

GESCHÄUMTE KERAMIKWERKSTOFFE: NEUE HERAUSFORDERUNGEN FÜR DEN PRODUKTENTWICKLUNGSPROZESS

Andreas Bischof, Almuth Berthold, Lucienne Blessing

Zusammenfassung

Neu entwickelte Werkstoffe ermöglichen die Konstruktion innovativer Produkte, aber erzeugen im Entwicklungsprozess gleichzeitig Probleme, die ein Abweichen von den bekannten Konstruktionsmethodiken erfordern. Z.B. werden auf Basis geschäumter Al_2O_3 -Keramik neuartige Bioreaktoren gebaut, bei denen Zellen in den Poren der Schäume wachsen. Da viele Eigenschaften der Keramikschaume noch unbekannt sind, muss bei der Produktentwicklung mit vielen unbekanntem Parametern gearbeitet werden.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz beschrieben, der darauf abzielt, den Einfluss dieser Unbekannten durch ein geeignetes, flexibles Produktdesign abzumildern. Der Ansatz basiert auf den drei Gestaltungsrichtlinien und Methoden *Design for Flexibility*, *Design for Variety* und *Design for Modularisation* mit denen Produkte modular und flexibel aufgebaut werden können und so auftretende Änderungen auch schon während des Entwicklungsprozesses schnell und einfach umgesetzt werden können.

1 Einleitung

Im Rahmen des Interdisziplinären Forschungsschwerpunktes (IFS) sollen tierische Zellen in einem neuartigen Bioreaktor gezüchtet werden. Grundlage für diesen Reaktortyp bilden geschäumte Al_2O_3 -Keramikelemente, in deren Poren die Zellen angesiedelt werden. Die Oberfläche der Keramik, welche zusätzlich mit Proteinen beschichtet wird, um das adhärente¹ Zellwachstum zu unterstützen, bietet den Zellen gute Wachstumsbedingungen. Insbesondere die konkave Form der Oberfläche in den Poren sowie der gute mechanische Schutz vor äußeren Einflüssen wirken sich positiv auf die Zellvermehrung aus. Durch die, auf den Raum bezogen, große Oberfläche der Keramikschaume können auch in kleinen Reaktoren viele Zellen gezüchtet werden.

1.1 Problemstellung

Die verwendete Al_2O_3 -Keramik besitzt durch das Schäumen grundsätzlich andere Eigenschaften als nicht geschäumte Keramik. Es wurden in zahlreichen Untersuchungen die Einflussfaktoren des Schäumens auf die Ausbildung einer bestimmten Porengeometrie untersucht. Dabei wurden speziell die Porengröße und -verteilung sowie die Größe und Art der Durchbrüche untersucht [1].

Über andere Eigenschaften des Schaums ist derzeit noch wenig bekannt. Versuche zu weiteren mechanischen Festigkeiten, wie z.B. Zug- und Druckfestigkeit, und speziell zum Durchströmungsverhalten wurden bisher noch nicht durchgeführt, bzw. dauern noch an. Darüber hinaus unterliegen die Eigenschaften der geschäumten Keramik weiten Streuungen,

¹ ahärent = auf Oberflächen

da der Herstellungsprozess, insbesondere das Schäumen statistisch verläuft und Schwankungen unterliegt.

Zusätzlich ist eine genau Zieldefinition für das Entwicklungsprojekt schwierig, da es sich um ein neues Produkt handelt, bei dem die Funktion des Konzeptes – Zellen in Keramikschaumen zu züchten – noch nicht vollständig bewiesen wurde. Folglich lassen sich auch die bekannten Produktentwicklungsmethoden und –methodiken nur eingeschränkt verwenden. Insbesondere bei Auslegungsrechnungen beim Entwerfen und Optimieren, aber auch schon in den frühen Phasen, wenn Anforderungen und Funktionen ermittelt werden, treten Probleme auf, da diese teilweise von den Versuchsergebnissen und Testläufen abhängen.

Ähnliche Probleme wurden durch entsprechende Institutskontakte auch in der Industrie festgestellt; es liegen jedoch keine Veröffentlichungen darüber vor.

1.2 Ziel

In diesem Beitrag wird ein Weg aufgezeigt, der es ermöglichen soll, in dem oben beschriebenen Problemkontext, die bekannten Produktentwicklungsmethodiken zu ergänzen und so ein systematisches Vorgehen während des gesamten Entwicklungsprozesses zu gewährleisten.

1.3 Vorgehen

Die aktive Teilnahme (participative action research) in der Produktentwicklung und das Reflektieren der eigenen Vorgehensweise kann zu einem guten Verständnis der komplexen Probleme und Zusammenhänge der Produktentwicklung führen [1]. In diesem Projekt ist der Erstautor teilnehmender Produktentwickler und gleichzeitig beobachtender Wissenschaftler, so dass alle Informationen aus erster Hand gewonnen werden. Dem Nachteil der dadurch bedingten teilweisen Subjektivität der ermittelten Daten steht der Vorteil der schnellen Umsetzung, Spezifizierung und Untersuchung vorgeschlagener Arbeitsweisen gegenüber.

Der Reaktor wird in drei Stufen so entwickelt, dass Erfahrungen aus den ersten prototypisch aufgebauten Reaktorstufen in die nächsten Entwicklungszyklen einfließen. Dabei wird der Fokus auf ein flexibles und modulares Design nach den Prinzipien des *Design for Flexibility* (DfF) [3], *Design for Variety* (DfV) [4] und *Design for Modularisation* (DfM) [5] gelegt, mit dem Ziel während des Entwicklungsprozesses schneller und einfacher auf Anforderungsänderungen reagieren und neue Erkenntnisse, die z.B. nur durch erste Versuche gewonnen werden können, im Produkt umsetzen zu können und nicht, um ein möglichst flexibles, modulares Endprodukt zu erhalten, wie es mit DfF, DfV und DfM allgemein üblich ist.

2 Ausgangssituation

2.1 Werkstoff

2.1.1 Keramikherstellung

Dreidimensionale keramische Schäume werden in der Kombination eines klassischen keramischen Verfahrens mit den schaubildenden Eigenschaften von Biopolymeren erzeugt. Ausgangsstoff des Keramikschaums ist ein hochreines Al_2O_3 -Pulver, welches zusammen mit einem Protein (Rinderserumalbumin (BSA), Molkeprotein), Wasser und einem anorganischen Dispergator turbulent gemischt wird. Durch den Mischprozess werden Luftblasen eingeschlagen, die infolge der Anwesenheit des Proteins und der dadurch verringerten Oberflächenspannung des Gesamtsystems in der Suspension gehalten werden können. Dieser

durch Mischen generierte, noch flüssige Vorschäum durchläuft eine Erwärmung in einem Mikrowellengenerator. Die Mikrowellenenergie erwärmt das im Vorschäum gebundene Wasser, wodurch der Dampfdruck innerhalb der Luftbläschen steigt. Die Poren werden auf diese Art vergrößert. Gleichzeitig führt die Erwärmung des Systems zur Denaturierung des enthaltenen Proteins. Dieser Prozessschritt gewährleistet eine Verfestigung des geschäumten Materials während der Konsolidierung. Anschließend müssen organische Bestandteile ausgebrannt werden und es folgt ein Sinterschritt bei ca. 1600°C, der die endgültige Festigkeit des Materials erzeugt.

2.1.2 Eigenschaften der Keramik

Die keramischen Schäume können ein breites Eigenschaftsspektrum aufweisen, je nach Zusammensetzung und Prozessführung. Die Porosität liegt meist als offene Porosität vor. Gesamt können Werte der Porosität zwischen 10 % und 60 % erzielt werden. Mit steigendem Porenanteil nimmt die Festigkeit des Materials ab. Die Schäume lassen sich durch Sägen oder Bohren bearbeiten. Die mittleren Porengrößen liegen zwischen 100 µm und 250µm, die Größe der interkonnektierenden Verbindungen beträgt 10µm bis 50µm. Durch gezielt Prozessführung lassen sich mittlere Werte der Porengröße zwischen 300µm und 500µm erzielen, allerdings bei eingeschränkter mechanischer Stabilität.

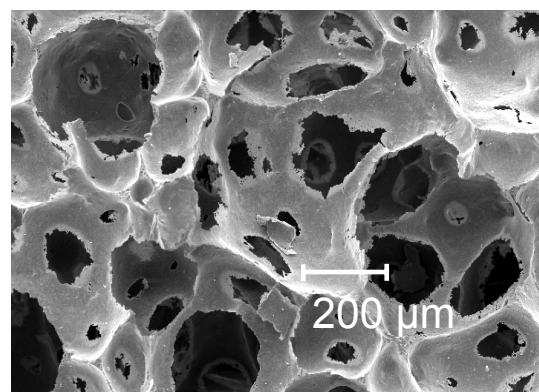
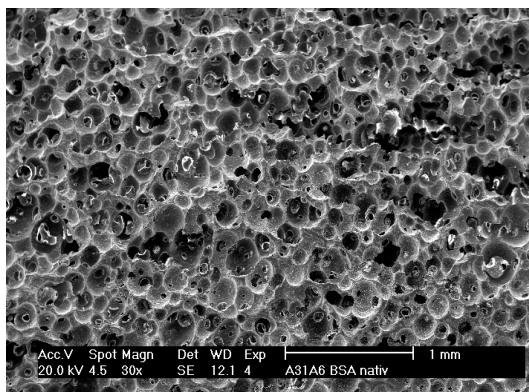


Bild 1: Elektronmikroskopische Vergrößerung der geschäumten Keramik

2.2 Bioreaktor

2.2.1 Herkömmliche Bioreaktoren

Bioreaktoren werden eingesetzt, um pflanzliche, tierische oder menschliche Zellen zu züchten. Der derzeit gängigste Reaktortyp ist der Rührreaktor. Bei diesem werden Zellen in einer Nährlösung schwimmend gezüchtet. Dabei wird das Nährmedium, welches dazu dient, die Zellen mit den nötigen Nährstoffen und Sauerstoff zu versorgen, mit einem Rührer durchmischt, um die Konzentrationen im gesamten Behältnis gleichmäßig zu halten. Darüber hinaus muss das Nährmedium auf eine den Zellen entsprechenden Temperatur geregelt und der pH-Wert muss in einem engen Intervall gehalten werden.

Rührreaktoren sind weit verbreitet, weil ihr Aufbau einfach ist und sie für ein weites Anwendungsspektrum eingesetzt werden können. Allerdings ist dieser Reaktortyp weniger für adherent (an Oberflächen) wachsende Zellen geeignet, da die Zellen ständig in Suspension gehalten werden und aufgrund des ständigen Rührens nicht an den Oberflächen siedeln können. Darüber hinaus können die Zellen durch den Rührer, bzw. durch die auftretenden Scherkräfte beschädigt werden.

2.2.2 Neues Bioreaktorkonzept mit geschäumter Keramik

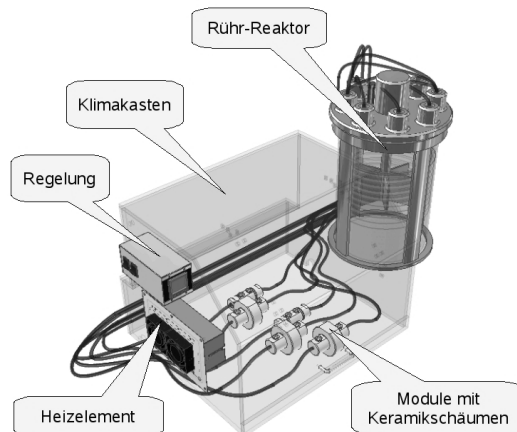


Bild 2: Bioreaktor gesamt mit Modulen für Keramikschaum

Im hier beschriebenen Interdisziplinären Forschungsschwerpunkt wird ein neuartiger Ansatz zum Züchten adhärent wachsender Zellen umgesetzt. Dabei sollen die Zellen in den Poren geschäumter Keramikelemente gezüchtet werden. Dadurch ergibt sich ein günstiges Verhältnis von Oberfläche zu Bauraum und die Zellen sind mechanisch vor äußeren Einflüssen geschützt. Zusätzlich soll eine Beschichtung der Oberfläche mit Proteinen die Anlagerung der adhärent wachsenden Zellen erleichtern und fördern.

Elemente der oben beschriebenen Al_2O_3 -Keramik werden in unterschiedlichen Modulen gehalten und mit dem Nährmedium durchspült, um die Zellen mit Nährstoffen und Sauerstoff zu versorgen (vgl. Bild 2). Die Aufbereitung des Nährmediums inklusive der pH-Wert- und Temperaturregelung wird dabei zunächst von einem kommerziellen Rührreaktor übernommen von dem die Module mit den Keramiksäumen im Bypass versorgt werden. Dazu sind die Module mit dem Rührreaktor über Schlauchsysteme verbunden. Um Wärmeverluste auszugleichen werden die Module des Reaktors in einem Klimakasten mit Hezelement und Temperaturregelung untergebracht.

2.3 Methodik

2.3.1 Probleme bei der Anwendung gängiger Produktentwicklungsmethodiken

Gängige Methodiken in der Produktentwicklung sind Pahl/Beitz [6] und die VDI Richtlinie 2221 [7]. Sie haben sich bewährt und bieten dem Produktentwickler eine gute systematische Unterstützung beim Konstruieren.

Bei einem Produktentwicklungsprojekt, welches durch viele unbekannte Parameter gekennzeichnet ist und darüber hinaus keine exakte Zieldefinition vorliegt, ist der Einsatz einer „normalen“ Konstruktionsmethodik problematisch. Schon in der ersten Phase, der Ermittlung der Anforderungen, können nur vage Aussagen gemacht werden. Die Verwendung eines neuen Werkstoffs, der bisher nur in wenigen Eigenschaften untersucht wurde, führt auch in den späteren Arbeitsabschnitten, z.B. bei Berechnungen, zu weiteren Kompromissen. So können statt detaillierter Auslegungsberechnungen nur überschlägige Schätzungen durchgeführt werden. Das klassische Vorgehen der Überdimensionierung ist bei der eingesetzten Al_2O_3 -Keramik für den beschriebenen Anwendungsfall ebenfalls nicht zielführend, da nicht nur die mechanische Festigkeit des Schaums unbekannt ist, sondern auch das Durchströmungsverhalten und die allgemeine Eignung des Schaums zur Unterstützung des adhäsiven

Zellwachstums. Eine simple Vergrößerung der verwendeten Schaumelemente führt daher nicht zwangsweise zu besseren Ergebnissen. Darüber hinaus betreffen diese Unsicherheiten nicht nur (späte) Berechnungen sondern beeinflussen auch frühe Arbeitsschritte, wie z.B. die Konzeptphase.

2.3.2 Ausgewählte Gestaltungsrichtlinien und Methoden

„Neben den Grundregeln „einfach“, „eindeutig“ und „sicher“, die aus den generellen Zielsetzungen abgeleitet sind, ergeben sich Gestaltungsrichtlinien aus den allgemeinen Bedingungen (Sicherheit, Ergonomie, Fertigung, etc.) und der daraus formulierten Leitlinie beim Gestalten.“ [6]. Die Gestaltungsrichtlinien helfen den jeweiligen Bedingungen gerecht zu werden und unterstützen die Grundregeln im besonderen [6]. Es existieren zahlreiche Gestaltungsrichtlinien und Methoden (DfX) mit jeweils spezifischen Schwerpunkten. Eine Gestaltungsrichtlinie, die den Konstruktionsprozess bei vielen unbekanntem Parametern unterstützt, findet sich darunter jedoch nicht. Daher werden nachfolgend drei Ansätze beschrieben, mit denen das beschriebene Problem ggf. umgangen, bzw. abgemildert werden kann. Eine genaue Auswahl und Anwendung dieser Gestaltungshilfen findet sich in Kap. 3.

2.3.2.1 Design for Flexibility (DfF)

Palani Rajan et al. definieren Produktflexibilität als Grad der Empfindlichkeit (oder Anpassungsfähigkeit) für jede zukünftige Änderung im Produktdesign [3]. Ziel des flexiblen Designs ist die Kosten für eine geänderte Konstruktion, bzw. eine Neukonstruktion, zu reduzieren und schneller auf wechselnde Kundenanforderungen reagieren zu können. Gleichzeitig sollen so schneller Aktualisierungen in die Produkte eingebracht und höhere Leistungen in kürzerer Zeit erreicht werden.

Van Wie ermittelt aus der Analyse von Produkten die sechs nachfolgend aufgelisteten Richtlinien zum DfF [8]:

- Verbesserung der Produktflexibilität durch modulare Auslegung
- Reduzierung der Auswirkung von Änderungen durch erhöhte Anzahl an Unterteilungen des Produktes
- Reduzierung der Auswirkung von Änderungen durch erhöhte Anzahl von virtuellen oder tatsächlichen Pufferzonen
- Reduzierung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Änderungen durch größere „Leistungshülle“ des Geräts
- Reduzierung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Änderungen durch Standardisierung von Komponenten und Schnittstellen
- Reduzierung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Änderungen durch die Wahl nicht zu schnell überalternder Technologien

Werden diese Richtlinien während des Konstruktionsprozesses berücksichtigt so erhält man nach Palani Rajan et al. messbar flexiblere Produkte [3].

2.3.2.2 Design for Variety (DfV)

Während der oben beschriebene DfF-Ansatz darauf abzielt, ein einzelnes Produkt so auszulegen, dass spätere Änderungen möglichst einfach und schnell adaptiert werden können, zielt

das *Design for Variety* (DfV) darauf ab durch den Aufbau einer geeigneten Produktarchitektur auf Basis einer Produktplattform eine große, bzw. sinnvolle, Anzahl von Produktvarianten zu generieren.

Dabei wird dem Design einer „robusten“ Baustuktur der Produktplattform hohe Bedeutung zugeschrieben. Laut Martin und Ishii bringt eine geeignete Auslegung der Plattform große Wettbewerbsvorteile mit sich, wobei der größte Vorteil auf der Reduzierung der time-to-market liegt [4]. Die generierte Produktplattform wird zum Aufbau von Produktfamilien und Baureihen benutzt. Sie verweisen in diesem Zusammenhang unter anderem auf Pine, Sandreson and Uzumeri, welche im DfV auch strategische Vorteile für das Unternehmen sehen [4]. Dabei ist es wichtig, dass der Produktentwickler die Kosten für die Variabilität des Produktes möglichst schon während des Entwicklungsprozesses berechnen oder abschätzen kann. Dazu werden von Martin und Ishii der Generational Variety Index (GVI) und der Coupling Index (CI) vorgestellt [4]. Der GVI ist definiert als Indikator für den konstruktiven Änderungsaufwand der einzelnen Komponenten um zukünftigen Marktanforderungen gerecht zu werden. Um zu einem möglichst geringen GVI zu gelangen, existieren vier Ansätze:

- Auslegung der Architektur des Produktes so, dass die einzelnen Komponenten auf möglichst wenig Leistungsanforderungen Einfluss nehmen
- „Einfrieren“, bzw. Standardisieren der Spezifikationen des Produktes, so dass diese nicht mehr modifiziert werden (dürfen)
- Reduzierung der internen Vernetzung und Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten
- Überdimensionierung der Spezifikationen, so dass diese bei gestiegenen Anforderungen nicht angepasst werden müssen

Der CI beschreibt die Stärke der Kopplung zwischen den Komponenten in einem Produkt. Je größer diese ist, desto wahrscheinlicher ist eine Anpassung einer Komponente bei der Änderung einer anderen. Um diese Abhängigkeiten der Komponenten untereinander zu reduzieren werden vier Möglichkeiten vorgeschlagen, welche den oben vorgestellten Ansätzen sehr ähnlich sind:

- Veränderung der Architektur des Produktes so, dass die Bindung der Komponenten zueinander reduziert wird, wobei mögliche neue Abhängigkeiten bedacht werden müssen
- „Einfrieren“ der Spezifikationen, d.h. Standardisieren der Verbindungen zwischen den Komponenten
- Reduzierung der internen Vernetzung der Produktkomponenten
- Überdimensionierung einzelner Komponenten, so dass diese bei gestiegenen Anforderungen nicht angepasst werden müssen

2.3.2.3 Design for Modularisation (DfM)

Die modulare Gestaltung von Produkten ist ein weiterer Ansatz das Produkt so auszulegen, dass es schnell, einfach und kostengünstig an geänderte Kundenwünsche angepasst werden kann. Dazu wird das gesamte Produkt aus mehreren separaten Modulen aufgebaut. Ein Modul wird hier als strukturell unabhängig aufgebaute Einheit eines größeren Systems mit genau definierten Schnittstellen verstanden.

Design for Modularisation (DfM) hilft dabei, diese Module zu gestalten, wobei die Kernaufgabe der Modularisierung das Definieren sinnvoller Module ist. Unter DfM werden alle Methoden zusammengefasst, welche auf die Modularisierung von komplexen Produkten abzielen. Die drei wichtigsten Methoden des DfM sind die Function Structure Heuristic Method [9], die Design Structure Matrix (DSM) [10] und die Modular Function Deployment (MFD) [11]. Diese drei Methoden werden von Holtta und Salonen in [12] verglichen mit dem Ergebnis, dass sie zu unterschiedlichen Modularisierungen von Produkten führen und unterschiedliche Wiederholbarkeiten aufweisen. Allen gemeinsam ist jedoch die Tatsache, dass sie zur Durchführung eine abstrakte Produktbeschreibung, bzw. eine Beschreibung der Funktionen des zu entwickelnden oder zu modularisierenden Produktes benötigen. Diese Abstraktionsebene der Beschreibung entspricht etwa der von Pahl/Beitz vorgestellten Funktionsstruktur [6].

Neben der Bildung sinnvoller Module weisen insbesondere Blackenfelt und Sellgren in [13] auf die Bedeutung wohl definierter Schnittstellen hin. Die frühzeitige Definition der Schnittstellen erlaubt darüber hinaus das Parallelisieren weiterer Arbeitsschritte. Sie schlagen dazu einen Ansatz vor, bei dem die Schnittstellen sehr früh grob festgelegt werden, um später, wenn genügend Informationen über die Module vorliegen, entsprechend angepasst, bzw. optimiert zu werden.

3 Lösungsansatz

Der Einsatz eines neuen Werkstoffs bedingt zahlreiche unbekannte Parameter. Nachfolgend wird ein Weg aufgezeigt, wie deren Einfluss auf das Gesamtlayout durch eine geeignete Auslegung vom Produkt entkoppelt werden kann. Dabei wird der Schwerpunkt auf das Produktdesign und nicht auf den Entwicklungsprozess gelegt. Es werden aus den oben beschriebenen Gestaltungsrichtlinien und Methoden die Teile ausgewählt, die für dieses Vorgehen hilfreich sind. Anschließend wird dieser neue Ansatz auf die Entwicklung des Bioreaktors angewandt und abschließend bewertet.

Dabei gilt zu beachten, dass sowohl DfF, DfV als auch DfM darauf abzielen ein Produkt so zu gestalten, dass es nach Markteinführung auf geänderte Kundenwünsche abgestimmt werden kann und nicht, um den Umgang mit unbestimmten Parametern und auftretenden Änderungen schon während des Entwicklungsprozesses zu erleichtern.

3.1 Synthese – Zusammenfassung geeigneter Gestaltungshilfen

Bei genauer Betrachtung der drei Richtlinien, bzw. Methoden, DfF, DfV und DfM fällt auf, dass für die beschriebene Problemstellung speziell das *Design for Flexibility* eingesetzt werden kann. Das DfV zielt in erster Linie darauf ab, eine geeignete Plattform zu definieren, auf der mehrere Varianten eines Produkts aufgebaut werden können. Für die Entwicklung eines one-of-a-kind Produkts ist die Definition einer Plattform weniger wichtig. Dennoch muss bei der Entwicklung eines Produkts der Architektur besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Grundlage hierfür bildet der modulare Aufbau. Dieser erlaubt es ggf. ganze Systemteile auszutauschen, nachzuarbeiten, entfallen zu lassen oder nachträglich hinzuzufügen. Nach den Methoden der DfM wird daher zunächst das gesamte Produkt in geeignete Module unterteilt. Die meist durch Funktionen definierten Module werden so angeordnet, dass die Vernetzungen und Abhängigkeiten untereinander möglichst gering sind (DfV). Gleichzeitig werden die Schnittstellen der Module frühzeitig definiert (DfM) und standardisiert (DfV), so dass die einzelnen Bauteile unabhängig voneinander entwickelt werden können.

Bei der detaillierten Ausarbeitung des Systems kommen nahezu alle unter DfF genannten Gestaltungsrichtlinien und die bei DfV beschriebene „Überdimensionierung“ zum Einsatz. D.h. das System wird in möglichst viele Module unterteilt, es werden Pufferzonen geschaffen und das System sowohl geometrisch als auch leistungstechnisch überdimensioniert, so dass

steigende Leistungsanforderungen oder erhöhter Raumbedarf ohne, bzw. mit nur geringen Änderung des Systems abgefangen werden können (DfF). Gleichzeitig werden Standardkomponenten verwendet (DfF), um die Auftrittswahrscheinlichkeit von Fehlern zu reduzieren und den gesamten Konstruktionsaufwand gering zu halten. Nur die in den Gestaltungsrichtlinien des DfF vorgeschlagene Wahl geeigneter Technologien ist nicht eindeutig umsetzbar, da das zugrunde liegende Konzept durch den neuen Werkstoff bestimmt wird, was zu übergeordneten Anforderungen führt. Daher scheinen insbesondere die nachfolgend aufgelisteten Gestaltungshilfen geeignet, um unbekannte Parameter, die durch neue Werkstoffe hervorgerufen werden können, durch ein entsprechendes Produktdesign abzufangen:

G1: Modulare Auslegung mit vielen Unterteilungen (DfF, DfM)

G2: Schaffung von Pufferzonen (DfF)

G3: Überdimensionierung räumlich, belastungs- und leistungsbezogen (DfF, DfV)

G4: frühzeitige Festlegung der Schnittstellen (DfF, DfV, DfM)

G5: Verwendung von Standardbauteilen (DfF)

G6: Reduzierung der internen Vernetzung (DfV)

Die oben aufgelisteten Gestaltungshilfen entstammen ausschließlich aus den beschriebenen Gestaltungsrichtlinien DfF, DfV und DfM. Sie müssen jedoch ggf. durch weitere noch zu definierende Gestaltungshilfen und –richtlinien ergänzt werden.

3.2 Anwendung der Gestaltungshilfen

Die ausgewählten Gestaltungshilfen wurden bei der Entwicklung des Bioreaktors eingesetzt, bei dem Zellen in geschäumten Keramikelementen gezüchtet werden (vgl. 2.2.2). Nachfolgend wird auf die Gestaltungshilfen in Kap.3.1 verwiesen.

Zunächst wurde auf Basis der geforderten Funktionen der Reaktor in mehrere Subsysteme unterteilt (G1). Die frühzeitige Definition der Schnittstellen (G4) der einzelnen Module geschah anhand einer früh generierten Funktionsstruktur. Vereinfacht wurde dieses Vorgehen durch die Verwendung zahlreicher Standardbauteile (G5).

Zusätzlich wurden Standardschnittstellen zu bisher nicht vorhandenen Modulen vorgesehen, die eine spätere Adaption zusätzlicher Funktionen zu erleichtern (G2). Bei zahlreichen Aspekten kam die Richtlinie der Überdimensionierung zum Einsatz (G3). Dies war z.B. der Fall bei der Auslegung des Klimakastens, in dem einzelne Reaktormodule auf einem konstanten Niveau temperiert werden. Dieser wurde wesentlich größer dimensioniert, als nach aktuellem Kenntnisstand erforderlich, um Raum für spätere Erweiterungen zu schaffen. Die Überdimensionierung wurde leistungstechnisch z.B. bei der Wahl der Pumpen und Schläuche umgesetzt, so dass ein Vielfaches mehr an Nährmedium umgepumpt werden kann, als nach derzeit abgeschätztem Bedarf erforderlich (G3). Die Überdimensionierung konnte jedoch nicht für Komponenten aus der geschäumten Keramik, sondern ausschließlich für Bauteile aus anderen Werkstoffen umgesetzt werden.

Wichtigste Aufgabe bei der Konstruktion des Reaktors war die Reduzierung der Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten von den unbekanntem Eigenschaften der geschäumten Al_2O_3 -Keramikelemente (G6). Dazu wurde frühzeitig die Geometrie der Schäume festgelegt, so dass diese definierte Schnittstellen nach DfV bzw. DfM aufweisen (G4). Die Schäume werden durch flexible, elastische und dämpfende Halterungselemente im Reaktor fixiert, um so eine größtmögliche Entkopplung der mechanischen Eigenschaften der Keramik vom Rest

des Reaktors zu erreichen (G2, G6). Die unbekanntenen Durchströmungseigenschaften werden durch Überdimensionierung des gesamten Reaktors abgefangen (G3), so dass auch bei falschen Abschätzungen des Nährstoffverbrauchs ausreichend Medium den Zellen zugeführt werden kann. Darüber hinaus erlaubt der modulare Aufbau der einzelnen Komponenten (Submodule) eine schnelle Anpassung, falls sich z.B. die definierte Geometrie der Schäume als ungeeignet herausstellen sollte (G1). Nachträglich aufgetretene Anforderungen, z.B. ein Sichtfenster auf die Keramikschäume, konnten durch die standardisierten Schnittstellen (vgl. Bild 1) schnell und problemlos umgesetzt werden (G4, G2).

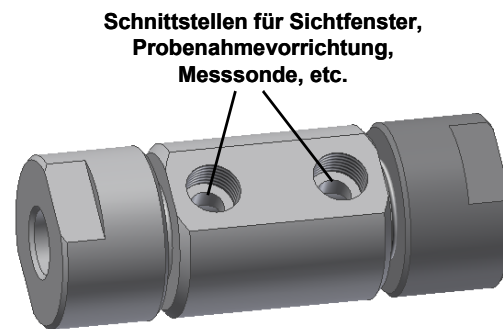


Bild 3: Modul des Bioreaktors mit standardisierten Schnittstellen

3.3 Diskussion

Die in Kap. 3.1 gewonnenen Gestaltungshilfen wurden bei der Entwicklung des Bioreaktors eingesetzt, um während des Entwicklungsprozesses schnell und einfach auf Änderungen reagieren zu können. Dabei wurden erste positive Effekte festgestellt, wie zum Beispiel die einfache Adaption nachträglich geforderter Funktionen, wie z.B. ein Sichtfenster. Ob die Anwendung der Gestaltungshilfen ausschließlich positiven Einfluss auf den Projektverlauf und das Produkt hat, lässt sich noch nicht abschätzen, da negative Auswirkungen ggf. erst mit Verzögerung auftreten. Darüber hinaus fehlen zur Zeit noch Vergleiche zwischen Entwicklungsprojekten, bei denen mit und ohne die beschriebenen Gestaltungshilfen gearbeitet wurde.

4 Fazit und Ausblick

Neu entwickelte Werkstoffe ermöglichen die Konstruktion innovativer Produkte. Sie erlauben zum Teil völlig neue Konzepte, die ohne diese Materialien nicht umsetzbar wären. Allerdings bringt der Einsatz dieser Werkstoffe, wie bei der beschriebenen Al_2O_3 -Keramik, auch einige Probleme mit sich. Dies liegt in erster Linie daran, dass nicht alle Eigenschaften des Werkstoffs bekannt sind und bei der Konstruktion mit diesen nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Dieses Problem ist umso gravierender, wenn mit dem neuen Werkstoff gleichzeitig ein ganz neues Konzept umgesetzt werden soll.

Daher erfordert die effiziente und effektive Entwicklung neuer Produkte mit innovativen Werkstoffen ein teilweise anderes Vorgehen als die bekannten Methodiken vorschreiben. Deshalb wurden in diesem Beitrag Gestaltungshilfen vorgestellt, die dazu dienen ein modulares, flexibles Produkt zu entwickeln. Dadurch können Unsicherheiten weitestgehend entkoppelt werden, so dass diese einen möglichst geringen Einfluss auf das Gesamtsystem haben und das Produkt bei geänderten Anforderungen schnell und einfach angepasst werden kann.

Es scheint sinnvoll, diesen Ansatz weiter zu verfolgen und für das Entwickeln der beschriebenen Produkte detaillierte Leitlinien zu definieren. Darüber hinaus müssen die vorgestellten Gestaltungshilfen nochmals genauer validiert und ggf. mit anderen Vorgehensweisen vergli-

chen werden. Dazu können z.B. weitere praxisnahe Entwicklungsprojekte oder Laborstudien durchgeführt werden.

5 Literatur

- [1] Berthold A.: Herstellung proteinbasierter keramischer Schäume mit gesteuerter Porengrößenverteilung – prozesstechnische Einflussfaktoren und Grenzflächenaspekte von Proteinlösungen, Dissertation TU-Berlin, Verlag Mensch und Buch, Berlin, 2006, im Druck
- [2] Ottosson S.: Participation action research: A key to improved knowledge of management, Technovation 23 (2003), pp 87 - 94
- [3] Palani Rajan P.K., Van Wie M., Otto K., Wood K.: Design for Flexibility – Measures and Guidelines, Proceedings ICED 03 Stockholm, 2003
- [4] Martin M.V., Ishii K.: Design for Variety: developing standardized and modularized product platform architectures, Research in Engineering Design 13 (2002) pp 213-235
- [5] Sosa M.E., Eppinger S.D., Rowles C.M.: Designing modular and integrative systems, Proceedings ASME DETC 00 Baltimore, 2000
- [6] Pahl G., Beitz W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin 1997
- [7] VDI 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf: Beuth-Verlag, 1993
- [8] Van Wie M.J.: Designing Product Architecture: A systematic method, PhD Dissertation, University of Texas at Austin, 2002
- [9] Stone R.B., Wood K.L., Crawford R.H.: A heuristic method for identifying modules for product architectures, Design Studies 21, 1, pp. 5-31
- [10] Ulrich K.T., Eppinger S.D.: Product Design and development, McGraw-Hill, New York, 2000
- [11] Erixon G.: Modular Function Deployment – A Method for Product Modularisation, PhD Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998
- [12] Holtta K.M.M., Salonen M.P.: Comparing three different modularity methods, Proceedings of DETC 03, Chicago, 2003
- [13] Blackenfelt M., Sellgren, U.: Design of robust interfaces in modular products, Proceedings ASME DETC 00 Baltimore, 2000

Dipl.-Ing. Andreas Bischof
Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik
Technische Universität Berlin, Sekr. H 10
Strasse des 17. Juni 135, D-10623 Berlin
Tel: +49-30-314-21425
Fax: +49-30-314-26481
Email: andreas.bischof@fgktem.tu-berlin.de
URL: <http://www.ktem.tu-berlin.de>