

Lebenszykluskostenanalyse als strategisches oder operatives Bewertungs- und Planungsinstrument für die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Axel Hartmann
aus Diez an der Lahn

Tag der mündlichen Prüfung: 18. September 2000

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann

Referent: Prof. Dr.-Ing. M. Neitzel

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. H.-D. Haasis

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1996 bis 2000 während meiner Tätigkeit als Projektkoordinator in der Stabstelle "Projektkoordination und Technologietransfer" der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Neitzel, dem Geschäftsführer des Instituts möchte ich an dieser Stelle für die Anregung und die wohlwollende Unterstützung der Arbeit mit Rat und Tat besonders herzlich danken. Ferner gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr. H.-D. Haasis für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, die Diskussionsbereitschaft und die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann danke ich für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut, einerseits für die Unterstützung dieser Arbeit, aber andererseits insbesondere auch für die gute Kooperation im Zusammenhang mit meinen Aufgaben in der Stabsstelle während der letzten vier Jahre. Besonders erwähnen möchte ich meine Mitarbeiterinnen J. Muic, S. Reitmayr und E. Korwan. Ohne deren kreative Mitwirkung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern für die kontinuierliche Unterstützung sowie den Rückhalt während meiner Ausbildung und meinem bisherigen beruflichen Werdegang.

Roxheim, im September 2000

Axel Hartmann

Für Kerstin

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Formelverzeichnis	VI
Abkürzungen	VIII
Kurzfassung	X
Abstract	XI
1 Einführung in die Problemstellung	1
1.1 Der industrielle Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden	1
1.2 Zukunftspotenzial und Restriktionen der FKV	6
1.2.1 Zukunftspotenzial des FKV-Marktes allgemein	6
1.2.2 Zukunftspotenzial im Flugzeugbau	7
1.2.3 Zukunftspotenzial im Fahrzeugbau	8
1.2.4 Zukunftspotenzial im Bauwesen	10
1.2.5 Restriktionen des Wachstums	12
1.3 Problemstellung, Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	17
1.3.1 Problemstellung und Lösungsansätze	17
1.3.2 Zielsetzung und Aufbau	21
2 Stand und Defizite der ökonomischen Bewertung von FKV	23
2.1 Konventionelle Wirtschaftlichkeitsanalyse	23
2.1.1 Begriffliche Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse	23
2.1.2 Anwendung der konventionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse für FKV	24
2.1.3 Defizite der konventionellen FKV-Wirtschaftlichkeitsanalyse	27
2.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse mittels Lebenszykluskostenrechnung	27
2.2.1 Begriffliche Grundlagen der Lebenszykluskostenrechnung	27
2.2.2 Ursprung und Status der Lebenszykluskostenrechnung	28
2.2.3 EDV-gestützte LZK-Modelle	30
2.2.4 Bisherige Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung für FKV	31
2.3 Defizite des derzeitigen Stands der Lebenszykluskostenrechnung im Hinblick auf die Untersuchung	32
3 Basiskonzept der Lebenszykluskostenrechnung für FKV	33
3.1 Strukturierungsansatz des FKV-Lebenszykluskostenkonzepts	33
3.2 Zeitliche Dimensionen des LZK-Konzepts	34

3.3	Inhaltliche Dimensionen des LZK-Konzepts.....	35
3.3.1	Kosten als inhaltliche Gestaltungsvariable des Konzepts	35
3.3.2	Zeit als inhaltliche Gestaltungsvariable des Konzepts	36
3.3.3	Leistung als inhaltliche Gestaltungsvariable des Konzepts.....	38
3.4	Logische Dimension des LZK-Konzepts	38
4	Synthese des LZK-Modells	40
4.1	Meta-Modell des FKV-Lebenszyklus	40
4.2	Modellbaustein FKV-Entstehungszyklus.....	42
4.3	Modellbaustein FKV-Herstellzyklus.....	44
4.3.1	Struktur des FKV-Herstellzyklus	44
4.3.2	Grundschema der Kostenvorkalkulation des FKV-Herstellzyklus	46
4.3.3	Bewertung des produktionsintegrierten Recycling und von Produktionsabfällen	50
4.3.4	Berücksichtigung von Lernkurveneffekten	52
4.3.5	Synthese der Kostenkalkulationsmethode für den Herstellzyklus	54
4.3.6	Umsetzung des Modellbausteins für den FKV-Herstellzyklus	56
4.4	Modellbaustein FKV-Betriebszyklus	60
4.4.1	Grundüberlegungen zur Abbildung des FKV-Betriebszyklus	60
4.4.2	Kostenkalkulationsmethode für den FKV-Betriebszyklus.....	62
4.5	Modellbaustein FKV-Nachsorgezyklus	64
4.5.1	Struktur des FKV-Nachsorgezyklus	64
4.5.2	Abbildung des FKV-Nachsorgezyklus im LZK-Modell.....	66
4.6	Verknüpfung der Modellbausteine	68
5	Verifikation	71
5.1	Fallstudie I: FKV-Anwendung im Automobilbau	71
5.1.1	Anwendungsbeispiele für FKV im Automobilbau.....	71
5.1.2	Analysierte Materialoptionen	72
5.1.3	Analysierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik	74
5.1.4	Annahmen und Inputdaten der LZK	74
5.1.5	Ergebnisse	76
5.1.6	Sensitivitätsanalysen.....	78
5.1.7	Fazit aus den LZK-Analysen.....	80
5.2	Fallstudie II: FKV-Anwendung im Anlagenbau.....	81
5.2.1	Anwendungsbeispiel: Pumpenschieber für die Verfahrenstechnik	81
5.2.2	Analysierte Materialoption	82
5.2.3	Analysierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik	83

5.2.4	Annahmen und Inputdaten der LZK	85
5.2.5	Ergebnisse	86
5.2.6	Sensitivitätsanalyse	87
5.2.7	Fazit aus der LZK-Analyse	88
5.3	Fallstudie III: FKV-Anwendung im Bauwesen	89
5.3.1	Anwendungsbeispiel: FKV-Brückenstruktur	89
5.3.2	Bauweise, Grobbemessung, analysierte Materialoption.....	90
5.3.3	Analysierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik	93
5.3.4	Annahmen und Inputdaten der LZK	94
5.3.5	Ergebnisse	96
5.3.6	Sensitivitätsanalyse	97
5.3.7	Fazit aus der LZK-Analyse	99
5.4	Fallstudie IV: FKV-Anwendung in der Offshore-Industrie.....	100
5.4.1	Anwendungsbeispiel: Flexibler Riser	100
5.4.2	Bauweise, analysierte Materialoption	103
5.4.3	Analysierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik	104
5.4.4	Annahmen und Inputdaten der LZK	105
5.4.5	Ergebnisse	107
5.4.6	Sensitivitätsanalyse	109
5.4.7	Fazit aus der LZK-Analyse	109
5.5	Betrachtungen zur Aussagesicherheit des LZK-Modells	110
5.5.1	Allgemeine Anmerkungen zur Aussagesicherheit.....	110
5.5.2	Abschätzung des Fehlerbereichs	112
6	Fazit – Nutzungspotenzial des LZK-Modells im F&E-Prozess	115
6.1	Operative Anwendungsoptionen des LZK-Modells	115
6.1.1	Alternativenbewertung und -auswahl	115
6.1.2	Identifikation von technischen Optimierungsansätzen.....	116
6.2	Das LZK-Modell als strategisches Planungsinstrument für die FKV	118
6.2.1	Ausgangslage	118
6.2.2	Strategischer Ansatz – Ableitung eines F&E-Portfolios	119
6.3	Verknüpfung von strategischer und operativer F&E-Planungsebene	122
7	Zusammenfassung	123
8	Literaturverzeichnis	125

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
AK_{Ent}	[EUR/Zyklus]	entstehungszykluspezifische Kosten für Anlagen des F&E-Bereichs
A_P	–	Anzahl Personal
b	–	Lernkurvenkoeffizient
BV_{Pkw}	[l/100 km]	Betriebsstoffverbrauch Pkw
BV_{Sys}	[l/h]	Betriebsstoffverbrauch des Systems
d	–	Kalkulationszinssatz der Diskontierung
EV_{Sys}	[kW]	Energieverbrauch des Systems
F_A	[m ²]	Flächenbedarf der Anlage
FK_{Ent}	[EUR/Zyklus]	entstehungszykluspezifische Fremdleistungskosten
i	–	Zinssatz
k_A	[EUR/Stück]	Entsorgungskosten/Recyclingerlöse von Produktionsabfällen
K_{AK}	[EUR/Anlage]	Anschaffungskosten einer Anlage
k_{Bet}	[EUR/Stück]	Betriebskosten des analysierten Bauteils
$K_{Bet, Sys}$	[EUR/System]	Betriebskosten eines technischen Systems
k_E	[EUR/Stück]	Energiekosten
$K_{E+B, Sys}$	[EUR/System]	Energie- bzw. Betriebsstoffkosten eines technischen Systems
k_{EB}	[EUR/Stück]	Kosten für Ersatzbeschaffungen
k_{ES}	[EUR/Stück]	Entsorgungsstückkosten
k_{Ent}	[EUR/Stück]	Entstehungszyklusstückkosten
K_f	[EUR/Periode]	fixe Gesamtkosten des Herstellzyklus
k_f	[EUR/Stück]	fixe Stückkosten des Herstellzyklus
K_{Hst}	[EUR/Periode]	Gesamtkosten des Herstellzyklus
k_{Hst}	[EUR/Stück]	Stückkosten des Herstellzyklus
k_M	[EUR/Stück]	Materialkosten
k_P	[EUR/Stück]	Personalkosten
k_{Pr}	[EUR/Stück]	Stückkosten des Prozesses
k_R	[EUR/Stück]	Reparaturkosten
K_R	[EUR/Periode]	Gebäude-/Raumkosten
k_{Rez}	[EUR/Stück]	Recyclingkosten
k_S	[EUR/Stück]	Sonstige Betriebskosten (Wartung/Instandhaltung etc.)
k_t	[EUR/Periode]	Summe der Kostenbeträge in Periode t
K_v	[EUR/Periode]	variable Gesamtkosten
k_v	[EUR/Stück]	variable Stückkosten
k_W	[EUR/Stück]	Wartungskosten

k_{W+R}	[EUR/Stück]	Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturkosten des Bauteils
$K_{W+R, Sys}$	[EUR/System]	Wartungs-/Instandhaltungs-/Reparaturkosten des Systems
K_Z	[EUR/Periode]	Zinsen
l_n	–	Lernkurvenfaktor
LZK	[EUR/Zyklus]	Lebenszykluskosten
M	–	Stückzahl
m_B	[kg/Stück]	Materialmenge je Bauteil
M_{Ent}	[Stück]	Produktionsmenge des entstehungszyklusbasierten Produkts
m_H	[kg]	Menge benötigtes FKV-Neumaterial
MK_{Ent}	[EUR/Zyklus]	entstehungszykluspezifische Materialkosten
m_{Pkw}	[kg]	Masse Pkw
m_{Sys}	[kg]	Gewicht Gesamtsystem
N	–	Anzahl unterschiedlicher Ressourcen
ND	[a]	Nutzungsdauer
NI_{Sys}	[h]	Nutzungsintensität des System
p	[EUR/Einheit]	Preis pro Ressourceneinheit
p_A	[EUR/kg]	Kosten-/Erlössatz Produktionsabfälle
p_B	[EUR/Liter]	Betriebsstoffkostensatz
p_E	[EUR/kWh]	Energiekostensatz
p_{Ent}	[EUR/kg]	Entsorgungskostensatz
p_f	[EUR/m ² *Periode]	Flächenbedarfskostensatz
PI_{Ing}	[Mannjahre]	Personaleinsatzintensität Ingenieure des Entstehungszyklus
p_{Ing}	[EUR/Mannjahr]	Personalkostensatz Ingenieure u.ä. pro Mannjahr
PI_{Tech}	[Mannjahre]	Personaleinsatzintensität Techniker des Entstehungszyklus
p_M	[EUR/kg]	Materialpreis
p_P	[EUR/h]	Personalkostensatz
p_R	[EUR/Reparatur]	durchschnittlicher Reparaturkostensatz.
p_{Rez}	[EUR/kg]	Rezyklatkostensatz
p_{Tech}	[EUR/Mannjahr]	Personalkostensatz Techniker u.ä. pro Mannjahr
P_{WI}	[EUR/Wartung]	Wartungs-/Instandhaltungskostensatz
q_A	–	Abfallquote des Prozesses
q_{Aus}	–	Ausschussquote
q_P	–	Produktionsabfallquote
q_R	–	Recyclingquote
q_{Rez}	[1/kg]	Recyclinganteil am Altteil
R	–	Konsumierte Ressourceneinheiten
RH	[1/a]	Reparaturhäufigkeit
R_L	–	Lernprozentsatz
T	[a]	Anzahl Perioden im Gesamtanalysezeitraum
t_l	[s]	Basiszykluszeit
t_n	[s]	Zykluszeit des n-ten Zyklus

W_A	[kW]	Energieverbrauch
WI	[1/a]	Wartungs-/Instandhaltungsintensität
z_{eff}	[s]	effektive Zykluszeit
$z_{F\&E,m}$	–	Zuschlagsfaktor materialbezogene F&E-Gemeinkosten
$z_{F\&E,p}$	–	Zuschlagsfaktor personalbezogene F&E-Gemeinkosten

Abkürzungen

Kurzform	Bedeutung
ACCEM	Advanced Composite Cost Estimating Model
ACQ	Herstellkosten
AF	Aramidfaser
ALCCA	Aircraft Life Cycle Cost Analysis
BMC	Bulk Molding Compound
CF	Kohlenstofffaser
CFC	Kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
COSTADE	Composite Optimization Software for Transport Aircraft Design
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DOC	Direkte Betriebskosten
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
E-Modul	Elastizitätsmodul
EP	Epoxi-Harz
F&E	Forschung und Entwicklung
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FLOPS	Flight Optimisation System
FUEL	Brennstoffverbrauch
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GM	General Motors
GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
LCC	Lebenszykluskosten
LFT	Diskontinuierlich langfaserverstärkte Thermoplaste
LZK	Lebenszykluskostenrechnung

MCMC	Manufacturing Cost Model for Composites
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIST	National Institute for Standards and Technology
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PCC	Payload Capacity Cost
PEEK	Polyetheretherketon
PP	Polypropylen
PRICE	Programmed Review of Information for Costing and Evaluation
RQ	Regelquerschnitt
RTM	Resign Transfer Moulding
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SCRIMP	Seemann Composites Resin Infusion Molding Process
SFB	Sonderforschungsbereich
SMC	Sheet Molding Compound
TOGW	Startgewicht
TOPROCO	Total Product Life Cycle Cost Estimation
UD	Unidirektional
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Kurzfassung

Aufgrund des spezifischen Eigenschaftsprofils weisen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) wesentliche komparative technische Vorteile gegenüber den Konkurrenzwerkstoffen in einer Reihe von industriellen Anwendungsfeldern auf. Trotz des daraus resultierenden Marktpotenzials konnten sich die FKV noch nicht in dem erwarteten Maße durchsetzen. Ursache hierfür ist die im Allgemeinen zwischen FKV und traditionellen Materialien bestehende signifikante "Wirtschaftlichkeitslücke".

Um eine Lösung dieses Problems voranzutreiben, wurden neue Ansätze bei der Entwicklung innovativer FKV-Anwendungen erforderlich. Optimierungspotenziale sind möglichst früh im Entwicklungsprozess zu identifizieren und konsequent zu erschließen. Hierzu wird ein geeignetes Analyse- und Planungsinstrument benötigt. Die bisher zur Verfügung stehenden Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis von Herstellkosten erweisen sich als unzureichend, da innovative FKV-Anwendungen, die hohe Herstellkosten bedingen, aber gleichzeitig im Betrieb Kostenvorteile gegenüber herkömmlichen Alternativprodukten aufweisen, benachteiligt werden. Deshalb wurde ein neuartiges, werkstoffgerechtes Instrument der Wirtschaftlichkeitsanalyse für FKV entwickelt, welches sich auf die Methode der Lebenszykluskostenrechnung stützt.

Das neuartige Instrument wurde auf verschiedene Fallstudien aus den Bereichen Verkehrstechnik, Anlagenbau, Bauwesen und Offshore-Industrie angewendet. Dies diente der Modellvalidierung, dem Aufzeigen von Anwendungsoptionen der Methodik bzw. des Modells im Rahmen von konkreten FKV-Entwicklungsaufgaben sowie der Bereitstellung einer Grundlage für die abschließende Ableitung einer wirtschaftlichkeits- und damit zukunftsorientierten Entwicklungsstrategie für FKV.

Abstract

Composites are characterised by typical properties such as high strength, high stiffness, excellent corrosion resistance, low density and feasibility for integration of parts and functions. Though the combination of these characteristics is ideal for many industrial purposes, the volume of the world-wide composite market is relatively small compared to conventional materials. The growth of the composite market is far behind expectations. However, while the potential number of applications for these materials in mass markets (like automotive industry) could be extensive, to date only niche applications have been developed and introduced in these market segments. In general, the primary barrier preventing a wider application of these advanced materials in broader market fields is the high initial (acquisition) cost caused by raw materials and related processing technologies which are relatively costly compared to conventional materials and processes.

Calculations of manufacturing costs for potential composite mass products are indicating insufficient economic characteristics of composite technology for mass markets. But, economic assessment of composites exclusively focused on initial costs can be considered "short-sighted". It neglects the influence of life cycle cost advantages on the overall economic performance of innovative materials and for this reason restricts the development of many promising composite products. To overcome this problem, a consistent method to evaluate the life cycle cost effectiveness of innovative materials is needed.

Because composite materials can show

- on the one hand significant economic advantages of application (higher payloads, better fuel efficiency, less effort for maintenance, longer life cycle) due to their outstanding properties and
- on the other hand higher acquisition costs compared to conventional material technologies

a comprehensive life cycle cost model has been developed, validated and applied to show the main life cycle cost determinants and to uncover the potential and restrictions of these innovative materials to minimise life cycle cost of industrial products.

Life cycle cost is the total cost of a product during its life span. It embraces all costs associated with

- R&D-activities,
- production,
- operation (including maintenance, repair, replacement) and
- post use treatment (recycling, disposal).

Life cycle costing may be defined as an analytical process which considers all cost impacts throughout the product life cycle. A life cycle cost model is a model which reflects the technical life cycle of a product, calculates all costs associated with the life cycle and combines this data taking into account the impact of time.

The new composite materials life cycle cost model has been developed based on these definitions. It consists of four modules.

The four modules are reflecting the four relevant cycles of a composite product's life (R&D cycle, production cycle, operation cycle, post-use cycle). The life cycle costs of composites are determined by a cluster of complex technological and economical processes with a large number of variables. For a comprehensive description of these processes the complexity has to be reduced by definition of basic cost functions. Therefore the composite life cycle system was analysed and the relevant links between the system structure, system variables and the associated costs were extracted. Core of the model is a life cycle cost accounting system, which is based on established business management standards.

The composite life cycle cost model has been applied to several case studies to validate the method, to show different possibilities for usage within composite related R&D projects and to generate a basis for derivation of a general life cycle cost oriented R&D strategy for composites. As case studies actual potential composite applications in transportation, industrial equipment, infrastructure and offshore systems have been evaluated and compared to conventional material options. The results of these case studies combined with sensitivity analysis show potential and restrictions of composites to minimise life cycle cost of industrial products.

The feasibility of the new method to investigate the life cycle cost characteristics of innovative composite applications has been confirmed. The case studies demonstrated, that the composite life cycle cost model represents a multi-functional decision support tool. Two main approaches to use the instrument have been identified:

- Application as an operative assessment and controlling tool to support decision processes within composite related R&D projects
- Application as a strategic planning instrument to set-up a economic efficiency oriented development strategy for composite technology.

1 Einführung in die Problemstellung

1.1 Der industrielle Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sind eine seit nunmehr über 50 Jahren im industriellen Maßstab eingesetzte Werkstoffklasse. Primäre Merkmale von FKV sind die im Vergleich zu klassischen metallischen Werkstoffen hohe Festigkeit und Steifigkeit, verknüpft mit einer geringen Dichte. Überdies kann bei FKV durch gezieltes Ausnutzen anisotroper Eigenschaften eine beanspruchungsgerechte Auslegung von Bauteilen erfolgen, die eine Minimierung der Masse von Strukturen oder Bauteilen ermöglicht [1]. Diese Gegebenheiten begründen das Leichtbaupotenzial der Werkstoffklasse. Ferner erlaubt die Flexibilität der FKV bezüglich der Gestaltung von Materialaufbau und Geometrie einen besonders hohen Integrationsgrad von Funktionen und Komponenten [2]. Die folglich realisierbare Integralbauweise gekoppelt mit dem Leichtbauvermögen begründet das elementare Leistungspotenzial der FKV und damit einen wesentlichen komparativen Vorteil gegenüber den Konkurrenzwerkstoffen in einer Reihe von industriellen Anwendungsfeldern.

Neben diesen übergeordneten Vorzügen von FKV kommt ein breites Spektrum weiterer, durch die Materialkonfiguration maßzuschneidender Eigenschaften von FKV hinzu, wie etwa Korrosions- und Witterungsbeständigkeit, günstiges Ermüdungsverhalten, Abrasionsresistenz, günstiges Feuer- und Rauchverhalten, Transparenz für elektromagnetische Wellen, geringe thermische Ausdehnung, gute Dämpfungseigenschaften sowie eine hohes Energieabsorptionsvermögen [3].

Wegen der spezifischen Werkstoffcharakteristika konnten sich FKV zuerst in Hochtechnologie-sektoren wie zum Beispiel der Raumfahrtindustrie oder der Wehrtechnik etablieren. Auch beim zivilen Flugzeugbau wurden FKV stark zunehmend angewendet, da durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen u.a. eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Nutzlast und Reichweite zu erzielen ist. Die Herstellung von Seitenleitwerken, Verkleidungen von Rumpf oder Tragflächen sowie Klappensystemen aus FKV ist weltweit Stand der Technik beim Bau moderner Passagierflugzeuge. Erste Höhepunkte des Trends in der Luftfahrtindustrie sind der Airbus A320 (Bild 1-1) bzw. Airbus A330/340, die jeweils einen FKV-Anteil am Strukturgewicht von rund 15-20 % aufweisen [4, 5].

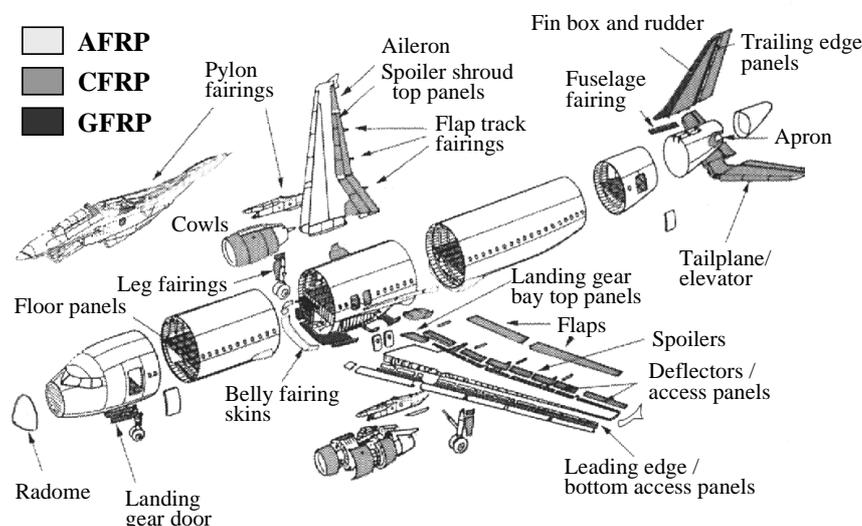


Bild 1-1 Faserverbundstrukturen des Airbus A320 (Quelle: DaimlerChrysler AG)

Aufgrund der Vorzüge des Materials migrierte die FKV-Technologie auch in andere Industriesektoren neben der Luft- und Raumfahrt. Die Eignung der FKV, einen Beitrag zur Lösung der akuten sozio-technologischen Problemstellungen der 70er und 80er Jahre (Veränderung der Lage auf den Energiemärkten, zunehmendes Umweltbewusstsein) zu leisten, war ein wesentlicher Faktor der stetig zunehmenden Anwendung in verschiedensten Industriesektoren [6].

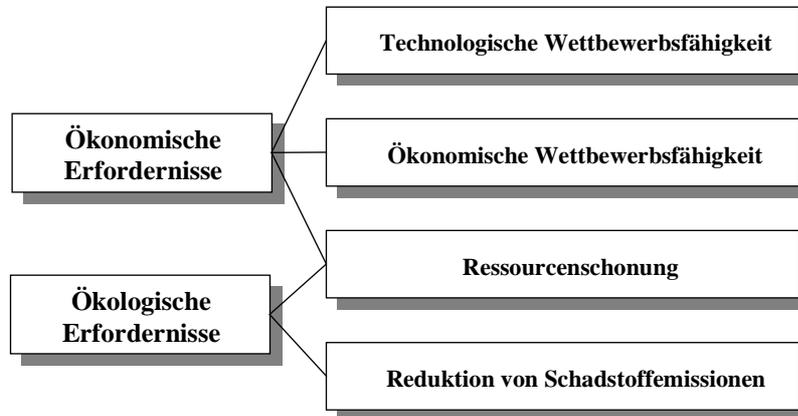


Bild 1-2 Übergeordnete Gründe für den industriellen Einsatz von FKV nach [7]

Als weitere starke Triebkraft des FKV-Einsatzes kommt der verschärfte Wettbewerb auf den Weltmärkten für technologie-intensive Produkte und der damit erzeugte zusätzliche Innovationsdruck hinsichtlich der Verbesserung der technologischen und ökonomischen Produktcharakteristika hinzu. Aus diesem Grund werden bei der Entwicklung innovativer Produkte immer höhere und komplexere Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe gestellt. Dieser Problematik kann in bestimmten Industrien nur durch die Anwendung neuartiger Werkstoffe im Allgemeinen und FKV im Speziellen begegnet werden. In Bild 1-2 sind die übergeordneten ökonomischen und ökologischen Gründe für den ansteigenden industriellen Einsatz von FKV zusammengestellt. Die daraus resultierende aufstrebende Entwicklung des FKV-Weltmarktes seit 1970 ist in Bild 1-3 veranschaulicht.

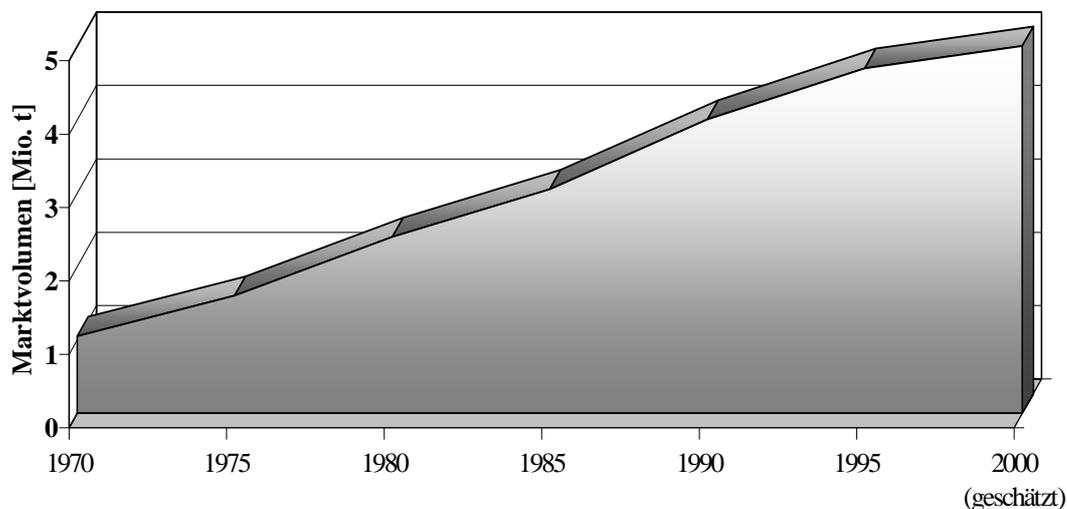


Bild 1-3 Entwicklung des FKV-Weltmarktes seit 1970 [8, 9]

Aufgrund der dargelegten industriellen Erfordernisse einerseits und des Leistungspotenzials der Materialklasse andererseits haben sich im letzten Jahrzehnt die vier Kernanwendungsfelder von FKV

- Verkehrstechnik (Luftfahrt-, Automobilbau- und Schiffbauindustrie),
- Elektro-/Elektronikindustrie,
- Maschinenbau und
- Bauwesen

herausgebildet [3].

Die genannten Kernanwendungsfelder stellen in Europa zusammen über 80 % des FKV-Gesamtmarktes dar (Bild 1-4). Innerhalb des bedeutendsten Anwendungssektors Verkehrstechnik (Marktanteil 33 %) ist der Automobilbau der weitaus größte Teilbereich.

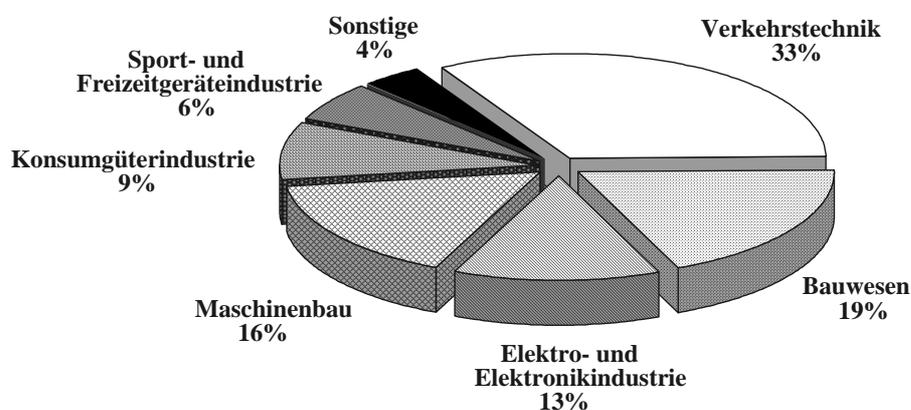


Bild 1-4 Verteilung des europäischen FKV-Marktes nach Anwendungsfeldern 1997 [10]

Derzeit beherrschen Werkstoffe mit duromerer Matrix den FKV-Markt. In Europa betrug 1997 der Anteil duromerer FKV am Gesamtmarkt rund 70 % gegenüber 30 % thermoplastischer FKV [11]. Bei den duromeren FKV stellen die mittels Preßverfahren verarbeitbaren SMC- (Sheet Molding Compound) oder BMC-Preßmassen (Bulk Molding Compound) den Hauptanteil, welche vor allem im Fahrzeugbau und der Elektronikindustrie Anwendung finden. Die Gruppe der thermoplastischen FKV wird von kurzfaserverstärkten Thermoplasten (Spritzguß) dominiert, die zwar prinzipiell auch zu den FKV gezählt werden, aufgrund der Werkstoffeigenschaften jedoch eher mit unverstärkten Kunststoffen zu vergleichen sind. An zweiter Stelle bei den thermoplastischen FKV stehen die GMT- (glasmattenverstärkte Thermoplaste) bzw. LFT-Preßmassen (diskontinuierlich langfaserverstärkte Thermoplaste). Eine Übersicht über die Aufteilung des europäischen FKV-Marktes nach Matrixsystemen gibt Bild 1-5.

Hinsichtlich der eingesetzten Verstärkungssysteme wird der FKV-Markt von den Glasfasern beherrscht. In Europa werden jährlich rund 600.000 t Verstärkungsmaterialien von der FKV-Industrie verbraucht. Diese Gesamteinsatzmenge an Verstärkungsmaterialien besteht zu mehr als 94 % aus Textilglas [9]. Aramid- und Kohlenstofffasern bilden zusammen den restlichen Anteil von rund 5 % [12]. Andere Faserarten (z.B. Borfasern) haben keine Marktrelevanz [1].

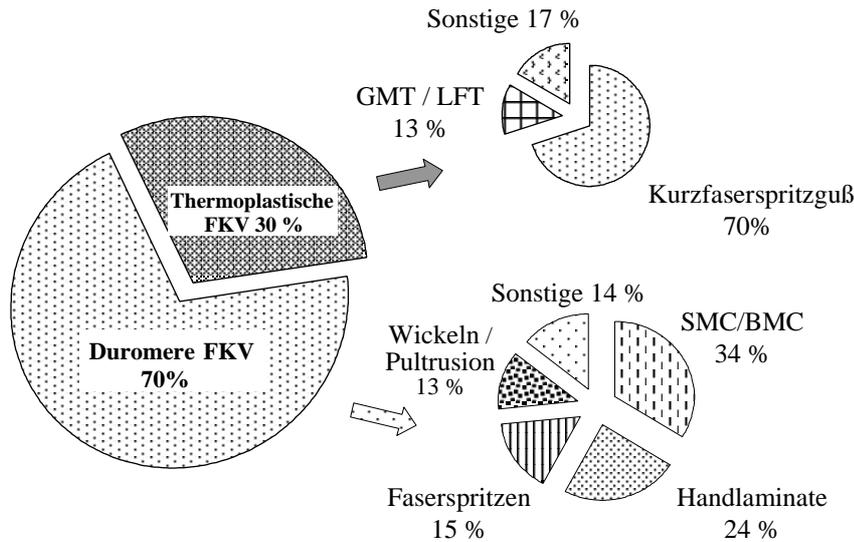


Bild 1-5 Verteilung des europäischen FRP-Marktes 1997 nach Matrixsystemen [11]

Aus der dargelegten Übersicht des derzeitigen FRP-Marktes geht hervor, dass – unter Vernachlässigung der FRP-untypischen kurzfaserverstärkten Kunststoffe – thermoplastische (GMT, LFT), aber vor allem duromere glasfaserverstärkte Preßmassen (SMC, BMC) sowie sonstige glasfaserverstärkte Duromere industriell eingesetzt werden. Diese Materialien sind allerdings bezüglich der Materialkennwerte eher im unteren Bereich des FRP-Spektrums anzusiedeln und weisen nur ein vergleichsweise bescheidenes Leichtbaupotenzial auf. Dies wird auch anhand der Gegenüberstellung spezifischer Festigkeitswerte einiger ausgewählter Vertreter der verschiedenen FRP-Materialtypen deutlich (siehe Bild 1-6).

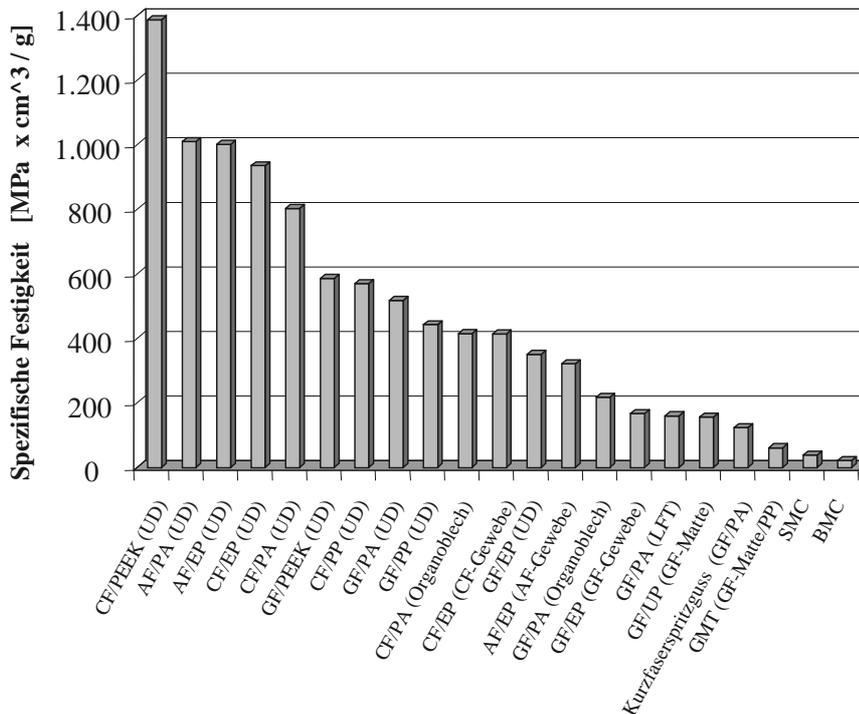


Bild 1-6 Spezifische Festigkeitswerte einiger ausgewählter Vertreter der verschiedenen FRP-Materialtypen [13-16]

Auf Basis der dargelegten Werkstoffeigenschaften lassen sich zwei FKV-Hauptgruppen differenzieren, zwischen denen allerdings ein fließender Übergang besteht [13]:

- Allgemeine oder technische FKV
- Hochleistungs-FKV

Die allgemeinen oder technischen FKV zeichnen sich durch vergleichsweise niedrige bzw. mittlere mechanische, ausreichend thermische und gleichzeitig gute chemische Eigenschaften aus; die Dichte liegt im hohen bzw. mittleren Spektrum der FKV. Typischerweise werden Glasfasern als Verstärkung angewandt. Demgegenüber weisen Hochleistungs-FKV neben guten bis hervorragenden thermischen und chemischen Eigenschaften höchste mechanische Eigenschaften auf. Bei Hochleistungs-FKV sind Kohlenstofffasern die verbreitetsten Verstärkungssysteme. Hochfeste Glasfaser- bzw. Aramidfaserverbundkunststoffe sind im Grenzbereich zwischen den beiden FKV-Hauptgruppen anzusiedeln.

Neben den technischen Eigenschaften sind die beiden Gruppen auch hinsichtlich ökonomischer Charakteristika gegeneinander abzugrenzen. Die Materialkosten technischer FKV sind durchschnittlich um eine Größenordnung kleiner als die der Hochleistungs-FKV (siehe Bild 1-7). Deshalb werden derzeit die technischen FKV vorwiegend in vergleichsweise kostensensitiven Massenanswendungsgebieten (Fahrzeugbau, Bauwesen, Elektro- /Elektronikindustrie etc.) eingesetzt, während die Anwendung von Hochleistungs-FKV weitgehend auf weniger kosten- aber dafür leistungs- und qualitätssensitive Bereiche mit geringerem Volumen (z.B. Flugzeugbau, Sportgeräteindustrie) beschränkt ist (siehe Bild 1-8).

Der derzeitige FKV-Markt unterteilt sich in zwei Hauptsegmente mit fundamental unterschiedlichen Marktconstellationen:

- Massenmarktsegment (z.B. Fahrzeugbau; hohes Marktvolumen/niedriges Preisniveau)
- Spezialitätenmarktsegment (z.B. Flugzeugbau; niedriges Marktvolumen/hohes Preisniveau)

Anwendungssektoren wie der Maschinenbau, das Bauwesen oder die Sportgeräteindustrie liegen im Schnittpunkt dieser beiden Extreme.

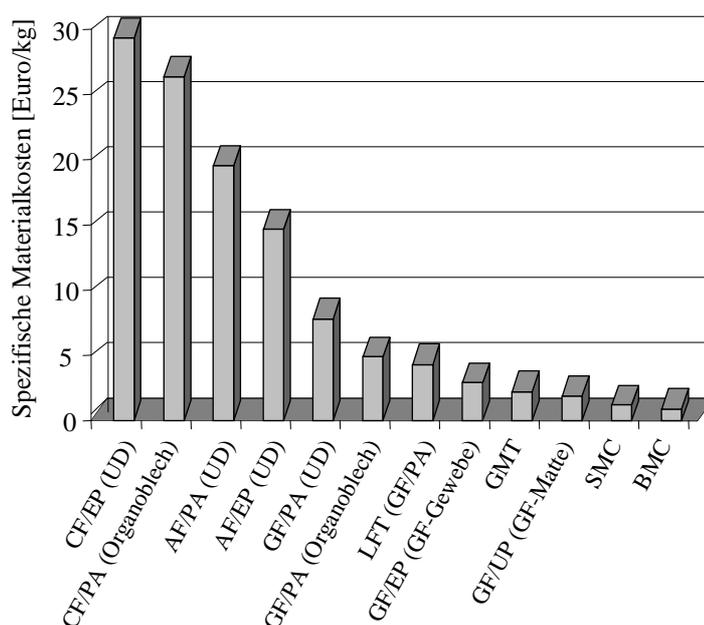


Bild 1-7 Spezifische Materialkosten einiger ausgewählter FKV-Materialtypen (Stand 9/98)

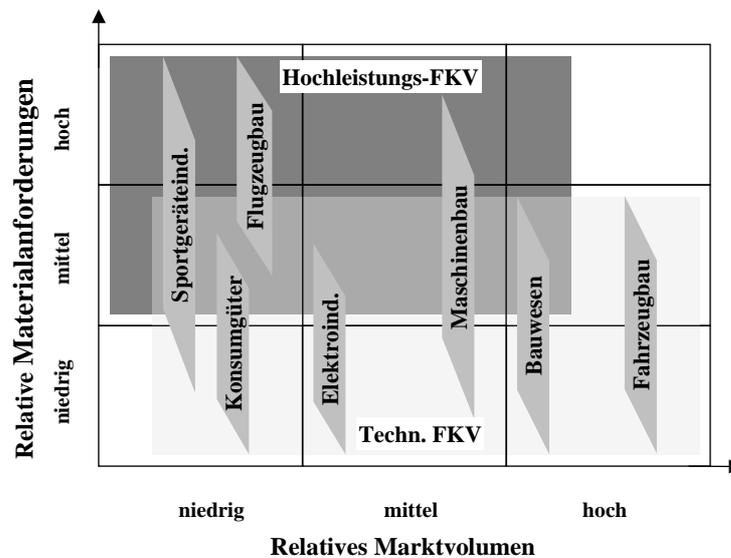


Bild 1-8 Gegenwärtige Segmentierung des FKV-Marktes (schematisch)

1.2 Zukunftspotenzial und Restriktionen der FKV

1.2.1 Zukunftspotenzial des FKV-Marktes allgemein

Unter Vernachlässigung kurzfristiger konjunkturell bedingter Schwankungen wird allgemein mit einem Wachstum des FKV-Marktes von jährlich 5-10 % gerechnet [9, 11, 17]. Das Wachstum soll schwerpunktmäßig von den Marktfeldern Flugzeugbau, Fahrzeugbau, Elektroindustrie und Bauwesen ausgehen. Die aktuellen Gegebenheiten des europäischen Marktes hinsichtlich Volumina und Wachstumsraten der einzelnen Marktsegmente lassen die beschriebenen Trends bereits heute erkennen (Bild 1-9).

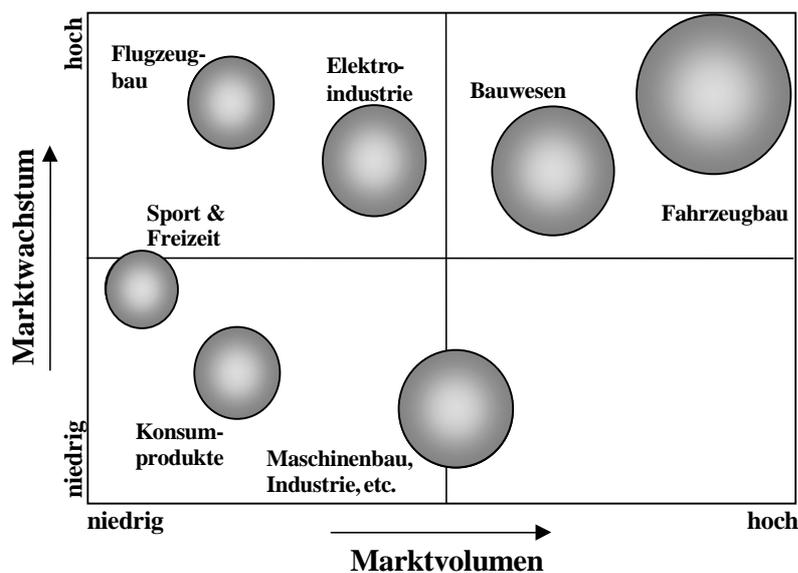


Bild 1-9 Volumina und Wachstumsraten der Segmente des europäischen FKV-Marktes im Jahr 1997 [18]

In den vier Marktsegmenten Flugzeugbau, Fahrzeugbau, Elektroindustrie und Bauwesen fallen eine bereits bestehende breitere Anwendungsbasis sowie ein größeres, längerfristiges Wachstumspotenzial zusammen. Es bestehen hier eine ganze Reihe noch unerschlossener, aber erfolgversprechender Anwendungsoptionen mit hohem potentiellen Marktvolumen. Einige der aus heutiger Sicht herausragenden Ansätze und Zukunftsprojekte sind nachfolgend beispielhaft zusammengestellt.

1.2.2 Zukunftspotenzial im Flugzeugbau

Hauptargument hinsichtlich der Ausweitung des FKV-Einsatzes im zivilen Flugzeugbau ist die zu erzielende Reduktion der Betriebskosten bzw. die Erhöhung der Leistungsfähigkeit (Nutzlast, Reichweite) durch Reduktion des Strukturgewichts. Allein das aus FKV gefertigte Seitenleitwerk eines Mittelstreckenflugzeugs setzt gegenüber einer herkömmlichen Aluminium-Variante das Strukturgewicht um rund 250 kg herab und spart damit über die Gesamteinsatzdauer des Flugzeugs ca. 200 t Kerosin ein [19]. Gesamthaft betrachtet reduziert nach Angaben der Luftfahrtindustrie ein FKV-Seitenleitwerk die Betriebskosten eines Mittelstreckenflugzeugs über die Gesamtlebensdauer um ca. 1 Mio. US-\$ [20]. Dieser, in Relation zu den Gesamtbetriebskosten gesehen geringe Kostenvorteil ($< 0,5\%$) leistet eigentlich nur einen kleinen Beitrag zur Steigerung der Gesamtwirtschaftlichkeit. Aufgrund des starken Wettbewerbs auf dem Weltmarkt für Verkehrsflugzeuge ist die Luftfahrtindustrie bestrebt, möglichst viele dieser Einzelpotenziale zu erschließen, um in Summe Produkte mit signifikanten Wirtschaftlichkeitsvorteilen gegenüber der Konkurrenz anbieten zu können.

Durch Anwendung von FKV in der Rumpfstruktur ist noch ein weitaus größeres Gewichtsreduktionspotenzial zu erschließen. Es lassen sich gegenüber der Metallbauweise 5 - 8 t am Strukturgewicht und damit über den Lebenszyklus des Flugzeugs bis zu 10.000 t Kerosin einsparen. Bei der europäischen Luftfahrtindustrie wird aus den genannten Gründen geplant, den Rumpf und die Außenflügel kommender Flugzeuggenerationen (z.B. A3XX, siehe Bild 1-10) weitgehend aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) zu fertigen [4, 21]. In den USA sind ähnliche Tendenzen bei geplanten Flugzeugentwicklungen festzustellen [22-24].



Bild 1-10 Geplanter Airbus A3XX (Quelle: DaimlerChrysler AG)

Auch der derzeit in der technischen Umsetzung befindliche "adaptive Flügel", ein innovativer Ansatz zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs von Verkehrsflugzeugen, könnte sich positiv auf den Markt auswirken, da aufgrund des Anforderungsprofils FKV als Werkstoff benötigt werden [25]. In Bild 1-11 sind das verfolgte Konzept des adaptiven Flügels und die damit angestrebten Zielsetzungen aufgezeigt. Neben der Entwicklung großer Flugzeugteilstrukturen gibt es aber auch konkrete Pläne hinsichtlich weitergehender FKV-Anwendung bei kleineren Substrukturen (Türen, Klappen, Abdeckungen, Triebwerkskomponenten etc.) [26-28].

Mittel- bis langfristig wird bei Passagierflugzeugen von einem FKV-Anteil am Strukturgewicht von 30 - 60 Gew.-% ausgegangen [6, 29]. Insgesamt werden nach Prognosen der Luftfahrtindustrie in der nächsten Dekade weltweit rund 9.000 neue Passagierflugzeuge mit einem Wert von zusammen rund 600 Mrd. US-\$ benötigt [30]. Das damit verbundene stattliche Anwendungspotenzial für die FKV läßt sich anhand dieser Zahlen erahnen.

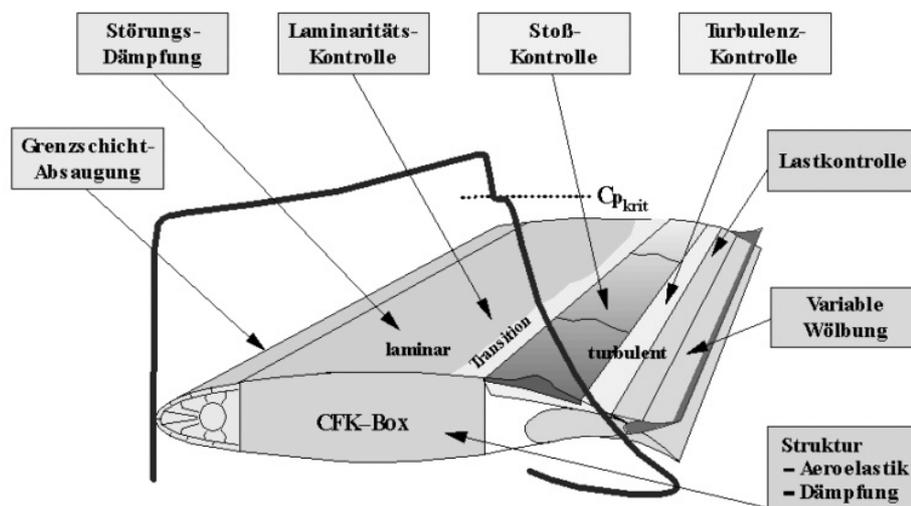


Bild 1-11 "Adaptiver Flügel" – Konzept und Zielsetzungen (Quelle: DLR)

1.2.3 Zukunftspotenzial im Fahrzeugbau

Eine ähnliche Situation wie in der Luftfahrtindustrie hinsichtlich künftiger FKV-Anwendungen ist auch beim Fahrzeugbau zu finden. Seitens der Automobilindustrie wird geschätzt, dass in naher Zukunft durchschnittlich 20 % (derzeit ca. 10 %) des Gesamtgewichts eines Mittelklassen-Pkw aus Kunststoffen bestehen werden und ein signifikanter Anteil davon faserverstärkt sein wird [31-33]. Als wesentlicher Grund für die Intensivierung des Einsatzes von Leichtbaumaterialien – und damit auch von FKV – wird der starke politische und marktseitige Druck auf die Automobilindustrie genannt, wirtschaftlichere und umweltfreundlichere Fahrzeuge für die weltweiten Zukunftsmärkte des 21. Jahrhunderts bereitzustellen. Das vieldiskutierte "3-Liter-Auto" ist dabei nur als Beginn einer längerfristigen Entwicklung anzusehen [25].

Durch die Reduktion des Fahrzeuggewichts kann ein wesentlicher Beitrag zur Absenkung des Kraftstoffkonsums und der Emissionen erzielt werden. Nach optimistischen Berechnungen der Industrie läßt sich bei heutigem Fahrverhalten und Antriebstechnik durch eine 50 %-ige Reduktion des Fahrzeuggesamtgewichts der Kraftstoffverbrauch um bis zu 30 % reduzieren [34].

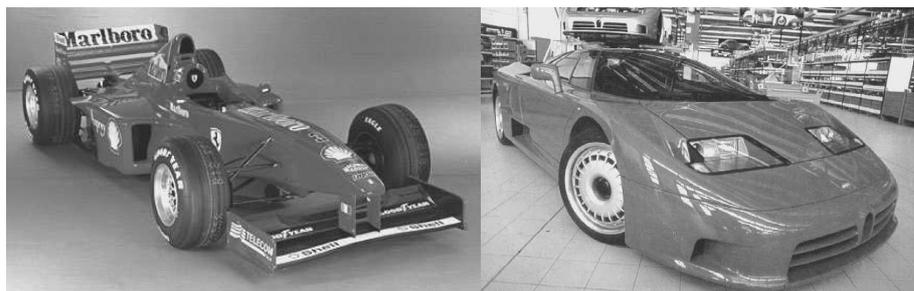


Bild 1-12 Anwendungsbeispiele für Sportfahrzeuge mit Karosserien aus faserverstärkten Kunststoffen (Quellen: Ferrari, Bugatti)

Einen wesentlichen Teilbeitrag hierzu verspricht beispielsweise der Einsatz von FKV-Karosserien, die gegenüber gängigen Stahlbauweisen bis zu 65 % leichter sein können; selbst mit fortschrittlichen Aluminiumkonstruktionen sind nach Prognoserechnungen nur max. 55 % zu erreichen [35]. Die dabei realisierbare Monocoque-Bauweise für die Karosserie kann gegenüber Stahlbauweisen die Anzahl an Teilen um bis zu 70 % reduzieren. Ausführungen extrem leichter aber auch anforderungsgerechter Bauweisen mit faserverstärkten Kunststoffen (insbesondere CFK) sind aus dem Luxusfahrzeugsektor bzw. dem Motorsport bekannt (Bild 1-12). Die Umsetzung dieser Technologie auch für neue Generationen von leichteren, umweltfreundlicheren Serienfahrzeugen birgt ein riesiges Marktpotenzial für die FKV.

Ein weiteres wichtiges Argument für die positive Einschätzung der Perspektive des FKV-Einsatzes im Automobil ist das Potenzial, die durch gestiegene Sicherheits- und Komfortansprüche angetriebene und sich über die letzten Jahre in steigenden Fahrzeugleergewichten niederschlagende "Gewichtsspirale" anzuhalten und umzukehren (Bild 1-13) [36, 37]. Gegenüber den konkurrierenden Leichtbauwerkstoffen (Aluminium, Magnesium, hochfeste Stähle) weisen die FKV entweder eine bessere Verarbeitbarkeit und/oder bessere Korrosionseigenschaften auf [38].

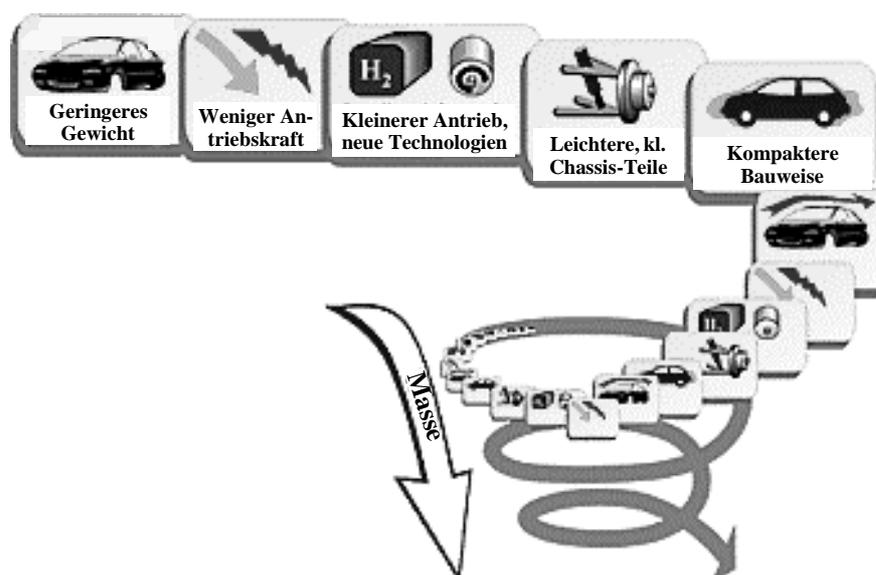


Bild 1-13 Umkehrung der Gewichtsspirale im Fahrzeugbau durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen [37]



Bild 1-14 "Ultralite"-Konzeptfahrzeug von General Motors mit FKV-Karosserie (Quelle: GM)

Ein besonders interessanter Aspekt der Zukunft von FKV im Automobilbau leitet sich aus den Aktivitäten der Automobilindustrie bezüglich der Entwicklung besonders umweltfreundlicher kleinerer bzw. kleinster Fahrzeuge (Beispiel siehe Bild 1-14) mit herkömmlichen aber insbesondere auch mit alternativen Antriebstechnologien ab. Es ist abzusehen, dass in den nächsten 10 Jahren in diesem zunehmend an Bedeutung gewinnenden Marktsegment es zu einer starken Diversifizierung hinsichtlich Fahrzeugkonzepten bzw. eingesetzter Technologien kommen und somit die Produktion einzelner Modelle in vergleichsweise geringen Stückzahlen (ca. 10.000 bis 50.000 pro Jahr) erfolgen wird [37]. In einem derart strukturierten Marktsegment werden die FKV – wie später noch näher erläutert – die spezifischen Vorteile zur vollen Geltung bringen und somit größere Marktanteile gewinnen können.

1.2.4 Zukunftspotenzial im Bauwesen

Im Bauwesen ist die Argumentation bezüglich des Einsatzpotenzials der FKV etwas anders akzentuiert als in der Verkehrstechnik. Eine wichtige Rolle spielen FKV als Materialien zur Reparatur und zum nachträglichen Armieren von Beton- oder Stahlbauten [39-42]. Dabei sind nicht nur Anwendungen in Erdbebengebieten interessant, sondern auch die Rehabilitation von Strukturen, die durch andere Umwelteinflüsse wie etwa Korrosion beschädigt wurden. Bild 1-15 zeigt eine mit CFK nachträglich armierte Brücke aus den USA. Es wurde abgeschätzt, dass eine Rehabilitation der Brücke mit FKV lediglich 10 % der ansonsten fälligen Grundsanierungskosten verursachen würde [43].

Aber nicht nur mit der Reparatur bzw. dem nachträglichen Armieren von Brücken oder vergleichbaren Strukturen ist ein zukunftsträchtiges FKV-Anwendungsgebiet gegeben. Auch die Herstellung neuer Brücken oder ähnlicher Bauwerksstrukturen aus FKV verspricht ein großes Einsatzpotenzial [44]. Beispielsweise können durch den kompletten oder teilweisen Aufbau von Brücken aus leichten, vorgefertigten FKV-Teilen (siehe Bild 1-16) die in der Regel bedeutenden Kostenpositionen im Vorfeld (z.B. Transportkosten) und während des Brückenbaus (Personalbedarf, Einsatz schweren Geräts) drastisch gesenkt werden [45]. Auch Folgekosten wie etwa die Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturkosten lassen sich durch den Einsatz von FKV gegenüber traditionellen Bauwerkstoffen wie Spannbeton oder Stahl herabsetzen.

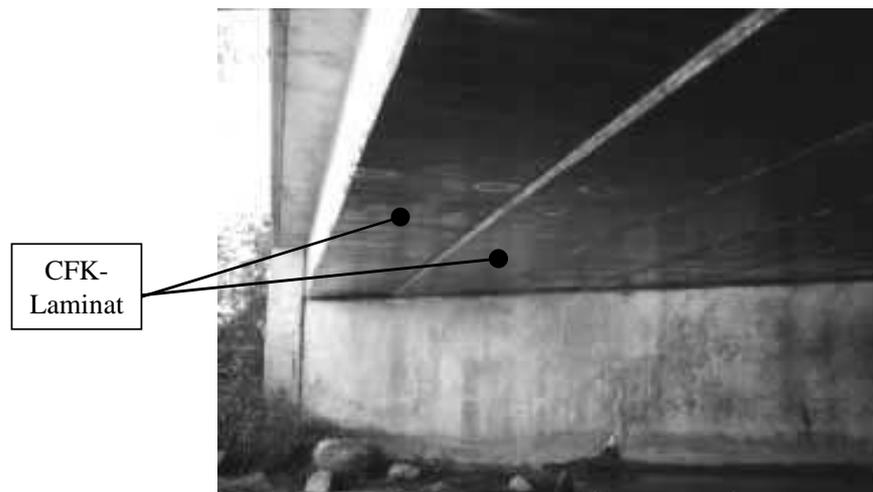


Bild 1-15 Nachträglich mit CFK armierte Brücke (Quelle: University of Delaware)

Nach einer Abschätzung der Federal Highway Administration müßten alleine in den USA mindestens 50 Mrd. \$ zur Behebung aller durch Umwelteinflüsse entstandenen Schäden an Brücken in den nächsten Jahren aufgewendet werden [46]; 42 % der rund 600.000 Brücken in den USA sind betroffen. Infolge dieses Bedarfs und der Möglichkeit, durch FKV-Anwendung einen wesentlichen Teil dieser Kosten einzusparen, hat sich bereits ein großes FKV-Marktsegment mit hohen Zuwachsraten in den USA etabliert.

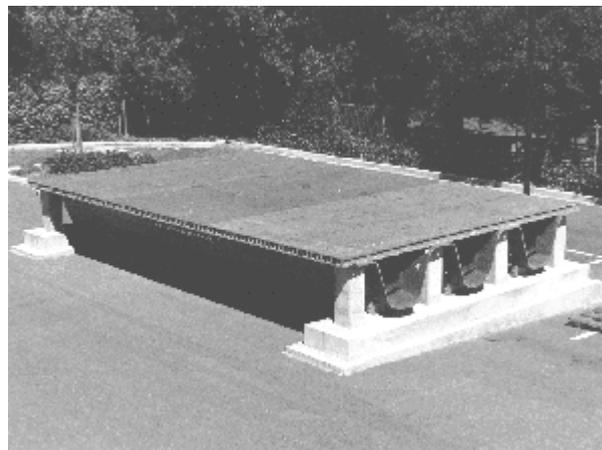


Bild 1-16 Prototyp einer FKV-Brücke in Modulbauweise (Quelle: Lockheed Martin)

Der Trend wird sich auch in Europa durchsetzen, da die Probleme hinsichtlich strukturell defizitärer Beton- und Stahlbauten infolge von qualitativ schlechter Bausubstanz aus den 60er und 70er Jahren, fortschreitender Korrosion sowie deutlich erhöhtem Verkehrsaufkommen im nächsten Jahrzehnt immer evidenter [47-50] und die leeren Kassen der öffentlichen Hand die Auswahl wirtschaftlichster Wege der Wiederherstellung bzw. des Neubaus der Infrastruktur stark fördern werden.

1.2.5 Restriktionen des Wachstums

Eine umfassende Zusammenstellung und Erläuterung aller aus heutiger Sicht erfolgversprechender Anwendungsmöglichkeiten für FKV würde den Rahmen der Arbeit bei weitem sprengen. Aber schon die dargelegten Beispiele geben einen Eindruck von dem hohen Potenzial des Werkstoffs für die Zukunft.

Der breite Durchbruch der FKV in Großserienanwendungen wird allerdings schon seit langem vorausgesagt, ohne dass entscheidende Fortschritte am Markt zu verzeichnen waren. Vielmehr war eher eine relativ langsame Durchdringung der Märkte über einzelne Nischenanwendungen zu beobachten.

Insbesondere in den 80er und 90er Jahren wurden sehr günstige Perspektiven hinsichtlich Massenanzwendung von FKV prognostiziert [51-54]. Auf Basis dieser Einschätzung hatten eine Reihe bedeutender Unternehmen große Summen in die Entwicklung und den Aufbau von Produktionsanlagen für FKV investiert. Beispielsweise setzte nach belastbaren Abschätzungen alleine DuPont rund 1 Mrd. US-\$ für die Entwicklungen im Zusammenhang mit Aramid-Fasern (Kevlar) ein [55]. In einem Bericht eines Expertengremiums der US-Regierung wird dieses Engagement folgendermaßen kommentiert: *"If DuPont had simply put all of the money it invested in Kevlar in the bank it would be earning more in interest, from doing nothing, than it earns in profits from Kevlar production"* [56]. Dieses, in betriebswirtschaftlicher Hinsicht vernichtende Urteil beschreibt die Situation vieler Versuche in den Markt der FKV einzusteigen.

Praktisch alle weltweit bedeutenden Unternehmen der Chemischen Industrie betätigten sich zwischen 1980 und 1990 auf dem Feld der FKV. Es wurde unter erheblichem Kapitaleinsatz Know-how gekauft, eine Vielzahl neuer Matrix- und Verstärkungssysteme oder Halbzeuge entwickelt und Produktionskapazitäten aufgebaut.

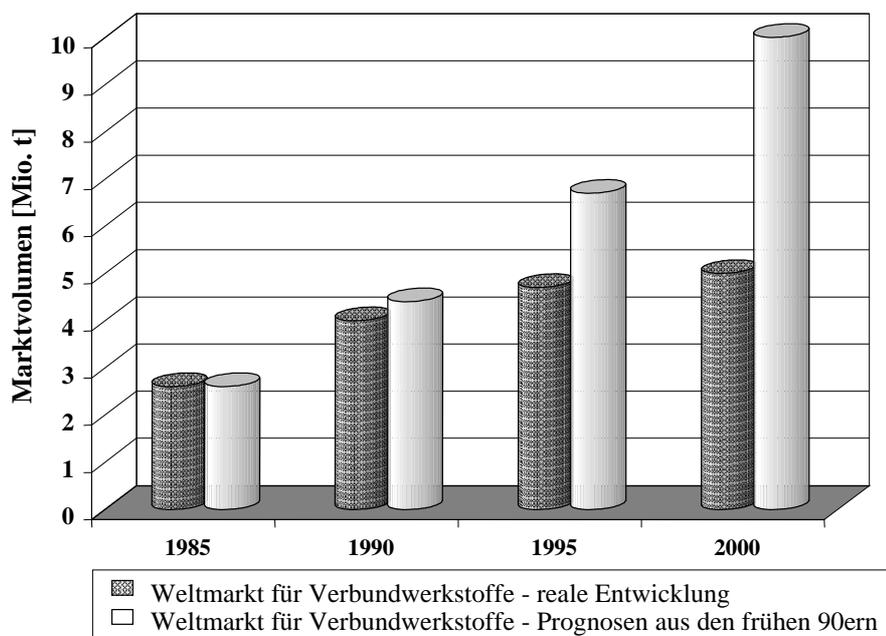


Bild 1-17 Schere zwischen Marktprognosen und realer Entwicklung des FKV-Marktes seit 1985 (reales Marktvolumen für 2000 auf Basis 1998 abgeschätzt)

Die Penetration der FKV in der zivilen Luftfahrtindustrie war jedoch – unter anderem bedingt durch ein niedriges Preisniveau bei Flugkraftstoffen – weitaus schwächer als vorhergesagt und die angestammten Märkte im militärischen Anwendungsbereich brachen infolge des Endes des "Kalten Krieges" zusammen [57]. Ferner gab es in diesem Zeitraum nur vereinzelt impulsgebende Anwendungen im Industriebereich bzw. im Automobilssektor. Lediglich bei Sport- und Freizeitgeräten wuchs ein neuer Markt heran, der allerdings bei weitem nicht die aufgebauten Kapazitäten auslasten konnte.

Daher sind viele der entwickelten FKV-Produkte oder Marken wieder vom Markt verschwunden und die Anbieter hatten die entsprechenden Aktivitäten entweder eingestellt, drastisch heruntergefahren oder das Know-how an kleinere, auf Nischenmärkte spezialisierte Firmen verkauft [57]. Bild 1-17 zeigt die resultierende Schere zwischen den Marktprognosen (Basis 1985) und realer Entwicklung bis heute deutlich auf. Das leichte reale Wachstum des Marktes war im betrachteten Zeitraum im wesentlichen durch die technischen FKV bedingt; das prognostizierte Wachstum insbesondere bei den Hochleistungs-FKV blieb hingegen weitgehend aus.

Wesentliche Ursachen für die weit hinter den Prognosen liegende Marktentwicklung sind in Bild 1-18 zusammengestellt. Als ein Hauptgrund für den vergleichsweise geringen Einsatz der FKV, ungeachtet des Anwendungspotenzials in den verschiedenen potentiellen Anwendungsfeldern, ist die unzureichende Wirtschaftlichkeit als direkte oder indirekte Konsequenz aus den ökonomischen und technologischen Restriktionen der derzeitigen FKV-Technologie sowie den sozio-technologischen Rahmenbedingungen zu nennen.

Neben den anderen dargelegten bedeutsamen Hemmnissen resultiert die ungenügende Wirtschaftlichkeit insbesondere aus den, verglichen mit traditionellen Werkstoffen, hohen Material- und Verarbeitungskosten [3, 6, 16, 25, 57-60].

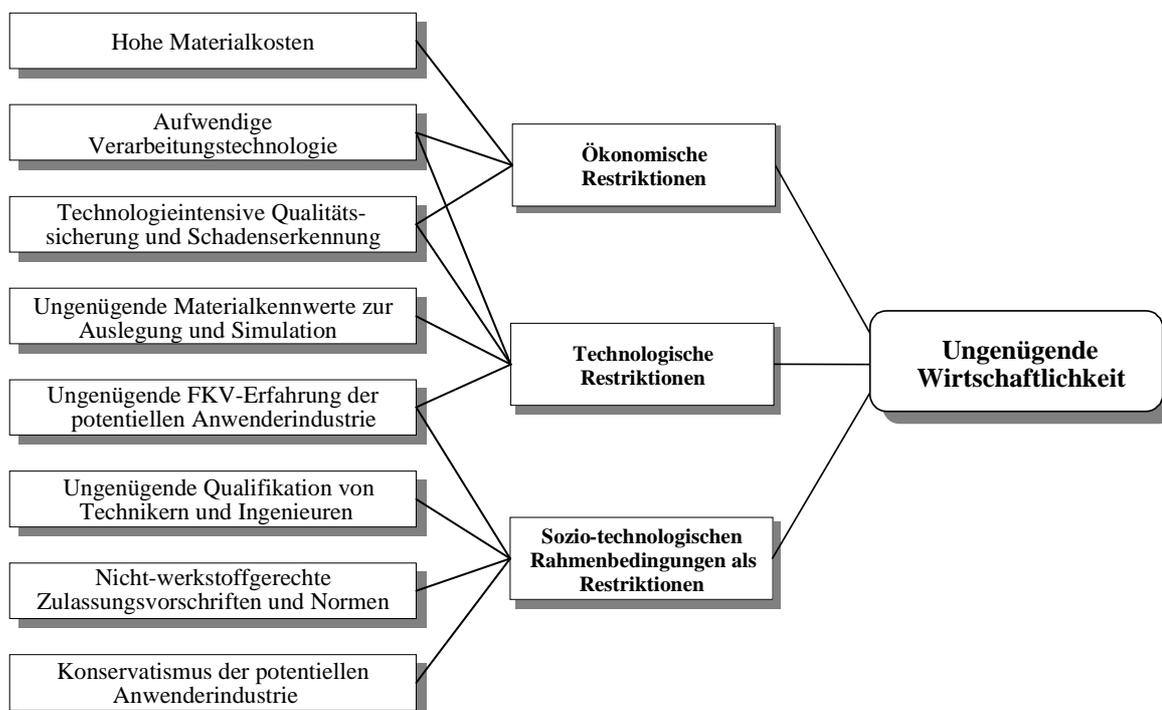


Bild 1-18 Hemmnisse der Entwicklung des FKV-Marktes

Deshalb konnten sich FKV bisher nur in denjenigen Anwendungsnischen etablieren, in denen die Kosten gegenüber bestimmten, durch FKV-typische Materialeigenschaften determinierten, funktionellen Vorteilen keine Rolle spielen. In Anwendungsbereichen mit größerem potentiellen Marktvolumen liegt jedoch in der Regel eine direkte Substitutionskonkurrenz zu traditionellen Materialien vor. Die ökonomischen Kenngrößen werden in diesen Fällen zu einem entscheidenden Kriterium bei der Materialauswahl.

Bild 1-19 verdeutlicht den beschriebenen Substitutionszusammenhang. Die Kosten/Leistungsprofile einer traditionellen (z.B. Metalle) und einer fortschrittlichen Materialtechnologie (z.B. FKV) sind idealtypisch als S-Kurven dargestellt. Hinter dem S-Kurven-Konzept verbirgt sich die Annahme, dass im unteren Leistungsspektrum einer Technologie die aufzuwendenden Kosten mit steigender Leistung allmählich, leicht progressiv wachsen. Im oberen Leistungsbereich hingegen steigt die Kurve degressiv und nähert sich der Leistungsgrenze der Technologie an. In Vereinfachung entspricht dies empirischen Analysen der am Markt zu beobachtenden Relation zwischen mechanischem Eigenschaftsprofil und Materialkosten bei verschiedenen Materialien. Unter "technischer Leistung L" ist die Gesamtheit aller technischen Eigenschaften und unter "Kosten K" die Summe aus Material- und Verarbeitungskosten zu verstehen.

In der Regel sind bei kommerziellen Anwendungen (im Gegensatz zu Anwendungen in der Wehrtechnik) die Kosten bei anwendungsseitig definiertem Leistungsniveau zu minimieren. Somit stellt sich in Bild 1-19 bei gefordertem Leistungsniveau L_1 die traditionelle Technologie als ökonomischste Alternative dar. Beim hohen Leistungsniveau L_2 hingegen muss – letztlich mangels Alternativen, da L_2 oberhalb der Leistungsgrenze der traditionellen Technologie L_{grenz} liegt – die Wahl auf die fortschrittliche Technologie fallen.

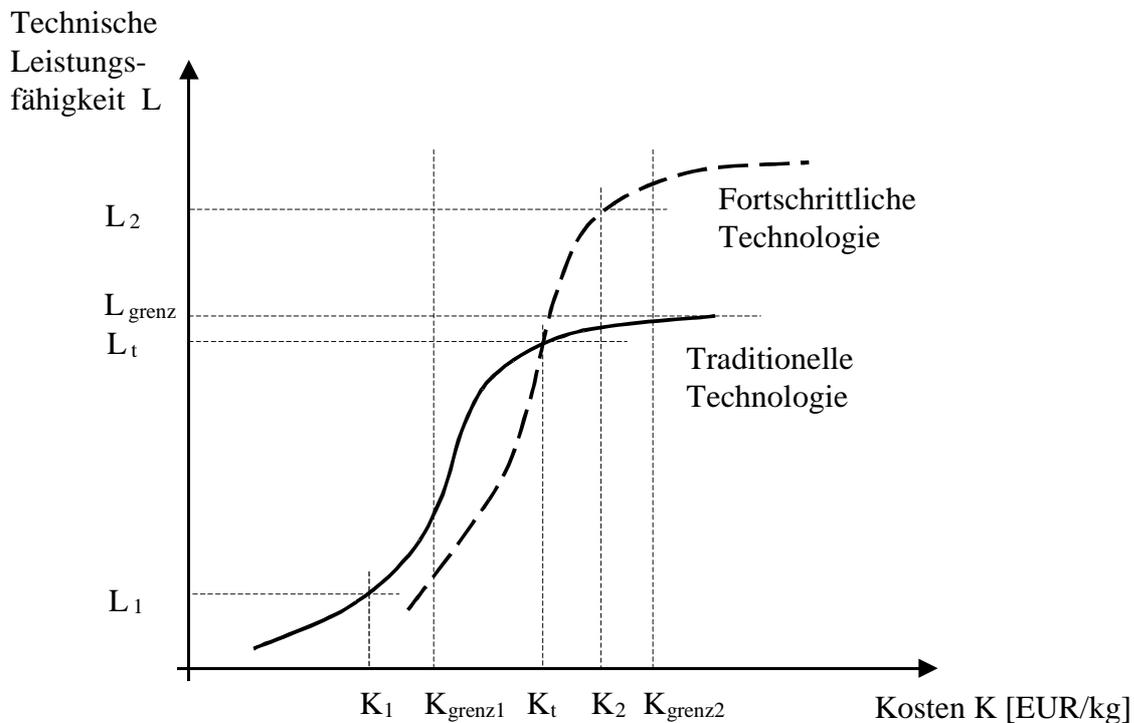


Bild 1-19 Einfaches Substitutionsmodell von (Material-)Technologien

Der Schnittpunkt der Kosten/Leistungskurven beider Technologien markiert den Indifferenzpunkt (L_i , K_i) der Substitutionsentscheidung.

In vielen Anwendungsbereichen liegen marktseitig definierte Kostenobergrenzen (Kostentoleranzgrenzen) vor. Deshalb wurden in dem Modell beispielhaft die Kostenschranken K_{grenz1} und K_{grenz2} zweier unterschiedlicher Anwendungsbereiche angelegt. Im ersten Anwendungsbereich mit der Kostenschranke K_{grenz1} wird die fortschrittliche Technologie unter den gegebenen Voraussetzungen (Kostenprimat) grundsätzlich auf keine Marktakzeptanz stoßen. Im zweiten Anwendungsbereich mit der Kostenobergrenze K_{grenz2} hingegen ist je nach Leistungsanforderung der Anwendung entweder die traditionelle oder die fortschrittliche Technologie am geeignetsten.

Der Anwendungsbereich mit der niedrigen Kostenschranke kann als Synonym für einen besonders kostensensitiven Massenmarkt – wie beispielsweise die Automobilindustrie – angesehen werden, in dem FKV bisher keinen breiten Einsatz finden konnten. Der zweite Anwendungsbereich repräsentiert einen weniger kostensensitiven, aber dafür mehr leistungsorientierten Markt wie die Luftfahrtindustrie, die gegenwärtig noch hauptsächlich traditionelle Materialtechnologien einsetzt, jedoch wegen spezifischer Anforderungen zumindest in Teilbereichen auch auf fortschrittliche Materialien wie FKV zurückgreift.

Anhand des einfachen Substitutionsmodells lassen sich die theoretischen Bedingungen für die Ausweitung des Einsatzes von fortschrittlichen Technologien definieren und auf Basis der realen Marktgegebenheiten bei FKV bewerten:

1. Steigende Leistungsanforderungen in den Anwendungsbereichen

Durch höhere Leistungsanforderungen werden die Grenzen traditioneller Materialtechnologien schneller erreicht und damit wird im Grunde der Weg frei für den Übergang auf die fortschrittlicheren, aber ggf. auch kostenintensiveren Technologie. Dies setzt allerdings voraus, dass die Kostenobergrenze des jeweiligen Anwendungsgebiets nicht überschritten wird. In der Vergangenheit hat sich allerdings immer wieder gezeigt, dass der aus rein technologischer Sicht naheliegende Schluß auf eine positive Korrelation zwischen Leistungsanforderungen und Kostentoleranz auf den Märkten für fortschrittliche Materialien in der Regel nicht zu beobachten ist. Vielmehr lauten die Anforderungen der potentiellen Anwenderindustrien: Höhere Leistung bei verglichen mit traditionellen Lösungen gleichen oder sogar geringeren Kosten. Motiv dieses Anspruchs ist das Erzielen bzw. Ausbauen der Marktführerschaft auf weltweiten Märkten durch technologische und/oder ökonomische komparative Wettbewerbsvorteile [61]. Bestes Beispiel ist die Flugzeugindustrie, die für den Einsatz fortschrittlicher Materialien und Bauweisen in kommenden Flugzeuggenerationen 30 % Gewichtseinsparung (höhere Leistungsanforderung) bei 20 - 40 % Kostenreduktion (niedrigere Kostenobergrenze) gegenüber dem heutigen Stand fordert [62].

2. Niedrigeres Kosten-/Leistungsverhältnis der fortschrittlichen Technologie

Das Kosten-/Leistungsverhältnis kann auch durch Erhöhen der Leistungsfähigkeit bei gleichbleibenden oder niedrigeren Kosten (Verschieben der S-Kurve nach oben) bzw. durch Reduktion des Kostenniveaus bei gleichbleibendem oder höherem Leistungsniveau erfolgen; ebenso ist die Kombination beider Ansätze zielführend. Diese Optionen stellen den Kardinalweg der Migration fortschrittlicher Materialtechnologien in größere Anwendungsgebiete dar.

Allerdings ist die Leistungssteigerung nur innerhalb des Leistungsanforderungsprofils der angestrebten Anwendungsfelder sinnvoll und damit sind diesbezügliche Optimierungspotenziale praktisch begrenzt.

Die kostenseitige Optimierung bietet ein größeres Potenzial. Allerdings existieren bei FKV gewichtige Hindernisse hinsichtlich der Absenkung des Kostenniveaus: Die (relativ) hohen Materialkosten des Werkstoffs können ein bestimmtes Niveau nur bedingt unterschreiten (Rohstoffpreise, Energiekosten der Faserherstellung etc.) [58]. Ferner unterliegen viele der verfügbaren Verarbeitungstechnologien für FKV bei dem derzeitigen Stand der Technik Einschränkungen hinsichtlich Zykluszeiten und Automatisierungsgrad, die ebenfalls einen relativ hohen, rigiden Kostensockel bedingen.

Um die beschriebene "ökonomische Barriere" der FKV-Anwendung zu durchbrechen, wurden seitens Industrie und Forschung in den letzten Jahren die Anstrengungen forciert. Zum einen konzentrieren sich die Aktivitäten auf die Reduktion der Kosten für Verstärkungsfasern. Durch Ausbau der Kapazitäten und Entwicklung neuer "Low-cost"-Produktionstechnologien wurde bereits eine dramatische Kostenreduktion insbesondere bei Hochleistungsfasern erzielt (siehe Bild 1-20). Seit Beginn der 90er Jahre bis heute fiel beispielsweise der Preis für Kohlenstofffasern (Standardtypen, nicht für Luftfahrtanwendungen) von ca. 200 \$/kg auf ca. 15-20 \$/kg; für die Zukunft sind 10 \$/kg das Ziel [63]. Zum anderen werden verstärkt neue FKV-Verarbeitungstechnologien mit dem Ziel der Kostenreduktion entwickelt [64-69].

Wenngleich unbestritten erhebliche Fortschritte in puncto Wirtschaftlichkeit von FKV erzielt wurden, bleibt dennoch fraglich, ob die Verbesserungen hinreichen, die angestrebten größeren Marktfelder in absehbarer Zukunft zu erschließen und eine substantielle, nachhaltige Aufwärtsentwicklung des FKV-Marktes einzuleiten [18].

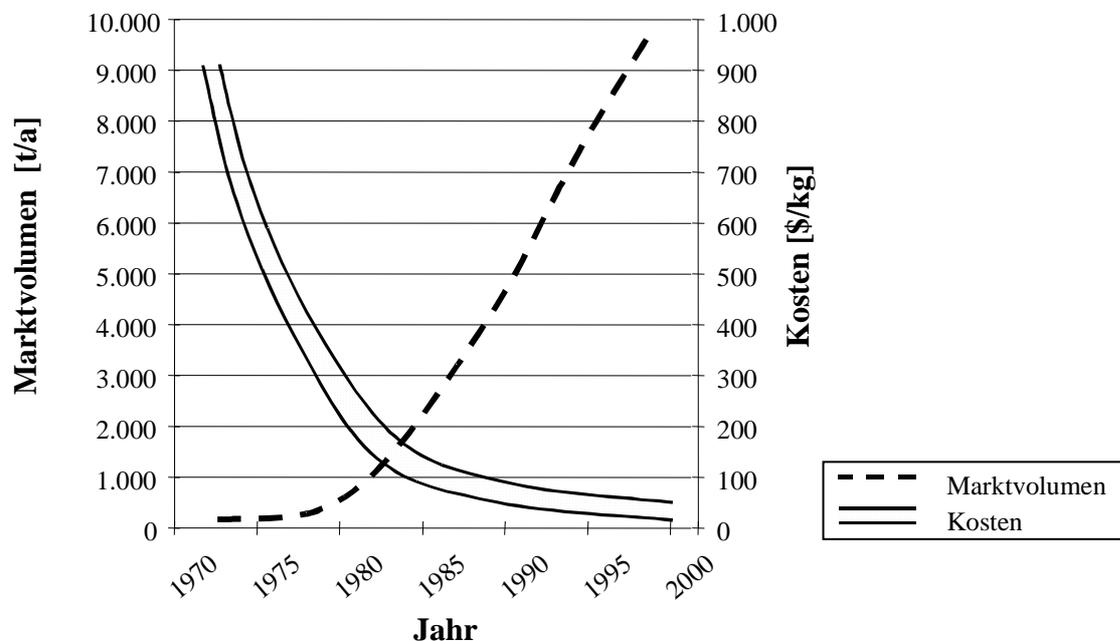


Bild 1-20 Entwicklung von Marktvolumen und Materialkosten für PAN-basierte Kohlenstofffasern 1970 - 2000 [53, 63, 70]

1.3 Problemstellung, Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

1.3.1 Problemstellung und Lösungsansätze

Im Allgemeinen besteht auch heute zwischen FKV und traditionellen Materialien weiterhin eine signifikante "Wirtschaftlichkeitslücke" hinsichtlich Material- und Verarbeitungskosten, die die zurückhaltende bzw. ablehnende Haltung vieler Anwendungsbereiche gegenüber der FKV-Technologie begründet. Das Hauptargument der potentiellen Anwenderindustrie gegen den Einsatz von FKV – die ungenügende Wirtschaftlichkeit – ist somit trotz 50-jähriger Entwicklungsarbeit auch zum Beginn des 21. Jahrhunderts noch immer nicht grundsätzlich überwunden.

Die Erforschung und Entwicklung neuer Anwendungen für FKV konzentrieren sich demgegenüber noch immer maßgeblich auf das Erschließen des technologischen Potenzials der Materialtechnologie, weniger auf Wirtschaftlichkeitsaspekte [71]. Systematische Wirtschaftlichkeitsanalysen im Zusammenhang mit diesem Technologiefeld werden zumeist – wenn überhaupt Untersuchungsgegenstand – von der technologischen Entwicklung weitgehend entkoppelt. Deshalb wurden vielfach Materialien, Bauteile und Verarbeitungstechnologien bis zum Prototypstadium gemäß den technischen Anforderungsprofilen erfolgreich entwickelt, um dann im Vorfeld der Markteinführung im angestrebten Anwendungsfeld an der beschriebenen "Wirtschaftlichkeits-hürde" zu scheitern.

Um eine Lösung des Wirtschaftlichkeitsdilemmas der FKV voranzutreiben und das Risiko von Fehlentwicklungen zu minimieren, ist ein prinzipielles Umdenken im Ansatz der Entwicklung innovativer FKV-Anwendungen erforderlich. Die Realisierung einer hohen Wirtschaftlichkeit muß als gleichberechtigtes Entwicklungsziel neben der technischen Leistungsfähigkeit etabliert werden [72].

Wirtschaftliche Optimierungspotenziale sind möglichst früh im Entwicklungsprozess in einem mit der technischen Konzeption und Planung eng gekoppelten Screeningprozess zu identifizieren und durch gezielte Einflussnahme auf alle relevanten Bereiche der technischen Fortentwicklung konsequent zu erschließen (Bild 1-21).

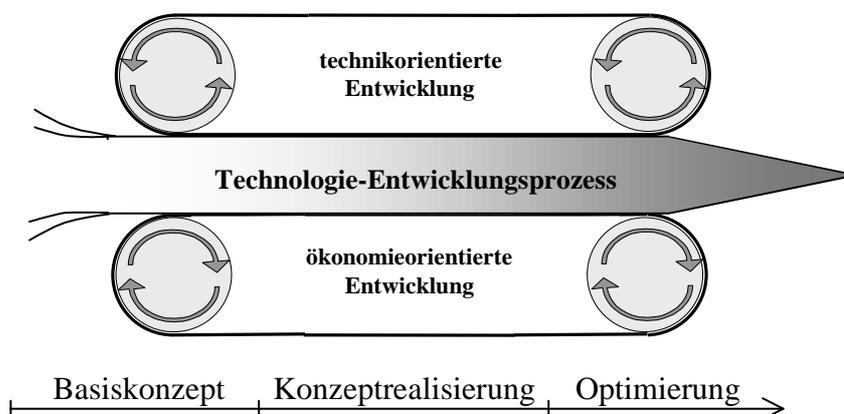


Bild 1-21 Koppelung von technik- und ökonomieorientierter Entwicklung

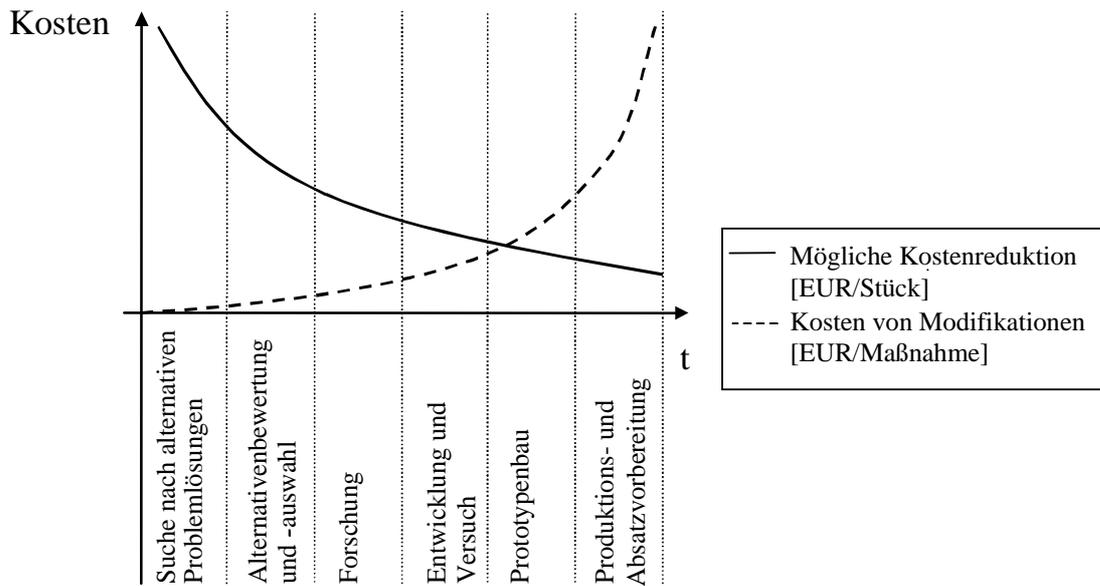


Bild 1-22 Kostenbeeinflussungspotenzial in der Entwicklungsphase

Bis zu 70 % der sich später ergebenden Kosten von Verfahren oder Produkten werden während der frühen Entwicklungsphasen determiniert [73]. Je früher eine wirtschaftliche Optimierung in Entwicklungsprozesse eingebracht wird, desto größer ist folglich die Einflussmöglichkeit auf die resultierenden wirtschaftlichen Charakteristika von Verarbeitungsprozessen bzw. Produkten. Somit liegt hier das weitaus größte Beeinflussungspotenzial hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit. Bild 1-22 unterstreicht die Bedeutung der Orientierung auf die Wirtschaftlichkeit in der frühen Phase technologischer Entwicklungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt von parallel zur technologischen FKV-Entwicklung durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalysen ist der sukzessive Vergleich von auf Basis des erreichten Konkretisierungsstands prognostizierten Wirtschaftlichkeitskennzahlen mit aus Marktgegebenheiten und Randbedingungen des angestrebten Anwendungsfeldes retrograd abgeleiteten Zielkorridoren für diese Kenngrößen. Durch derartige, an die Methode der Zielkostenrechnung angelehnte Analysen kann der technischen Entwicklung Informationen über die zur Zielerreichung einzuhaltenden Grenzen der Wirtschaftlichkeit im konkreten Anwendungsfeld zugeführt werden [74]. Dadurch werden

- ein wirtschaftlichkeitsschädliches "Over-Engineering" verhindert und
- die Basis für eine marktgerechte, auf Maximierung des Kundennutzen ausgerichtete Entwicklungsstrategie geschaffen [75].

Liegen die prognostizierten Wirtschaftlichkeitsdaten zu einer bestimmten Phase des Entwicklungsprozesses nicht innerhalb des abgeleiteten Zielkorridors, so lässt sich mittels Abweichungsanalyse die Höhe des notwendigen Verbesserungsbedarfs quantifizieren und die notwendigen Optimierungsmaßnahmen zielorientiert planen. Die Ergebnisse derartiger Analysen können aber auch als Abbruchkriterium dienen, um eine unproduktive Entwicklung nicht marktfähiger FKV-Materialien, -Prozesse und -Produkte von vorne herein zu vermeiden.

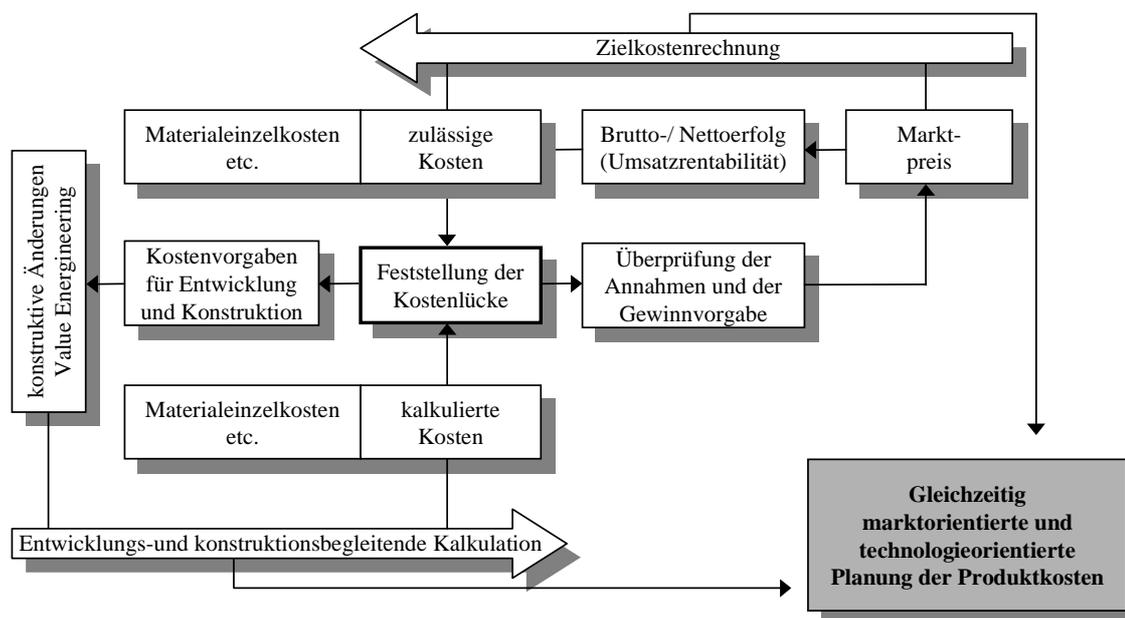


Bild 1-23 Integration von markt- und technologieorientiertem Entwicklungsprozess [75]

Mit diesem Vorgehen wird die anzustrebende Integration von technologie- und markt- bzw. wettbewerbsorientierten Entwicklungsprozessen, wie sie in Bild 1-23 skizziert ist, unterstützt.

Eine entscheidende Voraussetzung zur Implementierung der skizzierten wirtschaftlichkeitsorientierten FKV-Entwicklungsstrategie ist die Existenz eines entsprechenden Analyse- und Planungsinstruments, das zum Beispiel Aussagen über die auf Basis des technischen Planungsstands zu erwartenden Kostenstrukturen als primärer Wirtschaftlichkeitsindikator erlaubt. Technologieimmanente "Kostentreiber" können somit identifiziert und Ansatzmöglichkeiten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit aufgedeckt werden.

Die Schlüsselfunktion eines Instruments zur Wirtschaftlichkeitsanalyse der FKV ist in der Fähigkeit zur Simulation der Auswirkungen von technischen Modifikationen (z.B. hinsichtlich Werkstoffkonfiguration oder Fertigungstechnik) auf die Wirtschaftlichkeitsindikatoren bei gegebenem technischen und betriebswirtschaftlichen Umfeld zu sehen; dies erlaubt Sensitivitätsanalysen. Durch ein solches Instrument wird es möglich, bereits in einer sehr frühen Entwicklungsphase die notwendigen Leitlinien zur wirtschaftlichkeitsorientierten Technologieentwicklung abzuleiten und im Entwicklungsprozess zu implementieren.

Zentrale Problempunkte der Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Lösung innovativer Entscheidungstatbestände im Zusammenhang mit FKV sind die Methodik und der Maßstab der ökonomischen Bewertung. Bei herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsanalysen werden die Material- und Verarbeitungskosten (bzw. Anschaffungskosten aus der Sicht des Endanwenders) eines Bauteils bzw. einer Struktur gegenüber den anfallenden Kosten in herstellungsvor- (z.B. Gemeinkosten der F&E) oder nachgelagerten Phasen (z.B. Betrieb, Recycling, Entsorgung) überbewertet [76]. Je nach Art des Analysegegenstands sind jedoch die Material- und Verarbeitungskosten wesentlich geringer als die übrigen Kostenblöcke (Beispiele siehe Bild 1-24).

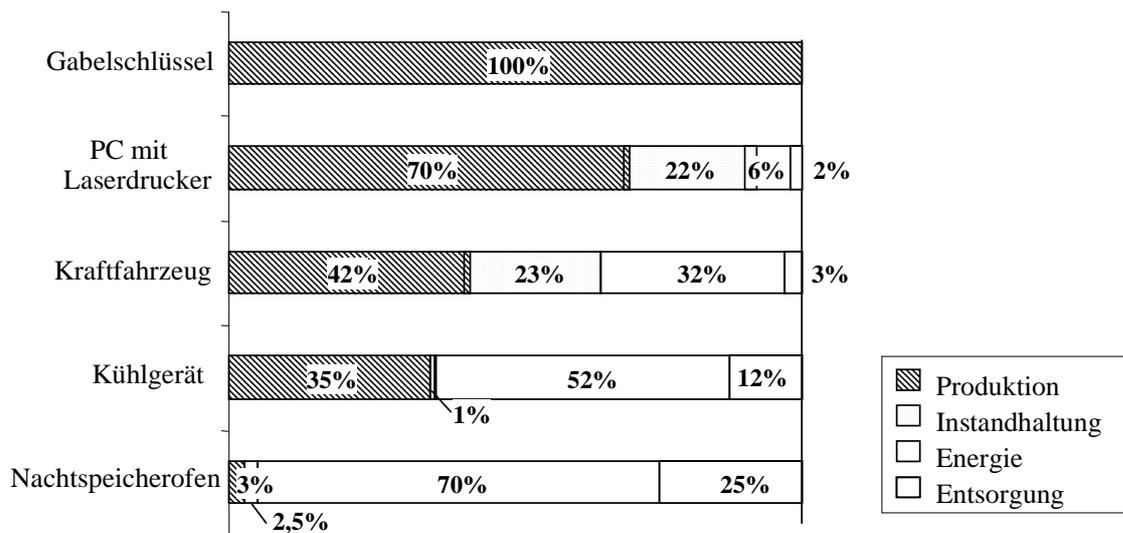


Bild 1-24 Beispiele für die Lebenszykluskostenverteilung bei Großserienprodukten [77]

Innovative FKV-Anwendungen, die hohe Herstellkosten bedingen, aber gleichzeitig im Betrieb Kostenvorteile gegenüber bewährten Alternativprodukten aufweisen, werden bei konventioneller Bewertungsmethodik in der Regel schlechter bewertet und damit a priori als unwirtschaftlich eingestuft. Beste Beispiele sind die in Kap. 1.2 genannten FKV-Zukunftsprojekte, deren Innovationspotenzial

- einerseits durch signifikante ökonomische Vorteile des FKV-Einsatzes wie geringeres Gewicht, höhere Nutzlast, geringerer Treibstoffverbrauch, geringere Reparatur-, Wartungs- und Instandhaltungskosten, längere Lebensdauer etc. definiert wird, aber
- andererseits verglichen mit traditionellen Materialien (Stahl, Aluminium, Beton) deutlich höhere Material- und Verarbeitungskosten bedingt.

Eine kurzfristige Betonung von Material- und Verarbeitungskosten bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der dargestellten Zukunftsprojekte würde zur strikten Ablehnung der neuen Technologie führen. Die inhärent punktuelle Kostenperspektive herkömmlicher Wirtschaftlichkeitsanalysen unterstützt somit das Entstehen herstellkostenbezogener Suboptima der Technologieauswahl und versperrt den Blick auf längerfristige Nutzeffekte innovativer Technologien. Um demgegenüber eine werkstoffgerechte Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den FKV-Entwicklungsprozess bereitzustellen, ergibt sich

- die Notwendigkeit einer konzeptionellen Erweiterung der bisherigen ökonomischen Bewertungsansätze für die FKV [78].

Die Defizite der herkömmlichen Methodik können durch Einbeziehung aller relevanten Wirtschaftlichkeitsaspekte in einem umfassenden Ansatz überwunden werden [79]. Hierzu bieten die Wirtschaftswissenschaften die Methode der Lebenszykluskostenrechnung als vielversprechenden Lösungsansatz [80]. Die Zielsetzung der Lebenszykluskostenrechnung besteht darin, für ein geplantes Produkt (z.B. FKV-Bauteil oder –Struktur) bereits im Entwicklungsprozess die zu erwartende Wirtschaftlichkeit mittels eines ganzheitlichen, auf alle Phasen des Produktlebenszyklus ausgedehnten Betrachtungshorizontes zu analysieren und damit die gezielte Optimierung zu unterstützen.

1.3.2 Zielsetzung und Aufbau

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die systematische Entwicklung einer – im Sinne der umfassenden Berücksichtigung aller relevanten Wirtschaftlichkeitsaspekte – werkstoffgerechten Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse für FKV sowie deren Darstellung und Umsetzung in einem praxisgeeigneten Instrument.

Mittels Anwendung des erstellten Modells auf konkrete, aktuelle Problemstellungen, darauf basierenden Sensitivitätsanalysen und deren Analyse sollen Leitlinien einer wirtschaftlichkeits- und damit marktorientierten Entwicklungsstrategie für FKV abgeleitet werden.

Diese übergeordnete Aufgabenstellung beinhaltet folgende wesentlichen Einzelaspekte:

- Analyse des Stands der Wissenschaft bezüglich Methoden der ökonomischen Bewertung von FKV; Extraktion von relevanten Ansätzen und Identifikation von Defiziten
- Erarbeitung von theoretischen Grundlagen für die angestrebte erweiterte Bewertungsmethodik der FKV-Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Prinzipaufbau sowie Auflösung in inhaltliche, zeitliche und sachliche Analyseebenen
- Entwurf und Konkretisierung einer FKV-spezifischen aber anwendungsfeldneutralen Methodik der Lebenszykluskostenrechnung für FKV; Transformation der Methodik zu einem handhabbaren Instrument
- Verifikation des entwickelten Modells mittels Fallstudien und Sensitivitätsanalysen
- Analyse der gewonnenen Daten und Synthese einer wirtschaftlichkeits- und marktorientierten Entwicklungsstrategie

Der in Bild 1-25 schematisch dargestellte Aufbau der Arbeit spiegelt diese Einzelzielsetzungen bezüglich Struktur und Inhalt wider.

Lebenszykluskostenanalyse als strategisches oder operatives Bewertungs- und Planungsinstrument für die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV)	
Definition des Themas	<p>1. Einführung in die Problemstellung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Übersicht über den heutigen FKV-Markt, Zukunftspotenziale, Restriktionen - Problemstellung, Ziele und Aufbau der Arbeit <p>2. Stand und Defizite der ökonomischen Bewertung von FKV</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anwendung der konventionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse - Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung - Defizite der Lebenszykluskostenrechnung
Teil I Methoden- und Modellentwicklung	<p>3. Basiskonzept der Lebenszykluskostenrechnung für die FKV</p> <ul style="list-style-type: none"> - Strukturierung des Konzepts - Definition der zeitlichen, inhaltlichen und logischen Dimension des Konzepts <p>4. Synthese des LZK-Modells</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung eines Meta-Modells - Entwicklung von Modellbausteinen zur Kostenschätzung für die verschiedenen Lebenszyklusphase der FKV - Entwicklung einer Verknüpfungsstruktur für die Modellbausteine
Teil II Verifikation des Modells	<p>5. Verifikation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anwendung des Modells auf 4 Fallbeispiele aus den Bereichen Fahrzeugbau, Anlagenbau, Bauwesen und Offshore-Industrie - Betrachtungen zur Aussagesicherheit
Teil III Interpretation / Fazit	<p>6. Fazit - Nutzungspotenzial des LZK-Modells im F&E-Prozess</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung der operativen Nutzung des LZK-Modells als wirtschaftlichkeitsorientiertes Bewertungsinstrument im F&E-Prozess - Entwicklung einer wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Strategie durch Anwendung des LZK-Modells - Verknüpfung von strategischer und operativer F&E-Planungsebene
	<p>7. Zusammenfassung</p>

Bild 1-25 Struktur und Inhalt der Arbeit

2 Stand und Defizite der ökonomischen Bewertung von FKV

In Kapitel 2 soll der Stand bei der ökonomischen Bewertung von FKV beschrieben und im Hinblick auf deren Nutzung bei F&E-Aufgaben analysiert werden. Zunächst wird eine Erläuterung der begrifflichen Grundlagen sowie eine Beschreibung herkömmlicher Methoden der Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgen. Daran wird sich eine übersichtsartige Darstellung der Ansätze zur Erweiterung der Bewertung sowie des daraus abgeleiteten Konzepts der "Lebenszykluskostenrechnung" anschließen. Die bisherigen Anwendungen dieser Methode werden analysiert und deren Defizite im Hinblick auf die konkrete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit identifiziert.

2.1 Konventionelle Wirtschaftlichkeitsanalyse

2.1.1 Begriffliche Grundlagen der konventionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse

Ökonomische Bewertungen lassen sich im Rahmen technologischer Entwicklungen durch die Projektion von Wirtschaftlichkeitskenngrößen, die auf Basis des jeweiligen technischen Planungsstands nach dessen Realisierung zu erwarten sind, durchführen [81]. Durch die ermittelten Kenngrößen kann der Grad der ökonomischen Vorteilhaftigkeit einer geplanten technologischen Entwicklung entweder absolut oder relativ (z.B. bei neuartigen technologischen Alternativen untereinander beziehungsweise mit dem Stand der Technik) bewertet und somit ordnende oder vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt werden [82].

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die vergleichenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auch Wirtschaftlichkeitsanalysen genannt. Hierunter ist die Gesamtheit aller Methoden zu verstehen, die zur Ermittlung bzw. Schätzung der wertmäßigen Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Untersuchungsgegenstands dienen [83]. Bei Wirtschaftlichkeitsanalysen handelt es sich somit um Informationssysteme zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen durch Bereitstellung von konkreten Planungsdaten [84]. In dem Informationssystem werden aus der technischen Planung abgeleitete, wirtschaftlichkeitsrelevante Inputinformationen zu Outputinformationen (Wirtschaftlichkeitsaussagen) mittels Berechnungs- und Bewertungsalgorithmen transformiert.

Das für die vorliegende Arbeit zentrale Bewertungskriterium "Wirtschaftlichkeit" ist aus dem ökonomischen Prinzip abgeleitet:

- Eine ökonomische Tätigkeit wird als wirtschaftlich bezeichnet, wenn das Verhältnis zwischen Output und Input größer ist als das vergleichbarer Alternativen [82].

Je nach Blickwinkel läßt sich diese Aussage auf unterschiedliche Weise interpretieren [85]. So wird unter Wirtschaftlichkeit nach einer technisch orientierten Definition "*...das Verhältnis von mengenmäßigem Ertrag (gemessen in Stück, kg, usw.) und mengenmäßigem Einsatz von Produktionsfaktoren (gemessen in Arbeitsstunden, Betriebsmittel- und Werkstoffeinheiten)*" verstanden [86].

In der Betriebswirtschaftslehre ist eher ein wertmäßiger Wirtschaftlichkeitsbegriff gebräuchlich [86]: "*Hierbei werden Einnahmen und Ausgaben beziehungsweise näherungsweise Erträge (Leistungen) und Aufwendungen (Kosten) von Verfahren einander gegenübergestellt.*"

Diese Definition läßt sich für Vergleichsrechnungen auch ausschließlich auf Kostenaspekte ausgerichtet modifizieren [87]:

"Der wertmäßige Wirtschaftlichkeitsbegriff bezeichnet dann – wenn ein bestimmter Ertrag mit verschiedenen Kombinationen von Produktionsfaktoren erzielt werden kann – das Verhältnis zwischen der günstigsten und der tatsächlich erreichten Kostensituation":

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Istkosten}}{\text{Sollkosten}}$$

Dies bedeutet, dass zum Erreichen einer hohen Wirtschaftlichkeit – bei beispielsweise durch den Stand der Technik determinierten Sollkosten – die zu erwartenden Plankosten nach Umsetzung der untersuchten technologischen Entwicklung die zentrale Größe darstellen. Als Entscheidungsregel hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bei Entwicklungsaufgabenstellungen kann daraus verallgemeinernd gefolgert werden, dass

- die Entwicklungsalternative I wirtschaftlicher als die Alternative II ist, wenn die zu erwartenden Kosten (nach der Realisierung der Entwicklung) k_I geringer sind als k_{II} [88].

Die Definition von "Entwicklungsalternative" kann dabei sehr weit gefaßt sein. Das Spektrum reicht von alternativen Materialien, variierenden Bauweisen oder Bauteilgeometrien usw. bis hin zu neuartigen Verfahrenstechnologien und deren konkrete Ausgestaltung sowie die Kombination aus den genannten Merkmalen.

Somit können die nach technologischer Realisierung zu erwartenden Kosten als entscheidende Kenngröße der Wirtschaftlichkeit bei der ökonomischen Bewertung technologischer Entwicklungen herangezogen und als eine zu minimierende Zielgröße des wirtschaftlichkeitsorientierten Entwicklungsprozesses eingesetzt werden.

2.1.2 Anwendung der konventionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse für FKV

Im Zusammenhang mit den FKV-Entwicklungen werden ökonomische Bewertungen in Form von konventionellen Wirtschaftlichkeitsanalysen zur Beurteilung konkreter unternehmerischer Problemstellungen (Kostenplanung, Investitionsrechnung etc.) seit dem Beginn der industriellen FKV-Anwendungen durchgeführt.

Systematische, wissenschaftliche Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Thema "Wirtschaftlichkeit der FKV" werden jedoch erst seit den letzten 15 Jahren intensiver vorangetrieben. Der inhaltliche Schwerpunkt der weitgehend in den USA erarbeiteten Studien liegt, entsprechend den Marktschwerpunkten, auf der Wirtschaftlichkeitsanalyse duromerer FKV [89]. Auslöser der stärkeren wissenschaftlichen Beachtung des Themas war die aus der schwachen Entwicklung der industriellen FKV-Anwendung gewachsene Einsicht, dass in vielen Applikationsfeldern, in denen FKV offensichtliche technische Vorteile aufweisen, eine ungenügende wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit gegenüber traditionellen Materialtechnologien vorliegt und methodisch fundierte Ansätze zur gezielten Optimierung gefunden werden müssen [60].

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten war die Entwicklung von maßgeschneiderten Methoden und Modellen zur Vorkalkulation der Herstellkosten von FKV-Bauteilen für die Luft- und Raumfahrtindustrie [90].

Erstmalig wurde ein umfassender modellgestützter Vergleich der Herstellkosten von traditionellen Materialien (in diesem Fall Aluminium) und FKV im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Strukturteile für das Passagierflugzeug Boeing 737 veröffentlicht [91]. Im Rahmen der Studie stellte sich heraus, dass die verwendeten FKV-Teile um den Faktor 2 höhere Herstellkosten als die Vergleichskonstruktion aus Aluminium aufwiesen. Aus diesem Grund wurden die bereits zertifizierten FKV-Komponenten aus der Produktion genommen und wieder auf herkömmliche Materialien zurückgegriffen [92].

In der Folgezeit wurden in den USA eine ganze Reihe von FKV-Entwicklungsprogrammen aufgelegt, die neben technischen Zielsetzungen auch stärker als bisher auf die Reduktion der Herstellkosten von FKV-Bauteilen und -Strukturen ausgerichtet waren. Ein Beispiel ist das "Advanced-Composite-Technology-Programm" unter Federführung der NASA, welches das zentrale Ziel verfolgte, FKV-Primärstrukturen für den zivilen Flugzeugbau zu entwickeln, die gegenüber der traditionellen Leichtmetallbauweise auch hinsichtlich der Herstellkosten wettbewerbsfähig sein sollen [93].

Im Rahmen der Forschungsarbeiten mit luft- und raumfahrtindustrieller Schwerpunktsetzung bildeten sich drei im theoretischen Ansatz grundsätzlich unterschiedliche Modellfamilien zur FKV-Wirtschaftlichkeitsanalyse heraus [89]:

- Parametrische, empirisch basierte Kostenmodelle
- Leistungsorientierte Kostenrechnungsmodelle (Activity-based Costing)
- Prozessanalytische Kostenmodelle

Basis der parametrischen Kostenmodelle sind mittels statistischer Methoden (zumeist multiple Regression) aus empirischen Daten abgeleitete Funktionen, die den Zusammenhang zwischen parametrisierten, technischen Charakteristika der darzustellenden Bauteile (Gewicht, geometrische Komplexität etc.) und den in verschiedenen Kategorien anfallenden Kosten abbilden [94-100]. Zur Unterstützung von FKV-Entwicklungsaufgaben mit größerer Innovationshöhe sind die parametrischen Kostenmodelle grundsätzlich nicht geeignet, da die empirische Abstützung der Schätzalgorithmen keine Übertragbarkeit auf neuartige Prozesstechnologien, Veränderungen des Automatisierungsgrads oder sich wandelndem betriebswirtschaftlichem oder technischem Umfeld zulässt [89]. Haupteinsatzgebiet der parametrischen Kostenschätzung ist vielmehr die Abschätzung von Kostengrößen im Vorfeld der Anwendung etablierter Technologien im bekannten produktionstechnischen und betriebswirtschaftlichen Umfeld.

Als relativ neuen Ansatz zur ökonomischen Bewertung von FKV-Bauteilen ist die Anwendung der leistungsorientierten Kostenrechnung (Activity Based Costing) zu nennen [101-103]. Die detaillierte Berücksichtigung der unterschiedlichen Handlungsebenen im Prozess bei der Herstellung von FKV-Bauteilen sowie sehr fein zergliederter Kostenzuordnungseinheiten stellt die besonderen Merkmale der Methode dar. Als problematisch bei der modellgestützten Umsetzung leistungsorientierter Kostenrechnung erwies sich jedoch der enorme Aufwand der Inputdatengenerierung [89]. Es ist zweifelhaft, ob bei der Anwendung der Methode als Bewertungsinstrument bei F&E-Aufgaben die theoretisch zu erzielende Berechnungsgenauigkeit wegen der inhärenten "Unschärfe" von Inputdaten aus der F&E überhaupt zum Tragen kommt.

Aufgrund des transparenten theoretischen Unterbaus sowie des vergleichsweise geringen Datenbedarfs wurden zur Abschätzung der Herstellkosten von FKV in der Vergangenheit vor allem prozessanalytische Kostenmodelle auf Basis von betriebswirtschaftlichen Kostenrechnungsstandardmethoden entwickelt und angewendet [104].

Diese Modelle basieren auf der Analyse von Verarbeitungsprozessen, wobei der Ressourcenverbrauch der einzelnen Prozessschritte bei gegebener Fertigungsaufgabenstellung (Bauteile, Strukturen etc.) betrachtet wird. Durch monetäre Bewertung des abgeschätzten Ressourcenverbrauchs werden die einzelnen Kosten nach Kostenarten (Personalkosten, Materialkosten, etc.) vorkalkuliert.

Allerdings sind zur Durchführung derartiger Analysen detaillierte Kenntnisse oder Vorplanung des Prozesses notwendig. Die Genauigkeit der prozessanalytischen Kostenmodelle ist sehr stark von der Qualität und dem Detaillierungsgrad der verfügbaren Eingabedaten abhängig.

Die bekanntesten prozessanalytischen Kostenmodelle für FKV sind:

- Advanced Composite Cost Estimating Model (ACCEM) [105]
- Manufacturing Cost Model for Composites (MCMC) [106]
- MSU Cost Comparison Model [107]
- Composite Optimization Software for Transport Aircraft Design (COSTADE) [108]

Diese Modelle wurden jeweils im Auftrag bzw. in Eigenregie von großen US-amerikanischen Luft- und Raumfahrtunternehmen entwickelt und basieren auf bzw. beinhalten unternehmensspezifische Daten. Aus diesem Grund sind diese Modelle und die damit erarbeiteten Detailergebnisse für allgemeine Forschungszwecke nicht zugänglich.

In Europa bzw. in Deutschland sind – obwohl auf weitaus niedrigerem Intensitätsniveau als in den USA – Arbeiten zur FKV-Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt worden. Neben einzelnen Untersuchungen des Luftfahrtsektors [109] wurden Arbeiten vor allem von der Automobilindustrie im Rahmen von Feasibilitystudien zum Einsatzpotenzial der FKV vorangetrieben. Inhaltlich konzentrierten sich die Studien auf die Vorkalkulation der Herstellkosten von FKV-Prototypbauteilen sowie Variantenuntersuchungen hinsichtlich FKV-Bauweisen und alternativen FKV-Verarbeitungsprozessen. Allerdings sind keine konkreten Wirtschaftlichkeitsdaten aus den Untersuchungen veröffentlicht worden.

Längerfristige wissenschaftliche Untersuchungen zur ökonomischen Bewertung der FKV-Technologie sind auch aus Projekten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) bekannt. Die bislang umfangreichsten Arbeiten in Deutschland wurden an der RWTH Aachen im Kontext des DFG-Sonderforschungsbereichs 332 "Produktionstechnik für Bauteile aus nichtmetallischen Faserverbundwerkstoffen" durchgeführt [110, 111]. Im Teilprojekt 6 "Methoden und Instrumentarien zur Planung und Bewertung von FKV-Technologien" des Vorhabens wurde ein Expertensystem zur Anlagenplanung, Bauteilbewertung und dynamischen Investitionsrechnung entwickelt und sukzessive über die Jahre erweitert. Kern des Expertensystems hinsichtlich der ökonomischen Bewertung ist ein Modell zur Vorkalkulation der Herstellkosten von FKV-Bauteilen auf Basis eines modifizierten, ressourcenorientierten Prozesskostenrechnungsansatzes. Der Fokus der Aktivitäten im SFB 332 liegt auf der Naßwickel- bzw. Tapelegetechnik und mit diesen Fertigungsprozessen darstellbaren duromeren FKV-Bauteilen.

2.1.3 Defizite der konventionellen FKV-Wirtschaftlichkeitsanalyse

Unter dem Begriff "Kosten" werden bei den beschriebenen herkömmlichen FKV-Wirtschaftlichkeitsanalysen in der Regel die Herstellkosten eines Produkts (oder Bauteils etc.) als Summe von Materialkosten sowie den sonstigen Kosten der Verarbeitung bzw. Fertigung (Personal, Energie, Anlagen etc.) verstanden. Diese Sichtweise der Herstellkosten als primärer Wirtschaftlichkeitsindikator spiegelt das (kurzfristige) Gewinnziel der Produkthersteller wider .

Unter heutigen, infolge des verschärften internationalen Konkurrenzdrucks immer dynamischeren und komplexeren Marktbedingungen ist die Definition eines eindimensional auf die Herstellkosten fokussierten Wirtschaftlichkeitsindikators als Entscheidungsgrundlage insbesondere beim Vorliegen von

- innovationsorientierten Entscheidungstatbeständen,
- mehrdimensionalen Zielsystemen und
- Kosten-Nutzen-Beziehungen mit längerfristigen Wirkhorizonten

als grundsätzlich unzureichend zu erachten [78, 112]. Speziell bei Entwicklungsaufgaben auf dem Feld der FKV liegen diese Gegebenheiten jedoch in der Regel immer vor. Somit sind neue Wege der ökonomischen Bewertung für diese Materialtechnologie zu finden und umzusetzen.

2.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse mittels Lebenszykluskostenrechnung

2.2.1 Begriffliche Grundlagen der Lebenszykluskostenrechnung

Um die dargelegten Defizite der konventionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse zu überwinden, wurde von den Wirtschaftswissenschaften die Methode der Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing) bereitgestellt [113]. Die Lebenszykluskostenrechnung (LZK) erweitert die herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsanalysen hinsichtlich des inhaltlich-zeitlichen Betrachtungshorizonts [114]. Zentrales Anliegen der LZK ist es, mittels eines ganzheitlichen monetären Bewertungsansatzes, die Gesamtwirtschaftlichkeit eines technischen Systems (z.B. Produkt, Bauteil oder Fertigungsverfahren) zu erfassen und damit eine verbesserte (weil weitblickendere) Entscheidungsgrundlage – z.B. bei zukunftsorientierten Investitionen – zu liefern [115]. Im Zusammenhang mit Entwicklungsaufgaben wird im LZK-Konzept ein erfolgsversprechender Ansatz zur verbesserten Integration von Wirtschaftlichkeitsaspekten in der frühen Planungsphase gesehen; durch die LZK können ökonomische Kennwerte als zu optimierende Zielgrößen in den Entwicklungsprozess eingebunden werden.

Alle Kosten, die im Verlauf der Phasen des Lebenszykluses eines technischen Systems anfallen, werden mittels LZK ganzheitlich – d.h. beginnend mit der F&E-Phase und endend mit der Entsorgung bzw. dem Recycling – kostenmäßig abgeschätzt [114]. Technische Systeme, die hohe Herstellkosten aber auch einen hohen ökonomischen Zusatznutzen während des Betriebs aufweisen (z.B. niedrigere Betriebskosten gegenüber Alternativen), lassen sich damit objektiver beurteilen.

Die LZK stellt somit die Voraussetzung für eine auf die Minimierung der Gesamtkosten bzw. Maximierung des ökonomischen Gesamtnutzens von technischen Systemen abzielende Entwicklungsmethodik für die Planungsphase dar [76].

Die LZK ist trotz eines ähnlichen methodischen Ansatzes streng von der Ganzheitlichen Bilanzierung – auch oft als "ökologische Lebenszyklusanalyse" – bezeichnet, abzugrenzen. Bei der LZK werden lediglich Kosten im betriebswirtschaftlichen Sinne abgeschätzt, während die ganzheitliche Bilanzierung auf die Erfassung und Bewertung von Kosten im umweltökonomischen Sinne ausgerichtet ist, vgl. zum Beispiel [116-119].

2.2.2 Ursprung und Status der Lebenszykluskostenrechnung

Der Ursprung der Lebenszykluskostenrechnung liegt in den USA. Bei Großprojekten der 80er Jahre, vorwiegend im Zusammenhang mit militärischen Luft- und Raumfahrtprogrammen, wurde sie zunehmend angewandt [120]. Aber auch beim Bau industrieller Großanlagen (z.B. Kraftwerksanlagen), beim Bau von Gebäuden oder Brücken wurde die LZK zur vergleichenden Bewertung von Alternativen oder zu Optimierungszwecken während der Projektdefinitionsphase erfolgreich eingesetzt [121]. Die Motivation zur Entwicklung und konsequenten Anwendung der "Life-Cycle-Costing"-Methode ergab sich aus immer wiederkehrenden, teils dramatischen Budgetüberschreitungen bei Großprojekten infolge von vorher nicht beachteten bzw. einkalkulierten Folgekosten [80, 122]. Zur Reduktion solcher Risiken lag es nahe, bedeutende Investitionsentscheidungen auch durch ganzheitliche Kostenkalkulationen vorzubereiten und abzuschließen [114].

Zunächst war das Hauptziel der Anwendung der LZK die Minimierung der Kosten und Risiken von Anschaffungsprojekten durch Vergleich und Bewertung alternativer Angebote und Systemkonfigurationen anhand des Bewertungskriteriums "Lebenszykluskosten". Es zeigte sich, dass die Anwendung des LZK-Konzepts auch bei Konzeptfindungs- und Entwicklungsprojekten zum Maximieren von Kosten-Leistungs-Relationen technischer Systeme erfolversprechend ist. Deshalb wurde die Lebenszykluskostenrechnung in Kombination mit dem Design-to-Cost-Ansatz zu einem Design-to-Life-Cycle-Cost-Konzept weiterentwickelt [123]. Der Design-to-Cost-Ansatz hat zum Ziel, bei technologischen Entwicklungen das Einhalten vorgegebener Kostenziele zu fördern und Impulse zur gezielten Suche nach kostengünstigeren technischen Lösungsalternativen in jedem Entwicklungsschritt zu geben. Während der Design-to-Cost-Ansatz im Wesentlichen auf Anschaffungs- oder Herstellkosten ausgerichtet ist, ergibt sich beim Übergang auf das Design-to-Life-Cycle-Cost-Konzept die Option der zusätzlichen Berücksichtigung von Vorlauf- bzw. Folgekosten und entsprechenden Kostenzielen. Aufgrund dieser Vorzüge wurde die Anwendung des Konzepts zum Beispiel bei bestimmten (v.a. militärischen) Entwicklungsvorhaben der US-Regierung vorgeschrieben [124].

Ein wichtiges Anwendungsfeld der LZK ist der Bausektor. Aufgrund der – verglichen mit Konsum- oder vielen Investitionsgütern – sehr langen Lebensdauer von Gebäuden summieren sich die Betriebs- und Instandhaltungskosten zu gegenüber den Baukosten signifikanten Beträgen. So liegt zum Beispiel der Anteil der Folgekosten (Wartung, Instandhaltung, Betrieb) eines Bürogebäudes an den Gesamtkosten über den Lebenszyklus durchschnittlich bei rund 60% [125]. Dementsprechend hoch ist das potentielle Einsparungspotenzial und damit auch das Interesse, dieses mit dem Instrument der LZK durch Identifikation von Kostensubstitutionspotenzialen zu erschließen.

Eine zunehmende Verbreitung findet die LZK auch im Hightech-Bereich. Impulsgebend hierfür sind die sich in den letzten Jahren dynamisch wandelnden Kostenstrukturen bei technologieintensiven Produkten infolge

- intensiverer F&E-Aktivitäten, um dem Konkurrenzdruck auf den globalen Märkten zu begegnen sowie
- allgemein kürzeren Produktlebenszyklen zur Realisierung neuer Marktchancen.

Infolge dieser Trends werden die Vorlaufkosten eines Produkts gegenüber den Herstellkosten immer dominanter [126]. In diesem Zusammenhang wird von einer Entstehungszyklusexpansion und einer Marktzykluskontraktion gesprochen [114].

Aber auch der verstärkte Einfluss von Umweltgesichtspunkten bleibt nicht ohne Auswirkungen:

- Nachsorgekosten, zum Beispiel infolge gesetzlich vorgeschriebenen Recyclings, gewinnen in der Kostenstruktur eines Produkts deutlich an Bedeutung.

Die LZK kann hier dazu beitragen, die bei herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsanalysen nicht darstellbaren Gegebenheiten hinsichtlich des Einflusses von Vor- und Folgekosten in eine vergleichende Bewertung (zum Beispiel von Technologiealternativen) gleichberechtigt zu den Herstellkosten einfließen zu lassen. Ferner können mittels der LZK auch die Auswirkungen von Kostensubstitutionsbeziehungen auf die Gesamtkosten des Produkts im Lebenszyklus aufgezeigt und damit dann die Trade-offs zwischen Zusatzkosten in einer Lebensphase und erzielbarer Reduktion in anderen Lebenszyklusabschnitten bestimmt werden [76].

Paradebeispiel der konsequenten Einbeziehung des LZK-Konzepts in Entwicklungsvorhaben der jüngeren Vergangenheit ist die Luft- und Raumfahrtindustrie in den USA. Um die Generalzielsetzung des Industriezweigs der Implementierung einer integrierten Produkt- und Prozessentwicklung auf Basis der Prinzipien des Concurrent Engineering und Total Quality Management zu erreichen, wurde das "Life Cycle Engineering" als geeigneter Ansatz und die LZK als geeignetes Instrument identifiziert. Zwei aktuellere US-Forschungsprogramme mit Luftfahrtbezug, das "Affordable Systems Optimization"- und das "Affordable Design and Manufacturing"-Programm weisen diesbezüglich konkrete Teilziele auf [127]. Im Rahmen der Arbeiten werden problemspezifische LZK-Modelle entwickelt und zur Optimierung von Gesamt- oder Teilsystemen eingesetzt. Ein ganze Reihe von LZK-Studien zu verschiedenen Flugzeugsystemen wurden veröffentlicht. Als Beispiel ist die Untersuchung zu unterschiedlichen Flügelkonzepten für Mittelstreckenpassagierflugzeuge unter verschiedenen Optimierungsanforderungen anzuführen (siehe Bild 2-1). Es zeigt sich die starke Abhängigkeit der Lösung (in diesem Fall das Flügelkonzept) vom jeweiligen (Kosten-)Optimierungsziel.

Auch die Automobilindustrie ist aufgrund der relativ hohen Komplexität und der langen Nutzungsdauer der Produkte prädestiniert für die Anwendung der LZK. Bisheriger Anwendungsschwerpunkt in diesem Industriezweig war die Unterstützung von Entscheidungsprozessen in der F&E [80], wie Studien zu den Gesamtkosteneffekten der Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren zeigen [128-130].

Neben den praxisrelevanten Arbeiten der Industrie zum Thema Lebenszykluskostenrechnung fand auch seitens der Wirtschaftswissenschaften eine vielschichtige, vor allem theoretisch-methodisch orientierte Diskussion statt, deren explizite Erläuterung hier zu weit führen würde; eine synoptische Übersicht ist z.B. bei Zehbold [114] zu finden.

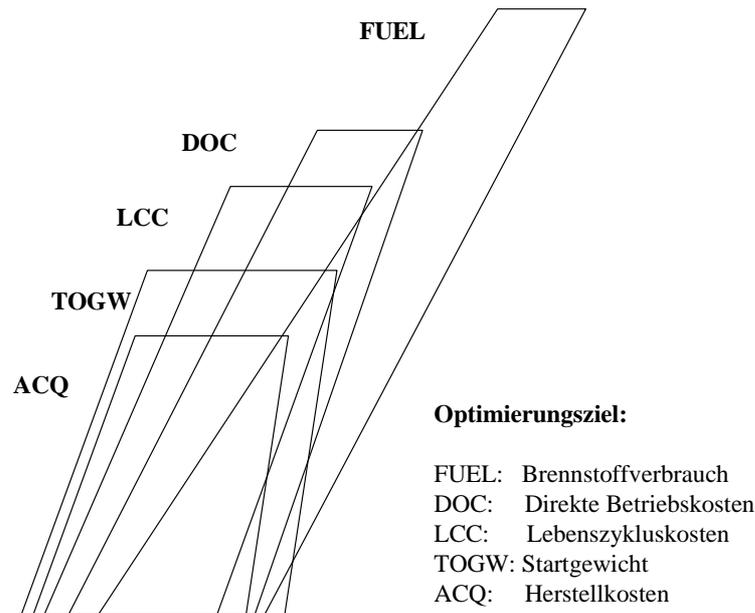


Bild 2-1 Nach unterschiedlichen Kostenzielen optimierte Flügelformen für Mittelstreckenpassagierflugzeuge [131]

2.2.3 EDV-gestützte LZK-Modelle

Aufgrund der Systematik und der Anwendungsoptionen in der Praxis liegt es nahe, die Methode der LZK auch in EDV-gestützten Modellen umzusetzen. Pionier auf diesem Gebiet der LZK-Modelle war die Luft- und Raumfahrtindustrie. Wie schon bei der herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde auch bei der LZK-Modellentwicklung unter anderem der Ansatz der parametrischen Kostenschätzung angewendet. LZK-Schätzalgorithmen zur Extrapolation von zu erwartenden Systemkosten auf Basis von Systemplandaten wurden aus den Daten abgeschlossener Projekte mittels Regressionsanalyse abgeleitet [80]. Bekanntestes parametrisches Modell ist das PRICE (Programmed Review of Information for Costing and Evaluation) von General Electric, das u.a. bei Luftfahrtbeschaffungsprogrammen oder Fernmeldesatellitenprojekten zur Identifikation der gesamtkostenoptimalen Lösungen bei Entscheidungsproblemen zum Einsatz kam [132]. Anwendungen des PRICE-Modells sind auch im Zusammenhang mit LZK-Fragestellungen bei der Entwicklung von Software bekannt [133].

Die NASA verfolgte den Ansatz der Integration eines LZK-Modells in die bestehende Hierarchie von Planungs- und Designinstrumenten für die Flugzeugentwicklung. Das "Flight Optimizing System" (FLOPS) wurde entsprechend durch das Modul "Aircraft Life Cycle Cost Analysis" (ALCCA) erweitert und kann somit gleichzeitig technische Layoutdaten und (Lebenszyklus-)Kostendaten bereitstellen [134]. Bild 2-1 zeigt ein Resultat des Einsatzes von ALCCA.

In Europa sind Arbeiten zur Entwicklung eines LZK-Modells im Zusammenhang mit dem EU-Projekt TOPROCO (Total Product Life-Cycle Cost Estimation) bekannt. Ziel war hier die Entwicklung eines Werkzeugs zur recyclinggerechten Konstruktion und Vorkalkulation auf Basis des Life-Cycle-Konzepts mit Schwerpunkt Elektronik/Elektroindustrie.

Fokus der Arbeiten war allerdings weniger der Gesamtlebenszyklus von Produkten als vielmehr die Nachsorgekosten am Ende des Lebenszyklus.

Bei den bisher entwickelten LZK-Modellen sind im Hinblick auf die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit folgende Punkte zu problematisieren:

- Die zumeist implementierte empirisch basierte Schätzmethodik (parametrische Modelle) erlaubt keine Anwendung bei Entscheidungsaufgaben mit stark innovativem Hintergrund.
- Der allgemein hohe Abstraktionsgrad der Modelle und das daher niedrige Niveau der modellinternen Technologieabbildung ermöglicht keine detaillierte Analyse von technologie-spezifischen Fragestellungen.

2.2.4 Bisherige Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung für FKV

Neben der Betrachtung von unterschiedlichen Materialtechnologien im Rahmen allgemeiner Lebenszykluskosten-Untersuchungen gibt es erste Anwendungen des LZK-Konzepts spezifisch für FKV. In den USA wurden im Rahmen von Entwicklungsvorhaben FKV-Bauteilen bzw. Strukturen für die zivile Luftfahrtindustrie mittels spezifisch modifizierter Lebenszykluskostenrechnungsmethoden bewertet [135]. Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die Erkenntnis, dass gerade im zivilen Luftfahrtsektor nicht die Herstellkosten sondern die Betriebs-, Wartungs- und Reparaturkosten in der Gesamtlebenszykluskostenstruktur eines FKV-Bauteils hervortreten. Die im Zusammenhang mit Luftfahrtanwendungen von FKV-Bauteilen relevanten Determinanten der Lebenszykluskosten wurden hier sehr detailliert herausgearbeitet, und – wenn auch unvollständig – hinsichtlich der Kostenwirkungen bewertet. Auch die europäische Luftfahrtindustrie hat sich parallel zur Entwicklung größerer Strukturbauteile aus FKV mit der Thematik der Lebenszykluskosten beschäftigt. Zum Beispiel wurde Zahlenmaterial zum Nachweis der Vorteilhaftigkeit des FKV-Seitenleitwerks des Airbus A310 gegenüber herkömmlichen Leichtmetallbauweisen hinsichtlich der Lebenszykluskosten veröffentlicht [20].

Eine weitere beachtenswerte Pilotanwendung der LZK für FKV-Strukturen liegt im Bereich des Sektors "Bauwesen". Am "National Institute for Standards and Technology" (NIST) wurde ein entsprechendes LZK-Modell entwickelt [136]. Der Kostenerfassungsrahmen des NIST-Modells ist sowohl zeitlich (Initialplanung bis Verschrottung) als auch inhaltlich sehr weit gesteckt. Aufgrund der Konzentration der Untersuchung auf den betrachteten Anwendungsbereich Bauwesen, ist aber die FKV-Technologie nicht explizit im Modell abgebildet.

Bezüglich des FKV-Einsatzes im Automobilbereich wurden in den USA vergleichende Bewertungen von Stahl- und FKV-Bauweisen für Pkw-Karosserien mittels LZK-Analysen erarbeitet. Dabei wurden in der Regel vereinfachend nur die Herstellkosten, Kraftstoffkosten und Recycling-/Entsorgungskosten berücksichtigt [137, 138]. Auch in Europa bzw. Deutschland sind ähnlich gelagerte, singulär auf die Analyse von Einzelaspekten – wie beispielsweise die Senkung der Betriebskosten durch niedrigeren Kraftstoffverbrauch infolge Gewichtsreduktion – ausgerichtete Lebenszykluskostenrechnungen von FKV-Bauteilen bzw. Strukturen seitens der Luftfahrt und der Automobilindustrie bekannt [4, 139]. Aufgrund der eingeführten methodischen Vereinfachungen sind die Ergebnisse der verschiedenen industriellen Studien wenig aussagekräftig.

2.3 Defizite des derzeitigen Stands der Lebenszykluskostenrechnung im Hinblick auf die Untersuchung

Wenngleich die LZK bereits eine gute wissenschaftlich-methodische Durchdringung und eine Anwendungsbasis in einzelnen Industriezweigen gefunden hat, so werden in der Literatur auch gewichtige Argumente genannt, die zur weitergehenden Ausbreitung und Durchsetzung der Methodik – auch insbesondere hinsichtlich einer Anwendung im Kontext mit der FKV-Technologie – zunächst zu bewältigen sind [80, 115, 140]:

- Generell niedriges Vertrauen der Entscheidungsträger in langfristige Kostenschätzungen.
- Mangelnde Bereitschaft, Kostensubstitutionspotenziale konsequent zu nutzen (keine Akzeptanz von höheren Kosten in frühen Lebenszyklusphasen selbst bei nachgewiesenen, höheren Einsparungspotenzialen in späteren Phasen).
- Interessenskonflikte zwischen Herstellern und Nutzern von Teilen bzw. Systemen.

Diese Argumente sind zu überwinden, wenn einerseits ein geeignetes, praxisnahes LZK-Bewertungsinstrument bereitgestellt und andererseits die Tauglichkeit und Vorzüge der Methode bei konsequenter Anwendung durch erfolgreiche Pilotstudien nachgewiesen werden. Genau hier liegen jedoch noch entscheidende Lücken:

- Die von industrieller Seite entwickelten Ansätze und Modelle (sowohl im Allgemeinen als auch speziell für die FKV) bilden jeweils sehr spezifische Sichtweisen der konkreten Einzelzielsetzung ab und sind somit auf Einzelaufgabenstellungen zugeschnitten. Dies schlägt sich in engen Betrachtungsrahmen und starren Bewertungsschemata nieder. Die angewandten Methoden und Ergebnisse sind daher – aufgrund des fehlenden allgemeingültigen methodischen Überbaus – nicht vergleichbar bzw. übertragbar.
- Auf wissenschaftlicher Seite hingegen wurde bisher das Schwergewicht auf die methodische Ausgestaltung der Vorgehensweise, insbesondere unter wirtschaftswissenschaftlichen Aspekten, gelegt. Erste grundlegende Ansätze der Übertragung dieser Konzepte zur Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen für Technologieentwicklungsaufgaben wurden zwar ausgeführt (vgl. z. B. [80]); das Abstraktionsniveau ist jedoch noch immer zu hoch, um eine zielführende Umsetzung der Methode zur Bildung eines umfassenden LZK-Bewertungsmodells für die FKV zu erlauben.

Obwohl die Anwendung der LZK-Bewertungsmethode gerade für die FKV-Materialtechnologie eine Schlüsselfunktion hinsichtlich der Erschließung neuer Marktfelder einnehmen kann und dies auch in der Literatur immer wieder betont wird (vgl. z.B. [63]), ist die Anwendungsintensität in diesem Feld generell bescheiden. Außerdem sind die bisherigen Arbeiten immer auf einzelne FKV-Anwendungssektoren sowie deren spezifische Rahmenbedingungen und Kostenstrukturen ausgerichtet worden. Ebenso ist der zeitliche Horizont der bis dato durchgeführten Untersuchungen oft beschränkt und spart dabei bestimmte, insbesondere für die ganzheitliche Bewertung von FKV relevante, Lebenszyklusphasen aus.

Es fehlt eine umfassende, aber auch auf die spezifischen Belange der Analyse von FKV zugeschnittene Systematik für die Lebenszykluskostenrechnung, die eine vergleichende Bewertung von FKV nicht nur innerhalb eines Anwendungsfeldes, sondern auch zwischen verschiedenen Anwendungsfeldern ohne methodischen Bruch ermöglicht. Diese Systematik ist dann in einem LZK-Modell umzusetzen, das eine detaillierte Abbildung der FKV-Technologie hinsichtlich Materialien, Prozessen und Anwendungsbereichen beinhaltet.

3 Basiskonzept der Lebenszykluskostenrechnung für FKV

Ein fundamentaler Schritt bei der Entwicklung des Instruments zur Lebenszykluskostenrechnung für FKV ist die Definition eines geeigneten Leitkonzepts als Modellgerüst, welches alle möglichen Gestaltungsvariablen und Analyseproblemstellungen berücksichtigt. Ziel dieses Kapitels ist die Ausarbeitung einer entsprechenden Grundstruktur, wobei insbesondere folgende Anforderungen zu beachten sind:

- Vollständige, material-, anwendungs- und verfahrensunabhängige Abbildung des FKV-Lebenszyklus
- Zweckgemäß hoher Detaillierungs- bzw. niedriger Abstraktionsgrad des LZK-Konzepts bei der Abbildung der FKV-Technologie

Damit sollen die Defizite der bisher bekannten Ansätze überwunden werden.

3.1 Strukturierungsansatz des FKV-Lebenszykluskostenkonzepts

Eine geeignete Plattform zur Vorstrukturierung des LZK-Modellgerüsts für die FKV stellt der Systemansatz nach Wübbenhorst [141] dar, der allgemein auf Produkte aber auch auf Technologien übertragen werden kann. Bei dem Systemansatz werden die relevanten Dimensionen der Lebenszykluskosten nach zeitlichem, inhaltlichem und logischem Bezug aufgegliedert.

Die zeitliche Dimension des Systems wird durch die Hauptlebenszyklusphasen Entwicklung, Herstellung, Nutzung/Betrieb und Nachsorge beschrieben. Die inhaltliche Dimension repräsentiert die Gestaltungsvariablen des Systems und wird dabei nach den drei zentralen Merkmalen Leistung, Kosten und Zeit differenziert. Der Prozess der LZK (auch als Problemlösungszyklus bezeichnet) wird nach verschiedenen Aktivitätsebenen untergliedert und als dritte, logische Dimension des Systemansatzes eingefügt. In Bild 3-1 ist der Systemansatz des LZK-Konzepts und dessen Dimensionen dargestellt. Dieser Systemansatz ermöglicht eine lebenszykluskostenorientierte Optimierung des betrachteten Systems durch Kalkulation der bestmöglichen Konfiguration der Gestaltungsvariablen über alle Phasen der Gesamtsystemlebensdauer.

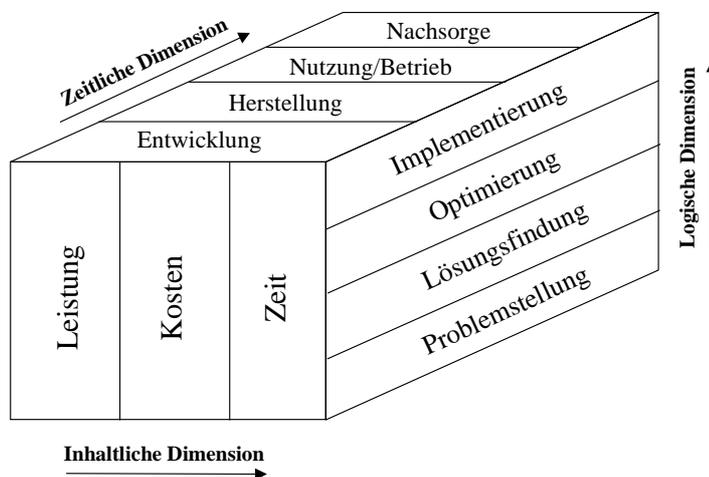


Bild 3-1 Systemansatz des LZK-Konzepts [141]

Die Interdependenzen der Gestaltungsvariablen werden sowohl in zeitlicher als auch inhaltlicher Hinsicht explizit erfasst. Um von diesem hohen Abstraktionsniveau auf ein konkretes Modellgerüst für die FKV-Lebenszykluskostenrechnung zu gelangen, sind die zeitliche, inhaltliche und logische Dimension des Systemansatzes weitergehend zu präzisieren.

3.2 Zeitliche Dimensionen des LZK-Konzepts

Die zeitliche Aufgliederung eines Modells zur Lebenszykluskostenrechnung für FKV muss alle für diese Materialtechnologie spezifischen, wirtschaftlichkeitsrelevanten Lebenszyklusphasen des zu betrachtenden Systems (z.B. FKV-Bauteil oder -Struktur) einbeziehen. Die Gesamtlebensdauer wird deshalb in Anlehnung an das Produktlebenszykluskonzept der Betriebswirtschaftslehre in vier Hauptphasen zerlegt, die dann weiter in Unterphasen aufgelöst werden [142]:

1. Entstehungszyklus
2. Herstellzyklus
3. Betriebszyklus
4. Nachsorgezyklus

Der Entstehungszyklus umfasst alle Phasen der Planung und Entwicklung im Zusammenhang mit FKV-Werkstoffen, -Bauteilen bzw. -Strukturen. Bei den FKV ist dieser Phase besondere Beachtung hinsichtlich Betrachtungsumfang und Detaillierungsgrad zu schenken, da innovative Technologien hohe, die Gesamtwirtschaftlichkeit signifikant beeinflussende F&E-Aufwendungen bedingen können. Der Herstellzyklus steht für die Produktionsphase des FKV-Systems. Je nach Betrachtungsgegenstand kann die Fertigung des Produkts im engen Sinne aber zusätzlich auch die vorgelagerte Herstellung von Halbzeugen oder Zwischenprodukten einbezogen werden. Der Betriebszyklus repräsentiert die wirtschaftliche Nutzungsphase des FKV-Produkts; auch Reparatur- und Wartungsphasen sind hier einzuordnen. Der Nachsorgezyklus deckt Recycling oder Entsorgung des FKV-Systems am Ende des Lebenszyklus ab. Bild 3-2 veranschaulicht die erläuterte Systematik des FKV-Lebenszyklus; die weitergehende Analyse des Lebenszyklus zur LZK-Modellierung wird in Kapitel 4 vorgestellt.

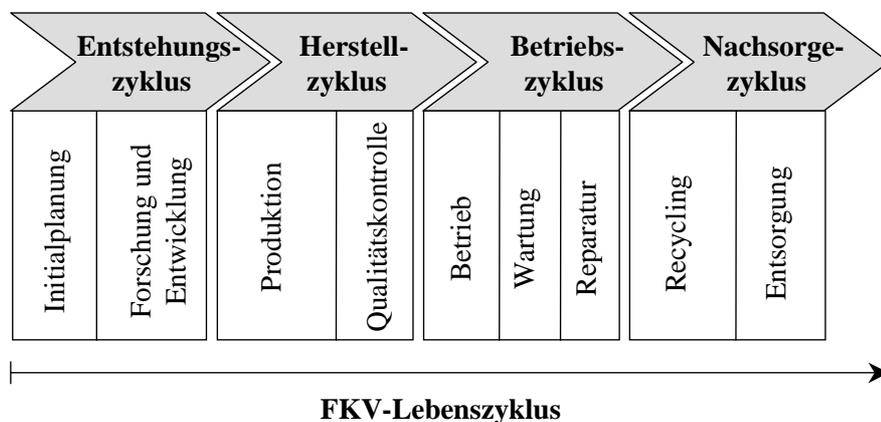


Bild 3-2 FKV-Produktlebenszyklus in Anlehnung an [142]

3.3 Inhaltliche Dimensionen des LZK-Konzepts

3.3.1 Kosten als inhaltliche Gestaltungsvariable des Konzepts

Die Strukturierung der Kosten muss sich primär an den vorstehend dargelegten Lebenszyklusphasen orientieren. Dadurch ist gewährleistet, dass alle für die Aufgabenstellung relevanten Kostenfaktoren berücksichtigt werden. Dies ermöglicht gleichzeitig – unter Einbeziehung der nachstehend erläuterten Gestaltungsvariable "Zeit" – die Berechnung von Trade-off-Beziehungen zwischen einzelnen Kostenpositionen im Gesamtkontext des Lebenszyklus [76]. Bild 3-3 zeigt eine Grobstruktur der Kosten für das LZK-Konzept.

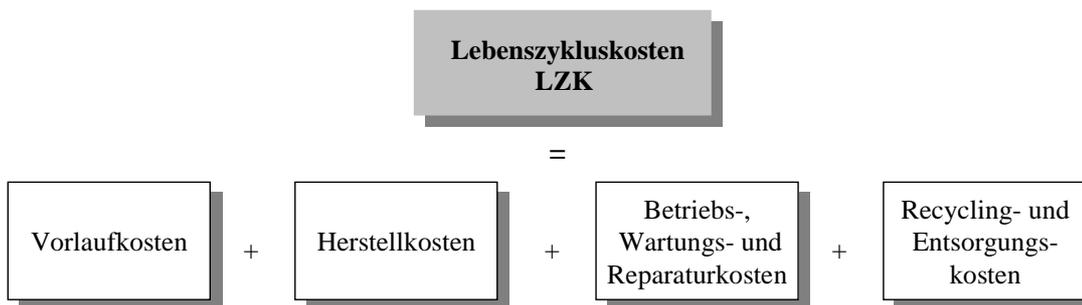


Bild 3-3 Kostengrobstruktur des LZK-Konzepts

Bei der weitergehenden Spezifikation der Kostenstruktur sind neben den allgemeinen auch FKV-spezifische Kostenpositionen explizit auszuweisen. Eine im Zusammenhang mit FKV – insbesondere bei Vergleichsanalysen mit herkömmlichen Materialtechnologien – besonders wichtige Kostenposition können die Technologieeinführungskosten darstellen. Hierunter werden alle Kosten subsumiert, die indirekt aus der Einführung einer neuen FKV-Technologie in den Produktionsprozess bzw. eines neuartigen FKV-Bauteils in die Anwendungsbereiche resultieren. Technologieeinführungskosten sind unter den Entstehungszykluskosten einzuordnen. Eine beispielhafte Zusammenstellung von Ursachen gibt Bild 3-4.

F&E	Produktion	Nutzung/Betrieb	Entsorgung/Recycling
<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung von <ul style="list-style-type: none"> - Materialcharakteristika - Materialverhalten unter Umwelteinflüssen - Sicherheitsaspekte • Entwicklung QS-Verfahren • Entwicklung Verbindungstechnik • Demonstrationsprojekte • Prozessentwicklung • Auslegungsrichtlinien • Zulassung, Zertifizierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderte Personalqualifikation • Anpassung anlagentechnisches Umfeld • Neue Anforderungen an Logistiksysteme • Neue Methoden im Qualitätswesen • Neue Umwelttechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderte Personalqualifikation • Neue Wartungs- und Inspektionsmethoden • Neue Reparaturverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Verfahren • Neue Umwelttechnik • Neue Logistiksysteme

Bild 3-4 Ursachen von Technologieeinführungskosten bei neuen Materialien

3.3.2 Zeit als inhaltliche Gestaltungsvariable des Konzepts

Der besondere Vorteil der LZK liegt darin, interperiodische Kostensubstitutionspotenziale zwischen einzelnen Kostenpositionen schon in der frühen Entwicklungsphase von Produkten aufzeigen zu können. Durch Analyse der Trade-off-Beziehungen zwischen den einzelnen Kostenpositionen in verschiedenen Lebenszyklusphasen lässt sich die lebenszykluskostenminimale Konfiguration des betrachteten Systems und die zugehörige zeitliche Kostenstruktur (Zeitpunkt und Höhe des Kostenanfalls) bestimmen.

Bild 3-5 verdeutlicht diesen zeitlichen Aspekt des LZK-Konzepts anhand eines Beispiels. Die linke Grafik in Bild 3-5 zeigt die vereinfachte, abgeschätzte Lebenszykluskostenstruktur eines geplanten FKV-Bauteils für die Automobilindustrie.

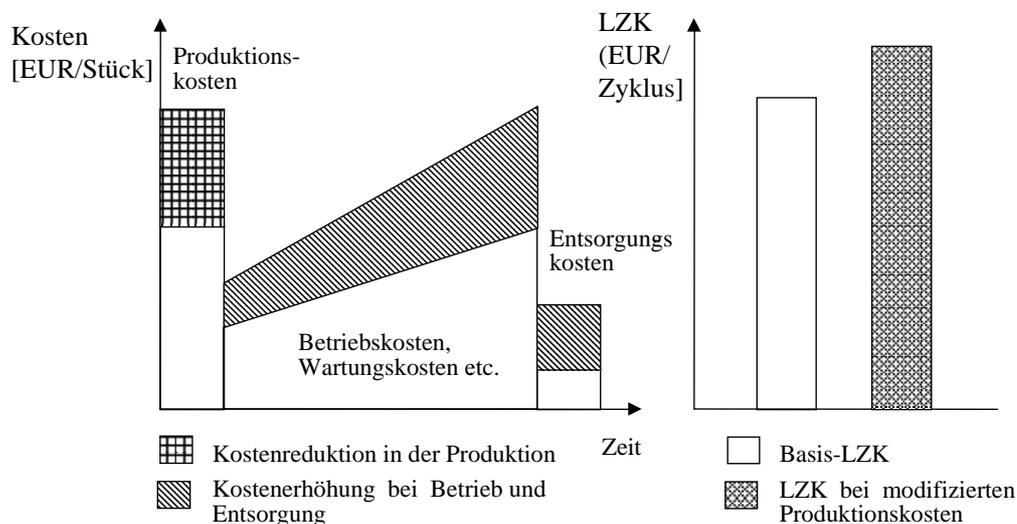


Bild 3-5 Beispiel: Interperiodische Kostensubstitution und resultierende LZK-Effekte

Der Hersteller des Produkts strebt niedrigere Produktionskosten an und beabsichtigt daher die Anwendung kostengünstigerer Materialien. Durch Lebenszykluskostenanalyse werden die Kosteneffekte der Maßnahmen in den verschiedenen Phasen aufgedeckt (z.B. höhere Betriebskosten infolge eines höheren Strukturgewichts und höhere Entsorgungskosten infolge schlechterer Verwertungsmöglichkeiten). Im rechten Teil der Grafik werden die Auswirkungen der geplanten Maßnahme auf die Gesamtlebenszykluskosten bewertet. Die geplante Kostenreduktion in der Produktion führt bei dem Beispiel zu insgesamt höheren Lebenszykluskosten. Unter diesem Gesichtspunkt wäre die Maßnahme somit abzulehnen.

Die Gestaltungsvariable "Zeit" weist allerdings nicht nur im übergeordneten Zusammenhang mit den interperiodischen Kostensubstitutionsbeziehungen eine große Bedeutung für das LZK-Konzept auf. Der Faktor Zeit ist aufgrund des periodenübergreifenden Charakters der LZK auch hinsichtlich der anzuwendenden Methode der Kostenermittlung relevant:

- Da die einzelnen Kostenpositionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Verlauf des Lebenszyklus anfallen, lassen sich diese zur Berechnung der Gesamtlebenszykluskosten nicht einfach addieren. Direkt verrechenbar und vergleichbar sind nur diejenigen Kosten, die sich auf einen identischen Zeitpunkt beziehen.

Um die Vergleichbarkeit von zu verschiedenen Zeitpunkten anfallenden Kosten zu gewährleisten, muss je nach Bezugszeitpunkt der Analyse eine Auf- oder Abzinsung der einzelnen Kostenbeträge vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die später beschriebenen, aus der dynamischen Investitionsrechnung entlehnten Methode zur zeitlichen Harmonisierung der Kosten eigentlich nur für pagatorische Größen zugelassen ist. Demgegenüber wird die Methode in dieser Arbeit unter Bezugnahme auf Kloock [143] und Lücke [144] auf Kosten als kalkulatorische Rechengrößen angewandt.

Das Vorgehen ermöglicht, die Zeitpräferenz von Entscheidungsträgern bei Entwicklungsprojekten in der Kostenberechnungsmethodik abzubilden, da aus betriebswirtschaftlichem Blickwinkel heutige Kosten gegenüber zukünftigen Kosten höher zu bewerten sind. Dahinter verbirgt sich die modellhafte Annahme, dass im Zeitraum zwischen Bezugszeitpunkt der Kostenanalyse und "Fälligkeitsdatum" einer Kostenposition die zwischenzeitlich freien (noch nicht als Kosten abgeflossenen) Finanzmittel am Kapitalmarkt zinsgewinnbringend angelegt werden können bzw. während diesem Zeitabschnitt keine zusätzlichen Mittel vom Kapitalmarkt zinskostenwirksam aufgenommen werden müssen.

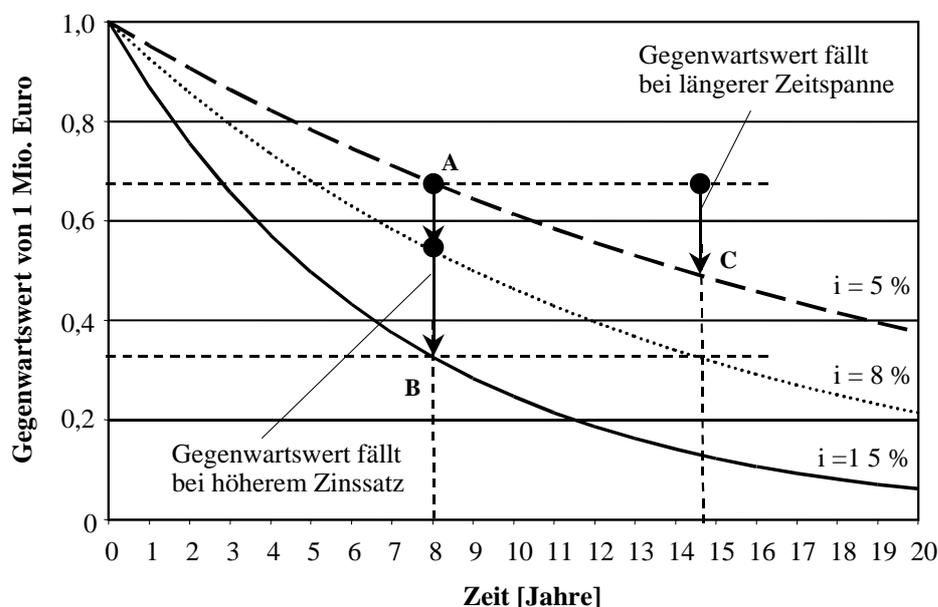


Bild 3-6 Gegenwartswert von 1 Mio. Euro in Abhängigkeit von Zeitpunkt des Kostenanfalls und Zinssatz

In der Regel wird bei LZK-Analysen das Datum der Analyse (Gegenwart) als Bezugspunkt definiert. Deshalb erfolgt für alle später im Lebenszyklus auftretenden Kosten eine entsprechende Diskontierung. Je später eine Kostenposition im Lebenszyklus anfällt, desto niedriger wird der Gegenwartswert dieser Kostenposition bei der LZK bewertet. Der in die Berechnung des Gegenwartswerts einzubeziehende Zinssatz wird entweder aus den jeweiligen Gegebenheiten auf dem Kapitalmarkt sowie den spezifischen Finanzungsverhältnissen abgeleitet oder im Kontext mit den sonstigen Annahmen zu den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Analyse festgelegt. Bild 3-6 zeigt den Gegenwartswert von 1 Mio. Euro in Abhängigkeit der Zeitspanne zwischen Bezugszeitpunkt ($t=0$) und Zeitpunkt des Kostenanfalls sowie des Zinssatzes.

3.3.3 Leistung als inhaltliche Gestaltungsvariable des Konzepts

Im abstrakten Lebenszykluskosten-Konzept nach Wübbenhorst [141] wird die Leistung des zu betrachteten Systems als dritte Gestaltungsvariable angeführt. Unter Systemleistung ist dabei die Gesamtheit aller technischen Eigenschaften eines Systems zu verstehen. Die Einführung einer Gestaltungsvariable „Leistung“ in das LZK-Konzept für die FKV führt jedoch zu methodischen Problemen:

- Die Definition eines Systemleistungsindikators ist kritisch, da immer ein breites, inhomogenes Spektrum von Einzelkriterien die technische Gesamtleistungsfähigkeit von FKV-Bauteilen oder -Strukturen beschreibt. Diese Einzelkriterien wiederum sind in kardinale Kriterien (z.B. Standard-Werkstoffkennwerte des "reinen Werkstoffs", ermittelt mit Standardprüfmethoden) und dem realen gestalt- und belastungsabhängigen Verhalten der FKV im Bauteil oder in der Struktur, zu unterteilen. Außerdem ist die den Kriterien beizumessende Relevanz – und damit die Gewichtung innerhalb eines Leistungsgesamtindikators – stark von dem jeweiligen konkreten Anwendungshintergrund abhängig.
Um eine hinreichende Abbildung der Leistungsvariable im LZK-Konzept für die FKV sicherzustellen, wäre eine Auflösung aller Leistungseinzelkriterien im Detail und deren Verknüpfung mit den LZK-Gestaltungsvariablen Kosten und Zeit notwendig. Dies erscheint aufgrund der sich ergebenden Komplexität der Bewertungsmatrix praktisch unlösbar.
- Im Allgemeinen werden an FKV-Anwendungen in den relevanten Anwendungsfeldern sehr konkrete technische Anforderungen gestellt, welche die zu erreichende Minimalleistungsfähigkeit definieren. Somit ist die Systemleistungsfähigkeit bei FKV keine freie Gestaltungsvariable. Technische Anforderungen gelten dabei in der Regel nicht nur punktuell für die Eigenschaften direkt nach Herstellung eines FKV-Bauteils, sondern werden auch für spätere Lebenszyklusphasen (Nutzung, Recycling, Entsorgung) exakt festgelegt.
In der Praxis zielen Entwicklungsprozesse auf die möglichst genaue Erfüllung der technischen Anforderungen ab, da Unterschreitungen zur generellen Ablehnung der Entwicklungslösung und Überschreitungen erfahrungsgemäss zu weniger wirtschaftlicheren Lösungen führen. Somit ist die technische Leistungsfähigkeit im Falle eines FKV-Systems keine Gestaltungsvariable, sondern fest verankertes Ziel ohne signifikanten Gestaltungsspielraum.

Aus den vorgenannten Gründen wird "Leistung" bei der Konkretisierung des LZK-Konzepts für FKV nicht als zu optimierende Gestaltungsvariable, sondern als eine fixe Zielvorgabe interpretiert, nach der sich die Optimierung der übrigen Gestaltungsvariablen zu richten hat.

3.4 Logische Dimension des LZK-Konzepts

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Konstruktion eines Gerüsts für das LZK-Konzept der FKV ist die Definition eines Grundablaufschemas der LZK-Analyse. Mittels Aufstellung einer Standardabfolge der einzelnen Schritte im LZK-Analyseprozess lassen sich

- einerseits konkrete Vorgaben für den Aufbau des LZK-Modells gewinnen und
- andererseits auch schon im Hinblick auf die spätere Durchführung von LZK-Analysen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verbessern.

Bild 3-7 gibt einen Überblick über das entsprechend der Aufgabenstellung konzipierte, in 9 Einzelschritte untergliederte Grundablaufschema zur LZK-Analyse.

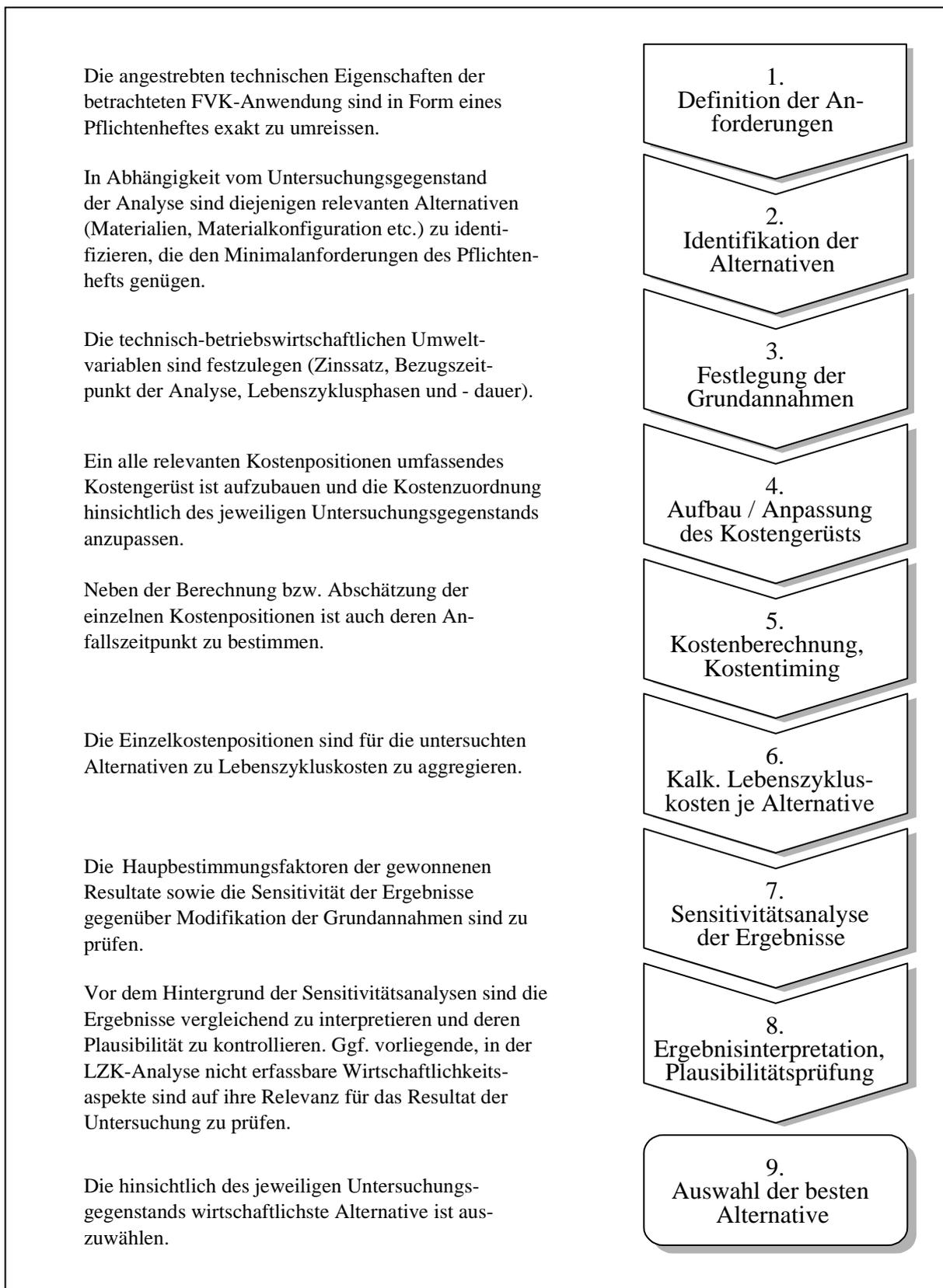


Bild 3-7 Grundablaufschaema der LZK-Analyse für FKV

4 Synthese des LZK-Modells

Ein Kernpunkt der vorliegenden Arbeit ist der Aufbau eines Entscheidungsmodells, welches dem Modellanwender die Bestimmung optimaler Entscheidungsalternativen bzw. Gestaltungsvarianten im FKV-Entwicklungsprozess hinsichtlich der Lebenszykluskosten von FKV-Bauteilen oder Strukturen ermöglicht. Die Bildung des Modells orientiert sich an dem in vier Schritte untergliederten Phasenschema nach Milling [145]:

1. Identifizieren und Spezifizieren des Problems
2. Formulieren des Modells
3. Modellvalidierung und Experimente mit dem Modell
4. Interpretation, Schlussfolgerung

Ausgangsbasis für die nachfolgend beschriebene Formulierung des Modells ist das in Kapitel 3 dargelegte LZK-Leitkonzept. Die Darstellungen konzentrieren sich auf das konzipierte Meta-Modell, den abgeleiteten Modellaufbau und -ablauf sowie die in den einzelnen Modellbausteinen implementierten Kostenberechnungs- bzw. Kostenschätzmethoden.

4.1 Meta-Modell des FKV-Lebenszyklus

Die Lebenszykluskosten von FKV werden durch komplexe technische und wirtschaftliche Wirkbeziehungen der Transformations- und Nutzungsprozesse mit einer Vielzahl von interdependenten Variablen und Nebenbedingungen bestimmt. Zur transparenten und reproduzierbaren Erfassung und Bewertung der Lebenszykluskosten müssen die Zusammenhänge, auf die entscheidenden Grundbeziehungen reduziert, in einem Modell abgebildet werden.

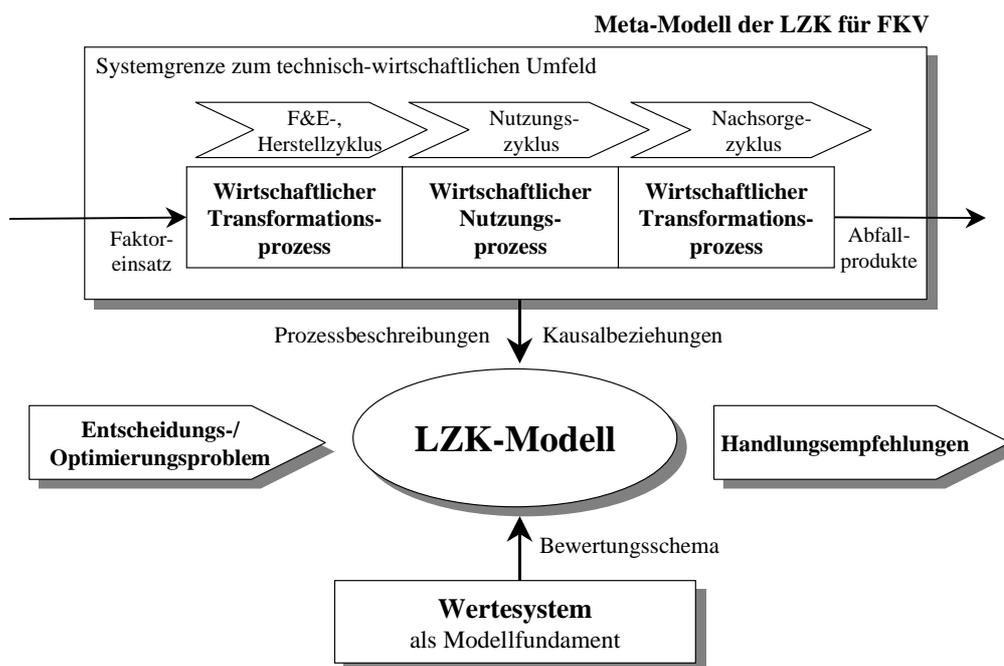


Bild 4-1 Ansatz der LZK-Modellsynthese

Hierzu ist das zu bewertende System "FKV-Lebenszyklus" innerhalb der durch die Problemstellung determinierten Systemgrenze zu analysieren und die LZK-relevanten Kausalbeziehungen zu extrahieren. Aus diesen Informationen ergibt sich der "Bauplan" des Modells. Das Fundament des Modells bildet das zu implementierende Bewertungssystem, welches in der Regel auf allgemein anerkannten, quasi normierten Maßstäben (z.B. betriebswirtschaftliche Kostenrechnungsgrundsätze) abgestützt ist, aber auch, je nach Untersuchungszielsetzung die spezifische Werthaltung des Modellkonstruktors oder -anwenders reflektieren kann. Den skizzierten Ansatz der LZK-Modellsynthese stellt Bild 4-1 dar.

Ein erster Schritt zur Modellkonkretisierung ist der Entwurf des Meta-Modells zum FKV-Lebenszyklus (siehe Bild 4-2). Unter Meta-Modell ist die Beschreibung der grundsächlichen Struktur des zu modellierenden Systems zu verstehen, welche die einzelnen Modellbausteine und deren Beziehungen untereinander definiert.

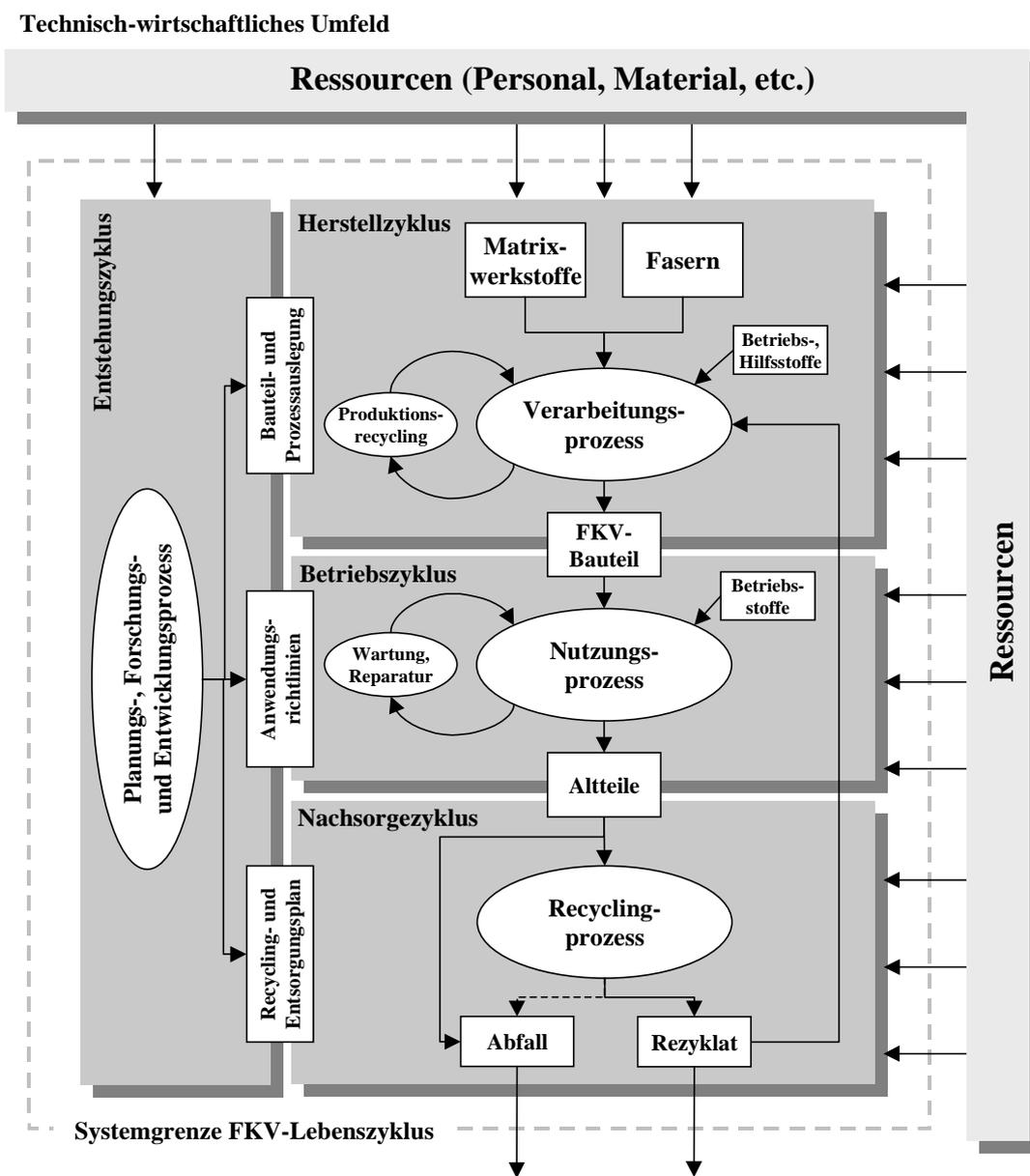


Bild 4-2 Meta-Modell des integrierten FKV-Lebenszyklus

Anhand der Darstellung des Meta-Modells wird die Abgrenzung und Segmentierung des FKV-Lebenszyklus deutlich. In Analogie zur Phasengliederung des FKV-Lebenszyklus wird das Modell aus vier Bausteinen aufgebaut, in deren Zentrum jeweils ein Prozess steht. Die Prozesse sind untereinander oder mit dem technisch-wirtschaftlichen Systemumfeld durch materielle oder immaterielle In- und Outputströme verknüpft und weisen zum Teil Nebenprozesse auf.

Die einzelnen Bausteine des Meta-Modells sind hinsichtlich der Berechnung bzw. Abschätzung der jeweiligen Kosten und deren zeitlichen Zuordnung weitergehend zu konkretisieren. Als gemeinsamer Ansatz wurde eine ressourcenverbrauchsbasierte Stückkostenbewertungsmethode gewählt, die auf die folgende allgemeine Gleichung reduziert werden kann:

$$k_{Pr} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{n=1}^N R_n \cdot p_n \quad (4-1)$$

mit

- k_{Pr} = Stückkosten des Prozesses,
- M = Stückzahl
- N = Anzahl unterschiedlicher Ressourcen,
- R = Konsumierte Ressourceneinheiten
- p = Preis pro Ressourceneinheit

4.2 Modellbaustein FKV-Entstehungszyklus

Im Modellbaustein "FKV-Entstehungszyklus" werden die produkt- bzw. projektbezogenen Kosten des Planungs-, Forschungs- und Entwicklungsprozesses ermittelt. Folglich müssen alle Ressourcenverbräuche der Alternativensuche, -bewertung und -auswahl, Aktivitäten der Forschung und Entwicklung sowie die verschiedenen direkt produktionsvorbereitenden Tätigkeiten berücksichtigt werden [114]. Da im Zusammenhang mit FKV-Produktinnovationen häufig Verfahrensinnovationen (z.B. Herstell- oder Recyclingverfahren) einhergehen, sind die ggf. damit verbundenen Entwicklungskosten einzubeziehen. Die Kosten der betriebswirtschaftlichen Aktivitäten im Entstehungszyklus (Marktbeobachtung, -prognose, etc.) werden hier ausgeklammert, da sie in der betrieblichen Praxis eher allgemeinen gesamtunternehmensbezogenen Charakter haben und somit weniger einem produktspezifischen Entstehungszyklus zuzurechnen sind.

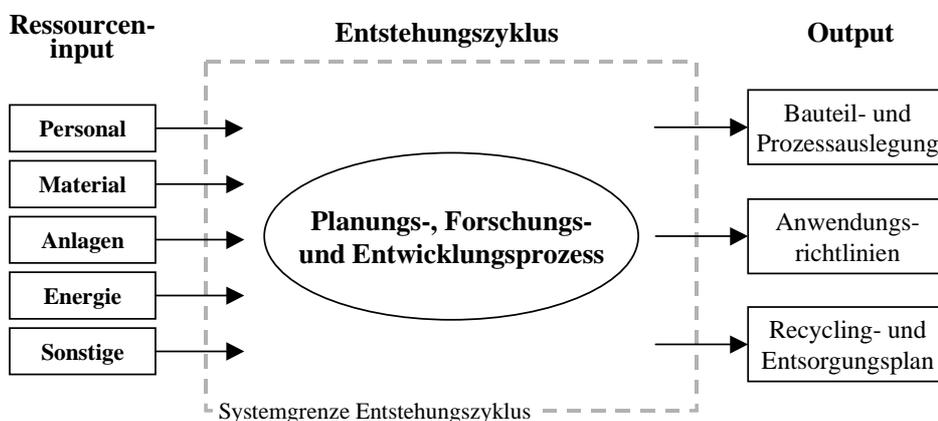


Bild 4-3 Modell des Entstehungszyklusprozesses

Bild 4-3 zeigt die modellhafte Struktur des Entstehungszyklus. Im FKV-Entstehungszyklus werden im wesentlichen Personalressourcen aus dem F&E-Bereich gebunden, die unter anderem wiederum Gebäudekosten, Verwaltungskosten und Kosten forschungsspezifischer Anlagen (z.B. Computer zur Berechnung und Konstruktion etc.) beinhalten. Je nach Entwicklungsgegenstand kommen aber auch weitere relevante Kosten hinzu (z.B. durch Fremdleistungen, Demonstrationsprojekte oder den Aufbau von Technologieplattformen).

Es liegt in der durch zeitliche und technische Durchführungsrisiken gekennzeichneten Natur des FKV-Planungs-, Forschungs- und Entwicklungsprozesses, dass Prognosen des Ressourcenverbrauchs und der damit einhergehenden Kosten im Allgemeinen mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. Somit muss eine geeignete Kostenschätzmethode angewendet werden.

Zur Schätzung der Kosten des Entstehungszyklus im Rahmen des zu entwickelnden Modells wird daher auf einen in der Praxis der Budgetinitialplanung von F&E-Projekten üblichen Ansatz mittels personalkostenbasierter Zuschlagskalkulation zurückgegriffen:

- Ausgangspunkt der Kalkulation ist die Abschätzung des bis zur Erfüllung aller Forschungs- und Entwicklungsziele notwendigen Zeitraums sowie der Personalintensität der F&E-Aktivitäten, aufgliedert nach Personalkategorien. Hieraus ergibt sich überschlägig die Summe der Personalkosten des Entstehungszyklus. Die sonstigen mit dem Personaleinsatz einhergehenden relevanten Kosten der F&E-Aktivitäten (Gebäude-, Verwaltungs-, Energiekosten etc.) sowie Kosten allgemeiner F&E-Anlagen werden als prozentualer Zuschlag auf die F&E-Personalkosten mittels branchen- oder projekttypusspezifischen Pauschalsätzen berechnet. Dabei ist darauf zu achten, dass in den Pauschalsätzen keine zyklusfremden Kosten beinhaltet sind und somit keine Doppelbewertungen auftreten. Darüber hinausgehende, entstehungszykluskostenspezifische Materialkosten, Kosten für Fremdleistungen (z.B. Zertifizierungen) oder/und für aktivitätsspezifische F&E-Anlagen werden fallweise als eigenständige Positionen angesetzt.

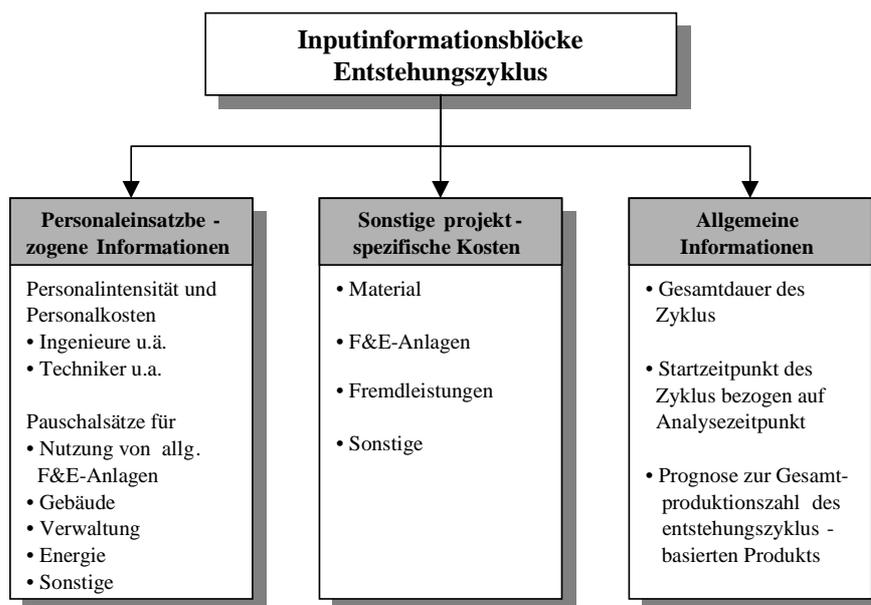


Bild 4-4 Inputinformationen zur Modellierung der Entstehungszykluskosten

Um die Gesamtkosten des Entstehungszyklus auf ein Produkt (FKV-Bauteil, Struktur etc.) umlegen zu können, wird als weitere Inputinformation eine Prognose zur Gesamtproduktionszahl des auf dem Entstehungszyklus basierenden Produkts benötigt. Ferner sind Informationen zur zeitlichen Einordnung des Entstehungszyklus in den Gesamtlebenszyklus erforderlich. Somit ergeben sich insgesamt drei Blöcke von Inputinformationen zur Modellierung des Entstehungszyklus (siehe Bild 4-4):

- F&E-personaleinsatzbezogene Informationen
- Sonstige projektspezifische Kosten
- Allgemeine Informationen zur Kostenumlegung und zeitlichen Zuordnung

Zur Berechnung der Kosten des Entstehungszyklus wird folgende Formel herangezogen:

$$k_{Ent} = \frac{(PI_{Ing} \cdot p_{Ing} + PI_{Tech} \cdot p_{Tech}) \cdot (1 + z_{F\&E,p}) + MK_{Ent} \cdot (1 + z_{F\&E,m}) + AK_{Ent} + FK_{Ent}}{M_{Ent}} \quad (4.2)$$

mit

- k_{Ent} = Entstehungszyklusstückkosten,
- PI_{Ing} = Personaleinsatzintensität Ingenieure u.ä. des Entstehungszyklus (Mannjahre),
- PI_{Tech} = Personaleinsatzintensität Techniker u.ä. des Entstehungszyklus (Mannjahre),
- p_{Ing} = Personalkostensatz Ingenieure u.ä. pro Mannjahr,
- p_{Tech} = Personalkostensatz Techniker u.ä. pro Mannjahr,
- $z_{F\&E,p}$ = Zuschlagsfaktor personalbezogene sonstige F&E-Kosten,
- $z_{F\&E,m}$ = Zuschlagsfaktor materialbezogene sonstige F&E-Kosten,
- MK_{Ent} = entstehungszykluspezifische Materialkosten,
- AK_{Ent} = entstehungszykluspezifische Kosten F&E-Anlagen,
- FK_{Ent} = entstehungszykluspezifische Fremdleistungskosten,
- M_{Ent} = Gesamtproduktionsmenge des entstehungszyklusbasierten Produkts.

Ein höhere Auflösung der Kosten des Entstehungszyklus (z.B. hinsichtlich der betrachteten Personalkategorien) ist zwar prinzipiell möglich, aufgrund der allgemeinen Unschärfe der Abschätzung jedoch nicht zielführend. Im Falle vorliegender Erfahrungswerte oder konkreter Daten zu den Entstehungszykluskosten aus bereits abgeschlossenen, vergleichbaren F&E-Projekten sollten die mittels Schätzung ermittelten Kostendaten verifiziert oder ggf. angepasst werden.

4.3 Modellbaustein FKV-Herstellzyklus

4.3.1 Struktur des FKV-Herstellzyklus

Der Modellbaustein zur Kalkulation der Herstellkosten von FKV-Bauteilen und -Strukturen repräsentiert das Kernelement in dem Gesamtmodell zur FKV-Lebenszykluskostenrechnung. Der Baustein muss das große Spektrum der hinsichtlich Aufbau, Ablauf und Ressourcenverbrauchsstruktur teilweise sehr inhomogenen FKV-Verarbeitungsprozesse abbilden können; somit werden hohe Anforderungen bezüglich Technologieabbildungstiefe und Flexibilität gestellt.

Der Verarbeitungsprozess zur Herstellung von FKV-Bauteilen oder -Strukturen lässt sich zur Modellbildung prinzipiell in sechs Teilverfahrensabschnitte untergliedern: 1. Prepreg-Her-

stellung (Vorimprägnierung; Zusammenführen von Verstärkung und Matrix; Imprägnierung), 2. Konsolidierung, 3. Formgebung sowie ggf. 4. Nachbearbeitung und 5. Fügen.

Je nach darzustellendem Bauteil und angewandter Fertigungstechnologie können diese Abschnitte (in unterschiedlicher Kombination) entweder nacheinander durchlaufen, oder auch in einem integrierten Verfahrensschritt umgesetzt werden. Die ersten drei Verfahrensschritte weisen in der Regel starke verfahrenstechnische Interdependenzen auf und repräsentieren in der Verfahrenskette den "FKV-Verarbeitungsprozess im engeren Sinne" als zentrales Glied. Die optionalen nachgelagerten Sekundärschritte "Nachbearbeitung" und "Fügen" sind demgegenüber in der Regel entkoppelte, verfahrenstechnisch weitgehend unabhängige Glieder der Verfahrenskette. Zum Ablauf der FKV-Verarbeitung können auf jeder Verfahrensstufe Qualitätssicherungs- und/oder Recyclingverfahren als parallele Abläufe integriert werden. Außerdem können je nach Automatisierungsgrad auch Transferschritte für Material, Zwischenprodukte oder Endprodukte zwischen den einzelnen Verarbeitungsstufen angeordnet sein.

Anhand der dargelegten Segmentierung des FKV-Verarbeitungsprozesses lässt sich ein Basisschema des FKV-Herstellzyklus (siehe Bild 4-5) als Grundlage der nachfolgend erläuterten Formulierung des Modellbausteins "Herstellkosten" ableiten.

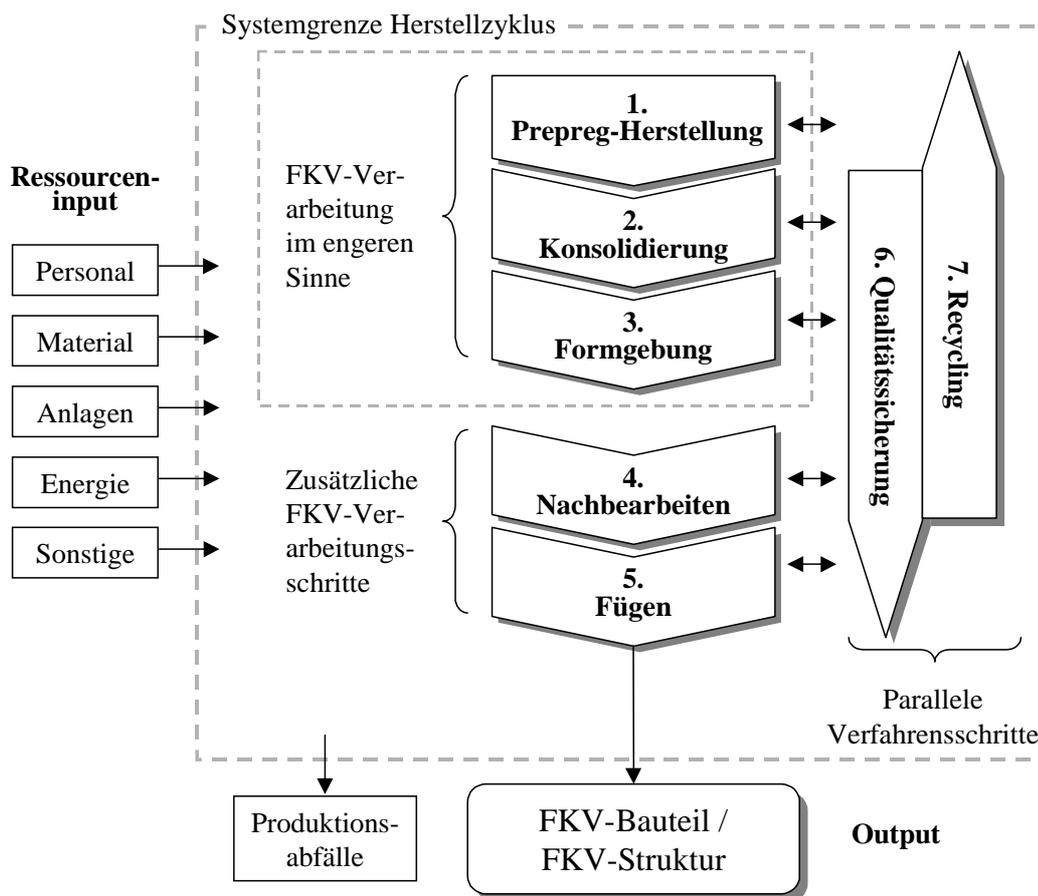


Bild 4-5 Modellhafte Abbildung des FKV-Herstellzyklus

4.3.2 Grundschema der Kostenvorkalkulation des FKV-Herstellzyklus

Methoden zur Prognose von Wirtschaftlichkeitskennzahlen (und damit auch Kostengrößen) von Produktionsprozessen werden bei Investitionsvorhaben im Zusammenhang mit Wirtschaftlichkeitsanalysen angewandt. Aus der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung sind eine Reihe von entsprechenden Standardberechnungsverfahren bekannt (vgl. Bild 4-6), die - je nach Analysegegenstand, zur Verfügung stehendem Umfang und Detaillierungsgrad der Eingangsdaten und Genauigkeit - spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Die Möglichkeiten und Restriktionen der verschiedenen Verfahren werden in der einschlägigen Literatur ausführlich diskutiert (vgl. z.B. [146-149]), so dass an dieser Stelle nicht mehr explizit darauf eingegangen werden muss.

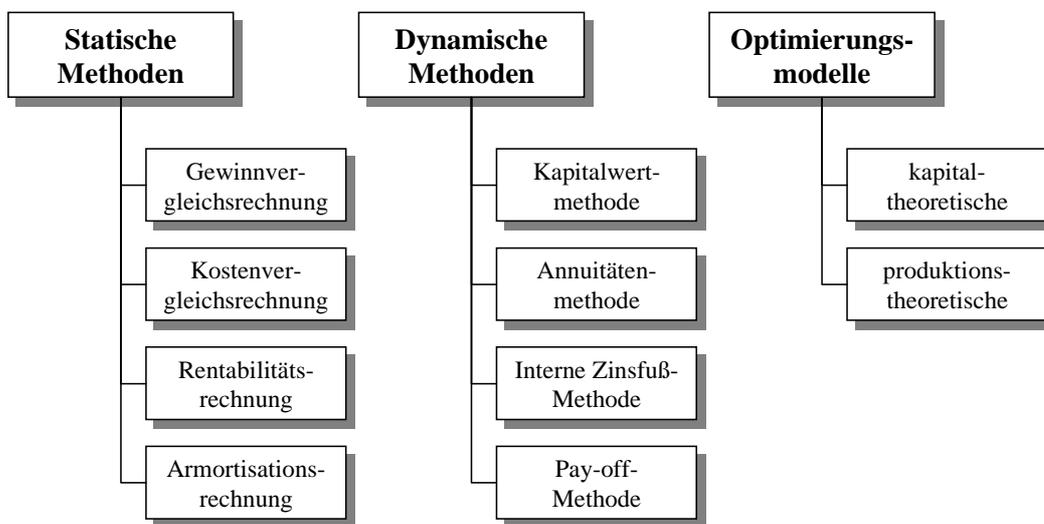


Bild 4-6 Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse aus der Investitionsplanung

In Kap. 2.1 wurde dargelegt, dass in der Praxis bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen im Kontext mit FKV-Entwicklungsvorhaben häufig die vergleichende wirtschaftliche Bewertung anhand des Bewertungskriteriums "Herstellkosten" im Vordergrund steht. Aus diesem Grund kann bei der Formulierung des Modellbausteins Herstellzyklus im Rahmen der Entwicklung des LZK-Modells auf eine Reihe von Vorerfahrungen zurückgegriffen werden. Folgende Problempunkte sind dabei allerdings zu beachten:

- Unvollständigkeit, Unbestimmtheit, Unsicherheit in der Datenbasis
Da Wirtschaftlichkeitsanalysen im Zusammenhang mit der FKV-Technologie zumeist auch neuartige, noch nicht realisierte Herstellprozesse oder Produkte untersuchen, liegt häufig nur eine sehr schmale, unvollständige Datenbasis für die Vorkalkulation der Kosten vor. Dies liegt darin begründet, dass im Entwicklungsstadium von innovativen FKV-Fertigungstechnologien oder -Bauteilen die wirtschaftlich relevanten Beziehungen zwischen dem wirtschaftlichen Umfeld, den (fertigungs-)technischen Rahmenbedingungen und dem resultierenden verfahrensspezifischen Input und Output nur schwierig quantifizierbar beziehungsweise prognostizierbar sind. Es handelt sich zumeist um neuartige Konstellationen, für die keine Vorerfahrungen und Daten existieren. Neben der Unvollständigkeit ist die Daten-situation i.d.R. auch durch Unbestimmtheit (Informationen sind nicht exakt) und Unsicherheit (die Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit von Information ist nicht bekannt) gekennzeichnet.

Ein wichtiges Instrument zur Kompensation der Problematik ist das Aufzeigen des Einflusses von Unvollständigkeit, Unbestimmtheit und Unsicherheit der Eingangsdaten auf das Ergebnis durch Sensitivitätsanalysen. Diese lassen sich jedoch nur mit vertretbarem Aufwand verwirklichen, wenn das zugrundeliegende Berechnungsverfahren eine relativ geringe Komplexität aufweist.

- Komplexität und Inhomogenität der Fertigungsverfahren**
 Die Auswahl- und Gestaltungsmöglichkeiten bei FKV-Fertigungsverfahren sowohl hinsichtlich der Ausgangsmaterialien als auch hinsichtlich der technischen Umsetzung der Verfahrensschritte sind groß. Aufgrund dieser Vielfalt ergibt sich eine unüberschaubare Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten. Bild 4-7 stellt exemplarisch einen Ausschnitt der Kombinationsoptionen für thermoplastische FKV dar. Obwohl hier lediglich die Verstärkungs- und Matrixmaterialien hinsichtlich übergeordneter Merkmale unterschieden sind, ergibt sich bereits auf dieser Analyseebene ein komplexes Schema. Beispielhaft sind einige der aus diesem Schema ableitbaren Prozesse zur Herstellung von Bauteilen aus thermoplastischen FKV in Tabelle 4-1 zusammengestellt.
 Aus der Vielfalt an Möglichkeiten hat sich in Abhängigkeit von den zu verarbeitenden Materialien, der darzustellenden Produktcharakteristika oder den angestrebten Produktanwendungsfeldern ein breites Spektrum unterschiedlichster Verfahren zur Verarbeitung von duromeren oder thermoplastischen FKV etabliert.

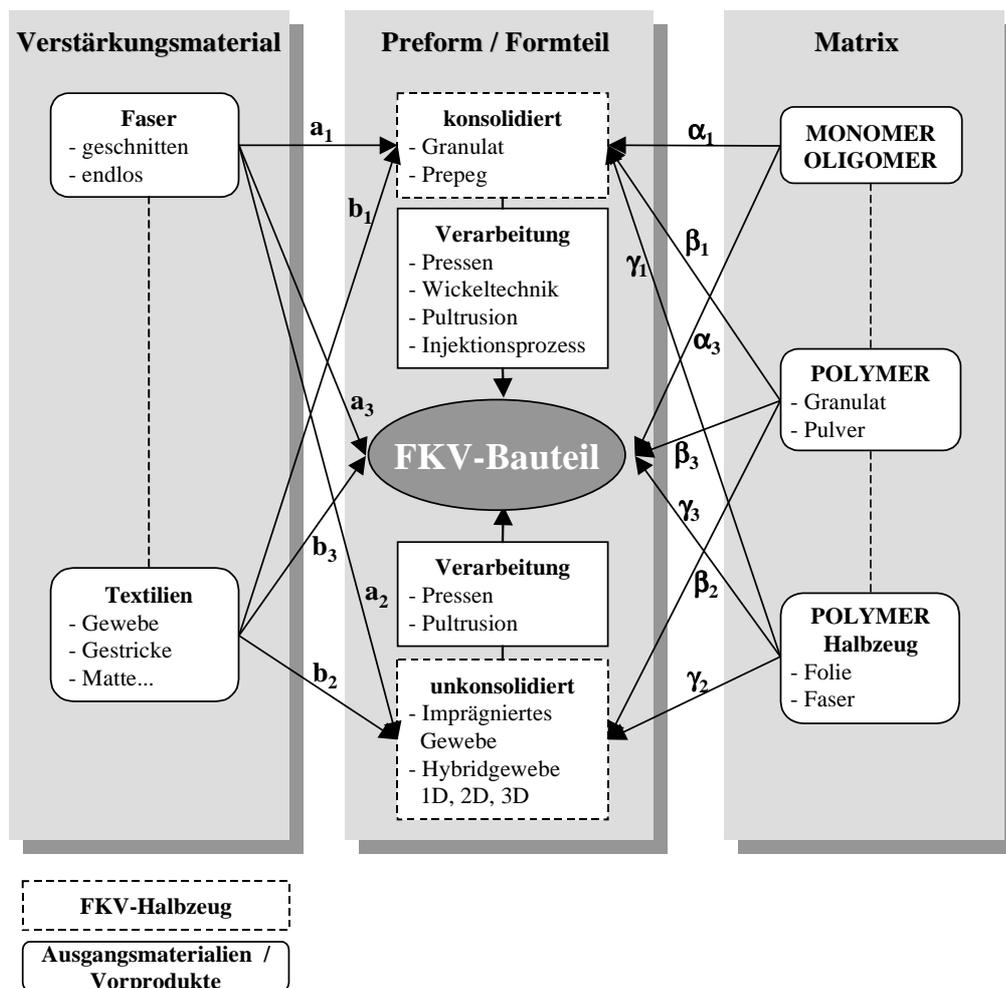


Bild 4-7 Überblick über die Verarbeitungsoptionen thermoplastischer FKV nach [150]

Tabelle 4-1 Exemplarische Zusammenstellung von aus Bild 4-7 ableitbaren Prozessen zur Herstellung thermoplastischer FKV-Bauteile nach [150]

Teil-schritte	Verfahren	Produkt, Vorprodukt	Formgebungsprozess
$a_1 + \beta_1$	Schmelzimpregnierung, Pulverimpregnierung	Verstärktes Granulat UD-Prepreg, Bändchen	Spritzgießen, Extrusion Tapelegen, Wickeln
$a_2 + \gamma_2$	Textiltechn. Strukturierung, Hybridweben, Flechten	Hybridgarn, -gewebe, -gewirke	Wickeln, Pultrusion, Pressen
$a_3 + \alpha_3$	TP Reaction Injection Molding – RIM	entfällt	entfällt
$a_2 + \beta_2$	Pulverimpregnierung	Prepreg	Wickeln, Pultrusion
$b_2 + \beta_2$	Suspensionsimpregnierung		Pressen, Thermoformen
$b_1 + \gamma_1$	Folienimpregnierung	GMT, Organoblech	Pressen, Thermoformen
$b_2 + \gamma_2$	Nadeln, textiltechnische Strukturierung	Hybridgarnmatte, -vlies, -gewebe	Pressen, Thermoformen
$b_3 + \alpha_3$	TP Structural Reaction Injection Molding - SRIM	entfällt	entfällt
$a_3 + \beta_3$	On-line-Impragnierung	entfällt	Wickeln, Pultrusion

Charakteristisch für jede Verfahrensgruppe sind individuelle verfahrenstechnische Strukturen und Merkmale. Selbst innerhalb der Verfahrensgruppen existieren i.d.R. noch eine beträchtliche Anzahl von Verfahrensvarianten, die signifikante Unterschiede hinsichtlich wesentlicher, kostenrelevanter Verfahrensmerkmale und -strukturen aufweisen können.

Einstufige, weitgehend manuelle Verfahren mit geringstem anlagentechnischem Aufwand stehen komplexen, vielstufigen, vollautomatisierten Prozessketten mit hohem Investitionsbedarf gegenüber. Auch die extremen Divergenzen bei den Zykluszeiten, einem besonders wirtschaftlichkeitsrelevanten Charakteristikum, verdeutlichen die Inhomogenität der FKV-Fertigungsverfahren: Die Zykluszeiten können wenige Sekunden betragen (z.B. Massenfertigung mittels Kurzfaserspritzguss), aber auch bei einigen Tagen liegen (z.B. Duromerwickeltechnik zur Fertigung von Großstrukturen).

Mit Blick auf die Konzeption des Modellbausteins zur Kalkulation der Kosten im Herstellzyklus und der dabei auszuwählenden Schätzmethodik ergeben sich aus den Problempunkten die folgenden Anforderungen:

- Eine für die Anwendung in einem LZK-Modell geeignete Methode zur Herstellkostenschätzung muss bezüglich des Dateninputs möglichst anspruchslos sein.
- Die auszuwählende Methode muss die Kostenschätzung auch unter Unbestimmtheit und Unsicherheit der Inputinformationen bei vertretbarem Aufwand ermöglichen.

Bei Methoden, die auf Basis einer größeren Anzahl komplexer funktionaler Abbildungen aufgebaut sind, ist dies entweder nicht oder nur mit exorbitantem Aufwand zu lösen. Somit ist eine Methode mit möglichst geringem Komplexitätsgrad auszuwählen.

- Eine geeignete Methode muss für alle zu untersuchenden FKV-Fertigungsverfahren und FKV-Bauteile universell und flexibel, ohne methodische Brüche anwendbar sein. Im Falle der Notwendigkeit zur Variation der Methode in Abhängigkeit von Aufbau oder Gestalt der zu untersuchenden Verfahren oder Bauteilen würden inkomparable Ergebnisse resultieren, die der anzustrebenden vergleichenden Bewertung und Interpretation entgegenstehen.

Aufgrund dieser Anforderungen erscheint die "klassische", ingenieurmäßige Herstellkostenvorkalkulation, wie sie beispielsweise in den entsprechenden VDI-Richtlinien [73, 151] oder der diesbezüglichen Literatur [82] dokumentiert ist, als Ausgangspunkt für den Aufbau des Herstellzyklus-Modellbausteins im LZK-Modell geeignet. In Bild 4-8 ist das Grundschemata einer derartigen, ressourcenverbrauchsorientierten Schätzmethode veranschaulicht. Bei dieser Methode werden mittels der Inputdaten zunächst kostenrelevante Zwischengrößen (z.B. Anzahl benötigter Prozessketten) abgeleitet und dann die Kostengrößen nach Kostenarten über die kostenmäßige Bewertung des vorkalkulierten Ressourcenverbrauchs (Personal, Kapital etc.) berechnet. Die formelle Ausführung der Methode ist in Kap. 4.3.5 erläutert.

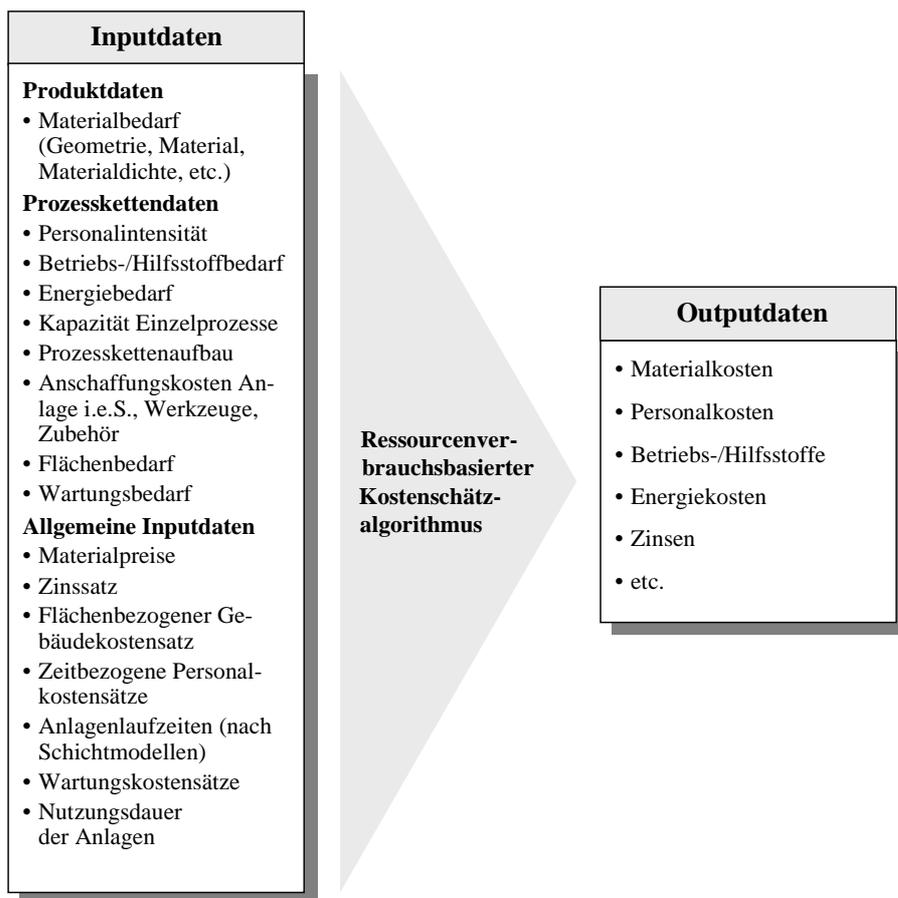


Bild 4-8 Schema der Standard-Herstellkostenkalkulation

Um dem Anspruch an das zu entwickelnde LZK-Modell für die FKV zu genügen, sind allerdings drei Erweiterungen in die Standardmethode der Herstellkostenkalkulation einzuarbeiten:

- Bewertung des produktionsintegrierten Recyclings
- Bewertung nicht recyclingfähiger Produktionsabfälle
- Lernkurveneffekte

4.3.3 Bewertung von produktionsintegriertem Recycling und Produktionsabfällen

Um zu einer vollständigen und praxisbezogenen Kostenabbildung des FKV-Verarbeitungsprozesses zu gelangen, sind in die Modellbildung auch die Produktionsabfallströme und das produktionsintegrierte Recycling einzubeziehen. Beispielsweise fallen bei Verarbeitungsprozessen zur Herstellung von Bauteilen aus Glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) aus verfahrensbedingten Gründen i.d.R. 10 bis 20 % des Bauteilrohgewichts als sortenreine Produktionsabfälle an [152]. Bei der Verarbeitung von Organoblechen (flächige Halbzeuge aus kontinuierlich-faserverstärkten Thermoplasten) liegt, wie Bild 4-9 exemplarisch veranschaulicht, der Produktionsabfallanteil häufig sogar bei bis zu 40 Gew.-% [153]. Noch höhere Anteile von 30 bis 50 Gew.-% können durch Halbzeugverschnitt im Zusammenhang mit der Verarbeitung duromerer Prepregs auftreten [154]. Die Einordnung der Produktionsabfallströme und des produktionsintegrierten Recyclings in den FKV-Herstellzyklus ist in Bild 4-10 verdeutlicht.

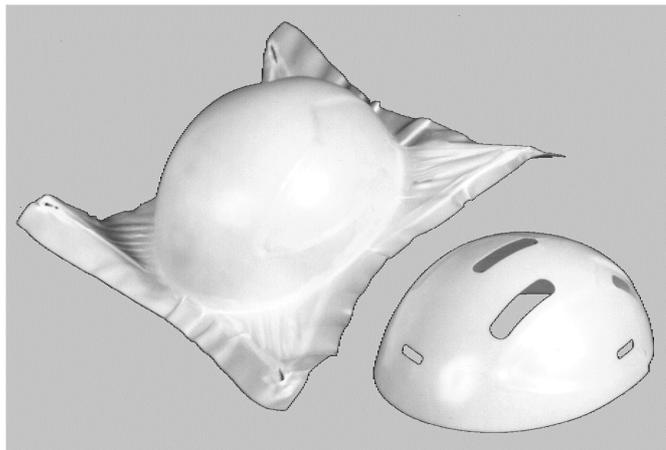


Bild 4-9 FKV-Fahradhelm hergestellt aus GF/PA6-Organoblech vor und nach dem Besäumen/Stanzen (Quelle: Uvex)

Die notwendige Bewertung des produktionsintegrierten Recyclings und des Anfallens von Produktionsabfällen im Rahmen der Kostenschätzung wird durch entsprechende Modifikation des Standardkalkulationsschemas vorgenommen. Recyclingprozesse werden als integraler Bestandteil der Gesamtprozesskette betrachtet und damit der verknüpfte Ressourcenverbrauch (Personal, Kapital, etc.) erfasst.

In Tabelle 4.2 sind die Arten von Produktionsabfällen und deren typische Gewichtsanteile am Gesamtmaterialverbrauch bei FKV-Fertigungsprozessen zusammengestellt. Der Mehrverbrauch von Material infolge von Verschnitten etc. wird mittels Zuschlagsfaktoren zum Nettomaterialbedarf je Produkt bemessen. Die drei in Tabelle 4-2 erstgenannten Abfallarten lassen sich in einem Zuschlagsfaktor (Produktionsabfallquote) zusammenfassen.

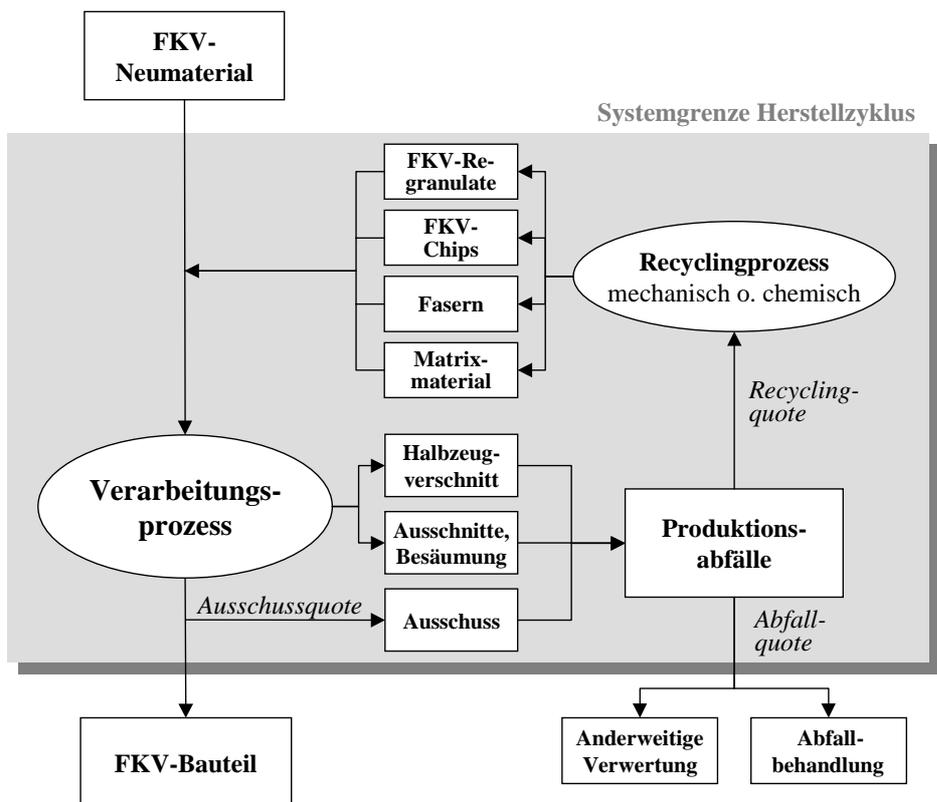


Bild 4-10 Einordnung der Produktionsabfallströme und des produktionsintegrierten Recyclings in den FKV-Herstellzyklus

Der Faktor für die Ausschussteile (Ausschussquote) ist gesondert auszuführen, da Ausschussteile die Produktionsdauer bis zum Erreichen der vorgegebenen Sollproduktionsmenge erhöhen und somit als gesamtzkluszeitverlängernd bei der Berechnung der übrigen Ressourcenverbrauche des Herstellzyklus berücksichtigt werden müssen.

Das produktionsintegrierte Recycling wird über einen Recyclingabschlag (Recyclingquote) am Materialverbrauch eingerechnet. Dieser Recyclingabschlag ist bei vielen Prozessen zur Verarbeitung von duromeren FKV mit 0 % festzusetzen, da keine geeigneten produktionsintegrierten Recyclingmethoden existieren.

Tabelle 4-2 Arten von Produktionsabfällen bei FKV-Fertigungsverfahren und deren typische Gewichtsanteile am Materialverbrauch in Anlehnung an [155]

FKV-Produktionsabfallart	Typischer Gewichtsanteil am Materialverbrauch
Halbzeugverschnitt	bis 50 Gew.-%
Ausschnittteile, Stanzabfälle	bis 30 Gew.-%
Besäumungsabfälle	bis 10 Gew.-%
Ausschussteile	bis 5 Gew.-%

Demgegenüber bilden u.a. die Verarbeitung von GMT oder LFT (Langfaserverstärkte Thermoplaste) das konträre Extrem mit einer Quote des produktionsintegrierten Recyclings von bis zu 100 %.

Aus der Differenz zwischen Produktionsabfallzuschlag (inkl. Ausschussquote) und Recyclingabschlag ergibt sich die Menge an nicht produktionsintegriert rezyklierbaren Produktionsabfällen (Abfallquote), die bei der FKV-Verarbeitung je nach verwendeten Materialien signifikante Kostentreiber darstellen können (z.B. Sonderabfallentsorgung bei styrolhaltigen duromeren Halbzeugen). Somit sind diese kostenmäßig bei der Herstellkostenkalkulation in Ansatz zu bringen. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, dass FKV-Produktionsabfälle in Zukunft auf dem Wertstoffmarkt gesuchte Rohstoffe darstellen werden (z.B. als energiereicher Brennstoffersatz in der Zementherstellung). In diesem Fall wären negative Kosten zu berücksichtigen.

Die Formel zur Berechnung des Bedarfs an FKV-Neumaterial je Produkt zur Erweiterung der Herstellkostenschätzmethode lässt sich aus der Massenbilanz des Herstellzyklus nach Bild 4-10 ableiten. Es gilt

$$m_H - m_B - m_B \cdot q_A = 0 \quad (4.3)$$

mit

- m_H = Menge benötigtes FKV-Neumaterial,
- m_B = Menge Material je Bauteil,
- q_A = Abfallquote des Prozesses.

Die Abfallquote q_A kann als Summe aus Produktionsabfallquote q_P und Ausschussquote q_{Aus} abzüglich der Recyclingquote q_R dargestellt werden. Diese Summe wird in die nach der benötigten Neumaterialmenge m_H aufgelöste Massenbilanzgleichung eingesetzt:

$$m_H = m_B \cdot (1 + q_P + q_{Aus} - q_R) \quad (4.4)$$

Die Quoten q_A , q_P , q_{Au} und q_R sind dabei jeweils auf das Bauteilgewicht bezogen.

4.3.4 Berücksichtigung von Lernkurveneffekten

Das Konzept der Lernkurve, oft auch als Erfahrungskurvenkonzept bezeichnet, wurde erstmals in den 40er Jahren für die Kostenprognose repetitiver handarbeitsintensiver Fertigungsprozesse in der Luftfahrtindustrie angewandt [156] und später auf Basis empirischer Untersuchungen auch für andere Industriezweige und Fertigungsarten, von der Massenproduktion von Standardkunststoffen bis hin zur Fertigung des Space Shuttles, adaptiert [157-159].

Ansatzpunkt der Lernkurventheorie ist die Annahme, dass bei Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge eines Produkts die benötigte Fertigungszeit infolge von Lernprozessen um einen bestimmten Prozentbetrag sinkt [86]. Hieraus ergibt sich dann auch eine Stückkostenreduktion. Damit wird der für die Massenfertigung typische Kostendegressionstrend zusätzlich unterstützt. Dieser Effekt wird bei herkömmlichen Herstellkostenkalkulationen durchweg vernachlässigt.

Gerade bei der Vorkalkulation der Kosten neuartiger FKV-Verfahren oder -Bauteile jedoch erscheint die Anwendung der Lernkurventheorie zwingend erforderlich, da viele kostenrelevante Eingangsgrößen der Kostenschätzung (z.B. die Zykluszeit) häufig aus Fertigungsversuchen im Labormaßstab oder Prototypenfertigungen abgeleitet sind und somit lediglich den Beginn der Lernkurve abbilden. Dies führt oft zu extrem konservativen Kostenschätzungen und benachteiligt somit innovative FKV-Technologien bei der vergleichenden Bewertung.

Zur Implementierung des Lernkurvenansatzes in die Herstellkostenkalkulation für das LZK-Modell wird auf folgende zykluszeitorientierte Ausprägung der Lernkurvengrundformel zurückgegriffen:

$$t_n = t_1 \cdot M^b \quad (4.5)$$

mit

- t_n = Zykluszeit des n-ten Zyklus (oder Durchschnitt von n Zyklen),
- t_1 = Basiszykluszeit,
- b = Lernkurvenkoeffizient,
- M = Stückzahl.

Unter der Prämisse, dass die Zykluszeit um einen konstanten "Lernprozentsatz" R_L je Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge abnimmt, ergibt sich für den Lernkurvenkoeffizient b der Ausdruck

$$b = \frac{\text{Ln}(1 - R_L)}{\text{Ln}(2)} \quad (4.6)$$

Somit lässt sich aus den Gleichungen 4.5 und 4.6 der Lernkurvenfaktor l_n ableiten, mit dem in Abhängigkeit eines zu definierenden Lernprozentsatzes R_L und der Produktionsmenge M die anzunehmende Reduktion der angenommenen Basiszykluszeit abgeschätzt wird:

$$l_n = M^{\frac{\text{Ln}(1 - R_L)}{\text{Ln}(2)}} \quad (4.7)$$

Der Lernprozentsatz R_L wird üblicherweise aus existierenden Kostenverlaufsdaten bei vergleichbaren Fertigungsverfahren oder Produkten empirisch abgeleitet. Fehlen derartige Daten, so muss auf Standardschätzwerte aus der einschlägigen Literatur zurückgegriffen werden [156]. Tabelle 4-3 gibt eine Übersicht über derartige Faktoren in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad des betrachteten Verfahrens bzw. von der Branche. Je stärker der betrachtete Produktionsprozess durch manuelle Teilprozesse geprägt ist, desto höher liegt der angenommene Lernprozentsatz und desto "steiler" verläuft die Lernkurve.

Tabelle 4-3 Standardschätzwerte des Lernprozentsatz in Anlehnung an [156]

Merkmals	Standard-Lernprozentsatz
Automatisierungsgrad <ul style="list-style-type: none"> • sehr niedrig • niedrig • mittel • hoch • sehr hoch 	15 bis 20 % 10 bis 15 % 5 bis 10 % 2 bis 5 % 0,5 bis 2 %
Branche <ul style="list-style-type: none"> • Luftfahrtindustrie • Schiffbau • Sondermaschinenbau • Maschinenbau • Rohstoffindustrie • Elektronikindustrie 	10 bis 15 % 15 bis 20 % 15 bis 20 % 5 bis 10 % < 5 % < 5 %

4.3.5 Synthese der Kostenkalkulationsmethode für den Herstellzyklus

Zur Synthese einer Kostenberechnungsformel für den Modellbaustein "Herstellzyklus" werden die vorstehend erläuterten Erweiterungen in die klassische Kostenschätzmethode eingearbeitet.

Die Gesamtkosten des Herstellzyklus K_{Hst} in einer definierten Periode (i.d.R. ein Jahr) lassen sich als Funktion der periodenbezogenen Ausbringungsmenge M darstellen und setzen sich aus verschiedenen Einzelkosten zusammen, die unter

- fixe Gesamtkosten K_f und
- variable Gesamtkosten K_v

zusammengefasst werden können. Es gilt

$$K_{Hst} = K_f + K_v, \text{ mit } \frac{K_{Hst}}{M} = \frac{K_f}{M} + \frac{K_v}{M} \text{ und } k_{Hst} = k_f + k_v \quad (4.8)$$

für die Herstellstückkosten k_{Hst} .

Fixe Kosten sind unabhängig von der Ausbringungsmenge. Hierzu gehören beispielsweise Zinsen K_Z und Gebäude-/Raumkosten K_R .

Die fixen Gesamtkosten des Herstellzyklus errechnen sich aus

$$K_f = K_A + K_Z + K_R, \text{ wobei } K_A = \frac{K_{AK}}{ND}, K_Z = \frac{K_{AK}}{2} \cdot i, \text{ und } K_R = F_A \cdot p_f \quad (4.9)$$

mit

- K_{AK} = Anschaffungskosten für die Anlage,
- ND = Nutzungsdauer,
- i = Zinssatz,
- F_A = Flächenbedarf der Anlage,
- p_f = Flächenbedarfskostensatz.

Aus Gleichung 4.8 und 4.9 folgt für die fixen Stückkosten:

$$k_f = \frac{1}{M} \cdot \left(K_{AK} \cdot \left(\frac{1}{ND} + \frac{i}{2} \right) + F_A \cdot p_f \right) \quad (4.10)$$

Im Unterschied zu fixen Kosten werden variable Gesamtkosten durch die Ausbringungsmenge beeinflusst, wobei unter Annahme einer linearen Gesamtkostenfunktion die variablen Stückkosten k_v konstant sind. Jede Erhöhung der Ausbringungsmenge um eine Einheit verursacht somit einen Zuwachs der Gesamtkosten um den Betrag von k_v . Die Gleichung für die variablen Stückkosten k_v lautet:

$$k_v = k_M + k_P + k_E + k_S + k_A \quad (4.11)$$

mit

- k_M = Materialkosten
- k_P = Personalkosten
- k_E = Energiekosten
- k_S = Sonstige Betriebskosten (Wartung/Instandhaltung etc.)
- k_A = Kosten für Produktionsabfälle

Für die Materialkosten k_M ergibt sich unter Einbeziehung von Gleichung 4.4:

$$k_M = m_B \cdot (1 + q_P + q_{Aus} - q_R) \cdot p_M \quad (4.12)$$

mit

- p_M = Materialpreis

Für die übrigen Einzelkostenpositionen aus Gleichung 4.11 k_P , k_E , k_S und k_A lassen sich folgende Formeln einsetzen:

$$k_P = \frac{z_{eff} \cdot A_P \cdot p_P}{3.600}, \quad k_E = \frac{z_{eff} \cdot W_A \cdot p_E}{3.600}, \quad k_S = \frac{z_{eff} \cdot P_{WI}}{3.600} \quad \text{und} \quad k_A = m_B \cdot (q_P + q_{Aus} - q_R) \cdot p_A \quad (4.13)$$

mit

- z_{eff} = effektive Zykluszeit (in Sekunden),
- A_P = Anzahl Personal,
- p_P = Personalkostensatz,
- W_A = Energieverbrauch,
- p_E = Energiekostensatz,
- P_{WI} = Wartungs-/Instandhaltungskostensatz,
- p_A = Kostensatz Produktionsabfälle.

Die effektive Zykluszeit z_{eff} ist aus dem Produkt der Basiszykluszeit z_B , dem in Gleichung 4.7 dargelegten Lernkurvenfaktor l_n sowie einem Aufschlagsfaktor für den Produktionsausschuss (auf Basis der Ausschussquote q_{Aus} ermittelt) zu berechnen:

$$z_{eff} = z_B \cdot \left(\frac{1}{1 - q_{Aus}} \right) \cdot M^{\frac{\ln(1-R_L)}{\ln(2)}} \quad (4.14)$$

Durch Kombination der Gleichungen 4.11 bis 4.14 ergibt sich die folgende Berechnungsformel für die variablen Stückkosten k_v unter Einbezug des produktionsintegrierten Recyclings, des Anfallens von Produktionsabfällen sowie von Lernkurveneffekten:

$$k_v = \frac{z_B \cdot \left(\frac{1}{1 - q_{Aus}} \right) \cdot M^{\frac{\ln(1-R_L)}{\ln(2)}}}{3.600} \cdot (A_P \cdot p_p + W_A \cdot p_E + P_{WI}) + m_B \cdot ((1 + q_P + q_{Aus} - q_R) \cdot p_M + (q_P + q_{Aus} - q_R) \cdot p_A) \quad (4.15)$$

4.3.6 Umsetzung des Modellbausteins für den FKV-Herstellzyklus

Der entwickelte Schätzalgorithmus für den Herstellzyklus bildet den Kern des Modellbausteins. Allerdings muss dieser noch in einen Rahmen eingebettet werden,

- der die notwendige Abbildung der FKV-Produktionstechnologie ermöglicht und
- der die Transformation der abgebildeten technischen Strukturen in Inputdatensätze für den Kostenschätzalgorithmus gewährleistet.

Aufgrund dieser Anforderungen, aber insbesondere auch hinsichtlich der angestrebten Flexibilität des Modellbausteins, bietet sich ein an Datenbankstrukturen angelehnter Aufbau des Modellbausteins an. In Bild 4-11 ist das gewählte Konzept schematisch veranschaulicht.

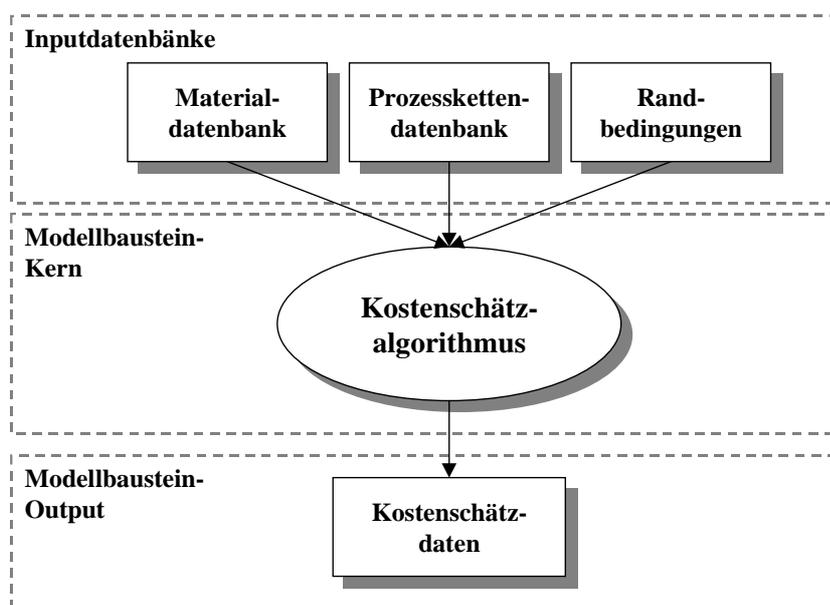


Bild 4-11 Strukturierung des Modellbausteins Herstellzyklus

Der Kostenschätzalgorithmus verknüpft die unterschiedlichen Bereiche des Dateninputs. Der Dateninput wird aus drei Datenbanken entnommen, die die Abbildung der FKV-Technologie (Werkstoffe und Prozessketten) sowie eine Beschreibung des technisch-wirtschaftlichen Umfelds (Informationen zu den relevanten Rahmenbedingungen) beinhalten.

In der Materialdatenbank werden die für die Kostenschätzung relevanten Informationen zu den für FKV-Fertigungsprozesse notwendigen Materialien vorgehalten. Deshalb sind in der Materialdatenbank nicht nur die FKV-Ausgangswerkstoffe, sondern auch Informationen zu sonstigen Einsatzmaterialien für die FKV-Verarbeitungsprozesse (z.B. Trennfolien, Trennmittel etc.) enthalten. Bei Zusammenstellung der Materialdaten (insbesondere hinsichtlich der Preisinformationen) wird – soweit wie möglich – auf bestehende externe Datenbestände zurückgegriffen.

Die technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden in einem eigenständigen Input-Datenblock strukturiert zusammengefasst. Vorwiegend handelt es sich um von der Fertigungstechnologie weitgehend unabhängige Informationen zu den betriebswirtschaftlichen Randbedingungen, wie zum Beispiel:

- Zinssatz
- Nutzungsdauer der Anlagentechnik
- Durchschnittliche Arbeits-/Anlagennutzungszeit je Schichtmodell
- Angenommenes Schichtmodell
- Personalkostensätze nach Qualifikationsgrad und inklusive von Zuschlägen
- Energiekostensätze

In der Prozessketten-Datenbank werden die relevanten Informationen zur einzubeziehenden Anlagentechnik systematisch zusammengestellt und das Prozessketten-Layout spezifiziert. Die FKV-Fertigungsverfahren werden hierzu in Prozessketten aufgelöst. Unter Prozesskette wird im Allgemeinen eine geordnete Folge von Prozessen oder Prozessschritten verstanden, die zur Erreichung eines bestimmten, eigenständigen Produktionszieles führt. Die Prozesskette ist somit als eine geordnete Folge von Prozessschritten zu betrachten, die an einem Produkt (in diesem Fall ein FKV-Bauteil oder eine FKV-Struktur) zum Zweck der geometrischen oder/und technologischen Zustandsänderung durchgeführt wird. Das heißt, eine Prozesskette ist diejenige Folge von Prozessschritten, die ausgehend von einer Bauteilbeschreibung (und über die Fertigungsvorbereitung und Fertigung) die Entstehung eines Bauteils abbildet.

Zum Aufbau der Prozessketten-Datenbank wird für jeden Prozesskettenschritt das Spektrum der einsetzbaren Anlagentechnik spezifiziert (Beispiel siehe Bild 4-12). Dabei ist sowohl unterschiedliche Technologie als ggf. auch gleichartige Technologie mit unterschiedlicher Kapazität/Auslegung zu berücksichtigen. Da bei einigen Prozesskettenelementen im Sinne der Kostenschätzung relevante, "autark" zu betrachtende Subelemente vorliegen (zum Beispiel das Subelement "Werkzeug" bei einer Presse), sind diese als eigene Klasse von Subelementen in der Datenbank abgebildet.

Aus dieser Gesamtheit an alternativen Prozesskettenelementen wird in der Prozessketten-Datenbank die Prozesskette für das zu analysierende Verfahren nach Maßgabe des Anwenders wie in einem Baukasten zusammengesetzt (siehe Bild 4-13). Das Baukastenprinzip gewährleistet eine hohe Flexibilität der Prozessketten-Datenbank.

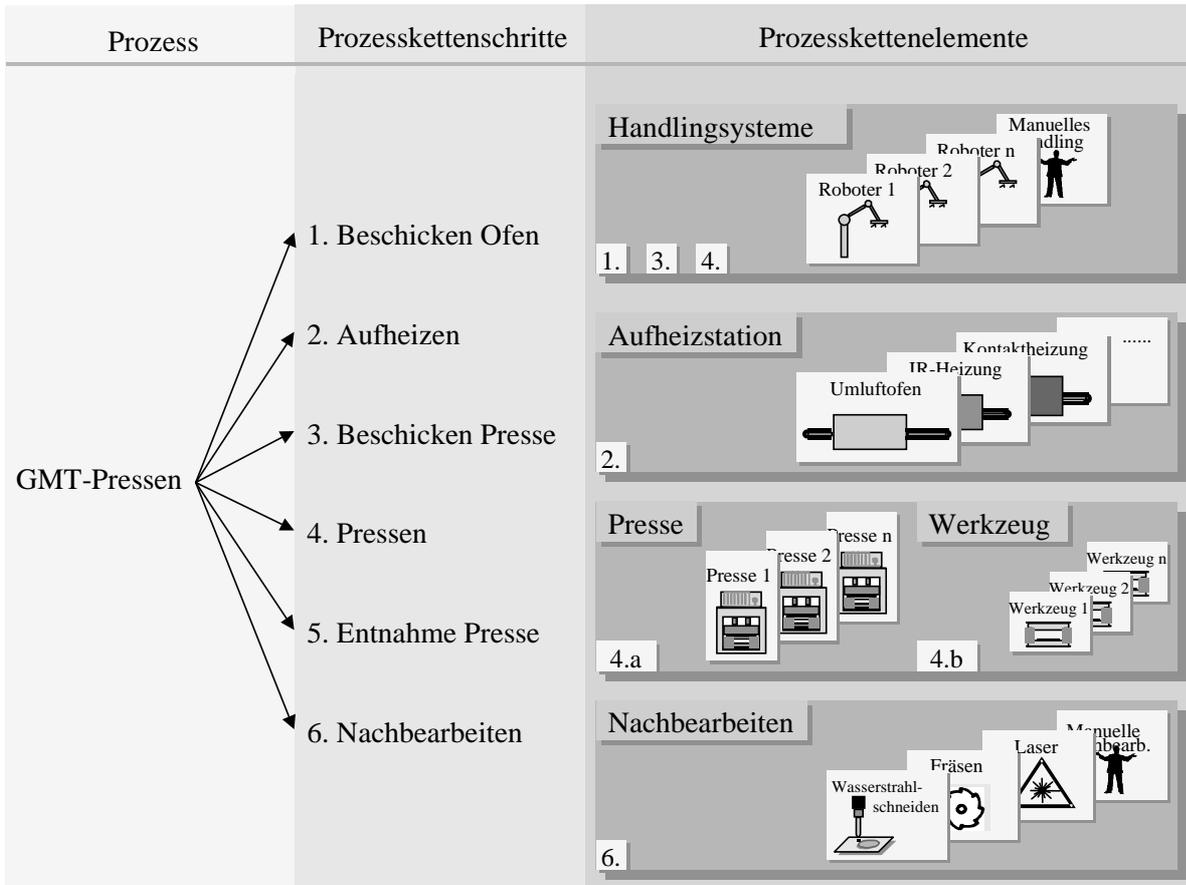


Bild 4-12 Identifikation von alternativen Prozesskettenelementen - Beispiel GMT-Prozess

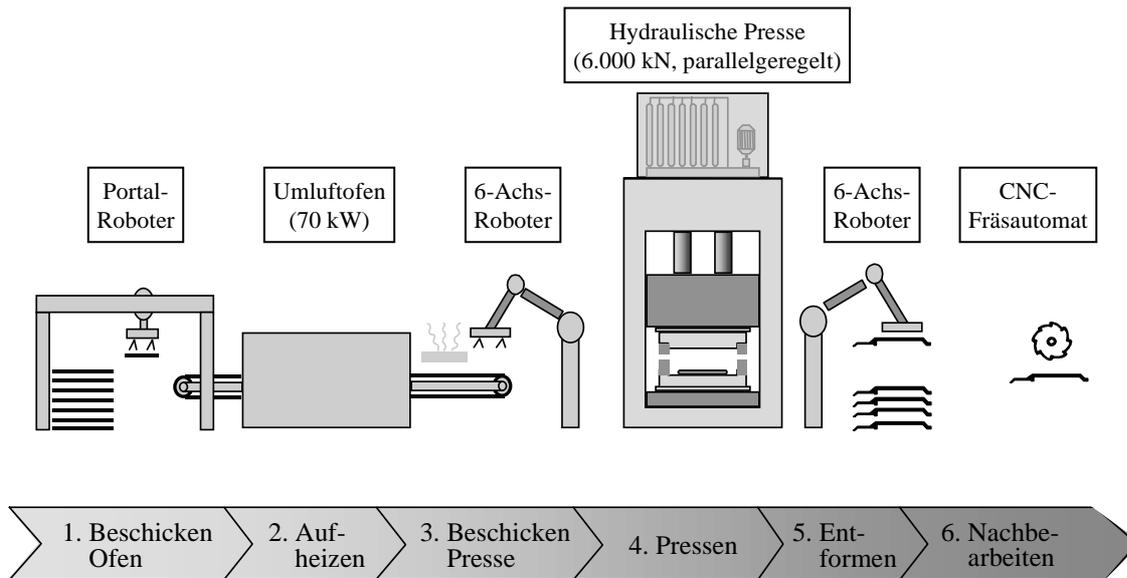


Bild 4-13 Prozessketten synthese - Beispiel vollautomatisierter GMT-Prozess

Wesentliche Kriterien für die Auswahl der einzelnen Prozesskettenelemente sind aus der Gestalt des darzustellenden Bauteils abzuleiten. Beispielsweise ergeben sich für die hydraulische Presse beim GMT-Prozess die Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Presskraft aus dem materialbedingten Pressdruck (bei GMT üblicherweise 200 bis 250 bar) und der Größe der projizierten Bauteiloberfläche normal zur Pressrichtung. Allerdings sind nur vereinzelt derartige operationelle Auslegungs- bzw. Auswahlhilfen für FKV-Prozessketten-elemente verfügbar; i.d.R. muss deshalb bei der Prozesskettensynthese auf Erfahrungswerte oder Expertenwissen zurückgegriffen werden.

Je Prozesskettenelement werden - neben den allgemeinen Charakteristika (zum Beispiel Kapazitätsdaten oder typische Zykluszeiten) - Informationen über den notwendigen Ressourcenverbrauch (Personal, Hilfs- und Betriebsstoffe, Energie, Wartung/Instandhaltung, Platzbedarf etc.) mittels entsprechenden Faktoren erfasst und zum Gesamtressourcenverbrauch der Prozesskette gemäss den Anforderungen des Kostenschätzalgorithmus aggregiert.

Ein wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit den Kostenrechneralgorithmen ist die Bestimmung der Zykluszeit für die Prozesskette und die sich daraus ergebende Produktionskapazität. Informationen zu den Zykluszeiten der einzelnen Prozesskettenelemente werden in der Prozesskettendatenbank bereitgestellt. Anhand des "Schaltplans" der Prozesskette wird die Gesamtzykluszeit über eine einfache Engpasskalkulation errechnet. Entscheidend für diese Kalkulation der Zykluszeiten ist nicht die Anordnung der Prozesskettenelemente im fertigungstechnischen (logischen) Ablauf der Prozesskette, sondern vielmehr die Lage in der zeitlichen Abfolge der Prozesskette. In einer Prozesskette sind die einzelnen Prozesskettenschritte zeitlich gesehen entweder hintereinander oder parallel angeordnet (siehe Bild 4-14). Aus technischen Gründen muss beispielsweise bei der Prozesskette "GMT-Pressen" der Prozesskettenschritt "Beschicken der Presse" und "Pressen"(siehe Bild 4-13) zeitlich hintereinander angeordnet werden; dagegen können die Schritte "Aufheizen der Halbzeuge", "Pressen" und "Nachbearbeiten" zeitgleich ablaufen. Der im Modell implementierte, einfache Algorithmus zur Kalkulation der Gesamtzykluszeit arbeitet mit Inputdaten aus der Prozessketten-Datenbank.

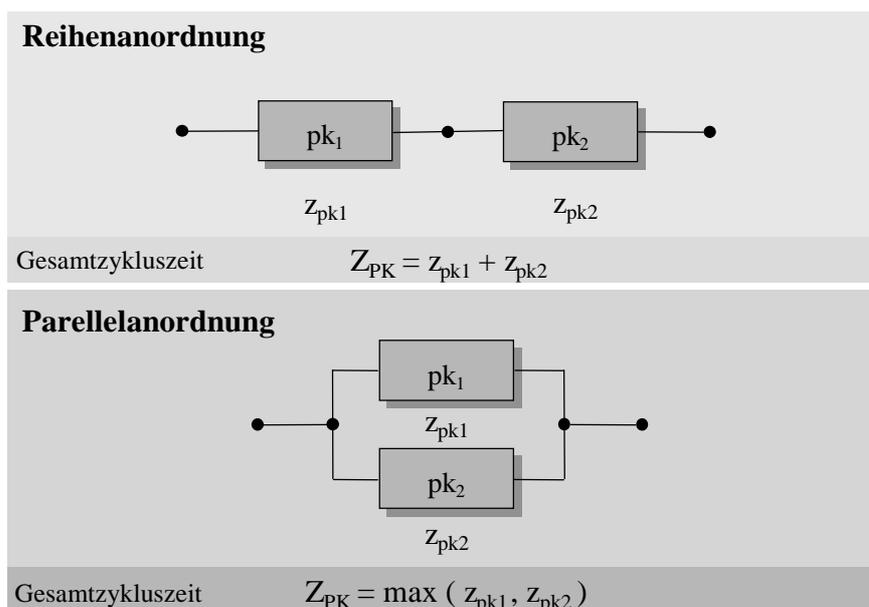


Bild 4-14 Anordnungsmöglichkeiten von Prozesskettenelementen im zeitlichen Ablauf einer Prozesskette und resultierende Zykluszeit

Diese können jedoch nur einen groben Rahmen liefern, da eine Anpassung der Zykluszeiten an die einzelnen Schritte der Prozesskette auf die spezifischen Charakteristika des verwendeten Materials und des darzustellenden Bauteils sowie der darzustellenden Prozesskettenstruktur insgesamt notwendig ist. Eine derartige Optimierung muss manuell auf Basis von Erfahrungswerten oder anhand von Daten aus Parameterstudien vorgenommen werden. Die Implementierung eines entsprechenden Expertensystems wäre zwar wünschenswert, würde jedoch bei weitem den Rahmen dieser Untersuchung sprengen.

Aus der Gesamtzykluszeit der Prozesskette sowie den Informationen zu den angenommenen Betriebsstunden pro Jahr errechnet sich die jährliche Ausbringungsmenge einer Prozesskette. Über die Angaben zum Produktionsoll lässt sich dann bestimmen, wie viele Prozessketten zur Erfüllung des Planziels benötigt werden. Die Anzahl an erforderlichen Prozessketten ist eine wesentliche Kennziffer für die Kostenschätzung (zum Beispiel zur Berechnung des Kapitaldienstes). Hinter dieser Vorgehensweise steht die Prämisse, dass die sich ergebende Ausbringungsmenge der Prozesskette an die Planmenge durch Variation der Zahl der Potenzialfaktoren angepasst werden kann; zu einer Prozesskette können somit ein oder mehrere weitere gleichartige Prozessketten im Sinne einer multiplen Betriebsgrößenvariation hinzukommen [86].

4.4 Modellbaustein FKV-Betriebszyklus

4.4.1 Grundüberlegungen zur Abbildung des FKV-Betriebszyklus

Im Rahmen des Modellbausteins zur Ermittlung der Betriebskosten sind alle relevanten Kosten zu erfassen, die während der wirtschaftlichen Nutzung eines FKV-Bauteils bzw. einer FKV-Struktur anfallen. Allerdings existieren für FKV-Anwendungen im Allgemeinen keine Standards zur Systematisierung der Betriebskosten, die als Grundlage der Erstellung des Modellbausteins herangezogen werden könnten. Lediglich für das FKV-Anwendungsfeld "Flugzeugbau" könnte auf die sog. DOC-Systematik (DOC = Direct Operating Cost) aufgebaut werden [160]. DOC ist eine in der Luftfahrtindustrie etablierte Methode der ökonomischen Bewertung von Verkehrsflugzeugen, mit der alle Flugzeugbetriebskosten nach einem standardisierten Schema erfasst werden. Kaufentscheidungen von Fluggesellschaften werden i.d.R. sehr stark vom Vergleich von DOC-Charakteristika bestimmt. Ein Beispiel für eine DOC-Struktur - hier die des Airbus A 320 - ist in Bild 4-15 dargestellt.

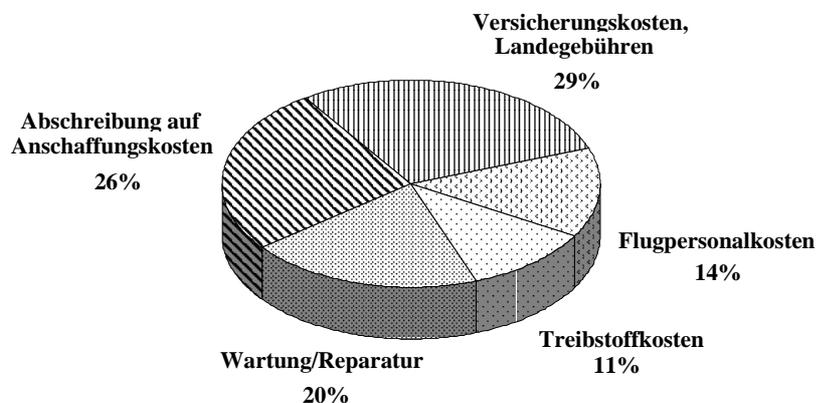


Bild 4-15 DOC-Struktur des Airbus A320 [19]

Tabelle 4-4 Relevante Betriebskostenpositionen der wichtigsten FKV-Anwendungsfelder

FKV-Anwendungsfeld	Anwendungstypische Betriebskostenpositionen*
Luftfahrtindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • Flugpersonalkosten • Betriebsstoffkosten • Wartungs-/Reparaturkosten • Versicherungskosten • Landegebühren
Automobilindustrie (Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge)	<ul style="list-style-type: none"> • Personalkosten • Betriebsstoffkosten • Wartungs-/Reparaturkosten • Versicherungskosten • Kfz-Steuer • Fahrweggebühren
Elektro-/ Elektronikindustrie	--
Bauwesen	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungs-/Reparaturkosten
Sport-/Freizeitgeräte	--
Maschinenbau/Industrie	<ul style="list-style-type: none"> • Energie-/Betriebsstoffkosten • Wartungs-/Reparaturkosten
Sonst. Konsumgüter	--

* ohne Abschreibung auf Anschaffungskosten, Erläuterung s.u.

Als Basis der Ableitung eines anwendungsfeldunabhängigen Betriebskostenschemas für den Modellbaustein wurden in Tabelle 4.4 die wesentlichen Betriebskostenpositionen der wichtigsten FKV-Anwendungsfelder zusammengestellt.

Im Hinblick auf die Zielsetzung der Untersuchung kann auf die Erfassung derjenigen Betriebskosten innerhalb der FKV-Lebenszykluskostenrechnung verzichtet werden, die keine Abhängigkeit von den betrachteten Material-, Bauweisen- oder Fertigungstechnikalternativen aufweisen [136]. Somit lassen sich vereinfachend die in Tabelle 4-4 genannten Betriebskosten wie Personal, Versicherungen, Gebühren oder Steuern in der Betriebskostenstruktur für die LZK vernachlässigen. In der Literatur finden sich zwar Hinweise, dass bei den Versicherungskosten von Verkehrsflugzeugen bzw. von Pkw die Bauweise Einfluss auf die Kostenhöhe haben könnte [138, 161]. Richtung und Grad des Einflusses im Spannungsfeld zwischen erhöhter Sicherheit bzw. Schadenstoleranz durch die Anwendung von FKV, aber auch höheren Sachschadenskosten im Schadensfall sind jedoch heute noch unsicher und für die Zukunft schwierig vorherzusagen. Daher werden diese Einflüsse hier ausgeklammert.

In Tabelle 4-4 wurden bewusst die üblicherweise unter den Betriebskosten aufzuführenden Abschreibungen auf Anschaffungskosten (zur Erfassung der technischen oder wirtschaftlichen Wertminderung des Analysegegenstandes infolge der Nutzung) herausgenommen.

Dies ist damit zu begründen, dass im Kontext mit der Kalkulation der Herstellzykluskosten die Einbeziehung der Anschaffungskosten über Abschreibungen eine Doppelbewertung in der LZK darstellen würde.

Die in der Praxis vorliegende Differenz zwischen den Herstellkosten des Produzenten und den Anschaffungskosten für den Betreiber/Nutzer infolge von Gewinnzuschlägen u.ä. kann bei der hier entwickelten LZK unberücksichtigt bleiben, da derartige Margen prinzipiell als unabhängig von Material-, Bauweisen- oder Fertigungstechnikalternativen angenommen werden können.

Die Kostenposition "Anschaffungskosten" wird jedoch im Falle unterschiedlich langer Nutzungszykluszeiträume bei den betrachteten Alternativen bedeutsam: In der Regel orientiert sich die Definition des Nutzungszyklus bei der LZK an der im jeweiligen Anwendungsfeld typischen wirtschaftlichen Nutzungsdauer. Ist die angenommene Nutzungszyklusbauzeit einer betrachteten Ausführungsalternative kürzer als der festgelegte Betrachtungszeitraum für den Nutzungszyklus, so müssen bei der Betriebskostenkalkulation die einzuplanenden Anschaffungskosten der Ersatzbeschaffung bewertet werden. Bei einer LZK bieten sich als Bewertungsgröße für die Ersatzbeschaffung deren Herstellkosten an. Zur Vereinfachung kann die Ersatzbeschaffung als Sonderfall der Reparatur interpretiert und somit unter diese Position subsumiert werden.

Basierend auf Tabelle 4-4 und der vorstehenden Erläuterungen lässt sich ein allgemeingültiges Schema für die FKV-Betriebskostenkalkulation im Rahmen der LZK folgern. Zu erfassen sind:

- Energie-/Betriebsstoffkosten
- Wartungs-/Instandhaltungs-/Reparaturkosten (ggf. inkl. notwendige Ersatzbeschaffungen)

FKV-Bauteile oder -Strukturen sind allerdings häufig Teilelemente von übergeordneten technischen Systemen (Beispiel: FKV-Leitwerksstruktur des Airbus A320, siehe Bild 1-1). Somit ergibt sich ein Problem aus der notwendigen Festlegung eines Kostenverteilungsschlüssels für diejenigen Einzelposten innerhalb der o.g. Kostenpositionen, die nicht direkt dem betrachteten Teilelement zugeordnet werden können. Dies ist insbesondere bei Energie- oder Betriebsstoffkosten der Fall. Gewöhnlich wird der Gewichtsanteil des Teilelements am Gewicht des Gesamtsystems (Leergewicht, Strukturgewicht) zur Zuordnung der Kostenanteile herangezogen [138]. Demgegenüber stellt die Erfassung von Wartungs- oder Reparaturkosten auf der Ebene von Systemteilelementen kein größeres Problem dar, weil die kostenwirksamen Aktivitäten i.d.R. teilelementspezifisch zugeordnet werden können.

4.4.2 Kostenkalkulationsmethode für den FKV-Betriebszyklus

Die Betriebskosten eines technischen Systems $K_{Bet, Sys}$ sind als Summe aus Energie- bzw. Betriebsstoffkosten $K_{E+B, Sys}$ und Wartungs-/Instandhaltungs-/Reparaturkosten $K_{W+R, Sys}$ auszudrücken:

$$K_{B, Sys} = K_{E+B, Sys} + K_{W+R, Sys} \quad (4.16)$$

Diese gesamtsystembezogenen Betriebskosten müssen auf einzelne Teilelemente (Bauteile oder Strukturen) heruntergebrochen werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass für die Wartungs- und Reparaturkosten teilelementbezogene Kosteninformationen vorliegen.

Für die Energie- bzw. Betriebsstoffkosten wird ein Faktor bestimmt (z.B. aus dem Quotienten des Teilelementgewichts und des Gesamtsystemgewichts), der den prozentualen Kostenanteil des analysierten Teilelements an den gesamtsystembezogenen Kosten beschreibt. Beispielsweise gilt für die Betriebskosten des betrachteten Teilelements eines Transportmittels:

$$k_{Bet} = \frac{m_B}{m_{Sys}} K_{E+B, Sys} + k_{W+R} \quad (4.17)$$

mit

- k_{Bet} = Betriebskosten des analysierten Bauteils,
- m_B = Gewicht des analysierten Bauteils,
- m_{Sys} = Gewicht Gesamtsystem,
- k_{W+R} = Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturkosten des Bauteils.

Je nach Anwendungsfall müssen ggf. auch anderer Kostenverteilungsschlüssel als das Gewichtsverhältnis für die Zuordnung Energie- bzw. Betriebsstoffkosten herangezogen werden.

Die Energie- bzw. Betriebsstoffkosten des Systems $K_{E+B, Sys}$ werden folgendermaßen ermittelt:

$$K_{E+B, Sys} = NI_{Sys} \cdot (EV_{Sys} \cdot p_E + BV_{Sys} \cdot p_B) \quad (4.18)$$

mit

- EV_{Sys} = Energieverbrauch des Systems,
- NI_{Sys} = Nutzungsintensität des System,
- p_E = Energiekostensatz,
- BV_{Sys} = Betriebsstoffverbrauch des Systems,
- p_B = Betriebsstoffkostensatz.

Dabei ist zu beachten, dass der Energie- oder der Betriebsstoffverbrauch des Systems eine Funktion von bestimmten Systemmerkmalen - insbesondere des Systemgewichts - sein kann. Bild 4-16 zeigt die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung für Pkw [162].

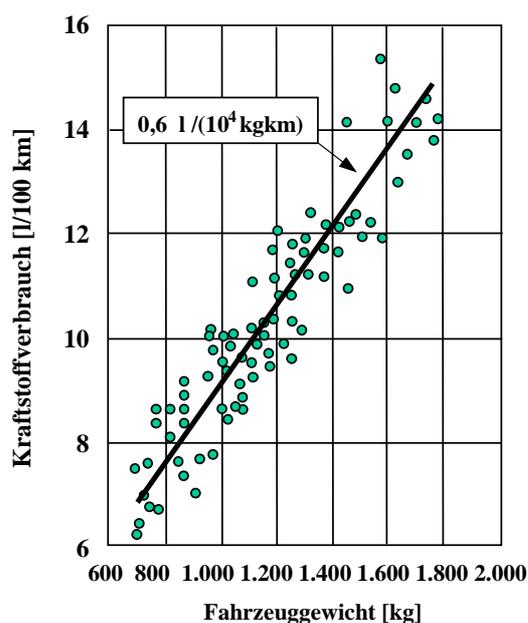


Bild 4-16 Zusammenhang zwischen Fahrzeuggewicht und Kraftstoffverbrauch [139]

Auf Basis der statistischen Auswertung der in Bild 4-16 dokumentierten Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Fahrzeuggewicht und Kraftstoffverbrauch lässt sich für einen typischen Personenkraftwagen aus dem Bestand in Deutschland mit durchschnittlicher Motorisierung und Ausstattung folgende Schätzfunktion des Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht formulieren:

$$BV_{Pkw} = 6 \frac{l}{100 \text{ km}} + 0,6 \frac{l}{10^4 \text{ kg km}} \cdot \left(\frac{m_{Pkw} - 600 \text{ kg}}{100} \right) \text{ für } 600 \text{ kg} < m_{Pkw} < 1.800 \text{ kg} \quad (4.19)$$

mit

$$\begin{aligned} BV_{Pkw} &= \text{Betriebsstoffverbrauch Pkw in l/100 km,} \\ m_{Pkw} &= \text{Masse Pkw.} \end{aligned}$$

Die Wartungs-/Reparaturkosten k_{W+R} des Analysegegenstands berechnen sich aus der Summe der Wartungskosten k_W , dem Erwartungswert der Reparaturkosten k_R und den Kosten für ggf. auftretende Ersatzbeschaffungen k_{EB} :

$$k_{W+R} = k_W + k_R + k_{EB}, \text{ wobei } k_W = WI \cdot p_W \text{ und } k_R = RH \cdot p_R \quad (4.20)$$

mit

$$\begin{aligned} WI &= \text{Wartungs-/Instandhaltungsintensität (Aktionen/a),} \\ p_W &= \text{Wartungs-/Instandhaltungskostensatz,} \\ RH &= \text{Reparaturhäufigkeit,} \\ p_R &= \text{durchschnittlicher Reparaturkostensatz.} \end{aligned}$$

Aus den Gleichungen 4.17 bis 4.20 setzt sich die Formel zur Abschätzung der Kosten des Betriebszyklus k_{Bet} zusammen:

$$k_{Bet} = \frac{m_B}{m_{Sys}} NI_{Sys} \cdot (EV_{Sys} \cdot p_E + BV_{Sys} \cdot p_B) + WI \cdot p_W + RH \cdot p_R + k_{EB} \quad (4.21)$$

4.5 Modellbaustein FKV-Nachsorgezyklus

4.5.1 Struktur des FKV-Nachsorgezyklus

Nach Beendigung des Nutzungszyklus fallen FKV-Bauteile oder -Strukturen als Altteile im Nachsorgezyklus an. Im Nachsorgezyklus können Altteile zwei prinzipiell unterschiedlichen Entsorgungspfaden zugeführt werden:

- Herkömmliche Entsorgung
- Recycling

FKV-Altteile werden derzeit noch vorwiegend herkömmlich durch Deponierung oder Verbrennung entsorgt. Dazu werden - sofern notwendig - die Altteile demontiert, sortiert und zerkleinert. In einigen Anwendungsbereichen, wie etwa bei Pkw, erfolgt allerdings zumeist keine Demontage oder Sortierung. Hier werden FKV-Teile aus Wirtschaftlichkeitsgründen direkt als Bestandteil des zu entsorgenden Gesamtsystems zerkleinert und fallen nach groben Sortierprozessen als Teil einer Mischfraktion (z.B. Shredderleichtfraktion) an.

Die FKV-Altmaterialien sind meistens als Gewerbeabfälle einzustufen und somit relativ unproblematisch zu entsorgen. Jedoch je nach Herkunft (z.B. Kontamination mit umwelttoxischen Substanzen) oder Ausprägung des anfallenden Abfalls werden FKV-Altmaterialien auch als Sonderabfälle klassifiziert und müssen entsprechend behandelt werden.

Nicht zuletzt aufgrund des sich in Gesetzen und Richtlinien niederschlagenden gesellschaftspolitischen Drucks wird Recycling als Entsorgungspfad auch für FKV zunehmend wichtiger. Unter Recycling wird die Rückführung gebrauchter Materialien in den Stoffkreislauf verstanden. Der Nutzen des Recyclings liegt in der Verringerung der zu deponierenden oder zu verbrennenden Abfallmenge und der Schonung der Rohstoffe. Für FKV wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Recyclingtechnologien entwickelt [163]:

- **Stoffliche Verwertung**
Vom umweltökonomischen Standpunkt aus gesehen ist die stoffliche Verwertung von FKV-Altmaterialien prinzipiell am vorteilhaftesten. Bei thermoplastischen FKV-Abfällen lässt sich dies einfach durch mehr oder minder starkes Zerkleinern und Rückführen in Produktionsprozesse realisieren. Problempunkte hierbei sind die nicht immer sicherzustellende Sortenreinheit, die Zerstörung oder Verkürzung der Verstärkungsstrukturen und ggf. die Degradation der thermoplastischen Matrix. Für duromere FKV kann eine Verwertung als Füllstoff (Pulver, Kurzfasern) in der Kunststoffverarbeitung erfolgen [164, 165]. Größter Nachteil der stofflichen Verwertung von FKV ist derzeit im Allgemeinen die Wirtschaftlichkeit; um FKV kostendeckend zu Regranulaten oder Füllstoffen aufzuarbeiten, müssten Verkaufspreise am Markt erzielt werden, die im Bereich der Preise für Neumaterialien liegen.
- **Chemisches Recycling**
Das chemische Recycling wurde vor allem für duromere FKV entwickelt. Ziel ist die Rückgewinnung einzelner Bestandteile der FKV zur Rückführung in den FKV-Produktionsprozess oder für andere Anwendungsbereiche. Beispielsweise werden durch partielle Hydrolyse unter 300 - 500° C heißem Dampf GFK zu Glassfasern, Styrol, Säure und Öl zerlegt [165]. Der hohe anlagentechnische Aufwand der Verfahren des chemischen Recyclings steht allerdings im Gegensatz zu den zu erzielenden Preisen für die Recyclingprodukte.
- **Pyrolyse**
Die Pyrolyse wurde als Recyclingprozess für FKV erprobt [138]. Durch thermische Zerlegung bzw. teilweise Oxidation bei katalytischen Niedrigtemperaturprozessen können Verstärkungsfasern weitgehend ungeschädigt zurückgewonnen werden, sofern aus prozesstechnischen Gründen keine starke Zerkleinerung notwendig ist. Nebenprodukte sind bitumenähnliche Substanzen, Pyrolysegas oder Öl. Aufgrund der ungenügenden Wirtschaftlichkeit der FKV-Pyrolyse kam dieses Recyclingverfahren noch nicht über das Versuchsstadium hinaus.
- **Thermisches Recycling**
Von thermischem Recycling wird in Abgrenzung zur Verbrennung gesprochen, wenn die beim Verbrennungsprozess anfallende Wärme konsequent genutzt wird und damit fossile Brennstoffe an anderer Stelle eingespart werden. Problematisch bei der Verbrennung von GFK sind die Glasfasern, die verunreinigt in der Verbrennungssasche zurückbleiben und somit als Sonderabfälle teuer zu entsorgen sind. Ein Sonderfall des thermischen Recyclings ist der sog. Zement-Prozess. Hierbei werden FKV-Abfälle in Zementöfen als Brennstoffersatz beigegeben. Die Fasern und andere Verbrennungsrückstände verbleiben als inerte Bestandteile im Zement.

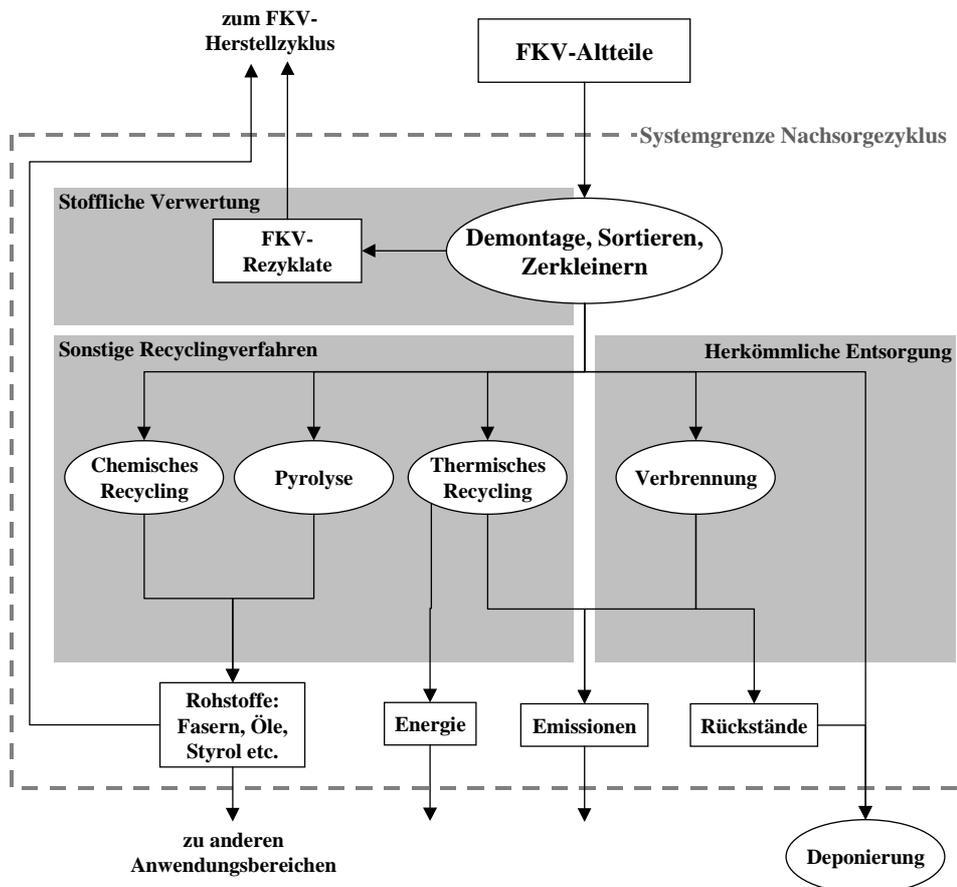


Bild 4-17 Mögliche Pfade im FKV-Nachsorgezyklus

Eine Übersicht über die beschriebenen möglichen Pfade im FKV-Nachsorgezyklus gibt Bild 4-17.

4.5.2 Abbildung des FKV-Nachsorgezyklus im LZK-Modell

Eine detaillierte Darstellung des FKV-Nachsorgezyklus im LZK-Modell (beispielsweise analog zur Technologieabbildungstiefe im Modellbaustein Herstellzyklus) erscheint aufgrund des dazu notwendigen verfahrenstechnologischen Fachwissens im gegebenen Untersuchungsrahmen nicht möglich. Ein weiterer Problempunkt der Modellierung des Nachsorgezyklus besteht darin, dass für FKV derzeit nur wenige praktikable Recyclingtechnologien existieren und sich noch kein stabiler Markt für FKV-Rezyklate etabliert hat. Des weiteren ist anzumerken, dass der Nachsorgezyklus – je nach betrachtetem Analysegegenstand – um viele Jahre nach dem Entstehungs- bzw. Herstellzyklus liegen kann. Somit können sich die Rahmenbedingungen des Nachsorgezyklus (z.B. Rohstoffpreise, Gesetze, etc.) zwischen dem Analysezeitpunkt und dem angenommenen Zeitraum des Nachsorgezyklus grundlegend verändert haben. Die Vorhersage des konkreten Entsorgungs- bzw. Recyclingpfades und dessen kostenrelevanter Charakteristika sind somit kritisch. Aus den genannten Gründen ist eine vereinfachende Beschreibung des FKV-Nachsorgezyklus im LZK-Modell anzustreben.

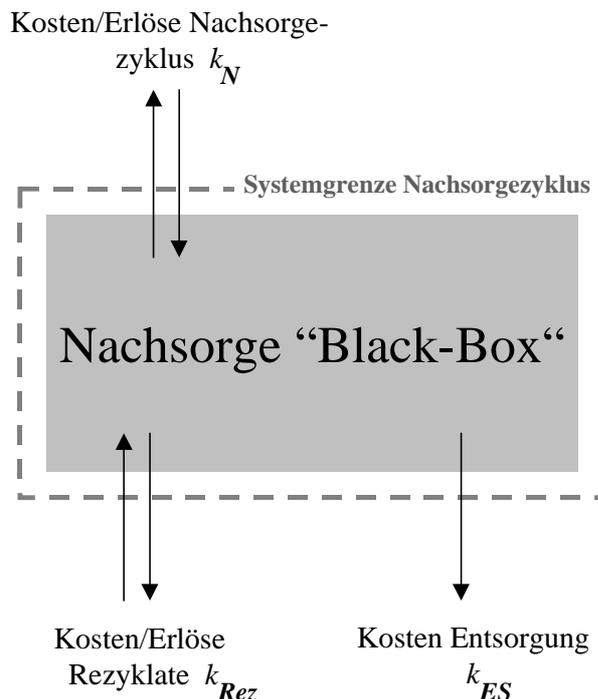


Bild 4-18 Vereinfachte kostenseitige Bilanzierung des Nachsorgezyklus

Dazu wird der Nachsorgezyklus als "Black-Box" interpretiert und lediglich der In- und Output kostenseitig nach Recyclingkosten k_{Rez} sowie Entsorgungskosten k_{ES} getrennt bilanziert (siehe Bild 4-18). Die Kosten des Nachsorgezyklus k_N werden demzufolge über folgende Gleichung beschrieben:

$$k_N = k_{Rez} + k_{ES} \text{ , wobei } k_{Rez} = m_B \cdot p_{Rez} \cdot q_{Rez} \text{ und } k_{ES} = m_B \cdot p_{Ent} \cdot (1 - q_{Rez}) \quad (4.22)$$

mit

- p_{Rez} = Rezyklatkostensatz,
- q_{Rez} = Recyclinganteil am Altteil,
- p_{Ent} = Entsorgungskostensatz.

Somit "reduziert" sich das Problem der Vorkalkulation der Kosten des Nachsorgezyklus auf die Abschätzungen des Recyclinganteils je analysiertem Altteil sowie der Entsorgungs- und Recyclingkosten. Eine Auswahl von abgeschätzten Kosten- oder Erlössätzen für die Entsorgung oder das Recycling von FKV sind in Tabelle 4-5 zusammengestellt.

Aus Tabelle 4-5 wird ersichtlich, dass unter den derzeitigen Rahmenbedingungen nicht nur bei der Entsorgung über die Deponie bzw. Verbrennungsöfen sondern auch beim FKV-Recycling mit Kosten im Nachsorgezyklus zu rechnen ist. Dies steht im krassen Gegensatz zu sehr optimistischen Prognosen aus den USA, die von zukünftig möglichen Recyclingenerlösen (z.B. bei der CFK-Pyrolyse) von bis zu 350 US-\$/t ausgehen [138].

Tabelle 4-5 Auswahl von Kostensätzen für Entsorgung oder Recycling von FKV in Anlehnung an [166]

Recycling-/Entsorgungspfad	Kostensätze [Euro/kg]
Recycling <ul style="list-style-type: none"> • Stoffl. GMT-Recycling • Stoffl. SMC-Recycling • Therm. Recycling Kupol-Ofen • Therm. Recycling Zementofen 	-2 bis -0,01 0,5 - 1,0 0,1 bis 0,15 0,1
Entsorgung <ul style="list-style-type: none"> • Deponie • Verbrennung 	0,025 bis 0,25 0,05 bis 0,25

4.6 Verknüpfung der Modellbausteine

In Kap. 3.3.2 wurde dargelegt, dass die mittels der Modellbausteine berechneten Kosten in den einzelnen Lebenszyklusphasen aufgrund der unterschiedlichen Anfallzeitpunkte nicht direkt zu einem Gesamtlebenszykluskostenbetrag summiert werden können. Kosten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, müssen auf einen gemeinsamen Zeitpunkt umgerechnet werden. Sie sind in temporaler Hinsicht zu homogenisieren. Dieser Vorgang der zeitlichen Homogenisierung wird als Diskontierung bezeichnet. Die hierzu herangezogene, aus der mehrperiodigen Investitionsrechnung entlehnten Methode ist im Wesentlichen nur für pagatorische Größen zugelassen. Die Anwendung der Methode im Rahmen dieser Arbeit auf kalkulatorische Rechengrößen (Kosten) erfolgt unter Bezugnahme auf Kloock [143] und Lücke [144].

Je nach Bezugszeitpunkt der Analyse ist eine Auf- oder Abzinsung der einzelnen Kostenbeträge vorzunehmen. Im Rahmen der Erstellung des LZK-Modells wird das Datum der Analyse als Bezugszeitpunkt festgelegt ($t = 0$). Zur entsprechenden Diskontierung der Kostenbeträge entlang des Lebenszyklus wird die nachstehende Formel herangezogen:

$$LZK = \sum_{t=0}^T \frac{k_t}{(1+d)^t} \quad (4.23)$$

mit

- LZK = Lebenszykluskosten,
- k_t = Summe der Kostenbeträge in Periode t ,
- T = Anzahl Perioden im Gesamtanalysezeitraum,
- d = Kalkulationszinssatz der Diskontierung.

Der FKV-Lebenszyklus bzw. dessen kostenseitige Abbildung ist somit zur Verknüpfung der einzelnen Modellbausteine im LZK-Modell zeitlich strukturiert darzustellen. Aus diesem Grund wird der Gesamtlebenszyklus T in Perioden unterteilt. Als Periode t wird zweckmäßigerweise ein Jahr herangezogen. Die Dauer des Herstell- und des Nachsorgezyklus sind gegenüber dieser kleinsten Lebenszykluszeiteinheit als marginal anzusehen und damit im Modell mit der Zeitdauer 0 abgebildet.

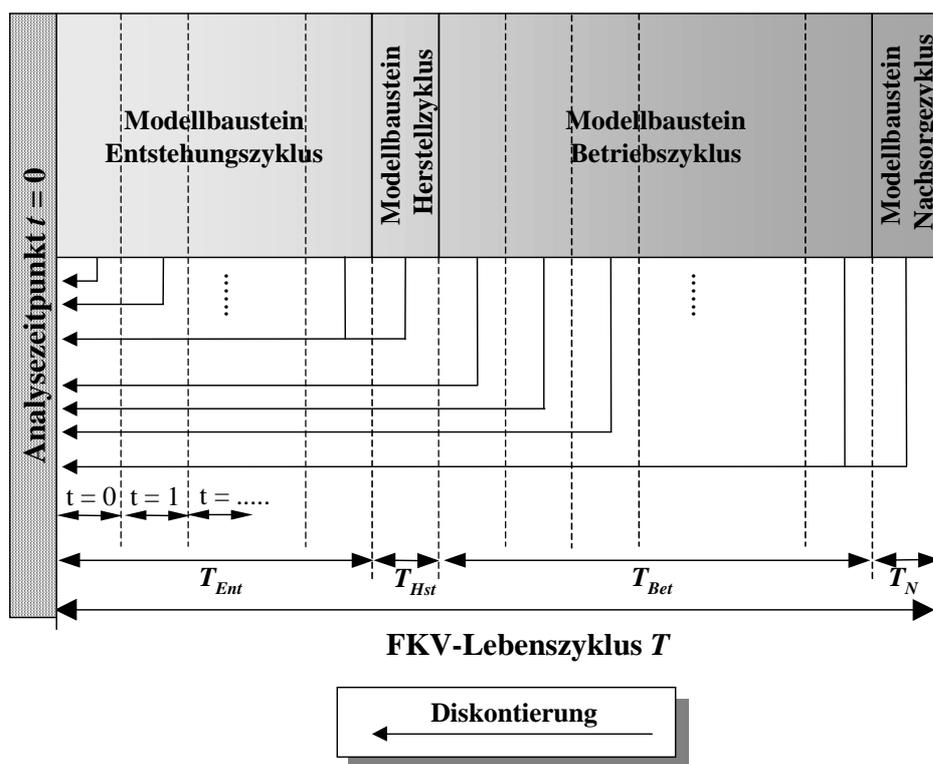


Bild 4-19 Zeitliche Strukturierung und Verknüpfung der Modellbausteine

Die Kostenbeträge der einzelnen Phasen werden auf Basis der Perioden erfasst, für jede Periode addiert und dann je Periodensumme auf den Analysezeitpunkt diskontiert. Die diskontierten Kostengrößen werden dann zum Gesamtlebenszykluskostenwert summiert. Dieses Vorgehen zur Verknüpfung der einzelnen Modellbausteine ist in Bild 4-19 veranschaulicht.

Problematisch ist die Festlegung des Kalkulationszinssatzes für die Diskontierung, da das Ergebnis einer LZK in signifikantem Maße von der Höhe der Diskontierungsrate abhängt. Je höher diese angesetzt wird, um so geringer werden die Kosten der späteren Lebenszyklusphasen bei der Berechnung des Gesamtlebenszykluskostenwerts gewichtet. Der aktuelle Marktzins wird in der Literatur als Basis für den Kalkulationszinssatz der Diskontierung im Rahmen von längerfristig orientierten Kostenanalysen abgelehnt. Kurzfristige Einflüsse wie Geldpolitik, Außenwirtschaftspolitik, Sparverhalten oder internationaler Konjunkturerwicklung sind darin abgebildet, die nicht mit der angestrebten Berücksichtigung der Zeitpräferenz in den Kostenreihen im Zusammenhang stehen [167]. Als geeigneter Referenzwert wird ein am langfristigen Kapitalmarktzins orientierter Kalkulationszinssatz empfohlen, der somit die o.g. eher kurzfristigen Einflüsse ausblendet.

In diesem Zusammenhang steht auch das Problem der Festlegung eines geeigneten Kalkulationszinssatzes der Diskontierung bei LZK-Anwendungen für Analysezeiträume von über 10 - 15 Jahren. Wegen der langen Zeitspanne und der sich ständig ändernden Kredit- und Geldmarktverhältnisse ist der "richtige" Zinssatz für eine Langfrist-LZK, wie beispielsweise bei der Bewertung von FKV-Anwendungen im Bereich Bauwesen mit Analysezeiträumen von bis zu 75 Jahren, nur bedingt vorhersehbar (siehe Bild 4-20). Im Zweifelsfalle empfiehlt es sich, entsprechende Prognosen der verantwortlichen Fachinstitutionen (z.B. in Europa die Europäische Zentralbank) heranzuziehen und ggf. Szenariobetrachtungen durchzuführen.

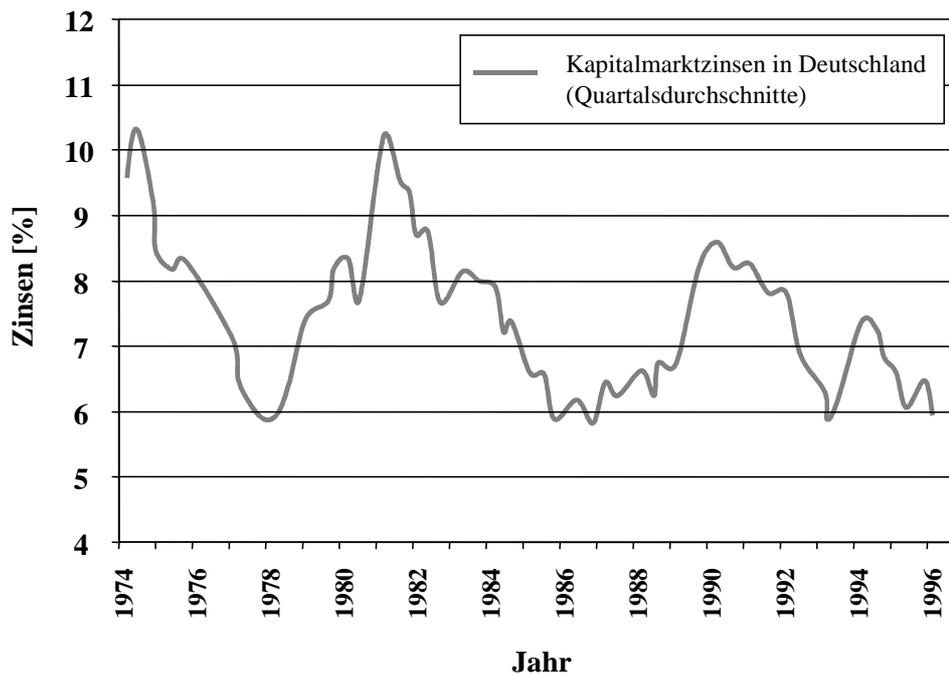


Bild 4-20 Entwicklung der Kapitalmarktzinsen in Deutschland 1974 bis 1996
(Quelle: Deutsche Bundesbank)

5 Verifikation

Die nachfolgend dargelegte Anwendung des entwickelten LZK-Modells auf verschiedene Fallstudien dient

- der Modellvalidierung,
- dem Aufzeigen der Anwendungsoptionen der Methodik bzw. des Modells im Rahmen von konkreten FKV-Entwicklungsaufgaben und
- der Bereitstellung einer Argumentationsgrundlage für die Ableitung einer Entwicklungsstrategie für FKV.

Als Fallstudien werden FKV-Bauteile bzw. -Strukturen aus unterschiedlichen potentiellen Anwendungsfeldern (siehe Kap. 1.2) hinsichtlich der Lebenszykluskostencharakteristik analysiert und mit herkömmlichen Materiallösungen verglichen. Es wurden Beispiele ausgewählt, die im Zusammenhang mit aktuellen industriellen F&E-Problemstellungen stehen.

5.1 Fallstudie I: FKV-Anwendungen im Automobilbau

5.1.1 Anwendungsbeispiele für FKV im Automobilbau

In der Automobilindustrie wird ein sehr großes zukünftiges Anwendungspotenzial für FKV gesehen. Bei den Überlegungen zu Anwendungsoptionen von FKV in diesem Industriesektor gibt es zwei prinzipiell unterschiedliche Ansätze:

- Materialsubstitution (Stahl zu FKV) von einzelnen Bauteilen oder Teilstrukturen von Fahrzeugen bei weitgehend unverändertem Gesamtfahrzeugkonzept (Beispiele siehe Bild 5-1)
- Neukonzeption von Fahrzeugstrukturen mittels FKV-Bauweisen (siehe Bild 5-2)

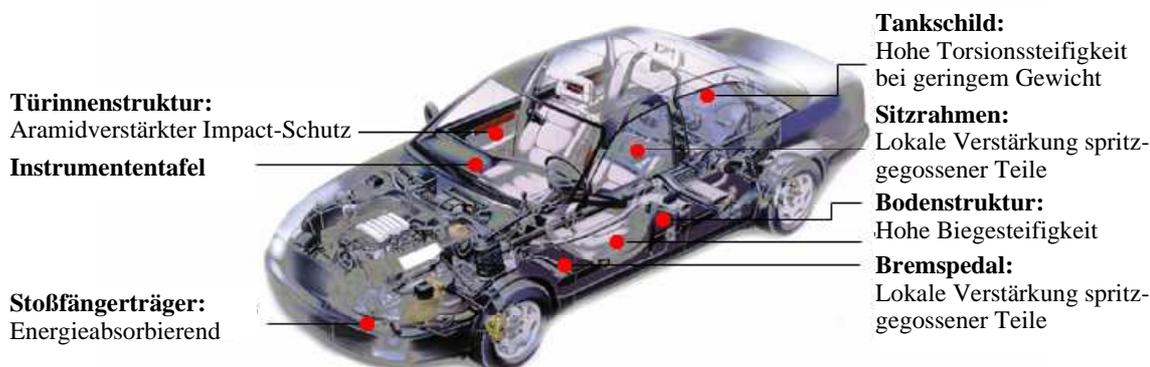


Bild 5-1 Potentielle Anwendungen von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten im Fahrzeugbau (Quelle Bond-Laminates GmbH)

Um diese beiden Ansätze hinsichtlich des Potenzials zur Reduktion der Lebenszykluskosten vergleichend darzustellen und bewerten zu können, werden als Fallbeispiele im Bereich Automobilbau

- ein Längsträger aus dem Vorderwagenbereich als typisches einzelnes Strukturbauteil mit relativ geringer geometrischer Komplexität sowie
- eine Karosserie für einen Kleinwagen als typische, relativ große, komplexe Struktur

betrachtet.

Der für die Analyse besonders interessante Unterschied in der Ausprägung der beiden Modellbauteilen liegt in der unterschiedlichen Art und Weise der abgebildeten Umsetzung der FKV-Technologie. Während für den Längsträger lediglich eine direkte Adaption der herkömmlichen, zweischaligen Stahl-Bauweise dargestellt wird, kann bei der Karosserie der Übergang zu einer verbundwerkstoffgerechten Bauweise (z.B. Monocoque-Bauweise) berücksichtigt werden, welche eine starke Teile- und Funktionsintegration zulässt und somit das konsequente Erschließen der verbundwerkstofftypischen Vorteile ermöglicht. Beispielsweise kann bei der FKV-Karosserie eine drastische Reduktion der Anzahl an notwendigen Einzelteilen erzielt werden. Nach vorliegenden Design-Studien werden ca. 8 bis 12 Teile bei der FKV-Bauweise gegenüber 150 bis 250 bei einer herkömmlichen Stahl-Karosserie benötigt [35, 138, 168].

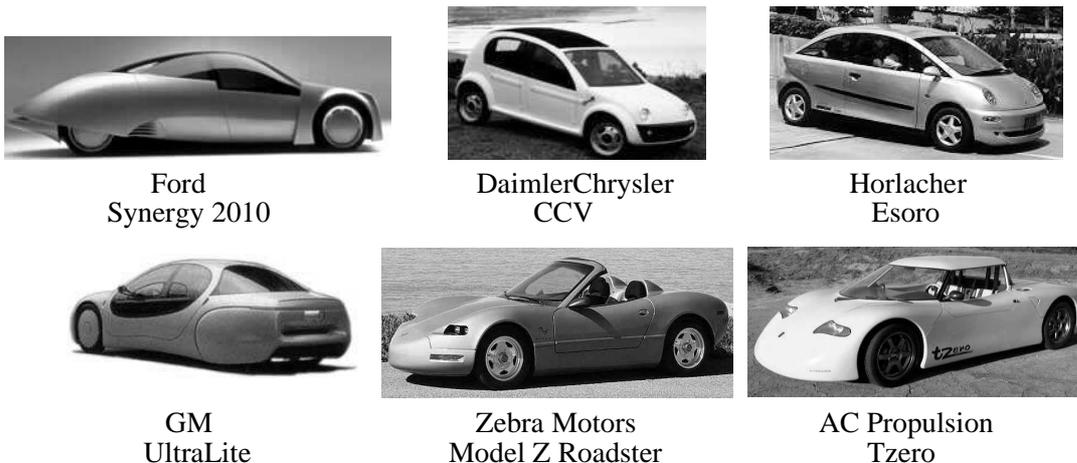


Bild 5-2 Prototypen von Konzeptfahrzeugen mit FKV-Karosserie (Quellen: DaimlerChrysler, Ford, GM, Horlacher, AC Propulsion, Zebra Motors)

Sowohl für einzelne FKV-Strukturbauteile von Fahrzeugen als auch für FKV-Karosserien (siehe Bild 5-2) existiert inzwischen eine ganze Reihe von Studien, die als funktionsfähige Prototypen umgesetzt wurden. Die prinzipielle technische Realisierbarkeit der Fallbeispiele kann somit als erwiesen erachtet werden.

5.1.2 Analytierte Materialoptionen

Der weitaus größte Teil der aktuellen Designkonzepte und Materiallösungen zur Erzielung hoher Gewichtseinsparungen durch Anwendung von Verbundwerkstoffen in der Struktur von Pkw sind auf den Einsatz duromerer FKV ausgerichtet [169, 170].

In der Literatur wird allerdings immer wieder darauf hingewiesen, dass bei den Verbundwerkstoffen mittel- bis langfristig vor allem thermoplastische FKV das weitaus größere Anwendungspotenzial im Automobilbau aufweisen [10, 11, 17, 27, 38, 171-173]. Dies wird vor allem mit der besseren Recyclingfähigkeit der thermoplastischen FKV und deren Potenzial zur Realisierung von großserientauglichen Fertigungsverfahren begründet. Da zur Wirtschaftlichkeit kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Verbundwerkstoffe im Automobilbau nur wenige Daten vorliegen, wird eine Lebenszykluskostenanalyse der Anwendung dieser innovativen Materialklasse für die beiden Modellbauteile durchgeführt.

Die Auswahl von geeigneten thermoplastischen FKV für die Fallbeispiele basiert auf Feasibility-Studien der Automobilindustrie unter Einbeziehung anwendungstypischer Anforderungen sowie unter dem Aspekt der Gewichtsminimierung. Bei den Feasibility-Studien wurde kohlenstofffaserverstärktes PA 6.6 (Verstärkung: Gewebe, T300, 55 vol.-%) als prinzipiell geeignetes Material sowohl für den Längsträger als auch die Karosseriestruktur identifiziert (siehe Tabelle 5-1). In Tabelle 5-2 werden die in den Feasibility-Studien ermittelten Gewichte der beiden FKV-Modellbauteile mit denen von Referenzbauteilen, ausgeführt in der herkömmlichen Stahlbauweise, verglichen.

Es ist anzumerken, dass bei den Feasibility-Studien potentielle Probleme hinsichtlich der Einwirkungen von Umwelteinflüssen auf die mechanischen Eigenschaften von PA 6.6, wie etwa erhöhte Temperaturen, Feuchtigkeit oder auch die Kriechneigung des Materials [174], ausgeklammert wurden. Außerdem blieben Fragestellungen der Fahrzeugsicherheit und andere übergeordnete Aspekte, wie z.B. die Oberflächenqualität [175], unberücksichtigt. Hinsichtlich der Zielsetzung dieser Arbeit sind diese Einschränkungen und Unsicherheiten tolerierbar, müssten aber im Falle konkreterer Überlegungen zur Umsetzung im Detail untersucht werden.

Tabelle 5-1: Materialeigenschaften von CF/PA 6.6-Organoblech (Quelle: Bond-Laminates)

Eigenschaft	Kennwert
E-Modul	66.000 MPa
Schubmodul	25.000 MPa
Zul. Zugspannung	880 MPa

Tabelle 5-2: Vergleich der Bauteilgewichte in FKV- und Stahlbauweise

Bauteil	Bauteilgewicht		Gewichtsreduktion FKV / Stahl
	Stahl-Bauweise	FKV (CF/PA 6.6)	
Längsträger	1,4 kg	0,6 kg	- 57 %
Karosserie	300 kg	170 kg	- 43 %

5.1.3 Analyisierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik

Obwohl bis zur Großserientauglichkeit noch einige technische Probleme zu lösen sind, kann der sog. Organoblech-Prozess als grundsätzlich zur weitgehend automatisierten Herstellung und Verarbeitung von CF/PA-6.6 geeignet eingestuft werden. Der Organoblech-Modellprozess (siehe Bild 5-3) ist folgendermaßen aufgebaut:

- Die kontinuierliche Herstellung von Organoblechen (konsolidierte, flächige FKV-Halbzeuge) erfolgt mittels einer Doppelbandpresse. Ausgangsmaterialien sind Verstärkungshalbzeuge (Gewebe, Gelege, Vliese, Matten, UD-Rovings etc.) und thermoplastisches Matrixmaterial (in Form von Folien, Pulver oder Schmelze). Die konsolidierten Organobleche werden zur Umformung zunächst in einem Ofen oder einem Strahlerfeld über die Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix erhitzt und dann über ein geeignetes Halte- und Spannsystem in eine Presse geladen. Hier wird mittels Stempelumformung die gewünschte Geometrie erzielt. Nach dem Umformen schließen sich Füge- und/oder Nachbearbeitungsschritte an. Zum Fügen des zweiseitigen Längsträgers wird die Vibrations-schweißtechnik angewendet. Für die Karosserie ist eine weitgehend automatisierte Verbindungstechnik mittels Induktionsschweißen denkbar, die sich zur Zeit in der Entwicklungsphase befindet. Zwischen den einzelnen Stationen werden Roboter angeordnet, die einen hohen Automatisierungsgrad der Gesamtprozesskette ermöglichen.

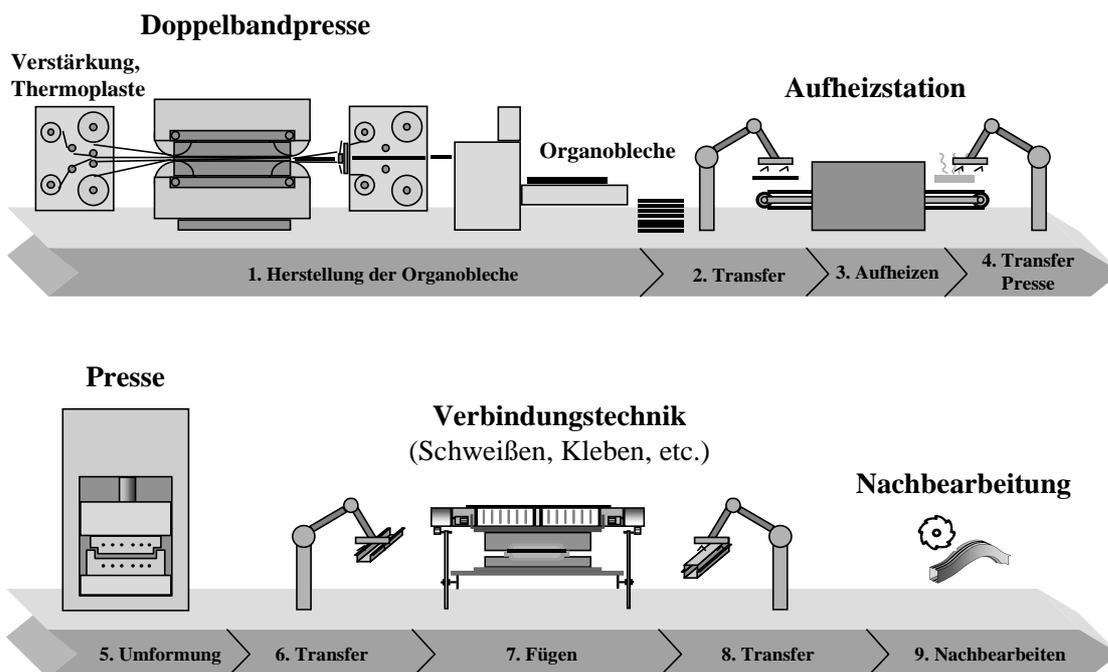


Bild 5-3 Prinzipskizze des Organoblech-Modellprozesses

5.1.4 Annahmen und Inputdaten der LZK

Tabelle 5-3 zeigt einen Auszug aus dem Inputdatensatz des LZK-Modells zur Kalkulation der Lebenszykluskosten für die beiden Fallbeispiele. Zu Vergleichszwecken werden neben den FKV-Bauweisen auch die herkömmlichen Stahl-Ausführungen betrachtet.

Table 5-3: Auszug aus den bauteilspezifischen Inputdaten der LZK-Modellierung für den Längsträger und die Karosserie

	Langträger		Karosserie	
	Stahl-Bauweise	FKV-Bauweise	Stahl-Bauweise	FKV-Bauweise
Jahressollproduktion	100.000 Stk.	100.000 Stk.	50.000 Stk.	50.000 Stk.
Benötigte F&E	-	ca. 1 Jahr	-	ca. 3 Jahre
Material	Stahl	CF / PA 6.6 (Gewebe, T300, 55 vol.-%)	Stahl	CF / PA 6.6 (Gewebe, T300, 55 vol.-%)
Bauteilgewicht	1,4 kg	0,6 kg	300 kg	170 kg
Abfallquote / Ausschussquote / Recyclingquote (produktionsintegriert)	10 % / 1 % / 0 %	10 % / 5 % / 0 %	40 % / 1 % / 0 %	30 % / 5 % / 0 %
Anzahl Einzelteile	2	2	200	10
Materialkosten	0,85 Euro/kg	15 Euro/kg [*]	0,85 Euro/kg	15 Euro/kg [*]
Recyclingquote des Nachsorgezyklus	100 %	0 %	100 %	0 %
Entsorgungskosten (Recyclingerlöse)	(0,15 Euro/kg)	0,05 Euro/kg	(0,15 Euro/kg)	0,05 Euro/kg

* Die Definition eines Basispreises für die ausgewählten FKV ist kritisch, da eine große Anzahl von Variablen und Unsicherheiten den bisher sehr engen Markt beeinflussen. Preisinformationen seitens der industriellen Anbieter stehen nicht zur Verfügung. Deswegen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein "geringster denkbare Materialpreis" für CF/PA 6.6 Organoblech unter Einbeziehung folgender Informationen abgeleitet: Aktuelle Preisinformationen der Kohlenstofffaser- und der Thermoplasthersteller, antizipierte Marktvolumen/Preis-Beziehung, marktübliche Zuschläge für die textile Verarbeitung der Fasern.

Zur Anwendung des LZK-Modells müssen eine Reihe von Annahmen zum Entstehungs-, Herstellungs-, Betriebs- und Nachsorgezyklus getroffen und in Inputdatensätze eingearbeitet werden. Neben einer Abschätzung des notwendigen F&E-Bedarfs bei den FKV-Bauteilen aus Erfahrungswerten zur Abbildung der Entstehungszykluskosten wird für die beiden FKV-Bauteile jeweils ein Prozessketten-Layout entwickelt und in die Prozesskettendatenbank des LZK-Modells übertragen. Die notwendigen Informationen zur Abbildung der Prozessketten zur Herstellung der Referenzbauteile in Stahl-Bauweise werden aus vorliegenden Informationen entnommen [137].

Zusätzlich werden zur Ableitung des Inputs zum Nutzungszyklus folgende statistische Daten ausgewertet:

- Fahrzeugnutzung (durchschnittliche Jahresfahrleistungen und Fahrzeuglebensdauer),
- Fahrzeugbestand (durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch) und

- Daten zu Kfz-Reparaturen (unfallbedingte Reparaturhäufigkeit, Unterteilung der Schadensfälle nach Fahrzeugbereichen, Unfallkosten nach Schadensarten etc.).

Quellen derartiger Daten sind die entsprechenden Statistiken des Kraftfahrzeugbundesamtes, des Statistische Bundesamtes sowie des Verbands der Versicherungsunternehmen.

Der Kalkulation der Nutzungskosten liegt der zum Analysezeitpunkt aktuelle durchschnittliche Kraftstoffpreis von 0,9 Euro/Liter in Deutschland zugrunde. Der Gewichtseinfluss auf den Kraftstoffverbrauch von Pkw wurde mit $0,6 \text{ l}/10^4 \text{ kgkm}$ festgelegt (Erläuterungen siehe Kap. 4.4.2). Die durchschnittliche Jahresfahrleistung von Pkw wurde mit 12.500 km angenommen. Die durchschnittliche Lebensdauer eines Pkw in Deutschland liegt bei rund 12 Jahren.

Die Kosteneffekte des Nachsorgezyklus (siehe Tabelle 5-3) werden auf Grundlage von pauschalen Informationen bzw. Absichtserklärungen der deutschen Automobilindustrie, vorliegenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Recycling von Teilen aus dem Fahrzeugbau und unter Berücksichtigung der Auswirkungen der geplanten Europäischen Richtlinie zur Altautoverwertung sowie Preisinformationen zum derzeitigen Markt für Recyclingmaterialien aus der Altautoverwertung abgeschätzt [176-179].

5.1.5 Ergebnisse

In Bild 5-4 sind die mittels des LZK-Modells kalkulierten Herstellkosten für die beiden Bauteile in den beiden betrachteten Materialvarianten (herkömmliche Stahl-Bauweise und FKV-Bauweise) dargestellt. Dabei wurde eine typische Pkw-Kleinserienproduktion von 50.000 (Karosserie) bzw. 100.000 Stück pro Jahr (Längsträger) zugrundegelegt. Es wird offensichtlich, dass die Herstellung von beiden Modellbauteilen in FKV-Bauweise deutlich kostenintensiver ist als die der herkömmlichen Stahl-Bauweisen (Längsträger: Faktor 2,5; Karosserie: Faktor 1,7). Bereits die Materialstückkosten der FKV-Anwendungen übersteigen die kalkulierten Gesamtstückkosten der Referenzbauteile.

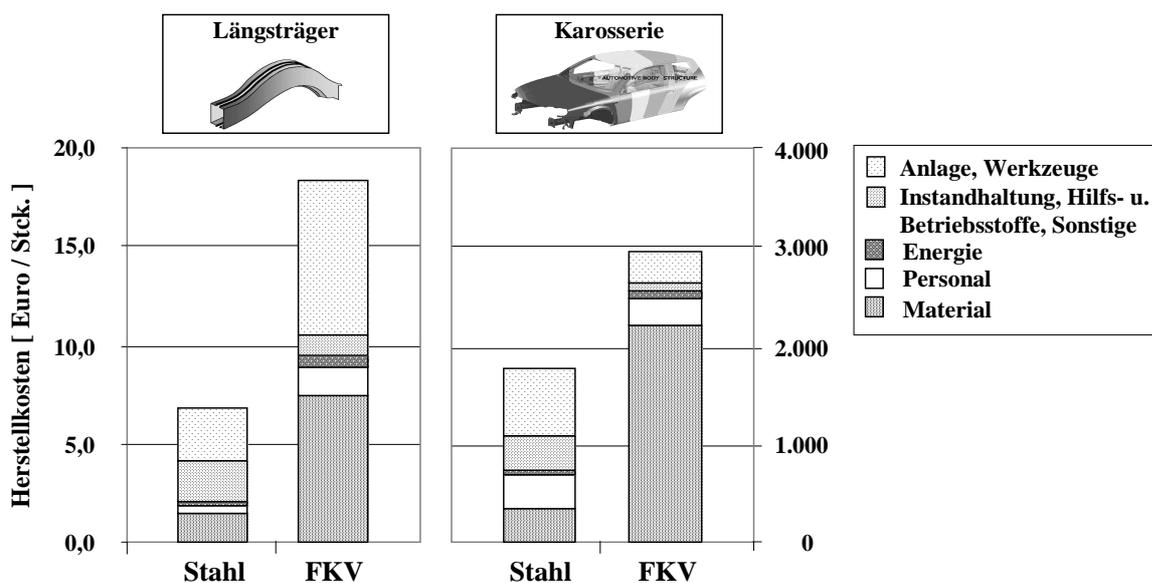


Bild 5-4 Herstellkostenkalkulation für Längsträger und Karosserie

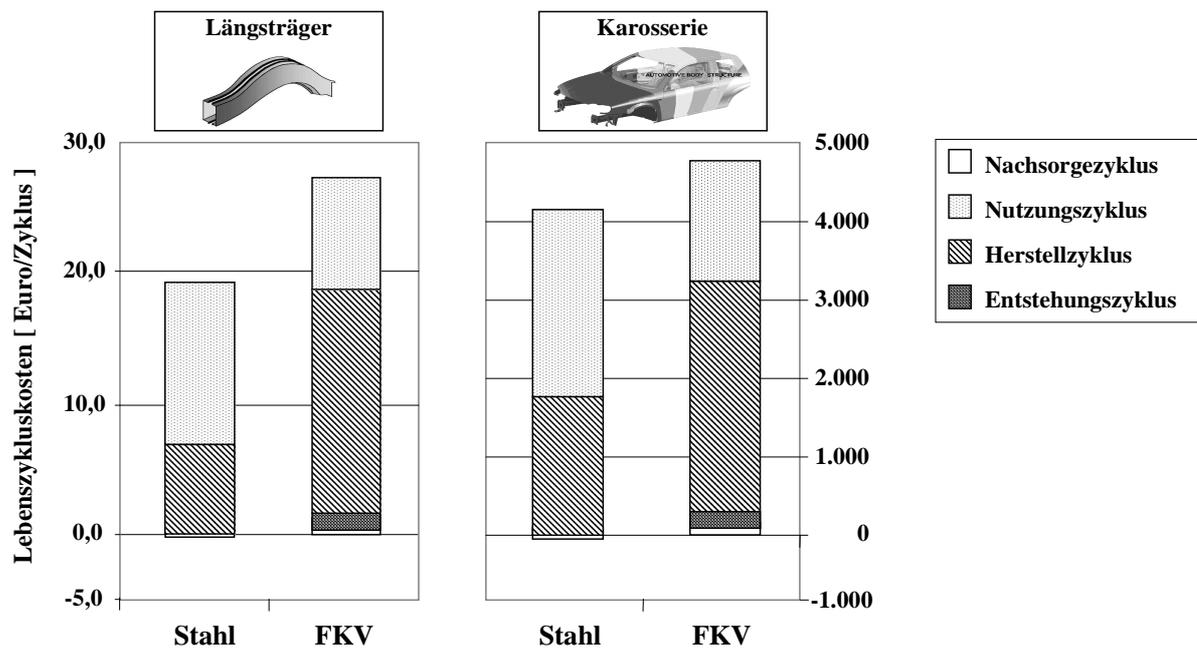


Bild 5-5 Lebenszykluskostenabschätzung für Längsträger und Karosserie

Bild 5-5 zeigt die Abschätzung der Lebenszykluskosten für die Modellbauteile. Obwohl der FKV-Längsträger wesentliche Nutzungszykluskostenvorteile gegenüber dem Stahlteil aufweist, werden die Kostennachteile des Herstellzyklus nicht annähernd kompensiert. Bei der Karosserie sind die Nutzungszykluskosten der FKV-Variante um rund 40 % geringer als die der Stahl-Lösung; aber selbst dieser substantielle Vorteil reicht nicht aus, die höheren Herstellzykluskosten aufzuwiegen.

Aus der Detailanalyse der LZK-Kalkulation ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Kosten des Entstehungszyklus bei den FKV-Varianten der Modellbauteile spielen nur eine untergeordnete Rolle.
- Die Kosten bzw. Erlöse des Nachsorgezyklus sind bei den ausgewählten Fallbeispielen im Hinblick auf die Gesamt-Lebenszykluskostenstruktur unbedeutend.
- Wenngleich die anteiligen Kraftstoffkosten als maßgebliche Komponente der Nutzungszykluskosten infolge der geringeren Gewichte beider FKV-Modellbauteile deutlich niedriger sind als die der Referenzbauteile aus Stahl, so heben sich diese Kostenvorteile im Nutzungszyklus zu einem gewissen Anteil durch die zu erwartenden höheren Reparaturkosten der FKV-Varianten wieder auf.
- Unter den in der Modellierung abgebildeten Rahmendingungen ist die Anwendung der ausgewählten FKV-Materialtechnologie auf die beiden Modellbauteile im Bereich Fahrzeugbau auch unter Einbeziehung des Kriteriums Lebenszykluskosten im Vergleich zu der herkömmlichen Stahl-Bauweise als unwirtschaftlich einzustufen. Dies gilt selbst im Falle der Berücksichtigung verbundwerkstoffgerechter Designkonzepte (Modellbauteil Karosserie). Problematische Kostentreiber sind die hohen Materialkosten der betrachteten FKV, welche die signifikanten Nutzungszykluskostenvorteile der Gewichtseinsparung im Anwendungsfeld Fahrzeugbau überdecken.

5.1.6 Sensitivitätsanalysen

Eine Variation der Annahmen zu den Randbedingungen der LZK-Modellierung kann die Ergebnisse der LZK-Analyse fundamental verändern. Zur fundierteren Interpretation der Ergebnisse einer LZK-Analyse ist die Detailkenntnis dieser Einflüsse wesentlich. Um derartiger Zusammenhänge herauszuarbeiten, werden Sensitivitätsanalysen angewendet. Die Sensitivitätsanalyse kann als Methode beschrieben werden, welche die Veränderung der Ergebnisse einer Modellierung infolge der Variation jeweils einzelner Inputparameter abbildet. Aufgrund der Vielfältigkeit der Inputdaten beim LZK-Modell muss eine Vorauswahl der in die Sensitivitätsanalyse einzubeziehenden Parameter getroffen werden. Zweckmäßigerweise werden insbesondere problematische (unsichere) und/oder hinsichtlich der Analysezielsetzung besonders interessante Parameter ausgewählt.

Für die beiden Fahrzeugbau-Fallbeispiele sind hier beispielhaft die Sensitivitätsanalysen der LZK-Modellierung bezüglich folgender Lebenszykluskosten-Einflussfaktoren ausgeführt:

- Kraftstoffpreis
- Kohlenstofffaserpreis
- Jahresproduktionsvolumen

Bild 5-6 zeigt den Einfluss des angenommenen Kraftstoffpreisniveaus auf die abgeschätzten Lebenszykluskosten von Längsträger und Karosserie im Vergleich zu den Stahl- und FKV-Bauweisen. Für den Längsträger müsste sich das der Kalkulation zugrundeliegende Kraftstoffpreisniveau (Stand Januar 2000) noch deutlich erhöhen, bis die FKV-Bauweise im Vergleich mit der Stahl-Bauweise unter dem Kriterium der Lebenszykluskosten als wirtschaftliche Alternative zu betrachten wäre. Demgegenüber würde bei der Karosserie bereits eine vergleichsweise geringe Erhöhung des angenommenen Kraftstoffpreisniveaus die FKV-Bauweise wirtschaftlicher erscheinen lassen.

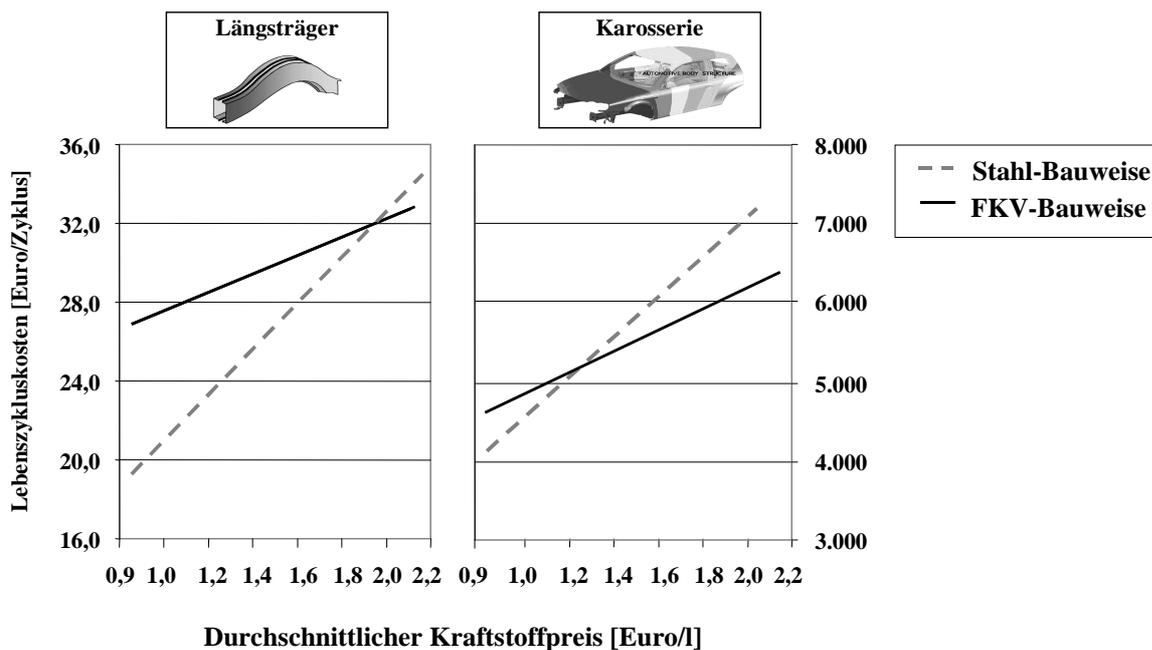


Bild 5-6 Sensitivitätsanalyse: Einfluss des Kraftstoffpreisniveaus auf die kalkulierten Lebenszykluskosten

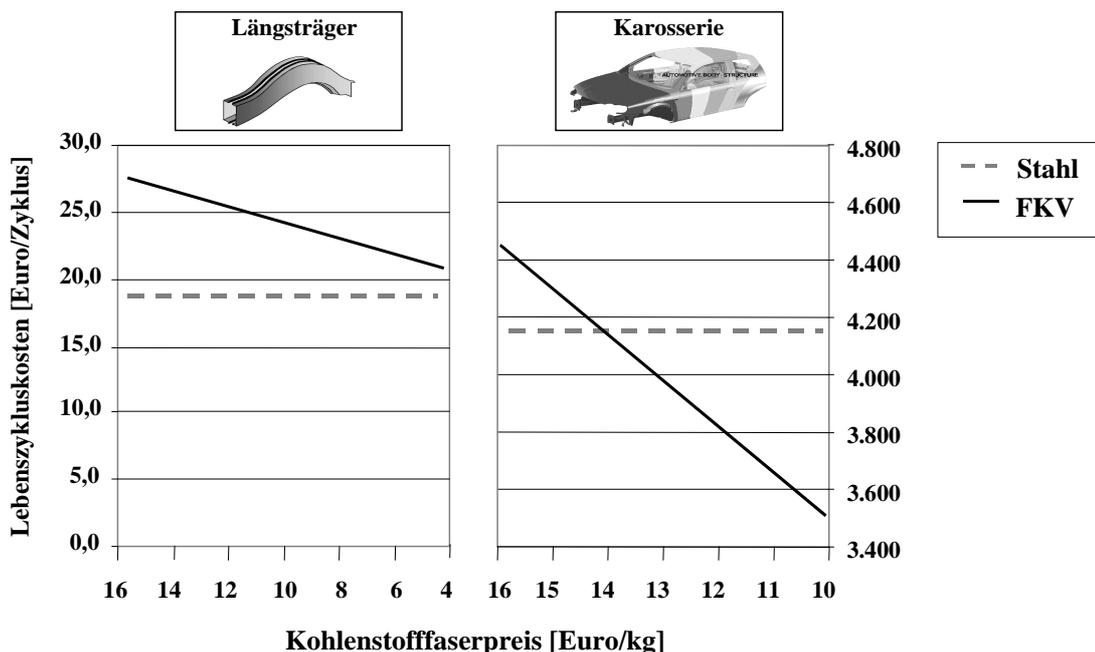


Bild 5-7 Sensitivitätsanalyse: Einfluss des Kohlenstofffaserpreisniveaus auf die kalkulierten Lebenszykluskosten

Bild 5-7 veranschaulicht den Einfluss des Kohlenstofffaserpreises auf die Lebenszykluskosten der FKV-Varianten. Es wird deutlich, dass innerhalb einer realistischen Spanne des Kohlenstofffaserpreises die Lebenszykluskosten des FKV-Längsträgers keinesfalls auf das Lebenszykluskostenniveau der herkömmlichen Stahl-Bauweisen gelangen wird; zum Erreichen der Kostenparität müsste der Kohlenstofffaserpreis unter 4 Euro/kg fallen. Mit Blick auf die Kostenstrukturen der Kohlenstofffaserproduktion [180] und die Kosten der notwendigen Textilprozesse zum Herstellen des Verstärkungshalbzeugs erscheint dies nicht realistisch. Für die Karosserie allerdings wäre bereits ein Kohlenstofffaserpreisniveau von 14 Euro/kg ausreichend, den Break-even der Lebenszykluskosten von FKV- und Stahl-Variante zu erreichen.

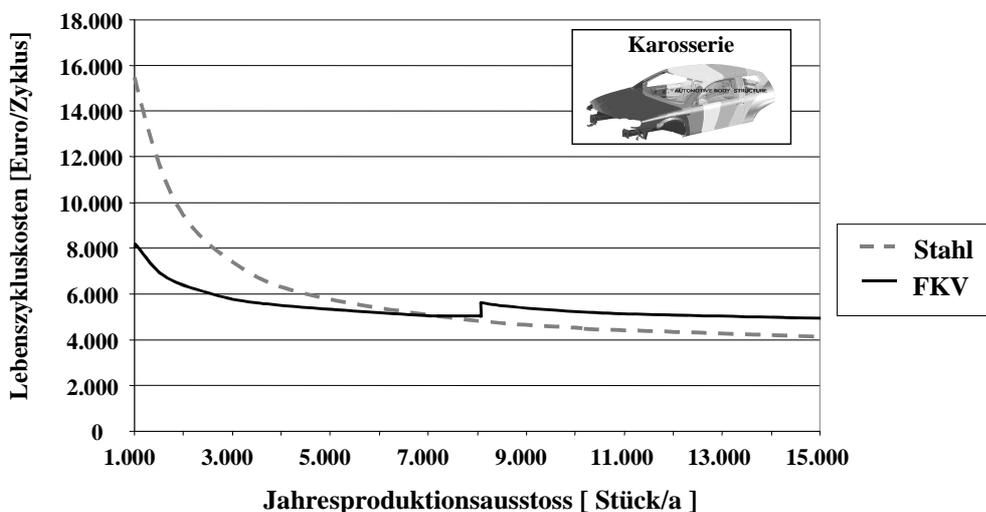


Bild 5-8 Sensitivitätsanalyse: Einfluss des Jahresproduktionsvolumens auf die kalkulierten Lebenszykluskosten des Modellbauteils "Karosserie"

Aufgrund der Sensitivität der Herstellkosten gegenüber einer Variation des Produktionsvolumens (Fixkostendegression) zeigen die Lebenszykluskosten auch eine Abhängigkeit von dieser Einflussgröße. Der mit dem LZK-Modell ermittelte Verlauf der Lebenszykluskostenkurven in Abhängigkeit des Jahresproduktionsvolumens für die FKV- und die Stahl-Karosserie ist in Bild 5-8 dargelegt. Bei einem Jahresproduktionsvolumen von unter rund 7.000 Stück pro Jahr sind die Lebenszykluskosten der FKV-Karosserie geringer als die der Stahl-Variante. Dieses Ergebnis unterstreicht die Herstellkostenvorteile der FKV-Technologie gegenüber der herkömmlichen Stahl-Technologie bei kleinen Stückzahlen infolge der sich in den Fixkosten niederschlagenden, relativ niedrigen Anlagen- und Werkzeugkosten der FKV-Verarbeitung.

5.1.7 Fazit aus den LZK-Analysen

Aus den dargelegten Ergebnissen der LZK-Modellierung für die Fallbeispiele aus dem Anwendungsfeld Fahrzeugbau und den beispielhaften Sensitivitätsanalysen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Analyse deutet darauf hin, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen die Anwendung des ausgewählten kontinuierlich faserverstärkten FKV (CF/PA 6.6) im Bereich Fahrzeugbau hinsichtlich des Bewertungskriteriums "Herstellkosten", verglichen mit den herkömmlichen Stahl-Bauweisen nicht wirtschaftlich ist. Kritischer Kostentreiber sind die Materialkosten (Kohlenstofffasern). Dies gilt insbesondere, wenn die Stahl-Bauweisen direkt auf die FKV-Bauweisen übertragen werden und keine Adaption auf ein verbundwerkstoffgerechtes Designkonzept erfolgt. Durch den Übergang auf verbundwerkstoffgerechte Bauweisen können die verbundwerkstofftypischen Vorteile (z.B. Teileintegration) erschlossen und damit auch materialbedingte Herstellkostennachteile reduziert, aber nicht gänzlich aufgewogen werden.
- Der Herstellkostennachteile der FKV-Bauweisen werden bei den Beispielen nur teilweise durch Nutzungszykluskostenvorteile kompensiert. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen reichen die Kostenvorteile des Nutzungszyklus infolge des geringen Bauteilgewichts nicht zur vollständigen Kompensation aus. Erst eine mehr oder minder deutliche Modifikation der Rahmenbedingungen (höhere Kraftstoffpreise oder geringere Kohlenstofffaserpreise) würden die FKV-Varianten hinsichtlich der Lebenszykluskosten wirtschaftlicher erscheinen lassen.
- Wirtschaftlichkeitsvorteile der analysierten FKV-Technologie gegenüber der herkömmlichen Stahl-Technologie treten bei kleinen Stückzahlen hervor. Hieraus lassen sich wirtschaftlichkeitsbedingte Chancen der Anwendung von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten bei Kleinstserienfahrzeugen ableiten.
- Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine breite Penetration kontinuierlich kohlenstofffaserverstärkter Thermoplaste im Fahrzeugbau in näherer Zukunft nicht zu erwarten ist. Erst wenn die Kraftstoffpreise infolge marktseitiger oder legislativer Einflüsse weiter deutlich steigen oder die Kohlenstofffaserpreise deutlich fallen, ergeben sich reale Chancen auf größere Anwendungsbereiche für FKV im Fahrzeugbau. Ansonsten besteht lediglich ein Potenzial für Nischenanwendungen, z.B. bei Kleinstserienfahrzeugen.

5.2 Fallstudie II: FKV-Anwendung im Anlagenbau

5.2.1 Anwendungsbeispiel: Pumpenschieber für die Verfahrenstechnik

Zu den maßschneiderbaren, herausragenden Merkmalen der FKV gehören die Beständigkeit gegen Chemikalien oder korrosive Medien und die Verschleißfestigkeit. Dies prädestiniert FKV für verschleißintensive Anwendungen in der industriellen Verfahrenstechnik wie z.B:

- Chemische Anlagen
- Raffinerien
- Vakuumtechnologie

Eine interessante innovative FKV-Anwendung in diesem Zusammenhang sind Pumpenschieber in sogenannten Drehschieber- bzw. Flügelzellenpumpen (siehe Bild 5-9).

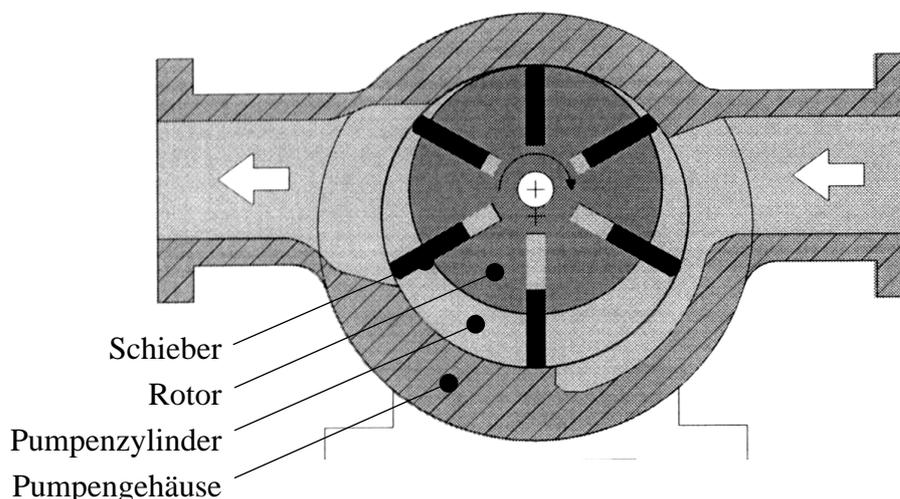


Bild 5-9 Prinzipskizze Drehschieberpumpe

Mit derartigen, häufig magnetgekuppelten Pumpen werden Flüssigkeiten oder Gase radial gefördert. Auf dem im Pumpenzylinder exzentrisch gelagerten Rotor einer Drehschieberpumpe sind 2 bis 6 Schieber in Taschen beweglich angeordnet. Durch die Zentrifugalkraft bei drehendem Rotor werden die Schieber gegen die Wände des Pumpenzylinders gedrückt. Bei einigen Ausführungsvarianten wird die Anpressung an die Zylinderwände zusätzlich durch in den Rotortaschen angebrachten Federn unterstützt. Die zu fördernden Medien werden zwischen benachbarten Schiebern eingeschlossen und durch die Rotorbewegung radial transportiert. Durch den sich erweiternden Querschnitt des eingeschlossenen Volumens am Eintrittsflansch werden die Medien in die Pumpe gesaugt und durch den sich verengenden Querschnitt am Austrittsflansch herausgedrückt.

Bei Pumpen für Chemikalien oder korrosive Flüssigkeiten müssen alle mit dem Fördermedium in Berührung kommenden Bauteile der Pumpe aus entsprechend beständigen Materialien hergestellt werden. Das Gehäuse und der Rotor einer Drehschieberpumpe werden deshalb i.d.R. aus hochwertigen Legierungen gefertigt.

Aufgrund des speziellen Anforderungsprofils, bestehend aus der Kombination von

- hohen mechanischen Kennwerten,
- Beständigkeit gegen Chemikalien und korrosive Medien,
- hohe Verschleißfestigkeit und
- ggf. hohe Dauereinsatztemperaturen

werden für die Schieber i.d.R. entweder hochlegierter Nickelstahl (z.B. Hasteloy) oder CFC (Kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff) eingesetzt.

Trotz Verwendung dieser hochwertigen Materialien bleibt bei dauerbetriebenen Drehschieberpumpen unter Einfluss aggressiver Medien (z.B. starke anorganische Säuren) der Verschleiß der Schieber infolge der Reibung mit der Pumpenzylinderwand häufig problematisch. Bereits nach wenigen Wochen Betriebsdauer müssen bei einigen in sicherheitsrelevanten Bereichen verfahrenstechnischer Anlagen eingesetzten Hochleistungspumpen Wartungsarbeiten durchgeführt und dabei oft die Schieber verschleißbedingt ausgewechselt werden. Da bei Großanlagen, wie beispielsweise Raffinerien, weit über 50 derartiger Pumpen installiert sein können, ist insgesamt ein hoher wartungstechnischer Aufwand gegeben.

Wie auch in anderen Industriebereichen werden bei verfahrenstechnischen Anlagen – neben der funktionellen Betriebsweise und den sicherheitstechnischen Anforderungen – vermehrt optimale Lebensdauer, Umweltaspekte und wirtschaftliche Betriebsweisen in den Vordergrund gestellt. Ein gestiegenes Umweltbewusstsein, die Verschärfung behördlicher Auflagen, aber insbesondere auch die Notwendigkeit zur Senkung von Betriebskosten erfordern somit auch eine marktgerechte Weiterentwicklung aller Anlagenkomponenten und damit auch der Drehschieberpumpen. Als ein potentieller Hauptansatzpunkt zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit wurden die Schieber der Pumpen identifiziert.

Aufgrund des Eigenschaftsprofils bieten sich FKV zur Substitution der konventionellen Pumpenschieber-Materialien an. Seitens der Industrie werden seit einiger Zeit entsprechende Überlegungen angestellt und technische Feasibility-Studien vorangetrieben. Deshalb erscheint auch eine Analyse der Wirtschaftlichkeit dieser innovativen Anwendung mittels des LZK-Modells sinnvoll.

5.2.2 Analyisierte Materialoption

Das erläuterte Anforderungsprofil des analysierten Anwendungsbereichs schränkt das Spektrum der möglichen FKV-Materialoptionen stark ein. Letztlich erscheint kohlenstofffaserverstärktes PEEK (CF/PEEK) besonders gut als Material für den Schieber geeignet. CF/PEEK stellt die Kombination der sehr guten mechanischen Eigenschaften von Kohlenstofffasern und der chemischen Beständigkeit, guten tribologischen Eigenschaften sowie der guten Temperaturresistenz des Thermoplasts PEEK dar.

Durch Entwicklung eines neuartigen CF/PEEK-Prepregs und einer innovativen Prepreg-Technologie konnten die Verarbeitungs- bzw. Verfügbarkeitsprobleme der bisher am Markt erhältlichen Halbzeuge überwunden werden.

Das auf dieser Basis hergestellte CF/PEEK-Laminat (CF-Gewebeverstärkung: Atlas 1/4, T300) weist folgende Charakteristika auf [181]:

- Faservolumengehalt 50 %,
- Dauereinsatztemperaturen bis zu 200 °C
- Biegefestigkeit 1.100 MPa
- Biegesteifigkeit 55 GPa
- Geringe thermische Ausdehnung
- Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit
- Gute tribologische Eigenschaften

Verglichen mit herkömmlichen Schieber-Materialien ist die hohe Verschleißfestigkeit das Alleinstellungsmerkmal von CF/PEEK für den hier betrachteten Anwendungsbereich. Nach ersten Untersuchungen der Anwenderindustrie werden mit CF/PEEK in Drehschieberpumpen Standzeiten erreicht, die unter völlig gleichen Betriebsbedingungen um ein Vielfaches höher liegen als mit Schiebern aus gängigen Materialien. Bild 5-10 zeigt einen Prototyp des CF/PEEK-Schiebers.

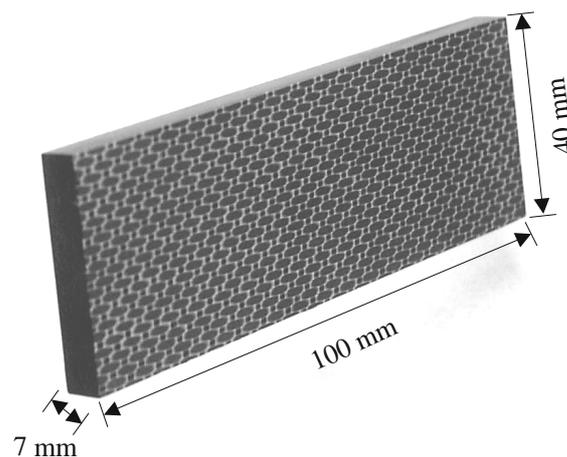


Bild 5-10 Prototyp eines CF/PEEK-Pumpenschiebers

5.2.3 Analytierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik

Zur Verarbeitung thermoplastischer Prepregs zu konsolidierten Platten stehen mehrere Verarbeitungsoptionen offen:

- Doppelbandpressentechnik
- Herkömmliche Presstechnik (diskontinuierliche Pressen)
- Autoklaventechnik

Aufgrund der notwendigen, vergleichsweise hohen Verarbeitungstemperaturen von PEEK bietet sich insbesondere der Autoklavenprozess als geeignete Verarbeitungstechnik zum Herstellen des CF/PEEK-Pumpenschiebers aus pulverimprägnierten Prepregs an.

Bei den anderen beiden Verfahren ist i.d.R. ein größerer anlagentechnischer Aufwand erforderlich.

Die Autoklaventechnik ist ein universell einsetzbares Verarbeitungsverfahren für duromere und thermoplastische FKV. Es können hiermit nahezu beliebig geformte Bauteile hergestellt werden. Im Gegensatz zu den anderen betrachteten Verfahren ist die Prozesskette der Autoklaventechnik insgesamt allerdings kaum zu automatisieren. Dies liegt im wesentlichen im notwendigen manuellen Laminataufbau, der den ersten Schritt in der Prozesskette bildet.

Bei der Verarbeitung thermoplastischer FKV mittels Autoklaventechnik werden Zuschnitte von Verstärkungshalbzeugen, thermoplastischer Matrix oder auch Prepregs auf ein Metallwerkzeug abgelegt und mit einer temperaturbeständigen Vakuumfolie luftdicht verschlossen. Der zweite Schritt ist der eigentliche Autoklavenprozess. Der auf einer Bestückungseinrichtung angeordnete Laminataufbau wird dazu in den Autoklav verbracht und der Vakuumsack an einen darin befindlichen Vakuumanschluss gekoppelt. Nach Schließen des Autoklavs und Evakuieren des Vakuumsacks wird im Autoklav ein zusätzlicher Verdichtungsdruck aufgebaut. Gleichzeitig wird der Autoklav über die Schmelztemperatur des jeweiligen thermoplastischen Matrixmaterials erhitzt und eine gewisse Zeit auf dieser Temperatur gehalten. Danach erfolgt ein Abkühlzyklus, wobei der Druck zunächst aufrechterhalten wird. Nach Entspannen des Autoklavs kann das Bauteil entformt werden. Es schließen sich als letzte Elemente in der Prozesskette ggf. Nachbearbeitungs-, Trenn- oder Fügeschritte zur Fertigstellung des jeweiligen Bauteils an.

Im Falle der Herstellung des CF/PEEK-Pumpenschieber sind drei Fertigungsschritte erforderlich (siehe Bild 5-11): Laminataufbau, Autoklavenzyklus, Nachbearbeitung/Trennen. Nach Aufbau des Laminats mit Vakuumsack auf einer ebenen Grundplatte wird im Autoklav eine konsolidierte CF/PEEK-Platte hergestellt. Der Autoklavenzyklus dauert ca. 4 Stunden. Die Platte wird abschließend auf Maß geschliffen und in die gewünschte Geometrie des Pumpenschiebers zerteilt. Als Präzisionstrenntechnik für CF/PEEK hat sich das Wasserstrahlschneiden als besonders geeignet erwiesen.

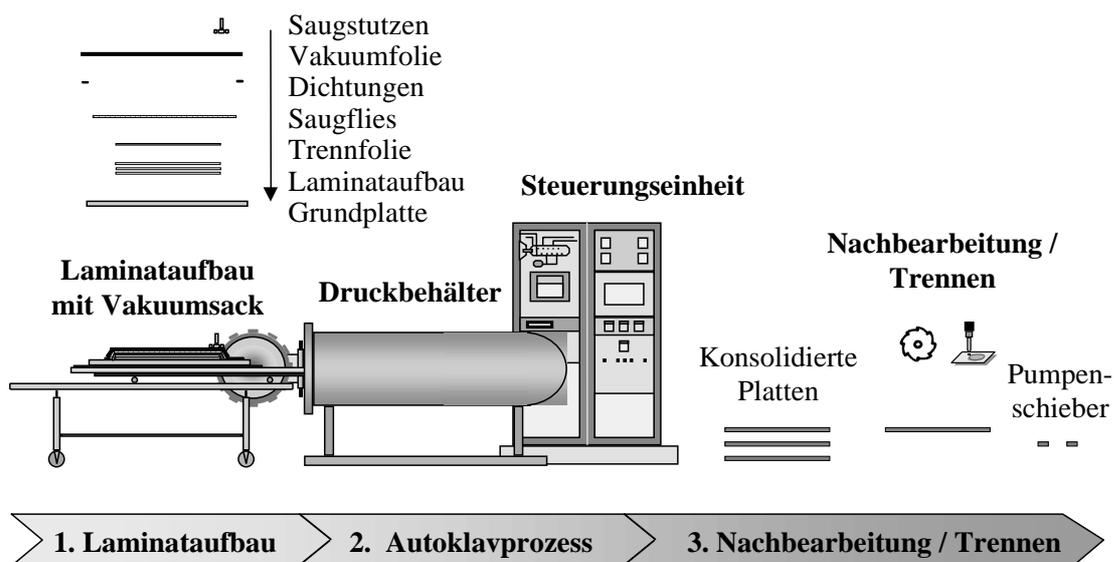


Bild 5-11 Prozesskette zur Herstellung des CF/PEEK-Pumpenschiebers

Bei der Geometrie des hier als Modellbauteil ausgewählten Pumpenschiebers (siehe Bild 5-10) lassen sich in einem kleineren Autoklaven rund 50 bis 150 Teile pro Fertigungszyklus herstellen.

5.2.4 Annahmen und Inputdaten der LZK

Die Lebenszykluskosten des FKV-Pumpenschiebers werden mit denen der konventionellen Ausführungsvarianten aus CFC bzw. hochlegiertem Stahl (Hasteloy) verglichen. Ein Auszug aus dem Inputdatensatz für die LZK-Modellierung ist in Tabelle 5-4 aufgeführt.

Da die Entwicklung des FKV-Schiebers bis zum Prototypstadium abgeschlossen ist und auch eine Herstellprozessentwicklung nicht mehr notwendig erscheint, wird keine F&E-Phase (Entstehungszyklus) berücksichtigt. Die Prozesskette zur Herstellung des FKV-Bauteils leitet sich aus dem beschriebenen Layout des Laborprozesses für den existierenden Prototypen ab. Dieses Basislayout wird auf Serienmaßstab projiziert (Up-scaling). Prozessbeschreibungen und Kostendaten der Industrie bilden die Grundlage zur Abbildung der Herstellprozesse für die Referenzvarianten aus CFC und Hasteloy. Beim Nutzungszyklus werden die schieberbezogenen Wartungskosten der Pumpen sowie die Kosten für den Ersatz verschlissener Schieber einbezogen.

Die kostenmäßige Bewertung der bei Wartungsintervallen zu ersetzenden Schieber erfolgt auf Basis der jeweilig abgeschätzten Herstellkosten. Für die Schieber aus Hasteloy und CFC wird entsprechend der Praxiserfahrungen ein Wartungsintervall von 8 Wochen einkalkuliert.

Table 5-4: Auszug aus den bauteilspezifischen Inputdaten der LZK-Modellierung für den Pumpenschieber

	Pumpenschieber		
	Stahl	CFC	FKV
Jahressollproduktion	50.000 Stk.	50.000 Stk.	50.000 Stk.
Benötigte F&E	-	-	-
Material	Hasteloy	CFC	CF/PEEK
Materialkosten	250 Euro/kg*	30 Euro/kg*	125 Euro/kg*
Abfallquote / Ausschussquote / Recyclingquote	5 % / 1 % / 0 %	10 % / 1 % / 0 %	10 % / 5 % / 0 %
Bauteilgewicht	200 g	49 g	55 g
Recyclingquote Nachsorgezyklus	0 %	0 %	0 %
Entsorgungskosten (Re-	(0,15 Euro/kg)	0,08 Euro/kg	0,08 Euro/kg

cyclingerlöse)			
----------------	--	--	--

* Basis: Marktpreisinformationen, Stand 5/1999

Die Abschätzung der Nutzungszykluskosten für die innovative FKV-Variante basiert auf Pilotuntersuchungen der Anwenderindustrie. Obwohl nach 3-jährigem Dauereinsatz bei den industriellen Anwendungstests der FKV-Schieber kein signifikanter Verschleiß festgestellt werden konnte, ist aufgrund von Überlegungen zur Betriebssicherheit ein einjähriger Wartungszyklus und ein Wechsel der Schieber nach drei Jahren zu veranschlagen. Indirekte Kosteneffekte der Wartungsintervalle (z.B. durch Ab- und Anfahren von Anlagen, Ausfallzeiten etc.) bleiben hier unberücksichtigt.

Zur kostenmäßigen Erfassung des Nachsorgezyklus wurde für die Stahl-Variante ein Altmetallerlös angesetzt. Demgegenüber wurde für die CFC- und die FKV-Ausführungen Entsorgungskosten berücksichtigt.

5.2.5 Ergebnisse

Die mittels des LZK-Modells berechneten Herstellkosten der drei Ausführungsvarianten des Pumpenschiebers sind in Bild 5-12, nach Kostenarten aufgelöst, dargestellt. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass hinsichtlich der Herstellkosten die Hasteloy-Variante am ungünstigsten ist. Ursache dafür sind einerseits sehr hohe Materialkosten des Nickelstahls und andererseits hohe Fertigungskosten infolge der schwierigen Bearbeitbarkeit des Materials (z.B. hoher Werkzeugverschleiß). Dagegen liegen die Herstellkosten der CFC-Variante deutlichst niedriger (Faktor 6). Die Herstellung des aus CF/PEEK gefertigte Schieber kostet rund doppelt so viel, wie die des CFC-Schiebers.

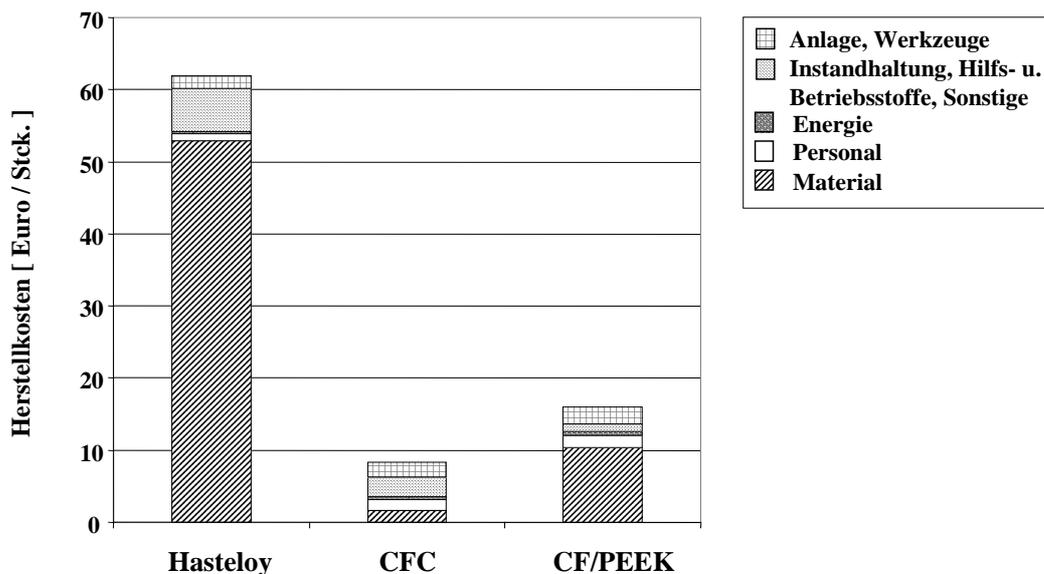


Bild 5-12 Herstellkostenkalkulation für den Pumpenschieber

Die Lebenszykluskostenbetrachtung der Pumpenschieber ist in Bild 5-13 veranschaulicht. Hier wird erkennbar, dass die Lebenszykluskosten von Pumpenschiebern weitgehend nutzungszyklusdominiert sind.

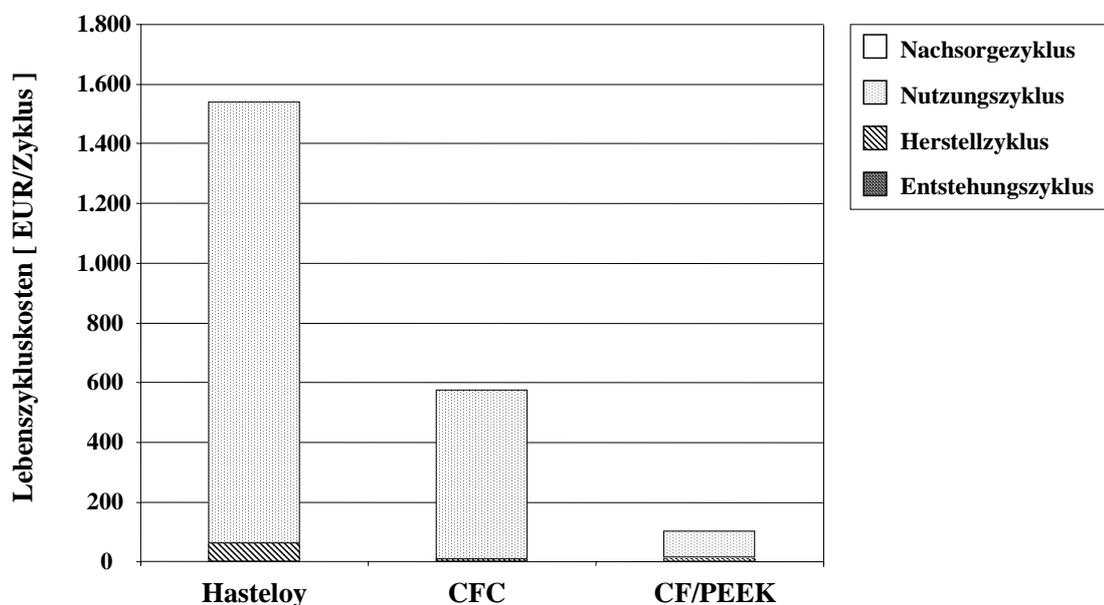


Bild 5-13 Lebenszykluskostenabschätzung für den Pumpenschieber

Der Nachsorgezyklus spielt für die Kostenstruktur keine wesentliche Rolle. Die Hasteloy-Ausführung tritt mit vergleichsweise hohen Lebenszykluskosten hervor. Der Übergang zu CFC reduziert demgegenüber bereits die Kosten um rund 60 %. Wirtschaftlichste Variante ist der neuartige FKV-Schieber (CF/PEEK) mit einem Lebenszykluskostenvorteil von

- -80 % im Vergleich zur CFC-Ausführung und
- -90 % im Vergleich zur Hasteloy-Ausführung.

5.2.6 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenbetrachtung für den Pumpenschieber sind eindeutig. Selbst relativ starke Variationen der Inputdaten würden das grundsätzliche Ergebnis der Analyse ($LZK_{\text{Stahl}} \gg LZK_{\text{CFC}} \gg LZK_{\text{FKV}}$) nicht verändern. Somit sind Sensitivitätsanalysen für diese Modellapplikation eigentlich nicht notwendig. Da sich allerdings der Wartungs-/Schieberaus-tauschintervall als zentrale, kritische Größe der Lebenszykluskostenstruktur des Pumpenschiebers darstellt, ist eine entsprechende modellgestützte Sensitivitätsanalyse für die FKV-Variante zweckmäßig.

Bild 5-14 beinhaltet die Analyse der Abhängigkeit der Lebenszykluskosten des FKV-Schiebers aus CF/PEEK von der Reduktion der Wartungsintensität im Vergleich zur CFC- bzw. Hasteloy-Variante. Bereits durch eine geringen Reduktion der Wartungsintensität (ab -20%) stellt der FKV-Schieber die wirtschaftlichste Materialoption dar.

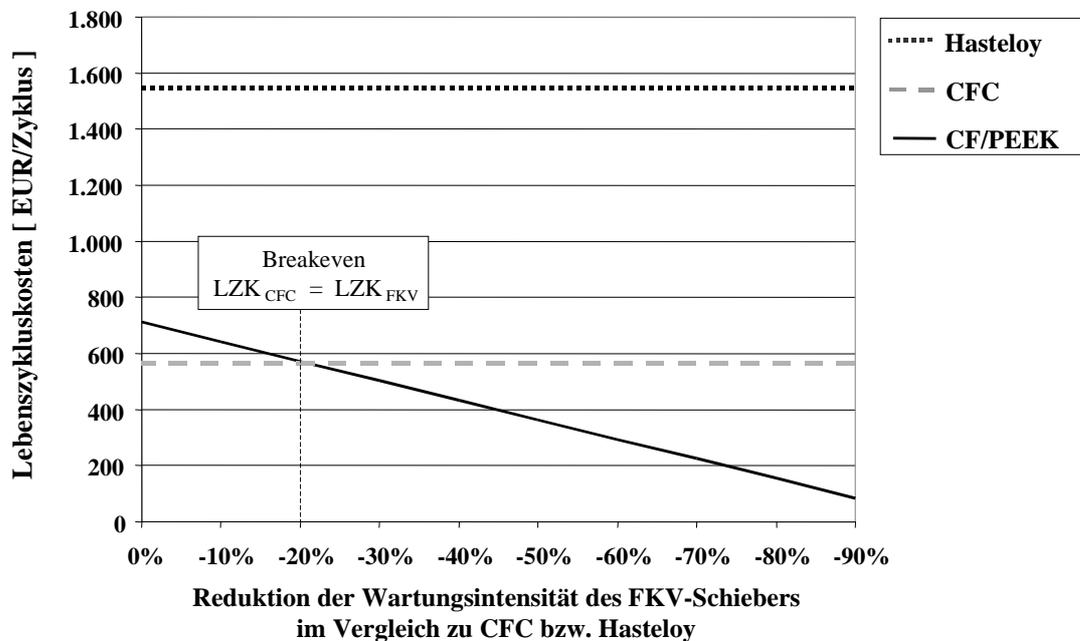


Bild 5-14 Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Wartungsintensität auf die kalkulierten Lebenszykluskosten des FKV-Pumpenschiebers

5.2.7 Fazit aus der LZK-Analyse

Die durchgeführte Analyse der Lebenszykluskosten des angestrebten Einsatzes von CF/PEEK bei Schiebern in Drehschieberpumpen und der Vergleich der Daten mit den herkömmlichen Materialien (CFC, Hasteloy) offenbart das hohe Kostenreduktionspotenzial in Nutzungszyklus durch die innovative FKV-Anwendung. Die im Vergleich zu CFC gegebenen Herstellkosten-nachteile sind gegenüber den Nutzungszykluskostenvorteilen unbedeutend.

Bereits eine relativ geringe Ausdehnung der Wartungsintervalle durch den Einsatz verschleiß-festerer Materialien würde die Wirtschaftlichkeit von Drehschieberpumpen signifikant steigern. Dies spricht für den Einsatz von CF/PEEK, selbst wenn der drastische Sprung in der Ausdehnung der Wartungs- und Schieberwechselintervalle nicht in dem prognostizierten Ausmaß in der Praxis durchsetzbar wäre (z.B. infolge von sicherheitstechnischen Restriktionen).

5.3 Fallstudie III: FKV-Anwendung im Bauwesen

5.3.1 Anwendungsbeispiel: FKV-Brückenstruktur

Zu kaum einem anderen innovativen Anwendungsfeld wird in der Literatur so oft und deutlich auf potentielle Lebenszykluskostenvorteile der FKV-Anwendung hingewiesen wie im Bauwesen. Hintergrund sind die im Vergleich zu vielen Konsum- oder Investitionsgütern sehr langen Lebenszyklen von Bauwerken in Kombination mit hohen Kosten während der Nutzungsphase, bedingt durch regelmäßig notwendige Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten. Durch Einsatz von FKV sollen insbesondere die Nutzungszykluskosten signifikant reduziert werden.

Brückenbauten werden in diesem Kontext als besonders attraktives Segment für die Anwendung von FKV angeführt [44-46, 49, 182]. Die antizipierte wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des FKV-Einsatzes bei Brücken bezieht sich auf zwei wesentliche technische FKV-Merkmale:

- Hohe Tragfähigkeit bei geringem Eigengewicht
- Lange Lebensdauer infolge Korrosionsbeständigkeit und günstigem Ermüdungsverhalten

Im Einzelnen lassen sich daraus im Vergleich zu herkömmlichen Brückenbauweisen (Stahl, Spannbeton etc.) u.a. folgende Argumente ableiten:

- Geringere Kosten des Baubetriebs (Herstellzykluskosten) infolge
 - geringerer Transportkosten für die leichten, ggf. modular aufgebauten Strukturen,
 - geringere Kosten des Maschinenparks (Kräne etc.),
 - geringere Personalkosten durch Bauzeit- und Personalbedarfeinsparung sowie
 - geringere volkswirtschaftliche Kosten durch kürzere Verkehrsbehinderungen.
- Geringere Kosten während der Brückennutzung (Nutzungszykluskosten) infolge von Möglichkeiten
 - der Online-Fernüberwachung durch integrierte Sensoren,
 - der Ausdehnung der Inspektions- und Wartungsintervalle und
 - der Vermeidung von Reparaturmaßnahmen bzw. frühzeitigem Ersatzneubau.

Diesen potentiellen FKV-Kostenvorteilen stehen höhere Materialkosten gegenüber [44]. Die in herkömmlichen Brücken eingesetzten Materialien wie Stahlbeton weisen ein Materialkostenniveau von 0,3 bis maximal 1 Euro/kg auf. Die Kostenuntergrenze von typischerweise im Bauwesen einzusetzenden FKV (v.a. GFK) liegen bei ca. 10 Euro/kg. Allerdings lassen sich mittels FKV Brückenstrukturen realisieren, die bei gleicher oder erhöhter Tragfähigkeit wie Stahlbeton 50 bis 80 % leichter sind und damit einen geringeren Materialeinsatz erfordern.

Bisher wurden in Europa nur einige Fußgängerbrücken in FKV ausgeführt [182]. In den USA hingegen sind schon seit einigen Jahren verschiedenen Prototypen von FKV-Straßenbrücken (Beispiel siehe Bild 5-15) mit geringer Spannweite im Testbetrieb [183]. Erste Planungen zur Realisierung großer FKV-Brückenstrukturen bestehen auf beiden Seiten des Atlantiks [44, 184].

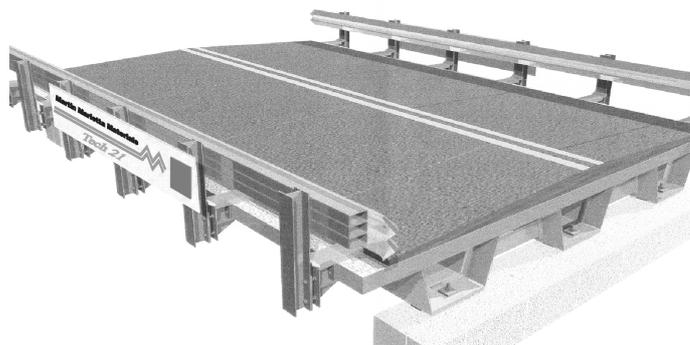


Bild 5-15 Tech 21 - Prototyp einer FKV-Straßenbrücke (Quelle: Martin Marietta)

Obwohl es auf der Hand liegt, die Wirtschaftlichkeit der potentiellen FKV-Anwendung im Brückenbau im Schnittfeld von Nutzungszyklusvorteilen und ggf. Entstehungszykluskostennachteilen mittels Lebenszykluskostenanalyse vergleichend zu bewerten, sind nur wenige, zumeist auf Teilaspekte ausgerichtete Studien v.a. aus den USA bekannt [45]. Daher soll hier exemplarisch eine nach deutschen Maßstäben ausgelegte FKV-Brücke hinsichtlich der Lebenszykluskosten bewertet und mit der herkömmlichen Betonbauweise verglichen werden.

5.3.2 Bauweise, Grobbemessung, analysierte Materialoption

Als Fallbeispiel wird eine typische zweispurige Straßenbrücke mit einer Gesamtspannweite von 36 m gewählt (siehe Bild 5-16). Derartige Brücken dienen z.B. zur kreuzungsfreien Überbrückung von Schnellstraßen. Die Brücke wird auf den Regelquerschnitt RQ 12,5 ausgelegt. Rund 30 % der in Deutschland über Autobahnen oder Schnellstraßen führenden Straßenbrücken liegen in der Spannweitenklasse der ausgewählten Modellbrücke [185]. Um den der Lebenszykluskostenanalyse vorgelagerten Auslegungsaufwand in Rahmen zu halten, wird eine relativ einfache Brückenbauweise - eine Balkenbrücke - untersucht, die sowohl in Stahlbeton als auch in FKV ohne grundsätzliche konzeptionelle Modifikation realisierbar wäre. Die Brücke ist vierfeldrig. Der Unterbau besteht aus 3 Stützen und 2 Widerlagern. Die Brückensegmente sind prinzipiell aus Platten und Längsträgern aufgebaut, die auf Stützen mit Querträgern gelagert sind.

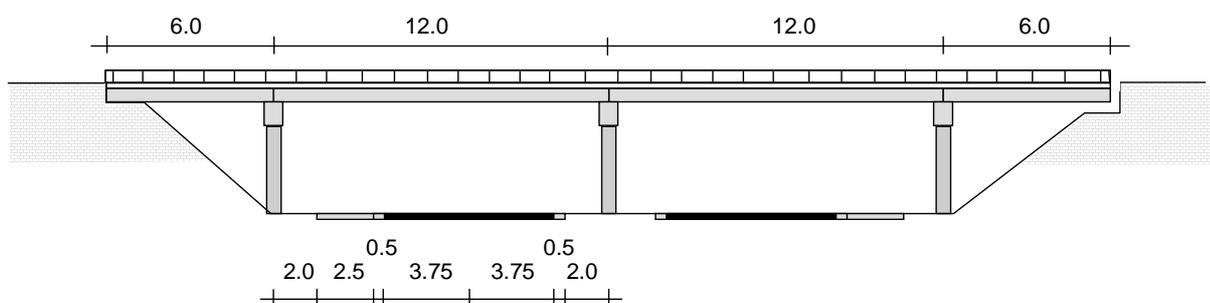


Bild 5-16 Seitenansicht der als Fallbeispiel ausgewählten Straßenbrücke

Aufgrund dieser einfachen Bauweise kann für wesentliche Teile der abzubildenden FKV-Brückenvariante auf bereits am Markt existierende, für den Einsatz im Bauwesen maßgeschneiderte Elemente (Platten, Träger, Hohlprofile, Roste) zurückgegriffen werden. Für diese Elemente liegen Datenblätter zu den Material- und Bauteileigenschaften der Hersteller vor [186]. Die GFK-Elemente für das Bauwesen bestehen aus kontinuierlich glasfaserverstärkten Duromeren. Aufgrund des Anforderungsprofils kann Phenolharz als Matrixmaterial für FKV-Brückenbauelemente Verwendung finden. Typische Materialkennwerte für GFK sind in Tabelle 5-5 zusammengestellt. Die Herstellung der genannten Elemente kann mittels kontinuierlichem Pultrusionsverfahren erfolgen. Daher können quasi beliebige Lieferlängen der Elemente realisiert werden. Andere Fertigungsverfahren und Bauweisen für die Brückensegmente wären prinzipiell möglich (z.B. Fertigung monolithischer Brückensegmente mittels SCRIMP - Seemann Composites Resin Infusion Molding Process). Überschlagsrechnungen zeigen allerdings, dass durch den hohen realisierbaren Faservolumengehalt bei der Pultrusion die stärkste Gewichts- und damit Materialeinsatzreduktion beim Brückenüberbau möglich ist. Damit lassen sich die niedrigsten FKV-Materialkosten umsetzen.

Table 5-5: Materialkennwerte von pultrudiertem duromeren GFK (50 - 80 % Faservol.)

Eigenschaft	Technischer Wert
Zugfestigkeit (Hauptverstärkungsrichtung)	400 - 800 MPa
Biegefestigkeit	250 - 600 MPa
E-Modul (aus Biegung)	25.000 - 40.000 MPa
Dichte	1,7 - 2,1 g/cm ³
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Hauptverstärkungsrichtung)	5 - 10 x 10 ⁻⁶ m / m K ⁻¹

Die Abstützungen, Fundamente und Widerlager der Modellbrücke müssen - insbesondere aufgrund von übergeordneten Aspekten (z.B. Sicherheit gegen Fahrzeugaufprall) - auch bei der FKV-Variante in Massivbauweise geplant werden.

Für die Modell-Brücke wird jeweils eine überschlägige Bemessung für eine Stahlbeton- und eine FKV-Ausführung durchgeführt. Vereinfachend werden bei der Abschätzung der Brückenbelastung nur die Verkehrslast und das Eigengewicht kalkuliert. Windlasten, Schwingungsaspekte etc. werden vernachlässigt. Die Verkehrslast wurde gemäß DIN 1072 bestimmt [187]. Dabei wurde die u.a. für Landesstraßen übliche Brückenklasse 60 (SLW 60) zugrundegelegt.

Zur Berechnung der Eigengewichte finden auch der Straßenbelag (Asphaltbeton), die seitlichen Schutzeinrichtungen (Planken etc.) und die Gehwege Berücksichtigung. Während bei der Stahlbetonbrücke ein Gehweg aus Beton einzuplanen ist, werden bei der FKV-Variante deutlich leichtere GFK-Roste bzw. -Platten vorgesehen. Die auf diesen Grundlagen berechneten Eigengewichtslasten der beiden Varianten sind in Bild 5-17 gegenüber gestellt. Der Überbau der FKV-Brücke ist um über 50 % leichter als der der vergleichbaren Massivbaubrücke.

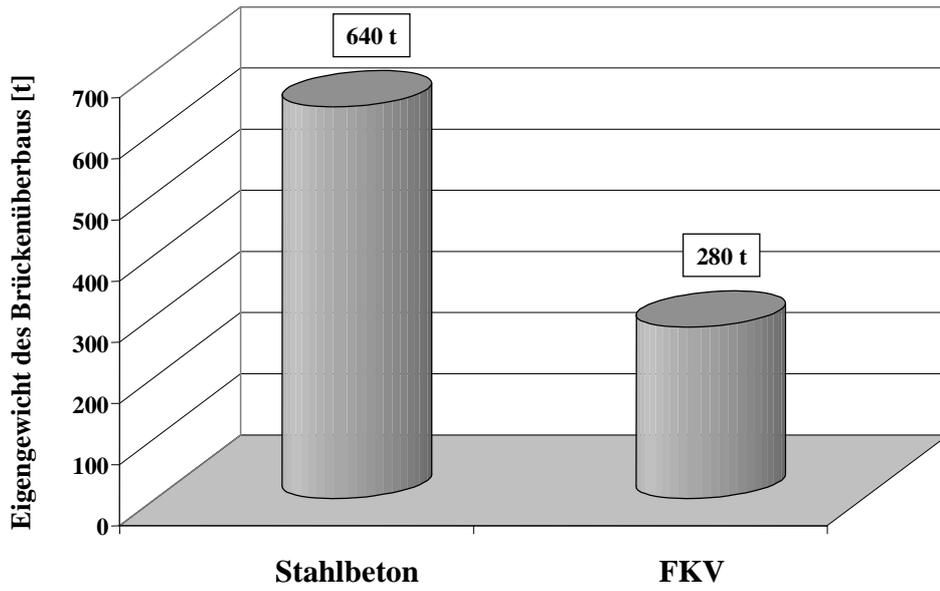


Bild 5-17 Berechnete Eigenlasten der Modellbrücken (Überbau)

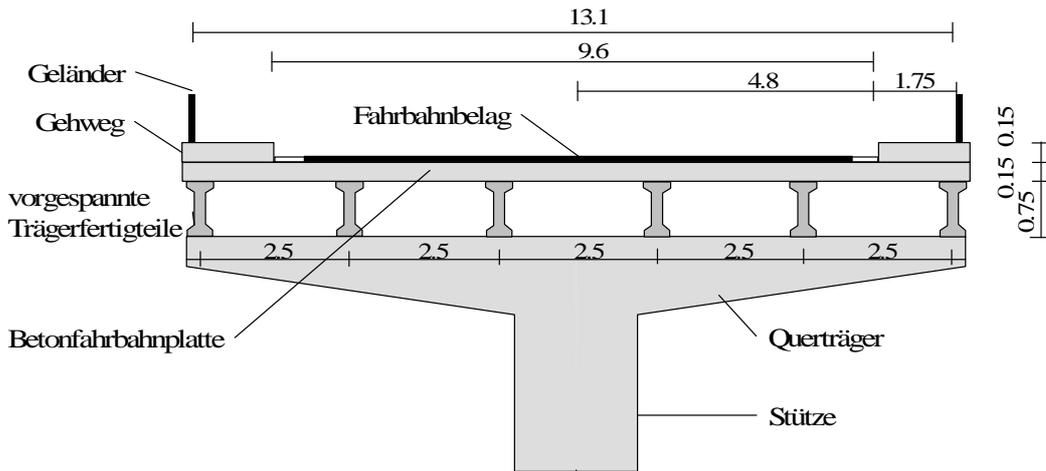


Bild 5-18 Querschnitt der Referenzbrücke aus Stahlbeton im Stützenbereich

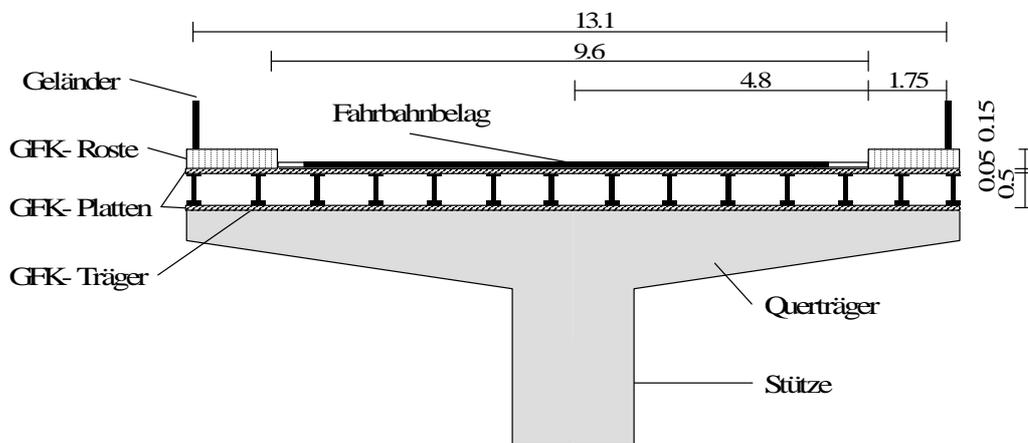


Bild 5-19 Querschnitt der FKV-Modellbrücke im Stützenbereich

Auf die Auslegung und Bauweisendetails der Brückenvarianten soll hier nicht im Detail eingegangen werden. Die letztlich für die Berechnung der Herstellkosten heranzuziehenden Querschnitte der Brücken sind in den Bildern 5-18 und 5-19 veranschaulicht.

5.3.3 Analytierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik

Aufgrund des Anwendungshintergrunds unterscheidet sich die kostenmäßige Abbildung der Verarbeitungs- und Fertigungstechnik im LZK-Modell für das Brücken-Fallbeispiel deutlich von den anderen Fallbeispielen. Für das Bauwesen existieren quasi-standardisierte Kostenkalkulationsrichtlinien bzgl. der Erstellung von Bauwerken [188], die u.a. auf marktpreisorientierten Richtsätzen für die einzusetzenden Materialien beruhen. Eine Abschätzung der Materialkosten für die FKV-Brücke auf Basis der reinen Herstellkosten des Pultrusionsprozesses (siehe Bild 5-20) wäre somit nicht mit der Kostenschätzung für die Referenzbrücke vergleichbar. Daher müssen auch für die FKV Marktpreise herangezogen werden. Dies ist allerdings unproblematisch, da für die hier betrachteten GFK-Elemente ein etablierter, stabiler Markt besteht und das Preisniveau hinreichend genau bekannt ist.

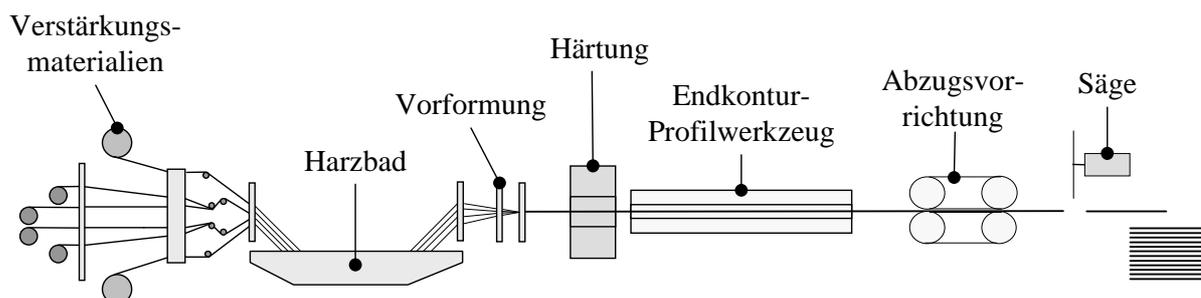


Bild 5-20 Schematische Darstellung des Pultrusionsprozesses zur kontinuierlichen Herstellung von GFK-Elementen

Der Herstellzyklus wird bei Brücken durch den Baubetrieb zur Erstellung der Brücke und die damit verbundenen Kosten repräsentiert. Zur Abbildung des Baus einer Referenz-Stahlbetonbrücke werden die schon erwähnten Kostenkalkulationsrichtlinien herangezogen. Dieses Schema ist auf die FKV-Brücke zu übertragen. Wenngleich für Deutschland bzw. Europa bisher keine Erfahrungen zu kostenrelevanten Unterschieden des Baubetriebs zwischen der Erstellung einer Stahlbeton- und einer FKV-Straßenbrücke dokumentiert wurden, so können doch Informationen aus den USA herangezogen werden [136]. Diese sind auf europäische Verhältnisse zu adaptieren.

Exemplarisch zeigt Bild 5-21 den Vorgang des Baus einer kurzen FKV-Straßenbrücke in den USA. Die Vorteile der FKV-Bautechnik im Baubetrieb infolge des modularen Aufbaus und des geringen Eigengewichts gegenüber der herkömmlichen Stahlbetonbauweise werden hier deutlich.



1. Anlieferung der Brückenelemente



2. Entladen an der Baustelle



3. Vorbereitung der Fugestellen



4. Anheben der Segmente



5. Einhängen der Segmente



6. Anbringen der Bepunktung

Bild 5-21 Bauabschnitte beim Bau einer kurzen FKV-Straßenbrücke (Quelle: Butler County Engineer's Office)

5.3.4 Annahmen und Inputdaten der LZK

Die wesentlichen Inputdaten der Lebenszykluskostenanalyse für die Modellbrücke sind in Tabelle 5-6 aufgeführt.

Da die Referenzbrücke eine Standardausführung repräsentiert, werden keine Entstehungszykluskosten einbezogen. Die Bauprojektierung wird als bauweisenneutral angenommen und somit ausgeklammert. Für die FKV-Ausführung wird eine einjährige F&E-Phase (inkl. Materialqualifikation etc.) mit Kosten von 150.000 Euro vorgesehen. Diese Annahme ist als sehr progressiv einzustufen, da in Europa noch kein ausreichendes Know-how auf Seiten der Bauindustrie und insbesondere der Planungs- und Zulassungsbehörden hinsichtlich FKV-Straßenbrücken existiert. Bei der Festlegung der Höhe der Entstehungszykluskosten wird davon ausgegangen, dass gleichzeitig mehrere FKV-Brückenprojekte vorangetrieben werden und somit eine Verteilung der F&E- und Zulassungskosten auftritt.

Die Herstellkostenkalkulation für die Referenzbrücke erfolgt auf Basis der üblichen Kalkulationsrichtlinien und -richtsätze. Die Kosten für die Erstellung der Brückenstützen und deren Fundamente bleiben hier unberücksichtigt, da sie als variantenneutral einzustufen sind. Die Kostenkalkulation für den Bau der FKV-Brücke richten sich nach dem gleichen Schema wie die Massivbauweise. Dabei werden die Vorteile der Anwendung von FKV-Elementen bei den Einrichtungskosten der Baustelle, bei den Baubetriebskosten für den Brückenüberbau und bei den Kosten für die Widerlager in Anlehnung an Ehlen und Marshall [136] bemessen. Bei der FKV-Brücke wird der Einbau eines Brücken-Fernüberwachungssystems eingeplant (zusätzliche Kosten ca. 25.000 Euro).

Table 5-6: Auszug aus den Inputdaten der LZK-Modellierung für die Modellbrücke

	Modellbrücke	
	Massivbau	FKV
Benötigte F&E	-	1 a / 150.000 Euro
Material - Überbau - Stützen/Fundament	Stahlbeton Stahlbeton	GF/PF, 70 vol.-% Stahlbeton
Materialkosten (durchschnittlich)* - Überbau - Stützen/Fundament	0,4 Euro/kg 0,4 Euro/kg	10 Euro/kg 0,4 Euro/kg
Eigengewicht (Überbau)	640 t	280 t
Lebensdauer	75 a	75 a
Inspektionsintervall / -kosten	1 a / 500 Euro	1 a / 100 Euro (online)
Instandhaltungsintervall** / -kosten	5 a / 20.000 Euro	40 a / 50.000 Euro
Sanierungsintensität / -kosten	20 a / 0,6 % der Baukosten pro Jahr	- / -
Recyclingquote Nachsorgezyklus	0 %	0 %
Recycling-/Entsorgungskosten	25 Euro/t + 200.000 Euro Abbruch/Abfuhr	25 Euro/t + 140.000 Euro Abbruch/Abfuhr

* Materialpreise Basis 1999

** ab dem 10. Lebensjahr

Für den Nutzungszyklus werden die Inspektions-, Wartungs- und Sanierungskosten überschlägig ermittelt. Zu Stahlbetonbrücken liegen hierzu eine Vielzahl von Informationen vor, die teilweise eine sehr hohe Streubreite aufweisen [189]. Standardkostenansätze für die Unterhaltskostenkalkulation von Stahlbetonbrücken sind aus Tabelle 5-7 zu entnehmen. Nach DIN 1076 müssen Brücken jährlich besichtigt werden. Alle 3 Jahre wird eine einfache Prüfung und alle 6 Jahre eine Hauptprüfung durchgeführt. Die Kosten für diese Inspektionen werden für die Lebenszykluskostenanalyse der Massivbauweise mit durchschnittlich 500 Euro/a angesetzt. Werden bei Inspektionen Mängel festgestellt, so sind Wartungs- oder sogar Sanierungsarbeiten vorzunehmen. Für die Referenzbrücke wurden ab dem 10. Lebensjahr alle 5 Jahre Wartungsarbeiten und alle 20 Jahre Sanierungsarbeiten einkalkuliert. Obwohl noch keine diesbezüglichen Erfahrungen aus der Praxis bestehen, werden in die Nutzungszykluskostenabschätzung der FKV-Brücke vergleichsweise geringe jährliche Inspektions- und Prüfungskosten (Online-Überwachung) von 100 Euro sowie in Anlehnung an Head [184] nach 40 Jahren Instandhaltungsaktivitäten (v.a. Erneuerung des UV-Schutzes) vorgesehen. Sanierungsarbeiten für die FKV-Brücke während der Lebensdauer werden als nicht notwendig erachtet.

Table 5-7: Kalkulationssätze der Unterhaltungskosten für Stahlbetonbrücken [190]

Vorgang	Durchschnittliche Aufwendungen pro Betriebsjahr in % der Baukosten
Inspektion / Prüfung	0,1 %
Wartung	0,5 %
Sanierung	0,6 %

Die Gesamtlebensdauer wird für beide Brückenvarianten mit 75 Jahren veranschlagt. Die Kosten des Nachsorgezyklus ergeben sich aus den Abbruch- und Abfuhrkosten sowie den Kosten der Entsorgung bzw. des Recyclings der Materialien (Bauschuttrecycling). Die Kosten des Abbruchs und des Abtransport des Bauschutts werden für die FKV-Brücke wegen der geringeren Materialmenge (Gewicht) niedriger angesetzt als für die der Stahlbetonbrücke.

5.3.5 Ergebnisse

Die Kosten des Herstellzyklus für die Modellbrücke in Massiv- und FKV-Bauweise sind in Bild 5-22 veranschaulicht. Es ist zu betonen, dass hier nur die Material- und Baubetriebskosten der durch die beiden unterschiedlichen Bauweisen tangierten Brückenbestandteile einbezogen werden; alle Kosten im Zusammenhang mit variantenneutralen Brückenteilen (Stützen, Stützenfundamente, etc.) oder auch übergeordnete Baustellenaktivitäten (Bauleitung, Erdbewegungen im Brückenumfeld etc.) werden vernachlässigt.

Die Kalkulation bestätigt, dass die Materialkosten einer FKV-Brücke signifikant über denen einer Massivbrücke liegen (+80 %). Die Vorteile hinsichtlich der Baubetriebskosten durch das geringere Gewicht und einfachere Handhabung der FKV-Elemente sind zwar offensichtlich, genügen aber nicht, die höheren Materialkosten zu kompensieren. Die kalkulierten Herstellkosten der FKV-Brücke liegen um rund 12 % höher als die der Massivbauweise.

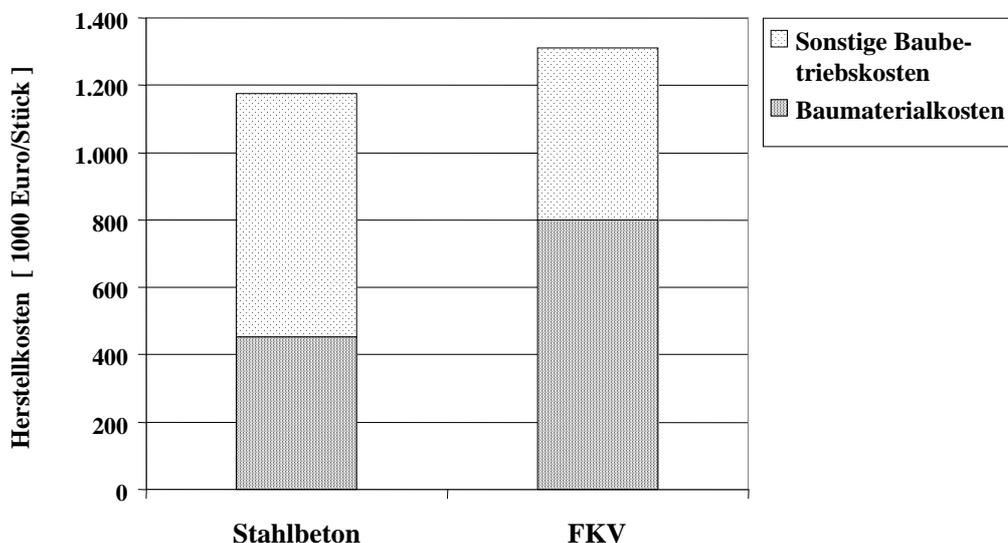


Bild 5-22 Herstellkosten der Modellbrücke (nur variantenabhängige Kosten)

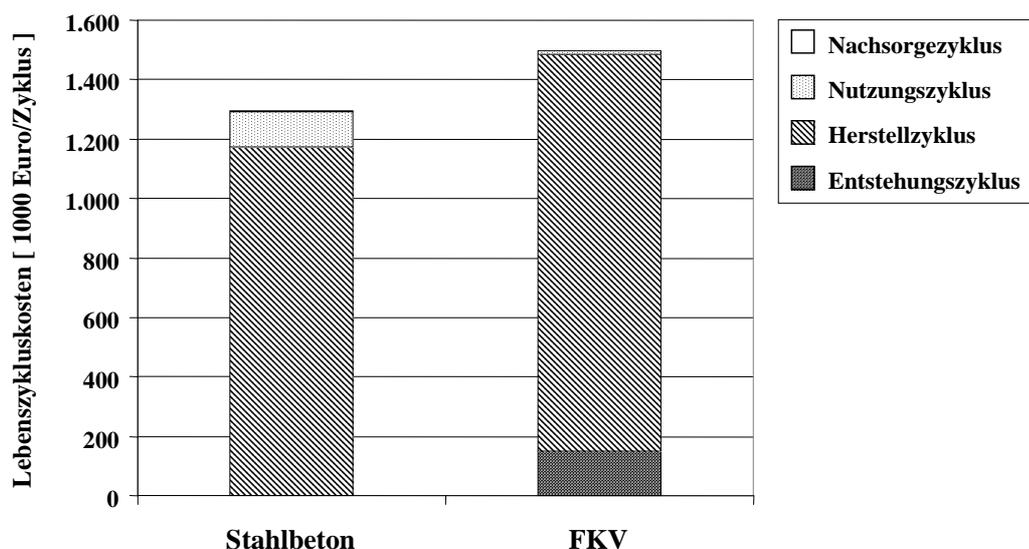


Bild 5-23 Lebenszykluskostenabschätzung der Modellbrücke

Die in Bild 5-23 dargestellte Lebenszykluskostenanalyse der beiden Brückenvarianten zeigt, dass unter den gegebenen Annahmen die Massivbrücke hinsichtlich der Lebenszykluskosten die wirtschaftlichere Variante ist. Die Nutzungszykluskostenvorteile der FKV-Brücke werden durch die Entstehungs- und Herstellzykluskostennachteile überdeckt. Die Nachsorgezykluskosten spielen keine Rolle.

Das Ergebnis der LZK-Modellierung überrascht in Anbetracht der antizipierten enormen FKV-Nutzungsvorteile in dem Anwendungsfeld Bauwesen. Eine Detailanalyse der LZK-Daten gibt Aufschluss über die diesem Ergebnis zugrunde liegenden Zusammenhänge:

- Die Entstehungs- und Herstellzykluskosten gehen aufgrund der zeitlichen Position im Lebenszyklus mit dem Faktor 1 bzw. 0,94 in die Lebenszykluskosten der Brücken ein. Die relevanten Unterschiede bei den Nutzungszykluskosten der beiden Varianten treten hingegen erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt im Lebenszyklus auf und werden entsprechend stark diskontiert. Beispielsweise werden die Wartungskosten der Massivbrücke beim erstmaligen Auftreten nach 10 Jahren mit dem Faktor 0,64 bewertet. Die angenommenen hohen Sanierungskosten im 20. Betriebsjahr sogar nur noch mit dem Faktor 0,33. Höhere Kosten in frühen Lebenszyklusphasen werden somit sehr viel stärker bei den Gesamtlebenszykluskosten gewichtet als höhere Kosten in späten Phasen. Dies erklärt auch die verschwindend geringe Bedeutung der Nachsorgekosten bei dem analysierten Beispiel.

5.3.6 Sensitivitätsanalyse

In die Kalkulation der Lebenszykluskosten der Modellbrücke gehen viele Inputdaten ein, die aufgrund der Datenlage einen ausgeprägten Schätzwertcharakter aufweisen. Daher erschließt sich für dieses Fallbeispiel ein großes Spektrum zweckmäßiger Ansätze der Sensitivitätsanalyse (Detailbauweise, Bauweiseneinfluss auf die Baubetriebskosten, FKV-Materialkosten etc.). Im Rahmen dieser Arbeit soll nur ein Beispiel, der Einfluss der Annahmen zu Sanierungsintervallen und -kosten der Massivbrücke auf die Lebenszykluskosten, angeführt werden:

- In der Literatur finden sich Hinweise, dass in Abhängigkeit von örtlichen Gegebenheiten (wie z.B. Häufigkeit und Intensität der Streusalzexposition, Klima und Verkehrsbelastung) die Standardkalkulationssätze für die Unterhaltskosten von Massivbrücken (siehe Tabelle 5-7) sowie die Annahmen zu Sanierungsintervallen zu günstig sind. Deshalb wird mit dem LZK-Modell untersucht, ob die FKV-Brücke wirtschaftlich ist, wenn der Sanierungsintervall der Referenzbrücke in Anlehnung an Head [184] auf 15 Jahre gesenkt wird und der Sanierungsaufwand von 0,6 auf 1 % der Baukosten pro Betriebsjahr [189] angehoben wird.

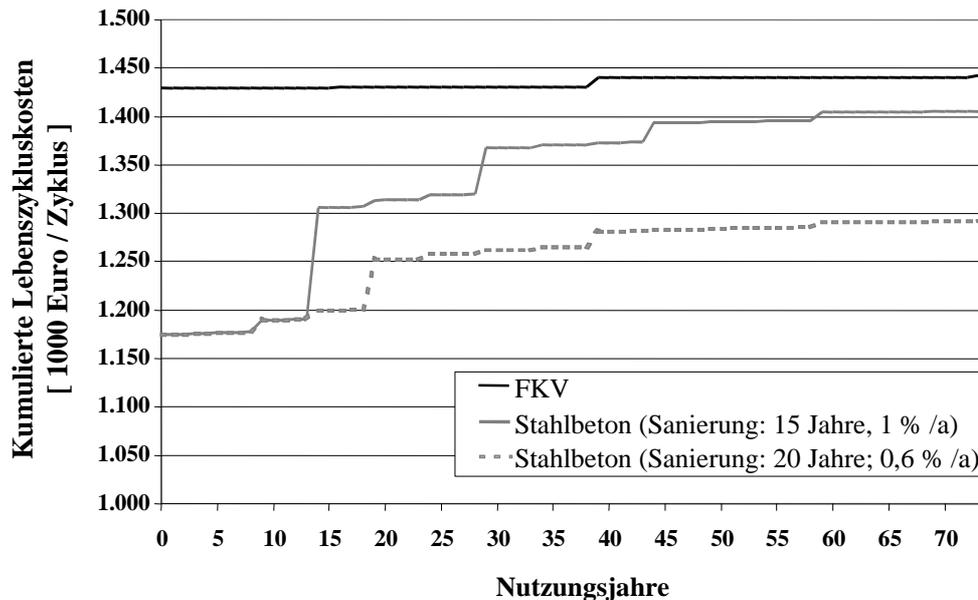


Bild 5-24 Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Annahmen zu Sanierungsintervall und -kosten auf die Lebenszykluskosten der Modellbrücke

In Bild 5-24 ist das Ergebnis dieser Analyse veranschaulicht. Die Kurven repräsentieren den Verlauf der kumulierten Lebenszykluskosten über den Lebenszyklus der FKV- sowie der Referenzbrücke. Bei der Referenzbrücke werden die beiden "Sanierungs-Szenarien" mit den verschiedenartigen Sanierungsintervallen und -aufwendungen unterscheiden. Die Abbildung lässt erkennen, dass selbst unter den ungünstigen Hypothesen zur Sanierung der Massivbrücke die FKV-Brücke als unwirtschaftlich einzustufen ist; die Differenz zwischen den abgeschätzten Lebenszykluskosten der Alternativen ist in diesem Fall allerdings nicht mehr signifikant.

Aufgrund des vergleichsweise sehr langen Lebenszyklus der Modellbrücke von 75 Jahren wäre prinzipiell auch eine Sensitivitätsanalyse bzgl. des Einflusses der Annahme zum Kalkulationszinssatz der Diskontierung notwendig. Das Resultat einer derartigen Sensitivitätsanalyse lässt sich aufgrund der erläuterten Ergebnislage und vor dem Hintergrund der Zinssituation in Europa allerdings leicht voraussagen:

- Die Kapitalmarktzinsen in Europa sind derzeit relativ niedrig. Mittel- und langfristig wird das Niveau mehr oder minder steigen. Somit wird das Ergebnis der Lebenszykluskostenanalyse zur Modellbrücke ($LZK_{FKV} > LZK_{Stahlbeton}$) nicht grundsätzlich verändert, sondern stärker polarisiert.

5.3.7 Fazit aus der LZK-Analyse

Die dargelegte Lebenszykluskostenanalyse für eine innovative FKV-Anwendung im Bauwesen unterstreicht die Mehrdimensionalität des Wirtschaftlichkeitsproblems der FKV. Bei der analysierten FKV-Modellbrücke stehen den Herstellkostennachteilen bedeutsame Nutzungszyklusvorteile, verglichen mit der Referenzbauweise aus Stahlbeton, gegenüber. Allerdings werden diese Vorteile erst im Verlauf des Lebenszyklus wirksam und müssen somit stärker diskontiert werden, als die Nachteile in der frühen Lebenszyklusphase. Im Falle der Modellbrücke wird unter den angenommenen Rahmenbedingungen die FKV-Variante als unwirtschaftliche Alternative bewertet. Auch wenn ungünstige Annahmen (Sanierungs-Szenarien) zu den Unterhaltungskosten der Referenzbrücke getroffen werden, weist die FKV-Ausführung höhere Lebenszykluskosten auf.

Wenngleich die dargelegten Ergebnisse für die ausgewählte Modellbrücke keinen allgemeingültigen Charakter hinsichtlich des FKV-Einsatzes im Bauwesen haben, so zeigen diese jedoch, dass bei Wirtschaftlichkeitsüberlegungen zum FKV-Einsatz im Schnittfeld von Herstell- und Nutzungszykluskosten auch die zeitliche Dimension berücksichtigt werden muss. Die Lebenszykluskostenanalyse der Modellbrücke deutet darauf hin, dass die in der Literatur immer wieder angeführten Pro-Argumente des FKV-Einsatzes im Bauwesen diese zeitliche Dimension nicht immer hinreichend differenziert berücksichtigen.

Wie lassen sich nun vor diesem wirtschaftlichen Hintergrund die starken Aktivitäten in den USA beim Bau von FKV-Straßenbrücken außerhalb von Erdbebengebieten erklären? Eine Teilantwort zu dieser Frage könnte in der US-amerikanischen Technologieförderpolitik zu finden sein. Seit nunmehr fast einem Jahrzehnt werden im Rahmen von Konversionsmaßnahmen hohe Summen für den Transfer von Wehrtechnologie in zivile Industriezweige investiert. Dabei wird auch die Anwendung der FKV-Technologie im Bauwesen gefördert. Beispielsweise ist für die nächsten Jahre geplant, allein im Bundesstaat Ohio den Bau von 100 FKV-Brücken mit einer Gesamtsumme von 33 Mio. US-\$ zu subventionieren [191]. Die damit durchschnittlich pro Brücke entfallende Summe von über 300.000 US-\$ würde im Rahmen einer Lebenszykluskostenanalyse als negative Entstehungs- oder Herstellzykluskosten zu berücksichtigen sein. Hierdurch könnte das Ergebnis einer Vergleichsrechnung (siehe Bild 5-22 und 5-23) maßgeblich zugunsten der FKV-Alternative verschoben werden.

Daneben spielt bei den Aktivitäten in den USA bezüglich des Neubaus von FKV-Brücken auch ein weiterer Gesichtspunkt eine entscheidende Rolle. Es besteht ein riesiger Sanierungs- bzw. Neubaubedarf von Straßenbrücken. Gesamthaft betrachtet ist das Problem der durch die notwendigen Baumaßnahmen verursachten Behinderung des gewerblichen und privaten Straßenverkehrs und der damit verursachten volkswirtschaftlichen Kosten (Wartezeiten in Staus, erhöhtes Unfallaufkommen etc.) nicht zu vernachlässigen. Die Verwendung von FKV-Straßenbrücken kann hier einen wesentlichen Beitrag zur zeitlichen Reduktion der Verkehrsbehinderungen und damit der volkswirtschaftlichen Kosten leisten. In US-amerikanischen Studien wurde versucht, diesen Wirtschaftlichkeitseffekt der FKV-Anwendung bei Brücken im Rahmen von Lebenszykluskostenkalkulationen zu quantifizieren [136]. Die Datenlage (projektspezifische Verkehrsmengengerüste, kostenseitige Bewertung von staubedingten Wartezeiten etc.) ist allerdings als wenig belastbar zu bezeichnen, so dass definitive Aussagen über die Relevanz dieser Kostenvorteile nicht möglich sind. Für die Verhältnisse in Europa existieren keine geeigneten Datengrundlagen als Voraussetzung für die Berücksichtigung der Einflüsse in LZK-Studien.

5.4 Fallstudie IV: FKV-Anwendung in der Offshore-Industrie

5.4.1 Anwendungsbeispiel: Flexibler Riser

Die herausragenden mechanischen Eigenschaften in Kombination mit dem günstigen Korrosionsverhalten prädestinieren FKV für den Einsatz in der Offshore-Industrie. Auch hier treten FKV in Konkurrenz zu herkömmlichen Materialtechnologien wie Stahl oder bestimmten Leichtmetallen. Trotz der teilweise drastisch höheren Materialkosten im gewichtsbezogenen Vergleich haben sich die FKV bereits in einigen Bereichen der Offshore-Industrie etablieren können. Zusätzlich wird derzeit ein weites Spektrum neuer Anwendungen in diesem Industrie-segment intensiv diskutiert. Bereits bestehende und potentielle Offshore-Einsatzbereiche sind in Tabelle 5-8 zusammengestellt.

Table 5-8: Bestehende und potentielle FKV-Anwendungsfelder in der Offshore-Industrie [192]

Bestehende FKV-Anwendungsfelder		
Feuerschutzeinrichtungen	Geländer, Treppen, Bühnen	Rettungsboote
Explosionsschutzeinrichtungen	Kabelschächte	Auftriebskörper
Unterwasserstrukturen	Trennwände	Abdeckungen, Gehäuse, Bunker
Brauchwasserrohre	Ausleger	Druckbehälter
Senkrohre	Rohrleitungsummantelungen	Löschwasserleitungen

Potentielle FKV-Anwendungsfelder		
Riser	Rohrleitungen u.ä.	Separatoren
Spannkabel	Hochdruckschläuche	Primärstrukturen

Triebfedern der Überlegungen zum Ausdehnen der FKV-Einsatzfelder im Offshore-Bereich sind die Erwartungen, dass

- durch FKV Installations- und Betriebskostenvorteile realisiert werden können, die einen Beitrag zur Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit des Förderprozesses leisten und/oder
- bestehende technische Restriktionen herkömmlicher Materialtechnologien grundsätzlich überwunden werden können, die das Erschließen neuer technisch-wirtschaftlicher Bereiche bisher verhindern.

Unter den potentiellen neuen FKV-Anwendungen ist die Riser-Technologie als aussichtsreich hervorzuheben. Insbesondere die sog. flexiblen Riser werden von der Offshore-Industrie hinsichtlich der FKV-Option evaluiert.

Riser sind Steigrohre, die als Verbindung zwischen dem Querkopf eines Offshore-Bohrlochs und einer schwimmenden Förder- und Verladeeinrichtungen eingesetzt werden (siehe Bild 5-25). Durch die Riser wird Erdöl oder Erdgas unter hohem Druck gefördert. Zur Kompensation von nicht zu unterbindenden Bewegungen der schwimmenden Fördereinrichtung (Seegang, Ebbe und Flut) sind Riser i.d.R. flexibel; der notwendige Biegeradius für einen Riser liegt im Bereich zwischen 20 und 30 m.

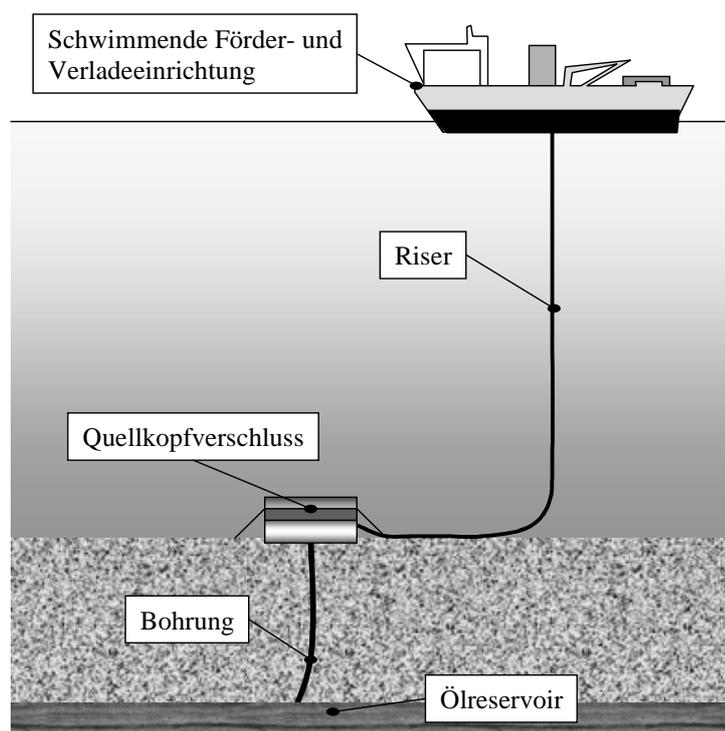


Bild 5-25 Prinzip der Erdöl- oder Erdgasförderung mittels flexiblem Riser

Die Anforderungen an Riser sind extrem hoch: Die zu fördernden Medien beinhalten z.B. H_2S und Chloride sowie stark abrasive Beimengungen wie z.B. Sand. Ferner treten bei der Erdöl- und Erdgasförderung hohe Temperaturen auf (90 - 160°C), und die Riser sind Salzwasser ausgesetzt. Somit ist die Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit ein entscheidendes Merkmal. Auch die Druckbelastungen sind erheblich. Hauptproblem ist jedoch die Zugbelastung von Risern durch das Eigengewicht, welches bei einem typischen flexiblen Stahl-Riser 100 - 250 kg/m beträgt. Beim Einsatz von flexiblen Risern in größeren Wassertiefen von bis zu 500 m und darüber hinaus ergeben sich sehr hohe Zugkräfte im oberen Bereich des Risers sowie an den Anschlusselementen der schwimmenden Fördereinrichtung. Auftriebskörper zur Reduktion der Belastung durch das Eigengewicht sind nur in einigen Förderregionen mit geringen Strömungen und guten Wetterbedingungen einsetzbar.

Stand der Technik sind sog. "non-bonded" flexible Riser, die im Wesentlichen aus mehreren Ebenen Spezialstahl und Polymeren bestehen. Der Aufbau eines derartigen Risers ist in Bild 5-26 veranschaulicht.

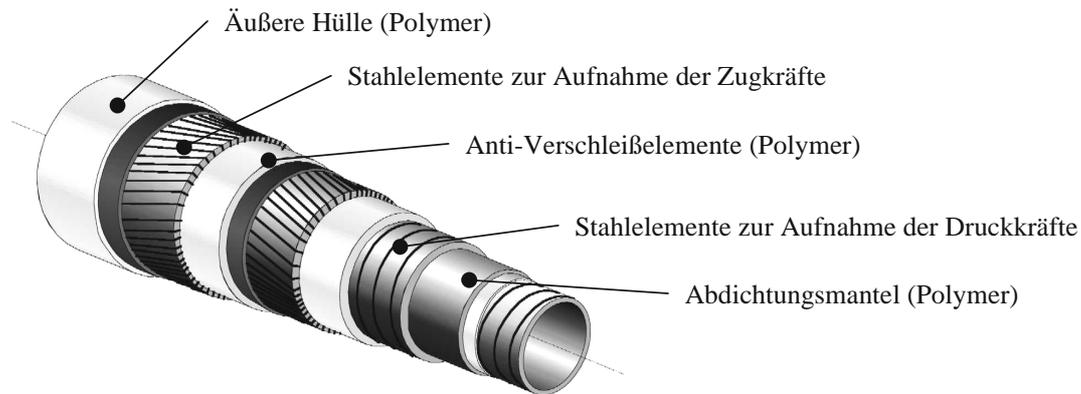


Bild 5-26 Aufbau eines "non-bonded" flexiblen Risers

Diese Riser-Bauweise wird von der Offshore-Industrie mit Blick auf zukünftige Anforderungen als nicht optimal angesehen. Unter anderem aufgrund folgender Problemstellungen wird intensiv nach neuen Konzepten gesucht:

- Die derzeitige Einsatzgrenze eines typischen flexiblen Risers (9" Durchmesser) infolge der Eigengewichtsproblematik liegt bei ca. 1.000 bis 1.300 m Wassertiefe. Ein Großteil der in Zukunft weltweit zu erschließenden Erdöl- und Erdgasressourcen liegt jedoch im Wassertiefenbereich von bis zu 2.000 m.
- Das Eigengewicht der Riser ist ein signifikanter Einflussfaktor auf die Gesamtwirtschaftlichkeit des Offshore-Förderprozesses. Die schwimmende Fördereinrichtung muss zur Aufnahme und Verteilung der erheblichen, aus dem Eigengewicht des Risers resultierenden Kräfte dimensioniert sein. Dies bedingt einen hohen Investitionsbedarf. Gleichzeitig wird die Beladungskapazität der Fördereinrichtung eingeschränkt; außerdem müssen das Eigengewicht des Risers und das strukturelle Zusatzgewicht durch den Auftrieb der Fördereinrichtung getragen werden. Die Sicherstellung des notwendigen Auftriebs bedingt einen weiteren Investitionsbedarf und reduziert überdies die Beladungskapazität zusätzlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Idealfall bis zu 34 Riser an eine Fördereinrichtung gekoppelt werden.

Zur Überwindung dieser Probleme bieten sich drei unterschiedliche materialtechnologische Strategien an [193]:

- Einsatz von hochfesten Stählen
- Einsatz von Leichtmetallen, insbesondere Titan
- Einsatz von Hochleistungs-FKV (CFK)

Die Hochleistungs-FKV weisen von diesen Alternativen die höchste spezifische Festigkeit auf und sollten deshalb aus technischer Sicht das größte Potenzial zur Realisierung innovativer, leichter Riser-Bauweisen besitzen.

Neben den rein technischen Vorteilen verspricht sich die Offshore-Industrie von leichteren Risern einen wesentlichen wirtschaftlichen Nutzen [194]. Zur Untersuchung und Bewertung der antizipierten wirtschaftlichen Vorteile von FKV im Vergleich zu den Konkurrenzmaterialien Stahl und Titan wird das LZK-Modell angewandt.

5.4.2 Bauweise, analysierte Materialoption

Die Bauweise und die Kriterien zur Auswahl eines FKV-Typs für das neue Riser-Konzept lässt sich aus den wesentlichen Merkmalen des Riser-Anforderungsprofils ableiten:

- Flexibilität der Riser-Struktur (minimaler Biegeradius 20 m)
- Hohe Einsatztemperaturen (bis 160 °C)
- Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit
- Standhalten hoher Innen- (bis zu 500 bar) bzw. Außendrucke (bis zu 200 bar),
- Minimales Eigengewicht

Nach Erfahrungen in anderen FKV-Anwendungsfeldern (z.B. Druckbehälterbau) erscheint die in Bild 5-27 dargelegte, vergleichsweise einfache Riser-Bauweise realisierbar. Wesentliche Elemente sind eine äußere Schutzhülle, eine Basisstruktur aus kohlenstoffaserverstärktem Thermoplast und ein thermoplastischer Liner. Als geeignetes Material für den Liner sowie als Matrix für die Basisstruktur ist der Hochtemperaturthermoplast PEEK anzusehen.

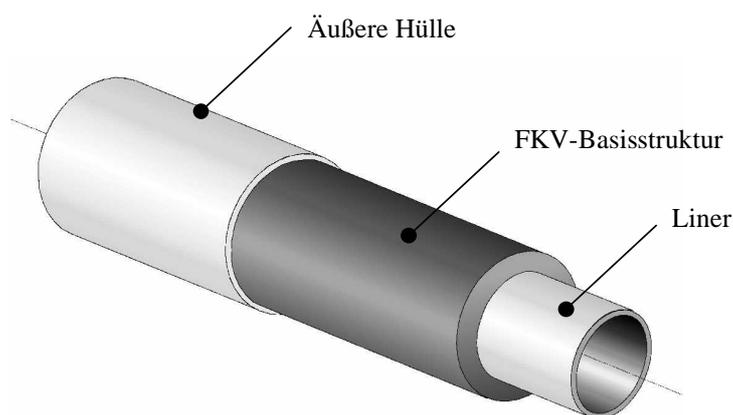


Bild 5-27 Potentielles Konzept für einen flexiblen FKV-Riser

Durch die rotationssymmetrische Geometrie des Risers bietet sich die FKV-Wickeltechnik zur kontinuierlichen Fertigung des FKV-Risers an. Als Material zum Aufbau der FKV-Basisstruktur wird das vor allem in der Luft- und Raumfahrt eingesetzte APC-2 (UD-verstärktes CF/PEEK) gewählt, welches sich als bändchenförmiges Halbzeug gut zum Einsatz bei Wickelverfahren eignet. Einige Kennwerte von APC-2 sind in Tabelle 5-9 zusammengestellt.

Table 5-9: Ausgewählte Materialkennwerte von APC-2 (Verstärkung AS4, 63 Faservol.-%)

Eigenschaft	Technischer Wert
Zugfestigkeit (0°)	2.100 MPa
Biegefestigkeit (0°)	2.000 MPa
E-Modul (aus Biegung)	125 GPa
Dichte	1,6 g/cm ³

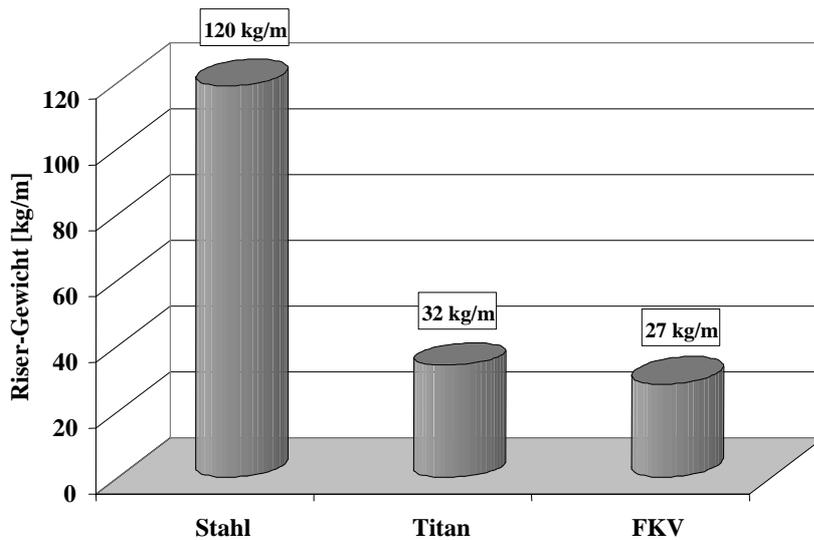


Bild 5-28 Kalkulierte Eigengewichte verschiedener Bauweisen eines flexiblen 9"-Risers

Eine überschlägige Berechnung auf Basis einer Feasibilitystudie für einen flexiblen Riser mit 9" Innendurchmesser ergibt, dass durch die Anwendung von APC-2 ein sehr niedriges Riser-Gewichtsniveau von rund 27 kg/m realisierbar ist. Für die Referenzbauweisen unter Verwendung von hochfestem Stahl bzw. Titan sind höhere Eigengewichte zu veranschlagen (siehe Bild 5-28). Die Berechnung weist im Übrigen darauf hin, dass bei der Stahl-Ausführung infolge der eigengewichtsinduzierten Zugspannungen eine Einsatzgrenze bei rund 1.300 Wassertiefe besteht, die durch Erhöhung der Wanddicke nicht mehr kompensiert werden kann.

5.4.3 Analytierte Verarbeitungs- und Fertigungstechnik

Wie schon erwähnt, könnte ein FKV-Riser in der skizzierten Bauweise mittels Thermoplast-Wickelverfahren kontinuierlich gefertigt werden. Das Prinzip des Thermoplast-Wickelverfahrens von bändchenförmigen Halbzeugen ist in Bild 5-29 veranschaulicht.

Das Bändchen wird bei Thermoplast-Wickelverfahren von einer Vorratsspule abgezogen und durch eine Vorheizstrecke geführt. Im Bereich des Ablegepunkts auf dem rotierenden Wickelkern oder Liner wird das Wickelgut über die Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix aufgeheizt.

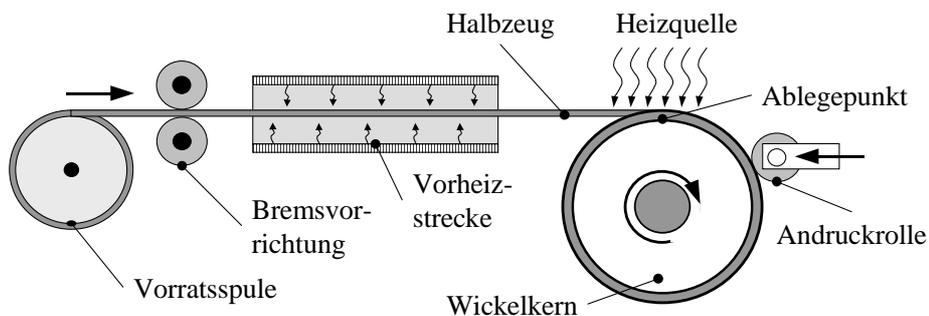


Bild 5-29 Schematische Darstellung der Verarbeitung faserverstärkter Thermoplaste im Wickelverfahren in Anlehnung an [195]

Um eine gute Konsolidierung zu erzielen, wird das Halbzeug durch eine Bremse vorgespannt, wodurch eine Normalkraft hinter dem Ablegepunkt auf das abgelegte Halbzeug einwirkt. Eine zusätzliche Andruckrolle oder Gleitschuhe können die Konsolidierung unterstützen. Zur Fertigung von Bauteilen wird entweder die Zuführung des Halbzeugs oder der Wickelkern bzw. der Liner parallel zur Wickelachse verschoben.

Die Verarbeitung von APC-2 mittels Wickelverfahren erfordert eine leistungsfähige Heizquelle zum Aufschmelzen des Halbzeugs vor oder während des Ablegens. Hierzu existieren verschiedene Lösungsansätze wie zum Beispiel Laser, Heißgas, Flamme und Infrarot. Als zweckmäßigste Heizquellen für die Verarbeitung von APC-2 bei der Herstellung von FKV-Risern sind die Laser- oder die Infrarottechnik einzustufen. Entscheidende Kriterien bei der Auswahl einer geeigneten Heizquelle zur Riser-Fertigung mittels Thermoplast-Wickeltechnik sind u.a. eine hohe Energiedichte und die gute Regelbarkeit; dies sind wesentliche Voraussetzungen für die zur großtechnischen Riser-Herstellung notwendigen hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit.

Auf dem heutigen Stand der Technik kann noch nicht entschieden werden, ob die Laser- oder die Infrarottechnik als Heizquelle für die Riser-Fertigung geeigneter ist. Mittels Lasertechnik kann theoretisch ein größerer Materialdurchsatz realisiert werden, wobei fundamentale technische Probleme hinsichtlich Energieabfuhr/Kühlung im Prozess noch nicht gelöst sind. Unter dieser Einschränkung wird nachfolgend von einer Riser-Fertigung mittels Einsatz von Lasertechnik ausgegangen.

Aus der Literatur ist bekannt, dass bei der Verarbeitung von APC-2 mittels Laser eine Wickelgeschwindigkeit von rund 100 m/min bei einem Durchsatz von rund 10 kg/h erreicht werden kann [195]. Bei den anderen Heizverfahren liegen diese Kennwerte um den Faktor 3 bis 10 niedriger. Aus den Daten der Verarbeitung von APC-2 wird erkennbar, dass zum Erreichen eines der großtechnischen Riser-Fertigung genügenden Ausstoßniveaus mehrere parallel arbeitende Wickelstationen einzuplanen sind. Durch den gleichzeitigen Einsatz von 10 Laser-Wickelstationen lassen sich pro Stunde 100 kg APC-2 verarbeiten und damit rund 4 m eines 9"-Risers pro Stunde herstellen. Die Fertigungsdauer eines 1.200 m langen FKV-Risers würde dann rund 300 h dauern.

Ein in der Praxis bisher noch nicht gelöstes, fertigungstechnisches Problem ist die Anforderung der kontinuierlichen Fertigung eines Risers über die komplette Länge, die nach derzeitigen Planungen bis zu 3.000 m betragen soll. Entsprechende, auf die Thermoplast-Wickeltechnik übertragbare Lösungskonzepte existieren zwar auf dem Papier [196-198], deren Umsetzung wird allerdings noch erhebliche F&E-Aufwendungen erfordern.

5.4.4 Annahmen und Inputdaten der LZK

Als Fallbeispiel wird ein Riser mit 1.200 m Länge untersucht. Die Basisdaten zum Herstell- bzw. Nutzungszyklus des analysierten FKV-Risers wurde aus einer Feasibilitystudie der Offshore-Industrie abgeleitet [192]. Aus dieser Studie wurden auch wesentliche Informationen zu den beiden Referenzvarianten aus Stahl bzw. Titan entnommen.

Da das untersuchte neuartige FKV-Riser-Konzept noch nicht Stand der Technik ist, wird eine intensive 3-jährige F&E-Phase im Entstehungszyklus berücksichtigt. Der Kostenansatz hierfür wird auf Basis von Kosteninformationen zu vergleichbaren Entwicklungsprojekten im FKV-Bereich abgeschätzt.

Für die Titan-Variante wird demgegenüber ein kürzerer Entstehungszyklus eingeplant, da dieses Material in der Offshore-Industrie in ähnlichen Anwendungsbereichen bereits etabliert ist. Die Entstehungszykluskosten werden auf eine 5-Jahresproduktion verteilt. Für die Stahl-Bauweise muss keine signifikante F&E-Phase einkalkuliert werden.

Für alle Varianten wird eine Nutzungsdauer von 10 Jahren angesetzt. Wartungs- oder Reparaturkosten sind in diesem Zeitraum nicht relevant.

Hinsichtlich der LZK-relevanten, bauweisenabhängigen Kosten des Riser-Nutzungszyklus ist das Gewicht der Risern die entscheidende Größe. Hiervon hängt der notwendige strukturelle Aufwand bei der schwimmenden Fördereinrichtung zur Aufnahme der Belastungen durch den Riser und zur Erzeugung des notwendigen Auftriebs ab, der sich im Investitionsbedarf niederschlägt. Außerdem reduziert sich durch das Gewicht des Risers die Beladungsfähigkeit der Fördereinrichtung mit entsprechender negativer Kostenwirkung. Zur Erfassung dieses Kosteneinflusses verwendet die Offshore-Industrie einen sog. PCC-Satz (PCC = Payload Capacity Cost), der die Kostenwirkung von zusätzlichen Gewichtslasten im Betrieb einer schwimmenden Fördereinrichtung bezüglich strukturellem Mehraufwand und Zusatzkosten der Minderbeladungsfähigkeit erfasst. Der übliche PCC-Satz für die hier untersuchte Anwendung liegt bei insgesamt 45 US-\$/kg. Bei der Berechnung der Gesamt-PCC eines Risers muss nicht nur das Eigengewicht des Risers, sondern auch das Gewicht des beinhaltenen Mediums sowie der erzeugte Auftrieb durch das verdrängte Meerwasser einbezogen werden.

Für die Abbildung des Nachsorgezyklus ist davon auszugehen, dass die Riser während der Nutzungsphase durch die Fördermedien mit umwelttoxischen Substanzen verunreinigt werden. Somit müssen Riser am Ende der Lebensdauer zunächst aufwendig aufbereitet werden. Metallische Bestandteile können dann wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Bei der Stahl-Variante wird aufgrund des Aufbereitungsaufwands ein Recyclingzuschlag angesetzt. Bei Titan werden mit Blick auf die Marktsituation vergleichsweise hohe Recyclingerlöse antizipiert. Bei dem FKV-Riser hingegen ist von einer starken, nicht reversiblen Kontamination des Polymers durch an- und einlagerte Problemstoffe auszugehen, die eine thermische Entsorgung mit entsprechenden Kosten bedingen.

Ausgewählte Inputdaten zur Modellierung der Lebenszykluskosten von flexiblen Risern sind in Tabelle 5-10 erfasst.

Table 5-10: Auszug aus den bauteilspezifischen Inputdaten der LZK-Modellierung für flexible Riser

	Flexibler Riser		
	Stahl	Titan	FKV
Lebensdauer	10 a	10 a	10 a
Länge	1.200 m	1.200 m	1.200 m
Jahressollproduktion	36 Stk.	36 Stk.	36 Stk.
Benötigte F&E	-	2 a	3 a
Material (Riser-Grundstruktur)	Stahl (API X75)	Titan (Grade 5)	APC-2/AS4
Materialkosten	26 Euro/kg*	250 Euro/kg*	280 Euro/kg*
Bauteilgewicht	144,0 t	38,4 t	32,4 t
Recyclingquote Nach- sorgezyklus	80 %	90 %	0 %
Entsorgungskosten (Re- cyclingerlöse)	0,15 Euro/kg	(4 Euro/kg)	0,25 Euro/kg

* Basis: Marktpreisinformationen, Stand 9/1999

5.4.5 Ergebnisse

Das Ergebnis der Herstellkostenkalkulation für die drei Riser-Varianten gibt Bild 5-30 wieder. Aufgrund der ausgeprägten Dominanz der Materialkosten in den Kostenstrukturen wurden die sonstigen Herstellkosten (Personal, Anlage, etc.) zu einem Posten aggregiert.

Die Herstellkostenanalyse verdeutlicht die enorme Kostendifferenz zwischen einer herkömmlichen Stahl-Bauweise und der Titan- bzw. FKV-Ausführung. Die Bauweisen unter Verwendung der beiden Hochleistungswerkstoffe sind in der Herstellung um den Faktor 2,5 teurer als die Stahl-Variante. Wesentlicher Kostentreiber und auch ursächlich für den großen Kostenunterschied sind die Werkstoffkosten.

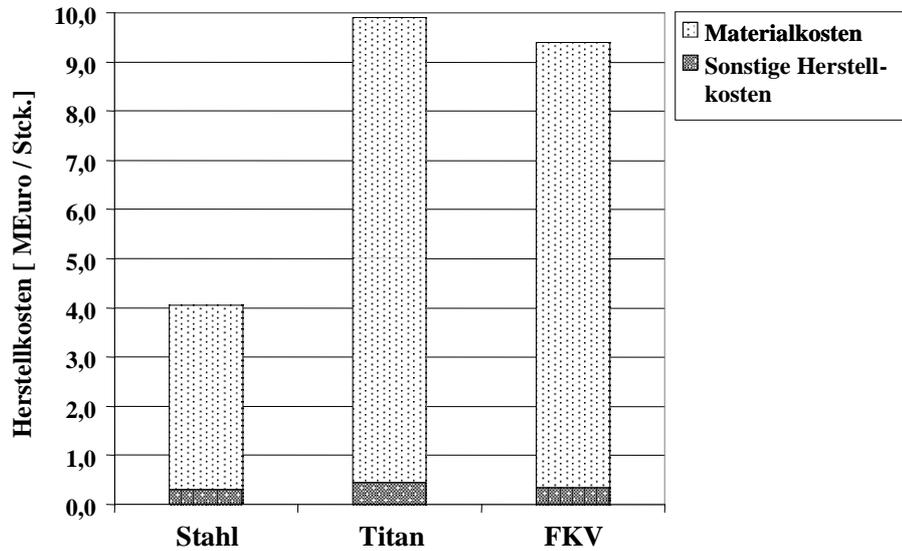


Bild 5-30 Herstellkosten eines flexiblen 9"-Risers mit 1.200 m Länge

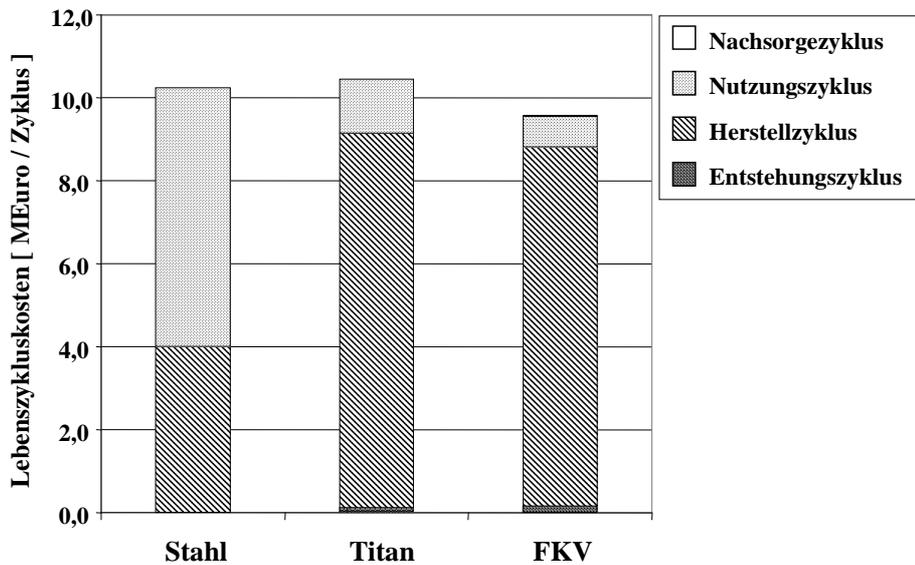


Bild 5-31 Lebenszykluskostenabschätzung eines flexiblen 9"-Risers mit 1.200 m Länge

Eine Darstellung der kalkulierten Lebenszykluskosten enthält Bild 5-31. Hier werden die Nutzungszykluskostenvorteile der Hochleistungswerkstoffe infolge des geringeren realisierbaren Riser-Gewichts offensichtlich. Allerdings führt dies bei der FKV-Bauweise lediglich zur geringen Unterschreitung des Lebenszykluskostenniveaus der Stahl-Ausführung. Für die Titan-Ausführung werden, verglichen mit der Stahl-Bauweise nahezu identische Lebenszykluskosten ausgewiesen. Die Entstehungs- sowie die Nachsorgezykluskosten spielen in der Lebenszykluskostenstruktur eines Risers keine signifikante Rolle.

5.4.6 Sensitivitätsanalyse

Ein wesentlicher Aspekt der Wirtschaftlichkeit von flexiblen Risern ist die Wassertiefe, aus der das Erdöl oder Erdgas gefördert wird. Die Wassertiefe bestimmt die Länge des Risers und damit das Riser-Eigengewicht als eine der wesentlichen Determinanten der Lebenszykluskosten. Aus den vorstehenden Betrachtungen wird deutlich, dass das Verhältnis von Herstell- und Nutzungszykluskosten durch die Riser-Länge maßgeblich beeinflusst wird. Somit erscheint eine Analyse des Einflusses der Riser-Länge auf die Lebenszykluskosten zweckdienlich. In Bild 5-32 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zusammengefasst.

Die Kurven stellen die berechneten Verläufe der Lebenszykluskosten von flexiblen Risern über die Wassertiefe dar. Es wird ersichtlich, dass bei Wassertiefen von weniger als 900 m der Stahl-Riser die wirtschaftlichste Alternative repräsentiert. Der Einsatzbereich von Stahl-Risern mit 9" Durchmesser ist aufgrund der Eigengewichtsproblematik allerdings auf maximal 1.300 m Wassertiefe beschränkt. Für Wassertiefen ab 900 m weist der FKV-Riser geringere Lebenszykluskosten als die Stahl- und die Titan-Bauweisen auf. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt der Wirtschaftlichkeitsvorteil des FKV-Risers zu. Bei 2.000 m Wassertiefe beträgt der kalkulierte Lebenszykluskostenvorteil gegenüber der Titan-Alternative 1,8 MEuro.

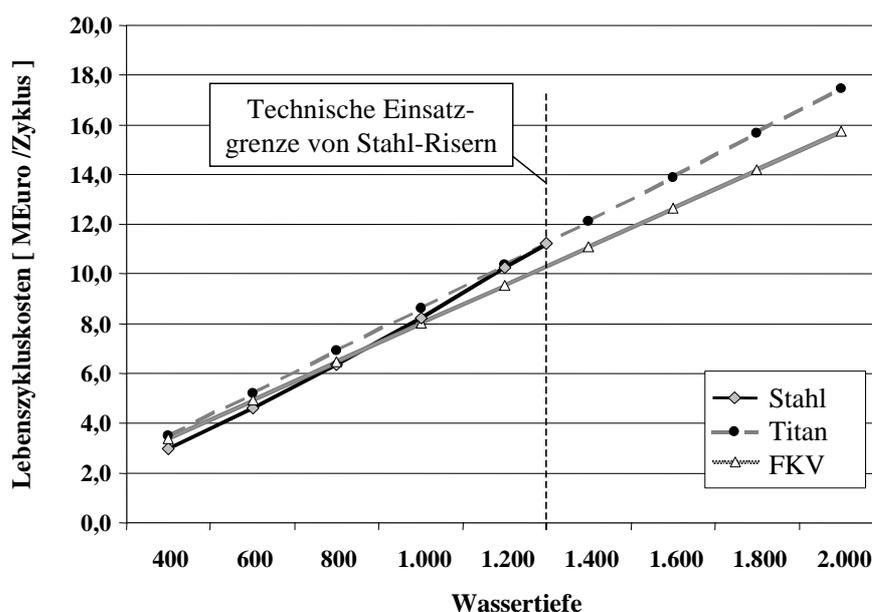


Bild 5-32 Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Wassertiefe auf die Lebenszykluskosten eines flexiblen Risers (9"-Innendurchmesser)

5.4.7 Fazit aus der LZK-Analyse

Die Lebenszykluskostenanalyse für das Riser-Fallbeispiel verdeutlicht das Einsatzpotenzial von FKV in Anwendungsgebieten, in denen eine hohe Sensitivität der Wirtschaftlichkeit gegenüber Gewichtslasten vorliegt.

Trotz signifikant höherer Herstellkosten erweist sich die FKV-Bauweise gegenüber einer herkömmlichen Stahl-Ausführung als konkurrenzfähig, da sich im Nutzungszyklus durch das geringere Gewicht signifikante Kostenreduktionspotenziale erschließen lassen.

Allerdings ist die FKV-Bauweise erst ab Einsatzwassertiefen von 900 m wirtschaftlicher als ein Stahl-Riser.

Bei größeren Wassertiefen (ab 1.300 m bei 9"-Risern) steht die Stahl-Alternative aufgrund der Eigengewichtsproblematik nicht mehr zur Verfügung.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass flexible FKV-Riser für die geplante Ausweitung der Förderaktivitäten der Offshore-Industrie auf größere Wassertiefen eine entscheidende Rolle spielen können, sofern die noch zu lösenden technischen Probleme überwunden werden. Die technischen Einsatzgrenzen für herkömmliche Bauweisen erfordern zwingend den Übergang zu neuen Materialtechnologien und Riser-Bauweisen. Die Lebenszykluskostenanalyse zeigt, dass die Anwendung von FKV hierbei die wirtschaftlichste Alternative darstellt und rechtfertigt somit entsprechende F&E-Aktivitäten.

5.5 Betrachtungen zur Aussagesicherheit des LZK-Modells

5.5.1 Allgemeine Anmerkungen zur Aussagesicherheit

Die dem LZK-Modell zugrunde liegende Methode repräsentiert aufgrund der vielfältigen lebenszykluskostenrelevanten Einflussfaktoren und Zusammenhänge immer nur ein vereinfachendes Abbild der Realität. Somit besteht – wie bei nahezu allen technischen oder betriebswirtschaftlichen Modellen – immer ein gewisses Maß an Unsicherheit bezüglich der Modellergebnisse. Deshalb ist es notwendig, kritische Aspekte der Methode bzw. des Modells herauszuarbeiten und zu bewerten. Damit wird die Grundlage für eine aussagesichere Interpretation der Ergebnisse geschaffen.

Folgende Aspekte sind bei der Bewertung der Aussagesicherheit von Lebenszykluskostenanalysen für die FKV im Allgemeinen zu beachten:

- **Bezugszeitpunkt und -ort der LZK-Ergebnisse :**
Die Aussagen des LZK-Modells beziehen sich immer auf den Bezugszeitpunkt der Inputdaten. D.h., die Ergebnisse können eine aktuelle, aber auch eine zukünftige oder vergangene Konstellation widerspiegeln. Einzelne Inputdaten des LZK-Modells weisen im Zeitverlauf starke Schwankungen auf (z.B. Marktpreise für Materialien). Für derartige Daten werden bei der Modellierung zumeist Durchschnittswerte herangezogen. Die LZK-Ergebnisse repräsentieren dann zwangsläufig eine durchschnittliche Konstellation. Sollen mittels der Lebenszykluskostenanalyse Entscheidungsprozesse mit mittel- bis langfristigem Wirkungshorizont vorbereitet werden, so müssten idealerweise alle Inputdaten auf den "Wirkungszeitpunkt" der zu fällenden Entscheidung projiziert werden.
Ferner beziehen sich die Inputdaten einer Lebenszykluskostenanalyse in der Regel auf eine bestimmte Örtlichkeit oder gemittelte Daten einer bestimmten Region (z.B. Deutschland oder Europa); somit reflektieren die Modellaussagen auch immer diesen örtlichen Bezug.
Diese Problematik von Bezugszeitpunkt und -ort lässt sich gut anhand des Fallbeispiels "Automobilbau" (Kap. 5.1) verdeutlichen. Die hier erarbeiteten Ergebnisse beziehen sich auf die Situation in Deutschland im Jahr 1999.

Es wurde u.a. das in Deutschland zu diesem Zeitpunkt durchschnittliche Kraftstoffpreisniveau (0,9 Euro/l) sowie der durchschnittliche Fahrzeuggewichtseinfluss auf den Kraftstoffverbrauch ($0,6 \text{ l}/10^4 \text{ kgkm}$) eines typischen Pkw der aktuellen Fahrzeugflotte in Deutschland herangezogen. Auch die Kalkulation der Herstellkosten stützt sich auf Inputinformationen, die sich an der Situation in Deutschland bezüglich Personal-, Anlage-, Materialkosten etc. orientieren. Demgegenüber müssen Automobilhersteller jedoch den Einsatz neuer Technologien immer mit mittel- bis langfristigem Horizont planen und somit die zukünftigen Gegebenheiten auf globalen Märkten - sowohl auf den Märkten für die Produkte als auch auf den Märkte für die notwendigen Ressourcen der Produktion - berücksichtigen.

- **Bilanzierungsrahmen:**
Die Festlegung des Bilanzierungsrahmens einer LZK-Modellierung wird immer auch subjektiven Einflüssen unterliegen. Zwar wird an eine Lebenszykluskostenrechnung die Anforderung zur Einbeziehung aller kostenrelevanten Aspekte gestellt; in der Realität wird jedoch der Anwender der Methode immer einen Kompromiss zwischen Umfang des Bilanzierungsrahmens und Aufwand der Analyse eingehen müssen. Dabei ist der Anwender gefordert, vorab eine Einschätzung zur Bedeutung aller kostenwirksamer Aspekte des Lebenszyklus einer FKV-Anwendung vorzunehmen und auf Basis dieser Bewertung den Bilanzierungsrahmen abzustecken. Dabei wird - bewusst oder unbewusst - immer der Blickwinkel und das Analyseziel des Modellanwenders eine gewichtige Rolle spielen. Beispielsweise hätten beim Fallbeispiel "FKV-Anwendung im Bauwesen" (Kap. 5.3) auch indirekte volkswirtschaftliche Kosteneffekte der Verkehrsbehinderung durch die Brückenbaustelle bei der Bewertung erfasst werden können (Arbeitsausfallzeiten infolge Staus, Kosten durch baustelleninduzierte Verkehrsunfälle etc.). Aus übergeordnetem volkswirtschaftlichem Blickwinkel wäre dies sinnvoll. Der öffentliche Bauträger ist hingegen insbesondere in Zeiten leerer öffentlicher Kassen lediglich an den ihn direkt budgetwirksam treffenden Herstell- und Nutzungszykluskosten interessiert.
- **Einheitlichkeit und Konsistenz der Datengrundlagen:**
Ein wichtiges Element bei der Bewertung von LZK-Modellergebnissen für FKV ist der Vergleich mit Konkurrenz- und/oder Referenzmaterialien. Derartige Vergleiche können zu falschen Schlussfolgerungen führen, wenn die Inputdaten für die verschiedenen Materialien von unterschiedlichen Randbedingungen ausgehen. Dabei sind nicht nur der zeitliche oder örtliche Bezugspunkt kritisch, sondern auch Herkunft und Hintergrund der Daten. Insbesondere bei der Abschätzung der Herstellzykluskosten besteht die Gefahr, Kostendaten mit unterschiedlichem Bezugsrahmen als gleichwertig nebeneinander zu stellen. Beispielsweise dürfen Kostendaten einer analysierten Alternative, die auf Basis der reinen Fertigungskosten ohne Gemeinkosten- oder Gewinnzuschläge berechnet worden ist, nicht marktpreisbasierten Kostendaten einer anderen Alternative gegenübergestellt werden.

Aus den dargelegten Punkten wird deutlich, dass Qualität und Konsistenz der Inputdaten eine besonderer Bedeutung für die Aussagesicherheit einer LZK-Analyse zukommt. Der Anwender muss im Vorfeld der Analyse die Datenquellen sorgfältig auswählen und die zeitlichen, örtlichen und inhaltlichen Bezugspunkte der einzelnen Daten untereinander und mit dem Analyseziel harmonisieren.

Interpretationen und Schlussfolgerungen von LZK-Analysen müssen im Sinne eines nachvollziehbaren und transparenten Vorgehens immer auch Angaben zu den Randbedingungen der Inputdaten und dem zugrunde liegenden Bezugsrahmen beinhalten.

5.5.2 Abschätzung des Fehlerbereichs

Im Zusammenhang mit der Bewertung der Aussagesicherheit bei technischen oder betriebswirtschaftlichen Modellen werden zwei potentielle Fehlerquellen prinzipiell unterschieden:

- Inputdateninduzierte Fehler
- Modellimmanente Fehler

Der aus den Fehlern der einzelnen Inputdaten resultierende Fehlerbereich von Modellaussagen wird üblicherweise aus Fehlerabschätzungen auf Ebene der einzelnen Inputdaten oder Inputdatenblöcken und Annahmen zur Fehlerakkumulation im Modell abgeleitet. Bei der Fehlerbetrachtung für Anwendungen des LZK-Modells tritt jedoch das Problem auf, dass für viele der Inputdaten die Definition eines Fehlerbereichs zwar möglich, aber in der Praxis nicht mit absoluter Sicherheit verifizierbar ist. LZK-Analysen werden üblicherweise in der frühen Planungs- und Entwicklungsphase durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt weisen viele der Inputdaten noch sehr hohe Freiheitsgrade auf, die einer sinnvollen Fehlereinschätzung entgegenstehen. Aus diesem Grund gibt es auch keine Möglichkeit der Abschätzung des Fehlerbereichs durch Vergleich von Modellwerten mit empirischen Daten aus der Praxis.

Modellimmanente Fehler ergeben sich aus der oben angesprochenen vereinfachenden Abbildung der Realität im Modell. Sowohl das Modell-Konzept als auch die beinhalteten Algorithmen können Ursache für Fehler in den Modellergebnissen sein. Die Abschätzung des hierdurch bedingten Fehlerbereichs ist allerdings ähnlich problematisch, wie bei den inputdateninduzierten Fehlern. In der betriebswirtschaftlichen Literatur werden zwar häufig die methodisch bedingten Fehlerquellen bei Kostenberechnungs- oder Kostenschätzmethoden beschrieben, eine Quantifizierung des damit verbundenen Fehlerbereichs fehlt jedoch in der Regel.

Aus den Erläuterungen wird deutlich, dass eine analytische Fehlerbetrachtung für das LZK-Modell der FKV nicht durchführbar ist. Somit kann bei der Präsentation von Modellergebnissen kein Fehlerbereich (z.B. in Form von Fehlerbalken) definiert werden.

Einen Hilfsansatz zur allgemeinen Einschätzung der Aussagesicherheit des LZK-Modells lässt sich aus den Ausführungen von Wildemann [199] zur Genauigkeiten von Kostenprognosen in Abhängigkeit von Prognoseverfahren und Prognosezeitpunkt herleiten. Wildemann geht davon aus, dass die in der frühen Initiierungsphase eines Projekts durchgeführte Kostenprognose einen Fehlerbereich von durchschnittlich $\pm 30\%$ aufweist. Mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Planungen sinkt der Fehler und erreicht am Ende der Detailplanungsphase ein Fehlerniveau von unter $\pm 5\%$ (siehe Bild 5-33).

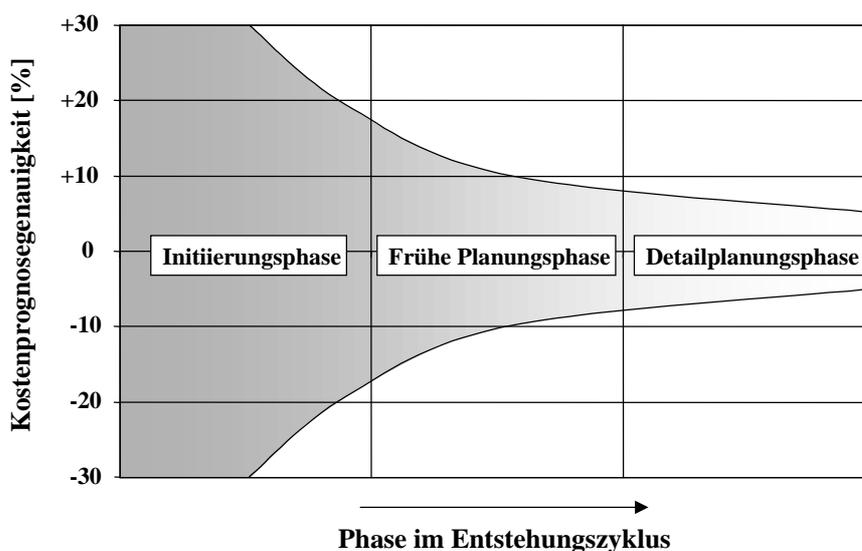


Bild 5-33 Kostenprognosegenauigkeit in den Planungsphasen des Entstehungszyklus [199]

Die sukzessive Steigerung der Genauigkeit wird durch den Übergang zu immer genaueren Kostenschätzmethoden und besseren Informationsbasen realisiert (siehe Tabelle 5-11). Der Vergleich der in Tabelle 5-11 zusammengefassten Merkmale mit dem Aufbau und Inhalt des LZK-Modells offenbart, dass das LZK-Modell als Querschnitt aus den drei typisierten Kostenprognoseverfahren interpretiert werden kann. So weisen zum Beispiel die im Modell implementierten Algorithmen zur Schätzung der Entstehungszyklus- bzw. Nachsorgezykluskosten Merkmale der Analogiebetrachtung bzw. Expertenschätzung auf Basis von Black-Box-Analysen auf. Hingegen sind die Bausteine des LZK-Modells zur Kalkulation der Herstell- und Nutzungszykluskosten eher den analytischen, kalkulatorischen Kostenprognoseansätzen zuzuordnen, wobei die Informationsbasis lediglich das Konkretisierungsniveau der frühen Planungsphase erreicht.

Table 5-11: Kostenprognoseverfahren, -funktionen und Informationsbasen in den verschiedenen Planungsphasen

Merkmale der Kostenprognose	Phasen im Entstehungszyklus		
	Initiierungsphase	Frühe Planungsphase	Detailplanungsphase
Methode der Kostenprognose	Expertenschätzung, Analogiebetrachtung	Kostenrelationsfunktionen	Analytischer kalkulatorischer Ansatz
Funktion der Kostenprognose	Alternativensuche oder -entwurf	Alternativenentscheidung	Kontrollmaßstab für die Durchführung
Informationsbasis	Black-Box-Betrachtung	System- und/oder Prozessanalyse	Stücklisten, Versuchsdaten, Fließbilder, detaillierte Ressourcenverbrauchsbilanzen
Fehlerbereich	± 30 %	± 10 bis 15 %	± 5 %

Somit ist eine allgemeine Abschätzung zum Fehlerbereich der Ergebnisse des LZK-Modells in Anlehnung an die Angaben von Wildemann zwischen ± 10 und ± 25 % anzusetzen, wobei die Tendenz zwischen der oberen oder unteren Fehlerspanne von der ermittelten Kostenstruktur abhängt. Je stärker Herstell- bzw. Nutzungszykluskosten in der Kostenstruktur dominieren, desto kleiner wird der anzusetzende Fehlerbereich.

Wichtig ist, dass sich diese grobe Einschätzung des Fehlerbereichs auf die absoluten Ergebniswerte des LZK-Modells bezieht. Die mittels des Modells berechneten absoluten Lebenszykluskosten sind aufgrund der Zielsetzung von LZK-Analysen – der Vergleich von Alternativen – jedoch nur von untergeordneter Bedeutung. Zentrale Ergebnisse der LZK-Modellierung sind vergleichende – relative – Angaben zu den betrachteten Alternativen. Wurde bei der Erhebung der Inputdaten und der Anwendung der verschiedenen Kostenschätzmethoden für die analysierten Alternativen streng auf Konsistenz geachtet, so werden bei vergleichenden Betrachtungen methodenimmanente Unsicherheitsfaktoren eliminiert. In diesem Fall sind die relativen Aussagen des LZK-Modells als wesentlich präziser und damit aussagesicherer einzustufen als die absoluten LZK-Daten.

6 Fazit – Nutzungspotenzial des LZK-Modells im F&E-Prozess

Die Fallbeispiele zeigen, dass das entwickelte LZK-Modell ein vielseitig nutzbares Hilfsmittel für den wirtschaftlichkeitsorientierten Bewertungs- und Planungsprozess im Zusammenhang mit FKV darstellen kann. Es lassen sich zwei prinzipiell unterschiedliche Ansätze zur Nutzung des entwickelten Modells identifizieren:

- Anwendung als operatives Bewertungsinstrument zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen bei konkreten F&E-Aufgaben im Zusammenhang mit FKV
- Anwendung als strategisches Planungsinstrument zur Definition einer wirtschaftlichkeitsorientierten Entwicklungsstrategie für die Technologie der FKV

6.1 Operative Anwendungsoptionen des LZK-Modells

Die Möglichkeiten zur unmittelbaren Nutzung der entwickelten Bewertungsmethode und des LZK-Modells im Rahmen konkreter F&E-Aufgaben sind – wie die Fallbeispiele verdeutlichen – recht vielfältig. Diese Vielfalt kann in zwei wesentliche Gruppen von operativen Anwendungsoptionen zusammengefasst werden:

- Inter- und intra-technologische Alternativenbewertung und -auswahl
- Identifikation von technischen Optimierungsansätzen/-schwerpunkten

6.1.1 Alternativenbewertung und -auswahl

Die Option zum Einsatz der Methode bzw. des Modells bei der wirtschaftlichkeitsorientierten vergleichenden Bewertung von technischen Alternativen wird durch die dargelegten Fallbeispiele veranschaulicht. Allerdings konzentrierten sich die Fallbeispiele auf den bewertenden Vergleich unterschiedlicher Materialtechnologien; diese Art der Anwendung des LZK-Modells lässt sich als "inter-technologische" Bewertung zur Unterstützung entsprechender Entscheidungsprozesse im F&E-Prozess bezeichnen.

Die Anwendungsmöglichkeiten des Modells im Rahmen von FKV-spezifischen F&E-Problemmstellungen gehen jedoch weit darüber hinaus. Aufgrund der Maßschneiderung des Modells zur detaillierten Abbildung der FKV-Technologie wird insbesondere auch der "intra-technologische" Bewertungs- und Auswahlprozess unterstützt: Oft treten bei F&E-Aufgaben im Zusammenhang mit FKV hinsichtlich

- der konkreten Auswahl möglicher FKV-Materialalternativen,
- dem Bauteildesign oder
- der Auswahl bzw. dem Detailaufbau der Verarbeitungs- und Fertigungstechnik

Entscheidungsproblemstellungen auf. Wie schon in der Einführung erwähnt, werden bisher häufig im Rahmen von F&E-Aktivitäten bei FKV lediglich technische Kriterien als Entscheidungsmaßstab herangezogen und damit ggf. unwirtschaftliche Lösungen vorangetrieben.

Die bereitgestellte LZK-Methode gestattet nun auf sehr einfache und komfortable Weise, bereits sehr früh im F&E-Prozess wirtschaftliche Gesichtspunkte bei technischen Entscheidungsproblemen äußerst umfassend (zeitliche und inhaltliche Dimension) zu berücksichtigen.

6.1.2 Identifikation von technischen Optimierungsansätzen/-schwerpunkten

F&E-Aufgaben im Zusammenhang mit FKV beinhalten oft ein- oder mehrstufige Optimierungsschritte. Ziel der Optimierung ist in der Regel, ein vorliegendes technisches Erstkonzept, welches vorläufige Festlegungen beispielsweise hinsichtlich anzuwendender Materialien, Bauteildesign oder auch Verarbeitungs- und Fertigungstechnik beinhaltet, zu verfeinern. Dabei werden die Zielgrößen der Entwicklung (z.B. mechanische Belastbarkeit eines Bauteils) systematisch maximiert.

Auch bei derartigen Schritten im F&E-Prozess der FKV ist es zweckmäßig, die Wirtschaftlichkeit als nicht-technische Zielgröße einzubeziehen. Dabei kann das LZK-Modell nicht nur als Bewertungsinstrument angewendet werden, welches dazu beiträgt, die ökonomischen Implikationen einer möglichen technischen Modifikation (Material, Bauteil, Verarbeitungstechnik etc.) über den Gesamtlebenszyklus des Analysegegenstands zu quantifizieren. Vielmehr kann das LZK-Modell als Planungsinstrument von F&E-Aktivitäten für FKV zur Identifikation der potentiellen Hauptansatzpunkte für die wirtschaftlichkeitsorientierte technische Optimierung dienen. Die Schlüsselfunktion des LZK-Modells liegt dabei in der Fähigkeit zur Sensitivitätsanalyse.

Um die hinsichtlich der Minimierung der Lebenszykluskosten effektivsten Ansätze oder Schwerpunkte der technisch-wirtschaftlichen Optimierung identifizieren zu können, ist zunächst eine LZK-Basisanalyse des zu optimierenden Ausgangskonzepts zu erarbeiten. Bereits die ermittelte Struktur der Lebenszykluskosten für das Ausgangskonzept gibt einen ersten Aufschluss über die geeigneten Ansatzpunkte zur Optimierung. Beispielsweise ist es – unter dem Aspekt der Gesamtlebenszykluskosten gesehen – wenig sinnvoll, im Falle einer stark nutzungszyklusdominierten Kostenstruktur primär Maßnahmen zur Reduktion der Nachsorgezykluskosten anzudenken.

Aufbauend auf der LZK-Basisanalyse werden Sensitivitätsanalysen für diejenigen Gestaltungsvariablen des Konzepts durchgeführt, die

- einerseits als wesentliche Kostentreiber in der Lebenszykluskostenstruktur erkannt wurden und
- andererseits im Gestaltungs- oder Einflussbereich des F&E-Prozesses liegen.

Durch Auswertung und Vergleich der Sensitivitätsanalysen kann abgelesen werden, welche Gestaltungsvariable unter den gegebenen technischen Randbedingungen das größte Potenzial zur Optimierung der Lebenszykluskosten des Analysegegenstands besitzt. Auch das Zusammenspiel einzelner Gestaltungsvariablen in dieser Hinsicht lässt sich analysieren. Dabei muss aber auch immer die technische Machbarkeit der ermittelten Ansätze geprüft werden. Aus den Informationen ergeben sich konkrete Leitlinien für die effektive Kombination und/oder Prioritätensetzung technischer Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der Lebenszykluskosten im F&E-Prozess von FKV.

Eine interessante Option bei derartiger Anwendung des LZK-Instruments ist die Abschätzung des technischen Optimierungsbedarfs bei einzelnen Gestaltungsvariablen auf Basis von LZK-Zielvorgaben im Sinne eines "Design-to-Life-Cycle-Cost"-Ansatzes. Liegen die Zielvorgaben für die Lebenszykluskosten des Analysegegenstands fest, so können durch rekursive Anwendung der LZK-Methode Zielgrößen für die Gestaltungsvariablen berechnet werden.

In Bild 6-1 ist ein Beispiel für eine derartige Analyse auf Basis des Fallbeispiels "FKV-Anwendungen im Fahrzeugbau" (Grundlagen siehe Kap. 5.1) dargestellt. Ausgangspunkt der Ableitung einer lebenszykluskostenorientierten Optimierungsstrategie der beiden betrachteten FKV-Modellbauteile (Längsträger, Karosserie) ist die Definition eines Optimierungsziels, in diesem Fall die Lebenszykluskostenparität mit den herkömmlichen Referenz-Stahlbauweisen (siehe Bild 5-5). Mit dieser Vorgabe können "Breakeven"-Funktionen ($LZK_{\text{Stahl}} = LZK_{\text{FKV}}$) für alle relevanten Gestaltungsvariablen im Einflussbereich des F&E-Prozesses formuliert werden. Die Gesamtheit dieser Funktionen stellt ein Gleichungssystem dar, welches zur Identifikation der hinsichtlich der Lebenszykluskosten "gewichtigen" Variablen ausgewertet wird. Auch die Kalkulation der Effekte einer multiplen Variation der Gestaltungsvariablen ist möglich.

Um die exemplarische Darstellung der Analyse für die beiden FKV-Modellbauteile übersichtlich zu halten, werden in Bild 6-1 lediglich der kombinierte Einfluss der Material- und Anlagekosten im Hinblick auf die Lebenszykluskosten ausgewertet. Die in Bild 6-1 eingezeichneten Breakeven-Linien repräsentieren die Kombination von fiktiven Kostenreduktionsfaktoren bei den beiden betrachteten Lebenszykluskostentreibern, die zu Erfüllung der Zielvorgabe ($LZK_{\text{Stahl}} = LZK_{\text{FKV}}$) führen.

Für den Längsträger müssten die F&E-Aktivitäten zur Erfüllung der Zielvorgabe auf eine starke Reduktion der Material- und der Anlagekosten ausgerichtet werden (Bild 6-1, links). Die Prüfung der technischen Umsetzungsmöglichkeiten dieser drastischen Kostenreduktionen führt zu dem Schluss, dass die definierte Zielvorgabe für den FKV-Längsträger unter den gegebenen Rahmenbedingungen unerreichbar ist. Die LZK-Analyse würde bezüglich des FKV-Längsträger eine Empfehlung zum Abbruch weiterer Optimierungsaktivitäten ergeben.

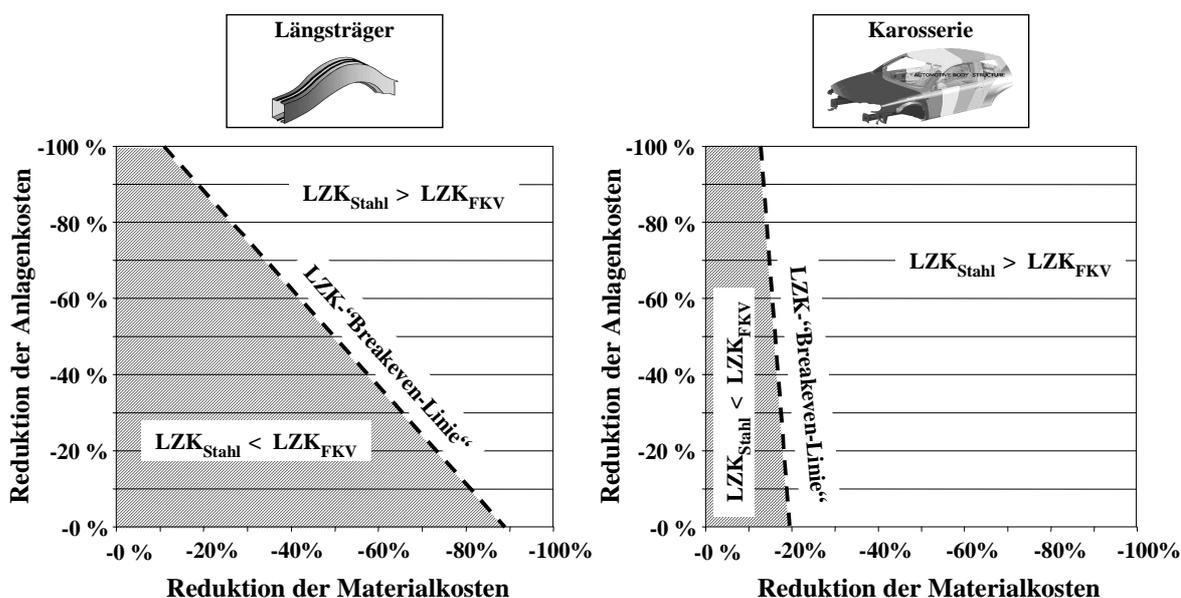


Bild 6-1 Beispiel zur Identifikation geeigneter Optimierungsansätzen mittels LZK-Analyse

Die Analyse der Optimierungsansätze für die FKV-Karosserie deutet hingegen darauf hin, dass die Zielvorgabe durch vergleichsweise geringe Reduktion der Materialkosten (-20 %) zu erreichen wäre. Kostenreduzierende Maßnahmen auf der Anlagenseite hätten nur geringen Einfluss. Daher würde auf Basis der LZK-Analyse ein ausschließlich materialkostenfokussierter Optimierungsansatz für die FKV-Karosserie abgeleitet werden. Dieser würde ein Bündel technischer Maßnahmen zur Beeinflussung derjenigen Gestaltungsvariablen beinhalten, die wesentlichen Einfluss auf die Materialkosten aufweisen, z.B.:

- Untersuchung von alternativen Verstärkungskonzepten im Detail (Verstärkungsmaterial bzw. Verstärkungsstrukturen mit ähnlichen Kennwerten und geringerem Preis)
- Verfeinerung der strukturellen Auslegung der FKV-Karosserie zur Identifikation von zusätzlichem Materialeinsparungspotenzial

Mittels Anwendung des LZK-Modells ist eine Bewertung der zusammengestellten Optimierungsmaßnahmen vor und während der F&E-Aktivitäten schnell und einfach hinsichtlich der Kosteneffekte im gesamten Lebenszyklus möglich.

6.2 Das LZK-Modell als strategisches Planungsinstrument für die FKV

6.2.1 Ausgangslage

Aus der Historie der industriellen FKV-Anwendung ist zu entnehmen, dass die bekannten Hemmnisse der Marktpenetration keine Rolle spielen, wenn für der potentielle Anwender von Anfang an erkannt, dass durch den Einsatz der FKV-Technologie technisch oder wirtschaftlich essentielle Restriktionen herkömmlicher Materialtechnologien überwunden werden können. Diese Marktgegebenheit kann als eine die technische Entwicklung und anschließende Marktpenetration fördernde Erwartungshaltung bzw. Aufnahmebereitschaft des Marktes bezeichnet werden (Market Pull). Hieraus resultieren kurzfristige, intensive F&E-Aktivitäten mit starker Orientierung auf das einzelne Problemfeld, zumeist ohne Ausstrahlung in die Marktbreite. "Market Pull"-Konstellationen sind bei der FKV-Technologie allerdings eher die Ausnahme.

In der Regel tritt bei FKV die Situation auf, dass Innovationen durch kontinuierliche, vom Marktbedarf zunächst unabhängige, langfristig angelegte F&E-Aktivitäten entstehen, welche durch die immanente Entwicklungslogik der FKV-Technologie vorangetrieben werden (Technology Push). Die Innovationen werden dann dem potentiellen Markt bereitgestellt, der über den wirtschaftlichen Erfolg oder Misserfolg entscheidet. In der Geschichte der FKV-Technologie kam es dabei zu einigen fatalen wirtschaftlichen Fehlschlägen. Einer der bekanntesten und teuersten industriellen Misserfolge der letzten Jahre auf dem europäischen FKV-Markt in waren die POLYSTAL[®]-Aktivitäten des Chemiekonzerns Bayer. Es wurde ein neuartiges gewebeverstärktes Thermoplast-Halbzeug inklusive der zugehörigen Massenproduktionstechnologie entwickelt, welches insbesondere für Massenmärkte wie dem Automobilbau geeignet sein sollte. Trotz enormer, jahrelanger Marketinganstrengungen nahmen die angestrebten Märkte das Produkt nicht an. Es stellte sich heraus, dass die Produktentwicklung weit am Bedarf des FKV-Marktes – sowohl hinsichtlich technischer als insbesondere auch wirtschaftlicher Kriterien – vorbei gegangen war.

Sowohl "Market Pull" als auch "Technology Push" sind als ungeeignete Fortschrittmechanismen zu erachten, wenn das wirtschaftliche Verwertungspotenzial einer innovativen Technologie effizient, systematisch und nachhaltig erschlossen werden soll. Die Entwicklung einer eigenständigen F&E-Strategie für die FKV-Technologie durch Implementierung einer wirtschaftlichkeitsorientierten Denkweise ist ein vielversprechender Ansatz, um das Problem zu überwinden. Ziel der zu entwickelnden F&E-Strategie muss es sein, die bisher isolierten Mechanismen des Technology Push und des Market Pull zu verknüpfen. Der Technology Push sollte durch die geeignete F&E-Strategie auf zukunftssträchtige Anwendungsfelder mit latentem Market Pull gesteuert werden. Dies würde das Risiko von wirtschaftlichen Fehlschlägen neuer Entwicklungen der FKV-Technologie erheblich reduzieren und die Effizienz des F&E-Prozesses insgesamt steigern.

6.2.2 Strategischer Ansatz - Ableitung eines F&E-Portfolios

Das hier vorgeschlagene Vorgehen zur Entwicklung einer F&E-Strategie für die FKV basiert auf dem Konzept der "Portfolio-Analyse", welches in der Regel bei der strategischen Geschäftsfeldplanung von Unternehmen angewendet wird [86]. Das LZK-Modell wird dabei als strategisches Analyse- und Planungsinstrument bei der Suche nach FKV-spezifischen Erfolgspotenzialen in dem Gesamtmarkt eingesetzt. Durch Anwendung der LZK-Methode sind diejenigen potentiellen Marktsegmente und Anwendungsfelder zu identifizieren, auf denen die FKV-Technologie signifikante Lebenszykluskostenvorteile gegenüber Konkurrenzwerkstoffen erreichen kann.

Der Ansatz zu Ableitung einer wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Strategie basiert auf folgende Hypothesen:

- Die komparativen Lebenszykluskostenvorteile werden als Kriterium des Durchdringungspotenzials einer FKV-Innovation in den einzelnen Marktfeldern herangezogen. Je höher die komparativen Lebenszykluskostenvorteile sind, desto höher wird die Chance der FKV eingeschätzt, ein Marktfeld zu durchdringen.
- Der Innovationsgrad der FKV-Anwendung im jeweiligen Marktfeld repräsentiert den Reifegrad der FKV-Anwendung im F&E-Prozess (beispielhafte Einschätzungen des Innovationsgrads verschiedener aktueller oder geplanter FKV-Anwendungen siehe Bild 6-2). Je höher der Innovationsgrad, desto größer ist der noch verbleibende Gestaltungsspielraum der wirtschaftlichkeitsorientierten F&E einzuschätzen.
- Das Volumen des Marktfelds dient als Kriterium zur Bewertung des potentiellen FKV-Gesamtanwendungsvolumens.

Die Bewertung der komparativen Lebenszykluskostenvorteile mittels LZK-Analyse sowie die Einschätzung des Innovationsgrades bestimmen die Position der als Kreise dargestellten FKV-Anwendungsfelder in einer Vier-Feld-Matrix, die bei Einteilung der beiden Kriterien in niedrig und hoch entsteht (siehe Bild 6-3); das Marktvolumen des FKV-Anwendungsfelds wird in Gestalt des Kreisdurchmessers abgebildet.

In Bild 6-3 sind in einer verallgemeinernden Darstellung die wichtigsten FKV-Marktfelder entsprechend dem oben skizzierten Vorgehen in die Vier-Feld-Matrix eingeordnet. Das Marktfeld "Sportgeräte" musste dabei vernachlässigt werden, da komparativen Vorteile der FKV-Anwendung in diesem Segment nicht monetär quantifizierbar sind und somit eine Bewertung in der Vier-Feld-Matrix wenig sinnvoll erscheint.

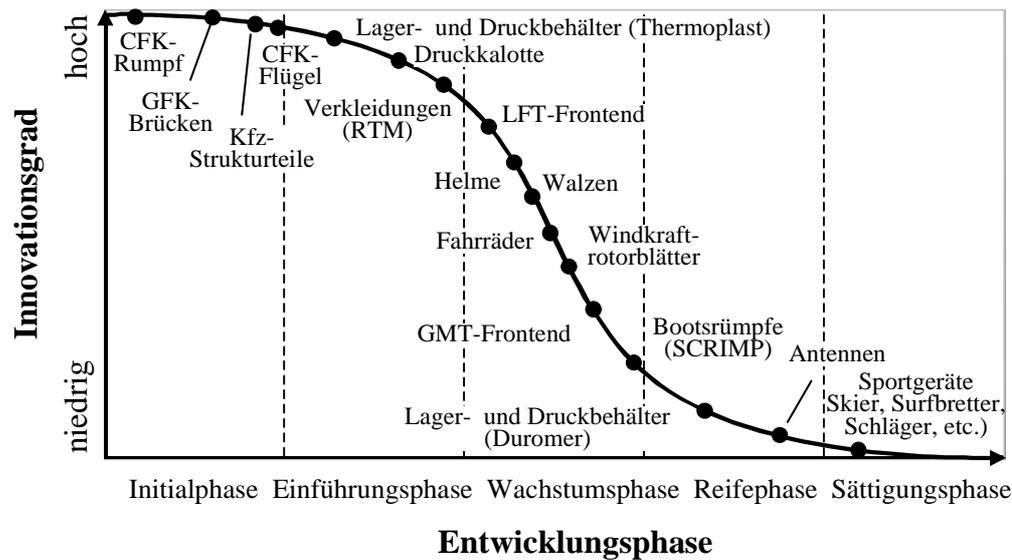


Bild 6-2 Entwicklungsphase und Innovationsgrad ausgewählter FKV-Anwendungen

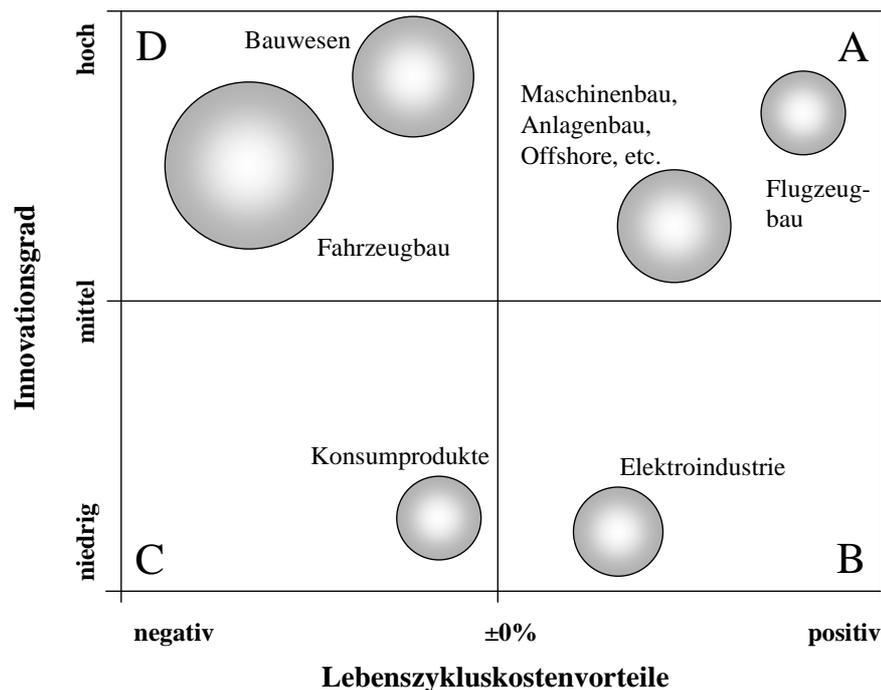


Bild 6-3 F&E-Portfolio-Analyse der FKV-Marktfelder zur Ableitung einer F&E-Strategie

Die einzelnen Feldern der Matrix repräsentieren jeweils idealtypische strategische Positionen der Marktfelder. Aus der Positionierung lassen sich Richtlinien (Normstrategien) für die Einordnung der FKV-Marktfelder in einer wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Strategie ableiten:

- **Feld A: Premium-Segment**
Im Premium-Segment kommt ein hoher Innovationsgrad der FKV-Anwendung komparative Lebenszykluskostenvorteile zusammen. Das wirtschaftliche Verwertungspotenzial von aus F&E-Aktivitäten resultierenden Innovationen wird daher als sehr hoch eingestuft. Folglich sollte bei der F&E-Strategie das Premium-Segment den Schwerpunkt bilden.

- **Feld B: Sekundär-Segment**
Für das Sekundär-Segment werden zwar komparative Lebenszykluskostenvorteile der FKV-Anwendung ausgewiesen, der Innovationsgrad ist aber vergleichsweise gering. Somit ist bei der Schwerpunktsetzung der F&E-Strategie das Sekundär-Segment mit niedriger Priorität zu belegen. Lediglich Anwendungsfelder mit großem potentiellen Marktvolumen und niedrigem Durchdringungsgrad sind näher hinsichtlich Markthemmnissen zu analysieren und auf Basis der Analyseergebnisse im Einzelfall in die Schwerpunkte der F&E-Strategie aufzunehmen.
- **Feld C: Problem-Segment**
In das Problem-Segment fallen diejenigen FKV-Marktfelder, die einen vergleichsweise niedrigen Innovationsgrad besitzen und für die Lebenszykluskostennachteile gegenüber herkömmlichen Materialtechnologien ausgewiesen werden. Aufgrund dieser Position ist davon auszugehen, dass die Chancen auf eine wirtschaftliche Verwertbarkeit von F&E-Aktivitäten in dem Segment generell sehr gering sind. Unabhängig vom potentiellen Marktvolumen ist hier eine Konzentration von F&E-Ressourcen zu vermeiden. Das Problem-Segment ist bei der Festlegung von strategischen F&E-Schwerpunkten zu vernachlässigen.
- **Feld D: Risiko-Segment**
Das Risiko-Segment ist durch einen hohen Innovationsgrad der FKV-Anwendung gekennzeichnet. Gleichzeitig werden Lebenszykluskostennachteile prognostiziert. Es bestehen somit zwei Entwicklungsszenarien für hier positionierte Anwendungsfelder: Entweder es gelingt, durch entsprechende F&E-Aktivitäten die Lebenszykluskostennachteile in -vorteile umzuwandeln und damit das Anwendungsfeld in das Primär-Segment zu verschieben oder die Lebenszykluskostennachteile bleiben bestehen und mit fortschreitender Zeit steigen die Anwendungsfelder in das Problem-Segment ab.
Das Risiko-Segment erfordert ein selektives Vorgehen bei der Festlegung der F&E-Strategie. Es ist eine detaillierte Analyse der Erfolgswahrscheinlichkeit von F&E-Maßnahmen zur Erzielung von komparativen Lebenszykluskostenvorteilen durchzuführen. Sensitivitätsanalysen mittels des LZK-Modells sind ein probates Mittel hierzu. Bei hoher Erfolgswahrscheinlichkeit erscheint die Aufnahme des jeweiligen Anwendungsfelds als Schwerpunkt in die F&E-Strategie sinnvoll. Andernfalls ist das Anwendungsfeld nicht zu berücksichtigen.

Die allgemeine F&E-Portfolio-Analyse aus Bild 6-3 ergibt, dass eine wirtschaftlichkeitsorientierte F&E-Strategie für die FKV-Technologie unter den gegebenen Rahmenbedingungen die Anwendungsfelder "Flugzeugbau" und "Industrieanwendungen" (Maschinen-/Anlagebau, Offshore) als Schwerpunkte beinhalten sollte. Die Anwendungsfelder "Bauwesen" und "Fahrzeugbau" sind im Risiko-Segment angesiedelt. Die relativen Positionen der Felder im Risiko-Segment und die Ergebnisse der Fallstudien aus Kap. 5 lassen vermuten, dass das Bauwesen ein größeres Potenzial als der Fahrzeugbau hinsichtlich einer Penetration durch die FKV-Technologie besitzt. Somit sollte ggf. auch das Bauwesen als Schwerpunkt in die F&E-Strategie aufgenommen werden; zusätzliche Detailanalysen sind allerdings empfehlenswert.

Die zunächst relativ pauschalen Schlussfolgerung aus der F&E-Portfolio-Analyse für die FKV-Anwendungsfelder können bei Bedarf in weiteren Schritten verfeinert werden. Hierzu sind die als Schwerpunkte einer wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Strategie identifizierten Anwendungsfelder in potentielle FKV-Einzelanwendungen aufzulösen, die dann wiederum mittels strategischer F&E-Portfolio-Analyse unter Anwendung des LZK-Modells bewertet und in eine Strategie eingeordnet werden können.

6.3 Verknüpfung von strategischer und operativer F&E-Planungsebene

Die aufgezeigten strategischen und operativen Aspekte der F&E-Planung für die Technologie der FKV sind eng miteinander verknüpft. Aus dem strategischen Planungsprozess resultiert eine F&E-Strategie, die durch konkrete F&E-Maßnahmen umzusetzen ist. Die F&E-Maßnahmen setzen eine operative Planung voraus. Ergebnisse und Erkenntnisse der operativen Planung werden kontinuierlich mit der strategischen Planungsebene rückgekoppelt, um hier ggf. Anpassungen oder Verbesserungen der Strategie zu erzielen.

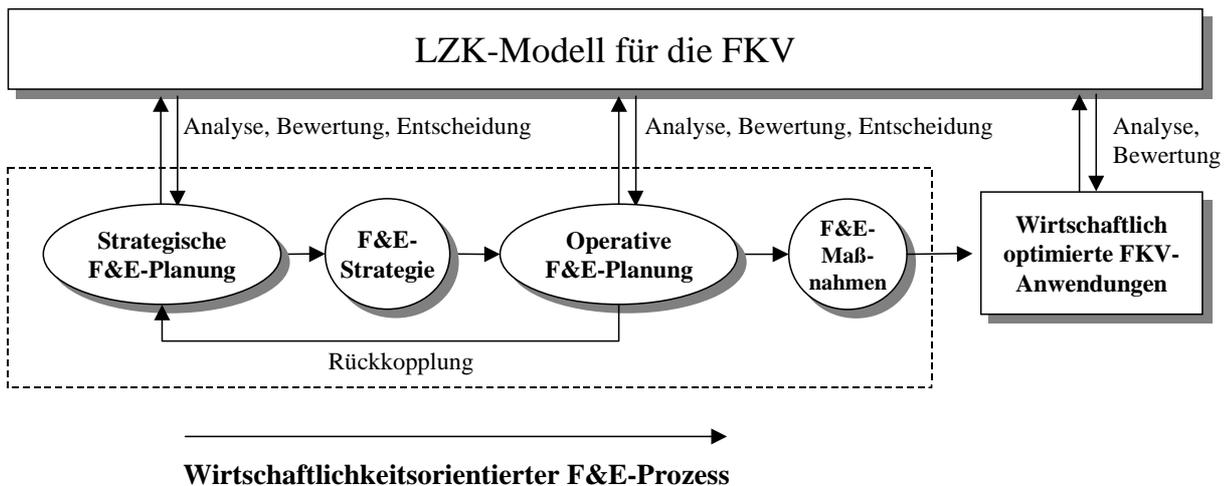


Bild 6-4 Implementierung des wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Prozesses für die FKV durch das LZK-Modell

Das entwickelte LZK-Modell stellt für die Weiterentwicklung der FKV-Technologie eine Klammerfunktion dar, da auf allen Stufen des wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Prozesses Analysen und Bewertungen durchzuführen sowie Entscheidungen zu fällen sind, die sich letztlich auf dem LZK-Modell abstützen (siehe Bild 6-4). Die Implementierung des LZK-Modells im F&E-Prozess kann eine starke Orientierung auf die Wirtschaftlichkeit sicherstellen und damit die konsequente Entwicklung wirtschaftlich optimierter FKV-Anwendungen vorantreiben.

Durch die Bereitstellung auch wirtschaftlich vorteilhafter Lösungskonzepte auf Basis der FKV-Technologie für zukünftige technische Problemfelder werden die bestehenden Barrieren der Marktpenetration für FKV bewältigt. Damit kann die Erschließung des enormen technisch-wirtschaftlichen Potenzials der FKV für breitere Anwendungsfelder beschleunigt werden.

7 Zusammenfassung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Steifigkeit sowie eine geringe Dichte aus. Die mittels FKV realisierbare Integralbauweise gekoppelt mit dem Leichtbauvermögen stellt das elementare Leistungspotenzial der Werkstoffklasse dar. Beispielsweise lässt sich durch gezielte Anwendung von FKV das Strukturgewicht von Transportmitteln (z.B. Verkehrsflugzeuge, Pkw, Nutzfahrzeuge) wesentlich reduzieren und damit der Kraftstoffverbrauch sowie die einhergehenden Luftschadstoffemissionen signifikant senken oder/und die Leistungsfähigkeit (Reichweite, Beladungskapazität) steigern. Die spezifischen Materialeigenschaften der FKV – wie etwa Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit oder das günstige Ermüdungsverhalten – können auch zur Erhöhung der Dauer des Produktlebenszyklus von Industrieprodukten eingesetzt werden. Dies steigert einerseits die Wirtschaftlichkeit der Produkte und reduziert andererseits die negativen Umwelteinwirkungen der industriellen Produktion.

Diese Eigenschaften begründen das Potenzial der FKV, einen Beitrag zur Lösung akuter technologischer bzw. wirtschaftlicher Problemstellungen (z.B. erhöhter Innovationsdruck auf den globalen Märkten, zunehmende Bedeutung von Umweltaspekten) zu leisten. Ein breiter Durchbruch von FKV in Großserienanwendungen wird schon seit langem vorausgesagt, jedoch ohne entscheidende Fortschritte am Markt zu verzeichnen. Als Hauptgrund für den vergleichsweise geringen Einsatz der FKV, ungeachtet des Anwendungspotenzials, ist die unzureichende Wirtschaftlichkeit zu nennen. Im Allgemeinen besteht zwischen FKV und traditionellen Materialien eine signifikante "Wirtschaftlichkeitslücke", welche die zurückhaltende bzw. ablehnende Haltung in vielen Anwendungsbereichen gegenüber der FKV-Technologie begründet.

Um eine Lösung des Wirtschaftlichkeitsdilemmas der FKV voranzutreiben, ist ein prinzipielles Umdenken im Ansatz der Entwicklung innovativer FKV-Anwendungen erforderlich. Wirtschaftliche Optimierungspotenziale sind möglichst früh im Entwicklungsprozess zu identifizieren und durch gezielte Einflussnahme auf die technische Fortentwicklung konsequent zu erschließen. Eine entscheidende Voraussetzung zur Implementierung einer wirtschaftlichkeitsorientierten FKV-Entwicklungsstrategie ist die Existenz eines entsprechenden Analyse- und Planungsinstruments. Problempunkte bei der Entwicklung eines derartigen Instruments sind die Methodik und der Maßstab der ökonomischen Bewertung. Bei herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsanalysen werden die Material- und Verarbeitungskosten eines Bauteils bzw. einer Struktur bewertet, die Kosten in herstellungsvor- oder nachgelagerten Phasen jedoch vernachlässigt. Innovative FKV-Anwendungen, die hohe Herstellkosten bedingen, aber gleichzeitig im Betrieb Kostenvorteile gegenüber bewährten Alternativprodukten aufweisen, werden bei konventioneller Bewertungsmethodik in der Regel schlechter bewertet und damit meist a priori als unwirtschaftlich eingestuft. Die inhärent punktuelle Kostenperspektive herkömmlicher Wirtschaftlichkeitsanalysen unterstützt somit das Entstehen herstellkostenbezogener Suboptima der Technologieauswahl und versperrt den Blick auf längerfristige Nutzeffekte innovativer Technologien. Aus dieser Problematik ergibt sich die Notwendigkeit der systematischen Entwicklung einer neuen, für die FKV maßgeschneiderten Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse, die alle relevanten Wirtschaftlichkeitsaspekte umfasst, einschließlich deren Darstellung in einem praxisgeeigneten Instrument. Diese Anforderungen repräsentieren die zentralen Ziele der vorliegenden Arbeit.

Als Ansatz zur Umsetzung dieses Ziels wurde die Methode der Lebenszykluskostenrechnung (LZK) herangezogen. Die LZK-Methode erlaubt, für ein geplantes Produkt bereits im Entwicklungsprozess die zu erwartende Wirtschaftlichkeit in Form von Kostenindikatoren mittels eines ganzheitlichen, auf alle Phasen des Produktlebenszyklus ausgedehnten Betrachtungshorizontes zu analysieren.

Das theoretische Konzept der LZK (Systemansatz) war in eine auf die spezifischen Belange der FKV-Technologie angepasste, innovative Systematik zu überführen und dann in einem neuartigen Bewertungsinstrument zu implementieren.

Zum Aufbau des LZK-Modells erfolgte zunächst die Ableitung eines Meta-Modells des FKV-Lebenszyklus. Hierzu wurden das zu bewertende System "FKV-Lebenszyklus" innerhalb der durch die Problemstellung determinierten Systemgrenze analysiert und die LZK-relevanten Kausalbeziehungen extrahiert. Aus diesen Informationen ergab sich der "Bauplan" des Modells. In Analogie zu den vier Phasen des FKV-Lebenszyklus (Entstehungszyklus, Herstellzyklus, Betriebszyklus und Nachsorgezyklus) wurden vier Modellbausteine entwickelt. Die einzelnen Bausteine wurden zur Berechnung bzw. Abschätzung der phasenspezifischen Kosten und deren zeitlichen Zuordnung ausgelegt. Als gemeinsamer Ansatz für jeden Baustein wurde eine ressourcenverbrauchs-basierte Stückkostenberechnungsmethode gewählt.

Nach Abschluss der Methoden- und Modellentwicklung erfolgte die Anwendung des neuen LZK-Modells auf verschiedene Fallstudien. Dies diente der Modellvalidierung, dem Aufzeigen von Anwendungsoptionen der Methodik bzw. des Modells im Rahmen von konkreten FKV-Entwicklungsaufgaben sowie der Bereitstellung einer Argumentationsgrundlage für die Ableitung einer Entwicklungsstrategie für FKV. In den Fallstudien wurden FKV-Bauteile bzw. Strukturen aus unterschiedlichen potenziellen Anwendungsfeldern hinsichtlich der Lebenszykluskostencharakteristik analysiert und mit herkömmlichen Materiallösungen verglichen. Es wurden vier Beispiele aus den Bereichen Fahrzeugbau, Anlagenbau, Bauwesen und Offshore-Industrie ausgewählt, die im Zusammenhang mit aktuellen industriellen F&E-Problemstellungen stehen.

Die grundsätzliche Eignung des neuen Modells zur Analyse der LZK-Charakteristik von innovativen FKV-Anwendungen gemäß den gestellten Anforderungen wurde nachgewiesen. Daneben wurden eine ganze Reihe von Daten zur Wirtschaftlichkeit der FKV-Anwendung in den untersuchten Fallbeispielen erarbeitet und analysiert. Die Fallbeispiele verdeutlichen, dass das entwickelte LZK-Modell ein vielseitig nutzbares Hilfsmittel für den wirtschaftlichkeitsorientierten Bewertungs- und Planungsprozess im Zusammenhang mit FKV darstellen kann. Es ließen sich zwei prinzipiell unterschiedliche Ansätze zur Nutzung des entwickelten Modells identifizieren:

- Anwendung als operatives Bewertungsinstrument zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen bei konkreten F&E-Aufgaben im Zusammenhang mit FKV
- Anwendung als strategisches Planungsinstrument zur Definition einer wirtschaftlichkeitsorientierten Entwicklungsstrategie für die Technologie der FKV

Erstmalig wurde herausgearbeitet, dass die LZK-Methodik für den gesamten F&E-Prozess der FKV-Technologie eine Klammerfunktion bilden kann. In der FKV-Technologie sind im Rahmen eines wirtschaftlichkeitsorientierten F&E-Prozesses auf allen Stufen Analysen und Bewertungen durchzuführen sowie Entscheidungen zu fällen, die sich letztlich auf das LZK-Modell stützen können. Die Implementierung des LZK-Modells in den F&E-Prozess kann eine starke Orientierung hin zur Wirtschaftlichkeit sicherstellen und damit die konsequente Entwicklung wirtschaftlich optimierter FKV-Anwendungen vorantreiben. Durch die Bereitstellung auch wirtschaftlich vorteilhafter Lösungskonzepte auf Basis der FKV-Technologie für zukünftige technische Problemfelder werden die bestehenden Barrieren der Marktpenetration für FKV bewältigt. Somit lässt sich die Erschließung des hohen technisch-wirtschaftlichen Potenzials der FKV für breitere Anwendungsfelder beschleunigen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Michaeli, W.; Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München Wien: Carl Hanser Verlag 1990.
- [2] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. München Wien: Carl Hanser Verlag 1992.
- [3] Neitzel, M.; Breuer, U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. München Wien: Carl Hanser Verlag 1997.
- [4] Räckers, B.: Faserverbundwerkstoffe - Entwicklungstrends am Beispiel des Airbus. Proceedings Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde. Frankfurt 1997, S. 3-14.
- [5] Balazard, J.: Quels matériaux pour l'aéronautique?. Caoutchoucs & Plastiques 722 (1993), S. 50-52.
- [6] Spur, G.: Bedeutung der Technologie der Faserverbundkunststoffe für die zukünftige Entwicklung in der industriellen Produktionstechnik. Proceedings 25. Internationale AVK-Tagung. Arbeitsgemeinschaft verstärkte Kunststoffe. Frankfurt 1993, S1.1-1.12.
- [7] Köhler, E.; Bergner, A.: Faserverbundbauweisen – Chancen für den Maschinenbau und die Verkehrstechnik. Proceedings Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde. Frankfurt 1995, S. 259-270.
- [8] N.N.: Composites: A Profile of the Worldwide Reinforced Plastics Industry. Oxford: Elsevier Science Publishers Ltd. 1992.
- [9] N.N.: Europe gets global. Reinforced Plastics 42 (1998) 6, S. 32-40.
- [10] N.N.: Composites continue progress in Western Europe. Reinforced Plastics 41 (1997) 3, S. 20-25.
- [11] Manganot, E.: The European Composite Market: Situation and Outlook, Proceedings 27. Internationale AVK-Tagung. Arbeitsgemeinschaft verstärkte Kunststoffe. Frankfurt 1996, S. A11.1-9.
- [12] Osthus, T.: Vergleich der Wirtschaftlichkeit von textilen Verstärkungshalbzeugen, Proceedings 35. Internationale Chemiefasertagung. Österreichisches Chemiefaser-Institut. Dornbirn 1996.
- [13] Müller, J.: Potential lang noch nicht ausgeschöpft. Kunststoffe (10) 1993, S. 40-45.
- [14] Ostgathe, M.: Zur Serienfertigung gewebeverstärkter Halbzeuge für die Umformung. VDI-Fortschrittberichte VDI 2-463. Düsseldorf : VDI-Verlag 1998.
- [15] Breuer, U.: Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste. VDI-Fortschrittberichte VDI 2-433. Düsseldorf : VDI-Verlag 1998.
- [16] Aström, B. T.: Manufacturing of Polymer Composites. London: Chapman&Hall Verlag 1997.
- [17] Marsh, G.: Thermoplastics Drive into the Future. Reinforced Plastics 42 (1998) 9, S. 46-50.

-
- [18] Hartmann, A.; Mayer, C.; Neitzel, M.: Improving Economic Efficiency – Key for Market Penetration of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermoplastics. Proceedings AN-TEC'99. Society of Plastic Engineers. New York 1999, S. 2160-2614.
- [19] Brandt, J.: Present and Future of Composite Materials for Aerospace Applications. Proceedings ICCM-9. Hrsg. Miravete, A., University of Zaragoza. Zaragoza 1993, S. 112.
- [20] Krämer, M.; Winkler, P.-J.: Möglichkeiten und Grenzen einer Synergie zum Leichtbau zwischen Automobil- und Luftfahrtindustrie. Beiträge der Fahrzeugtechnik zur Verbrauchssenkung. VDI-Bericht 1099. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993, S. 59-85.
- [21] N.N.: The development of composites in aeronautical parts and equipment. Composites, 31 (1999), S. 37-39.
- [22] Ashley, S.: Carbon composites fly high. Mechanical Engineering 9 (1997) 119, S. 66-69.
- [23] N.N.: The Advanced Stitching Machine: Making Composite Wing Structures of the Future. NASA Facts FS-1997-08-31-LaRC. NASA. Hampton 1997.
- [24] N.N.: Advanced Stitching Machine For Aircraft Components Demonstrated. Boeing News Release No. 97-165. The Boeing Company. Seattle 1997.
- [25] Brandt, J.; Kuch, I.: Verbundwerkstoffe mit polymerer Matrix für Strukturanwendungen Proceedings Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde. Frankfurt 1995, S. 539-549.
- [26] Offringa, A. R.: Thermoplastic Composites in Aerospace – Proven Through Cost-Effective Processing. Proceedings ICAC'95. Institut of Materials. Nottingham 1995, S. 159-169.
- [27] Harper-Tervet, J. et al.: Superplastic Diaphragm Forming of Thermoplastic Complex Shaped Composites as a Cost Effective Manufacturing Process. Proceedings International SAMPE Technical Conference. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Covina 1997, S. 383-394.
- [28] N.N.: Flight critical structures manufactured from composite materials. Composites 31 (1999) 1, S. 51-54.
- [29] Turner, G. F.: Advanced Composite Materials in European Aircraft – Present and Future. SAMPE International Conference. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Covina 1995, S. 366-380.
- [30] N.N.: Current Market Outlook, Worldwide Airplane Deliveries – 10-Year Forecast. Marktstudie The Boeing Company. Seattle 1999.
- [31] Jeryan, R.: The Development of Composites for Automotive Structures. Proceedings of the ASME Aerospace Division. AD-Vol. 52. ASME. New York 1996, S. 93-96.
- [32] N.N.: Kunststoffe im Automobilbau – Polymer-Potential noch nicht ausgereizt. Kunststoff Information 1387 (1998), S 1.
- [33] Stauber, R.: Werkstoffe im Automobilbau - Neue Anwendungen und Verfahren. Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde. Frankfurt 1995, S. 453-457.

- [34] Piëch, F.; Demel, H.: Der Pkw mit 3 l Verbrauch pro 100 km – Traum oder Wirklichkeit? VDI-Fortschritt-Berichte VDI 12-239. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994, S. 391-404.
- [35] Lovins, A. B.; Brylawski, M. M.; Cramer, D. R.; Moore, T. C.: *Hypercars: Materials, Manufacturing and Policy Implications*. The Hypercar Center, Rocky Mountain Institute. Snowmass 1996.
- [36] Seiffert, U.: *The Automobile in the next Century*. Proceedings FISITA-XIV Conference. Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile. London 1996.
- [37] Brylawski, M. M.; Lovins, A. B.: *Advanced Composites: The Car is at the Crossroad*. SAMPE Journal 35 (1999) 2, S. 25-36.
- [38] Breuer, U.: *Fabric Reinforced Thermoplastic Composites – A Challenge for Automotive Applications*. Proceedings FISITA-XIV Conference. Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile. London 1996.
- [39] Chajes, M.J.; Finch, W.W.: *Performance of a Prestressed Concrete Bridge Rehabilitated Using CFRP Sheets*. Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tucson 1996, S. 1186-1192.
- [40] Mertz, D. R.; Gillespie, G. W.; Kasai, K.: *Rehabilitation of Steel Bridges Through Application of Advanced Composite Materials*. NCHRP-IDEA Annual Progress Report 2: Emerging Concepts and Products for Highway Systems. Center for Composite Materials, University of Delaware. Newark 1995, S. 48-57.
- [41] N.N.: *Composites make progress in reinforcing concrete*. Reinforced Plastic 43 (1999) 7, S. 40-46.
- [42] N.N.: *Canada's infrastructure benefits from FRP*. Reinforced Plastic 43 (1999) 7, S. 34-38.
- [43] Chajes, M. J.: *Foult Road Bridge Rehabilitation*. Projektbericht. Departement of Civil & Environmental Engineering, University of Delaware. Newark 1995.
- [44] N.N.: *A Bridge To Last*. Popular Mechanics. New York: Hearst Communications Inc. 1996.
- [45] Ehlen, M. A.: *The Life-Cycle Costs of New Construction Materials*. Journal of Infrastructure Systems 3 (1999) 4, S129-133.
- [46] Wilson, J.: *Glas Bridges*. Popular Mechanics. New York: Hearst Communications Inc. 1997.
- [47] Hooks, J. et al.: *Advanced Composites in Bridges in Europe and Japan*. FHWA Study. Federal Highway Administration, U.S. Departement of Transportation. Washington DC 1997.
- [48] Luyckx, J.; Lacroix, R.; Fuzier, J. P.: *Bridge Strengthening by Carbon Fibres*. Proceedings European Conference on Composite Materials ECCM-8. Hrsg. Visconti, C., University of Naples. Neapel 1998, S. 15-20.

- [49] N.N.: Acceptance of composites in infrastructure grows. *Reinforced Plastic* 43 (1999) 7, S. 7.
- [50] N.N.: UK team strengthens bridge with carbon fibre, *Reinforced Plastic*, 43 (1999) 7, S. 8.
- [51] Goldsworthy, W. B.: Composites Gear up for the Commodities Market in the Automotive Industry. *Proceedings Advanced Composite Conference*. ASM International. Materials Park 1985, S. 113-115.
- [52] Cassidy, V. M.: Plastic Composites challenge metals. *Modern Metals* 42 (1986) 3, S. 16-27.
- [53] Blumberg, H.: Kohlenstoff- und Aramidfasern. *Kunststoffe* 77 (1987) 10, S. 104-107.
- [54] Reinhart, T. J.: Polymer Matrix Composites. *Advanced Materials & Processes* 137 (1990) 1, S. 33-34.
- [55] N.N.: *The Advanced Composite Industry Worldwide 1998-2003*. Watford: Materials Technology Publications 1998, S. 1-5.
- [56] N.N.: Ceramic fibers and coatings, advanced materials for the twenty-first century. Pub. NMAB-494. Hrsg. National Materials Advisory Board (US National Research Council). Washington: Washington National Academy Press 1998.
- [57] Molyneux, M.: Advanced Composite Market Analysis. *Take Off - FACC customers magazine* 4 (1998), S. 4.
- [58] Segal, C. L.: 21st Century Market Opportunities for Advanced Fibers and Composites. *SAMPE Journal* 32 (1996) 4, S. 12-19.
- [59] Brandt, J.; Drechsler, K.: Faserverbundstrukturen mit dreidimensionaler Geflechtverstärkung. *Proceedings Werkstoffwoche '96*. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde. Frankfurt 1996. S. 137-142.
- [60] Kassapoglou, C.: Simultaneous cost and weight minimisation of composite-stiffened panels under compression and shear. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (1997) 5, S. 419-435.
- [61] Vary, A.: NDE in the Age of "Faster, Better, Cheaper" with Implications for Structural Composites. *Materials Evaluation* 53 (1995) 5, S. 576-578.
- [62] Marsh, G.: Pragmatism prevails in aerospace industry. *Reinforced Plastics* 43 (1999) 1, S. 14.
- [63] Dry, A.; Betts, J.; Strandbury, D.: Carbon Fibre Reinforced Composites: Applications in Alternative Energy and Transportation Systems. *Proceedings 41st International SAMPE Symposium*. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Covina 1996, S. 1427-1431.
- [64] Mills, A., Burley, G., Backhouse, R.: Innovative Manufacturing Processes and Equipment for the Cost Effective Manufacture of Composite Airframe Structures, *Proceedings 19th International SAMPE Conference*. Society for the Advancement of Material and Process Engineering Europe. Paris 1998, S. 711-722.

- [65] N.N.: Automation at low cost from RTM Systems. *Reinforced Plastics* 40 (1996) 3, S. 32-34.
- [66] Krajenski, V.; Sigle, C. H.; Pabsch, A.; Herrmann, A. S.; Hanselka, H.: Kostengünstige Fertigung hochbelasteter Faserverbundbauteile am Beispiel der RTM- und Wickeltechnik. *Proceedings 35. Internationale Chemiefasertagung. Österreichisches Chemiefaser-Institut. Dornbirn 1996*, S. 1- 14.
- [67] Francomb, J.; Parmer, M.: Reduced cost, higher performance RTM. *Reinforced Plastics* 41 (1997) 10, S. 48-54.
- [68] Singkofer, R.; Mehn, R.: Advanced Thermoplastic Composites Based on Knitted Fabrics with Weft Insertion – Economical Application in Highly Loaded Vehicle Components. *Proceedings 17th International SAMPE Europe Conference. Society for the Advancement of Material and Process Engineering Europe. Basel 1996*, S. 273-286.
- [69] Mayer, C.; Hartmann, A.; Neitzel, M.: Cost-Conscious Manufacturing of Tailored Thermoplastic Intermediates Using a Double Belt Press. *Proceedings 18th International SAMPE Conference. Society for the Advancement of Material and Process Engineering Europe. Paris 1997*, S. 339-351.
- [70] N.N.: Marktdaten. Schriftliche Mitteilung der Tenax Fibers GmbH & Co. KG, Wuppertal 1998.
- [71] Hartmann, A.; Mayer, C.; Neitzel, M.: Potentials in Cost Effective Processing of PMCs. *Proceedings 9th CIMTEC. Hrsg. Visconti. C., University of Naples. Florenz 1998*, S. 1232-1242.
- [72] Liebetrau, A.; Hartmann, A.; Neitzel, M.: Die Wirtschaftlichkeit als Chance für Faser-Kunststoff-Verbunde (Faser-Kunststoff-Verbunde). 28. AVK-Tagung. Arbeitsgemeinschaft verstärkte Kunststoffe. Frankfurt 1997. S. S1.1-10.
- [73] VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Aug. 1997, S. 3.
- [74] Schierenbeck, H.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. München Wien: R. Oldenbourg Verlag 1998, S. 683.
- [75] Horváth, P: Zielkostenmanagement – Target Costing als Instrument des Konstrukteurs, Konstrukteure gestalten Kosten. VDI-Bericht 1097. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993, S. 17-35.
- [76] Back-Hock, A.: Lebenszyklusorientiertes Produktcontrolling. Berlin: Springer Verlag 1988.
- [77] Ehrenstein, G. W.; Brinkmann, T.; Steinhilper, R.: Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung. Augsburg: WEKA Fachverlag 1994.
- [78] Liebetrau, A.: Beitrag zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von schnell rotierenden Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Fortschrittsberichte 12-96. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, S. 87-90.

- [79] Zangenmeister, C.: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse – Verfahrenstypologie und Drei-Stufen-Ansatz zur Arbeitssystembewertung. *Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering* 43 (1994), S. 63-71.
- [80] Franzeck, J.: Methodik der Lebenszykluskostenanalyse und -planung für die Entwicklung technischer Produktsysteme unter Berücksichtigung umweltlicher Effekte. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart 1997.
- [81] Frey, W.; Heimann, F.; Maier, S.: Wirtschaftliche und technologische Bewertung von Verfahren. *Chem.-Ing.-Tech.* 62 (1990) 1, S. 1-8.
- [82] Warnecke, H. J. et al.: *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. München: Hanser Verlag 1990.
- [83] Horváth, P.: Grundprobleme der Wirtschaftlichkeitsanalyse beim Einsatz neuer Informations- und Produktionstechnologien. in: *Wirtschaftlichkeit neuer Produktionstechniken*. Hrsg. Horváth, P., Stuttgart 1988 S. 1-14.
- [84] Wittmann, W.: *Handwörterbuch der Betriebswirtschaftslehre*. Schäffer Verlag: Stuttgart 1993.
- [85] Siebig, J.: Wirtschaftlichkeit: Ein relativer Begriff. in: *zfbf* 32 (1980), S. 631-645.
- [86] Wöhe, G.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Vahlen Verlag 1990.
- [87] Gutenberg, E.: *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Gabler Verlag 1990.
- [88] Däumler, K.-D.: *Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung*. Herne Berlin: Verlag Neue Wirtschaftsbriefe 1998.
- [89] Eaglesham, M. A.; Deisenroth, M. P.: Advanced Composites Manufacturing Cost Estimation Decision Support System. *Proceedings 6th Industrial Engineering Research Conference*. The Institute of Industrial Engineers. 1997, S. 632-637.
- [90] Gutowski, T. G.; Ilcewicz, L.: Advanced Composite Design for Low Cost, MD-Vol. 74, *Advanced Materials: Development, Characterization, Processing and Mechanical Behavior*. *Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. ASME. New York 1996.
- [91] Krolewski, S.; Gutowski, T.: Economic Comparison of Advanced Composite Fabrication Technologies, *Proceedings 34th International SAMPE Symposium*. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Reno 1989, S. 329-340.
- [92] McLane, R.: Economic Issues in Composites Manufacturing. *Proceedings Conference of the American Society for Composites*. American Society for Composites. Dayton 1988, S. 23-32.
- [93] Poe, C. C.; Dexter H. B.; Raju, I. S.: A Review of the NASA Textile Composites Research. *38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit Adaptive Structures Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Kissimmee 1997, S. 13 - 26.

- [94] Hess, R. W.; Romanoff, H. P.: Aircraft Airframe Cost Estimating Relationships. Rand Corp., Report R-2283/3-AF, Santa Monica, 1987.
- [95] Gutowski, T. G.; Henderson, R.; Shipp, C.: Manufacturing Cost for Advanced Composite Aerospace Parts, SAMPE Journal 27 (1991) 3, 37-40.
- [96] Neoh, E.T.: Adaptive Framework for Estimating Fabrication Time. Dissertation Massachusetts Institute for Technology. Cambridge 1995.
- [97] Tse, M.: Design Cost Model for Advanced Composite Structures, Dissertation Massachusetts Institute for Technology. Cambridge 1992.
- [98] Unal, R.; Dean E. B.: Design for Cost and Quality: The Robust Design Approach. Journal of Parametrics 11 (1991) 1.
- [99] Dean, E. B.: Parametric Cost Deployment. Proceedings of the Seventh Symposium on Quality Function Deployment. International Council for Quality Function Deployment. Novi 1996, S. 27-34.
- [100] Rais-Rohani, M.; Dean, E. B.: Toward Manufacturing and Cost Considerations in Multi-disciplinary Aircraft Design. Proceedings of the 37th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Salt Lake City 1996, S. 2602-2612.
- [101] Cooper, R.: Cost Classification in Unit-Based and Activity-Based Manufacturing Cost Systems. Journal of Cost Management for the Manufacturing Industry (Fall 1990). Boston 1990, S. 5-14.
- [102] Karbhari, V. M.; Jones, S. K.: Activity-Based Costing and management in the Composites Product Realization Process. Technical Report 92-21. Center for Composite Materials, University of Delaware. Newark 1992.
- [103] Karbhari, V. M.; Wilkins, D. J.: Selecting materials, processes, and shapes: Getting it right the first time. Proceedings 37th International SAMPE Symposium. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Covina 1992, S. 1379-1391.
- [104] Neitzel, M., Hartmann, A.: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeit von Bauteilen aus faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen. Projektbericht zum DFG-Projekt Ne 546/4-1. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 1998.
- [105] Gutowski, T. D. et al.: Development of a Theoretical Cost Model. Proceedings of the Forth NASA/DoD Advanced Composites Technology Conference. NASA. Salt Lake City 1993, S. 49-75.
- [106] Rankumar, R. L.; Vatava, R. B.; Saha, S. K.: Manufacturing Cost Model for Composites. 23rd Int. SAMPE Technical Conference. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Covina 1991, S. 982-994.
- [107] Martin, M. J.: Understanding Composites Costs: Comparison of Five Fabrication Techniques; Proceedings Annual. Conference on Reinforced Plastics 1991. Composites Institute/SPI. Washington DC 1991, Seite 3-D/1-4.

- [108] Mabson, G.E.; Flynn, B. W.; Ilcewicz, L. B.; Graesser, D.L.: The Use of COSTADE in Developing Composite Commercial Aircraft Fuselage Structures. Proceedings of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Hilton Head 1994.
- [109] Flemming, M.; Pönitzsch, W.; Roth, S.: Die Jagd nach Kosten- und Gewichtsreduzierung, Technische Rundschau 46 (1990), S. 36-91.
- [110] Michaeli, W.; Goedel, M.; Rau, S.: Industrielle Anwendung der Faserverbundtechnik. Teil 3. Neue Fertigungstechniken für Bauteile. Ingenieur Werkstoffe 5 (1993) 9/10, Seite 49 - 51.
- [111] Weck, M. et al.: Sonderforschungsbereich 332 "Produktionstechnik für Bauteile aus nichtmetallischen Faserverbundwerkstoffen, DFG-Arbeits- und Ergebnisbericht 1996 - 1998. Aachen 1998.
- [112] Pfeiffer, W.; Weiß, E.; Strubl, C.: Systemwirtschaftlichkeit – Konzeption und Methodik zur betriebswirtschaftlichen Fundierung innovationsorientierter Entscheidungen. Göttingen: Vandenhoeck&Ruprecht Verlag 1994.
- [113] Brede, H.: Entwicklungstrends in Kostenrechnung und Kostenmanagement. Die Unternehmung 47 (1996) 4, S. 333-357.
- [114] Zehbold, C.: Lebenszykluskostenrechnung. Wiesbaden: Gabler Verlag 1996.
- [115] Pfohl, H.-C.; Wübbenhorst, K.: Lebenszykluskosten - Ursprung, Begriff und Gestaltungsvariablen. Journal für Betriebswirtschaft 33 (1983) 3, S. 142-155.
- [116] Harsch, M.; Schuckert, M.; Eyerer, P.; Saur, K.: Life-Cycle Engineering and Design. in: Dieter, G. E. (Hrsg.): ASM Handbook, Volume 20, Materials Selection and Design. ASM International. Materials Park 1997, S. 96-103.
- [117] Hirth, T.; Braunmiller, U.; Woidasky, J.; Gediga, J.; Grützner, R.-E.; Saur, K.: Entwicklung eines praxisnahen Instrumentariums für die technische, wirtschaftliche und ökologische Beurteilung neuer Materialien am Beispiel von Verbundwerkstoffen. in: Ziegler, G., Cherdrón, H., Hermel, W., Hirsch, J., Kolaska, H. (Hrsg.): Werkstoffwoche 96, Symposium 6 - Werkstoff- und Verfahrenstechnik, Tagungsband. Frankfurt, 1997, S. 81-90.
- [118] Eyerer, P.; Dekorsy, Th. u. Schuckert, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Produkten und Verfahren; Kunststoffe 81 (1991) 4, S. 268 – 273.
- [119] Schuckert, M.; Dekorsy, Th.; Pfeleiderer, I.; Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung eines PKW-Ansaugrohres; Kunststoffe 83 (1993) 3, S. 195- 200.
- [120] Riezler, S.: Lebenszyklusrechnung - Instrument des Controlling strategischer Projekte. Wiesbaden: Gabler-Verlag 1996.
- [121] Gregory, A. N., Marshall, H. E.: Decision Analysis Method for Evaluating Buildings and Buildings Systems. National Institute of Standards and Technology, Interagency Report 5663. Gaithersburg 1995.
- [122] Blanchard, B. S., Fabrycky, W. J.: Life-cycle cost and economic analysis. Englewood-Cliffs: Prentice Hall 1991.

- [123] Schelle, H., Voglmaier, E., Madauss, B.: Symposium Life Cycle Cost. Schelle/Voglmaier /Madauss (Hrsg.). Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement. München 1986, S. 1-3.
- [124] Madaus, B.: Lebenszykluskosten. Symposium Life Cycle Cost, Schelle/Voglmaier /Madauss (Hrsg.). Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement. München 1986, S. 5-22.
- [125] Flanagan, R.: Life Cycle Costing: Theory and Practice. Oxford: BSP 1989, S. 9.
- [126] Ewert, R.; Wagenhofer, A.: Interne Unternehmensrechnung. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1997.
- [127] Marx, W. J.; Mavris, D. N.; Schrage, D. P.: A Hierarchical Aircraft Life Cycle Cost Analysis Model, 1st AIAA Aircraft Engineering Technology and Operations Congress. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Los Angeles 1996.
- [128] Diefenbach, J. R.; Mascarin, A. E.: Body-in-White Material Systems: A Life Cycle Cost Comparison. The Journal of Mineral, Metals, and Materials Society 45 (1993) 6, S. 16-19.
- [129] Kiessling, R.: Reduced Life Cycle Cost - Neglected Arguments for Stainless Steel. Steel Times 28 (1996) 1, S. 29-32.
- [130] Frisch, A.: Zukunft der NE-Metalle in der Automobilindustrie. Metall 49 (1995) 2, S. 166-167.
- [131] Johnson, V. S.: Minimizing Life Cycle Cost for Subsonic Commercial Aircraft. Aircraft Journal 27 (1999) 2, S. 139-145.
- [132] N.N.: PRICE S Software Model Reference Manual. General Electric PRICE Systems. Cherry Hill 1991.
- [133] Sherer, S. S. Cost Benefit Analysis and the Art of Software Maintenance. Proceedings of the 1992 IEEE Conference on Software Maintenance. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, S. 70-77.
- [134] Marx, W. J.; Mavris, D. N.; Schrage, D. P.: Effects of Alternative Wing Structural Concepts on High Speed Civil Transport Life Cycle Costs. Proceedings 37th AIAA/ASME/ASCE; AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Salt Lake City April 1996.
- [135] Connolly, J.: Life Cycle Issues in Composites Structure, AD-Vol. 52, Proceedings of the ASME Aerospace Division, ASME International. Atlanta 1996, S. 99-100.
- [136] Ehlen, M. A.; Marschall, H. E.: The Economics of Nex-Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking. NIST-Report NISTIR-5864, Gaithersburg 1996.
- [137] Mascarin, A. E.; Diefenbach, J. R.: Manufacturing and Life Cycle Costs of a Composite Automotive Structure. Proceedings Annual Technical Conference of the Society of Plastic Engineers. Society of Plastic Engineers. Detroit 1992, S. 1311-1313.
- [138] Mascarin, A. E. et al.: Costing the Ultralite in Volume Production: Can Advanced-Composite Bodies-in-White be Affordable?. Rocky Mountain Institute. Snowmass 1996, S. 1-25.

- [139] Haldenwanger, H.-G.: Hochleistungs-Faserverbund-Werkstoffe im Automobilbau – Entwicklung, Berechnung, Prüfung, Einsatz von Bauteilen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- [140] Fürnrohr, M.: Stochastische Modelle zur Prognose der Lebenszykluskosten komplexer Systeme. Dissertation an der Universität der Bundeswehr. München 1992.
- [141] Wübbenhorst, K.: Lebenszykluskosten. In: Schulte, Chr. (Hrsg.): Effektives Kostenmanagement - Methoden und Implementierung. Schäffer-Poeschel-Verlag: Stuttgart 1992.
- [142] Coenenberg, A., G.: Kostenrechnung und Kostenanalyse. 3. Auflage. Verlag Moderne Industrie: Landsberg/Lech 1997, S. 484 ff.
- [143] Kloock, J.: Mehrperiodige Investitionsrechnungen auf Basis kalkulatorischer und handelsrechtlicher Erfolgsrechnungen. In: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 33 (1981) 10, S. 873 - 890.
- [144] Lücke, W.: Die kalkulatorischen Zinsen im betrieblichen Rechnungswesen. In: ZfB 35 (1965) Ergänzungsheft, S. 3 - 28.
- [145] Milling, P.: Systemmanagement und Managementsysteme. Verlag Duncker & Humblot: Berlin 1991.
- [146] Kern, W.: Investitionsrechnung. Stuttgart : Poeschel Verlag, 1974.
- [147] Blohm H.; Lüder, K.: Investition: Schwachstellenanalyse d. Investitionsbereichs u. Investitionsrechnung. 8. aktualisierte u. erg. Aufl.. Vahlen Verlag: München, 1995.
- [148] Betge, P.: Investitionsplanung. 2. Aufl.. Gabler Verlag: Wiesbaden 1995, S. 22.
- [149] Schmidt, R.-B.: Unternehmungsinvestitionen : Strukturen - Entscheidungen. 4. Neubearb. u. erw. Aufl.. Westdeutscher Verlag: Opladen 1984.
- [150] Karger-Kocsis, J.: Composites (Structure, Properties Manufacturing). In Salamone, J.C. (Hrsg.): Polymeric Materials Encyclopedia. CRC-Press: Boca Raton 1996, S. 1381.
- [151] VDI 2234: Wirtschaftliche Grundlagen für den Ingenieur. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Aug. Jan. 1990
- [152] Begemann, M.; Stadlbauer, W.: Isobares Langfaser-GMT. Kunststoffe 84 (1994) 5, S. 596.
- [153] Nowacki, J.; Schuster, J.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Thermoformen von GFK. Kunststoffe 89 (1999) 6, S. 56-60.
- [154] Brink, P.: Recycling von Faserverbundwerkstoffen – Ein Programm der DASA-Airbus. Proceedings Werkstofftag '94 – Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile. VDI-Bericht 1080. VDI-Verlag. Düsseldorf 1994, S. 639-646.
- [155] Zoog, M.: Neue Wege zum Recycling von faserverstärkten Kunststoffen. Dissertation an der ETH Zürich (Nr. 11'946). Zürich 1996.
- [156] Ostwald, P. F.: Engineering Cost Estimating. Prentice Hall: Upper Saddle River 1992, S. 576 ff..
- [157] Henderson, B. D.: Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie. 2. Aufl.. Campus Verlag: Frankfurt/Main 1986, S. 19.

- [158] Liese, J.: Betriebliche Planungstechniken. Materialien zur Vorlesung Wintersemester 98/99. Märkische Fachhochschule Iserlohn. Iserlohn 1998.
- [159] Humboldt C. M.: Assessment of Space Shuttle Program Cost Estimating Methods. Dissertation an der University of Colorado. Boulder 1983.
- [160] N.N.: Standard Method of Estimating Comparative Direct Operating Cost of Turbine Powered Transport Airplanes. Air Transport Association of America. Washington D.C. 1967.
- [161] Scholz, D.: Entwicklung eines CAE-Werkzeuges zum Entwurf von Flugzeugsteuerungs- und Hydrauliksystemen. VDI 20- 262. VDI Verlag: Düsseldorf, 1997.
- [162] Haldenwanger, H.-G.; Schäper, S.: Öko-/Energiebilanzierung im PKW-Bau mit unterschiedlichsten Werkstoffen. In: Kunststoffe im Automobilbau: Rohstoffe, Bauteile, Systeme. VDI-Verlag: Düsseldorf 1994, S. 65.
- [163] N.N.: FRP Recycling in Japan, Composites, No. 35, Sept./Oct. 1999, S. 58
- [164] Schiebisch, J.; Ehrenstein, G.W.: Verstärken von Thermoplasten mit CFK-Recyclat, Plastverarbeiter 45 (1994) 10, S. 104-110.
- [165] Marion, A.: Thermosetting Materials: Recycling and Applications. Composites No. 35 Sept./Oct. 1999, S. 49.
- [166] Mattus, V.: Zur werkstofflichen Verwertung lang- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste. Dissertation an der Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern 2000.
- [167] Schmidt, J.: Wirtschaftlichkeit in der öffentlichen Verwaltung: Grundsatz der Wirtschaftlichkeit, Zielsetzung, Planung Vollzug, Kontrolle, Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Kosten- und Leistungsrechnung. E. Schmidt Verlag: Bielefeld 1996, S. 93 ff..
- [168] N.N.: Dodge ESX3's Affordable Weight Loss Plan. Composites Weekly News 8 (2000) 2, S. 1.
- [169] McConnell, V.: Future cars take shape with composites. Reinforced Plastics. 43 (1999) 5, S. 44 - 48.
- [170] Mc Connell, V.: Electric vehicles rely on composite design. Reinforced Plastics 43 (1999) 9, S. 28 -34.
- [171] Schönleber, G.: Großserienfertigung von Faserverbundbauteilen für Leichtbaustrukturen im Automobilbau. VDI Berichte Nr. 1099. Düsseldorf: VDI Verlag 1993.
- [172] Nowacki, J.; Neitzel, M.: Vehicle Body-Panels of Organic Sheet. Kunststoffe plast europe. (1997) 9, S. 27-28.
- [173] Breuer, U.; Neitzel, M.: The Challenge of Stamp Forming High-strength Thermoplastic Composites for Transportation. Proceedings 47th International SAMPE Conference. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. Anaheim 1997, S. 1527-1537.
- [174] Kohan, M. I.: Nylon Plastics Handbook. Cincinnati: Hanser Publishers 1995, S 291-358.

- [175] Blinzler, M.; Hoecker, F.; Neitzel, M.: Oberflächentexturen bei gewebeverstärkten Thermoplasten. *Kunststoffe*. 89 (1999) 11, S. 128-130.
- [176] N.N.: Preise für Regranulate. *KI - Kunststoff Information* (2000) 1473, S. 3.
- [177] N.N.: Stahlschrottpreise Dezember 1999. *EUWID Recycling & Entsorgung* (1999) 50, S. 15.
- [178] Schiemann, A.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Recycling von Kunststoffkraftstoffbehältern. Studie im Auftrag des VDA und des VKE, Institut für Recycling an der Fachhochschule Braunschweig. Wolfsburg 1998.
- [179] N.N.: Stellungnahme des VKE zum Entwurf der europäischen Altautoverordnung, Verband der Kunststoffherzeugenden Industrie e.V.. Frankfurt 1999.
- [180] N.N.: Strategic acquisitions spell real chance for \$5.00/lb carbon fiber. *Transportation Composites Newsletter* 2 (2000) 1, S. 8-11.
- [181] N.N.: Pulverbeschichtetes CF-Prepreg mit thermoplastischer Matrix. *Produktinformationsblatt der Institut für Verbundwerkstoff GmbH*. Kaiserslautern, 1999.
- [182] Busel, J. P., Lindsay, K.: A Look at the World's Bridges. *CDA/Composites Design & Application*. January/February 1999, S. 14-23.
- [183] Rodriguez, J. G. et al.: INEEL Tests on Composite Bridge. INEEL Report No. I-NEEL/EXT-99-00145. Idaho Falls 1999.
- [184] Head, P. R.: New Construction Techniques and new Forms of Structure using Advanced Composite Materials. *Presseinformation der Fa. Maunsell Group Europe*. London 1999.
- [185] Weidemann, H.: *Brückenbau*. 1. Aufl.. Düsseldorf: Werner Verlag 1982.
- [186] N.N.: Profile aus faserverstärkten Kunststoffen - Fiberline Produktionsprogramm. *Produktionsinformationsschriften der Fiberline Composites A/S*. Kolding 1999.
- [187] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen, Deutsches Institut für Normung, Berlin Köln, Beuth Verlag.
- [188] Fleischmann, H.-D.: *Angebotskalkulation mit Richtwerten - Grundlagen der Kostenerfassung im Baubetrieb*. 3. Aufl.. Düsseldorf: Werner Verlag 1999.
- [189] Ruffert, G.: *Unterhaltung von Massivbrücken*. Düsseldorf: Beton-Verlag 1983, S. 7ff..
- [190] Menn, C.: *Stahlbetonbrücken*. Wien: Springer Verlag 1990.
- [191] N.N.: US composites centre seeks funding for bridges. *Reinforced Plastics* 43 (1999) 9, S. 11.
- [192] Gibson, G. et al.: Cost-effective use of composites in the offshore and petroleum industries: Recent developments in structural use in fire-sensitive areas. *Proceedings 20th International SAMPE Europe Conference*. Society for the Advancement of Material and Process Engineering Europe. Paris 1999, S. 15-26.
- [193] Osen, P.; Reinhart, K.: Deep Water Risers of Composite Materials. *Conference on Riser-technology*. Norske Sivilingeniørers Forening. Trondheim 1996, S. 15 -27.

-
- [194] Martin, R. H.: Fiber reinforced plastic standards for the offshore industry. SAMPE Journal 32 (1999) 6, S. 37-41.
- [195] Funk, R.: Entwicklung innovativer Fertigungstechniken zur Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Wickelverfahren. VDI-Fortschrittsberichte 2-393. Düsseldorf: VDI Verlag 1996.
- [196] Bostrom, R. O.: Continuous Reinforced Plastic Pipemaking Machine. US-Patent 3616072 (1971).
- [197] Goldsworthy, W. B.; Hardesty, E. E.: Method and Apparatus for Producing Filament Reinforced Tubular Products on a Continuous Basis. US-Patent US3769127 (1973).
- [198] Tanaka, K.: Method of and Apparatus for Manufacturing Reinforced Flexible Tubes. US-Patent 3997382 (1976).
- [199] Wildemann, H.: Kostenprognose bei Großprojekten. Stuttgart: Poeschel Verlag 1982, S. 126 ff..