

# Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen

## MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN AM BEISPIEL VERFAHRENSTECHNISCHER MASCHINEN

Von Torsten Grünendick

### Einleitung: Werkstoffwahl als Aufgabe des Konstrukteurs

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Forschungsausschreibungen erwecken den Eindruck, als ob die Entwicklung neuer Werkstoffe Hauptausgangspunkt für die Entwicklung marktgerechter Produkte sei. Für einen Produktentwickler ist dies nur schwer nachvollziehbar; denn nach allen gängigen Vorstellungen ist die Idee, die Entsprechung der Anforderung durch ein Lösungsprinzip, die treibende Kraft der Entwicklung neuer und innovativer Produkte. Die Wahl eines neuen Werkstoffs bedeutet eigentlich nur, dass die bekannten Werkstoffe – also die, die in ihren Eigenschaften wie in ihrem Fertigungsverhalten bekannt und im Stücklistensystem des Unternehmens enthalten sind – Forderungen an die neue Konstruktionssidee nicht erfüllen.

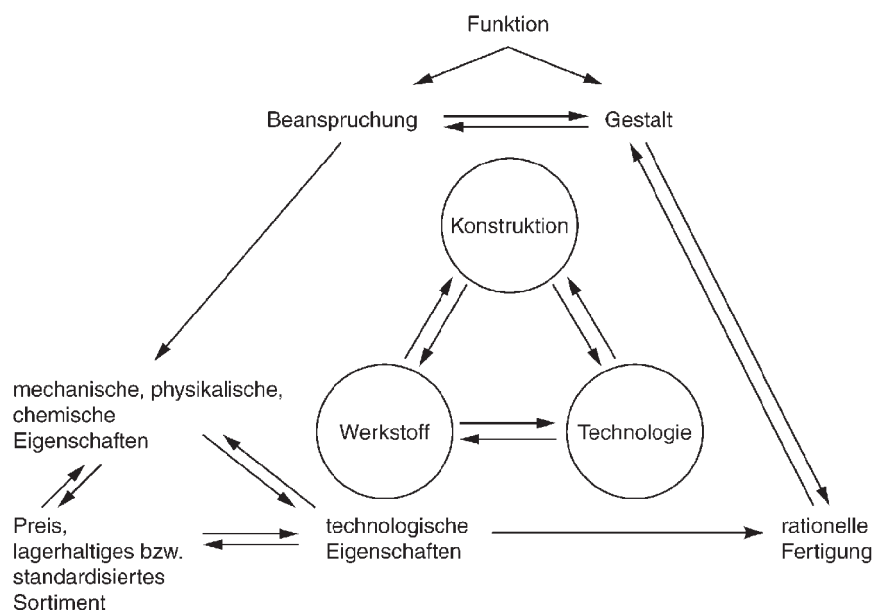
**These 1:** Die Wahl des Werkstoffs stellt aus der Sicht des Konstrukteurs eine Restriktion dar, die mit dem eigentlichen schöpferischen Prozess der Produktentwicklung nichts zu tun hat.

Grundlage der Produktentwicklung ist immer eine Reihe von Anforderungen, die aus einer Vielfalt von Bereichen stammen und oft weit die gewünschte Hauptfunktion übersteigen. Demgegenüber hat jeder Werkstoff eine Unmenge von Eigenschaften, die mit dem Anforderungsprofil an das Produkt abgeglichen werden müssen. Somit besteht nur eine geringe Chance für eine gute Übereinstimmung von Produktanforderungen und Werkstoffeigenschaften. Hieraus folgt:

**These 2:** Die Wahl eines Werkstoffs stellt immer einen Kompromiss dar, in dem spezifische Merkmale eines Werkstoffs die vom Produkt geforderten Eigenschaften begünstigen, andere Merkmale aber den Anforderungen nicht gerecht werden.

Hieraus ist zunächst zu schließen, dass es den idealen Werkstoff nicht gibt – auch nicht für eine speziell ausgewählte Konstruktionsaufgabe. Hieraus ist aber auch ableitbar, dass man mit Hilfe von Werkstofftechnologien bestimmte Eigenschaften forcieren kann (z.B. bei Legierungen) oder dass man mit der konstruktiven Kombination von Bauteilen aus Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften den Kompromiss etwas in Richtung der gewünschten Produkteigenschaften verschieben kann.

zen oder der Entwicklung von faserverstärkten Tragstrukturen. Wesentlich dabei ist, dass dem Konstrukteur die Aufgabe zukommt, mit Hilfe der Werkstoff- und der Fertigungstechnik die Eigenschaften zu „konstruieren“, um der Erfüllung der Anforderung durch Integration der Werkstoff- und Herstellungstechnik in die Gestaltung der Bauteile zu genügen (**Bild 1**). Wenn wir von „marktgerechten“ Produkten sprechen, ist damit immer auch eine wirtschaftliche Herstellung gemeint. Die Wirt-



**Bild 1: Werkstoffauswahl unter dem Aspekt der Interaktion von Konstruktion, Technologie und Werkstoff (GROBE 2000)**

**These 3:** 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 Werkstoffs.

Hiervon leben seit Generationen schon Konstrukteure bei der Gestaltung von Oberflächenstruktur, Verschleißsätt-

schafflichkeit – und damit ist oft die Menge in die Produktion fließenden Materials verbunden – stellt 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. Es sei daher die letzte These genannt: ▶

**These 4:** Der wirtschaftliche Erfolg der Anwendung neuer Werkstoffe zur Erzielung bestimmter Bauteileigenschaften ist abhängig von einer preisgünstigen Werkstoffherstellung, Bearbeitung und Montage der zu entwickelnden Bauteile.

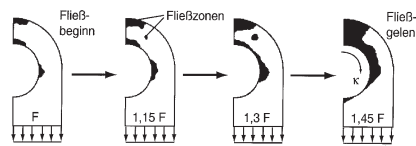
Die Wahl der Werkstoffe oder ihrer Kombinationen im Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 (1993) erfolgt meist erst in den letzten Phasen „Gestalten der maßgebenden Module“ und „Gestalten des gesamten Produkts“. Diese späte Auswahl ist im Wesentlichen bedingt durch die bis zu diesem Zeitpunkt nur sehr unpräzise Formulierung von Abmessungen, Belastungen oder weiteren Randbedingungen der Konstruktion. 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. Eine effektive Wahl und eine Optimierung bedürfen daher oftmals einer „Schleifenbildung“ im Konstruktionsprozess, um eine schrittweise Verbesserung der Informationen während des Konstruktionsvorgangs sicherzustellen.

An einigen Beispielen soll aufgezeigt werden, wie durch die gezielte Anwendung von Bauteilen aus kombinierten Werkstoffen konstruktive Lösungsmöglichkeiten für spezielle Entwicklungsaufgaben geschaffen werden. 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.

### Nutzung der plastischen Verformung zur Tragfähigkeitssteigerung

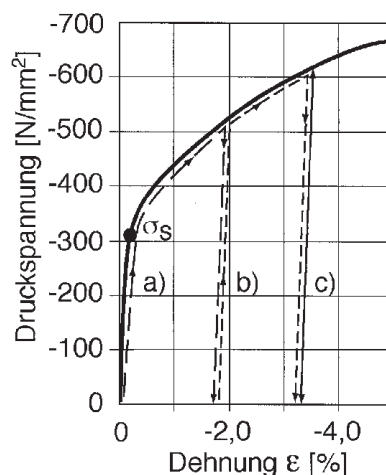
Die Erzeugung spezieller Eigenschaften setzt nicht immer die Anwendung neuer Werkstoffe voraus, auch die Eigenschaftsveränderung eines einzigen Werkstoffs in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich enthält ein großes Potential für das Prinzip der Bauteilstruktur aus der Kombination von Werkstoffeigenschaften.

Die Grenzbeanspruchung von Maschinenteilen wird im Allgemeinen nach dem Kriterium des linear-elastischen Verhaltens von Bauteil und Werkstoff ermittelt; das Werkstoffverhalten bei überelastischer Beanspruchung wird meist als „zusätzliche

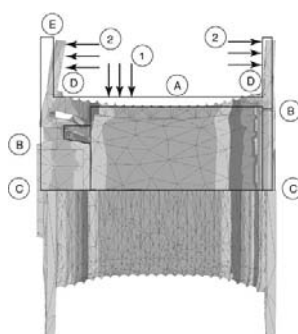


**Bild 2:** Plastizierungsfolgen einer spielbehafteten Bolzen-Laschen-Verbindung  
κ: Kontaktwinkel des Bolzen-Laschen-Kontakts; F: Zuglast (DIETZ 1999)

Sicherheit“ nicht in die Berechnung mit einbezogen. **Bild 2** zeigt am Beispiel einer Bolzen-Laschen-Verbindung, dass der eigentliche Versagensfall „Durchplastizieren“ ein auf 145% gesteigertes Lastüber-



**Bild 3:** Spannungs-Dehnungsdiagramm des quasistatischen Druckversuchs für den Trommelwerkstoff GGG 40.3  
Eingetragen ist der Vorgang des „Einfahrens“ der Trommel infolge erstmaliger Belastung (a) und (b) sowie der dadurch vergrößerte elastische Bereich für die nachfolgenden Belastungen (c).



**Bild 4:** 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

tragungspotential 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. Dies setzt aber Beanspruchungszustände mit hinreichendem „Plastizierungspotential“ im Querschnitt voraus, wie dies im Beispiel durch vorwiegende Biegebeanspruchung gegeben ist (DIETZ 1999, ROTHE 1994).

Ein weiteres Beispiel soll diese Aussage der Leistungssteigerung stützen und zugleich auf eine Verlagerung der kritischen Lastfälle hinweisen: Seiltrommeln erfahren durch die Seilumschnürung eine tangentielle Druckspannung des Trommelmantels als maßgebende Beanspruchung; bei überelastischer Beanspruchung versprechen die Werkstoffangaben eine Verdoppelung der Belastungsfähigkeit (**Bild 3**). In der Praxis werden durch sogenannte „Einfahrversuche“ in den überelastischen Bereich Seiltrommeln vorverformt und damit für höhere Belastungen „trainiert“. Die nachfolgenden betrieblichen Belastungsvorgänge stoßen auf ein linear-elastisches Dehnungsverhalten, bei dem 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 4**, Pos. A), dass die Auslegung der Trommeln heute andere Schadensfälle berücksichtigen muss:

- Schiefstellungen infolge der plastischen Verformungen führen zu Lagerschäden oder verursachen Eingriffsstörungen im Antriebsstrang (**Bild 4**, Pos. B).
- Plastische Axialverformungen der Trommel tragen zu Störungen in der Lagerung bei (**Bild 4**, Pos. C).
- Der Übergang der plastischen zur elastischen Verformung im Bereich der Bordscheibenanschlüsse führt zu Vorspannungen und damit zur Vergrößerung der Kerbwirkung (**Bild 4**, Pos. D).

- Der Bereich der Bordscheiben kann unzulässige Verformungen aufweisen, die den Bauraum überschreiten. Im Fall der Schiefstellung von Bremscheiben wird die Bremsfunktion beeinträchtigt (Bild 4, Pos. E).

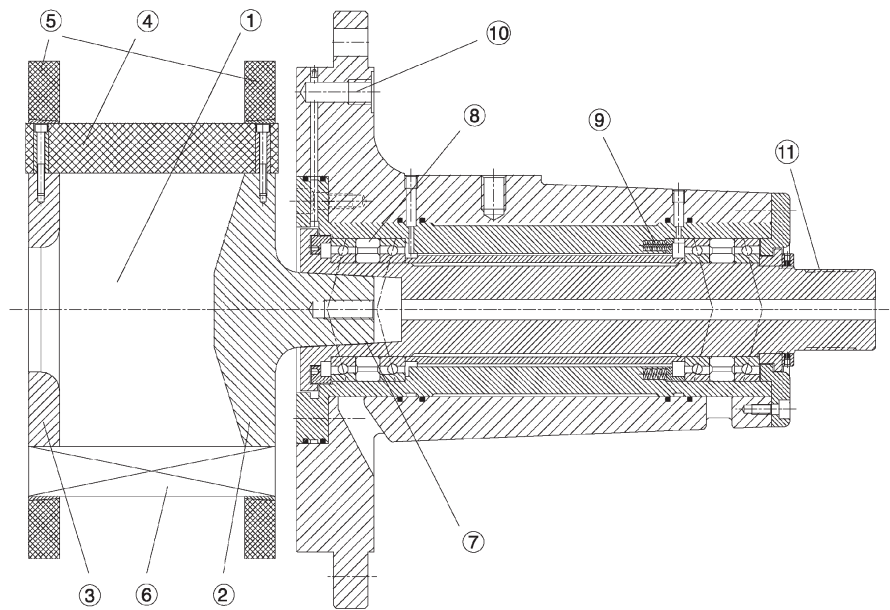
Bezüglich der in der Einleitung genannten Thesen besteht sicherlich kein Zweifel, dass allein die Eigenschaftsveränderung eines an sich bekannten Werkstoffes zu der im Vordergrund stehenden Tragfähigkeitssteigerung führt. Während im Fall der Bolzen-Laschen-Verbindung die Tragfähigkeitssteigerung aufgrund 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.

### 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:

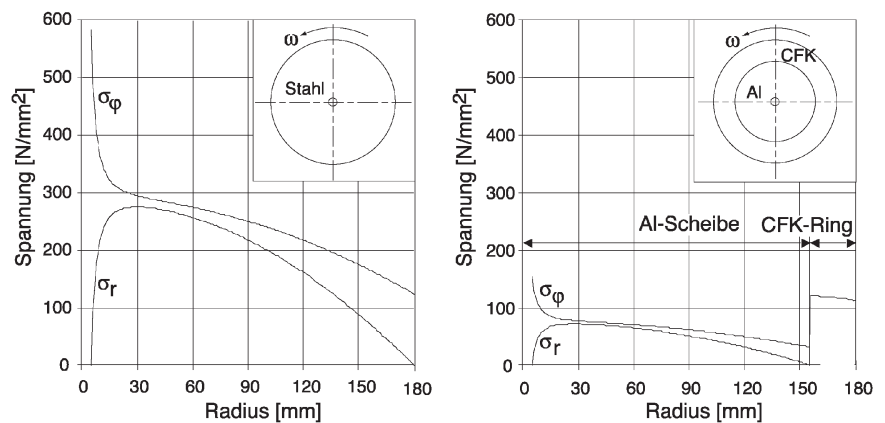
Aus der Optimierung eines mechanischen Klassierprozesses mit der Forderung nach einer Trenngrenze von 1  $\mu\text{m}$  Partikeldurchmesser ergab sich die Konstruktion eines Rotors für einen Abweiseradsichter, der an der verfahrenstechnischen Wirkfläche eine Umfangsgeschwindigkeit von mindestens 250 m/s bietet. Die konsequente Anwendung von Leichtbauprinzipien zur Erreichung hoher Umfangsgeschwindigkeiten führt zur Anwendung von Hybridbauweisen unter Verwendung von Faserverbundwerkstoffen (Bild 5), auf die wegen der Interaktion von konstruktiver Gestaltung, Werkstoffauswahl und Fertigungstechnik näher eingegangen 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. Mit Hilfe der anisotropen Steifigkeitsbeziehungen ist eine Optimierung der Struktur durch das Aufeinander-



**Bild 5: Aufbau eines einseitig gelagerten Abweiseradsichters in Hybridkonstruktion für Umfangsgeschwindigkeiten bis 300 m/s (RÜBELKE 1994, DIETZ 2000)**

- 1: Hybridsichter;
- 2: Antriebsscheibe;
- 3: getriebene Scheibe mit Feingutauslass;
- 4: Haltestäbe;
- 5: Faserverbundringe;
- 6: Lamellen



**Bild 6: Spannungsverlauf in den Scheiben des Hochgeschwindigkeitswindsichters bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 300 m/s**

(links: Stahlscheibe; rechts: Aluminiumscheibe mit Faserverbundring) (RÜBELKE 1994)

schichten von unidirektionalen Prepregs unter Ausrichtung der Fasern gemäß den Schnittgrößen der Bauteile möglich – der rechnerische Aufwand zur Optimierung der Faserkombinationen ist jedoch ungeheuerlich.

Nach dem konstruktionsmethodischen Prinzip der Aufgabentrennung wurde im vorliegenden Rotor die Mitnahmefunktion der Lamellen und Haltestäbe durch Metallscheiben (2 und 3) vorgenommen, die Auf-

nahme der Fliehbeanspruchungen geschieht über einen aufgesetzten Ring (5) aus Faserverbundwerkstoff (CFK-HM) mit hohem Elastizitätsmodul und geringem spezifischen Gewicht, der infolge Ausdehnungsbehinderung am äußeren Rand der rotierenden Scheibe die Fliehspannungen in dieser Scheibe verringert. Bild 6 zeigt die enormen Beanspruchungsunterschiede gegenüber einer umlaufenden Stahlscheibe an einem Berechnungsbeispiel. ►

Die gute Trennbarkeit der Forderungen in der Anforderungsliste des Windsichters gestattete im vorliegenden Fall eine Optimierung der Konstruktion durch gezielten Einsatz von Werkstoffeigenschaften in der Zusammenarbeit zwischen Werkstofffachmann und Konstrukteur. Der in der Einleitung angedeutete „Pferdefuß“ dieser Konstruktion bestand in der Neigung des Sichtprozesses zu Turbulenzen in Lamellennähe, die zu Lamellenverschleiß führten. Für eine industriell erfolgreiche Lösung dieser Windsichterkonstruktion ist als weitere unverzichtbare „Werkstoffeigenschaft“ die Entwicklung einer Schutzschicht gegen Abrasivverschleiß der Lamellen notwendig.

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

In Hochtemperaturprozessen sollte ein Ventilator entwickelt und erprobt werden, der für Gastemperaturen bis 1350 °C einsetzbar

Struktur entwickelt wurde. Sie sollen aber auch die Unsicherheit demonstrieren, die heute noch bei Konstrukteuren im Umgang mit keramischen Werkstoffen vorherrscht.

Im ersten Schritt wurde ein Versuchsrad aus Stahl konstruiert und gebaut (Bild 7a), in das die einzelnen Keramik-Schaufeln, bestehend aus tortenstückartiger Fußplatte und Schaufelblatt (Bild 7b), eingehängt wurden. Ein solcher modularer Aufbau erschien deshalb besonders günstig, weil das Versagensrisiko beim Einsatz von Einzelschaufeln mit begrenzten Abmessungen deutlich geringer als mit monolithischen Rädern eingeschätzt wurde. Versuche in der erwähnten Ofenanlage zeigten rasch die Grenzen des Konzepts, da unter

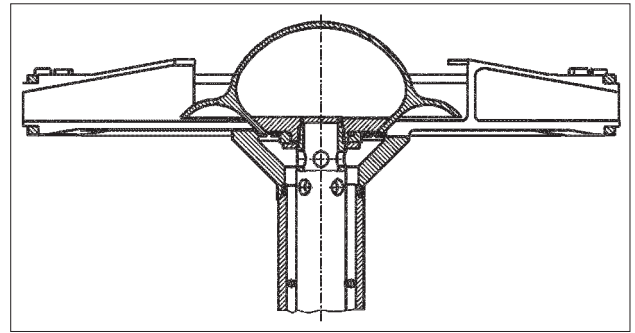


Bild 8: Modulare Lösung des Heißgasventilators mit einzelnen SiSiC-Schaufelelementen (DIETZ 2000, JAKEL 1996)

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 8 zeigt eine weitere modulare Lösung mit einzelnen SiSiC-Schaufelelementen (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, auch dieses Konzept nicht weiter zu verfolgen.

Nachdem Strömungsversuche gezeigt hatten, dass mit rein radial verlaufenden Schaufeln konstanter Breite auch bei Verzicht auf Deck- und Rückenscheibe ein befriedigendes Förderverhalten zu erreichen ist, wurde ein sogenanntes „Paddelrad“ (Bild 9) entworfen. Der Verzicht ►

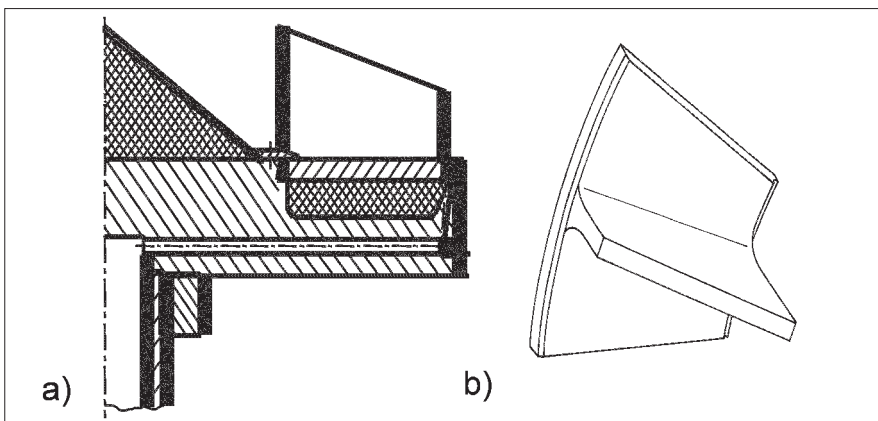


Bild 7: Heißgaslüfter: a) Versuchsaufbau aus Stahlrad und Keramikschaufeln; b) Keramikschaufeln (DIETZ 2000, JAKEL 1996)

ist. Dieses Ziel ist durch einfache Weiterentwicklung der bekannten Stahlventilatoren oder die Verwendung hochtemperaturbeständiger Nickellegierungen nicht zu erreichen. Als Lösung wird eine Konstruktion mit hochtemperaturfester Keramik im Schlickerguss (Silizium-infiltriertes Silizium-Carbid) gesehen, die zu einer Gestaltung ähnlich Graugussteilen führt.

Es wurde eine Reihe von konstruktiven Lösungen erarbeitet, gebaut und in einer Versuchsanlage getestet, die Temperaturen bis zu 1400 °C erlaubt. Die folgenden, am Ablauf der Entwicklung orientierten Darstellungen sollen zeigen, wie in der Zusammenarbeit zwischen Maschinenbaukonstrukteur und ausführendem Unternehmen der Keramikbranche schrittweise eine

anderem die notwendige Temperaturdifferenz zwischen Stahlrückenscheibe und Prozesstemperatur nicht erreichbar war und die hohen Reibwerte der Keramikschaufeln unter Wärmeausdehnung zu Unwuchten führten. Ferner zeigte sich, dass Schaufeln aus reaktionsgebundenem Silizium-Nitrid (RBSN)

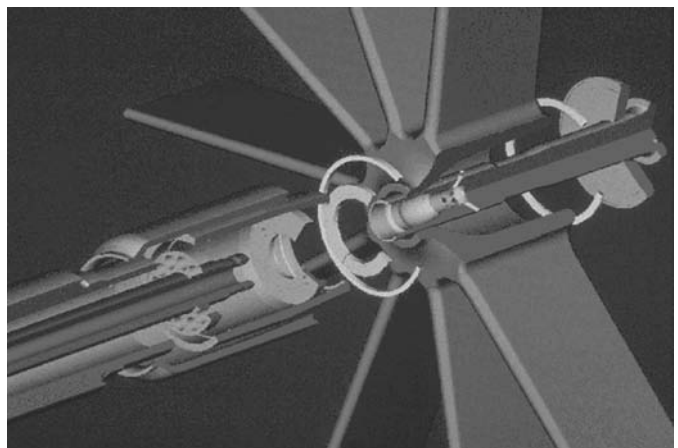


Bild 9: Abschließende Ausführung der Welle-Nabe-Verbindung zwischen Stahlwelle und SiSiC-Lüfter (DIETZ 2000, JAKEL 1996)

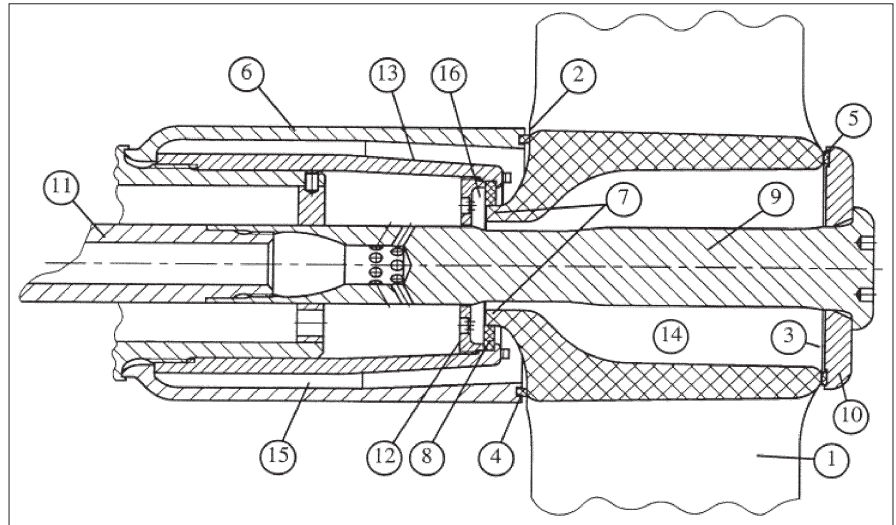


auf Deck- und Rückenscheibe bringt eine Steigerung der Temperaturwechselbeständigkeit, da sich die langen schlanken Flügel ungehindert ausdehnen können. Durch Verzicht auf eine Schaufelkrümmung treten nur geringe „Fliehkraftbiegespannungen“ und wegen der geringen Dichte des Fluids keine Biegebeanspruchungen aus den Reaktionskräften auf.

Die Verbindung von Rad und Welle enthält die „Heiß-Kalt“-Problematik und die Forderung nach Zentrierung. Es wurde ein kraftschlüssiges System entwickelt (**Bild 10**), bei dem die gekühlte Hohlwelle (11) als Zuganker benutzt wird, der gegen ein Tellerfederpaket am kalten Ende der Welle die Übertragungsfähigkeit auch bei unterschiedlichen wärmebedingten Dehnungen sicherstellt. Im Heißgasbereich wird als Zuganker ein Zylinder aus ODS (9) verwendet. Das Laufrad (1) wird über die Flächen (2) und (3) ausgerichtet. Diese Kippabstützung bleibt auch bei unterschiedlichen Dehnungen der Stützelemente erhalten, weil die Teile aufeinander gleiten können. Um Verschweißungen zwischen SiSiC-Keramik- und Metallbauteilen durch Diffusion zu verhindern, werden Aluminiumoxid-Ringe eingelegt (4 und 8).

Die Zentrierung erfolgt keramikseitig über den am Zentrierabsatz des Rades angeschliffenen Absatz (7) mit kleinem Durchmesser, so dass bei Erwärmung nur kleine Durchmesserunterschiede erzeugt werden. Der Zentrierabsatz wird durch 4 Zirkonoxidsegmente umschlossen, die zum einen als Wärmesperre wirken, zum anderen wegen ihres Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen dem von SiSiC und Stahl die Dehnungsunterschiede bei Erwärmung aufteilen.

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. 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 bis heute 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



**Bild 10: Kraftschlüssige Verbindung der „Heiß-Kalt“-Problematik (DIETZ 2000, JAKEL 1996)**

der Entwicklung eines High-Tech-Produktes besonderer Anwendung und hohen Qualitätsanforderungen nicht decken.

### 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 mit unterschiedlichen, problemorientierten Werkstoffeigenschaften. Auch hier bedeutet die Werkstoffwahl immer einen Kompromiss zwischen den Produktanforderungen und den Werkstoffeigenschaften. Es konnte nachgewiesen werden, dass einerseits ein unterschiedliches Werkstoffverhalten in Abhängigkeit von der Belastung auch ohne Wechsel des Werkstoffs Optimierungspotentiale 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 Produktanforderungen 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.

**Anm. d. Red.:** Auf Wunsch können über den Verfasser die vollständigen Literaturangaben bezogen werden.

*Dipl.-Ing. Torsten Grünendick  
Institut für Maschinenwesen  
Robert-Koch-Straße 32  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel.: 0 53 23/72-35 07  
Fax: 0 53 23/72-35 01  
E-Mail: gruenen@imw.tu-clausthal.de* ■