

Dr. Ralph Lässig, Dr. Martin Eisenhut, Arne Mathias, Dr. Rolf T. Schulte,
Frank Peters, Thorsten Kühmann, Thomas Waldmann, Dr. Walter Begemann

Studie

Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen

Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau

Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen

Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	3
1. Aufbau der Studie – Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2. Endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe im Überblick – Materialien, Leistungseigenschaften, Herstellverfahren und Kosten	6
2.1 Gängige Faser-Matrix-Kombinationen und ihre Eigenschaften	6
2.2 Herstellverfahren	9
2.3 Leistungs- und Kostenvergleich mit traditionellen Werkstoffen	13
2.4 Material- und Verfahrensinnovationen und ihr Beitrag zur Verbesserung der Kostenposition	15
3. Marktentwicklung – Anwendungssegmente, Nachfragetreiber und Marktmodell	22
3.1 Wesentliche Anwendungssegmente und ihre Treiber	22
3.2 Prognostizierte Nachfrageentwicklung der relevanten Volumensegmente	25
3.3 Limitierende Faktoren und Hindernisse	30
3.4 Nachfragestruktur und Marktmodell	32
4. Industrialisierung der Produktionsprozesse – Treiber, Restriktionen und mögliche Standards	35
4.1 Anforderungen an den Serienprozess – Treiber der Industrialisierung	35
4.2 Restriktionen – Produktionskonzept und Fertigungsverfahren	37
4.3 Entwicklungspfad und Standardverfahren	42
5. Rolle des Maschinen- und Anlagenbaus – Beiträge, Anforderungsprofil und Geschäftspotenziale	51
5.1 Beitrag einzelner Maschinenbausegmente zur industrialisierten Fertigung hochfester Composites	51
5.2 Anforderungen an den Maschinen- und Anlagenbau	54
5.3 Geschäftspotenzial bis 2020	55
5.4 Handlungsbedarf und mögliche Positionierung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus	58
6. Ausblick – Mittel- und Langfristperspektive	64
Autoren und Ansprechpartner	67

Executive Summary

- > Zur Positionsbestimmung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen wurden mehr als 30 führende Branchenexperten befragt
- > Der Markt für hochfeste Faserverbundbauteile weist bis 2020 ein solides Wachstum auf – die Nachfrage für hochfeste carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) wächst mit 17% p.a. deutlich stärker als die Nachfrage für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)
- > Wesentliche Wachstumstreiber sind Anwendungen im Automobil und der Luftfahrt, aber auch in den Bereichen Windenergie und Maschinenbau ist mit steigender Nachfrage zu rechnen
- > Voraussetzung für das Marktwachstum sind weitere Kostensenkungen – im 10-Jahres-Zeitraum ist eine Reduktion der Bauteilkosten für CFK um 30% realistisch, die zu großen Teilen aus Prozessverbesserungen (-40%), weniger aus günstigeren Rohmaterialien (Faser: -20%) herrührt
- > Die Industrialisierung der Herstellprozesse für mittlere Seriengrößen hat begonnen mit dem Fokus auf teilautomatisierte RTM- und Formpressverfahren, die zur Fertigung von Struktur- und Flächenbauteilen für unterschiedlichste Anwendungen geeignet sind
- > Zum Aufbau der Prozessketten müssen unterschiedliche Technologien und Komponenten aus verschiedenen Disziplinen des Maschinen- und Anlagenbaus integriert werden, v.a. aus den Segmenten Kunststoff, Werkzeug- und Textilmaschinen sowie Automatisierung und Handlingsysteme – dazu ist unternehmensübergreifende Kooperation notwendig
- > Angesichts des derzeit noch kleinen Marktes für Composite-Produktionssysteme setzen die meisten Maschinen- und Anlagenbauer auf eine Anpassung bzw. Weiterentwicklung vorhandener Technologien und Produkte
- > Nach 2020 werden weitere Kostensenkungen und insbesondere die Hybridisierung von Compositebauteilen (Verbund aus Endlosfaser und weiteren Materialien wie z.B. Metall oder Kurzfasern) zu einer drastischen Ausweitung des Marktes führen – diese Hybride lassen sich mit ähnlichen Prozessen fertigen wie reine Composites
- > Diejenigen Maschinenbauunternehmen, die heute bewusst in das Geschäftsfeld "Compositenfertigung" mit einer klaren strategischen Positionierung einsteigen, werden mittel- bis langfristig den Markt dominieren und maximal am Marktwachstum partizipieren

1. Aufbau der Studie – Zielsetzung und Vorgehensweise

Durch die hohe Bedeutung von Energie- und Ressourceneffizienz nimmt der Stellenwert von Leichtbau branchenübergreifend immer weiter zu. Daher werden neben traditionellen Konstruktionswerkstoffen wie Aluminium oder hochfesten Stählen zunehmend hochfeste Faserverbundkunststoffe (FVK) eingesetzt, die in bestimmten Anwendungsfällen ein deutlich höheres Leichtbaupotenzial aufweisen. Dies gilt insbesondere dann, wenn neben der Festigkeit auch die Steifigkeit eines Bauteils auslegungsbestimmend ist.

Waren Faserverbundwerkstoffe noch vor etwa 10 bis 15 Jahren fast ausschließlich "High-End"-Anwendungen in Luft- und Raumfahrt oder bspw. der Formel 1 vorbehalten, haben sie sich heute auch in anderen Segmenten etabliert. Während sie bisher in der Regel nur in Nischenanwendungen zum Einsatz gekommen sind und der Gesamtmarkt noch überschaubar ist, sehen alle Experten – hauptsächlich aufgrund des erheblichen Leichtbaupotenzials – in den kommenden Jahren hohes Wachstum für hochfeste Composites.

Hohe Medienaufmerksamkeit gilt dem Thema z.B. durch das BMW-i-Projekt, das 2013 erstmals ein Fahrzeug in einer mittleren Serie von einigen 10.000 Stück p.a. mit einer Karosserie aus hochfestem carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) ins Leben rufen wird oder durch neue Flugzeuge wie den A350 und die B787, deren Struktur zu mehr als 50% aus CFK besteht. Dabei sind schon viele Facetten zumeist aus dem Blickwinkel der Endkunden oder der Hersteller von Faserverbundbauteilen beleuchtet worden.

Der weiter steigende Einsatz von hochfesten FVK in verschiedenen Anwendungsgebieten wirft jedoch ebenso interessante Fragen aus Sicht der Produktionstechnik auf: Welche Seriengrößen werden künftig erwartet? Können die heutigen, stark manuell geprägten Fertigungsprozesse in Zukunft noch eingesetzt werden? Welche Produktionskonzepte sind für die Serienfertigung geeignet? Was kann der deutsche Maschinen- und Anlagenbau zur weiteren Entwicklung beitragen? Welche Geschäftspotenziale ergeben sich daraus? Vor diesem Hintergrund haben sich das VDMA Forum Composite Technology und Roland Berger Strategy Consultants entschieden, in einer gemeinsamen Studie die künftigen Herausforderungen und Chancen zu untersuchen, die sich für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau in diesem Segment ergeben.

Wesentliche Kernfragen und Ziele der Studie sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

Abbildung 1: Kernfragen und Ziele der Studie

KERNFRAGEN

- > Welcher **Bedarf an hochfesten Faserverbundbauteilen** besteht **heute und zukünftig** in den wichtigsten Anwendungssegmenten, und **welche Mechanismen treiben diesen Bedarf**?
- > Welche **spezifischen Anforderungen** stellen die **verschiedenen Anwenderbranchen**?
- > Welche **Verfahren und Prozesse** sind besonders **für die industrielle Serienproduktion** hochfester Composites **geeignet**, und wie lassen sich **diese Prozesse effizient erreichen**?
- > Welchen **Beitrag** kann der **Maschinen- und Anlagenbau** bei der **Industrialisierung** der Produktionsprozesse **leisten**?
- > Welche **Geschäftspotenziale** ergeben sich daraus, und wie kann eine **geeignete Aufstellung der Maschinen- und Anlagenbauer** aussehen?

ZIELSETZUNG

- > Verständnis der Markttreiber und Anforderungen je Anwenderbranche
- > Marktprognose
- > Geeignete Serienprozesse
- > Handlungsempfehlungen für den Maschinen- und Anlagenbau

Quelle: VDMA; Roland Berger

Der Fokus liegt auf hochfesten, mit endloser Glas- und Carbonfaser verstärkten Bauteilen auf Basis einer Duromer- oder Thermoplastmatrix. Gegenstand der Studie sind Herstellverfahren und Produktionskonzepte von der Faser bis zum Bauteil. Eine detaillierte Betrachtung der Segmente Bauteilbearbeitung, Fügetechnologie, Oberflächenbehandlung und Prüftechnik wurde nicht vorgenommen.

Nach umfangreichen Recherchen zu Technologie und Anwendungsbereichen wurden dazu in einer breit angelegten empirischen Vorgehensweise mehr als 30 Experteninterviews geführt. Dabei kamen Fachleute zu Wort, die die gesamte Wertschöpfungskette hochfester Verbundwerkstoffe von der Faser, über die Halbzeugherstellung bis hin zur Composite-Anwendung (OEM) in verschiedenen Branchen (Automotive, Luftfahrt, Windenergie, Maschinenbau) abdecken. Zusätzlich wurden auch Experten aus Forschung und Wissenschaft einbezogen, um aktuelle Entwicklungsrichtungen zu identifizieren. Seitens des Maschinen- und Anlagenbaus waren insbesondere Experten der Segmente Kunststoff- und Gummimaschinen, Werkzeugmaschinen, Textilmaschinen sowie Robotik und Automation involviert.

Die für den Maschinen- und Anlagenbau relevanten Erkenntnisse aus diesen Gesprächen wurden im Anschluss zu Thesen verdichtet, zu deren Validierung Mitgliedsunternehmen des VDMA-Forums befragt wurden. Die Befragungsteilnehmer stammen aus allen Segmenten des Maschinen- und Anlagenbaus, die bei Produktionsanlagen für hochfeste Faserverbundwerkstoffe eine Rolle spielen.

2. Endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe im Überblick – Materialien, Leistungseigenschaften, Herstellverfahren und Kosten

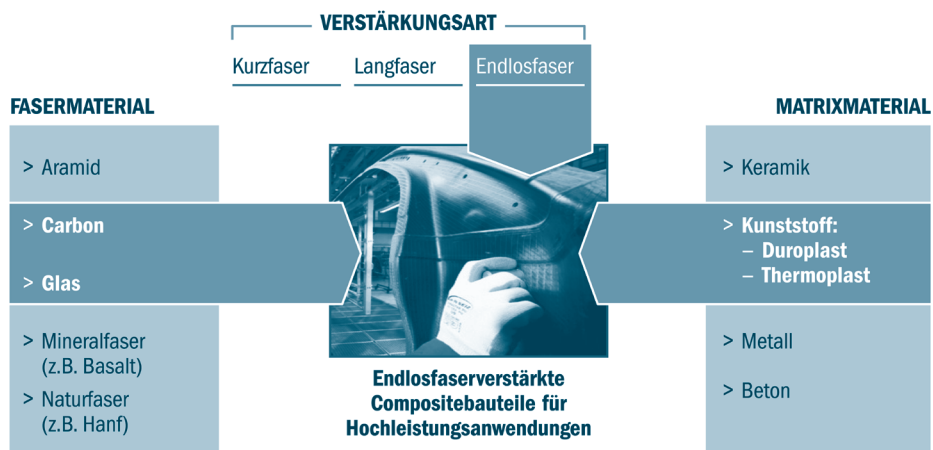
Ziel dieses Kapitels ist es, ein grundlegendes Verständnis der Kosten- und Leistungseigenschaften sowie der heutigen Herstellungsverfahren für unterschiedliche hochfeste Faserverbundbauteile zu schaffen. Dieses Verständnis ist notwendig, um die in den folgenden Kapiteln angestellten Schlussfolgerungen entsprechend verstehen und bewerten zu können.

2.1 Gängige Faser-Matrix-Kombinationen und ihre Eigenschaften

Faserverstärkte Verbundwerkstoffe (Composites) sind eine relativ junge Werkstoffgruppe, die grundsätzlich aus der Kombination einer textilen Verstärkungsstruktur (Fasern) mit einem Matrixwerkstoff besteht. Wesentliche Einflussparameter auf Leistungseigenschaften, Herstellverfahren und Kosten von Compositebauteilen sind nicht nur die verwendeten Faser- und Matrixmaterialien, sondern auch die Art bzw. Struktur der Verstärkung, insbesondere die Länge der verwendeten Fasern. Einen Überblick gibt Abbildung 2.

Mechanisch hoch beanspruchte Bauteile lassen sich praktisch ausschließlich durch die Verwendung nahezu endloser Fasern realisieren, deren Länge nur durch die Bauteilabmessungen beschränkt ist. Sie stehen damit im Gegensatz zu kurz- oder langfaserverstärkten Composites, bei denen die verwendeten Fasern eine Länge von nur wenigen Millimetern bis etwa 50 mm aufweisen.

Abbildung 2: Composites im Überblick



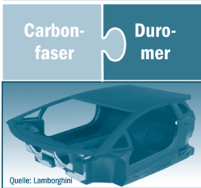
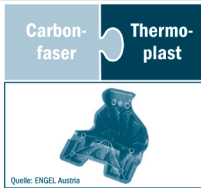
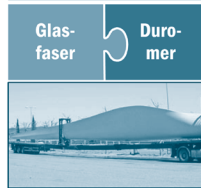
Quelle: VDMA; Roland Berger

Als Fasermaterial kommen bei endlosfaserverstärkten Composites in Volumen- anwendungen ausschließlich Glas- und/oder Carbonfasern zum Einsatz. Es wird dann von GFK (glasfaserverstärkten Kunststoffen) bzw. CFK (carbonfaser- verstärkten Kunststoffen) gesprochen.

Aramidfaser wird eingesetzt, wenn es auf eine besonders hohe Energieaufnahme im Falle eines Impacts ankommt, bspw. bei Schutzwesten oder Fahrzeug- panzerungen. Ebenso wie Mineralfasern spielen sie bisher in Serienanwendungen für Hochleistungsbauteile nur eine untergeordnete Rolle. Naturfasern, die sich in verschiedenen Anwendungen wachsender Beliebtheit erfreuen, spielen im Bereich der Endlosfaserverstärkung ebenfalls praktisch keine Rolle, weil sie in der Natur nur in Form von Kurzfasern vorkommen (z.B. Elementarfasern bei Flachs ca. 20-40 mm). In sehr kleinen Nischen werden zusätzlich keramische und metallische Fasern eingesetzt, z.B. bei Hochtemperaturanwendungen in der Raumfahrt. Diese Fasertypen werden in der Studie nicht betrachtet, weil sie ebenfalls bei Serienanwendungen kein signifikantes Marktvolumen erreichen.

Als Matrixwerkstoffe werden bei industriellen Volumen- anwendungen ausschließlich polymere Werkstoffe eingesetzt, die sich in die zwei wesentlichen Hauptgruppen Duroplaste und Thermoplaste unterteilen lassen. Nur in sehr speziellen Nischenanwendungen kommen auch keramische Matrixwerkstoffe zum Einsatz, bspw. für extreme Hochtemperaturanwendungen. In aller Regel wird innerhalb eines Bauteils nur ein Matrixwerkstoff verwendet, wohingegen eine Kombination unterschiedlicher Fasermaterialien häufiger zu beobachten ist. Aus den jeweils zwei Faser- und Matrixmaterialien, die in den Volumen- anwendungen der endlosfaserverstärkten Bauteile eingesetzt werden, ergeben sich vier Kombinationen mit unterschiedlichen Charakteristika, die in Abbildung 3 zusammengestellt sind.

Abbildung 3: Eigenschaften hochfester Faserverbundwerkstoffe

	CARBONFASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFF (CFK)		GLASFASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFF (GFK)			
	Carbon- faser	Duro- mer	Glas- faser	Duro- mer	Glas- faser	Thermo- plast
Anwen- dungs- beispiele	 <small>Quelle: Lamborghini</small>		 <small>Quelle: ENGEL Austria</small>		 <small>Quelle: Lamason</small>	
Steifigkeit	↑	↔	→	→	→	→
Festigkeit	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Gewicht	↓	↔	→	→	→	→
Kosten	↑	↔	↔	↔	↔	↔
	"Beste mechanische Kennwerte bei höchsten Kosten"		"Besonders schlagfest und mit kurzer Zykluszeit"		"Geringere mech. Eigenschaften aber Kostenvorteil"	
					"Kurze Zykluszeit und attraktives Kostenprofil"	

↑ Hoch (im Vergleich untereinander) ↓ Gering (im Vergleich untereinander)

Quelle: Desk-Research; Roland Berger

Die Kombination aus Duromer und Carbonfasern bietet dabei die besten mechanischen Eigenschaften, ist jedoch auch am teuersten. Kombinationen mit Glasfasern kosten wesentlich weniger, weisen jedoch schlechtere mechanische Eigenschaften auf.

Über die "notwendigen" Bestandteile – Faser und Matrix – hinaus werden in vielen Anwendungen ergänzende Materialien eingesetzt: bspw. Füllstoffe für die Verbesserung der Festigkeit an Bauteilkanten, Farbstoffe zur Einstellung von optischen Eigenschaften, sowie Kerne (bspw. Schaum, Balsaholz, Wabenstrukturen), die die Biegesteifigkeit erhöhen, indem sie zwischen zwei dünne Faserverbund-Deckschichten eingebracht werden.

Maßgebend für die Auswahl der Werkstoffkombination ist im Allgemeinen die Bauteilbeanspruchung, jedoch muss der Einfluss der Materialauswahl auf die Ausgestaltung des Fertigungsprozesses berücksichtigt werden, insbesondere im Hinblick auf die Anforderung der Serienproduktion (siehe dazu auch das folgende Kapitel).

Fasern und Matrix haben innerhalb des Verbundbauteils grundsätzlich unterschiedliche Aufgaben: Während die Fasern im Wesentlichen die auf das Bauteil wirkenden Zugkräfte aufnehmen, dient die Matrix hauptsächlich der Formgebung, hält den Zusammenhalt innerhalb des Bauteils aufrecht und nimmt Druck- und Schubkräfte auf. Abbildung 4 veranschaulicht die relative Bedeutung von Faser und Matrix für die mechanischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften. Während die mechanischen Eigenschaften weitgehend von der Faser bestimmt werden, sind die physikalisch-chemischen Eigenschaften in hohem Maße von der Matrix abhängig.

Abbildung 4: Relative Bedeutung von Faser und Matrix im Werkstoffverbund

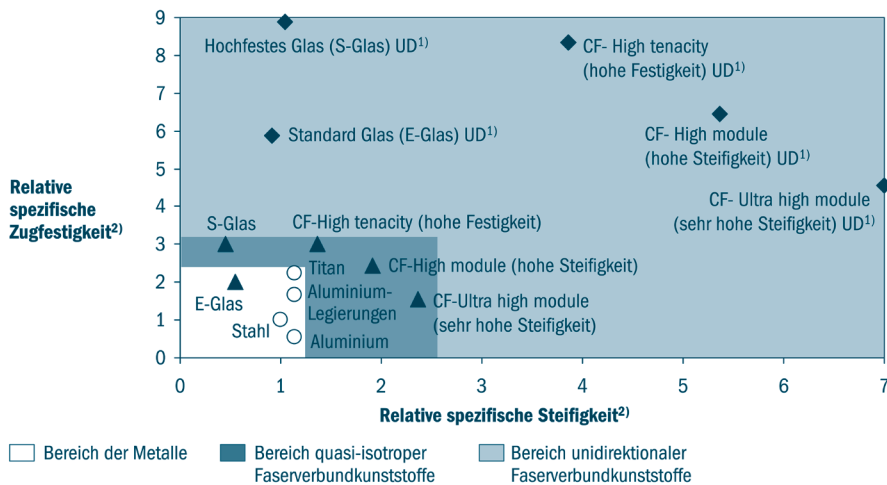
	Faser	Matrix
Mechanische Eigenschaften	> Steifigkeit	
	> Festigkeit	
	> Ermüdung	
	> Schadenstoleranz	
	> Impactverhalten	
	> Thermomechanische Eigenschaften	
Physikalisch-chemische Eigenschaften	> Elektrische Eigenschaften	
	> Temperaturbeständigkeit	
	> Chemische Beständigkeit	
	> Korrosionsverhalten	
Verarbeitungseigenschaften		

○ Gering ● Hoch

Die wesentlichen Vorteile von hochfesten Faserverbundwerkstoffen gegenüber traditionellen Werkstoffen sind eine sehr hohe spezifische (d.h. auf die Masse bezogene) Steifigkeit und Festigkeit. Wie Abbildung 5 zu entnehmen ist, gilt dies insbesondere für unidirektionale Laminare, bei denen die Fasern nur in eine Richtung verlaufen. Eine Belastung in Faserrichtung nutzt dabei die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Faser optimal aus und es können mehr als fünffach höhere Steifigkeiten und Festigkeiten als bei Stahl erreicht werden. Bei einem quasi-isotropen (in alle Raumrichtungen identischen) Laminat, wird der Vorteil gegenüber traditionellen Werkstoffen geringer, ist aber in der Regel noch gegeben (siehe Abbildung 5).

Im Gegensatz zu isotropen Konstruktionswerkstoffen lassen sich mit Faserverbunden bauteilspezifisch optimierte Materialeigenschaften einstellen, bspw. indem die Fasern belastungsgerecht orientiert werden. Nur so lassen sich die Vorteile derartiger Verbundwerkstoffe vollständig nutzen.

Abbildung 5: Materialkennwerte hochfester Faserverbundwerkstoffe im Vergleich mit metallischen Werkstoffen



1) Unidirektional 2) Bezogen auf Stahl = 1

Quelle: ETH Zürich

2.2 Herstellverfahren

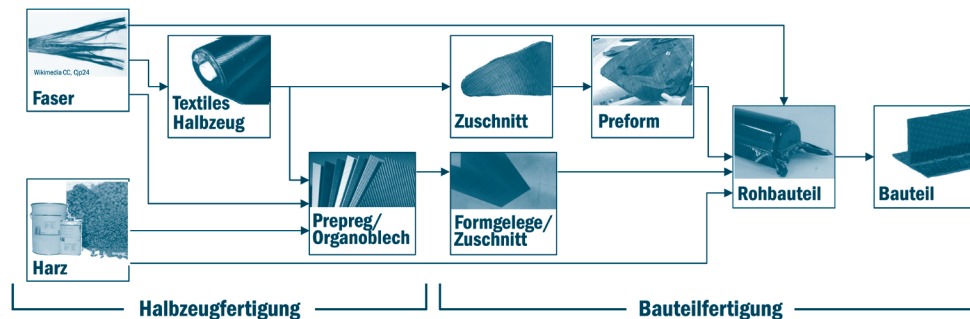
Im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen, bei denen die Eigenschaften des finalen Bauteils in hohem Maße durch die Eigenschaften des Ausgangsmaterials bestimmt werden, hat bei Verbundwerkstoffen das Herstellungsverfahren einen vergleichsweise großen Einfluss auf die finalen Bauteileigenschaften.

Die Überführung von Faser und Matrix in das finale Verbundbauteil kann grundsätzlich über verschiedene Prozessketten erfolgen, wie Abbildung 6 zeigt. Neben der direkten Verwendung von Fasern und Harz (bspw. bei Wickelverfahren) kommen in der Mehrzahl der Anwendungen Halbzeuge zum Einsatz. Dies können textile Halbzeuge sein, die mit Hilfe entsprechender Textiltechniken wie Weben, Wirken etc. aus den Fasern hergestellt und dann am Ende der Prozesskette mit Harz getränkt und ausgehärtet werden.

Alternativ werden Fasermaterial und Harz schon im Halbzeug miteinander kombiniert, was im Falle von Duromerharz zu den sogenannten Prepregs ("pre-impregnated", also vorimprägnierten Fasergelegen oder -textilien) führt. Werden Thermoplaste verwendet, spricht man von sogenannten Organoblechen, bei denen das Fasermaterial in die Thermoplastmatrix eingebettet wird.

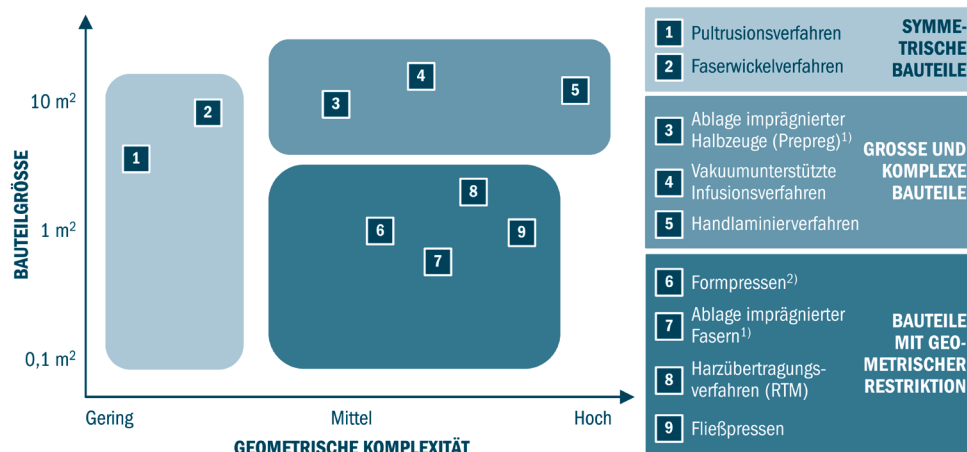
In der Bauteilfertigung werden dann aus den Halbzeugen zunächst Rohteile gefertigt, die anschließend noch bearbeitet werden, bspw. durch die Besäumung der Bauteilkanten und/oder der Aufbereitung der Oberflächen für spätere Fügeoperationen.

Abbildung 6: Wertschöpfungskette endlosfaserverstärkter Composites



Quelle: Desk-Research; Roland Berger

Im Detail kann die Bauteilfertigung mittels einer Vielzahl von verschiedenen Verfahren erfolgen. Eine Übersicht relevanter Verfahren, abhängig von der Bauteilgeometrie, bietet Abbildung 7. Aufgeführt sind ausschließlich Verfahren, die zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Bauteilen eingesetzt werden können (Fließpressen ist nur geeignet, wenn entsprechende Faserhalbzeuge zugesetzt werden). Verfahren, die sich wie bspw. Spritzgießverfahren ausschließlich für kurz- oder langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe eignen, sind in der Darstellung nicht berücksichtigt. Verfahrensvarianten bzw. abgeleitete Verfahren werden ebenfalls nicht erwähnt.

Abbildung 7: Einordnung wesentlicher Herstellungsverfahren nach Bauteilgeometrie

1) Mit anschließender Aushärtung im Autoklaven 2) Inkl. Organoblech
 Quelle: Universität Kaiserslautern; Roland Berger

Pultrusionsverfahren (1) sowie Faserwickelverfahren (2) eignen sich grundsätzlich nur für (weitgehend) symmetrische Bauteile. Beim Pultrusionsverfahren werden Fasern aus einem Spulenmagazin zunächst durch ein Harzbad und dann durch eine beheizte Matrize gezogen. In der Matrize wird das Harz mit den Fasern zusammengeführt und verpresst, was zu einem endlosen Profil führt. Das ausgehärtete Profil wird anschließend nach Wunsch zugeschnitten. Bei der "Pull-Forming"-Variante wird das teilgehärtete Profil anschließend nochmals in einer Form zur gewünschten endgültigen Geometrie gepresst und erst dann ausgehärtet. Typische Anwendungen sind Balken, Versteifungsrippen und Profile.

Beim Faserwickelverfahren werden Fasern durch ein Harzbad geführt und anschließend auf einen Kern aufgewickelt. Dies findet praktisch ausnahmslos auf automatisierten Anlagen statt, wobei die Faserorientierung durch Rotationsgeschwindigkeit und Wickelkopfstellung beeinflusst werden kann. Eine vollständig parallele Orientierung der Fasern zur Drehachse des Kerns ist jedoch nicht möglich. Das Verfahren ist durch die schon heute hohe Automatisierung sehr gut für Serienprozesse geeignet und wird typischerweise für Rohre, Tanks, Druckbehälter, Achswellen oder ähnliche Bauteile eingesetzt.

Für große und geometrisch komplexe Bauteile eignen sich besonders die Ablage imprägnierter Halbzeuge mit Aushärtung im Autoklaven (3), vakuumunterstützte Infusionsverfahren (4) sowie das Handlaminierverfahren (5).

Das Handlaminierverfahren basiert auf trockenen Faserhalbzeugen (Gewebe, Gelege etc.), die manuell in eine Form gelegt, mit Harz imprägniert und manuell, bspw. mit Rollern, konsolidiert werden. Die Aushärtung kann unter verschiedenen Bedingungen stattfinden: Neben Standarddruck und Raumtemperatur werden häufig erhöhte Temperaturen durch beheizbare Formen genutzt. Typische Anwendungen sind verschiedenste Großbauteile, bspw. für den Boots- und Behälterbau.

Beim vakuumunterstützten Infusionsverfahren werden trockene textile Halbzeuge in eine Form gelegt, mit einem Entlüftungsvlies bedeckt und anschließend mit Folie abgedeckt und abgedichtet. Nach Anlegen eines Vakuums werden Harzeinlässe geöffnet, und das Harz wird durch das Vakuum in das Laminat gezogen. Gegenüber dem Handlaminierverfahren ist durch das Vakuum eine bessere Kompaktierung des Bauteils gegeben. Typische Anwendungen sind z.B. Rotorblätter von Windturbinen, Struktur- und Verkleidungsteile von LKWs und Bahnwaggons.

Bei der Ablage imprägnierter Halbzeuge werden Prepregs in einer Form abgelegt. Durch Erhitzen im Autoklaven verflüssigt sich das Harz zunächst, bevor das Bauteil aushärtet. Durch den erhöhten Druck kann zudem eine noch bessere Kompaktierung als mit vakuumbasierten Verfahren erzielt werden. Relevante Anwendungen sind insbesondere Strukturkomponenten für den Flugzeugbau, bei Rennfahrzeugen (Formel 1) und hochwertigen Skiern.

Die verbleibenden Verfahren Formpressen (6), Ablage imprägnierter Fasern (7), Harzübertragungsverfahren (Resin Transfer Moulding, RTM, 8) sowie Fließpressen (9) erlauben nur eine eingeschränkte Bauteilgeometrie, hinsichtlich der Bauteilgröße und der maximal erreichbaren Komplexität der Bauteile.

Beim Formpressen und Fließpressen wird eine oftmals vorgeheizte Formmasse (Fließpressen, "Bulk molding compound, BMC") bzw. ein Organoblech oder ein schon mit Harz getränktes Halbzeug (Formpressen, "Sheet molding compound, SMC") in eine Form eingelegt. Danach wird die Form geschlossen, und unter Hitze und Druck härtet das Bauteil aus. Bei beiden Verfahren werden sehr oft Langfasern bis ca. 50 mm verwendet, insbesondere beim Formpressen werden jedoch auch Endlosfasern eingebracht (Organobleche). Typische Anwendungen sind kleine bis mittelgroße Bauteile in unterschiedlichen Branchen, in der Regel jedoch keine höchstbelasteten Bauteile.

RTM-Verfahren basieren auf der Verwendung zweiseitiger Formen. Üblicherweise wird dabei zunächst ein trockener Vorformling (Preform) erzeugt und dann in eine Form eingelegt. Nach dem Schließen der Form in einer Presse wird Harz in die Kavität eingespritzt. Nach Schließen der Harzeinlässe beginnt die Aushärtung, oftmals unter erhöhter Temperatur durch Beheizen der Form. Typische Anwendungen sind Automobil-, Bahn- und Flugzeugkomponenten mit relativ komplexer Geometrie.

Der Prozess der Ablage imprägnierter Fasern verläuft sehr ähnlich wie die Ablage imprägnierter Halbzeuge. Statt Prepregs werden jedoch einzelne Faserrovings gespreizt und abgelegt. Dies führt zu einer höheren erreichbaren geometrischen Komplexität der Bauteile, ist jedoch mit einer deutlich verringerten Ablegerate verbunden und limitiert damit die wirtschaftlich erzielbare Bauteilgröße. Wesentliche Anwendung sind komplexe Flugzeugstrukturkomponenten.

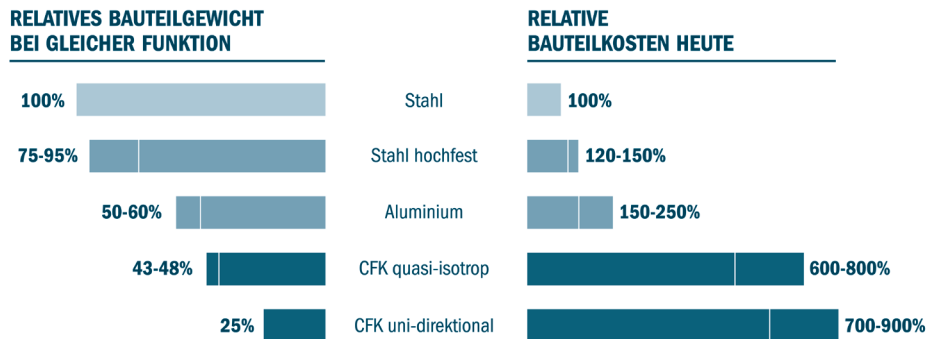
Grundsätzlich sind zur Festlegung eines geeigneten Herstellungsverfahrens für endlosfaserverstärkte Bauteile vier wesentliche Kriterien zu beachten: die Bauteilgröße, die erreichbare geometrische Komplexität, das Produktionsvolumen sowie Anforderungen an die Bauteilqualität und -eigenschaften. Die zuvor schon im Detail betrachteten Einschränkungen im Hinblick auf erreichbare Bauteilgröße und geometrische Komplexität stellen dabei obligatorische Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens dar.

Das Produktionsvolumen bzw. die Seriengröße spielt vor allem bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine große Rolle, wobei die Kosten der Halbzeuge, die Prozesskosten und die notwendigen Investitionen für die Anlage abhängig vom jeweiligen Verfahren zu berücksichtigen sind. Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Bauteils oder an die Oberflächenqualität können ebenfalls zum Ausschluss eines ansonsten geeigneten Verfahrens führen, bspw. wenn eine beidseitig perfekte Oberfläche gefordert ist, die sich nur in einer zweiseitigen Form herstellen lässt (dafür eignet sich bspw. ein Vakuuminfusionsverfahren nicht).

2.3 Leistungs- und Kostenvergleich mit traditionellen Werkstoffen

Faserverbundwerkstoffe nehmen mengenmäßig im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen bisher eine Nischenposition ein: Während global ca. 1,3 Mrd. Tonnen Stahl hergestellt werden, machen GFK mit 4-5 Mio. Tonnen (inklusive kurz- und langfaserverstärktem GFK) und CFK mit rund 40.000 Tonnen deutlich weniger als 1% dieser Menge aus.

Neben anderen Gründen verhindern vor allem die Kosten für endlosfaserverstärkte Verbundbauteile den Einsatz in größerem Maßstab. Die gesamten Bauteilkosten liegen daher deutlich oberhalb von Bauteilen, die aus traditionellen Werkstoffen gefertigt werden. Abbildung 8 veranschaulicht dazu beispielhaft das gegenläufige Verhalten der wesentlichen Parameter Gewicht und (heutiger) Kosten für funktionsgleiche Strukturbauteile aus unterschiedlichen Materialien im Automobilbereich. Während sich CFK durch sehr hohes Leichtbaupotenzial auszeichnet – insbesondere bei weitgehend einachsiger Belastung – übertreffen die Kosten derartiger Bauteile die traditioneller Stahlbauteile heute noch um mehr als 500%. Auch gegenüber hochfesten Stählen und Aluminium ergibt sich ein ähnlicher Zusammenhang: Es lassen sich zwar deutliche Gewichtsvorteile realisieren, die aber mit mehrfach höheren Kosten einhergehen.

Abbildung 8: Gewichts- und Kostenvergleich am Beispiel Strukturbauteil Automobil

Quelle: Desk-Research; Expertengespräche; Audi; Roland Berger

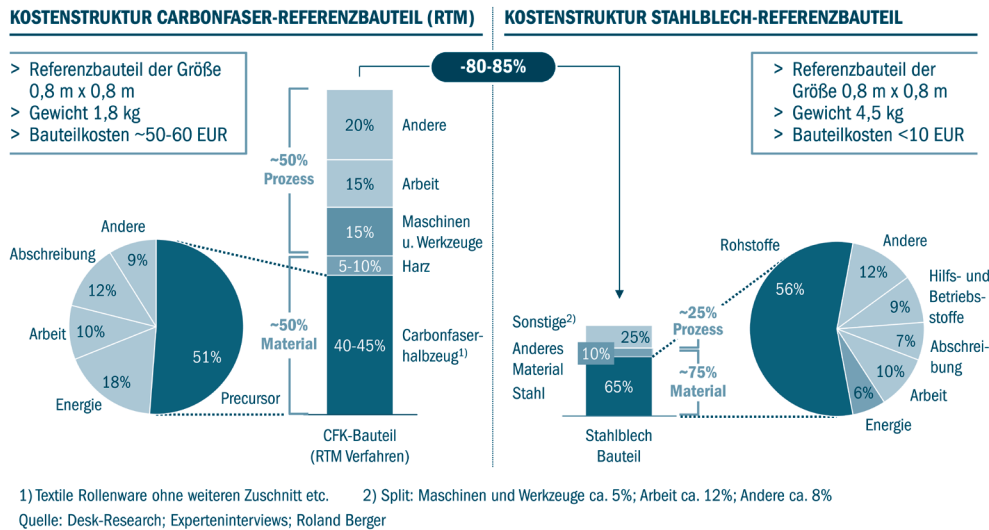
Auch wenn Kosten und Kostenstruktur immer zu einem gewissen Grad vom konkreten Bauteil abhängig sind und sich erhebliche Unterschiede ergeben können, eignen sich Referenzbauteile zur Ermittlung der wesentlichen Einflussgrößen.

Der Vergleich der Kostenstruktur eines im RTM-Verfahren hergestellten CFK-Referenzbauteils mit einem funktional ähnlichen Stahlbauteil liefert für die wesentlichen Kostentreiber ein sehr unterschiedliches Bild, wie in Abbildung 9 dargestellt ist.

Derzeit machen bei CFK-Bauteilen, die nach dem RTM-Verfahren hergestellt sind, die Materialkosten etwa 50% der gesamten Bauteilkosten aus. Die andere Hälfte entfällt auf Prozesskosten, die sich im Wesentlichen aus Maschinen- und Werkzeugkosten, Arbeitskosten und anderen Kosten wie Energie etc. zusammensetzen. Den größten Einzelanteil hat die Carbonfaser, die bis zu 45% der Bauteilkosten verursacht.

Carbonfaserkosten werden wiederum zu mehr als 50% von dem Vorprodukt (Precursor) Polyacrylnitril (PAN) bestimmt, das in sehr hoher Qualität vorliegen muss, um Carbonfasern mit entsprechend guten mechanischen Eigenschaften zu erhalten. Dieser Precursor wird dann in einem mehrstufigen, sehr energieintensiven Prozess bei hohen Temperaturen oxidiert, carbonisiert und bei Hochmodulfasern zusätzlich noch graphitisiert. Dabei werden Temperaturen von mehr als 2.000 °C benötigt (bei Hochmodulfasern bis zu 3.000 °C), weshalb knapp 20% der Faserkosten auf Energie entfallen. Weil der Prozess in hochautomatisierten Anlagen abläuft, fallen nur etwa 10% Arbeitskosten, dafür aber etwa 20% Abschreibung und andere Fixkosten an.

Abbildung 9: Referenzbauteil Kostenvergleich heute: CFK vs. Stahlblech
(Modellrechnung)



Die Gesamtkosten des Stahlblechbauteils betragen nur etwa 15-20% des CFK-Bauteils und liegen damit in der Größenordnung der Kosten, die allein der Precursor für die Fasern des CFK-Bauteils ausmacht.

Auch die Kostenstruktur des Stahlblechbauteils unterscheidet sich signifikant: Die Materialkosten dominieren mit etwa 75% die Gesamtkosten und werden maßgeblich vom Rohstoff Erz bestimmt. Prozesskosten machen folglich nur etwa 25% der Gesamtkosten aus.

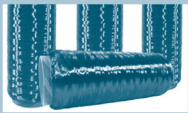
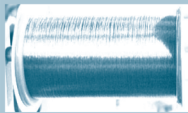


2.4 Material- und Verfahrensinnovationen und ihr Beitrag zur Verbesserung der Kostenposition

Eine Weiterentwicklung findet derzeit auf praktisch allen Stufen der Wertschöpfungskette von den Rohmaterialien bis hin zu einzelnen Schritten des Bauteilherstellungsverfahrens statt. Dabei wird eine Vielzahl verschiedener Stoßrichtungen verfolgt, die bis 2020 zu unterschiedlichen Kostensenkungspotenzialen führen werden, wie Abbildung 10 illustriert.

Bei den Fasern werden dabei zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Während bei der Carbonfaser insbesondere an einer Senkung der Faserkosten gearbeitet wird, steht bei der Glasfaser eher die Optimierung der mechanischen Eigenschaften der Faser im Vordergrund.

Für die Carbonfasern werden dazu neue Konvertierungstechnologien entwickelt, die beispielsweise die Fasern mit Mikrowellen oder mit einer Kombination aus Mikrowellen und Plasma direkt heizen. Zudem erforscht man Modifikationen bei der Oxidationstechnologie und der finalen Oberflächenbehandlung (Schlichte). Wesentliches zweites Forschungsgebiet ist eine neue Precursortechnologie, die nicht mehr PAN als Ausgangsstoff verwendet.

Abbildung 10: Innovations- und Kostensenkungspotenziale entlang der FVK-Wertschöpfungskette

	CARBONFASER	GLASFASER	MATRIX	HERSTELLVERFAHREN
Aktuelle Entwicklungsfelder	 <ul style="list-style-type: none"> > Modifizierte Konvertierungstechnologie mit geringerem Energieverbrauch > Neuartige Precursortechnologie 	 <ul style="list-style-type: none"> > Energetische Optimierung > Verbesserte Glaseigenschaften (Zugfestigkeit, Steifigkeit) 	 <ul style="list-style-type: none"> > Schneller härtende Matrixsysteme > Maßgeschneiderte Eigenschaften > Thermoplaste 	 <ul style="list-style-type: none"> > Verfahrensoptimierung > Automatisierung > Endkonturnahe Preforms mittels Textiltechnik > Organoblech
Kostensenkungspotenzial bis 2020	15-25%	5-10%	<10%	30-40%
Anmerkungen	> Andere Precursor mit hinreichender Qualität nicht vor 2020 zu erwarten	> Glasfaser als Commodity kostenseitig schon weitgehend ausgereizt	> Kürzere Zykluszeit bewirkt zusätzlich Einsparung bei der Komponentenfertigung	> Hohes Potenzial auf praktisch allen Stufen der Prozesskette

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; RBSC/VDMA Umfrageergebnisse; Roland Berger

Dazu werden beispielsweise Ausgangsstoffe auf Ligninbasis für Fasern mit etwas geringerer mechanischer Qualität untersucht. Da die Kosten des Precursors heute etwa 50% der Gesamtkosten der Kohlefaser betragen, birgt dieser Ansatz prinzipiell hohes Potenzial. Nach dem heutigen Erkenntnisstand ist hier jedoch innerhalb der kommenden 5-10 Jahre nicht mit einer erheblichen Innovation zu rechnen, weil die mechanischen Eigenschaften der Lignin-basierten Fasern derzeit nicht annähernd die der PAN-basierten Fasern erreichen.

Bei der Herstellung von Carbonfasern auf Basis der heute bekannten Prozesskette greifen zudem Skaleneffekte nicht, wie sie von vielen anderen chemischen Prozessen bekannt sind. Die derzeit verwendeten Mainstreamanlagen

zur Herstellung von Carbonfasern (Jahreskapazität einer Anlage ca. 2.000 Tonnen) stellen nahezu ein prozesstechnisches Optimum dar, bei größeren Anlagen scheint der Prozess in den Grenzbereich der stabilen Beherrschbarkeit zu kommen.

Eine wegweisende Innovation zeichnet sich auf dem Gebiet der Herstellung von Carbonfasern kurz- und mittelfristig somit nicht ab, sodass Einsparungen von 15-25% im Zeitraum bis 2020 durch inkrementell verbesserte Technologien erwartet werden.

Entwicklungen im Bereich der Glasfaser fokussieren sich stärker auf eine Optimierung der mechanischen Fasereigenschaften als auf eine reine Kostensenkung. Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass schon heute ein großer Teil der Glasfasern in China hergestellt wird. Glasfasern besitzen weitgehend den Charakter eines Commodity, der keine signifikanten Kostensenkungen mehr zulässt. Entwicklungspotenzial wird hier eher in speziellen chemischen Formulierungen gesehen, die verbesserte Festigkeit oder Steifigkeit bewirken.

Bei der Matrix konzentriert sich die Entwicklung im Bereich Duromere derzeit insbesondere auf kürzere Aushärtungszeiten, bspw. durch sogenannte Snap-Cure-Verfahren. Eine Einsparung ergibt sich dabei nicht direkt über die Materialkosten, sondern durch eine bessere Maschinenausnutzung durch eine geringere Zykluszeit. Zusätzlich wird an einer Verbesserung der Harzeigenschaften hinsichtlich der Kombination aus mechanischen Eigenschaften und Viskosität gearbeitet: Alle Verfahren, bei denen Harz in ein trockenes Textilhalbzeug eingebracht wird, streben verfahrenstechnisch eine möglichst geringe Viskosität zur optimalen Benetzung und schnellen Ausbreitung des Harzes an. Damit lassen sich jedoch oftmals keine optimalen mechanischen Festigkeitswerte des Bauteils erreichen, weshalb in diesem Bereich noch Entwicklungspotenzial besteht. Auch bei Thermoplasten soll vor allem die Viskosität optimiert werden, ohne die in ausgehärtetem Zustand guten mechanischen Eigenschaften zu beeinträchtigen.

Bei den Entwicklungen im Bereich der Matrix ist kurz- und mittelfristig ebenfalls keine bahnbrechende Innovation zu erwarten, die die Kosten schlagartig signifikant verringern könnte. Stattdessen rechnet man in diesem Bereich nur mit geringen direkten Kostensenkungen von weniger als 10%. Die Entwicklungen zur Verkürzung der Zykluszeit können jedoch maßgeblich zur Senkung der Prozesskosten beitragen.

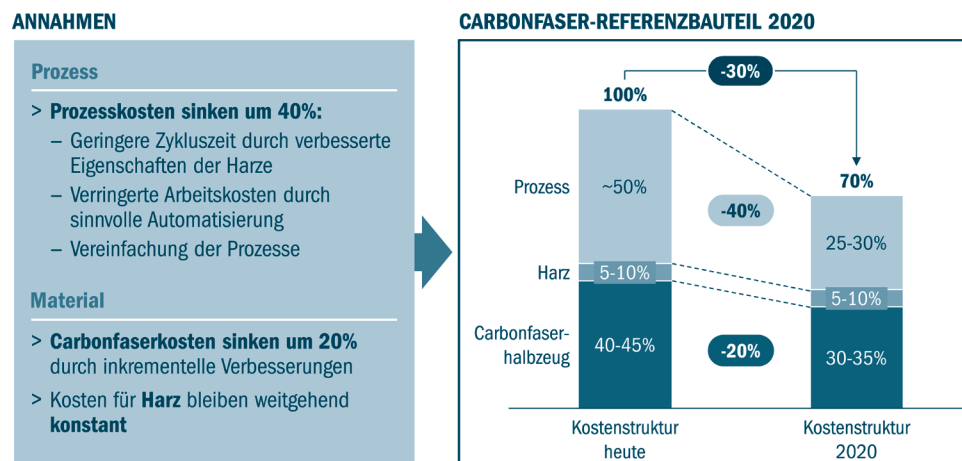
Auch im Bereich der Herstellungsverfahren und -prozesse zur Bauteilfertigung werden derzeit intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet.

Bei den Herstellungsverfahren ist in den letzten 10-15 Jahren eine Vielzahl von Verfahrensvarianten entwickelt worden, oftmals für ein konkretes Bauteil in einer bestimmten Anwendung. Als Beispiele lassen sich hier das Hochdruck-RTM-Verfahren oder verschiedene "Spezialitäten" bei vakuumunterstützten Infusionsverfahren, Pressverfahren etc. nennen. Viele dieser Entwicklungen waren nicht primär auf eine Kostensenkung, sondern eher auf die grundsätzliche Machbarkeit bestimmter Komponenten oder die Erfüllung spezifischer Anforderungen (bspw. in der Luftfahrt) ausgerichtet.

Speziell in den letzten Jahren hat das Kostenbewusstsein jedoch deutlich zugenommen und spielt heute bei den Entwicklungszielen der Verfahren/Prozesse eine große Rolle. Der Fokus liegt dabei neben der gezielten Verbesserung einzelner Prozessabschnitte auch auf einer optimierten Verkettung der einzelnen Prozessschritte. Eine erhebliche Anstrengung hat bspw. BMW mit dem i-Projekt geleistet, und dadurch einen Schritt in Richtung Industrialisierung vollzogen.

Zusammen mit der zuvor beschriebenen Kostenstruktur und den erwarteten Kostensenkungspotenzialen ergibt sich gegenüber heute in 2020 ein Kostensenkungspotenzial von etwa 30% für ein RTM-Bauteil, vergleiche Abbildung 11.

Abbildung 11: Kostensenkungspotenzial bis 2020 (Modellrechnung)



Neben der Weiterentwicklung von Ausgangsmaterialien und Herstellungsverfahren wird auch intensiv an der Verbesserung bestehender Simulationswerkzeuge gearbeitet. Dabei stehen einerseits eine genauere Bauteilberechnung (bspw. mithilfe der Finite-Elemente-Methode, FEM) und andererseits eine realitätsnahe Prozesssimulation im Fokus. Optimierte Berechnungswerkzeuge können zu einer Bauteilauslegung mit geringeren Sicherheitsfaktoren führen, weil das Bauteilverhalten genauer vorhergesagt werden kann.

Dadurch kann dann letztlich Material eingespart werden, was weiteres Kostensenkungspotenzial bedeutet, das in der Modellrechnung (Abbildung 11) noch nicht berücksichtigt ist. Auch eine weiter verbesserte Prozesssimulation schlägt sich in der Regel in geringeren Bauteilkosten nieder, weil eine ganzheitliche Optimierung der Prozesskette vor Produktionsbeginn durchgeführt werden kann.

Keinesfalls zu unterschätzen ist darüber hinaus, wie die Trends zu Multi-materialdesign und Hybridisierung die hochfesten Faserverbundwerkstoffe und ihre Kosten langfristig beeinflussen (Abbildung 12): Erst im Zusammenspiel mit der Hybridisierung können faserverstärkte Bauteile ihr maximales Leistungspotenzial entfalten. Wie schon zuvor erwähnt, sind Faserverstärkungen dort besonders sinnvoll, wo eine hohe Beanspruchung vorliegt, die im Idealfall zudem weitgehend einachsrig ist. In fast allen Anwendungen liegen jedoch auch Bereiche vor, die nur wenig belastet sind. Bei vollständig endlosfaserverstärkten Bauteilen werden an den gering belasteten Stellen daher in der Regel weniger Faserlagen eingesetzt, um die Bauteilkosten zu reduzieren.

Die Hybridisierung eröffnet an dieser Stelle noch wesentlich weitergehende Potenziale, wenn beispielsweise an gering belasteten Stellen keinerlei Endlosfasern mehr eingesetzt werden. Stattdessen kann man in diesen Bereichen ausschließlich kurz- oder langfaserverstärkten Kunststoff verwenden, der nur entlang der Lastpfade mit Endlosfasermaterial verstärkt ist. Ebenso können Carbonfasern in wenig belasteten Bereichen eventuell partiell durch die deutlich kostengünstigere Glasfaser ersetzt werden, sofern es die Steifigkeitsanforderungen an das Bauteil zulassen.

Auch die Kombination mit metallischen Elementen kann sehr große Vorteile bieten, beispielsweise an Stellen, die hohen Flächenpressungen ausgesetzt sind oder Lasten in alle Raumrichtungen aufnehmen müssen.

Abbildung 12: Potenziale (1/2): Hybridisierung von Faserverbundkunststoffen

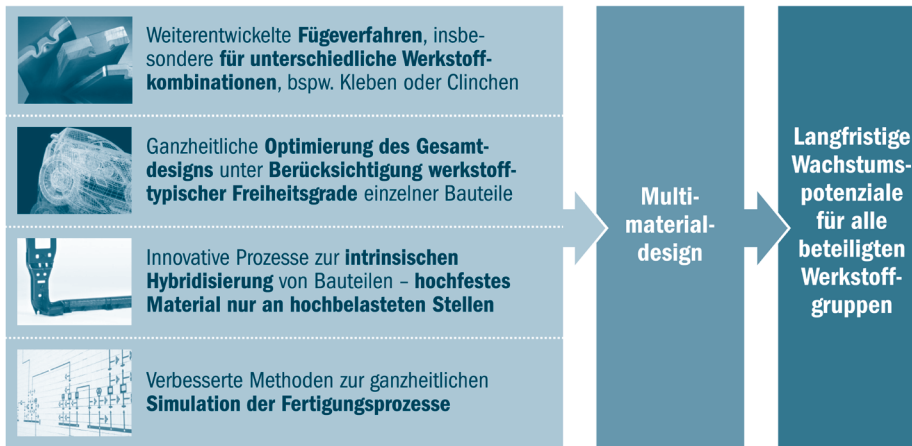
	Endlosfaserverstärktes CFK/GFK	Endlosfaserverstärkter FVK und Metall	Endlosfaserverstärkung und Kurz-/Langfaser/Kunststoff
Beispiel			
Rationale	<ul style="list-style-type: none"> > Nutzung der kostengünstigen Glasfaser für gering belastete Stellen > Gezielte Versteifung hochbelasteter Stellen mit Carbonfaser 	<ul style="list-style-type: none"> > Verbindung der spezifischen Stärken von FVK und Metallen innerhalb eines Bauteils, bspw. zur Aufnahme hoher punktueller Lasten 	<ul style="list-style-type: none"> > Verwendung der Endlosfaser nur in maximal belasteten Bereichen > Restliches Bauteil kostengünstiger durch Kurz-/Langfaserverstärkung oder nicht verstärkten Kunststoff
Geeignete Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> > Vakuumunterstützte Infusionsverfahren > Handlaminierverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> > Harzübertragungsverfahren (RTM) > Vakuumunterstützte Infusionsverfahren > Handlaminierverfahren > Pressverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> > Harzübertragungsverfahren (RTM) > Pressverfahren

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research

Neben den Potenzialen direkt aus der Hybridisierung zeichnen sich gemäß Abbildung 13 mittel- bis langfristig weitere werkstoffübergreifende Innovationen ab.

Insbesondere auf dem Gebiet der Fügetechnologie mit Fokus auf der Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe wird derzeit intensiv geforscht. Dabei sind beispielsweise Kleben, aber auch Nieten, Clinchen oder andere Technologien zu nennen, deren Potenziale teilweise noch nicht ausgereizt scheinen.

Ein ganzheitlich optimiertes Gesamtdesign berücksichtigt sowohl die jeweils spezifischen Freiheitsgrade des Werkstoffs als auch fertigungstechnische Aspekte und ermöglicht so, die Materialeigenschaften optimal auszunutzen. Bei Blechbauteilen ist es heute bspw. Standard, dass fertigungstechnische Überlegungen schon in die Designphase eines Bauteils einbezogen werden (bspw. hinsichtlich machbarer Biegeradien oder bei Hinterschnitten). Erst wenn dies auch bei Composites in einer standardisierten Form erfolgt, kann ein optimaler Kompromiss aus technischem Nutzen und Wirtschaftlichkeit erzielt werden.

Abbildung 13: Potenziale (2/2): Multimaterialdesign von Faserverbundwerkstoffen

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research

Im Zusammenhang mit der Hybridtechnologie ist zusätzlich auch die intrinsische Hybridisierung erwähnenswert, insbesondere bei der Kombination mit Metallen. Dazu wird derzeit erforscht, in welcher Form sich Hybridbauteile schon während der Bauteilfertigung so effizient herstellen lassen, dass auf aufwendige Fügeverfahren verzichtet werden kann.

Last but not least eröffnen verbesserte Verfahren zur Simulation der Fertigungsprozesse weitere Potenziale, weil sich dadurch unter anderem erhebliche Einsparungen bei Versuchen ergeben können und sich die Grenzen der Fertigung genauer vorhersagen lassen.

3. Marktentwicklung – Anwendungssegmente, Nachfragetreiber und Marktmodell

Nachdem im Kapitel 2 ein grundlegender Überblick über die verwendeten Materialien, Eigenschaften und Herstellungsverfahren für verschiedene hochfeste Faserverbundbauteile dargestellt worden ist, setzt sich dieses Kapitel mit dem Markt, d.h. der erwarteten Nachfrage nach derartigen Bauteilen auseinander. Dazu werden zunächst die wesentlichen Anwendungsgebiete und ihre Treiberlogik untersucht und bestehende limitierende Faktoren für weiteres Wachstum in diesen Segmenten im Detail betrachtet. Den Abschluss bildet eine Marktprognose mit Fokus auf das zu erwartende Marktvolumen und dessen Struktur (Seriengröße).

3.1 Wesentliche Anwendungssegmente und ihre Treiber

Eine wachsende Nachfrage nach hochfesten Verbundbauteilen ist in unterschiedlichen Branchen festzustellen, wobei Automotive, Luft- und Raumfahrt sowie Windenergie die mengenmäßig bedeutendsten Segmente sind. In der vierten in Abbildung 14 aufgeführten Branche, dem Maschinen- und Anlagenbau, gibt es derzeit noch keine hohen Volumina oder großen Serien, sie weist aber eine Vielzahl unterschiedlicher Nischen mit hohem Potenzial auf und wird deshalb ebenfalls im Detail betrachtet.

Abbildung 14: Wesentliche Marktsegmente für hochfeste Verbundbauteile

<p>1. Automotive</p> <ul style="list-style-type: none"> > Derzeit von Nischenanwendungen im Sport und im Premium-/Super-Premium Segment dominiert > BMW i3 als erstes Fahrzeug mit hohem CFK-Anteil in 10.000er Serie 		<p>2. Luft- und Raumfahrt</p> <ul style="list-style-type: none"> > Steigender CFK-Anteil bei Strukturbauteilen neuer Flugzeuge, z.B. A350, B787 mit ca. 50% Strukturgewicht > Interieur mit hohem GFK-Anteil (Verkleidungen, Schränke, Ablagen etc.) > State-of-the-art bei Helikoptern und Kampffjets 	
<p>3. Windenergie</p> <ul style="list-style-type: none"> > Rotorblätter fast ausschließlich aus GFK – nur zu geringem Anteil mit CFK verstärkt > Trend zu längeren Blättern begünstigt CFK wegen höherer Steifigkeit 		<p>4. Maschinen- und Anlagenbau</p> <ul style="list-style-type: none"> > Viele relativ kleine Nischen mit stark variierenden Anforderungen > Einsatz in Hochleistungsbereichen bei besonderen dynamischen, mechanischen, thermischen oder elektromagnetischen Anforderungen 	

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; Roland Berger

In den Branchen Bau, Marine und Sport werden ebenfalls endlosfaserverstärkte Faserverbunde eingesetzt, sie sind aber keine Volumentreiber für hochfeste Verbundwerkstoffe: In der Bauindustrie kommen hauptsächlich Profile und

Rohre aus Faserverbundkunststoffen zum Einsatz. Insbesondere Rohre, die das größte Volumen ausmachen, sind zwar teilweise mit Endlosfaser (meist Glas) verstärkt, zu einem größeren Teil jedoch mit Kurz- oder Langfaser. Damit fallen sie nur am Rande in das Segment der hochfesten Faserverbunde. In der Marineindustrie wird im Boots- und Yachtbau hauptsächlich Glasfaser im Bereich der Bootsrümpfe und teilweise auch der Aufbauten eingesetzt. Es werden fast ausschließlich sehr kleine Serien in weitgehend manuellen Verfahren verarbeitet, und es ist kein signifikantes Wachstum der Nachfrage in dieser Branche festzustellen. Im Bereich Sport wird CFK schon verhältnismäßig lange verwendet, beispielsweise für Tennisschläger oder die Schäfte von Golfschlägern. Auch dieser Bereich weist jedoch kein signifikantes Wachstum auf und fällt daher nicht unter die potenziellen Volumentreiber.

Die Entwicklung des Bedarfs in den in Abbildung 14 aufgeführten Segmenten variiert branchenspezifisch sehr stark, was durch unterschiedliche Markttreiber zu begründen ist. Grundsätzlich muss zwischen spezifischen Treibern für den Einsatz von endlosfaserverstärkten Composites und Wachstumstreibern der gesamten Branche unterschieden werden. Während erstgenannte zu einem Ersatz von traditionellen Materialien durch Composites führen und damit sogar bei stagnierender Branchenentwicklung den Compositebedarf steigern, wird im zweiten Fall die Nachfrage nach Composites durch das Branchenwachstum an sich stimuliert. Als Beispiel für den ersten Fall kann die Automobilindustrie dienen, bei der Verbundwerkstoffe konventionelle Werkstoffe teilweise ersetzen. Die Windenergie ist ein typischer Vertreter des zweiten Falles, weil die Rotorblätter schon heute praktisch ausschließlich endlosfaserverstärkte Verbundbauteile sind.

Als spezifische Treiber für den Einsatz endlosfaserverstärkter Composites lassen sich vier grundlegende Anforderungen identifizieren: "Technische Notwendigkeit" ist gegeben, wenn sich die benötigten bzw. gewünschten Bauteileigenschaften nicht mit anderen Materialien erzielen lassen. Dies kann sich sowohl auf mechanische Eigenschaften als auch auf andere physikalische Eigenschaften wie den nahe null liegenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten von CFK beziehen. Dies wird bspw. für Bauteile in Textilmaschinen ausgenutzt, wo es auf maximale Präzision auch unter schwankenden Temperaturbedingungen ankommt.

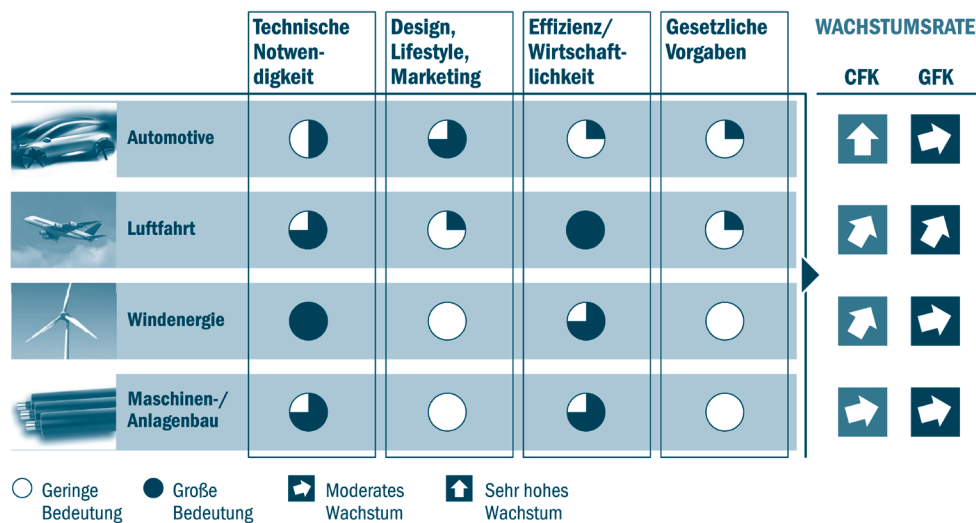
"Effizienz/Wirtschaftlichkeit" liegt vor, wenn gegenüber der Verwendung eines anderen Werkstoffs für ein Bauteil ein messbarer Kostenvorteil vorliegt. Dabei werden in der Regel nicht nur die direkten Bauteilkosten, sondern auch Einsparungen in der Betriebsphase berücksichtigt, bspw. der geringere Benzinverbrauch durch die Gewichtsersparnis und/oder geringere erwartete Wartungskosten, wie im Fall von carbonfaserverstärkten Kunststoffbauteilen moderner Flugzeuge.

"Außenwirkung/Lifestyle/Marketing" sind Faktoren, die nicht direkt im Zusammenhang mit ökonomischem oder technischem Nutzwert stehen, sondern bei denen es ausschließlich um das Erscheinungsbild geht: "Carbon ist hip". Nicht tragende Verkleidungsteile, Zierleisten und sonstige Sichtteile fallen bspw. in diese Kategorie.

"Gesetzliche Vorgaben" umfassen alle gesetzlichen Vorschriften, die zur Steigerung des Bedarfs an hochfesten Faserverbundbauteilen führen. Dies können zum Beispiel noch weiter verschärfte CO₂-Vorgaben für Automobile sein.

Die jeweilige Relevanz dieser Treiber für die vier wesentlichen Marktsegmente zeigt Abbildung 15. Branchenübergreifend spielen technische Notwendigkeit und Effizienz/Wirtschaftlichkeit die wichtigste Rolle. Sie sind in der Luftfahrt, Windenergie und dem Maschinen- und Anlagenbau der Motor für den Einsatz hochfester Faserverbundwerkstoffe. Allein im Automotive-Umfeld ist die Bedeutung dieser beiden Treiber bisher etwas geringer: Hier dominiert bisher der Lifestyle- und Marketingaspekt. Dies äußert sich beispielsweise in vielen Sichtteilen, Verblendungen etc. (z.B. die Side-Blades beim Audi R8), die allein aus Designgründen ein Faserverbundbauteil sind. Gesetzliche Vorgaben spielen insgesamt nur eine Nebenrolle, wobei sie in der Windenergie und im Maschinen- und Anlagenbau keinerlei Relevanz haben. Nur in den Branchen Automotive und Luftfahrt spielen sie eine gewisse Rolle durch die zunehmenden Anforderungen im Hinblick auf Flottenverbrauch und CO₂-Reduktion. So stimulieren sie den Leichtbau und damit indirekt den Einsatz faserverstärkter Komponenten.

Abbildung 15: Treiber für den Einsatz hochfester Faserverbundwerkstoffe



Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; RBSC/VDMA Umfrageergebnisse

Die in Abbildung 15 rechts dargestellte Indikation des Nachfragewachstums je Segment resultiert aus der Konsolidierung des heutigen Einsatzes der Faserverbunde in der jeweiligen Branche und der zugehörigen Treiber. Der folgende Abschnitt geht dazu im Detail auf die jeweiligen Segmente ein.

3.2 Prognostizierte Nachfrageentwicklung der relevanten Volumensegmente

3.2.1 Automotive

Anwendungen hochfester Faserverbundbauteile, insbesondere CFK, in der Automobilindustrie stehen derzeit besonders stark im Fokus der Medien. Während historisch der Einsatz praktisch ausnahmslos auf hochwertige Sportwagen in 100er-Serien sowie Fahrzeuge für den Profisport (z.B. Formel-1-Autos) beschränkt war, hat ein gewisser Wandel eingesetzt: Auch in Fahrzeugen mit etwas größeren Serien (bspw. Audi R8 in 1.000er-Stückzahl) werden zunehmend CFK-Bauteile eingesetzt. Ein "Leuchtturmprojekt" ist in diesem Zusammenhang das Projekt BMW i, bei dem erstmals für ein Fahrzeug in geplanter 10.000er-Serie die vollständige Karosserie aus CFK bestehen wird. Die ersten Auslieferungen sind für 2013 geplant. Für dieses Projekt wurden die gesamte Wertschöpfungskette von der Carbonfaser bis zum Bauteil vollständig neu geplant und entsprechende Produktionsstätten errichtet.

Das Vorpreschen von BMW im Rahmen dieses Projekts hat eine Art "Hype" ausgelöst und die Wahrnehmung von Composites auch in den Medien stark gesteigert.

Neben diesem sehr medienwirksamen Projekt sind im Automotive-Sektor weitere Aktivitäten zu beobachten, die in den Medien weniger präsent sind: Vereinzelt werden auch heute schon Funktionsbauteile in größerer Serie hergestellt, bspw. Blattfedern aus GFK. Eine Vielzahl weiterer Bauteile betrifft Interieurkomponenten, zumeist Zierleisten und andere Sichtteile, die jedoch in der Regel nur aus einer dünnen Carbonfaserlage bestehen, die auf einen anderen Werkstoff aufgebracht wird.

Weitere Anwendungen bestehen schon heute im Bereich von LKWs, bei denen GFK bspw. für Verkleidungsteile des Führerhauses eingesetzt wird. Hier kommen jedoch bisher nur in geringerem Maße endlosfaserverstärkte Bauteile zum Einsatz, sondern es werden oftmals Kurz- oder Langfasern verwendet, bspw. Sheet-Moulding-Compound (SMC)-Teile.

Hauptsächlich aus Kostengründen ist aus heutiger Sicht nicht zu erwarten, dass kurz- und mittelfristig weitere Fahrzeuge in Mittel- oder Großserie (mindestens 10.000 Stück p.a.) mit einer kompletten Karosserie aus Faserverbundbauteilen hergestellt werden. Vorstellbar ist jedoch der selektive Einsatz

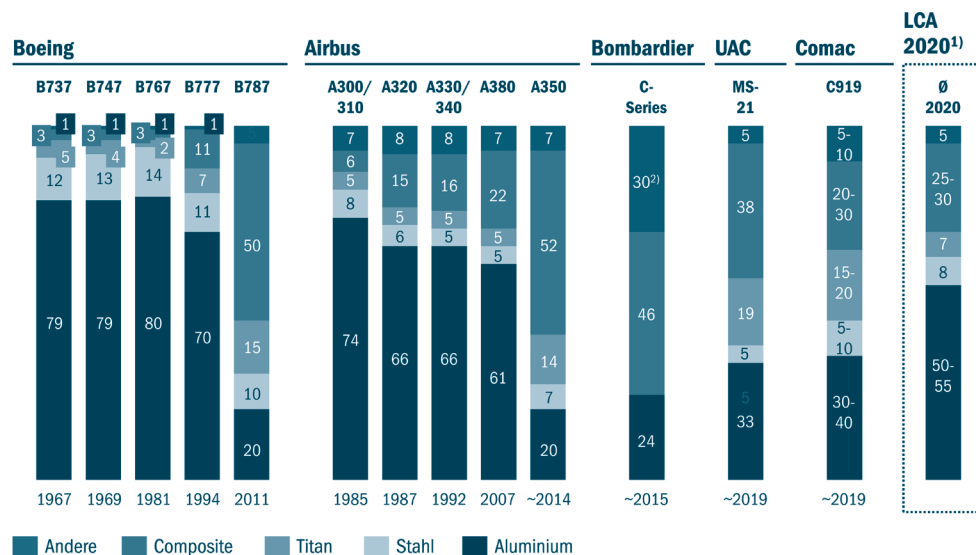
von derartigen Bauteilen in einer größeren Anzahl von Premiumfahrzeugen an Stellen, wo sich ein besonders großer Nutzen bspw. hinsichtlich Leichtbaupotenzial oder Crashesicherheit ergibt. Das Teilespektrum kann dabei vielfältig sein, jedoch werden komplexe Profilstrukturen und Flächenbauteile dominieren.

3.2.2 Luftfahrt

In der kommerziellen Luftfahrt sind hochfeste Faserverbundbauteile schon seit langer Zeit etabliert. So wurde bspw. das erste CFK-Seitenleitwerk für den A310 schon im Jahr 1983 ausgeliefert. Die Entwicklung des CFK-Anteils in Großflugzeugen veranschaulicht Abbildung 16. Zunächst beschränkte sich der CFK-Einsatz auf ausgewählte Bauteile, was bspw. bei den Typen A320 und A330/340 zu einem Anteil von ca. 15% am Strukturgewicht führte. Dominierendes Material ist bei dieser Flugzeuggeneration Aluminium.

Insbesondere durch die Einführung der neuen Generation von Langstreckenflugzeugen (B787 und A350) ist der CFK-Anteil im Bereich der Strukturbauteile moderner Flugzeuge jedoch stark angestiegen: Diese beiden Flugzeugtypen haben erstmals einen CFK-Rumpf und erreichen einen CFK-Anteil von etwa 50% am Strukturgewicht. Im Vergleich zu Kurzstreckenflugzeugen werden diese beiden Flugzeugtypen jedoch in einer signifikant kleineren Stückzahl (geplant sind jeweils 110-130 Stück p.a.) hergestellt.

Abbildung 16: Entwicklung des Materialmix kommerzieller Großraumflugzeuge



1) Ø Materialmix von Großraumflugzeugen (Large Commercial Aircrafts, LCA) 2020 geschätzt

2) Inkl. Stahl und Titan

Bei dem 2015/16 geplanten Update der Kurzstreckenflugzeuge (B737max, A320neo), die jeweils Stückzahlen von mehr als 400 p.a. aufweisen sollen, ist eine starke Erhöhung des Composite-Anteils nicht geplant. Dennoch ist zu erwarten, dass einzelne, heute noch metallische Bauteile auch dort ersetzt werden. Der Materialmix der darauffolgenden Flugzeuggeneration ("Post-Neo") steht derzeit noch nicht fest.

Die Luft- und Raumfahrtbranche ist vor allem wegen der entscheidenden Bedeutung des Strukturgewichts ein Vorreiter bei der Verwendung von hochfesten Faserverbundbauteilen. Die erheblichen Mehrkosten lassen sich relativ problemlos amortisieren, wie eine Beispielrechnung illustriert: Bei einer Betriebsdauer von 60.000 Stunden führt jedes eingesparte Kilogramm Gewicht zu einem um etwa 3 Tonnen Kerosin verminderten Treibstoffverbrauch. Über die gesamte Flugzeuglebensdauer lassen sich so Mehrkosten von 400-500 EUR pro eingespartem Kilogramm Gewicht amortisieren. Zusätzliches Potenzial kann sich bei der Wartung ergeben, da CFK in der Regel nicht so ermüdungsanfällig ist wie konventionelle Materialien.

Weil bei Kurzstreckenflugzeugen die Anschaffungskosten im Vergleich zu den Betriebskosten stärker ins Gewicht fallen, arbeitet auch die Luftfahrtindustrie an Verfahren, um die CFK-Fertigung von Flugzeugkomponenten kostengünstiger zu gestalten. Das ließe sich bspw. durch Alternativen zum sehr kostenintensiven Prepreg-Verfahren mit Aushärtung im Autoklaven erreichen.

Neben Strukturbauteilen kommen auch im Interieur viele Faserverbundbauteile zum Einsatz, wobei hier in erster Linie GFK verwendet wird. Das Teilespektrum ist hier sehr vielfältig und reicht von Verkleidungsteilen bis hin zu Einbauten wie Schränken und Ablagen. Auch bei funktionell identischen Bauteilen herrscht in der Regel eine hohe Varianz vor, die bspw. durch individuelle Kundenwünsche oder geometrische Variationen der Struktur bedingt ist.

Die typische Seriengröße in der Luftfahrt hängt insgesamt stark vom konkreten Bauteil ab: Während Großbauteile wie Flügelschalen in 100er-Serien benötigt werden, sind insbesondere bei kleineren Teilen wie Versteifungsrippen (Stringer) oder Clips 1000er- oder in Einzelfällen sogar 10.000er-Serien nötig. Speziell bei der Innenausstattung führen individuelle Kundenwünsche dagegen oft zu Serien, die nur im 10er-Bereich liegen.

3.2.3 Windenergie

Für die Windenergiebranche werden weltweit heute etwa 60.000 Rotorblätter p.a. hergestellt. Diese Anzahl verteilt sich jedoch auf mehr als 20 relevante Hersteller und eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle, sodass die typische

Seriengröße maximal im 100er-Bereich liegt. Da schon heute praktisch 100% der Rotorblätter aus hochfesten Faserverbundstrukturen bestehen, ist die Entwicklung des Composites-Bedarf in dieser Branche eng an die Gesamtentwicklung der Branche gekoppelt. Eine zusätzliche Substitution von traditionellen Werkstoffen durch Faserverbundbauteile ist nicht zu erwarten.

In den letzten Jahren hat sich der Trend zu immer größeren Turbinen und damit längeren Rotorblättern verstärkt. Insbesondere für Anwendungen auf hoher See (Offshore) werden wegen der hohen Installations- und Logistikkosten und der Windverhältnisse zunehmend größere Anlagen mit Leistungen von 5 MW oder mehr bevorzugt. Die Mehrzahl der relevanten Hersteller hat entweder schon Turbinen dieser Größenordnung gefertigt oder entwickelt sie gerade. Für die jährlich installierte neue Anlagenkapazität wird derzeit eine mittelfristige globale Wachstumsrate von 4-5% p.a. prognostiziert. Dieses Wachstum wird jedoch nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Anzahl der benötigten Rotorblätter führen, sondern resultiert fast ausschließlich aus den ansteigenden Anlagengrößen, während die Zahl der jährlich installierten Anlagen stagnieren oder sogar leicht sinken wird.

Die dabei eingesetzten Rotorblätter gehen dann über die bisher typischen Längen von 40-50 m für 1,5- bis 2,5-MW-Anlagen deutlich hinaus und werden in wenigen Jahren bis zu etwa 80 m erreichen. Die damit verbundenen höheren Lasten steigern die Anforderungen an Festigkeit und Steifigkeit der Blätter erheblich. Eine Herausforderung ist bspw. der nötige Freigang zwischen Blatt und Turm, der durch ausreichend steife Blätter sichergestellt werden muss. Es ist daher schon heute ein zunehmender Einsatz der wesentlich teureren Carbonfaser – insbesondere im Bereich der Versteifungsurte – anstelle von Glasfaser zu beobachten.

Wie stark sich die Carbonfaser gegenüber der Glasfaser in dieser Anwendung durchsetzen kann, wird insbesondere durch die Kosten bestimmt werden, weil die besseren mechanischen Eigenschaften der Carbonfaser mit erheblichen Mehrkosten verbunden sind.

Ein potenzieller Zukunftstrend im Bereich der Rotorblätter von Windenergieanlagen könnte ein modular aus einzelnen Segmenten aufgebautes Rotorblatt sein, das erst an der Baustelle zusammengesetzt wird. Insbesondere ein amerikanisches Unternehmen ist auf diesem Gebiet sehr aktiv und plant die Installation eines ersten Prototyps spätestens im kommenden Jahr. Eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Umsetzung dieses Konzepts hat langfristig "Game-Changer"-Potenzial für die gesamte Rotorblattproduktion in der Windenergiebranche.

3.2.4 Maschinenbau

Im Maschinen- und Anlagenbau werden Composites bisher nur in wenigen, speziellen Anwendungen eingesetzt. In dieser Branche entscheidet das Zusammenspiel aus technischer Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit über den Materialeinsatz bei den Anwendungen. Ein Aspekt der technischen Notwendigkeit berücksichtigt die erforderlichen mechanischen, ein anderer die erforderlichen physikalischen Materialeigenschaften.

Unter mechanische Eigenschaften fallen die hohe Steifigkeit in Verbindung mit geringem Gewicht. Dies macht hochfeste Faserverbundwerkstoffe insbesondere für den Einsatz bei Maschinen und Anlagen interessant, in denen hohe Beschleunigungen auftreten. Die Steifigkeit spielt zudem bei langen Walzen oftmals eine große Rolle. Unter besondere physikalische Eigenschaften fallen bspw. der nahe null liegende Wärmeausdehnungskoeffizient sowie das nichtmagnetische Verhalten.

Vermutlich am weitesten verbreitet ist der Einsatz von Faserverbundwalzen in schnell rotierenden Maschinen, bspw. in der Papier- oder der Druckindustrie. In diesem Anwendungsfall ist die Relation aus Mehrkosten und dem damit zu erzielenden Zusatznutzen besonders gut. Weitere Beispiele für rotationssymmetrische Teile sind Rotoren in Synchronmotoren mit elektrostatischen Lagern. Bei Bauelementen für (sich schnell bewegende) Handlingssysteme, Spannfütern (zur Reduktion des Gewichts), gezielt eingesetzten Versteifungselementen und vielen weiteren Nischenanwendungen sind die besonderen mechanischen oder physikalischen Eigenschaften ebenfalls von entscheidender Bedeutung.

Die typische Seriengröße für Anwendungen im Maschinenbau ist 50-200 Teile p.a.. Eine Stückzahl von mehr als 1.000 p.a. kann in dieser Branche schon als Großserie bezeichnet werden und betrifft insbesondere Faserverbundbauteile bisher nur sehr selten.

Durch die Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen bietet der Maschinen- und Anlagenbau langfristig erhebliche Potenziale für Faserverbunde, das Wachstum wird jedoch zunächst nur langsam verlaufen, was durch verschiedene "harte" Faktoren hervorgerufen, zusätzlich aber auch von einer tendenziell konservativen Haltung des Maschinenbaus gegenüber neuen Materialien gefördert wird. Die Grundeinstellung "Wir haben das doch schon immer in Metall gebaut und das hat funktioniert" ist bei vielen Maschinenbauern festzustellen. Insbesondere im sich verschärfenden globalen Wettbewerb kann aber der Einsatz von Faserverbunden an den richtigen Stellen neue oder verbesserte Funktionalitäten ermöglichen, mit denen sich die Konkurrenz, bspw. aus China, auf Distanz halten lässt.

3.3 Limitierende Faktoren und Hindernisse

Das derzeit größte branchenübergreifende Hindernis für eine schnellere Marktpenetration hochfester Faserverbundwerkstoffe sind die erheblichen Mehrkosten im Vergleich zu Bauteilen aus traditionellen Materialien, vergl. auch Abschnitt 2.3. Die Mehrkosten lassen sich unter ökonomischen Gesichtspunkten nur in den Anwendungen rechtfertigen, bei denen sich entweder während der Lebensdauer eine entsprechend hohe Einsparung ergibt oder die mit konventionellem Material nicht realisierbar wären. Die jeweiligen Zielkosten sind jedoch branchenspezifisch sehr unterschiedlich: Während in der Luftfahrt mehrere 100 EUR pro kg Gewichtseinsparung akzeptiert werden, müssen für Großserienanwendungen im Automobilbereich die Kosten erheblich gesenkt werden, um mit Stahl oder Aluminium konkurrieren zu können.

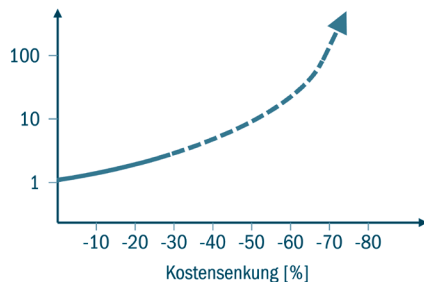
Mit den bis 2020 erwarteten Einsparungen von etwa 30% wird es zwar zu einer zunehmenden branchenübergreifenden Nutzung von Faserverbunden kommen, jedoch noch nicht zum Großserieneinsatz bspw. im Automobilbau. Dazu müssten nach den Angaben der Automobilindustrie die Kosten für CFK-Bauteile um etwa 70% gegenüber dem Stand von 2010 gesenkt werden.

Neben der Kostenproblematik wirken auch andere Faktoren limitierend, vergleiche Abbildung 17. So existiert derzeit noch keine optimale Recyclingroute für Faserverbundwerkstoffe (und die schon während der Produktion anfallenden Abfälle). Zwar werden schon heute Abfälle von Endlosfasertextilien (insbesondere der "Verschnitt" während des Produktionsprozesses der Bauteile) zu anderen, minderwertigen Halbzeugen verarbeitet, jedoch führt dies zu erheblichen Einbußen, da die typischerweise entstehenden Vliesstoffe nur für geringer belastete Bauteile verwendet werden können.

Ausgediente CFK- und GFK-Bauteile kann man – im Gegensatz zu metallischen Bauteilen – nach heutigem Stand der Technik nur sehr begrenzt recyceln, sie werden in der Regel thermisch verwertet. Im Gegensatz zu konventionellen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium können sie also nicht zu neuen hochwertigen Produkten verarbeitet werden. Insbesondere für GFK ist in den letzten Jahren eine gemischte stoffliche und thermische Verwertung entwickelt worden: Dabei werden GFK-Abfälle nach der Zerkleinerung als Roh- und Brennstoffsubstitut in einem Zementwerk bei der Herstellung von Zementklinkern eingesetzt. Die Harze dienen dort als Brennstoff, die im Glas enthaltenen Mineralien können bspw. Sand ersetzen. Nach Angaben der Fa. Holcim substituieren dabei bspw. 1.000 Tonnen GFK bis zu 450 Tonnen Kohle, 200 Tonnen Kreide, 200 Tonnen Sand und 150 Tonnen Aluminiumoxid. Durch dieses Verfahren ist eine sinnvolle Verwertungsrouten etabliert worden, die jedoch noch nicht so gut ist, wie die weitgehende stoffliche Verwertung metallischer Rohstoffe.

Abbildung 17: Limitationen für den Masseneinsatz hochfester Faserverbundwerkstoffe**KOSTEN (CFK)**

Nutzungsgrad (indiziert heute =1)

**WEITERE ASPEKTE****Verfügbarkeit der Carbonfaser**

Nicht ausreichende Beschaffungssicherheit ist Ausschlusskriterium für Großserieneinsatz bspw. in der Automobilindustrie

Reparaturkonzepte

Technisch mögliche Lösungen müssen entsprechend in der Breite umgesetzt werden ("Ich kann mein Auto nicht zur Reparatur zum OEM bringen")

Recycling

Weiter optimierte Recyclingroute zur Verbesserung der Gesamt-Umweltbilanz

- > Kontinuierliche **Kostensenkung** wird erfolgen
- > **Masseneinsatz** erst nach **Kostensenkung >50%**

- > **Alle Aspekte** werden **derzeit bearbeitet**
- > **Keine "Show-Stopper"**

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; Roland Berger

Ein weiteres, noch nicht vollständig gelöstes Problem stellt die Reparatur von Faserverbundbauteilen dar. Während Schäden an metallischen Bauteilen in der Regel relativ einfach repariert werden können (bspw. durch partiellen Austausch mit sogenannten Reparaturblechen) oder sogar durch eine gezielte plastische Rückverformung ("Ausbeulen"), ist dies bei Faserverbundbauteilen nicht so einfach möglich. Stattdessen müssen hier entweder ganze Bauteile ausgetauscht werden, oder es kommen spezielle Reparaturverfahren zum Einsatz. Insbesondere bei Strukturbauteilen ist jedoch eine Reparatur praktisch immer mit einem Verlust an spezifischer Festigkeit und Steifigkeit verbunden, weil die Fasern unterbrochen werden. Dies muss dann durch zusätzlich aufgebrachte Lagen ausgeglichen werden. Während dies in Luftfahrtanwendungen noch vergleichsweise einfach realisierbar ist, stellt bspw. im Automobilbereich die praktische Umsetzung derartiger Reparaturverfahren eine nicht unerhebliche Hürde da, weil entsprechende Kompetenz in Werkstätten erst aufgebaut werden muss.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang auch die oftmals deutlich erschwerte Erkennung von Schädigungen. Während bei metallischen Bauteilen signifikante Schädigungen in der Regel an der Oberfläche des Bauteils erkennbar sind, ist dies bei Faserverbunden häufig nicht der Fall, da die Schädigungen innerhalb des Laminatverbundes liegen können. Diese sogenannten Delaminationen können eine erhebliche Schwächung des Bauteils hervorrufen, ohne dass dies von außen direkt erkennbar ist.

Auch der Aspekt der Versorgungssicherheit ist zu beachten – insbesondere bei Carbonfasern. Durch die bisher im Vergleich zu anderen Konstruktionsmaterialien geringere Nachfrage ist auch das Angebot limitiert. Weil die bestehenden Kapazitäten mit Ausnahme von wirtschaftlichen Krisen nicht wesentlich über der aktuellen Nachfrage liegen, müssen bei einem plötzlichen Anstieg der Nachfrage die entsprechenden Kapazitäten erst aufgebaut werden. Ein Beispiel für diesen Prozess bietet das Joint Venture von SGL Carbon und BMW, SGL Automotive Carbon Fibers, das ausschließlich zur Versorgung der BMW Group mit Carbonfaser-Halbzeugen gegründet wurde. Allein in die erste Ausbaustufe des dafür errichteten Carbonfaserwerkes in Moses Lake mit einer Jahreskapazität von 3.000 Tonnen wurden ca. 100 Mio. USD investiert.

Last but not least lassen sich Faserverbunde bis heute nur unter einigen Schwierigkeiten mit metallischen Komponenten verbinden: Dauerhaft haltbare, für die entsprechenden Lasten geeignete Verbindungen stellen höchste Ansprüche an die Verbindungstechnik. Die schon in Abschnitt 2.4 angesprochene Hybridisierung von Bauteilen bzw. Multimaterialkonzepte bieten zwar langfristig enorme Chancen, die Hürde der Verbindungstechnik muss jedoch erst noch stückweise überwunden werden.

Trotz dieser nicht unerheblichen Hindernisse lässt sich an dieser Stelle ein positives Zwischenergebnis festhalten: Keiner der limitierenden Faktoren wird aus heutiger Sicht ein echter "Show-Stopper". Auf allen Gebieten befinden sich entsprechende Lösungsansätze derzeit im Stadium der Forschung und Entwicklung. Insbesondere der Kostenaspekt steht dem Einsatz in der Großserie kurz- und mittelfristig noch entgegen, aber dank der zunehmenden Anstrengungen aus Industrie und Forschung wird es auch über 2020 hinaus zu weiteren Kostensenkungen und damit zu einer stärkeren Marktpenetration kommen.

3.4 Nachfragestruktur und Marktmodell

Aus der Synthese der heutigen Verwendung von hochfesten Faserverbundkunststoffen, den wesentlichen Markttreibern und den limitierenden Faktoren lässt sich eine Prognose der Nachfrage und Nachfragestruktur ableiten. Wie schon bei der Analyse der Nachfrage in den relevanten Volumensegmenten (Abschnitt 3.2) erwähnt, werden sich Großserien (d.h. Stückzahlen >100.000 p.a.) erst nach 2020 in größerem Umfang etablieren. Dennoch wird in allen Segmenten die Nachfrage deutlich zunehmen, was sich sowohl in einer ansteigenden Seriengröße – also vermehrt Kleinserien (Stückzahlen im Bereich >1.000 p.a.) und Mittelserien (>10.000 p.a.) anstelle von Einzel fertigung bzw. sehr kleinen Serien (100 p.a.) –, aber auch in einer steigenden Anzahl von Komponenten aus hochfestem Faserverbundwerkstoff äußert (Abbildung 18).

Abbildung 18: Prognose der Nachfragestruktur bis 2020

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; Roland Berger

Unter Berücksichtigung der in den vorherigen Abschnitten dargestellten Erkenntnisse ist die in Abbildung 19 dargestellte Marktprognose für endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe entwickelt worden: Bis 2020 wird ein jährliches Wachstum von 17% p.a. im Bereich hochfestes CFK erwartet, während der Bereich GFK deutlich langsamer mit etwa 5% p.a. wachsen wird. Als Grundlage zur Abschätzung der heutigen Marktgröße dienen verschiedene Marktstudien/-reports und Schätzungen relevanter Verbände, Institutionen und Unternehmen, unter anderem AVK, Composites Forecasts and Consulting LLC, Industry Experts Publications, SGL Carbon und andere.

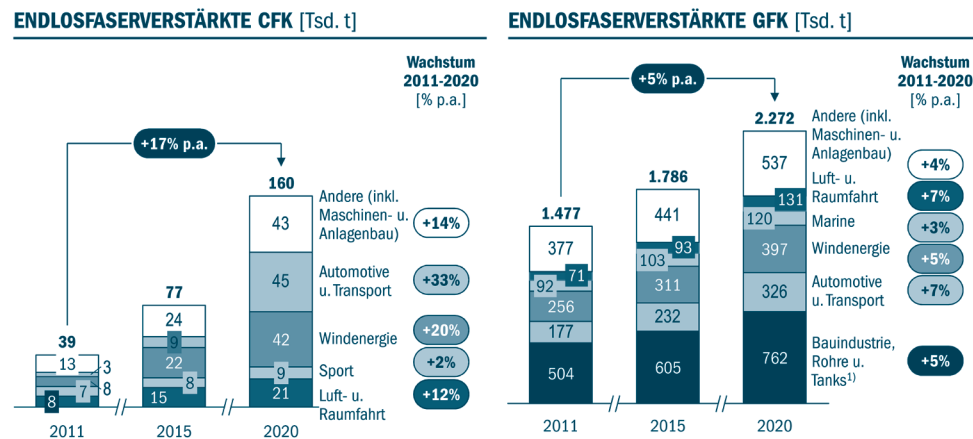
Da insbesondere für den GFK-Bereich in der Regel nur Zahlen für den Gesamtmarkt (also inklusive kurz- und langfaserverstärkter Materialien) veröffentlicht werden, wurden auf der Basis von Expertengesprächen diese Zahlen bereinigt, um die Marktgröße ausschließlich für endlosfaserverstärkte Bauteile zu ermitteln. Dazu wurde branchenspezifisch abgeschätzt, wie hoch der Anteil an endlosfaserverstärktem GFK in Bezug zur Gesamtmenge ist. Insbesondere in den Segmenten Automotive und Transportation, Bau, Consumer- und Elektroindustrie ist dabei eine signifikante Reduktion der Gesamtmenge vorgenommen worden, weil in diesen Branchen eine erhebliche Menge kurz- und langfaserverstärkter Bauteile verwendet wird. In anderen Branchen, bspw. Luftfahrt, Marine und Windenergie, ist der weit überwiegende Anteil der hergestellten GFK-Menge endlosfaserverstärkt.

Im Bereich CFK ist eine Abgrenzung hinsichtlich der Länge der eingesetzten Fasern einfacher, weil fast ausschließlich Endlosfasern zum Einsatz kommen. Ein gezielter Einsatz von Carbon-Kurzschnittfasern ist aus Kostengründen meist nicht sinnvoll, sondern wird vor allem dadurch getrieben, dass bspw.

der Verschnitt, der bei der Verarbeitung von Endlosfaserhalbzeugen auftritt, zu Schnitffasern verarbeitet wird. Der Anteil macht branchenübergreifend jedoch maximal 10% aus.

CFK-Anwendungen werden insgesamt auch 2020 noch immer eine kleine Nische gegenüber GFK bleiben, ihr Anteil wird jedoch von weniger als 3% (2011) auf knapp 7% des gesamten Marktes für hochfeste Faserverbundbauteile ansteigen.

Abbildung 19: Nachfrageprognose für endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe



1) Bauindustrie, Rohre und Tanks liegen an der Grenze der hochfesten Materialien im Fokus der Studie, sind aber der Vollständigkeit halber aufgeführt
Quelle: AVK; Composites Forecasts and Consulting LLC; Industry Experts Publications; SGL Carbon; Roland Berger Marktmodell

Die Nachfrage nach hochfestem CFK wächst branchenspezifisch sehr unterschiedlich: An erster Stelle ist mit großem Abstand das Segment Automotive zu nennen, von dem die größten Wachstumsimpulse ausgehen und wo ein durchschnittliches jährliches Wachstum von mehr als 30% p.a. bis 2020 erwartet wird. Auf den Plätzen folgen die Windenergie mit 20% Wachstum p.a., getrieben durch die Substitution von GFK in längeren Blättern, sowie Andere (inklusive Maschinen und Anlagenbau) mit 14%. Auch die Luft- und Raumfahrt weist mit 12% ein deutlich zweistelliges Nachfragewachstum auf, allein im Bereich Sport ist eher eine Stagnation mit nur 2% Wachstum zu erwarten.

Der Bedarf für endlosfaserverstärktes GFK wächst über die Branchen hinweg deutlich gleichmäßiger. Das größte Wachstum wird bis 2020 mit etwa 7% p.a. bei Luft- und Raumfahrt- sowie Automobil- und Transportanwendungen prognostiziert. Der Bereich Marine wächst mit durchschnittlich 3% p.a. bis 2020 am langsamsten.

4. Industrialisierung der Produktionsprozesse – Treiber, Restriktionen und mögliche Standards

Aus der wachsenden Nachfrage nach hochfesten Composites und dem damit verbundenen Übergang von Kleinserien zu mittleren Serien in der Größenordnung 10.000er-Stückzahlen ergeben sich branchenübergreifend neue Fragestellungen und Anforderungen an die Produktionstechnik. In diesem Kapitel wird dargestellt, wie sich daraus entsprechende branchenübergreifende Standards ergeben können. Zu diesem Zweck werden zunächst die Anforderungen konkretisiert, um anschließend die Eignung bestehender Produktionskonzepte und Herstellungsverfahren entsprechend zu untersuchen und zu bewerten.

4.1 Anforderungen an den Serienprozess – Treiber der Industrialisierung

Die Produktionstechnik muss branchenübergreifend angesichts der wachsenden Seriengröße sicherstellen, dass entsprechende Anlagen mit der nötigen Produktivität zur Verfügung stehen und weiteren branchenspezifischen Anforderungen Rechnung tragen, die in Abbildung 20 zusammengefasst sind.

Abbildung 20: Anforderungen an den Serienprozess



Quelle: Expertengespräche; Roland Berger

Für Automotive-Anwendungen müssen speziell die Zyklus- und Taktzeiten gesenkt werden, um die zunehmenden Seriengrößen bedienen zu können. Eine Senkung der Fertigungskosten und somit der Stückkosten ist insbesondere von Bedeutung, um die Position im Wettbewerb mit metallischen

Bauteilen zu verbessern und um langfristig für eine zunehmende Anzahl von Bauteilen den Sprung vom Super-Premium-Segment in andere Segmente schaffen zu können.

Auch in der Luftfahrt wird – insbesondere bei Kurzstreckenflugzeugen – der Kostenaspekt zunehmend wichtig, jedoch spielen andere Gesichtspunkte eine noch größere Rolle: die maximale Präzision der Bauteile und die höchste Prozessstabilität. Dies liegt einerseits an den hohen Sicherheits- und Zertifizierungsanforderungen, zusätzlich ist jedoch auch ein ökonomisches Interesse gegeben: In der Luftfahrt sind viele Bauteile sehr groß und dementsprechend auch sehr teuer. Fehler im Fertigungsprozess führen wegen der angesprochenen Sicherheitsaspekte in der Regel zu einer Ausschleusung des gesamten Bauteils, was mit hohen Kosten verbunden ist. Daher ist eine möglichst niedrige Ausschussquote anzustreben, wofür eine hohe Prozessstabilität notwendig ist. Die Anforderungen an die Präzision resultieren aus der Kombination von möglichst geringem Gewicht bei gleichzeitig hoher Sicherheit. Nur wenn die Fertigung mit hoher Präzision erfolgt, kann das Bauteildesign in Grenzbereiche vorstoßen und können die Sicherheitszuschläge entsprechend klein gehalten werden. Ein weiterer Aspekt, der in der Luftfahrt besonders ausgeprägt ist, sind die Anforderungen an die Komplexität der Geometrie und insbesondere den Lagenaufbau. Auch geometrisch nicht sehr komplexe Bauteile, bspw. Flügelschalen, haben in der Regel einen komplexen Lagenaufbau mit vielen unterschiedlichen Faserorientierungen und Wandstärken, d.h. auch diversen Querschnittsprüngen.

Die spezifischen Bedürfnisse in der Windindustrie unterscheiden sich wiederum stark von den beiden zuvor betrachteten Branchen. Neben den "riesigen" Dimensionen der Rotorblätter sind die Kosten der Fertigungsanlagen die wesentlichsten Kriterien. Zumindest solange die Blätter noch mit der heute am weitesten verbreiteten Technologie aus zwei Halbschalen hergestellt werden, ist die Länge der Bauteile von mehr als 50 m eine erhebliche Hürde für die Automatisierung des Fertigungsprozesses. Es gibt beispielsweise keine Pressen in der entsprechenden Größe, sodass sehr wahrscheinlich das Vakuuminfusionsverfahren weiterhin das Mittel der Wahl bleibt.

Unterstützende Automatisierungslösungen, bspw. zur Ablage der trockenen textilen Halbzeuge, sind zwar schon entwickelt worden, haben sich aber bisher am Markt nicht durchgesetzt, was hauptsächlich an den hohen Anlagenkosten liegen dürfte: Unter anderem wegen der nötigen Größe der Anlagen kommen in der Regel Kosten von mehreren Millionen EUR zusammen. Dies ist dann aus zwei Gründen oftmals kein Business Case mehr: Erstens ist die Anzahl der pro Anlage hergestellten Blätter zu gering (in der Regel nur 100er-Serien), d.h., die Anlagenkosten lassen sich nur auf eine geringe Anzahl von Bauteilen umlegen. Zweitens spielt auch eine große Rolle, dass der zeitaufwendigste Prozess nicht die Ablage der Halbzeuge, sondern das Aushärten des Harzes ist.

Der Zusatznutzen eines schnelleren Ablagevorgangs der Textilien ist somit moderat, weil er nicht direkt den gesamten Takt beschleunigen kann. Derzeit richten sich die Anforderungen der Windenergie daher weniger auf die vollautomatisierte Ablageeinrichtung, sondern auf eine Optimierung einzelner Arbeitsschritte, bspw. bei der Nachbearbeitung (Besäumen, Schleifen etc.) durch maßgeschneiderte, automationsgestützte Lösungen. Die Anforderungen im Maschinenbau sind maßgeblich durch die kleinen Serien bestimmt: Eine Automatisierung muss entsprechend flexibel sein, um der hohen Teilevarianz gerecht zu werden. Die weiteren Anforderungen unterscheiden sich sehr stark je nach dem konkreten Anwendungsfall und sind daher nur schwer zu verallgemeinern.

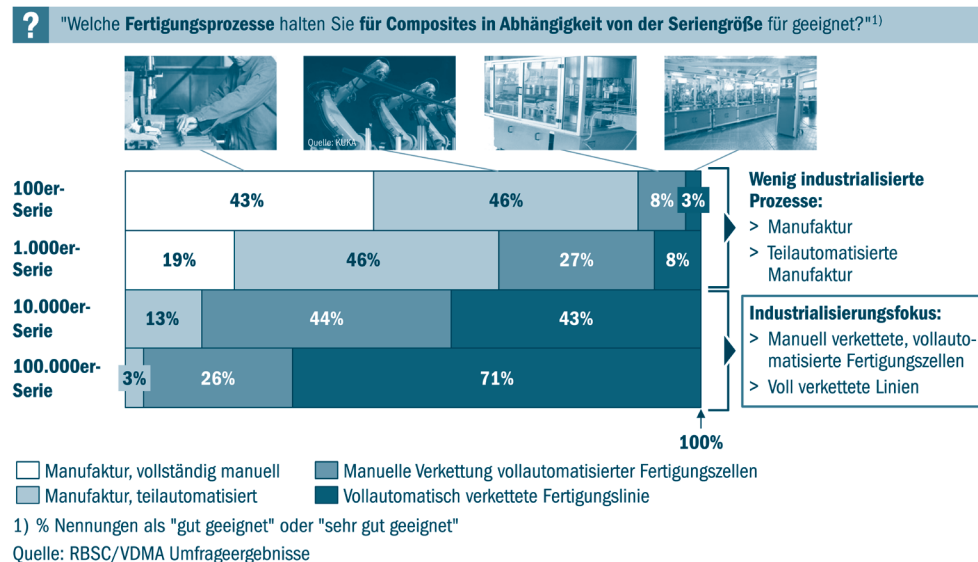
Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass eine wirtschaftliche Fertigung größerer Stückzahlen eine Automatisierung erfordert. Mit Ausnahme der Windenergie, die spezielle Lösungen benötigt, sind für die anderen Branchen geeignete Produktionskonzepte und Verfahren zu schaffen, mit denen die Anforderungen der Serienproduktion erfüllt werden können.

4.2 Restriktionen – Produktionskonzept und Fertigungsverfahren

4.2.1 Eignung unterschiedlicher Produktionskonzepte

Vor der Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren muss im ersten Schritt sinnvollerweise das Produktionskonzept festgelegt werden. Abbildung 21 veranschaulicht die Ansichten der befragten Maschinen- und Anlagenbauer zu der Frage, welche Fertigungsprozesse abhängig von der Seriengröße als gut oder sehr gut geeignet bewertet werden.

Abbildung 21: Einschätzung der Eignung unterschiedlicher Produktionskonzepte



Für 100er- und 1.000er-Serien dominiert dabei eine vollständig manuelle oder eine teilautomatisierte Manufaktur mit 89% der Nennungen. Nur 11% votierten für manuell verkettete, vollautomatische Fertigungszellen oder eine vollautomatisch verkettete Linie. Die jeweils größte Zustimmung mit 46% hatte in beiden Fällen die teilautomatisierte Manufaktur, bei der bestimmte ursprünglich manuelle Arbeitsschritte automationsgestützt ablaufen. Dies kann bspw. das robotergestützte Ablegen von Prepregs in einer Form sein. Durch die erhöhte Wiederholgenauigkeit gegenüber der vollständig manuellen Arbeit ist dies auch bei kleinen Serien sinnvoll, wenn hohe Präzisionsanforderungen gestellt werden.

Einen wenig industrialisierten Prozess halten die Befragten im Vergleich zu industrialisierten vollautomatischen Fertigungszellen bzw. voll verketteten Linien bis zur Größenordnung der 1.000er-Serien für überlegen.

Bei einer 10.000er-Serie werden – wie nicht anders zu erwarten war – die stärker industrialisierten Konzepte jedoch deutlich besser bewertet: Während die vollständig manuelle Manufaktur keine Rolle mehr spielt und nur 13% eine teilautomatisierte Manufaktur für geeignet halten, entfallen 44% der Stimmen auf die manuelle Verkettung vollautomatischer Fertigungszellen und 43% auf voll verkettete Linien. Bei 100.000er-Serien liegt die voll verkettete Linie mit 71% klar vor den Fertigungszellen mit 26%.

Bei der Einschätzung dieser Aussagen muss berücksichtigt werden, dass der Maschinen- und Anlagenbau in der Lage ist, hoch automatisierte Anlagen anzubieten, die einen deutlich höheren Wert und damit höheres Umsatzpotenzial haben. Für die unterschiedlichen Anwendungen muss der optimale Automatisierungsgrad noch gefunden werden. Dies wird insbesondere im Bereich der 10.000er-Serien deutlich: Anlagenbetreiber/OEMs sehen an dieser Stelle in geringerem Umfang die voll verketteten Linien mit dem entsprechend hohen Investitionsvolumen, sondern präferieren eher manuell verkettete, automatisierte Fertigungszellen. Neben dem geringeren Investitionsvolumen ist dies zusätzlich in vielen Anwendungen auch der höheren Flexibilität der manuellen Verkettung geschuldet, weil nicht bei jeder Modifikation eine gesamte Linie neu programmiert werden muss.

Ein weiterer Vorteil der Fertigungszellen ist auch, dass sie bei Bedarf später durch eine weitere Erhöhung des Automatisierungsgrades zu einer voll verketteten Linie "zusammenwachsen" können. Somit wird Flexibilität in Form einer mit den zunehmenden Seriengrößen mitwachsenden Lösung geschaffen.

Für die bis 2020 erwarteten dominierenden Seriengrößen im 10.000er-Bereich, erscheint daher das Produktionskonzept der manuell verketteten, vollautomatisierten Linien am wahrscheinlichsten. Daher sollte sich die Industrialisierung folgerichtig besonders stark auf dieses Konzept konzentrieren.

4.2.2 Eignung der unterschiedlichen Fertigungsverfahren

Im zweiten Schritt stellt sich die Frage, welche der bestehenden Herstellungsverfahren sich sowohl für die branchenspezifischen Anforderungen als auch für die notwendige Industrialisierung eignen. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass alle derzeit verwendeten Verfahren gewissen Herausforderungen gegenüberstehen, die teilweise verfahrensübergreifend sind.

Für alle auf einer Duromer-Matrix basierenden Verfahren ist insbesondere die Aushärtungszeit des Duromerharzes zu nennen, die bei praktisch allen Verfahren (mit gewissen Einschränkungen bei Pultrusions- und Wickelverfahren) die limitierende Prozessgröße ist, die die Zykluszeit bestimmt. Dies gilt bspw. sowohl für die Aushärtung von Rotorblättern für Windenergieanlagen als auch für die Aushärtung von Flugzeugstrukturbauteilen im Autoklaven und auch bei Bauteilen, die im RTM-Verfahren hergestellt werden. Bei letztgenanntem Verfahren liegt die Verweildauer in der Presse bei derzeitigen Harzen in der Größenordnung von 5 bis 15 Minuten und ist damit wesentlich geringer als bei den beiden anderen erwähnten Verfahren mit jeweils mehreren Stunden. Dennoch ist dieser Prozessschritt derjenige, der auch beim RTM-Verfahren die Zykluszeit festlegt, weil alle anderen Prozesse bspw. mithilfe geeigneter Automatisierung beschleunigt werden können. Die Aushärtungszeit hängt jedoch maßgeblich von den Materialeigenschaften des Harzes ab und kann nur begrenzt durch die Prozessführung beschleunigt werden.

Eine weitere verfahrensübergreifende Herausforderung besteht in der Sicherstellung der geforderten Bauteilqualität. Während bei dünnwandigen metallischen Bauteilen in der Regel durch eine Inspektion der Oberfläche ein entsprechender Nachweis mit einfachen Mitteln erbracht werden kann, sind bei Compositebauteilen Defekte im Inneren eines Bauteils ein erheblicher Risikofaktor. Um derartige Risiken auszuschließen, ist entweder eine sehr aufwendige vollständige Prüfung aller Bauteile nach der Fertigstellung nötig (mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren wie Ultraschall), oder der Nachweis ist auf andere Weise zu führen. Verfahren, die auf der Tränkung eines trockenen Halbzeugs basieren, sind in diesem Zusammenhang besonders hervorzuheben, weil sowohl das gesamte Halbzeug vollständig umschlossen werden muss als auch die Faserorientierung nicht unkontrolliert durch den Injektionsvorgang beeinflusst werden darf. Während in der Luftfahrt alle strukturellen Bauteile eine 100%-Prüfung durchlaufen, ist dies in anderen Branchen aus Kostengründen kaum vorstellbar.

Eine wesentliche Herausforderung von Prepreg-basierten Verfahren beginnt zudem schon weit vor dem eigentlichen Produktionsprozess der Bauteile: Damit es nicht zu vorzeitiger Vernetzung des Harzes kommt, ist eine entsprechende Kühlung bei Lagerung und Transport der Halbzeuge notwendig. Dies erfordert neben den entsprechenden Räumlichkeiten auch einen erheblichen Energieaufwand und komplexe Transportlogistik, was die Gesamtkosten des Verfahrens erheblich beeinflusst. Darüber hinaus verursacht die notwendige Aushärtung im Autoklaven insbesondere bei Großbauteilen einen erheblichen Aufwand: Neben den Investitionen für einen hochgenau regelbaren und entsprechend großen Autoklaven ist der damit verbundene Zeitaufwand (in der Regel mehrere Stunden) kaum für die Produktion größerer Serien geeignet.

Alle Verfahren, die nicht auf der direkten Ablage von einzelnen Fasern, sondern auf textilen Halbzeugen basieren, haben darüber hinaus gemeinsam, dass es bei der Bauteilherstellung in teils erheblichem Umfang (oft bis zu 30%) zur Entstehung von Produktionsabfällen durch Verschnitt kommt. Dies können sowohl trockene Halbzeuge sein, wenn entsprechende Formen aus Rollenware geschnitten werden, als auch Abschnitte von Prepregmaterial. Insbesondere bei trockenen Fasern ist zwar eine gewisse Weiterverwendung der Abfälle möglich, führt jedoch zu minderwertigerem Halbzeug, das nicht mehr vollständig die mechanischen Eigenschaften des ursprünglichen Materials besitzt.

Innerhalb der Prozesskette des RTM-Verfahrens ist insbesondere das Handling und die entsprechend genaue Positionierung von biegeschlaffen Halbzeugen schwierig: Bis zur Injektion des Harzes und der Aushärtung sind in mehreren Schritten trockene textile Halbzeuge zu handhaben, die biegeschlaff sind und zudem über eine ungleichmäßige Oberfläche verfügen. Ein prozesssicheres Handling mit hoher Geschwindigkeit ist nur mit speziellen Systemen, bspw. basierend auf Nadel- oder Gefriergreifern, möglich und erreicht mit der derzeitigen Technik noch nicht die in Transferstraßen für metallische Bauteile übliche Handlinggeschwindigkeit.

Neben den genannten Herausforderungen spielt bei der Auswahl von zukunftsfähigen Verfahren für größere Serien auch die Eignung des jeweiligen Herstellverfahrens für verschiedene Fertigungskonzepte eine große Rolle. Abbildung 22 bietet dazu in einer Übersicht eine Einschätzung der Eignung der in Kapitel 2.2 beschriebenen Verfahren. Für diese Einschätzung wurden die wesentlichen Teilschritte der jeweiligen Verfahren analysiert und hinsichtlich der Automatisierbarkeit ausgewertet. Zudem sind der Bedarf an Maschinen und Anlagen sowie die erreichbaren Taktzeiten wesentliche Bewertungskriterien.

Abbildung 22: Einschätzung der Eignung von Herstellverfahren für verschiedenen Fertigungskonzepte

	Manufaktur	Teilautomatisierte Manufaktur	Vollautomatisierte Fertigungszellen	Voll verkettete Fertigungslinie	RELEVANTE KRITERIEN
Prepreg-Ablegeverfahren ²⁾	■	■			> Wesentliche Teilschritte des Verfahrens
Vakuum-infusionsverfahren	■	■			> Automatisierbarkeit der Einzelschritte
Handlaminieren	■	■			> Bedarf an Anlagen und Maschinen
Ablage imprägnierter Fasern ²⁾	■	■			> Taktzeiten
Form-/Fließpressen ³⁾			■	■	
Harzübertragungsverfahren (RTM)			■	■	
Pultrusion			■	■	
Faserwickelverfahren			■	■	

1) Mit manueller Verkettung 2) Mit Aushärtung im Autoklaven 3) Inkl. Organoblech
 Quelle: Experteninterviews; Desk-Research; Roland Berger

Prepreg-Ablegeverfahren, Vakuuminfusionsverfahren und Handlaminieren scheinen sehr gut für eine Manufaktur bzw. eine teilautomatisierte Manufaktur geeignet, sind jedoch für vollautomatisierte Fertigungszellen oder gar voll verkettete Linien kaum vorstellbar. Bei diesen drei Verfahren ist eine Automatisierung einzelner Teile (bspw. das Ablegen des Prepregs) gegebenenfalls schon heute Stand der Technik, eine weitere Industrialisierung in Richtung der vollautomatisierten Fertigungszelle scheint jedoch kaum möglich bzw. sinnvoll, bspw. aus Gründen der Bauteilgröße und Komplexität sowie der Taktzeit.

Die Ablage imprägnierter Fasern ist besonders gut in einer teilautomatisierten Manufaktur abzubilden, weil insbesondere das eigentliche Ablegen der Faser in einer Form in einem rein manuellen Prozess nur schwer mit der notwendigen Präzision zu wiederholen ist. Auch hier ist jedoch die weitere Industrialisierbarkeit begrenzt – unter anderem deshalb, weil der Ablagevorgang relativ lange dauert, was neben der Aushärtung im Autoklaven tendenziell zu sehr hohen Taktzeiten führen würde.

Für ein stärker industrialisiertes Produktionskonzept deutlich besser geeignet sind die verbleibenden Verfahren: Form- und Fließpressen (inkl. Organoblech), RTM-Verfahren, Pultrusion und Wickelverfahren.

Pultrusion und Wickelverfahren nehmen dabei einen gewissen Sonderstatus ein, weil diese beiden Verfahren nur für weitgehend symmetrische Bauteile wie Profile, Rohre oder konvexe Bauteile wie Tanks etc. (Wickeln) geeignet sind. Daher spielen beide Verfahren keine relevante Rolle bei Flächenbauteilen und komplexen Strukturbauteilen. Zum anderen heben sich diese beiden Verfahren auch hinsichtlich des Herstellungsprozesses etwas von den anderen Verfahren ab: Sie verwenden im Wesentlichen eine Einzelmaschine. Dabei wird entweder kontinuierlich ein Profil oder Rohr hergestellt, das dann nur noch entsprechend abzulängen ist, oder ein entsprechendes Teil gewickelt, indem die Faser mit einem Wickelkopf auf einem entsprechenden Kern abgelegt wird. Dies geschieht schon heute in einem in der Regel hoch automatisierten Prozess auf einer Einzelmaschine. Folgerichtig stellen sich die Fragen der Verkettung etc. bei diesen beiden Verfahren nur bedingt.

Als besonders geeignete Kandidaten für vollautomatisierte Fertigungszellen verbleiben damit einerseits Form- und Fließpressen und andererseits das RTM-Verfahren inklusive seiner Derivate wie Nasspressverfahren. Mit diesen Verfahren lassen sich Taktzeiten im Bereich von einigen Minuten realisieren und viele Prozessschritte sind automatisierbar. Manufakturkonzepte mit hohem manuellen Aufwand und langen Taktzeiten sind unter Berücksichtigung der Vielzahl von notwendigen Anlagen (Prozessschritten) bspw. Presse, Kunststoffverarbeitungsmaschinen (Mischer, Injektionseinheit) und Heizöfen für diese Verfahren wirtschaftlich nur wenig tragfähig. Da beide Verfahren auf dem Einlegen von Halbzeugen in eine Presse basieren, erscheint auch die Zukunftsfähigkeit im Hinblick auf Hybridbauteile gegeben, weil bspw. metallische Einleger relativ einfach hinzugefügt werden können.

4.3 Entwicklungspfad und Standardverfahren

4.3.1 Potenzieller Entwicklungspfad

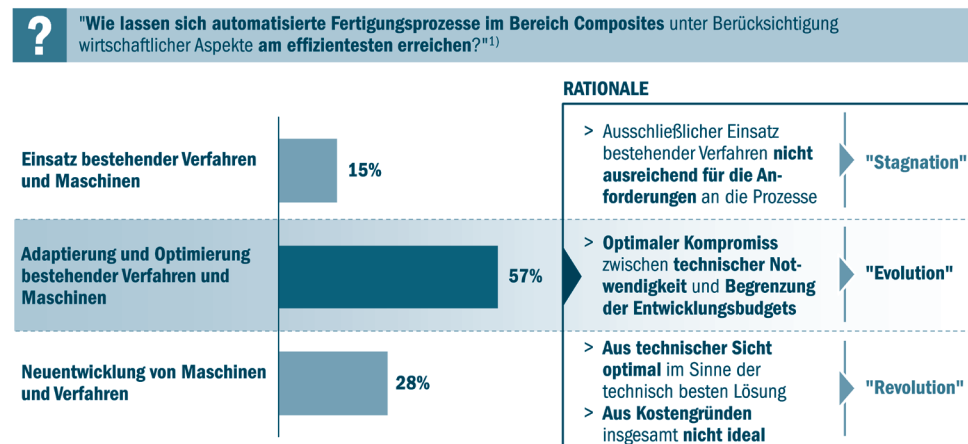
Fassen wir an dieser Stelle die bisherigen Erkenntnisse im Hinblick auf die Industrialisierung der Herstellungsprozesse endlosfaserverstärkter Composites kurz zusammen:

- > Bis 2020 werden schwerpunktmäßig 10.000er-Serien prognostiziert
- > Für diese Seriengröße sind vollautomatisierte Fertigungszellen besser geeignet als voll verkettete Linien, die erst ab 100.000er-Serien zu bevorzugen sind
- > Für Konzepte auf Basis vollautomatisierter Fertigungszellen sind Pressverfahren sowie RTM-Verfahren aus heutiger Sicht am besten geeignet

- > Diese beiden Verfahren erscheinen auch langfristig zukunftsfähig, da sie einerseits eine (spätere) Erhöhung des Automatisierungsgrades in Richtung 100.000er-Serien erlauben und sich andererseits auch potenziell für Hybridbauteile eignen
- > Last but not least fallen diese Verfahren zwar in die Klasse der Verfahren mit geometrischen Restriktionen (insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Bauteilgröße), sind aber branchenübergreifend für eine Vielzahl von Struktur- und Flächenbauteilen geeignet.

Wie kann nun – auf der Basis dieser Erkenntnisse – die Industrialisierung der Produktionsprozesse erfolgen? Grundsätzlich scheinen dazu drei Entwicklungspfade geeignet: Der weitgehend unveränderte Einsatz bestehender Maschinen und Verfahren, eine Adaptierung und Optimierung bestehender Verfahren und Maschinen oder die vollständige Neuentwicklung entsprechender Anlagen und Verfahren "from scratch". Eine Einschätzung des Eignungsgrades dieser drei Varianten aus Sicht der Maschinen- und Anlagenbauer gibt Abbildung 23. Mit 57% der Stimmen halten sie die Adaptierung/Optimierung bestehender Maschinen und Verfahren für wesentlich geeigneter als die Neuentwicklung (28%) oder den Einsatz bestehender Maschinen (15%).

Abbildung 23: Entwicklungspfade zur Industrialisierung der Prozesse



1) Bezeichnung als "gut geeignet" oder "sehr gut geeignet"

Quelle: RBSC/VDMA Umfrageergebnisse

Dies ist insoweit gut nachvollziehbar, als der alleinige Einsatz der bestehenden Verfahren und Maschinen nicht in ausreichendem Maße zur geforderten

Industrialisierung führt, sondern eher eine Stagnation bewirkt. Insbesondere die Kostensenkungspotenziale des Herstellungsprozesses lassen sich so nicht realisieren.

Die vollständige Neuentwicklung von Maschinen/Anlagen und Verfahren wäre zwar aus technischer Sicht optimal, ist aber mit erheblichen Entwicklungskosten verbunden. Vor dem Hintergrund des insgesamt noch mäßigen Marktvolumens (vergl. Abschnitte 3.4 und 5.3) ist eine Umlage dieser Kosten auf eine hohe Anzahl von Anlagen auf absehbare Zeit nicht möglich, weshalb auch diese Vorgehensweise nicht als ideal erscheint.

Als Kompromiss verbleibt somit die Adaptierung und intelligente Optimierung der Verfahren und Maschinen. Diese evolutionäre Strategie birgt insgesamt ein hohes Erfolgspotenzial. Die befragten Experten stimmen praktisch alle darin überein, dass die grundlegenden Funktionalitäten der Verfahrenseinzelschritte schon heute für entsprechende Serienproduktion tauglich sind. Weitere Potenziale bieten die übergreifende Optimierung des Gesamtprozesses und inkrementell verbesserte Detailschritte. Zudem ist diese evolutionäre Vorgehensweise unter dem Aspekt limitierter Entwicklungsbudgets effizienter als vollständige Neuentwicklungen, weil sie wesentlich kostengünstiger ist und unter Umständen direkte Synergien mit anderen Bereichen nutzen kann.

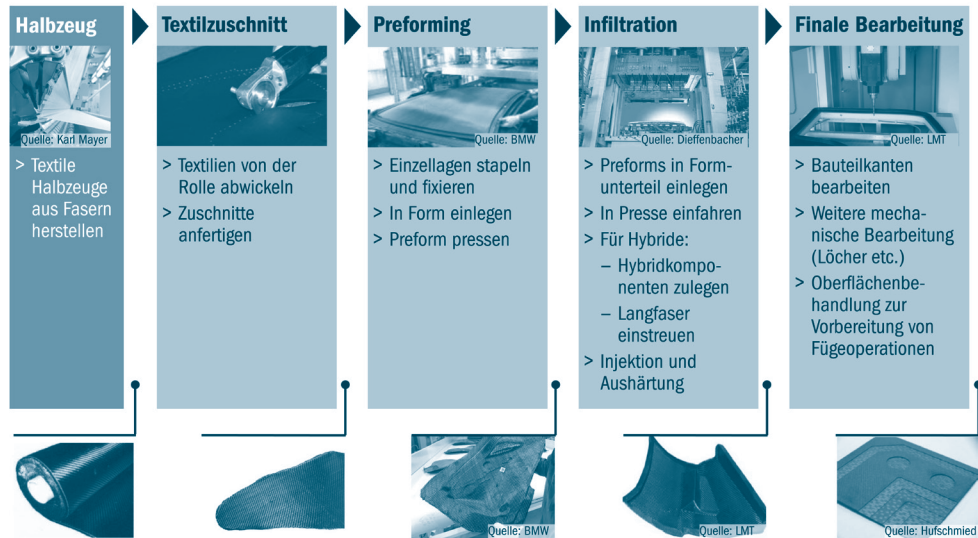
4.3.2 Potenzielle Standardverfahren

Wie können nun mögliche Standardverfahren aussehen, die sich aus den bestehenden Verfahren wie beschrieben evolutionär entwickeln? Diese Frage ist verfahrensübergreifend nicht konkret zu beantworten. Daher werden das RTM- und das Pressverfahren betrachtet, die wie erwähnt als besonders für eine Industrialisierung geeignet eingeschätzt werden. Ausgangspunkt ist dazu die heutige Prozesskette der jeweiligen Verfahren.

RTM-Verfahren

Für das RTM-Verfahren (vergl. Abbildung 24) startet die Prozesskette mit der Herstellung des Halbzeugs. Dabei werden aus der Carbon- oder Glasfaser mithilfe textiltechnischer Verfahren entsprechende Halbzeuge produziert. Am weitesten verbreitet ist dabei Rollenware, d.h. Gewebe, Gewirke oder Gelege, die in einem heute schon sehr effizienten, hoch automatisierten Prozess auf Textilmaschinen industriell hergestellt und dann zunächst auf Rollen aufgewickelt werden. Die Herstellung dieser Halbzeuge wird überwiegend von spezialisierten Anbietern für diese sogenannten technischen Textilien durchgeführt, die als Zulieferer für die Bauteilhersteller agieren.

Erster Schritt der Bauteilherstellung ist der Zuschnitt von Formen aus der angelieferten Rollenware. Dazu werden die Rollen (unter Umständen in mehreren Lagen übereinander) abgewickelt und anschließend die gewünschten Formen ausgeschnitten.

Abbildung 24: Heutiger RTM-Prozess für mittlere Serien

Diese ausgeschnittenen Formen werden im nächsten Schritt entsprechend gestapelt, mit Binder fixiert und in eine Form eingelegt. In einer speziellen Preform-Presse werden dann die entsprechenden Preforms hergestellt. Je nach Größe und Geometrie des Bauteils kann unter Umständen nur ein Preform für das gesamte Bauteil ausreichen (bei kleineren und/oder kompakten Bauteilen ohne größere Löcher/Durchbrüche). Bei großen und geometrisch komplexen Bauteilen werden jedoch oftmals mehrere Einzel-Preforms hergestellt, bspw. verwendet BMW für die Seitenteile des i3 bis zu neun kleine Preforms. Die optimale Aufteilung ist dabei von verschiedenen Parametern wie Drapierbarkeit, Verschnitt, mechanischen Anforderungen an das finale Bauteil etc. abhängig.

Im nächsten Schritt wird/werden der/die Preform(s) in das RTM-Werkzeug eingelegt. Dazu bietet es sich insbesondere bei dem Zusammenlegen aus mehreren Preforms an, Werkzeugsätze mit nur einem Oberteil, aber mehreren Unterteilen zu verwenden. Dadurch können die beiden Unterteile abwechselnd in die Pressen verfahren werden, wodurch man das Einlegen der Preforms in die Nebenzeit verlagern kann.

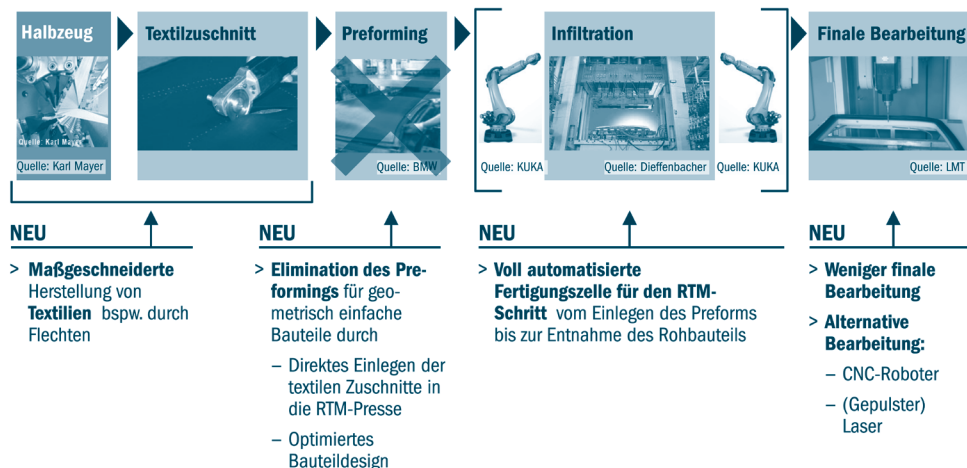
Alternativ kann das Zusammenlegen auch in einer einfachen "Holzform" geschehen, die allein der Positionierung der einzelnen Preforms dient. Das entstehende Preform-Gebilde muss dann mithilfe einer geeigneten Vorrichtung als Ganzes schnell in das RTM-Werkzeug eingebracht werden. Im Falle von

Hybridbauteilen sind an dieser Stelle zusätzlich entsprechende Einleger mit in das Werkzeug einzubringen oder gegebenenfalls Langfasern einzustreuen. Nach dem anschließenden Zufahren der Presse wird Harz injiziert, und der Aushärtungsprozess beginnt.

Nachdem eine ausreichende Aushärtung erreicht ist (derzeit üblicherweise nach rund 10 Minuten) wird die RTM-Pressen wieder aufgeföhren, das Rohbauteil wird entnommen und der finalen Bearbeitung zugeführt. Dabei werden dann bspw. die Bauteilkanten besäumt und gegebenenfalls weitere mechanische Bearbeitungsschritte durchgeführt. Zum Einsatz kommen dabei meist spanabhebende Verfahren wie Fräsen oder Wasserstrahl-schneiden. Zusätzlich werden eventuelle Oberflächenbehandlungen zur Vorbereitung von Fügeoperationen durchgeführt, bevor dann das einbaufertige, finale Bauteil vorliegt.

Wie zuvor schon erwähnt, wird derzeit an vielen Elementen dieses Prozesses gearbeitet, wodurch auch der Gesamtprozess evolutionär optimiert wird. Entlang der gesamten Prozesskette sind ausgehend vom Halbzeug vier wesentliche Optimierungspotenziale identifiziert worden, die in ihrem Zusammenspiel auf der Basis des heutigen Prozesses zu einem voll industrialisierten RTM-Prozess für mittlere Serien führen können (vergleiche Abbildung 25).

Abbildung 25: Möglicher voll industrialisierter RTM-Prozess für mittlere Serien (10.000er)



Quelle: Experteninterviews

Am Anfang der Prozesskette steht die Anfertigung maßgeschneiderter Textilien im Fokus: Durch die Verwendung zusätzlicher Textiltechniken wie Flechten oder Sticken oder die Kombination verschiedener Techniken miteinander lassen sich im Idealfall schon endkonturnahe textile Halbzeuge herstellen. Dadurch kann dann unter Umständen der Verschnitt erheblich reduziert werden.

Weiterhin erscheint es möglich, den Prozess des Preforming für einfache Geometrien zumindest teilweise zu eliminieren, indem die zugeschnittenen bzw. im Idealfall maßgeschneiderten Halbzeuge direkt in das RTM-Werkzeug gelegt werden. In Verbindung mit einem entsprechend optimierten Bauteildesign lassen sich so unter Umständen erhebliche Preforming-Aufwendungen einsparen.

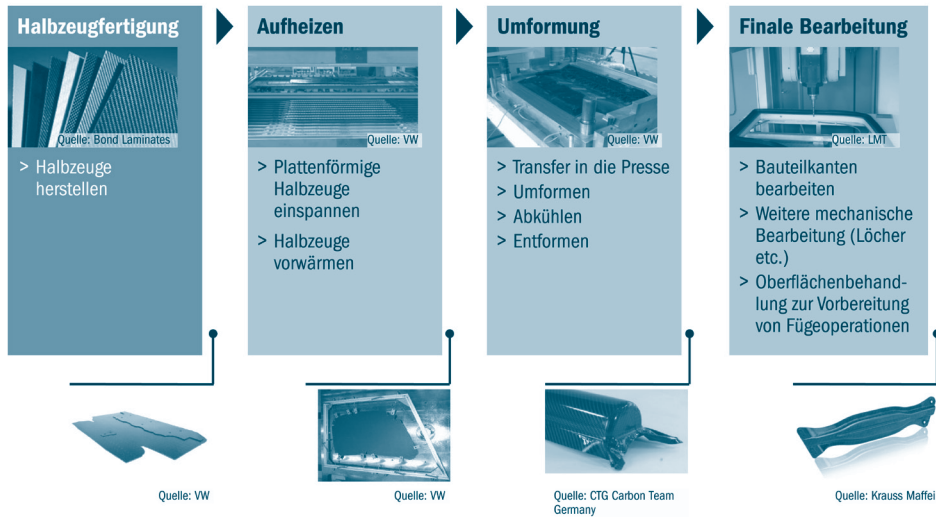
Für den Kernschritt des Verfahrens, die Infiltration, bietet sich eine komplette Automatisierung in Form einer Fertigungszelle an, bei der vom Abstapeln der Preforms/Textilien bis hin zur Entnahme des Rohbauteils (nach der Aushärtung) aus der Form und Ablage auf einem Stapel alles vollautomatisch abläuft.

Auch bei dem letzten Glied der Kette werden verschiedene Optimierungen stattfinden: Neben einer Verringerung der notwendigen Bearbeitung durch endkonturnahe Rohbauteile werde alternative Bearbeitungstechnologien wie CNC-Roboter oder (gepulste) Laser potenziell die finale Bearbeitungstechnologie verändern.

Formpressverfahren

Im Gegensatz zum RTM-Verfahren basiert das Thermoplast-Formpressen (vergl. Abbildung 26) nicht auf trockenen Faserhalbzeugen, sondern auf plattenförmigen Halbzeugen, die schon aus dem Verbund der Thermoplastmatrix und dem Fasermaterial in Form von Gewebe oder Gelege bestehen. Diese Halbzeuge werden in der Regel in einem kontinuierlichen Prozess auf sogenannten Doppelbandpressen hergestellt.

Im ersten Schritt der Bauteilfertigung werden diese Halbzeuge grob zugeschnitten und in einem speziellen Ofen aufgeheizt. Dabei werden oftmals Öfen mit Infrarotstrahlern eingesetzt. Diese ermöglichen besonders schnelle Aufheizraten und eine sehr genaue Prozessführung. Je nach Material der Thermoplastmatrix kann vor dem Zuschneiden bzw. Aufheizen noch ein separater Trocknungsschritt nötig sein.

Abbildung 26: Heutiger Prozess: Thermoplast-Formpressen

Quelle: Experteninterviews; Desk-Research; Roland Berger

Die groben Zuschnitte werden in der Regel vor dem Aufheizvorgang in eine entsprechende Vorrichtung gespannt, in der sie zunächst durch den Ofen laufen und anschließend in die Presse transferiert werden. Je nach konkreter technischer Umsetzung des Verfahrens existieren für dieses Handling jedoch unterschiedliche Verfahren.

In der Presse wird das erwärmte Halbzeug umgeformt und anschließend so weit abgekühlt, dass es als formstabiles Rohbauteil entnommen werden kann. Während der gesamten Prozesskette des Thermoplast-Formpressens spielt die Temperaturführung eine große Rolle: Eine gleichmäßige Bauteilqualität kann nur erzielt werden, wenn der Umformvorgang in hohem Maße reproduzierbar abläuft. Weil das Umformverhalten des Halbzeugs wiederum stark von der Temperatur abhängt, ist eine sehr genaue Temperaturführung erforderlich. So reichen bspw. kleine Verzögerungen beim Halbzeugtransfer aus, um eine etwas zu starke Abkühlung mit entsprechend verändertem Umformverhalten zu bewirken, was zu Ausschuss führen kann.

Als letzter Prozessschritt erfolgt dann – analog zum RTM-Prozess – die finale Bearbeitung des Bauteils. Dabei werden alle Bauteilkanten entsprechend der Vorgaben bearbeitet und/oder weitere mechanische Bearbeitungen vorgenommen.

Ähnlich wie beim RTM-Prozess bestehen auch beim Thermoplast-Formpressen erhebliche Potenziale im Hinblick auf eine Industrialisierung (siehe Abbildung 27). Dieser stärker industrialisierte Prozess wird auch als Organoblech-Umformprozess bezeichnet.

Abbildung 27: Möglicher voll industrialisierter Prozess der Organoblech-Umformung

Quelle: Experteninterviews

Zu Beginn der Prozesskette steht dabei ein Zuschnitt der Halbzeuge, der schon sehr nahe an der finalen Endkontur liegt. Dadurch lassen sich sowohl der Verschnitt als auch die zum Aufheizen benötigte Energie minimieren.

Die wesentlichste Modifikation des Prozesses liegt jedoch im Bereich der Umformung: Anstelle der ausschließlichen Umformung des Halbzeuges in einem Presswerkzeug wird dieser Schritt mit dem Spritzgießen kombiniert. Dabei findet der Umformvorgang in einem Spritzgusswerkzeug statt, in das direkt im Anschluss weiteres Material eingespritzt werden kann. Dies kann entweder ein reines Thermoplastmaterial sein, oder es können Kurz- oder eventuell sogar Langfasern als Verstärkung zugegeben werden. Durch diese Kombination können beispielsweise Versteifungsrippen angespritzt werden, die die mechanischen Eigenschaften des eher flächigen Organoblech-Bauteils für bestimmte Lastfälle verbessern. Zusätzlich können auch Halterungen etc. angespritzt werden, die eine höhere Funktionsintegration erlauben. Das Verfahren führt dabei also quasi automatisch zu einem Hybridbauteil (vergleiche auch Abbildung 12 rechts).

Für nicht zu große Bauteile lässt sich dieses Verfahren durch Kombination der Aufheizeinrichtung, z.B. Infrarot-Ofen, mit einer geeignet modifizierten Spritzgießmaschine und entsprechendem Handlingsystem in relativ kompakten Fertigungszellen darstellen.

Bei einer geeigneten Bauteilkonstruktion ist es durch das Spritzgießen unter Umständen auch möglich, schon das finale Bauteil herzustellen, das keiner weiteren mechanischen Bearbeitung mehr bedarf. Dadurch kann dann die finale Bearbeitung im Idealfall vollständig entfallen.

Neben Organoblech- und RTM-Prozess, die besonders stark von der Industrialisierung der Produktionsprozesse profitieren können, werden auch in Zukunft die anderen weiter oben angesprochenen Verfahren innerhalb der gesamten Verfahrenslandschaft zur Herstellung von hochfesten Faserverbundbauteilen einen gewissen Stellenwert behalten, der sich jedoch durch die Industrialisierung graduell verschieben wird.

Für Profile und konvexe Hohlkörper werden Pultrusion und Wickeln als besonders prädestinierte Verfahren ihre gegenwärtige Bedeutung auch in Zukunft behalten. Beide Verfahren sind schon heute, insbesondere in GFK-Anwendungen, weit verbreitet und in hoch automatisierten Prozessen für eine wirtschaftliche Fertigung umgesetzt.

Bei Struktur- und Flächenbauteilen oberhalb von etwa 10 m² werden RTM-Verfahren die Ausnahme bleiben, was hauptsächlich am notwendigen Investitionsvolumen für entsprechende Pressen (bzw. am grundsätzlich fehlenden Angebot solcher Pressen) liegt. Daher wird dieses Bauteilsegment praktisch exklusiv durch Vakuuminfusionsverfahren bedient werden, nur bei sehr kleinen Serien unterhalb 100 Stück sind auch einfache Handlaminierverfahren eine Option.

Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass es in diesem Segment keine 10.000er-Serien geben wird. Die konkrete Ausgestaltung der Prozesskette wird bei Vakuuminfusionsverfahren abhängig von der Seriengröße von der Manufaktur bis hin zur Teilautomatisierung gehen. Vollautomatische Fertigungszellen oder eine vollständig automatisierte Verkettung wird es jedoch vermutlich nicht geben.

Eine besondere Stellung nehmen Prepreg-basierte Verfahren ein. Während sie heute insbesondere in der Luftfahrt das Mittel der Wahl sind, ist damit zu rechnen, dass ihre Bedeutung mittel- bis langfristig abnehmen wird: Dies lässt sich vor allem durch die Fortschritte bei RTM-Verfahren begründen, mit denen schon heute eine fast gleichwertige Bauteilqualität erzielt werden kann.

Durch weitere Entwicklungsarbeit ist davon auszugehen, dass mittelfristig keine signifikanten Vorteile für Prepreg-basierte Verfahren bestehen bleiben. Insbesondere in der Luftfahrt wird gezielt darauf hingearbeitet, Prepreg-Verfahren wegen der oben erwähnten Nachteile (Kühlkette, hohe Zykluszeit, Autoklaven etc.) wo immer möglich durch andere Verfahren zu ersetzen. Dies wird zwar bis 2020 nicht dazu führen, dass Prepreg-Verfahren vollständig aus der Prozesslandkarte verschwinden, jedoch ist das weitere Zukunftspotenzial über 2020 hinaus aus heutiger Sicht als gering bis moderat zu bewerten.

5. Rolle des Maschinen- und Anlagenbaus – Beiträge, Anforderungsprofil und Geschäftspotenziale

Aus dem klaren Trend zur Industrialisierung der Herstellprozesse in Richtung mittlere Serienproduktion ergeben sich mittelfristig bedeutende Geschäftspotenziale für den Maschinen- und Anlagenbau. In diesem Kapitel werden daher die Beiträge der einzelnen Disziplinen des Maschinen- und Anlagenbaus zu den industrialisierten Prozessketten untersucht und das Geschäftspotenzial sowie die potenzielle Aufstellung der Maschinen- und Anlagenbauer analysiert und bewertet.

5.1 Beitrag einzelner Maschinenbausegmente zur industrialisierten Fertigung hochfester Composites

Der Maschinen- und Anlagenbau nimmt eine Schlüsselposition für die weitere Industrialisierung der Produktionsprozesse hochfester Composites ein. Dabei sind eine Vielzahl von Segmenten des Maschinen- und Anlagenbaus gefordert, einen Beitrag zu den unterschiedlichen Prozessketten zu leisten (vergleiche Abbildung 28).

Abbildung 28: Beiträge des Maschinen- und Anlagenbaus zu den Serienprozessen für Composites

	Harzübertragungsverfahren (RTM)	Form-/Fließpressen inkl. Organoblech	Pultrusion	Faserwickelverfahren
Handling	✓	✓	(✓)	(✓)
Umformmaschinen	✓	✓		
Kunststoffverarbeitungsmaschinen	✓	✓		
Textilmaschinen	✓	✓		✓
Formwerkzeugbau	✓	✓	(✓)	(✓)
Werkzeugmaschinen/Präzisionswerkzeuge	✓	✓	✓	(✓)
Sondermaschinen			✓	

✓ Kernelement (✓) Teilweise involviert

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; VDMA; Roland Berger

An den Prozessketten von RTM- und Form-/Fließpressverfahren sind beispielsweise mindestens sechs Disziplinen beteiligt. Dies beginnt schon bei der Herstellung der Halbzeuge, wo Textilmaschinen und Kunststoffverarbeitungs-

maschinen (Organoblech) eingesetzt werden. In der Bauteilfertigung werden dann Umformmaschinen (in der Regel Pressen), Kunststoffverarbeitungs-
maschinen (bspw. Injektionsanlagen) und Handlingsysteme benutzt. Auch der Formwerkzeugbau, der für die Herstellung der notwendigen Formen/Werkzeuge verantwortlich ist, steuert ein wesentliches Element bei. Insbesondere gegen Ende der Prozesskette kommen dann die Werkzeugmaschinen ins Spiel, die für die finale Bearbeitung der Bauteile benötigt werden und unter Umständen auch schon beim Zuschnitt der Textilien von Bedeutung sind.



An Pultrusions- und Faserwickelverfahren sind insgesamt weniger Segmente des Maschinen- und Anlagenbaus beteiligt. Die Pultrusionsanlage fällt in die Kategorie der Sondermaschinen, ebenfalls involviert sind Handlingsysteme für die entsprechende Handhabung der fertigen Bauteile sowie der Formwerkzeugbau für die notwendigen Formen/Werkzeuge. Die Beiträge beider Disziplinen sind im Vergleich zu RTM- oder Form-/Fließpressen jedoch geringer, weil nur eine recht einfache Form benötigt wird und eine Handhabung der Bauteile in der Regel nur am Ende des Prozesses stattfindet, wenn die Rohbauteile entnommen werden. An dieser Stelle ist dann auch wieder der Werkzeugmaschinenbau gefragt, um aus den pultrudierten Endlosprofilen Bauteile definierter Länge herzustellen.

Faserwickelmaschinen fallen in die Kategorie der Textilmaschinen, aber auch in diesen Prozess sind weitere Disziplinen involviert: Neben dem Formwerkzeugbau für die entsprechenden Formen/Kerne und den Handlingsystemen für die Bauteile, können auch hier zur finalen Bearbeitung Werkzeugmaschinen involviert sein (unter Umständen werden direkt Fertigteile gewickelt, daher werden Werkzeugmaschinen nicht als Kernelement aufgefasst). Besonders aufschlussreich ist es an dieser Stelle, sich die entsprechenden Kompetenzen, aber auch die Bereiche mit weniger ausgeprägtem Know-how in den jeweiligen Disziplinen zu vergegenwärtigen (Abbildung 29).

Handlingspezialisten verfügen über Know-how in den Bereichen Robotik und Greiftechnik (bzw. in mindestens einem dieser Gebiete) und haben oftmals auch ein erhebliches System-Know-how. Ihnen fehlt im Hinblick auf den Gesamtprozess jedoch im Allgemeinen das Wissen über Kernprozesse/Maschinen, insbesondere die Presse und die Kunststoffverarbeitung.

Prinzipiell ähnlich geht es auch den Herstellern für Umformmaschinen: Sie haben ein tiefes Wissen über vertikale Hochleistungspressen und teilweise zusätzlich eine gewisse Handlingkompetenz, aber ihnen fehlt zum überwiegenden Teil Know-how für die Kunststoffverarbeitung. Umgekehrt haben aber die Hersteller von Kunststoffverarbeitungsmaschinen ausschließlich das Know-how in ihrem Spezialgebiet (und eventuell eine gewisse Handlingkompetenz), ihnen fehlt jedoch die entsprechende Pressentechnik für hohe Kräfte und hohe Präzision, die für die Prozesse notwendig ist.

Abbildung 29: Know-how-Position des Maschinen- und Anlagenbaus

	 EIGENES KNOW-HOW	 "MISSING LINKS"
Handling	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Greiftechnik und Robotik <input checked="" type="checkbox"/> System-Know-how 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Alle Kernprozesse des Verfahrens, insbesondere Pressen und Injektion
Umformmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Vertikale Hochleistungspresse 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Injektion <input checked="" type="checkbox"/> Handling
Kunststoffverarbeitungs- maschinen	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Injektion von Kunststoffen <input checked="" type="checkbox"/> Horizontale Presse, geringe Presskräfte 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Hohe Presskräfte und hohe Präzision
Textilmaschinen	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Herstellung der Textilien 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Alle nachgelagerten Kernprozesse
Formwerkzeugbau	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Herstellung von Formwerkzeugen nach Zeichnung 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Kein Prozess-Know-how
Werkzeugmaschinen/ Präzisionswerkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Zuschnitt der Textilien <input checked="" type="checkbox"/> Finale Bearbeitung der Bauteile 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Kernprozesse der Composite-Fertigung, insbesondere Pressen und Injektion

Know-how vorhanden Know-how fehlt
 Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; VDMA; Roland Berger

Auch die anderen Beteiligten entlang der Prozesskette fokussieren sich auf ein bestimmtes Element und haben nicht das entsprechende Wissen über weitere Kernschritte des Gesamtprozesses: Spezialisten für Textilmaschinen widmen sich der Herstellung der technischen Textilien, wissen aber wenig über die übrigen Prozesse der Bauteilfertigung. Formwerkzeugbauer verfügen zwar unter Umständen über sehr wichtiges Spezialwissen, was das Design der Werkzeuge angeht (teilweise stammt es auch vom Anlagenbetreiber und der Werkzeugbauer fertigt nur nach Zeichnung), sind aber ebenfalls nicht tief genug mit den weiteren Prozessen vertraut. Und auch der Werkzeugmaschinenbau, der entsprechende Maschinen und Schneidwerkzeuge zur finalen Bearbeitung (und eventuell zum Zuschnitt von Formen) bereitstellt, ist sehr auf diese Prozessschritte fokussiert, weiß aber nur wenig über die restliche Prozesskette.

Es bleibt an dieser Stelle also festzuhalten, dass niemand der Beteiligten über das Know-how aller Elemente der Prozesskette verfügt.

Für die weitere Entwicklung der Technologie müssen alle Beteiligte noch viel tun: Nicht nur die Elemente mit eigenem Know-how müssen weiter optimiert und an die Anforderungen der industrialisierten Composite-Fertigung angepasst werden, sondern auch die Schnittstellen zwischen den einzelnen Gewerken. Hier gibt es von der Kommunikation einzelner Maschinen/Systeme miteinander bis hin zu einem zusammenhängenden Datenstrang vom Konstruktionsbüro bis zum Handlingsystem noch in erheblichem Maße Optimierungsbedarf.

Die ganzheitliche Optimierung eines Serienprozesses bietet beträchtliche weitere Potenziale, die heute bei Weitem noch nicht vollständig erschlossen sind.

5.2 Anforderungen an den Maschinen- und Anlagenbau

Welche Anforderungen werden in diesem Zusammenhang konkret an den Maschinen- und Anlagenbau gestellt? Im Rahmen der durchgeführten Expertengespräche haben die OEMs bzw. Hersteller hochfester Compositebauteile Anforderungen formuliert, die sie – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – an den Maschinen- und Anlagenbau stellen:

"Es wäre wünschenswert, wenn Maschinen- und Anlagenbauer eine stärkere Kompetenz im Bereich CFK-Bauteilfertigung aufbauen", wird bspw. seitens der Luftfahrt geäußert. Eine entsprechende Hilfe bei materialspezifischen Fragestellungen (Auslegung, Berechnung, Design) wird dazu angeboten, jedoch mit der konkreten Forderung verbunden, "dass der Maschinenbauer auch mal mit eigenen Ideen für die Fertigung oder für entsprechende Maschinen auf uns [Flugzeughersteller] zukommt." Durch den zunehmenden Kostendruck auch innerhalb der Luftfahrt wächst außerdem der Wunsch, in stärkerem Umfang auf nur leicht modifizierte Serienmaschinen zurückgreifen zu können und weniger – in der Regel erheblich kostspieligere – Sondermaschinen einsetzen zu müssen. Zudem wird insgesamt eine höhere Beteiligung des Maschinenbaus im Rahmen von gemeinsamen Entwicklungen gewünscht.

Verschiedene Automotive-OEMs stellen etwas andere Forderungen, die jedoch in eine ähnliche Richtung weisen: "Der Maschinenbau muss bereit sein, auch selbst etwas zu investieren, um aus den bestehenden Konzepten wirklich anwendungsreife Technologien zu machen." Im Rahmen gemeinsamer Entwicklungen wird dazu explizit ein "langer Atem" der Maschinenbauer gefordert, weil die Nachfrage nach entsprechenden Anlagen nur langsam steigt. Für die konkrete Gestaltung der Produktionsanlagen wird außerdem eine Besinnung auf die gezielte Optimierung einzelner Felder mit Entwicklungspotenzial (beispielsweise Greiftechnologie und Handling von biegeschlaffen Teilen) gewünscht. Mittelfristig besteht des Weiteren großes Interesse an einem kompetenten Systempartner, der entsprechende Produktionssysteme operatorübergreifend anbieten kann. Nur wenn dies sichergestellt ist, kann sich die Technologie mit der notwendigen Geschwindigkeit entwickeln und können die Kosten entsprechend schnell sinken.

Die Anforderungen der Windenergiebranche unterscheiden sich von den zuvor angesprochenen Forderungen stärker: "Eine weitere Automatisierung ist grundsätzlich wünschenswert, aber wir brauchen maßgeschneiderte Lösungen mit Augenmaß, die mit geringen Investitionen auskommen."

Besonders geeignet erscheinen dazu zunächst eher die technisch etwas weniger anspruchsvollen Arbeitsschritte im Rahmen des Finishings (Schleifen, Bearbeiten der Kanten, Lackieren). Eine erhebliche Automatisierung der Ablageprozesse der Textilien durch komplexe Großanlagen wird demgegenüber eher skeptisch gesehen, weil der entsprechende Investitionsaufwand den derzeitigen Nutzen übersteigt.

Die verschiedenen Endkundensegmente stellen also verschiedene Forderungen, die aber branchenübergreifend einige wesentliche Gemeinsamkeiten aufweisen:

- > Der Maschinen- und Anlagenbau wird aufgefordert, in stärkerem Maße in entsprechende Entwicklungen zu investieren
- > Verschiedene technische Entwicklungsfelder müssen weiter optimiert werden
- > Die Wirtschaftlichkeit muss bei allen Entwicklungen sichergestellt sein – dabei ist die maximal automatisierte Lösung nicht immer wünschenswert
- > Langfristige Entwicklungspartnerschaften werden angestrebt

5.3 Geschäftspotenzial bis 2020

Die Investitionsbereitschaft des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus in die weitere Entwicklung und Optimierung entsprechender Anlagen und Systeme wird maßgeblich von dem zu erwartenden Geschäftspotenzial beeinflusst: Nur bei entsprechendem Absatzpotenzial ist ein signifikanter F&E-Aufwand gerechtfertigt.

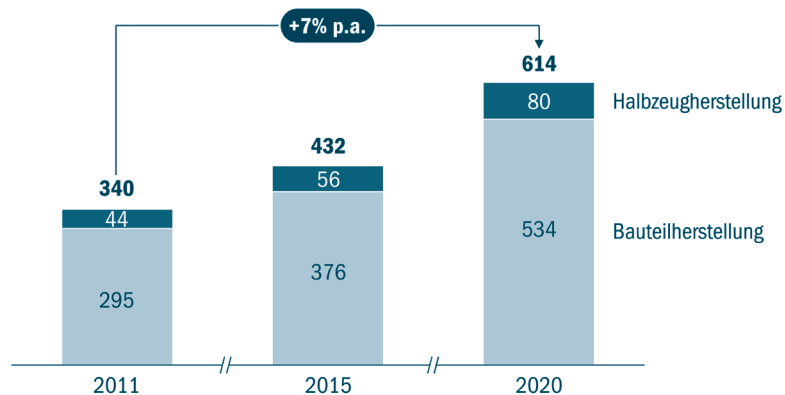
Auf der Basis der Nachfrageprognose für entsprechende hochfeste Faserverbundbauteile (Abbildung 19, Seite 34) und einer Vielzahl von Expertengesprächen ist daher ein Marktmodell erstellt worden, um den Bedarf für automatisierte Anlagen zur Fertigung hochfester Composites bis 2020 zu ermitteln.

Wesentliche Eingangsgröße für dieses Modell ist der Zuwachs des Bedarfs an endlosfaserverstärkten Bauteilen. Da der Fokus der Studie auf der Serienproduktion liegt, sollen nur Anlagen betrachtet werden, die im Rahmen einer mindestens teilautomatisierten Serienproduktion verwendet werden können. Nicht in diese Kategorie fallen bspw. Formen, die ausschließlich in manuellen Prozessen zum Einsatz kommen (z.B. bei der konventionellen Fertigung von Rotorblättern für Windenergieanlagen oder bei manuell gefertigten Kleinserien im Automobilbereich). Gehören die Formen jedoch zur Grundausstattung eines mindestens teilautomatisierten Prozesses, so werden sie mit berücksichtigt.

Um dies zu erreichen, wird in einem ersten Schritt mithilfe von Experten-schätzungen branchen- und materialspezifisch ermittelt, wie groß der Anteil des jährlichen Marktzuwachses ist, der mit Einsatz von mindestens teilauto-matisierten Anlagen gefertigt wird. Die Bandbreite liegt dabei zwischen 10% bei GFK für Windenergieanlagen bis zu 80% bei CFK für den Automobil-bereich.

Auf der Basis der daraus resultierenden Mengen und weiterer Annahmen zu Produktionskapazität und Kosten der einzelnen Anlagen/Anlagenkom-ponenten ergibt sich das Marktvolumen für Maschinen und Anlagen, das in Abbildung 30 dargestellt ist. Während der globale Markt für hochfeste Composites nur mit etwas mehr als 5% wächst (das moderate Wachstum des GFK-Marktes dominiert wegen der Marktgröße über das stärkere CFK-Wachstum, vergleiche Abbildung 19), wird für die Maschinen und Anlagen ein Wachstum von etwa 7% p.a. bis 2020 prognostiziert. Das etwas stärkere Wachstum ist im Wesentlichen durch die zunehmende Automatisierung bisher manueller Prozesse zu begründen. Demgegenüber wird künftig jedoch auch eine steigenden Produktivität der Anlagen erwartet, was das Wachstum etwas abschwächt.

Abbildung 30: Globaler Maschinen- und Anlagenbedarf für hochfeste Composites¹⁾ 2011-2020 [EUR m]



1) Ausschließlich endlosfaserverstärkte Composites; Formwerkzeuge nur im Zusammenhang mit automatisierten Anlagen berücksichtigt

Quelle: Expertengespräche; Desk-Research; Roland Berger Marktmodell

Insgesamt ist das derzeitige weltweite Marktvolumen für Anlagen zur Pro-duktion hochfester Composites im Vergleich zu anderen Segmenten mit etwa 340 Mio. Euro noch gering und auch nach der bis 2020 erwarteten Verdop-pelung des Marktvolumens bleibt es mit global gut 600 Mio. Euro moderat.

Zur Bewertung dieser Zahlen sei nochmals explizit erwähnt, dass ausschließlich Anlagen für hochfeste Verbundbauteile betrachtet werden, also keine Anlagen für kurz- und langfaserverstärkte Bauteile. Bestimmte Anlagenkomponenten, beispielsweise im Bereich von Pressen, Kunststoffverarbeitungs-
maschinen oder Handlingsystemen werden jedoch auch in diesen Marktsegmenten verwendet.

Im Zusammenhang mit dem Mengengerüst ist auch eine kurze Betrachtung zur Prognosesicherheit sinnvoll. In den unterschiedlichen Branchen laufen Produktentwicklungszyklen mit sehr unterschiedlichem Zeithorizont ab: Während bspw. im Automotive-Sektor die Entwicklungszyklen in der Regel etwa 3 Jahre betragen, werden in der Luftfahrt mindestens 10 Jahre für die vollständige Neuentwicklung eines Großraumflugzeugs benötigt. Zudem ist in letzterer Branche oftmals schon vor Beginn der Produktion eine große Anzahl von Flugzeugen bestellt worden, sodass die geplante Produktionskapazität über Jahre hinaus mit hoher Sicherheit ausgelastet werden kann.

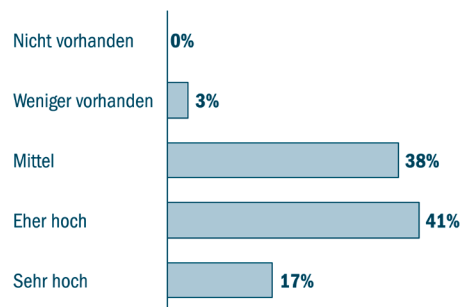
Daraus ergibt sich bei der Luftfahrt über 2020 hinaus eine signifikant höhere Prognosesicherheit für die benötigten Maschinen und Anlagen zur Produktion von entsprechenden Faserverbundbauteilen, als es zum Beispiel bei der Automobilindustrie der Fall ist. Dieser Faktor kann insbesondere bei der Bereitschaft zu branchenspezifischen Entwicklungen eine große Rolle spielen.

Insgesamt ist die Aktivität des deutschen Maschinenbaus im Bereich der Produktionssysteme für hochfeste Composites heute eher moderat einzuschätzen. Obwohl tendenziell hohe Wachstumschancen für den Maschinen- und Anlagenbau in diesem Marktsegment gesehen werden, findet nur eine moderate Allokation von Entwicklungsbudgets statt (Abbildung 31).

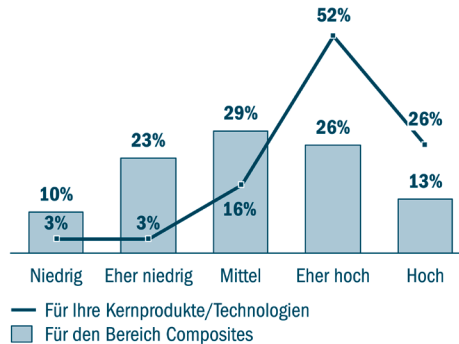
58% der an der Befragung teilnehmenden Maschinen- und Anlagenbauer sehen hohe oder sogar sehr hohe Wachstumschancen und nur 3% gehen von geringeren Chancen aus. Dennoch ist die Bereitschaft, Risiken auf sich zu nehmen, geringer ausgeprägt als bei den Kernprodukten/Technologien der jeweiligen Unternehmen: Während bei den Kernprodukten für 78% der Unternehmen eine hohe oder eher hohe Bereitschaft zu Vorleistungen in Form von Entwicklungsarbeit besteht, sind im Bereich Composites nur 39% der Unternehmen zu diesem Risiko bereit, und ein Drittel der Unternehmen äußert explizit eine niedrige oder eher niedrige Bereitschaft.

Abbildung 31: Geschäftsaktivität des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus**GESCHÄFTSPOTENZIAL
IM BEREICH COMPOSITES**

"Wie schätzen Sie die **Wachstumschancen bis 2020 im Bereich endlosfaserverstärker Composites** für den **Maschinen- und Anlagenbau** ein?"

**ENTWICKLUNGSBUDGETS
FÜR COMPOSITES**

"Wie hoch ist die **Bereitschaft** in Ihrem Unternehmen, **bei einer Entwicklung in Vorleistung zu gehen**?"



Quelle: RBSC/VDMA Umfrageergebnisse

Diese Ergebnisse zeigen auf, dass der Maschinen- und Anlagenbau zu großen Teilen derzeit eine eher abwartenden Haltung gegenüber den Produktionsanlagen für hochfeste Composites einnimmt. Die erwarteten Potenziale werden von der Mehrzahl der deutschen Maschinen- und Anlagenbauer nicht so hoch bewertet, dass sie ein erhebliches F&E-Budget für dieses Marktsegment zu allokkieren bereit wären.

5.4 Handlungsbedarf und mögliche Positionierung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus

Aus den bisherigen Überlegungen lassen sich Handlungsbedarf und sinnvolle Optionen für die Aufstellung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus im Markt für Produktionssysteme für hochfeste Verbundbauteile ableiten. Fassen wir die dazu relevanten Erkenntnisse kurz zusammen:

- > Kein Maschinen- und Anlagenbauer verfügt derzeit über alle notwendigen Kompetenzen, die für die Industrialisierung von RTM- und/oder Form-/Fließpress-Prozessen benötigt werden
- > Niemand hat die vollständige, übergreifende Systemkompetenz und entsprechende Referenzen – daher bestehen Schwierigkeiten, komplette Anlagen aus einer Hand anzubieten

- > Der Gesamtmarkt für entsprechende Produktionsanlagen ist derzeit noch limitiert, weist jedoch solides Wachstum auf und bietet mittel- bis langfristig zusätzliche Potenziale durch die Hybridisierung von Bauteilen
- > Entsprechende Maschinen und Anlagen sind nicht das Kerngeschäft der beteiligten Maschinen- und Anlagenbauer. Daher sind nur begrenzte F&E-Budgets verfügbar, und die weitere Entwicklung muss evolutionär, auf der Basis bereits vorhandenen Equipments erfolgen
- > Für eine hohe Innovationsgeschwindigkeit und eine damit verbundene schnelle Senkung der Fertigungskosten ist ein operatorübergreifender Technologieaustausch anzustreben

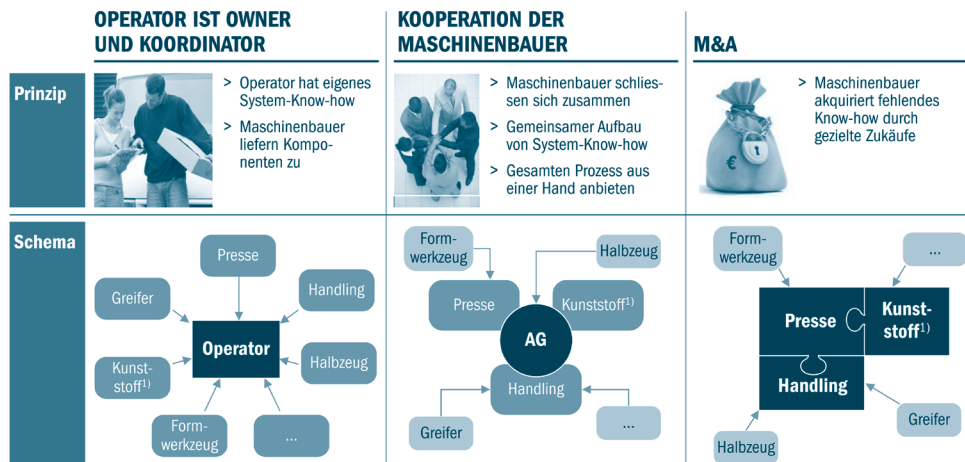
Was bedeutet dies nun für die Positionierung der deutschen Maschinen- und Anlagenbauer im Hinblick auf Produktionsanlagen für hochfeste Faserverbundbauteile? Durch die Vielzahl der an der Prozesskette beteiligten Maschinenbauer ist kein natürlicher Systemführer des Gesamtsystems erkennbar: Keiner der Beteiligten hebt sich in besonderer Weise durch seinen Wertbeitrag von den anderen Beteiligten ab. Rein organisch, aus eigener Kraft, scheint daher aus heutiger Perspektive die Systemführerschaft nur schwer erreichbar zu sein. Aus Sicht der Kunden/OEMs und auch im Sinne einer zügigen Technologieentwicklung ist eine unternehmensübergreifende Kooperation somit zwingend erforderlich, um den Anforderungen gerecht werden zu können.

Grundsätzlich erscheinen dazu drei Kooperationsformen möglich, in denen entsprechende Anlagen bereitgestellt werden können (Abbildung 32). Bei Variante eins ist der Anlagenoperator der Systemführer und Koordinator. Die verschiedenen Disziplinen des Maschinen- und Anlagenbaus liefern Komponenten entsprechend ihrem jeweiligen Know-how zu.

Als zweite Variante ist eine Kooperation verschiedener Maschinenbauer vorstellbar, bei der sich mit großen Anteilen an der Prozesskette Beteiligte zu einer Arbeitsgemeinschaft zusammenschließen. Diese Arbeitsgemeinschaft tritt dann gegenüber den Anlagenbetreibern als Systemanbieter (Generalunternehmer) auf. Als Beteiligte der AG kommen insbesondere die Hersteller von Pressen, Kunststoffverarbeitungsmaschinen und Handlingsystemen infrage. Weitere notwendige Elemente werden dann entsprechend von Dritten bezogen.

Als dritte Möglichkeit bieten sich M&A-Aktivitäten an, bei denen ein Maschinenbauer über geeignete Akquisitionen die entsprechenden Kompetenzen erwirbt, um dann aus einer Hand als Systemanbieter auftreten zu können.

Abbildung 32: Mögliche Kooperationsformen für den Aufbau von Serienproduktionsanlagen



1) Kunststoffverarbeitungsmaschinen (bspw. Injektionseinheit etc.)

Quelle: Roland Berger

Zur Bewertung dieser grundsätzlichen Möglichkeiten lassen sich vielfältige Kriterien heranziehen: Investitionsbedarf/Entwicklungsbudget, Synergien, Innovationsgeschwindigkeit, Koordinationsaufwand und Know-how-Position sind dabei besonders relevante Aspekte, unter denen die drei Kooperationsformen etwas näher betrachtet werden (vergleiche Abbildung 33).

Hinsichtlich des Investitionsbedarfs ist aus Sicht des Maschinenbauers sowohl die Operatorlösung als auch eine Kooperation mehrerer Maschinenbauer positiv zu bewerten, weil im ersten Fall nur sehr geringe Investitionen der Maschinenbauer benötigt werden und im zweiten Fall die Investitionen auf mehrere Schultern verteilt werden können. Ein hoher Investitionsbedarf fällt jedoch im Falle von M&A-Aktivitäten an, weil zur optimalen Ergänzung des eigenen Kompetenzportfolios mehr als eine Akquisition notwendig ist.

Ähnlich lassen sich die Synergien bewerten: Bei der Operatorlösung und der Kooperation bestehen in der Regel für den Maschinenbauer Synergien zwischen compositespezifischen Aktivitäten und dem Kerngeschäft. Beispielsweise können im Kerngeschäft entwickelte Systeme unter Umständen leicht modifiziert auch für die Composite-Fertigung eingesetzt werden, oder es können Skaleneffekte genutzt werden. Im Falle von M&A-Aktivitäten sind im Gegensatz dazu erhebliche Dissynergien wahrscheinlich: Wenn die Composite-Aktivitäten eines Maschinenbauers in Form eines Carve-Outs herausgelöst werden, gehen entsprechende Synergien mit dem Kerngeschäft schlagartig verloren.

Abbildung 33: Bewertung der Kooperationsformen

	OPERATOR IST OWNER UND KOORDINATOR	KOOPERATION	M&A
Investitionsbedarf/ Entwicklungsbudget	+ Geringer Investitionsbedarf für die Maschinenbauer	+ Moderater Investitionsbedarf – Aufteilung auf viele Schultern	- Hoher Investitionsbedarf, weil mehrere Akquisitionen nötig
Synergie mit anderen Anwendungen	+ Synergien mit jeweiligem Kerngeschäft voll nutzbar	+ Synergien mit jeweiligem Kerngeschäft voll nutzbar	- Erhebliche Dissynergien bei Carve-out möglich
Innovations- geschwindigkeit	- Gering, weil kein operator- übergreifender Transfer	+ Hoch durch enge Zusammenarbeit	+ Hoch durch Gesamtkom- petenz unter einem Dach
Koordinations- aufwand	+ Gering für den Maschinenbau	- Hoch, insbesondere hinsichtlich der Initiierung	0 Moderat bis hoch durch Inte- gration mehrerer Bereiche
Know-how Position	- Kein eigenes System-Know- how des Maschinenbaus	+ Aufbau von gemeinsamem System-Know-how	+ Aufbau von System- Know-how
	Maschinen- und Anlagenbau nimmt keine aktive Rolle ein	Initiative mit "Bordmitteln"	Gründung der "Dt. Composite Fertigungssysteme AG"

+ Positiv **0** Neutral **-** Negativ
Quelle: Roland Berger

Die Operatorlösung ist bei der Innovationsgeschwindigkeit deutlich schlechter als die beiden anderen Lösungen zu bewerten: Die Erfahrung mit anderen Technologien zeigt, dass es nur durch operatorübergreifenden Technologietransfer zu einer schnellen Weiterentwicklung kommt. Eine Kooperation von Maschinenbauern mit entsprechend enger Zusammenarbeit ist unter diesem Gesichtspunkt ebenso empfehlenswert wie auch M&A-Aktivitäten, die die Gesamtkompetenz unter einem Dach vereinen.

Im Hinblick auf den notwendigen Koordinationsaufwand ist aus Sicht des Maschinenbauers das Operatormodell zu bevorzugen, weil dabei der gesamte Koordinationsaufwand allein beim Operator anfällt. Bei einer Kooperation mehrerer Maschinenbauer ist dieser Aspekt dagegen die größte Hürde, weil insbesondere die Initiierung einer derartigen unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit im deutschen Maschinen- und Anlagenbau sehr schwierig ist. Bei M&A-Aktivitäten fällt ebenfalls ein gewisser Integrationsaufwand der neuen Geschäftsbereiche an.

Last but not least stellt die Know-how-Position des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus ein wesentliches Bewertungskriterium dar, bei dem insbesondere das Operatormodell aus Sicht des Maschinenbauers schlecht abschneidet: Der Maschinenbauer kann in diesem Fall kein übergreifendes Know-how des Gesamtprozesses aufbauen, sondern fungiert nur als Lieferant einzelner Subsysteme. Bei den beiden anderen Kooperationsformen wird die Know-how-Position des Maschinenbaus hingegen deutlich gestärkt, indem die übergreifende Systemkompetenz gemeinsam bzw. unter einem Dach aufgebaut wird.

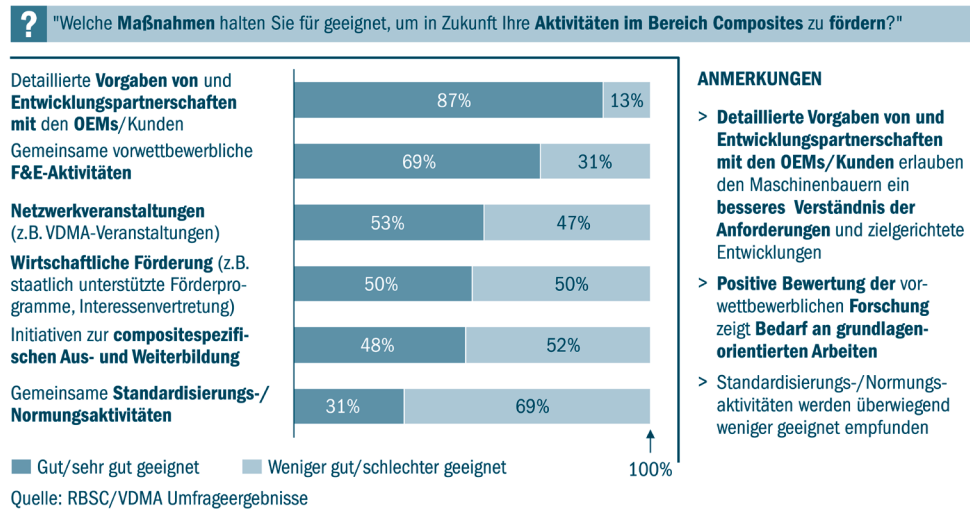
Zusammenfassend nimmt der Maschinen- und Anlagenbau bei dem Operatormodell eine eher passive Rolle ein, weil er ausschließlich als Lieferant einzelner Anlagenkomponenten dient. Der Einfluss auf die gesamte Entwicklung der Technologie beschränkt sich daher stark auf die eigene Komponente und ist insgesamt moderat. Insbesondere vor dem Hintergrund der langfristigen globalen Potenziale muss jedoch kritisch hinterfragt werden, ob dies ein Erfolgsmodell für den Maschinen- und Anlagenbau sein kann.

Für eine global führende Position auf diesem Gebiet ist der Aufbau eigener Systemkompetenz mittel- bis langfristig unbedingt notwendig. Insbesondere auf außereuropäischen Märkten besteht grundsätzlich, d.h. unabhängig von der konkreten Produktionstechnologie, eine hohe Nachfrage nach schlüsselfertigen Anlagen aus einer Hand. Dies gilt insbesondere für komplexe Prozesse, die verschiedene Technologien miteinander verbinden und für die ein hohes Maß an Kompetenz erforderlich ist.

Mit einer aktiveren Rolle, also einer Kooperation oder der Gründung der "Deutschen Composites-Fertigungssysteme AG" durch M&A-Aktivitäten kann sich der deutsche Maschinen- und Anlagenbau sicherlich wesentlich besser in diesem Markt positionieren und sich dadurch langfristig eine bessere Ausgangslage verschaffen.

Neben diesen "großen" strategischen Überlegungen existieren auch viele weitere flankierende Maßnahmen, mit denen die Industrialisierung der Fertigungsprozesse hochfester Faserverbundbauteile gefördert werden kann (vergleiche Abbildung 34). Aus der Perspektive des Maschinen- und Anlagenbauers eignet sich dazu besonders gut eine engere Zusammenarbeit mit den OEMs/Endkunden.

Detailliertere Vorgaben von und Entwicklungspartnerschaften mit den OEMs werden von fast 90% der befragten Maschinenbauer als wesentliche Voraussetzung für eine Steigerung der eigenen Aktivität im Bereich der Produktionsanlagen für hochfeste Composites gesehen. Hohen Zuspruch mit 70% finden auch gemeinsame, vorwettbewerbliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Dies spiegelt sicherlich wider, dass in vielen Bereichen entlang des Gesamtprozesses noch grundlegende Entwicklungspotenziale gesehen werden. Aktuell wird beispielsweise mit dem Spitzencluster MAI-Carbon in diesem Bereich bereits Einiges unternommen.

Abbildung 34: Weitere Maßnahmen zur Beschleunigung der Industrialisierung

Der Nutzen von Netzwerkveranstaltungen, wirtschaftlicher Förderung und Aus- bzw. Weiterbildungsinitiativen wird eher ambivalent eingeschätzt. Netzwerkveranstaltungen sind für viele Beteiligte ein sehr guter Weg, um sich mit der Materie bekannt zu machen, erstes Wissen aufzubauen und entsprechende Kontakte sowohl zu anderen Maschinenbauern wie auch zu OEMs zu knüpfen. Sie sind somit ein wichtiger Wegbereiter, reichen allein jedoch nicht aus, um die Aktivitäten des Einzelnen signifikant zu fördern.

Wirtschaftliche Förderung sowie Bildungsinitiativen sind ebenfalls eine grundsätzlich gute Sache, von denen sich etwa die Hälfte der Befragten einen direkten Mehrwert versprechen. Die andere Hälfte sieht den direkten Mehrwert eher nicht, beispielsweise weil die Beantragung von Fördermitteln zu komplex ist oder das jeweilige Unternehmen glaubt, nicht direkt von den Bildungsinitiativen profitieren zu können.

Aktivitäten im Bereich Standardisierung und Normung bewertet eine klare Mehrheit als weniger geeignet – vermutlich weil auch hier der direkte Einfluss auf das einzelne Unternehmen nur schwer greifbar ist.

6. Ausblick – Mittel- und Langfristperspektive

Welches Fazit lässt sich nun aus den Aussagen der vorherigen Kapitel ziehen und welche mittel- und langfristige Perspektive ergibt sich daraus für die Composite-Aktivitäten des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus?

Als wesentliche Aussage ist zunächst festzuhalten, dass die Nachfrage nach hochfesten Faserverbundbauteilen branchenübergreifend zunimmt und bis 2020 zu einem soliden Marktwachstum führen wird. Getrieben wird diese Nachfrage von zunehmenden Leichtbauanstrengungen. Insbesondere carbonfaserverstärkte Bauteile zeichnen sich dabei durch deutlich zweistellige Wachstumsraten aus. Eine ansteigende Nachfrage ist dabei über verschiedene Branchen hinweg festzustellen: Automotive, Luftfahrt und Windenergie werden zunächst die wesentlichen Volumentreiber bleiben, auch der Maschinen- und Anlagenbau bietet eine Vielzahl von Nischen mit hohem individuellen Potenzial.

Um diese Nachfrage, die mit zunehmenden Seriengrößen einhergeht, bedienen zu können, müssen mehr entsprechende Produktionsanlagen errichtet werden. Die dazu notwendige Industrialisierung der Produktionsprozesse hat jedoch erst begonnen: Insbesondere das RTM-Verfahren und der Thermoform- bzw. Organoblech-Umformprozess weisen erhebliches Industrialisierungspotenzial auf und sind auch langfristig für die Serienherstellung von Struktur- und Flächenbauteilen geeignet. Es ist realistisch, dass die Verfahrens- und Prozesskosten bis 2020 um 40% sinken, während die Faserkosten voraussichtlich nur um ca. 20% verringert werden. Dadurch ist eine Senkung der gesamten Bauteilkosten um etwa 30% zu erwarten.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss eine Vielzahl von Technologien weiterentwickelt und für die spezifischen Anforderungen einer teilautomatisierten Fertigung von Composite-Bauteilen optimiert werden. Das beinhaltet sowohl die Entwicklung und Erprobung gänzlich neuer, innovativer Komponenten z.B. zur Vorfertigung maßgeschneiderter Halbzeuge, die Weiterentwicklung und Anpassung vorhandener Komponenten als auch den Aufbau prozessspezifischen Erfahrungswissens zur optimalen Auslegung des Prozessdesigns und der Prozessparameter für einzelne Faser/Matrix-Kombinationen, Bauteilgeometrien und -designs. Darüber hinaus muss das Know-how zur Auslegung und Integration des gesamten Produktionssystems für die Serienfertigung im RTM- und Formpressverfahren vollständig neu aufgebaut werden.

Diejenigen Maschinenbauer, die in dieser frühen Phase mit dabei sind, haben die Chance, sich einen Know-how-Vorsprung aufzubauen. Gerade in den Bereichen Systemauslegung und -integration sowie Prozessabstimmung wird hier Erfahrungswissen aufgebaut, das sich in der Zukunft nur schwer kopieren lässt und damit hilft, den Know-how-Vorsprung auch dauerhaft abzusichern. Es werden also bereits heute die Plätze für die künftigen Marktführer bei der Herstellung von Composite-Produktionssystemen besetzt.

Für das einzelne Maschinen- oder Anlagenbauunternehmen heißt das, dass heute bereits eine Entscheidung gefällt werden muss, ob, und wenn ja, in welcher Rolle man in diesem Markt mitspielen möchte. Wer bereit ist, eine längere Anlaufphase für dieses Geschäftsfeld zu finanzieren, der sollte diesen Schritt dann auch konsequent gehen. Das bedeutet auch, gezielte Neu- und Weiterentwicklungen anzustoßen, möglichst vielfältige Pilotinstallationen mit diesen Technologien und Produkten auszurüsten, aktiv Kooperationen sowohl mit anderen Maschinenbauern als auch Betreibern aufzubauen und ggf. aktiv die Systemführerschaft anzustreben.

Langfristig, d.h. im Zeitraum nach 2020, ist ein deutlicher Anstieg des Marktvolumens für Compositebauteile und entsprechende Produktionssysteme zu erwarten. Weitere Kostensenkungen und Performancesteigerungen bei Faser und Matrix und die Verbesserung der Serienprozesse werden zu einer weiteren Reduzierung der Bauteilkosten führen. Gleichzeitig ermöglichen signifikante Erfahrungszuwächse im Design von Compositebauteilen in Verbindung mit ausgefeilten Test- und Simulationsmethoden deutlich günstigere Bauteildesigns. Dadurch werden hochfeste Faserverbundbauteile langfristig in immer mehr Anwendungen den dort etablierten Werkstoffen erfolgreich Konkurrenz machen.

Ein zentraler Wachstumstreiber dürfte mit den entsprechenden Multimaterialkonzepten die Hybridisierung von Compositebauteilen werden: Durch einen intelligenten Einsatz der Endlosfaserverstärkung nur dort, wo ihre Stärken – bspw. in mechanischer Hinsicht – maximal ausgenutzt werden, in Kombination mit kostengünstigeren Materialien – bspw. kurzfaserverstärktem Kunststoff oder Metall – ist langfristig eine Vielzahl von Hybridbauteilen mit sehr attraktivem Kostenprofil zu erwarten. Damit eröffnen sich eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten mit z.T. gänzlich neuen Bauteil- und Endproduktdesigns. Mit dem Aufbau geeigneter Designansätze, Auslegungsrichtlinien und Simulationsmethoden werden hier die Voraussetzungen für ein drastisches Wachstum des Compositemarktes geschaffen.

Viele Hybridbauteile können mit denselben Serienprozessen hergestellt werden wie reine Compositebauteile. Es eröffnet sich also ein wesentlich größeres Einsatzfeld für RTM- und Thermoform-Serienprozesse, die für diese Art von Bauteilen nur geringfügig angepasst bzw. modifiziert werden müssen, was einen entsprechenden Nachfrageschub auslösen wird. Sämtliche Entwicklungen und Investitionen in die zugrundeliegenden Technologien sind also sehr robust.

Das bedeutet, dass diejenigen Maschinen- und Anlagenbauer, die heute bereits in dieses Technologie- und Anwendungsfeld investieren, nach 2020 in einer exzellenten Position sein werden, um am dann deutlich stärker wachsenden Markt zu partizipieren. Das heißt aber auch, dass heutige Entscheidungen über einen Einstieg in diesen Bereich mit einer entsprechenden langfristigen strategischen Perspektive auf die zukünftige Rolle im Markt für Produktionssysteme zur Compositefertigung getroffen werden müssen.

Zentral ist dabei die Frage, ob man sich als Systemanbieter/Integrator oder als Komponentenspezialist positionieren möchte: Analog zu anderen Anwendungsfeldern, wie z.B. beim Karosserierohbau oder der Karosserie-lackierung, dürften sich mittel- bis langfristig auch für die Herstellung von Composite-Produktionssystemen spezialisierte Systemanbieter herausbilden. Diese fertigen entweder noch einige Schlüsselkomponenten selbst, oder sie sind reine Systemintegratoren, die am Markt verfügbare Komponenten und Baueinheiten zu einem maßgeschneiderten Produktionssystem kombinieren und dieses quasi schlüsselfertig an den Betreiber übergeben.

Während viele deutsche Maschinenbauer derzeit die Entwicklung einzelner Technologien und spezifischer Komponenten vorantreiben, ist im Bereich der Systemintegration für die komplette Produktionsanlage nur wenig bis gar kein Know-how vorhanden und damit auch nur geringe Marktaktivität erkennbar. Dieses Vakuum wird derzeit durch die Betreiber gefüllt, vor allem die großen Automobilhersteller. Das stellt aber eher eine Übergangslösung als ein langfristiges Optimum dar. Hier bietet sich also viel Raum für eine klare Positionierung als Anbieter von Komplettsystemen, wenngleich die Positionierung als reiner Komponentenspezialist in vielen Fällen die attraktivere sein dürfte. Vermieden werden muss in jedem Fall ein "sowohl-als-auch" Ansatz, da solche Strategien erfahrungsgemäß zu einer Verzettelung und damit zu einer Verschwendung von Investitionen und Ressourcen ohne nachhaltigen Nutzen führen.

Autoren und Ansprechpartner



Dr. Ralph Lässig

Partner
Roland Berger Strategy Consultants
Engineered Products & High Tech Competence Center, München

ralph.laessig@rolandberger.com



Dr. Martin Eisenhut

Senior Partner
Roland Berger Strategy Consultants
Engineered Products & High Tech Competence Center, München

martin.eisenhut@rolandberger.com



Arne Mathias

Principal
Roland Berger Strategy Consultants
Engineered Products & High Tech Competence Center, Düsseldorf

arne.mathias@rolandberger.com



Dr. Rolf T. Schulte

Senior Consultant
Roland Berger Strategy Consultants
Engineered Products & High Tech Competence Center, Düsseldorf

rolf.schulte@rolandberger.com

Autoren und Ansprechpartner



Frank Peters

Sprecher VDMA Forum Composite Technology
Executive Vice President Sales
KraussMaffei Technologies GmbH

frank.peters@kraussmaffe.com



Thorsten Kühmann

Geschäftsführer VDMA Forum Composite Technology
Geschäftsführer VDMA Fachverband Kunststoff- und Gummimaschinen

thorsten.kuehmann@vdma.org



Thomas Waldmann

Geschäftsführer VDMA Forum Composite Technology
Geschäftsführer VDMA Fachverband Textilmaschinenbau
Geschäftsführer VDMA Arbeitsgemeinschaft Großanlagenbau

thomas.waldmann@vdma.org



Dr. Walter Begemann

Projektleiter VDMA Forum Composite Technology

walter.begemann@vdma.org

Amsterdam
Barcelona
Beijing
Beirut
Berlin
Boston
Brussels
Bucharest
Budapest
Casablanca
Chicago
Detroit
Doha
Dubai
Düsseldorf
Frankfurt
Gothenburg
Guangzhou
Hamburg
Hong Kong
Istanbul
Jakarta
Kuala Lumpur
Kyiv
Lagos
Lisbon

London
Madrid
Manama
Milan
Montreal
Moscow
Mumbai
Munich
New York
Paris
Prague
Riga
Rome
São Paulo
Seoul
Shanghai
Singapore
Stockholm
Stuttgart
Taipei
Tokyo
Vienna
Warsaw
Zagreb
Zurich