

OPTIMIERUNG EINES NEUARTIGEN INJEKTORS FÜR KRYOGENE RAKETENTRIEBWERKE

Martin Konopka, Johannes Lux, Oskar Haidn

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Institut für Raumfahrtantriebe, Lampoldshausen, 74239 Hardthausen

Zusammenfassung

Beim DLR Lampoldshausen werden alternative Werkstoffe für den Einsatz in Raketentriebwerken untersucht. Dabei wird insbesondere die Verwendung poröser Faserkeramik in effusionsgekühlten Brennkammern angedacht, die mit der kryogenen Treibstoffkombination Flüssigsauerstoff (LOX)/Wasserstoff betrieben werden. Da diese auf C/C basierenden Werkstoffe äußerst empfindlich auf eine sauerstoffreiche Atmosphäre reagieren, muss ein direkter Kontakt mit Flüssigsauerstoff im Betrieb vermieden werden. Dies erfordert eine Modifizierung bisher verwendeter Injektionskonzepte. Die im Allgemeinen in LOX/H₂-Triebwerken verwendeten Koaxialinjektoren weisen in diesem Zusammenhang verschiedene Nachteile auf.

Unter anderem für einen solchen Einsatz in effusionsgekühlten Triebwerken wird ein Injektionskonzept mit porösen Elementen entwickelt. Durch den Einsatz poröser Materialien kann die mittlere Einspritzgeschwindigkeit drastisch reduziert werden. Mit dem neuartigen Injektionskonzept wird der Treibstoff besonders homogen in die Brennkammer eingebracht, was zu einer gleichmäßigen Verbrennung führt. Die hohen Temperaturunterschiede, die besonderen thermodynamischen Randbedingungen und die speziellen Konstruktionsmerkmale erfordern dabei eine genaue Charakterisierung des eingesetzten Materials. Die verwendete Sinterbronze wurde in der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich der mechanischen Festigkeit charakterisiert. Zudem wurden in umfangreichen Tests die Permeabilitätskonstanten bestimmt, um den zu erwartenden Druckverlust bei Durchströmung vorhersagen zu können.

1. NOMENKLATUR

Buchstaben		
Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
L	m	Probenlänge
R	J/(kg · K)	spezifische Gaskonstante
R	N/mm ²	Spannung
T	K	Fluidtemperatur
V	m ³	Volumen
c	m/s	Schallgeschwindigkeiten
d	m	Stirnplattendicke
dx	m	Abschnittslänge
i		Abschnitt
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n		Anzahl der Abschnitte
p	Pa	Druck
s		Standardabweichung
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
x	m	Probenlängsachse
Δp	Pa	Druckdifferenz
α	m	Darcy-Konstante
β	m	Forchheimer-Konstante
η	Pa · s	Viskosität
ϵ	%	Dehnung
ϵ_p		Porosität
ν		Poissonzahl
ρ	kg/m ³	Dichte

Indizes	
Zeichen	Bedeutung
0	Anfangszustand
1	Eintritt
2	Austritt
D	Permeabilitätskonstanten nach DIN ISO 4022
c	Brennkammer
i	Abschnitt
l	longitudinal
m	Zugfestigkeit
p _{0,2}	0,2 %-Dehngrenze
p	Poren, Porosität
t	transversal

2. ÜBERSICHT

Beim DLR Lampoldshausen werden neuartige Einspritzmethoden für kryogene Treibstoffe in Raketenbrennkammern untersucht. Gegenstand der Forschung sind hochporöse Sintermetalle, durch die der Brennstoff der Treibstoffkombinationen Flüssigsauerstoff (LOX)/Methan bzw. LOX/Wasserstoff eingespritzt wird. Dieses Einspritzkopfkonzept konnte bereits erfolgreich am Europäischen Forschungs- und Entwicklungsprüfstand P8 bei Brennkammerdrücken bis zu 80 bar demonstriert werden¹⁻⁴. Zur Auslegung der porösen Injektorstirnplatte sind ge-

naue mechanische Materialkennwerte der verwendeten Sinterbronze „SIKA-B“⁵ erforderlich. Diese wurden in Rahmen von Zugversuchen und Ultraschallmessungen ermittelt. Bei der Durchströmung eines porösen Materials mit einem Fluid stellt sich über dem Material ein Druckverlust ein. Dieser Druckverlust ist maßgeblich für die Berechnung der Festigkeit einer entsprechenden Injektorstirnplatte. Die Berechnung des Druckverlusts erfolgt mit der Forchheimer-Gleichung, deren Parameter bei Durchflussversuchen für die Sinterbronze SIKA-B bestimmt wurden⁶. Mit den ermittelten mechanischen und hydraulischen Materialkennwerten kann die Auslegung und Optimierung eines auf poröser Sinterbronze basierenden Einspritzkopfkonzep tes erfolgen. Hierzu wird auf bestehende Finite-Elemente-Methoden zurückgegriffen.

3. PORÖSE INJEKTOREN

In Bild 1 ist die Prinzipskizze eines porösen Injektors dargestellt. Der Brennstoffmassenstrom wird dabei vollständig durch das poröse Material in die Brennkammer eingespritzt. Dies unterscheidet das Einspritzkopfkonzzept von herkömmlichen Ansätzen wie z. B. im Space-Shuttle-Haupttriebwerk SSME, bei dem Koaxialinjektoren eingesetzt werden und nur ein kleiner Anteil des Brennstoffmassenstroms für Kühlungszwecke durch eine poröse Injektorstirnplatte eingespritzt wird⁷. Der flüssige Sauerstoff (LOX) wird durch Edelstahlröhren in die Brennkammer eingespritzt. Diese Röhren sind in Bohrungen in die poröse Injektorstirnplatte eingelassen. Für derartige

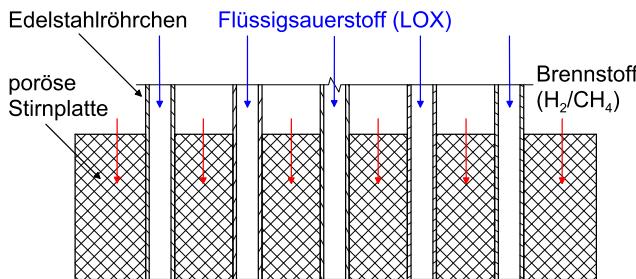


Bild 1: Prinzipskizze eines porösen Injektors

Einspritzköpfe, bei denen der gesamte Brennstoffmassenstrom durch ein poröses Material in die Raketenbrennkammer eingebracht wird, sind Werkstoffe mit einer hohen Porosität

$$(1) \quad \varepsilon_p = \frac{V_p}{V}$$

erforderlich. Diese hohe Porosität weist u. a. die aus kugeligem Bronzepulver hergestellte Sinterbronze SIKA-B auf. Zur Herstellung wird das Bronzepulver der Legierung CuSn12-C in einer Schutzatmosphäre unterhalb der Schmelztemperatur von 830°C erhitzt. Dadurch setzt ein Diffusionsprozess ein, so dass sich die Bronzekugeln an den Kontaktstellen verbinden. In Bild 2 ist eine Mikroskopaufnahme der Sinterbronze SIKA-B 150 gezeigt.

Im Betrieb wird die poröse Injektorstirnplatte durch den

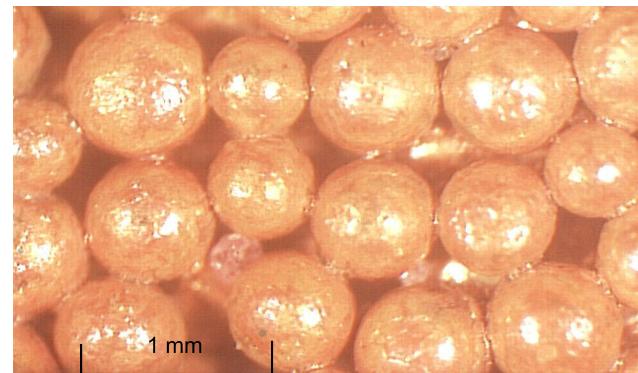


Bild 2: Mikroskopaufnahme der Sinterbronze SIKA-B 150

Brennstoff korrodiert und durch die intensive Strahlungswärme der heißen Verbrennungsgase von bis zu 3500 K angegriffen⁸. Neben der hohen Porosität sind deshalb eine gute Korrosionsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Werkstoffs für die Injektorstirnplatte erforderlich. Diese Eigenschaften werden durch die verwendete Legierung CuSn12-C erfüllt⁹.

4. MATERIALKENNWERTE VON SIKA-B

Für die Sinterbronze SIKA-B werden vom Hersteller Angaben zur Scherfestigkeit des Werkstoffs gemacht. Für die Festigkeitsberechnungen von Bauteilen aus dieser Sinterbronze sind jedoch der Elastizitätsmodul E , die Poissonzahl ν , die Dehngrenze $R_{p0,2}$ sowie die Zugfestigkeit R_m erforderlich. Diese Kennwerte wurden mit Zugversuchen und Ultraschallmessungen ermittelt. Die Zugversuche wurden mit aus der Norm DIN EN ISO 2740 abgeleiteten Zugproben durchgeführt¹⁰. Die Zugproben wurden entgegen der in der Norm vorgeschlagenen Form mit einem innerhalb der Anfangsmesslänge L_0 konstanten Querschnitt aus einer Sinterbronzeplatte gefertigt. Die Zugversuche wurden an einer Zwick-Roell Prüfmaschine mit einem 20 kN-Lastraumrahmen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau (IWM) an der RWTH Aachen durchgeführt¹¹. Untersucht wurden jeweils fünf Proben der Sinterbronzen SIKA-B 100, SIKA-B 150 und SIKA-B 200. Diese Sinterbronzen besitzen Porositäten von 39 %, 41,2 % und 42 %. Das ermittelte Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die Zugversuche mit der Sinterbronze SIKA-B 150 ist in Bild 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Spannungsverläufe der Zugproben trotz der unregelmäßigen Poren- und Kugelstruktur nicht sehr stark voneinander abweichen. Es bildet sich keine ausgeprägte Streckgrenze heraus, sondern die Kurvenverläufe gehen allmählich vom elastischen in den plastischen Dehnungsbereich über. Die Zugversuchsnorm DIN EN ISO 6892 betrachtet Zugversuche nur dann als gültig, wenn die Probe innerhalb der Anfangsmesslänge L_0 bricht¹². Im elastischen Dehnungsbereich ist die

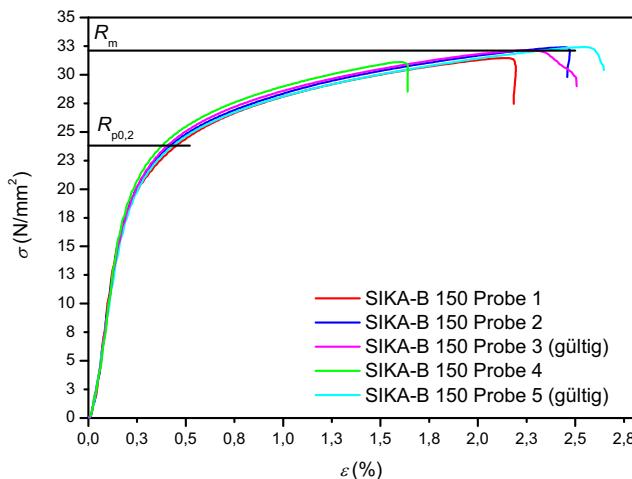


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugversuche von SIKA-B 150

Abweichung zwischen den Versuchen jedoch so gering, dass nur für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls auf alle Zugversuche zurückgegriffen wird. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die ermittelten

Tabelle 1: Ergebnisse der Zugversuche

	E (N/mm ²)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)
SIKA-B 100			
Mittelwert	13 916		
s	925		
Minimum		26,71	40,71
SIKA-B 150			
Mittelwert	12 258		
s	812		
Minimum		23,77	32,11
SIKA-B 200			
Mittelwert	9560		
s	1318		
Minimum		18,62	22,84

Elastizitätsmoduln von 9560–13 916 N/mm² sind dabei erwartungsgemäß erheblich niedriger als der Elastizitätsmodul des nichtporösen Ausgangsmaterials CuSn12-C in Höhe von 97 000 N/mm². Für die Dehngrenze und die Zugfestigkeit wurden die minimalen Werte der gültigen Zugversuche herangezogen. Dadurch können diese Werte uneingeschränkt für eine Festigkeitsberechnung verwendet werden. Die Dehngrenze verringert sich ausgehend von der Sinterbronze SIKA-B 100 mit 26,71 N/mm² um 30 % auf 18,62 N/mm². Die Zugfestigkeit sinkt dagegen sogar um 43,9 %. Neben dem Elastizitätsmodul, der Dehngrenze und der Zugfestigkeit ist für eine Finite-Elemente-Analyse die Poissonzahl ν – auch Querdehnungszahl genannt – erforderlich. Diese kann für isotrope Werkstoffe im linear-

elastischen Bereich aus dem Elastizitätsmodul und dem Schubmodul G errechnet werden:

$$(2) \quad \nu = \frac{E}{2G} - 1 .$$

Die Bestimmung des Schubmoduls G wurde mittels Ultraschallmessungen durchgeführt. Dabei werden von einem Ultraschallgerät Schallwellen mit Frequenzen oberhalb von 20 000 Hz erzeugt. Diese Schallwellen werden mittels Piezokristallen in einem Ultraschallkopf erzeugt¹³, der mit einem Kontaktmittel an das zu untersuchende Material angekoppelt wird. Die Schallwellen bewegen sich durch das zu untersuchende Material in Richtung eines Empfängers auf der gegenüberliegenden Seite. Es können zwei Arten von Schallwellen erzeugt werden, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten. Dies sind zum einen die Longitudinalschallgeschwindigkeit c_l , bei der die Schwingung in Ausbreitungsrichtung erfolgt, und zum anderen die Transversalschallgeschwindigkeit c_t , bei der die Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt. Diese Schallgeschwindigkeiten können am Ultraschallgerät über eine Laufzeitbestimmung ermittelt werden. Daraus können in der Folge mit

$$(3) \quad E = \frac{3 - 4 \cdot \left(\frac{c_t}{c_l} \right)^2}{1 - \left(\frac{c_t}{c_l} \right)^2} \cdot G ,$$

$$(4) \quad G = c_t^2 \cdot \rho ,$$

der Elastizitätsmodul sowie der Schubmodul bestimmt werden¹³. Die Ultraschalluntersuchungen wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem IWM durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die mit dem Ultraschallverfahren ermittelten Elastizitäts-

Tabelle 2: Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen

	G (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ν
SIKA-B 100	7225	18 433	0,28
SIKA-B 150	6139	15 556	0,27
SIKA-B 200	5486	14 027	0,28

moduln fallen um bis zu 32,5 % höher aus, als die im Zugversuch ermittelte Elastizitätsmoduln. Dieser Umstand wird auf beim Zugversuch früh einsetzende plastische Verformung an den Kontaktstellen zwischen den Bronzekugeln zurückgeführt¹⁴. Weiterhin können bei Zugversuchen die Einspannbedingungen variieren. Die im Ultraschallverfahren ermittelten Konstanten sind deshalb als genauer anzusehen. Die Poissonzahl liegt nahezu konstant bei 0,28. Somit fällt diese bei der porösen Sinterbronze gegenüber dem Ausgangsmaterial niedriger aus¹⁵.

5. PERMEABILITÄTSKONSTANTEN VON SIKA-B

Für die Festigkeitsberechnung der porösen Injektorstirnplatte ist die Kenntnis der anliegenden Lasten erforderlich. Die hauptsächliche Last stellt die Druckdifferenz zwischen Brennstoffsammler auf der einen und Brennkammer auf der anderen Seite dar. Diese Druckdifferenz stellt sich bei der Strömung des Brennstoffs durch die poröse Sinterbronze ein. Die Durchströmung von Fluiden durch poröse Materialien wird durch die Forchheimer-Gleichung (FG) beschrieben:

$$(5) \quad \frac{\partial p}{\partial x} = - \left(\frac{\eta}{\alpha} u + \frac{\rho}{\beta} u^2 \right).$$

Hierbei ist u die Strömungsgeschwindigkeit vor dem porösen Material, η ist die Viskosität und ρ die Dichte des strömenden Fluids. Die Permeabilitätskonstanten α und β sind vom porösen Material abhängige Konstanten und unabhängig vom Fluid, welches das poröse Material durchströmt. Zur Berechnung des Druckverlusts über dem porösen Material muss Gleichung 5 über die Länge L des Materials integriert werden. Für ein kompressibles Fluid ergibt sich bei konstanter Querschnittsfläche unter Verwendung der idealen Gasgleichung¹⁶

$$(6) \quad p_2 = \sqrt{p_1^2 - 2 \cdot \frac{mRT}{A} \left(\frac{\eta}{\alpha} + \frac{m}{A\beta} \right) L}.$$

Dabei sind p_1 der Druck am Eintritt und p_2 der Druck am Austritt des porösen Materials. Die Temperatur T wird als konstant über der Länge des Materials angenommen.

Weiterhin kann die Forchheimer-Gleichung diskretisiert über der Länge des porösen Materials berechnet werden. Dazu wird die Länge des durchströmten Materials in n Abschnitte eingeteilt. In jedem der Abschnitte wird in der Folge die Forchheimer-Gleichung gelöst. Dabei werden die Dichte ρ_i sowie die Viskosität η_i für einen Abschnitt i jeweils aus dem Druck p_{i-1} und der Temperatur T_{i-1} des vorherigen Abschnitts berechnet. Die Berechnung der thermodynamischen Stoffeigenschaften erfolgt mittels Realgasdaten¹⁷, so dass das Realgasverhalten der Fluide berücksichtigt werden kann. Für die Temperaturverteilung innerhalb des Materials wird ein linearer Verlauf von Eintrittstemperatur T_1 zu Austrittstemperatur T_2 angenommen. Dies ergibt folgende Rechenvorschrift:

$$(7) \quad \Delta p = - \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\eta_i m}{\alpha \rho_i A} + \frac{m^2}{\beta \rho_i A^2} \right) dx,$$

$$(8) \quad dx = \frac{L}{n},$$

$$(9) \quad T_i = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{n} \cdot i.$$

Die für die Forchheimer-Gleichung (siehe Gleichung 5) notwendigen Permeabilitätskonstanten α und β wurden

mittels Durchflussversuchen für die Sinterbronzen SIKA-B 100, SIKA-B 150 und SIKA-B 200 ermittelt. Dazu wurden die Sinterbronzenproben in einen Probenhalter eingesetzt, der in Bild 4 dargestellt ist. Die Proben werden

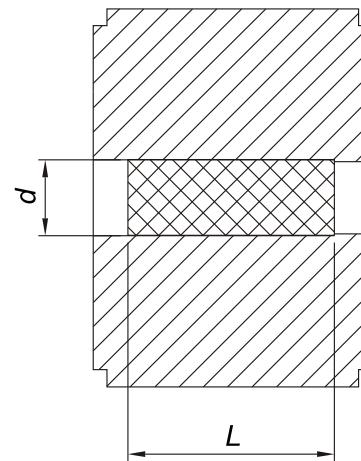


Bild 4: Probenhalter mit Durchflussprobe

dabei zunächst von Stickstoff bei Eingangsdrücken von 20–40 bar sowie einer Temperatur von ungefähr 290 K durchströmt. Bei diesen Versuchen wurden jeweils der Druck und die Temperatur vor und hinter der porösen Probe gemessen. Zusätzlich wurde der Massenstrom aufgezeichnet. Aus den Messdaten erhält man unter Anwendung von Gleichung 6 ein überbestimmtes und nach entsprechender Umstellung lineares Gleichungssystem. Dieses Gleichungssystem konnte mittels linearer Ausgleichsrechnung für die Permeabilitätskonstanten α und β gelöst werden. Die so ermittelten Konstanten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Zusätzlich sind jeweils die Quotienten aus den vom Hersteller nach DIN EN 4022 ermittelten Konstanten sowie den im Rahmen dieser Arbeit bestimmten Konstanten abgebildet. Es ist festzustellen, dass mit stei-

Tabelle 3: Ermittelte Permeabilitätskonstanten

	α (m ²)	β (m)	$\frac{\alpha_D}{\alpha}$	$\frac{\beta_D}{\beta}$
SIKA-B 60	$10,7 \times 10^{-12}$	$11,6 \times 10^{-6}$	4,7	1,7
SIKA-B 100	$18,7 \times 10^{-12}$	$21,5 \times 10^{-6}$	6,8	1,9
SIKA-B 150	$36,3 \times 10^{-12}$	$50,2 \times 10^{-6}$	6,8	1,3
SIKA-B 200	$80,7 \times 10^{-12}$	$81,2 \times 10^{-6}$	5,7	1,3

gender Porosität von SIKA-B 100 bis SIKA-B 200 die Permeabilitätskonstanten ebenfalls erwartungsgemäß zunehmen. Dies bedeutet einen mit zunehmender Porosität sinkenden Druckverlust. Der Faktor α_D/α fällt relativ hoch aus, da hauptsächlich Messdaten aus dem turbulenten Strömungsbereich verwendet wurden. Dabei ist das Trägheitsglied durch die quadratisch eingehende Strömungsgeschwindigkeit u maßgeblich für den Druckverlust. Bild 5 zeigt den gemessenen Druckverlust sowie den mit

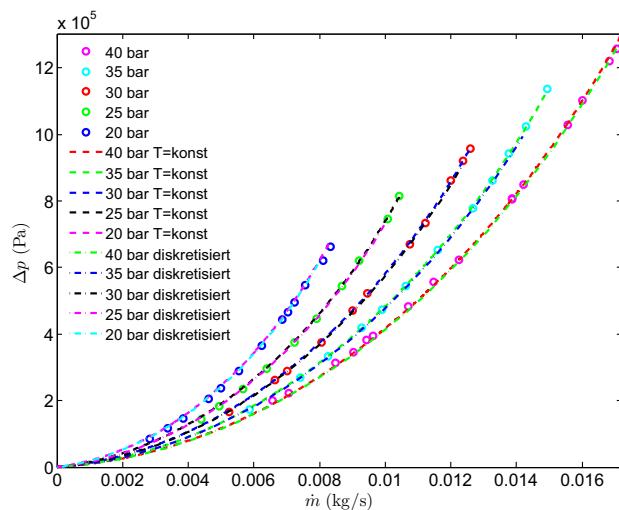


Bild 5: Druckverlust über der mit Stickstoff durchströmten Sinterbronze SIKA-B 100; aufgetragen sind die Messwerte, die kompressible FG sowie die diskretisierte FG

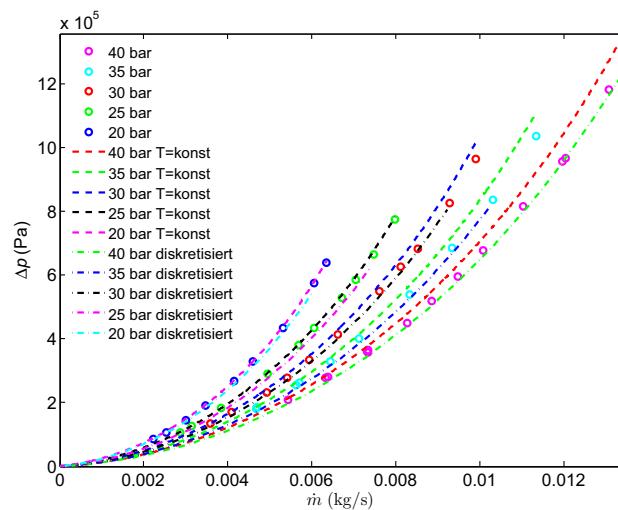


Bild 6: Druckverlust über der mit Methan durchströmten Sinterbronze SIKA-B 100; aufgetragen sind die Messwerte, die kompressible FG sowie die diskretisierte FG

Hilfe der Gleichungen 6 und 7 berechneten Druckverlust der Sinterbronze SIKA-B 100 bei Durchströmung mit Stickstoff. Eine aufgetragene Kurve stellt dabei einen konstanten und in der Legende angegebenen Eingangsdruck dar. Wie zu erkennen ist, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen sowie den mit Hilfe der beiden Modelle berechneten Druckverlusten. „T = konst“ bezeichnet den mit Hilfe der kompressiblen Forchheimer-Gleichung berechneten Druckverlust.

Aus Bild 5 geht des Weiteren hervor, dass der Druckverlust bei einem geringeren Eingangsdruck von 20 bar schneller ansteigt als bei einem höheren Eingangsdruck von 40 bar. Dies ist mit einer bei geringerem Eingangsdruck höheren Strömungsgeschwindigkeit u zu begründen. Diese steigt bei fallendem Druck durch die sich ergebende geringere Dichte an.

Anhand von Bild 6 wird deutlich, dass die ermittelten Permeabilitätskonstanten eine Materialeigenschaft widerspiegeln und dementsprechend unabhängig von dem durchströmenden Fluid sind. Es zeigt sich, dass bei einer Durchströmung der porösen Sinterbronze mit Methan sowohl die mit der kompressiblen Forchheimer-Gleichung als auch die mit der diskretisierten Forchheimer-Gleichung berechneten Druckverluste mit den experimentell ermittelten übereinstimmen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die diskretisierte Forchheimer-Gleichung in diesem Fall eine geringere Abweichung von den Messdaten zeigt als die kompressible Forchheimer-Gleichung. Dies liegt an der Berücksichtigung der Realgaseffekte in der diskretisierten Forchheimer-Gleichung. Hierbei ergibt sich bei den in Bild 6 aufgeführten Drücken von bis zu 40 bar eine Abweichung von 8 % zwischen der in der kompressiblen Forchheimer-Gleichung durch die ideale Gasgleichung be-

rechneten Dichte und der aus Realgasdaten ermittelten Dichte. Mit dieser Berechnungsmethode lässt sich somit der sich über der porösen Injektorstirnplatte einstellende Druckverlust für eine Festigkeitsberechnung vorhersagen.

6. OPTIMIERUNG EINER PORÖSEN STIRNPLATTE

Mit den zuvor ermittelten mechanischen und hydraulischen Materialeigenschaften kann nun eine poröse Stirnplatte ausgelegt werden. Dafür wird zunächst die Last in Gestalt des Druckverlusts über der Stirnplatte mit der kompressiblen und diskretisierten Forchheimer-Gleichung berechnet. Bild 7 zeigt den Druckverlust des Wasserstoffs bei Durchströmung einer porösen Injektorstirnplatte aus Sinterbronze SIKA-B 150, aufgetragen in Abhängigkeit von der Stirnplattendicke d . Die Einströmbedingungen mit einer relativ hohen Wasserstofftemperatur und einem niedrigen Brennkammerdruck $p_2 = p_c$ könnten sich beispielsweise beim Anfahren einer Raketenbrennkammer auf dem Prüfstand ergeben.

Das Finite-Elemente-Modell mit variierender Dicke d wird mit einer der Dicke entsprechenden Druckdifferenz berechnet. Dafür werden die zuvor ermittelten mechanischen Materialkennwerte herangezogen. Bild 8 zeigt die Vergleichsspannung σ_v nach von Mises¹⁸ für ein mit elastischem Materialverhalten gerechnetes Modell mit einer Plattendicke von 11 mm bei einer Druckdifferenz Δp von 10,3 bar. Zu sehen ist die Injektorstirnplatte mit den Bohrungen für die LOX-Edelstahlröhren sowie eine Stützbohrung. Die Vergleichsspannung ist farbkodiert angegeben, wobei die Skala den Bereich bis 24 N/mm² abdeckt. Dies entspricht dem zuvor für die Sinterbronze

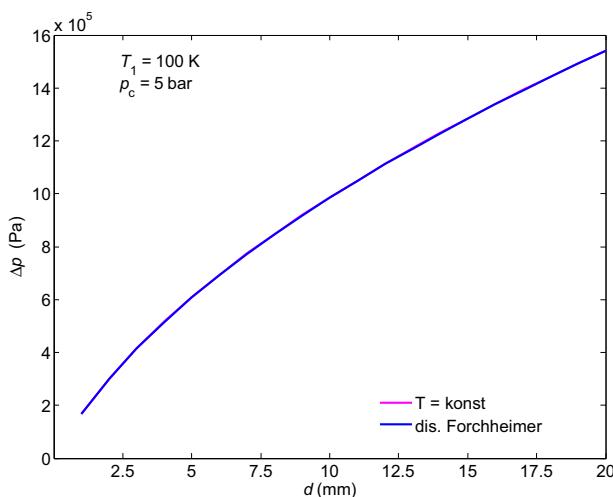


Bild 7: Wasserstoffseitiger Druckverlust bei Anfahrbedingungen

SIKA-B 150 ermittelten elastischen Dehnungsbereich. Zu-

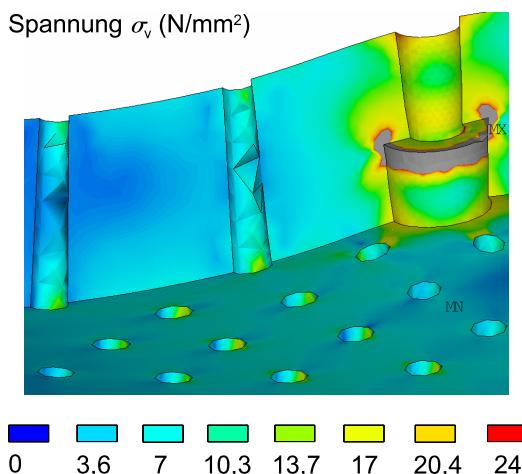


Bild 8: Spannungsverteilung bei einer optimalen Dicke von 11 mm

sätzlich ist die elastische Verformung des Modells stark übertrieben dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegt der kritische Bereich mit besonders hohen Spannungen in einer Stützbohrung. Hier wird später eine Schraube die Injektorstirnplatte abstützen. An der Kerbe zwischen unterer und oberer Bohrung stellt sich eine Spannung über der ermittelten Dehngrenze $R_{p0,2}$ ein. Diese Spannung wird im realen Modell jedoch durch plastische Verformung und lokaler Verhärtung nicht zum Versagen des Bauteils führen. Des Weiteren wird der Bereich der Stützstellen durch geeignete konstruktive Maßnahmen weiter verstärkt. Die Spannungen oberhalb der großen Bohrung sind zwar im Vergleich zum umliegenden Gebiet erhöht, liegen jedoch unterhalb der Dehngrenze, so dass das Material hier nicht versagt und die Injektorstirnplatte der anliegenden Druckdifferenz stand hält. Diese Rechnung

stellt dabei die annähernd optimale Dicke der Stirnplatte dar. Bei einer geringeren Dicke sinkt zwar die anliegende Druckdifferenz, jedoch wird die Platte insgesamt zu dünn, so dass sie versagt. Wird die Dicke zu stark erhöht, dann ergeben sich wegen der zu hohen Druckdifferenz zu große Spannungen sowohl in der gezeigten Stützbohrung als auch in den Bohrungen für die LOX-Röhrchen. Zusätzlich ist ein zu hoher Druckverlust über der Injektorstirnplatte für ein Raketentriebwerk unerwünscht, da die Pumpenleistung entsprechend erhöht werden müsste.

7. DISKUSSION

Das erläuterte poröse Einspritzkopfkonzept ist besonders für neuartige effusionsgekühlte Raketenbrennkammern geeignet. Mit dem porösen Einspritzkopf kann ein Kontakt der effusionsgekühlten Brennkammerwand mit Sauerstoff wesentlich wirkungsvoller vermieden werden, als dies beim Einsatz herkömmlicher Koaxialinjektoren der Fall ist. Insbesondere C/C-Keramiken halten einem längeren Beschlag mit konzentriertem Sauerstoff während eines Heißlaufs nicht stand.

Als mögliches Material für einen derartigen porösen Einspritzkopf bietet sich aus unterschiedlichsten Gründen Sinterbronze an. Für die äußerst komplexe Auslegung ist eine genaue Materialcharakterisierung von besonderer Bedeutung. Hierbei konnten zunächst mittels Zugversuchen die Dehngrenze, die Zugfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul der Sinterbronzen SIKA-B 100, SIKA-B 150 und SIKA-B 200 bestimmt werden. Die ermittelten Werte liegen dabei erwartungsgemäß weit unterhalb der Materialeigenschaften des nichtporösen Ausgangsmaterials CuSn12-C.

Darüber hinaus wurden Ultraschallmessungen durchgeführt, mit denen der Schubmodul sowie die Poissonzahl der verschiedenen Sinterbronzen bestimmt werden konnten. Hierbei wurde ein Elastizitätsmodul festgestellt, welcher um bis zu 30 % über dem der entsprechenden Zugversuche liegt.

Weiterhin wurde neben der mechanischen Werkstoffcharakterisierung auch eine strömungsmechanische durchgeführt. Hierbei wurde ein diskretisierter Ansatz zur Lösung der Forchheimer-Gleichung vorgestellt. Damit kann der Druckverlust bei Durchströmung der porösen Sinterbronze mit Fluiden unter Berücksichtigung von Realgaseffekten berechnet werden. Für die Forchheimer-Gleichung wurden die erforderlichen Permeabilitätskonstanten α und β für die Sinterbronzen SIKA-B 100, SIKA-B 150 und SIKA-B 200 bestimmt. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass diese Materialkonstanten sowohl für Stickstoff, als auch für Wasserstoff und Methan anwendbar sind.

Mit den ermittelten Materialeigenschaften konnte schließlich eine Festigkeitsberechnung einer porösen Injektorstirnplatte erfolgen. Hierbei wurde ein Finite-Elemente-Modell der Injektorstirnplatte aufgebaut und die entspre-

chenden Drucklasten mit den erläuterten Forchheimer-Gleichungen berechnet. Mit diesem FE-Modell konnte das Optimum aus Porosität, Stirnplattendicke und Festigkeit bestimmt werden.

LITERATUR

- [1] LUX, J. ; SUSLOV, D. ; HAIDN, O.: Porous injectors in cryogenic liquid rocket engines at sub- and supercritical pressures. In: *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, NV, 2008. – AIAA 2008-0947
- [2] LUX, J. ; SUSLOV, D. ; HAIDN, O.: On porous liquid propellant rocket engine injectors. In: *Aerospace Science and Technology* (2008). – Artikel im Druck
- [3] SUSLOV, D. ; LUX, J. ; HAIDN, O. J.: Investigation of porous injectors for LOX/CH₄ and LOX/H₂ combustion at sub- and supercritical conditions. In: *European Conference For Aerospace Sciences (EUCASS)*. Brussels, Belgium, 2007
- [4] LUX, J. ; SUSLOV, D. ; HAIDN, O.: Experimental Investigation of Porous Injectors for Liquid Propellant Rocket Engines. In: *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Hartford, CT, 2008. – AIAA 2008-4563
- [5] GKN SINTER METALS FILTERS GMBH: *Filter-Elemente, Hochporöse Sinterteile SIKA-B*. Datenblatt, 2003
- [6] FORCHHEIMER, P.: Wasserbewegung durch Boden. In: *Z. Ver. Deutsch. Ing.* 45 (1901), S. 1782–1788
- [7] SUTTON, G. P. ; BIBLARZ, O. ; JOHN WILEY & SONS, NY (Hrsg.): *Rocket Propulsion Elements*. 7th Edition. 2001
- [8] KOSCHEL, W.: *Vorlesungsskript Raumfahrtantriebe I/II*. Lehr- und Forschungsgebiet Betriebsverhalten der Strahlantriebe an der RWTH Aachen, 2006
- [9] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT E.V.: *Werkstoff-Datenblatt CuSn12-C*. 2005
- [10] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Sintermetalle, ausgenommen Hartmetalle - Zugprobestäbe*. 1999. – DIN EN ISO 2740
- [11] ZWICK ROELL AG: *Zwick Prüfmaschinen und Prüfsysteme für Metalle*. Datenblatt, 2008
- [12] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. 2007. – DIN EN ISO 6892 (Entwurf)
- [13] KRAUTKRÄMER, J. ; KRAUTKRÄMER, H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. Springer-Verlag, 1986
- [14] STRAFFELINI, G. ; FONTANARI, V. ; MOLINARI, A.: True and apparent Young's modulus in ferrous porous alloys. In: *Materials Science and Engineering* 260 (1999), Nr. 1
- [15] VERSCHIEDENE AUTOREN ; BEISS, P. (Hrsg.) ; RUTHARDT, R. (Hrsg.) ; WARLIMONT, H. (Hrsg.): *Landolt-Börnstein Group VIII: Advanced Materials and Technologies*. Bd. 2, Subvolume A. Springer-Verlag, 2003
- [16] GREUEL, D. ; HERBERTZ, A. ; HAIDN, O. ; ORTELT, M. ; HALD, H.: Transpiration Cooling Applied to C/C Liners of Cryogenic Liquid Rocket Engines. In: *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Fort Lauderdale, FL, 2004. – AIAA 2004-3682
- [17] LEMMON, E. W. ; MCLINDEN, M. O. ; FRIEND, D. G. ; LINSTROM, P. J. (Hrsg.) ; MALLARD, W. G. (Hrsg.): *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, 2005
- [18] BEISS, P.: *Vorlesungsskript Werkstoffkunde I*. Institut für Werkstoffkunde an der RWTH Aachen, 2004