

UNTERSUCHUNGEN ZUM GASRÜCKHALTEVERMÖGEN VON METALLISCHEN SIEBEN

C. Höfflin, J. Gerstmann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Raumfahrtsysteme – Abteilung Transport- und Antriebssysteme, Robert-Hooke-Strasse 7, 28359 Bremen, Deutschland

Es werden experimentelle Ergebnisse zum Gasrückhaltevermögen von metallischen Sieben vorgestellt. Untersucht wurden für die Raumfahrt relevante Siebe in Kombination mit lagerfähigen und kryogenen Flüssigkeiten. Die Ergebnisse wurden mit Angaben aus der Literatur verglichen. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zum Grenzdruck beim Wiederverschließen (Reseal Point), dem erneuten Sperren des Siebes nach dem Gasdurchbruch, durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur und stellen eine Erweiterung der Datenbasis dar.

1. EINLEITUNG

Aktuelles Ziel der europäischen Raumfahrt ist die Weiterentwicklung der Ariane 5 Rakete, bei der eine kryogen betriebene Oberstufe ESC-B mit VINCI-Triebwerk zum Einsatz kommen soll. Das Hauptentwicklungsziel der neuen Oberstufe ist die Ermöglichung flexibler Missionsziele, welche die Wiederzündbarkeit des Triebwerks und die Durchführung langer ballistischer Flugphasen erfordern. Das Verhalten des Treibstoffs stellt insbesondere bei mehrfacher Wiederzündung des Triebwerks und dazwischen liegenden Freiflugphasen besondere Anforderungen an das Tanksystem. Die Wiederzündung erfordert, dass der Treibstoff auch bei verschiedenen Restbeschleunigungen und kleinen Flüssigkeitsmengen immer blasenfrei, ohne gelöstes Bedrückungsgas und mit den richtigen Temperaturbedingungen zum Antriebssystem befördert werden. Besonders beim Vorhandensein von Treibstoffpumpen muss eine jederzeitige blasenfreie Zuströmung der Pumpen mit Treibstoff sichergestellt sein. Sogenannte Liquid Acquisition Devices (LADs) sind Einbauten im Tank, die durch Ausnutzung von Adhäsions- und Kohäsionskräften den Treibstoff bei verschiedenen Restbeschleunigungen vorhalten und jederzeit blasenfrei dem Triebwerk zuführen können. Diese für lagerfähige Treibstoffe bewährte Technologie soll für kryogene Antriebssysteme wiederzündbarer Oberstufen weiterentwickelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil dieser LADs sind Filter aus Metallgewebe (Siebe), die ein Eindringen von Gasblasen in das Treibstoffördersystem verhindern sollen.

Das Durchbruchverhalten von Gas- und Dampfblasen an den metallischen Sieben ist für die Auslegung der Tanksysteme von fundamentaler Bedeutung. Dabei stellt die Kenntnis des maximalen Rückhaltevermögens der Siebe gegenüber einem Blasendurchbruch (Bubble Point) eine entscheidende Größe dar. Der Bubble Point von Metallsieben ist ein wichtiger Parameter für die Auslegung der Tanksysteme und ein charakteristischer Parameter für das jeweilige Metallsieb.

2. GRUNDLAGEN

Die für die Untersuchungen verwendeten Köpertressen-Webstruktur der Siebe sind in BILD 1 und BILD 2 dargestellt.

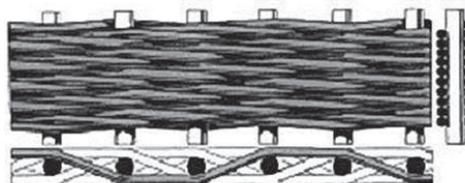


BILD 1. Köpertressen Webstruktur [1]

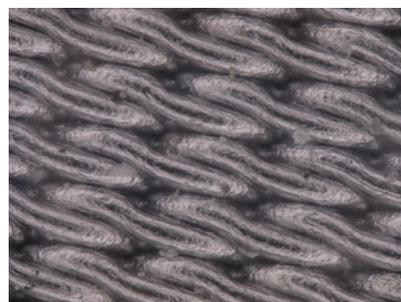


BILD 2. Spörl 200 x 1400 Köpertresse

Für die Bestimmung des Gasrückhaltevermögens ist die Grenzfläche zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase zu betrachten. Verantwortlich für das Gasrückhaltevermögen eines Siebes ist die Oberflächenspannung der verwendeten Flüssigkeit, die bei der Blasenentstehung infolge der gekrümmten Oberfläche einen Gegendruck (Kapillardruck) erzeugt. Der Differenzdruck über die Grenzfläche ist dabei direkt proportional zu der Oberflächenspannung und der Summe der Hauptkrümmungsradien der Oberfläche. Dieser Zusammenhang wird durch die Young-Laplace Gleichung beschrieben

$$(1) \quad \Delta p = \sigma_{Liquid} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Kurz vor dem Durchtritt der Blase durch das Metallgewebe wird bei der Überwindung des engsten Querschnitts der größte Differenzdruck und damit der Bubble Point erreicht. Eine Bestimmung der Hauptkrümmungsradien (r_1 und r_2) einer sich bildenden Blase ist aufgrund der komplexen Siebstrukturen, BILD 1 und BILD 2, nicht möglich. Es wird daher von der Bildung einer sphärischen Gasblase ($r = r_1 = r_2$) ausgegangen. Da nur vollständig benetzende Flüssigkeiten untersucht werden treten keine Randwinkelleffekte auf. Somit entspricht der Krümmungsradius der Gasblase dem effektiven Porenradius (r_{eff}) des Siebes. Unter Verwendung des effektiven Porendurchmessers ($d_{eff} = 2r_{eff}$) kann die Young-Laplace Gleichung zur aus der Literatur allgemein bekannten Beziehung für die Bestimmung des Bubble Point umformuliert werden

$$(2) \quad \Delta p_{Bubble\ Point} = \frac{4 \cdot \sigma_{Liquid}}{d_{eff}}$$

Der effektive Durchmesser d_{eff} ist hierbei die Größe, die aus den experimentellen bestimmten Bubble Points mithilfe der Oberflächenspannung σ_{Liquid} mathematisch ermittelt wird.

Wird der Bubble Point überschritten, kommt es am Siebgewebe zum Blasendurchbruch. Durch die Blasenablösung wird über das Sieb eine Verminderung des Differenzdruckes erzeugt. Die Abnahme des Differenzdruckes ist dabei durch die Blasenbildung, bestimmt durch die Siebgeometrie, und dem Verhältnis aus Blasenablösung zu Gaszufuhr auf der Rückhalteseite des Siebes bestimmt. Wird durch die Blasenablösung ausreichend Druckentlastung erzielt, kommt es am Sieb zum Wiederverschließen. Der Reseal Point stellt dabei den Grenzdruck dar, an dem keine Blasenablösungen am Sieb mehr auftreten.

3. MESSAUFBAU & UNTERSUCHUNGSZIEL

Die für die experimentelle Ermittlung der Bubble Points aufgebaute Anlage ist in den Abbildungen BILD 3 und BILD 4 dargestellt.



BILD 3. Messanlage Bubble Point

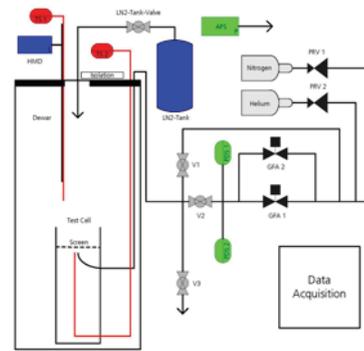


BILD 4. Schaltplan Messanlage

Der Messaufbau, bestehend aus folgenden Komponenten,

- Testzelle
- Gasflussregler
- Differenzdrucksensor
- Gasversorgung Helium / Stickstoff
- Temperatursensoren
- Hydrostatik Messvorrichtung
- Test Dewar
- Steuer- und Datenspeicherungsprogramm

dient zur Messung der Siebproben bei Umgebungsdruck mit lagerfähigen und kryogenen Testflüssigkeiten. Als Bedrückungsgase werden Helium und Stickstoff eingesetzt.

Für die Messungen mit kryogener Testflüssigkeit wird die Testzelle mit Siebprobe in einem Dewar völlig in die Testflüssigkeit eingetaucht. Aufgrund des Füllstandes ist eine Bestimmung des hydrostatischen Drucks erforderlich und das gemessene Differenzdrucksignal durch diesen zu korrigieren. Testzelle und Siebprobe bilden ein abgeschlossenes Volumen, in welches die Gaszufuhr erfolgt. Dabei wird ein Verdrängen der Testflüssigkeit durch die Siebprobe erzeugt bis zur vollständigen Bedeckung der Siebprobe mit dem Bedrückungsgas. Durch fortgeführte Gaszufuhr in das Volumen wird aufgrund der Sperrwirkung des Siebes über den Kapillareffekt in den Siebporen ein Druckanstieg erzeugt, welcher beim Erreichen des Bubble Points zusammenbricht. Durch den Gasdurchbruch und das Ablösen der Gasblasen an der Pore wird eine Druckentlastung erzeugt. Durch die Entlastung wird weiterhin ein Grenzdruck erreicht, an welchem Gasdurchbruch und Blasenablösung endet. Der Grenzdruck des Wiederverschließens wird als Reseal bezeichnet. Der gemessene Differenzdruck setzt sich dabei aus der Differenz von Blasendruck und Umgebungsdruck, korrigiert durch den hydrostatischen Druck, zusammen.

Neben den experimentellen Untersuchungen der Siebe soll zusätzlich die Annahme untersucht werden, ob sich bei Sieben gleicher Struktur und Geometrie die Messergebnisse für unterschiedliche Testflüssigkeiten gemäß folgender Beziehung

$$(3) \quad \frac{\Delta p_{Bubble\ Point\ 1}}{\Delta p_{Bubble\ Point\ 2}} = \frac{\sigma_{Liquid\ 1}}{\sigma_{Liquid\ 2}}$$

übertragen lassen. Die Annahme ist, dass der effektive Porendurchmesser für ein Sieb unabhängig von der Testflüssigkeit ist.

Dazu wird geprüft, ob die Messergebnisse an einem Sieb, erzielt mit der Referenzflüssigkeit Isopropanol, mit dem Ansatz aus Gleichung 3 auf andere Testflüssigkeiten übertragbar/skalierbar sind. Zu diesem Zweck sind Versuche mit folgenden Sieben und unterschiedlichen Testflüssigkeiten (und untersch. Oberflächenspannungen) durchgeführt worden:

Siebe

- Breitmaschenköpertresse 165 x 800
- Köpertresse 165 x 1400
- Köpertresse 200 x 1400
- Köpertresse 325 x 2300

Testflüssigkeiten & Oberflächenspannung

- Isopropanol IPA – 21,4 [mN/m]
- Silikonöl SF0.65 – 15,9 [mN/m]
- Flüssig Stickstoff LN2 – 8,8737 [mN/m]

4. ERGEBNISSE

Charakteristische Differenzdrucksignalverläufe für die Messung von Bubble Point und Reseal für ein 165 x 800 und 200 x 1400 Köpertressen Sieb sind in BILD 5 dargestellt.

BILD 5a.

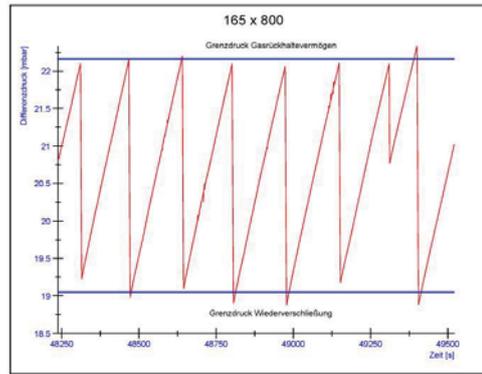
Der Differenzdrucksignalverlauf für das 165 x 800 zeigt einen für diesen Siebtyp charakteristischen Sägezahnverlauf. Die Druckmaxima stellen dabei den Bubble Point, die Minima den Reseal Point dar.

BILD 5.b.

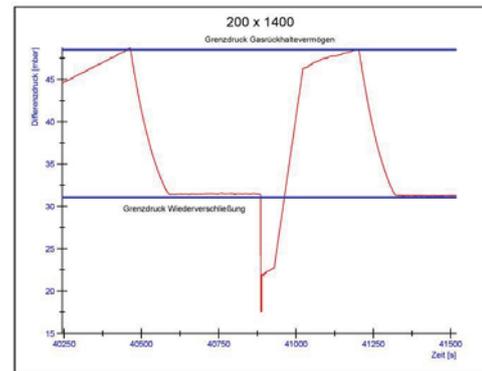
Der Differenzdruckverlauf für das 200 x 1400 zeigt die Bubble Points als Druckmaxima. Der Reseal ist hier durch einen konstanten Druckverlauf gekennzeichnet.

BILD 5 ist dabei zu entnehmen, dass sowohl Bubble Point als auch Reseal Point mit der Zunahme der Siebfeinheit zu höheren Druckniveaus angehoben werden. Weiterhin wird die Druckentlastung bei Gasdurchbruch durch die Zunahme der Siebfeinheit erhöht. Der Unterschied von 165 x 800 und 200 x 1400 im Resealverhalten ist dadurch gekennzeichnet, dass für 165 x 800 das Wiederverschließen einen Wiederanstieg des Differenzdruckes bis zum Bubble Point erlaubt. Für 200 x 1400 und 325 x 2300 ist ein Wiederverschließen mit darauffolgendem Druckanstieg bis zum Bubble Point nicht zu beobachten. Vielmehr werden beim Erreichen des Reseal Points schon bei kleinsten Druckschwankungen Gasblasen abgelöst, was sich in Form eines konstanten Druckverlaufes ausdrückt.

Die Ergebnisse der ermittelten Bubble Points und Reseals können TAB 1 entnommen werden.



a) Charakteristik des Grenzdruckverhaltens für 165 x 800 Sieb und 0,05SCCM Volumenstrom



b) Charakteristik des Grenzdruckverhaltens für 200 x 1400 Sieb und 0,05SCCM Volumenstrom

BILD 5. Charakteristische Drucksignalverläufe für 165 x 800 und 200 x 1400 Köpertressen

Die experimentelle Bestimmung der Messwerte für SF0.65 und LN2 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und den, mit Gleichung 3, theoretisch bestimmten Bubble Point und Reseal Point Werten. Ein Vergleich der zugehörigen effektiven Durchmesser, ermittelt mit Gleichung 2 und den angegebenen Durchmessern des Herstellers, zeigt eine signifikante Abweichung zueinander. Eine Bestimmung der theoretischen Bubble Points und Reseal Points anhand von Herstellerangaben ist somit nicht zulässig. Messergebnisse für Bubble Point (rotes Dreieck) und Reseal Point (rotes Quadrat) werden im σ - Δp Diagramm, BILD 6, BILD 7, BILD 8 und BILD 9 dargestellt. Weiterhin wird über die Methode der kleinsten Quadrate nach Gleichung 2 mit den erzielten Ergebnissen und dem Diagrammnullpunkt Ausgleichsgeraden für Bubble Point (rote Gerade) und Reseal Point (blaue Gerade) bestimmt und in den Diagrammen eingetragen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen erzielten Messwerten und Ausgleichsgeraden, die entsprechend Gleichung 2 einen linearer Zusammenhang der Ergebnisse für Bubble Point und Reseal Point mit der Oberflächenspannung und der Geradensteigung

$$(4) \quad m = \frac{4}{d_{eff}}$$

herstellen.

Sieb	d _{Herstell} [µm] [1]	IPA				
		BP _{Mess} [mbar]	RS _{Mess} [mbar]	d _{eff} [µm]		
165 x 800	25	21,76	18,74	39,34		
165 x 1400	17	36,11	26,88	23,71		
200 x 1400	13	48,55	31,25	17,63		
325 x 2300	8,5	68,81	50,41	12,44		
		SF0.65				
		BP _{Kalk} [mbar]	RS _{Kalk} [mbar]	BP _{Mess} [mbar]	RS _{Mess} [mbar]	d _{eff} [µm]
165 x 800	25	16,17	13,9	15,87	14,34	40,08
165 x 1400	17	26,83	19,97	25,93	19,84	24,52
200 x 1400	13	36,07	23,22	35,84	23,91	17,75
325 x 2300	8,5	51,13	37,45	50,62	36,49	12,56
		LN2				
		BP _{Kalk} [mbar]	RS _{Kalk} [mbar]	BP _{Mess} [mbar]	RS _{Mess} [mbar]	d _{eff} [µm]
165 x 800	25	9,022	7,77	8,86	7,98	40,05
165 x 1400	17	14,97	11,15	14,98	11,25	23,69
200 x 1400	13	20,13	12,96	20,02	14,82	17,73
325 x 2300	8,5	28,53	20,90	29,27	21,38	12,13

TAB 1. Messergebnisse für 165 x 800, 200 x 1400 und 325 x 2300 mit IPA, SF0.65 und LN2

Zum Vergleich mit bisherigen Literaturwerten werden diese in BILD 6, BILD 7, BILD 8 und BILD 9 eingetragen. Gute Übereinstimmung der Messergebnisse und der daraus resultierenden Ausgleichsgeraden sind mit den Bubble Point Messwerten für

- 165 x 800 von Blatt [6], Cady [2], EADS [5] und Junge [4] für Messungen mit LH2, LN2 und Ethanol
- 200 x 1400 von Blatt [6], Cady [2], Conrath [7] und Jurns & McQuillen [10] für Messungen mit LH2, LOx und SF0.65
- 325 x 2300 von Cady [2], Jurns & McQuillen [10] und Jurns/McQuillen/Gaby/Sinacore [11] für LH2, LN2 und LOx

zu ermitteln. Eine gute Übereinstimmung der Reseal Messwerte und der Ausgleichsgeraden wurde mit den Messergebnissen von Junge [4] für 165 x 800 und 325 x 2300 mit Ethanol erzielt. Für das 165 x 1400 liegen bis jetzt keine Literaturwerte zum Vergleich vor.

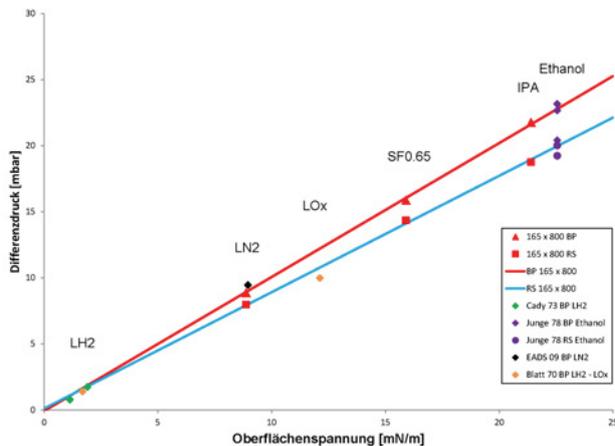


BILD 6. Messergebnisse 165 x 800 mit Vergleich zu Literaturwerten [2][4][5][6]

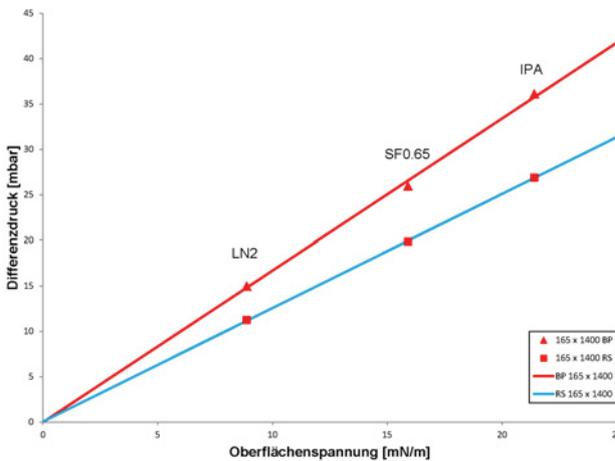


BILD 7. Messergebnisse 165 x 1400

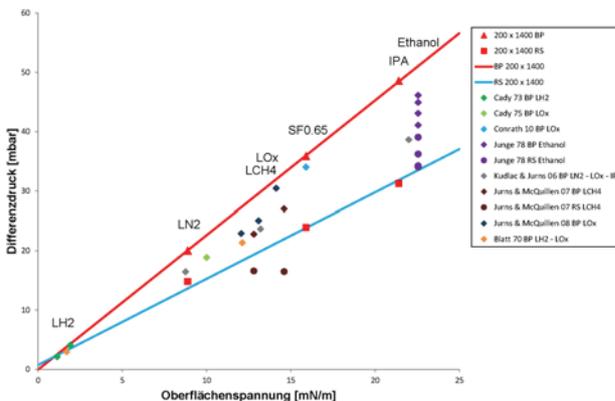


BILD 8. Messergebnisse 200 x 1400 mit Vergleich zu Literaturwerten [2][3][4][6][7][8][9][10]

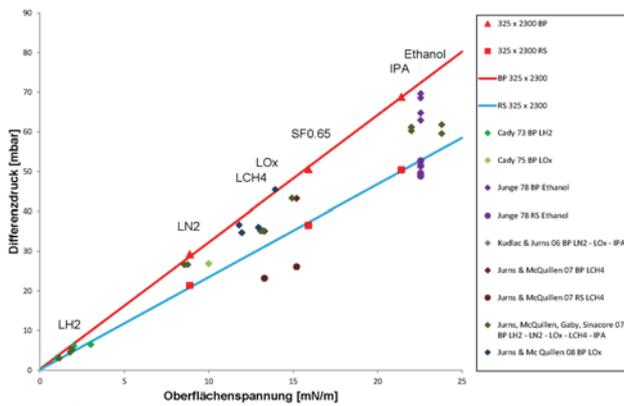


BIld 9. Messergebnisse 325 x 2300 mit Vergleich zu Literaturwerten [2][3][4][8][9][10][11]

[8] M.T.Kudlac & J.M.Jurns: Screen Channel Liquid Acquisition Devices for Liquid Oxygen, AIAA 2006-5054, 2006

[9] J.M.Jurns & J.B.McQuillen: Bubble Point Measurements With Liquid Methane of a Screen Capillary Liquid Acquisition Device, NASA/TM—2009-215496, 2007

[10] J.M.Jurns & J.B.McQuillen: Liquid Acquisition Device Testing with Sub-Cooled Liquid Oxygen, AIAA 2008-4943, 2008

[11] J.M.Jurns, J.B.McQuillen, J.D.Gaby & S.A.Sinacore: Bubble Point Measurements with Liquid Methane of a Screen Channel Capillary Liquid Acquisition Device, NASA/TM—2009-215494, 2009

5. ZUSAMMENFASSUNG

Es werden Bubble Point und Reseal Point Messungen für 165 x 800, 165 x 1400, 200 x 1400 und 325 x 2300 twilled dutch Siebe mit IPA, SF0.65 und LN2 durchgeführt. Der gewählte Ansatz zur Berechnung und theoretischen Bestimmung von Messergebnissen für SF0.65 und LN2 ausgehend von IPA Referenzwerten kann in dem untersuchten Datenbereich für die eigenen Messungen bestätigt werden. Die Daten aus der Literatur streuen sehr stark, so dass neben einer sehr guten Übereinstimmung auch Abweichungen festzustellen sind. In der Literatur sind nur wenige Daten zum Reseal-Verhalten verfügbar. Für eine Festigung der Überlegungen und Ansätze, besonders für das Reseal-Verhalten der Siebe, ist eine experimentelle und theoretische Erweiterung der Daten- und Kenntnisbasis zu empfehlen.

LITERATUR

[1] S.Schütz, P.Kopf, C.Winkler, M.Piesche: Anwendung der Kapillardruckmethode zur Bestimmung maximaler Porengrößen in Filtermedien aus Metalldrahtgeweben, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008

[2] E.C.Cady: Study of thermodynamic vent and screen baffle integration for orbital storage and transfer of liquid hydrogen, NASA CR-134482, 1973

[3] E.C. Cady: DESIGN AND EVALUATION OF THERMODYNAMIC VENT-SCREEN BAFFLE CRYOGENIC STORAGE SYSTEM, NASA CR-134810, June 1975

[4] H. Junge: Bestimmung der Filterfeinheit von Tressengewebe mit dem Bubble-Point-Test, Aufbereitungs-Technik, Nr. 5, 209-216, 1978

[5] EADS Astrium: Dok.Br. C3B-RIBRE-TN-0080-DASA, 2009

[6] M.H.Blatt: Low Gravity Control using capillary devices in large scale cryogenic vehicles, Phase II Final Report, NASA CR-114104, 1970

[7] M. Conrath & M. Dreyer: The dynamic bubble point, submitted to Int.J. Multiph. Flow (2011)