffällig, dass die Technologiekette ζ die geforderten Mindestwerte in Reifegradstufe 3 sowie den Grenzwert für die Reife der Technologiekette nicht erreichte. Die Technologieketten α und γ erzielten den gleichen Gesamtwert von 75 % und wiesen ein nahezu identisches Reife-Profil auf. Um die Reife der Technologiekettenalternativen α , γ und ζ beurteilen und die entsprechenden technischen und organisatorischen Risiken einschätzen zu können, war eine unsicherheitsbehaftete Berechnung durchzuführen.

⁸⁸ Bezeichnung für den Mittelwert (engl. mean) der Histogramme

Technologiereife M_{TK}							
Gewichtung		Technologiekette α		Technologiekette γ		Technologiekette ζ	
TRL	q_M	Reife-Fortschritt	$M_{TK\alpha}$	Reife-Fortschritt	$M_{TK\gamma}$	Reife-Fortschritt	$M_{TK\zeta}$
1	5 %	$m_{TRL,1}$ 90%	75 %	$m_{TRL,1}$ 90%	75 %	$m_{TRL,1}$ 60%	68 %
2	5 %	$m_{TRL,2}$ 94 %		$m_{TRL,2}$ 86 %		$m_{TRL,2}$ 88 %	
3	15 %	$m_{TRL,3}$ 50 %		$m_{TRL,3}$ 56 %		$m_{TRL,3}$ 42 %	
4	15 %	$m_{TRL,4}$ 60 %		$m_{TRL,4}$ 68 %		$m_{TRL,4}$ 80 %	
5	20 %	$m_{TRL,5}$ 81 %		$m_{TRL,5}$ 78 %		$m_{TRL,5}$ 69 %	
6	20 %	$m_{TRL,6}$ 87%		$m_{TRL,6}$ 86 %		$m_{TRL,6}$ 83%	
7	20 %	$m_{TRL,7}$ 78 %		$m_{TRL,7}$ 72 %		$m_{TRL,7}$ 60 %	

M: Reife $m_{TRL,i}$: Reife-Fortschritt in TRL i q_M : Gewichtungsfaktor für Reifegradstufe
 TRL: Technology Readiness Level T_i: Technologien TK: Technologiekette

Abb. 6.8: Ergebnis der deterministischen Reifebestimmung der Technologieketten α , γ und ζ

Abb. 6.9 zeigt das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Reife der Technologieketten. Auch hier wurde bestätigt, dass aus Sicht des Entwicklungsstands die Technologieketten α und γ quasi identisch und v. a. vorteilhaft ggü. Technologiekette ζ waren. Die Histogramme der Technologieketten α und γ sind nahezu deckungsgleich, wobei Technologiekette γ eine geringfügig kleinere Schwankungsbreite aufwies, was auf geringere technische und organisatorische Risiken rückschließen lässt. Da auch die Mittelwerte der beiden Technologieketten α und γ übereinander liegen, erschienen beide Alternativen aus Sicht des Entwicklungsstandes gleichermaßen geeignet.

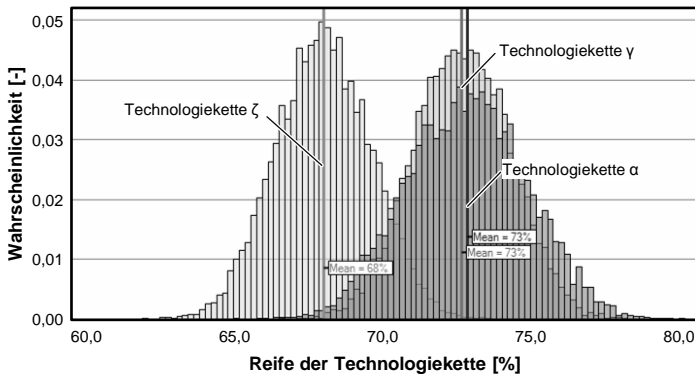


Abb. 6.9: Übersicht über die Histogramme der Reife für die Technologiekette α , γ und ζ

Der Grenzwert für die Reife der Technologiekette von 70 % wurde im Mittel durch beide Technologiekettenalternativen erreicht⁸⁹.

Nachdem die Reife der Technologiekettenalternativen ermittelt wurde, galt es, deren Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Hierzu konnte auf die in Abschnitt 4.4 eingeführten Modelle für die Bestimmung der Entwicklungskosten, der Herstellstückkosten sowie des daraus resultierenden Kapitalwertes zurückgegriffen werden. Nachfolgend wird die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit anhand der Technologiekette α nachvollzogen, bevor die Ergebnisse der weiteren Alternativen γ und ζ diskutiert werden. Zunächst wurden die Herstellstückkosten der Technologiekette α gemäß Gleichung 4.8 ermittelt, wobei auf die Berücksichtigung des Lernfaktors α_L verzichtet wurde. Eine Übersicht über das deterministische Ergebnis der Bestimmung der Herstellstückkosten $HSK_{TK,\alpha}$ der Technologiekette α zeigt Abb. 6.10.

Herstellstückkosten HSK_{α} der Technologiekette α							
Bauteil-Feature	Technologie	TSS	MSS	Bedienverhältnis	Prozesszeit	FSK	Summe
A	T ₁ Sintern	16,00 €/h	19,40 €/h	20 %	0,10 h	1,99 €/Stk.	21,99 €/Stk.
B	T ₂ Planschleifen	22,30 €/h	29,80 €/h	80 %	0,12 h	5,54 €/Stk.	
C	T ₂ Planschleifen	22,30 €/h	29,80 €/h	80 %	0,02 h	0,92 €/Stk.	
D	T ₅ Löten	6,10 €/h	16,40 €/h	100 %	0,10 h	2,25 €/Stk.	
E	T ₂ Planschleifen	32,60 €/h	29,80 €/h	80 %	0,20 h	11,29 €/Stk.	
Werkstoff			Masse	Materialpreis	MSK	Summe	
Hartmetall K10			7,56 g	110,00 €/kg	0,83 €	1,90 €/Stk.	
PKD-Schneideinsatz			41,72 mg	25.500,00 €/kg	1,06 €		
Summe der Herstellstückkosten							23,88 €/Stk.

TSS: Technologiestundensatz MSS: Mitarbeiterstundensatz FSK: Fertigungsstückkosten
MSK: Materialstückkosten HSK: Herstellstückkosten

Abb. 6.10: Übersicht über die deterministische Berechnung der Herstellstückkosten der Technologiekette α

Die Fertigungsstückkosten machten v. a. aufgrund der Know-how-intensiven Technologien einen Großteil der Herstellstückkosten aus. Wesentlicher Kostentreiber in der Technologiekette α war das Planschleifen T_2 ⁹⁰. Die Materialkosten hatten nur einen geringen Einfluss auf die Herstellstückkosten. Neben den Herstellstückkosten wurden unter Verwendung von Gleichung 4.9 auch die Entwicklungskosten für die in der Technologiekette α enthaltenen Technologien

⁸⁹ Eine Übersicht über die detaillierten Ergebnisse der Reifebestimmung der einzelnen Technologien sowie der Technologieketten α , γ und ζ befinden sich im Anhang in Abschnitt B.

⁹⁰ Der abweichende Technologiestundensatz für das Planschleifen von Bauteil-Feature E ergibt sich aufgrund hochwertigerer Werkzeuge für den Schlichtprozess.

abgeschätzt. Abb.6.11 zeigt die Übersicht der zu erwartenden Entwicklungskosten der Technologien T_1 , T_2 und T_3 sowie der Technologiekette α .

Entwicklungskosten EK_α der Technologiekette α						
TRL	T_1 Sintern		T_2 Planschleifen		T_3 Löten	
	EK_{T1}	Summe	EK_{T2}	Summe	EK_{T3}	Summe
1	60.000 €	428.500 €	0 €	575.500 €	0 €	152.500 €
2	41.500 €		0 €			
3	125.000 €		240.000 €			
4	0 €		134.500 €		41.500 €	
5	126.000 €		71.000 €		41.000 €	
6	46.000 €		40.000 €		40.000 €	
7	30.000 €		90.000 €		30.000 €	
Summe der Entwicklungskosten						1.156.500 €

EK: Entwicklungskosten T_i : Technologien TRL: Technology Readiness Level

Abb. 6.11: Übersicht über die deterministische Berechnung der Entwicklungskosten der Technologiekette α

Bei der Festlegung der Entwicklungskosten wurden die entstehenden Kosten auf die sieben Reifegradstufen entsprechend der Reife-Fortschritte unter den Vorgaben aus Abschnitt 4.4.2.1 aufgeteilt. Sowohl beim Sintern T_1 als auch beim Planschleifen T_2 waren noch relevante Entwicklungsumfänge zu tätigen. Auffällig war, dass beim Planschleifen T_2 in den mittleren Reifegradstufen, welche für die konzeptionelle Entwicklung sowie die Simulation verantwortlich zeichnen, signifikante Entwicklungsumfänge eingeschätzt wurden. Um die Wirtschaftlichkeit der Technologiekette α beurteilen zu können, waren die erwarteten Kosten auf 10 Perioden umzulegen, wobei nicht der gesamte Produktlebenszyklus (PLZ) der Wendeschneidplatte für die Hartmetallbearbeitung eingeschlossen wurde. Im Rahmen der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit sollte lediglich eine Übergangsphase vom Beginn des Technologieentwicklungsprozesses bis zum Abschluss der Anlaufphase nach dem SOP betrachtet werden.

Abb. 6.12 zeigt die Aufteilung der ermittelten Entwicklungs- und Herstellkosten auf die zu betrachtenden 10 Perioden. Für die Produktion wurde die Stückzahl je Periode mit den zuvor ermittelten Herstellstückkosten multipliziert. Die maximal geforderte Stückzahl von 5.000 Wendeschneidplatten sollte ab Periode 8 erreicht werden. Außerdem wurden die Entwicklungskosten auf die ersten Perioden bis zum *Start of Production* (SOP) aufgeteilt. Der SOP wurde für die Periode 5 angenommen, d. h. ab dieser Periode wurde die Stückzahl Schrittweise gesteigert. Unter Verwendung von Gleichung 4.12 konnte ein Kapitalwert $NPV_{TK\alpha}$ der Technologiekette α von 1.294.685 € ermittelt werden, wobei ein Kalkulationszinssatz $i_{NPV,TK}$ von 10 % gefordert wurde. Die Gesamtsumme der Herstellkosten belief sich auf 537.321 €, die deterministische Berechnung der Entwicklungskosten ergab einen Wert von 1.156.500 €.

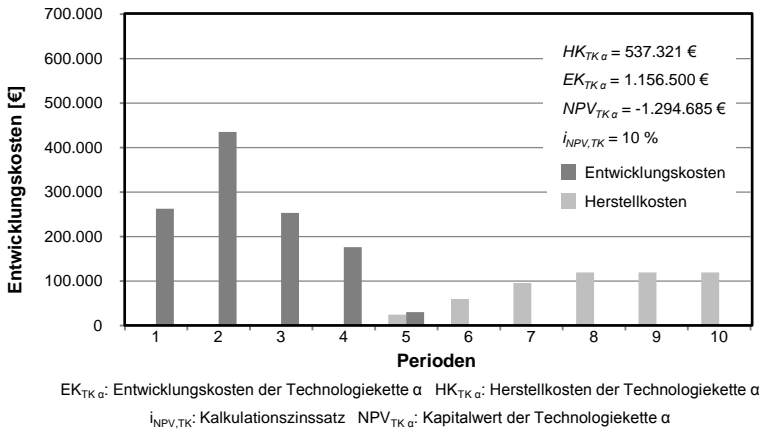


Abb. 6.12: Übersicht der Herstell- und Entwicklungskosten der Technologiekette α betrachtet für 10 Perioden

Um die drei Technologieketten α , γ und ζ miteinander zu vergleichen, war die unsicherheitsbehaftete Berechnung der Herstellstückkosten zu betrachten. Dazu wurden die Technologie- und Mitarbeiterstundensätze, die Materialpreise für das Hartmetall sowie den PKD-Schneideinsatz sowie entstehende Entwicklungskosten (siehe Gleichung 4.9) als Unsicherheiten abgebildet. Abb. 6.13 zeigt eine Übersicht der aus der Monte-Carlo-Simulation stammenden Histogramme der Herstellstückkosten. Während die Mittelwerte der Technologieketten α und ζ nah beieinander lagen (23, 32 € bzw. 24, 18 €), fielen im Mittel bei Technologiekette γ signifikant höhere Herstellstückkosten von 30, 27 € an. Gegenüber Technologiekette ζ wies Alternative α die geringere Streubreite auf. Dies war in erster Linie auf die größere Technologiereife zurückzuführen. Aus Sicht der Herstellstückkosten waren die Technologieketten α und ζ zu bevorzugen, wobei Alternative ζ die wesentlich höheren Risiken, aber auch die geringfügig größeren Chancen beinhaltete.

Nachdem die Entwicklungskosten bereits bei der deterministischen Berechnung erheblich von einander abwichen, konnten für die finale Betrachtung die Histogramme der Kapitalwerte der Technologieketten α , γ und ζ beurteilt werden. Abb. 6.14 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse der unsicherheitsbehafteten Berechnung. Während Technologiekette α einen mittleren Kapitalwert von $-1.288.486 \text{ €}$ erreichte, waren die Alternativen γ und ζ mit Werten von $-1.860.937 \text{ €}$ bzw. $-2.054.236 \text{ €}$ erheblich nachteilhafter. Dies war auf die wesentlich höheren Entwicklungskosten der Technologieketten γ und ζ zurückzuführen.

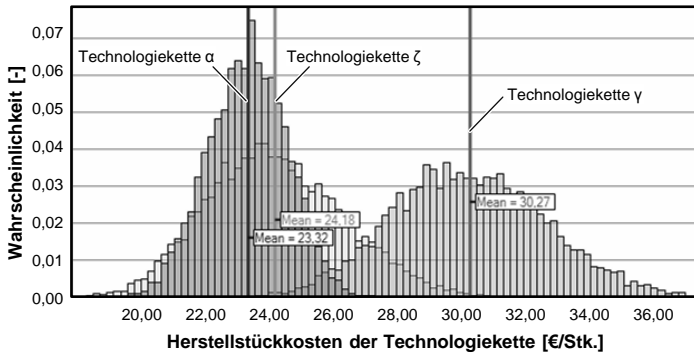


Abb. 6.13: Übersicht über die Histogramme der Herstellstückkosten für die Technologiekette α , γ und ζ

Aus Sicht der Betrachtung der Kapitalwerte, was analog dem Vorgehen aus Abschnitt 4.4.2.2 die finale Zielgröße zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit darstellt, war Technologiekette α klar ggü. den anderen Alternativen zu bevorzugen⁹¹. Allerdings sind die Einsparpotenziale, v. a. von Technologiekette ζ , aus Sicht der Herstellstückkosten theoretisch vorhanden, da auch Ziehungen existieren, die vorteilhaft ggü. der Alternative α sind. Daher ist aus Kostensicht eine zukünftige, erneute Betrachtung der Alternative ζ sinnvoll. In diesem Zusammenhang ist allerdings auf die Reife-Fortschritte der in dieser Technologiekette enthaltenen Technologien des Laserstrahlabtragens T_4 und des hochtemperaturbeständigen Klebens T_6 des PKD-Schneideinsatzes zu achten, um den Einsatz dieser Technologien gegen technische und organisatorische Risiken abzusichern.

Um die Technologiefeybewertung abzuschließen, musste noch das Technologiepotenzial bestimmt werden, was nachfolgend anhand der Technologiekette α nachvollzogen wird, bevor die Ergebnisse der weiteren Alternativen γ und ζ diskutiert werden. Wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, waren hierzu zunächst die für das Technologiepotenzial maßgeblichen Leistungsparameter festzulegen. Diese hingen i. W. von den Einflussfaktoren auf die Produktqualität der herzustellenden Wendeschneidplatte ab, welche in Abschnitt 6.2.2 bereits eingeführt wurden.

⁹¹ Eine Übersicht der detaillierten Ergebnisse der Berechnung der Herstellstückkosten, der Entwicklungskosten sowie der daraus abgeleiteten Bestimmung der Wirtschaftlichkeit für die Technologieketten α , γ und ζ befinden sich im Anhang in Abschnitt C.

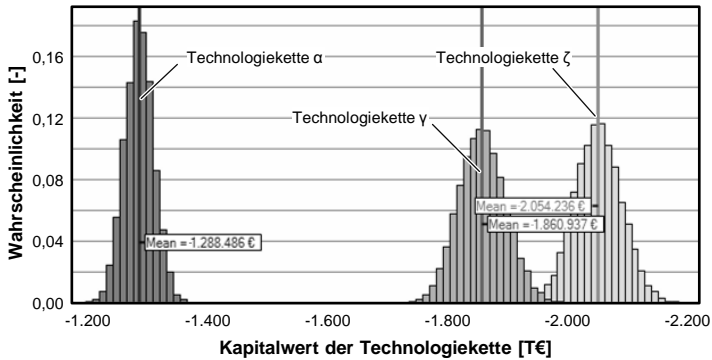


Abb. 6.14: Übersicht über die Histogramme der Kapitalwerte für die Technologiekette α , γ und ζ

Abb. 6.15 zeigt die durch die Technologiekette α erreichten Werte⁹². Als wesentliche Leistungsparameter wurden die Bearbeitungsgenauigkeit, die Schartigkeit $Rz < 2 \mu m$, der Standweg $s > 5.000 m$ bei der Drehbearbeitung sowie die Einsatztemperatur $T_E > 600^\circ C$ festgelegt. Die *Bearbeitungsgenauigkeit* ergibt sich aus den erzielbaren Werten für die geforderten Lage-, Form- und Maßtoleranzen und wurde in Prozentangaben abgeschätzt.

Leistungsparameter der Technologiekette α							
Leistungsparameter	Grenzwert	Optimum	Technologie (Bauteil-Feature)				
			T ₁ (A)	T ₂ (B)	T ₂ (C)	T ₂ (D)	T ₂ (E)
Bearbeitungsgenauigkeit [%]	50	100	-	-	90	95	90
Schartigkeit Rz [μm]	2	<1	-	-	-	-	1,4
Standweg s [m]	3.000	>5.000	-	-	-	-	4.200
Einsatztemperatur T _E [°C]	250	>700	-	-	-	600	-

A-E: Bauteil-Features T_i: Technologien

Abb. 6.15: Übersicht über die Zuordnung der technologischen Leistungsparameter zu den einzelnen Technologien der Technologiekette α

⁹² Eine Übersicht über die Technologischen Leistungsparameter der Technologieketten γ und ζ befinden sich im Anhang in Abschnitt D.

Die *Schartigkeit* ist ein Maß für die erzielbare Kantengüte⁹³ und sollte im vorliegenden Fall unterhalb eines Wertes von $2\ \mu\text{m}$ liegen. Auch der *Standweg* s beschreibt das Verschleißverhalten der Wendeschneidplatte und sollte mindestens $3.000\ \text{m}$ betragen. Das Einsatzverhalten wird weiter durch die *Einsatztemperatur* T_E charakterisiert. Diese muss den gängigen Prozesstemperaturen bei der Dreh- und Fräsbearbeitung von mehr als $250\ ^\circ\text{C}$ widerstehen. Aufgrund der Grenztemperatur zur Beeinträchtigung des PKD⁹⁴ ist die Prozesstemperatur nach oben auf ca. $700\ ^\circ\text{C}$ begrenzt.

Auf Basis des in Abschnitt 4.5 eingeführten Modells zur Bestimmung des Technologiepotenzials war zu beurteilen, wie hoch auf Basis der identifizierten Leistungsparameter das Technologiepotenzial der Technologiekette α eingeschätzt wurde. Während die Bearbeitungsgenauigkeit v. a. vom Planschleifen T_2 und vom Lötens T_5 beeinflusst wird. Sind sowohl Schartigkeit als auch Standweg in erster Linie vom Planschleifen T_2 abhängig. Die erforderliche Einsatztemperatur hängt i. W. vom Fügeprozess des Lötens T_5 ab. Durch Referenzieren der erzielten Werte der Leistungsparameter auf das jeweilige Optimum wurde das Technologiepotenzial der Technologiekette α ermittelt.

Die Ergebnisse der deterministischen und unsicherheitsbehafteten Bestimmung der Potenziale der Technologieketten α , γ und ζ unterschieden sich nur unwesentlich, so dass die Betrachtung der Histogramme aus der Monte-Carlo-Simulation ausreichte. Abb. 6.16 zeigt die Ergebnisse der unsicherheitsbehafteten Berechnung⁹⁵ der Alternativen α , γ und ζ . Demzufolge hatte Technologiekette ζ mit 55 % das höchste Technologiepotenzial, gefolgt von den Technologieketten γ (46 %) und α (36 %). Die Schwankungsbreiten der Histogramme der Technologiepotenziale der Technologieketten α , γ und ζ unterschieden sich nur unwesentlich. Aus Sicht der Bestimmung des Technologiepotenzials war daher Alternative ζ , gefolgt von den Technologieketten γ und α , zu bevorzugen.

Um die am besten geeignete Technologiekette auszuwählen, ist auf Basis der Ergebnisse der Bestimmung der Bewertungskriterien der Technologiereife, der Wirtschaftlichkeit und des Technologiepotenzials der Eignungsgrad der Technologiekettenalternativen zu ermitteln. Die Interpretation und Aggregation der Bewertungsergebnisse erfolgt im nachfolgenden Abschnitt.

⁹³ Die Kantengüte wird bei Wendeschneidplatten i. d. R. durch Rauheitsmessungen entlang der Schneidkante mit einer keilförmigen Tastspitze ermittelt. Je niedriger die Schartigkeit Rz ist, desto höher ist die Oberflächenqualität an der Schneidkante (KLOCKE & KÖNIG 2008).

⁹⁴ Ab einer Temperatur von ca. $700\ ^\circ\text{C}$ neigt PKD zum einen zum Graphitisieren und zum anderen erfolgt eine exotherme Reaktion. Beide Effekte können den PKD-Schneideinsatz massiv schädigen (LACHMUND 1997).

⁹⁵ Eine Übersicht über die detaillierten Ergebnisse deterministischen Bestimmung der Technologiepotenziale der Technologieketten α , γ und ζ befinden sich im Anhang in Abschnitt D.

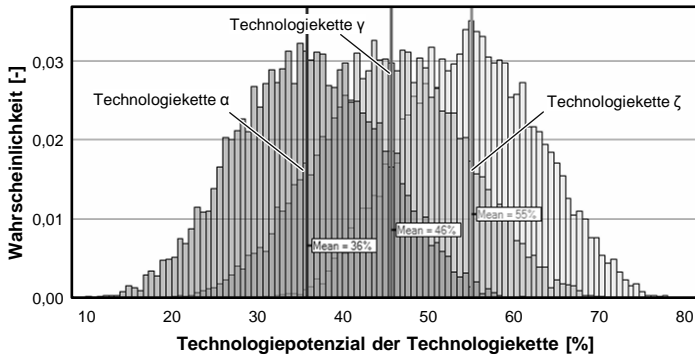


Abb. 6.16: Übersicht über die Histogramme der Technologiepotenziale für die Technologiekette α , γ und ζ

6.2.6 Schritt 5: Interpretation und Auswahl

Für die Auswahl der Technologiekette ist gemäß der Abschnitte 5.6 und 5.7 der Eignungsgrad φ_E der Technologieketten zu bestimmen. Dieser ergab sich durch eine gewichtete Zusammenführung der Ergebnisse aus der Bestimmung der Bewertungskriterien der Technologiereife der Wirtschaftlichkeit und des Technologiepotenzials. Bei der Aggregation dieser Bewertungskriterien konnten die prozentualen Angaben der Technologiereife und des Technologiepotenzials übernommen werden. Die Zielgröße der Wirtschaftlichkeit wurde auf einen Kapitalwert von $-2.200.000$ € normiert. Auf Basis der Vorgaben aus der Technologiestrategie wurden die Bewertungskriterien der Technologiereife und der Wirtschaftlichkeit jeweils mit einem Gewichtungsfaktor q_k von 40 % beaufschlagt. Das Technologiepotenzial wurde mit 20 % gewichtet. Abb. 6.17 stellt die Histogramme der Eignungsgrade der Technologiekettenalternativen α , γ und ζ dar.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, wies Technologiekette α einen vergleichsweise positiven Eignungsgrad $\varphi_{E,\alpha}$ von im Mittel 53 % auf. Mit deutlichem Abstand folgten die Alternativen γ mit einem Mittelwert von 44 % und ζ mit 41 %. Bzgl. der Streubreite der Verteilungen waren alle drei Alternativen gleich unsicher. Aufgrund der Eindeutigkeit der Simulationsergebnisse konnte somit Technologiekette α klar bevorzugt und empfohlen werden, was durch die Ergebnisse aus der Reife- und der Wirtschaftlichkeitsbestimmung untermauert wurde. Auf weitere Analysen durch die in Abschnitt 5.7 eingeführten Kippszenarien konnte daher verzichtet werden.

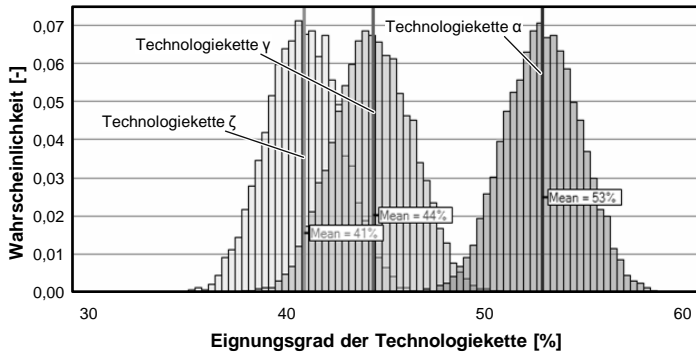


Abb. 6.17: Übersicht über die Histogramme der Eignungsgrade für die Technologiekette α , γ und ζ

6.3 Bewertung der entwickelten Methodik

6.3.1 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Der Aufwand für die Durchführung der Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten hängt grundsätzlich vom technologie- und unternehmensspezifischen Betrachtungsfall ab. Nachfolgend wird der Aufwand für die Anwendung der Methodik in Personentagen PT anhand der fünf in der Methodik enthaltenen Schritte abgeschätzt. Im Rahmen von Schritt 1 ist die Produktionsaufgabe festzulegen und die Grenzwerte und Rahmenbedingungen auf der Grundlage der Unternehmens- und Technologiestrategie festzulegen. Hierfür werden 5 PT veranschlagt. Der Aufwand von Schritt 2 hängt i. W. von den im Unternehmen verfügbaren Methoden und Datenbanken für das Technologie-Screening oder eine Technologiefrüherkennung ab.

Die Recherche von neuen Technologien und notwendige Experteninterviews können z. T. aufwendig sein, da hiermit i. d. R. auch Dienstreisen verbunden sind. Außerdem müssen die Modelle für die Technologiegrobbeurteilung aufgebaut werden, wobei auf die in dieser Arbeit bereitgestellten Vorlagen zurückgegriffen werden kann. Für diesen Schritt werden daher 10 PT angenommen. Da Schritt 3 i. W. auf der bereitgestellten Methodik und den zu berechnenden Matrizen basiert, sind hierfür relativ geringe Aufwände notwendig. Um die Wechselwirkungen darzustellen und daraus Technologieketten abzuleiten, werden 2 PT veranschlagt. Im Rahmen von Schritt 4 ist die Technologiefinebewertung durchzuführen. Sämtliche Modelle und Berechnungen hierfür können mit dem i. d. R. in Unternehmen verfügbaren Tabellenkalkulationsprogramm

Microsoft® Office Excel® aufgebaut und durchgeführt werden. Unsicherheiten sind in Microsoft® Office Excel® einfach durch eine gebräuchliche Monte-Carlo-Simulation-Software, wie bspw. Oracle® Crystal Ball⁹⁶ abzubilden. Da die Input-Faktoren für die Parametrierung der Modelle aufgenommen und die Bewertungskriterien zu bestimmen sind, werden hierfür 10 *PT* abgeschätzt. Schritt 5 beinhaltet die Analyse und Interpretation der Bewertungsergebnisse. Hierfür werden 5 *PT* veranschlagt.

Zusammenfassend lässt sich der Aufwand für die Durchführung der Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten mit ca. 32 *PT* abschätzen. Wird ein Personentagesatz von 1.000 € je *PT* zugrunde gelegt, so beläuft sich der finanzielle Aufwand auf 32.000 €. Der Entscheidung für oder gegen eine Technologiekette kommt eine immense Bedeutung zu, da hierdurch die produktionstechnischen Weichen für ein Unternehmen gestellt werden. Wird die falsche Technologiekette ausgewählt, so sind nicht nutzbare Investitionen in Millionenhöhe zu erwarten. Im Anwendungsbeispiel aus Abschnitt 6.2 entspricht der Unterschied zwischen den beiden alternativen Technologieketten α und ζ ca. 760.000 € allein für den Anlauf der Technologiekette. Stellt man diesem Risiko, die Aufwände für die Durchführung der Methodik gegenüber, so ist der Mehraufwand gerechtfertigt.

6.3.2 Beurteilung der Anforderungen

In Kapitel 3 wurden Anforderungen für die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten formuliert, welche hier kritisch überprüft und beurteilt werden sollen. Eine Übersicht über die Beurteilung der allgemeinen und praktischen Anforderungen an die Methodik zeigt Abb. 6.18. Die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten baut direkt auf den Ergebnissen der Strategieentwicklung eines produzierenden Unternehmens auf. Die *Integration der Unternehmens- und Technologiestrategie* ist somit indirekt gegeben. Außerdem können die im Rahmen der Anwendung der Methodik entwickelten Ergebnisse und Erkenntnisse wieder direkt in die Strategieentwicklung einfließen. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, wurden im Rahmen der Entwicklung der Methodik Interviews und eine Umfrage durchgeführt, woraus die für die strategische Planung von Technologieketten zentralen Kriterien abgeleitet wurden. Diese konnten durch eine umfangreiche Literaturrecherche abgesichert werden. Daher gilt die *Bereitstellung der relevanten Bewertungskriterien* als erfüllt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell zur Bestimmung der Reife von Technologien und Technologieketten entwickelt, welches die *Berücksichtigung*

⁹⁶ Die Kosten für eine Lizenz für Oracle® Crystal Ball® belaufen sich auf einmalig 785,00 €. Da diese i. d. R. auf mehrere Jahre abgeschrieben werden kann, sind die Kosten hierfür vernachlässigbar.

des Entwicklungsstands ermöglicht und die mit einer Alternative verbundenen technischen und organisatorischen Risiken abbildet. Das in Abschnitt 4.3.4 hergeleitete und beschriebene Modell zur Bestimmung der Technologiereife ermöglicht neben der Beurteilung von einzelnen Technologien auch die Bestimmung der Reife von Technologieketten.

Anforderungen an die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten			
Allgemeine Anforderungen		Praktische Anforderungen	
Integration der Unternehmens- und Technologiestrategie		Allgemeingültigkeit der Methodik	
Bereitstellung der relevanten Bewertungskriterien		Modularität der verwendeten Modelle und Methoden	
Berücksichtigung des Entwicklungsstands		Skalierbarkeit hinsichtlich des Detaillierungsgrads	
Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Kriterien		Sicherstellung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses	

Anforderung erfüllt...

- ...gar nicht
- ...kaum
- ...teilweise
- ...schwerpunktmäßig
- ...vollständig

Abb. 6.18: Beurteilung der Erfüllung der an die Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten gestellten Anforderungen

Die in dieser Arbeit eingesetzten Modelle sind grundsätzlich für die *Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Kriterien* ausgelegt, wobei der hierfür entwickelte Ansatz von KREBS (2012) verwendet werden konnte und keinerlei Anpassungen notwendig waren. Weitere Informationen zu deren Modellierung und Verrechnung finden sich auch bei REINHART ET AL. (2011c) und REINHART ET AL. (2011b).

Die Methodik wurde branchenunabhängig entwickelt und ist für sämtliche Hauptgruppen und Technologien der DIN 8580 (2003) anwendbar. Insofern gilt die *Allgemeingültigkeit der Methodik* als sichergestellt. Die Aggregation der Bewertungskriterien für die strategische Planung von Technologieketten wurde derart gestaltet, dass diese technologie- und unternehmensspezifisch erweitert und angepasst werden können, wie dies in Abschnitt 4 am Beispiel der Ressourceneffizienz angedeutet wurde. Die entwickelten Modelle sowie der in Gleichung 5.4 dargestellte Eignungsgrad gewährleisten somit die *Modularität der verwendeten Modelle und Methoden*. Da im Rahmen der Methodik sowohl eine Technologiegrobbeurteilung als auch eine Technologiefinbeurteilung essentieller Bestandteil sind, wurden die eingesetzten Modelle jeweils so ausgelegt, dass der Anwender je nach Planungsphase das Abstraktionslevel selbst einstellen kann. Außerdem wurden in den Abschnitten 5.4.2 und 5.6 jeweils Vorschläge für den notwendigen Detaillierungsgrad gegeben. Die *Skalierbarkeit hinsichtlich des Detaillierungsgrads* ist somit gegeben. Im vorherigen Abschnitt 6.3.1 erfolgte eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik. Hierbei wurden die Aufwände, die bei der Durchführung der Methodik notwen-

dig sind, abgeschätzt und den dadurch generierten Nutzen gegenübergestellt. Somit erfolgte die *Sicherstellung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses*, wobei diese stets abhängig vom jeweiligen technologie- und unternehmensspezifischen Betrachtungsfall ist.

6.3.3 Fazit

Die Beurteilung und kritische Diskussion zeigte, dass die in Kapitel 3 formulierten allgemeinen und praktischen Anforderungen an die entwickelte Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten nahezu vollständig erfüllt werden. Die einfache und umfassende Anwendbarkeit der Methodik wird durch Abschnitt 6.2 erfolgreich belegt. Auf Basis der in Kapitel 4 eingeführten Modelle können die für die strategische Technologieplanung relevanten Bewertungskriterien der Technologiereife, der Wirtschaftlichkeit, des Technologiepotenzials sowie der technischen Machbarkeit von Technologien und v. a. von Technologieketten bestimmt werden. Zentrale Neuerung in diesem Zusammenhang stellt das entwickelte Reifemodells dar, dass es allgemeingültig ermöglicht, die Reife von Technologieketten abzuschätzen. Dabei liefert das Reifemodell nicht nur einen festen Reifewert, sondern dokumentiert den parallelen Reife-Fortschritt in den sieben Reifegradstufen. Bei regelmäßigem Einsatz im Rahmen des Entwicklungsprozesses einer Technologie lässt sich so auf wichtige Reifegradstufen hinweisen. Außerdem lassen sich durch das Reifemodell Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess identifizieren. Die in Kapitel 5 vorgestellte Methodik liefert ein strukturiertes Vorgehen für die strategische Planung von Technologieketten und leitet den Anwender bei der Bestimmung und Aggregation der Bewertungskriterien an. Im Rahmen der Generierung alternativer Technologieketten können nun Wechselwirkungen 1. bis 3. Art modelliert und berücksichtigt werden. Durch die Integration quantitativer und qualitativer Kriterien in die Bewertung können sich auf die Technologiekettenalternativen auswirkende Unsicherheiten greifbar gemacht werden. Auf diese Weise sind mit einer Alternative verbundene technische und organisatorische Risiken einschätzbar. Auf diese Weise liefert die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zur strategischen Planung von Technologieketten eine umfassende Einschätzung und belastbare Aussage für die Auswahl von Technologieketten für produzierende Unternehmen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Um im globalen Wettbewerb erfolgreich zu sein, sind gerade produzierende Unternehmen an Hochlohnstandorten gefordert, innovative Technologien einzusetzen, welche die Produktionsaufgabe besser, d. h. bspw. qualitativ hochwertiger oder schneller, realisieren können. Gerade neue Technologien bergen ein gewisses Risiko, da die Erfahrung in der Anwendung zumeist gering ist und die Technologie technisch und organisatorisch nicht ausreichend beherrscht wird. Bei der Herstellung von Produkten kommen zudem eine Kombination von mehreren, sequentiell angeordneten Technologien in Form einer Technologiekette zum Einsatz. Diese Technologien weisen Wechselwirkungen untereinander auf, d. h. sie ergänzen und bedingen sich oder schließen sich u. U. gegenseitig aus. Bei der strategischen Planung von Technologieketten müssen diese Gegebenheiten berücksichtigt werden. Bestehende Ansätze der wissenschaftlichen Literatur berücksichtigen insbesondere den Entwicklungsstand von Technologieketten nur unzureichend. Darüber hinaus zeigte eine Umfrage unter produzierenden Unternehmen, dass die Bestimmung geeigneter Bewertungskriterien für die Auswahl von Technologieketten z. T. nicht möglich ist, weil die Bewertungskriterien entweder unbekannt sind oder keine Methoden und Modelle für deren Beurteilung existieren.

Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methodik entwickelt, welche diese Lücken bei der strategischen Planung von Technologieketten schließt. Hierzu wurden zunächst die für die Bewertung relevanten Kriterien identifiziert. Außerdem wurden Modelle und Methoden entwickelt, um diese zu bestimmen und zu aggregieren. Insbesondere der Entwicklungsstand von Technologieketten kann nun durch das Modell zur Bestimmung der Technologiereife abgebildet und greifbar gemacht werden. Dieses Modell teilt den Reife-Fortschritt einer Technologie in sieben Reifegradstufen ein und hilft, Entwicklungsbedarfe offen zulegen. Auf diese Weise ist das Reifemodell für einen standardisierten und umfassenden Technologieentwicklungsprozess nutzbar. Außerdem werden durch die Methode zur Bestimmung der Reife von Technologieketten technische und organisatorische Risiken beim Einsatz einer Alternative abgebildet, wodurch der Anwender für existierende Unsicherheiten sensibilisiert wird. Darüber hinaus beinhaltet die Methodik eine Vorgehensweise, Wechselwirkungen zwischen Technologien und den einzelnen Bauteil-Features zu modellieren, um auf dieser Basis alternative Technologieketten zu generieren.

Auf Grundlage der Bestimmung der Bewertungskriterien der technischen Machbarkeit, der Technologiereife, der Wirtschaftlichkeit und des Technologiepotenzials ist es nun möglich, im Rahmen der strategischen Technologieplanung die am besten geeignete Technologiekette für die Produktionsaufgabe auszuwählen. Hierbei können die für die Auswahl relevanten Kriterien zunächst unabhängig voneinander betrachtet und analysiert werden. Durch die Aggregation der Ergebnisse der Bestimmung der Bewertungskriterien ist die Berücksichtigung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Kriterien sichergestellt.

Die vorliegende Arbeit bildet die Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der strategischen Technologieplanung. Produkte werden im Zuge der Globalisierung i. d. R. in einem Produktionsnetzwerk bestehend aus OEMs und Zulieferern hergestellt, wobei sich die verschiedenen Unternehmen jeweils auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren können. Vor diesem Hintergrund ist zu untersuchen, wie v. a. neue Technologien auf die am Produktionsnetzwerk beteiligten Unternehmen aufzuteilen sind. In Abhängigkeit der Kompetenzen und der Organisationsform sind Unternehmen unterschiedlich gut geeignet, Technologien weiterzuentwickeln. Hierzu sind Modelle und Methoden bereitzustellen, welche v. a. neue Technologien einer Technologiekette optimal im Produktionsnetzwerk positionieren.

Darüber hinaus bestehen noch weitere Untersuchungsmöglichkeiten im Bezug auf das Bewertungskriterium des Technologiepotenzials. Hierbei wurden in der vorliegenden Arbeit lediglich technische und organisatorische Aspekte, welche sich direkt auf die Anwendung beziehen, berücksichtigt. Durch den Einsatz innovativer Technologien können auch neue Absatzmärkte erschlossen werden. Insofern wirken sich neue Technologien auf das Wettbewerbspotenzial von produzierenden Unternehmen aus. Diese beschriebenen Zusammenhänge und v. a. wie diese Wirkmechanismen abzubilden und zu bewerten sind, stellen Möglichkeiten für weitere Analysen dar.

A Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien

Das Modell zur Bestimmung der Reife von Produktionstechnologien wurde in Abschnitt 4.3.4 ausführlich erläutert. Zur Bestimmung der Reife wurde ein Fragebogen entwickelt, welcher, inspiriert durch die TRL von MANKINS (1995), Fragestellungen enthält, deren Beantwortung auf den Entwicklungsstand von Produktionstechnologien schließen lässt. Nachfolgend ist in den Abb. A.1 bis Abb. A.9 der Fragebogen aufgeführt, welcher den Entwicklungsstand von Technologien in sieben Reifegradstufen einteilt und für jede Reifegradstufe allgemeingültige Fragestellungen enthält.

Da die Reifegradstufen technologieunabhängig formuliert wurden, ist der Fragebogen bei der Bestimmung der Reife einer konkreten Technologie noch mit technologiespezifischen Fragen aufzufüllen und entsprechend zu erweitern. Außerdem sind insbesondere die qualitativen Kriterien der Reifegradstufen zu quantifizieren um nach den in Abschnitt 4.3.4.2 aufgeführten Gleichungen einen Wert für die Gesamtreife zu erhalten.

Fragebogen zur Reifegradbestimmung von Produktionstechnologien		Seite 1 von 9						
Allgemeine Angaben								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Technologiebezeichnung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Technologiebezeichnung</i></td> </tr> </table>	Technologiebezeichnung	<i>Technologiebezeichnung</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i></td> </tr> </table>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit	<i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Datum</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Erstellung/ Aktualisierung</i></td> </tr> </table>	Datum	<i>Erstellung/ Aktualisierung</i>
Technologiebezeichnung								
<i>Technologiebezeichnung</i>								
Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit								
<i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>								
Datum								
<i>Erstellung/ Aktualisierung</i>								
1. Grundlagenforschung								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Kurzbeschreibung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> Grundlagenforschung ist die erste Stufe der Reifeskala. Theorien und Wirkprinzipien werden im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung entworfen und überprüft. Auf dieser Grundlage beginnt die anwendungsbezogene Forschung. Dabei werden praktische Anwendungen identifiziert und es erfolgt die Formulierung und Beschreibung von Problemen und Lösungskonzepten. Die Anwendung ist in dieser Stufe jedoch noch rein spekulativ und nicht durch Experimente virtueller oder physischer Art untermauert. </td> </tr> </table>			Kurzbeschreibung	Grundlagenforschung ist die erste Stufe der Reifeskala. Theorien und Wirkprinzipien werden im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung entworfen und überprüft. Auf dieser Grundlage beginnt die anwendungsbezogene Forschung. Dabei werden praktische Anwendungen identifiziert und es erfolgt die Formulierung und Beschreibung von Problemen und Lösungskonzepten. Die Anwendung ist in dieser Stufe jedoch noch rein spekulativ und nicht durch Experimente virtueller oder physischer Art untermauert.				
Kurzbeschreibung								
Grundlagenforschung ist die erste Stufe der Reifeskala. Theorien und Wirkprinzipien werden im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung entworfen und überprüft. Auf dieser Grundlage beginnt die anwendungsbezogene Forschung. Dabei werden praktische Anwendungen identifiziert und es erfolgt die Formulierung und Beschreibung von Problemen und Lösungskonzepten. Die Anwendung ist in dieser Stufe jedoch noch rein spekulativ und nicht durch Experimente virtueller oder physischer Art untermauert.								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">1.1</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Existiert eine technische Beschreibung des (Funktions-) Prinzips der Technologie in Form von Patenten, Veröffentlichungen, Dissertationen, mit mathematischen Formeln, physikalischen Wirkzusammenhängen, Geometrie- oder Werkstoffdaten, etc.?</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			1.1		Existiert eine technische Beschreibung des (Funktions-) Prinzips der Technologie in Form von Patenten, Veröffentlichungen, Dissertationen, mit mathematischen Formeln, physikalischen Wirkzusammenhängen, Geometrie- oder Werkstoffdaten, etc.?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
1.1								
Existiert eine technische Beschreibung des (Funktions-) Prinzips der Technologie in Form von Patenten, Veröffentlichungen, Dissertationen, mit mathematischen Formeln, physikalischen Wirkzusammenhängen, Geometrie- oder Werkstoffdaten, etc.?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">1.2</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Existiert ein produktionstechnisches Anwendungsgebiet? Kann die Technologie ein produktionstechnisches Problem lösen?</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			1.2		Existiert ein produktionstechnisches Anwendungsgebiet? Kann die Technologie ein produktionstechnisches Problem lösen?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
1.2								
Existiert ein produktionstechnisches Anwendungsgebiet? Kann die Technologie ein produktionstechnisches Problem lösen?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">1.3</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Existieren mehrere produktionstechnische Anwendungsgebiete? (z. B. in verschiedenen Branchen)</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			1.3		Existieren mehrere produktionstechnische Anwendungsgebiete? (z. B. in verschiedenen Branchen)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
1.3								
Existieren mehrere produktionstechnische Anwendungsgebiete? (z. B. in verschiedenen Branchen)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">1.4</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Sind alle relevanten Parameter zur Beeinflussung der Technologie bekannt? (z. B. Steuerungsgrößen, Temperatur, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft, usw., im Sinne von Prozessparametern)</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			1.4		Sind alle relevanten Parameter zur Beeinflussung der Technologie bekannt? (z. B. Steuerungsgrößen, Temperatur, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft, usw., im Sinne von Prozessparametern)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
1.4								
Sind alle relevanten Parameter zur Beeinflussung der Technologie bekannt? (z. B. Steuerungsgrößen, Temperatur, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft, usw., im Sinne von Prozessparametern)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">1.5</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">...</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			1.5		...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
1.5								
...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							

Abb. A.1: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 1: Grundlagenforschung

Allgemeine Angaben	
Technologiebezeichnung <i>Technologiebezeichnung</i>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit <i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>
Datum <i>Erstellung/ Aktualisierung</i>	
2. Machbarkeitsstudie	
Kurzbeschreibung Ziel der Phase der Machbarkeitsstudie ist der Nachweis der in Stufe eins prognostizierten Anwendung. Dazu werden sowohl analytische Studien, zum Beispiel in Form von virtuellen Modellen, als auch Experimente zu wesentlichen Funktionen durchgeführt.	
2.1 Sind die wesentlichen Funktionen für die Realisierung der Technologie bekannt? Ist bekannt, was experimentell oder simulativ untersucht werden muss, um die Realisierbarkeit der Technologie darzustellen?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.2 Sind alle Randbedingungen für eine Realisierung der Systemanwendung identifiziert? (z. B. Randbedingungen wie Gesetze, Umgebungsbedingungen, usw.)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.3 Sind alle Anforderungen für eine Realisierung der Systemanwendung identifiziert? (beim Schweißen z.B. Schweißgas, Strom, Schweißdraht, usw.)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.4 Sind alle weiteren Technologien und Ressourcen identifiziert, die notwendig sind, um die Technologie zu realisieren?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.5 Existieren alle relevanten virtuellen oder physischen Teilfunktionsprototypen ¹ zum Nachweis der einzelnen wesentlichen Funktionen der Technologie? (wesentliche Funktionen siehe Frage 2.1)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.6 Ist ein Prozessfenster theoretisch möglich, d.h. existiert theoretisch mindestens eine Kombination der Parameter um die Technologie zu realisieren? (Nachgewiesen durch analytische oder experimentelle Analyse von wesentlichen einzelnen Funktionen, die auf die Möglichkeit der Realisierung hindeuten.)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.7 Ist die technologische Machbarkeit der Funktionen durch grundlegende Experimente, experimentell oder analytisch z.B. durch Simulation, validiert worden?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
2.8 ...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Hinweis zu Fußnote 1 Prototypen sind verallgemeinert physische Informationsträger. Sie dienen dem Informationsaustausch zwischen verschiedenen Unternehmensbereichen und werden erstellt, um die Eigenschaften einer Technologie bereits während der Entwurfsphase zu evaluieren. Funktionsprototypen sind Prototypen mit dem Ziel des Funktionsnachweises. Es werden Teilfunktionen oder auch die Gesamtfunktionalität abgebildet und getestet.	

Abb. A.2: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 2: Machbarkeitsstudie

Fragebogen zur Reifegradbestimmung von Produktionstechnologien		Seite 3 von 9						
Allgemeine Angaben								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Technologiebezeichnung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Technologiebezeichnung</i></td> </tr> </table>	Technologiebezeichnung	<i>Technologiebezeichnung</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i></td> </tr> </table>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit	<i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Datum</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Erstellung/ Aktualisierung</i></td> </tr> </table>	Datum	<i>Erstellung/ Aktualisierung</i>
Technologiebezeichnung								
<i>Technologiebezeichnung</i>								
Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit								
<i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>								
Datum								
<i>Erstellung/ Aktualisierung</i>								
3. Technologieentwicklung								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Kurzbeschreibung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Im Rahmen der Technologieentwicklung werden Konzepte zur Umsetzung der Technologie erarbeitet. Die gesamte Systemarchitektur wird beschrieben. Ergebnis der Technologieentwicklung sind alle benötigten Daten für den Aufbau eines Funktionsprototypen.</td> </tr> </table>			Kurzbeschreibung	Im Rahmen der Technologieentwicklung werden Konzepte zur Umsetzung der Technologie erarbeitet. Die gesamte Systemarchitektur wird beschrieben. Ergebnis der Technologieentwicklung sind alle benötigten Daten für den Aufbau eines Funktionsprototypen.				
Kurzbeschreibung								
Im Rahmen der Technologieentwicklung werden Konzepte zur Umsetzung der Technologie erarbeitet. Die gesamte Systemarchitektur wird beschrieben. Ergebnis der Technologieentwicklung sind alle benötigten Daten für den Aufbau eines Funktionsprototypen.								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">3.1</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Sind alle wesentlichen Funktionen bei der Anwendung der Technologie beschrieben? (z.B. Beschreibung der Umsetzung der Technologie in der Realität, Beschreibung von wesentlichen physikalischen Effekten, Einstellung der Parameter zur Realisierung einer Funktion)</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			3.1		Sind alle wesentlichen Funktionen bei der Anwendung der Technologie beschrieben? (z.B. Beschreibung der Umsetzung der Technologie in der Realität, Beschreibung von wesentlichen physikalischen Effekten, Einstellung der Parameter zur Realisierung einer Funktion)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
3.1								
Sind alle wesentlichen Funktionen bei der Anwendung der Technologie beschrieben? (z.B. Beschreibung der Umsetzung der Technologie in der Realität, Beschreibung von wesentlichen physikalischen Effekten, Einstellung der Parameter zur Realisierung einer Funktion)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">3.2</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Sind alle Parameter zur Realisierung der Technologie, also diejenigen aller Funktionen, beschrieben? Ist bekannt, wie die Parameter für die einzelnen Funktionen eingestellt werden müssen? (z. B. Steuerungsgrößen, Temperatur, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft, usw., im Sinne von Prozessparametern)</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			3.2		Sind alle Parameter zur Realisierung der Technologie, also diejenigen aller Funktionen, beschrieben? Ist bekannt, wie die Parameter für die einzelnen Funktionen eingestellt werden müssen? (z. B. Steuerungsgrößen, Temperatur, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft, usw., im Sinne von Prozessparametern)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
3.2								
Sind alle Parameter zur Realisierung der Technologie, also diejenigen aller Funktionen, beschrieben? Ist bekannt, wie die Parameter für die einzelnen Funktionen eingestellt werden müssen? (z. B. Steuerungsgrößen, Temperatur, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Anpresskraft, usw., im Sinne von Prozessparametern)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">3.3</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Sind alle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie Beeinflussungsmöglichkeiten der Parameter (z.T. theoretisch) bekannt? (z.B. Interaktionen zwischen Einsatzumgebungen, Leistungsanforderungen und bestehenden Technologien)</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			3.3		Sind alle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie Beeinflussungsmöglichkeiten der Parameter (z.T. theoretisch) bekannt? (z.B. Interaktionen zwischen Einsatzumgebungen, Leistungsanforderungen und bestehenden Technologien)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
3.3								
Sind alle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie Beeinflussungsmöglichkeiten der Parameter (z.T. theoretisch) bekannt? (z.B. Interaktionen zwischen Einsatzumgebungen, Leistungsanforderungen und bestehenden Technologien)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">3.4</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Ist ein Prozess-(Technologie) Fenster/-Raum auf Basis der z. T. theoretisch vorliegenden Erkenntnisse (grob) beschrieben?</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			3.4		Ist ein Prozess-(Technologie) Fenster/-Raum auf Basis der z. T. theoretisch vorliegenden Erkenntnisse (grob) beschrieben?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
3.4								
Ist ein Prozess-(Technologie) Fenster/-Raum auf Basis der z. T. theoretisch vorliegenden Erkenntnisse (grob) beschrieben?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">3.5</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Existiert ein Plan für eine Gesamtsystemarchitektur in Form von Dokumenten?</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			3.5		Existiert ein Plan für eine Gesamtsystemarchitektur in Form von Dokumenten?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
3.5								
Existiert ein Plan für eine Gesamtsystemarchitektur in Form von Dokumenten?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">3.6</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">...</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			3.6		...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
3.6								
...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							

Abb. A.3: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 3: Technologieentwicklung

Allgemeine Angaben		
Technologiebezeichnung <i>Technologiebezeichnung</i>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit <i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>	Datum <i>Erstellung/ Aktualisierung</i>
4. Technoliedemonstrator		
Kurzbeschreibung In dieser Stufe wird ein Funktionsprototyp (Definition siehe 2.5) mit allen zur Realisierung der Technologie notwendigen Funktionen aufgebaut. Es erfolgen Tests zur Validierung von Komponenten und deren Funktionsnachweis im Gesamtverbund des Prototypen in Laborumgebung unter realistischen Bedingungen. Die grundsätzlichen Prozessfenster können ermittelt werden.		
4.1 Existiert ein Gesamtfunktionsprototyp?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
4.2 Wurde das ermittelte Prozessfenster abgefahren, getestet/validiert oder ggf. erweitert? (Ein Prozessfenster wird durch alle Kombinationen von Parametern beschrieben, die eine fehlerfreie Anwendung der Technologie ermöglichen.)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
4.3 Wurden alle Funktionen im realen Zusammenspiel validiert? (z. B. durch Langzeitversuche bei extremen Temperaturen, v. a. an den Grenzen des grundsätzlichen Prozessfensters)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
4.4 Waren die Tests repräsentativ in Bezug auf die zukünftige Produktionsaufgabe? (d.h. wurden Rahmenbedingungen der realen Produktionsumgebung wie z. B. Umgebungstemperaturen, Luftfeuchtigkeit, etc. oder beeinflussende andere Prozesse mit hinreichender Genauigkeit abgebildet)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
4.5 ...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	

Abb. A.4: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 4: Technoliedemonstrator

Fragebogen zur Reifegradbestimmung von Produktionstechnologien
Seite 5 von 9

Allgemeine Angaben

Technologiebezeichnung Technologiebezeichnung	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung	Datum Erstellung/ Aktualisierung
---	--	---

5. Integration in Betriebsmittel²

Kurzbeschreibung
 Die Stufe fünf beinhaltet die Integration der Technologie in ein Betriebsmittel. Darunter wird die Zuordnung und Eingliederung des Funktionsprototypen (Definition siehe 2.5) in ein Betriebsmittel wie beispielsweise eine Werkzeugmaschine verstanden, oder darüber hinaus, falls erforderlich, die Entwicklung eines geeigneten Betriebsmittels. Die Funktionen des Prototypen der Technologie werden im Betriebsmittel nachgewiesen. Es erfolgen Tests zur Validierung der Ergebnisse aus vorangehenden Stufen bezüglich Funktionen und Wechselwirkungen von Komponenten im Gesamtverbund des Betriebsmittels in Laborumgebung und unter realistischen Bedingungen. Die grundsätzlichen Prozessfenster können ermittelt werden.

5.1
 Wurde das gesamte Prozessfenster, nach Integration in das Betriebsmittel (detailliert) abgefahren, getestet/validiert? (Dies beinhaltet die Untersuchung von Auswirkungen des Betriebsmittels auf das bisher grundsätzlich ermittelte Prozessfenster z. B. durch Wärmedehnung, mangelnde Steifigkeit, etc., sowie die Ermittlung von Prozessgrenzen und optimalen Punkten im Prozessfenster)

ja nein

5.2
 Wurden Interaktionen zwischen verschiedenen Technologien innerhalb des Systems genau verstanden? (Untersuchung des Zusammenspiels von Technologie und Betriebsmittel oder anderen im Betriebsmittel integrierten Technologien)

ja nein

5.3
 Sind die SOLL- bzw. IST-Werte für folgende technologische Kennzahlen ermittelbar?

5.3.1 Arbeitsgenauigkeit (z. B. Wiederhol-, Positioniergenauigkeit)	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.2 Prozessfähigkeit	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.3 Verfügbarkeit	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.4 Zuverlässigkeit	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.5 Automatisierungsgrad	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.6 Prozessgeschwindigkeit	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.7 Ausfallrate	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.8 Sonstige:	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			
5.3.9 Sonstige:	SOLL	<input type="text"/>	
	IST	<input type="text"/>	
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]			

Hinweis zu Fußnote 2
Betriebsmittel sind Produktionsmittel zur Herstellung von Produkten. Dies können zum Beispiel Werkzeugmaschinen wie Fräs- oder Drehmaschinen sein.

Abb. A.5: Fragebogen zur Reifbestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 5: Integration in Betriebsmittel (Teil 1)

Allgemeine Angaben

Technologiebezeichnung
 Technologiebezeichnung

Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit
 Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen
 Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung

Datum
 Erstellung/
 Aktualisierung

5. Integration in Betriebsmittel?

5.4

Sind die SOLL- bzw. IST-Werte für folgende wirtschaftliche Kennzahlen ermittelbar?

5.4.1 Belegungszeit (Haupt-, Neben-, Rüst- und Verteilzeiten)	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.2 Durchlaufzeit	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.3 Energieverbrauch	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.4 Ressourcenverbrauch	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.5 Mengenleistung	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.6 Investitionen	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.7 Stückkosten	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.8 Sonstige:	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
5.4.9 Sonstige:	SOLL		0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
	IST		Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]

5.5

Existiert ein Betriebsmittel, in das die Technologie integriert werden kann?

ja nein

5.6

...

ja nein

Hinweis zu Fußnote 2

Betriebsmittel sind Produktionsmittel zur Herstellung von Produkten. Dies können zum Beispiel Werkzeugmaschinen wie Fräs- oder Drehmaschinen sein.

Abb. A.6: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 5: Integration in Betriebsmittel (Teil 2)

Fragebogen zur Reifegradbestimmung von Produktionstechnologien		Seite 7 von 9																																															
Allgemeine Angaben																																																	
Technologiebezeichnung <i>Technologiebezeichnung</i>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit <i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>	Datum <i>Erstellung/ Aktualisierung</i>																																															
6. Produktionsstruktur																																																	
Kurzbeschreibung In der sechsten Stufe, Integration und Validierung in Produktionsumgebung, wird ein Technischer Prototyp ³ aufgebaut. Es erfolgt der Einbau des Betriebsmittels inklusive der neuen Technologie, wie in Stufe fünf beschrieben, in die Produktionsstruktur. Tests zum Funktionsnachweis erfolgen unter realen Produktionsbedingungen. Das Prozessfenster kann detailliert ermittelt werden. Einflüsse von Schnittstellen zur Infrastruktur und zu anderen Betriebsmitteln in der Produktionsstruktur werden untersucht.																																																	
6.1 Wurden erfolgreiche Demonstrationen der Produktionsaufgabe in der realen Produktionsumgebung durchgeführt? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein																																																	
6.2 Wie sind die exakten SOLL- bzw. IST-Werte für folgende technologische Kennzahlen?																																																	
6.2.1 Arbeitsgenauigkeit (z. B. Wiederhol-, Positioniergenauigkeit)	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.2 Prozessfähigkeit	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.3 Verfügbarkeit	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.4 Zuverlässigkeit	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.5 Automatisierungsgrad	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.6 Prozessgeschwindigkeit	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.7 Ausfallrate	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.8 Sonstige:	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.2.9 Sonstige:	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;">SOLL</td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black;">IST</td> <td style="border: 1px solid black;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]											IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]										
SOLL	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
IST	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black;">0</td><td style="border: 1px solid black;">10</td><td style="border: 1px solid black;">20</td><td style="border: 1px solid black;">30</td><td style="border: 1px solid black;">40</td><td style="border: 1px solid black;">50</td><td style="border: 1px solid black;">60</td><td style="border: 1px solid black;">70</td><td style="border: 1px solid black;">80</td><td style="border: 1px solid black;">90</td><td style="border: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td colspan="11" style="border: 1px solid black; text-align: center;">Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]</td> </tr> </table>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																				
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																							
Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]																																																	
6.3 Wie sind die exakten SOLL- bzw. IST-Werte für folgende wirtschaftliche Kennzahlen?																																																	
6.3.1 Belegungszeit (Haupt-, Neben-, Rüst- und Verteilzeiten)																																																	
Hinweis zu Fußnote 3 Technische Prototypen unterscheiden sich nicht wesentlich vom Endprodukt. Sie dienen detaillierten Funktionsanalysen und Dauerbelastungen. Werkstoffe entsprechen weitestgehend der Serie.																																																	

Abb. A.7: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 6: Produktionsstruktur (Teil 1)

Allgemeine Angaben

Technologiebezeichnung <i>Technologiebezeichnung</i>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit <i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>	Datum <i>Erstellung/ Aktualisierung</i>
--	---	---

6. Produktionsstruktur

6.3
Wie sind die exakten SOLL- bzw. IST-Werte für folgende wirtschaftliche Kennzahlen?

6.3.2 Durchlaufzeit	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.3 Energieverbrauch	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.4 Ressourcenverbrauch	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.5 Mengenleistung	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.6 Investitionen	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.7 Stückkosten	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.8 Sonstige:	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]
6.3.9 Sonstige:	SOLL	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	IST	<input type="text"/>	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Grad der Erfüllung des SOLL-Werts [%]

6.4 Wurde ein Muster* erstellt?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
6.5 ...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Hinweis zu Fußnote 4
Muster stammen bereits aus einer Serie. Sie verfügen über einen hohen Detaillierungsgrad und alle Funktionalitäten. Die Produkteigenschaften können vollständig getestet werden und es ist zudem möglich die Ausbildung von Fertigungs- und Servicepersonal zu unterstützen. Muster können beim Anlauf einer Serienfertigung, insbesondere bei der Abstimmung von Fertigungs- und Montagefolge sowie der Feinplanung in Zusammenhang mit der Kunden-Lieferanten-Kette beitragen.

Abb. A.8: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 6: Produktionsstruktur (Teil 2)

Fragebogen zur Reifegradbestimmung von Produktionstechnologien		Seite 9 von 9						
Allgemeine Angaben								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Technologiebezeichnung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Technologiebezeichnung</i></td> </tr> </table>	Technologiebezeichnung	<i>Technologiebezeichnung</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i></td> </tr> </table>	Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit	<i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Datum</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Erstellung/ Aktualisierung</i></td> </tr> </table>	Datum	<i>Erstellung/ Aktualisierung</i>
Technologiebezeichnung								
<i>Technologiebezeichnung</i>								
Verantwortlicher, Funktion und Organisationseinheit								
<i>Name des Steckbrief-Aufnahme-Verantwortlichen, dessen Funktion und Organisationseinheit oder Abteilung</i>								
Datum								
<i>Erstellung/ Aktualisierung</i>								
7. Serienproduktion								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Kurzbeschreibung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Die Technologie befindet sich im industriellen Einsatz und kann mit der erwarteten Prozesssicherheit betrieben werden. Alle technologischen und wirtschaftlichen Parameter sind bekannt. Das Risiko beim Einsatz der Technologie ist gering und abschätzbar.</td> </tr> </table>			Kurzbeschreibung	Die Technologie befindet sich im industriellen Einsatz und kann mit der erwarteten Prozesssicherheit betrieben werden. Alle technologischen und wirtschaftlichen Parameter sind bekannt. Das Risiko beim Einsatz der Technologie ist gering und abschätzbar.				
Kurzbeschreibung								
Die Technologie befindet sich im industriellen Einsatz und kann mit der erwarteten Prozesssicherheit betrieben werden. Alle technologischen und wirtschaftlichen Parameter sind bekannt. Das Risiko beim Einsatz der Technologie ist gering und abschätzbar.								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.1 Ist die Technologie in der realen Produktion im Einsatz?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.1 Ist die Technologie in der realen Produktion im Einsatz?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.1 Ist die Technologie in der realen Produktion im Einsatz?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.2 Sind regelmäßige Service-Leistungen wie Wartung, Condition-Monitoring oder Software-Updates etabliert?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.2 Sind regelmäßige Service-Leistungen wie Wartung, Condition-Monitoring oder Software-Updates etabliert?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.2 Sind regelmäßige Service-Leistungen wie Wartung, Condition-Monitoring oder Software-Updates etabliert?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.3 Ist die Technologie durch Herstellungs- und Betriebsunterlagen vollständig beschrieben? (z.B. Patente, Zertifikate, Richtlinien, (DIN-) Normen, usw.)</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.3 Ist die Technologie durch Herstellungs- und Betriebsunterlagen vollständig beschrieben? (z.B. Patente, Zertifikate, Richtlinien, (DIN-) Normen, usw.)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.3 Ist die Technologie durch Herstellungs- und Betriebsunterlagen vollständig beschrieben? (z.B. Patente, Zertifikate, Richtlinien, (DIN-) Normen, usw.)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.4 Sind weitere quantifizierbare Rationalisierungseffekte zu erwarten oder können Verbesserungsvorschläge formuliert werden?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.4 Sind weitere quantifizierbare Rationalisierungseffekte zu erwarten oder können Verbesserungsvorschläge formuliert werden?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.4 Sind weitere quantifizierbare Rationalisierungseffekte zu erwarten oder können Verbesserungsvorschläge formuliert werden?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.5 Ist das Know-how über die Technologie ausreichend gesichert? (Kann jeder fachkundige MA des Unternehmens mit den vorliegenden Unterlagen die Technologie aufbauen und einsetzen?)</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.5 Ist das Know-how über die Technologie ausreichend gesichert? (Kann jeder fachkundige MA des Unternehmens mit den vorliegenden Unterlagen die Technologie aufbauen und einsetzen?)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.5 Ist das Know-how über die Technologie ausreichend gesichert? (Kann jeder fachkundige MA des Unternehmens mit den vorliegenden Unterlagen die Technologie aufbauen und einsetzen?)	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.6 Bewegen sich die technologierelevanten Kennzahlen innerhalb des erwarteten Spielraums?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.6 Bewegen sich die technologierelevanten Kennzahlen innerhalb des erwarteten Spielraums?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.6 Bewegen sich die technologierelevanten Kennzahlen innerhalb des erwarteten Spielraums?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.7 Nutzen Ihre Kernwettbewerber die Technologie?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.7 Nutzen Ihre Kernwettbewerber die Technologie?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.7 Nutzen Ihre Kernwettbewerber die Technologie?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.8 Ist die Technologie in anderen Branchen im Einsatz?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.8 Ist die Technologie in anderen Branchen im Einsatz?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.8 Ist die Technologie in anderen Branchen im Einsatz?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.9 Ist die Technologie am Markt im Sinne einer Buy-Entscheidung verfügbar?</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.9 Ist die Technologie am Markt im Sinne einer Buy-Entscheidung verfügbar?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.9 Ist die Technologie am Markt im Sinne einer Buy-Entscheidung verfügbar?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%; padding: 5px;">7.10 ...</td> <td style="width: 30%; padding: 5px; text-align: right;"><input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</td> </tr> </table>			7.10 ...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein				
7.10 ...	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein							

Abb. A.9: Fragebogen zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien - Reifegradstufe 7: Serieneinsatz

B Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung der Technologiereife des Anwendungsbeispiels

Nachfolgend sind die detaillierten Ergebnisse der Bestimmung der Reife des Anwendungsbeispiels aus Abschnitt 5.6 aufgeführt. Abb. B.1 zeigt die Ergebnisse der deterministischen Reifebestimmung der Technologien T_1 bis T_6 sowie der Technologieketten α , γ und ζ . In Abb. B.2 und B.3 sind ergänzend zu Abb. 6.7 die Histogramme der Technologieketten γ und ζ dargestellt.

Reife der Technologien M_T									
Technologie		T_1 Sintern		T_2 Planschleifen		T_3 Funkenerodieren			
TRL	$q_{T,M}$	Reife-Fortschritt		M_{T1}	Reife-Fortschritt		M_{T2}	Reife-Fortschritt	
1	5%	$m_{TRL,1}$	50%	79%	$m_{TRL,1}$	100%	69%	$m_{TRL,1}$	100%
2	5%	$m_{TRL,2}$	70%		$m_{TRL,2}$	100%		$m_{TRL,2}$	60%
3	15%	$m_{TRL,3}$	60%		$m_{TRL,3}$	30%		$m_{TRL,3}$	60%
4	15%	$m_{TRL,4}$	100%		$m_{TRL,4}$	40%		$m_{TRL,4}$	80%
5	20%	$m_{TRL,5}$	76%		$m_{TRL,5}$	80%		$m_{TRL,5}$	64%
6	20%	$m_{TRL,6}$	78%		$m_{TRL,6}$	90%		$m_{TRL,6}$	83%
7	20%	$m_{TRL,7}$	90%		$m_{TRL,7}$	70%		$m_{TRL,7}$	40%
66%									
Technologie		T_4 Laserstrahlabtragen		T_5 Löten		T_6 Kleben			
TRL	$q_{T,M}$	Reife-Fortschritt		M_{T4}	Reife-Fortschritt		M_{T3}	Reife-Fortschritt	
1	5%	$m_{TRL,1}$	50%	64%	$m_{TRL,1}$	100%	91%	$m_{TRL,1}$	100%
2	5%	$m_{TRL,2}$	90%		$m_{TRL,2}$	100%		$m_{TRL,2}$	100%
3	15%	$m_{TRL,3}$	30%		$m_{TRL,3}$	100%		$m_{TRL,3}$	60%
4	15%	$m_{TRL,4}$	80%		$m_{TRL,4}$	80%		$m_{TRL,4}$	60%
5	20%	$m_{TRL,5}$	66%		$m_{TRL,5}$	90%		$m_{TRL,5}$	69%
6	20%	$m_{TRL,6}$	84%		$m_{TRL,6}$	89%		$m_{TRL,6}$	87%
7	20%	$m_{TRL,7}$	50%		$m_{TRL,7}$	90%		$m_{TRL,7}$	60%
71%									
Reife der Technologieketten M_{TK}									
Technologiekette		TK α (T_1, T_2, T_2, T_5, T_2)		TK γ (T_1, T_2, T_3, T_5, T_2)		TK ζ (T_1, T_4, T_4, T_6, T_2)			
TRL	$q_{T,M}$	Reife-Fortschritt		$M_{TK\alpha}$	Reife-Fortschritt		$M_{TK\gamma}$	Reife-Fortschritt	
1	5%	$m_{TRL,1}$	90%	75%	$m_{TRL,1}$	90%	75%	$m_{TRL,1}$	70%
2	5%	$m_{TRL,2}$	94%		$m_{TRL,2}$	86%		$m_{TRL,2}$	90%
3	15%	$m_{TRL,3}$	50%		$m_{TRL,3}$	56%		$m_{TRL,3}$	42%
4	15%	$m_{TRL,4}$	60%		$m_{TRL,4}$	68%		$m_{TRL,4}$	72%
5	20%	$m_{TRL,5}$	81%		$m_{TRL,5}$	78%		$m_{TRL,5}$	71%
6	20%	$m_{TRL,6}$	87%		$m_{TRL,6}$	86%		$m_{TRL,6}$	85%
7	20%	$m_{TRL,7}$	78%		$m_{TRL,7}$	72%		$m_{TRL,7}$	64%
69%									

TRL: Technology Readiness Level T_i : Technologien, TK: Technologiekette

Abb. B.1: Detaillierte Ergebnisse der Reifebestimmung der einzelnen Technologien und Technologieketten α , γ und ζ des Anwendungsbeispiels

B Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung der Technologiereife des Anwendungsbeispiels

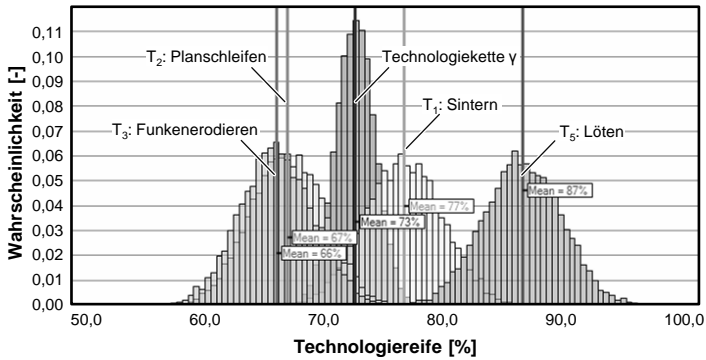


Abb. B.2: Übersicht über die Histogramme der Technologiereife für die einzelnen Technologien und die resultierende Technologiekette γ

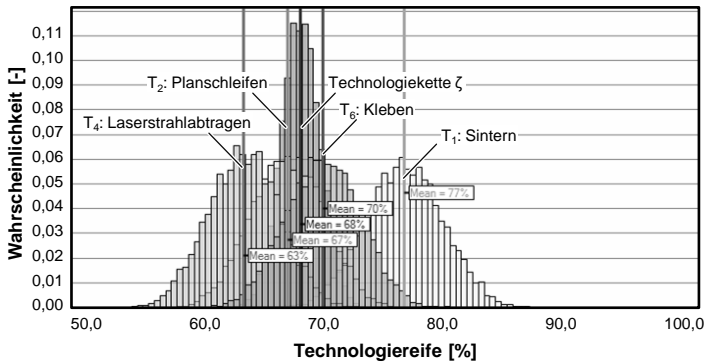


Abb. B.3: Übersicht über die Histogramme der Technologiereife für die einzelnen Technologien und die resultierende Technologiekette ζ

C Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Anwendungsbeispiels

Nachfolgend sind die detaillierten Ergebnisse der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Anwendungsbeispiels aus Abschnitt 5.6 aufgeführt. Abb. C.1 zeigt in Ergänzung zu Abb. 6.10 die Ergebnisse der deterministischen Bestimmung der Herstellstückkosten der Technologieketten γ und ζ . Abb. C.2 und C.3 zeigen ergänzend zu Abb. 6.12 die Herstell- und Entwicklungskosten der Technologieketten γ und ζ .

Herstellstückkosten HSK_γ der Technologiekette γ							
Bauteil-Feature	Technologie	TSS	MSS	Bedienverhältnis	Prozesszeit	FSK	Summe
A	T ₁ Sintern	16,00 €/h	19,40 €/h	20 %	0,10 h	1,99 €/Stk.	28,03 €/Stk.
B	T ₂ Planschleifen	22,30 €/h	29,80 €/h	80 %	0,12 h	5,54 €/Stk.	
C	T ₃ Funkenerodieren	35,00 €/h	29,80 €/h	20 %	0,17 h	6,96 €/Stk.	
D	T ₅ Löten	6,10 €/h	16,40 €/h	100 %	0,10 h	2,25 €/Stk.	
E	T ₂ Planschleifen	32,60 €/h	29,80 €/h	80 %	0,20 h	11,29 €/Stk.	
Werkstoff			Masse	Materialpreis	MSK	Summe	
Hartmetall K10			7,56 g	110,00 €/kg	0,83 €		
PKD-Schneideinsatz			41,72 mg	25.500,00 €/kg	1,06 €		1,90 €/Stk.
Summe der Herstellstückkosten							29,92 €/Stk.
Herstellstückkosten HSK_ζ der Technologiekette ζ							
Bauteil-Feature	Technologie	TSS	PSS	Bedienverhältnis	Prozesszeit	FSK	Summe
A	T ₁ Sintern	16,00 €/h	19,40 €/h	20 %	0,10 h	1,99 €/Stk.	20,88 €/Stk.
B	T ₄ Laserstrahlabtragen	41,00 €/h	29,80 €/h	50 %	0,05 h	2,80 €/Stk.	
C	T ₄ Laserstrahlabtragen	41,00 €/h	29,80 €/h	50 %	0,03 h	1,68 €/Stk.	
D	T ₆ Kleben	4,50 €/h	16,40 €/h	100 %	0,15 h	3,14 €/Stk.	
E	T ₂ Planschleifen	32,60 €/h	29,80 €/h	80 %	0,20 h	11,29 €/Stk.	
Werkstoff			Masse	Materialpreis	MSK	Summe	
Hartmetall K10			7,56 g	110,00 €/kg	0,83 €		
PKD-Schneideinsatz			41,72 mg	25.500,00 €/kg	1,06 €		1,90 €/Stk.
Summe der Herstellstückkosten							22,78 €/Stk.

TSS: Technologiestundensatz MSS: Mitarbeiterstundensatz FSK: Fertigungsstückkosten
MSK: Materialstückkosten HSK: Herstellstückkosten

Abb. C.1: Übersicht über die deterministische Berechnung der Herstellstückkosten der Technologieketten γ und ζ

C Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Anwendungsbeispiels

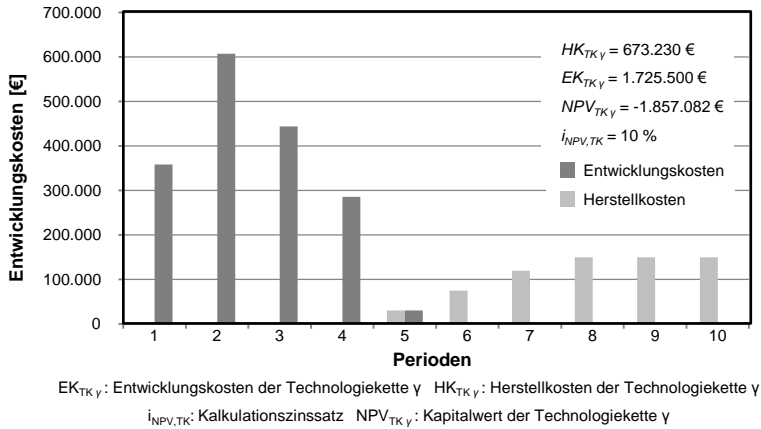


Abb. C.2: Übersicht der Herstell- und Entwicklungskosten der Technologiekette γ betrachtet für 10 Perioden

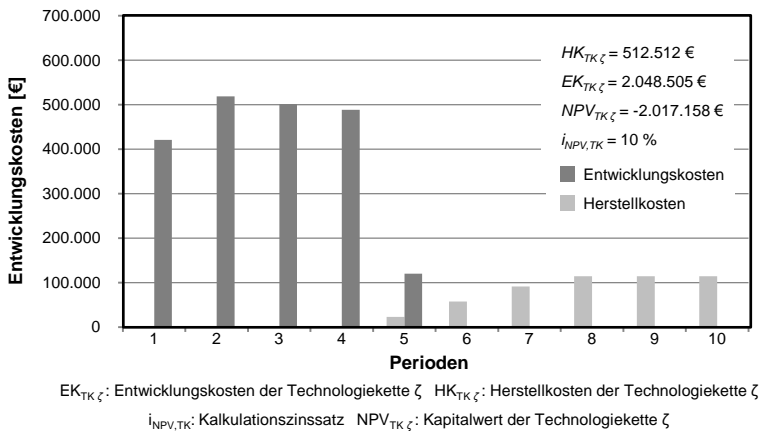


Abb. C.3: Übersicht der Herstell- und Entwicklungskosten der Technologiekette ζ betrachtet für 10 Perioden

D Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung des Technologiepotenzials des Anwendungsbeispiels

Nachfolgend sind die detaillierten Ergebnisse der Bestimmung des Technologiepotenzials des Anwendungsbeispiels aus Abschnitt 5.6 aufgeführt. Abb. D.1 und Abb. D.2 zeigen ergänzend zu Abb. 6.15 die technologischen Leistungsparameter der Technologieketten γ und ζ . Außerdem stellt Abb. D.3 ergänzend zu Abb. 6.16 die deterministischen Ergebnisse der Bestimmung der Technologiepotenziale der Technologieketten α , γ und ζ anhand einer S-Kurve dar.

Leistungsparameter der Technologiekette γ							
Leistungsparameter	Grenzwert	Optimum	Technologie (Bauteil-Feature)				
			T ₁ (A)	T ₂ (B)	T ₃ (C)	T ₅ (D)	T ₂ (E)
Bearbeitungsgenauigkeit [%]	50	100	-	-	60	95	90
Schartigkeit Rz [μm]	2	>1	-	-	-	-	1,4
Standweg s [m]	3.000	>5.000	-	-	-	-	4.200
Einsatztemperatur T _E [°C]	250	>700	-	-	-	600	-

A-E: Bauteil-Features T_i: Technologien

Abb. D.1: Übersicht über die Zuordnung der technologischen Leistungsparameter zu den einzelnen Technologien der Technologiekette γ

Leistungsparameter der Technologiekette ζ							
Leistungsparameter	Grenzwert	Optimum	Technologie (Bauteil-Feature)				
			T ₁ (A)	T ₄ (B)	T ₄ (C)	T ₆ (D)	T ₂ (E)
Bearbeitungsgenauigkeit [%]	50	100	-	-	80	80	90
Schartigkeit Rz [μm]	2	>1	-	-	-	-	1,4
Standweg s [m]	3.000	>5.000	-	-	-	-	4.200
Einsatztemperatur T _E [°C]	250	>700	-	-	-	300	-

A-E: Bauteil-Features T_i: Technologien

Abb. D.2: Übersicht über die Zuordnung der technologischen Leistungsparameter zu den einzelnen Technologien der Technologiekette ζ

D Detaillierte Ergebnisse der Bestimmung des Technologiepotenzials des Anwendungsbeispiels

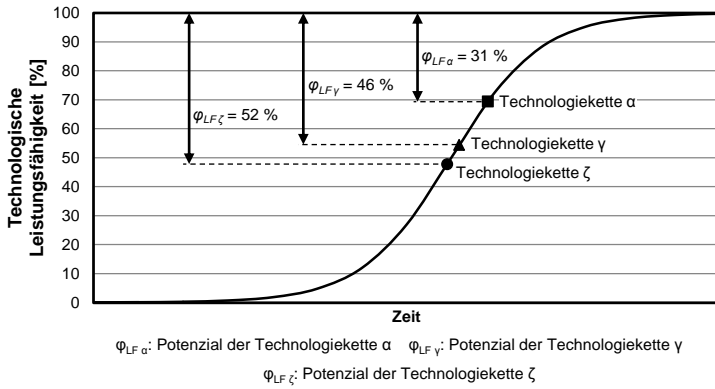


Abb. D.3: Darstellung des Technologiepotenzials der Technologieketten α , γ und ζ anhand der S-Kurve

E Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen im Rahmen der strategischen Planung von Technologieketten untersucht wurden. Deren Ergebnisse sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für Ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Nachfolgend sind die Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

- NIXDORF, D. Entwicklung eines Konzepts zur Generierung und Auswahl von Technologieketten unter Berücksichtigung zyklischer Einflüsse, Diplomarbeit, 2009, eingeflossen in Abschnitte 2.4 bis 2.6.
- FECHTER, W. Analyse und Bewertung von Methoden zur Identifizierung innovativer Produktionstechnologien, Semesterarbeit, 2010, eingeflossen in Abschnitt 5.4.
- MEYER, M. K. Bewertung von Innovationen in der Prozesskette einer Geschirrspülerinnentürfertigung, Semesterarbeit, 2010, eingeflossen in Abschnitt 4.4.
- BRUCKBAUER, P. Konzeptionelle Entwicklung einer Methode zur Reifegradbestimmung von Technologien und Technologieketten, Semesterarbeit, 2011, eingeflossen in Abschnitt 4.3.
- HENGSTLER, M. Entwicklung einer Methode zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Technologieketten unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, Bachelorarbeit, 2011, eingeflossen in Abschnitt 4.4.
- SAILER, T. Entwicklung eines Modells zur Generierung von Technologieketten unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen, Semesterarbeit, 2011, eingeflossen in Abschnitt 5.5.

- GREITEMANN, J. Entwicklung einer Methodik für die strategische Frühaufklärung und das Screening von Technologien und Technologieketten, Diplomarbeit, 2012, eingeflossen in Abschnitte 5.4.2 bis 5.4.3.

Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011.

ABELE ET AL. 2008

Abele, E.; Rumpel, G.; Kuhn, S. M.: Flexible Produktionskonzepte für die saisonale Produktion. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 103 (2008) 9, S. 585–588.

ABELE ET AL. 2011

Abele, E.; Kuske, P.; Lang, H.: Schutz vor Produktpiraterie: Ein Handbuch für den Maschinen- und Anlagenbau. 1. Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2011.

ABELE 2006

Abele, T.: Verfahren für das Technologie-Roadmapping zur Unterstützung des strategischen Technologiemanagements. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 441. Heimsheim: Jost-Jetter 2006.

AGOSTINI 2000

Agostini, A.: Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen. Dissertation, Universität Karlsruhe, wbk Forschungsberichte, Band 106. Karlsruhe: Grässer 2000.

AHSEN ET AL. 2010

Ahsen, A. v.; Kuchenbuch, A.; Heesen, M.: Leitfaden: Bewertung von Innovationen im Mittelstand. In: Ahsen, A. v. (Hrsg.): Bewertung von Innovationen im Mittelstand. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2010, S. 39–74.

ALISCH ET AL. 2010

Alisch, K.; Winter, E.; Arentzen, U.: Gabler Wirtschaftslexikon: Die ganze Welt der Wirtschaft: Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Wirtschaftsrecht, Recht und Steuern. 17. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2010.

ARDILIO & LAIB 2008

Ardilio, A.; Laib, S.: Technologiepotenzialanalyse - Vorgehensweise zur Identifikation von Entwicklungspotenzialen neuer Technologien. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Fokus Technologie. München: Carl Hanser 2008, S. 175–217.

ARMAN ET AL. 2006

Arman, H.; Hodgson, A.; Gindy, N.: Threat and opportunity analysis in technological development. In: IEEE (Hrsg.): PICMET Conference: Technology Management for the Global Future. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 2006, S. 9–17.

AURICH ET AL. 2003

Aurich, J.; Barbian, P.; Wagenknecht, C.: Prozessmodule zur Gestaltung flexibilitätsgerechter Produktionssysteme. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 98 (2003) 5, S. 214–218.

AURICH ET AL. 2009

Aurich, J. C.; Lauer, C.; Faltin, M.; Schweitzer, E.: Abschätzung der Lebenszykluskosten neu entwickelter Fertigungsprozesse. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 9, S. 720–724.

BANKHOFER & VOGEL 2008

Bankhofer, U.; Vogel, J.: Datenanalyse und Statistik: Eine Einführung für Ökonomen im Bachelor. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2008.

BAUM ET AL. 2013

Baum, H.-G.; Coenenberg, A. G.; Guenther, T.: Strategisches Controlling. 5. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2013.

BECHMANN 1978

Bechmann, A.: Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung. Bern, Stuttgart: Haupt 1978.

BENES & GROH 2010

Benes, G. M.; Groh, P. E.: Grundlagen des Qualitätsmanagements. München: Carl Hanser 2010.

BERGER & KLOOS 2011

Berger, C.; Kloos, K. H.: Eigenschaften und Verwendung der Werkstoffe. In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel. Berlin: Springer 2011, S. E32–E70.

BERRET 2009

Berret, M.: Herausforderungen der globalen Wertschöpfung am Beispiel der

Automobilindustrie. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H. J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin: Springer 2009, S. 337–351.

BIERMANN ET AL. 2013

Biermann, D.; Gausemeier, J.; Hess, S.; Petersen, M.; Wagner, T.: Planning and Optimisation of Manufacturing Process Chains for Functionally Graded Components – Part 1: Methodological Foundations. Production Engineering - Research and Development 7 (2013) 6, S. 657–664.

BIEWER 1997

Biewer, B.: Fuzzy-Methoden: Praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1997.

BINDER & KANTOWSKY 1996

Binder, V.; Kantowsky, J.: Technologiepotentiale: Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des strategischen Technologiemanagements. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1996.

BOLZ 2008

Bolz, A. E.: Innovation, Kooperation und Erfolg junger Technologieunternehmen: Konzept - Panelstudie - Gestaltungsempfehlungen. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. Wiesbaden: Gabler 2008.

BOOS ET AL. 2011

Boos, W.; Völker, M.; Schuh, G.: Grundlagen des Managements produzierender Unternehmen. In: Schuh, G.; Kampker, A. (Hrsg.): Strategie und Management produzierender Unternehmen. Berlin, Dordrecht, London, New York: Springer 2011, S. 1–62.

BOSCH 2011

Bosch, K.: Elementare Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung: Mit 82 Beispielen und 73 Übungsaufgaben mit vollständigem Lösungsweg. 11. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011.

BOSSMANN 2007

Bossmann, M.: Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. Dissertation, Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 38. Saarbrücken: LFT 2007.

BRECHER ET AL. 2005

Brecher, C.; Klocke, F.; Weck, M.; Meidlinger, R.; Wegner, H.: Bewertung von Fertigungsfolgen. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin, Heidelberg: Springer 2005, S. 208–225.

BRECHER ET AL. 2013

Brecher, C.; Klocke, F.; Schindler, F.; Janssen, A.; Fischer, B.; Hermani, J.-P.: Finishing of polycrystalline diamond tools by combining laser ablation with grinding. *Production Engineering - Research and Development* 7 (2013) 4, S. 361–371.

BRETZKE 2010

Bretzke, W.-R.: *Logistische Netzwerke*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

BRIEKE 2009

Brieke, M.: *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 01/2009. Garbsen: PZH, Produktionstechnisches Zentrum 2009.

BROUSSEAU ET AL. 2009

Brousseau, E. B.; Barton, R.; Dimov, S.; Bigot, S.: Technology maturity assessment of micro and nano manufacturing processes. In: *4M/ICOMM - The Global Conference on Micro Manufacture*, 2009, S. 257–262.

BROUSSEAU ET AL. 2010

Brousseau, E. B.; Barton, R.; Dimov, S.; Bigot, S.: A Methodology for Evaluating the Technological Maturity of Micro and Nano Fabrication Processes. In: Ratchev, S. (Hrsg.): *Precision Assembly Technologies and Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 329–336.

BULLINGER 1994

Bullinger, H.-J.: *Einführung in das Technologiemanagement: Modelle, Methoden, Praxisbeispiele*. Stuttgart: Teubner 1994.

BULLINGER 1996

Bullinger, H.-J.: *Technologiemanagement*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Betriebshütte*. Berlin: Springer 1996, S. 4.26–4.54.

BULLINGER 2002

Bullinger, H.-J.: *Technologiemanagement: Forschen und arbeiten in einer vernetzten Welt*. Berlin: Springer 2002.

BULLINGER 2009

Bullinger, H.-J.: *Technology guide: Principles, Applications, Trends*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

BULLINGER ET AL. 2012

Bullinger, H.-J.; Slama, A.; Potinecke, T.: *Erfolgreiche Technologieentwicklung - Krisensicher in die Zukunft: Studie*. Fraunhofer Verlag 2012.

BURGELMAN & ROSENBLOOM 2000

Burgelman, R.; Rosenbloom, R. S.: Design and Implementation of Technology Strategy: An Evolutionary Perspective. In: Dorf, R. C. (Hrsg.): Technology Management Handbook. Boca Raton, USA: CRC Press LLC 2000, S. 896–912.

BURGSTAHLER 1997

Burgstahler, B.: Synchronisation von Produkt- und Produktionsentwicklung mit Hilfe eines Technologiekalenders. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Schriftenreihe des IWF, Band 01/2009. Essen: Vulkan-Verlag 1997.

CAPUTO ET AL. 2009

Caputo, A.; Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Lang, S.; Pigeot-Kübler, I.; Tutz, G.: Arbeitsbuch Statistik. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Dissertation, Technische Universität München, iwv Forschungsberichte, Band 191. München: Herbert Utz 2005.

COOPER 1979

Cooper, R. G.: Identifying industrial new product success. Industrial Marketing Management 1 (1979) 8, S. 124–135.

COOPER 2002

Cooper, R. G.: Top oder Flop in der Produktentwicklung: Erfolgsstrategien: von der Idee zum Launch. 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH 2002.

CORSTEN ET AL. 2006

Corsten, H.; Gössinger, R.; Schneider, H.: Grundlagen des Innovationsmanagements. Vahdens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 1. Auflage. München: Vahlen 2006.

COTTIN & DÖHLER 2009

Cottin, C.; Döhler, S.: Risikoanalyse: Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009.

DAUM ET AL. 2010

Daum, A.; Greife, W.; Przywara, R.: BWL für Ingenieure und Ingenieurinnen: Was man über Betriebswirtschaft wissen sollte. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010.

DEINZER & RETHMEIER 2006

Deinzer, G. H.; Rethmeier, M.: Welding and other Thermal Processes. In: Friedrich, H. E.; Mordike, B. L. (Hrsg.): Magnesium Technology. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2006, S. 349–365.

DENKENA & HENNING 2008

Denkena, B.; Henning, H.: Dimensioning Technological Interfaces and Process Parameters in Manufacturing Process Chains. In: Teti, R. (Hrsg.): Proceedings of the 6th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME), Neapel, Italien: 2008, S. 55–60.

DENKENA ET AL. 2005

Denkena, B.; Rudzio, H.; Liedtke, C.; Brandes, A.: Planung fertigungstechnischer Prozessketten. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 11-12, S. 866–871.

DENKENA ET AL. 2008

Denkena, B.; Nyhuis, P.; Eikötter, M. S. W.: Roadmapping zur strategischen Unternehmensplanung: Integrative Produkt-, Technologie- und Fabrikplanung mittels Roadmapping. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 103 (2008) 12, S. 856–860.

DENKENA ET AL. 2009

Denkena, B.; Henjes, J.; Henning, H.: Holistic Process Chain Optimisation based on Simulation of Technological Interfaces. In: Zaeh, M. F.; ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München: Herbert Utz 2009, S. 867–876.

DGR 2008

DGR: Risikoaggregation in der Praxis: Beispiele und Verfahren aus dem Risikomanagement von Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

DIN-199 2002

DIN 199: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Begriffe, Berlin: Beuth 2002.

DIN-55350 1986

DIN 55350: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Begriffe zu Mustern, Berlin: Beuth 1986.

DIN-8580 2003

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

DOHMS 2001

Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 11. Aachen: Shaker 2001.

DOWLING & HÜSING 2002

Dowling, M.; Hüsing, S.: Technologiestrategie. In: Specht, D.; Möhrle, M. G. (Hrsg.): Gabler-Lexikon Technologiemanagement. Wiesbaden: Gabler 2002, S. 377–380.

DRACHSLER 2006

Drachsler, K.: Leitfaden Technology Intelligence: Anleitung zur Technologiefrühaufklärung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

DRESCHER ET AL. 2011

Drescher, T.; Wellensiek, M.; Schuh, G.: Technologie-Leveraging - das Technologiepotential gezielt abschöpfen. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 300. Berlin, Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2011, S. 261–284.

DU ET AL. 2005

Du, X.; Jiao, J.; Tseng, M.: Understanding customer satisfaction in product customization. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 31 (2005) 3-4, S. 396–406.

DYCKHOFF & SPENGLER 2010

Dyckhoff, H.; Spengler, T. S.: Produktionswirtschaft: Eine Einführung. 3. Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2010.

ECKLE-KOHLER & KOHLER 2009

Eckle-Kohler, J.; Kohler, M.: Eine Einführung in die Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

EHRENSPIEL 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Auflage. München, Wien: Carl Hanser 2009.

EHRENSPIEL ET AL. 1998

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur: Springer 1998.

ELMARAGHY & WIENDAHL 2009

ElMaraghy, H.; Wiendahl, H.-P.: Changeability - An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and reconfigurable manufacturing systems. New York, London: Springer 2009, S. 3–24.

ERHARDT & PASTEWSKI 2010

Erhardt, R.; Pastewski, N.: Relevanz der Ressourceneffizienz für Unternehmen des produzierenden Gewerbes: Ergebnisse der Datenerhebung über die Relevanz des Themas Ressourceneffizienz im produzierenden Gewerbe Deutschlands. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2010.

ERLACH 2010

Erlach, K.: Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik. 2. Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2010.

ESA 2008

ESA: Technology Readiness Levels Handbook for Space Applications. 2008.

ESAWI & ASHBY 1998

Esawi, A. M. K.; Ashby, M. F.: Cost-Based Ranking for Manufacturing Process Selection. In: Batoz, J.-L.; Chedmail, P.; Cognet, G.; Fortin, C. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME 1998). Dordrecht: Kluwer Academic 1998, S. 1001–1008.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik: Band 1 - Grundlagen. 3. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.

EVERSHEIM & KRAUSE 1996a

Eversheim, W.; Krause, F.-L.: Produktgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996a, S. 7.26–7.72.

EVERSHEIM & KRAUSE 1996b

Eversheim, W.; Krause, F.-L.: Produktgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996b, S. 7.26–7.72.

EVERSHEIM ET AL. 1995

Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering: Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer 1995.

EVERSHEIM ET AL. 1996

Eversheim, W.; Böhlke, U. H.; Martini, C. J.; Schmitz, W. J.: Innovativer mit dem Technologiekalender. Harvard Business Manager 1 (1996) 1, S. 105–112.

EVERSHEIM ET AL. 2005

Eversheim, W.; Klocke, F.; Schuh, G.; Knoche, K.; Willms, H.: Einsatzplanung von Fertigungstechnologien. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin, Heidelberg: Springer 2005, S. 170–190.

EWERT & WAGENHOFER 2008

Ewert, R.; Wagenhofer, A.: Interne Unternehmensrechnung. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

FALLBÖHMER 2000

Fallböhrer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 23. Aachen: Shaker 2000.

FIEBIG 2004

Fiebig, C.: Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Band 165. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.

FORD & RYAN 1981

Ford, D.; Ryan, C.: Taking technology to market. Harvard Business Review 59 (1981) 2, S. 117–126.

FOSTER 1986

Foster, R. N.: Innovation: The attacker's advantage. New York: Summit Books 1986.

FRESE ET AL. 1996

Frese, E.; Hahn, D.; Horváth, P.: Managementsysteme. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 3.42–3.93.

FRIEMUTH 2002

Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge. Habilitation, Technische Universität Hannover, Fortschrittsberichte VDI, Band 615. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.

GASSMANN & BADER 2011

Gassmann, O.; Bader, M. A.: Patentmanagement: Innovationen erfolgreich nutzen und schützen. 3. Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2011.

GAUSEMEIER ET AL. 2006

Gausemeier, J.; Stollt, G.; Wenzelmann, C.: Szenariogestützte Technologieplanung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 101 (2006) 6, S. 349–355.

GAUSEMEIER ET AL. 2009

Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München, Wien: Carl Hanser 2009.

GAUSEMEIER ET AL. 2011

Gausemeier, J.; Echterhoff, N.; Kokoschka, M.: Direct Manufacturing - innovative Fertigungsverfahren für die Produkte von morgen. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 300. Heinz-Nixdorf-Institut 2011, S. 5–27.

GAUSEMEIER ET AL. 2012

Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U.: Grundlagen. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. München: Carl Hanser 2012, S. 29–67.

GEISSDÖRFER 2009

Geißdörfer, K.: Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC): Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA. Dissertation, European Business School, Controlling und Management, Band 7. Münster, Berlin: LIT 2009.

GERPOTT 2005

Gerpott, T. J.: Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2005.

GERSTEIN 2000

Gerstein, M. S.: Understanding the Value Chain. In: Dorf, R. C. (Hrsg.): Technology Management Handbook. Boca Raton, USA: CRC Press LLC 2000, S. 269–275.

GOMERINGER 2007

Gomeringer, A.: Eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 460. Heimsheim: Jost-Jetter 2007.

GÖTZE 2010

Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

GRAWATSCH 2005

Grawatsch, M.: TRIZ-basierte Technologiefrüherkennung. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 19/2005. Aachen: Shaker 2005.

GROSSMANN ET AL. 2012

Großmann, K.; Wiemer H.; Helbig, M.: Modellierung und Analyse technologischer Ketten: Ein neuer Ansatz zur effektiven Generierung von Technologiewissen. *Industrie Management* 28 (2012) 4, S. 38–42.

GUDEHUS 2005

Gudehus, T.: *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2005.

GUNDLACH & BECKER 2010

Gundlach, C.; Becker, L.: *Die frühe Innovationsphase: Methoden und Strategien für die Vorentwicklung*. 1. Auflage. Düsseldorf: Symposium 2010.

GUNDLACH ET AL. 2010

Gundlach, C.; Fresner, J.; Jantschgi, J.; Nähler, H.: *Strategische Innovationsplanung mit TRIZ*. In: Barske, H.; Gerybadze, A.; Sommerlatte, T. (Hrsg.): *Innovationsmanagement*. Düsseldorf: Symposion Publishing 2010, S. 1–20.

HAAG ET AL. 2011

Haag, C.; Schuh, G.; Kreysa, J.; Schmelter, K.: *Technologiebewertung*. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin: Springer 2011, S. 309–366.

HAUSCHILDT & SALOMO 2011

Hauschildt, J.; Salomo, S.: *Innovationsmanagement*. 5. Auflage. München: Vahlen 2011.

HAUSCHILDT & STAUDT 1996

Hauschildt, J.; Staudt, E.: *Innovationsmanagement*. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Betriebshütte*. Berlin: Springer 1996, S. 4.1–4.25.

HEESEN & KUCHENBUCH 2010

Heesen, M.; Kuchenbuch, A.: *Bewertung von Innovationen bei der Behr-Hella Thermocontrol GmbH*. In: Ahsen, A. v. (Hrsg.): *Bewertung von Innovationen im Mittelstand*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2010, S. 89–104.

HEINECKER 2006

Heinecker, M.: *Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme*. Dissertation, Technische Universität München. München: Herbert Utz 2006.

HEITSCH 2000

Heitsch, J.-U.: *Multidimensionale Bewertung alternativer Produktionstechniken*:

Ein Beitrag zur technischen Investitionsplanung. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 17/2000. Aachen: Shaker 2000.

HERB ET AL. 2000

Herb, R.; Herb, T.; Kohnhauser, V.: TRIZ - der systematische Weg zur Innovation: Werkzeuge, Praxisbeispiele, Schritt-für-Schritt-Anleitungen. Landsberg am Lech: Moderne Industrie 2000.

HERNÁNDEZ MORALES 2002

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Universität Hannover, Fortschrittsberichte VDI, Band 149. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.

HERRMANN 2010

Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Heidelberg, Dodrecht, London, New York: Springer 2010.

HEUBACH ET AL. 2008

Heubach, D.; Slama, A.; Rüger, M.: Der Technologieentwicklungsprozess. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Fokus Technologie. München: Carl Hanser 2008, S. 13–44.

HIRT ET AL. 2012

Hirt, G.; Bleck, W.; Bobzin, K.; Brecher, C.; Bührig-Polazcek, A.; Haberstroh, E.; Klocke, F.; Loosen, P.; Michaeli, W.; Poprawe, R.; Reisinger, U.; Arntz, K.; Bagcivan, N.; Bambach, M.; Bäuml, S.; Beckemper, S.; Bergweiler, G.; Breitbach, T.; Buchholz, S.; Bültmann, J.; Diettrich, J.; Do-Khac, D.; Eilbracht, S.; Emonts, M.; Flock, D.; Gerhardt, K.; Gillner, A.; Göttmann, A.; Grönlund, O.; Hartmann, C.; Heinen, D.; Herfs, W.; Hermani, J.-P.; Holtkamp, J.; Ivanov, T.; Jakob, M.; Janssen, A.; Karlberger, A.; Klaiber, F.; Kutschmann, P.; Neuß, A.; Prahl, U.; Roderburg, A.; Rosen, C.-J.; Rösner, A.; Saeed-Akbari, A.; Scharf, M.; Scheik, S.; Schleser, M.; Schöngart, M.; Stein, L.; Steiners, M.; Stollenwerk, J.; Araghi, B. T.; Theiß, S.; Wunderle, J.: Hybrid Production Systems. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Production Technology for High-Wage Countries. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2012, S. 435–696.

HÖCHERL 2000

Höcherl, I.: Das S-Kurven-Konzept im Technologiemanagement: Eine kritische Analyse. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Europäische Hochschulschriften - Band 5: Volks- und Betriebswirtschaft, Band 2564. Frankfurt am Main: Internationaler Verlag der Wissenschaften 2000.

HÖFT 1992

Höft, U.: Lebenszykluskonzepte: Grundlage für das strategische Marketing- und Technologiemanagement. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1992.

HOISL 2012

Hoisl, F.: Visual, Interactive 3D Spatial Grammars in CAD for Computational Design Synthesis. Dissertation, Technische Universität München. München 2012.

JACK & RATURI 2002

Jack, E. P.; Raturi, A.: Sources of volume flexibility and their impact on performance. *Journal of Operations Management* 20 (2002) 5, S. 519–548.

JAHN 2010

Jahn, T.: Portfolio- und Reifegradmanagement für Innovationsprojekte zur Multiprojektsteuerung in der frühen Phase der Produktentwicklung. Dissertation, Universität Stuttgart, Berichte des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Band 575. Stuttgart: IKTD 2010.

JURKLIES 2004

Jurklies, I.: Generierung und Bewertung von Prozessketten für den Werkzeug- und Formenbau. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Berichte aus der Fertigungstechnik. Aachen: Shaker 2004.

KALLMEYER ET AL. 2001

Kallmeyer, F.; Ebbesmeyer, P.; Gausemeier, J.: Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Carl Hanser 2001.

KARL ET AL. 2011

Karl, F.; Pohl, J.; Schindler, S.: Umfrage – Beeinflussung der Produktion durch Zyklen. *iwb Newsletter* 4 (2011) 12, S. 7–8.

KEIL ET AL. 2007

Keil, S.; Lasch, R.; Deutschländer, A.; Schneider, G.: Einfluss- und Erfolgsfaktoren auf den Ramp Up in der Halbleiterindustrie. In: Otto, A.; Obermaier, R. (Hrsg.): *Logistikmanagement*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007, S. 201–230.

KLAPPERT 2006

Klappert, S.: Systembildendes Technologie-Controlling. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 4. Aachen: Shaker 2006.

KLAPPERT ET AL. 2011

Klappert, S.; Schuh, G.; Möller, H.; Nollau, S.: Technologieentwicklung. In:

Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin: Springer 2011, S. 223–239.

KLOCKE 2002

Klocke, F.: Technologiesprünge durch Kooperation und Interdisziplinarität. In: Milberg, J.; Schuh, G. (Hrsg.): *Erfolg in Netzwerken*. Berlin: Springer 2002, S. 221–233.

KLOCKE 2009a

Klocke, F.: Production Technology in High-Wage Countries: From Ideas of Today to Products of Tomorrow. In: Schlick, C. M. (Hrsg.): *Industrial Engineering and Ergonomics*. Berlin: Springer 2009a, S. 13–30.

KLOCKE 2009b

Klocke, F.: *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009b.

KLOCKE & KÖNIG 2008

Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2008.

KLOCKE & WILLMS 2007

Klocke, F.; Willms, H.: Methodology to describe the influence of manufacturing processes on the part functionality. *Production Engineering - Research and Development* 1 (2007) 1, S. 163–168.

KLOCKE ET AL. 2008

Klocke, F.; Zeppenfeld, C.; Pampus, A.; Mattfeld, P.: *Fertigungsbedingte Produkteigenschaften (FePro): Förderkennzeichen 02 PU 1010 - Status und Perspektiven*. Aachen: Apprimus-Verlag 2008.

KLOCKE ET AL. 2009

Klocke, F.; Roderburg, A.; Wegner, H.: Methodik zur inventiven Weiterentwicklung von Fertigungstechnologien. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): *Vorausschau und Technologieplanung*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 265. Heinz-Nixdorf-Institut 2009, S. 353–369.

KLOCKE ET AL. 2011

Klocke, F. T. s.; Wegner, H.; Roderburg, A.: Modeling economic efficiency of multi-technology platforms. *Production Engineering - Research and Development* 5 (2011) 3, S. 293–300.

KNAF & HEUBACH 2008

Knaf, H.; Heubach, D.: Den Reifegrad einer Technologie mit dem Technologiekompass bestimmen. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): *Fokus Technologie*. München: Carl Hanser 2008, S. 147–174.

KNIGHT 2005

Knight, F. H.: Risk, Uncertainty and Profit. New York: Cosimo Classics 2005.

KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 5. Aachen: Shaker 2005.

KOHN & ÖZTÜRK 2010

Kohn, W.; Öztürk, R.: Statistik für Ökonomen: Datenanalyse mit R und SPSS. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

KOSTE & MALHORTA 1999

Koste, L. J.; Malhorta, M. K.: A theoretical Framework for Analyzing the Dimensions of Manufacturing Flexibility. Journal of Operation Management 18 (1999) 1, S. 75–93.

KRAMER 2009

Kramer, O.: Informatik im Fokus - Computational Intelligence: Eine Einführung. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer 2009.

KRAPP & NEBEL 2011

Krapp, M.; Nebel, J.: Methoden der Statistik: Lehr- und Arbeitsbuch. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011.

KREBS 2012

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Dissertation, Technische Universität München, iwv Forschungsberichte, Band 255. München: Herbert Utz 2012.

KREBS ET AL. 2009

Krebs, P.; Müller, N.; Reinhardt, S.; Schellmann, H.; Bredow, M. v.; Reinhart, G.: Ganzheitliche Risikobewertung für produzierende Unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 3, S. 174–181.

KRÖLL 2007

Kröll, M.: Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis. Heimsheim: Jost-Jetter 2007.

LACHMUND 1997

Lachmund, U.: Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Band D83. Berlin: FhG/IPK 1997.

LANG-KOETZ ET AL. 2008

Lang-Koetz, C.; Adrilio, A.; Warschat, J.: TechnologieRadar - Heute schon Technologien für morgen identifizieren. In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Fokus Technologie. München: Carl Hanser 2008, S. 133–146.

LANZA ET AL. 2012

Lanza, G.; Peters, S.; Herrmann, H.-G.: Dynamic optimization of manufacturing systems in automotive industries. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 (2012) 4, S. 235–240.

LAUBE 2009

Laube, T.: Methodik des interorganisationalen Technologietransfers: Ein Technologie-Roadmap-basiertes Verfahren für kleine und mittlere technologieorientierte Unternehmen. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 483. Heimsheim: Jost-Jetter 2009.

LAUWERS ET AL. 2010

Lauwers, B.; Klocke, F.; Klink, A.: Advanced Manufacturing through the Implementation of Hybrid and Media Assisted Processes. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Sustainable production for resource efficiency and ecomobility. Chemnitz: Wissenschaftliche Skripten 2010, S. 205–220.

LEE 2003

Lee, T.: Complexity Theory in Axiomatic Design. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology (MIT). Massachusetts 2003.

LEHNER 2001

Lehner, C.: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweissprozesses von Magnesiumdruckguss. Dissertation, Technische Universität München, iw Forschungsbereiche, Band 147. München: Herbert Utz 2001.

LICHTENTHALER 2002

Lichtenthaler, E.: Organisation der Technology Intelligence: Eine empirische Untersuchung der Technologieförderung in technologieintensiven Grossunternehmen. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 2002.

LICHTENTHALER 2008

Lichtenthaler, E.: Methoden der Technologie-Früherkennung und Kriterien zu ihrer Auswahl. In: Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 59–84.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Auflage. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer 2009.

LINDEMANN & MAURER 2006

Lindemann, U.; Maurer, M.: Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. (Hrsg.): Individualisierte Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, S. 41–62.

LINDEMANN ET AL. 2003

Lindemann, U.; Baumberger, C.; Freyer, B.; Gahr, A.; Ponn, J.; Plum, U.: Entwicklung individualisierter Produkte. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2003, S. 13–29.

LÖFFLER 2008

Löffler, C.: Strategische Selbstbindung und die Auswirkung von Zeitführerschaft. Dissertation, Technische Universität Wien, Organisation und ökonomische Analyse, Band 10. Wiesbaden: Gabler 2008.

LOTTER 2006

Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2006, S. 1–9.

MANKINS 1995

Mankins, J. C.: Technology Readiness Level: A White Paper, 1995, <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf> vom 15.04.2011.

MEIER & UHLMANN 2012

Meier, H.; Uhlmann, E.: Hybride Leistungsbündel - ein neues Produktverständnis. In: Meier, H.; Uhlmann, E. (Hrsg.): Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 1–21.

MENZEL 2001

Menzel, T.: Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2001.

MEYER 2006

Meyer, T.: Investitionen in Auslandsstandorte: Bewertung und Auswahl. In: Abele, E.; Kluge, J.; Näher U. (Hrsg.): Handbuch globale Produktion. München: Carl Hanser 2006, S. 102–143.

MILBERG 2005

Milberg, J.: Deutschland eine starke Marke – ein Beitrag zur Leitbilddiskussion in Deutschland. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachen: Shaker 2005, S. 1–16.

MILBERG & MÜLLER 2007

Milberg, J.; Müller, S.: Integrated configuration and holistic evaluation of technology chains within process planning. *Production Engineering - Research and Development* 1 (2007) 4, S. 401–406.

MOCH 2011

Moch, D.: Strategischer Erfolgsfaktor Informationstechnologie: Analyse des Wertbeitrags der Informationstechnologie zur Produktivitätssteigerung und Produktdifferenzierung. Dissertation, Universität Mannheim. Wiesbaden: Gabler 2011.

MÖHRLE & ISENMANN 2008

Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Dissertation, Technische Universität München, iwv Forschungsberichte, Band 212. München: Herbert Utz 2008.

MORYSON 2004

Moryson, R.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Fortschritt-Berichte VDI, Band 388. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.

MÜLLER 2007

Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Dissertation, Technische Universität München, iwv Forschungsberichte, Band 209. München: Herbert Utz 2007.

MÜLLER-GRONBACH ET AL. 2012

Müller-Gronbach, T.; Novak, E.; Ritter, K.: *Monte Carlo-Algorithmen*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2012.

MUMM 2008

Mumm, M.: *Kosten- und Leistungsrechnung: Internes Rechnungswesen für Industrie- und Handelsbetriebe*. Heidelberg: Physica-Verlag 2008.

NAU 2012

Nau, B. R.: Anlauforientierte Technologieplanung zur Auswahl von Fertigungstechnologien. Dissertation, RWTH Aachen, Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Band 10/2012. Aachen: Apprimus-Verlag 2012.

NAU ET AL. 2011

Nau, B. R.; Roderburg, A.; Klocke, F.: Ramp-up of hybrid manufacturing technologies. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4 (2011) 3, S. 313–316.

NEUGEBAUER 2008

Neugebauer, R.: Energieeffizienz in der Produktion: Abschlussbericht - Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. München: Fraunhofer Gesellschaft (FhG) 2008.

NICK 2008

Nick, A.: Wirksamkeit strategischer Frühaufklärung: Eine empirische Untersuchung. Dissertation, Technische Universität Berlin. Wiesbaden: Gabler 2008.

NIEMANN ET AL. 2005

Niemann, G.; Höhn, B.-R.; Winter, H.: Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2005.

NOLTE ET AL. 2003

Nolte, W. L.; Kennedy, B. C.; Dziegiel, R. J.: Technology Readiness Calculator, 2003, <http://www.dtic.mil/ndia/2003systems/nolte2.pdf> vom 28.12.2011.

NONN 2009

Nonn, C.: Analyse und Steigerung der Innovationsproduktivität: Ein kompetenzbasierter und systemdynamischer Ansatz. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen 2009.

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH, Produktionstechnisches Zentrum 2008.

OCKER 2010

Ocker, D.: Unschärfe Risikoanalyse strategischer Ereignisrisiken. Dissertation, Universität Frankfurt an der Oder, Schriften zur Unternehmensplanung, Band 83. Frankfurt am Main: Lang 2010.

OSD 2011

OSD: Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook: Version 2.01, 2011, <http://www.dodmrl.com/MRLDeskbookV2.01.pdf> vom 03.02.2012.

OSSADNIK 2008

Ossadnik, W.: Kosten- und Leistungsrechnung. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

PACHOW-FRAUENHOFER ET AL. 2009

Pachow-Frauenhofer, J.; Wagner, C.; Nyhuis, P.: Erweiterte Prozesskettenbewertung am Beispiel eines kombinierten Laserverfahrens. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 7-8, S. 617–622.

PAUL ZOLÉKO 2011

Paul Zoléko, J.-F. d.: Reifegradbasierte Planung eines organisatorischen Regelwerkes in einer Produktion. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 03/2011. Garbsen: PZH, Produktionstechnisches Zentrum 2011.

PAULK ET AL. 1993

Paulk, M. C.; Curtis, B.; Chrissis, M. B.; Weber, C. V.: Capability Maturity Model for Software Version 1.1., 1993, <http://www.sei.cmu.edu/reports/93tr025.pdf> vom 03.01.2012.

PEIFFER & PFEIFFER 1992

Peiffer, S.; Pfeiffer, S.: Technologie-Frühaufklärung: Identifikation und Bewertung zukünftiger Technologien in der strategischen Unternehmensplanung. Hamburg: S+W Steuer- und Wirtschaftsverlag 1992.

PELZER 1999

Pelzer, W.: Methodik zur Identifizierung und Nutzung strategischer Technologiepotentiale. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 22. Aachen: Shaker 1999.

PERILLIEUX 1987

Perillieux, R.: Der Zeitfaktor im strategischen Technologiemanagement: Früher oder später Einstieg bei technischen Innovationen? Berlin: Erich Schmidt Verlag 1987.

PETERS & LANZA 2013

Peters, S.; Lanza, G.: Production Technology Management: Technical Presentation, CIRP General Assembly Copenhagen, Dänemark 2013.

PETERSEN ET AL. 2014

Petersen, M.; Rudtsch, V.; Gausemeier, J.: Multi-Criteria Decision-Support for Manufacturing Process Chain Selection in the Context of Functionally Graded Components. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin, London: Springer 2014, S. 377–382.

PFEIFFER & DÖGL 1986

Pfeiffer, W.; Dögl, R.: Das Technologie-Portfolio-Konzept zur Beherrschung der Schnittstelle Technik und Unternehmensstrategie. In: Hahn, D.; Taylor, B.

(Hrsg.): Strategische Unternehmensplanung - strategische Unternehmensführung. Heidelberg, Wien: Springer 1986, S. 149–177.

PMI 2003

PMI: A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide): Das offizielle Handbuch zur Gesamtheit des Projektmanagementwissens. 2003 Auflage. Newtown Square, Pennsylvania, USA: Project Management Institute 2003.

PORTER 1999

Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten. 10. Auflage. Frankfurt am Main: Campus-Verlag 1999.

RAPP 1999

Rapp, T.: Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen. Dissertation, Universität St. Gallen. Wiesbaden: Gabler 1999.

REEVES 2000

Reeves, R.: Research and Development. In: Dorf, R. C. (Hrsg.): Technology Management Handbook. Boca Raton, USA: CRC Press LLC 2000, S. 150–156.

REGER 2001

Reger, G.: Risikoreduzierung durch Technologie-Früherkennung. In: Gassmann, O.; Kobe, C.; Voit, E. (Hrsg.): High-Risk-Projekte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2001, S. 251–277.

REINHARDT ET AL. 2012

Reinhardt, S.; Fischl, M.; Reinhart, G.: Characterization and Weighting Scheme to Assess the Resource Efficiency of Manufacturing Process Chains. In: Dornfeld, D. A.; Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Heidelberg, New York: Springer 2012, S. 509–514.

REINHART & SCHINDLER 2010a

Reinhart, G.; Schindler, S.: A Strategic Evaluation Approach for Defining the Maturity of Manufacturing Technologies. World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET) 6 (2010a) 71, S. 920–925.

REINHART & SCHINDLER 2010b

Reinhart, G.; Schindler, S.: Reife von Produktionstechnologien: Konzeptionelle Bestimmung des Entwicklungsstadiums von Fertigungsverfahren und -prozessen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 105 (2010b) 7-8, S. 710–714.

REINHART & SCHINDLER 2012

Reinhart, G.; Schindler, S.: Strategic Evaluation of Technology Chains for Producing Companies. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability. Berlin, London: Springer 2012, S. 391–396.

REINHART ET AL. 1999

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: Reaktionsfähigkeit für Unternehmen: Eine Antwort auf turbulente Märkte. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 94 (1999) 1-2, S. 21–24.

REINHART ET AL. 2008

Reinhart, G.; Krebs, P.; Haas, M.; Zäh, M. F.: Monetäre Bewertung von Produktionssystemen: Ein Ansatz zur Integration von qualitativen Einflussfaktoren in die monetäre Bewertung unter Unsicherheit. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 103 (2008) 12, S. 845–850.

REINHART ET AL. 2011a

Reinhart, G.; Schindler, S.; Bruckbauer, P.: Reife von Technologieketten: Konzeptionelle Bestimmung des Entwicklungsstands der Reihenschaltung von Technologieketten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 106 (2011a) 9, S. 639–643.

REINHART ET AL. 2011b

Reinhart, G.; Schindler, S.; Krebs, P.: Bewertung von Produktionstechnologien aus strategischer Sicht. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 300. Heinz-Nixdorf-Institut 2011b, S. 103–119.

REINHART ET AL. 2011c

Reinhart, G.; Schindler, S.; Krebs, P.: Strategic Evaluation of Manufacturing Technologies. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Berlin, Heidelberg: Springer 2011c, S. 179–184.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Greitemann, J.; Schindler, S.: Strategische Frühaufklärung und Auswahl von Technologieketten für die Produktion. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 306. Heinz-Nixdorf-Institut 2012, S. 355–372.

REMINGER 1990

Reminger, B.: Expertensysteme für die strategische Technologieplanung, Technological Economics, Band 35. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1990.

RENZ 2004

Renz, K.-C.: Technologiestrategien in wachsenden und schnell wachsenden Unternehmen. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 406. Heimsheim: Jost-Jetter 2004.

RIMPAU 2010

Rimpau, C.: Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte. Dissertation, Technische Universität München, iwv Forschungsberichte, Band 239. München: Herbert Utz 2010.

RODERBURG ET AL. 2011

Roderburg, A.; Klocke, F.; Koshy, P.: Principles of Technology Evolutions for Manufacturing Process Design: TRIZ Future Conference 2009. Procedia Engineering 1 (2011) 9, S. 294–310.

ROMMELFANGER 2006

Rommelfanger, H.: Fuzzy-Nutzwertanalyse und Fuzzy-AHP. In: Neumann, K.; Morlock, M. (Hrsg.): Perspectives on operations research. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006, S. 403–423.

ROSENKRANZ & MISSLER-BEHR 2005

Rosenkranz, F.; Mißler-Behr, M.: Unternehmensrisiken erkennen und managen: Einführung in die quantitative Planung. Berlin: Springer 2005.

RUGE & WOHLFAHRT 2007

Ruge, J.; Wohlfahrt, H.: Technologie der Werkstoffe: Herstellung, Verarbeitung, Einsatz. Wiesbaden: Vieweg 2007.

SAATY 1990

Saaty, T. L.: The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. 2. Auflage. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: RWS Publishing 1990.

SACHS 2003

Sachs, L.: Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden - mit 317 Tabellen und 99 Übersichten. 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2003.

SALOMONS ET AL. 1993

Salomons, O. W.; van Houten, F. A. M.; Kals, H. J. J.: Review of Research in Feature Based Design. Journal of Manufacturing Systems 12 (1993) 2, S. 113–132.

SCHÄFER 2003

Schäfer, L.: Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten: Konzept zur datenbasierten Ermittlung qualitätswirksamer Einfluss-Ursache-Wirkungszusammenhänge und zur Ableitung von Maßnahmen zur Prozesssicherheit. Dissertation, Universität Kaiserslautern, FBK Produktionstechnische Berichte, Band 45. 2003.

SHELL 1996

Schell, H.: Entwicklung von Verfahren zur Bewertung alternativer Handhabungs- und Fertigungsfolgen in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1996.

SHELLMANN 2012

Schellmann, H.: Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz. Dissertation, Technische Universität München, iwv Forschungsberichte, Band 260. München: Herbert Utz 2012.

SCHLOSKE & THIEME 2009

Schloske, A.; Thieme, P.: Qualität als entscheidender Wettbewerbsfaktor. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H. J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin: Springer 2009, S. 150–153.

SCHMITZ 1996

Schmitz, W. J.: Methodik zur strategischen Planung von Fertigungstechnologien: Ein Beitrag zur Identifizierung und Nutzung von Innovationspotentialen. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 96. Aachen: Shaker 1996.

SCHÖNING 2006

Schöning, S.: Potenzialbasierte Bewertung neuer Technologien. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 7. Aachen: Shaker 2006.

SCHRAFT ET AL. 1996

Schraft, R. D.; Eversheim, W.; Tönshoff, H. K.; Milberg, J.; Reinhart, G.: Planung von Produktionssystemen. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 10.36–10.72.

SCHUH 2005

Schuh, G.: Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser 2005.

SCHUH & KNOCHE 2005

Schuh, G.; Knoche, K.: Systematisch zur besseren Technologiekette: Auswahl

und Kombination von Fertigungstechnologien für definierte Produktionsaufgaben. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 4, S. 259–263.

SCHUH ET AL. 2011a

Schuh, G.; Aghassi, S.; Orilski, S.; Schubert, J.; Bambach, M.; Freudenberg, R.; Hinke, C.; Schiffer, M.: Technology roadmapping for the production in high-wage countries. *Production Engineering - Research and Development* 4 (2011a) 5, S. 463–473.

SCHUH ET AL. 2011b

Schuh, G.; Kampker, A.; Stich, V.; Kuhlmann, K.: Prozessmanagement. In: Schuh, G.; Kampker, A. (Hrsg.): *Strategie und Management produzierender Unternehmen*. Berlin, Dordrecht: Springer 2011b, S. 327–382.

SCHUH ET AL. 2011c

Schuh, G.; Klappert, S.; Moll, T.: Ordnungsrahmen Technologiemanagement. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin: Springer 2011c, S. 11–32.

SCHUH ET AL. 2011d

Schuh, G.; Klappert, S.; Orilski, S.: Technologieplanung. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin: Springer 2011d, S. 171–222.

SCHUH ET AL. 2011e

Schuh, G.; Klappert, S.; Schubert, J.; Nollau, S.: Grundlagen zum Technologiemanagement. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin: Springer 2011e, S. 33–54.

SCHULTE-GEHRMANN ET AL. 2011

Schulte-Gehrmann, A.-L.; Klappert, S.; Schuh, G.: Technologiestrategie. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): *Technologiemanagement*. Berlin: Springer 2011, S. 55–88.

SCHULZE & FRITZ 2010

Schulze, G.; Fritz, A. H.: *Fertigungstechnik*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

SEIDEL 2005

Seidel, M.: *Methodische Produktplanung: Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe, Band 1/2005. Karlsruhe: Universitätsverlag 2005.

SELIGER 2012

Seliger, G.: Sustainable Manufacturing for Global Value Creation. In: Seliger, G.

(Hrsg.): Sustainable Manufacturing. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer 2012, S. 3–8.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A.-K.; Sethi, S.-P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. The international Journal of Flexible Manufacturing Systems 1 (1990) 2, S. 289–328.

SOMMERLATTE & DESCHAMPS 1985

Sommerlatte, T.; Deschamps, J.-P.: Der strategische Einsatz von Technologien. In: Little, A. D. (Hrsg.): Management im Zeitalter der strategischen Führung. Wiesbaden: Gabler 1985, S. 39–80.

SPATH 2004

Spath, D.: Vorwort. In: Spath, D. (Hrsg.): Forschungs- und Technologiemanagement. München, Wien: Carl Hanser 2004, S. V–IX.

SPATH ET AL. 2010

Spath, D.; Schimpf, S.; Lang-Koetz, C.: Technologiemonitoring - Technologien identifizieren, beobachten und bewerten: Studie. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag 2010.

SPECHT & BERNTSEN 2009

Specht, D.; Berntsen, G.: Technologie-Controlling: Stand der Forschung und Entwicklungsperspektiven. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 104 (2009) 11, S. 998–1002.

SPECHT & BECKMANN 1996

Specht, G.; Beckmann, C.: F&E-Management. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996.

SPUR 1998

Spur, G.: Technologie und Management: Zum Selbstverständnis der Technikwissenschaften. München, Wien: Carl Hanser 1998.

SPUR 2008

Spur, G.: Produktion. In: Czichos, H.; Hennecke, M. (Hrsg.): Hütte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2008, S. L1–L56.

SPUR & EVERSHEIM 1996

Spur, G.; Eversheim, W.: Einführung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte. Berlin: Springer 1996, S. 11.1–11.14.

STELAND 2010

Steland, A.: Basiswissen Statistik: Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

STRY & SCHWENKERT 2010

Stry, Y.; Schwenkert, R.: *Mathematik kompakt: für Ingenieure und Informatiker*. 3. Auflage. Heidelberg, London, Dodrecht, New York: Springer 2010.

SUH 2005

Suh, N. P.: *Complexity: Theory and Applications*. New York: Oxford University Press 2005.

TIEFEL 2007

Tiefel, T.: *Technologielebenszyklus-Modelle - Eine kritische Analyse*. In: Tiefel, T. (Hrsg.): *Gewerbliche Schutzrechte im Innovationsprozess*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007, S. 25–49.

TONI & TONCHIA 1998

Toni, A. d.; Tonchia, S.: *Manufacturing flexibility*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (1998) 6, S. 1587–1617.

TÖNISSEN ET AL. 2012

Tönissen, S.; Klocke, F.; Feldhaus, B.; Buchholz, S.: *Modeling the characteristics of multi-technology platforms*. *Production Engineering - Research and Development* 6 (2012) 1, S. 97–105.

TÖNSHOFF ET AL. 2002

Tönshoff, H. K.; Denkena, B.; Zwick, M.; Brandes, A.; Hessel, D.: *Process Chain Configuration by Design of Technological Interfaces*. In: CIRP (Hrsg.): *Manufacturing technology in the Information Age*, Seoul, Korea 2002, S. 551–554.

TROMMER 2001

Trommer, G.: *Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen*. Dissertation, RWTH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 15. Aachen: Shaker 2001.

ULRICH & EPPINGER 2000

Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D.: *Product Design and Development*. 2. Auflage. New York: McGraw-Hill 2000.

URBAN 1998

Urban, M.: *Fuzzy-Konzepte für Just in Time-Produktion und -Beschaffung*. Frankfurt am Main, New York: Lang 1998.

VALERDI & KOHL 2004

Valerdi, R.; Kohl, R. J.: *An Approach to Technology Risk Management*, 2004, <http://web.mit.edu/rvalerdi/www/TRL%20paper%20ESD%20Valerdi%20Kohl.pdf> vom 23.03.2012.

VAN VLIET 2001

van Vliet, J. W.: Design for Manufacturing: Development and application of a process-based design support methodology. Dissertation, Technische Universität Delft. Delft, Niederlande 2001.

VDA 2009

VDA: Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette: Produktentstehung - Reifegradabsicherung für Neuteile. Methoden, Messgrößen, Dokumentationen. 2. Auflage. Oberursel: VDA, Qualitätsmanagement-Center 2009.

VDI-2225 1998

VDI 2225: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Berlin: Beuth 1998.

VDI-2803 1996

VDI 2803: Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode, Berlin: Beuth 1996.

VDI-2851 1987

VDI 2851: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen, Berlin: Beuth 1987.

VELLA ET AL. 2010

Vella, P. C.; Brousseau, E. B.; Minev, R.; Dimov, S.: A Methodology for Technology Maturity Assessment of Micro and Nano Manufacturing Processes and Process Chains. In: ICOMM/4M - Multi-Material Micro Manufacture, Madison, USA 2010.

VOEGELE & SOMMER 2012

Voegele, A.; Sommer, L.: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure: Kostenmanagement im Engineering. München: Carl Hanser 2012.

VOIGT 2008

Voigt, K.-I.: Industrielles Management: Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

WAGNER & THIELER 2007

Wagner, M. H.; Thieler, W.: Wegweiser für den Erfinder: Von der Aufgabe über die Idee zum Patent. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2007.

WALLENOWITZ ET AL. 2009

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009.

WANNENWETSCH 2010

Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.

WARTBURG 2000

Wartburg, I. v.: Wissensbasiertes Management technologischer Innovationen. Dissertation, Universität Zürich. 2000.

WASTIAN & SCHNEIDER 2005

Wastian, M.; Schneider, M.: Zeitliche Aspekte des Projektmanagements: Die Bedeutung von Phasen, Laufzeiten, Impulsen, Ups und Downs. Wirtschaftspsychologie. Wirtschaftspsychologie 7 (2005) 3, S. 28–35.

WASTIAN ET AL. 2009

Wastian, M.; Gunkel, J.; Schneider, M.; Klendauer, R.; Pohl, J.; Schindler, S.; Reinhart, G.: Die Dynamik komplexer Innovationsnetzwerke am Beispiel der Fabrikplanung: 6. Tagung der Fachgruppe Arbeits- und Organisationspsychologie der Deutschen Gesellschaft für Psychologie. Wien 2009.

WEBER & KABST 2009

Weber, W.; Kabst, R.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. 7. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2009.

WECKENMANN ET AL. 2010

Weckenmann, A.; Brenner, P.-F.; Akkasoglu, G.: Reifegradmethode für die Entwicklung neuer Umformverfahren. Ingenieurspiegel 1 (2010) 3, S. 56–58.

WELLENSIEK ET AL. 2011

Wellensiek, M.; Schuh, G.; Hacker, P. A.; Saxler, J.: Technologiefrüherkennung. In: Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement. Berlin: Springer 2011, S. 89–169.

WERMKE ET AL. 2009

Wermke, M.; Klosa, M.; Kunzel-Razum, K.; Scholze-Stubenrecht, W.: Duden: Die deutsche Rechtschreibung, Band 1. 25. Auflage. Mannheim: Dudenverlag 2009.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2006.

WESTKÄMPER & BALVE 2009

Westkämper, E.; Balve, P.: Technologiemanagement in produzierenden Unternehmen. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H. J.; Westkämper,

E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin: Springer 2009, S. 126–140.

WIBE 2004

Wibe, S.: Engineering and Economic Laws of Production. International Journal of Production Economics 92 (2004) 3, S. 203–206.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Auflage. München: Carl Hanser 2010.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zaeh, M. F.; Wiendahl, H. H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. International Institution for Production Engineering Research (2007), S. 1–25.

WIENDAHL ET AL. 2009

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Carl Hanser 2009.

WILLMS 2008

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

WÖHE & DÖRING 2010

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 24. Auflage. München: Vahlen 2010.

WOLF ET AL. 2010

Wolf, N.; Siener, M.; Clement, M. H.; Jenne, F.; Fuchs, C.: Konfiguration investiver Produkt-Service Systeme. In: Aurich, J. C.; Clement, M. H. (Hrsg.): Produkt-Service Systeme. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer 2010, S. 67–94.

WOLFRUM 2000

Wolfrum, B.: Strategisches Technologiemanagement. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2000.

WÖRDENWEBER & WICKORD 2008

Wördenweber, B.; Wickord, W.: Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen: Lean Innovation. 3. Auflage. Berlin: Springer 2008.

ZADEH 1965

Zadeh, L.: Fuzzy Sets. *Information and Control* 1 (1965) 8, S. 338–353.

ZAEH ET AL. 2009

Zaeh, M. F.; Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Karl, F.; Rimpau, C.: Modelling, Anticipating and Managing Cyclic Behaviour in Industry. In: Zaeh, M. F.; ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009)*. München: Herbert Utz 2009, S. 16–43.

ZÄH & WIEDENMANN 2011

Zäh, M. F.; Wiedenmann, R.: Laserunterstütztes Fräsen: Prozessuntersuchung zum laserunterstützten Fräsen von Titanlegierungen. *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) 7-8, S. 482–486.

ZÄH ET AL. 2010

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Karl, F.; Schindler, S.; Pohl, J.; Rimpau, C.: Cyclic influences within the production resource planning process. *Production Engineering - Research and Development* 4 (2010) 4, S. 309–317.

ZAHN 2004

Zahn, E.: Strategisches Technologiemanagement. In: Spath, D. (Hrsg.): *Forschungs- und Technologiemanagement*. München, Wien: Carl Hanser 2004, S. 125–131.

ZANGEMEISTER 2000

Zangemeister, C.: *Erweiterte Wirtschaftlichkeits-Analyse (EWA): Grundlagen, Leitfaden und PC-gestützte Arbeitshilfen für ein 3-Stufen-Verfahren zur Arbeitssystembewertung*, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Band Fb 879. 1. Auflage. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft 2000.

ZIMMERMANN & ANGSTENBERGER 1993

Zimmermann, H.-J.; Angstenberger, J.: *Fuzzy-Technologien: Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.