

Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen – Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen

Dietz, P.; Grünendick, T.

Der Aufsatz stellt in Auszügen einen Vortrag dar, der in der VDI-EKV Tagung: „Innovative Produkte durch neue Werkstoffe“ am 18. und 19. Oktober 2001 in Würzburg gehalten wurde. Erstveröffentlichung VDI-Berichte 1595, ISBN 3-18-091595-01.

The contribution is a excerpt of a lecture which was discussed within the framework of the VDI-EKV congress: „Innovative Produkte durch neue Werkstoffe“ at the 18th and 19th October 2001 in Würzburg. First publication VDI-Berichte 1595, ISBN 3-18-091595-01.

1 Einleitung, Werkstoffwahl als Aufgabe des Konstrukteurs

Eine Reihe von Veröffentlichungen in Fachzeitschriften der letzten Zeit erwecken den Eindruck, als ob die Entwicklung neuer Werkstoffe Hauptausgangspunkt für die Entwicklung marktgerechter Produkte wäre. Selbst einige Forschungsprogramme in Deutschland scheinen zu implizieren, dass man nur neue Werkstoffe zu entwickeln bräuchte und damit die Entwicklung neuer Produkte schon vorherbestimmt sei. Als Konstrukteur kann ich dies überhaupt nicht nachvollziehen, denn nach allen gängigen Vorstellungen des Produktentwicklers ist die Idee, die Entsprechung der Anforderung durch ein Lösungsprinzip, die treibende Kraft der Entwicklung neuer und innovativer Produkte. Die Wahl des Werkstoffes spielt demgegenüber eine nachgeordnete Rolle, denn ich bin grundsätzlich nur auf die Erfüllung der von mir angestrebten Eigenschaften eines Produktes aus. Und dabei bedeutet die Wahl eines neuen Werkstoffes ei-

gentlich nur, dass die mir bekannten Werkstoffe – also die, die ich am liebsten verwenden würde, weil sie mir in ihren Eigenschaften wie in ihrem Fertigerhalten bekannt und vertraut sind – irgendwelche Forderungen an meine neue Konstruktionsidee nicht erfüllen. Hieraus sei eine erste These für die Anwendung von Werkstoffen in innovativen Produkten abgeleitet

- **Die Wahl des Werkstoffes stellt aus der Sicht des Konstrukteurs eine Restriktion dar, die mit dem eigentlichen schöpferischen Prozess der Produktentwicklung nichts zu tun hat.**

Grundlage der Produktentwicklung ist immer eine Reihe von Anforderungen, die aus einer Vielfalt von Bereichen stammen und oft weit weg von den zu erreichenden Funktionen sind. **Bild 1** zeigt am Beispiel einer schon 1902 konzipierten Darstellung, dass wir es hier mit einem Problem zu tun haben, das bereits seit dem Beginn des Industriezeitalters besteht. Demgegenüber hat jeder Werkstoff eine Unmenge von Eigenschaften, die mit dem vorher gezeigten Anforderungsprofil abgeglichen werden

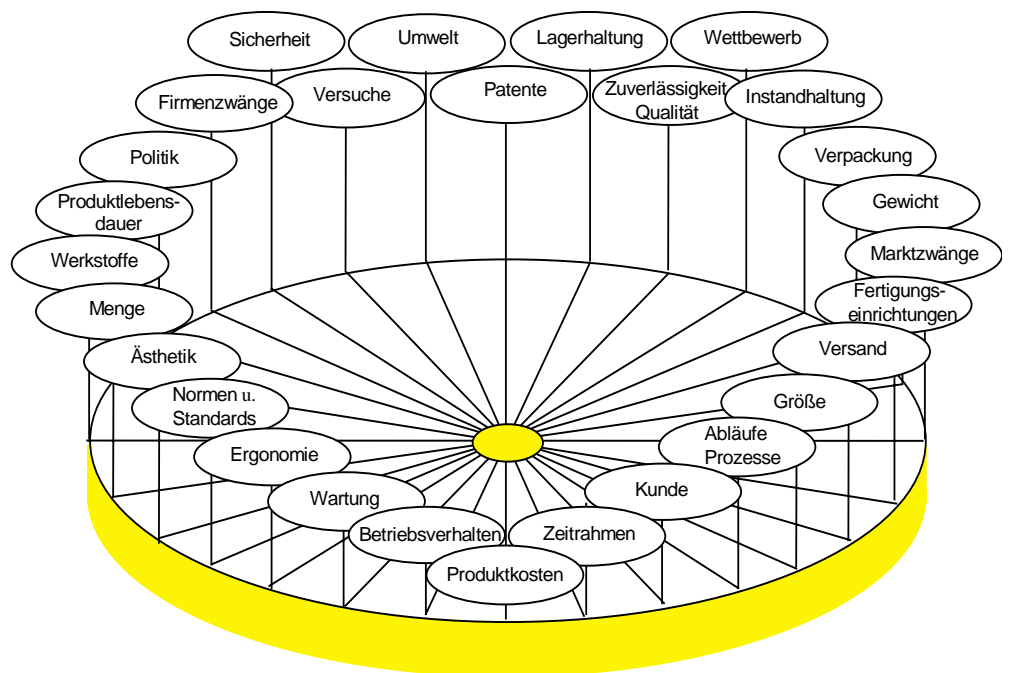


Bild 1: Mögliche Bereiche der Anforderungsdefinitionen an ein Produkt /1, 2/

müssen. Als Beispiel dient **Bild 2** als Auszug aus einer Datenbankanwendung zur Suche nach einem geeigneten Stahlwerkstoff. Man erkennt, dass selbst bei diesen bekannten Werkstoffen nur eine geringe Chance für eine gute Übereinstimmung von Produktanforderungen und Werkstoffeigenschaften besteht. Hieraus folgt die zweite These:

- **Die Wahl eines Werkstoffes stellt immer einen Kompromiss dar, in dem spezifische Merkmale eines Werkstoffes die vom Produkt geforderten Eigenschaften begünstigen, andere Merkmale aber den Anforderungen nicht gerecht werden.**

aus ist aber auch ableitbar, dass man mit Hilfe von Werkstofftechnologien bestimmte Eigenschaften forcieren kann, z.B. bei Legierungen, oder dass man auf der konstruktiven Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen Eigenschaften den nach wie vor vorhandenen Kompromiss etwas in Richtung der gewünschten Produkteigenschaften verschieben kann. Hieraus folgt die dritte These:

- **Durch die Kombination von Werkstoffen bei der Gestaltung eines Produktes besteht die Chance der Anforderungserfüllung für dieses Produkt eher als durch die Verwendung eines einzelnen Werkstoffes.**

The screenshot shows a web browser window titled "Stahlikon - Microsoft Internet Explorer". The page content includes a search form with the following fields and options:

- Werkstoffnummer: [input field]
- Werkstoffbezeichnung: [input field]
- Werkstoffgruppe: [dropdown menu]
- Anzeige: [input field with value 25]
- Treffer maximal: [checkbox]
- Bezeichnungen: [checkbox]
- Gruppen: [checkbox]
- Eigenschaften: [checkbox]

Buttons for "Suchen" and "Zurücksetzen" are located below the search form. The main content area is divided into several sections, each with a list of checkboxes for selecting specific material properties:

- Allgemeine Eigenschaften:** Handelsnamen, Hersteller, Werkstoffbeschreibung, Werkstoffumschlüsselung.
- Mechanische Eigenschaften:** Bruchzähigkeit, Dauerfestigkeit HCF, Dauerfestigkeitsverhalten, Dichte, Eigenschaften im warmgewalzten Zustand, einachsiges Kriechen, Ermüdungsrißwachstum, Härte HB, Härte HV, Härte HRC, Härte HRC-Zugfestigkeit f (Anlaßtemperatur), Kerbschlagzähigkeit, Kriechrißwachstum, LCF (dehnungskontrolliert), LCF (kraftkontrolliert), Mechanische Eigenschaften, mehrachsiges Kriechen, Relaxationsverhalten, thermomechanische Ermüdung, Torsionsstandversuch, Zähigkeitsverhalten.
- Zeitstandverhalten:** Zugfestigkeit, zyklisches Kriechen, Härte HRB, Streckgrenze (Mindestwert), Streckgrenze (Maximalwert), 1% Dehngrenze, Zugfestigkeit (Mindestwert), Zugfestigkeit (Maximalwert), Bruchdehnung (quer), Bruchdehnung (längs), Brucheinschnürung, Kerbschlagarbeit (quer), Kerbschlagarbeit (längs), Warmfestigkeitswerte, Kerbschlagarbeit f(Temperatur), Zeitdehngrenze f(Temperatur), Zeitfestigkeit f(Temperatur).
- Chemische Zusammensetzung:** Chemische Zusammensetzung.
- Physikalische Eigenschaften:** Physikalische Eigenschaften, Physikalische Eigenschaften f(T), Elastizitätsmodul, linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, spezifische Wärmekapazität.
- spezieller elektrischer Widerstand:** spezifischer elektrischer Widerstand, Temperaturleitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit.
- Tribologische Eigenschaften:** Abrasiv-Gleitverschleiß (gebundenes Korn), Abrasiv-Gleitverschleiß (ungebundenes Korn), Dreikörper-Abrasivverschleiß, Gleitstrahlverschleiß, Hydroabrasivverschleiß, Prallstrahlverschleiß, Schrägstrahlverschleiß.
- Technologische Eigenschaften:** Anlaßschaubild, Max Durchmesser f(KernHärte), Mechanisch-technologische Kenngrößen, Schweißbarkeit, Technologische Eigenschaften, Umformbarkeit-Biegen-Abkanten, Vergütungsschaubild, Wärmebehandlung, Warmfestigkeitsschaubild, ZTU-Schaubild, Härbarkeitsschaubild.
- Magnetische Eigenschaften:** Magnetisch-technologische Kenngrößen.
- Korrosionseigenschaften:** Kavitationserosion, Korrosionseigenschaften.

Bild 2: Werkstoffsuche mit der Datenbankanwendung Stahlikon, /3/

Hieraus ist zunächst zu schließen, dass es den idealen Werkstoff nicht gibt – auch nicht für eine speziell ausgewählte Konstruktionsaufgabe. Hier-

Hiervon leben seit Generationen schon Konstrukteure bei der Gestaltung von Oberflächenschutzstrukturen, Verschleißsätzen oder der Entwick-

lung von faserverstärkten Tragstrukturen. Wesentlich dabei ist, dass dem Konstrukteur dabei die Aufgabe zukommt, mit Hilfe der Werkstoff- und der Fertigungstechnik die Eigenschaften zu konstruieren, denn die Erstellung des Bauteils ist meist mit der Schaffung der Werkstoffeigenschaften und damit der Erfüllung der Anforderung durch Integration der Werkstoff- und Herstellungstechnik verbunden. Diesen Aspekt stellt **Bild 3** /3/ dar, es stellt aber auch einen bisher wenig beachteten Gesichtspunkt heraus: Wenn wir von „marktgerechten“ Produkten sprechen, ist damit immer auch eine wirtschaftliche Herstellung gemeint. Die Wirtschaftlichkeit – und damit ist oft die Menge in die Produktion fließenden Materials verbunden – stellt in **Bild 3** einen eigenen Regelkreis dar, der die klassischen Kategorien „Konstruktion“, „Werkstoff“ und „Technologie“ empfindlich beeinflussen kann. Mit diesem Problem haben eine Reihe von Forschungsergebnissen zu kämpfen, die in den vergangenen Jahren in Materialforschungsprogrammen erzielt wurden.

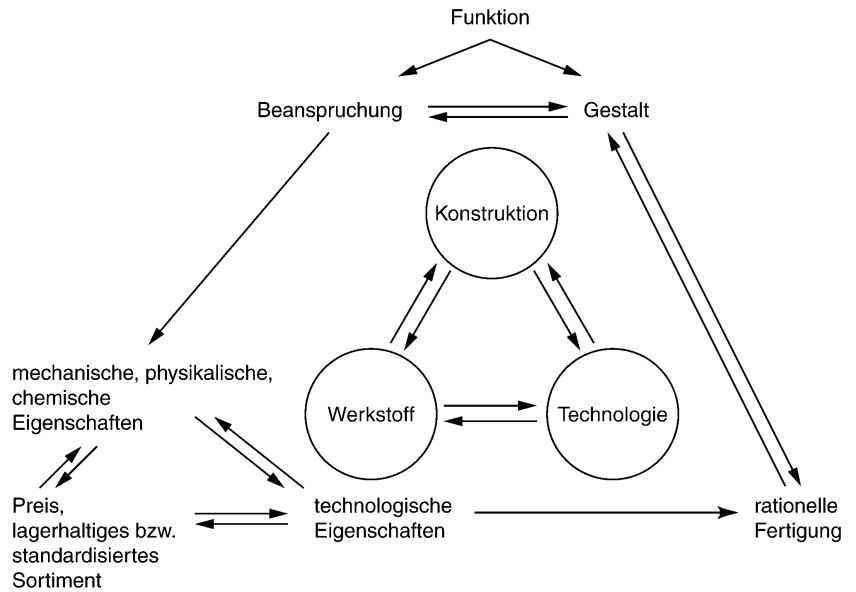


Bild 3: Werkstoffauswahl unter dem Aspekt der Einheit von Konstruktion, Technologie und Werkstoff /3/

Es sei daher die vierte und letzte These genannt:

- **Der wirtschaftliche Erfolg der Anwendung neuer Werkstoffe zur Erzielung bestimmter Bauteileigenschaften ist abhängig von einer preisgünstigen Werkstoffherstellung, Bearbeitung und Montage der zu entwickelnden Bauteile.**

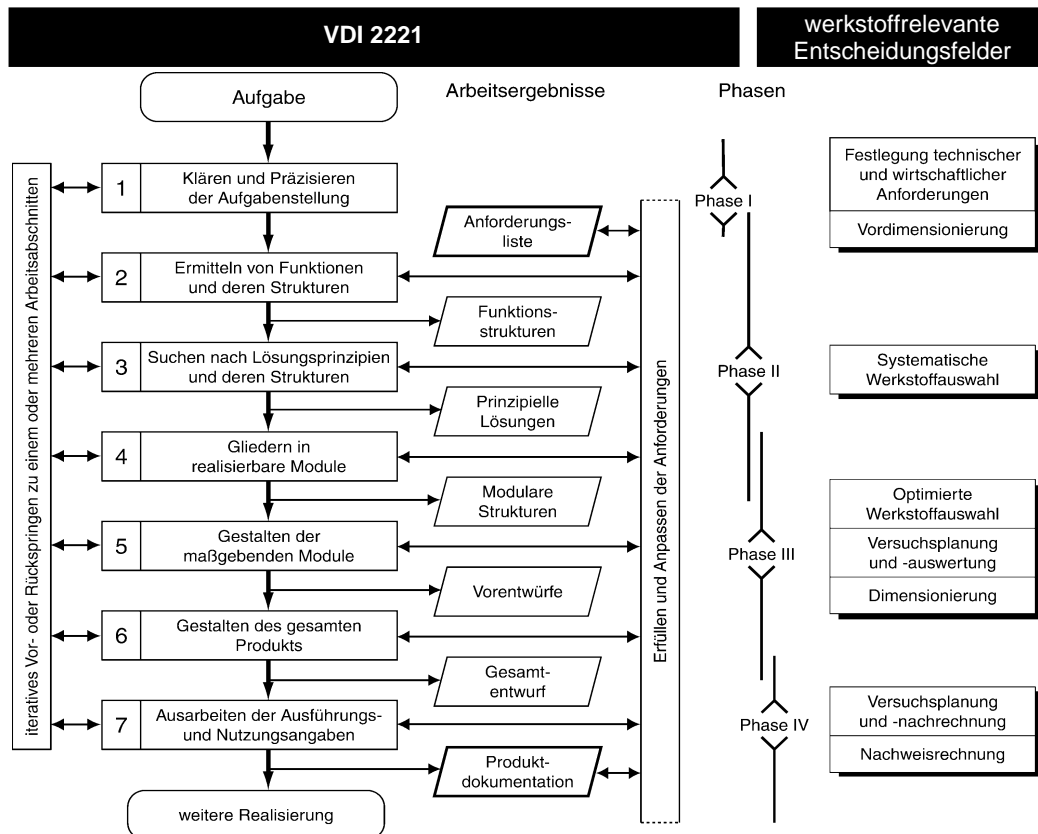


Bild 4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 und werkstoffrelevante Entscheidungsfelder /4, 5/

Auslegung	Anforderungen	Werkstoffauswahl
Näherungsweise Analyse	Konzeption	Betrachtung sämtlicher Werkstoffe (geringe Genauigkeit)
Analyse mit größerer Genauigkeit, Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit	Anwendungsform, Ausführungsart	Teilmenge an Werkstoffen (Höhere Genauigkeit)
Optimierung, Wirkungsgrad, Nutzeffekt	wie oben	weitere Einengung der infrage kommenden Werkstoffe
Detaillierte Analyse, Finite-Elemente-Berechnungen u.a.	Festlegung von Details	Festlegung eines Werkstoffes (bestmögliche Genauigkeit)
Exakte Dimensionierung	Erzeugnis	Verwendung des festgelegten Werkstoffes

Bild 5: Einordnung der Werkstoffauswahl in den allgemeinen Entwicklungsprozeß nach VDI 2221 (stark vereinfacht) (nach /6/)

In welcher Weise wählt der Konstrukteur im Laufe des Entwicklungsprozesses Werkstoffe oder Kombinationen aus? Ich zeige dies am Schema der Vorgehensweise nach VDI 2221 /4/ (**Bild 4**), bei der im rechten Teil die werkstoffrelevanten Entscheidungsfelder aufgezeigt sind: Im Normalfall wird die Werkstoff- und Fertigungsart in Schritt 5: „Gestalten der maßgebenden Module“ und die definitive Festlegung auf den Werkstoff in Schritt 6 „Gestalten des gesamten Produkts“ vorgenommen. Diese späte Auswahl ist im wesentlichen bedingt durch die bis zu diesem Zeitpunkt nur sehr unpräzise Formulierung von Abmessungen, Belastungen oder weiteren Randbedingungen der Konstruktion. Meist unterliegt die Werkstoffwahl einem fortschreitenden Einschränkungprozeß, wie ihn **Bild 5** beschreibt. Nur in sehr seltenen Fällen ist durch die Anforderungsliste eine Vorauswahl von Werkstoffen gegeben, meist beschränkt sich dies auf sehr spezielle chemische („beständig gegen ...“) oder physikalische Eigenschaften wie Betriebstemperatur, Gewichtsrestriktionen usw..

Die Problematik der Werkstoffauswahl liegt dabei auf einer ähnlichen Linie wie die Erfüllung von Forderungen wie Lärmarmut, Wirtschaftlichkeit oder Ergonomie, da für eine eindeutige Beurteilung der Eigenschaften des Bauteils aufgrund der Werkstoffwahl eine sehr detaillierte Kenntnis der Charakteristika einer Konstruktion vorausgesetzt werden. Eine effektive Wahl und eine Optimierung bedürfen daher oftmals einer „Schleifenbildung“ im Konstruktionsprozeß, um eine schrittweise Verbesserung der Informationen während des Konstruktionsvorgangs sicherzustellen. Dabei handelt es sich

um einen mit zunehmendem Maße immer komplexeren Auswahlvorgang, da die Werkstoffentwicklungen ständig wachsen und z.B. die mit der konstruktiven Gestaltung von Verbundwerkstoffen verbundenen zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten deren Auswahlprozeß deutlich erschweren. Nur selten gelingt es auch, unter Reduzierung auf wenige Auswahlgesichtspunkte eine Auswahlmöglichkeit zu gestalten, wie sie z.B. in **Bild 6** unter dem Beispiel „leichte und steife Bauteilkonstruktion“ aufgezeigt wird.

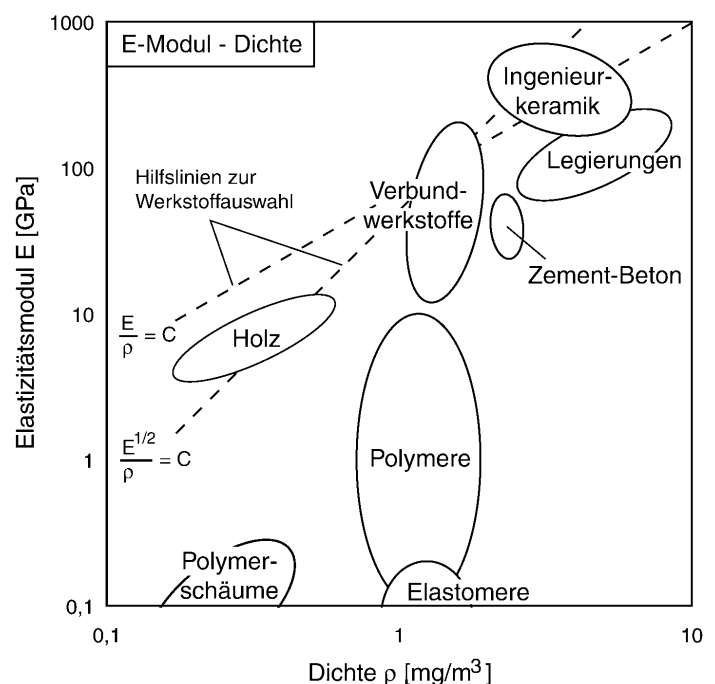


Bild 6: Werkstoffschaubild nach Ashby (Performance Index E/ρ ist Indikator für leichte und steife Bauteile /7/)

Im folgenden soll an einigen Beispielen aufgezeigt werden, wie durch die gezielte Anwendung von Bauteilen aus kombinierten Werkstoffen konstruktive Lösungsmöglichkeiten für spezielle Entwicklungsaufgaben geschaffen wurden. Durch Spiegelung dieser Beispiele an den o.a. Thesen soll aber auch deutlich gemacht werden, dass der zur Erfüllung bestimmter Bauteileigenschaften geschlossene Kompromiß Einschränkungen bei anderen Eigenschaften verursacht, die zum Teil die gewählte Lösung in Frage stellen können.

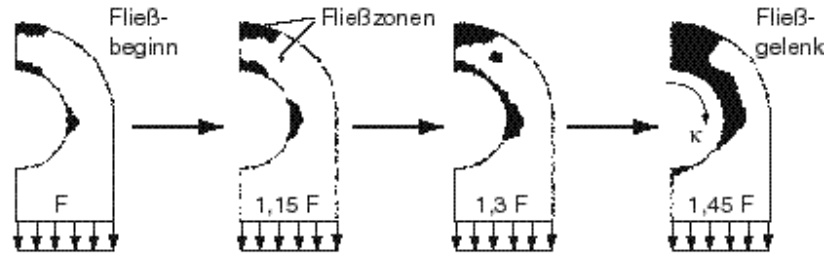


Bild 7: Plastifizierungsfolgen einer spielbehafteten Bolzen-Lasche-Verbindung. κ Kontaktwinkel des Bolzen-Lasche-Kontakts; F Zuglast /8/

Die Grenzbeanspruchung von Maschinenteilen wird im allgemeinen nach dem Kriterium des linear-elastischen Verhaltens von Bauteil und Werkstoff ermittelt, das – durchaus nutzbare – Werkstoffverhalten bei überelastischer Beanspruchung wird meist als „zusätzliche Sicherheit“ nicht in die Berechnung mit einbezogen. **Bild 7** zeigt am Beispiel einer Bolzen-Laschenbverbindung, dass der eigentliche Versagensfall „Durchplastizieren“ ein auf 145% gesteigertes Lastübertragungspotenzial gegenüber der elastischen Rechnung enthält, weil der plastisch verformte Bereich selbst bei Berechnung nach dem idealplastischen Verhalten auf die Steifigkeit dieser Verbindung kaum Einfluß hat. Die In-

2 Nutzung der plastischen Verformung zur Tragfähigkeitssteigerung

An zwei Beispielen soll deutlich gemacht werden, dass die Erzeugung spezieller Eigenschaften nicht immer die Anwendung neuer Werkstoffe impliziert, sondern dass die Eigenschaftsveränderung eines einzigen Werkstoffes in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich ein großes Potenzial für das Prinzip der Bauteilstruktur aus der Kombination von Werkstoffeigenschaften enthält.

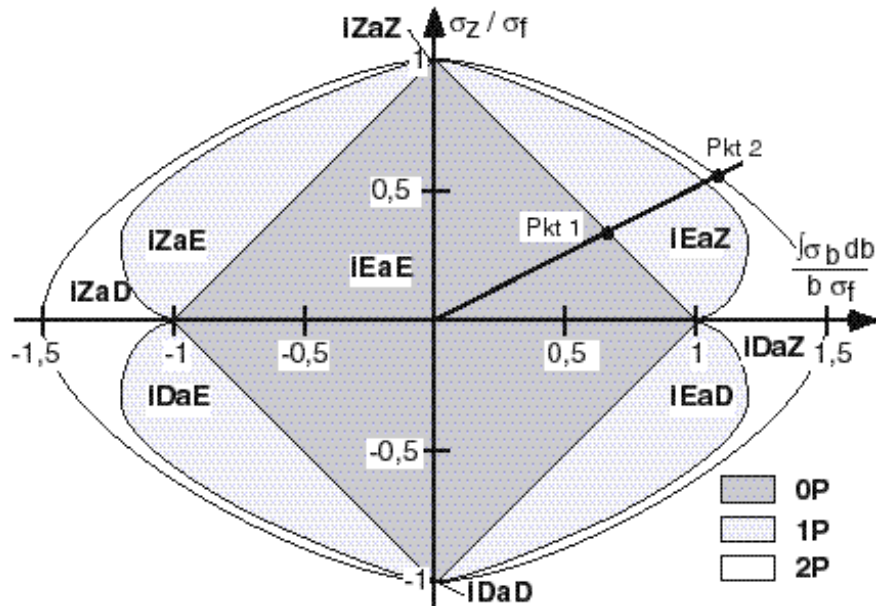


Bild 8: Lösungsfelder bei elastischer und teilplastischer Verformung infolge unterschiedlicher Belastungskombinationen aus Biege- und Zug/Druckbeanspruchung (z.B. bei Laschenverbindungen oder beim krummen Balken). iEaE = innen und außen elastisch, iZaE = innen teilplastischer Zug und außen elastisch, iDaE = innen teilplastischer Druck und außen elastisch, iDaD = innen und außen teilplastischer Druck usw.; 0P = keine plastische Verformung, 1P = plastische Verformung auf einer Biege-seite, 2P = plastische Verformung im Zug- und Druckspannungsbereich der Biege-zonen). Pkt.1: Grenze des elastischen Bereichs; Pkt. 2: Fließgelenk (Durchplastizieren) bei einer gegebenen Kombination von Zug und Biegung /8, 9/

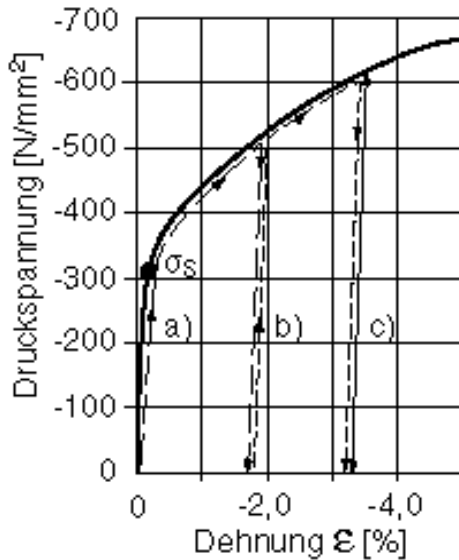


Bild 9: Spannungs-Dehnungsdiagramm des quastatischen Druckversuchs für den Trommelwerkstoff GGG 40.3. Eingezeichnet ist der Vorgang des "Einfahrens" der Trommel infolge erstmaliger Belastung (a) und b)) und der dadurch vergrößerte elastische Bereich für die nachfolgenden Belastungen (c)).

teraktion von Beanspruchungsverteilung und Werkstoffverhalten führt am Beispiel einer solchen Bolzen-Lasche-Verbindung zu Beanspruchungsfeldern, die das Ausmaß einer Tragfähigkeitssteigerung durch Verwendung einer „Kombination aus zwei Werkstoffen“ – einer mit ideal-elastischem und einer mit ideal-plastischem Verhalten - aufzeigt, wenn die durch die Biegebeanspruchung erzeugte Verteilung der Spannungen einen solchen Ausgleich erlaubt (**Bild 8**).

Ein weiteres Beispiel soll diese Aussage der Leistungssteigerung stützen und zugleich auf eine Verlagerung der kritischen Lastfälle hinweisen: Seiltrommeln erfahren durch die Seilumschnürung eine Druckbeanspruchung des Trommelmantels in Umfangsrichtung, bei überelastischer Beanspruchung versprechen die Werkstoffangaben eine Verdoppelung der Belastungsfähigkeit (**Bild 9**) in diesem Bereich – in der Praxis werden durch sogenannte „Einfahrversuche“ in den überelastischen Bereich Seiltrommeln vorverformt und damit für höhere Belastungen „trainiert“. Im Unterschied zum vorherigen Fall wird dabei durch den elastoplastischen Erstbelastungsvorgang die Eigenschaft „Spannungs-Dehnungsverhalten“ so verändert, dass die nachfolgenden betrieblichen Belastungsvorgänge auf ein linear-elastisches Dehnungsverhalten stoßen, bei dem lediglich die Streckgrenze durch Verfestigungsvorgänge höher gesetzt wurde. Dieser Trainiervorgang ruft aber irreversible Verformungen hervor, die Betriebsbelastungen stoßen auf eine geometrisch veränderte Form des Bauteils. Die Festigkeitsgrenze des Trommelmantels wird soweit hinaufgeschoben (**Bild 10**, Pos A), dass die Auslegung der Trommeln heute völlig andere Schadensfälle berücksichtigen muß:

- Schiefstellungen infolge der plastischen Verformungen führen zu Lagerschäden oder verursachen Eingriffsstörungen im Antriebsstrang (**Bild 10**, Pos. B),

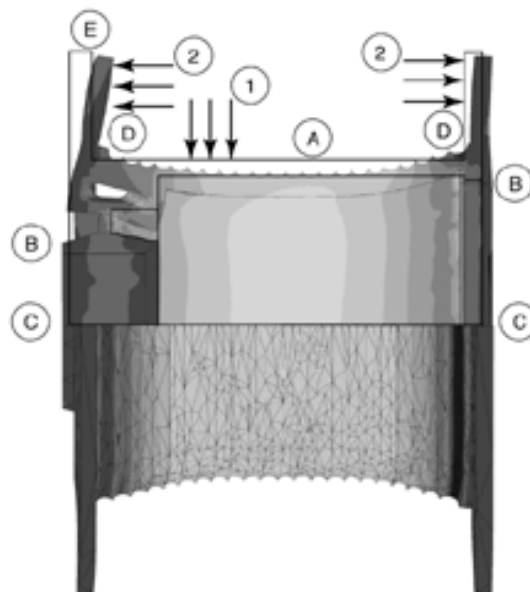


Bild 10: Seiltrommel, Beanspruchungs- und Verformungsverhalten anhand einer FE-Rechnung. Problemzonen: A Trommelmantel; B Lagerbereich infolge Radialverformung und Schiefstellung; C Einbaubegrenzung in axialer Richtung; D Kerbwirkungen im Bereich der Bordscheibenanschlüsse; E Endscheibenverformung bei mehrlagiger Bewicklung

- plastische Axialverformungen der Trommel tragen zu Störungen in der Lagerung bei (**Bild 10**, Pos. C),
- der Übergang der plastischen zur elastischen Verformung im Bereich der Bordscheibenanschlüsse führt zu Vorspannungen und damit zur Vergrößerung der Kerbwirkung (**Bild 10**, Pos. D).
- der Bereich der Endscheiben kann unzulässige Verformungen aufweisen, die den Bauraum überschreiten. Im Fall der Schiefstellung von Bremscheiben wird die Bremsfunktion beeinträchtigt (**Bild 10**, Pos. E).

Bezüglich der in der Einleitung genannten Thesen besteht sicherlich kein Zweifel, dass allein die Eigenschaftsänderung eines an sich bekannten Werkstoffes zu der im Vordergrund stehenden Tragfähigkeitserhöhung führt. Während im Fall der Bolzen-Laschen-Verbindung die Tragfähigkeitssteigerung aufgrund des geänderten Werkstoffverhaltens ohne weitere Folgen für die Funktionsfähigkeit vonstatten ging, weist die Seiltrommel dagegen Funktionsmängel auf, die auf das Auftreten plastischer Verformungen zurückzuführen sind und die dadurch die Anwendbarkeit dieser „Werkstoffkombination“ nach neu zu berücksichtigenden Versagenskriterien begrenzen.

3 Kombination von Faserverbunden und Metall bei der Gestaltung eines Hochgeschwindigkeits-Windsichters

Das folgende Beispiel aus der Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen soll verdeutlichen, wie die verfahrenstechnische Forderung hoher Prozeßgeschwindigkeiten zur Bauform eines Rotors führt, der nur durch die Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen Funktionswerkstoffen realisiert werden kann:

Aus der Optimierung eines mechanischen Klassierprozesses mit der Forderung nach einer Trenngrenze von 1 µm Partikeldurchmesser ergab sich die Konstruktion eines Rotors für einen Abweiseradsichter, der an der verfahrenstechnischen Wirkfläche eine Umfangsgeschwindigkeit von mindestens 250 m/s bietet. Die in der Anforderungsliste hervorstechende Eigenschaft besteht damit in der Gewährleistung von Festigkeit und Steifigkeit gegenüber hohen Fliehbelastungen. Die konsequente Anwendung von Leichtbauprinzipien zur Erreichung hoher Umfangsgeschwindigkeiten führt zur Anwendung von Hybridbauweisen unter Verwendung von Faserverbundwerkstoffen, um damit gezielt die Eigenschaften der Maschine bezüglich Tragfähigkeit, Verformung und dynamischem Verhalten einstellen zu können. Es wurde daher ein Versuchsrotor entwickelt, bei dem die verfahrenstechnischen Ele-

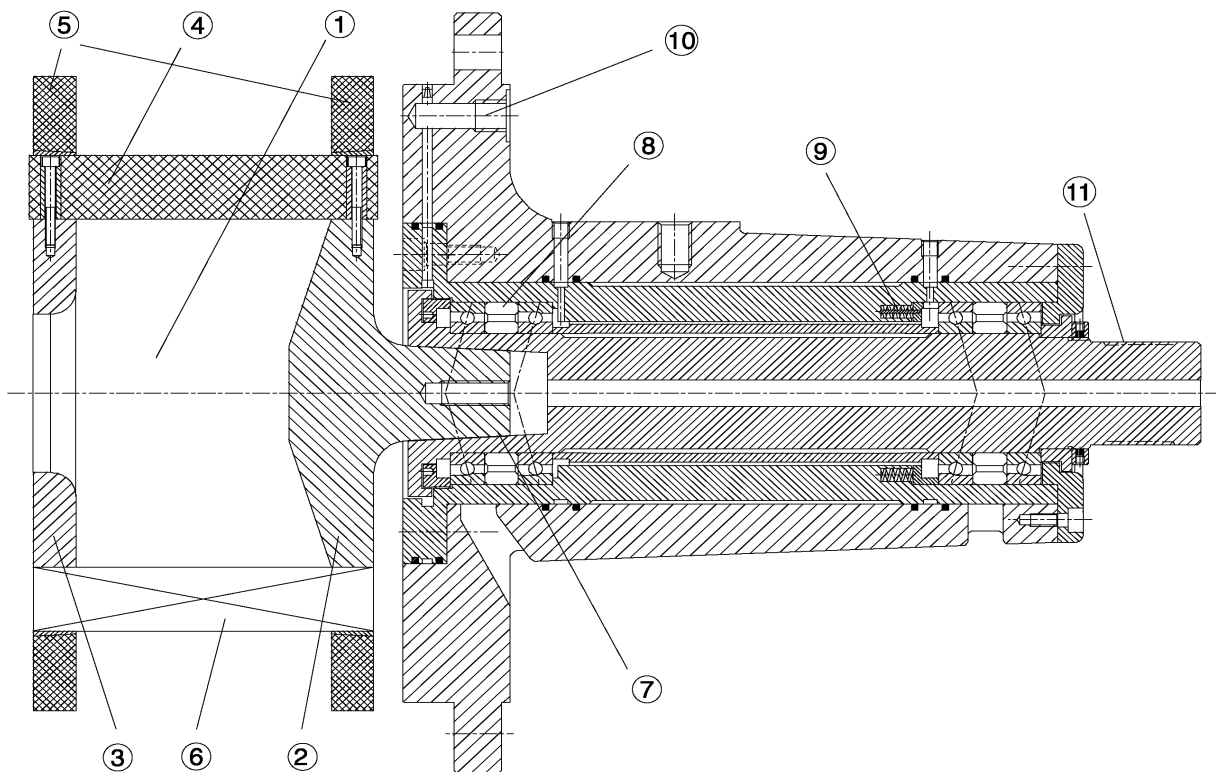


Bild 11: Aufbau eines einseitig gelagerten Abweiseradsichters in Hybridkonstruktion für Umfangsgeschwindigkeiten bis 300 m/s /10, 11/

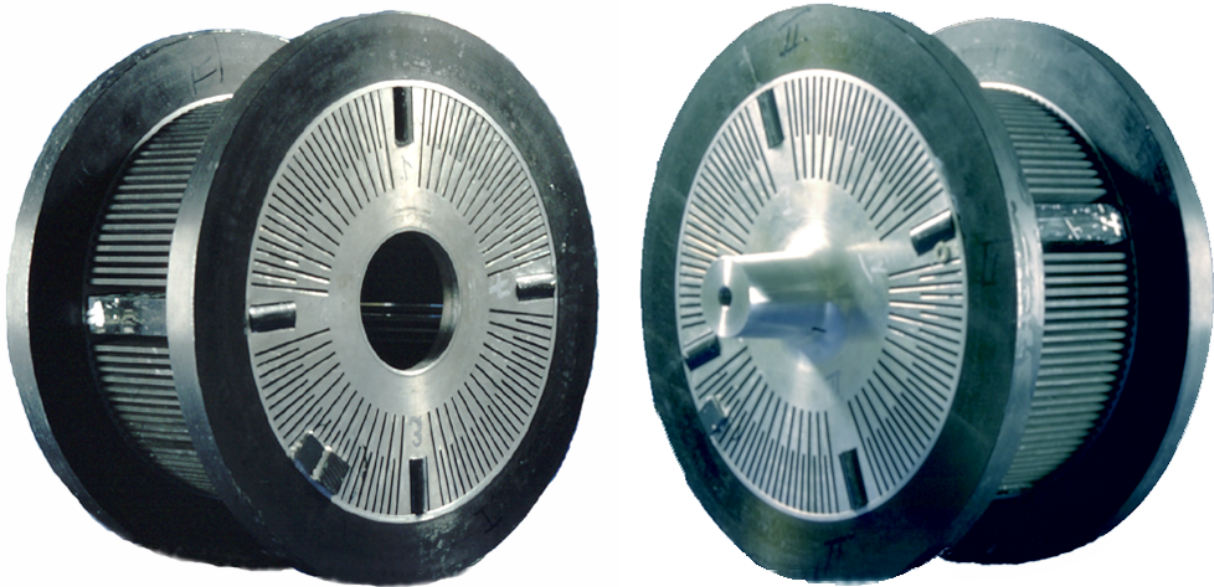


Bild 12: Einseitig gelagerter Hybridrotor in zwei Ansichten

mente aus Verbundwerkstoff, die Tragstruktur als Kombination von Aluminiumscheiben (wegen der Welle-Nabe-Verbindung) und Tragringen aus Faserverbundstoff gefertigt sind. Der in **Bild 11** und **Bild 12** dargestellte Hybridsichter (1) besteht aus der Antriebsscheibe (2), der getriebenen Scheibe mit dem Feingutauslass (3), vier Haltestäben (4) zur Drehmomentübertragung auf die getriebene Scheibe, den über Kegelpressverbindungen befestigten Faserverbundringen (5) zur Dehnungsbehinderung und Aufnahme der Fliehkräfte und den Lamellen als Strömungsleitelemente (6).

Auf einige der Elemente und ihre Auslegung sei hier besonders eingegangen, da an diesem Beispiel besonders die Interaktion von konstruktiver Gestaltung, Werkstoffauswahl und Fertigungstechnik demonstriert werden soll.

Die Lamellen (6) stellen den mechanischen Fall beidseitig eingespannter Träger dar, bei denen die Belastung durch Fliehkraft dominiert – maßgebende Größen sind also die Eigenmasse der Lamellen, die Einspannlänge, die Lamellenhöhe und die Querschnittsgrößen gegenüber Biegung und Verdrehung. Im vorliegenden Fall der Leichtbaukon-

struktion mit Faserverbundwerkstoffen wird ein Aufbau von Prepregs im Tape-Lying-Verfahren vorgeschlagen. Da eine übliche unidirektionale Prepregschicht eine Dicke von etwa 0,25 mm aufweist, sind für den Aufbau einer Lamelle von 3 bis 4 mm Dicke 12 bis 16 Schichten Kohlenstofffaser HT realisierbar.

Die Steifigkeit einer unidirektionalen Schicht ist abhängig von dem Faserorientierungswinkel und besteht in ihrer mathematischen Formulierung aus Dehnsteifigkeiten, Biegesteifigkeiten und Koppelsteifigkeiten. Damit ist grundsätzlich eine Optimierung der Struktur

12 Lagen	Schrittweite	Kombination
ohne Symmetriebetrachtung	15°	117649
	5°	47 Mio.
mit Symmetriebetrachtung	15°	4096
	10°	46656
	5°	1 Mio.

16 Lagen	Schrittweite	Kombination
ohne Symmetriebetrachtung	15°	5 Mio
	5°	1,6 Mrd.
mit Symmetriebetrachtung	15°	65536
	5°	100 Mio.

Bild 13: Kombinationsmöglichkeiten eines Lagenaufbaus für Windsichterlamellen aus Prepregs für verschiedene Lagenzahlen und Schrittweiten der Faserorientierungswinkel /10/

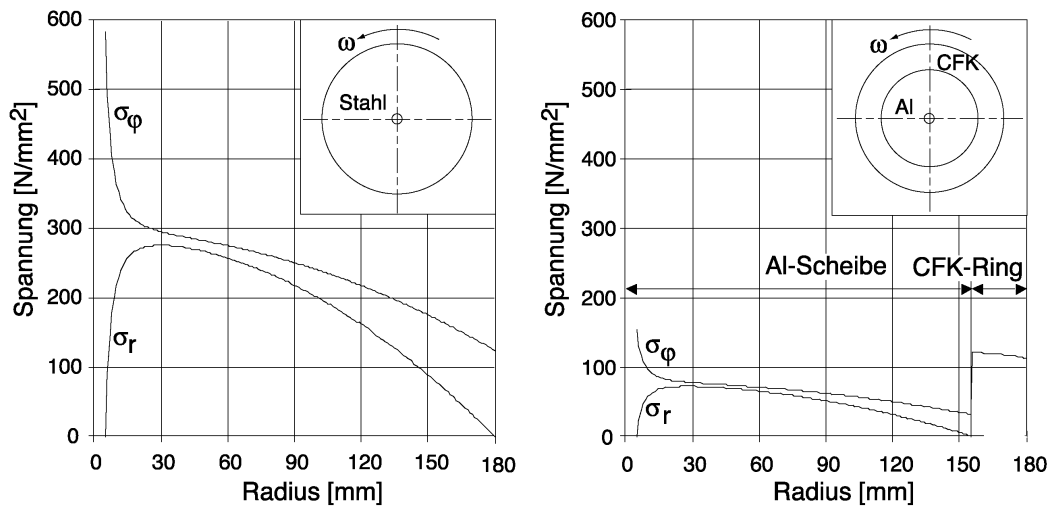


Bild 14: Spannungsverlauf in den Scheiben des Hochgeschwindigkeitswindsichters bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 300 m/s (Links: Stahlscheibe; rechts: Aluminiumscheibe mit Faserverbundring) /10/

durch das Aufeinanderschichten von unidirektionalen Prepregs unter Ausrichtung der Fasern gemäß den Schnittgrößen der Bauteile möglich, wobei zu beachten ist, dass sowohl durch die Anzahl der Prepregschichten als auch durch die Anzahl der zu optimierenden Steifigkeitsgrößen eine Vielzahl von Parametern und deren Kombinationen die zu optimierenden Eigenschaften bestimmen. Die Gesamtwirkung der aus 16 Schichten aufgebauten Lamelle ist einer Bewertung zu unterwerfen, die von den Anforderungen an den Sichterrotor abgeleitet wird. **Bild 13** vermittelt einen Eindruck über die für eine Optimierung durchzurechnende Zahl von Kombinationen, abhängig von der Zahl der Prepregs und der Schrittweite bei der Variation des Faserrichtungswinkels jeder einzelnen Schicht. Die Darstellung soll aber auch die Verantwortung des Konstrukteurs für die „Werkstoffgestaltung“ aufzeigen und betonen, dass eine solch gezielte Entwicklung des Bauteils Lamelle nur möglich ist, wenn die Belastungen und Einsatzbedingungen im Detail bekannt sind. Allgemeine Regeln zur inneren Gestaltung von Windsichterlamellen sind aus diesen Betrachtungen nicht ableitbar.

Die Gestaltung und Auslegung der Rotorscheiben und -ringe (Teile (2), (3) und (5) in Bild 11) wird in hohem Maße beeinflusst durch Elastizitätsmodul, Dichte, Verformung und Festigkeit des Scheibenwerkstoffs. Nach dem konstruktionsmethodischen Prinzip der Aufgabentrennung wurde im vorliegenden Fall die Mitnahmefunktion der Lamellen und Haltestäbe durch eine Metallscheibe vorgenommen, die Aufnahme der Fliehbeanspruchungen geschieht über einen aufgesetzten Ring, der infolge

Ausdehnungsbehinderung am äußeren Rand der rotierenden Scheibe die Fliehspannungen in dieser Scheibe verringert. Der äußere Ring sollte daher aus einem Werkstoff mit geringer Dichte, hohem Elastizitätsmodul und hoher Festigkeit bestehen, der Faserverbundwerkstoff (CFK-HM) besitzt unter den untersuchten Werkstoffen hierfür die besten Eigenschaften. **Bild 14** zeigt die enormen Beanspruchungsunterschiede gegenüber einer umlaufenden Stahlscheibe an einem Berechnungsbeispiel.

Das Beispiel des Haltestabes (Teil 4 in Bild 11) soll die Anforderungen herausstellen, die die Verwendung unkonventioneller Werkstoffe an die Detailgestaltung und damit an den Konstrukteur stellt. Bei isotropen Werkstoffen sind durch Überlagerung der Schnittgrößen die Beanspruchungen und Verformungen aus den Grundgleichungen der Festigkeitslehre bestimmbar, wobei die Verbindungsstelle (Schrauben, Schweißen) einer besonderen Betrachtung auch bezüglich der Kerbwirkung bedarf. Beim Aufbau der Haltestäbe aus Faserverbundwerkstoffen ist für den Aufbau und die Berechnung die gleiche Vorgehensweise wie bei den Lamellen zu wählen, es besteht aber das Problem der für Faserverbundwerkstoffe typischen Verbindungstechnik. **Bild 15** zeigt anhand zweier Lösungsmöglichkeiten, dass zwischen einem eingelagerten Anschlusselement (1) und dem eigentlich tragenden Element (3) durch angepasste Bewicklungstechniken oder spezielle Formgebungen während des Aushärtvorgangs (2) kraftflussgerechte Bauteilstrukturen geschaffen werden müssen, die sich erheblich von den Konstruktionen mit isotropen

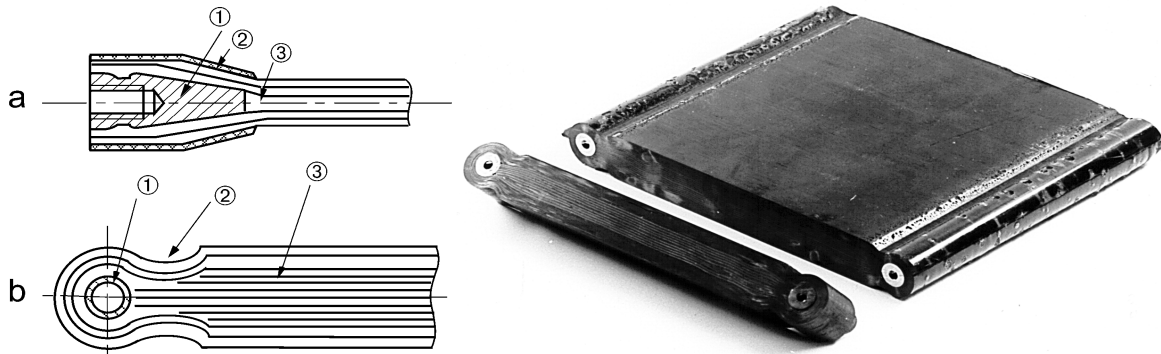


Bild 15: Prinzipdarstellungen für die konstruktive Gestaltung des Haltestabes. A: Gewickelter Haltestab mit Gewindeanschlußstück; b: Prepreg- und Wickelkonstruktion; c: Ausgeführte Form mit eingewickeltem Verbindungsstück nach b. /10/

Werkstoffen unterscheiden. Für den Versuchsrotor wurde ein in den Lamellenbereich integrierter rechteckiger Haltestab gemäß **Bild 15b** entwickelt, **Bild 15c** zeigt den in einem Wickelwerkzeug um die Hülsen vorgefertigten und anschließend in einem Presswerkzeug auf Kontur gebrachten Rohling zur Herstellung der Haltestäbe; deutlich ist der Aufbau aus den eingelegten Prepregs und die Umwicklung zur kraftflussgerechten Übernahme der Schnittgrößen an den Stabenden zu erkennen. Zur Übertragung in die Scheiben wurde in diese ein formangepasstes Gegenstück eingebracht.

Das vorgetragene Beispiel macht meines Erachtens besonders deutlich, dass die Optimierung einer Bauteilstruktur mit speziellen und erhöhten Anforderungen durch die Verwendung von konstruktiven Hauptanforderungen besonders begünstigten Werkstoffen möglich ist, aber die detaillierte Ausgestaltung nur in der Zusammenarbeit zwischen Werkstofffachmann, Fertigungstechniker und Konstrukteur erfolgen kann. Die gute Trennbarkeit der Forderungen in der Anforderungsliste des Windsichters gestattete im vorliegenden Fall eine Optimierung der Konstruktion durch gezielten Einsatz von Werkstoffeigenschaften. Der in der Einleitung angedeutete „Pferdefuß“ dieser Konstruktion bestand in einer Eigenschaft des Sichtprozesses, der zum Entwicklungszeitraum so nicht absehbar

war: Technische Pulver enthalten immer einen gewissen Anteil an Grobkornpartikeln, die der Strömungsform des Sichters bei den vorgesehenen Geschwindigkeiten nicht folgen und unter Bildung von Sekundärwirbeln Lamellenverschleiß verursachen. Für eine industriell erfolgreiche Lösung dieser Windsichterkonstruktion ist die Entwicklung einer Schutzschicht gegen Abrasivverschleiß notwendig.

4 Entwicklung keramischer Ventilatoren für die Umwälzung heißer Gase bis 1350°C

Hochtemperaturprozesse mit Prozesstemperaturen über 1000 °C spielen in der Verfahrenstechnik im Hinblick auf den Energieaufwand eine wichtige Rolle. Dabei dienen Einrichtungen zur Gasförderung dazu, heiße Gase an den gewünschten Ort zu bringen bzw. umzuwälzen. Geräte zur Heißgasförderung sind deshalb wünschenswert, weil sich mit ihnen die Prozessführung gezielt verbessern lässt, d.h. dass sich Temperaturfelder vergleichmäßigen, Schadstoffemissionen reduzieren und der Energieeinsatz optimieren lassen usw.. Es sollte deshalb ein Ventilator entwickelt und erprobt werden, der für Gastemperaturen bis 1350 °C einsetzbar ist. Dieses Ziel ist durch einfache Weiterentwicklung der bekannten Stahlventilatoren (max. bis 800° bzw. kurzzeitig bis 1000°C einsetzbar) nicht zu errei-

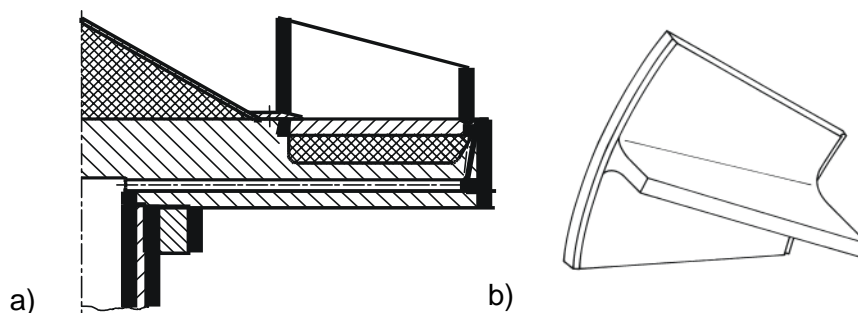


Bild 16: a) Versuchsaufbau aus Stahlrad und Keramikschaufeln; b) Keramikschaufeln /11, 12/

chen. Bemühungen um eine Konstruktion aus hochtemperaturbeständigen Nickel-Legierungen, die als Werkstoff für (gekühlte) Schaufeln von Gasturbinen Verwendung finden, mussten wegen der enormen Werkstoff- und Fertigungskosten aufgegeben werden. Die zwischenzeitlich entwickelten ODS-Legierungen (Oxid-Dispersionsverfestigte Superlegierungen) könnten eventuell in der Zukunft als Alternative zu keramischen Werkstoffen neue Lösungsansätze bieten, wenn in ihrer Entwicklung ausreichende Korrosionsbeständigkeit erreicht wird.

Als Lösung wird eine Konstruktion mit hochtemperaturfester Keramik gesehen. Keramische Werkstoffe sind im Maschinenbau bisher unüblich und den meisten Konstrukteuren deshalb wenig vertraut. Dies gilt für die Werkstoffauswahl als auch für die fertigungsgerechte, beanspruchungsgerechte und betriebsgerechte Gestaltung. Für die hier benötigten Bauteilgeometrien kommt praktisch nur der Schlickerguss infrage, der zu einer Gestaltung ähnlich Graugussteilen führt, also Konstruktionen mit angemessenen Aushebeschrägen und ohne Hinterschneidungen. Der anschließende Brennprozess bedingt eine Gestaltung ohne merkliche Querschnittsänderungen und mit begrenzten Wandstärken. Wie sich im Laufe der Entwicklung zeigte, besteht bei flächigen Strukturen, z.B. Scheiben, die Gefahr eines Verziehens beim Brennen. Es zeigte sich, dass SiSiC (Silizium-infiltriertes Silizium-Carbid) erste Wahl für die geplante Anwendung ist, weil dieser Werkstoff eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und die Herstellung großer Bauteile gestattet.

Es wurden eine Reihe von konstruktiven Lösungen erarbeitet, gebaut und in einer halbindustriellen Versuchsanlage, die Temperaturen bis zu 1400 °C erlaubt, getestet. Die folgenden Darstellungen sollen zeigen, wie in der Zusammenarbeit zwischen Maschinenbaukonstrukteur und ausführendem

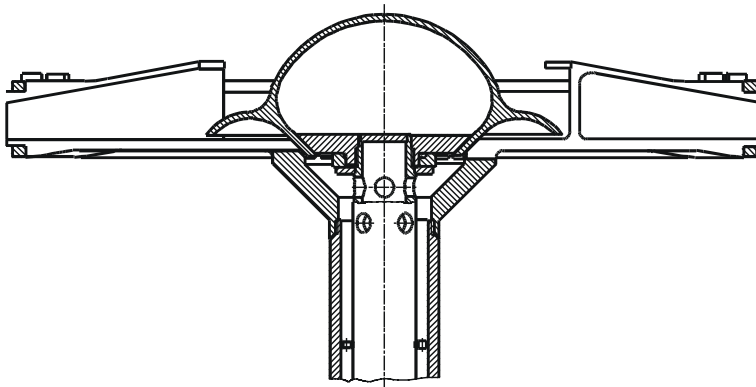


Bild 17: Modulare Lösung des Heißgasventilators mit einzelnen SiSiC-Schaufelelementen /11, 12/

Unternehmen der Keramikbranche schrittweise eine Struktur entwickelt wurde, die den besonderen Anforderungen beim Einsatz eines solchen Heißgaslüfters gerecht wird.

Zum Test einzelner Schaufeln unterschiedlicher Geometrie und aus unterschiedlichen Werkstoffen wurde ein Versuchsrad aus Stahl konstruiert und gebaut (**Bild 16a**), in das die einzelnen Keramik-Schaukeln, bestehend aus tortenstück-artiger Fußplatte und Schaufelblatt (**Bild 16b**), eingehängt wurden. Durch Aneinanderfügen mehrerer Schaufeln entstand ein vollständiger Schaufelkranz. Ein solcher modularer Aufbau erschien deshalb besonders günstig, weil das Versagensrisiko beim Einsatz von Einzelschaukeln mit begrenzten Abmessungen deutlich geringer als mit monolithischen Rädern eingeschätzt wurde.

Versuche in der erwähnten Ofenanlage zeigten rasch die Grenzen des Konzepts:

- Die Stahlrückenscheibe war mit Kühlluftkanälen versehen. Der zum Schutz des Rades notwendige Kühlluftstrom betrug bis 10 % des Förderstroms und führte zu einer starken Abkühlung der Prozessgase.
- Eine Temperatur über 1000 °C war nicht zu verwirklichen, weil die Temperatur der Stahlrückenscheibe um nicht mehr als 200 K gegenüber der Prozesstemperatur abgesenkt werden konnte (Grenztemperatur 800 °C).
- Unter der Wirkung der Fliehkraft und der Erwärmung waren Gleitbewegungen zwischen den Schaufelfußteilen unvermeidlich. Dazu mussten alle Gleitflächen geschliffen werden. Dennoch entstanden durch örtliche Gleitbehinderung Unwuchten.

Ferner zeigte sich, dass Schaufeln aus reaktionsgebundenem Silicium-Nitrid (RBSN) infolge der geringen Wärmeleitung eine starke Isolierung gegen die Stahlscheibe bewirken. Die daraus resultierenden starken Temperaturgradienten verursachten aber kritische Wärmespannungen. Das Konzept einer gekühlten Stahl-Tragekonstruktion mit einem keramischen Wärmeschutz wurde danach aufgegeben.

Bild 17 zeigt eine weitere modulare Lösung mit einzelnen SiSiC-Schaufelelement-

en (Fußplatte, Schaufel und Deckscheibenabschnitt), die in zwei SiC-armierte CFC-Ringe (Carbon fibre reinforced carbon) als die Fliehkraftbeanspruchung aufnehmende Elemente eingehängt wurden. Unwuchtprobleme und die geringe Beständigkeit der Schutzschicht für die CFC-Ringe zwangen dazu, dieses Konzept nicht weiter zu verfolgen.

Ein wesentliches Problem von Stahl-Heißgaslüftern ist der Wärmefluss über die Welle aus dem Heißgasraum in die Umgebung. Man sollte daher Lösungen anstreben, bei denen es gelingt, den Wärmefluss aus dem Ofenraum heraus zu begrenzen. Damit ergibt sich als konstruktives Kernproblem die Gestaltung des Übergangs warm-kalt und des Übergangs Stahl-Keramik, also einmal die Schaffung einer Wärmesperre und zum anderen eine geeignete Welle-Nabe-Verbindung zwischen Stahlwelle und Keramikrad. Eine konstruktionssystematische Untersuchung zu den Welle-Nabe-Verbindungen ergab, dass wegen der Kerbempfindlichkeit keramischer Werkstoffe und wegen der höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl im Vergleich mit Keramik formschlüssige Verbindungen nicht in Frage kamen. So wurde eine Konstruktion angestrebt, bei der das Rad ungekühlt der Gastemperatur ausgesetzt wird und der zu kühlende Bereich möglichst aus dem Ofenraum verlagert werden sollte.

Erste Lösungen in dieser Richtung mit einem Si-SiC-Scheibenring mit aufgarnierten rein radial verlaufenden Schaufeln führte zu Unwuchten durch Verzug der Keramikstruktur. Nachdem Strömungsversuche gezeigt hatten, dass mit rein radial verlaufenden Schaufeln konstanter Breite auch bei Verzicht auf Deck- und Rückenscheibe ein befriedi-

gendes Förderverhalten zu erreichen ist, wurde ein so genanntes „Paddelrad“ (**Bild 18**) entworfen. Zur Abstützung des Rades diente ein an den Radkörper angarnierter großer Flansch, zur Zentrierung ein ZrO_2 -Ring, dessen Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen dem von SiSiC und Stahl liegt. Der Verzicht auf Deck- und Rückenscheibe und der Spalt zwischen angarniertem Flansch und Rad bringt eine Steigerung der Temperaturwechselbeständigkeit, da sich die langen schlanken Flügel ungehindert ausdehnen können. Durch Verzicht auf eine Schaufelkrümmung treten nur geringe „Fliehkraftnormalspannungen“ und wegen der geringen Dichte des Fluids keine Biegebeanspruchungen auf. Auch dieses Rad wies wie folgt immer noch einige Mängel auf, obwohl ein mehrstündiger Betrieb bei $1300^\circ C$ durchgeführt werden konnte:

- Die Wärmeabfuhr durch den angarnierten Rückenflansch war zu hoch. Dadurch entstanden unzulässig hohe Wärmespannungen im Bereich der Garnierung.
- Der Radkörper war scharfkantig, was besonders an den Schaufelkanten beim An- und Abfahren zu kritischen Wärmespannungen führt.
- Das eingesetzte keramische Isolierpapier setzte sich im Verlauf des Betriebs und büßte dabei einen Teil seiner Wärmesperrfunktion ein. Die Elastizität des faserigen Materials bewirkte einen dynamisch unbefriedigenden Lauf.
- Kriechen der Metallteile der Nabe als Folge unzureichender Kühlung führte zum Klemmen nach der Abkühlung und behinderte die Demontage.
- Um hohe Grünfestigkeit zu erzielen, wurde ein selbstaushärtender Schlicker verwendet, dessen Festigkeitsstreuung zu groß war (Weibull-Modul < 6), um eine ausreichend geringe Ausfallwahrscheinlichkeit zu sichern.

Die Erfahrungen mit diesem Rad wurden bei der Gestaltung der abschließenden Konstruktionsform genutzt: Das Rad läuft hängend, d.h. mit vertikaler Achsanordnung in einem Gehäuse mit Feuerfestausmauerung. Ein über Frequenzwandler in der Drehzahl verstellbarer Motor treibt über einen Keilriementrieb die Antriebswelle an. Dadurch entstehen eindeutige Lagerlasten für die zwei Standard-

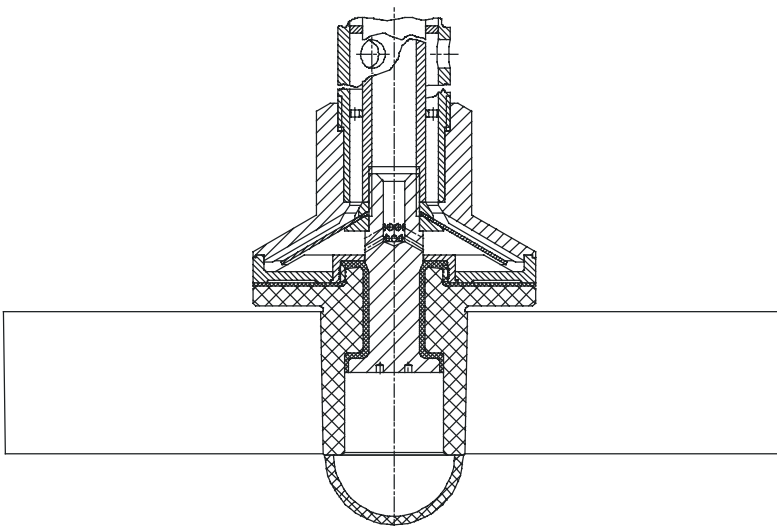


Bild 18: Paddelrad /11, 12/

Die etwas ausführliche Beschreibung des Werdeganges dieser Keramik-Metallkonstruktion soll neben dem positiven Effekt der Problemlösung besonders aufzeigen, welcher Informationsbedarf zwischen Maschinenbau, Werkstoffkunde, Fertigungstechnik und Verfahrenstechnik notwendig ist, um eine der verfahrenstechnischen Aufgabenstellung entsprechende Maschinenbaulösung zu schaffen. Eines der schwierigsten Probleme war der für den Konstrukteur ungewohnte Umgang mit den Eigenschaften des Werkstoffes Keramik: Wärmeausdehnung, Wärmeleitung, Festigkeitsverhalten (Spröbruchverhalten, statistische Kennwerte nach der Weibull-Verteilung), Reibung usw. Für das mitarbeitende Unternehmen aus der Keramikbranche waren Begriffe wie Kraftfluß, Kerbwirkung, Mehrachsigkeit der Spannungszustände zu verinnerlichen und in die Fertigungsprozesse umzusetzen.

Entsprechend den Thesen der Einleitung mußten zwei Negativverfahren bei der Umsetzung dieser Konstruktion in die industrielle Anwendung gemacht werden: Das Vertrauen in den Werkstoff Keramik bezüglich seiner Dauerfestigkeit ist so gering, dass eine Umsetzung in der verfahrenstechnischen Industrie nicht erfolgte, weil bei einem potentiellen Bruch eines Ventilators die Bruchstücke eine ganze Charge des verfahrenstechnischen Produkts zerstören würde.

Der andere „Pferdefuß“ war die Wirtschaftlichkeit: Die Keramikindustrie geht von Produktionsmengen vorstellungen aus, die sich mit der Entwicklung eines High-Tech-Produktes besonderer Anwendung und hohen Qualitätsanforderungen nicht decken.

5 Entwicklung einer Reaktionsschwingmühle

Mit dem folgenden Beispiel soll neben der problemangepaßten Lösung auch gezeigt werden, wie die Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen in einem Baukastensystem zur Erfüllung von Anforderungen genutzt werden kann. Grundlage ist die Entwicklung eines verfahrenstechnischen Prozesses zur simultanen Zerkleinerung und Umsetzung von Feststoffreaktionen /11, 13, 14/. Im Mittelpunkt dieses Prozesses steht eine Schwingmühle mit integriertem Reaktor, die unter hoher Beschleunigung von mehr als 60 g steht und bei der – abhängig von der durchzuführenden Reaktion – Prozeßtemperaturen bis zu 400°C auftreten können. Die außerordentlich erfolgreichen Grundlagenuntersuchungen /11/ an einer in Stahl ausgeführten Mühlenkonstruktion führten zu dem Ergebnis, dass eine Überarbeitung der Mühlenstruktur hinsichtlich der Beanspruchungen unter Beschleunigung, der thermischen Stabilität und der Angleichung der Mahlbehälter an die durchzufüh-

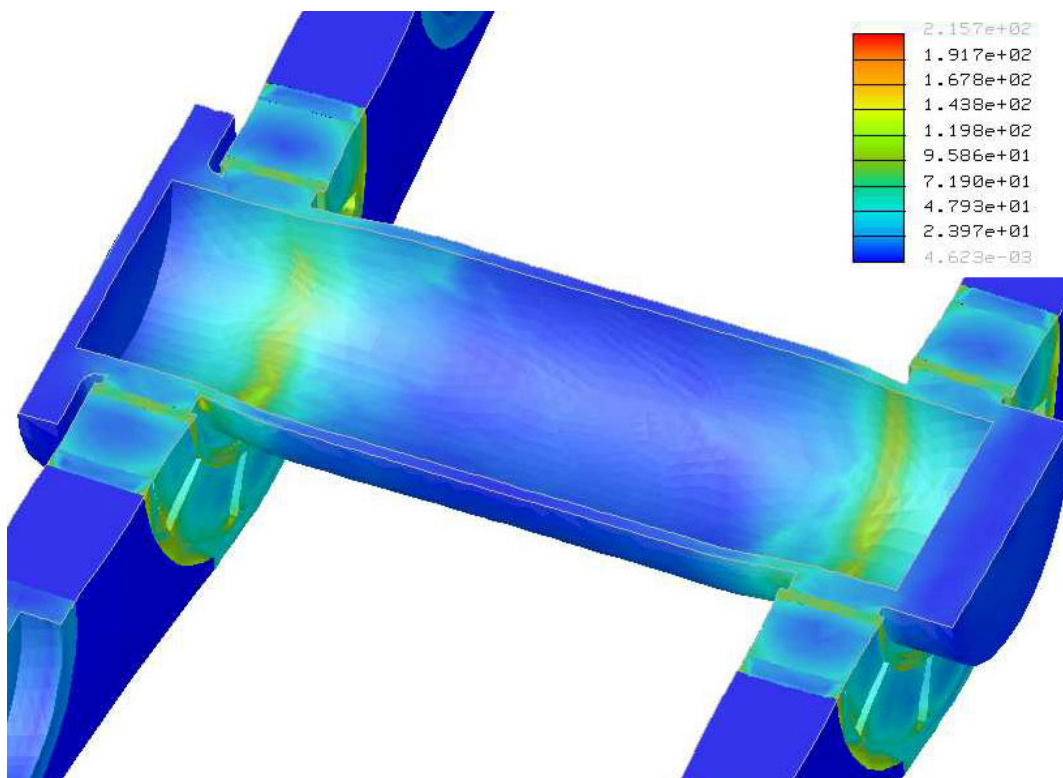


Bild 20: 3-D Modell des Reaktionsbehälters und der Mühlenstruktur mit unterschiedlichen Werkstoffen /15/

rende Reaktion zu einem Baukastensystem führt, das den jeweiligen prozeßbedingten Anforderungen angepaßt werden kann (Forderungen wie: Einsatz bei aggressiven Gasen wie HCl, Chlorsilane; kontinuierliche Zu- und Abfuhr von Gas und Reaktionsgut; Wärme- und Luftisolation usw.). Von den unterschiedlichen Lösungen werden bei der vorliegenden Betrachtung die Leichtbaukonzepte besonders herausgestellt:

Betrachtet man die Einsatzbedingungen der Reaktionsschwingmühle differenzierter, so stellt man fest, dass das Gewicht eine zentrale Stellung einnimmt, die direkt auf die Kosten und die Systemfunktionen wirkt. Die geforderte Beschleunigung von mindestens 60g bei niedriger Drehzahl ist nur mit einer großen Amplitude zu realisieren, auf die wiederum die Massenzusammensetzung einen großen Einfluß hat. Damit erscheint es aus funktionalen und ökonomischen Gründen zweckmäßig, das Gewicht zu reduzieren, ohne die Tragfähigkeit, Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern.

Um die Gesamtmasse der Reaktionsmühle zu verringern, wird eine Traverse in Verbundbauweise entwickelt, die aus einem kohlefaserverstärkten Kunststoff die Verbindung zwischen dem Mahlbehälter und den Unwuchtwellen gewährleistet (**Bild 20**). Diese Verbindung muß möglichst steif sein und eine Demontage des Mahlbehälters ermöglichen. Weiterhin muß das zu konstruierende Bauteil die Elemente für die Unwuchtlagerung und der Federelemente aufnehmen können bzw. beinhalten.

Bei der Auswahl der Matrixsysteme wird ersichtlich, dass es nur ein Harzsystem gibt, das für Temperaturen bis maximal 270°C anwendbar ist. Die Bismaleinimidharze, die eine so hohe Wärmebeständigkeit aufweisen, erfordern jedoch einen sehr hohen verfahrenstechnischen Aufwand, so daß diese nicht zur Anwendung kommen konnten. Eine gute Alternative stellt jedoch das für die RTM-Technik geeignete und wärmebeständige Epoxidharz EPOLAM 2080 von der Firma Axson mit einer Glasübergangstemperatur von 190°C dar.

Als Fasermaterial kommt für die Anwendung nur eine Carbonfaser des Typs HTA in Frage, da diese Fasern als einzige eine genügende Steifigkeit aufweisen und bis 500°C wärmebeständig sind. Die Fasern werden als Gewebe in Körperbindung verwendet, da sich diese besonders gut für ein sphärisch gekrümmtes Bauteil eignen.

Die im Vergleich zur Mahlbehältertemperatur von 250°C relativ niedrige Wärmebeständigkeit des Matrixwerkstoffes und des Faser-Kernwerkstoffes führt dazu, dass die Trägerstruktur durch eine Wärmeisolierung vom Mahlbehälter getrennt werden muß. Für die Wärmeisolierung wird Zirkonoxid verwendet, da durch das Keramikelement eine steife Anbindung der Trägerstruktur an den Mahlbehälter und eine relative geringe Wärmeleitung gewährleistet wird. Der Behälter selbst besteht aus einer dünnen Metalltragschale, in die Keramikeinsätze so eingeschoben werden, dass im Sinne des konstruktionsmethodischen Prinzips der Aufgabentrennung alle mechanischen Schnittgrößen von der Metall-Kunststoff-Tragestruktur übernommen werden, während die keramischen Bauteile die für die chemische Reaktion notwendigen Voraussetzungen gewährleisten und eine Wärmeisolierung garantieren. Dies erfordert eine sorgfältige und aufwendige numerische Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens ebenso wie eine Betrachtung von Wärmefluß und thermischen Spannungen bzw. Dehnungen in der gesamten Struktur.

Auch hier ist wie beim letzten Beispiel durch die Anwendung einer Reihe unterschiedlicher Werkstoffe eine Anpassung an die funktionellen Anforderungen der Reaktionsmühle gefunden worden und im Sinne des Baukastensystems ein breiteres Anwendungsfeld gewährleistet.

6 Zusammenfassung

Anhand von einigen Beispielen konnte nachgewiesen werden, dass bei den vielfältigen Anforderungen an moderne und marktgerechte Produkte die Suche nach dem Werkstoff zur Erfüllung eines Teils dieser Anforderungen erhebliche Schwierigkeiten bereiten kann. In vielen Fällen gelingt eine Produktoptimierung nur durch die Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen, problemorientierten Werkstoffeigenschaften. Auch hier bedeutet die Werkstoffwahl immer einen Kompromiss zwischen den Produkthanforderungen und den Werkstoffeigenschaften. Es konnte nachgewiesen werden, daß einerseits ein unterschiedliches Werkstoffverhalten in Abhängigkeit von der Belastung auch ohne Wechsel des Werkstoffs Optimierungspotenziale enthält (Plastizierungsvermögen der Metalle), andererseits selbst die Kombination einer Reihe von Werkstoffen Anforderungslücken hinterläßt, wie dies besonders bei den prozeßgerechten Maschinenlösungen in der Verfahrenstechnik zu beobachten ist.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Betrachtung ist die Forderung nach einer interdisziplinären Lösung des anstehenden Entwicklungsproblems. Der die Funktionen beherrschende Entwickler kann nur gemeinsam mit dem Werkstofffachmann die Produkthanforderungen bezüglich ihrer Abbildung auf Werkstoffeigenschaften untersuchen und nach dem Prinzip des „Werkstoffe Gestaltens“ Werkstoffeigenschaften, geometrische Form, Funktionsbereitstellung, Verschleißverhinderung usw. entwickeln. In den weitaus meisten Fällen ist hierzu der Fertigungstechnologe notwendig, der die Realisierung dieser Gestaltung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten leisten kann.

7 Literatur

- /1/ Kruse, P.J.: Anforderungen in der Systementwicklung. Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Anforderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten. Diss. TU Clausthal 1995. Fortschrittberichte VDI, Reihe 20, Nr. 191. VDI-Verlag Düsseldorf 1996
- /2/ Dieter, G.E.: Engineering Design: A Materials and Processing Approach. McGraw-Hill, New York 1991
- /3/ Große, A.: Interdisziplinäre Werkstoffauswahl durch Aufbau eines Material Data Mart. Diss. TU Clausthal 2000
- /4/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag Düsseldorf 1993
- /5/ Fischer, D.R.: Entwicklung eines objektorientierten Informationssystems zur optimierten Werkstoffauswahl. Springer Berlin 1995 (Diss.)
- /6/ Achatt, W.; Simmchen, E.; Zouhar, G.: Konstruktionswerkstoffe des Maschinen- und Anlagenbaus. 5. Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Stuttgart 1998
- /7/ Ashby, M.F.: Materials selection in Engineering Design. Indian Journal of Technology. Vol. 28 (1990) June-August, pp. 217-225
- /8/ Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion Oktober 10-1999, S. 27-35
- /9/ Rothe, F.: Spielbehaftete Laschenverbindungen bei quasistatischer Belastung unter der Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen. Diss. TU Clausthal 1994
- /10/ Rübbelke, L.: Konstruktive Lösungen und Auslegungsmethoden für Hochgeschwindigkeitsabweiseradsichter aus Leichtbauwerkstoffen in der Verfahrenstechnik. Diss. TU Clausthal 1994
- /11/ Dietz, P. (Hrsg.): Verfahrenstechnische Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen. Springer Berlin 2000
- /12/ Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, dargestellt am Beispiel eines keramischen Heißgasventilators. Diss. TU Clausthal 1996
- /13/ Bade, S.: Einsatz einer Reaktionsschwingmühle zur simultanen Zerkleinerung und chemischen Reaktion von Ferrosilizium mit Chlorwasserstoff. Diss. TU Clausthal 1996
- /14/ Bock, U.; Schönert, K.: Charge Motion Model for Vibration Mills with High Excitation. Powder Technology 105, pp.311-320
- /15/ Dietz, P.; Grünendick, T.: Konstruktion einer kontinuierlich arbeitenden Schwingmühle mit hohen Beschleunigungen. Zwischenbericht zu einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben, 2000