

UNTERSUCHUNG DES STRÖMUNGSWIDERSTANDS AN METALLISCHEN SIEBGEWEBEN IN KRYOGENEN FLÜSSIGKEITEN

A. Fischer, J. Gerstmann, DLR Bremen, Institut für Raumfahrtsysteme, Abteilung für Transport und Antriebssysteme, Robert-Hooke- Straße 7, 28359 Bremen, Deutschland

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschäftigt sich mit theoretischen Ansätzen zur Vorhersage von Strömungswiderständen metallischer Siebe und deren Anwendbarkeit für die Auslegung von realen Tanksystemen. Es werden Ergebnisse vorgestellt von Druckverlustmessungen, die am DLR Bremen mit flüssigem Stickstoff durchgeführt wurden. Die Ergebnisse werden verglichen mit Literaturdaten und zeigen generell eine gute Übereinstimmung. Bedingt durch die geringen Viskositäten kryogener Fluide ist der Einfluss des turbulenten Anteils am Druckverlust sehr hoch. Korrelationen, wie z.B. von Cady^[1] und Armour^[2], basieren jedoch hauptsächlich auf Daten mit geringerem turbulenten Einfluss und kleinen Re- Zahlen. Die neuen experimentellen Daten bieten eine genauere Vorhersagemöglichkeit bezüglich des Druckverlustes für Siebdurchströmungen im hohen Re- Bereich.

1. EINLEITUNG

Aktuelles Ziel der europäischen Raumfahrt ist die Entwicklung einer wiederzündbaren kryogenen Oberstufe für die Ariane 5 Rakete. Wengleich die Verwendung von kryogenen Antrieben technologisch weit fortgeschritten ist, steht man bei der Entwicklung einer wiederzündfähigen kryogenen Oberstufe vor neuen Herausforderungen. Besonders die Zielsetzung von vielfältigen Missionsprofilen mit der Möglichkeit von mehreren Wiederzündungen und längeren ballistischen Flugphasen bedeutet einen großen Fortschritt bei der Beförderung von mehreren Nutzlasten in den Erdorbit und festigt damit den Status der Ariane Rakete.

Diese Bedingungen stellen besondere Anforderungen an die Handhabung der Treibstoffe. Das Tanksystem muss in der Lage sein bei den unterschiedlichen Beschleunigungszuständen, jederzeit die Treibstoffe blasenfrei und unter den benötigten thermodynamischen Bedingungen dem Antriebssystem zur Verfügung zu stellen. Metallische Siebe übernehmen dabei eine außerordentlich wichtige Aufgabe. Zum einen werden sie eingesetzt, um Verunreinigungen zurückzuhalten. Zum anderen zeichnen sie sich durch die Eigenschaft aus, den Treibstoff durch ihre Benetzungseigenschaften zu positionieren und Gas bis zu einem charakteristischen Druck zurückzuhalten.

In diesem Zusammenhang sind 2 Eigenschaften metallischer Siebe von besonderer Bedeutung. Zum einen beschreibt der so genannte „Bubble Point“ eben diesen Differenzdruck der maximal über das Siebgewebe auftreten darf, ohne das es zu einem Gasdurchbruch kommt. Daneben bestimmt der Strömungswiderstand der Siebe den auftretenden Druckverlust bei Durchströmung, ein wesentlicher Designparameter für das Propulsionssystem. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich im Folgenden mit der Bestimmung des Strömungswiderstands an metallischen Filtergeweben. Besonders interessant dabei sind Versuche mit flüssigem Stickstoff als kryogene Versuchsflüssigkeit.

2. STAND DER FORSCHUNG

Die für Raumfahrtanwendungen interessanten Siebe sind sehr feine Gewebe (Porengröße 10-30 μm). Hier werden vornehmlich Köpertressen (Twilled Dutch) eingesetzt. Es existieren in der Literatur Ansätze zur Vorherbestimmung des auftretenden Druckverlustes für solche Webarten^[1,2]. Andere theoretische Ansätze, auch neuere^[3,4,5,6], betrachten offene Webarten mit Leinwand- oder Köperbindung (Plain Square, Full Twill), diese sind aber für die raumfahrtrelevanten feinen Gewebe nicht anwendbar.

Die Datenbasis der theoretischen Ansätze stützt sich auf Daten, die mit lagerfähigen Flüssigkeiten, wie Wasser oder Alkoholen, gewonnen wurden, bzw. mit Gasen^[2,7,6,8]. Daten für kryogene Flüssigkeiten sind nur in geringem Maße vorhanden^[1,9] und mittlerweile 40 Jahre alt.

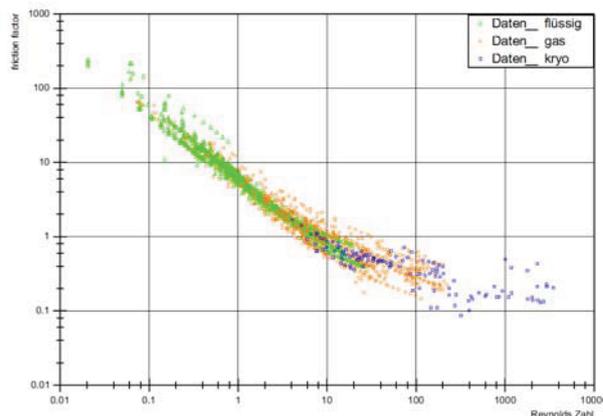


BILD 1: Darstellung von Literatur- und Experimentdaten nach der Definition von Armour^[2]. Die dunkelblauen Quadrate stellen Literaturwerte für kryogene Flüssigkeiten dar.

2.1. Siebgeometrie

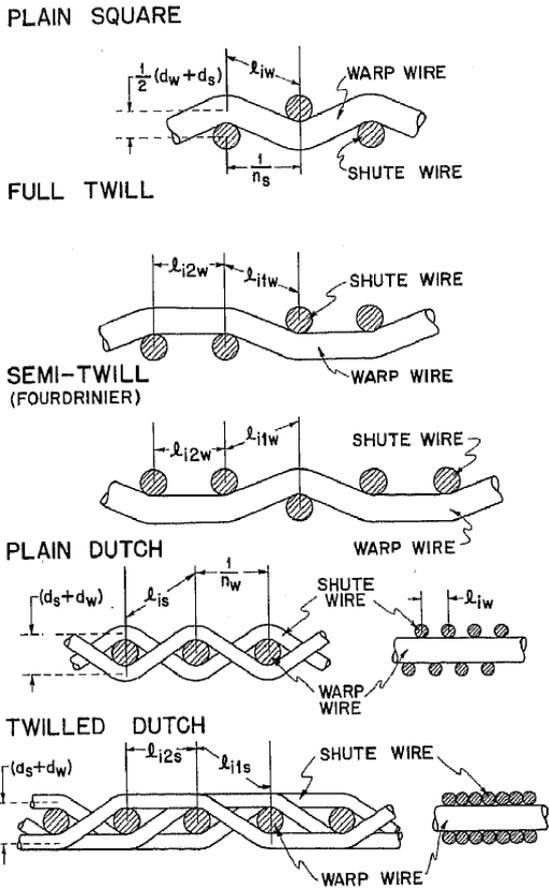


Fig. 1. Cross-sectional views of plain weave (plain square, full twill, and fourdrinier) and dutch weave (plain dutch and twilled dutch) screens.

BILD 2 [2]. Skizze der einzelnen Webarten. Von oben nach unten: Leinwand-, Körper- und Atlasbindung, Tressen- und Körperdressengewebe.

Es gibt in der Literatur zwei prinzipielle Ansätze für die Vorhersage des Druckverlustes: ein Ansatz basierend auf der Analogie zu einer Blendendurchströmung [3,4,5,6], und ein Ansatz basierend auf einer Abschätzung der auftretenden Reibungsverluste bei Durchströmung [1,2]. Der Ansatz, basierend auf der Blendenanalogie, erfordert eine Siebgeometrie mit offenen durchströmten Poren. Dies ist der Fall bei Leinwand- und Körperbindungen, allerdings nicht zutreffend bei dichten Siebgeweben ohne offene Poren, wie zum Beispiel bei Tressengewebe. Bei dem Ansatz, basierend auf den Reibungsverlusten, wird angenommen, dass die Umströmung der Gewebefäden reibungsbehaftet ist und somit Druckverluste verursacht werden. Dieser Ansatz eignet sich sowohl für offene Siebgeometrien, als auch für sehr dichte. Voraussetzung ist allerdings eine gute (mathematische) Beschreibung der Siebgeometrie.

Armour et al. [2] definiert einen dimensionslosen Reibungskoeffizient: „friction factor“ f_r :

$$f_r = \frac{\Delta p \cdot \epsilon^2 \cdot D}{Q \cdot B \cdot \rho \cdot u^2}, \quad (1) \quad Re = \frac{\rho \cdot u}{\mu \cdot \alpha^2 \cdot D}, \quad (2)$$

mit dem Druckverlust Δp , der Anströmgeschwindigkeit u , dem Porendurchmesser D , der Porösität ϵ , der Fluidichte ρ , der dyn. Viskosität μ , der Siebdicke B und dem Tortuositätsfaktor Q .

Wird f_r über der Re- Zahl aufgetragen ergibt sich eine gute Korrelation für alle Webarten (BILD 1).

3. UNTERSUCHUNGSZIEL

Untersuchungsziel ist die Messung des Strömungswiderstands von metallischen Filtergeweben mit kryogenen Flüssigkeiten. Im Fokus stehen dabei engmaschige Webarten, wie Tressen und Körperdressen (Plain & Twilled Dutch).

Für Raumfahrtanwendungen sind Daten von kryogenen Flüssigkeiten von Interesse. Ziel ist es, eine breitere Datenbasis für solche Fluide zu schaffen. Bedingt durch die geringen Viskosität kryogener Flüssigkeiten kann dadurch auch der Bereich der experimentellen Daten auf Re- Zahlen > 100 ausgedehnt werden.

Die Versuche werden mit LN₂ als Testflüssigkeit durchgeführt. Ergänzende Messungen werden mit H₂O und GN₂ durchgeführt, um einen direkten Vergleich mit Literaturdaten zu ermöglichen. Getestet werden glatte Proben des Siebes 165x800 Breitmaschengewebe mit Durchmessern von 15mm und 30mm.

4. TESTAUFBAU

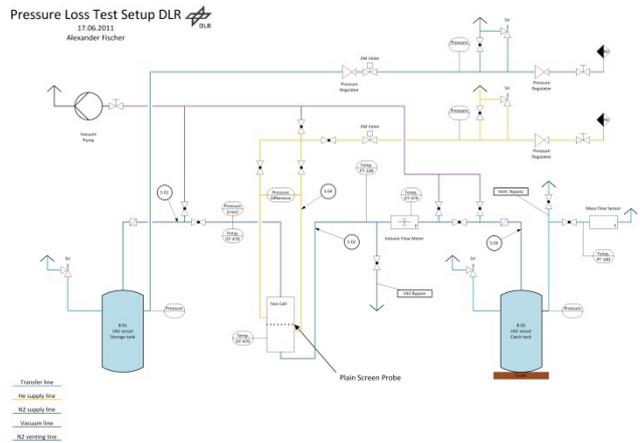


BILD 3: Skizze des Experimentaufbaus für flüssigen (leicht modifiziert auch für gasförmigen) Stickstoff. blau: Transferleitung, lila: Vakuumentleitung, grün: Bedrückungsleitung, gelb: He- Spülleitung, hellblau: Entlüftungsleitung

Zur Durchführung der Messungen mit flüssigem Stickstoff werden 2 Kryostate verwendet. Diese sind über eine Transferleitung miteinander verbunden. In diese Leitung ist die Teststrecke eingebaut (BILD 3).

Der erforderliche Volumenstrom LN_2 wird gefördert indem der Vorrats- Kryostat bedrückt wird. Über ein Ventil können unterschiedliche Volumenströme realisiert werden.



BILD 4: Versuchsanlage für LN_2 des DLR Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen

Für die Versuche mit Wasser wird ein einfacher Pumpenkreislauf genutzt und die Teststrecke in einen Wassertank eingebaut:



BILD 5: Versuchsanlage für H_2O des DLR Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen

Untersuchungsobjekt ist eine runde Siebprobe aus 165x800 Breitmaschengewebe. Die Probe wird durch einen Flanschadapter gehalten und senkrecht durchströmt.

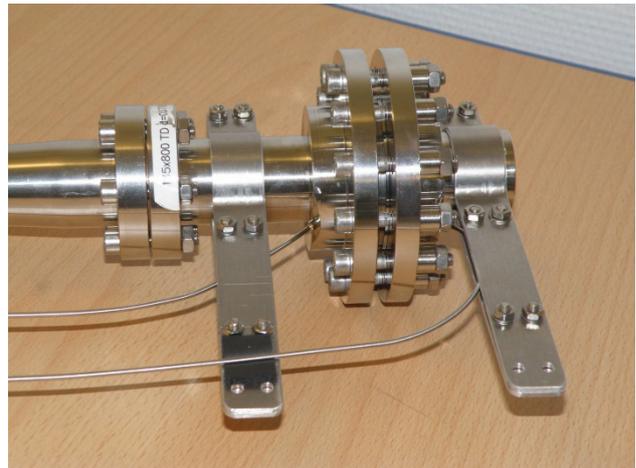


BILD 6: Foto der Testzelle für die 30mm Siebproben.

5. ERGEBNISSE

Es wurden für jeden Siebadapter jeweils Messungen mit allen 3 Fluiden über einen Reynolds- Zahl Bereich von 1 bis 300 durchgeführt.

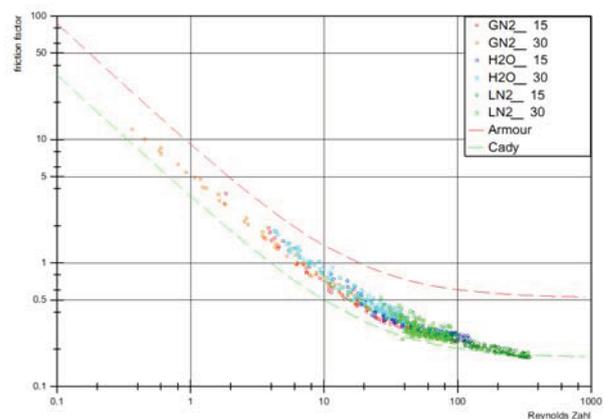


BILD 7: Darstellung der Experimentdaten für das 165x800er Sieb. Die rote und grüne Linie geben die Vorhersagen von Cady^[1] und Armour^[2] an.

Bei der dimensionslosen Darstellung der Daten nach dem Ansatz von Armour^[2] erkennt man die gute Korrelation der Daten zueinander (BILD 7). Die Abweichung der Daten zueinander beträgt ca. 15%. Die Abweichung zu der von Armour^[2] ermittelten Vorhersage beträgt 55%. Nutzt man die von Cady^[1] bestimmten Koeffizienten beträgt die Abweichung für das 165x800er Sieb 37%. Auch der Vergleich mit Daten aus der Literatur zeigt eine gute Übereinstimmung:

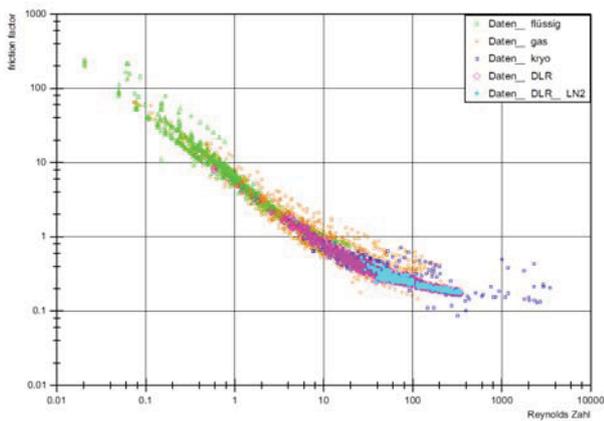


BILD 8: Darstellung der Experimentdaten (rosa) für das 165x800er-Sieb im Vergleich zu den Literaturdaten (grün und orange). Hervorgehoben (hellblau) sind die experimentell bestimmten Daten für LN₂

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden experimentelle Ergebnisse zu Druckverlustmessungen an metallischen Sieben mit flüssigem Stickstoff, Wasser und gasförmigen Stickstoff vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen für das untersuchte metallische Gewebe (165x800) eine gute Übereinstimmung mit Literaturdaten und stellen darüber hinaus eine Erweiterung der Datenbasis dar. Die neuen experimentellen Daten bieten eine genauere Vorhersagemöglichkeit bezüglich des Druckverlustes für Siebdurchströmungen im hohen Re- Bereich.

Zukünftiges Ziel ist eine Fortsetzung der Untersuchung mit weiteren Sieben gleicher Webart (Breitmasche und Köpertsse) und mit Webarten größerer Maschenweite (Leinwand- und Köpertsse). Fernziel ist eine Untersuchung der Siebcharakteristiken für flüssigen Wasserstoff. Somit wären Messdaten für einen Realtreibstoff der Oberstufe verfügbar. Darüber hinaus könnte die Übertragbarkeit der bisherigen Ergebnisse überprüft, und aufgrund der geringen Viskosität des Wasserstoffs, die Datenbasis für hohe Reynoldszahl-Bereiche verifiziert werden. Die Möglichkeit für Versuche mit flüssigem Wasserstoff wird derzeit mit der Inbetriebnahme des neuen Laborgebäudes am DLR Institut für Raumfahrtssysteme in Bremen geschaffen.

7. LITERATUR

- 1 Cady, E.C. *Study of Thermodynamic Vent and Screen Baffle Integration for Orbital Storage and Transfer of Liquid Hydrogen*. NASA CR-134482, NASA Lewis Research Center, 1973.
- 2 Armour, J.C. and Cannon, J.N. Fluid Flow through Woven Screens. *AICHE Journal*, 14(3) (May 1968), 415-420.
- 3 Lu, W.M., Tung, K.L., and Hwang, K.J. Fluid Flow Through Basic Weaves of Monofilament Fabrics. *Textile Research Journal*, 66 (1996), 311-323.
- 4 Wang, Q., Maze, B., Vahedi Tafreshi, H., and Pourdeyhimi, B. On the Pressure Drop Modeling of Monofilament-Woven Fabrics. *Chemical Engineering Science*, 62 (2007), 4817-1821.

- 5 Wu, W.T., Liu, J.F., Li, W.J., and Hsieh, W.H. Measurement and Correlation of Hydraulic Resistance of Flow Through Woven Metal Screens. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (2005), 3008-3017.
- 6 Pedersen, G.C. Fluid Flow Through Monofilament Fabrics. *paper presented at 64th national Meeting of AIChE* (March 1969).
- 7 Bruhn, H. *Siebwidstandsmessungen mit Sieben der Maschenweite 9-10 μ und 12-14 μ unter Verwendung von Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Zähigkeit*. FFE-Tanktechnologie, 1985.
- 8 Conradt, M. and Dreyer, M. The dynamic Bubble Point. *submitted to Int. J. Multiph. Flow* (2011).
- 9 Blatt, M.H., Stark, J.A., and Siden, L.E. *Low Gravity Propellant Control Using Capillary Devices in Large Scale Cryogenic Vehicles- Design Handbook*. General Dynamics/Convair, 1970.