

Die Produktion in Hochlohnländern sieht sich mit zwei wesentlichen Herausforderungen konfrontiert: Erstens führt der globale Wettbewerb zu stetigem *Effizienzdruck* auf die bestehenden Technologieketten, zweitens können radikale produkttechnologische Umbrüche die *Effektivität* des etablierten Leistungsangebots gefährden. *Fertigungstechnologische Innovation* kann einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung dieser beiden Herausforderungen leisten. Durch *Effizienzinnovationen* können Fertigungskosten in bestehenden Technologieketten reduziert werden. *Effektivitätsinnovationen* erlauben die Erschließung neuer, differenzierender Produkte.

Mit der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur *Planung fertigungstechnologischer Effizienz- und Effektivitätsinnovation* entwickelt. Die Methode besteht aus vier logisch verknüpften Modulen. Im Zentrum des Modul I *Transparenz und Impulse* steht die Entwicklung des *Technologiepotenzialkalenders*, der aus fertigungstechnologischen Potenzialen, produkttechnologischen Möglichkeiten und langfristigem Kundenbedarf die gezielte Ableitung von Innovationsaufgaben ermöglicht. Mit dem Modul II *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* werden die Fertigungskosten in bestehenden Technologieketten des Produktionsnetzwerks reduziert. Die entwickelte Heuristik prüft dazu die ausgewählte Technologiekette systematisch auf Möglichkeiten zur *Elimination*, *Substitution* und *Optimierung* einzelner Prozessschritte. Das Modul III *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* dient der langfristig effektiven fertigungstechnologischen Entwicklung des Produktionsnetzwerks im Kontext radikalen produkttechnologischen Wandels. Der entwickelte Methodenmix, zur Integration von Produkt- und Technologieplanung noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering*, unterstützt die Erschließung fertigungstechnologieinduzierter, wettbewerbsdifferenzierender Produkte. Im Methodenmodul IV *Bewertung der entwickelten Konzepte* wird ein multikriterielles Bewertungssystem für fertigungstechnologische Innovation entwickelt. Dieses bewertet die Konzepte mit der Scorecard Innovation in den Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Realisierungsdauer*, *Qualität* und *Komplexität*. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Entwicklung von Methoden zur quantitativen Messung fertigungstechnologischer Komplexität.

ISBN 978-3-86359-207-3



9 783863 592073

Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk

Tilman Friedrich



Tilman Friedrich

Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk



Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Tilman Friedrich

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2013

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Tilman Friedrich

Planung fertigungstechnologischer Innovation
im Produktionsnetzwerk

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 17/2014



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Tilman Friedrich:

Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2014

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-207-3

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2013)

Vorwort

Preamble

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Die Forschungstätigkeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit der BMW Group.

Hrn. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie (IPT), danke ich für die konstruktiven Gespräche und die wohlwollende Förderung meiner Arbeit. Hr. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Korreferates. Für den Prüfungsvorsitz danke ich Fr. Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin.

Weiterer Dank gilt den Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere den Kollegen aus der Gruppe Technologieplanung: Andreas Roderburg, Steffen Buchholz, Stefan Tönissen und Bastian Nau. Ich danke Euch für die gemeinsame Zeit, die stets guten Diskussionen und dafür, dass Ihr mich mit meinem „industriellen Pragmatismus“ dann und wann zurück auf die Gleise der angewandten Forschung geschubst habt! Außerdem bedanken möchte ich mich bei meinen Oberingenieuren Dr.-Ing. Björn Feldhaus und Patrick Mattfeld für die zahlreichen Anregungen und die unkomplizierte Zusammenarbeit.

Auf Seiten der BMW Group gilt mein ganz besonderer Dank Dr.-Ing. Markus Fallböhrmer für die fachliche Betreuung dieser Arbeit, seine Beratung in allen beruflichen Lebenslagen und seine aufrichtige, besonnene Art, die für mich stets von Vorbild war. Mein besonderer Dank gilt außerdem Dr.-Ing. Axel Werner für die bedingungslose Unterstützung dieses Projektes und für seine stets ansteckende Freude in der wissenschaftlichen Analyse praktischer Problemstellungen. Dr.-Ing. Peter Weber danke ich für die Mentorenschaft und seine inspirierenden Fragen. Meinen zahlreichen Kollegen, Projektpartnern, Diplomanden und Praktikanten in der Produktion Fahrwerk und Antriebsstrang der BMW Group danke ich für die Unterstützung bei der Entwicklung und Umsetzung dieses Projektes in die industrielle Praxis.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Familie und meiner Freundin, die mich in egal welcher Lebens- und Dissertationslage ausgehalten, gestärkt und unterstützt haben. Herzlich danke ich auch vielen Freunden, die mich in den vergangenen Jahren zuverlässig aus der Wissenschafts- und Automobilwelt gerissen haben, um mit mir „Pferde zu stehlen“.

Inhalt

I	Formelzeichen und Abkürzungen	V
II	Introduction and Motivation.....	IX
1	Einleitung und Motivation	1
2	Grundlagen zur Planung fertigungstechnologischer Innovation	3
2.1	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs und Definition grundlegender Begriffe.....	3
2.1.1	Produktion und Produktionsnetzwerk (Subjektbezogene Abgrenzung)	3
2.1.2	Fertigungstechnologische Innovation (Objektbezogene Abgrenzung)	3
2.1.3	Planungs- und Innovationsprozess (Prozessbezogene Abgrenzung)	4
2.2	Theoretische Grundlagen und Formulierung von Planungsgrundsätzen	6
2.2.1	Innovation als Zusammenführung von Market Pull und Technology Push	6
2.2.2	Prüfung fertigungstechnologischer Alternativen im Kontext lebenszyklustheoretischer Ansätze	7
2.2.3	Erfordernis der Fähigkeit zu radikaler und inkrementeller Innovation	8
2.2.4	Steigerung der Innovationskraft durch Kollaboration	9
2.3	Analyse relevanter Modelle und Methoden aus Forschung und Praxis	10
2.3.1	Grobeinordnung existierender Modelle und Methoden im Untersuchungsbereich	10
2.3.2	Analyse etablierter Methoden der derzeitigen Unternehmenspraxis	12
2.3.3	Analyse relevanter Forschungsarbeiten zur Technologieplanung	13
2.3.4	Analyse von Technologieinformationssystemen und Technologiebeschreibungsmodellen	16
2.3.5	Analyse der Methoden des Technologie-Roadmapping	18
2.4	Zwischenfazit und Handlungsbedarf	20
3	Zielsetzung, Vorgehensweise und Grobkonzept	23
3.1	Zielsetzung und Forschungshypothesen	23
3.2	Forschungskonzept und Vorgehensweise	24
3.3	Grobkonzept der Methode	25

4	Methode zur Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk	29
4.1	Transparenz und Impulse für die Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk (Modul I)	29
4.1.1	Entwicklung des Technologiepotenzialkalenders	30
4.1.2	Erstellung des Technologiepotenzialkalenders mit dem Technologiepotenzialkalenderprozess	33
4.1.3	Fertigungstechnologieorientierte Technologiefrüherkennung als Impulsgeber im Innovationsprozess	39
4.1.4	Zwischenfazit.....	41
4.2	Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette (Modul II).....	44
4.2.1	Identifikation von Handlungsschwerpunkten in der Technologiekette	44
4.2.2	Modelle und Methoden zur bedarfsorientierten Erweiterung des Technologiewissens im Innovationsprozess	48
4.2.2.1	Möglichkeiten, Eingangsgrößen und Grenzen von Technologiedatenbanken und -informationssystemen	48
4.2.2.2	Entwicklung des Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells: Schnittstelle zu Technologieexperten und Technologieinformationssystemen	50
4.2.2.3	Methoden zur aufwandsoptimalen Einbindung von Simulationswerkzeugen	58
4.2.3	Heuristik zur Generierung von Konzepten zur Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette.....	66
4.2.4	Zwischenfazit.....	79
4.3	Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot (Modul III)..	81
4.3.1	Integrationsansatz für die Produkt- und Technologieplanung vor Beginn des Simultaneous Engineering	82
4.3.2	Vorgelagerte Aktivitäten der integrierten Produktfindung	82
4.3.2.1	Ermittlung von Produkt- und Technologiepotenzialen.....	82
4.3.2.2	Abgleich von Produkt- und Technologiepotenzialen mit der Potenzialmatrix	83

4.3.2.3 Kommunikation der technologischen Potenziale mit One-off-Prototyping.....	86
4.3.3 Befähigung von Effektivitätsinnovationen mit der Integrierten Produktfindung	87
4.3.4 Zwischenfazit.....	88
4.4 Bewertung der entwickelten Konzepte (Modul IV)	90
4.4.1 Anforderungen an das Bewertungssystem	90
4.4.2 Vorgehensmodell für die Bewertung der entwickelten Konzepte.....	92
4.4.3 Vorauswahl der Konzeptideen (Bewertungsstufe 1).....	93
4.4.4 Grob- und Feinbewertung der Konzepte (Bewertungsstufe 2+3).....	95
4.4.4.1 Kriteriensystem für die Grob- und Feinbewertung.....	95
4.4.4.2 Bewertungsmodell für die Grob- und Feinbewertung.....	96
4.4.4.3 Grob- und Feinbewertung fertigungstechnologischer Komplexität ...	98
4.4.5 Visualisierung der Bewertungsergebnisse in der Scorecard Innovation	106
4.4.6 Zwischenfazit.....	107
4.5 Anhaltspunkte für die erfolgreiche Integration und Anwendung der Methode in der Planungspraxis.....	109
5 Anwendung der Methode in der Automobilindustrie	113
5.1 Ausgangssituation	113
5.2 Transparenz und Impulse für die Planung fertigungstechnologischer Innovation mit dem Technologiepotenzialkalender	114
5.3 Erschließung von Effizienzinnovationen im Kontext der Initiative Ressourceneffiziente Produktion	116
5.3.1 Anwendungsbeispiel Härtetechnologie	116
5.3.2 Anwendungsbeispiel Reinigungstechnologie.....	119
5.3.3 Zwischenfazit.....	123
5.4 Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Kontext des elektrifizierten Antriebsstrangs	124

IV	Inhalt
5.5	Bewertung der Konzepte..... 126
5.5.1	Bewertungssituation..... 126
5.5.2	Bewertungswerkzeug..... 127
5.5.3	Bewertung der Konzepte und Auswertung der Bewertungsergebnisse in der Scorecard Innovation..... 127
5.6	Zwischenfazit..... 130
6	Zusammenfassung..... 133
III	Summary.....VII
IV	LiteraturverzeichnisXI
V	Anhang.....XXV

I Formelzeichen und Abkürzungen

Characteristics, Abbreviations

€/E		Euro pro Einheit
AHP		Analytic Hierarchy Process
a_p	mm	Schnitttiefe
b	mm	Breite
β	Grad	Flankenwinkel
CAD		Computer Aided Design
CE		Concurrent Engineering
CI_{product}		Product Complexity Index
CO_2		Kohlenstoffdioxid
CoC		Center of Competence
d_2	mm	Flankendurchmesser
D_a	mm	Außendurchmesser
d_h	mm	Durchmesser des Durchgangslochs
DIN		Deutsches Institut für Normung
DLZ		Durchlaufzeit
DMAIC		Define - Measure - Analyse - Improve - Control
D_R_{process}		Diversity Ratio Process
d_w	mm	Außendurchmesser Kopfauflage
Eh/a		Einheiten per annum
EOP		End of Production
ERP		Enterprise Resource Planning
f	mm	Vorschub
F&E		Forschung und Entwicklung
FEM		Finite-Elemente-Methode
FLD		Forming Limit Diagram (Grenzformänderungsdiagramm)
FMEA		Failure Mode and Effects Analysis
F_{VM}	N	Montagevorspannkraft

H_{process}		Information Entrophy measure
HV		Härte nach Vickers
I&K-Technik		Informations- und Kommunikationstechnik
ISO		International Organisation for Standardisation
IT		Informationstechnik
k		Steigungswert der logarithmischen v_c -T-Funktion
K_F	€	Fertigungskosten
KI		Komplexitätsindikator Gesamtsystem
k_i		Komplexitätsindikator Systemelement
K_{ML}	€/h	Zeitbezogene Platzkosten (ohne Werkzeug)
KVP		Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
K_W	€	Werkzeugkosten je Stück
K_{WT}	€	Werkzeugkosten je Standzeit
m	mm	Modul
μ_{ges}		Reibungszahl
M_A	Nm	Anzugsmoment
MCDM		Multi-Criteria-Decision-Making-Methoden
MF		Mehrfrequenz
MKS		Mehrkörpersimulation
MTBF		Mean Time Between Failures
ng		Neuheitsgrad
n_{WT}	Stck.	Anzahl Werkstücke je Standzeit
OEE		Overall Equipment Effectiveness
OEM		Original Equipment Manufacturer
P		Prüfen
PI_{process}		Process Complexity Index
PPM		Parts per Million – Qualitätskennzahl für Ausschuss
PPS		Produktionsplanung und Steuerung
QFD		Quality Function Deployment

Ra	µm	Arithmetischer Mittenrauwert
Rz	µm	Gemittelte Rautiefe
φ	Grad	Steigungswinkel
SE		Simultaneous Engineering
SFB		Sonderforschungsbereich
SOP		Start of Production
t		Metrische Tonne (1000 kg)
T€		Tausend Euro
t _{eB}	min	Belegungszeit auf Maschine
TFB		Transferbereich
TK		Technologiekalender
TOC		Theory of Constraints
T _{ok}	min	kostenoptimale Standzeit
TPK		Technologiepotenzialkalender
TPM		Total Productive Maintenance
TRIZ		Theorie des erfinderischen Problemlösens
TRM		Technologie-Roadmapping
t _w	min	Werkzeugwechselzeit
v _c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v _{ok}	m/min	kostenoptimale Schnittgeschwindigkeit
w		Gewichtung
WBH		Wärmebehandlung
z		Zähnezahl

II Introduction and Motivation

Globalization and radical technological changes are characterizing the current production environment in high-wage countries [KLOC08, p. 16; MCKI08, p.7 et seqq.]. The *pressure to increase the efficiency* of manufacturing processes is constantly rising. Targets regarding costs, time and quality are consistently tightened [AELE09, p.57]. Radical technological change, such as the leap from conventional to electrified power trains in automotive engineering, questions the *effectiveness* or efficacy of the existing productive capacity [GORB08]. As a result new tasks and challenges for manufacturing technology evolve.

In this challenging environment innovation in manufacturing technology is a key for the production in high-wage countries. In global competition it increases the efficiency of existing technology chains and makes the realization of radical product concepts possible. The planning of manufacturing technology innovation in production networks hereby faces the following methodic challenges:

- Deduction of the right innovative activities for the production network in the overall context of the developments in manufacturing technology, in product technology and in customer requirements
- The competitiveness of the production network's existing technology chains to be increased constantly by means of systematic manufacturing innovation
- That mid-term and long-term changes regarding product technology be designed from manufacturing technology

The motivation of the present thesis is to meet these challenges with the development of a *Method for the Planning of Manufacturing Innovation in Production Networks*. In contrast to the existing strategic methods of production management the development of targets and competitive strategies is not in focus, but the development of target-consistent innovation activities for manufacturing. Hence the planning object is manufacturing technology, which has to be designed in the context of the ongoing changes in product technology.

1 Einleitung und Motivation

Introduction and Motivation

Globalisierung und radikale produkttechnologische Umbrüche prägen das aktuelle Umfeld der Produktion in Hochlohnländern (**Abbildung 1**) [KLOC08, S.16; MCKI08, S.7ff]. Der *Effizienzdruck* auf die Produktionsprozesse steigt stetig. Kosten-, Zeit- und Qualitätsziele werden laufend verschärft [AELE09; S.57]. Radikaler produkttechnologischer Wandel, wie beispielsweise der Sprung vom konventionellen zum elektrifizierten Antriebsstrang in der Fahrzeugtechnik, stellt die *Effektivität* bzw. Wirksamkeit bestehender Produktionsleistung infrage [GORB08]. Neue fertigungstechnologische Aufgaben und Herausforderungen entstehen.



Abbildung 1: Aktuelle Herausforderungen der Produktion in Hochlohnländern
Current Challenges for the Production in high-wage Countries

In diesem herausfordernden Umfeld spielt *fertigungstechnologische Innovation* für die Produktion in Hochlohnländern eine Schlüsselrolle. Sie kann die Effizienz etablierter Technologieketten im globalen Wettbewerb erhöhen und die Umsetzung radikaler neuer Produkttechnologien ermöglichen. Dabei ergeben sich in der industriellen Praxis bei der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken folgende methodische Herausforderungen:

- Ableitung der richtigen Innovationsaktivitäten für das Produktionsnetzwerk aus dem Gesamtkontext von fertigungstechnologischen Entwicklungen, produkttechnologischem Wandel und mittel-/langfristigem Kundenbedarf
- Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit etablierter Technologieketten des Produktionsnetzwerks durch gezielte fertigungstechnologische Innovationen

- Gestaltung mittel- bis langfristiger produkttechnologischer Umbrüche aus der Fertigungstechnologie

Motivation der vorliegenden Arbeit ist es, diesen Herausforderungen mit der Entwicklung einer *Methode für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* zu begegnen. In Abgrenzung zu den strategischen Ansätzen des Produktionsmanagements ist dabei nicht die wettbewerbsstrategische Positionierung und Zielplanung der Produktion Gegenstand der Betrachtung, sondern die Entwicklung zielkonsistenter fertigungstechnologischer Innovationsaktivitäten. Planungsobjekt ist folglich die Fertigungstechnologie, die es im Kontext produkttechnologischer Entwicklungen zu gestalten gilt.

2 Grundlagen zur Planung fertigungstechnologischer Innovation

Fundamentals for Planning Technological Innovation

2.1 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs und Definition grundlegender Begriffe

Scope of Work and Definitions

Der Untersuchungsbereich der *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk* wird über das Planungssubjekt *Produktionsnetzwerk*, das Planungsobjekt *fertigungstechnologische Innovation* und den *Technologieplanungs- und Innovationsprozess* abgegrenzt.

2.1.1 Produktion und Produktionsnetzwerk (Subjektbezogene Abgrenzung)

Definitions: Production and Production Network

Betrachtungssubjekt der vorliegenden Arbeit sind intraorganisationale oder strategische Produktionsnetzwerke [SCHD05, S.237f]. Im Kontext der Aufgabenstellung werden diese als partnerschaftliche Kompetenz- bzw. Innovationsnetzwerke verstanden [FRIE06, S.361ff; HAUS07, S.85]. Den Potenzialen der Netzbildung stehen die Herausforderungen *Komplexität, Ausrichtung und Koordination* sowie *Wissens- und Kompetenzvernetzung* gegenüber [SCHU05, S.10; HENS07, S.14; BLEC06, S.7ff].

2.1.2 Fertigungstechnologische Innovation (Objektbezogene Abgrenzung)

Definiton: Manufacturing Innovation

Im Folgenden wird das Technologie- und Innovationsverständnis der vorliegenden Arbeit erläutert.

Fertigungstechnologie und Technologieplanung

Im Zentrum der Produktion und somit auch im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht die *Fertigungstechnologie*. Der Begriff *Fertigungstechnologie* beschreibt dabei sämtliche Technologien, die zur – physikalischen oder chemischen – betriebszweckbedingten Objektveränderung eingesetzt werden (z. B. Drehen, Fräsen, Härten) [DIN03a, S.4]. Fertigungstechnologien werden im Rahmen der *Technologieplanung* zu *Technologieketten* und *Fertigungsfolgen* kombiniert und durch Fertigungsmittel bzw. Maschinen, Werkzeuge, Spannzeuge, Messzeuge, Hilfszeuge und -stoffe detailliert [SPUR91, S.13] (Kap. 2.1.3). Technologieketten sind die sequenzielle Verknüpfung von produktionsmittelunabhängigen Fertigungstechnologien (z. B. Drehen oder Fräsen). Durch sie wird ein Bauteil über schrittweise Veränderung der Form und/oder der Stoffeigenschaften in einen definierten Endzustand gebracht [FALL00, S.14f, TROM01, S.31ff]. Fertigungsfolgen werden aufbauend auf Technologieketten generiert. Sie sind unternehmens- und produktionsmittelbezogen und berücksichti-

gen neben den Fertigungstechnologien auch nicht wertschöpfende Zwischenschritte [TROM01, S.31ff]. Produkt- und Fertigungstechnologie sind integriert zu betrachten und optimal aufeinander abzustimmen [SCHM96, S.11ff; FALL00, S.7].

Fertigungstechnologische Innovation

Innovation wird im Sinne von *Schumpeter* als „Neuerung mit Markterfolg“ definiert [vgl. SCMP61, S. 91-93]. Die Bezugseinheit für die Feststellung der Neuheitseigenschaft ist dabei das innovierende Unternehmen. Der Grad der Neuheit der Innovation wird durch den *Innovationsgrad* angegeben, welcher sich in inkrementelle und radikale Innovation skalieren lässt [SCHL99, S.25ff]. Gegenstand der Planung fertigungstechnologischer Innovation in der Produktion sind Innovationen in der Technologiekette bzw. Fertigungsfolge sowie fertigungstechnologieinduzierte Innovationen im Leistungsangebot. Als *Leistungsangebot* werden die aktuellen und potenziellen zukünftigen Produktionsleistungen des Produktionsnetzwerks bezeichnet. Diese werden in Gestalt von innovativen technischen Produkten und Dienstleistungen dem internen oder externen Kunden angeboten.

Je radikaler die Innovation im Leistungsangebot, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass ihre Erschließung für das Produktionsnetzwerk auch umfassender fertigungstechnologischer Innovation bedarf (Kap. 2.1.1). Fertigungstechnologische Innovation ist folglich nicht ausschließlich auf die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bestehender Technologieketten zu beschränken (*Effizienz der Produktionsfaktoren*), sie ist vielfach Grundlage für die Erschließung neuer Produktionsumfänge und somit für ein langfristig attraktives Leistungsangebot des Produktionsnetzwerks (*Effektivität der Produktionsfaktoren*).

Das Planungsobjekt *fertigungstechnologische Innovation* ist gekennzeichnet durch hohe Unsicherheit [SCHM96, S.13; THOM80, S.23]. Ursache ist die hohe Dynamik der Wechselwirkungen von Fertigungs-, Produkttechnologie und Kundenbedarf. Die daraus resultierende Komplexität erfordert spezielle Modelle und Methoden.

2.1.3 Planungs- und Innovationsprozess (Prozessbezogene Abgrenzung)

Definitions: Planning and Innovation Process

Planungsprozess

Die *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk* lässt sich der Technologieplanung zuordnen. Diese soll im Folgenden im Anwendungskontext der Produktentwicklung und -herstellung prozessual eingeordnet werden.

Der *Produktentwicklungsprozess* gliedert sich in die Phasen Produktplanung, Konstruktion und Arbeitsvorbereitung (**Abbildung 2**, S. 5). Den ersten Schritt im Produktentwicklungsprozess bildet die *Produktplanung*. Voraussetzung bzw. Eingangsgröße für die Produktplanung sind Informationen aus Markt und Umwelt sowie Informatio-

nen aus dem Unternehmen (Unternehmensziele, Stärken und Schwächen, etc.) [VDI80, S.2ff; BRAN02, S.57ff]. In ihrem Zentrum steht die systematische Suche und Auswahl zukunftssträchtiger Produktideen, die *Produktfindung*. In dieser werden bereits Funktionen, Arbeitsprinzip und Merkmale des zu entwickelnden Produktes festgelegt [VDI80, S.8]:

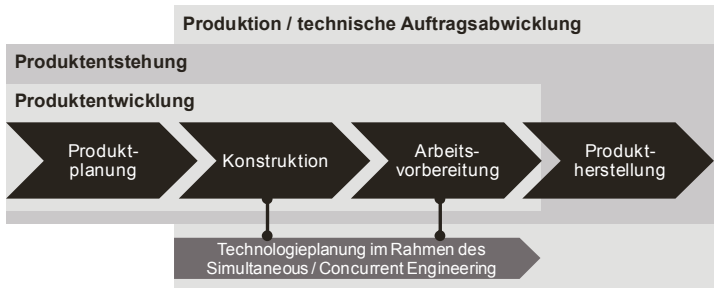


Abbildung 2: Produktentstehungsprozess und Anknüpfungspunkte der Technologieplanung
Product Development Process and Links to Technology Planning

Den zweiten Schritt in der Produktentwicklung bildet die *Konstruktion*. In der Konstruktion wird das Produkt funktional, geometrisch, strukturell und technologisch ausgestaltet. Zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses wurden zahlreiche Konstruktionsmethoden entwickelt, die in den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 zusammengefasst sind [VDI93; VDI97]. Die *Arbeitsvorbereitung* bildet den letzten Schritt in der Produktentwicklung. Sie beinhaltet die Arbeitsplanung und die Arbeitssteuerung [EVER02; S.2ff]. Ihr folgt die *Produktherstellung*, die im Wesentlichen der operativen Fertigung und Montage des Produktes entspricht und die den Prozess der *Produktentstehung* komplettiert.

Die Planungsaktivitäten der Produktion im Produktentwicklungsprozess wurden in den vergangenen 20 Jahren stark von den Ansätzen des *Simultaneous Engineering* (SE) bzw. des *Concurrent Engineering* (CE) geprägt. Diese fassen, mit dem Ziel der Realisierung von Zeit- und Kostenvorteilen im Produktentstehungsprozess, eine Vielzahl von Ansätzen der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung zusammen [AHN97; BOCH96; DERI96; EVER95; GRÄS99; SOHL92; BULL97; BOCH96]. In diesem Zusammenhang haben sich auch die Aufgaben der *Technologieplanung* zunehmend erweitert. Während diese sich in der Vergangenheit noch auf die fertigungstechnische Umsetzung der Konstruktionsvorgaben im Rahmen der Arbeitsplanung beschränkte, nimmt sie im Zuge des *Simultaneous* bzw. *Concurrent Engineering* eine gestalterische Rolle in der Konstruktionsphase ein [FALL00].

Innovationsprozess

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich zahlreiche idealtypische Phasenmodelle des *Innovationsprozesses*. Einen umfassenden Überblick darüber gibt Herstatt [HERS02]. Das der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende Phasenmodell baut auf den von Thom definierten Kernphasen des Innovationsprozesses auf (**Abbildung 3**). Diese sind die Konzeptgenerierung, die Konzeptakzeptierung und die Konzeptrealisierung [THOM80, S. 53].

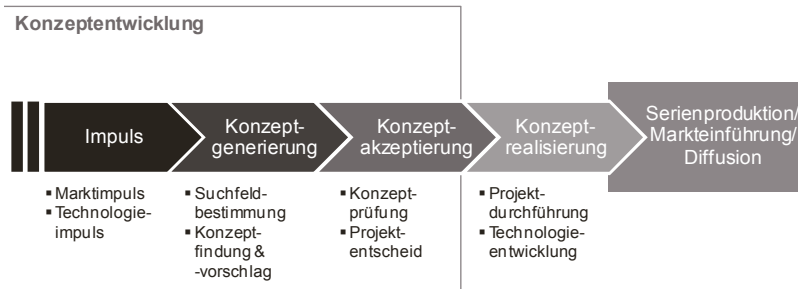


Abbildung 3: Phasenmodell des Innovationsprozesses in Anlehnung an Thom [THOM80, S. 53]
Innovation Process according to Thom [THOM80, S. 53]

Der eigentlichen Konzeptgenerierung vorgelagert ist der Innovationsimpuls. Dieser wird häufig mit den Schlagworten *Market Pull* und *Technology Push* belegt (Kap. 2.2.1), ohne aber weiter detailliert zu werden [BRAN02, S.14]. Der Start des Innovationsprozesses ist für die Produktion weitgehend losgelöst vom Produktentwicklungsprozess zu betrachten. Er kann in allen Phasen der Produktentstehung angestoßen werden (**Abbildung 2**, S. 5). Der Innovationsprozess endet mit der Markteinführung der Innovation bzw. der Einführung dieser in die Serienproduktion.

2.2 Theoretische Grundlagen und Formulierung von Planungsgrundsätzen

Theoretical Fundamentals and Formulation of Planning Principles

Im Folgenden werden für den in Kap. 2.1 abgegrenzten Untersuchungsbereich Planungsgrundsätze formuliert. Diese beruhen auf allgemeinen theoretischen Überlegungen für den beschriebenen Untersuchungsbereich. Sie weisen für die Entwicklung und Anwendung der Methode generelle Gültigkeit auf und dienen als Leitsätze der weiteren Methodenentwicklung [ULRI84, S.193].

2.2.1 Innovation als Zusammenführung von Market Pull und Technology Push

Innovation as Integration of Market Pull and Technology Push

Der erste Planungsgrundsatz der vorliegenden Arbeit besagt, dass erfolgreiches Innovieren aus der bewussten oder unbewussten Integration von Kundenbedürfnissen

(*Market Pull* bzw. *Demand Pull*) und Technologien (*Technology Push*) resultiert [vgl. HAUS07, S.7]. *Market Pull* und *Technology Push* bezeichnen dabei zwei grundlegende technologiestrategische Orientierungsrichtungen und können wie folgt definiert werden [BULL94, S. 100]:

- *Market Pull*: Bedarfsinduzierte technische Lösungen – der (potenzielle) Kunde formuliert einen subjektiven Mangel, welcher auf Beseitigung drängt.
- *Technology Push*: Autonom induzierte (fertigungs-)technische Lösungen – Ursprung ist hier der Anwendungsdrang eines technischen Potenzials.

Als „Vermittler“ in diesem Wechselspiel zwischen Technologieentwicklung und Marktentwicklung kann der *Potenzialorientierte Ansatz* verstanden werden. Gälweiler prägte in diesem Zusammenhang den Begriff des *Erfolgspotenzials* als Grundlage für den Unternehmenserfolg [GÄLW87, S.24ff]. Ein *Erfolgspotenzial* entsteht aus der Integration von externen Faktoren (z. B. interner/externer Kunde) und internen Faktoren (z. B. Fertigungstechnologie) [BIND96, S.43]. Die Perspektiven des *Market Pull* und *Technology Push* werden mit dem *Potenzialorientierten Ansatz* somit integriert.

2.2.2 Prüfung fertigungstechnologischer Alternativen im Kontext lebenszyklustheoretischer Ansätze

Assessing Technological Alternatives in the Context of the Life Cycle Theory

Der zweite Planungsgrundsatz der vorliegenden Arbeit besagt, dass die Lebensdauer von Technologien, respektive technologischen Kompetenzen, begrenzt ist und die Planung fertigungstechnologischer Innovation folglich einer laufenden Prüfung technologischer Alternativen bedarf. Dabei ist auf die integrative Betrachtung von produkt- und fertigungstechnologischen Lebenszyklen zu achten [REIN09].

Dieser Planungsgrundsatz fußt auf den Modellen des *Technologie-* und des *Kompetenzlebenszyklus* [SAAD91, S.65ff; KRÜG97, S.95f] (**Abbildung 4**, S.8). Grundlage des *Technologie-* und *Kompetenzlebenszyklus* ist die Auswertung von Vergangenheitsdaten technologischer Entwicklungen. Diese hat deutlich gemacht, dass die Leistung von Technologien/technologischen Kompetenzen – sowohl über die Zeit als auch über den kumulierten Forschungs- und Entwicklungsaufwand betrachtet – einen S-förmigen Verlauf beschreibt [BROC99, S.85]. Dieser sogenannte *Technologielebenszyklus* kann nach A. D. Little in die vier Phasen Entstehung, Wachstum, Reife und Alter unterteilt werden [SAAD91, S.65ff]. Die diesen Phasen zugeordneten Technologien werden dabei als *Schrittmachertechnologien*, *Schlüsseltechnologien*, *Basistechnologien* oder *Verdrängte Technologien* bezeichnet. Für die Anwendung des Technologielebenszyklusmodells in der Praxis wurden diverse Indikatoren entwickelt wie z. B. die Zahl der Patentmeldungen oder die Unsicherheit über die Leistungsfähigkeit der Technologie [SAAD91, S.66].

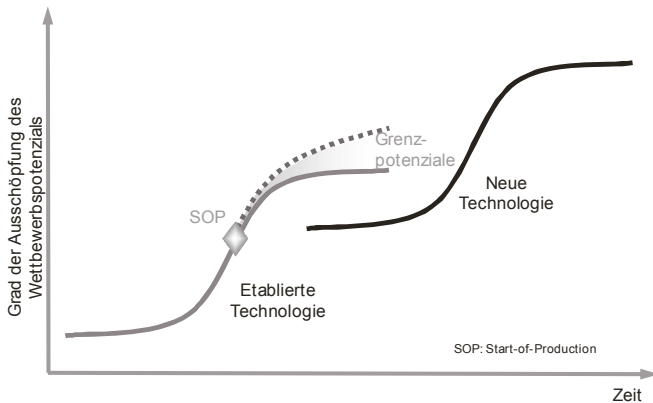


Abbildung 4: Technologielebenszyklen in Anlehnung an *Saad* [SAAD91, S.65ff]
Technology Life Cycles

Trotz teilweiser Abweichungen empirisch ermittelter Lebenszykluskurven vom dargestellten idealtypischen Verlauf lassen sich aus diesem einige wichtige Schlüsse für die weitere Arbeit ziehen [WOL94, S.113f; WALK03, S.20]:

- Produkt- und Fertigungstechnologien haben eine begrenzte Lebensdauer. Eine nachhaltige Planung fertigungstechnologischer Innovation hat folglich auch den Lebenszyklus des Produkt- bzw. Leistungsprogramms zu betrachten.
- Auf Phasen inkrementeller Innovation folgt in unbestimmten Abständen eine radikale Innovation, also der Sprung auf eine höher gelegene S-Kurve.

Die dargestellten Ausführungen implizieren die Notwendigkeit der laufenden Prüfung technologischer Alternativen in Leistungsangebot und Fertigungstechnologie.

2.2.3 Erfordernis der Fähigkeit zu radikaler und inkrementeller Innovation

Necessity for Radical and Incremental Innovation

Ein langfristiges Überleben im dynamischen, durch hohen technischen Wandel geprägten Wettbewerb setzt die Fähigkeit der Produktion zu radikalen und inkrementellen Innovationen voraus. Dieser Planungsgrundsatz beruht auf den Untersuchungen von Miller zum plötzlichen Versagen einst erfolgreicher Unternehmen [MILL92; MILL93]. So tendieren erfolgreiche Unternehmen dazu, sich scheuklappenartig auf die in der Vergangenheit erfolgreichen Strategien und Technologien zu spezialisieren. Statt neue Möglichkeiten zu erkunden, optimieren und verbessern sie das Bestehende inkrementell und gefährden so ihre langfristige Wettbewerbsfähigkeit. Die Exploration neuer Möglichkeiten, das Hinterfragen bestehender, in der Vergangenheit erfolgreicher Lösungen, der Versuch radikaler Innovation, bleibt aus.

Es lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit in einem dynamischen Umfeld sowohl ein „konservatives“, strukturiertes Arbeiten an bestehenden Technologien (*Exploitation*), als auch radikale, zielgerichtete Experimente erfordert (*Exploration*). Die Möglichkeiten bestehender Technologien werden somit ausgeschöpft, die Gefahr einer zu späten Adaption wettbewerbskritischer technologischer Neuerungen verringert.

2.2.4 Steigerung der Innovationskraft durch Kollaboration

Enhancing Innovation by Collaboration

Der vierte Planungsgrundsatz der vorliegenden Arbeit besagt, dass gezielte *Kollaboration* die Innovationskraft im Produktionsnetzwerk steigert. *Kollaboration* soll dabei als ein dynamischer, abteilungs-, ressort-, bis unternehmensübergreifender Prozess der Zusammenarbeit verstanden werden [KRAP91, S.12; VÖLK08, S.46ff]. *Kollaboration* findet innerhalb eines offenen Netzwerkes statt, die Einbindung der Akteure erfolgt rein nach individuellen Kenntnissen und Fähigkeiten. *Kollaboration* hat im Gegensatz zur Kooperation einen rein handlungsorientierten bzw. prozessualen Charakter [SAUE05, S.18f]. Die organisatorische, institutionelle Ausgestaltung der Zusammenarbeit ist nicht Gegenstand der Betrachtung. In den Ingenieurwissenschaften wird *Kollaboration* als die nächste Stufe des *Simultaneous Engineering* bezeichnet [WILT98, S.98; LUCZ99, S.16].

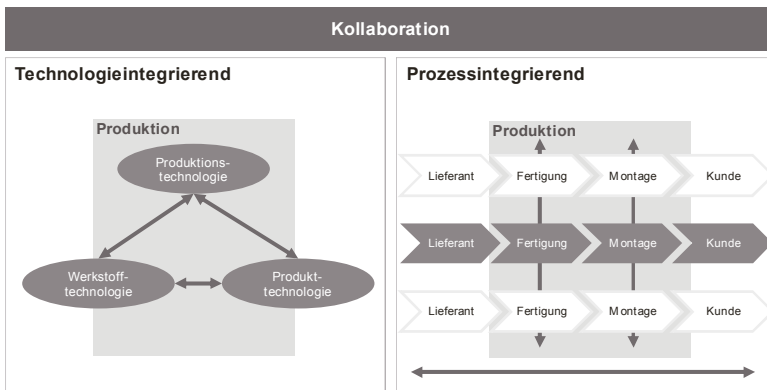


Abbildung 5: Kollaboration – Richtungen für die Produktion
Collaboration – Directions for the Production

Der Mehrwert von Kollaboration für die Technologieplanung liegt primär in der Integration fertigungs-, werkstoff- und produkttechnologischer Perspektiven. Diese ist Befähiger für neue Produkte und Produktionsleistungen. Darüber hinaus fördert *Kollaboration* entlang der Technologiekette und parallel zu dieser deren gesamtoptimale

Ausgestaltung (**Abbildung 5**, S.9). Innovative Ansätze aus anderen Fertigungsbereichen können adaptiert und fertigungstechnologische Innovation erst durch eine integrierte, ggf. auch unternehmensübergreifende, Betrachtung ermöglicht werden.

Die Vorteile kollaborativer Zusammenarbeit müssen zukünftig konsequent genutzt werden. Methodische Voraussetzungen für erfolgreiche *Kollaboration* sind Transparenz über Aktivitäten und Kompetenzen im Netzwerk sowie komplementäre Strategien und Ziele der beteiligten Partner.

2.3 Analyse relevanter Modelle und Methoden aus Forschung und Praxis

Analysis of Relevant Models and Methods in Research and Industry

Im Folgenden sollen relevante Modelle und Methoden aus Forschung und Praxis bezüglich ihrer Bedeutung für die *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk* geprüft werden. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf Methoden, welche die Planungsaufgabe umfassend behandeln. Für einen Überblick über die Teilaspekte Technologiefrüherkennung, Konzeptfindung und Technologiebewertung sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen [HAUS07; SCHK99; EVER03; SPEC02].

2.3.1 Grobeinordnung existierender Modelle und Methoden im Untersuchungsbereich

Classification of the State of the Art

Aufgrund der Vielzahl von Modellen und Methoden im beschriebenen Untersuchungsbereich soll im ersten Schritt eine Grobeinordnung erfolgen. Hierbei sind sowohl Modelle und Methoden aus ingenieur- und wirtschaftswissenschaftlichen Forschungsarbeiten, als auch Methoden der aktuellen Unternehmenspraxis zu berücksichtigen. Diese werden wie folgt eingeordnet (**Abbildung 6**, S.11):

- Etablierte Methoden der derzeitigen Unternehmenspraxis (Kap.2.3.2)
- Forschungsarbeiten zur Technologieplanung (Kap.2.3.3)
- Technologieinformationssysteme und -beschreibungsmodelle (Kap. 2.3.4)
- Methoden des Technologie-Roadmapping (Kap. 2.3.5)

Grundlage für die Beurteilung der existierenden Modelle und Methoden ist deren Kompatibilität mit dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Untersuchungsbereich der *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk*. Darüber hinaus wird die Berücksichtigung der in Kapitel 2.2 beschriebenen Planungsgrundsätze und die Erfüllung wesentlicher Anforderungen der Planungspraxis geprüft.

Etablierte Methoden	Kompatibilität mit Untersuchungsbereich			Anforderungen der Planungsphase	Anforderungen der Planungsphase
	Produktionsnetzwerk	Fertigungstechnologische Innovation	Planungsphase Konzeption/Entwicklung	Methodische Identifikation & Prüfung	Technologische Push (Inhaltlich, Zeitlich)
Technologiefrüherkennung	■	■	■	■	[LICH02]
Szenariotechnik	■	■	■	■	[GAUS96]
Technologieportfolio	■	■	■	■	[PFEI83]
Quality Function Deployment	■	■	■	■	[PFEF01]
Simultaneous Engineering	■	■	■	■	[EVER95]
Technologieplanung					
Broser, W.	■	■	■	■	[BROS02]
Knoche, M.	■	■	■	■	[KNOC06]
Pelzer, W.	■	■	■	■	[PELZ99]
Schmitz, W.	■	■	■	■	[SCHM96]
Borsdorf, R.	■	■	■	■	[BORS07]
Fallböhrner, M.	■	■	■	■	[FALL00]
Trommer, G.	■	■	■	■	[TROM01]
Willms, H.	■	■	■	■	[WILL08]
Tillmann, M.	■	■	■	■	[TILL09]
Informationssysteme & Beschreibungsmodelle					
Klocke, F.	■	■	■	■	[KLOC98]
Tönshoff, H.	■	■	■	■	[TOEN95]
Walker, R.	■	■	■	■	[WALK03]
Wegner, H.	■	■	■	■	[WEGN07]
Knoche, K.	■	■	■	■	[KNHE05]
Technologie-Roadmapping					
Abele, T.	■	■	■	■	[ABEL06]
Burgstrahler, B.	■	■	■	■	[BURG96]
Brandenburg, F.	■	■	■	■	[BRAN02]
Behrens, S.	■	■	■	■	[BEHR03]
Machate, A.	■	■	■	■	[MACH06]
Zernial, P.	■	■	■	■	[ZERN07]
vorliegende Arbeit	■	■	■	■	

Legende:

■ Schwerpunkt
■ Behandelt

■ Teilweise behandelt
■ Nicht behandelt

Abbildung 6: Angrenzende Modelle und Methoden
State of the Art

Wesentliche Anforderungen der Planungspraxis sind die *Durchgängigkeit der Unterstützung vom Innovationsimpuls bis zum bewerteten Konzept*, die *Betrachtung von Effizienz- und Effektivitätsinnovation* sowie die *Bereitstellung von Anhaltspunkten* für eine nachhaltige Integration und Anwendung der Methode in der Planungspraxis. Die Analyse zeigt, dass die bestehenden Modelle und Methoden im Hinblick auf die definierten Kriterien nur Teilaspekte adressieren (**Abbildung 6**, S.11). Es gibt keine Methode, die die *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk* in Hinblick auf die definierten Kriterien zufriedenstellend unterstützt. Die Analyse deckt sich mit den Erkenntnissen von *Friedli*, der feststellt, dass mit den existierenden methodischen Teillösungen die wachsende Dynamik und Komplexität technologischer Fragestellungen nicht mehr vollständig zu beherrschen ist [FRIE06, S. 5ff]. Gesamtzusammenhänge gehen verloren, optimierte Subsysteme statt eines ganzheitlich optimierten Produktionssystems sind die Folge [ACKO81, S.354ff].

Aus wissenschaftstheoretischer Sicht besteht die Notwendigkeit, die dargestellten Modelle und Methoden bezüglich ihrer Relevanz für die beschriebene Problemstellung genauer zu untersuchen [ULRI84]. In den folgenden Teilkapiteln soll deshalb eine genaue Analyse dieser Modelle und Methoden im Anwendungszusammenhang erfolgen.

2.3.2 Analyse etablierter Methoden der derzeitigen Unternehmenspraxis

Established Methods in the Industry

In der Unternehmenspraxis existiert eine geringe Anzahl an weitverbreiteten, etablierten Methoden der Technologieplanung. Dazu gehören für die strategische Technologieplanung die *Szenariotechnik*, das *Technologieportfolio* und die *Technologiefrüherkennung* [GAUS96; PFEI83; GRAW05]. Für die operative Technologieplanung sind dies das *Simultaneous Engineering* sowie Methoden der Qualitätsplanung wie z. B. das *Quality Function Deployment (QFD)* und die *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)* [EVER95; BULL97; PFEF01; KAMI95]. An der Schnittstelle von strategischer und operativer Technologieplanung deutet die wachsende Anzahl an Artikeln und Fallbeispielen zum *Technologie-Roadmapping* auch hier auf einen mittlerweile relativ hohen Verbreitungsgrad hin [ABEL05; ABEL06a; BEHT07; SCHUH08; etc.]. Aufgrund seiner zentralen Bedeutung für die beschriebene Planungsaufgabe soll die Methode des *Technologie-Roadmapping* jedoch in Kap. 2.3.5 einer separaten und umfassenden Analyse unterzogen werden.

Es ist zu erkennen, dass die etablierten Methoden der Technologieplanung dem beschriebenen Anspruch einer durchgängigen und ganzheitlichen Unterstützung in der Planung fertigungstechnologischer Innovation nicht gerecht werden (**Abbildung 6**, S. 11). Mit Ausnahme des *Simultaneous Engineering* adressieren diese nur Teilaspekte der *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken*

[SCHM96, S.32]. Da die *etablierten Methoden der derzeitigen Unternehmenspraxis* darüber hinaus in Standardwerken des Technologie- und Innovationsmanagements bereits umfassend beschrieben und analysiert wurden, soll hier von einer detaillierten Betrachtung abgesehen werden [HAUS07; EVER03; SPEC02].

2.3.3 Analyse relevanter Forschungsarbeiten zur Technologieplanung

Research in Production Technology Planning

Im Folgenden werden, aufbauend auf der *Grobeinordnung existierender Modelle und Methoden im Untersuchungsbereich* aus Kap. 2.3.1, für die vorliegende Problemstellung relevante Forschungsarbeiten zur Technologieplanung in der Produktion untersucht. Zunächst werden hierzu Arbeiten mit strategischem Fokus beleuchtet [BROS02; KNOC06; PELZ99; SCHM96]. Anschließend erfolgt die Analyse von Arbeiten mit Schwerpunkt auf den operativen Bereichen der Technologieplanung [BORS07; FALL00; THOE01; WILL08; TILL09].

Forschungsarbeiten zur strategischen Technologieplanung

Broser entwickelt in seiner Forschungsarbeit eine Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke [BROS02]. Er adressiert somit die zunehmende Bedeutung methodischer Unterstützung für die Planung technologischer Innovationen in (Produktions-)Netzwerken. Kern von *Broser's* Entwicklung ist ein Bewertungssystem, das bereits ausgearbeitete Konzepte voraussetzt. Wie diese Konzepte zielgerichtet, also im Hinblick auf zukünftige Herausforderungen, erarbeitet werden können, erläutert *Broser* nicht.

Die „Komplementaritätsrelevante technologiebasierte Diversifikation“ von *Knoche M.* unterstützt die Technologieplanung bei der Identifikation von Komplementärtechnologien [KNOC06]. Komplementärtechnologien ergänzen Funktionen bestehender Kerntechnologien des Unternehmens. Die Methode von *Knoche M.* geht somit über den klassischen Kernkompetenzansatz hinaus [PRAH90, S.79ff]. Sie liefert wertvolle Erkenntnisse für eine technologiegetriebene Geschäftserweiterung über komplementäre Technologien. Es erfolgt jedoch kein integriertes Vorgehen von Technologie- und Produktplanung. Primäres Anwendungsgebiet der Methode sieht *Knoche M.* in der Bewertung von Mergers & Aquisitions (M&A).

Mit der Methode zur „Identifizierung und Nutzung strategischer Technologiepotenziale“ gibt *Pelzer* methodische Unterstützung in den frühen Phasen des Innovationsprozesses [PELZ99]. In Abgrenzung zur vorliegenden Arbeit ist bei *Pelzer* das primäre Planungsobjekt das Produkt. Die Fertigungstechnologie ist lediglich eine Eingangsgröße bei der Suche nach neuen Produkten, aber nicht das Gestaltungsobjekt.

Im Gegensatz zu *Pelzer* rückt *Schmitz* die Fertigungstechnologie ins Zentrum der Betrachtung [SCHM96]. Zielsetzung seiner Methode ist die Erschließung von Poten-

zional innovativer Fertigungstechnologien. Es erfolgt keine Integration der Produktplanung. Auch werden die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Fertigungstechnologien nur am Rande berücksichtigt. Die Dokumentation der Planungsergebnisse erfolgt im *Technologiekalender* (**Abbildung 7**).

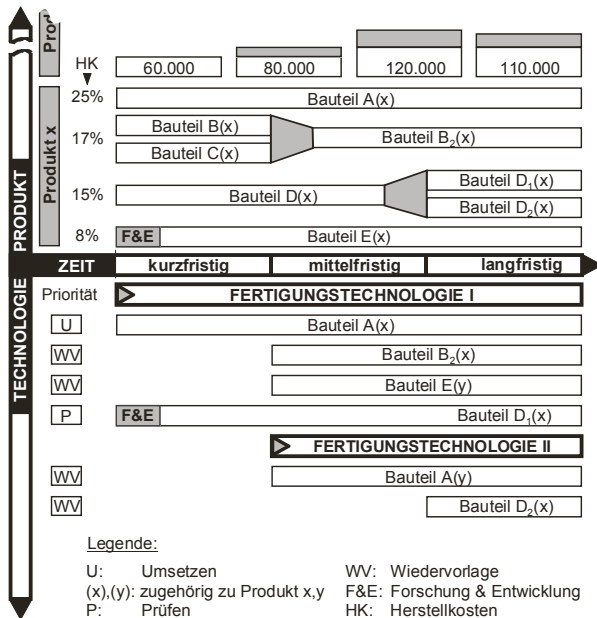


Abbildung 7: Technologiekalender nach Schmitz [SCHM96]

Technologiekalender according to Schmitz [SCHM96]

Der *Technologiekalender* von Schmitz entwickelt die von Westkämper eingeführte und von Wildemann und Emmert aufgegriffene Methode des *Technologiekalenders* für die strategische Technologieplanung weiter [WEST87; WILD87; EMME94]. Er integriert Produktstrukturelemente (Bauteile) und Fertigungstechnologien über der Zeitachse. Auch wenn der Technologiekalender in seiner dargestellten Form nur einen Ausschnitt relevanter Informationen für die *Planung fertigungstechnologischer Innovation* in einem dynamischen Wettbewerbsumfeld abbildet, bietet er dennoch einen guten Anknüpfungspunkt für einen ganzheitlichen Planungsansatz im Produktionsnetzwerk. Primärer Kritikpunkt an dem von Schmitz vorgeschlagenen Technologiekalender ist die unvollständige Visualisierung wichtiger Zusammenhänge und Einflussgrößen im Kontext der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken. Radikale produkttechnologische Umbrüche und ihre möglichen fertigungstechnologischen Konsequenzen werden erst mit dem Vorliegen auskon-

struierter Produktstrukturelemente transparent. Der Technologieplanung bleibt somit nur ein Reagieren auf Konstruktionsergebnisse, ein proaktives Agieren der Technologieplanung bereits in der Produktplanung wird verpasst. Darüber hinaus wird die Rolle des *Technologiekalenders* auf die Dokumentation eines vorangegangenen Planungsprozesses reduziert. Möglichkeiten des *Technologiekalenders* als transparenz- und impulsgebendes Element im Planungsprozess des Produktionsnetzwerks bleiben ungenutzt.

Forschungsarbeiten zur operativen Technologieplanung

Mit der Methode zur *Integration von Technologiewissen in den Produktentwicklungsprozess* integriert Borsdorf Produktentwicklung und Technologieplanung mit Beginn des Konstruktionsprozesses [BORS07]. Er reduziert die Rolle der Produktion jedoch auf die Rolle eines „Informationslieferanten“ für die Konstruktion.

Gegenstand der Arbeit von Fallböhrer ist das Generieren alternativer Technologieketten im Rahmen des *Simultaneous Engineering* [FALL00]. Dazu wird ein Integrationsmodell für die operative Technologieplanung vorgeschlagen, welches der Grob- und Feingestaltung des Produktes eine Technologiegrob- und Technologiefeinplanung gegenüberstellt. Fallböhrer beschränkt sich jedoch auf die Neuplanung von Technologieketten. Die Anpassung von Technologieketten an zukünftige Wettbewerbsbedingungen ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

Die Forschungsarbeiten von Trommer und Willms greifen die Überlegungen von Fallböhrer auf und übertragen diese auf die Planung von Fertigungsfolgen und -verkettungen [TROM01; WILL08]. Nicht wertschöpfende Zwischenschritte (Transport, Lagerung, etc.) sowie Fertigungsparameter (Vorschub, Schnittgeschwindigkeiten, etc.) werden somit Teil der Betrachtung.

Aufbauend auf einer umfassenden Analyse aktueller Optimierungsmethoden der Produktion, insbesondere des Qualitätsmanagements, entwickelt Tillmann eine Methode zur innovativen Prozesskettenoptimierung [TILL09]. Ziel ist die Qualitätsverbesserung der Produktion mithilfe von Innovationsmethoden auf Grundlage des aus der *Six-Sigma-Methode* stammenden *DMAIC-Vorgehensmodells* (Define - Measure - Analyse - Improve - Control) [RAMA09]. In Abgrenzung zur vorliegenden Methode fokussiert Tillmann die generische Optimierung. Die Substitution und Elimination von Prozesselementen sowie der zielgerichtete Ausbau fertigungstechnologischer Kompetenz im Hinblick auf zukünftige Herausforderungen ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

Es lässt sich festhalten, dass sich die Arbeiten mit strategischem Schwerpunkt häufig auf ein Übertragen klassischer Methoden des strategischen Managements auf die Produktion beschränken. Das für die Produktion so wichtige integrierte Agieren mit

der Produktentwicklung geht dabei verloren. Dies wird jedoch vor dem Hintergrund des teilweise radikalen produkttechnologischen Wandels, wie z. B. der Elektrifizierung des Antriebsstrangs in der Automobilindustrie, zur zwingenden Notwendigkeit. Im operativen Bereich der Technologieplanung existieren umfassende Methoden zur Generierung alternativer Technologieketten im Rahmen des *Simultaneous Engineering*. Handlungsbedarf liegt im Speziellen in der methodischen Unterstützung gezielter Innovation in etablierten Technologieketten. Dabei sind Möglichkeiten der Technologiesubstitution oder -elimination zu berücksichtigen.

Auffällig im Zusammenhang der Analyse von Forschungsarbeiten der Technologieplanung ist die hohe Dichte an Technologieinformationssystemen und -beschreibungsmodellen. Diese sollen im Folgenden genauer auf ihren Mehrwert für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in der Produktion geprüft werden (Kap. 2.3.4). Darüber hinaus sind die Arbeiten zum *Technologie-Roadmapping*, zu welchen sich der *Technologiekalender* nach Schmitz im weitesten Sinne zuordnen lässt, genauer zu betrachten (Kap. 2.3.5).

2.3.4 Analyse von Technologieinformationssystemen und Technologiebeschreibungsmodellen

Information Systems and Technology Models for Production Technology Planning

Im Folgenden werden Technologieinformationssysteme und -beschreibungsmodelle bezüglich ihres Mehrwerts für die beschriebene Planungsaufgabe untersucht.

Technologieinformationssysteme

Seit den 70er Jahren entstanden weltweit diverse Technologieinformationssysteme. Einen umfassenden Überblick dazu geben *Wegner* und *Knoche* [WEGN07, S.11ff; KNHE05, S.11ff]. Im Hinblick auf die beschriebene Planungsaufgabe soll im Folgenden der Schwerpunkt auf die Analyse generischer Systeme gelegt werden, welche die Erfassung und Beschreibung von Fertigungsverfahren verschiedener Hauptgruppen der DIN 8580 ermöglichen [KOEN94; KLOC98; SCHM96; FALL00; TROM01; TOEN95; WALK03; WEGN07; DIN03a].

Technologiedatenbanken und Technologie-Expertensysteme, welche unter dem Überbegriff Technologieinformationssysteme zusammengefasst werden können, haben die Aufgabe fertigungstechnologisches Wissen zu erfassen, zu bewahren und verteilt arbeitenden Anwendern zur Verfügung zu stellen. In einer umfassenden Analyse von Technologieinformationssystemen kam *Wegner* zu dem Ergebnis, dass diese der beschriebenen Aufgabe nur in Ausschnitten gerecht werden [WEGN07, S.11ff]. So ermöglichen moderne Systeme über relationale Datenbanken zwar eine umfassende Erfassung fertigungstechnologischen Wissens, weisen demnach aber

u.a. Mängel bzgl. der Wissensnutzung auf.¹ Diese bildet im Wissensmanagement den Überbegriff für die einfache Nutzung und zeitgerechte Bereitstellung von Informationen [PROS10, S.175ff]. Das in Technologieinformationssystemen abgebildete Wissen sowie seine Anwendungsfelder unterliegen darüber hinaus einer dynamischen Entwicklung, der die Systeme nur bedingt folgen können [WEGN07, S.13].

In einem ersten Zwischenfazit lässt sich somit festhalten, dass bestehende Technologieinformationssysteme grundsätzlich geeignet sind, fertigungstechnologisches Wissen umfassend abzubilden. Beispiele für Technologieinformationssysteme, die eine umfassende Beschreibung des fertigungstechnologischen Angebots ermöglichen, sind die Datenbanken DABIT, TIM und eTEMsolutionTM sowie das fertigungstechnologische Wissensmanagementsystem von Wegner [KOEN94; KLOC98; SCHM96; FALL00; TROM01; WALK03; WEGN07]. Der geringe Nutzungsgrad der Systeme in der Planungspraxis ist über die Gestaltung entsprechender Schnittstellen zu verbessern. Darüber hinaus scheint es aufgrund der hohen technologischen Dynamik nicht sinnvoll, Technologieinformationssysteme als alleinige Quelle technologischer Information heranzuziehen. Vielmehr gilt es, diese im Rahmen der Technologierecherche gezielt zu integrieren.

Technologiebeschreibungsmodelle

Der Planungsgrundsatz der Integration von *Market Pull* und *Technology Push* erfordert, neben der Abbildung technologischen Wissens über entsprechende Technologieinformationssysteme (*Technology Push*), die Beschreibung des technologischen Innovationsbedarfs (*Market Pull*) (Kap. 2.2.1). Als „Schnittstelle“ zu Technologieinformationssystemen und Technologieexperten ist seine Beschreibung von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Technologierecherche. Eine zu grobe Beschreibung des Innovationsbedarfs in Form allgemeiner Suchfelder, wie z. B. Kostenreduzierung, Leichtbau etc., resultiert in einer ungewollten Erhöhung des Bewertungsaufwandes und mindert die Planungseffizienz. Orientiert sich die Beschreibung hingegen zu stark an der für die Produktionsaufgabe etablierten Technologie, wird damit eine wirkliche Alternativengenerierung verhindert. Nur die aufgabenspezifische Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs, abgeleitet aus den mittel- bis langfristigen Herausforderungen des Produktionsnetzwerks, kann eine zufriedenstellende technologische Antwort liefern.

¹ Die Problemstellung der mangelnden Akzeptanz von Technologieinformationsmodellen in der Unternehmenspraxis wird durch den Transferbereich 57 aufgegriffen. Der Schwerpunkt liegt hier jedoch in der Gestaltung „systemunabhängiger Referenzprozesse“ und der Entwicklung eines „Entscheidungsunterstützenden Tools bei der Anwendung von Target Costing (ETAT)“ [TFB57].

Bestehende Technologiebeschreibungsmodelle, die zum Großteil im Rahmen der Entwicklung von Expertensystemen oder Technologiedatenbanken entstanden sind, eignen sich dazu nur bedingt [BORS07; KOEN94; KLOC98; KLOC02a; KNHE05; SCHM96; FALL00; WALK03; WEGN07; HARS97; etc.]. Sie fokussieren eine anwendungsneutrale Beschreibung technologischen Angebots oder adressieren Nischen der Technologieplanung wie z. B. die technologische Bewertung von M&A [KNOC06]. Eine Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs, abgeleitet aus dem mittel- bis langfristigen Kunden- und Innovationsbedarf des Produktionsnetzwerks, ermöglichen sie nicht. Es besteht somit Handlungsbedarf in der Entwicklung eines bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells, welches den Anwender im Vorfeld der Technologierecherche bei der Formulierung seines aufgabenspezifischen Technologiebedarfs aus dem Gesamtkontext unterstützt.

2.3.5 Analyse der Methoden des Technologie-Roadmapping

Technology Roadmapping

Eine *Technologie-Roadmap* kann für das Technologiemanagement als eine „Landkarte in die Zukunft“ verstanden werden [VOIG05, S.13]. Sie vermag einen Überblick über die Technologien des Handlungsgebietes, über ihre Vernetzung sowie ihre „Distanz“ bis zur Marktreife zu geben [MÖHR05, S.2f]. Sie hilft dem Unternehmen sicherzustellen, dass zur Erreichung der gewünschten Ziele die richtigen Ressourcen zum richtigen Zeitpunkt eingesetzt werden [SPET05, S.143] (**Abbildung 8**).

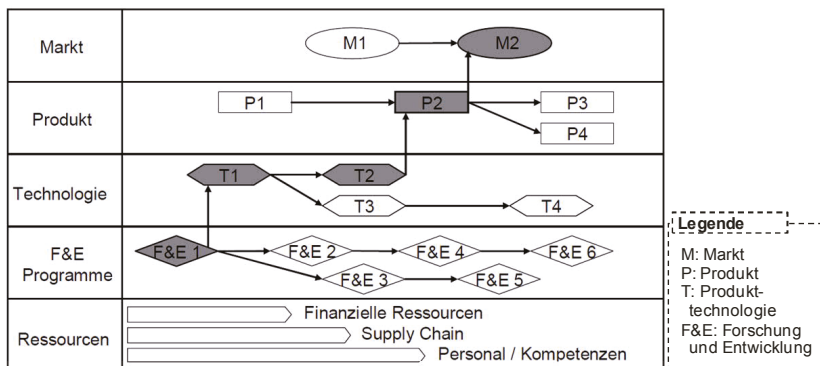


Abbildung 8: EIRMA Technologie-Roadmap [PROB03, S. 1184]

EIRMA Technology Roadmap [PROB03, S. 1184]

Die schematische *Roadmap* nach dem Standard der *European Industrial Research Management Association (EIRMA)* lässt bereits deutliche Parallelen zum *Technologiekalendar* erkennen. Sie wurde in Zusammenarbeit mit 25 Unternehmen unter Leitung von *ABB*, *Philips* und *Hoogovens* entwickelt. Es handelt sich um eine *Roadmap*

des *Multiple-Layer-Formats*, das verschiedene Objektebenen (z. B. Markt, Produkt etc.) über der Zeitachse aufrägt. Das Format hat sich für die Visualisierung komplexer Zusammenhänge bewährt. Die dargestellte *Roadmap* ist Ergebnis des *EIRMA-Technologie-Roadmappingprozesses*. Dieser lässt sich in acht Phasen gliedern (**Abbildung 9**).

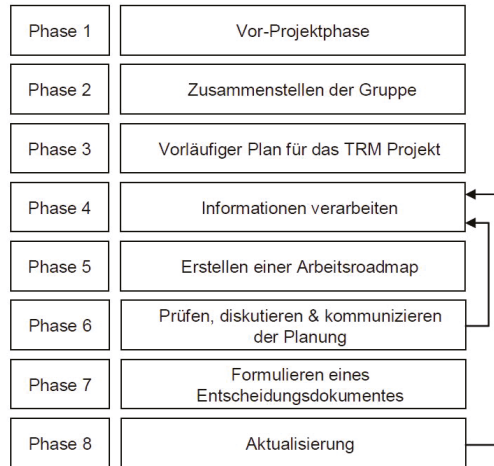


Abbildung 9: Technologie-Roadmappingprozess nach EIRMA [BUCH03, S.109]
Technology Roadmapping Process according to EIRMA [BUCH03, S.109]

Zahlreiche Forschungsarbeiten haben, aufbauend auf dem dargestellten EIRMA-Standard, das *Technologie-Roadmapping* um zusätzliche Aspekte des Technologiemanagements erweitert. *Abele* erweitert das *Technologie-Roadmapping* um Aspekte des Projektmanagements [ABEL06]. *Burgstrahler* ergänzt die Themen *Zielfindung* und *Projektcontrolling* [BURG96]. *Brandenburg* integriert im Rahmen der Zukunftsanalyse die *Szenariotechnik* [BRAN02]. *Behrens* verknüpft das *Technologie-Roadmapping* mit der strategischen Geschäftsfeldplanung [BEHR03]. *Machate* ergänzt Methoden des strategischen Managements [MACH06]. Und *Zernial* erweitert das *Technologie-Roadmapping* um Aspekte des *Quality Function Deployment (QFD)* [ZERN07]. Da die erwähnten Erweiterungen den Untersuchungsbereich nur am Rande betreffen und für ein genaueres Verständnis des *Technologie-Roadmapping* keinen Mehrwert besitzen, soll an dieser Stelle auf eine detaillierte Analyse verzichtet werden (Kap. 2.1).

Die Ausführungen zeigen, dass sich das *Technologie-Roadmapping* als analytisches Gerüst für ein Innovieren im Netzwerk eignet. Durch die Möglichkeit der Darstellung mehrerer Planungsebenen im *Multiple-Layer-Format* bietet es Vorteile in der Visuali-

sierung wesentlicher Zusammenhänge für die Planung fertigungstechnologischer Innovation. Bestehende Methoden zum *Technologie-Roadmapping* zeichnen sich jedoch durch einen sehr hohen Abstraktionsgrad aus [ABEL06; BURG96; BRAN02; BEHR03; MACH06; PROB03; ZERN07]. Es finden sich zwar zahlreiche Makrobeschreibungen und Überschriften für die Gestaltung von *Roadmaps*, wie aber die *Roadmap* und ihre Ebenen letztendlich auszugestalten sind, wird nicht erläutert. Vielmehr wird immer wieder auf den intuitiv-heuristischen Charakter des *Roadmapping* verwiesen [GERY96, S. 2030]. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Analyse der Arbeiten des *Roadmapping* folgende Forschungslücken identifiziert:

- *Fehlende Berücksichtigung der Perspektive der Fertigungstechnologie:* Schwerpunkte bestehender Methoden des *Roadmapping* liegen im Bereich der Unternehmens-, Produkt- und Ressourcenplanung.
- *Reduktion der Roadmap auf die Dokumentation von Planungsergebnissen:* Die Potenziale der *Roadmap* für Produktionsnetzwerke als synergie- und initiativengibende Planungsmethode bleiben ungenutzt.
- *Fehlende Integrationsansätze:* Die fehlende Integration der Methode in Unternehmensstrukturen und -prozesse gefährdet deren nachhaltig erfolgreiche Anwendung [ROSI06; PHAA00].

Die Ausführungen verdeutlichen den Handlungsbedarf für die Entwicklung einer *Roadmap* für die *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken*. Den für die Technologieplanung entwickelten *Technologiekalender* gilt es, in diesem Zusammenhang zu erweitern und zu einer Methode für die Beherrschung der Komplexität fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken auszubauen (**Abbildung 7**, S.14).

2.4 Zwischenfazit und Handlungsbedarf

Interim Results and Need for Action

Im Rahmen des zweiten Kapitels *Grundlagen zur Planung fertigungstechnologischer Innovation* erfolgte die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs (Kap. 2.1), die Ableitung von Planungsgrundsätzen (Kap. 2.2) sowie die Analyse relevanter Modelle und Methoden aus Forschung und Praxis (Kap. 2.3). Der Untersuchungsbereich wurde über die drei Dimensionen *Untersuchungssubjekt*, *-objekt* und *-prozess* abgegrenzt. Planungssubjekt ist das Produktionsnetzwerk, Planungsobjekt ist die fertigungstechnologische Innovation, Planungsprozess ist der Innovationsprozess. Für den abgegrenzten Untersuchungsbereich wurden aus theoretischen Grundlagen vier Planungsgrundsätze entwickelt. Diese sind die Integration von *Market Pull* und *Technology Push*, die gezielte Prüfung fertigungstechnologischer Alternativen unter Beachtung lebenszyklustheoretischer Grundsätze, die Fähigkeit der parallelen Erschließung radikaler und inkrementeller Innovation sowie die gezielte Nutzung von

Kollaboration als „Befähiger“ im Innovationsprozess. Die genannten Planungsgrundsätze wurden als Grundlage für die Bewertung bestehender Forschungsarbeiten herangezogen und dienen als Orientierungsrahmen für die weitere Methodentwicklung.

Im Rahmen der *Analyse relevanter Modelle und Methoden aus Forschung und Praxis* wurde zunächst die Kompatibilität dieser Modelle und Methoden mit dem eingangs definierten Untersuchungsbereich, die Berücksichtigung der formulierten Planungsgrundsätze sowie die Erfüllung wesentlicher Anforderungen der Planungspraxis geprüft (Kap. 2.3.1). Aus dieser ersten Analyse konnte bereits Handlungsbedarf im Hinblick auf die Entwicklung einer Methode für die *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* abgeleitet werden (Kap. 2.3.1). Keine der untersuchten Arbeiten konnte die definierten Kriterien zufriedenstellend erfüllen. Zur Detaillierung des Handlungsbedarfs wurden im Rahmen der weitergehenden Analyse des *Stand der Technik* drei wesentliche Defizite für die *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk* herausgearbeitet (**Abbildung 10**, S. 22).

Das *Transparenzdefizit* beschreibt die oft unzureichende Transparenz hinsichtlich der mittel- und langfristigen Zusammenhänge von Fertigungstechnologie, von Produkttechnologie und Kundenbedarf bei der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken. Dieses Defizit ist das Resultat zunehmender technologischer Dynamik und organisatorischer Vernetzung. Die Transparenz der genannten Zusammenhänge ist jedoch Voraussetzung für die Ableitung langfristig erfolgreicher Innovationsaktivitäten.

Das *Effizienzdefizit* bezieht sich auf die fehlende methodische Unterstützung von fertigungstechnologischer Innovation in etablierten Technologieketten. Effizienzmaßnahmen beschränken sich nach Produktionsanlauf fast ausschließlich auf den kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP). Die Potenziale fertigungstechnologischer Innovation im Rahmen der Anpassungsplanung etablierter Technologieketten werden nur unzureichend genutzt. Gezielte fertigungstechnologische Innovation kann in einem globalen Wettbewerbsumfeld jedoch einen entscheidenden Beitrag zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit etablierter Technologieketten leisten.

Das *Effektivitätsdefizit* beschreibt den Mangel an methodischer Unterstützung in der Gestaltung radikaler produkttechnologischer Umbrüche aus der Fertigungstechnologie. Dazu bedarf es einer verstärkten Integration der Technologieplanung mit der Produktplanung noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering*.

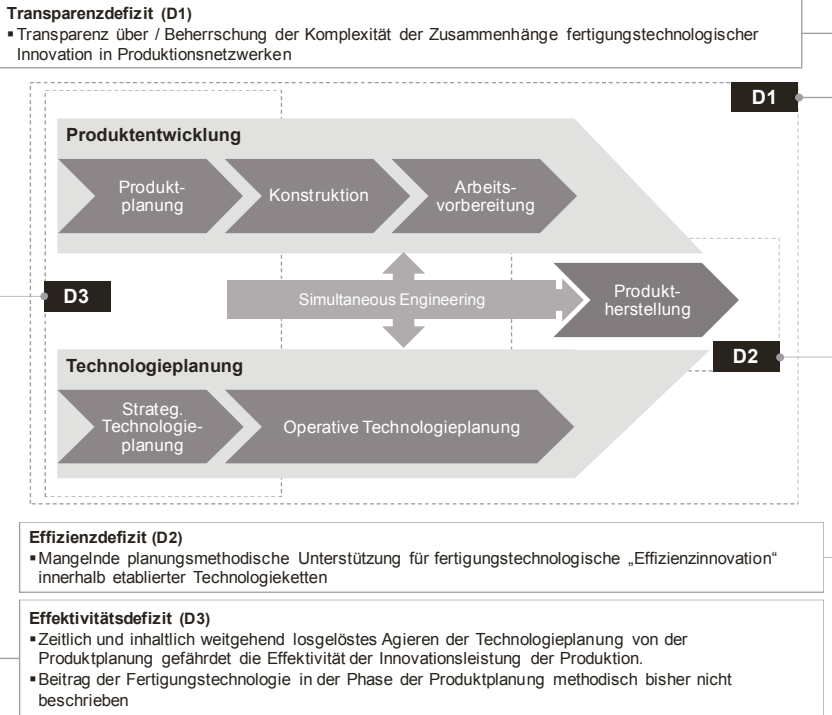


Abbildung 10: Defizite der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken
Domains for Further Research in Technology Planning for Production Networks

Aus der Analyse relevanter Modelle und Methoden im Untersuchungsbereich ergibt sich somit zusammenfassend folgende Problemstellung: Es existiert keine Methode, die die aktuellen Herausforderungen der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken zufriedenstellend adressiert. Der Abgleich der aktuellen Herausforderungen der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken (Kap. 1) mit relevanten Modellen und Methoden aus Forschung und Praxis (Kap. 2.3) lässt für die Technologieplanung ein Transparenz-, ein Effizienz- und ein Effektivitätsdefizit erkennen. Es besteht somit Handlungsbedarf für die Entwicklung einer Methode zur Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken unter Berücksichtigung der ermittelten Defizite.

3 Zielsetzung, Vorgehensweise und Grobkonzept

Objective, Course of Action and Concept

3.1 Zielsetzung und Forschungshypothesen

Objective and Research Hypotheses

Die Produktion in Hochlohnländern sieht sich in einem globalen Wettbewerbsumfeld mit permanent steigendem Kostendruck konfrontiert. Darüber hinaus entstehen im Kontext radikaler produkttechnologischer Umbrüche, wie beispielsweise der Entwicklung alternativer Antriebsarchitekturen im Automobilbau, neue Herausforderungen (Kap. 1). Mit fertigungstechnologischen Innovationen lassen sich in diesem Umfeld entscheidende Wettbewerbsvorteile erzielen. Sie ermöglichen:

- Kosteneinsparungen in etablierten Technologieketten
- Erschließung neuer Produkttechnologien für ein langfristig differenzierendes Leistungsangebot

Aus der Analyse vorliegender Forschungsarbeiten geht hervor, dass für die *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* im Zusammenhang der geschilderten Herausforderungen drei wesentliche Defizite existieren (Kap. 2.4):

- *Transparenzdefizit*: Defizit in der Transparenz hinsichtlich mittel- und langfristiger Zusammenhänge von fertigungstechnologischer Innovation, produkttechnologischen Umbrüchen und Kundenbedarf
- *Effizienzdefizit*: Defizit in der methodischen Unterstützung fertigungstechnologischer Innovation im Rahmen der Anpassungsplanung etablierter Technologieketten
- *Effektivitätsdefizit*: Defizit in der Gestaltung radikaler produkttechnologischer Umbrüche aus der Fertigungstechnologie

Zielsetzung der Arbeit ist die Entwicklung einer *Methode für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* unter Berücksichtigung der dargelegten Defizite. Diese existiert zurzeit nicht. Aufbauend auf dieser Zielsetzung wird die zentrale Forschungshypothese der Arbeit aufgestellt:

Die Entwicklung einer Methode zur Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk steigert die Innovationskraft der Technologieplanung und erhöht die Effektivität und Effizienz des Produktionsnetzwerks.

Diese Forschungshypothese lässt sich in vier Teilthesen gliedern:

- *Teilthese I:* Der Technologiepotenzialkalender kann die Komplexität der Zusammenhänge technologischer Innovation in Produktionsnetzwerken transparent und beherrschbar machen. Er eignet sich als Grundlage für die systematische Ableitung von fertigungstechnologischem Innovationsbedarf im Produktionsnetzwerk.
- *Teilthese II:* Die zielbeitragsorientierte Prüfung ausgewählter Fertigungstechnologien innerhalb der Technologieketten unter systematischer Nutzung prozessgestalterischer Variablen (Elimination, Substitution, Optimierung) und gesamttechnologischer Möglichkeiten (Technologieketten, Werkstoff, Produktgestalt) ermöglicht Effizienzinnovationen in der Technologieketten.
- *Teilthese III:* Die methodische Einbindung der Technologieplanung im Produktentstehungsprozess noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering* schafft Impulse für die Gestaltung zukunftsorientierter Technologieketten und legt die Grundlage für ein langfristig effektives Leistungsprogramm im Produktionsnetzwerk.
- *Teilthese IV:* Wirtschaftlichkeit, Komplexität und qualitativer Mehrwert der erarbeiteten fertigungstechnologischen Konzeptalternativen lassen sich mit einem multikriteriellen Bewertungssystem quantifiziert abbilden.

Als Wahrheitskriterium der Forschungshypothese dient im Sinne der realanalytischen Forschung das Realisierungskriterium, d. h. die Umsetzung der Methode in der Praxis und ihre empirische Prüfung bzgl. der prognostizierten Zielwirkungen [HILL76, S.347].

3.2 Forschungskonzept und Vorgehensweise

Research Concept and Course of Action

Die vorliegende Arbeit basiert auf Herausforderungen der Praxis, vorgefunden in der Komponentenproduktion eines führenden deutschen Automobilherstellers und lässt sich somit den angewandten Wissenschaften zuordnen. Im Sinne von *Ulrich* wird das Ziel verfolgt, Methoden zur Lösung von Praxisproblemen zu generieren und deren Anwendbarkeit im Anwendungszusammenhang zu prüfen [ULRI84, S.179].

Die vorliegenden Ergebnisse sind Resultate eines iterativen Forschungsprozesses, in dessen Verlauf die Methode entwickelt, erprobt, infrage gestellt, angepasst und optimiert wurde. Der gewählte Forschungsprozess steht somit dem des *Action Research* nahe, bei dem der Forscher als aktiver Teil des Experiments versucht, die Realsituation zu verbessern und sich in diesem Zusammenhang Wissen über diese anzueignen [CHEC98, S.9].

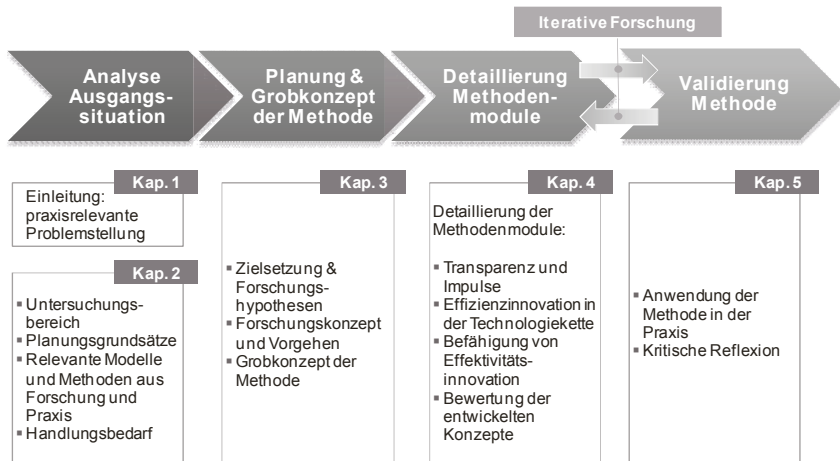


Abbildung 11: Vorgehensweise und Strukturierung der vorliegenden Arbeit
Research Process and Structure

Aus der in Kapitel 3.1 vorgestellten Zielsetzung und den geschilderten Überlegungen zum Forschungsprozess ergibt sich die bereits dargestellte Vorgehensweise und Strukturierung der Arbeit (**Abbildung 11**, S.25). Die intensive Zusammenarbeit von Forschung und Praxis ist dabei ein entscheidendes Merkmal dieser Arbeit. Interessen beider Seiten sind in den Forschungsprozess eingeflossen und spiegeln sich in dessen Ergebnissen wieder.

3.3 Grobkonzept der Methode

Concept of the Methodology

Im Folgenden wird die *Methode zur Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* in ihren Grundzügen erläutert. Die dazu entwickelten vier Module der Methode werden zu einem Vorgehensmodell verknüpft, dass auf höchster Systemebene einen geschlossenen Kreislauf bildet (**Abbildung 12**, S.26). Bereits auf den ersten Blick wird dabei ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der Methode deutlich: Sie gewährleistet die durchgängige methodische Unterstützung von fertigungstechnologischen Effizienz- und Effektivitätsinnovationen in den Phasen *Impuls*, *Konzeptgenerierung* und *Konzeptakzeptierung* des Innovationsprozesses (Kap. 2.1.3).

Das Modul *I Transparenz und Impulse für die Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk* bildet den Ausgangspunkt im Planungsprozess. Wesentliche Neuerung ist die Entwicklung des Technologiepotenzialkalenders (TPK) zur Strukturierung und Analyse innovationsrelevanter technologischer Informationen und Zusammenhänge. Die Erstellung und Analyse des Technologiepotenzialkalen-

ders wird durch den dafür entwickelten TPK-Prozess unterstützt, der dazu geeignete Methoden bereitstellt und die Integration der Technologiefrüherkennung ermöglicht. Ergebnis des ersten Planungsschritts sind im Gesamtkontext von Fertigungstechnologie, Produkt und Kunde erarbeitete Innovationsaufgaben. Diese bilden den inhaltlichen Rahmen für die Module *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* (Modul II) und *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* (Modul III).

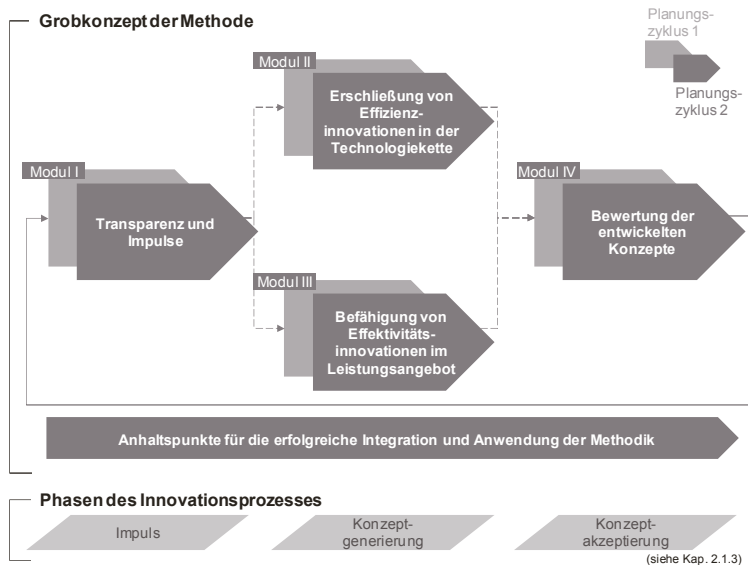


Abbildung 12: Die vier Module der Methode im Vorgehensmodell
The four Modules of the Methodology

Das Modul II *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit etablierter Technologieketten des Produktionsnetzwerks weiterzuentwickeln. Wissenschaftlicher Mehrwert liegt in der entworfenen Heuristik, die ausgewählte Technologien innerhalb der Technologiekette systematisch auf ihre Möglichkeit zur Elimination, Substitution und Optimierung prüft. Dafür werden Schnittstellen zu Technologieinformationssystemen, Simulationswerkzeugen und Technologieexperten geschaffen und somit die umfassende Integration von fertigungstechnologischem Wissen in den Innovationsprozess sichergestellt. Ergebnis des Planungsschritts sind Konzepte zur Realisierung von Effizienzinnovationen innerhalb der untersuchten Technologiekette.

Die *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* (Modul III) zielt auf die fertigungstechnologiegetriebene Erschließung neuer Leistungsumfänge für das Produktionsnetzwerk im Kontext radikaler produkttechnologischer Umbrüche. Im Vordergrund steht dabei die Integration von Produkt- und Technologieplanung noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering* (Kap. 2.1.3). Dazu wird die Potenzialmatrix entwickelt, die fertigungs- und produkttechnologische Potenziale zum frühestmöglichen Zeitpunkt integriert. Mit ihrer Hilfe werden gemeinsame Aktionsfelder von Produkt- und Technologieplanung erarbeitet und die Produktfindung vorbereitet. Ergebnis des Planungsschritts sind fertigungstechnologische Konzepte zur langfristigen Erweiterung des Leistungsangebots des Produktionsnetzwerks.

Die Anforderung einer durchgängigen methodischen Unterstützung im Innovationsprozess erfordert ein auf die Planungsaufgabe zugeschnittenes Bewertungssystem. Im Modul IV *Bewertung der entwickelten Konzepte* wird ein stufenweises Bewertungssystem für die vorliegende Planungsaufgabe entwickelt. Dieses Bewertungssystem unterstützt das Entscheidungsgremium in der Auswahl fertigungstechnologischer Konzeptalternativen unter Berücksichtigung von Qualität, Wirtschaftlichkeit, Realisierungsdauer und fertigungstechnologischer Komplexität. Der Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung eines Komplexitätsverständnisses für die Fertigungstechnik und in der Entwicklung von Methoden zur quantitativen Messung fertigungstechnologischer Komplexität. Die mit dem Bewertungssystem priorisierten fertigungstechnologischen Alternativen fließen in den in Modul I entwickelten *Technologiepotenzialkalender* ein und schließen damit den Planungskreislauf. Das Modul I *Transparenz und Impulse* bildet somit Ausgangs- und Endpunkt im Planungsprozess. Der im Zentrum dieses Moduls stehende *Technologiepotenzialkalender* ist dabei „Taktgeber“ eines rollierenden Innovationsprozesses über mehrere Planungszyklen.

Die langfristig erfolgreiche Anwendung der Methode erfordert eine solide Integration in ihr Systemumfeld. Dazu werden abschließend *Anhaltspunkte für die erfolgreiche Anwendung der Methode in der Planungspraxis* definiert. Diese unterstützen die Integration der Methode in das Produktionssystem.

Das dargestellte Vorgehensmodell kann als Leitfaden zur *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* interpretiert werden. In Abhängigkeit von der aktuellen Unternehmenssituation sind für den jeweiligen Planungszyklus die Planungsschwerpunkte Effizienzinnovation (Modul II) und/oder Effektivitätsinnovation (Modul III) auszuwählen. Grundlage für die Definition des Planungsschwerpunktes bilden dabei die Ergebnisse des ersten Moduls *Transparenz und Impulse*.

4 Methode zur Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk

Planning Manufacturing Innovation in the Production Network

Innovation ist eine entscheidende Stellgröße für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der Produktion in Hochlohnländern. Ihre Entwicklung erfordert eine durchgängige methodische Unterstützung der Technologieplanung von der Identifikation technologischen Handlungsbedarfs bis zur Bewertung fertigungstechnologischer Konzeptalternativen. Bislang existiert dazu keine geeignete Methode. Mit dem vorliegenden Kapitel wird diese Lücke geschlossen.

4.1 Transparenz und Impulse für die Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk (Modul I)

Transparency and Impulses for Innovation in Production Networks (Module I)

Das Modul *Transparenz und Impulse* adressiert die beschriebene Herausforderung hoher Komplexität in der *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* (Abbildung 13).

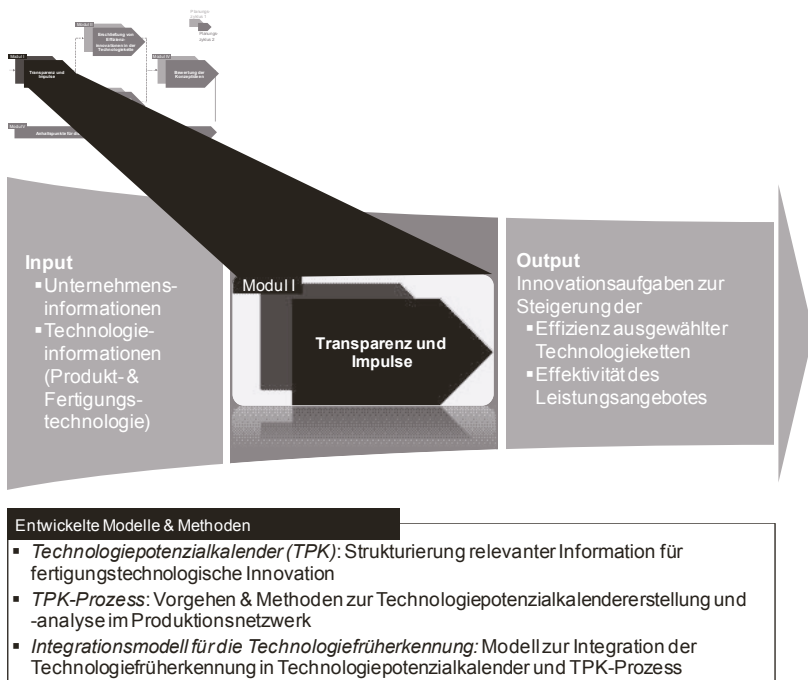


Abbildung 13: Input, Output, Modelle und Methoden des Modul I

Input, Output, Models and Methods of Module I

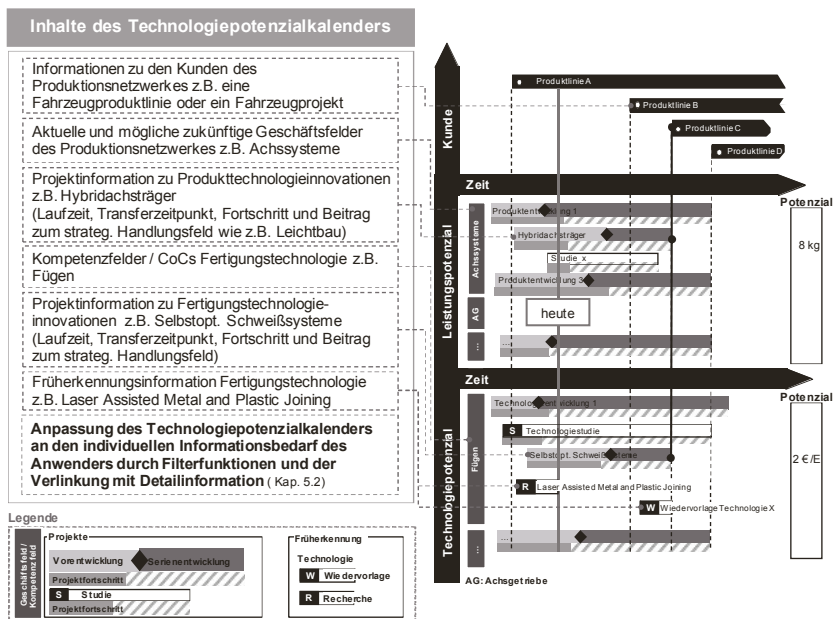
Diese Komplexität liegt begründet in der hohen Anzahl an Systemelementen und -beziehungen des Planungssubjekts Produktionsnetzwerk sowie in der Dynamik und den Wechselwirkungen des betrachteten Planungsobjektes *fertigungstechnologische Innovation* (Kap. 2.1.1; Kap. 2.1.2).

Im Zentrum des im Folgenden beschriebenen Moduls steht der entwickelte *Technologiepotenzialkalender*, der erforderliche Eingangsinformationen für die Planung fertigungstechnologischer Innovation verdichtet sowie transparent und beherrschbar macht. Ergebnis des Moduls sind die aus dem Gesamtkontext abgeleiteten Innovationsaufgaben, die eine Steigerung der Effizienz der Technologieketten und/oder der Effektivität des Leistungsangebots zum Ziel haben. Sie bilden den Ausgangspunkt für den weiteren Planungsprozess.

4.1.1 Entwicklung des Technologiepotenzialkalenders

Development of the Technologiepotenzialkalender

Der in dieser Arbeit entwickelte *Technologiepotenzialkalender* bündelt innovationsrelevante Informationen in den drei Ebenen Kunde, Leistungspotenzial und Technologiepotenzial. Die Ebenen sind über der Zeitachse aufgespannt (**Abbildung 14**).



Mit dem *Technologiepotenzialkalender* wird der *Technologiekalender* von Schmitz substantiell erweitert [SCHM96]. Nicht auskonstruierte Produktstrukturelemente sind das erstrangig fertigungstechnologisch zu gestaltende Objekt, sondern langfristige Produkt- bzw. Leistungspotenziale. Diese können systematisch aus dem *Technologiepotenzialkalender* abgeleitet werden. Die gesamthafte Visualisierung der Zusammenhänge fertigungstechnologischer Innovation innerhalb der Ebenen Kunde, Leistungs- und Technologiepotenzial ermöglicht ein ganzheitliches Agieren des Produktionsnetzwerks im Kontext radikaler produkttechnologischer Umbrüche.

Die *Ebene 1 Kunde* (Achsen: Kunde, Zeit) gibt einen Überblick über aktuelle und (mögliche) zukünftige Kunden des Produktionsnetzwerks. Der Kunde der Produktion ist dabei in der Regel unternehmensintern. Der interne Kunde Produktlinie bzw. dessen Ziele und Anforderungen bilden dabei einen sinnvollen ersten Anknüpfungspunkt für die Technologieplanung. Beispielsweise werden in der Automobilindustrie noch vor Beginn der Fahrzeugentstehung für die Produktlinie fahrzeugübergreifende, verbindliche Ziele und Merkmale festgelegt. Aus ihrer Analyse lassen sich bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt belastbare Rückschlüsse für die Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk ableiten. In der Ebene 1 *Kunde* sind folglich alle aktuellen und geplanten Produktlinien im Zeitverlauf abzubilden. Ihre wesentlichen Zielgrößen und Anforderungen sind im *Technologiepotenzialkalender* darzustellen. Hierbei kann auf bestehende Dokumentationen zurückgegriffen werden (Kap. 5.2).

Die *Ebene 2 des Technologiepotenzialkalenders* (Achsen: Leistungspotenzial, Zeit) bildet das *Leistungspotenzial* des Produktionsnetzwerks ab. Es beschreibt das potenzielle zukünftige Angebot des Produktionsnetzwerks an seine Kunden. Ebene 2 beschreibt somit die potenziellen Produkt- und Dienstleistungsinnovationen, mit denen das Produktionsnetzwerk mittel- bis langfristig im globalen Wettbewerb agieren will. Die potenziellen Leistungsumfänge des Produktionsnetzwerks an der Produktinnovation können bei Bedarf, in Abhängigkeit vom aktuellen Planungsstand, bis auf Komponenten oder Bauteilebene detailliert werden. Der Beitrag des Produktionsnetzwerks zur Erfüllung der Ziele und Anforderungen seiner Kunden ist in der Spalte *Potenzial* zu vermerken (**Abbildung 14**, rechts, S. 30). Dieser Beitrag kann sich beispielsweise auf fertigungstechnologieinduzierte Kosten- oder Gewichtsreduzierungspotenziale beziehen. Detailinformationen zu den in Ebene 2 dargestellten Leistungspotenzialen, wie z. B. Produktsteckbriefe, sind mit dem *Technologiepotenzialkalender* zu verknüpfen (Kap. 5.2).

Die Ebene 3 *Technologiepotenzial* (Achsen: Technologiepotenzial, Zeit) dokumentiert die für das Produktionsnetzwerk relevanten fertigungstechnologischen Potenziale im *Technologiepotenzialkalender*. Dabei geht das vorliegende Begriffsverständnis

des Technologiepotenzials über das von *Binder* definierte Technologiepotenzial hinaus [BIND96, S.70]. Es umfasst neben den Kerntechnologien bzw. -kompetenzen auch (mögliche) Komplementärtechnologien zum bestehenden Technologieportfolio des Produktionsnetzwerks. Als Komplementärtechnologien werden dabei Fertigungstechnologien bezeichnet, die den Leistungsfähigkeitsbereich einer bestehenden Kerntechnologie oder technologischen Kernkompetenz im Hinblick auf zukünftige Herausforderungen sinnvoll erweitern, ergänzen oder nutzen [KNOC06, S.20]. Es werden folglich die fertigungstechnologischen Potenziale aufgenommen, die zur Realisierung der in Ebene 2 dargestellten Leistungspotenziale einen potenziellen Beitrag leisten können, unabhängig davon, ob diese im Bereich der Kernkompetenzen des Produktionsnetzwerks liegen oder nicht.

Die unterschiedlichen Arten der Innovationsaktivitäten sind im *Technologiepotenzialkalender* kenntlich zu machen. Beispielsweise ist eine Technologie-Recherche von einem bereits in der Serienentwicklung befindlichen Innovationsprojekt visuell abzugrenzen (**Abbildung 14**, S. 30). Für eine Differenzierung der Reife der Innovationsaktivitäten wird eine Einteilung gemäß folgendem Schema eingeführt:

- *Technologie-Wiedervorlage*: Technologien, die aufgrund ihrer aktuell noch zu geringen Reife zu einem späteren Zeitpunkt nochmals geprüft werden sollen; keine Entwicklungsaktivitäten seitens des Produktionsnetzwerks
- *Technologie-Recherche*: Suche technologischer Konzeptalternativen, Vorstufe zur Machbarkeitsuntersuchung
- *Technologie-Studie/Machbarkeitsuntersuchung*: In der Regel produktunabhängig, geringer finanzieller Aufwand, oft Vorstufe zum Projekt
- *Innovationsprojekt*: Zielprodukt/-produktlinie definiert und abgestimmt, Inhalte priorisiert und finanziert
- *Technologie-Schaufensterlösung*: Erfolgreich abgeschlossene Innovationsprojekte, die noch nicht in die Serienproduktion transferiert werden konnten

Der *Technologiepotenzialkalender* in der dargestellten Struktur aggregiert Informationen auf höchster Ebene, lässt Zusammenhänge erkennen und ermöglicht die detaillierte Analyse der Ausgangssituation des Produktionsnetzwerks. Er eignet sich als Kommunikationsinstrument des Produktionsnetzwerks für die Abstimmung mit Entwicklung und Design. Wesentliche fertigungstechnologische Fähigkeiten und Potenziale werden auf transparente Art und Weise dargestellt.

4.1.2 Erstellung des Technologiepotenzialkalenders mit dem Technologiepotenzialkalenderprozess

The *Technologiepotenzialkalender-Process* for Production Networks

Der vorgestellte *Technologiepotenzialkalender* bildet das methodische Gerüst zur Strukturierung innovationsrelevanter Informationen im Produktionsnetzwerk. Diesen gilt es, unternehmensindividuell anzupassen und mit Inhalten zu füllen. Dazu wird ein auf die spezifischen Anforderungen von Produktionsnetzwerken zugeschnittener *Prozess* entwickelt. Der *Standard-Roadmappingprozess nach ERIMA* bildet dafür den methodischen Ausgangspunkt (Kap. 2.3.5). Zur Steigerung der Planungseffizienz und -qualität im Produktionsnetzwerk wird er um folgende wesentliche Aspekte erweitert:

- Selektive Parallelisierung der Teilprozesse für eine zeit- und ressourceneffiziente Erstellung des Technologiepotenzialkalenders im Produktionsnetzwerk
- Umfassende methodische Unterstützung der *Technologiepotenzialkalendererstellung* und *-analyse*
- Integration einer fertigungstechnologieorientierten *Technologiefrüherkennung*

Der in dieser Arbeit entwickelte Prozess gliedert sich in die Schritte *Technologiepotenzialkalendererstellung*, *-analyse* und *Integration Technologiefrüherkennung* (**Abbildung 15**). Die Komplexität der Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerken erfordert dabei ein iteratives Vorgehen.

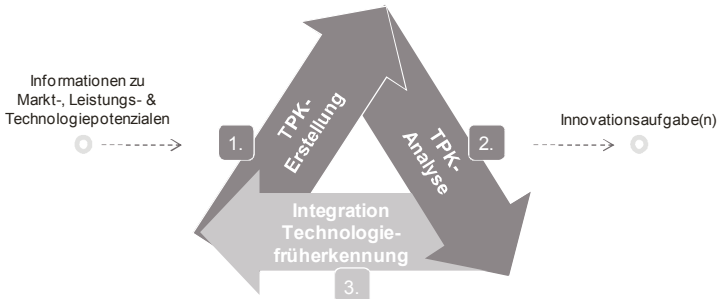


Abbildung 15: Entwickelter Technologiepotenzialkalenderprozess
Developed Technologiepotenzialkalender Process

Die Prozessschritte *TPK-Erstellung* und *TPK-Analyse* bilden den Kern des *entwickelten* Technologiepotenzialkalenderprozesses. Der Prozessschritt *Integration Technologiefrüherkennung* kann als Erweiterung dieses Kerns verstanden werden. Er liefert zusätzliche fertigungstechnologische Impulse für die Planung technologischer Innovation im Produktionsnetzwerk, steigert allerdings Umfang und Aufwand der Planungsaufgabe. Es wird daher empfohlen, die Technologiefrüherkennung erst mit

fortgeschrittener Planungserfahrung – im zweiten Planungszyklus – zu integrieren. Im vorliegenden Kapitel werden deshalb zunächst die Kernprozesse *TPK-Erstellung* und *TPK-Analyse* beschrieben. Die *Integration der fertigungstechnologieorientierten Technologiefrüherkennung* wird in Kap. 4.1.3 erläutert.

TPK-Erstellung – Vorgehen für Produktionsnetzwerke

Im Rahmen der Erstellung des Technologiepotenzialkalenders erfolgt die strukturierte IST-Analyse innovationsrelevanter Information für das Produktionsnetzwerk. Sie ist Voraussetzung für die Ableitung gezielter Innovationsaktivitäten und erfolgt in den drei Schritten *Aufgabenklärung*, *Potenzialerfassung* und *Integration der Potenziale zum Technologiepotenzialkalender* (**Abbildung 16**).

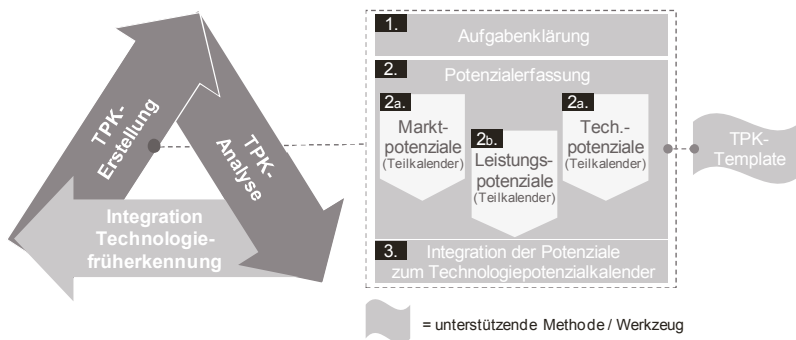


Abbildung 16: Erstellung des Technologiepotenzialkalenders
Creation of the Technologiepotenzialkalender

Der erste Schritt *Aufgabenklärung* legt die organisatorische Grundlage für die erfolgreiche Erstellung des *Technologiepotenzialkalenders*. Es werden zentrale Fragestellungen und Ziele mit dem Management abgestimmt. Der zur Bearbeitung erforderliche finanzielle und personelle Ressourcenbedarf wird aufgezeigt. Dies inkludiert die Ernennung eines zentralen Projektleiters sowie die Definition von Projektmitarbeitern an den einzelnen Standorten des Produktionsnetzwerks. Vor dem Hintergrund begrenzter Planungsressourcen ist die Beschränkung auf ein bestimmtes Markt-, Geschäfts- oder Technologiefeld zu empfehlen. Auch der zeitliche Planungshorizont ist an die unternehmensindividuellen Gegebenheiten anzupassen. Im Hochtechnologiebereich, wie z. B. der Automobilproduktion, wird ein Planungshorizont von zwei bis drei Produktgenerationen empfohlen.

Im Anschluss an die Aufgabenklärung erfolgt im zweiten Schritt *Potenzialerfassung* die Erfassung und Strukturierung von *Markt-, Technologie- und Leistungspotenzialen*. Die Integration dieser Potenziale ist Grundlage für die langfristig erfolgreiche

Planung fertigungstechnologischer Innovationen (Kap. 2.2.1). *Marktpotenziale* entsprechen dabei den Markt- bzw. Kundensegmenten des Produktionsnetzwerks wie z. B. den aktuellen und möglichen zukünftigen Produktlinien. Sie implizieren einen fertigungstechnologischen Bedarf bzw. einen *Market Pull*, werden federführend von Vertrieb und Produktplanung definiert und sind dort abzufragen. *Technologiepotenziale* sind autonom induzierte fertigungstechnische Lösungen mit einem „Anwendungsdrang“. Sie entstehen aus der technologischen Arbeit an den verschiedenen Standorten und entsprechen im *Potenzialorientierten Ansatz* dem *Technology Push* (Kap. 2.2.1). Leistungspotenziale sind die aus dem Abgleich von Markt- und Technologiepotenzialen resultierenden aktuellen und möglichen zukünftigen Produktionsleistungen. Sie können sich vom Bauteil über Produktkomponenten bis zum endmontierten Produkt erstrecken. Aus Gründen der Zeit- und Ressourceneffizienz wird eine Parallelisierung der Abfrage von Markt- und Technologiepotenzialen empfohlen. Ihre Ergebnisse können bereits in Entwurfsform in den Technologiepotenzialkalender einfließen (Ebenen: Kunde & Technologiepotenzial) bzw. in Form von Teilkalendern dargestellt werden. Die Abfrage der *Leistungspotenziale* bzw. die Informationsabfrage zur mittleren Ebene des *Technologiepotenzialkalenders* erfolgt nachfolgend, idealerweise auf Grundlage der beiden Ebenen *Kunde* und *Technologiepotenzial*. Hintergrund dieser Sequenzierung ist die besondere Bedeutung der mittleren Ebene des *Technologiepotenzialkalenders*. Sie verknüpft als „Brücke“ die Ebenen Technologiepotenzial (*Technology Push*) und Kunde (*Market Pull*) und erfordert zur Darstellung dieser Brückenfunktion folglich Information aus diesen Bereichen.

Der Mehrwert des *Technologiepotenzialkalenders* liegt nicht in der vollständigen Neuerfassung und Neuerfindung der Dokumentation innovationsrelevanter Information, sondern in der intelligenten Verknüpfung verteilter Daten innerhalb des Produktionsnetzwerks. Zur Erfassung dieser Daten im soeben geschilderten Vorgehensschritt *Potenzialerfassung* kann das *TPK-Template* herangezogen werden (**Abbildung 17**, S.36). Dieses dient der systematischen Aufnahme der Innovationsaktivitäten im Produktionsnetzwerk. Die für die Erstellung des Technologiepotenzialkalenders minimal erforderlichen Informationen werden abgefragt, weitere bereits vorhandene Detailinformationen können hinterlegt werden.

Nr.	Art der Aktivität	Geschäftsfeld	Tech.-feld	Titel der Aktivität	Start	Ende	Verantwortlicher	Abteilung	Kunde / Zielprodukt	Transferzeitpunkt	Potenzial	Link zu Details	Kommentar
Art der Aktivität ▪ Innovationsprojekt (Vorentwicklung, Serienentwicklung) ▪ Technologie-Studie/ Machbarkeitsuntersuchung ▪ Technologie-Recherche ▪ Technologie-Wiedervorlage ▪ Technologie-Schaufensterlösung (siehe Kap. 4.1.1) Technologiefeld Nach DIN 8580 Transferzeitpunkt Aus Kundensicht spätestens möglicher Zeitpunkt zum Transfer des Projektes (Start Serienentwicklung, SOP, ...) Potenzial Beitrag der Aktivität zur Erfüllung der Ziele und Anforderungen des Kunden (z.B. Kostenreduzierungs-potenzial, Potenzial zur Gewichteinsparung,...)													

Abbildung 17: TPK-Template zur Informationsabfrage für die Erstellung des Technologiepotenzialkalenders
TPK-Template for the Creation of the Technologiepotenzialkalender

Die resultierenden Ebenen bzw. Teilkalender *Kunde*, *Leistungspotenzial* und *Technologiepotenzial* werden im Vorgehensschritt *Integration der Potenziale zum Technologiepotenzialkalender* zum ersten Entwurf des *Technologiepotenzialkalenders* zusammengeführt. Dieser ist durch die verantwortlichen Fachbereiche auf Vollständigkeit zu prüfen.

TPK-Analyse

Nach Erstellung des Technologiepotenzialkalenders (TPK) erfolgt im zweiten Schritt des entwickelten Technologiepotenzialkalenderprozesses die *TPK-Analyse*. Sie dient der *Identifikation von Defiziten* im aktuellen Innovationsprogramm des Produktionsnetzwerks, der *Ableitung von Innovationsbedarf* und der *Priorisierung des Innovationsbedarfs*. Ergebnis sind aus dem Gesamtzusammenhang von Kunde, Technologie- und Leistungspotenzialen abgeleitete *Innovationsaufgaben* (**Abbildung 18**).

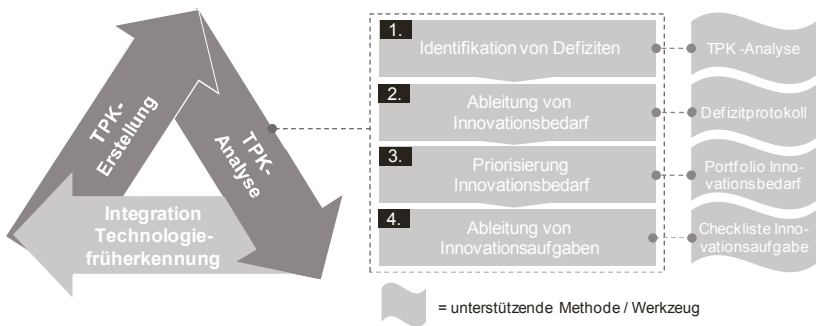


Abbildung 18: Wesentliche Inhalte der Analysephase
Major Tasks in the Analyzing Process

Die *Identifikation von Defiziten* im aktuellen Innovationsprogramm beinhaltet die systematische Prüfung des *Technologiepotenzialkalenders* im Expertenkreis bzgl. operativer, taktischer und strategischer Defizite (**Abbildung 19**, oben).

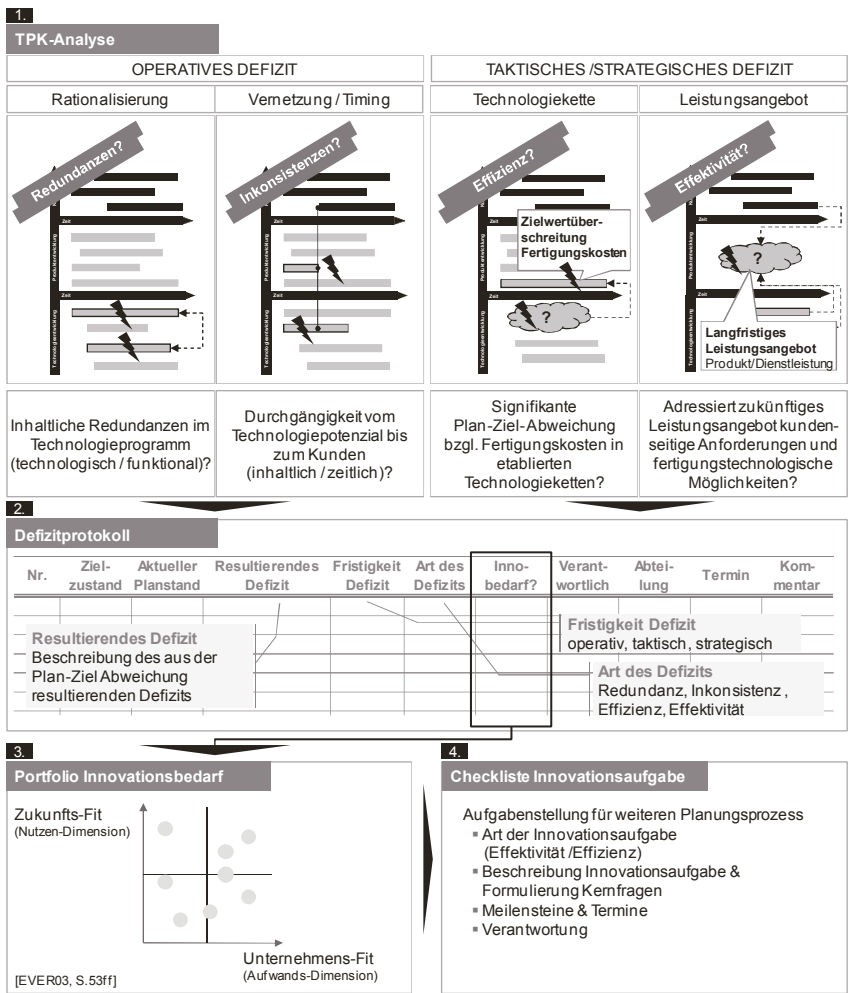


Abbildung 19: Analyse des Technologiepotenzialkalenders und Ableitung von Innovationsaufgaben
Analysis of the *Technologiepotenzialkalender* and Derivation of Innovation Tasks

Mithilfe des *Technologiepotenzialkalenders* können *operative Defizite*, wie z. B. *Redundanzen* bzw. gleichartige Innovationsaktivitäten an verschiedenen Standorten des Netzwerks, einfach erkannt werden. Zeitliche und inhaltliche *Inkonsistenzen*

werden über die schrittweise Verfolgung der Technologiepfade transparent. Ein konsistenter Technologiepfad läuft dabei ausgehend vom *Technologiepotenzial* (Ebene 3) über das *Leistungspotenzial* (Ebene 2) bis zum *Kunden* (Ebene 1). Wird der Technologiepfad auf einer der Ebenen unterbrochen liegt Inkonsistenz vor, die entsprechend im Defizitprotokoll zu dokumentieren ist (**Abbildung 19**, mittig, S.37).

Taktische und strategische Defizite lassen sich ebenfalls über die Verfolgung von Technologiepfaden im *Technologiepotenzialkalender* erkennen. Dabei ist im Gegenstromverfahren vorzugehen. Es sind sowohl die Auswirkungen der Ebene 1 *Kunde* auf die Ebene 3 *Technologiepotenzial* zu prüfen als auch mögliche Auswirkungen der Ebene 3 *Technologiepotenzial* auf die Ebene 1 *Kunde* zu untersuchen. Der Anforderung der Integration von *Market Pull* und *Technology Push* wird mit dem Gegenstromverfahren somit gerecht (Kap. 2.2.1). Das geschilderte Vorgehen kann bei Bedarf durch etablierte Prognose- und Analysemethoden wie z. B. die *Szenariotechnik*, den *Technologielebenszyklus* oder die *GAP-Analyse* unterstützt werden [GAUS96; SAAD91, S.65ff; THOE01, S.903f].

Da sich operative Defizite mit etablierten Methoden des Multiprojektmanagements lösen lassen, stehen sie nicht im Fokus der weiteren Betrachtung [BEA08, S.497ff; KUNZ07]. Taktische und strategische Defizite in Leistungsangebot und Fertigungstechnologie hingegen stellen aufgrund ihrer hohen Komplexität die Produktion vor große Herausforderungen. Ihre Bearbeitung steht im Zentrum der weiteren Arbeit.

Die taktischen/strategischen Defizite werden im *Defizitprotokoll* hinsichtlich *Effizienzdefizit* und *Effektivitätsdefizit* unterschieden. *Effizienzdefizite* betreffen die Effizienz der Produktionsfaktoren/Technologieketten in Bezug auf den Einsatz fertigungstechnischer Ressourcen (Kap. 2.1.2). Ein *Effizienzdefizit* ist strategischer/taktischer Natur, wenn dessen Lösung mittel- bis langfristig alternativer fertigungstechnologischer Konzepte bedarf, d. h. nicht über den kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) behoben werden kann. Die Lösung von *Effizienzdefiziten* wird vom Kunden indirekt z. B. über einen günstigeren Preis wahrgenommen. Ein mögliches Beispiel für ein taktisches *Effizienzdefizit* wäre eine Plan-Ziellücke in den Fertigungskosten von 10% für die anstehende Produktgeneration.

Effektivitätsdefizite beziehen sich auf die Effektivität der Produktionsfaktoren im Hinblick auf sich abzeichnende produkttechnologische Umbrüche (Kap. 2.1.2). Sie wirken damit direkt auf das Leistungsangebot des Produktionsnetzwerks, d. h. ihre Lösung wird vom Kunden direkt über ein neues Objekt/Produkt oder über eine neue Produktfunktion wahrgenommen. Ein Beispiel für ein *Effektivitätsdefizit* eines Produzenten konventioneller Pkw-Antriebstechnologie wären zunehmende Marktanteile elektrifizierter Antriebsarchitekturen bei führenden Automobil OEMs.

Die dokumentierten taktischen und strategischen Defizite bzw. der daraus resultierende *Innovationsbedarf* ist im nächsten Schritt zu priorisieren (**Abbildung 19**, unten, S.37). Dazu wird auf das von *Eversheim* vorgeschlagene Portfolio zur Aufgabendefinition zurückgegriffen [EVER03, S.54ff]. Dieses ordnet die Innovationsbedarfe bzgl. ihres *Zukunfts-Fit* und *Unternehmens-Fit* ein. Der *Zukunfts-Fit* entspricht dem Potenzial des Innovationsbedarfs aus Kundensicht (Nutzendimension), der *Unternehmens-Fit* der Fähigkeit des Produktionsnetzwerks zu dessen Umsetzung (Aufwandsdimension). Eine relative, rein qualitative Priorisierung des Innovationsbedarfs im Expertenkreis ist in dieser Phase des Innovationsprozesses ausreichend.

Der priorisierte Innovationsbedarf wird in *Innovationsaufgaben* übersetzt und vom zuständigen Entscheidungsgremium verabschiedet (**Abbildung 19**, unten, S.37). Innovationsaufgaben bezeichnen dabei den zur Handlungsanweisung bzw. Fragestellung übersetzten Innovationsbedarf. Bei der Formulierung der Innovationsaufgaben ist auf Lösungsneutralität zu achten. Die dokumentierten Innovationsaufgaben bilden die Eingangsgröße für die Methodenmodule *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette (Modul II)* und *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot (Modul III)*.

4.1.3 Fertigungstechnologieorientierte Technologiefrüherkennung als Impulsgeber im Innovationsprozess

Integration of Manufacturing Technology Forecasting

Eine erfolgreiche Technologiefrüherkennung scheitert in der Praxis selten an fehlenden Modellen und Methoden, sondern vielmehr an der Integration ihrer Ergebnisse in nachfolgende Planungsprozesse: „Prüft man die vielfältigen Vorschläge zur Gestaltung der Technologie-Frühaufklärung² unter der Frage, ob sie zur Entstehung von Initiativen für konkrete Innovationsprozesse beitragen, ist man enttäuscht [HAUS07; S.328].“ Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Möglichkeiten erarbeitet, welche die *Beschreibung* und *Weiterverarbeitung* fertigungstechnologischer Technologiefrüherkennungsinformationen ermöglichen. Dabei ergeben sich im Anwendungszusammenhang der *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* folgende wesentliche Herausforderungen für die Technologiefrüherkennung:

- *Technologiebeschreibung (Initiative starten)*: Aufzeigen des Mehrwerts der fertigungstechnologischen Neuerung gegenüber Technologieplanung und Konstruktion & Entwicklung

² Die Begriffe Technologie-Frühaufklärung und Technologiefrüherkennung werden in der Literatur synonym verwendet [HAUS07; S.326].

- *Weiterverarbeitung der Technologiefrüherkennungsinformation (Initiative nachhalten)*: Nutzung der Technologiefrüherkennung als kontinuierlichen Impulsgeber im Planungsprozess

Möglichkeiten zur *Weiterverarbeitung der Technologiefrüherkennungsinformation* im *Technologiepotenzialkalender* und dem dazugehörigen *TPK-Prozess* wurden bereits vorgehalten (Kap. 4.1.1; Kap. 4.1.2). Der Schwerpunkt der folgenden Ausführung liegt somit in der Entwicklung eines Steckbriefs für fertigungstechnologische Technologiefrüherkennungsinformationen. Der Steckbrief muss in hoch verdichteter Form den Mehrwert der fertigungstechnologischen Neuerung seinen (möglichen) Kunden in Technologieplanung, Produktplanung und Entwicklung & Konstruktion aufzeigen. Ziel ist die Initiierung eines „Pull“ auf Kundenseite und somit die Komplettierung des klassischen *Technology Push* der Technologiefrüherkennung.

Der entwickelte Steckbrief für fertigungstechnologische Neuerungen grenzt sich von bestehenden Beschreibungsmodellen der Technologieplanung und des Innovationsmanagements wie folgt ab:

- *Abgrenzung zu Technologieinformationssystemen*: Zielsetzung ist ein erster Impuls über neueste fertigungstechnologische Entwicklungen und nicht die Ausgestaltung von Technologieketten (Kap. 2.3.4).
- *Abgrenzung zum Innovationsmanagement*: „Zweisprachigkeit“ – der Mehrwert der fertigungstechnologischen Neuerung wird sowohl der Technologieplanung als auch der Produktplanung sowie der Konstruktion & Entwicklung vermittelt. Während die Technologieplanung neben der grundsätzlichen Machbarkeit vor allem den Mehrwert der Fertigungstechnologie in Bezug auf Zeit, Kosten und Qualität prüft, hat die Produktplanung, Konstruktion & Entwicklung darüber hinaus insbesondere Interesse an den gestalterischen Möglichkeiten der Fertigungstechnologie.

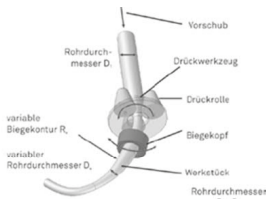
Der anhand eines Beispiels dargestellte Steckbrief für fertigungstechnologische Früherkennungsinformationen wurde in Zusammenarbeit mit Experten aus Konstruktion, Entwicklung und Produktion erarbeitet (**Abbildung 20**, S.41). Er ordnet die Technologieinformation grob in die Handlungsfelder des Unternehmens ein und gibt in hoch aggregierter Form einen Überblick über Funktion und Reife der fertigungstechnologischen Neuerung. Mögliche Vorteile des Technologieeinsatzes für Produktion sowie für Entwicklung und Konstruktion werden in Stichpunkten angeführt. Für eine weiterführende Diskussion und Untersuchung der Fertigungstechnologie werden darüber hinaus interne und externe Referenzen angegeben.

Inkrementelles Rohrumformen.

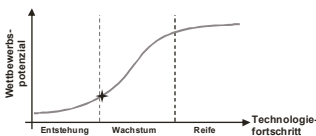
Arbeitskreis Innovation
(12.11.2009)
In Anschluss an
Freiformbiegen genauer
zu untersuchen
WV Q1/2010

Geschäfts-/ Produktfeld	Strateg. Themenfeld	Technologiefunktion (DIN 8580)
Achsen	Kosten	Umformen
Achsgewinde	Qualität	Stoffeig. ändern
Gelenkwelle	Zeit	Trennen
Bremsscheibe	Ökologie	Fügen
	Flexibilität	Beschichten

Visualisierte Inhalte



Reifestufe



Entwicklungsstand: Erfindung wurde international zum Patent angemeldet. Verfahren und Prototyp werden weiterentwickelt.

Schlagnote

Flexible Herstellung räumlich gebogener Rohrstrukturen mit variablen Querschnittsgeometrien

Beschreibung - Vorteile/Innovation

Allgemeine Beschreibung Funktion

Kombinierter Drück- und Freiformbiegeprozess zur Herstellung von Rohren mit dreidimensionaler Kontur und variablen Querschnitten.

Stückzahlengröße / Fertigungsart: Einzel- & Kleinserienfertigung
Referenztechnologie: Innenhochdruckumformen

Vorteile / Innovation Produktionsprozess

- Wirtschaftliche Herstellung
- ab Losgröße 1
- in einem Prozessschritt
- bei hoher Konturgenauigkeit
- Gegebenenfalls Einsparung von Fügeprozessen möglich

Vorteile / Innovation Produktgestaltung

- Fügenerfreie, sanfte Querschnitts- und Wandstärkenübergänge für dreidimensionale Rohrgeometrien
- Darstellung beanspruchungsangepasster Wandstärken möglich
- Außer Verformungsverfestigung kein Festigkeitseinfluss

Bearbeitbares Werkstoffspektrum

Erprobt für Stahl inkl. höher- und hochfester Stähle



Externe Referenzen

IUL

<http://www.iul.eu>

Tel: +49-231-367-8034

Interne Referenzen

Dr. Hans Huber

Hans.Huber@oem.de

Tel.: 56909

Abbildung 20: Technologiesteckbrief für fertigungstechnologische Früherkennungsinformation
Example of a Technology Information Sheet

Die Inhalte des Steckbriefs sind an das Unternehmen anzupassen. Insbesondere die Grobeinordnung der Technologie bzgl. Geschäfts-/Produktfelder sowie strategischer Themenfelder ist unternehmensindividuell zu überarbeiten (**Abbildung 20**, oben rechts, S.41). Sofern die im Technologiesteckbrief dargestellte Information für das Unternehmen von Interesse ist, wird der Steckbrief in den *Technologiepotenzialkalender* übernommen.

4.1.4 Zwischenfazit

Interim Results

Im Zentrum des beschriebenen Moduls *Transparenz und Impulse für das Produktionsnetzwerk* steht der *Technologiepotenzialkalender*, der erforderliche Eingangsinformationen für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken verdichtet, transparent und beherrschbar macht. Ergebnis des Moduls sind aus dem technologischen Gesamtkontext von Kunde, Produkt- und Fertigungstechnologie abgeleitete Innovationsaufgaben. Diese adressieren die Steigerung der Effizienz der etablierten Technologieketten (Effizienzinnovation) und/oder die fertigungstechnologiegetriebene Erschließung neuer Produkte im Leistungsangebot des

Produktionsnetzwerks (Effektivitätsinnovation). Sie bilden den Ausgangspunkt für den weiteren Planungsprozess.

In Abgrenzung zu bestehenden Arbeiten des Roadmapping beschränkt sich der entwickelte *Technologiepotenzialkalender* nicht auf die Ergebnisdokumentation eines vorangegangenen Planungsprozesses [ABEL06; BURG96; BRAN02; BEHR03; MACH06 etc.]. Als den Planungsprozess initiiierender Methodenbaustein gestaltet, schafft er Transparenz über Innovationsaktivitäten im Produktionsnetzwerk und deren Zusammenhänge, lässt mögliche radikale technologische Umbrüche rechtzeitig erkennen und gibt Impulse für fertigungstechnologische Innovation. Wesentliche Neuerungen gegenüber dem in der Technologieplanung etablierten *Technologiekalender* von Schmitz sind die Ergänzung der Kundenperspektive sowie strukturelle und inhaltliche Erweiterungen auf den Ebenen Produkt- und Fertigungstechnologie [SCHM96]:

- *Ebene 1 Kunde:* „Know-why“ – wer sind aktuelle und zukünftige Kunden des Produktionsnetzwerks bzw. seiner fertigungstechnologischen Innovationen? Welche mittel- bis langfristigen Anforderungen stellen die Kunden an das Produktionsnetzwerk?
- *Ebene 2 Leistungspotenzial:* „Know-what“ – mit welchen potenziellen Innovationen im Leistungsangebot gestaltet das Produktionsnetzwerk mittel- bis langfristig den globalen Wettbewerb?
- *Ebene 3 Technologiepotenzial:* „Know-how“ – welche fertigungstechnologischen Innovationspotenziale sieht das Produktionsnetzwerk zur Steigerung seiner Wettbewerbsfähigkeit?

Aktivitäten und Potenziale im Netzwerk werden so in hochkomprimierter Form im Gesamtkontext von Kunde, Produkt und Fertigungstechnologie aufgezeigt. Zeitliche und inhaltliche Inkonsistenzen in den Aktivitäten des Produktionsnetzwerks sowie der daraus resultierende fertigungstechnologische Handlungsbedarf werden transparent und adressierbar. Als „Visitenkarte“ des Produktionsnetzwerks unterstützt der Technologiepotenzialkalender die effiziente Abstimmung und Kommunikation von Kompetenzen, Aktivitäten und Leistungen des Produktionsnetzwerks mit den Prozesspartnern aus Produktplanung, Entwicklung, Einkauf etc. (**Abbildung 21**, S. 43).

Internes Netzwerk

- Produktplanung
- Entwicklung
- Einkauf
- Technologieplanung
- Werke
- ...

Externes Netzwerk

- Universitäten
- Forschungsinstitute
- Lieferanten
- Kooperationspartner
- Tech. Dienstleister
- ...

Technologiepotenzialkalenderprozess



- Erstellung Technologiepotenzialkalender
- Analyse Technologiepotenzialkalender
- Integration der fertigungstechnologieorientierten Technologiefrüherkennung

(Kap. 4.1.2)

Technologiepotenzialkalender

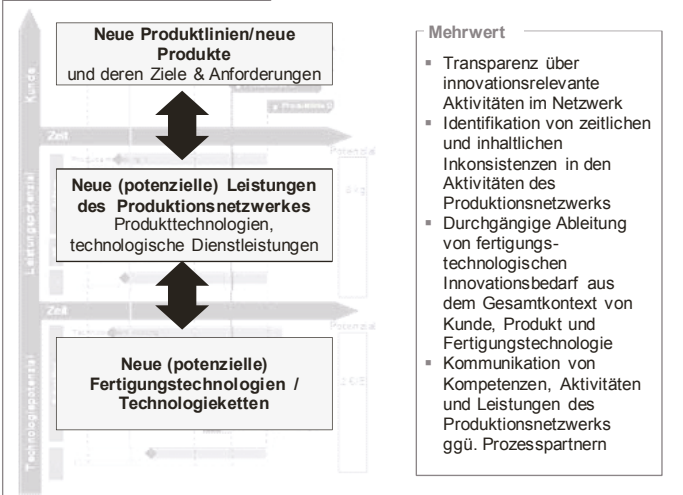


Abbildung 21: Mehrwert des Technologiepotenzialkalenders für die Zusammenarbeit im Netzwerk
Benefits of the *Technologiepotenzialkalender* for Collaboration in Production Networks

Der Mehrwert des Moduls I *Transparenz und Impulse für das Produktionsnetzwerk* liegt dabei nicht nur in den geschilderten Ergebnissen in Form des *Technologiepotenzialkalenders*, sondern auch im *TPK-Prozess* an sich begründet. Dieser ist als Diskussions-, Lern- und Abstimmungsprozess bereits Quelle innovativer Ideen.

4.2 Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologieketten (Modul II)

Developing Efficiency Innovations in the Technology Chain (Module II)

Methodenmodul II adressiert die Realisierung von Effizienzinnovationen in ausgewählten Technologieketten des Produktionsnetzwerks (**Abbildung 22**).

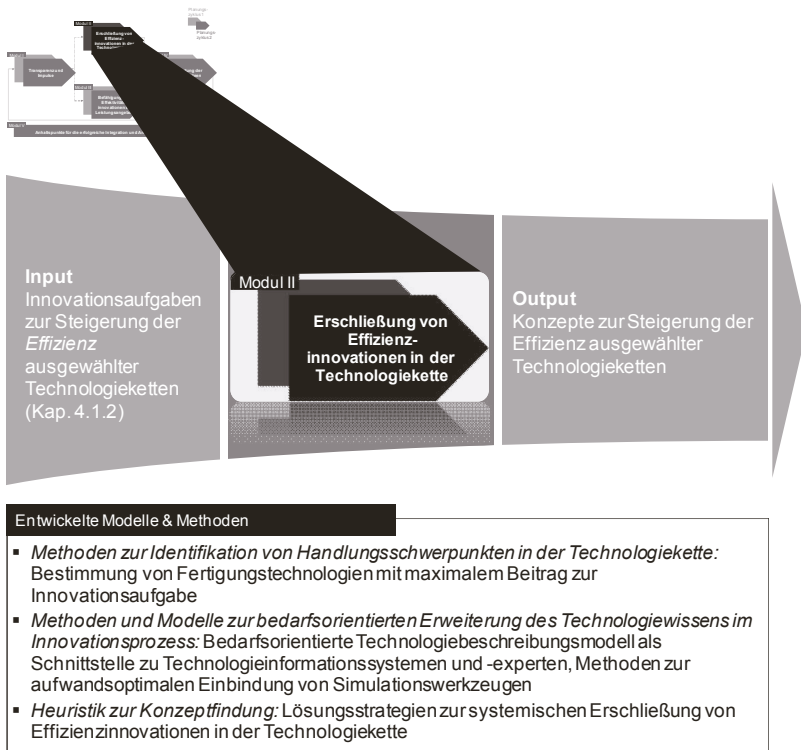


Abbildung 22: Input, Output, Modelle und Methoden des Modul II
Input, Output, Models and Methods of Module II

Eingangsinformation sind die aus einem strategisch/taktischen Effizienzdefizit abgeleiteten Innovationsaufgaben (Kap. 4.1.2). Ergebnis des Moduls sind Konzepte für *Effizienzinnovationen* in der untersuchten Technologiekette.

4.2.1 Identifikation von Handlungsschwerpunkten in der Technologiekette

Focusing Action in the Technology Chain

In Abgrenzung zu den existierenden Arbeiten der Technologieplanung adressiert das Methodenmodul II nicht die Neuplanung, sondern die gezielte Anpassungsplanung etablierter Technologieketten in Hinblick auf die dem Produktionsnetzwerk gegebene

nen Effizienzziele (Kap. 2.4; Kap. 3). Die mit dem Technologiepotenzialkalender aus den Effizienzzielen abgeleitete Innovationsaufgabe ist dazu auf konkrete fertigungstechnologische Fragestellungen zu deduzieren. Diese *Identifikation von Handlungsschwerpunkten in der Technologiekette* erfolgt für die mit der Innovationsaufgabe adressierten Produkte/Bauteile anhand des *Fertigungskostenbeitrags* und des *fertigungstechnologischen Innovationspotenzials* der jeweiligen Technologie innerhalb der Technologiekette. Zur Ermittlung dieser wird dem Technologieplaner ein Methodenbaukasten zur Seite gestellt. In Abgrenzung zu den klassischen Methodenbaukästen der Produktion (KVP, TPM, Six Sigma,...) steht hierbei nicht die Identifikation von Fehlern und Verschwendung im Produktionsprozess im Vordergrund, sondern das Streben nach Innovation in formal problemfreien Prozessen.

Die Identifikation von Fertigungstechnologien mit maximalem *Fertigungskostenbeitrag* erfolgt unter Anwendung der *ABC-Analyse* (**Abbildung 23**, oben, S.46). Bei der *ABC-Analyse* handelt es sich um ein bewährtes Analyseverfahren zur Schwerpunktbildung [HADE00; S.3; EHRL07, S.349f]. Übertragen auf die vorliegende Problemstellung erfolgt mit der ABC-Analyse eine Einteilung gemäß folgendem Schema:

- *A-Anteil*: Kleine Anzahl an Fertigungstechnologien mit hohem/sehr hohem Fertigungskostenbeitrag
- *B-Anteil*: Mittelgroße Anzahl an Fertigungstechnologien mit mittlerem Fertigungskostenbeitrag
- *C-Anteil*: Große Anzahl an Fertigungstechnologien mit geringem Fertigungskostenbeitrag

Als idealtypisch für die *ABC-Analyse* gilt die 80/20 Regel, d. h. mit 20 % der Fertigungstechnologien werden 80 % des Fertigungskostenbeitrags für das ausgewählte Bauteil erzielt (A-Anteil). Von besonderem Interesse für die weitere Bearbeitung sind folglich die *A-Technologien*. Die Fertigungskostenbeiträge in der Technologiekette zur Herstellung des ausgewählten Bauteils/Produktes können hierzu aus dem PPS- oder ERP-System ausgelesen werden.

Da maximaler Fertigungskostenbeitrag bzgl. der Innovationsaufgabe nicht gleich maximalem Innovationspotenzial ist, wird die *ABC-Analyse* der Technologieketten durch eine Reihe von Indikatoren zur Abschätzung des Innovationspotenzials ergänzt (**Abbildung 23**, unten, S.46). Die Beurteilung der Fertigungstechnologien bzgl. ihres Innovationspotenzials beginnt bei den *A-Technologien*, d. h. bei den Technologien mit dem größten möglichen Fertigungskostenbeitrag für die Innovationsaufgabe.

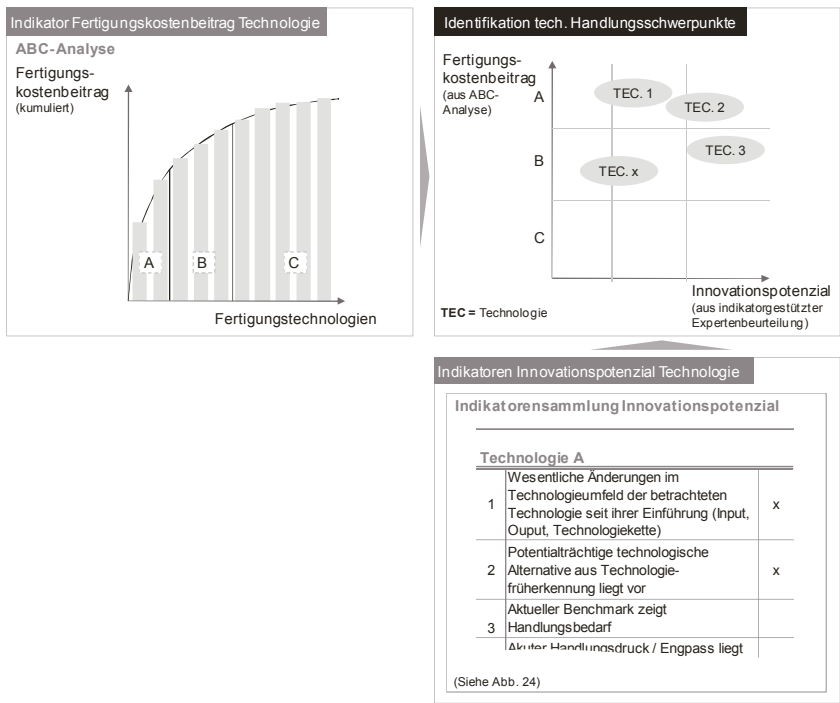


Abbildung 23: Identifikation fertigungstechnologischer Handlungsschwerpunkte
Focusing Action in the Technology Chain

Die *Indikatorensammlung Innovationspotenzial* wurde empirisch-induktiv aus Projekterfahrungen des Autors und der Befragung von Projektleitern unterschiedlichster Innovationsprojekte in der Komponentenproduktion eines deutschen Automobilherstellers erstellt. Die ermittelten Innovationspotenzial-Indikatoren sollen kurz ausgeführt werden (**Abbildung 24**). Unter *wesentlichen Änderungen im Technologieumfeld* der betrachteten Fertigungstechnologie werden beispielsweise deren Nutzung für eine neue Bearbeitungsaufgabe, wesentliche Änderungen auf Kunden- und Lieferantenseite mit Auswirkungen auf Bauteileigenschaften sowie die Substitution von Maschinen/wesentlichen Fertigungsmitteln in der Technologiekette verstanden. Die Erfahrung zeigt: Wenn eine Maschine/wesentliches Fertigungsmittel seinem ursprünglichen Zweck entbunden bzw. einer neuen Aufgabe zugeführt wird, dann wird auch der Möglichkeitsraum fertigungstechnologischer Innovation neu definiert. Ebenso ermöglicht die Substitution/Erneuerung und Weiterentwicklung von Maschinen im unmittelbaren Umfeld der betrachteten Fertigungstechnologie oft vollständig neue Möglichkeiten für technologische Innovation. Impuls und Motor für Innovation können darüber hinaus potentialträchtige *Alternativen aus der fertigungstechnologieorientier-*

ten *Technologiefrüherkennung* oder ein oft auch informelles internes oder externes *Technologiebenchmarking* sein (Kap. 4.1.3). Ein weiterer Indikator für Innovationspotenzial ist *akuter Handlungsdruck* in Bezug auf die betrachtete Fertigungstechnologie. Hintergrund hierfür mag jedoch vor allem die damit verbundene hohe Managementaufmerksamkeit und der verstärkte Einsatz personeller und finanzieller Ressourcen sein. Insbesondere die Analyse und Optimierung von B- und C-Technologien geht oft in der Hektik des laufenden Produktionsbetriebs unter. B- und C-Technologien besitzen folglich häufig ein überdurchschnittlich hohes Maschinenalter und sind in Bedienung und Instandhaltung aufwandsintensiv. Die Indikatoren *letzte umfassende Potenzialuntersuchung*, *Maschinenalter* und *Maschinenbedienung & Instandhaltung* weisen auf das hohe Innovationspotenzial unter den genannten Rahmenbedingungen hin. Hinter dem Indikator *geringe/schwankende Auslastung* steht das Innovationspotenzial neuer flexibler Fertigungsverfahren, innovativer Steuerungskonzepte und der generischen Verfahren des *Rapid-Manufacturing*. Einen hohen Flexibilitätsbedarf vorausgesetzt stellen diese Technologien oft eine wirtschaftlichere Alternative zur konventionellen Fertigungstechnik dar.

Indikatorensammlung Innovationspotenzial Fertigungstechnologie A

1	Wesentliche Änderungen im Technologieumfeld der betrachteten Fertigungstechnologie seit ihrer Einführung (Input, Output, Technologiekette)	x
2	Potentialträchtige technologische Alternative aus der fertigungstechnologieorientierten Technologiefrüherkennung liegt vor	x
3	Aktueller Technologiebenchmark zeigt Handlungsbedarf	
4	Akuter Handlungsdruck/Engpass liegt für die betrachtete Fertigungstechnologie vor (Prozessfähigkeit, Verfügbarkeit, Engpass für geforderte Ausbringungsmenge, ...)	
5	Letzte umfassende Potenzialuntersuchung zur Fertigungstechnologie liegt mehr als drei Jahre zurück	x
6	Alter der Maschine(n) der betrachteten Fertigungstechnologie liegt über dem durchschnittlichen Maschinenalter des Produktionsnetzwerks	x
7	Maschinenbedienung und -instandhaltung aufwendig/personalintensiv	
8	Geringe/stark schwankende Auslastung	
	Summe	4

Abbildung 24: Indikatoren Innovationspotenzial für Beispieltechnologie A
Assessment of the Innovation Potential of Technology A

Einen abschließenden, gesamthaften Blick auf die Wertbeiträge der Fertigungstechnologien zur Innovationsaufgabe und auf ihre Innovationspotenziale ermöglicht das Portfolio *Identifikation technologischer Handlungsschwerpunkte* (**Abbildung 23**, oben, S.46). Fertigungstechnologien mit hohem Fertigungskostenbeitrag sowie mit hohem Innovationspotenzial sind entsprechend zu priorisieren.

4.2.2 Modelle und Methoden zur bedarfsorientierten Erweiterung des Technologiewissens im Innovationsprozess

Methods for Integration of technological knowledge in the innovation process

Eine erfolgreiche Generierung fertigungstechnologischer Innovation erfordert die Einbindung von aktuellem, fertigungstechnologischem Wissen. Das Wissensmanagement differenziert dabei zwischen expliziten bzw. formalisierbaren und impliziten bzw. personenbezogenem Wissen. Explizites Wissen ist einfach kommunizierbar und zeitlich stabil. Es eignet sich daher gut zur Dokumentation in Technologieinformationssystemen, Patenten, Formeln etc. Implizites Wissen hingegen beinhaltet kognitive Elemente wie Erfahrung, Lerneffekte, Interpretationskraft und Kreativität. Es entspricht den individuellen Fähigkeiten des Technologen und ist deshalb nur mit sehr hohem Aufwand und zu einem kleinen Anteil explizierbar [PROS10, S.124]. Fertigungstechnologische Innovation als kreativ-konzeptioneller Problemlösungsprozess erfordert explizites wie implizites fertigungstechnologisches Wissen. Als Schnittstelle zu diesen beiden Wissensquellen wird das *Bedarfsorientierte Technologiebeschreibungsmodell* vorgeschlagen. Dafür werden zunächst Möglichkeiten, Grenzen und Schnittstellen existierender Technologiedatenbanken und -informationssysteme näher untersucht. Geschlossen wird das vorliegende Teilkapitel mit Ausführungen zur aufwandsoptimalen Einbindung von Simulationswerkzeugen in den Innovationsprozess. Die gezielte Einbindung von aktuellem fertigungstechnologischem Wissen aus diversen Kanälen ist somit sichergestellt.

4.2.2.1 Möglichkeiten, Eingangsgrößen und Grenzen von Technologiedatenbanken und -informationssystemen

Seit der Einführung der ersten Technologiedatenbanken in den 70er Jahren wurden diese bis heute zu umfassenden fertigungstechnischen Informations- und Wissensmanagementsystemen ausgebaut (Kap. 2.3.4). Sie bieten die Möglichkeit, fertigungsmittelneutrale Informationen zu Fertigungstechnologien und bearbeitbaren Werkstoffen sowie fertigungsmittelspezifische Informationen zu Maschine, Werkzeugen, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Fertigungsparametern abzubilden. Neuere Systeme erlauben darüber hinaus die Verknüpfung mit Formfeatures und geben erste Indikatoren bzgl. Wirtschaftlichkeit und Ökologie der Fertigungstechnologien. Durch die Integration von Algorithmen zur Optimierung und Bewertung wird darüber hinaus versucht, eine direkte Weiterverarbeitung der technologischen Daten zu realisieren.

Wesentliche Eingangsgrößen existierender Technologieinformationssysteme und somit für die Entwicklung des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* explizit zu berücksichtigen, sind die DIN 8580 oder das Anwendungsfeld der Fertigungstechnologie sowie Angaben zum zu bearbeitenden Werkstoff, zur Werkstofffamilie oder zur Werkstoffgruppe (**Abbildung 25**, S.49) [DIN03a; SCHM96; KLOC98; FALL00; WALK03; GRAN10; MANT10; STAR98]. Darüber hinaus sind alle aktuellen

Technologieinformationssysteme mit einer Freifeldsuche ausgestattet, die das Durchsuchen des gesamten Datenbestandes nach bestimmten Schlüsselwörtern ermöglicht. Eine anwenderspezifische Eingrenzung der Suche ist so problemlos möglich.

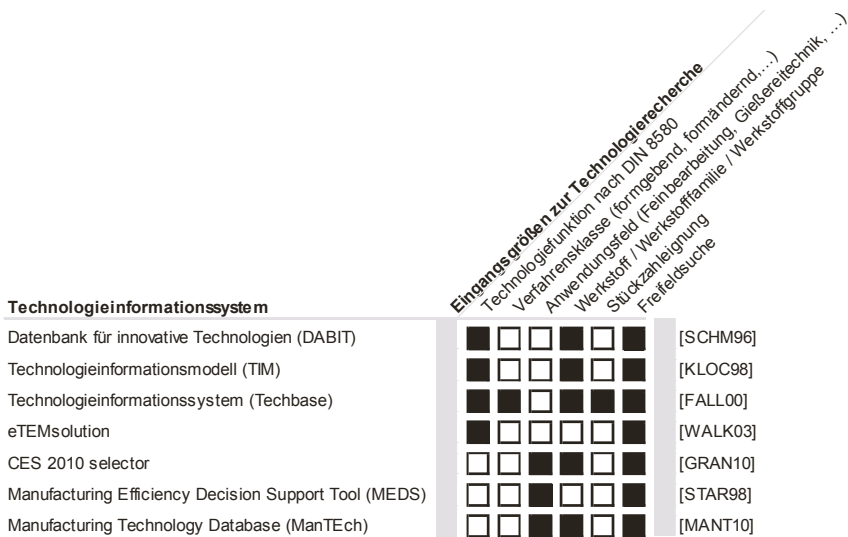


Abbildung 25: Technologieinformationssysteme und ihre wesentlichen Eingangsgrößen
Technology Information Systems and Important Input Parameters

Der geringe Verbreitungsgrad der Systeme in der Praxis legt die Vermutung nahe, dass diese durch den zunehmenden Versuch der Integration impliziter Wissensinhalte an ihre Effizienzgrenzen stoßen. *Probst* spricht in diesem Zusammenhang auch von den Grenzen der Explizierung [PROS10, S.124]. Trotz hohen Aufwands wird ein großer und wichtiger Teil des Wissens von Technologieexperten nie vollständig explizierbar sein. Darüber hinaus können die Systeme der Dynamik technologischer Entwicklungen nur bedingt folgen [WEGN07, S.13]. Ihre Nutzung im Innovationsprozess ist folglich durch die Einbindung weiterer Wissensquellen zu ergänzen.

4.2.2.2 Entwicklung des Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells: Schnittstelle zu Technologieexperten und Technologieinformationssystemen Methodical Interface to Experts and Technology Information Systems

Mit dem *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodell* wird eine Schnittstelle geschaffen, die die gezielte Abfrage technologischen Wissens aus Technologieinformationssystemen erlaubt, aber den Technologieexperten als Wissensquelle mit einbezieht. Wesentliche Eingangsgrößen existierender Technologieinformationssysteme werden berücksichtigt und für den Technologieexperten um anwendungsspezifische Information ergänzt. Die Kenntnis dieses unternehmensspezifischen Anwendungskontextes erleichtert dem Experten die Einordnung der fertigungstechnologischen Innovationsaufgabe und somit die gezielte Generierung von Konzeptalternativen.

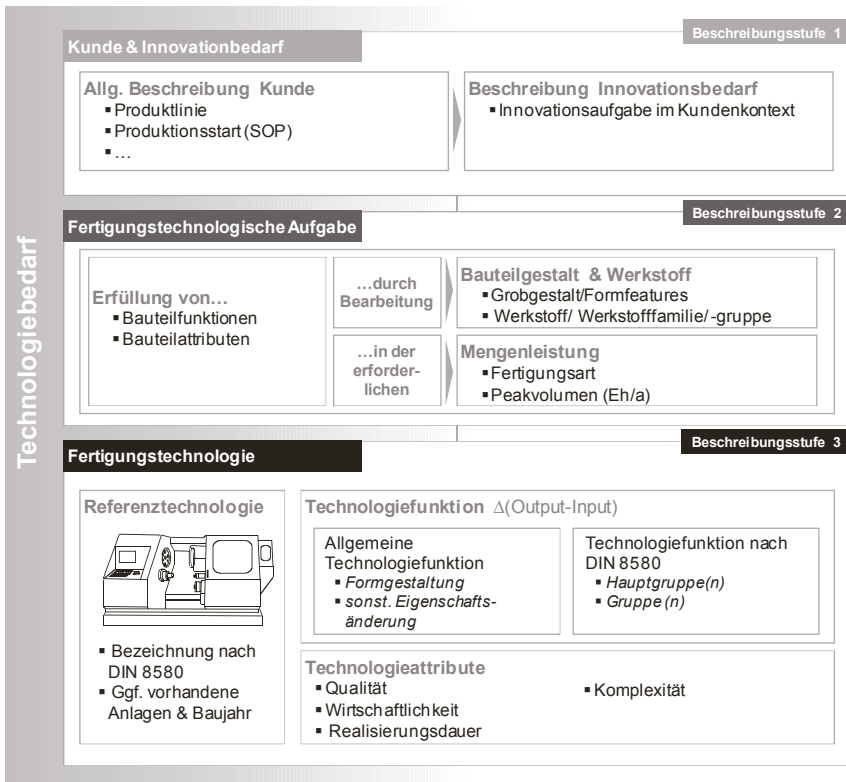


Abbildung 26: Die drei Ebenen des Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells
The Three Levels of the Technology Requirement Model

Das entwickelte Technologiebeschreibungsmodell artikuliert den technologischen Bedarf über die drei Ebenen *Kunde & Innovationsbedarf*, *Fertigungstechnologische Aufgabe* und *Fertigungstechnologie* (**Abbildung 26**, S.50). Die Beschreibungstiefe bzw. der Detaillierungsgrad der Technologiebeschreibung nimmt dabei in der dargestellten Übersicht von oben nach unten und von links nach rechts zu.

Beschreibungsstufe 1: Kunde & Innovationsbedarf

Mit der ersten Beschreibungsstufe *Kunde & Innovationsbedarf* des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* wird der (latente) Innovationsbedarf des Kunden inhaltlich und zeitlich beschrieben (**Abbildung 26**, oben, S.50). Die in diesem Zusammenhang gestellte Frage lautet wie folgt: Wer (Kunde/Produktlinie) erwartet was (Ziele & Anforderungen) bis wann (Produktionsanlauf/SOP)? Zur Beantwortung der Frage wird der entwickelte *Technologiepotenzialkalender* herangezogen (Kap. 4.1.1). Dieser gibt in seiner ersten Ebene *Kunde* einen Überblick über alle Produktlinien und deren Ziele und Anforderungen. Mit den entwickelten Analysewerkzeugen ermöglicht der Technologiepotenzialkalender die Ableitung von Innovationsbedarf und dessen Dokumentation in Innovationsaufgaben (Kap. 4.1.2, *TPK-Analyse*). Diese ergeben sich aus der Plan-Zielabweichung zwischen Kundenanforderungen und den aktuellen/geplanten Innovationsaktivitäten des Produktionsnetzwerks.

Beschreibungsstufe 2: Fertigungstechnologische Aufgabe

In der zweiten Beschreibungsstufe des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* wird der technologische Bedarf durch die erwartete *Technologieleistung* bzw. durch das erwartete Fertigungsergebnis in Form eines Bauteils umschrieben (**Abbildung 26**, mittig, S.50). Diese indirekte, bauteilbezogene Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs ist in der Praxis ein häufig eingesetztes Instrument bei der Grobrecherche alternativer Fertigungstechnologien durch Technologieexperten. Sie wird in dieser zweiten Beschreibungsstufe über die Beschreibung von *Bauteilhauptfunktionen & -attributen*, *Bauteilgestalt & Werkstoff* sowie über die Beschreibung der erforderlichen *Mengenleistung* systematisiert. Diese drei Beschreibungsfelder der *Beschreibungsstufe 2 „Fertigungstechnologische Aufgabe“* werden im Folgenden genauer erläutert.

Beschreibung der Bauteilhauptfunktionen & -attribute

Sinn und Zweck der Beschreibung der Bauteilhauptfunktionen (z. B. Drehmomentübertragung) und Bauteilattribute (z. B. Laufruhe/Akustik) ist die Abstraktion fertigungstechnologischer Anforderungen zur Vergrößerung des Lösungsraums. Diese Abstraktion erfolgt in bestehenden Technologiebeschreibungsmodellen der Technologieplanung bisher nicht (Kap. 2.3.3; Kap. 2.3.4; Kap. 5.2.2.1). Die Abstraktion der fertigungstechnologischen Anforderungen auf die Bauteilhauptfunktionen und

-attribute kann im Innovationsprozess jedoch radikal neue fertigungstechnologische Konzepte provozieren. Außerdem ermöglicht sie das Hinterfragen komplexer Produktionssysteme und -systemanforderungen.

Zur Modellierung und Strukturierung von Bauteilfunktionen wurden in der Konstruktionslehre verschiedene Methoden entwickelt. Für einen Überblick zur Funktionsmodellierung und -strukturierung wird auf *Ehrlenspiel* und die *VDI-Richtlinie 2222* verwiesen [VDI97; EHRL07, S. 392ff]. Die dort beschriebenen Methoden gehen in Umfang und Detaillierungsgrad jedoch über die für die vorliegende Anwendung notwendige Beschreibungstiefe hinaus. Hier genügt in der Regel bereits ein Funktionsbaum mit Haupt- und Nebenfunktionen des zu fertigenden Bauteils. Die Funktion des Bauteils kann im Sinne der Systemtheorie über Bauteilattribute, wie z. B. Gewicht, Anmutung und Zuverlässigkeit, weiter detailliert werden (Kap. 4.1.1). Die Bauteilattribute beschreiben die Art und Weise der Funktionserfüllung des Bauteils näher. Einen Überblick über mögliche Bauteilattribute eines technischen Produktes gibt ebenfalls *Ehrlenspiel* [EHRL07, S.28]. Bauteilfunktion und -attribute geben bereits einen ersten Orientierungsrahmen für die Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs. Dieser kann über die Beschreibung von *Bauteilgestalt* und *Werkstoff* weiter konkretisiert werden (**Abbildung 26**, mittig, S.50).

Beschreibung von Bauteilgestalt und Werkstoff

Die *Grobgestalt* beschreibt die geometrische Gestalt des Bauteils unter Vernachlässigung nicht-funktionsrelevanter Einzelheiten [FALL00, S.41]. Dazu können Bauteilmodelle aus CAD oder featurebasierte Beschreibungsansätze herangezogen werden [EHRL07, S.655f]. Diese gehen in ihrer Beschreibungstiefe in der Regel jedoch deutlich über den für die Abfrage von Technologieinformationssystemen notwendigen Informationsgehalt hinaus. Die technische Bezeichnung des Bauteils, ergänzt um Skizzen oder Fotos sowie um semantische Information zu Abmessungen, Makro- und Mikrogeometrie der wesentlichen Formelemente ist für die Abfrage im Normalfall ausreichend.

Der *Werkstoff* ist wesentliches Kriterium zur Eingrenzung des technologischen Lösungsraums. Auch die Nutzung von Technologieinformationssystemen erfordert in der Regel Angaben zum Werkstoff (Kap. 4.2.2.1). Wie bereits bei der Beschreibung der Gestalt des Bauteils ist dabei auf die passende Beschreibungstiefe zu achten. Das Werkstoffmodell von *Fischer* bietet dazu eine für die Anwendung gut geeignete „Beschreibungshierarchie“ (**Abbildung 27**, S.53).

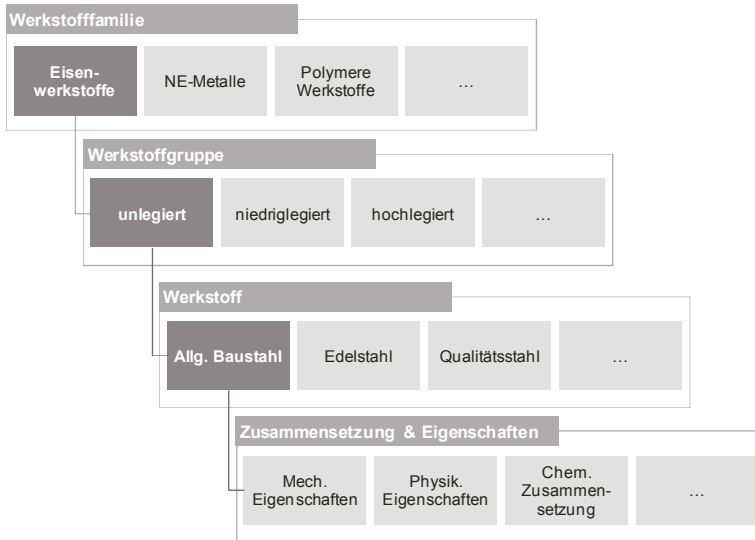


Abbildung 27: Beschreibungshierarchie Werkstoff in Anlehnung an Fischer [FISC95]
Material Hierarchy According to Fischer [FISC95]

Durch die Hierarchie des Werkstoffmodells wird die aufgabenindividuelle und strukturierte Detaillierung der Werkstoffangaben ermöglicht [FISC95]. Der technologische Lösungsraum kann in Abhängigkeit von der in der Technologiekette vorliegenden Werkstoffflexibilität sinnvoll eingegrenzt werden.

Beschreibung der Mengenleistung

Neben der Fähigkeit der Technologie, eine definierte Bauteilgestalt darzustellen, ist für einen erfolgreichen Einsatz im Produktionsbetrieb ihre *Stückzahlleistung* zu prüfen (**Abbildung 26**, mittig, S.50). Einen ersten Anhaltspunkt dazu bildet die Eignung der Technologie für die benötigte Fertigungsart. Es wird zwischen Einmal-, Einzel-/Kleinserien-, Serien- und Massenfertigung unterschieden [KÄMP07, S.56f]. Über die Fertigungsart hinaus wird für die Beschreibung der benötigten Mengenleistung in der industriellen Praxis häufig das Peakvolumen pro Jahr und Monat im branchenüblichen Arbeitszeitmodell angegeben.

Der Vorteil der dargestellten indirekten, ausschließlich bauteilbezogenen Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs im Rahmen der *Beschreibungsstufe 2*, liegt in der gedanklichen Loslösung von bestehenden Restriktionen in der etablierten Technologiekette. Fertigungstechnologien werden bzgl. ihrer prinzipiellen Eignung geprüft, unabhängig von ihrer letztendlichen Kombination und Anordnung in der Technologiekette. Diese Form der Beschreibung des technologischen Bedarfs ist in der Praxis der Technologieplanung ein häufig isoliert eingesetzter Teilaspekt zur Re-

cherche neuer Technologien. Sie ist in der Regel deutlich einfacher als die semantische Beschreibung der Technologiefunktion (siehe Beschreibungsstufe 3). Auch ist eine auf diese Weise angestoßene Technologierecherche lösungsneutral, d. h. sie erfolgt vollkommen losgelöst von den zur Herstellung der Komponente etablierten Technologien und Technologieketten. Seminaritel wie „Innovationen rund ums Kegelrad“ oder „Rohrherstellung und -verarbeitung“ machen sich diesen Aspekt zunutze. Sie geben einen technologieübergreifenden Überblick über fertigungstechnologische Neuerungen für das jeweilig herzustellende Bauteil. Verschiedene technologische Funktionen unterschiedlicher Hauptgruppen, wie z. B. des Trennens, des Umformens und des Fügens, sind Gegenstand der Diskussion.

Beschreibungsstufe 3: Fertigungstechnologie

In der dritten Beschreibungsstufe *Fertigungstechnologie* wird der fertigungstechnologische Bedarf weiter detailliert und direkt über die *Referenztechnologie* der vorliegenden Fertigungsaufgabe sowie über die benötigten *Technologiefunktion(en)* und *-attribute* beschrieben (**Abbildung 26**, unten, S.50). In Erweiterung bestehender Ansätze der Technologiebeschreibung wird das Beschreibungselement *Referenztechnologie* eingeführt und eine phasenadäquate Beschreibung der Technologiefunktionen und -attribute für die Konzeptphasen des Innovationsprozesses vorgeschlagen (Kap. 2.3.3; Kap. 2.3.4). Die entwickelte Beschreibungslogik erlaubt die Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs im Kontext der bestehenden Technologiekette, ohne den Lösungsraum zu stark einzuschränken. Das Potenzial neuer Konzepte wird somit erhöht. Die genannten drei Beschreibungsfelder *Referenztechnologie*, *Technologiefunktion* und *Technologieattribute* der *Beschreibungsstufe 3 „Fertigungstechnologie“* werden im Folgenden erläutert.

Referenztechnologie

Im Sinne der vorliegenden Arbeit ist die *Referenztechnologie* die für die zu untersuchende Bearbeitungsaufgabe im Produktionsnetzwerk oder in der Branche etablierte Fertigungstechnologie. Sie ist für ihre Bearbeitungsaufgabe weit verbreitet und/oder der Industriestandard. Sie ist im *Technologielebenszyklus* der Reife- oder Altersphase zuzuordnen (Kap. 2.2.2). Ihre fertigungstechnologischen Funktionen und -attribute, ihre Stärken und Schwächen sind in Expertenkreisen bekannt. Sie ist in gewisser Weise Synonym für die fertigungstechnologische Aufgabe und eignet sich deshalb gut als erster Anhaltspunkt für die Suche nach technologischen Alternativen. Ferner ist sie das Maß, an dem sich mögliche fertigungstechnologische Alternativen messen müssen. Die *Referenztechnologie* wird im *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungmodell* gemäß der Untergruppen der DIN 8580 abgebildet [DIN03a]. Gegebenenfalls bereits im Produktionsnetzwerk für die Bearbeitungsaufgabe einge-

setzte Maschinen der Referenztechnologie sind inklusive ihres Baujahres mit anzuführen.

Technologiefunktion

Auch wenn die *Referenztechnologie* die gesuchte(n) technologische(n) Hauptfunktion(en) bereits implizit abbildet, wird die explizite Formulierung dieser Funktionen dringend empfohlen. Sie erleichtert die Suche nach technologischen Konzeptalternativen, losgelöst von der bestehenden *Referenztechnologie* und ohne sich dabei in deren technischen Details zu verlieren.

Die fertigungstechnologische Funktion eines Systems kann im Sinne der Systemtheorie über die Zustandsänderung von Eingangs- zu Ausgangszustand eines Bauteils beschrieben werden [PATZ82, S. 64; ROPO99, S.75ff]. Unter *Technologiefunktion* wird in diesem Sinne die von der Technologie dargestellte Tätigkeit wie z. B. die Formveränderung eines Bleches verstanden. Diese kann über makro- und mikrogeometrische Angaben näher beschrieben werden. Das der Technologie zugrunde liegende physikalische oder chemische Prinzip ist hingegen nicht Gegenstand der Betrachtung.

Die *allgemeine Technologiefunktion* wird in der vorliegenden Arbeit folglich als eine dem technologischen Zweck entsprechende Veränderung des Bauteils definiert. Diese Output-Input Veränderung des Bauteils kann sich auf seine *Form* und/oder sonstige *Eigenschaften* beziehen (**Abbildung 28**).

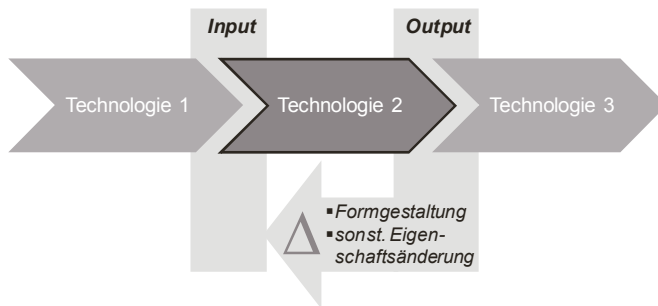


Abbildung 28: Beschreibung der Technologiefunktion über Formgestaltung und sonstige Eigenenschaftsänderung
Specification of the Technology Function

Die Funktionsgruppe *Formgestaltung* bildet die erste Funktionsgruppe zur Beschreibung der *Allgemeinen Technologiefunktion* (**Abbildung 29**, S.56). Sie integriert die von *Fallböhrer* definierten Technologieklassen *Formgeben*, *Formverändern* und *Fügen* zu einer Funktionsgruppe [FALL00, S. 73]. Hinter der Funktion *Formgeben* stehen Fertigungsverfahren zum Generieren der Grobgestalt des Bauteils. Sie sind in

der DIN 8580 den Hauptgruppen Urformen, Umformen und Trennen zuzuordnen [DIN03a]. Die Auswahl des formgebenden Verfahrens ist entscheidend für die gesamte Technologiekette. Sie übt wesentlichen Einfluss auf deren weitere Gestaltung aus. Die Funktion *Formverändern* umfasst Fertigungsverfahren zur Veränderung der durch das formgebende Verfahren definierten Grobgestalt. Formverändernde Verfahren beschränken sich innerhalb der DIN 8580 auf die Hauptgruppen Umformen und Trennen. Die Funktion *Fügen* bildet die letzte Funktion der Funktionsgruppe *Formgestaltung*. Sie umfasst Verfahren zum Verbinden von zwei oder mehreren Einzelteilen und ist innerhalb der DIN 8580 der Hauptgruppe Fügen zuzuordnen. Typische Verfahren der Funktionsgruppe *Formgestaltung* sind z. B. das Spritzgießen (formgebend), das Drehen (formverändernd) und das Schrauben (fügend).

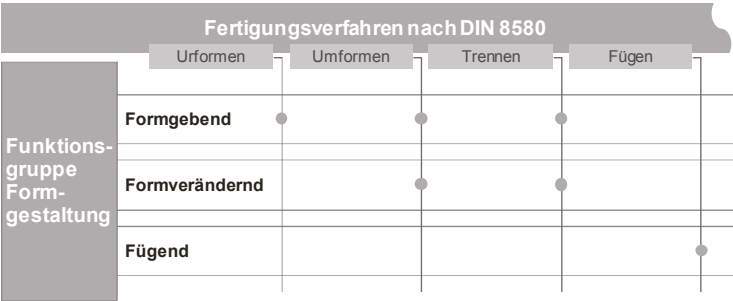


Abbildung 29: Funktionsgruppe Formgestaltung
Functional Group of Shaping and Forming

Die durch die Fertigungstechnologie herbeigeführte Output-Input Veränderung des Bauteils kann sich neben der Form auch auf andere Eigenschaften des Bauteils beziehen. Die Funktionsgruppe *sonstige* Eigenschaftsänderung bildet somit das zweite Cluster für die Beschreibung der allgemeinen Technologiefunktion (**Abbildung 30**).

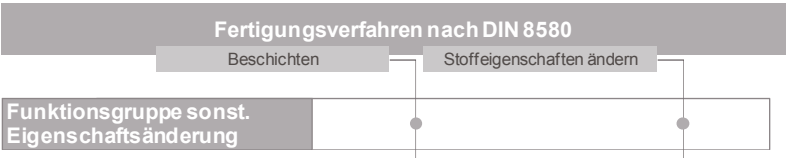


Abbildung 30: Funktionsgruppe sonstige Eigenschaftsänderung
Functional Group of Property and Characteristics

Sonstige Eigenschaftsänderungen am Bauteil können z. B. durch die Fertigungsverfahren *Chemisches Beschichten* oder *Härten* herbeigeführt werden. Sie sind inner-

halb der DIN 8580 den Hauptgruppen *Beschichten* und *Stoffeigenschaft ändern* zuzuordnen [DIN03a].

Der Vorteil der Beschreibung des technologischen Bedarfs über die Funktionsgruppen *Formgestaltung* und *sonstige Eigenschaftsänderung* liegt in seiner Generik. Sie ermöglicht eine beliebig genaue Detaillierung der gesuchten fertigungstechnologischen Funktion (Formgestaltung, sonst. Eigenschaftsänderung), ohne dabei die technologische Lösungsrichtung vorwegzunehmen. Sie fördert somit einen technologischen Leistungsvergleich, der sich über die einzelnen Hauptgruppen der DIN 8580 erstreckt. Damit wird Raum für neue fertigungstechnologische Konzepte geschaffen, losgelöst von der aktuellen *Referenztechnologie*.

Die Funktionsgruppen *Formgestaltung* und *sonstige Eigenschaftsänderung* lassen sich über die Hauptgruppen und Gruppen der DIN 8580 weiter spezifizieren. So kann beispielsweise die Funktionsgruppe *Formgestaltung* in der Technologieklasse *Formverändern* über die Hauptgruppe *Trennen* und die Gruppe *Spanen mit geometrisch bestimmtem Schneiden* fallspezifisch weiter detailliert werden. Die Funktionsgruppen nach DIN 8580 sind im deutschen Sprachraum Gliederungsstandard für Technologieinformationssysteme und auch aus diesem Grund elementarer Bestandteil der dritten Beschreibungsstufe des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* (**Abbildung 25**, S. 49).

Wie bereits definiert, wird in der vorliegenden Arbeit unter Technologiefunktion eine dem technologischen Zweck entsprechende Output-Input-Veränderung des Bauteils verstanden. Für eine weitere Detaillierung der technologischen Funktion wären somit sowohl der Eingangs- als auch der gewünschte Ausgangszustand des Bauteils für den jeweiligen Fertigungsschritt im Detail zu beschreiben. Für die Beschreibung des technologischen Bedarfs in den Konzeptphasen des Innovationsprozesses ist die Beschreibung der Technologiefunktion gemäß der vorgestellten Logik allerdings ausreichend. Sollte im Einzelfall dennoch eine detaillierte Beschreibung der Output-Input-Veränderungen des Bauteils erforderlich sein, kann dazu auf bestehende Modelle zur Beschreibung der Bauteilgestalt zurückgegriffen werden [FALL00; FISC95; KNHE05].

Technologieattribute

Analog zur Bauteilhauptfunktion kann die Technologiefunktion über Attribute weiter detailliert werden. Diese beschreiben die Art und Weise der Funktionserfüllung bzw. der Formgestaltung oder sonstigen Eigenschaftsänderung des Bauteils. Dazu können im Kontext der Planung fertigungstechnologischer Innovation die Attribute Qualität, Wirtschaftlichkeit, Realisierungsdauer und Komplexität herangezogen werden (Kap. 4.4).

4.2.2.3 Methoden zur aufwandsoptimalen Einbindung von Simulationswerkzeugen

Die Einbindung von Simulationswerkzeugen in den Innovationsprozess bietet, über die Einbindung von Technologieinformationssystemen und -experten mit dem Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmo­dell hinaus, Erklärungsmodelle für fertigungstechnologische Phänomene und Machbarkeiten. Sie schafft somit die Möglichkeit zur Erweiterung der fertigungstechnologischen Wissensbasis im Innovationsprozess. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zunächst die aktuellen Möglichkeiten der Simulation in der Fertigungstechnik diskutiert und anschließend Methoden für eine gezielte und aufwandsoptimale Einbindung von Simulationswerkzeugen im Innovationsprozess entwickelt.

Simulation wird in der Fertigungstechnik zur Beurteilung technischer Machbarkeiten, zur beanspruchungsgerechten Auslegung und Optimierung von Bauteilen und zur Technologie-/Prozessoptimierung eingesetzt. Numerische Methoden, speziell die FEM-Methode, haben sich dabei zur Modellierung physikalischer Vorgänge durchgesetzt. In Anwendungsfeldern wie dem Umformen und dem Gießen ist die Simulation bereits integraler Bestandteil industrieller Produktentstehungsprozesse. In anderen Anwendungsfeldern wie dem Spanen, dem Abtragen, dem Fügen, dem Beschichten und der Wärmebehandlung befindet sich die Simulation in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und wird nur teilweise industriell eingesetzt. In Summe ergibt sich für die Fertigungstechnik somit ein sehr inhomogenes Bild der „Simulationslandschaft“, dass geprägt ist von einer Vielzahl spezialisierter fertigungstechnologischer Anwendungen. Die Kopplung von Simulationswerkzeugen ist dabei nur eingeschränkt möglich und beschränkt sich im industriellen Umfeld auf Nischen wie z. B. die Blechumform-Crash-Kopplung. Aktuelle Forschungsansätze greifen diese Problematik auf und versuchen im Sinne eines „Virtuellen Produktionssystems“, Werkzeuge und Schnittstellen für die übergreifende Simulation ganzer Technologieketten zu entwickeln [SCHZ11, S.257ff]. Die dabei verfolgten Entwicklungsrichtungen zielen auf eine Erhöhung der Simulationsbreite und/oder der Simulationstiefe (**Abbildung 31**, S.59). Eine Erhöhung der *Simulationsbreite* entspricht hierbei einer sequenziellen Kopplung von fertigungstechnologischen Simulationswerkzeugen bis hin zur durchgängigen Simulation von Technologiekette und Bauteileinsatzverhalten. Die Erhöhung der *Simulationstiefe* zielt auf die Verfeinerung eines fertigungstechnologischen Modells und die Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen. Beispielsweise kann für das Umformen neben Platine (Bauteil), Werkzeug und Werkstoff unter anderem auch das Verhalten der Maschine, die Reibung und die Temperatur betrachtet werden. So wird versucht, die Qualität des Simulationsergebnisses zu verbessern.

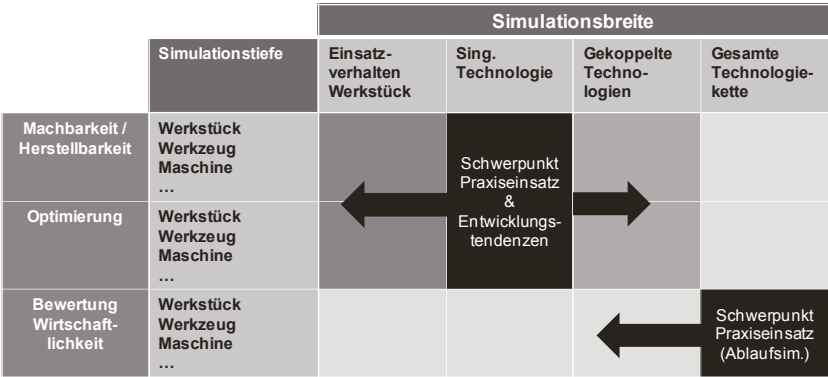


Abbildung 31: Wesentliche Entwicklungsrichtungen der Simulation in der Fertigungstechnik
Development Trends of Simulation Technology in Manufacturing

Die Vielzahl der Fertigungstechnologien und Simulationswerkzeuge erschwert generelle Aussagen. Jedoch lässt sich festhalten, dass sich die Kopplung von Simulationswerkzeugen noch im Entwicklungsstadium befindet. Die Komplexität der technologischen Wechselwirkungen, das Fehlen von Schnittstellen und Standards sowie die teilweise eingeschränkte Verfügbarkeit von Modellen und Eingangsdaten macht ihre Entwicklung und Anwendung oft aufwendig. Die wirtschaftliche Abschätzung technologischer Machbarkeiten und die Erschließung technologischer Grenzen erfordert folglich die aufwandsoptimale Kombination von Berechnung, Simulation, Experten und Versuch. Die Simulation bildet hierbei einen wesentlichen Baustein, den es jedoch gezielt einzusetzen gilt. Dafür werden im Folgenden Methoden entwickelt, die eine gezielte und wirtschaftliche Integration der Simulation in den Innovationsprozess ermöglichen.

Integration von Simulationswerkzeugen in den Innovationsprozess

Die Simulation übernimmt innerhalb des Innovationsprozesses eine prognostizierende und beurteilende Funktion. Sie ermöglicht die Abschätzung der Auswirkungen fertigungstechnologischer, konstruktiver und werkstofftechnologischer Änderungen. Die Stärke der Simulation liegt in ihrer Fähigkeit, eine Vielzahl von Elementen und Wechselwirkungen innerhalb fertigungstechnologischer Systeme abzubilden. Sie bietet somit eine sinnvolle Ergänzung des Expertenwissens bzw. des menschlichen Arbeitsgedächtnisses, das gemäß der *Cognitive Load Theory* bei Systemen mit einer Vielzahl interagierender Elemente an seine kapazitiven Grenzen stößt [SWEL06, S.15ff]. Die Simulation gibt im ersten Schritt keinen Lösungsweg vor – das ist Aufgabe des Anwenders. Sie bietet ihm jedoch ein Entscheidungswerkzeug, das ihn bei der Planung und Optimierung des technologischen Gesamtsystems aus Bauteilgestalt, Fertigungstechnologie und Werkstoff unterstützt. Durch die Kombination der

kreativ-konzeptionellen Fähigkeiten der Technologieexperten mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Heuristik und der Prognose- und Beurteilungsfunktion der Simulation wird die Innovativität und Qualität im Planungsprozess gesteigert (**Abbildung 32**).

Änderungszyklen und Änderungsgeschwindigkeit im Innovationsprozess sind hoch, Eingangsgrößen zu Bauteilgestalt, Fertigungstechnologie und Werkstoff oft unscharf. Die Zielsetzung des Einsatzes von Simulationswerkzeugen im Innovationsprozess ist somit von der in der Serienentwicklung und Serienproduktion abzugrenzen. Nicht die finale Validierung/Absicherung des Prozesses vor Auslösung der Werkzeuge, noch die Lösung von Qualitätsproblemen im laufenden Serienbetrieb ist die Aufgabe. Zielsetzung ist vielmehr eine Abschätzung des geometrischen, fertigungs- und werkstofftechnologischen Lösungsraums. Es gilt, bei vergleichsweise kurzen Antwortzeiten Machbarkeitsgrenzen abzustecken und Lösungspfade zu einem robusten Konzept aufzuzeigen.

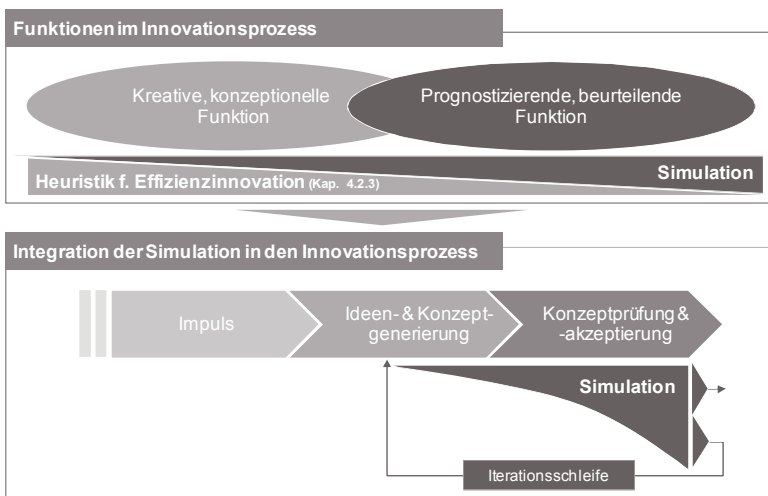


Abbildung 32: Integration der Simulation in die Konzeptphasen des Innovationsprozesses
Integration of Simulation Technology in the Innovation Process

Am Beispiel des Einsatzes von Simulationswerkzeugen in der Technologie Umformen wird die Abgrenzung zur Serienentwicklung und -produktion deutlich (**Abbildung 33**, S.61). Ziel der Simulation in der in dieser Arbeit fokussierten Konzeptphase ist es, im Sinne des Paretoprinzipis eine „80/20-Aussage“ zu generieren. Das bedeutet ca. 80% Ergebnisqualität mit ca. 20% des Simulationsaufwands gegenüber der Simulation in Serienentwicklung und -produktion zu erreichen.

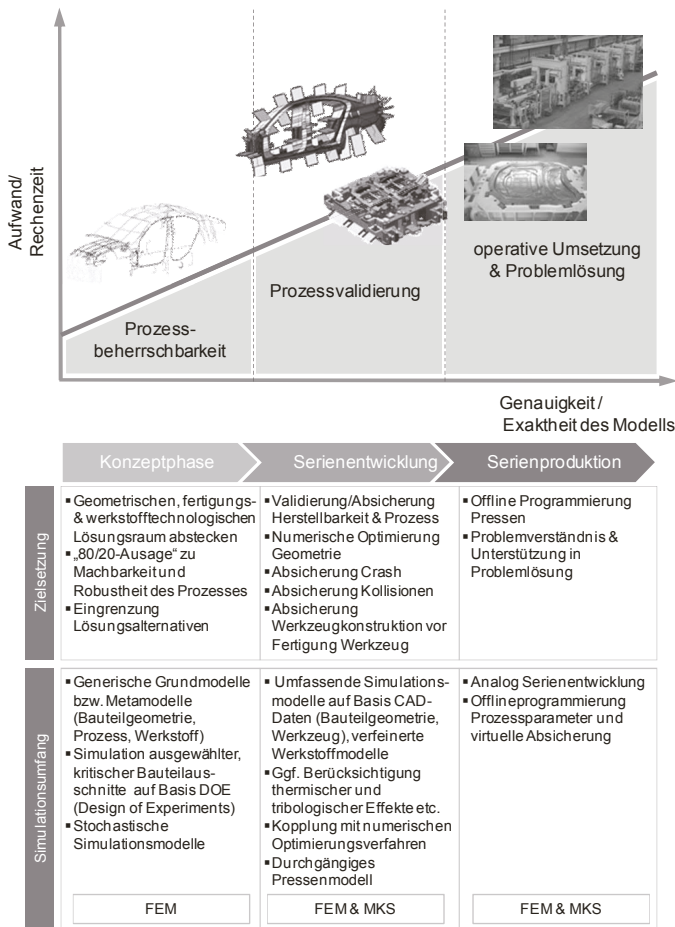


Abbildung 33: Simulation im Produktentstehungsprozess am Beispiel Umformen
Simulation in the Product Development Process using the Example of Metal Forming

Eine Möglichkeit zum Einsatz von Simulationswerkzeugen in der durch Informationsunsicherheit geprägten Konzeptphase bilden stochastische Simulationsmodelle [PANN10, S.17ff; GRAF11]. Zur Optimierung der Rechenzeit ist dabei jedoch eine Beschränkung der Untersuchung auf ausschließlich kritische Bauteilbereiche erforderlich. Stochastische Simulationsmodelle nutzen stochastische Samplings als Eingangsgröße für die FEM-Simulationsläufe. Typische stochastische Eingangsvariablen sind z. B. Werkstoffkennwerte und Blechdicken. Durch eine Vielzahl von Simulationsläufen mit unterschiedlichen Samplings kann die Eignung und Robustheit des untersuchten Prozesses beurteilt werden. Zur Bestimmung der Samplings eig-

nen sich das Monte Carlo Sampling oder das Hypercube Sampling, wobei letzteres bei gleicher Anzahl an Simulationsläufen eine wesentlich bessere Ergebnisqualität verspricht. Die Samplings werden im Preprocessing mit Hilfe von gängigen Workflow-tools in einen für den FE-Solver lesbaren Code übersetzt. Nach Durchführung der Simulation werden die Ergebnisdaten mit Hilfe von Qualitätskennzahlen ausgewertet.

Qualitätsprobleme in der Blechumformung wie Risse, Faltenbildung und Einschnürungen können für konventionelle Werkstoffe zuverlässig und automatisiert ermittelt werden [KLOC06, S.67f; SCHO11, S.71]. Die Maßhaltigkeit kann mit Hilfe der Rückfederungssimulation relativ gut prognostiziert werden. Sie wird in der Industrie allerdings noch nicht flächendeckend eingesetzt [SCHO11, S.76f]. Oberflächenprobleme können nach aktuellem Stand der Technik nur ansatzweise ermittelt werden [ROLL07, S755ff]. So können potenzielle Faltengebiete im Bauteil automatisiert bisher nur näherungsweise auf Basis des Grenzformänderungsdiagramms berechnet werden. Einfallstellen, Oberflächenunruhen, Riefenbildung etc. lassen sich noch nicht automatisiert numerisch vorhersagen. Ansatzweise sind diese lediglich mittels Spanungskriterien visuell beurteilbar. Im Postprocessing werden die Ergebnisse der Simulationsläufe mit statistischen Methoden analysiert. Mit Cluster-, Sensitivitäts- und Korrelationsanalysen lassen sich robuste Lösungsräume ermitteln und Optimierungsrichtungen bestimmen. Die Ergebnisse der Simulation liefern somit die Grundlage für die weitere Versuchsplanung, wobei nicht-zielführende Lösungsräume bereits ausgeklammert werden können.

Darüber hinaus lassen sich die Simulationsdaten mit modernen Verfahren der Datenanalyse wie z. B. neuronalen Netzen oder Data-Mining-Methoden zu generischen Grundmodellen bzw. Metamodellen verarbeiten. Zum Anlernen dieser „Ersatzmodelle“ aus bestehenden Simulationsdaten kann auf kommerzielle Software wie z. B. *ClearVu Analytics* zurückgegriffen werden. Sie ermöglichen die grobe Prognose der Auswirkungen neuer Parameter im fertigungstechnologischen Gesamtsystem ohne zusätzliche Simulationsläufe und sind vor diesem Hintergrund insbesondere in der Konzeptphase des Innovationsprozesses von hohem Interesse. Die Generierung von Metamodellen ist speziell für die fertigungstechnologische Bewertung anspruchsvoller geometrischer Zusammenhänge in wiederkehrenden, isolierbaren Bauteilbereichen, wie z. B. dem Türeinstieg im Automobilbau von Vorteil. Ihre Ergebnisse können im Postprocessing beispielsweise über Schieberegler visualisiert werden (**Abbildung 34**, S. 63).

Die dargestellte Visualisierung über Ampelfarben ermöglicht ein sofortiges Erkennen von Sensitivitäten. Im dargestellten Beispiel „Türeinstieg Seitenrahmen“ ist unter den gegebenen Prämissen die *Ziehhöhe* der einzige Parameter, um aus dem kritischen Prozessfenster in ein machbares Prozessfenster zu kommen. Durch Verringerung der *Ziehhöhe* bzw. bei Verschieben des Schiebereglers nach links könnte der FLD-

Wert gesenkt werden. Nach Verringerung der *Ziehhöhe* würde die Bewertung aller Parameter automatisch angepasst werden. Das Modell ermöglicht auf diese Weise ein interaktives Optimieren der simulierten Parameter durch Technologieplanung, Konstruktion und Design. Dabei sind zunächst Parameter ohne Einfluss auf die vorgeschlagene Konstruktion bzw. das vorgeschlagene Design, wie z. B. der Platinenradius, zu optimieren.

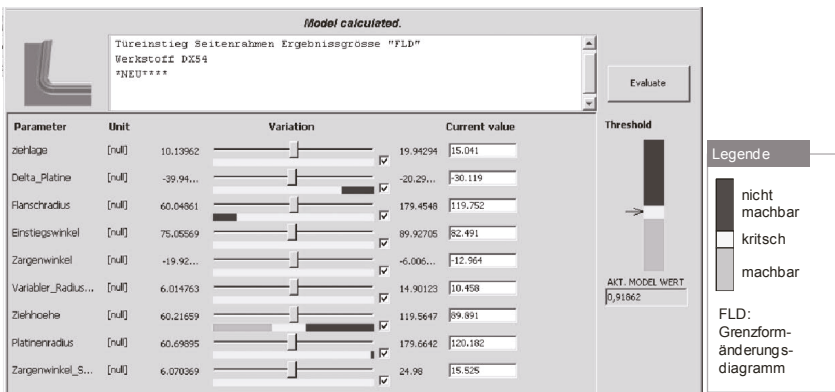


Abbildung 34: Postprocessing der Metamodellierung „Türeinstieg Seitenrahmen“
Postprocessing of the Meta Model „Entry area“

Eine Kombination mit Optimierungsalgorithmen ist grundsätzlich möglich, hat sich aber aufgrund der fehlenden dynamischen Interaktionsmöglichkeit mit Konstruktion und Design während der Optimierung und nur schwer quantifizierbaren Designrestriktionen nicht bewährt.

Methode zur Ermittlung virtueller Absicherungsinhalte in der Konzeptphase

Die Simulationskapazitäten in Unternehmen sind knapp, Softwarelizenzen und Hardware teuer. Die Anwendung der Simulation in der industriellen Praxis muss somit gezielt und unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsprinzips erfolgen. Die Entscheidung ob, wann und wie ein Bauteilfeature abgesichert wird, kann dabei weitreichende finanzielle, terminliche und qualitative Konsequenzen für den Serienprozess haben. Vor diesem Hintergrund wird am Beispiel der Technologie *Umformen* im Folgenden eine Methode entwickelt, die die systematische und transparente Ableitung des Absicherungs- und Simulationsbedarfs in der Konzeptphase erlaubt.

Anspruchsvolle Bauteilgeometrien und höherfeste Werkstoffe stellen eine Herausforderung für die Umformtechnik im Automobilbau dar. Am Beispiel eines Karosseriesitenrahmens wird die Vielzahl umformtechnischer Problemstellungen der Konzeptphase deutlich (Abbildung 35). Diese sind meistens aus Vorgängerprojek-

ten bekannt und hinsichtlich Herstellbarkeit, Maßhaltigkeit und Oberfläche klassifizierbar [GROS08, S.14ff]. Es ist wirtschaftlich nicht sinnvoll diese Problemstellungen vollständig virtuell abzusichern. Die Empfehlung, welche virtuell und welche über konventionelle Absicherungsmaßnahmen bzw. den klassischen Q-Regelkreis abgesichert werden sollen, wird mit Hilfe der entwickelten Methode in drei Schritten ermittelt.

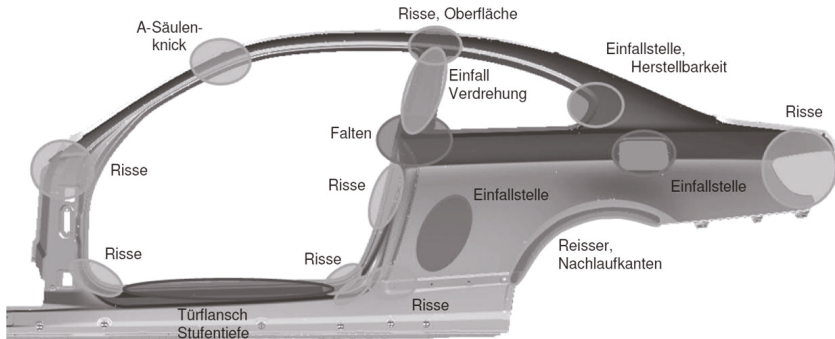


Abbildung 35: Umformtechnologische Risiken am Beispiel Karosserie-Seitenrahmen [GROS08, S.14]
Risks in Metal Forming using the Example of an Automotive Side Frame

Im ersten Schritt wird das fertigungstechnologische Fehlerrisiko z. B. für das Feature „A-Säulenknick“ über die Dimensionen *Fehlerausmaß* und *Eintrittswahrscheinlichkeit* aus Vergangenheitsdaten ermittelt oder durch Expertenbefragung abgeschätzt (**Abbildung 36**, S. 65 links). Das *Fehlerausmaß* definiert die Ereignisschwere bei Eintritt des Fehlers. Ein hohes Fehlerausmaß (z. B. Riss) führt zum vollständigen Verlust des Bauteils, der sich weder durch Folgeprozesse noch durch eine Nacharbeitsschleife korrigieren lässt. Die *Eintrittswahrscheinlichkeit* definiert die erwartete Eintrittshäufigkeit des Fehlers im Serienprozess. Da diese in der Konzeptphase teilweise schwer abschätzbar ist, wird sie über das *Wissensdefizit* angenähert. Somit wird im Sinne eines „Worst-Case-Szenarios“ bei einem hohen Wissensdefizit von einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit des Fehlers ausgegangen. Fertigungstechnologische Problemstellungen mit hohem *Fehlerausmaß* und hoher *Eintrittswahrscheinlichkeit*/ *Wissensdefizit* sind in der Absicherung zu priorisieren.

Im zweiten Schritt wird die *relative Wirksamkeit der Simulation* für die fertigungstechnologische Problemstellung bestimmt (**Abbildung 36**, S. 65, rechts). Sie ist über die Kriterien *Simulierbarkeit* und *Aufwand bei konventioneller Absicherung* zu bestimmen. Die *Simulierbarkeit* ist im Wesentlichen von der Fertigungstechnologie und der zu simulierenden Problemstellung abhängig. So sind klassische Umformprozesse im Automobilbau gut simulierbar, auch wenn beispielsweise Oberflächenproblematiken und Aufsprungkompensation nur eingeschränkt virtuell dargestellt werden können.

Darüber hinaus stellt insbesondere der Einzug von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) die Umformsimulation im Automobilbau vor neue Herausforderungen. Geeignete Werkstoffmodelle, die das Verhalten des Faser-Matrix-Verbundes im Umformprozess zuverlässig abbilden, sind noch in der Entwicklung. Allgemein steigt die Simulierbarkeit, je näher man sich mit der Konstruktion an bekannten Werkstoffen und Bauteilgeometrien bewegt. Anpassungs- und Variantenkonstruktionen sind demnach für die Simulation optimal geeignet [EHL07, S.264]. Die aus dieser Diskussion von fertigungstechnologischer Aufgabe und verfügbaren Modellen und Simulationswerkzeugen resultierende Simulierbarkeit wird im Portfolio dem *Aufwand bei konventioneller Absicherung* gegenübergestellt. So kann beispielsweise der bereits erwähnte „A-Säulenknick“ nur mit hohem Aufwand in der konventionellen Q-Schleife abgesichert werden, bei gleichzeitig guter Simulierbarkeit. Die *relative Wirksamkeit der Simulation* ist für dieses Beispiel somit hoch.

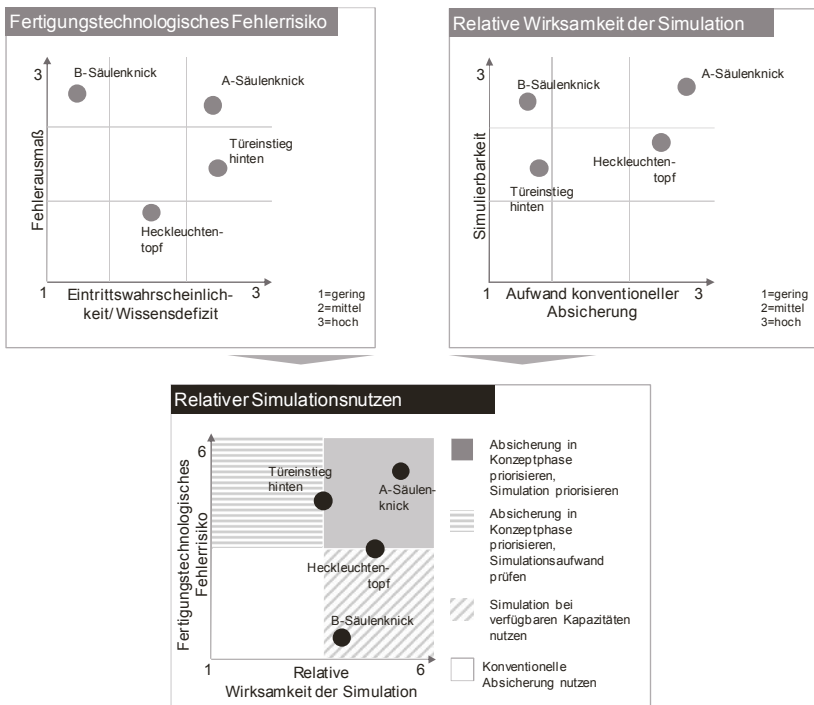


Abbildung 36: Ableitung des Absicherungs- und Simulationsbedarfs in der Konzeptphase
Definition of Simulation Tasks in the Concept Stage

Die Ergebnisse der Abschätzung von *fertigungstechnologischem Fehlerrisiko* und *relativer Wirksamkeit der Simulation* werden zum *relativen Simulationsnutzen* zusammengefasst (**Abbildung 36**, S.65, unten). Die fertigungstechnologischen Problemstellungen mit hohem *Fehlerrisiko* und hoher *relativer Wirksamkeit der Simulation* sind in der Konzeptphase folglich für die virtuelle Absicherung zu priorisieren.

4.2.3 Heuristik zur Generierung von Konzepten zur Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette

Heuristic for Designing Concepts for Efficiency Innovations in the Technology Chain

Zielsetzung der Heuristik ist die Erschließung fertigungstechnologischer Innovationen in der Technologiekette mit maximalem Beitrag zu der im Vorfeld definierten Innovationsaufgabe (Kap. 4.1.2; Kap. 4.2.1). Dazu werden im Rahmen eines heuristisch-systemischen Lösungsprozesses Konzepte für *Effizienzinnovationen* erarbeitet. Heuristiken haben sich für komplexe Probleme bewährt [WAGE03, S.153f]. Sie erlauben über definierte Suchregeln eine aufwandsoptimale, iterative Annäherung an das Optimum. In Abgrenzung zu bestehenden Methoden der Technologieplanung stellt die entwickelte Heuristik die gezielte Innovation an etablierten Technologieketten in den Vordergrund und nicht deren Neugestaltung (Kap. 2.3.3).

Die erfolgreiche Anwendung der Heuristik erfordert ein kompetentes Arbeitsteam. Dazu wird folgende Teamzusammensetzung empfohlen, die es im Kontext der vorliegenden Innovationsaufgabe situationsspezifisch anzupassen gilt:

- Methodenspezialist/Moderator: Hält das Team auf Kurs, verantwortlich für Vor- und Nachbereitung
- Fertigungstechnologe/Spezialist für die zu untersuchende Technologie
- Maschinenbediener/Instandhalter der zu untersuchenden Technologie
- Werkstofftechnologe: Vertraut mit dem/den bearbeiteten Werkstoff(en), dessen/deren Eigenschaften und möglichen Alternativen
- Qualitätsspezialist/Produktionsverantwortlicher des Untersuchungsbereichs
- Konstrukteur der zu fertigenden Komponente(n)
- Externe Impulsgeber: Zum Beispiel Technologielieferant, Technologe(n) aus „artverwandten“ Produkt-/Produktionsbereichen, Technologieexperten von Hochschulen/Forschungsinstituten, „Querdenker“
- Interne/externe Kunde(n) der Technologieleistung: Spezifiziert Anforderungen an die untersuchte Technologie

Das Arbeitsteam ist vor Anwendung der Heuristik unter Zuhilfenahme des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* zu briefen, gängige Technologieinformationssysteme sind bzgl. der zu untersuchenden Fertigungstechnologie abzufragen (Kap. 4.2.2). Die Ergebnisse der Abfrage fließen als fertigungstechnologische Impulse in die Heuristik ein.

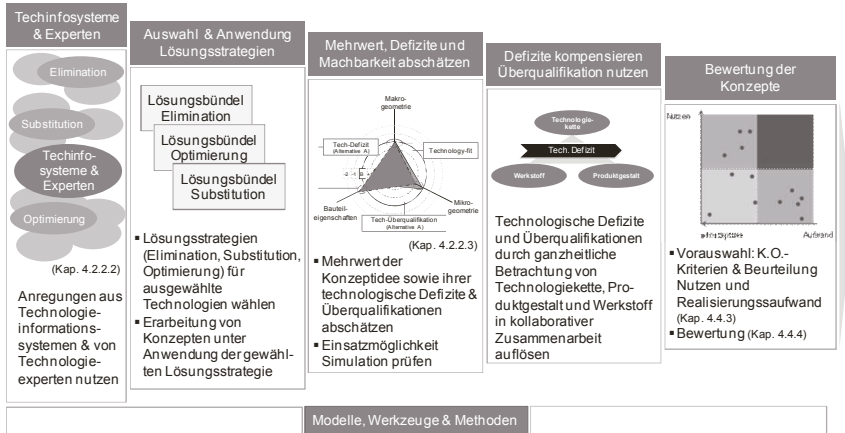


Abbildung 37: Ablaufschema der Heuristik

Flowchart of the Heuristic

Die entwickelte Heuristik besteht aus einer Abfolge von Iterationen nach folgendem Ablaufschema (**Abbildung 37**, S.67, oben):

- *Technologieinformationssysteme & Expertenwissen nutzen:* Mithilfe intuitiver Kreativitätstechniken werden Ideen der Experten aufgegriffen sowie Rechercheergebnisse aus Technologieinformationssystemen in den Anwendungskontext einbezogen.
- *Auswahl und Anwendung der Lösungsstrategien:* Systematische Prüfung der Lösungsstrategien Elimination, Substitution und Optimierung unter Verwendung unterstützender Modelle und Methoden
- *Mehrwert und Defizite der Konzeptidee abschätzen:* Grobe Beurteilung des Leistungsbeitrags der erarbeiteten Konzeptidee in Bezug auf die formulierte Innovationsaufgabe; Abschätzung von fertigungstechnologischem Mehrwert und Defiziten unter Einbeziehung von Simulationswerkzeugen
- *Defizite kompensieren, Überqualifikation nutzen:* Versuch der Kompensation der aus der Konzeptidee resultierenden fertigungstechnologischen Defizite/Überqualifikationen durch einen systemischen Gestaltungsansatz
- *Bewertung der Konzepte:* Vorauswahl über K.O.-Kriterien und Beurteilung des Nutzen-/Aufwandverhältnisses, weiterführende Bewertung der Konzepte in den Dimensionen Wirtschaftlichkeit, Qualität, Realisierungsdauer und fertigungstechnologische Komplexität in Abhängigkeit von der vorliegenden Informationsreife

Der Kern der Heuristik ist das systematische Hinterfragen des Status quo der Technologieketten. Durch die integrierte Betrachtung von Fertigungstechnologie, Produktgestalt und Werkstoff werden technologische Potenziale ausgereizt und an das Gesamtoptimum angenähert. Im Folgenden werden die dargestellten Schritte der Heuristik ausgeführt.

Schritt 1: Technologieinformationssysteme & Expertenwissen nutzen

In der Regel entstehen während oder nach dem Briefing der Technologieexperten bereits erste, rohe Ideen für die zu bearbeitende fertigungstechnologische Fragestellung. Die Nutzung kreativ-intuitiver Methoden noch vor der Anwendung der eigentlichen Heuristik hilft diese systematisch abzugreifen. Erfahrungen und erste Ideen der Teammitglieder werden erfasst, die Abfrageergebnisse aus Technologieinformationssystemen reflektiert. Oft finden sich auch einige einfach und schnell umzusetzende Optimierungsmaßnahmen, die zeitnah in den laufenden Serienbetrieb einfließen können. Aufgrund ihrer Einfachheit und ihres hohen Bekanntheitsgrades eignet sich an dieser Stelle die Methode des Brainstormings am besten [KELL02; S.65ff]. Der Einsatz anderer kreativ-intuitiver Methoden der Ideenfindung, wie z. B. Brainwriting, Brainstation etc., ist alternativ möglich [SCHT05, S.88ff]. Bei ähnlichem Output ist der Erklärungs- und Vorbereitungsaufwand hier jedoch deutlich höher.

Schritt 2: Auswahl und Anwendung der Lösungsstrategien

Im zweiten Schritt der Heuristik erfolgt die Auswahl und Anwendung der Lösungsstrategien *Technologieelimination*, *Technologieoptimierung* und *Technologiesubstitution*. Alle elementaren fertigungstechnologischen Aktionsmöglichkeiten zur Lösung der Innovationsaufgabe werden somit systematisch geprüft.

Technologieelimination

In Anlehnung an das TRIZ-Prinzip der Idealität stellt das ideale System die gewünschte technologische Funktion zur Verfügung, ohne selbst zu existieren [TERN98, S.147]. An erster Stelle steht somit die Prüfung der Lösungsstrategie *Technologieelimination* und mit ihr die Frage: „Ist vorliegende Technologie durch eine Neuabstimmung existierender Haupt- und Nebenfunktionen in der Technologiekette eliminierbar?“

Eine erste Indikation bezüglich der Umsetzbarkeit der Lösungsstrategie *Technologieelimination* gibt die Wertschöpfungstreppe (**Abbildung 38**, S.69). Die *Wertschöpfungstreppe* lässt den Wertschöpfungsbeitrag der einzelnen Elemente der Technologiekette erkennen [REGI02, S.65]. Der Wertschöpfungsbeitrag wird dabei nicht auf die Herstellkosten bezogen, sondern ist über die Produktfunktion zu beurteilen. Je höher der Beitrag der Fertigungstechnologie zu kundenrelevanten Produktfunktionen, wie sie z. B. die Momentübertragung und -übersetzung für ein Getriebe

darstellen, desto unwahrscheinlicher ist ihre Elimination. Je geringer der Beitrag, desto radikaler ist der Technologieeinsatz zu hinterfragen. Insbesondere nicht wertschöpfende Hilfs- und Nebenfunktionen in der Technologiekette, wie z. B. Reinigungs-, Schütz- und Prüftechnologien, sind folglich bzgl. ihrer Eliminationsmöglichkeiten zu prüfen.

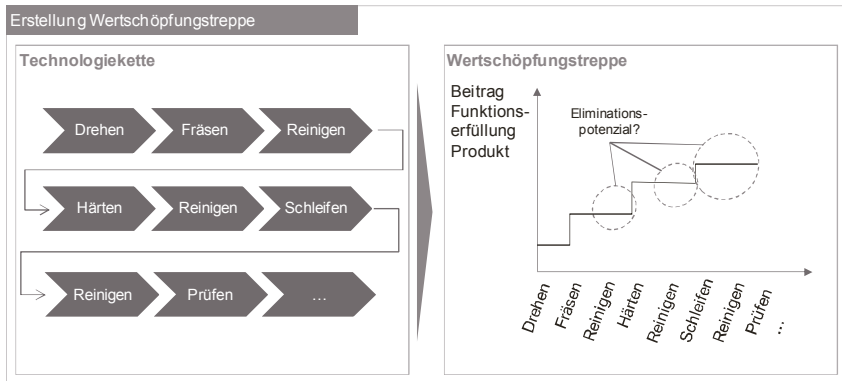


Abbildung 38: Erstellung der Wertschöpfungsstreppe
Steps of Value Creation

Die Frage nach der Eliminationsmöglichkeit der zu untersuchenden Fertigungstechnologie wird normalerweise zunächst verneint. Das systematische Durchdenken der Fragestellung mithilfe der vorliegenden Heuristik eröffnet jedoch oft radikal neue, mittel- bis langfristige technologische Perspektiven und Visionen. Beispielsweise finden sich in einer Technologiekette bei genauer Betrachtung teilweise redundante Funktionen, deren Neuabstimmung die Elimination eines vollständigen Elements der Technologiekette ermöglichen kann. So kann z. B. durch die längere Rotation des Bauteils nach Abschluss des Fräsprozesses eine Reinigungsfunktion erfüllt werden. Späne und Kühlschmierstoff werden abgeschleudert. Die Maschine besitzt in diesem Fall eine Nebenfunktion (Reinigen), die ggf. die Elimination eines chemischen Reinigungsschritts ermöglicht. Erfolgreiche Beispiele von Technologieelimination in der spanenden Bearbeitung zeigen, dass durch konsequente Optimierung der gesamten Technologiekette sogar die Elimination von Technologien mit hohem Beitrag zur Funktionserfüllung des Produktes möglich ist. Ein verbessertes Prozessverständnis in Vorbearbeitung, Härten und Fertigbearbeitung sowie verbesserte Zerspanwerkzeuge und Maschinenteknik können die Elimination von Feinbearbeitungsverfahren ermöglichen. Dabei gilt: Je signifikanter die Veränderung in der Technologiekette an der einen Stelle, desto größer die Möglichkeiten zur Elimination ganzer Fertigungsschritte an anderer Stelle. Mögliche Veränderungen in der Techno-

logiekette bei externen Lieferanten sind bei der Prüfung der Lösungsstrategie *Technologieelimination* vor diesem Hintergrund unbedingt zu berücksichtigen. So kann beispielsweise der Einsatz hochpräziser Umformprozesse bei externen Rohteillieferanten, bei gleichzeitiger interner Adaption der spanenden Hartfeinbearbeitung, die Elimination der gesamten Vorbearbeitung ermöglichen.

Technologieoptimierung

Die zweite Lösungsstrategie *Technologieoptimierung* prüft, ob die vorliegende Innovationsaufgabe durch Modifikation der existierenden Fertigungsmittel lösbar ist. Das Optimierungspotenzial der ausgewählten Fertigungstechnologie ist dabei unmittelbar nach der Technologieeinführung am höchsten (**Abbildung 39**).

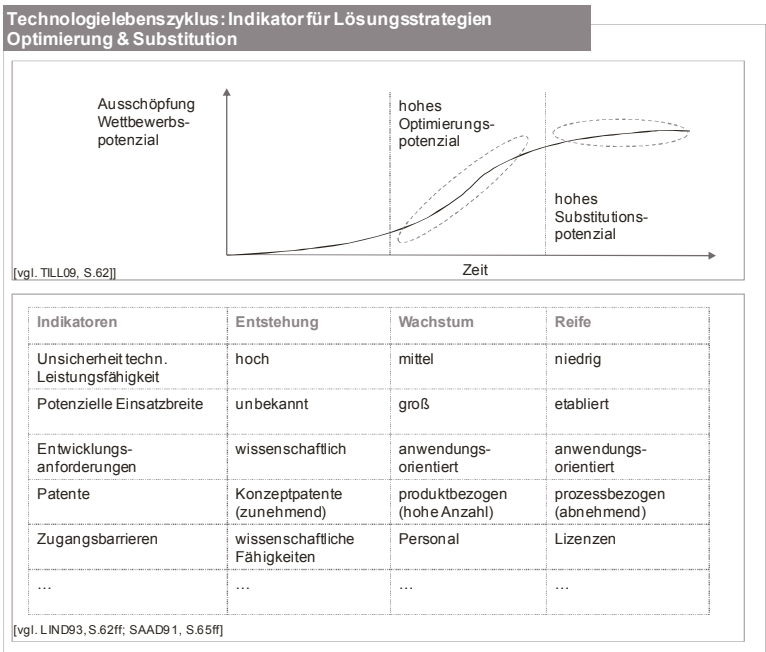


Abbildung 39: Indikatoren für erfolgsversprechende Lösungsstrategien
Indicators for Promising Innovation Approaches

Inkrementelle Innovation führt in dieser sogenannten Optimierungs- und Dynamisierungsetappe die Technologie schrittweise zu ihrer vollständigen Reife [LIND93, S.77]. Zur Bestimmung der aktuellen Lebenszyklusphase einer Technologie und somit zur Bestimmung ihres Optimierungspotenzials finden sich in der wissenschaftlichen Literatur zahlreiche Indikatoren [LIND93, S.62ff; SAAD91, S.65ff]. Eine solche

„Standortbestimmung“ auf der Lebenszykluskurve ist jedoch nicht trivial und mit gewisser Unschärfe verbunden. Sie hat somit primär orientierende Wirkung.

Optimierung bedeutet im weitesten Sinn die Suche nach dem bestmöglichen Kompromiss zwischen verschiedenen Zielgrößen, Parametern oder Eigenschaften. In der Mathematik ist Optimierung die Minimierung oder Maximierung einer Zielfunktion bzw. die Bestimmung eines Extremums unter Nebenbedingungen [BENK03, S.115]. Im Folgenden wird fertigungstechnologische Optimierung als die Realisierung minimaler Fertigungskosten unter den Nebenbedingungen anforderungsgerechter Produkt- und Prozessqualität, definierter Prozessflexibilität und unter der Einhaltung ökologischer Standards verstanden (Kap. 4.4.4.1).

Optimierung kann nur unter klaren fertigungstechnologischen Prämissen erfolgen. Dazu gehört die Spezifikation von Bauteil, Werkstoff und Stückzahl. Unter diesen Prämissen ist im Rahmen der Optimierung durch Einstellung fertigungstechnologischer Prozessparameter ein optimaler Kompromiss aus Werkzeug-/Prozesskosten und Bearbeitungs-/Belegungszeit zu erarbeiten (**Abbildung 40**).

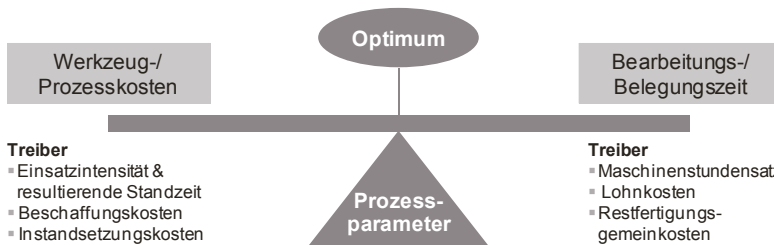


Abbildung 40: Optimierung im Spannungsfeld von Prozesskosten und Belegungszeit
Optimization in the Context of Tool Costs and Production Time

Dieses fertigungstechnologische Optimierungsproblem aus Werkzeug-/Prozesskosten und Bearbeitungs-/Belegungszeit erfordert die fertigungstechnologiespezifische Modellierung von Produktivitätsparametern zu einer Produktivitätsfunktion. Eine umfassende Behandlung fertigungstechnologiespezifischer Optimierungsstrategien und Produktivitätsfunktionen würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen und an deren eigentlicher Zielsetzung vorbeigehen. Für ein besseres Verständnis soll jedoch am Beispiel spanender Bearbeitungsverfahren mit umlaufender Hauptbewegung und geometrisch bestimmter Schneide die Herausforderung fertigungstechnologischer Optimierung kurz aufgezeigt werden und in den Kontext der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken eingeordnet werden. Für Details wird auf die VDI-Richtlinie 3321 verwiesen [VDI94].

Die Fertigungskosten K_F eines Zerspanvorganges setzen sich aus einem zeitproportionalen und einem werkzeugproportionalen Anteil zusammen (**Formel 1**).

$$K_F = K_{ML} \cdot \frac{t_{eB}}{60} + K_w \quad (\text{Formel 1})$$

mit: K_{ML} : Maschinen- + Lohn- + Lohnnebenkosten + Restfertigungsgemeinkosten in €/h

t_{eB} : Belegungszeit auf Maschine in min

K_w : Werkzeugkosten in €

Diese beiden Kostenanteile haben in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit v_c gegenläufige Tendenz (**Abbildung 41**).

Die Wirtschaftlichkeit des Zerspanvorgangs wird wesentlich durch den Werkzeugverschleiß und somit durch die Wahl der Schnittwerte a_p, f und v_c beeinflusst (**Formel 1**). Dabei hat sich nach Kenntnis der Verschleißwirkung der genannten Schnittwerte folgende Optimierungsstrategie durchgesetzt:

1. Maximiere die Schnitttiefe a_p (geringe Verschleißwirkung)
2. Maximiere den Vorschub f (deutliche Verschleißwirkung)
3. Optimierte die Schnittgeschwindigkeit v_c (höchste Verschleißwirkung)

Die maximale Schnitttiefe a_p , der maximale Vorschub f und die Schnittgeschwindigkeit v_c werden dabei durch Werkzeug, Werkstoff und Maschine begrenzt. Sie limitieren an dieser Stelle den Optimierungsraum.

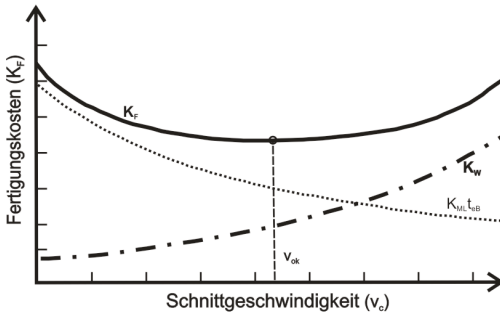


Abbildung 41: $K_F = f(v_c)$ [VDI94, S. 8]

Der kostenoptimalen Schnittgeschwindigkeit ist eine kostenoptimale Werkzeugstandzeit T_{ok} zugeordnet. Ist nur ein Werkzeug im Einsatz, gilt für die kostenoptimale Werkzeugstandzeit T_{ok} folgende Grundformel (**Formel 2**):

$$T_{ok} = (-k - 1) \cdot \left(t_w + K_{wt} \cdot \frac{60}{K_{ML}} \right) \quad (\text{Formel 2})$$

mit: k : Steigungswert Standzeitgerade

t_w : Werkzeugwechselzeit in min

K_{wt} : Werkzeugkosten für Wendschneidplattenwerkzeuge in €

K_{ML} : Maschinen- + Lohn- + Lohnnebenkosten + Restfertigungsgemeinkosten in €/h

Dieses noch relativ einfache Beispiel zeigt, dass fertigungstechnologische Optimierung weder singularär nach Werkzeugkosten noch nach Bearbeitungszeit erfolgen darf, sondern diese Größen integriert betrachten muss. Die singularäre Reduzierung von Werkzeugbudgets zur Reduzierung der Gemeinkosten ist gesamtbetriebswirtschaftlich somit falsch. Das Beispiel zeigt außerdem, dass fertigungstechnologische Optimierung immer für eine spezifische Kombination von Werkzeug, Werkstück und Maschine erfolgt und durch diese Kombination begrenzt wird. Durch die Variation dieser Elemente bzw. durch Werkzeug-, Werkstoff- und Maschineninnovation wird ein neuer Optimierungsraum definiert. Das Optimierungspotenzial des fertigungstechnologischen Gesamtsystems wird erweitert (**Abbildung 42**).

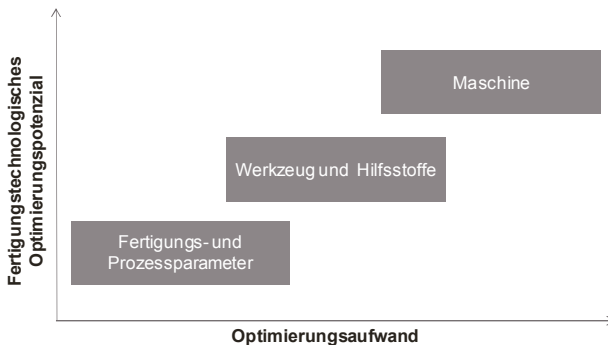


Abbildung 42: Potenziale fertigungstechnologischer Optimierung
Production Technology Improvement Steps

Im Sinne von *Schumpeters* Innovationsverständnis der „schöpferischen Zerstörung“ wird durch Werkzeug-, Werkstoff- und/oder Maschineninnovation das bestehende kostenoptimale Gleichgewicht von Werkzeugkosten und Belegungszeit zerstört [SCMP34, S.157]. Eine neue Kostenkurve K_F^* wird geschaffen. Beispiele für diese Verschiebung der Kostenkurve in der spanenden Bearbeitung ist die Einführung von leistungsgesteigerten Schneidstoffen. Der Standweg des Werkzeugs steigt bzw. die Anzahl der Werkstücke je Standzeit n_{WT} wird erhöht. Bei Annahme konstanter Schneidstoffkosten bzw. bei Überkompensation der gestiegenen Schneidstoffkosten

durch Erhöhung der Werkstücke je Standzeit sinken die Werkzeugkosten K_W (Formel 3).

$$K_W = \frac{K_{WT}}{n_{WT}} \quad (\text{Formel 3})$$

mit: K_{WT} : Werkzeugkosten für Wendeschneidplattenwerkzeuge in €
 n_{WT} : Anzahl der Werkstücke je Standzeit in Stück

Die beiden Kostenkurven K_W und K_F verschieben sich zu einem neuen Optimum nach K_W^* und K_F^* (Abbildung 43).

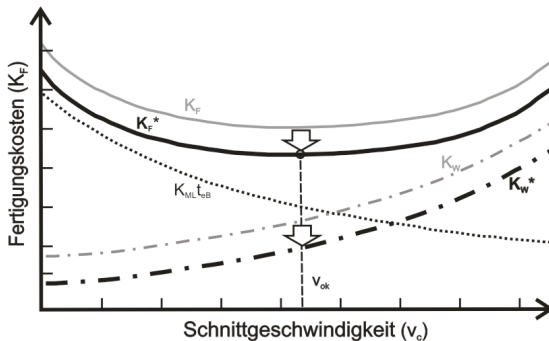


Abbildung 43: Reduzierung K_W durch Leistungssteigerung des Schneidstoffs
 Reduction of K_W through Performance Enhancement of Cutting Material

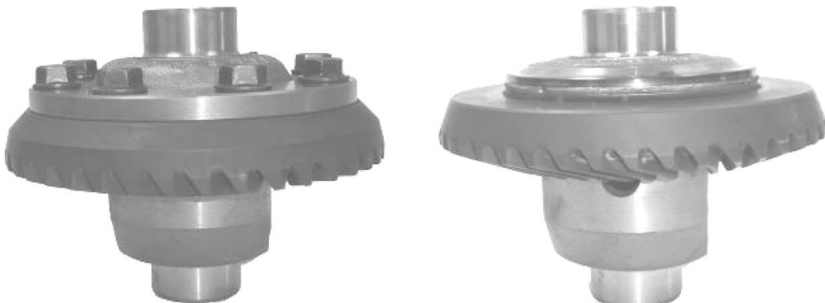
Methoden und Tools, die bei der Lösung des dargestellten Optimierungsproblems unterstützen können sind, neben den vorgestellten Berechnungsverfahren, die statistische Versuchsplanung sowie die Simulation. Sie ermöglichen über ihre prognostizierende, beurteilende Funktion die Überprüfung der Zielerreichung (Kap. 4.2.2.3).

Technologiesubstitution

Mit der dritten Lösungsstrategie *Technologiesubstitution* wird der Mehrwert innovativer fertigungstechnologischer Alternativen für die bestehende Innovationsaufgabe untersucht. Erste Hinweise über das Substitutionspotenzial der betrachteten Fertigungstechnologie kann der Technologielebenszyklus geben (Abbildung 39, S.70). Befindet sich die Fertigungstechnologie im letzten Abschnitt des *Technologielebenszyklus*, der sogenannten Reife- und Altersphase, stößt sie per Definition an ihre ökonomischen, physikalischen und ökologischen Grenzen. Eine Substitution der Fertigungstechnologie ist bei Vorliegen innovativer Alternativen zielführend [UTTE96]. Grundlage für die gezielte Recherche nach alternativen Fertigungstechnologien über Expertenbefragung, Technologieinformationssysteme oder Technologie-

früherkennung, ist das in Kapitel 4.2.2.2 entwickelte *Bedarfsorientierte Technologiebeschreibungsmo- del*.

Mit der Lösungsstrategie *Technologiesubstitution* bzw. mit der Einführung einer neuen Fertigungstechnologie ergeben sich vielfach Möglichkeiten, Produktfunktionen anders als bisher darzustellen. Neue konstruktive Freiräume werden erschlossen. Zur konsequenten Nutzung der technologiespezifischen Vorteile bedarf es konsequenterweise einer umfassenden Bauteiloptimierung. Die kollaborative Zusammenarbeit von Technologieplanung, Konstruktion/Entwicklung und Werkstofftechnologie ist hier deshalb von hoher Bedeutung. Das Beispiel der Substitution der Technologie Schrauben durch Laserschweißen für die Fügestelle *Tellerrad* und *Ausgleichsgehäuse* zeigt Ergebnisse und Vorteile einer integrierten Technologiesubstitution und Bauteiloptimierung (**Abbildung 44**). Durch den Entfall der Schraubverbindung und die konstruktive Anpassung des Ausgleichsgehäuses konnten Gewichts-, Wirkungsgrad-, Kosten- und Bauraumvorteile realisiert werden.



Substitution Schraubverbindung durch Laserschweißverbindung

Prozess

- Gehäuse: GGG60
- Tellerrad: Einsatzstahl
- Zusatzwerkstoff: Nickeldraht
- Einschweißtiefe: 5mm

Vorteile

- Einsparung Gewicht durch Entfall Schrauben
- Verbesserung Wirkungsgrad Getriebe durch Reduzierung Planschverluste
- Reduzierung Fertigungskosten
- Reduzierung Bauraum

Abbildung 44: Beispiel Technologiesubstitution: Laserschweißen Tellerrad (BMW Group)

Laser Welding Ring gear: An Example for Technology Substitution (BMW Group)

Die Lösungsstrategien *Technologieelimination*, *-optimierung* und *-substitution* werden in genannter Reihenfolge auf die zu untersuchende Technologie angewandt. In Ausnahmefällen kann eine Einschränkung des Lösungsraums durch die gezielte Reduzierung der Lösungsstrategien sinnvoll sein. Für die jeweilige Lösungsstrategie erfolgt jeweils ein kompletter Durchlauf der Heuristik.

Schritt 3: Mehrwert und Defizite Konzeptidee abschätzen

Für die Abschätzung von Mehrwert und Defiziten der erarbeiteten Konzeptideen wurde die Methode der *Technology-Footprints* entwickelt. Diese bilden die für die Erfüllung der Produktfunktion wesentlichen fertigungstechnologischen Funktionen und Attribute ab. Das Übereinanderlegen der *Technology-Footprints* von Referenztechnologie und Alternativlösung lässt Mehrwert und Defizite der erarbeiteten fertigungstechnologischen Konzeptidee erkennen. Das von *Fallböhmer* entwickelte *Technologiefähigkeitsprofil* wird dabei umfassend erweitert [FALL00, S.48f]. Die darin nicht weiter spezifizierten Technologiemerkmale werden im Rahmen des entwickelten *Technology-Footprint-Modells* detailliert. Durch die Änderung der Darstellungsform wird der relative Vergleich von *Technologiebedarf*, *Referenztechnologie* und der erarbeiteten *technologischen Alternative* in der Konzeptphase des Innovationsprozesses ermöglicht.

Im Sinne des *Technology-Footprint-Modells* besitzt jede fertigungstechnologische Konzeptidee zwei „Fußabdrücke“. Der erste „Fußabdruck“ spiegelt die für die Erfüllung der Produktfunktion wesentlichen fertigungstechnologischen Funktionen wieder. Diese sind im *Technology-Footprint* in den Dimensionen *Makrogeometrie*, *Mikrogeometrie* und *sonstige Bauteileigenschaften* abbildbar (**Abbildung 45**, „linker Fuß“).

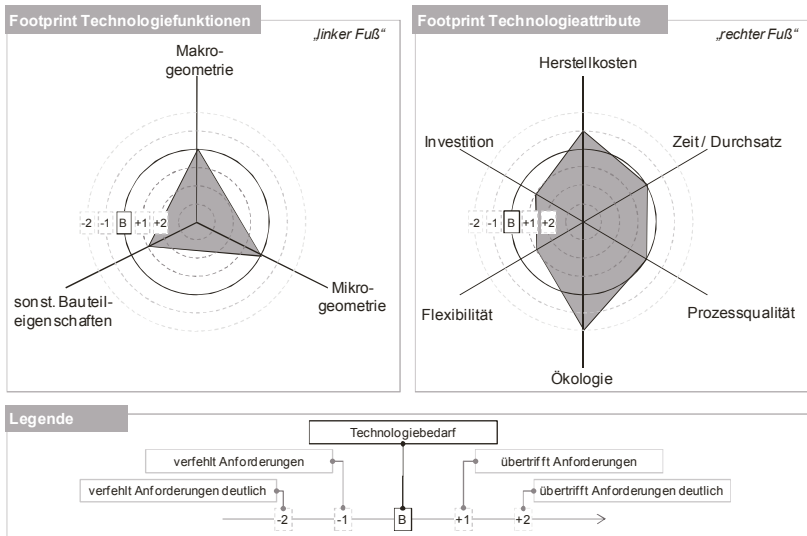


Abbildung 45: Technology-Footprints für Technologiefunktion und -attribute
Technology Footprints for Technology Functions and Attributes

Klassische *Makrogeometrische Eigenschaften* sind Form, Lage und Maß. *Mikrogeometrische Eigenschaften* sind z. B. die dazugehörigen Toleranzen sowie Oberflächenangaben wie z. B. Ra und Rz. Unter *sonstige Bauteileigenschaften* können u.a. die mechanischen Eigenschaften der Randzone oder gewünschte akustische, haptische oder optische Eigenschaften des Bauteils verstanden werden. Sie sind anwendungsspezifisch zu detaillieren und sind teilweise nur schwer quantifizierbar.

Der zweite „Fußabdruck“ der Technologie beschreibt die Art und Weise der fertigungstechnologischen Funktionserfüllung über Technologieattribute (**Abbildung 45**, S.76 „rechter Fuß“). Hier sind auf erster Ebene Herstellkosten, Investitionen, Zeit/Durchsatz, Prozessqualität, Ökologie und Flexibilität zu nennen. Die Investitionen sind wesentlich für eine Aussage zur Finanzierbarkeit der technologischen Konzeptalternative und vor diesem Hintergrund getrennt von den Herstellkosten auszuweisen. Die genannten Kriterien werden in Kapitel 4.4 genauer betrachtet.

Der Abgleich von *Technologiebedarf* mit der *Referenztechnologie* und der erarbeiteten *Alternativlösung* erfolgt im Anschluss im Rahmen des *Technology-fit* (**Abbildung 46**).

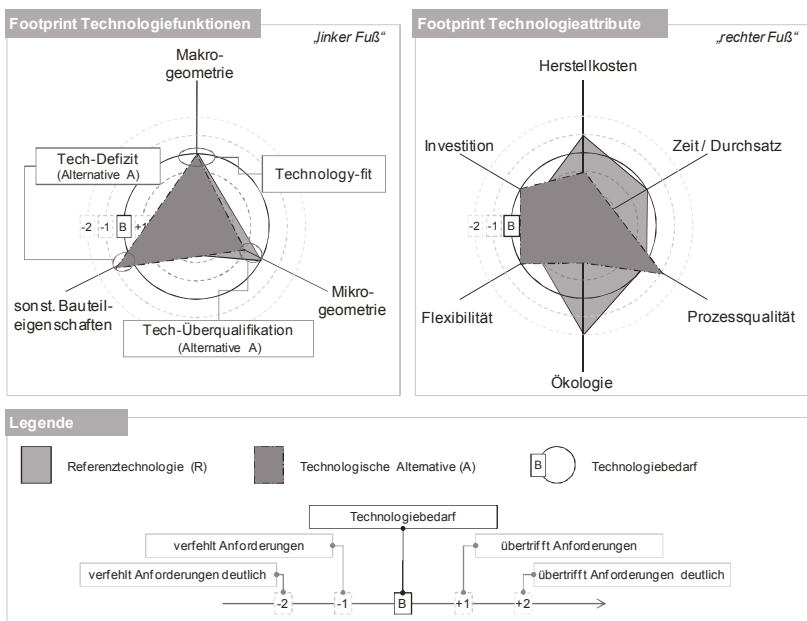


Abbildung 46: Abschätzung von Mehrwert und Defiziten mit dem Technology-fit
Assessment of Benefits and Deficits with the Technology-fit

Dabei werden die *Technology-Footprints* der *Referenztechnologie* und der technologischen *Alternativlösung* übereinandergelegt. Ist ein Footprint deckungsgleich mit der Kreisfläche des Technologiebedarfs (B), liegt für diesen ein vollständiger *Technology-fit* vor. Geht er an einer Stelle darüber hinaus, besteht an dieser Stelle ein *Technologiedefizit*. Liegt er an einer Stelle auf einem kleineren Kreisradius als auf dem des Technologiebedarfs (B), so handelt es sich an dieser Stelle um eine *Technologieüberqualifikation*.

Der *Technology-fit* lässt somit auf einen Blick technologische Defizite und Überqualifikationen der fertigungstechnologischen Konzeptalternative erkennen. Er ermöglicht darüber hinaus die Abgrenzung der erarbeiteten Alternative zur *Referenztechnologie*. Seine Kriterien sind anwendungsspezifisch zu detaillieren. Die Einordnung der fertigungstechnologischen Konzeptalternative in den Footprint kann durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen unterstützt werden (Kap.4.2.2.3).

Schritt 4: Defizite kompensieren, Überqualifikationen nutzen

Im vierten Schritt der Heuristik erfolgt der Versuch der Kompensation der aus dem Konzept resultierenden fertigungstechnologischen Defizite sowie der Versuch der Nutzung fertigungstechnologischer Überqualifikationen. Liegt ein Defizit oder eine Überqualifikation vor, ist zunächst die Analyse des funktional-technologischen Kontextes erforderlich. Hierbei werden alle mit der fertigungstechnologischen Funktion verknüpften Systemobjekte aus Technologiekette, Produktgestalt und Werkstoff mit in den Lösungsraum einbezogen. Eine systemoptimale Lösungsfindung unter Berücksichtigung vorhandener Potenziale in Technologiekette, Produktgestalt und Werkstoff ist somit sichergestellt.

Zur Erfassung möglicher Beiträge zur Auflösung des technologischen Defizits (z. B. n. i. O. Ra) innerhalb des Systemumfelds der betrachteten Fertigungstechnologie kann der Technologiekontextbaum genutzt werden. Dabei wird ausgehend vom eigenen Kontrollbereich (Technologiekette) der Lösungsraum schrittweise über die Lösungsbäume Produktgestalt und Werkstoff erweitert (**Abbildung 47**, S.79). Häufig finden sich an anderer Stelle in der Technologiekette Möglichkeiten zur Reduzierung des ausgewiesenen Defizits der untersuchten technologischen Konzeptalternative. Die gezielte Nutzung technologischer Überqualifikationen und Nebenfunktionen kann somit einen Beitrag zur Optimierung der gesamten Prozesskette leisten.

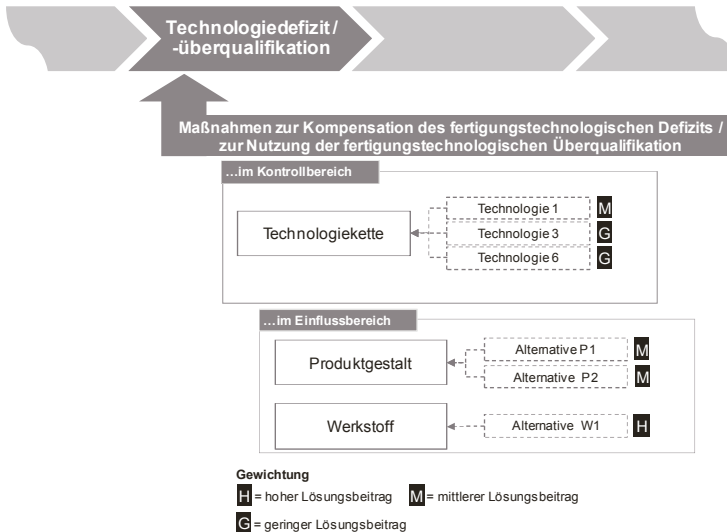


Abbildung 47: Analyse des funktional-technologischen Kontextes mit dem Technologiekontext-Baum
Analysing the Technological Context with the Technology-Context-Tree

Betrifft das identifizierte Defizit ein Technologieattribut, wie z. B. Herstellkosten oder Ökologie, so werden für dessen Analyse Methoden des Qualitätsmanagements – wie etwa das Ursache-Wirkungsdiagramm – empfohlen [PFEF01, S.41]. Analog zum funktionalen Defizit kann anschließend die Lösungsfindung im Systemkontext, ggf. unter Einsatz bestehender Methoden der Ideenfindung bzw. der systematischen Problemlösung, erfolgen [SCHT05; TERN98; SICK97].

Schritt 5: Bewertung der Konzepte

Im fünften Schritt der Heuristik *Bewertung der Konzepte* erfolgt die Bewertung der mithilfe der Lösungsstrategien *Elimination*, *Optimierung* und *Substitution* erarbeiteten Konzepte in Abhängigkeit der vorliegenden Informationsreife. Dabei wird auf das entwickelte Bewertungssystem zurückgegriffen (Kapitel 4.4).

4.2.4 Zwischenfazit

Interim Results

Im Rahmen des Methodenmoduls *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* erfolgt die systematische Erarbeitung von Konzepten zur Steigerung der Effizienz ausgewählter Technologieketten. Grundlage sind dabei die mit dem *Technologiepotenzialkalender* abgeleiteten Innovationsaufgaben.

Im Unterschied zu bestehenden Forschungsarbeiten der Technologieplanung steht nicht die Generierung alternativer Technologie- und Prozessketten im Vordergrund,

sondern die gezielte Innovation innerhalb etablierter Technologieketten. Zunächst werden dafür, auf Grundlage von Fertigungskostenbeiträgen und Innovationspotenzialen, fertigungstechnologische Handlungsschwerpunkte in der etablierten Technologiekette bestimmt. Die so ausgewählten Fertigungstechnologien werden anschließend mithilfe der entwickelten *Heuristik* systematisch auf Eliminations-, Substitutions- und Optimierungsmöglichkeiten geprüft. Die gesamttechnologischen Möglichkeiten von Technologiekette, Werkstoff und Produktgestalt werden dabei systematisch genutzt. Das *Bedarfsorientierte Technologiebeschreibungsmode*ll und die *Methode zur aufwandsoptimalen Einbindung von Simulationswerkzeugen* ermöglichen hierbei die gezielte Erweiterung der fertigungstechnologischen Wissensbasis des Produktionsnetzwerks. Ergebnis des Moduls sind Konzepte für *Effizienzinnovationen* in der untersuchten Technologiekette.

4.3 Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot (Modul III)

Enabling Effectiveness Innovation for Products and Services (Module III)

Radikale produkttechnologische Umbrüche können die Effektivität und Wettbewerbsfähigkeit der vom Produktionsnetzwerk angebotenen Leistungen langfristig verändern. Zielsetzung des Moduls *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* ist die, auf bestehenden Kompetenzen des Produktionsnetzwerks aufbauende, fertigungstechnologiegetriebene Erweiterung des Leistungsangebotes im Kontext sich abzeichnender produkttechnologischer Umbrüche (**Abbildung 48**).

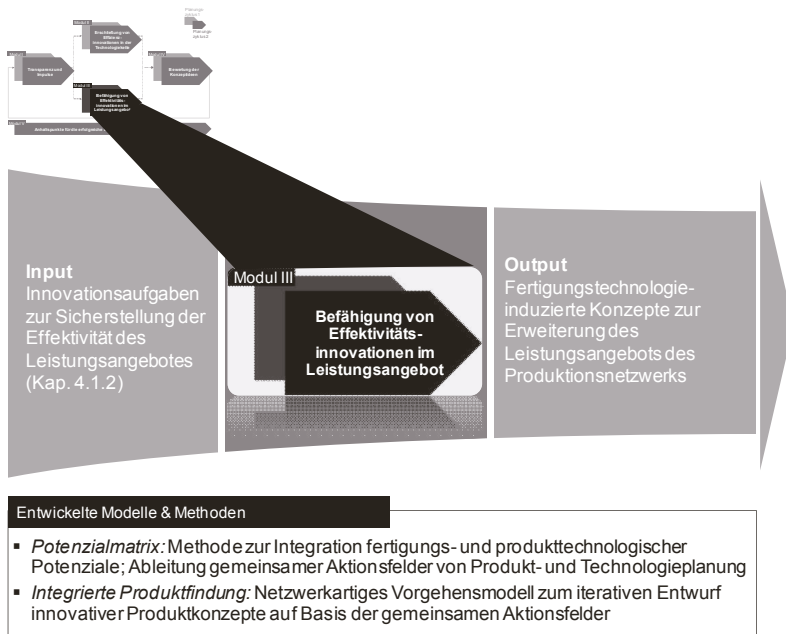


Abbildung 48: Input, Output, Modelle und Methoden des Modul III
Input, Output, Models and Methods of Module III

Eingangsinformation des Moduls sind die aus einem Effektivitätsdefizit abgeleiteten Innovationsaufgaben (Kap. 4.1.2). Ergebnis sind innovative Produktkonzepte zur langfristigen Absicherung der Effektivität des vom Produktionsnetzwerk dargestellten Leistungsangebots.

4.3.1 Integrationsansatz für die Produkt- und Technologieplanung vor Beginn des Simultaneous Engineering

Integrating Product and Technology Planning previous to Simultaneous Engineering

Mit der Integration von Produkt- und Technologieplanung vor Beginn des *Simultaneous Engineering* werden Chancen und Risiken im Kontext produkttechnologischer Wandels frühzeitig erkannt. Die Möglichkeiten zur rechtzeitigen Definition entsprechender fertigungstechnologischer Maßnahmen werden maximiert. Zur Integration von Produkt- und Technologieplanung noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering* existiert bisher noch kein geeigneter Ansatz (Kap. 2.3; Kap. 2.4).

Der hier entwickelte Integrationsansatz gliedert sich in die zwei Planungsstufen *Vorgelagerte Aktivitäten der integrierten Produktfindung* und *Integrierte Produktfindung*. Er ist somit vollständig kompatibel zum Vorgehensmodell *Produktplanung* aus der VDI-Richtlinie 2220 und ergänzt diese um fertigungstechnologische Aspekte [VDI80]. Im Zentrum der Planungsstufe *Vorgelagerte Aktivitäten der integrierten Produktfindung* steht die entwickelte *Potenzialmatrix*. Diese ermöglicht durch den Abgleich von *Produktpotenzialen* mit *Technologiepotenzialen* die Ableitung von gemeinsamen *Aktionsfeldern* für die Produkt- und Technologieplanung. Die mit der *Potenzialmatrix* abgeleiteten gemeinsamen Aktionsfelder werden im Rahmen der zweiten Planungsstufe *Integrierte Produktfindung* ausgearbeitet. Dies erfolgt in kollaborativer Zusammenarbeit von Produkt- und Technologieplanung. Produktideen werden gemeinsam entwickelt bzw. deren Funktionen und Attribute konzipiert.

4.3.2 Vorgelagerte Aktivitäten der integrierten Produktfindung

Prior Activities to Integrated Product Design

Der *Integrierten Produktfindung* geht die Erarbeitung gemeinsamer *Aktionsfelder* von Produkt- und Technologieplanung voraus. Diese definieren aussichtsreiche Bereiche der Zusammenarbeit mit hohem *produkt- und fertigungstechnologischem Potenzial*.

4.3.2.1 Ermittlung von Produkt- und Technologiepotenzialen

Die Ermittlung der *Produktpotenziale* erfolgt durch die Produktplanung analog VDI-Richtlinie 2220 [VDI80, S. 4ff]. Dabei werden auf Grundlage von Informationen aus Markt, Umfeld und Unternehmen Suchfelder oder erste Produktideen abgeleitet. Die *Produktpotenziale* werden von der Produktplanung bezüglich ihrer Zukunftsträchtigkeit priorisiert. Zu berücksichtigen sind dabei allgemeine und produkttechnologische Trends sowie Markt- und Substitutionsentwicklung [VDI80, S. 5].

Die Ermittlung der *Technologiepotenziale* erfolgt durch die Technologieplanung. Im Sinne der vorliegenden Arbeit definieren *Technologiepotenziale* die fertigungstechnologischen Fähigkeiten und Aktionsmöglichkeiten des Produktionsnetzwerks. Diese werden wesentlich durch die beherrschten Kerntechnologien bzw. durch die techno-

logischen Kernkompetenzen des Produktionsnetzwerks festgelegt [PRAH90, S.79ff]. Kriterien für die pragmatische Bestimmung von Kerntechnologien sind hoher Kundennutzen, Seltenheit sowie schwere Imitier- und Substituierbarkeit der Technologie [HERR09, S.67]. Die Handlungs-, Erfolgs- und Innovationsmöglichkeiten des Produktionsnetzwerks und seiner Kerntechnologien werden über die Einbeziehung von *Komplementärtechnologien* erweitert. Unter *Komplementärtechnologien* werden Fertigungstechnologien verstanden, die den Leistungsfähigkeitsbereich einer bestehenden Kerntechnologie oder technologischen Kernkompetenz sinnvoll ergänzen oder nutzen [KNOC06, S.20]. Mögliche *Komplementärtechnologien* können über die fertigungstechnologieorientierte *Technologiefrüherkennung* systematisch erfasst werden (Kap. 4.1.3). Sie können direkt oder indirekt (über einen Kooperationspartner) in das Produktionsnetzwerk integriert werden.

4.3.2.2 Abgleich von Produkt- und Technologiepotenzialen mit der Potenzialmatrix

Zur systematischen Ableitung gemeinsamer *Aktionsfelder* von Produkt- und Technologieplanung wird im Folgenden die *Potenzialmatrix* entwickelt. Die klassische Ableitung von Suchfeldern im Rahmen der Produktplanung gemäß VDI-Richtlinie 2220 wird um die Perspektive der Fertigungstechnologie erweitert [VDI80]. Grundlage der *Potenzialmatrix* ist der *Potenzialorientierte Ansatz*. Innovation entsteht dabei aus der erfolgreichen Integration von *Market Pull* und *Technology Push* (Kap. 2.2.1). Übersetzt in den vorliegenden Untersuchungsbereich, der Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk, entspricht dies der erfolgreichen Integration von *Produkt-* und *Technologiepotenzialen*.

Die von Produkt- und Technologieplanung ermittelten *Produkt-* und *Technologiepotenziale* werden in der *Potenzialmatrix* zusammengeführt (**Abbildung 49**, S.84). Dieser Abgleich von Produkt- und Technologiepotenzialen kann in Abhängigkeit der Konzeptreife des Produktpotenzials auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen (Kap. 4.3.2.1):

- Ebene Suchfeld
- Ebene Produktidee
 - Produktfunktion
 - Produktattribut
 - Produktobjekt/Großgestalt (Bauteil/Feature)
 - Werkstoff

Grundsätzlich sind *Produkt-* und *Technologiepotenziale* so weit zu detaillieren, bis eine erste Zuordnung möglich ist.

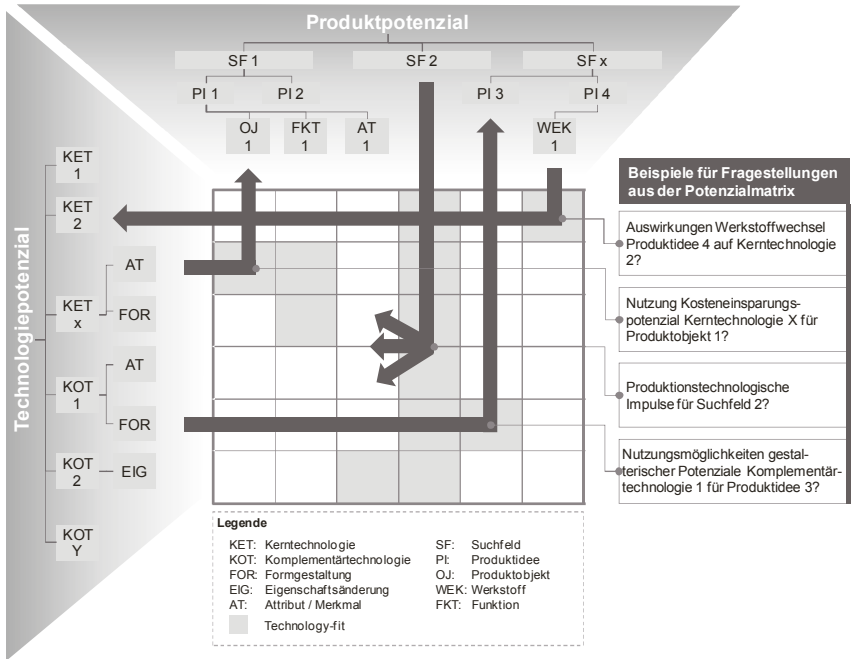


Abbildung 49: Potenzialmatrix

Matrix for Integrating Product and Technology Potentials

Der Beitrag und die Vorteile der Fertigungstechnologie bzw. des Technologiepotenzials werden dabei in Abhängigkeit von der Konzeptreife des Produktpotenzials unterschiedlich detailliert beschrieben. In den sehr frühen Phasen der Produktentstehung beschränkt sich die Semantik dabei auf die Beschreibungsparameter für Suchfelder gemäß VDI 2220 (**Abbildung 50**, links, S.85). Mit zunehmender Konzeptreife des Produktes werden die fertigungstechnologischen Beiträge zur Erreichung der Produktziele über die Dimensionen *Produktfunktionen & -attribute*, *Produktobjekt/Grobgestalt* und *Werkstoff* detailliert (**Abbildung 50**, unten, von links nach rechts, S.85). Die Herausforderung hierbei ist die Übersetzung der fertigungstechnologischen Potenziale in die Sprache der Entwicklungs- und Konstruktionsmethoden. Die Beschreibungsdimensionen und -parameter aus **Abbildung 50** dienen hier als Anregung, sind aber produkt- und fertigungstechnologiespezifisch zu erweitern.

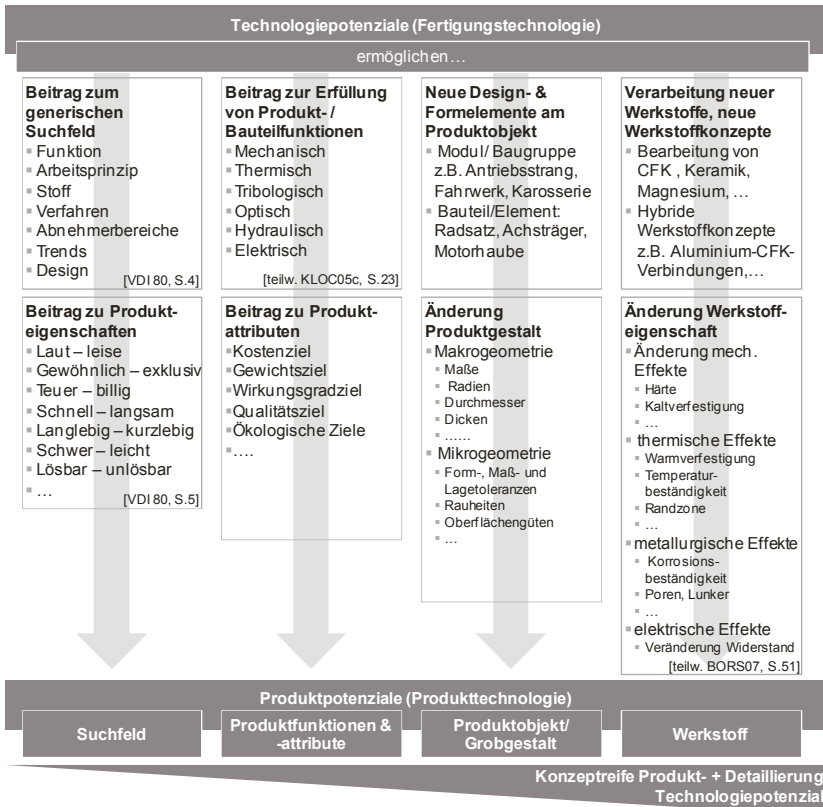


Abbildung 50: Mögliche fertigungstechnologische Beiträge zur Realisierung von Produktpotenzialen
Manufacturing Technology: Possible Contribution for Product Innovation

Bei der Anwendung der *Potenzialmatrix* hat sich folgendes Vorgehen bewährt:

- Vorstellung der *Produktpotenziale* sowie ihrer wesentlichen Differenzierungsmerkmale durch die Produktplanung
- Vorstellung der *Technologiepotenziale* inklusive ihrer wesentlichen Differenzierungsmerkmale durch die Technologieplanung
- Abgleich der Produkt- und Technologiepotenziale mit der *Potenzialmatrix*

Das vorgestellte Vorgehen erlaubt die systematische Identifikation von gemeinsamen Aktionsfeldern von Produkt- und Technologieplanung mit maximalem Nutzen für beide Planungsbereiche. Darüber hinaus ermöglicht es die Ableitung von Arbeitsfragen für die *Integrierte Produktfindung* (Kap. 4.3.3). Diese können direkt in den Feldern der *Potenzialmatrix* festgehalten werden.

4.3.2.3 Kommunikation der technologischen Potenziale mit One-off-Prototyping

One-off-Prototyping dient der Visualisierung und Kommunikation technologischer Fähigkeiten und Potenziale des Produktionsnetzwerks. Es kann die Suche nach Anwendungsmöglichkeiten für neue fertigungstechnologische Entwicklungen des Produktionsnetzwerks unterstützen. Die Erstellung von *One-off-Prototypen* erfolgt, in Abgrenzung zum klassischen Prototypenbau, bereits vor oder während der Produktfindung und nicht nach erstmaligem Durchlauf des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses [VDI93, S.8]. Dabei stehen die Darstellung und Kommunikation von Ideen, Möglichkeiten und Herausforderungen sowie die (selektive) Prüfung von Funktion und Machbarkeit im Vordergrund. Die Darstellungsformen reichen von Prototypen aus Papier und Pappe, über virtuelle Prototypen bis hin zu ersten Funktionsmustern (Abbildung 51).

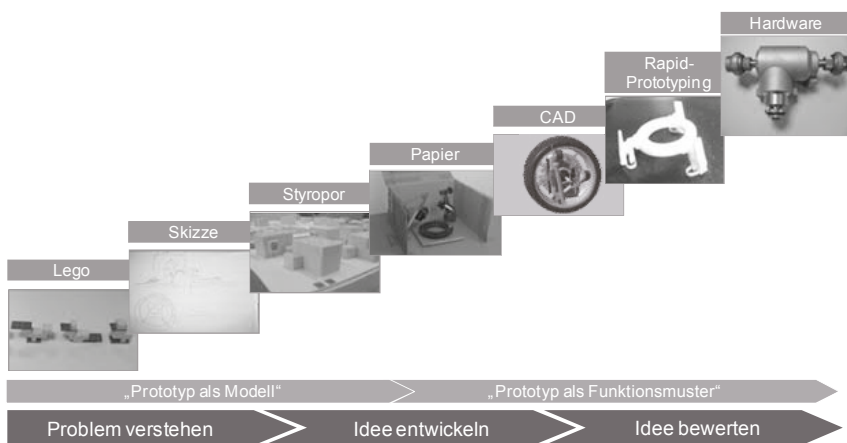


Abbildung 51: Beispiele für One-off-Prototyping in der Produktion
Examples for One-off-Prototyping in Production

One-off-Prototyping dient dem Verstehen, Entwickeln und Beurteilen von fertigungstechnologischen Konzepten. Es ist Arbeits- und Kommunikationsmedium. Es greift die Gedanken aus dem *Social Prototyping* oder *Experience Prototyping* des Produkt- und Softwaredesigns auf und überträgt diese auf die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken [KELL01; KELL02; BUCE00; SNYD01]. Es ermöglicht die schnelle Generierung und Kommunikation von Lösungsvarianten sowie deren Diskussion und Bewertung im Expertenkreis. Es ist empirisch erwiesen, dass sich Skizzen, einfache Modelle und Prototypen positiv auf die Kreativität und Lösungsqualität auswirken [SACH02, S.63ff].

One-off-Prototyping ist im Allgemeinen ein Appell zur Durchführung einfacher, schneller Prinzipversuche zur Weiterentwicklung und Prüfung der fertigungstechnologischen Konzepte. Prototypen sind ein außerordentlich starkes Kommunikationsmedium. Ein guter One-off-Prototyp hilft, Prozesspartner vom fertigungstechnologischen Konzept und der Kompetenz des Produktionsnetzwerks zu überzeugen.

4.3.3 Befähigung von Effektivitätsinnovationen mit der Integrierten Produktfindung

Integrated Product Design

Mit der *Integrierten Produktfindung* werden in Zusammenarbeit von Produkt- und Technologieplanung Ideen und Grobkonzepte für neue Produkte und Leistungen entwickelt. Es erfolgt ein gemeinsames Ausgestalten relevanter Produktfunktionen und -attribute. Fertigungstechnologische Kompetenzen und Potenziale fließen somit bereits in die Produktdefinition mit ein.

Der Innovationsprozess, insbesondere im Kontext radikaler produkttechnologischer Umbrüche, ist von hoher Dynamik und Unsicherheit gekennzeichnet (Kap. 2.1.3; 2.2.3). Die in diesem Zusammenhang bereits von *Ehrlenspiel* und *Hacker* geäußerte Kritik der mangelnden Flexibilität linearer Planungsmethoden wird an dieser Stelle aufgegriffen [EHLR07, S.317ff; HACK02]. Kern der *Integrierten Produktfindung* ist folglich ein netzwerkartiges Vorgehensmodell (**Abbildung 52**).

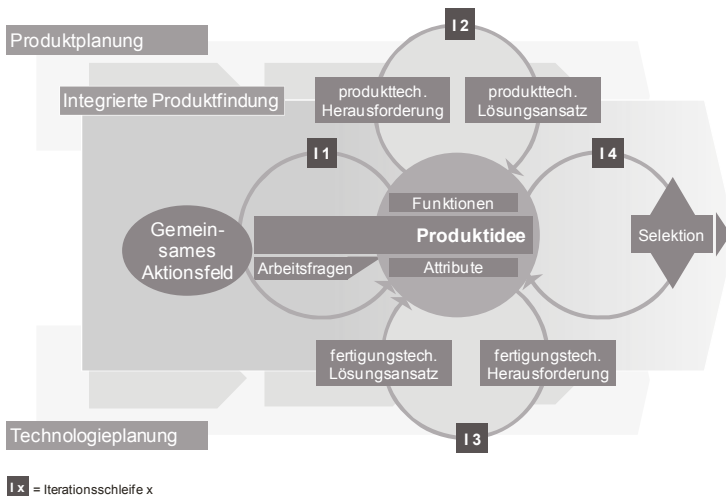


Abbildung 52: Die vier Iterationsschleifen der Integrierten Produktfindung
The four Iteration Loops of Integrated Product Design

Dieses Vorgehensmodell soll dazu anregen, die Aktivitäten der Produkt- und Technologieplanung bereits in der Produktentstehung zu verknüpfen. Die Integration von Produktentwicklung und Technologieplanung erfolgt dabei nicht im klassischen Gegenstromprinzip, sondern im Rahmen kollaborativer Zusammenarbeit (Kap. 2.2.4) [EVER03, S.32ff].

Die *Integrierte Produktfindung* erfolgt auf Basis der im vorangegangenen Planungsschritt mithilfe der *Potenzialmatrix* erarbeiteten Aktionsfelder, Arbeitsfragen und Produktideen (Kap. 4.3.2.2). Kern des Vorgehensmodells sind folgende vier Iterationsschleifen (**Abbildung 52**, S.87):

- Erarbeitung der Produktidee (I 1)
- Produkttechnische Detaillierung (I 2)
- Fertigungstechnologische Detaillierung (I 3)
- Selektion der erarbeiteten Konzeptideen (I 4).

Dabei kann für die Erarbeitung der Produktideen (I 1) auf die *Potenzialmatrix* sowie die klassischen Methoden der Ideenfindung zurückgegriffen werden (Kap. 4.3.2.2) [KELL02; SHT05]. Zur produkttechnischen Detaillierung (I 2) bieten Produktplanung und Produktentwicklung methodische Unterstützung [VDI80; EHRL07, S.335ff]. Hierbei sind mögliche werkstofftechnologische Alternativen mit zu berücksichtigen. *Technologiepotenzialkalender*, *fertigungstechnologieorientierte Technologiefrüherkennung* und *Technologieinformationssysteme* sind ein möglicher Anknüpfungspunkt für fertigungstechnologische Lösungsimpulse (I 3) (Kap. 4.1.1; Kap. 4.1.3; Kap. 4.2.2.1). Für die Selektion der Konzeptideen kann das Bewertungssystem aus Kapitel 4.4 genutzt werden (I 4).

4.3.4 Zwischenfazit

Interim Results

Die Effektivität und Wettbewerbsfähigkeit der vom Produktionsnetzwerk angebotenen Leistungen kann langfristig durch produkttechnologische Umbrüche verändert werden. Insbesondere radikale produkttechnologische Umbrüche, wie z. B. die Elektrifizierung des Pkw-Antriebsstrangs, erfordern ein frühzeitiges Agieren von Produktenwicklung und Technologieplanung. Mit dem Modul *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* werden Produkt- und Technologieplanung noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering* integriert. Der inhaltliche und zeitliche Aktionsraum des Produktionsnetzwerks wird erweitert. Neue Möglichkeiten zur Realisierung fertigungstechnologieinduzierter, wettbewerbsdifferenzierender Produkte werden erschlossen. Gegebenenfalls fehlende fertigungstechnologische Fähigkeiten und Kompetenzen können rechtzeitig aufgebaut werden. Anstoß für die im Rahmen des Methodenmoduls beschriebenen Aktivitäten bilden die mithilfe des *Technologiepotenzialkalenders* abgeleiteten Innovationsaufgaben.

Der entwickelte Integrationsansatz verknüpft die Aktivitäten von Produkt- und Technologieplanung auf Grundlage der VDI-Richtlinie 2220 in zwei Stufen [VDI80]. In der ersten Planungsstufe werden mit der entwickelten *Potenzialmatrix* Produkt- und Technologiepotenziale abgeglichen und gemeinsame Aktionsfelder für Produkt- und Technologieplanung abgeleitet. Die klassische Definition von Suchfeldern im Rahmen der Produktplanung gemäß VDI-Richtlinie 2220 wird somit um fertigungstechnologische Aspekte erweitert [VDI80]. In der zweiten Planungsstufe werden die erarbeiteten Aktionsfelder und Produktideen ausgearbeitet. Dazu wird ein netzwerkartiges Vorgehensmodell vorgestellt, das in kollaborativer Zusammenarbeit von Produkt- und Technologieplanung die gemeinsame, iterative Ausgestaltung der Produktfunktionen und -attribute ermöglicht. Ergebnis des Moduls sind stimmige Konzepte zur Erschließung von *Effektivitätsinnovationen* unter maximaler Nutzung fertigungstechnologischer Potenziale.

4.4 Bewertung der entwickelten Konzepte (Modul IV)

Evaluation of Concepts (Module IV)

Das Modul *Bewertung der entwickelten Konzepte* unterstützt bei der Bearbeitung der im Rahmen der Methodenanwendung anfallenden Beurteilungs- und Bewertungsaufgaben (**Abbildung 53**).

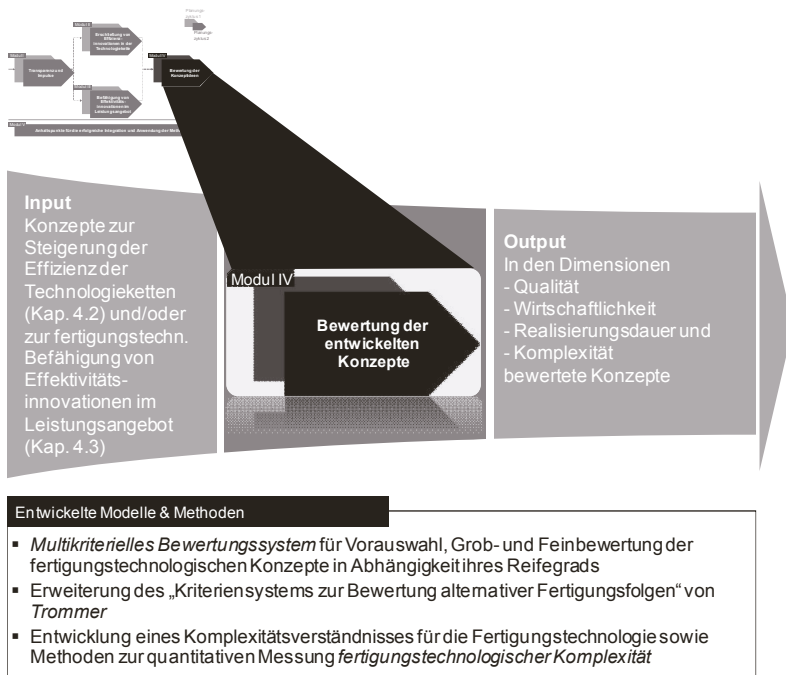


Abbildung 53: Input, Output, Modelle und Methoden des Modul IV

Input, Output, Models and Methods of Module IV

Ergebnis des Moduls sind bewertete Konzepte als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen.

4.4.1 Anforderungen an das Bewertungssystem

Der Anspruch der durchgängigen Unterstützung der *Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* erfordert die Bereitstellung eines Bewertungssystems zur multikriteriellen Bewertung der entwickelten fertigungstechnologischen Konzepte. Dabei sind die spezifischen Charakteristika der Bewertungsaufgabe zu berücksichtigen. Aus dem Anwendungskontext der vorliegenden Arbeit ergeben sich folgende wesentliche Anforderungen an das Bewertungssystem (Kap. 2.1):

- Multikriterielle Bewertung – Berücksichtigung der Bewertungsdimensionen Wirtschaftlichkeit, Realisierungsdauer, Qualität und Komplexität
- Reifeadäquate Bewertung – stufenweise Steigerung der Bewertungstiefe in Abhängigkeit von der Konzeptreife
- Bewertung unter Unsicherheit – Erfordernis des Umgangs mit unsicherer Information
- Praxistauglichkeit des Bewertungssystems – Anpassungsflexibilität, Effizienz und Transparenz des Bewertungssystems

Auch wenn Bewertungssysteme Gegenstand nahezu aller Arbeiten der Technologieplanung sind, werden die zuvor genannten Anforderungen an das Bewertungssystem nur in Ausschnitten erfüllt (Kap. 2.3.3). Wesentliche Handlungsfelder sind die fehlende Berücksichtigung *fertigungstechnologischer Komplexität* sowie die fehlende *Effizienz* und *Transparenz* der Bewertungssysteme. Diese Handlungsfelder sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Wird *fertigungstechnologische Komplexität* nicht bereits in der Planungsphase erkannt bzw. bewertet, ist die Gefahr hoher Komplexitätskosten im laufenden Serienbetrieb gegeben. Eine Berücksichtigung fertigungstechnologischer Komplexität im Entscheidungsprozess ist vor diesem Hintergrund erforderlich. In keinem der untersuchten Arbeiten der Technologieplanung wird dieser Aspekt jedoch bisher berücksichtigt (Kap. 2.3.3).

Die fehlende *Transparenz* existierender Bewertungssysteme resultiert primär aus dem Zusammenfassen verschiedenartigster Ziele zu einem formalen Ausdruck. Die dazu genutzte additive Präferenzfunktion weist den Nachteil auf, dass sich die Zielerreichungsgrade unterschiedlichster Kriterien gegenseitig kompensieren können [GELD06, S.134]. Es entsteht ein „verschwommenes“ Bild der Bewertungssituation. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, die für den Entscheidungsprozess wichtigsten Ziele bzw. Zieldimensionen nicht miteinander zu verrechnen, sondern separat und standardisiert aufzuzeigen. So wird die Identifikation und Auflösung von gegebenenfalls existierenden Zielkonflikten möglich.

Die angesprochene fehlende *Effizienz* existierender Bewertungssysteme resultiert zum einen aus der mangelnden Anpassungsfähigkeit einzelner Systeme an unterschiedliche Bewertungssituationen und zum anderen aus der mathematischen Abbildung unscharfer linguistischer Informationen im Bewertungssystem. Ursache für die mangelnde Anpassungsfähigkeit der Bewertungssysteme ist die unzureichende Berücksichtigung wesentlicher Einflussvariablen auf die Bewertungssituation, wie z. B. die Anzahl und die Reife der Konzeptvorschläge. Darüber hinaus ist mit Blick auf die Zielsetzung der effizienten Bewertung zu hinterfragen, ob die Abbildung unscharfer linguistischer Information z. B. mithilfe der *Fuzzylogik* oder des *Preference Program*-

ming den Mehraufwand rechtfertigt. Schließlich wird die Abbildung unscharfer Eingangsinformationen eben auch unscharfe Ausgangsinformationen bzw. Bewertungsergebnisse zur Folge haben.

Existierende Bewertungssysteme der Technologieplanung sind bereits von hoher Reife und Güte. Insbesondere das Bewertungssystem von *Trommer* bildet für die vorliegende Problemstellung einen guten Ansatzpunkt [TROM01]. Es soll folglich als Grundgerüst für eine Weiterentwicklung in den beschriebenen Handlungsfeldern dienen.

4.4.2 Vorgehensmodell für die Bewertung der entwickelten Konzepte

Das Vorgehensmodell besteht aus den drei Bewertungsstufen *Vorauswahl*, *Grobbewertung* und *Feinbewertung*. Die Bewertungsstufen dienen der schrittweisen Eingrenzung von Konzeptalternativen über die Kriteriencluster *Qualität*, *Wirtschaftlichkeit*, *Komplexität* und *Realisierungsdauer* (Abbildung 54).

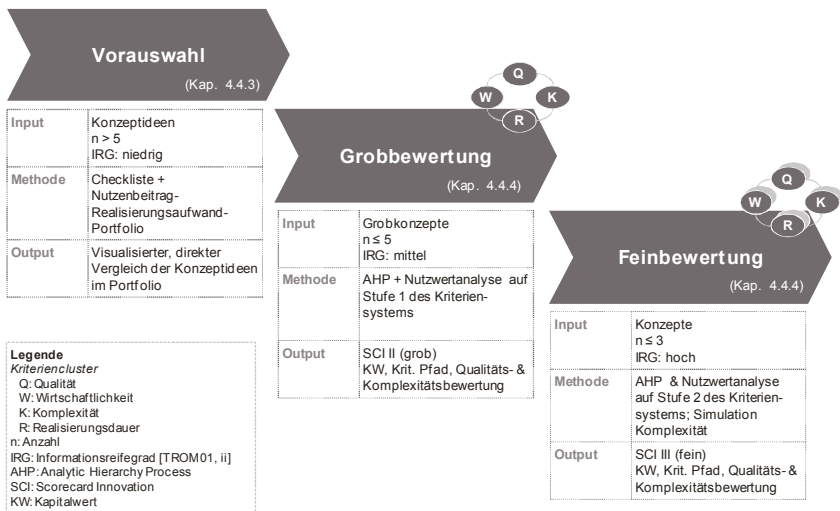


Abbildung 54: Vorgehensmodell für die Bewertung fertigungstechnologischer Innovation
Production Technology Innovation Assessment Process

Die erste Stufe des Bewertungssystems bildet die *Vorauswahl* von Konzeptideen. Die hier vorliegende Bewertungssituation ist gekennzeichnet von mindestens fünf Konzeptideen geringer Informationsreife. Die Informationsreife ist eine Funktion des Informationsgehalts und der Informationssicherheit des Konzeptes im Zeitverlauf und kann pragmatisch von Konstrukteur und Technologieplaner abgeschätzt werden [TROM01, S.47ff]. Eine geringe Informationsreife ist gekennzeichnet durch fehlen-

de/unscharfe Spezifizierung von Formelementen und Werkstoffangaben des Bauteils bzw. Bauteilfeatures.³ Eine hohe Anzahl an Konzeptalternativen geringer Informationsreife limitiert die Anwendbarkeit der in der Technologieplanung weitverbreiteten *Multi-Criteria-Decision-Making-Methoden (MCDM-Methoden)* wie z. B. der *AHP-Methode* [GELD99, S.97]. Vor diesem Hintergrund wird an dieser Stelle eine Vorauswahl der Konzeptideen mithilfe von *K.O.-Kriterien* und dem *Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolio* eingeführt.

Die zweite Stufe des Bewertungssystems bildet die *Grobbewertung* der Konzeptvorschläge. Die mittlere Informationsreife der Konzeptvorschläge sowie deren vorausgegangene Eingrenzung im Zuge der Vorauswahl ermöglichen den sinnvollen Einsatz klassischer *MCDM-Methoden*. Eingesetzt wird eine Kombination von AHP-Methode und Nutzwertanalyse, die die Vorteile beider Ansätze kombiniert. Dabei bildet die Komplexitätsbewertung den Schwerpunkt der Methodenentwicklung. Die Ergebnisse der Grobbewertung werden über die *Scorecard Innovation* visualisiert. Diese stellt die Konzeptalternativen in den Dimensionen Qualität, Wirtschaftlichkeit, Komplexität und Realisierungsdauer einander gegenüber und ermöglicht somit eine valide Entscheidungsfindung im Gremium.

In der dritten und letzten Stufe des Bewertungssystems werden mit der *Feinbewertung* der Konzepte die Ergebnisse aus der Grobbewertung detailliert. Die hohe Informationsreife erlaubt die weitere Detaillierung der Bewertungskriterien. Mit Hilfe des auf der *Monte Carlo Simulation* aufbauenden *Latin Hypercube Verfahrens* können die Auswirkungen fertigungstechnologischer Komplexität auf die Bauteileigenschaften (Bauteilgeometrie, sonst. Bauteileigenschaften) simuliert werden. Die Ergebnisse der Feinbewertung werden analog zur Grobbewertung in einer Scorecard aufbereitet.

4.4.3 Vorauswahl der Konzeptideen (Bewertungsstufe 1)

Die Bewertungssituation bei der Vorauswahl von Konzeptideen ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Alternativen geringer Informationsreife. Zielsetzung der Vorauswahl ist es nicht, die optimale Alternative zu identifizieren, sondern die Entscheidungssituation zu ordnen.

Die Vorauswahl erfolgt „sortenrein“ für die jeweilige Innovationsaufgabe, d. h. Konzeptideen unterschiedlicher Innovationsaufgaben werden nicht miteinander verglichen. Sie erfolgt in zwei Stufen und prüft die Konzeptideen bzgl. definierter K.O.-Kriterien und bzgl. Nutzenbeitrag und Realisierungsaufwand.

Die *K.O.-Kriterien* umfassen binäre technologische, finanzielle, gesetzliche oder unternehmenspolitische Ausschlussmerkmale für die Konzeptidee. An erster Stelle

³ Für Methoden zur Berechnung des Informationsreifegrades vgl. *Trommer* [TROM01,S.47f]

steht die Erfüllbarkeit der geforderten Bauteileigenschaften. Technologie- und standortspezifische K.O.-Kriterien können darüber hinaus ergänzend genutzt werden. Ein Beispiel für ein standortspezifisches K.O.-Kriterium kann eine eingeschränkte Hallenhöhe sein, ein technologisches K.O.-Kriterium die fehlende Automatisierbarkeit der Fertigungstechnologie. Da die Nichterfüllung eines K.O.-Kriteriums zum direkten Verwerfen der Konzeptidee führt, sollte die Definition von K.O.-Kriterien sehr restriktiv erfolgen.

Das *Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolio* wird durch die Achsen Nutzenbeitrag und Realisierungsaufwand aufgespannt (**Abbildung 55**). Das Portfolio orientiert sich somit am Wirtschaftlichkeitsprinzip oder ökonomischen Prinzip und versucht dieses für die Vorauswahl der Konzeptideen qualitativ abzubilden [HADE00; S.3508].

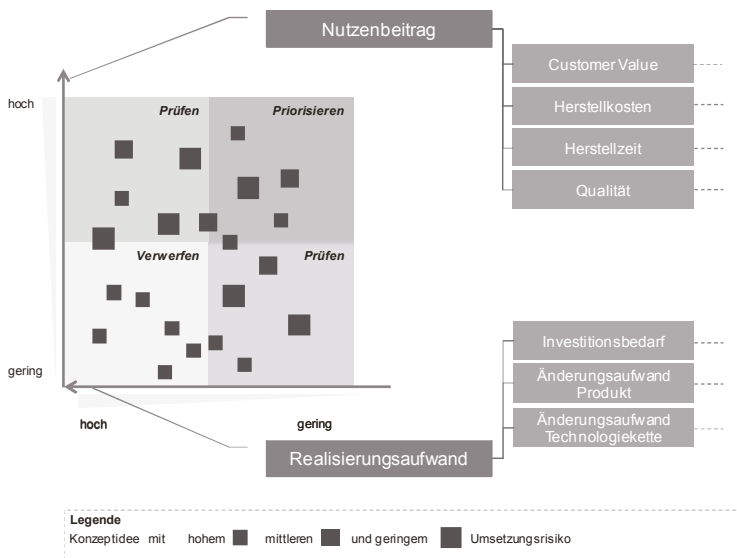


Abbildung 55: Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolio
Benefit and Effort Portfolio

Die Beurteilung erfolgt im Rahmen der Expertendiskussion über den direkten, paarweisen Vergleich der Konzeptideen. Die Einordnung im Portfolio kann durch die Anwendung der Nutzwertanalyse unterstützt werden [OERT09, S.142ff]. Diese ermöglicht die Quantifizierung der Experteneinschätzungen auf den Achsen Nutzenbeitrag und Realisierungsaufwand und somit die Errechnung exakter Positionen für die Konzeptideen im Portfolio. Die vier Quadranten des Portfolios sind mit den Normstrategien *Priorisieren*, *Prüfen* und *Verwerfen* hinterlegt. Eine Abschätzung des Umsetzungsrisikos bzw. Zweifel an der Machbarkeit der Konzeptidee lassen sich im

Portfolio direkt vermerken und/oder über Form oder Farbe der Konzeptkarte visualisieren.

Das Vorgestellte Vorgehen zur Vorauswahl der Konzeptideen sollte noch während der Konzeptfindungswshops eingesetzt werden. Es bietet eine praktikable Möglichkeit zur Eingrenzung der Alternativen bei geringem Informationsreifegrad und dient somit der Steigerung der Effizienz im weiteren Bewertungsprozess.

4.4.4 Grob- und Feinbewertung der Konzepte (Bewertungsstufe 2+3)

Konnten die Konzeptalternativen im Rahmen der Vorauswahl auf ca. fünf Alternativen eingegrenzt werden, und liegt ein mittlerer Informationsreifegrad vor, ist eine quantitative Bewertung der Alternativen sinnvoll. Dafür wird im folgenden Teilkapitel zunächst das Kriteriensystem vorgestellt, anschließend wird das Bewertungsmodell für die Grob- und Feinbewertung beschrieben.

4.4.4.1 Kriteriensystem für die Grob- und Feinbewertung

Das Kriteriensystem basiert auf dem *Modularen Kriteriensystem zur Bewertung alternativer Fertigungsfolgen* von Trommer [TROM01, S. 79ff]. Es ergänzt dieses um die Bewertungsdimensionen *Fertigungstechnologische Komplexität* und *Realisierungsdauer*.



Abbildung 56: Gliederung der vier Bewertungsdimensionen fertigungstechnologischer Innovation
The four Dimensions of Manufacturing Technology Innovation Assessment

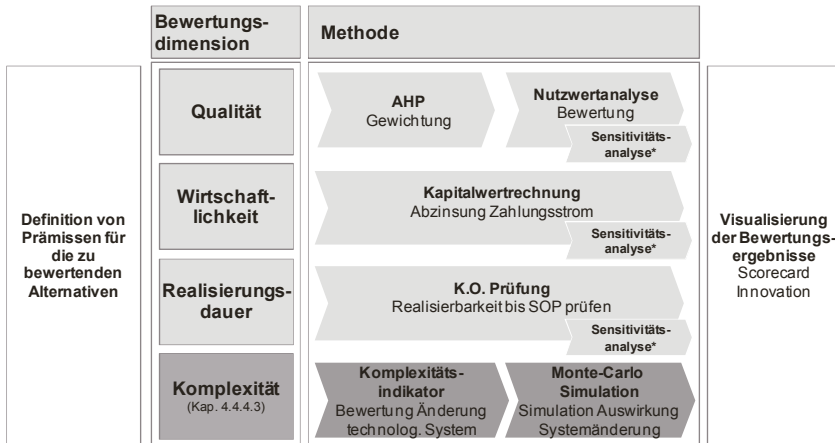
Die von *Trommer* vorgeschlagenen qualitativen Bewertungsdimensionen *prozessabhängige Produktqualität*, *Prozessqualität* und *Ökologie* werden zu einem erweiterten Qualitätsbegriff zusammengefasst. Der Aspekt fertigungstechnologieinduzierter *funktionaler Produktqualität* wird eingearbeitet, eine optionale Ergänzung um die Kriteriencluster Ergonomie und Flexibilität/Wandlungsfähigkeit ermöglicht. Die von *Trommer* vorgeschlagene Bewertungsdimension *Company-Fit* wird indessen ausgeklammert, da die Konsistenz der Innovationsaufgabe zu Unternehmensstrategie und -zielen über den entwickelten Technologiepotenzialkalender bereits gewährleistet ist (Kap. 4.1). Auf höchster Ebene ergeben sich für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken somit vier Bewertungsdimensionen: *Wirtschaftlichkeit*, *Qualität*, *Realisierungsdauer* und *Komplexität* (**Abbildung 56**, S.95).

Die Detaillierung der genannten Bewertungsdimensionen erfolgt in den Stufen der *Grob-* und *Feinbewertung* des Vorgehensmodells und ist im Anhang dargestellt (Anhang A.1). Das Kriteriensystem ist anwendungsspezifisch anzupassen und zu ergänzen.

4.4.4.2 Bewertungsmodell für die Grob- und Feinbewertung

Das Bewertungsmodell setzt auf dem entwickelten Kriteriensystem auf und stellt geeignete Methoden für die Bewertung von Qualität, Wirtschaftlichkeit, Realisierungsdauer und Komplexität der fertigungstechnologischen Konzepte bereit. Die genannten Bewertungsdimensionen werden dabei nicht über eine additive Präferenzfunktion verrechnet, sondern getrennt voneinander bewertet (**Abbildung 57**, S.97). Der aus der Verrechnung verschiedener Zieldimensionen resultierende kompensatorische Effekt klassischer MCDM-Methoden wird somit für diese Dimensionen vermieden. Eine transparente Kompromiss- und Entscheidungsfindung im Entscheidungsgremium unter Berücksichtigung konfliktärer Kriterienausprägungen wird unterstützt. Grundlage für die Grobbewertung ist die Definition von Eingangsprämissen. Dazu gehören im Wesentlichen das Schichtmodell bzw. die Betriebszeit, Peakstückzahl, SOP, EOP und der Diskontierungsfaktor.

Im Folgenden wird die Methodenauswahl für die Bewertungsdimensionen Qualität, Wirtschaftlichkeit und Realisierungsdauer kurz begründet. Dabei wird weitestgehend auf bewährte Methoden zurückgegriffen, für deren umfassende theoretische Darstellung auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen wird [GOET08, S. 180ff; THOE01, S.601ff]. Für die Bewertungsdimension *fertigungstechnologische Komplexität* ist der Rückgriff auf bewährte Bewertungsmethoden nicht möglich. Vor diesem Hintergrund wird dieser Aspekt im Rahmen eines separaten Teilkapitels weiter vertieft (Kap. 4.4.4.3).



*Sensitivitätsanalyse: Prüfung der Robustheit des Bewertungsergebnisses bei unsicheren Eingangsgrößen

 =Rückgriff auf etablierte Methoden

 =Neuentwicklung Methode

Abbildung 57: Bewertungsmodell für die Grob- und Feinbewertung
Evaluation Modell

Methodische Basis zur Bewertung der *Qualität* bildet eine Kombination von AHP-Methode, Nutzwert-, und Sensitivitätsanalyse. Die vorgeschlagene Methodenkombination verbindet die Vorteile der genannten Ansätze bezüglich der an das Bewertungssystem gestellten Anforderungen einer multikriteriellen, reifeadäquaten und praxistauglichen Bewertung unter Unsicherheit (Kap. 4.4.1). Die sehr aufwendige, aber aufgrund ihrer paarweisen Vergleiche und der Konsistenzprüfung sehr exakte AHP-Methode wird für die Gewichtung der Kriterien genutzt. Die Bewertung der Konzeptalternativen erfolgt über die Nutzwertanalyse. Diese verzichtet auf paarweise Vergleiche zugunsten von Direkteingaben und steigert somit die Effizienz und Praxistauglichkeit des Bewertungsprozesses. So würde die AHP-Methode, bei angenommenen fünf Konzeptalternativen und sechs Qualitätskriterien, schon auf erster Ebene 100 Paarvergleiche bzw. Eingaben erfordern, die eine gewissenhafte Bewertung bei knapper Planungskapazität nahezu unmöglich machen.

Zur Bewertung der *Wirtschaftlichkeit* von Investitionsvorhaben hat sich in der Praxis die Kapitalwertrechnung durchgesetzt. Diese soll in Form des aufwandsorientierten Kapitalwertes für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit fertigungstechnologischer Konzeptalternativen herangezogen werden. Eine Betrachtung der Ertragsseite ist vor dem Hintergrund der Prämisse, dass nur fertigungstechnologische Alternativen für identische Produkte mit identischen Stückzahlen bewertet werden, irrelevant. Der Diskontierungsfaktor ist in Abhängigkeit der unternehmensspezifischen Kapitalkosten festzulegen. Die zur Anwendung des aufwandsorientierten Kapitalwertes erforderlichen

Zahlungsströme sind entsprechend des entwickelten Kriteriensystems für Investitionen, Entwicklungs-, Planungs- und Anlaufkosten sowie Fertigungs-/Herstellkosten zu ermitteln.

Fertigungstechnologische Investitionen sind in der Regel zeitkritisch. Teil der Grobbewertung ist folglich eine Abschätzung der *Realisierungsdauer* für das fertigungstechnologische Konzept. Diese ergibt sich aus der Entwicklungs-, Planungs- und Beschaffungsdauer sowie der Dauer für Aufbau, Inbetriebnahme und Anlaufvorbereitung.

Die Planung technologischer Innovation ist im Allgemeinen von Unsicherheit gekennzeichnet, ihre Bewertung unterliegt darüber hinaus subjektiven Schwankungen. Zur Prüfung der Robustheit des Bewertungsergebnisses gegenüber Veränderungen kritischer Eingangsparameter kann die *Sensitivitätsanalyse* genutzt werden. Im Sinne von Best- und Worst-Case-Szenarien bietet sie die Möglichkeit, kritische Eingangsparameter zu variieren. Das Vertrauen in das Bewertungsergebnis wird gestärkt.

Das dargestellte Bewertungsmodell wurde in Form eines EDV-Tools umgesetzt (Kap. 5.5). Vorgegebene Eingabemasken und Bewertungsmatrizen sowie eine automatisierte Ausgabe der Bewertungsergebnisse in Form der *Scorecard Innovation* ermöglichen den effizienten Einsatz des Bewertungsmodells in der Planungspraxis (Anhang A.2). Vorgestellte Methoden werden dabei für Grob- und Feinbewertung genutzt. Die höhere Bewertungsgenauigkeit der Feinbewertung gegenüber der Grobbewertung wird über die Detaillierung und Anpassung des Kriteriensystems erreicht (Anhang A.1).

4.4.4.3 Grob- und Feinbewertung fertigungstechnologischer Komplexität

Die Individualisierung von Produkten, die Volatilität der Absatzmärkte sowie die Verkürzung der Produktlebenszyklen steigern die Komplexität fertigungstechnologischer Prozesse und Prozessketten. Die Beherrschung dieser Komplexität stellt eine zentrale Herausforderung für die Produktion dar. Nicht erkannte und nicht verstandene Komplexität kann zu plötzlichen Qualitätsproblemen bis hin zu Produktionsausfällen führen. Die Planung eines robusten Produktionssystems erfordert folglich die *ex ante* Bewertung fertigungstechnologischer Komplexität. Nur so können rechtzeitig geeignete Maßnahmen zur Komplexitätsreduzierung und -beherrschung abgeleitet werden.

Ansätze zur Bewertung von Komplexität in den Ingenieurwissenschaften sind fast ausschließlich den Bereichen Produktentwicklung und Produktionsmanagement zuzuordnen. Während in der Produktentwicklung die Produktkomplexität und ihre Auswirkung auf Produktfunktion und -kosten Schwerpunkt der Betrachtung sind, betrachtet die Komplexitätsforschung im Produktionsmanagement vorrangig Aspekte

der Produktionsablauf und -aufbauorganisation [LINM09; SUH05; SCHU01; WILD00; TANI08; CALI98; PAPA09; WIEN94]. Die Elemente des fertigungstechnischen Systems werden dabei nicht oder nur oberflächlich über Kapazitäten und Durchlaufzeiten beschrieben. Gemeinsam sind den Ansätzen aus Produktentwicklung und Produktionsmanagement Vorschläge zur Produktmodularisierung und -standardisierung mit dem Ziel der Varianten- und Komplexitätsreduktion.

In der Fertigungstechnik finden sich bisher kaum Ansätze zur Bewertung von Komplexität. So adressiert keine der in Kap. 2.3.3. untersuchten Arbeiten zur Technologieplanung den Aspekt fertigungstechnologischer Komplexität. Einen Anknüpfungspunkt zur Bewertung fertigungstechnologischer Komplexität liefert *EIMaraghy* [ELMA03; ELMA05]. Basierend auf informationstheoretischen Erkenntnissen bewertet sie fertigungstechnologische Komplexität über Informationsquantität, -diversität und -gehalt. Informationsquantität und -diversität beziehen sich auf die Anzahl der Elemente und die Vielfalt der Elemente des fertigungstechnologischen Systems (Produkte, Fertigungsmittel). Der Informationsgehalt beschreibt die Schwierigkeit der zu produzierenden Produktfeatures und wird über den *Product Complexity Index* errechnet [ELMA03, S.364f]. Dieser wird absolut bestimmt, unabhängig von der Fertigungstechnologie. Informationsquantität, -diversität und -gehalt des fertigungstechnologischen Systems werden über den *Process Complexity Index* abgebildet (**Formel 4**):

$$PI_{process} = \sum D_{R\ process,x} \cdot H_{process} + CI_{product} \text{ (Formel 4)}$$

mit: $D_{R\ process,x}$: Diversity Ratio Process (Informationsdiversität Fertigungsprozess)
 $H_{process}$: Information Entrophy measure (Informationsquantität Fertigungsprozess)
 $CI_{product}$: Product Complexity Index (unabhängig vom Fertigungsprozess)

Die Ermittlung fertigungstechnologischer Komplexität über den von *EIMaraghy* vorgeschlagenen, informationsorientierten *Process Complexity Index* greift zu kurz, da dieser in seiner abstrakten Form keine Aussage über eine mögliche Beeinflussung des Fertigungsergebnisses bzw. der Bauteilqualität erlaubt. Ein hoher *Process Complexity Index* zeigt im Wesentlichen nur, dass durch den fertigungstechnologischen Prozess viele unterschiedliche Informationen zu verarbeiten sind.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden ein Ansatz zur Bewertung fertigungstechnologischer Komplexität entwickelt, der das zu erzielende Fertigungsergebnis in den Mittelpunkt stellt. Diesem wird folgende Definition fertigungstechnologischer Komplexität zugrunde gelegt:

Komplexität in der Fertigungstechnik ist ein Maß der Unsicherheit, definierte Bauteileigenschaften durch eine Fertigungsfolge prozesssicher zu erfüllen.

In Abgrenzung zu *EIMaraghy* wird Komplexität in der Fertigungstechnik somit als ein relatives Maß verstanden, abhängig von den zu fertigenden Bauteileigenschaften, dem eingesetzten Werkstoff, den Fertigungstechnologien und -mitteln sowie dem standortspezifischen Fertigungs-Know-how. Eine sinnvolle Bewertung fertigungstechnologischer Komplexität im Sinne der vorgestellten Definition setzt fertigungstechnologische Konzeptalternativen voraus, die die Erfüllung der geforderten Bauteilfunktionen und -attribute grundsätzlich gewährleisten können. Dies wird bereits im Rahmen der Vorauswahl über die Beurteilung von *Machbarkeit* und *Umsetzungsrisiko* geprüft (Kap. 4.4.3).

Grobbewertung fertigungstechnologischer Komplexität

Erster Indikator für Komplexität im fertigungstechnologischen System ist der relative Neuheitsgrad von Bauteil, Fertigungstechnologie, Werkstoff und den im Umgang mit der zu bewertenden fertigungstechnologischen Konzeptalternative erforderlichen Personalqualifikationen. Je umfassender die Neuerung gegenüber dem Status quo, desto höher der Unsicherheits- und Komplexitätsgrad. Dieser Zusammenhang wird mit dem im Folgenden vorgestellten Komplexitätsindikator für Fertigungssysteme KI_{FS} aufgegriffen. Dabei ist die Prozessfähigkeit der aktuell eingesetzten Fertigungstechnologie vor dem Hintergrund der relativen Bewertung zum Status quo Prämisse.

$$KI_{FS} = \sum_{s=1}^S w_s \cdot ki_s \quad (\text{Formel 5})$$

mit: S : Anzahl sich ändernder Systemelemente
 w_s : Optionale Gewichtung im Anwendungskontext
 ki_s : Komplexitätsindikator Systemelement s

Die Systemelemente Bauteil/Bauteilfeature, Technologiekette/Fertigungstechnologie, Werkstoff und Personalqualifikation werden bezüglich ihres Neuheitsgrads gegenüber Status quo geprüft. Für das Systemelement Bauteil/Bauteilfeature gilt:

$$ki_{BF} = \sum_{f=1}^F ng_{BF_f} \quad (\text{Formel 6})$$

mit: F : Anzahl neuer Bauteilfeatures
 ng_{BF_f} : Neuheitsgrad Bauteilfeature f

Für das Systemelement Technologiekette/Fertigungstechnologie gilt:

$$ki_{FT} = \sum_{t=1}^T ng_{FT_t} \quad (\text{Formel 7})$$

mit: T : Anzahl neuer Fertigungstechnologien in der Technologiekette
 ng_{FT_t} : Neuheitsgrad Fertigungstechnologie t

Für das Systemelement Werkstoff gilt:

$$ki_W = ng_W \cdot n_{WS} \quad (\text{Formel 8})$$

mit: ng_W : Neuheitsgrad Werkstoff
 n_{WS} : Anzahl der durch Werkstoffwechsel betroffenen Fertigungsschritte

Die Ermittlung des Komplexitätsindikators der fertigungstechnologischen Konzeptalternative hat standortspezifisch zu erfolgen. Die Bewertung erfolgt dabei im Expertenkreis mit Vertretern aus Produktentwicklung, Technologieplanung, Werkstofftechnik und Personalmanagement. Allgemein gilt: Je geringer der Komplexitätsindikator, desto eher kann von einer detaillierten Komplexitätsbewertung abgesehen werden. Ist der Komplexitätsindikator $KI_{FS} \geq 3$, ist eine genauere Betrachtung der Komplexitätsindikatoren der Teilsysteme Bauteil/Bauteilfeature ki_{BF} , Technologiekette/Fertigungstechnologie ki_{FT} , Werkstoff ki_W und Personalqualifikation ki_P erforderlich. Eine hohe Komplexität in einem der Teilsysteme ist als kritisch zu beurteilen und bedarf weitergehender fertigungstechnologischer Analysen.

Die Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse der verschiedenen Standorte mit den Komplexitätsindikatoren auf Gesamtunternehmens- sowie Industrieebene ermöglicht eine erste Aussage zu technologischen Handlungsschwerpunkten und Umsetzungspfaden. So ist standortspezifische Komplexität bestenfalls mit standortübergreifender Zusammenarbeit und unternehmensspezifische Komplexität mit unternehmensübergreifender Kooperation zu adressieren.

Die exemplarische Auswertung des Beispiels „Fügen von Batteriezellen“ zeigt auf den ersten Blick geringe Komplexität für die Technologie *Schrauben* und hohe für die Technologie *Laserschweißen* (**Abbildung 59**; S.103). Unabhängig von der Wahl der Fertigungstechnologie lässt sich darüber hinaus aus fertigungstechnologischer Sicht bereits eine eindeutige Standortempfehlung für Werk A aussprechen. Beide Technologien besitzen hier einen deutlich geringeren relativen Neuheitsgrad. Der Komplexitätsindikator für die Konzeptalternative *Laserschweißen* Zellverbinder liegt außerdem durchgängig bei $KI_{FS} \geq 3$. Eine folglich erforderliche Analyse der Komplexitätsindikatoren auf Systemelementebene zeigt durchgängig $ki_{BF} \geq 3$ und für beide Werke $ki_W \geq 3$. Hintergrund ist die für die Technologie *Laserschweißen* neue und kritische Anforderung bzgl. des maximalen Wärmeeintrags in den Fügepartner Batteriezelle sowie der für beide Werke hohe Neuheitsgrad für die Mischverbindung der Werkstoffe Aluminium und Kupfer. Diese Anforderung ist auch über die Unternehmensgrenzen hinaus als komplex bis sehr komplex einzustufen und wäre somit in der weiteren Untersuchung zu priorisieren.

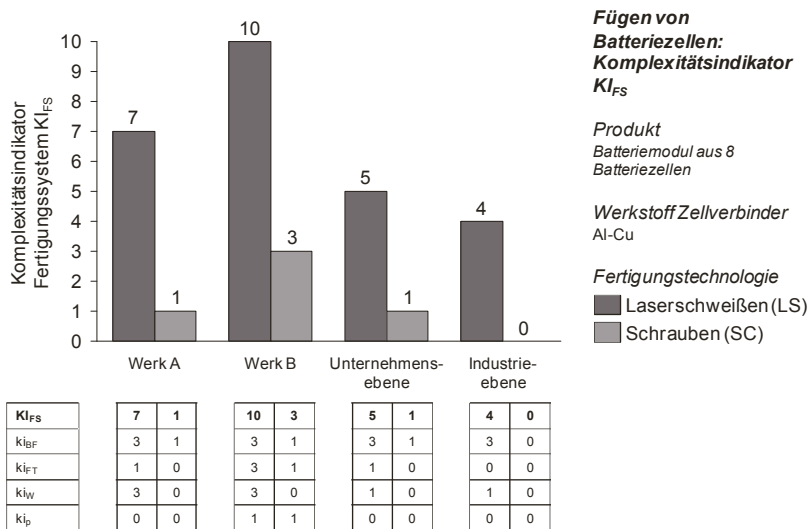


Abbildung 59: Komplexitätsindikator für fertigungstechnologische Komplexität
Indication for Complexity in Manufacturing

Die Ermittlung fertigungstechnologischer Komplexität über den Neuheitsgrad der verschiedenen Elemente des fertigungstechnologischen Systems kann eine erste Indikation für die vorliegende Komplexität geben, gibt aber keinen genauen Aufschluss über deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften. Dazu bedarf es der Analyse der Elemente und Beziehungen des fertigungstechnologischen Systems im Anwendungskontext. Diese erfolgt im Rahmen der Feinbewertung.

Feinbewertung fertigungstechnologischer Komplexität

Im Rahmen der Feinbewertung fertigungstechnologischer Komplexität wird die Auswirkung der Unsicherheit im fertigungstechnologischen System auf die geforderten Bauteileigenschaften bewertet. Dazu bedarf es analytischer Modelle, die fertigungstechnologische Variablen mit den geforderten Bauteileigenschaften in Beziehung setzen. Beispielsweise kann für das Fertigungsverfahren *Schrauben* die Montagevorspannkraft F_{VM} , als die wesentliche Bauteileigenschaft für ein sicheres Betriebsverhalten der Verbindung, wie folgt analytisch beschrieben werden [ROLO11, S.245]:

$$F_{VM} = \frac{2 \cdot M_A}{d_2 \cdot \left[\mu_{ges} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \frac{d_w + d_h}{2 \cdot d_2} \right) + \tan\varphi \right]} \tag{Formel 10}$$

mit: M_A : Anzugsmoment d_2 : Flankendurchmesser μ_{ges} : Reibungszahl
 β : Flankenwinkel φ : Steigungswinkel
 d_w : Außendurchmesser Kopfauflage d_h : Durchmesser des Durchgangslochs

Analytische Modelle sind statisch und berücksichtigen komplexitätstreibende, zeitdynamische Schwankungen der Eingangsgrößen nicht. Mögliche komplexitätstreibende Effekte mit Einfluss auf die Montagevorspannkraft können sich beispielsweise aus fertigungsbedingten, zeitdynamischen Änderungen der Makro- und Mikrogeometrie der Fügepartner ergeben. Für die spanenden Fertigungsverfahren nennt *Klocke* hier als mögliche Quelle thermische Störgrößen (z. B. Prozesswärme, Umgebungseinflüsse), maschinendynamische Störgrößen (z. B. Schwingungen), statische Störgrößen (z. B. Spannfehler) und den Werkzeugverschleiß [KLOC08a, S.4]. *Grossenbacher* nennt für die Umformtechnologie äußere Störgrößen (z. B. Bedienfehler), innere Störgrößen (z. B. Pressenspiel, Werkzeugverschleiß) und temporäre Störgrößen (z. B. Werkstoff-, Lageschwankungen, Beölung) [GROS08, S.68].

Im Rahmen der Feinbewertung fertigungstechnologischer Komplexität wird modelliert, wie sich die aus den Störgrößen resultierende Unsicherheit im fertigungstechnologischen System auf die geforderten Bauteileigenschaften auswirkt. Dazu wird das *Latin Hypercube Verfahren* eingesetzt. Hier handelt es sich um ein stochastisches Simulationsverfahren zur Durchführung von Zufallsexperimenten. Es hat sich aufgrund seiner höheren Recheneffizienz gegenüber der *Monte Carlo Simulation* durchgesetzt [GROS08, S.70]. Bei beiden Simulationsverfahren wird pro Simulationsdurchlauf für alle Eingangsgrößen aus der ihr zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Zufallsgröße bestimmt und in der Zielfunktion verrechnet. Durch die Wiederholung der Simulationsdurchläufe ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung für die Zielgröße, aus der bei ausreichend großem Versuchsumfang auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung geschlossen werden kann [VOSE97]. Die Verfahren werden vorwiegend in der Finanzindustrie zur Risikoaggregation eingesetzt. Im vorliegenden Anwendungskontext lässt sich mithilfe der durch die Simulation ermittelten Häufigkeitsverteilung der untersuchten Zielgröße wie z. B. der Montagevorspannkraft F_{VM} und dem für diese Zielgröße geforderten Toleranzfeld auf die Unsicherheit und somit die Komplexität der Fertigungsaufgabe schließen. Am Beispiel des bereits vorgestellten Modells der Montagevorspannkraft wird das vorgeschlagene Vorgehen deutlich (**Abbildung 60**, S.105). Die nicht durch Parameter des Schraubverfahrens beeinflussbaren Eingangsgrößen Flankendurchmesser, Reibungszahl, Flankenwinkel, Steigungswinkel, Außendurchmesser Kopfauflage und Durchmesser des Durchgangslochs wurden entsprechend ihrer fertigungsbedingten Schwankungen im Zeitverlauf mit Normalverteilungen hinterlegt. Das Anzugsmoment, als die einzige durch das Verfahren direkt beeinflussbare Eingangsgröße des Modells, wurde idealisiert als statisch angenommen.

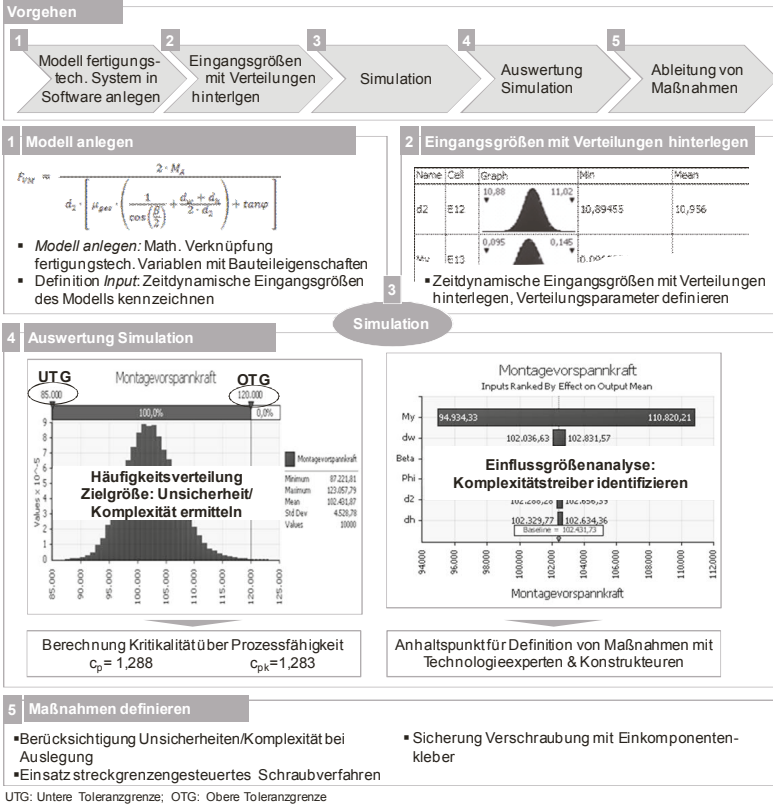


Abbildung 60: Schematische Ermittlung der Unsicherheit der Montagevorspannkraft mit Hilfe von Latin Hypercube
Schematic Derivation of Uncertainty with Latin Hypercube

Aus der Simulation wird ersichtlich, dass die Unsicherheiten im fertigungstechnologischen System zu deutlichen Schwankungen der Montagevorspannkraft führen. Es liegt somit eine Komplexität im Sinne der eingangs formulierten Definition vor. Zur Abschätzung der Kritikalität der vorliegenden Komplexität können die Prozessfähigkeitsindizes c_p und c_{pk} herangezogen werden. Im Beispiel wird das dargestellte Toleranzfeld zwar eingehalten, eine Six-Sigma Prozessfähigkeit mit einem c_p -Wert von mindestens 2,00 und einem c_{pk} -Wert von mindestens 1,5 ist allerdings nicht gegeben.⁴ Maßgeblichen Einfluss auf die Komplexität im Beispiel hat dabei die Reibungszahl μ_{ges} . Sie setzt sich aus der Reibungszahl von Gewinde und Kopfauflage

⁴ Toleranzgrenzen nur zur Verdeutlichung. Für die untersuchte Anwendung wird nur eine untere Toleranzgrenze für das Anzugsmoment vorgegeben.

zusammen und wird durch die Makro- und Mikrogeometrie sowie die Schmierung der Fügepartner beeinflusst. Schwankungen in vorausgehenden Fertigungsschritten mit Einfluss auf Makro-, Mikrogeometrie und Schmierung der Fügepartner wirken folglich stark komplexitätssteigernd.

Die Anwendung des vorgestellten Vorgehens setzt ein analytisches Modell des Fertigungssystems bzw. des relevanten Teilsystems voraus. Auch müssen die Unsicherheiten im System über Wahrscheinlichkeitsverteilungen darstellbar sein. Existiert kein analytisches Modell des Fertigungssystems, sind aber empirische Messdaten von Analogieprozessen vorhanden, kann mittels Datenanalysemethoden versucht werden, mathematische Zusammenhänge abzuleiten. *Regressionsanalysen*, *Data-Mining Methoden* oder *künstliche neuronale Netze* sind an dieser Stelle zu nennen.

4.4.5 Visualisierung der Bewertungsergebnisse in der Scorecard Innovation

Die Bewertungsergebnisse werden standardisiert aufbereitet in der *Scorecard Innovation* zusammengefasst. Diese überträgt den Gedanken der *Balanced Scorecard* des strategischen Managements (dt. ausgewogener Berichtsbogen) auf die vorliegende Problemstellung. Die *Scorecard Innovation* gibt – ausgehend von den wesentlichen allgemeinen und technologiespezifischen Prämissen – Auskunft über die Bewertungsergebnisse der Konzeptalternativen in den vier Dimensionen Qualität, Wirtschaftlichkeit, Realisierungsdauer und Komplexität. Dabei steht innerhalb dieser vier Bewertungsdimensionen folgende Information im Vordergrund (Anhang A.2):

- *Wirtschaftlichkeit*: Gegenüberstellung der Kapitalwerte der untersuchten fertigungstechnologischen Konzeptalternativen aufgeschlüsselt nach Einmalaufwand und Herstellkosten
- *Realisierungsdauer*: Abgleich der Umsetzungsdauer der jeweiligen Konzeptalternative mit dem geplanten SOP
- *Qualität*: Nutzwert Qualität; Details zur Gewichtung und zu kritischen Aspekten in den Unterkriterien funktionale Produktqualität, Prozessqualität, Ökologie, Flexibilität/Wandlungsfähigkeit und Ergonomie
- *Komplexität*: Gegenüberstellung der Komplexitätsindikatoren der verschiedenen Konzeptalternativen sowie der Simulationsergebnisse

Die Scorecard ist direkt mit den Eingangsdaten des Bewertungssystems verknüpft, Detailinformationen sind damit problemlos einsehbar. Ein automatisierter Dominanztest lässt Konzeptalternativen erkennen, die in allen Bewertungsdimensionen unterlegen sind. Die *Scorecard Innovation*, als ausgewogener Bericht über den Zielbeitrag der untersuchten fertigungstechnologischen Konzeptalternativen in den genannten vier Bewertungsdimensionen, ermöglicht eine transparente Kompromiss- und Entscheidungsfindung. Der vielfach kritisierte kompensatorische Effekt klassischer *MCDM-Methoden* wird vermieden [GOET08, S.177].

4.4.6 Zwischenfazit

Im Methodenmodul IV *Bewertung der entwickelten Konzepte* wird ein multikriterielles Bewertungssystem für fertigungstechnologische Innovation entwickelt. Dieses System basiert auf einem dreistufigen Vorgehen, das den Bewertungsprozess in die Schritte *Vorauswahl*, *Grob-* und *Feinbewertung* gliedert. Eine reifeadäquate Bewertung der fertigungstechnologischen Konzeptalternativen ist somit gewährleistet. Diese werden frühzeitig priorisiert, die Verschwendung von Planungsressourcen wird somit vermieden. Dazu werden in der *Vorauswahl* die Konzeptideen anhand von K.O.-Kriterien sowie eine relativen Einordnung in das *Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolio* zunächst eingegrenzt.

Grundlage für die anschließende Grob- und Feinbewertung der Konzepte bildet ein auf diese beiden Bewertungsstufen zugeschnittenes Kriteriensystem. Dazu wird das „Modulare Kriteriensystem zur Bewertung alternativer Fertigungsfolgen“ von *Trommer* an die vorliegende Bewertungsaufgabe angepasst und um die Bewertungsdimensionen *Komplexität* und *Realisierungsdauer* ergänzt [TROM01, S. 79ff]. Auf höchster Ebene ergeben sich für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken somit vier Bewertungsdimensionen: *Wirtschaftlichkeit*, *Qualität*, *Realisierungsdauer* und *Komplexität*

Das entwickelte Bewertungsmodell stellt geeignete Methoden für die Grob- und Feinbewertung der fertigungstechnologischen Konzeptalternativen in den genannten Dimensionen bereit. Während für die Bewertungsdimensionen *Qualität*, *Wirtschaftlichkeit* und *Realisierungsdauer* etablierte Methoden kombiniert werden können, ist für die Bewertungsdimension *fertigungstechnologische Komplexität* grundlegender Entwicklungsbedarf gegeben. Der entwickelte Ansatz stellt dabei die Unsicherheit im Fertigungsergebnis in den Mittelpunkt der Bewertung. Komplexität wird definiert als die Unsicherheit, geforderte Bauteileigenschaften prozesssicher zu erfüllen. Diese Unsicherheit wird in der ersten Bewertungsstufe über den Neuheitsgrad der Bauteil-, Fertigungstechnologie-, Werkstoff- und Personalkombination abgeschätzt und über den Komplexitätsindikator für Fertigungssysteme KI_{FS} quantifiziert. Dieser Indikator bietet eine pragmatische Annäherung für die dem Fertigungssystem inhärente Komplexität. In der Feinbewertung werden die Auswirkungen der Unsicherheit im fertigungstechnologischen System auf die Bauteileigenschaften bewertet. Dazu wird die Unsicherheit fertigungstechnologischer Eingangsgrößen über Verteilungsfunktionen quantifiziert und mithilfe des *Latin Hypercube Verfahrens* deren Wirkung auf die geforderten Bauteileigenschaften simuliert. Der vorgestellte Bewertungsansatz kann anhand eines Praxisbeispiels grundsätzlich bestätigt werden. Erfolgskritisch für ein aussagefähiges Simulationsergebnis bleibt jedoch die Modell- und Datenqualität des Fertigungssystems.

Die Bewertungsergebnisse in den vier Bewertungsdimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Qualität*, *Realisierungsdauer* und *Komplexität* werden anschließend nicht über eine additive Präferenzfunktion verrechnet, sondern in Form der *Scorecard Innovation* standardisiert aufbereitet. Der kompensatorische Effekt klassischer MCDM-Methoden wird somit vermieden, eine transparente Entscheidungs- und Kompromissfindung im Gremium ermöglicht.

4.5 Anhaltspunkte für die erfolgreiche Integration und Anwendung der Methode in der Planungspraxis

Guiding Principles for Successful Integration and Application of the Methodology in the Industry

In einer Befragung von 200 Unternehmen ermittelten *Phaal* und *Farrukh* als zentrale Herausforderung des *Technologie-Roadmapping* (50 % der Nennungen): „keeping the roadmapping process alive on an ongoing basis“ [PHAA00]. Zur Integration und Anwendung der Methode des *Technologiekalenders* in der Planungspraxis bemerkt *Rosier* [ROSI06]: „Der geringe Verbreitungsgrad der Technologiekalendermethode liegt nicht in der Methode an sich begründet, sondern an der fehlenden Integration in unternehmerische Prozesse.“ Der Integration der entwickelten Methode in das Produktionssystem kommt somit für ihre langfristig erfolgreiche Anwendung entscheidende Bedeutung zu.

Die vorliegende Arbeit ist Gegenstand der Technologieplanung und somit Teil des (Technologie-)Managementprozesses (Kap. 2.1.3). Die Überlegungen von *Bleicher* zum *Integrierten Management* bilden somit einen validen Anknüpfungspunkt für die erfolgreiche Integration und Anwendung der Methode in der Planungspraxis (**Abbildung 61**).

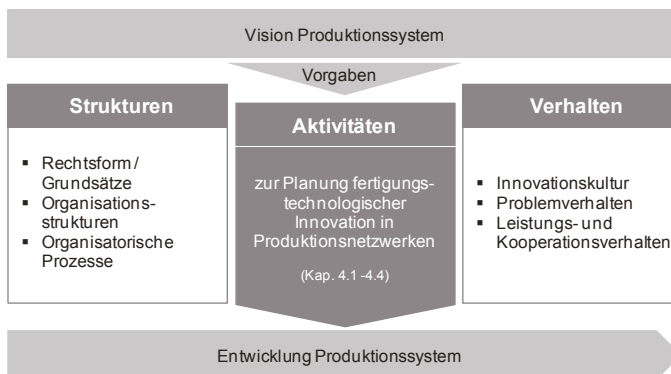


Abbildung 61: Anhaltspunkte zur Integration der Methode in Anlehnung an *Bleicher* [BLEI04, S.88]
Guiding Principles for the Integration of the Methodology according to *Bleicher* [BLEI04, S.88]

Nach *Bleicher* durchziehen drei Aspekte sämtliche Dimensionen des *Integrierten Managements* [BLEI04, S.87ff]:

- Integration durch Aktivitäten
- Integration durch Strukturen
- Integration durch Verhalten

Diese Aspekte problematisieren die Integration von *konzeptionell-gestalterischem Wollen* und *leistungsmäßiger wie kooperativer Umsetzung* [BLEI04, S.87]. Konse-

quenterweise sind sie somit von direkter Relevanz für die erfolgreiche Integration und Anwendung der entwickelten Methode in der Planungspraxis.⁵ Im Folgenden werden die genannten Aspekte auf die vorliegende Problemstellung angewandt. Der Aspekt *Integration durch Aktivitäten* wird dabei ausgespart, da die für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken notwendigen Aktivitäten bereits in den vorangegangenen Kapiteln umfassend beschrieben wurden.

Integration durch Strukturen

Die Strukturen des Produktionssystems werden im Wesentlichen durch Rechtsform, Organisationsstrukturen und organisatorische Prozesse bestimmt. Eine Grundaussage der Kybernetik ist, dass das Verhalten eines Systems begrenzt wird durch seine Strukturen [ULRI01, S.248f]. Der direkte Einfluss der Organisationsstrukturen und der organisatorischen Prozesse auf die Qualität der Entscheidungen im Innovationsmanagement und somit auf die Effektivität des Innovierens ist empirisch belegt [GOHL09, S.105ff].

Primäre Aufgabe des Produktionssystems und seiner Struktur ist die termingerechte Herstellung von Produkten in geforderter Stückzahl und Qualität. Produktionsfehler sind in Form von Ausschuss, Qualitäts- und Gewährleistungskosten direkt messbar. Zur Minimierung des Produktionsrisikos werden Routinen und Standards geschaffen. Es gilt, Produktionsrisiken zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Die Produktion bzw. seine Akteure sind somit tendenziell risikoaverse Entscheider. Fertigungstechnologische Innovation wird zwar als wichtiges Handlungsfeld anerkannt, dazu erforderliche Aktivitäten werden bei operativem Druck in der Serienproduktion aber oft aufgeschoben.

Um ein fokussiertes Arbeiten an fertigungstechnologischen Innovationen zu ermöglichen, müssen dafür entsprechende Strukturen geschaffen werden. Es ist erforderlich, der Planung fertigungstechnologischer Innovation sowie dem damit verbundenem Arbeiten und Experimentieren einen geschützten Raum zu geben. Üblicherweise geschieht dies über die gezielte Freistellung ausgewählter Mitarbeiter innerhalb der bestehenden Strukturen oder durch die Schaffung von Forschungs-, Vorentwicklungs- oder Innovationsteams bzw. -abteilungen. Ergänzend dazu setzten sich, insbesondere im Entwicklungsbereich, aber auch unkonventionellere Modelle durch. So erlaubt die 15%-Regel von 3M seinen Ingenieuren, 15 % ihrer Zeit auf Ideen ihrer Wahl zu verwenden [KITZ07, S.8]. Auch *Corning* räumt seinen Mitarbeitern im F&E Labor Sullivan Park 10 % ihrer Zeit für „Freitagnachmittags-Experimente“ ein, um an unkonventionellen Ideen zu arbeiten [SUTT02, S.79]. Paral-

⁵ Siehe auch *Golke* für Details zu den Einfluss- bzw. Erfolgsfaktoren „Strukturen“ und „Verhalten“ im Technologie- und Innovationsmanagement [GOHL09, S. 105ff]

lel dazu werden im Kontext radikaler Innovation in Wissenschaft und Praxis *Venture-Teams*, *Venture-Units*, *Innovation-Hubs* und ähnliches diskutiert [KRIE05]. Gemeinsam sind diesen eine mehr oder minder ausgeprägte Autonomie gegenüber der Stammorganisation in der Generierung und Umsetzung radikaler Innovationen. Die Vorteile organisch/autonom und hierarchisch/mechanischer Strukturen werden damit kombiniert [HAUS07, S.115ff].

Erfolgreiches Innovieren und damit die erfolgreiche Anwendung der entwickelten Methode bedarf der Unterstützung durch organisatorische und prozessuale Strukturen. Dies erfolgt üblicherweise über eine funktionale *Innovationsstruktur* und definierte Entscheidungsprozesse. Aktuell setzen sich insbesondere im Kontext radikaler Innovation alternative organisatorische Modelle durch, die es an dieser Stelle fallspezifisch zu berücksichtigen gilt.

Integration durch Verhalten

Das Verhalten des Produktionssystems wird durch die Innovationskultur und das Problem- sowie Leistungs- und Kooperationsverhalten seiner Akteure geprägt. Es wirkt auf die Innovationsfähigkeit des Produktionsnetzwerks und soll daher an dieser Stelle erwähnt werden [GOHL09, S.105ff].

Innovationskultur wird in der Literatur häufig mit Begriffen wie *unternehmerisches Handeln*, *Experimentierfreude*, *Offenheit/Vertrauen* und *Fehlerkultur* umschrieben [HAUS07, S.115]. Eine ausgeprägte Innovationskultur stellt die Innovationsaktivitäten auf eine Stufe mit den operativen Aktivitäten der laufenden Produktion. Sie sichert eine gewisse Gleichbehandlung im Zielkonflikt zwischen kurzfristigen operativen Verpflichtungen der Serienproduktion und langfristigen Innovationsaktivitäten.

Innovation erfordert ein Problemverhalten im Sinne von „Wie könnte das funktionieren?“, statt eines „Warum das unmöglich funktionieren kann!“ [SCHT05, S.66]. Das mit der Durchführung anspruchsvoller Innovationsprojekte einhergehende erhöhte Risiko des Scheiterns erfordert darüber hinaus Fehlertoleranz. „In einer Organisation, die kreativ sein will, ist Untätigkeit der schlimmste Fehler und der einzige, der bestraft werden sollte“ [SUTT02a, S.12].

Innovation ist Ergebnis eines Leistungsprozesses. Dieser besteht aus Aktivitäten des Experimentierens, Entwickelns, Nachahmens und des Anpassens [DOSI88, S.222]. Die steigende Dynamik der Märkte sowie radikale produkttechnologische Umbrüche erfordern die Entwicklung dieses Leistungsprozesses in Richtung eines Kooperations- bzw. Kollaborationsprozesses (Kap. 2.2.4). Die dafür notwendige Offenheit und Qualifizierung des Personals bedarf einer entsprechenden Förderung durch das Management.

5 Anwendung der Methode in der Automobilindustrie

Validation of the Methodology in the Automotive Industry

Die Anwendung der entwickelten Methode erfolgte in der Komponentenproduktion eines großen deutschen Automobilherstellers über einen Zeitraum von drei Jahren. Zur Validierung der formulierten Forschungshypothese bzw. ihrer Teilthesen werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Methodenanwendung anhand von ausgewählten Anwendungsbeispielen erläutert.

5.1 Ausgangssituation

Initial Situation

Die Planung und Produktion der betrachteten Komponentenproduktion ist auf insgesamt vier deutsche Standorte verteilt und umfasst ca. 3000 Mitarbeiter. Die Kernprodukte des Produktionsnetzwerks sind Achsen, Achsträger, Achsgetriebe, Radsätze, Gelenkwellen und Bremsscheiben. Diese bilden die wesentlichen Elemente des Pkw-Antriebsstrangs. Alle Komponenten stehen im direkten Wettbewerb zu externen Anbietern, welche zum Teil in Niedriglohnländern produzieren. Der Effizienz- und Innovationsdruck auf das Netzwerk ist folglich hoch.

Darüber hinaus stellt die Elektrifizierung des Pkw-Antriebsstrangs das Produktionsnetzwerk vor große Herausforderungen (**Abbildung 62**).

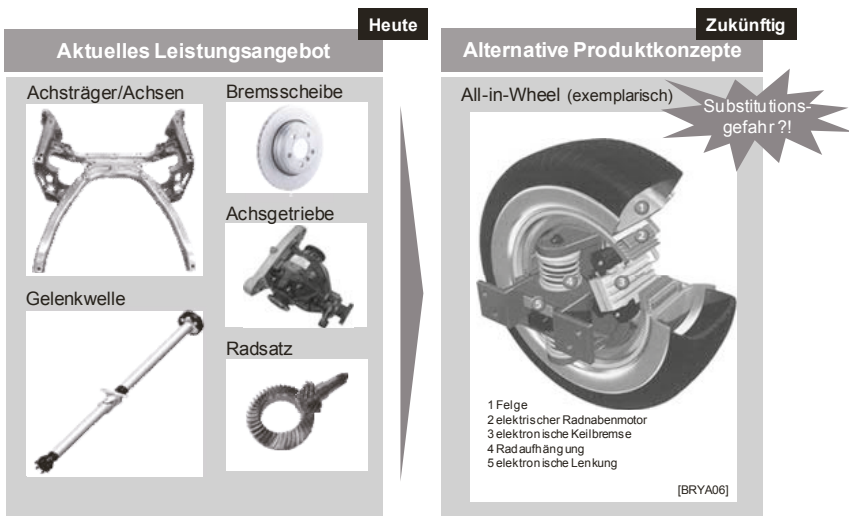


Abbildung 62: Aktuelles Leistungsangebot des Produktionsnetzwerks im Kontext alternativer Produktkonzepte
Challenge Vehicle Electrification for the Production network

Radikale Produktkonzepte wie das *All-in-Wheel-Konzept* hinterfragen die langfristige Effektivität bzw. Wirksamkeit des gesamten Leistungsangebots des Produktionsnetzwerks. Dessen flächendeckender Verbau in zukünftigen Fahrzeuggenerationen würde das gesamte Leistungsangebot des Produktionsnetzwerks substituieren. Die Frage nach dem Beitrag des Produktionsnetzwerks zum elektrifizierten Antriebsstrang wurde demzufolge intensiv diskutiert.

Zur Steigerung der Effizienz der Technologieketten und zur Sicherstellung der Effektivität des zukünftigen Leistungsangebots wurden die Innovationsaktivitäten des Produktionsnetzwerks verstärkt. Die Grundlage dazu bildete die vorliegende Methode.

5.2 Transparenz und Impulse für die Planung fertigungstechnologischer Innovation mit dem Technologiepotenzialkalender

The *Technologiepotenzialkalender* for Transparency and Impulses in Innovation

Der *Technologiepotenzialkalender* bildet den Ausgangspunkt der entwickelten Planungsmethode (Kap. 3.3). Er verdichtet notwendige Eingangsinformationen für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken und ermöglicht die Ableitung von Innovationsaufgaben unter Berücksichtigung relevanter Abhängigkeiten zwischen fertigungstechnologischen Potenzialen, produkttechnologischen Möglichkeiten und langfristigem Kundenbedarf. Der Technologiepotenzialkalender und der Technologiepotenzialkalenderprozess wurden wie in Kap. 4.1 beschrieben umgesetzt.

Darüber hinaus erweitert der EDV-Prototyp die entwickelte Struktur des *Technologiepotenzialkalenders* um folgende anwenderspezifische Funktionen (**Abbildung 63**, S.115):

- *Zielbeitrag Projekte*: Transparenz über Plan-Ziel-Lücken durch automatischen Abgleich der Innovationsprojekte mit den Innovationszielen des Produktionsnetzwerks
- *Filterfunktionen*: Möglichkeit der Generierung anwenderspezifischer *Ansichten des Technologiepotenzialkalenders*
- *Detailinformationen*: Möglichkeit der Abfrage von Detailinformationen zu den Innovationsaktivitäten durch Integration existierender Datenbanken und Dokumente

Die Anwendung des *Technologiepotenzialkalenders* erfolgte im betrachteten Produktionsnetzwerk in zwei wesentlichen Stufen. In der ersten Stufe wurden die Innovationsaktivitäten des Produktionsnetzwerks mit Hilfe des Technologiepotenzialkalenders bereinigt und neu ausgerichtet. Operative Defizite, wie Redundanzen und Inkonsistenzen im Innovationsprogramm, wurden eliminiert und Synergiepotenziale realisiert (Kap. 4.1.2). So konnte unter Anwendung des *Technologiepotenzialkalen-*

ders und des *Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolios* die Projektanzahl im ersten Planungszyklus durch Projektbündelung und -fokussierung um 55% reduziert werden.

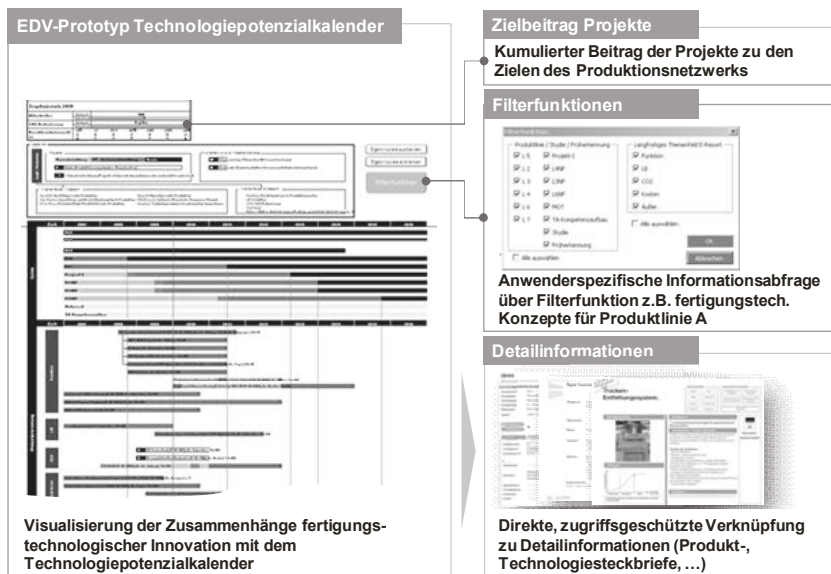


Abbildung 63: EDV-Prototyp des Technologiepotenzialkalenders
IT-Prototype of the *Technologiepotenzialkalender*

In den Folgejahren der Anwendung wurde die fertigungstechnologieorientierte Technologiefrüherkennung integriert und innerhalb eines Zeitraums von über zwei Jahren insgesamt 68 Technologiesteckbriefe generiert. Deren Diskussion und Einordnung in den *Technologiepotenzialkalender* und die Ableitung von Innovationsaufgaben aus dem Gesamtkontext des Kalenders hat sich als fester Bestandteil im Planungsprozess etabliert. Zahlreiche technologische Impulse aus dem Technologiepotenzialkalender wurden weiterverfolgt und sind zum Teil bereits erfolgreich in den Serienbetrieb überführt. Die Aktivitäten rund um den *Technologiepotenzialkalender* stießen über die Komponentenproduktion hinaus auf großes Interesse. Der Rollout der Methode auf das komplette Produktionsressort ist beschlossen und in Umsetzung.

Der entwickelte *Technologiepotenzialkalender* hat sich für die Planung fertigungs-technologischer Innovation im Anwendungszusammenhang bewährt. Die Komplexität der Zusammenhänge fertigungstechnologischer Innovation wird transparent und be-

herrschar, das Erkennen fertigungstechnologischen Handlungsbedarfs aus dem Gesamtkontext wird erleichtert. Die *Teilthese I* ist somit validiert (Kap. 3.1).

5.3 Erschließung von Effizienzinnovationen im Kontext der Initiativen Ressourceneffiziente Produktion

Developing Efficiency Innovations triggered by the Initiative Resource Efficient Production

Das Methodenmodul *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* wurde im Kontext der Initiative *Ressourceneffiziente Produktion* erprobt und weiterentwickelt. Mithilfe der Methoden zur *Identifikation von Handlungsschwerpunkten in der Technologiekette* wurden für die Jahre 2009 und 2010 im Produktionsnetzwerk die fertigungstechnologischen Schwerpunkte *Härtetechnologie* und *Reinigungstechnologie* bestimmt. Diese wiesen sowohl bzgl. ihres Fertigungskostenbeitrags als auch bzgl. ihres Innovationspotenzials Maximalwerte auf (Kap. 4.2.1). Die Ergebnisse und Erfahrungen der Methodenanwendung innerhalb der genannten Schwerpunkte *Härtetechnologie* und *Reinigungstechnologie* werden im Folgenden beschrieben.

5.3.1 Anwendungsbeispiel Härtetechnologie

Example Hardening Technology

Das betrachtete Produktionsnetzwerk nutzt für das Härten von Zahnrädern die Technologie des Einsatzhärtens. Die Innovationsaufgabe der Reduzierung des Ressourcenverbrauchs an Betriebsstoffen um mindestens 30% erforderte eine umfassende Prüfung fertigungstechnologischer Alternativen. Sowohl Eliminations-, Substitutions- als auch Optimierungsmöglichkeiten wurden mit der entwickelten Heuristik für die Technologie *Einsatzhärten* geprüft.

Die Innovationsaufgabe wurde zunächst mit dem *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmo- dell* weiter konkretisiert (Kap. 4.2.2.2). Der Innovationsbedarf, die fertigungstechnologische Aufgabe und die Technologie *Einsatzhärten* wurden im Vorfeld der Konzeptfindung beschrieben. Zur Erweiterung des konzeptionellen Gestaltungsraums beschränkte sich die Beschreibung dabei auf wesentliche Kenngrößen innerhalb der Beschreibungsdimensionen *Kunde*, *fertigungstechnologische Aufgabe* und *Fertigungstechnologie*. Die Beschreibung des technologischen Bedarfs wurde in einem Steckbrief zusammengefasst (**Abbildung 64**). Dieser sowie Angaben zu den Prozessschritten und zum Betriebsstoffverbrauch der Technologie *Einsatzhärten* bildeten die Grundlage für das Briefing des Arbeitsteams.

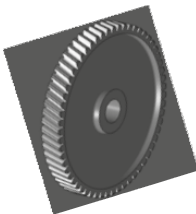
Der Einsatz der *Heuristik zur Generierung von Konzepten zur Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* erfolgte iterativ (Kap. 4.2.3). Dabei wurde jeweils ein kompletter Durchlauf der Heuristik für die Lösungsstrategien *Elimination*, *Substitution* und *Optimierung* durchgeführt. Ergebnis waren insgesamt vier Konzeptideen für Technologieelimination und -substitution sowie eine Vielzahl an Optimie-

rungsmaßnahmen. Davon wurden folgende im *Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolio* priorisiert und im Rahmen weiterer Aktivitäten vertieft:

- *Lösungsstrategie Substitution*: Substitution Einsatzhärten durch Mehrfrequenzinduktionshärten bei gleichzeitiger Anpassung des Stahlwerkstoffs – erwartete Ressourceneinsparung ca. 50%
- *Lösungsstrategien Optimierung*: Insgesamt fünf priorisierte Optimierungsmaßnahmen – erwartete Ressourceneinsparung ca. 15%

Kunde & Innovationsbedarf

Produktlinie	P5
Produktionsstart (SOP)	7/2013
Innovationsaufgabe	Reduzierung des Energie-, Wasser- und Chemieverbrauchs sowie des Abfallaufkommens im Produktionsbetrieb um mind. 30%



Fertigungstechnologische Aufgabe

Bauteil	Stirnrad (hart)
Bauteilhauptfunktion	Drehmomentübertragung 240 Nm
Bauteilattribut	Akustische Qualität mind. BI 6
Großgestalt Zahnrad 1	
Verzahnung	Schrägverzahnung
Zähnezahl z	60
Breite b	22 mm
Außendurchmesser D_a	145 mm
Modul m	2,0 mm
Fertigungsart	Großserie

Fertigungstechnologie

Referenztechnologie	Einsatzhärten
Technologiefunktion	
Allg. Technologiefunktion	Eigenschaftsänderung: Erhöhung statische & dynamische Widerstandsfähigkeit
Technikt. nach DIN 8580	Hauptgruppe 6 "Stoffeigenschaften ändern"
Technologieattribut	
Qualität	Verzugsarm
Wirtschaftlichkeit	analog Einsatzhärten

Abbildung 64: Beschreibung des fertigungstechnologischen Bedarfs
Specification of Technological Requirements

Lösungsstrategie Substitution

Die Konzeptidee *Substitution Einsatzhärten durch Mehrfrequenzinduktionshärten* wurde über folgende Schritte der Heuristik weiter vertieft (Kap. 4.2.3):

- Ermittlung von Mehrwert und Defiziten des Mehrfrequenzinduktionshärtens gegenüber dem Einsatzhärten (Schritt 3)
- Erarbeitung von Maßnahmen zur Kompensation des aus der Anwendung des Mehrfrequenzinduktionshärtens resultierenden Festigkeitsdefizits (Schritt 4)
- Beurteilung des Mehrfrequenzinduktionshärtens im direkten Vergleich zu alternativen Maßnahmen der Ressourceneffizienzsteigerung (Schritt 5)

Die Ermittlung von Mehrwert und Defiziten des Mehrfrequenzinduktionshärtens gegenüber dem Einsatzhärten erfolgte mithilfe der entwickelten *Technology-Footprints*

(Kap. 4.2.3). Aus der Gegenüberstellung von Einsatzhärten und Mehrfrequenzinduktionshärten in den *Footprints Technologiefunktionen* und *Technologieattribute* wurden folgende Differenzen ersichtlich:

- Footprint Technologiefunktionen
 - Sonst. Bauteileigenschaften: Festigkeitsdefizit Mehrfrequenzinduktionshärten gegenüber Einsatzhärten gegeben
- Footprint Technologieattribute
 - Ökologie: Energieeinsparung durch Mehrfrequenzinduktionshärten von ca. 50%; kein Abschrecköl erforderlich, kein Öldampf
 - Zeit/Durchsatz: Reduzierung Durchlaufzeit durch Mehrfrequenzinduktionshärten von ca. 10 h auf ca. 30 sec.; Möglichkeit der Darstellung des Mehrfrequenzinduktionshärtens als Inlineprozess
 - Prozessqualität: Reduktion Bauteilverzüge durch Mehrfrequenzinduktionshärten, da reine Randschichthärtung; Somit Reduktion Anzahl der zu erwartenden Fehler (ppm)

Zur Kompensation des Festigkeitsdefizits wurden im Rahmen des vierten Schritts der Heuristik Maßnahmen definiert. Im Sinne des entwickelten *Technologiekontext-Baums* wurde dazu, ausgehend vom eigenen Kontrollbereich der Technologiekette und unter Einbeziehung produktgestalterischer und werkstofftechnologischer Variablen, ein gesamttechnologisches Maßnahmenpaket erarbeitet (Kap. 4.2.3). Die wesentlichen Maßnahmen in den Gestaltungsdimensionen Technologiekette, Werkstoff und Produktgestalt sind der Vorhalt der Technologie Festigkeitsstrahlen, der angepasste Stahleinsatz sowie verschiedene Maßnahmen zur Anpassung der Verzahnungsgeometrie. Das entwickelte Maßnahmenpaket sowie die positive Bewertung der Konzeptidee in den Dimensionen Ökologie und Zeit/Durchsatz waren entscheidend für einen gemeinsamen Projektvorschlag der Unternehmensfunktionen Technologieplanung, Werkstofftechnologie und Produktkonstruktion. Das Projekt verläuft vielversprechend und wird weiter verfolgt.

Lösungsstrategie Optimierung

Die Technologie Einsatzhärten kann in die Teilprozesse Voroxidation, Erwärmung, Aufkohlen, Abschrecken und Anlassen gegliedert werden (**Abbildung 65**, oben, S.119). Zur Optimierung der Technologie Einsatzhärten wurde die entwickelte Heuristik bzw. wurden ihre Lösungsstrategien *Elimination* und *Optimierung* auf genau diese Teilprozesse angewendet. Die Lösungsstrategie *Substitution* wurde ausgespart, da die Substitution einzelner Teilprozesse einer bestehenden Härteanlage unmöglich ist bzw. mit einer Substitution der gesamten Anlage einhergeht.

Das Einsatzhärten beginnt mit der Voroxidation, die im ersten Schritt auf ihre Eliminationsmöglichkeit geprüft wurde (**Abbildung 65**). Bei der Voroxidation werden die

Bauteile zur Minimierung der Verzüge und Aktivierung der Oberfläche vorab auf ca. 480°C erwärmt. Das aus der Elimination der Voroxidation resultierende, maßgebende technologische Defizit *erhöhter Bauteilverzug* wurde umfassend auf Kompensationsmöglichkeit geprüft. Der entstandene Maßnahmenkatalog umfasst Optimierungen an der Chargieranordnung, den Erwärmprozessen und am Abschreckprozess. Die Maßnahmen wurden im Kontext einer anstehenden Ersatzbeschaffung mit verschiedenen Anlagenherstellern diskutiert und sind bereits in Umsetzung.



■ = Optimierungsmaßnahme

ELIMINATION TEILPROZESS



OPTIMIERUNG TEILPROZESS

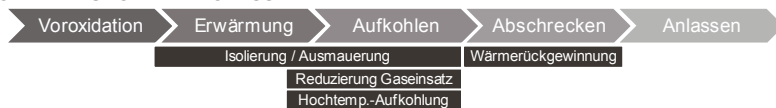


Abbildung 65: Definierte Optimierungsmaßnahmen zum Einsatzhärten
Defined Measures for Case Hardening

Die Teilprozesse Erwärmung, Aufkohlen, Abschrecken und Anlassen wurden analog auf ihre Eliminationsmöglichkeit geprüft, resultierende Konzeptideen aus physikalisch-technischen Gründen jedoch verworfen. Ihre Untersuchung auf Optimierungspotenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz war indessen erfolgreich (**Abbildung 65**, unten). Priorisiert und zum Teil in Umsetzung sind Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeisolierung, zur Reduzierung des Gaseinsatzes beim Aufkohlen, zur Verkürzung der Prozesszeit durch Hochtemperaturaufkohlung und zur Wärmerückgewinnung aus dem Abschreckprozess. Der Verbrauch an Energie und Prozessgas sowie die Fertigungskosten werden durch diese Maßnahmen reduziert und die Ressourceneffizienz weiter gesteigert.

5.3.2 Anwendungsbeispiel Reinigungstechnologie

Example Cleaning Technology

In den Technologieketten des betrachteten Produktionsnetzwerks werden für die Zwischen- und Endreinigung der Bauteile verschiedene Reinigungsverfahren eingesetzt. Typische durch diese Reinigungsverfahren zu entfernende Verschmutzungen sind Kühlschmierstoff, Schleiföl, Schutzpastenrückstände, Späne und Ziehöl. Über

alle Technologieketten verteilt befinden sich im Produktionsnetzwerk ca. 50 Reinigungsanlagen. Deren Ressourcenverbrauch an elektrischer Energie, Heizenergie, Kühlenergie, Wasser, Chemie und Druckluft beträgt an einzelnen Anlagen deutlich mehr als 100 000 €/a. Im Rahmen eines einjährigen Projektes wurden alle Anlagen mit der entwickelten Methode systematisch auf ihre Eliminations-, Optimierungs- und Substitutionspotenziale geprüft. Aufgrund der großen Anzahl an Reinigungsanlagen im Produktionsnetzwerk wurde auf Basis des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* eine Datenbank entworfen (**Abbildung 66**).

Abbildung 66: Eingabe der Technologieinformation
Input of Technology Information

Die Datenbank ermöglicht über die Eingabemasken *Anlagenkurzinfo*, *Ressourcenverbrauch*, *Technologiebedarf*, *Prozessdetails* und *Kommentar/Idee* die Aufnahme sämtlicher für die Methodenanwendung relevanten Informationen. Die Logik des *Bedarfsorientierten Technologiebeschreibungsmodells* wurde im Reiter *Technologiebedarf* abgebildet. Die darin enthaltenen Informationen können aus der Datenbank ausgeleitet und in den Kontext der Technologiekette eingeordnet werden (**Abbildung 67**):

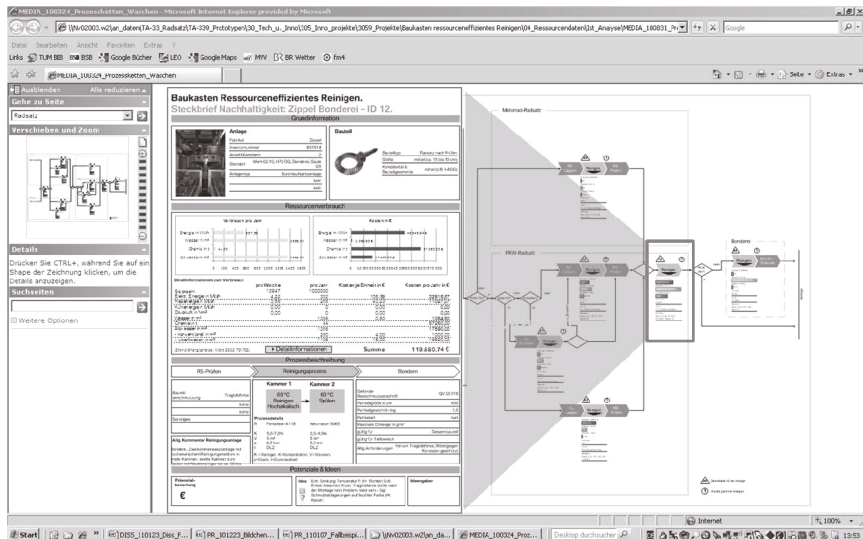


Abbildung 67: Mögliche Ausleitungen aus der Datenbank
Possible Database Export

Die entwickelte Heuristik wurde auf alle Reinigungsanlagen angewandt. Da der grundlegende Ablauf der Heuristik bereits am Anwendungsbeispiel Härtetechnologie erläutert wurde, sollen sich die Ausführungen an dieser Stelle auf ausgewählte Ergebnisse der Methodenanwendung beschränken.

Lösungsstrategien Elimination und Substitution

Im Rahmen des Anwendungsbeispiels Reinigungstechnologie wurden neben den bestehenden Technologieketten des Produktionsnetzwerks auch die Planstände zukünftiger Technologieketten untersucht. In **Abbildung 68** ist der Planstand einer Technologiekette zur Herstellung von Achsträgern in einem neuen Werkstoff dargestellt (siehe S.122). Die Technologiekette umfasste nach damaligem Planstand drei Reinigungsprozesse. Vor dem Schweißen war jeweils ein Reinigungsprozess zur Entfernung der Ölrückstände aus den vorausgehenden Umformprozessen vorgesehen. Schweißversuche mit dem neuen Werkstoff zeigten darüber hinaus starke Schweißspritzer und erhöhte Schmauchbildung, was zusätzlich einen Hochdruckreinigungsprozess vor dem Lackieren erforderlich machte.

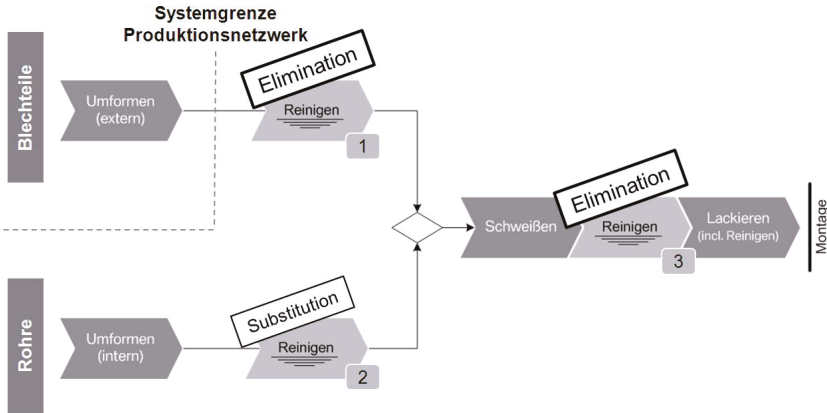


Abbildung 68: Fallbeispiel Elimination und Substitution von Reinigungsprozessen
Case Study Showing the Elimination and Substitution of Cleaning Processes

Die dargestellte Technologiekette wurde mit der entwickelten Heuristik geprüft. Die Anwendung der Lösungsstrategie Elimination zeigte im Technology-Footprint bezüglich des Technologieattributes Prozessqualität für *Reinigungstechnologie 1* und *Reinigungstechnologie 2* Defizite hinsichtlich der Schweißbarkeit der Rohre und Blechteile. Für die Elimination der *Reinigungstechnologie 3* wurde ein qualitatives Defizit bezüglich der Lackhaftung festgehalten. Die Kompensationsversuche der aus der Technologieelimination resultierenden technologischen Defizite brachten folgendes Ergebnis:

- *Reinigungstechnologie 1:* Elimination der Reinigungstechnologie möglich – Kompensation des technologischen Defizits über die Technologien Umformen und Schweißen:
 - *Umformen:* Zusage des Lieferanten zur Lieferung von spanfreien Blechteilen mit einer definierten, gleichmäßigen Beölung
 - *Schweißen:* Optimierung der Schweißparameter für Schweißen von Bauteilen mit leichter Beölung
- *Reinigungstechnologie 2:* Elimination nicht möglich – die vorgelagerte Innenhochdruckumformung kann keine gleichmäßige Beölung im definierten Intervall sicherstellen. Jedoch Möglichkeit der Umstellung/Substitution auf chemieloses Dampfreinigen
- *Reinigungstechnologie 3:* Elimination der Reinigungstechnologie möglich – Kompensation des technologischen Defizits über die Technologien Lackieren und Schweißen:
 - *Lackieren:* Umstellung auf Dickschichtlack

- *Schweißen*: Optimierung der Schweißparameter zur Minimierung von Schweißspritzern

Die entwickelten Konzepte wurden durch weitere Versuche abgesichert und in den Planstand erhoben. Die Ressourceneinsparungen an Energie, Chemie, Wasser und Abwasser summieren sich auf mehrere 100 T€/a. Darüber hinaus wurden Investitionen von mehreren Millionen Euro eingespart.

Das Fallbeispiel verdeutlicht die Potenziale einer konsequenten Anwendung der entwickelten Methode. Das beharrliche Hinterfragen der etablierten Technologiekette, unter Anwendung der entwickelten Heuristik und ihrer Lösungsstrategien, war essenziell für den Innovationserfolg.

Lösungsstrategie Optimierung

Im Rahmen der Methodenanwendung wurden für die bestehenden Reinigungsanlagen im Produktionsnetzwerk zahlreiche Optimierungsansätze entwickelt. Typische Maßnahmen umfassen die Elimination von Badbeheizung und Bauteilkühlung durch Nutzung alternativer Reinigungschemie, die Temperatursenkung durch Umstellung auf alternative Reinigungschemie, das Spülwasserrecycling, die Nutzung von Spritzkränzen sowie optimierte Schaltzeiten an den Anlagen. Die dadurch realisierten Einsparungen im Ressourcenverbrauch lagen zwischen 2-40%.

Die nachträgliche Betrachtung der erzielten Ergebnisse zeigt, dass auch für die Lösungsstrategie *Optimierung* der Schlüssel zum Erfolg in der stringenten Anwendung der entwickelten Heuristik lag. Es erfolgte lediglich ein Wechsel der Systemebene. Statt der Betrachtung der Technologiekette erfolgte die Betrachtung der Anlage und ihrer wesentlichen Variablen *Arbeitstemperatur*, *Reinigungschemie*, *Mechanik* und *Zeit*. Statt der Elimination der gesamten Anlage wurde, unter Anwendung der Methode, beispielsweise die Elimination der Beheizung des Reinigungsbads geprüft. Das daraus resultierende technologische Defizit konnte vielfach über alternative Reinigungschemie und/oder optimierte Mechanik kompensiert werden. Die im Laufe des Projektes so gewonnene Erfahrung in der Anlagenoptimierung ermöglichte darüber hinaus die Formulierung von Best-Practice Ansätzen für verschiedene Anlagentypen und deren Multiplikation im Produktionsnetzwerk.

5.3.3 Zwischenfazit

Interim Results

Die Anwendungsbeispiele *Härtetechnologie* und *Reinigungstechnologie* zeigen, dass das der entwickelten Methode inhärente Hinterfragen der Technologien bezüglich ihrer Eliminations-, Substitutions- und Optimierungspotenziale Effizienzinnovationen in der Technologiekette ermöglicht. Wesentlicher Erfolgsfaktor zur Kompensation eventueller aus der Konzeptidee resultierender Defizite ist die Nutzung der gesamt-

technologischen Möglichkeiten aus Technologie(kette), Werkstoff und Produktgestalt. Die *Teilthese II* wird somit beibehalten (Kap. 3.1).

5.4 Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Kontext des elektrifizierten Antriebsstrangs

Enabling Effectiveness Innovation in the Electric Drive Train

Die Automobilindustrie sieht sich mit radikalen produkttechnologischen Umbrüchen konfrontiert. Der konventionelle Antriebsstrang, bestehend aus seinen Kernkomponenten Verbrennungsmotor, Hauptgetriebe, Differenzial und Abtriebswellen, wird durch die zunehmende Verknappung fossiler Energieträger zum ersten Mal seit ca. 100 Jahren wieder ernsthaft infrage gestellt. Neue Antriebsarchitekturen, wie z. B. der elektrische Antriebsstrang, definieren neue Möglichkeiten und Herausforderungen für die Fertigungstechnik.

Das Methodenmodul *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* wurde in diesem Kontext entwickelt und erprobt. Die Effektivität des etablierten Leistungsangebots des betrachteten Produktionsnetzwerks, bestehend aus Fahrwerks- und Antriebssystemen sowie -komponenten, wurde durch die geschilderte Entwicklung hinterfragt. Die Frage nach dem fertigungstechnologischen Beitrag des Produktionsnetzwerks zum elektrischen Antriebsstrang prägte die Debatte und war primärer Auslöser der im Folgenden geschilderten Methodenanwendung. Die hohe Wettbewerbsrelevanz der erarbeiteten Konzepte macht deren Darstellung an dieser Stelle allerdings nur eingeschränkt möglich.

Erster Schritt der Methodenanwendung ist die Definition gemeinsamer Aktionsfelder von Produktplanung, Produktentwicklung und Produktion mit der Potenzialmatrix. Eingangsgröße dafür waren *Produktpotenziale* bzw. neueste produkttechnologische Such- und Handlungsfelder aus den Bereichen Antriebs- und Fahrwerksentwicklung, eingesteuert durch die Produktplanung und -entwicklung. Diesen wurden die Kompetenzen des Produktionsnetzwerks und fertigungstechnologische Potenziale aus der *fertigungstechnologieorientierten Technologiefrüherkennung* gegenübergestellt. Die Auswertung der *Potenzialmatrix* und die Ableitung von gemeinsamen Aktionsfeldern erfolgten im Kernteam mit Vertretern aus Produktplanung/-entwicklung und Produktion. Die integrierte Betrachtung von *Produkt- und Technologiepotenzialen* in der *Potenzialmatrix* legte die Grundlage für eine Vielzahl gemeinsamer Projektvorschläge. Anhand der aus der *Potenzialmatrix* abgeleiteten Produktidee *Bauraum- und kostenoptimiertes Achsgetriebe für E-Fahrzeuge* soll die weitere Methodenanwendung exemplarisch erläutert werden. Die erwähnte Produktidee entstand vor dem Hintergrund steigenden Bauraumbedarfs von elektrifizierten Fahrzeugen im Hinterwagen (Produktpotenzial). Sie war Teil eines Gesamtprojektes zur Gestaltung eines innovativen Antriebs- und Fahrwerkskonzepts. Durch die vollständige Neugestaltung der

Produktstruktur und unter maximaler Berücksichtigung fertigungstechnologischer Potenziale sollten signifikante Kosteneinsparungen realisiert werden und ein neues, kundenwertes Fahrzeugpackage entstehen.

Ziel der *Integrierten Produktfindung* für das Projekt „Entwicklung eines Grobkonzeptes für ein Bauraum- und kostenoptimiertes Achsgetriebe für E-Fahrzeuge“ war das Ausgestalten der wesentlichen Produktfunktionen und -attribute des Getriebes in kollaborativer Zusammenarbeit von Produktplanung, -entwicklung und Fertigungstechnik (**Abbildung 69**).



Abbildung 69: Integrierte Produktfindung und ihr Ergebnis
Integrated Product Design and Results

Die Kernfunktionen des Achsgetriebes, wie Drehmomentübertragung und Übersetzung des Drehzahlverhältnisses, wurden bezüglich der Zielattribute Kostenreduzierung und Bauraumoptimierung analog dem entwickelten Vorgehensmodell *Integrierte Produktfindung* untersucht (Kap. 4.3.3). Für einen groben Eindruck über die entwickelten Konzeptideen und die darin beinhalteten fertigungstechnologischen Beiträge dient folgende Aufstellung:

- Produktgestaltung: Rotationssymmetrische Bauteile, Entfall Demontierbarkeit, Sandwichbauweise, Steckverbindungen zu Wellen
- Umformen statt Urformen: Halbwarmschmieden, Kaltfließpressen, Tiefziehen, IHU
- Alternative Fügeverfahren: Schweißen, Rändelpressen, selbstfurchende Schrauben
- Alternative Wärmebehandlung: Mehrfrequenzinduktionshärten

Die priorisierte Konzeptidee wurde über einen *One-off-Prototypen* visualisiert (**Abbildung 69**, S.125). Der Mehrwert des Konzeptes und aktuelle Entwicklungsrichtungen konnten dadurch anschaulich vermittelt werden. Das Konzept wird aktuell weiterentwickelt.

Mit dem Methodenmodul *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* konnten für das Produktionsnetzwerk eine Vielzahl fertigungstechnologieinduzierter, innovativer Konzepte generiert werden. Der Anteil zentraler Vorentwicklungsgelder für das Produktionsnetzwerk konnte gesteigert werden. Die Grundlage für ein langfristig effektives fertigungstechnologisches Projektprogramm ist gelegt. Die Teilthese III kann somit beibehalten werden (Kap. 3.1).

5.5 Bewertung der Konzepte

Evaluation of Conceptual Ideas

Die Anwendung des Bewertungssystems wird am bereits vorgestellten Beispiel des Mehrfrequenzinduktionshärtens (MF-Induktionshärten) dargelegt (Kap. 5.3.1).

5.5.1 Bewertungssituation

Im Kontext der Ausplanung eines neuen Fertigungsstandortes sollte aufbauend auf den ersten Ergebnissen des Projektes *Mehrfrequenzinduktionshärten von Zahnradern* die Möglichkeit des Serieneinsatzes der Technologie für die Verzahnung von Achsgetrieben geprüft werden. Auftrag war ein vollständiges Bild der Technologie in den Dimensionen Qualität, Wirtschaftlichkeit, Realisierungsdauer und Komplexität im Anwendungskontext zu erarbeiten und dieses der Referenztechnologie Einsatzhärten gegenüberzustellen. Aufgrund der noch relativ kurzen Laufzeit des Projektes war in nicht allen Aspekten der Technologieanwendung der für die Grobbewertung erforderliche mittlere Informationsreifegrad gegeben (Kap.4.4.2). Dies wurde vor dem Hintergrund der Dringlichkeit der benötigten Aussage jedoch akzeptiert. Die Bewertung der Kosten für Betriebsstoffe, wie Energie, Abschrecköl etc., wurde aufgrund ihrer hohen Relevanz für den vorliegenden Anwendungsfall in die Grobbewertung vorgezogen.

Neben den erwarteten und veröffentlichten Vorteilen des MF-Induktionshärtens bei Energieverbrauch, Investitionen und Logistikkosten sollten insbesondere die Auswirkungen auf die Technologiekette *Radsatz* erfasst und bewertet werden [JEHN09]. Da es sich beim MF-Induktionshärten um eine Radschichthärtung handelt, ist für die Erlangung der geforderten Festigkeit im Kernmaterial der Einsatz eines Vergütungsstahls erforderlich. Die höhere Härte des Vergütungsstahls nimmt Einfluss auf die gesamte Technologiekette, sein höherer Kohlenstoffgehalt auf die Qualität der Schweißverbindung von Tellerrad und Ausgleich. Ein singulärer Vergleich der Technologien losgelöst von der Technologiekette wäre somit irreführend und wird an dieser Stelle durch eine umfassende Betrachtung ersetzt.

5.5.2 Bewertungswerkzeug

Das entwickelte Bewertungsmodell wurde als Bewertungswerkzeug auf Excelbasis mit der Skriptsprache VBA umgesetzt. Es umfasst insgesamt zwei Eingabeblätter sowie eine Ausgabefunktion für die *Scorecard Innovation*. Das erste Eingabeblatt erfordert Eingaben zu Prämissen, kritischen Schwellwerten, AHP-Parametern, Sensitivitäten sowie Eingaben in den Bewertungsfeldern der Dimensionen Qualität, Realisierungsdauer und Komplexität (**Abbildung 70**). Das zweite Eingabeblatt dient der Erfassung der kalendarisierten Stückzahlen und Zahlungsströme für die Berechnung des aufwandsorientierten Kapitalwerts. Die Berechnungen von Kapitalwert, die AHP- und Nutzwertanalysen, die Berechnung des Komplexitätsindikators sowie die Berechnung von Dominanzen und Sensitivitäten erfolgt automatisch, ebenso wie die Ausgabe der *Scorecard Innovation*.

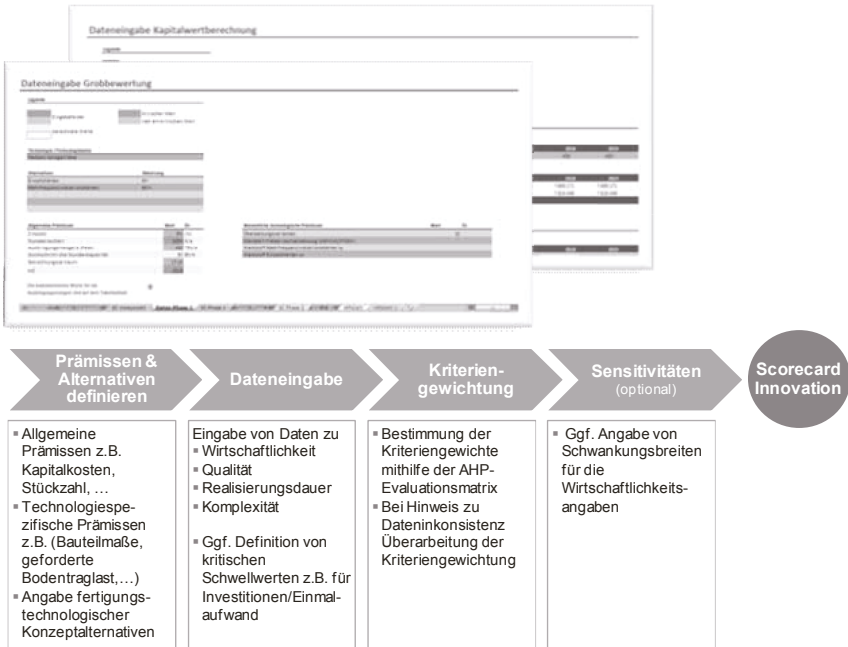


Abbildung 70: Erforderliche Eingaben für das Bewertungswerkzeug
Required Input for the Evaluation Tool

5.5.3 Bewertung der Konzepte und Auswertung der Bewertungsergebnisse in der *Scorecard Innovation*

Bewertet wurden die Technologieketten *Einsatzhärten* und *MF-Induktionshärten* für die Fertigung von Radsätzen von PKW Achsgetrieben in 10 Übersetzungsvarianten. Dabei erfolgt beim Tellerrad ausschließlich eine Härtung der Laufverzahnung, beim

Antriebskegelrad sind darüber hinaus Steckverzahnung und Lagersitze zu härten. Werkstoffprämissen für die Referenztechnologiekette *Einsatzhärten* ist ein im Unternehmen etablierter Einsatzstahl, für die Technologiekette *MF-Induktionshärten* ein ausgewählter Vergütungsstahl. Dieser Werkstoffwechsel hat teils erhebliche Auswirkung auf die Technologiekette *Radsatz*. Dabei sind in der Weichbearbeitung die Auswirkungen auf die Technologie *Walzen* und *Fräsen* wesentlich. Die aus dem härteren Werkstoff resultierenden Mehrkosten beim *Weichdrehen* hingegen werden durch die Einsparungen in der Hartbearbeitung kompensiert und vor diesem Hintergrund vernachlässigt. Grund für die Einsparungen in der Hartbearbeitung sind geringere Verzüge durch die konturnahe Härtung des *MF-Induktionshärtens*. Darüber hinaus ist die Auswirkung des Werkstoffwechsels auf die Qualität der Schweißverbindung, von Tellerrad und Ausgleich zu berücksichtigen (**Abbildung 71**).

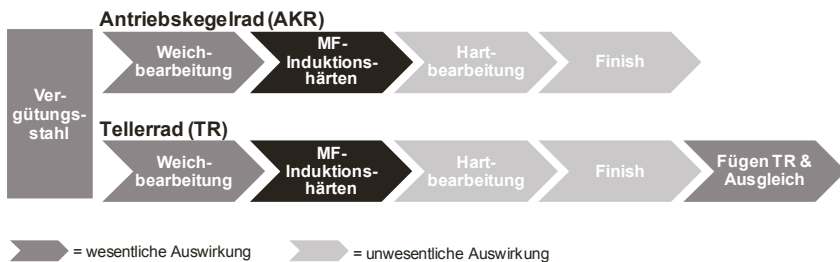


Abbildung 71: Auswirkungen des Werkstoffwechsels in der Technologiekette Radsatz
Effects of Induction Hardening in the Technology Chain Gear Set

Als Auslegungsprämissen für einen fiktiven achtjährigen Produktionszeitraum mit einer Peakstückzahl von 400 TEh/a wurde eine Stundenlaufzeit von 5000 h/a angenommen. Für die Berechnung des Kapitalwertes wird ein interner Zinssatz von 12% untergestellt. Die Ergebnisse der Bewertung in den Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Realisierungsdauer*, *Qualität* und *Komplexität* sind in der *Scorecard Innovation* zusammengefasst (**Anhang A2**). Wettbewerbsrelevante Daten wurden dabei abgeändert. Die Ergebnisse der Bewertung sollen im Folgenden kurz erläutert werden, der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung der durch die Technologie *MF-Induktionshärten* induzierten, wesentlichen Änderungen innerhalb der Technologiekette *Radsatz*.

Wirtschaftlichkeit

Für das vorgestellte Einsatzszenario ergibt sich ein Kapitalwertvorteil für das Mehrfrequenzinduktionshärten von ca. 4 Mio. € (**Anhang A2**). Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit des MF-Induktionshärtens sind die Einsparungen im Fertigungs-

schritt *Härten*. Diese werden teilweise durch Mehrungen bei Rohmaterial und Weichbearbeitung kompensiert.

Für das Einsatzhärten wurde jeweils ein Durchstoßofen mit manueller Chargierung angesetzt, für das MF-Induktionshärten jeweils eine Induktionshärteanlage für Teller- und Antriebskegelrad inklusive Generator und Induktoren für 10 Übersetzungsvarianten. Die Heizkammerververweilzeit beim Einsatzhärten beträgt für die genannten Bauteile ca. 5 h bei ca. 900 °C, die Prozesszeit beim MF-Induktionshärten beträgt mit Abschrecken ca. 30s. Diese kurze Prozesszeit ermöglicht die Integration der Technologie in die Fertigungslinie und somit gegenüber dem Einsatzhärten wesentliche Einsparungen in Logistik und Gebäudestruktur. Weder ein abgetrennter Härterebereich inklusive Feuerschutzmaßnahmen, noch die für das Einsatzhärten aufwendige Medienversorgung ist erforderlich. Auch können Investitionen für Richten, Schützen, Chargiergestelle und Werkzeuge für die Härtepresse eingespart werden. Bei den proportionalen Kosten zeigen sich ebenfalls Vorteile für die Technologie *MF-Induktionshärten*. An erster Stelle sind hier die Energie- und die, im Wesentlichen aus der direkten Verkettung resultierenden, Lohnkosteneinsparungen zu nennen. Zudem entfallen Kosten für Prozess- und Schutzgase sowie Härteöl.

Die genannten wirtschaftlichen Vorteile des MF-Induktionshärtens werden teilweise vom höheren Rohteilpreis des Vergütungsstahls sowie durch die, mit der höheren Härte des Vergütungsstahls verbundenen, Standzeitverluste in der Weichbearbeitung kompensiert. Erste Prinzipversuche beim Verzahnungsfräsen ergaben einen Einbruch bei den Werkzeugstandzeiten von bis zu 70% gegenüber dem aktuellen Serienstand. Seriennahe Versuche, Schneidstoff- und Parameteroptimierungen stehen noch aus. Vor diesem Hintergrund wird für das Fräsen der Laufverzahnung als erste Annahme eine mittlere Werkzeugstandzeit von 50 % gegenüber dem Serienstand angesetzt, die sich in entsprechenden Mehrungen bei Maschinen, Werkzeug, Werkzeugaufnahmen und insbesondere in der Werkzeugaufbereitung widerspiegeln.

Realisierungsdauer

Sowohl die Technologie *Einsatzhärten* als auch die Technologie *MF-Induktionshärten* sind bis zum geplanten SOP umsetzbar (**Anhang A2**). Die Absicherung der Technologie *MF-Induktionshärten* und des damit verbundenen Werkstoffwechsels wurden berücksichtigt.

Qualität

Das Einsatzhärten zeigt einen deutlich höheren Nutzwert über die untersuchten Qualitätskriterien (**Anhang A2**). Auch wird die funktionale Produktqualität bei Einsatz des MF-Induktionshärtens noch als sehr kritisch und die Prozessqualität als kritisch eingestuft. Zwar konnte die grundsätzliche Machbarkeit des MF-Induktionshärtens über

einen Dauerlauf test bestätigt werden, allerdings kommt es bei guten Härte werten im Zahnfußbereich noch zu einer teilweisen Durchhärtung des Zahnkopfes. Auch liegen die Streuungen beim Härteverzug noch über dem für eine Six-Sigma-Prozessfähigkeit erforderlichen Wert. Ferner hat der hohe Kohlenstoffgehalt des Vergütungsstahls eine Aufhärtung der Schweißnaht zu Folge, die die Untersuchung alternativer Fügeverfahren für die Verbindung von Tellerrad und Ausgleich erfordert.

Komplexität

Der Komplexitätsindikator *Fertigungssystem* KI_{FS} zeigt einen im Vergleich zur Technologiekette *Einsatzhärten* sehr hohen Wert für das MF-Induktionshärten (**Anhang A2**). Sowohl der Wert für den Komplexitätsindikator *Fertigungstechnologie* KI_{FT} , als auch der Wert Komplexitätsindikator *Werkstoff* KI_W sind größer als drei und somit als kritisch einzustufen. Hintergrund ist der sehr hohe Neuheitsgrad der Technologie *MF-Induktionshärten* sowie die hohen Wechselwirkungen des neuen Werkstoffs in der Technologiekette.

Auswertung der Scorecard Innovation

Die Darstellung der Bewertungsergebnisse in der *Scorecard Innovation* in den Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Realisierungsdauer*, *Qualität* und *Komplexität* fasst die Bewertungsergebnisse auf höchster Ebenen zusammen und schafft Transparenz über existierende Zielkonflikte (**Anhang A2**). So wird im Fallbeispiel ein Zielkonflikt zwischen wirtschaftlichen Vorteilen des MF-Induktionshärtens auf der einen Seite sowie qualitativen Nachteilen und hoher Komplexität auf der anderen Seite ersichtlich. Dabei überwiegen zum aktuellen Zeitpunkt die kritischen Werte zur Produkt- und zur Prozessqualität sowie die durch den Komplexitätsindikator wiedergegebenen hohe Unsicherheit in der Technologieanwendung. Für einen Serieneinsatz im vorliegenden Anwendungsfall ist es somit noch zu früh. Vor dem Hintergrund der noch geringen Reife der Technologie und der bestätigten Wirtschaftlichkeit scheint die Entwicklungsarbeit jedoch lohnend. Das Optimierungspotenzial in der Weichbearbeitung und steigende Energiepreise werden die wirtschaftliche Attraktivität des MF-Induktionshärtens weiter steigern.

Mithilfe des entwickelten Bewertungssystems konnte die Technologie *MF-Induktionshärten* im Anwendungskontext der Pkw-Radsatzproduktion quantitativ bewertet werden. Die Teilthese IV ist somit valide (Kap. 3.1).

5.6 Zwischenfazit

Interim Results

Der Prozess der angewandten Forschung endet mit der Prüfung der entwickelten Methoden und Modelle in der Praxis [ULRI84, S.193]. Die im vorliegenden Kapitel

erläuterten Anwendungsbeispiele zeigen die Wirksamkeit der Methode im Anwendungszusammenhang und bestätigen die formulierten Teilthesen (Kap. 3.1):

- *Teilthese I:* Die Zusammenhänge zwischen fertigungstechnologischen Potenzialen, produkttechnologischen Möglichkeiten und langfristigen Kundenbedarf werden mit dem entwickelten *Technologiepotenzialkalender* für das Produktionsnetzwerk transparent. Der *Technologiepotenzialkalender* ermöglicht so die systematische Ableitung von fertigungstechnologischem Innovationsbedarf aus dem Gesamtkontext (Kap. 5.2).
- *Teilthese II:* Über die methodengestützte Anwendung der Normstrategien *Elimination*, *Substitution* und *Optimierung* im Rahmen der entwickelten Heuristik werden mit dem Modul *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* fertigungstechnologische Effizienzinnovationen möglich (Kap. 5.3).
- *Teilthese III:* Das Methodenmodul *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* gibt über die Potenzialmatrix und über das Vorgehensmodell zur integrierten Produktfindung Impulse für die Gestaltung zukunftsorientierter Technologieketten. Es legt so die Grundlage für ein langfristig effektives Leistungs- und Technologieprogramm im Produktionsnetzwerk (Kap. 5.4).
- *Teilthese IV:* Das entwickelte Bewertungssystem ermöglicht die quantitative Bewertung der fertigungstechnologischen Konzeptalternativen in den Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Qualität*, *Realisierungsdauer* und *Komplexität*. Es bietet durchgängige Unterstützung für die im Rahmen der Methodenanwendung anfallenden Beurteilungs- und Bewertungsaufgaben in Abhängigkeit von der vorliegenden Informationsreife (Kap. 5.5).

Die Innovationsaktivitäten im Produktionsnetzwerk wurden mit der entwickelten Methode in Summe gestärkt. Im europäischen Wettbewerb „Beste Fabrik“ erreichte das Produktionsnetzwerk im Betrachtungszeitraum volle Punktzahl in den Bewertungsdimensionen „Umsetzung Strategie“ und „Produkt- und Prozessentwicklung“. Die Auszeichnung unterstreicht die Potenziale der vorgeschlagenen Planungsmethode, auch wenn der ihr zuzurechnende Anteil am Erfolg schwer quantifizierbar bleibt.

Alle Teilthesen konnten bestätigt werden. Die zentrale Forschungshypothese der vorliegenden Arbeit ist somit valide.

6 Zusammenfassung

Summary

Die Produktion in Hochlohnländern sieht sich mit zwei wesentlichen Herausforderungen konfrontiert: Erstens führt der globale Wettbewerb zu stetigem *Effizienzdruck* auf die bestehenden Technologieketten, zweitens können radikale produkttechnologische Umbrüche die *Effektivität* des etablierten Leistungsangebots gefährden. *Fertigungstechnologische Innovation* kann einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung dieser beiden Herausforderungen leisten. Durch *Effizienzinnovationen* können Fertigungskosten in bestehenden Technologieketten reduziert werden. *Effektivitätsinnovationen* erlauben die Erschließung neuer, differenzierender Produkte im Kontext radikaler produkttechnologischer Umbrüche.

Aus der Analyse relevanter Modelle und Methoden aus Forschung und Praxis konnten für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken drei wesentliche Defizite herausgearbeitet werden: ein Transparenz-, ein Effizienz- und ein Effektivitätsdefizit. Das *Transparenzdefizit* zeigt Handlungsbedarf bezüglich der Entwicklung einer Methode zur Ausrichtung und Koordination der Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken. Das *Effizienzdefizit* steht für unzureichende methodische Unterstützung in der Planung von Effizienzinnovationen in bestehenden Technologieketten. Das *Effektivitätsdefizit* steht für fehlende Antworten der Technologieplanung auf radikale produkttechnologische Umbrüche. Ziel dieser Arbeit war es, die genannten Defizite im Rahmen der Entwicklung einer *Methode zur Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken* zu beheben. Diese existiert zurzeit nicht.

Die entwickelte Methode besteht aus vier logisch verknüpften Modulen. Das Modul I *Transparenz und Impulse* bildet den Startpunkt im Planungsprozess. Im Zentrum steht die Entwicklung des *Technologiepotenzialkalenders*. Als den Planungsprozess initiierender Methodenbaustein gestaltet, schafft er Transparenz über fertigungstechnologische Potenziale, produkttechnologische Möglichkeiten und langfristigen Kundenbedarf. Durch die Integration der *fertigungstechnologieorientierten Technologiefrüherkennung* in den *Technologiepotenzialkalender* und seinen Erstellungsprozess wird für die Technologieplanung eine stetige Quelle fertigungstechnologischer Impulse erschlossen. Der *Technologiepotenzialkalender* wird somit im Sinne von *Fallböhrmer* zu einer Wissens- und Kommunikationsplattform für die Planung fertigungstechnologischer Innovation in Produktionsnetzwerken [FALL00, S.137f]. Ergebnis der Anwendung des Moduls sind aus dem Technologiepotenzialkalender abgeleitete und im *Defizitprotokoll* dokumentierte *Innovationsaufgaben*. Diese stecken den Gestaltungsraum für die Methodenmodule *Erschließung von Effizienzinn-*

vationen in der Technologiekette und Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot ab.

Das Modul II *Erschließung von Effizienzinnovationen in der Technologiekette* zielt auf fertigungstechnologische Innovation zur Reduzierung der Fertigungskosten in den Technologieketten des Produktionsnetzwerks. In Abgrenzung zu bestehenden Forschungsarbeiten der Technologieplanung steht dazu nicht die Generierung von neuen Technologieketten oder deren kontinuierliche Verbesserung (KVP) im Vordergrund, sondern die gezielte fertigungstechnologische Innovation durch Anpassung bestehender Technologieketten. Dazu werden Methoden entwickelt, die die *Identifikation von Handlungsschwerpunkten* in bestehenden Technologieketten, die *Beschreibung fertigungstechnologischen Bedarfs* sowie die *Generierung von fertigungstechnologischen Konzepten* unter Einbindung von *Technologieinformationssystemen* und *Simulationswerkzeugen* unterstützen. Kern des Moduls und wesentliche wissenschaftliche Neuerung stellt die entwickelte *Heuristik* zur Erarbeitung von Konzepten für Effizienzinnovationen dar. Diese prüft die Technologieketten systematisch auf fertigungstechnologische *Eliminations*-, *Substitutions*- und *Optimierungsmöglichkeiten*. Durch das methodische Hinterfragen des Status quo und durch die systemische Analyse von Technologiekette, Produktgestalt und Werkstoff werden die gesamttechnologischen Möglichkeiten in Richtung optimaler Fertigungskosten entwickelt.

Das Modul III *Befähigung von Effektivitätsinnovationen im Leistungsangebot* integriert Produkt- und Technologieplanung noch vor Beginn des *Simultaneous Engineering*. Der inhaltliche und zeitliche Aktionsraum der Fertigungstechnologie im Produktentstehungsprozess wird so maximiert. Der dazu entwickelte *Integrationsansatz* verknüpft die Aktivitäten von Produkt- und Technologieplanung auf Grundlage der VDI-Richtlinie 2220 in zwei Stufen [VDI80]. In der ersten Stufe werden mit der entwickelten *Potenzialmatrix* fertigungstechnologische Potenziale mit Produktpotenzialen abgeglichen und gemeinsame Aktionsfelder von Produkt- und Technologieplanung abgeleitet. Im Rahmen eines *netzwerkartigen Vorgehensmodells* erfolgt in zweiter Planungsstufe die gemeinsame, iterative Ausgestaltung der Aktionsfelder. Die Chancen zur Erschließung fertigungstechnologieinduzierter, wettbewerbsdifferenzierender Produkte wird somit erhöht und eine langfristig effektive fertigungstechnologische Entwicklung im Kontext radikalen produkttechnologischen Wandels unterstützt.

Im Methodenmodul IV *Bewertung der entwickelten Konzepte* wird ein multikriterielles Bewertungssystem für fertigungstechnologische Innovation entwickelt. Dieses basiert auf einem dreistufigen Vorgehensmodell, das den Bewertungsprozess in die Schritte *Vorauswahl*, *Grob*- und *Feinbewertung* gliedert. In der *Vorauswahl* werden die Konzeptideen anhand von K.O.-Kriterien sowie einer expertenbasierten, relativen Ei-

nordnung in das *Nutzenbeitrag-Realisierungsaufwand-Portfolio* eingegrenzt. In der Grob- und Feinbewertung werden die Konzepte auf Basis des entwickelten Kriteriensystems in den Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Realisierungsdauer*, *Qualität* und *Komplexität* bewertet. Der Forschungsschwerpunkt liegt dabei in der Entwicklung eines Komplexitätsverständnisses für die Fertigungstechnik sowie in der Entwicklung von Methoden zur quantitativen Messung fertigungstechnologischer Komplexität. Diese wird definiert als die Unsicherheit, definierte Bauteileigenschaften prozesssicher zu erfüllen. Sie wird in der Grobbewertung über den Neuheitsgrad der Bauteil-, Fertigungstechnologie-, Werkstoff- und Personalkombination abgeschätzt und über den *Komplexitätsindikator für Fertigungssysteme* quantifiziert. In der Feinbewertung werden die Auswirkungen der Unsicherheit im fertigungstechnologischen System auf die Bauteileigenschaften mithilfe des *Latin Hypercube Verfahrens* simuliert. Die Bewertungsergebnisse in den vier Bewertungsdimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Qualität*, *Realisierungsdauer* und *Komplexität* werden abschließend in der *Scorecard Innovation* standardisiert aufbereitet.

Die einzelnen Module bilden in sich vollständig funktionsfähige Teilsysteme mit definierten Schnittstellen zu dem jeweils vor- und nachgelagerten Vorgehensschritt. Die Modularisierung der Methode ermöglicht eine problemlose, unternehmensindividuelle Anpassung und Anwendung bis hin zur vollständigen Substitution einzelner Module durch gegebenenfalls bereits im Unternehmen vorliegende Methodenbausteine. Einzelne Module können situativ besonders intensiv bearbeitet werden, andere für einen bestimmten Planungszyklus ganz entfallen. So zeigt der Einsatz der Methode in der Industrie eine verstärkte Nutzung der Module I und IV in den ersten Planungszyklen, während mit steigender Planungsroutine die Methodenmodule II und III in den Vordergrund der Planungsaktivitäten rücken.

Die entwickelte Methode wurde anhand verschiedener Anwendungsbeispiele validiert. Dargestellte Erfolge in der Methodenanwendung belegen die Wirksamkeit der Planungsmethode in der Praxis. So hat sich der *Technologiepotenzialkalender* im betrachteten Produktionsnetzwerk etabliert, die Entscheidung zum Rollout im gesamten Produktionsressort liegt vor. Die Fallbeispiele *Härtetechnologie* und *Reinigungstechnologie* zeigen, dass bei konsequenter Anwendung der Methode *Effizienzinnovationen* bzw. signifikante Produktivitätssteigerungen realisierbar sind. Im Kontext der Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen wurden die Potenziale der entwickelten Methode zur Gestaltung von *Effektivitätsinnovationen* aufgezeigt. Alle Teilthesen wurden durch Anwendungsbeispiele bestätigt. Die Hauptthese ist somit validiert.

III Summary

Production in high-wage countries is faced with two great challenges. First, global competition is leading to constant *pressure on the efficiency* of existing technology chains. Second, radical technological changes are challenging the *effectiveness* of the established range of products. Innovation in manufacturing technology can give substantial contribution to solve these challenges. With efficiency innovations manufacturing costs in established technology chains can be reduced. Additionally, effectivity innovation makes the exploitation of new products possible.

It was possible to determine three essential deficits regarding technology planning in this context: A transparency deficit, an efficiency deficit and an effectiveness deficit. The *transparency deficit* reveals the need to design a tool to align and coordinate manufacturing innovation in production networks. The *efficiency deficit* signifies a lack of methodical support for efficiency innovation in the production networks' existing technology chains. The *effectiveness deficit* reveals that technology planning is lacking a response to radical technological product changes. The aim of this thesis was to address these deficits by developing a *Method for Planning Manufacturing Innovation in Production Networks*. This method does not exist yet.

The methodology developed consists of four modules, which are connected logically. Module I, *Transparency and Impulses*, constitutes the starting point in the planning process. Its focal point is the development of the *Technologiepotenzialkalender*. The *Technologiepotenzialkalender* gives transparency over manufacturing technology potentials, possible product changes and long-term customers' needs. A constant source of technological impulses is made accessible for technology planning by integrating *Technology Forecasting* into the *Technologiepotenzialkalender*. Thus, the *Technologiepotenzialkalender* becomes a knowledge and communication platform for the planning of manufacturing innovation in production networks. It creates transparency regarding interdependencies of technological innovation and offers innovation impulses. It yields *Innovation Tasks* deduced from the overall context and documented in the *Deficits Report*. The *Innovation Tasks* define the scope for the modules *Developing Efficiency Innovations in the Technology Chain* and *Enabling Effectiveness Innovations*.

Module II, *Developing Efficiency Innovations in the Technology Chain* addresses innovation to reduce manufacturing costs in the production network's technology chains. In contrast to existing research in technology planning, the focus is not on the generation of new process chains or their continuous improvement (CIP). The focus is on target-oriented innovation in the existing technology chain. Tools supporting the *identification of focus fields* in the technology chain, the *description of technological*

requirements within the latter, as well as the *concept design* are developed. *Technology Information Systems* and *Simulation Tools* are methodologically integrated in concept design. Focus of the module is the development of a *heuristic* for generating concepts for efficiency innovation. The heuristic systematically examines *elimination*, *substitution* and *optimization* possibilities in the technology chains. The overall technological opportunities are combined into an optimum by methodically scrutinizing the status quo and by systemically examining the technology chain, the product and the material as a whole.

Module III, *Enabling Effectiveness Innovations for Products* integrates product and manufacturing technology planning before the beginning of simultaneous engineering. In this way, the space for manufacturing innovation in the product development process is maximized. The developed *approach* links the activities of product and manufacturing technology planning in a two-step process. In the first step product and manufacturing technology potentials are aligned using the developed *Matrix of Potentials* and joint fields of action are deduced. The joint, iterative design of the fields of action is carried out in a second planning step as part of a network-like process model. Integrating the activities of product and manufacturing technology planning in this manner increases the production network's chances for new business. It contributes to safeguarding the long-term effectiveness of productive capacities in the context of radical product-technological change.

In Module IV, *Evaluation of the developed Concepts*, a multi-criteria system for the evaluation of manufacturing innovation is developed. It is based on a three-stage evaluation funnel. In the first stage the conceptual ideas are narrowed down with exclusion criteria and an expert-based, relative classification in the *Benefit-Cost Portfolio*. In stage two and three the concepts are evaluated with the developed criteria system in the dimensions operating efficiency, time for realization, quality and complexity. Main research lies in the development of methods for quantitative evaluation of complexity in manufacturing. Complexity thereby is defined as the uncertainty to realize defined product characteristics with the requested process reliability. It is estimated in stage two of the evaluation system by the degree of newness of the produced part, of the manufacturing technology, of the material and of the employed workforce and is quantified by the *Complexity Indicator for Manufacturing Systems*. In stage three of the evaluation system the consequences of this uncertainty in the manufacturing system are simulated with *Latin Hypercube* and so its impact on product characteristics are made transparent. The results of the concept evaluation in the four dimensions operational efficiency, time for realization, quality and complexity are concluded in the *Scorecard Innovation*.

Each individual module constitutes an entirely functional sub-system. The concept, modularized in that way, enables adapting and applying the planning methodology in

a smooth and company-specific manner. It even allows substituting individual modules for concepts, which may already be present in the company. It is possible to work on individual modules particularly intensively, whereas others may be omitted entirely for a certain planning cycle. Thus, the application of the methodology in the industry showed that modules I and IV are used more intensively during the initial planning cycles, whereas method modules II and III come to the fore of planning activities as planning routine increases.

The developed methodology was validated in several case studies, where it proved fully successful. The *Technologiepotenzialkalender* has become established as a planning tool in the studied production network. The case studies of hardening technology and cleaning technology showed *great increases in efficiency* in the production network's technology chains. A case study in the field of vehicle electrification shows the potentials of the developed methodology for designing *effectiveness innovations*. All theses are confirmed by case studies. Therefore the main thesis has been validated.

IV Literaturverzeichnis

- [ABEL05] Abele, T.; Kaiser, U.; Drathen, H.; Westerkamp, D.; Laube, T.: Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 2005-2015“. In: atp - Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 47, 2005, Nr. 8, S.36-41
- [ABEL06] Abele, T.: Verfahren für das Technologie-Roadmapping zur Unterstützung des strategischen Technologiemanagements. Helmsheim: Jost-Jetter, 2006
- [ABEL06a] Abele, T.; Junghans, T.; Barthel, H.: Logistik-Roadmapping zum Aufbau von Logistikkompetenz. In: Supply Chain Management Nr. IV/2006, S.43-46
- [ACKO81] Ackoff, R.: On the use of Models in Corporate Planing. In: Strategic Management Journal. Volume 2, Issue 4, October 1981, S.353-359
- [AELE09] Abele, E.; Rumpel, G.; Cachay, J.: Zukunft der Produktion in Deutschland. Entwicklungstrends und Herausforderungen für die Produktion von morgen. In: Industrie Management Nr. 25, 2009, S.53-58
- [AHN97] Ahn, H.: Optimierung von Produktentwicklungsprozessen - Entscheidungsunterstützung bei der Umsetzung des Simultaneous Engineering. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag, 1997
- [BEA08] Bea, F.; Scheurer, S.; Hesselmann, S.: Projektmanagement. Stuttgart: Lucius & Lucius, 2008
- [BEHR03] Behrens, S.: Möglichkeiten der Unterstützung von strategischer Geschäftsfeldplanung und Technologieplanung durch Roadmapping. Berlin: Logos, 2003
- [BEHT07] Behrendt, S.; Erdmann, L.; Nolte, R.; Diegner, B.: Integrated Technology Roadmapping. A practical guide to the search for technological answers to social challenges and trends. Frankfurt am Main: ZVEI, 2007
- [BENK03] Benker, H.: Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen. Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler. Berlin: Springer, 2003
- [BIND96] Binder, V.; Kantowsky, J.: Technologiepotenziale – Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des strategischen Technologiemanagements. Diss. Universität St. Gallen, Nr. 1799, St. Gallen, 1996

- [BLEC06] Blecker, T.; Liebhart, U.: Grundlagen und Herausforderungen des Wirtschaftens in Wertschöpfungsnetzwerken. In: Blecker, T.; Gmünden, H.: Wertschöpfungsnetzwerke. Festschrift für Bernd Kaluza. Berlin: Erich Schmidt, 2006, S.1-17
- [BLEI04] Bleicher, K.: Das Konzept Integriertes Management. Visionen-Missionen-Programme. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. Frankfurt a.M.: Campus, 2004
- [BOCH96] Bochtler, W.: Modellbasierte Methodik für eine integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung. Aachen: Shaker, 1996
- [BORS07] Borsdorf, R.: Methodischer Ansatz zur Integration von Technologie-wissen in den Produktentwicklungsprozess. Aachen: Shaker, 2007
- [BRAN02] Brandenburg, F.: Methodik zur Planung technologischer Produktinnovationen. Aachen: Shaker, 2002
- [BROC99] Brockhoff, K.: Forschung und Entwicklung – Planung und Kontrolle. 5. ergänzte und erweiterte Auflage. München: Oldenburg, 1999
- [BROS02] Broser, W.: Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke. München: Uzt, 2002
- [BRYA06] Bryant, E.: Siemens VDO announces e-Corner motor-in-hub concept. URL:// <http://www.autoblog.com/2006/08/10/siemens-vdo-announces-ecorner-motor-in-hub-concept/> [Stand: 29.12.2010]
- [BUCE00] Buchenau, M.; Suri, J.: Experience Prototyping. New York: ACM, 2000
- [BUCH03] Bucher, P.: Integrated Technology Roadmapping: Design and Implementation for Technology-Based Multinational Enterprises, Diss. ETH Zürich 2003.
- [BULL94] Bullinger, H.: Einführung in das Technologiemanagement. Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. Stuttgart: Teubner, 1994
- [BULL97] Bullinger, H.; Bading, A.: Forschungs- und Entwicklungsmanagement – simultaneous engineering, Projektmanagement, Produktplanung, rapid product development. Stuttgart: Teubner, 1997
- [BURG96] Burgstahler, B.: Synchronisation von Produkt- und Produktionsentwicklung mit Hilfe eines Technologiekalenders. Essen: Vulkan, 1997

- [CALI98] Calinescu, A; Efstathiou, J; Schirn, J; Bermejo, J: Applying and assessing two methods for measuring complexity in Manufacturing. In: Journal of the Operational Research Society. 1998, Nr. 48, S.723-733
- [CHEC98] Checkland, P.; Holwell, S.: Action Research: Its nature and validity. In: Systematic Practice and Action Research. 11. Jg., 1998, Nr. 1, S. 9-21
- [DERI96] Derichs, T.: Informationsmanagement im Simultaneous Engineering: Systematische Nutzung unsicherer Informationen zur Verkürzung der Produktentwicklungszeiten. Aachen: Shaker, 1996
- [DIN03a] Norm DIN8580 (September 2003): Fertigungsverfahren. Begriffe, Einleitung, als [DIN03a]
- [DIN03b] Norm DIN8593-0 (September 2003): Fertigungsverfahren Fügen. Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe, als [DIN03b]
- [DOSI88] Dosi, G.: The Nature of the innovative process. In: Dosi, G.; Freeman, C.; Nelson, R.; Silverberg, G.; Soete, L. (Hrsg.), Technical Change and economic theory. London: Pinter, 1988, S. 221-238
- [EHRL07] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Auflage. München, Wien: Hanser, 2007
- [ELMA03] ElMaraghy, W.H.; Urbanic, R.J.: Modelling of Manufacturing Complexity. In: CIRP Annals. 53. Jg., 2003, Nr. 1, S. 563-366
- [ELMA05] ElMaraghy, H.A.; Kuzgunkaya, R.J.; Urbanic, R.J.: Manufacturing Systems Configuration Complexity. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology. 54. Jg., 2005, Nr. 1, S. 445-450
- [EMME94] Emmert, D.: Planung von Investitionsprogrammen. Ludwigsburg: Wissenschaft und Praxis, 1994
- [EVER02] Eversheim, W: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3: Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2002
- [EVER03] Eversheim, W. (Hrsg.): Innovationsmanagement für technische Produkte. Heidelberg: Springer, 2003
- [EVER95] Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering – Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin: Springer, 1995

- [FALL00] Fallböhrer, M: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Aachen: Shaker, 2000
- [FISC95] Fischer , D.: Entwicklung eines objektorientierten Informationssystems zur optimierten Werkstoffauswahl. Berlin: Springer, 1995
- [FRIE06] Friedli, T.: Technologiemanagement: Modelle zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit. Berlin Heidelberg: Springer, 2006
- [GÄLW87] Gälweiler, A.: Strategische Unternehmensführung. 3. Aufl. Frankfurt/Main: Campus, 1987
- [GAUS96] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management-Planen und Führen mit Szenarien. 2. Bearb. Aufl. München: Hanser, 1996
- [GELD06] Geldermann, J.: Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion. Karlsruhe: uvka, 2006
- [GELD99] Geldermann, J.: Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung. Düsseldorf: VDI, 1999
- [GERY96] Gerybadze, A.: Technologische Vorhersagen. In: Kern, W.; Schröder, H.; Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. 2. Auflage. S. 2027-2040. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996
- [GOET08] Goetze, U.: Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 6. Auflage. Berlin: Springer, 2008
- [GOHL09] Gohlke, C.: Entscheidungen unter Unsicherheit. Einflussfaktoren auf Gruppen im Innovationsmanagement. München: AVM, 2009
- [GORB08] Gorbea, C.; Lindemann, U.; Fricke, E.: The design of future Cars in a new age of architectural competition. In: Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2008, August 3-6, 2008, New York
- [GRAF11] Graf, W.; Kaliske, M.: Adaption und Anwendung nicht-deterministischer Simulations- und Bemessungsstrategien in der industriellen Entwurfspraxis. SFB 528, Transferprojekt T7. URL: <http://sfb528.tu-dresden.de/t7/index.html> [Stand: 19.02.2012]
- [GRAN10] Grantana Material Intelligence: CES Selector 2010. URL: <http://www.grantadesign.com/products/ces/overview.htm> [Stand 04.10.2010]

- [GRÄS99] Gräßler, R.: Planungs- und Workflow-Methodik für eine integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung. Aachen: Shaker, 1999
- [GRAW05] Grawatsch, M.: TRIZ-basierte Technologiefrüherkennung. Aachen: Shaker, 2005.
- [GROS08] Virtuelle Planung der Prozessrobustheit in der Blechumformung. Diss. ETH Zürich, 2008
- [HACK02] Hacker, W. (Hrsg.): Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung der frühen Phasen. Zürich: Rainer Hampp 2002.
- [HADE00] Hadeler, T.; Winter, E. et al.: Gabler Wirtschaftslexikon. 15. Aufl. Wiesbaden, 2000
- [HARS97] Harstorff, M.: Integriertes technologisches Informationssystem für spanende Fertigungsprozesse. Düsseldorf: VDI, 1997
- [HAUS07] Hausschild, J.; Salomo, S.: Innovationsmanagement. 4. Auflage. München: Vahlen, 2007
- [HENS07] Hensel, J.: Netzwerkmanagement in der Automobilindustrie. Erfolgsfaktoren und Gestaltungsfelder. Wiesbaden: Dt. Universitäts-Verlag, 2007
- [HERR09] Hermann, A.; Huber, F.: Produktmanagement. Grundlagen-Methoden-Beispiele. Wiesbaden: Gabler, 2009
- [HERS02] Herstatt, C.; Verworn, B.: The innovation process: an introduction to process models, Arbeitspapier Nr. 12, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2002.
- [HILL76] Hill, W.; Ulrich, P.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). In: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt. 5. Jg., Nr. 8, 1976, S.345-350
- [JEHN09] Jehnert, H.; Peter, H.-J.: Einsatzhärten vs. Induktionshärten. Beitrag zum Wirtschaftlichkeitsvergleich beim Wärmebehandeln von Zahnrädern. In: HTM – Journal of Heat Treatment and Materials. 02/2009, S.72-78
- [KAMI95] Kamiske, G.; Brauer, J.: Qualitätsmanagement von A – Z. München: Hanser, 2001
- [KÄMP07] Kämpf, R.; Gienke, H.: Handbuch Produktion. Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling. München: Hanser, 2007

- [KELL01] Kelley, T.: Prototyping is the shorthand of Design. In: Design Management Journal. Vol. 12, No.3, 2001; S.35-42
- [KELL02] Kelley, T.; Littman, J.: Das IDEO Innovationsbuch. Wie Unternehmen auf neue Ideen kommen. München: Econ, 2002
- [KITZ07] Kitzer, P.: Pipeline of Ideas. A flow of Innovation. In: Aachener Technologiemanagement Tagung. Aachen, 13.09.2007
- [KLOC02] Klocke, F.: Technologiesprünge durch Kooperation und Interdisziplinarität. In: Milberg, J.; Schuh, G. (Hrsg.): Erfolg in Netzwerken. Berlin: Springer, 2002, S. 219-234
- [KLOC02a] Klocke, F.; Beck, T.: Computerunterstützte Prozessauslegung und -optimierung beim Schleifen. In: Hoffmeister, H.; Tönshoff, H. (Hrsg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren – Verfahren und Maschinen, 60. Ausgabe. Essen: Vulkan, 2002, S. 336-350
- [KLOC05c] Klocke, F.; Brinksmeier, E.; Weinert, K.: Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology. Vol. 54, Issue 2, 2005, S.22-45
- [KLOC06] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4. Umformen. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer, 2006
- [KLOC08] Klocke, F. et al.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven. Aachen: Apprimus, 2008, S.13-40.
- [KLOC08a] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. 8., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer, 2008
- [KLOC96] Klocke, F. et al.: Komprimierte Prozessketten – Voraussetzungen und Potenziale. In: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Weck, M. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996, S. 4-1 bis 4-33
- [KLOC98] Klocke, F.; Eversheim W.: SFB361 – Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung. Arbeits- und Ergebnisbericht, Teilprojekt C1, 1998, S.575-638
- [KNHE05] Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Aachen: Shaker, 2005
- [KNOC06] Knoche, M.: Komplementaritätsrelevante technologiebasierte Diversifikation. Aachen: Shaker, 2006

- [KOEN94] König, W.; Klocke, F.; Eversheim W.: SFB361 – Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung. Arbeits- und Ergebnisbericht, Teilprojekt C1, 1994, S.395-424
- [KRAP91] Krapfel, R.; Salmond, D; Spekman, R.: A strategic approach to managing buyer-seller relationships. In: European Journal of Marketing. Vol. 25, 1991, Nr. 9, S.22-37
- [KRIE05] Krieger, A.: Erfolgreiches Management radikaler Innovationen. Autonomie als Schlüsselvariable. Weisbaden: DUV, 2005
- [KRÜG97] Krüger, W.; Homp, C.: Kernkompetenz-Management: Steigerung von Flexibilität und Schlagkraft im Wettbewerb. Wiesbaden: Gabler, 1997
- [KUNZ07] Kunz, C: Strategisches Multiprojektmanagement: Konzeption, Methoden und Strukturen. 2. Auflage. Wiesbaden: DUV, 2007
- [LIND93] Linde, H.; Hill, B.: Erfolgreich erfinden. Widerspruchsorientierte Innovationsstrategien für Entwickler und Konstrukteure. Darmstadt: Hoppenstedt, 1993
- [LINM09] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural Complexity Management. An Approach for the Field of Product Design. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2009
- [LUCZ99] Luczak, H.; Eversheim, W.: Telekooperation - Industrielle Anwendungen in der Produktentwicklung. Berlin: Springer, 1999
- [MACH06] Machate, A.: Zukunftsgestaltung durch Roadmapping – Vorgehensweise und Methodeneinsatz für eine zielorientierte Erstellung und Visualisierung von Roadmaps. Diss. Tech. Universität München, 2006
- [MANT10] ManTech. Manufacturing Technology Database. URL: <http://www.iprod.auc.dk /mantech/> [Stand: 03.10.2010]
- [MCKI08] McKinsey & Company: Deutschland 2020. Zukunftsperspektiven für die deutsche Wirtschaft. Zusammenfassung der Studienergebnisse. Frankfurt: McKinsey&Company, Inc., 2008
- [MILL92] Miller, D.: The Icarus paradox. How exceptional companies bring about their own downfall. In: Business Horizons, Vol. 35 (1992), No. 1; S.24-35
- [MILL93] Miller, D.: The architecture of simplicity. In: Academy of Management Review, Vol. 18 (1993), No. 1, S.116-138

- [MÖHR05] Möhrle, M.; Isenmann, R.: Grundlagen des Technologie-Roadmapping. In: Möhrle, M.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Berlin: Springer, 2005, S.1-13.
- [NYHU08] Nyhuis, P.; Reinhart Gunther; Abele Eberhard: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Hamburg: Impressum, 2008.
- [OERT09] Oertelt, S.: Innovationscontrolling. Ganzheitliches Verfahren zur Priorisierung und Steuerung von Vorentwicklungsprojekten. Aachen: Shaker, 2009
- [PANN10] Pannier, S. et al.: Increasing reliability of metal forming processes in early design stages. In: LS-Dyna Anwenderforum. Bamberg, 2010, S.17ff
- [PAPA09] Papakostas,N.; Efghymiou, K.; Mourzis,D.; Chryssolouris, G.: Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamic approaches. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology. No. 58, 2009, S.437-440.
- [PATZ82] Patzak, G.: Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin: Springer, 1982
- [PELZ99] Pelzer, W.: Methodik zur Identifizierung und Nutzung strategischer Technologiepotenziale. Aachen: Shaker, 1999
- [PFEF01] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken. München: Hanser, 2001
- [PFEI83] Pfeiffer, W.; Metze, G.; Schneider, W.; Amler, R.: Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder. Göttingen: Vandenhoeck & Rupprecht, 1983
- [PHAA00] Phaal, R.; Farrukh, C.: Technology planning survey – results. Institute for Manufacturing, University of Cambridge (Hrsg.): Project report, 2000
- [PRAH90] Prahalad, C.; Hamel, G.: The Core Competence of the Cooperation. In: Harvard Business Review, 1990, Nr. 3, S.79-91.

- [PROB03] Probert, D.; Farrukh, C.; Phaal, R.: Technology roadmapping - developing a practical approach for linking resources to strategic goals. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2003, S. 1183-1195.
- [PROS10] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2010
- [RAMA09] Rama, S.: Process Improvement using Six Sigma: A DMAIC guide. Milwaukee: Quality Press, 2009
- [REGI02] Regius, B.: Kostenreduktion in der Produktion. Praxisleitfaden für die Qualitätskostenanalyse. Berlin: Springer, 2002
- [REIN09] Reinhart, G.; Schindler, S.; Pohl, J.: Zyklusorientierte Produktions-technologieplanung. Kontinuierliche Produktionsplanung mittels Synchronisationsmedium Technologiekettenkalender. In: ZWF. Jahrg. 104, 2009, S.50-53
- [ROLL07] Roll, K.; Bogon, P.; Ziebert, C.: Innovative Methoden zur Auslegung von Umformwerkzeugen im Fahrzeugbau. In: wt Werkstatttechnik. 97. Jg., 2007,Nr. 10, S.753-759
- [ROLO11] Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. 20. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- [ROPO99] Ropohl, G.: Allgemeine Technologie – eine Systemtheorie der Technik. München: Carl Hanser,1999
- [ROSE00] Rose, P.: Analyse ausgewählter Methoden zur Identifikation dynamischer Kernkompetenzen. München: Hampp, Mering, 2000
- [ROSI06] Rosier, C.: Strategische Technologieplanung – Der Technologiekalender auf dem Prüfstand. Promotionsvortrag am Fraunhofer IPT, Aachen, 2006
- [SAAD91] Saad, K.: Management der F&E-Strategie. Wiesbaden: Gabler, 1991
- [SACH02] Sachse,P.; Leinert,S: Skizzen und Modelle – wieso Hilfsmittel des Denkens und Handelns beim Konstruieren? In: Hacker,W. (Hrsg.): Denken in der Produktentwicklung. Zürich: Rainer Hampp, 2002, S. 63-83

- [SAUE05] Sauer, A.: Machtbasierte Entwicklung von Intellectual Capital in Kollaborationen der produzierenden Industrie. Aachen: Shaker, 2005
- [SCHD05] Schmid, S.: Kooperation: Erklärungsperspektiven interaktionstheoretischer Ansätze. In: Zentes, J.; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Grundlagen-Ansätze-Perspektiven. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2005, S.235-256
- [SCHK99] Schlicksupp, H.: Innovation, Kreativität und Ideenfindung. 5., überarb. und erw. Aufl., Würzburg: Vogel, 1999
- [SCHL99] Schlaak, T.: Der Innovationsgrad als Schlüsselvariable. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 1999
- [SCHM96] Schmitz, W.: Methodik zur strategischen Planung von Fertigungstechnologien – Ein Beitrag zu Identifizierung und Nutzung von Innovationspotenzialen. Aachen: Shaker, 1996
- [SCHO11] Schongen, F.; Terhorst, M.: Simulation und Simulationsdatenverwendung. In: Aachner Werkzeugbau Akademie. Forschungsbericht 2011/2012. S.70-80.
- [SCHT05] Schnetzler, Nadja: Die Ideenmaschine. Methode statt Geistesblitz – wie Ideen industriell produziert werden. 4. Aufl. Weinheim: Wiley, 2005
- [SCHU01] Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen. Strategien Methoden Tools. 1. Aufl.; München Wien: Carl Hanser, 2001
- [SCHU05] Schuh, G.; Friedli, F.; Kurr, A.: Kooperationsmanagement. Systematische Vorbereitung. Gezielter Auf- und Ausbau. Entscheidende Erfolgsfaktoren. München: Hanser, 2005
- [SCHUH08] Schuh, G. et al.: Roadmapping: Geschäftserfolg durch zielgerichtete Technologieentwicklung. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven. Aachen: Apprimus, 2008, S.513-536.
- [SCHZ11] Schulz, W. et al.: Virtuelle Produktionssysteme. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Heidelberg: Springer, 2011, S.257-465
- [SCMP34] Schumpeter, J.: The Theory of Economic Development. 10. Aufl. New Brunswick, New Jersey: Transaction Publishers, 1934

- [SCMP61] Schumpeter, J.: Konjunkturzyklen. Eine theoretische, historische und statistische Analyse des kapitalistischen Prozesses. Bd. I. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1961
- [SICK97] Sickafus, E.: Unified structured inventive thinking. How to invent. Grosse Ile: Ntelleck, 1997
- [SNYD01] Snyder, C.: Paper Prototyping. San Diego: Elsevier, 2003
- [SOHL92] Sohlenius, G.: Concurrent Engineering. Keynote Paper, Annals of the CIRP 41/2, 1992
- [SPEC02] Specht, G.: F-&E-Mangement. 2., überarbeitete und erweiterte Aufl., Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2002
- [SPET05] Specht, D.; Behrens, S.: Strategische Planung mit Roadmaps – Möglichkeiten für das Innovationsmanagement und die Personalbedarfsplanung. In: Möhrle, M.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Berlin: Springer ,2005, S.141-160.
- [SPUR91] Spur, G.; Stöferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik. Band 3/1 Spanen. München: Hanser, 1991
- [STAR98] Start, Christopher: Manufacturing Efficiency Decision Support (MEDS): An interactive Tool for Alternative Manufacturing Technologies.URL:<http://www.p2pays.org/ref/18/17075.pdf>
[Stand:03.10.2010]
- [SUH05] Suh, N.: Complexity. Theory and Applications. 1. Aufl. New York: Oxford University Press, 2005
- [SUTT02] Sutton, R.: Weird Ideas that work: 11 ½ practices for promoting, managing and sustaining Innovation. New York: Free Press, 2002
- [SUTT02a] Sutton, R.: Der Kreativität den Boden bereiten. In: Harvard Business Manager. Nr. 2, 2002, S. 9-18.
- [SWEL06] Sweller, J.: How the Human Cognitive System Deals with Complexity. In: Elen, J; Clark, R. (Hrsg.): Handling Complexity in Learning Enviroments: Theory and Research. Oxford: Elsevier, 2006, S.13-27
- [TANI08] Tani, G; Cimatti, B: Technological Complexity: A Support to Management Decisions for Product Engineering and Manufacturing. In: Proceedings of the 2008 IEEE IEEM, 8.-11. Dez. 2008, S.8-11

- [TERN98] Terninko, J.; Zusman, A.; Zlotin, B.; Herb, R.: TRIZ – Der Weg zum konkurrenzlosen Erfolgsprodukt. Ideen produzieren, Nischen besetzen, Märkte gewinnen. Landsberg: Moderne Industrie, 1998
- [THOE01] Thommen, J.; Achleitner, A.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. Wiesbaden: Gabler, 2001.
- [THOM80] Thom N.: Grundlagen des betrieblichen Innovationsmanagements. 2. Aufl. Königstein/Ts: Hanstein, 1980.
- [TILL09] Tillmann, M.: Innovative Prozesskettenoptimierung (IPO). Aachen: Apprimus, 2009
- [TOEN95] Tönshoff, H.; Sielermann, M.: Betriebliches Informationssystem für Maschinen und Anlagen. VDI-Z, Vol. 137; 1995, Nr. 10, S.50-53
- [TROM01] Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Aachen: Shaker, 2001
- [ULRI01] Ulrich, H.: Systemorientiertes Denken und Management. In: Stiftung zur Förderung der systemorientierten Managementlehre (Hrsg.): Systemorientiertes Management. Das Werk von Hans Ulrich. Bern: Haupt, 2001, S.243-256.
- [ULRI84] Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Dyllick, T.; Probst, G. (Hrsg.): Management. (Reihe: Unternehmung und Unternehmensführung; Bd.13). Bern: Haupt, 1984, S.168-199.
- [UTTE96] Utterback, J: Mastering the Dynamics of Innovation. Boston: Harvard Business School Press, 1996
- [VDI80] Richtlinie VDI 2220 (Mai 1980). Produktplanung. Ablauf, Begriffe und Organisation. Ausschuss Produktplanung, als [VDI80]
- [VDI93] Richtlinie VDI 2221 (Mai 1993). Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Ausschuss Methodisches Konstruieren, als: [VDI93]
- [VDI94] Richtlinie VDI 3321 (März 1994). Schnittwertoptimierung. Grundlagen und Anwendung. Ausschuss Zerspanungsrichtwerte, als: [VDI94]

- [VDI97] Richtlinie VDI 2222, Blatt 1 (Juni 1997). Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Ausschuss Konstruktionsmethodik; Unterausschuss Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, als [VDI97]
- [VOIG05] Voigt, K. ; Weber, R.: Roadmapping. München: Transfer-Zentrum, 2005.
- [VÖLK08] Völker, R.; Neu, J.: Supply Chain Collaboration. Kollaborative Logistikkonzepte für Third- and Fourth-Tier-Zulieferer. Heidelberg: Physica, 2008
- [VOSE97] Vose, D.: Quantitative Risk Analysis. A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling. Chichester: John Wiley & Sons, 1997
- [WAGE03] Wagenknecht, C.: Algorithmen und Komplexität. München: Hanser, 2003
- [WALK03] Walker, R.: Informationssystem für das Technologiemanagement. Aachen: Shaker, 2003
- [WEGN07] Wegner, H.: Ein System zum fertigungstechnologischen Wissensmanagement. Aachen: Shaker, 2007
- [WEST87] Westkämper, E.: Strategische Investitionsplanung mit Hilfe eines Technologiekalenders. In: Wildemann, H. (Hrsg.): Strategische Investitionsplanung für neue Technologien in der Produktion, Bd. 3, Stuttgart: gmft, 1987, S. 143-181
- [WIEN94] Wiendahl, H.-P.; Scholtissek, P.: Management and Control of Complexity in Manufacturing. In: Annals of the CIRP. Vol. 43/2/1994, S. 533-540.
- [WILD00] Wildemann, H.: Komplexitätsmanagement. Vertrieb, Produkte, Beschaffung, F&E, Produktion und Administration. 1. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum GmbH, 2000
- [WILD87] Wildemann, H.: Strategische Investitionsplanung. Methoden zur Bewertung neuer Produktionstechnologien. Wiesbaden: Gabler, 1987
- [WILL08] Willms, H.: Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Diss. RWTH Aachen, 2008

- [WILT98] Willaert, S.; De Graaf, R.; Minderhoud, S.: Collaborative engineering: a case study of concurrent engineering in a wider context. In: Journal of engineering and technology management, Vol. 15, No. 1, 1998, S.87-109
- [WOL94] Wolfrum, B.: Strategisches Technologiemanagement. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 1994
- [ZENT05] Zentes, J; Swoboda, B.; Morschett, D.: Kooperationen, Allianzen und Netzwerke. Grundlagen-Ansätze-Perspektiven. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2005
- [ZERN07] Zernial, P.: Technology Roadmap Deployment. Eine Methodik zur Unterstützung der integrierten strategischen Planung technologischer Innovation. Diss. RWTH Aachen, 2007

V Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

- A.1 Kriteriensystem für die Bewertung fertigungstechnologischer Innovation
- A.2 Scorecard Innovation

A.1 Kritisensystem für die Bewertung fertigungstechnologischer Innovation

Bild A.1- 1: Kritisensystem – Legende
Evaluation Criteria – Key

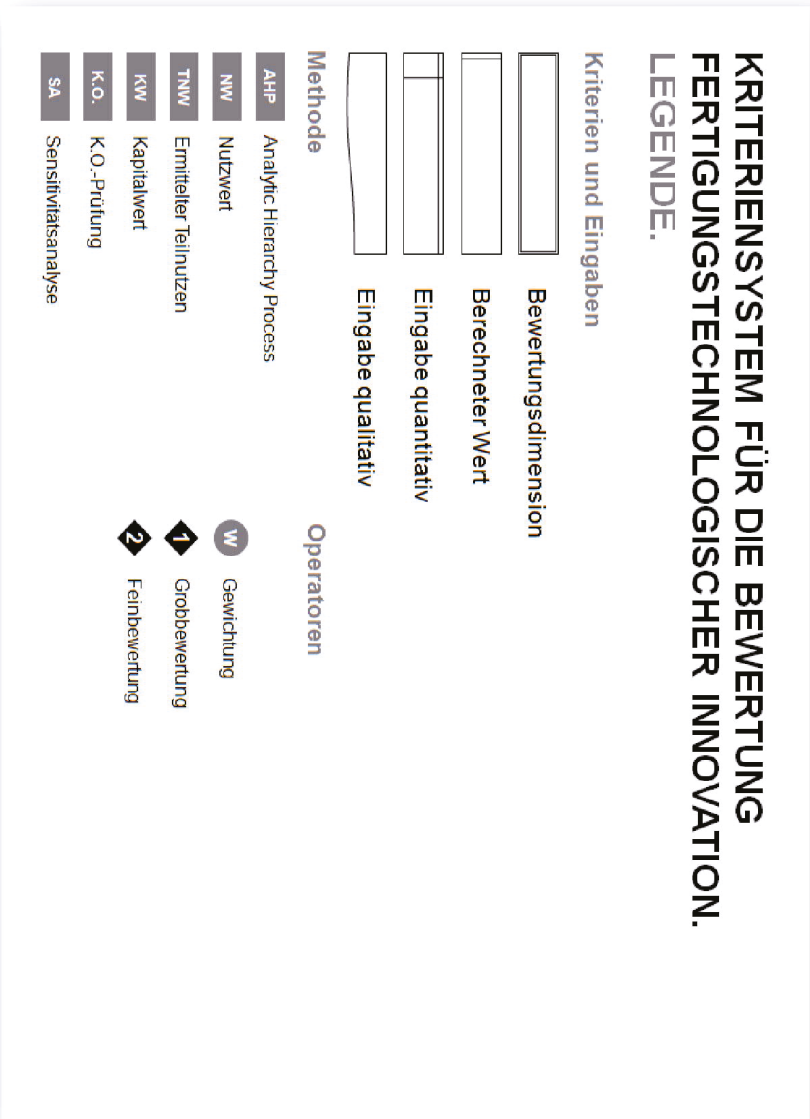


Bild A.1- 2: Kriteriensystem – Wirtschaftlichkeit (1)
Evaluation Criteria – Profitability (1)

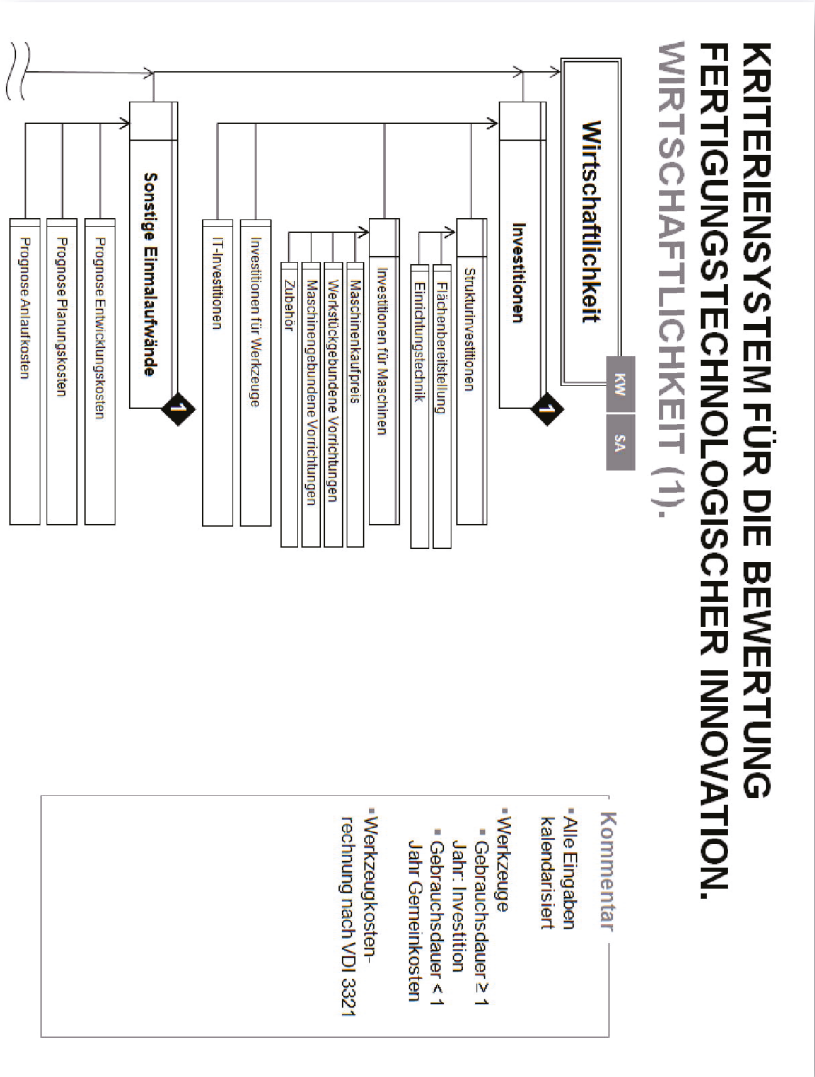


Bild A.1- 3: Kriteriensystem – Wirtschaftlichkeit (2)
Evaluation Criteria – Profitability (2)

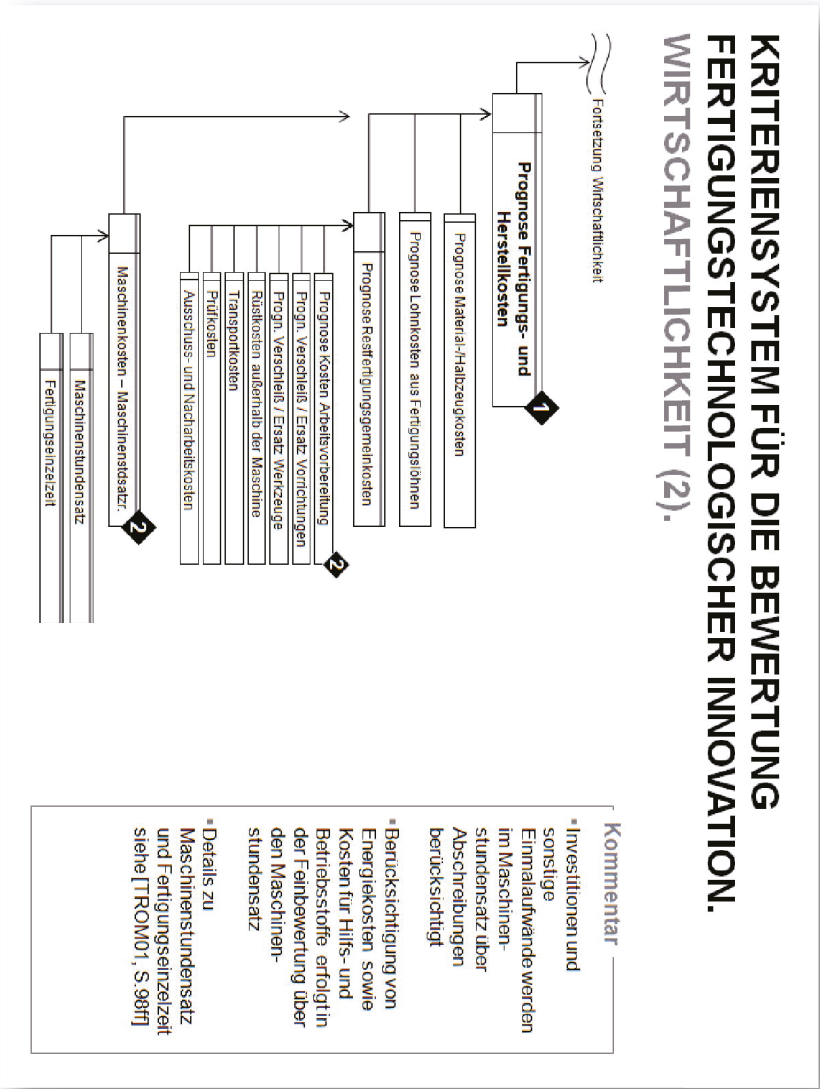
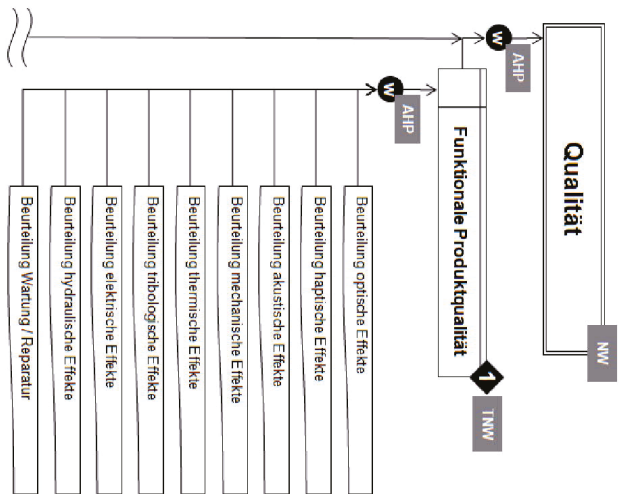


Bild A.1- 4: Kriteriensystem – Qualität (1)
Evaluation Criteria – Quality (1)



Kommentar

- Machbarkeit der Realisierung funktionsrelevanter Bauteileigenschaften durch Fertigungstechnologie wird in Vorauswahl über K.O.- Kriterien geprüft
- Gewichtung und Detaillierung funktionsrelevanter Bauteileigenschaften erfolgt in Abhängigkeit der spezifischen Bauteilfunktionen
- Beurteilung funktionale Produktqualität ist im Rahmen der Feinbewertung zu detaillieren

[teilw. TROM01,
BORS07; KLOC00c]

Bild A.1- 5: Kriteriensystem – Qualität (2)
Evaluation Criteria – Quality (2)

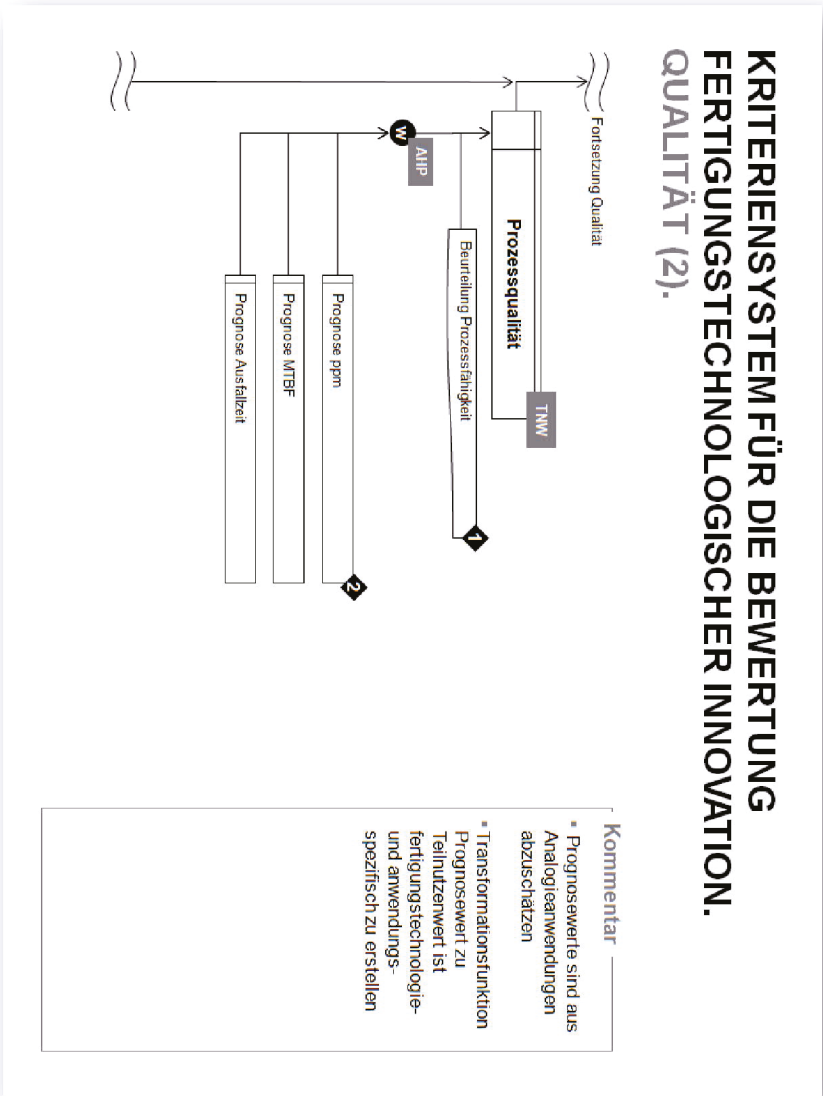
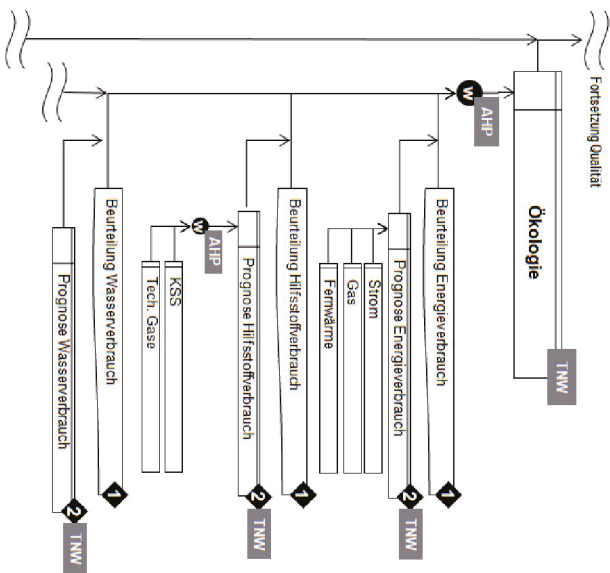


Bild A.1- 6: Kriteriensystem – Qualität (3)
Evaluation Criteria – Quality (3)



KRITERIENSYSTEM FÜR DIE BEWERTUNG FERTIGUNGSTECHNOLOGISCHER INNOVATION. QUALITÄT (3).

Kommentar

- Durchschnittsverbüräuche sind aus Analogie- anwendungen abzuschätzen
- Transformationsfunktion Prognosewert zu Teilnutzenwert ist fertigungstechnologisch und anwendungs- spezifisch zu erstellen
- Energie-, Hilfsstoff- und Wasserverbrauch sind in Wirtschaftlichkeits- betrachtung zu verrechnen
- Anpassung & Erweiterung der Kriterien erfolgt technologie- & anwendungsspezifisch

Bild A.1- 7: Kriteriensystem – Qualität (4)
Evaluation Criteria – Quality (4)

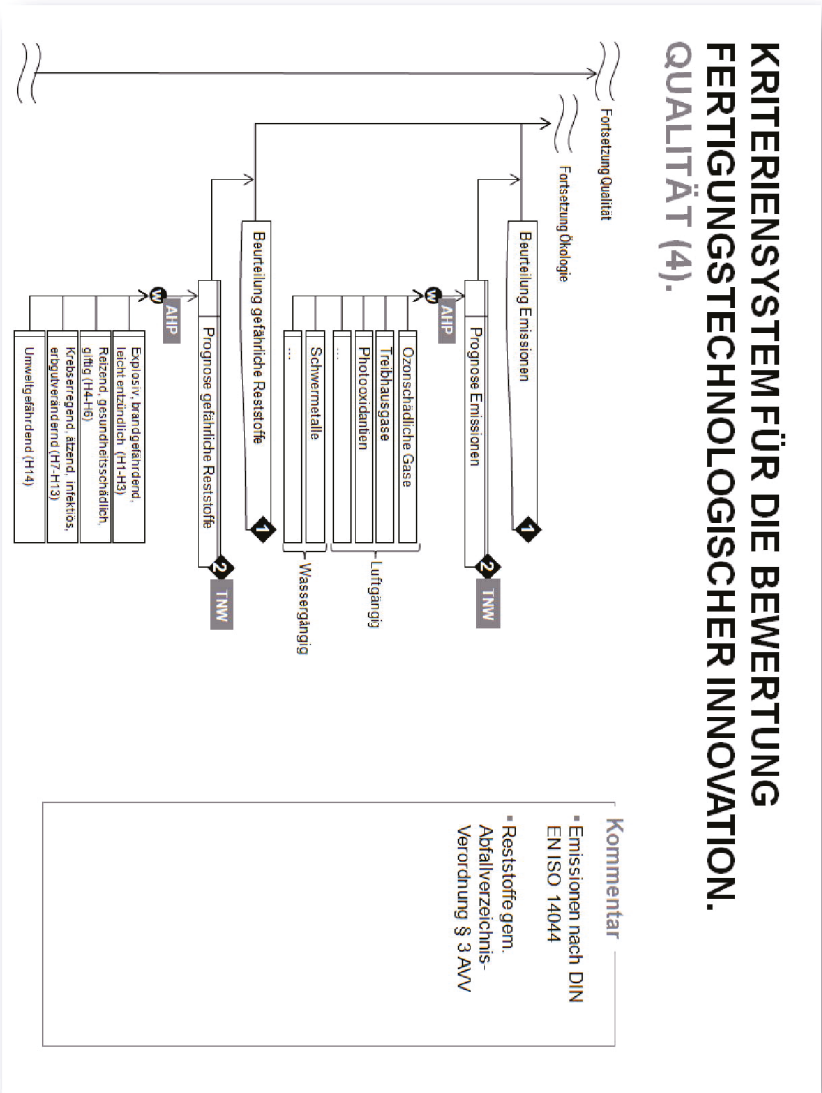


Bild A.1- 8: Kriteriensystem – Qualität (5)
Evaluation Criteria – Quality (5)

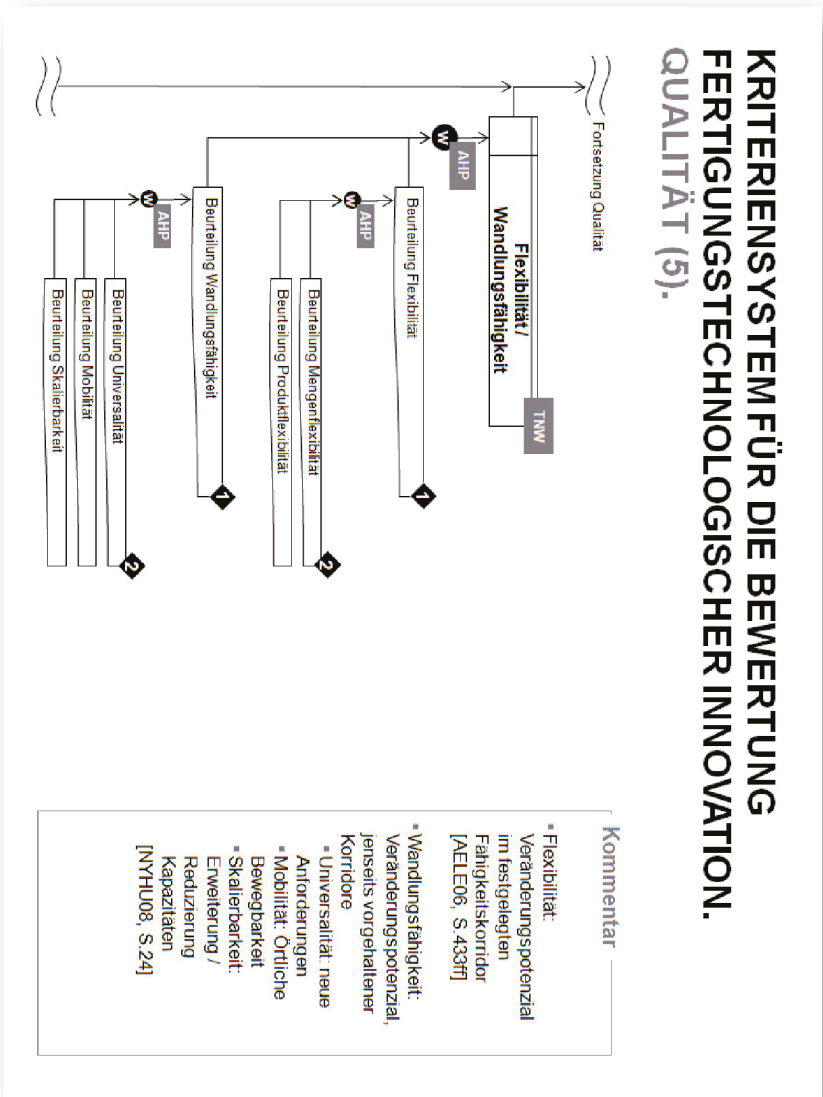


Bild A.1- 9: Kriteriensystem – Qualität (6)
Evaluation Criteria – Quality (6)

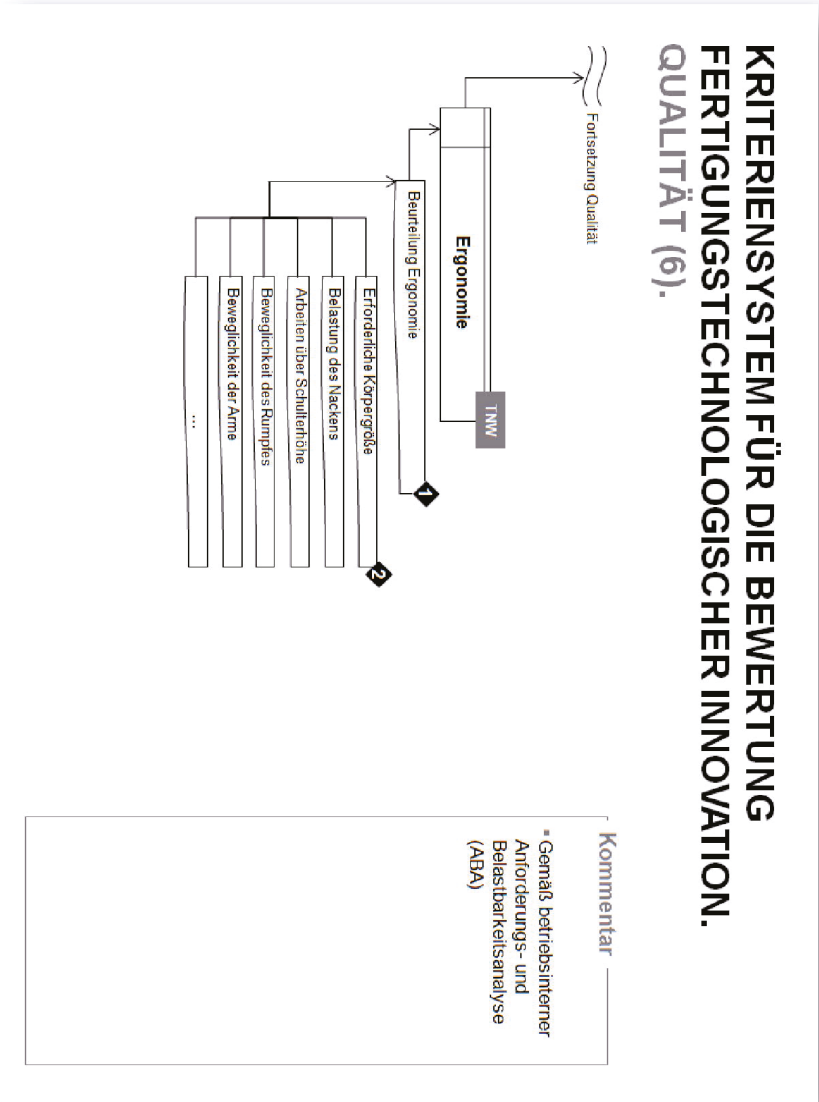


Bild A.1- 10: Kritisensystem – Komplexität (1)
Evaluation Criteria – Complexity (1)

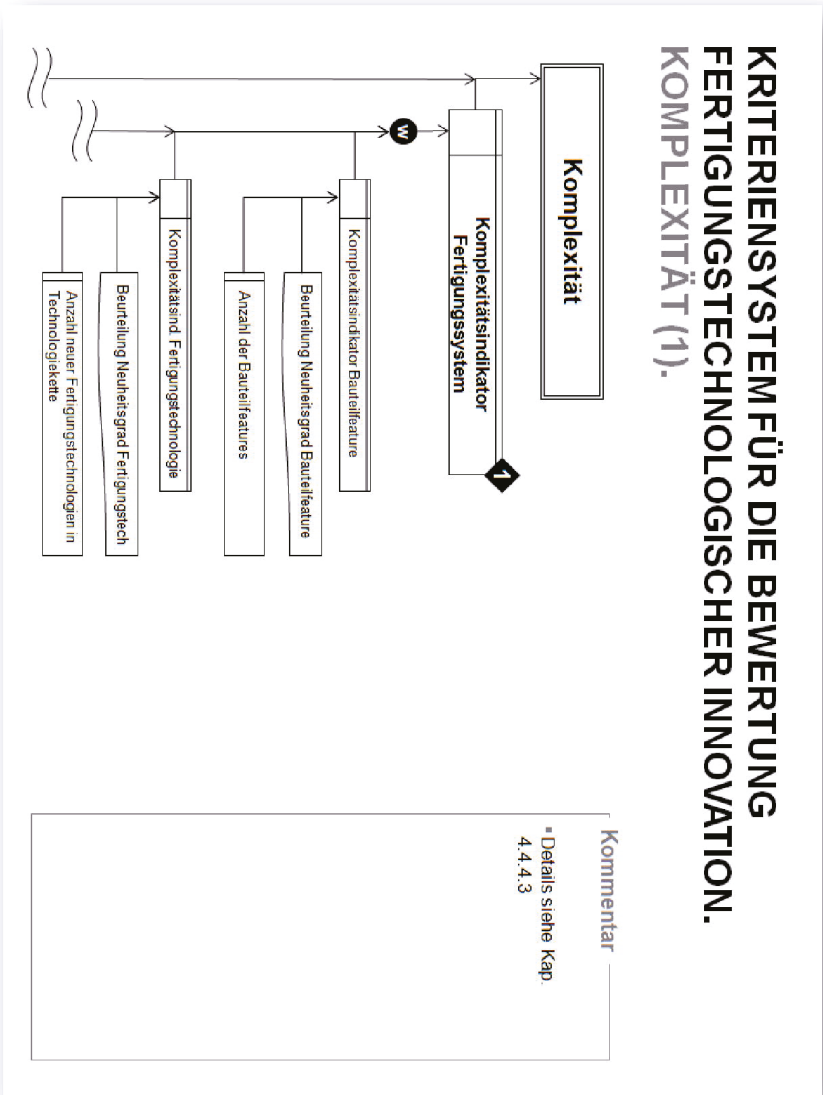


Bild A.1- 11: Kriteriensystem – Komplexität (2)
Evaluation Criteria – Complexity (2)

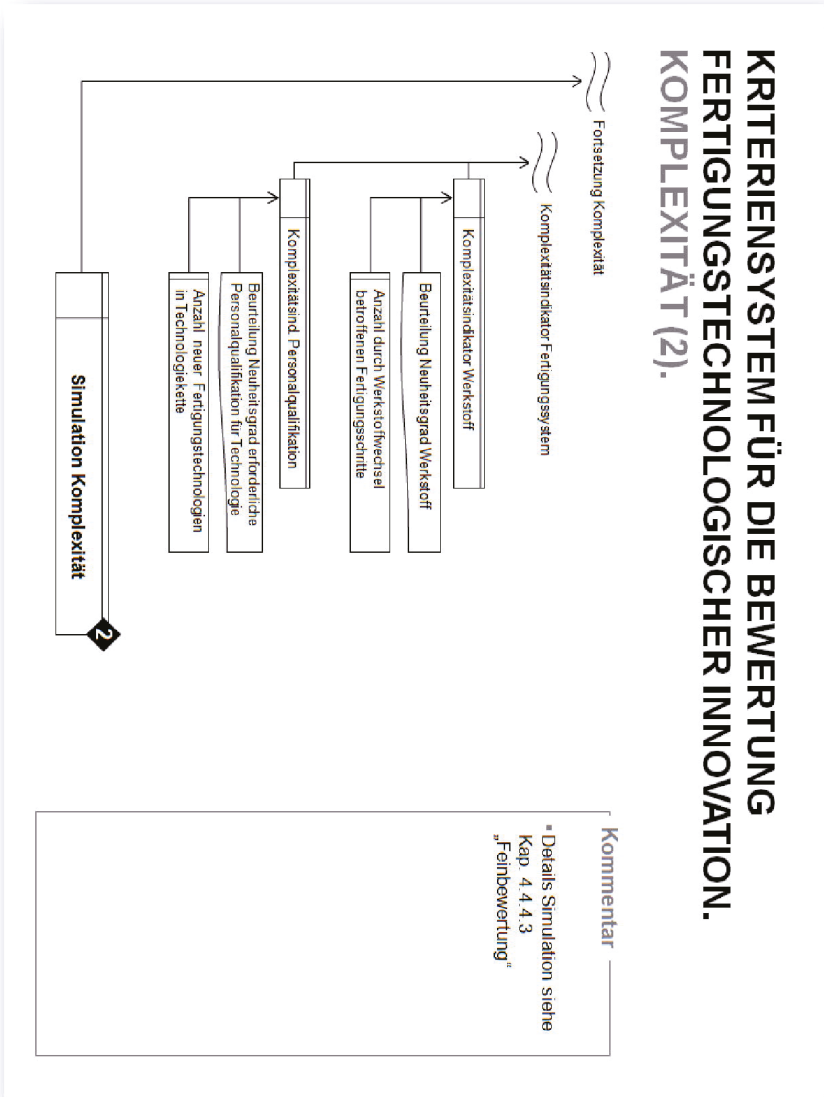
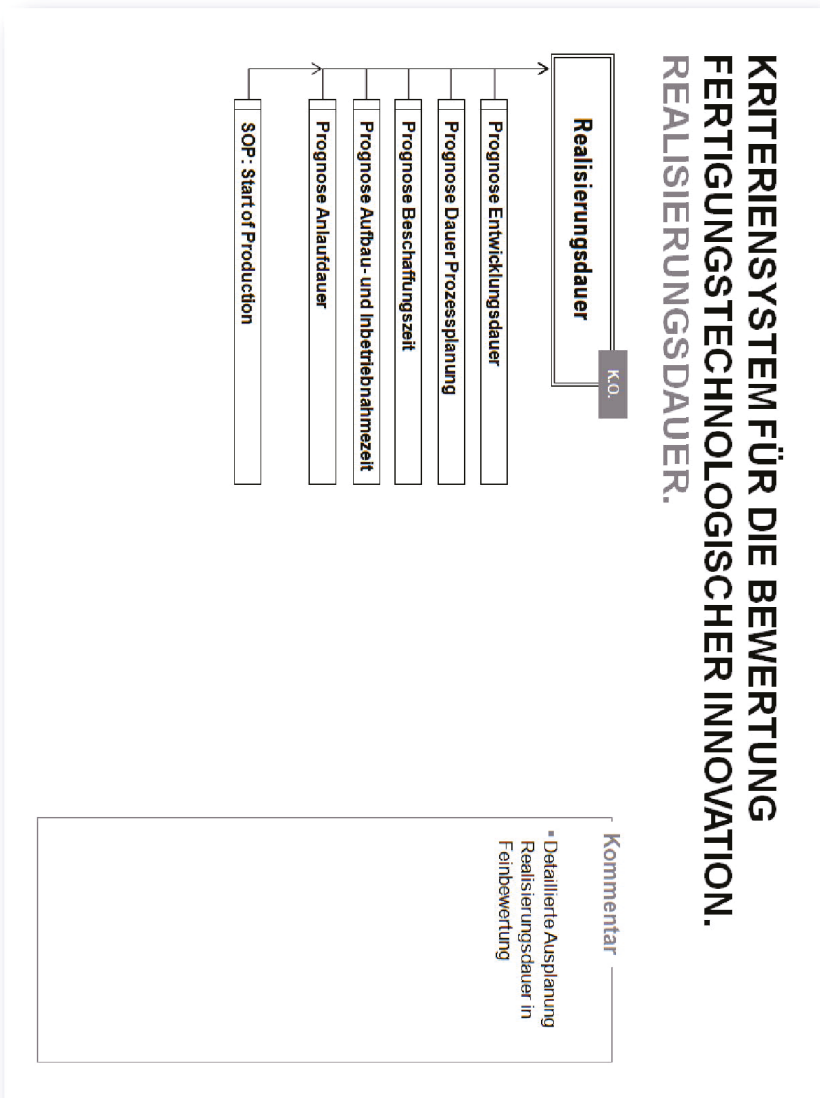


Bild A.1- 12: Kriteriensystem – Realisierungsdauer
Evaluation Criteria – Realisation Time



A 2 Scorecard Innovation

Bild A.2- 1: Scorecard Innovation – Übersicht
Scorecard Innovation –Overview

Scorecard Innovation

Übersicht

Technologie/-kette

Radnetz Achsgetriebe

Allgemeine Prämissen

	Wert	Einheit
Zinssatz	12 %	
Stundenlaufzeit	5000	h/a
Ausbringungs menge/a (Peak)	400	TE/h/a
Produktionszeitraum 2017-2024		

Alternativen	Abkürzung	Dominanztest
Einsatzhärten	EH	✓
Mehrfrequenzinduktionshärten	MIH	✓

Wesentliche technologische Prämissen

	Wert	Einheit
Übersetzungsvarianten	10	
Werkstoffprämissen siehe REZE 05/12		

Wirtschaftlichkeit (in T€)

Gesamtkosten

Alternative	Kapitalwert	Herstellkosten	Gesamt
EH	~35,000	~23,086	58,086
MIH	~33,000	~21,513	54,513

Realisierungsdauer (in Monaten)

Alternative	Dauer (Monate)
EH	36
MIH	50

0 = frühestes Startdatum: 01.01.2013

	Nutzwert	Gewicht	Produktqualität	Prozessqualität	Ökologie	Flexibilität/Wandlungsfähigkeit	Ergonomie
			20%	20%	20%	20%	20%
EH	0,57		✓	✓	✓	✓	✓
MIH	0,32		✗	✓	✓	✓	✓

0 = frühestes Startdatum: 01.01.2013

Legend: ✓ unkritisch, ? kritisch, ✗ sehr kritisch

Komplexitätsindikator Standard A (Grobbewertung)

	KI ₇₅	KI ₆₂	KI ₅₇	KI ₅₄	KI ₅₂	Kommentar
EH	1	✓	✓	✓	✓	
MIH	11	✓	✓	✓	✓	

Ergebnisse Simulation (Feinbewertung)

Merkmal	C ₂	C ₃₁	μ	σ

Datum

Bearbeiter

1

Bild A.2- 2 Scorecard Innovation – Details Wirtschaftlichkeit
Scorecard Innovation – Details Costs

