

UNTERSUCHUNG DES VERSPRÜHUNGSVERHALTENS VON GELFÖRMIGEN TREIBSTOFFEN BEI EINEM PRALLINJEKTOR

J. von Kampen, F. Alberio*, H.K. Ciezki, A. Feinauer
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Raumfahrtantriebe
Lampoldshausen
D-74239 Hardthausen

ÜBERSICHT

Vergelte Treibstoffe zeigen ein nicht-newtonisches rheologisches Verhalten, was die Fließeigenschaften sowie das Versprühungs- und Verbrennungsverhalten im Vergleich zum unvergelter Stoff deutlich beeinflusst. In dieser Arbeit wird der Einfluss von Aluminiumpartikelzusätzen zu vergeltem Jet A-1 Treibstoff auf die rheologischen Eigenschaften und die Versprühungsvorgänge dargestellt. Hierzu gehört die Beschreibung der Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate und vom Al-Gehalt sowie die Visualisierung und Charakterisierung des Versprühungsverhaltens der gelförmigen Brennstoffe mit einem Prallinjektor (doublet, like-on-like) unter Umgebungsdruck und –temperatur.

Verbrennungsphänomene wie Schalenbildung auf Tröpfchenoberflächen (siehe z.B. Lit. [1-3]) auch Probleme in Zusammenhang mit Langzeitstabilität und Stabilität bei erhöhten Beschleunigungswerten infolge auftretender Sedimentations- und anderer Effekte, die zum Teil auch heute noch nicht vollständig beherrscht werden.

In vergelten Treibstoffen mit Metallpartikelzusätzen hingegen sind Partikel- und Phasensedimentationseffekte erheblich geringer ausgeprägt als in Slurries und treten nur bei sehr hohen Beschleunigungen auf. Diese geringere Sedimentationsneigung wird durch die interne Struktur des Gels verursacht, wobei die Partikel und die Flüssigphase in einem dreidimensionalen Netzwerk des Gelbildners eingebettet sind. Außerdem wird das Leckageverhalten bei Beschädigungen des Tank- und Fördersystems im Vergleich zu Slurries wegen der so genannten "halbfesten" Struktur der Gele erheblich verbessert. Aufgrund ihres scherratenabhängigen nicht-newtonischen Fließverhaltens, bieten Gele die Möglichkeit, regelbare Antriebe zu konstruieren, die gleichzeitig ähnlich einfache Handhabungseigenschaften wie Feststoffantriebe haben.

Seit den sechziger Jahren sind in den Vereinigten Staaten [4] und später auch anderenorts Bemühungen unternommen worden, Antriebssysteme mit vergelten Treibstoffen zu entwickeln. Die erste erfolgreiche Flugdemonstration von zwei Testflugkörpern wurde von TRW 1999 und 2000 [5] durchgeführt. Detaillierte

1. EINLEITUNG

Der Zusatz energetischer Partikel wie z.B. Kohlenstoff, Aluminium, oder Bor zu flüssigen Treibstoffen ist von hohem Interesse für die Realisierung regelbarer Antriebe mit hohen Flugleistungen, da diese Partikel erheblich höhere volumetrische Heizwerte im Vergleich zu reinen Kohlenwasserstoffen besitzen. Allerdings zeigen sich bei den seit langem untersuchten Treibstoffschlämmen (Slurries) neben komplexen

* Diplomand vom SP Lab, Politecnico di Milano,
Mailand, Italien

Informationen über diese und andere Untersuchungen werden im Übersichtsvortrag von Natan und von Rahimi [6] und in Lit. [7,8] gegeben. Mit dem Einbringen von Vergelungsmitteln in herkömmliche Flüssigbrennstoffe und der Durchführung des Vergelungsprozesses ändern sich deren rheologische Eigenschaften grundlegend. Ohne aufgebrachte Scherbeanspruchung sind Gele aufgrund ihrer hohen dynamischen Viskositätswerte weitgehend fließunfähig, weisen sogar elastische Eigenschaften auf und besitzen teilweise eine ausgeprägte Fließgrenze.

Durch das Aufbringen hoher Scherraten während des Einspritzvorganges ist es jedoch möglich, relativ niedrige Viskositätswerte und somit eine weitgehende Verflüssigung im Bereich des Injektorausgangs zu erreichen, wie dies später noch in Kapitel 3.1 anhand von Viskositätsverläufen im Detail dargestellt wird. Dadurch wird ein Injektionsvorgang, der dem herkömmlicher Flüssigtreibstoffe ähnelt, für bestimmte Einspritzzustände und -einstellungen möglich, wie schon vorhergehende Untersuchungen bewiesen haben. Allerdings ist dieser Prozess schwieriger als im Falle der reinen unvergelten Brennstoffe durchzuführen. Des Weiteren ist die Verdampfungsrate der Gele im Vergleich mit denen reiner Brennstoffe niedriger, sodass sich auch das Verbrennungsverhalten der Geltröpfchen erheblich unterscheidet [9]. Auch ist der Einfluss von Partikelzusätzen zu Brenn- und Treibstoffgelen auf das Versprühungs- und Verbrennungsverhalten in der Literatur kaum beschrieben. Das Ziel der hier präsentierten Untersuchung war, den Einfluss des Aluminiumgehalts von Jet A-1-basierten Gelen auf ihr Versprühverhalten darzustellen.

2. EXPERIMENTELLER AUFBAU

Die vergelten Brennstoffe wurden mittels eines Getzmann Dissolver-Rührers hergestellt. Die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften (Scherviskositätskurven und Fliessgrenzen) erfolgte mit einem ThermoHaake RheoStress 1 Viskosimeter.

Der experimentelle Aufbau für die Versprühungsuntersuchungen ist in den Skizzen der

Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Gelversorgung besteht aus einer Kartusche, die den vergelten Brennstoff enthält, einer hydraulischen Antriebseinheit und einer austauschbaren Injektoreinheit. Das Gel wird mit Hilfe eines in der Kartusche befindlichen Kolbens durch Schläuche zum Injektor gefördert. Die zeitlichen Druckverläufe in der Kartusche und im Injektor wurden mit Druckaufnehmern ermittelt und aufgezeichnet. Die Düsenaustrittsgeschwindigkeit wurde aus der Kolbengeschwindigkeit über einen Weggeber ermittelt. Für die in dieser Veröffentlichung präsentierte Untersuchung wurde ein Prallinjektor eingesetzt, dessen Skizze in Bild 2 zu sehen ist. Diese Injektorart wird wegen ihrer Einfachheit und ihrer guten Versprühungs- und Mischeigenschaften [10] häufig in Raketenmotoren genutzt, die mit lagerfähigen newtonischen Treibstoffen betrieben werden. Alle hier präsentierten Experimente wurden mit einem Injektorbohrungsdurchmesser von $d=0,7$ mm und einem Prallwinkel von $2\theta=90^\circ$ durchgeführt. Die Visualisierung des Sprayverhaltens erfolgte mittels der Schattenbildtechnik unter Benutzung eines Nanolite Funkenblitzes mit einer Blitzdauer von 18 ns (FWHM). Weitere Informationen über die Versuchsrandbedingungen, den Aufbau und das Injektordesign siehe z.B. Lit. [7,8,11].

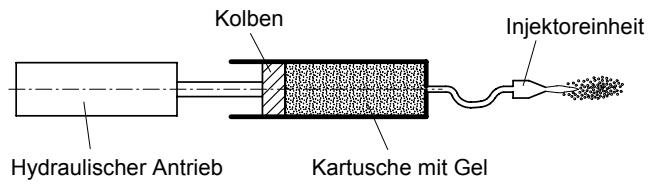


BILD 1: Skizze der Gelversorgung

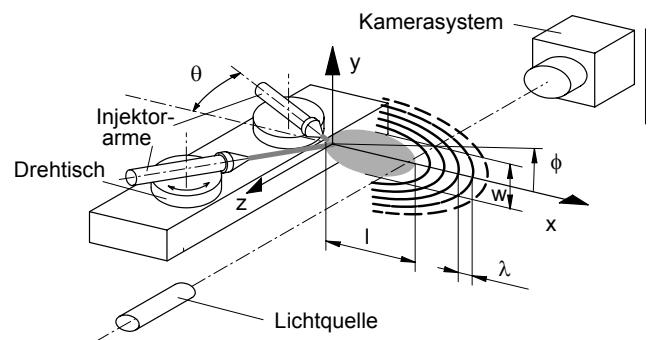


BILD 2: Skizze des Prallinjektor-Aufbaus

3. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

3.1. Rheologische Eigenschaften

Jet A-1 als kommerzieller und leicht verfügbarer Flüssigbrennstoff wurde für die hier präsentierten Experimente gewählt und mit Thixatrol ST, einem organischen Gelbildner, vergelt. Thixatrol ST, ein Rizinolsäureamidester hergestellt von Rheox, wurde zusammen mit 5-Methyl-2-Hexanon (Miak) als Lösungsmittel für den Vergeleungsprozess benutzt. Die verwendeten Aluminiumpartikel (-325 mesh) mit einem mittleren Durchmesser von 11 µm und mit 99,5 % Reinheit stammen von Alfa Aesar. Die chemische Zusammensetzung der produzierten Gele ist in Tabelle 1 dargestellt.

Test-treibstoff	Jet A-1	Thixatrol ST	Miak	Aluminium
	[%]	[%]	[%]	[%]
TF1	65	7,5	7,5	20
TF2	60	7,5	7,5	25
TF3	55	7,5	7,5	30
TF4	50	7,5	7,5	35
TF5	45	7,5	7,5	40
TF6	85	7,5	7,5	-

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Gele in Gew.-%

Geltreibstoffe sind scherverdünnende Fluide, die abnehmende Scherviskositäten η mit steigender Scherrate $\dot{\gamma}$ zeigen, wie es das Diagramm in Abbildung 3 veranschaulicht. Hier ist der Verlauf der Scherviskositätskurven der Testtreibstoffe aus Tabelle 1 im Vergleich mit reinem Jet A-1 dargestellt, das eine newtonische Flüssigkeit mit konstanter Viskosität ist. Man kann sehen, dass die Viskositätswerte der Gele bei niedriger und mittlerer Scherrate teilweise um mehrere Größenordnungen höher als die des reinen Jet A-1 sind. Erst bei sehr hohen Scherraten über 10^5 , wie sie in Injektoren auftreten können, werden ausreichend niedrige Viskositätswerte erzeugt, wie sie für eine triebwerksrelevante Versprühung benötigt werden.

Für Gele des hier dargestellten Typs lässt sich die η - $\dot{\gamma}$ -Abhängigkeit von niedrigen bis an den

Bereich hoher $\dot{\gamma}$ durch die Herschel-Bulkley-Gleichung beschreiben, die die Existenz einer Fließgrenze τ_0 (yield stress) berücksichtigt:

$$(1) \quad \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1}$$

Dies bedeutet, dass diese Gele nicht fließfähig sind, wenn die aufgebrachte Scherbeanspruchung unterhalb dieser Fließgrenze τ_0 liegt. Des Weiteren zeigt Bild 3, dass mit steigendem Aluminiumgehalt die Viskosität zunimmt.

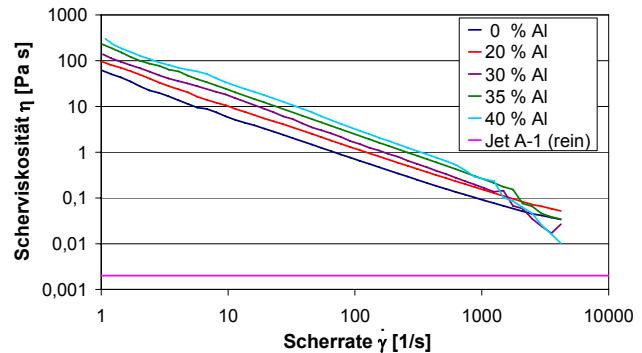


BILD 3: Scherviskosität in Abhängigkeit der Scherrate

Test-treibstoff	Y_{Al}	K	n	τ_0	$R_{gen,krit}$
	[%]	[Pa·s ⁿ]	[-]	[Pa]	[-]
TF1	20	50	0,12	34,5	1902
TF2	25	63	0,095	52,7	1681
TF3	30	72	0,078	76,1	1482
TF4	35	78	0,067	135,9	1337
TF5	40	81	0,062	225,5	1273
Jet A-1 (rein)	0	0,002	1	-	2300

Tab. 2: Koeffizienten der Herschel-Bulkley-Gleichung sowie $R_{gen,krit}$ für die Gele und Jet A-1

Die in der Tabelle 2 angegebenen Koeffizienten der Herschel-Bulkley-Gleichung wurden mittels der Software des Viskosimeters bestimmt. Die ermittelten Werte zeigen, dass alle Gele eine ausgeprägte Fließgrenze haben. Mit Zunahme des Aluminiumgehaltes erhöhen sich Fließgrenze τ_0 und prä-exponentieller Faktor K; der exponentielle Faktor n nimmt hingegen ab. Den Abbildungen 4 bis 6 kann man entnehmen, dass zu höheren Al-Gehalten hin bei K und n die

Kurvenverläufe abflachen, während für die Fließgrenze τ_0 die Werte mit steigendem Y_{AI} deutlich zunehmen. Zusätzlich sind bei den Abbildungen die mit einem parabolischen Ansatz gefitteten Kurven für die Herschel-Bulkley-Koeffizienten angegeben.

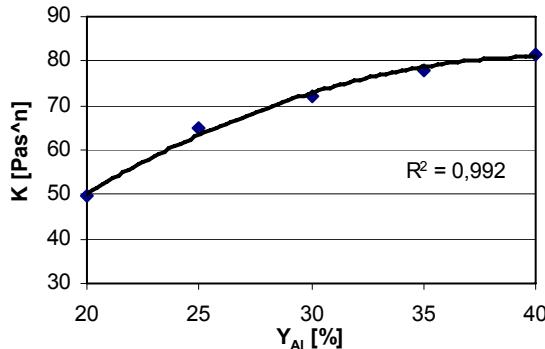


BILD 4: prä-exponentieller Faktor K

$$K = -0,0714 \cdot Y_{AI}^2 + 5,8209 \cdot Y_{AI} - 37,534$$

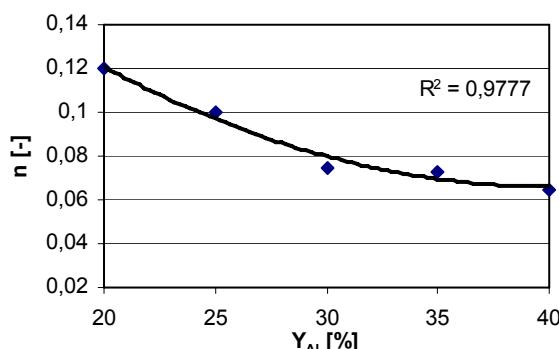


BILD 5: exponentieller Faktor n

$$n = 0,000132 \cdot Y_{AI}^2 - 0,0108 \cdot Y_{AI} + 0,2829$$

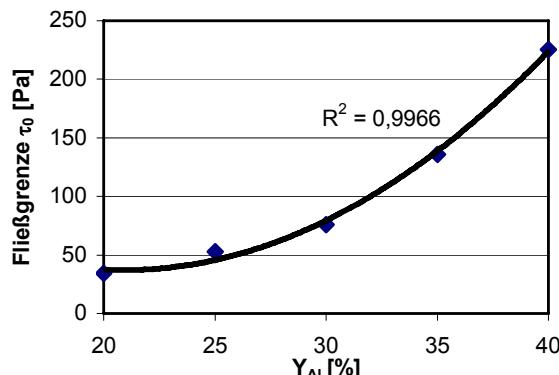


BILD 6: Fliessgrenze τ_0

$$\tau_0 = 0,5117 \cdot Y_{AI}^2 - 21,4 \cdot Y_{AI} + 260,8$$

Für die Kennzeichnung des Strömungszustandes von Rohrströmungen bei nicht-newtonischen Flüssigkeiten des Power-Law Typs ($\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$) haben Reed, Metzner und Mitarbeiter [12] eine generalisierte Reynolds Zahl abgeleitet

$$(2) \quad Re_{gen} = \frac{\rho u_{gel}^{2-n} d^n}{K \left(0,75 + \frac{0,25}{n} \right)^n 8^{n-1}}$$

Ryan und Johnson [13] entwickelten für statioäre Rohrströmungen eine theoretische Gleichung (3) zur Bestimmung der kritischen Reynolds-Zahl $Re_{gen,krit}$ von Power-Law-Fluiden, bei der eine laminare in eine turbulente Strömung umschlägt.

$$(3) \quad Re_{gen,krit} = 885 \frac{8n}{(1+3n)^n} (2+n)^{\frac{2+n}{1+n}}$$

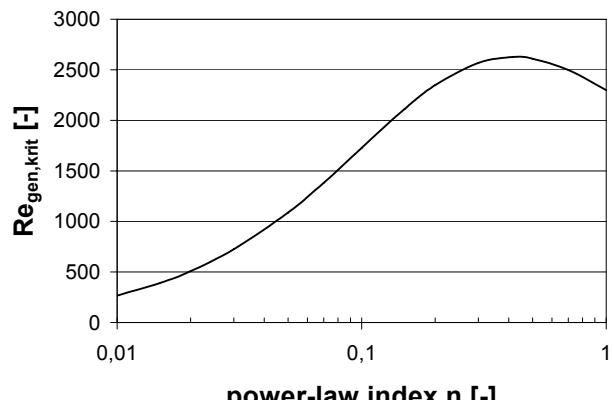


BILD 7: $Re_{gen, krit}$ in Abhängigkeit von n

Experimentelle Untersuchungen von Ryan und Johnson mit Flüssigkeiten, deren exponentielle Faktoren n zwischen 0,16 und 1 lagen, zeigten, dass Gleichung (3) in diesem Bereich verwendet werden kann. Obwohl die exponentiellen Faktoren n der hier präsentierten Gele unter 0,16 sind und den Autoren keine Arbeiten zu diesem Bereich bekannt sind, wurde zur Abschätzung des Übergangs laminar-turbulent Gl. (3) trotzdem herangezogen. Die in Tab. 2 aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass mit steigendem Al-Gehalt sinkende $Re_{gen,krit}$ auftreten, wobei die Werte deutlich unterhalb der kritischen Reynolds-Zahl $Re_{krit} = 2300$ für newtonische Fluide sind.

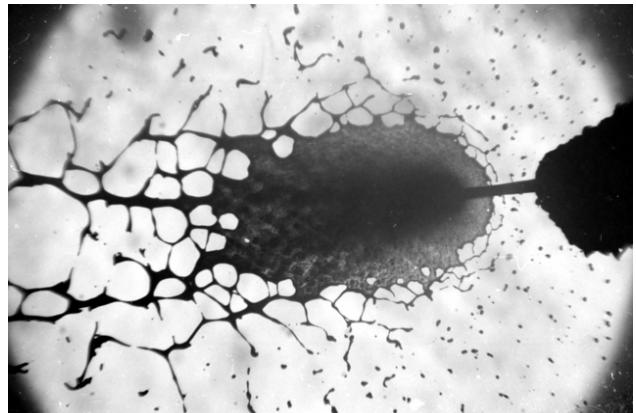
3.2. Versprühungsverhalten

Das Zusammentreffen zweier gleicher, zylindrischer und koplanarer Fluidstrahlen erzeugt ein sich erweiterndes Flüssigkeitsblatt (auch Flüssigkeitsslamelle genannt) senkrecht zur Fläche, in der die beiden Strahlen liegen, wie es z.B. auf den Bildern 8a-c zu sehen ist. Dieses Blatt zerfällt in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie Strahlgeschwindigkeit, Aufprallwinkel, Flüssigkeitseigenschaften, usw. auf unterschiedliche Art. Heidmann et al. [14] fanden vier unterschiedliche Zerfallsmuster bei Zunahme der Strahlgeschwindigkeit für eine newtonische 70 %-ige Glycerinlösung. Eine Übersicht hinsichtlich der Forschung zur Prallinjektor-Zerstäubung bis 1995 ist z.B. in der Veröffentlichung von Santoro, Anderson et al. [15] gegeben.

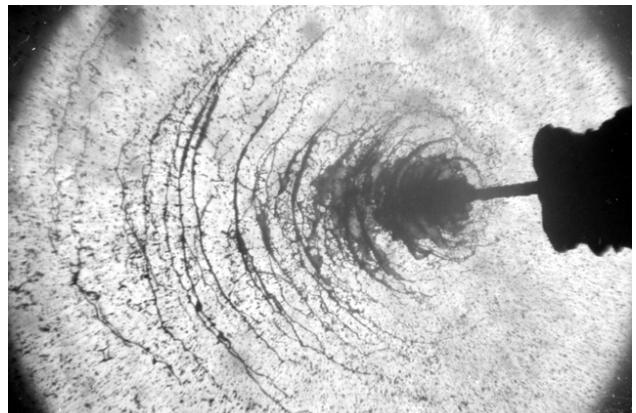
Die drei auf Jet A-1 basierenden Gele TF3, TF4 und TF5, die einen hohen Al-Gehalt haben, wurden für die hier präsentierten Untersuchungen eingesetzt. Bei den Versuchen traten im Wesentlichen drei unterschiedliche Zerfallsmuster auf, die in den Schattenaufnahmen 8a-c an typischen Beispielen dargestellt sind.

- Strahlenförmiges Zerfallsmuster (Bild 8a): Bei niedrigen Re_{gen} tritt eine strahlenförmige Struktur, mit ihrem Ursprung nahe dem Kollisionspunkt der Gelstrahlen, auf der Oberfläche des Blattes auf. Dieses Blatt zerfällt nach außen gehend zuerst in eine netzartige Struktur, die weiter stromab in kleinere Ligamente und in größere Tröpfchen zerfällt. Auf den Aufnahmen treten auch radialorientierte größere Ligamentstrukturen in der Fortsetzung der (Oberflächen-)Strahlen hervor.
- Ligament-Muster (Bild 8b): Bei mittleren Re_{gen} treten kreisförmige wellenähnliche Strukturen auf der Oberfläche des Gelblattes auf und große bogenförmige Ligamente werden in regelmäßigen Abständen vom Rand abgetrennt. Diese Ligamente zerfallen stromabwärts in kleinere Ligamente und hiernach in Tröpfchen.
- Voll entwickeltes Muster (Bild 8c): Bei sehr hohen Re_{gen} wird die Form des Flüssigkeitsblattes klein und unregelmäßig. Es zerbricht direkt in sehr feine Tröpfchen, ohne vorher in

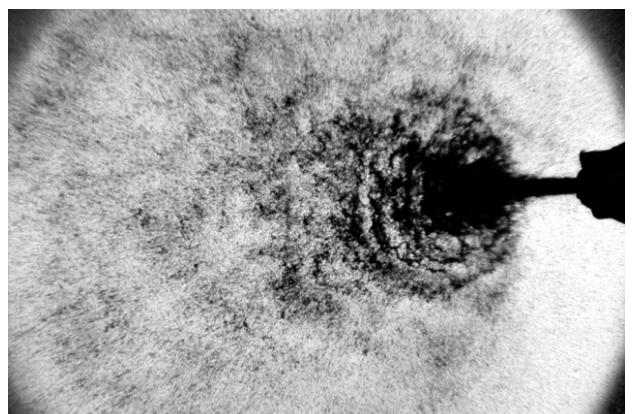
Ligamente zu zerfallen. Diese Tröpfchen separieren vorzugsweise in periodischen Wellen vom Blattrand.



a: $u_{gel}=5,1 \text{ m/s}$; $Re_{gen}=1210$



b: $u_{gel}=18 \text{ m/s}$; $Re_{gen}=13890$



c: $u_{gel}=88 \text{ m/s}$; $Re_{gen}=296630$

BILD 8: Schattenaufnahmen,
Jet A-1/35%Al-Gel (TF4)

Ligament-Muster und voll entwickeltes Muster sind von Prallinjektoruntersuchungen mit newtonischen Flüssigkeiten her bekannt, siehe z.B.

[15]. Das strahlenförmige Muster jedoch wurde zuerst bei Geltreibstoffen [16] beobachtet und konnte im Jahr 2004 auch für newtonische Flüssigkeiten [17] bei Reynolds-Zahlen von etwa 200 und Weber-Zahlen unter 2000 nachgewiesen werden.

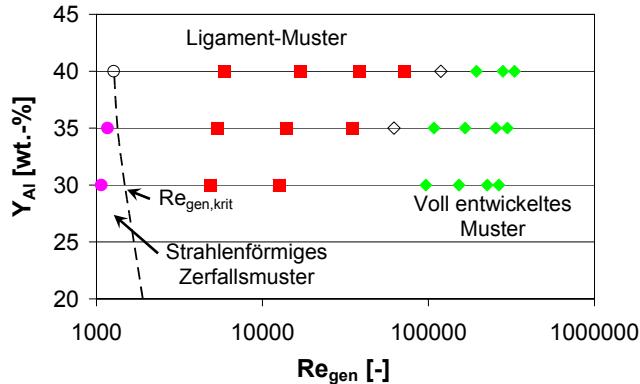


BILD 9: Regimediagramm

Bild 9 zeigt in einem Regimediagramm die unterschiedlichen Sprayoutmuster für die Geltreibstoffe TF3 bis TF5 in der Abhängigkeit von Re_{gen} . Man kann sehen, dass das strahlenförmige Muster (violette Punkte) bei Reynolds-Zahlen unter $Re_{gen,krit}$ auftritt. Das bedeutet, dass die Gelstrahlen die Düsenöffnungen unter laminaren Bedingungen verlassen. Für $Y_{Al}=40\%$ und $Re_{gen}=1340$ (schwarzer Kreis) ist ein Übergang zwischen strahlenförmigem und Ligament-Muster beobachtet worden, wie dies auch die Schattenaufnahme in Abbildung 10 zeigt.

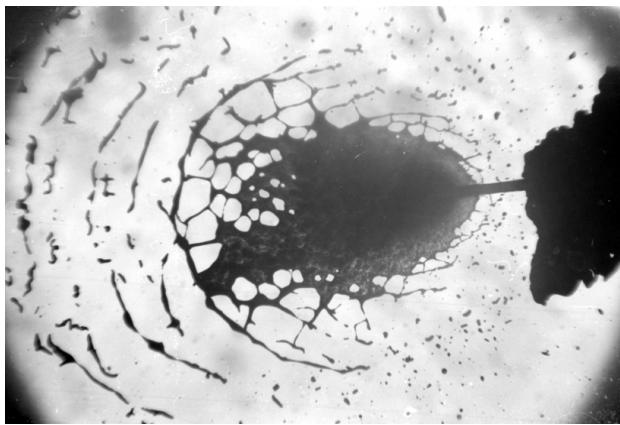


BILD 10: Schattenaufnahme des Übergangs vom strahlenförmigen zur Ligament-Muster. $Y_{Al}=40\%$ (TF5); $u_{gel}=5,1 \text{ m/s}$; $Re_{gen}=1320$; $Re_{gen,krit}=1273$

Der Übergang zwischen dem Ligament-Muster (rote Quadrate) und dem voll entwickelten Muster (grüne Rauten) tritt bei Re_{gen} von ungefähr 100.000 auf, wobei kein eindeutiger Übergangspunkt ermittelt werden konnte, weshalb die entsprechenden Experimente im Diagramm als schwarze offene Rauten dargestellt werden.

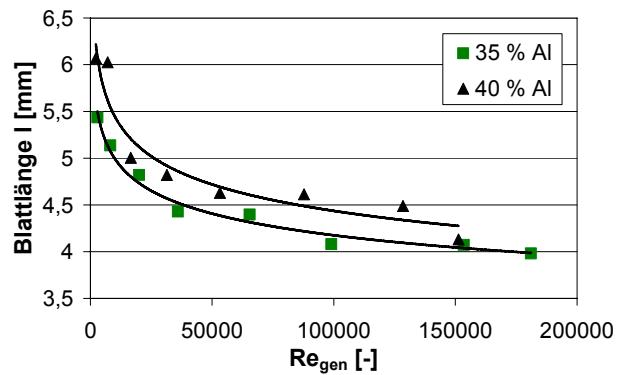


BILD 11: Blattlänge l über Re_{gen}

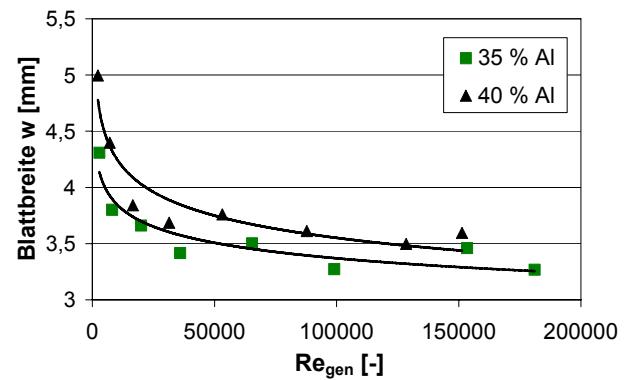


BILD 12: Blattbreite w über Re_{gen}

Die Größe des Gelblattes und der Ort des Zerfalls des Blattes ändern sich bei Zunahme der Geschwindigkeit u_{gel} und damit der Reynolds Zahl. Bild 11 stellt die Gelblatt-Länge l (auch beschrieben als Zerfallslänge) dar, die die mittlere Entfernung vom Prallpunkt der Gelstrahlen zum Ort der vollständigen Ligamentablösung ist, wie dies auch in der Skizze in Abb. 2 dargestellt ist. Mit der Erhöhung von Re_{gen} treten abnehmende Gelblatt-Längen (bzw. Zerfallslängen) auf, wobei die Steigung der Kurven zu hohen Re_{gen} hin abnimmt. Ein Vergleich zwischen TF4 und TF5 zeigt, dass bei höherem Al-Gehalt größere Gelblatt-Längen l auftreten. Das Ver-

halten der Gelblattbreite w ist prinzipiell ähnlich, wie man in Bild 12 sehen kann.

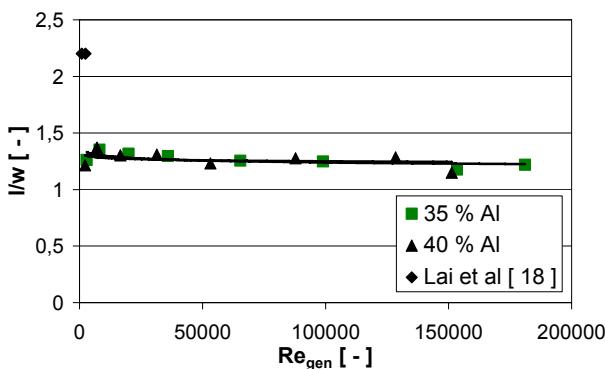


BILD 13: Verhältnis Blattlänge zu -breite l/w

Während Gelblatt-Länge l und -Breite w mit zunehmendem Re_{gen} abnehmen, so kann deren Verhältnis l/w , dargestellt in Abbildung 13, als konstant und gleich für beide Y_{Al} angesehen werden. Somit bleibt die äußere Gelblattform für alle untersuchten Re_{gen} und Y_{Al} unverändert. Ein ähnliches Verhalten wurde von Lai et al [18] für Wasser gefunden. Für den gleichen Prallwinkel $2\theta=90^\circ$ wurde ein konstanter Wert $l/w \approx 2,2$ im untersuchten Geschwindigkeitsbereich ermittelt, wobei dieser l/w -Wert höher ist als bei den hier untersuchten Gelen. Hierbei ist zu bedenken, dass die Untersuchungen von Lai nur im laminaren Bereich und somit bei sehr geringen Reynolds-Zahlen stattfanden, wie dies auch in Abb. 13 dargestellt ist, und dort, im Gegensatz zu den Untersuchungen an Gelen im turbulenten Bereich, steigende Fluidblatt-Längen und -Breiten auftreten. Weiterhin erscheint ein Einfluss der bei Gelen vorhandenen Dehnviskosität denkbar, sodass hierdurch unterschiedliche l/w -Werte auftreten könnten.

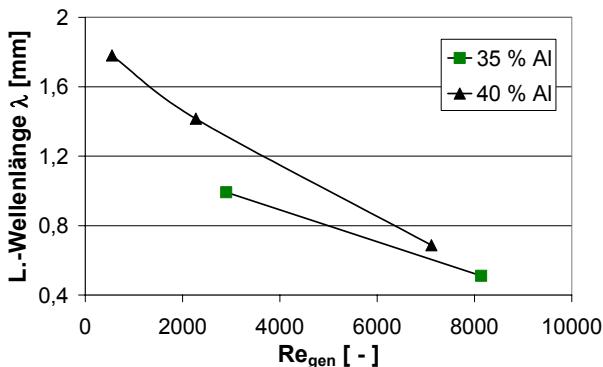


BILD 14: Ligament-Wellenlänge λ über Re_{gen}

Des Weiteren wurde festgestellt, dass sich bei höherem Al-Gehalt der Abstand zwischen den Ligamentbögen λ verringert (Bild 14).

4. ZUSAMMENFASSUNG

Eine ausführliche Studie hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften und des Versprühungsverhaltens von vergelten Treibstoffen auf Jet A-1-Basis mit verschiedenen Aluminiumpartikelgehalten wurde durchgeführt. Die Scherviskositätsmessungen zeigten, dass mit zunehmendem Al-Gehalt zunehmende Viskositätswerte und Fliessgrenzen auftreten.

Die Sprühexperimente ergaben, dass alle untersuchten Gele bis zu $Y_{Al}=40$ Gew.-% zerstäubt werden können. Bei Zunahme der generalisierten Reynolds-Zahl Re_{gen} wurden abnehmende Zerfallslängen und Gelblattbreiten gefunden, wobei für höhere Y_{Al} höhere Werte erhalten wurden. Drei Versprühungsregime mit unterschiedlichen Spraymustern traten bei unterschiedlichen Randbedingungen auf und konnten in einem Diagramm in der Abhängigkeit von Y_{Al} und Re_{gen} dargestellt werden. Es wurde gezeigt, dass das strahlenförmige Zerfallsmuster bei laminaren Zustandsbedingungen der Gelstrahlen auftritt.

5. DANKSAGUNG

Die Autoren möchten J. Liebl, R. Brändle und Ö. Tokac für die Mithilfe bei der Produktion der Geltreibstoffe und A. Feinauer für seine Hilfe während der Durchführung der Experimente danken. Auch sei an dieser Stelle Prof. L. De Luca für die hilfreichen Diskussionen, Anmerkungen und Vorschläge gedankt.

6. NOMENKLATUR

d	Düsenaustrittsdurchmesser, [mm]
K	prä-exponentieller Faktor, [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$]
l	Gelblatt-Länge, [m]
n	exponentieller Faktor, [-]
Re_{gen}	generalisierte Reynolds-Zahl, [-]
Re_{krit}	kritische Reynolds-Zahl, [-]
u	Geschwindigkeit, [m/s]

w	Gelblatt-Breite [m]
x,y,z	kartesische Koordinaten, [m]
Y_i	Massenbruch der i-ten Komponente, [%]
ρ	Dichte, [kg/mm^3]
η	Scherviskosität, [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
θ	Prallhalbwinkel, [$^\circ$]
λ	Ligament-Wellenlänge, [m]
τ	Scherspannung, [Pa]
τ_0	Fließgrenze, [Pa]

7. LITERATUR

- [1] Szekely Jr G.A. and Faeth G.M. Combustion properties of carbon slurry drops. *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 3, pp 422-429, 1982.
- [2] Lee A and Law C.K. Gasification and shell characteristics in slurry droplet burning. *Combustion and Flame*, Vol. 85, pp 85-93, 1991
- [3] Mueller D.C. and Turns S.R. Some aspects of secondary atomization of aluminum/hydrocarbon slurry propellants. *J. of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 3, pp 345-352, 1993.
- [4] Rapp D.C. and Zurawski R.L. Characterization of aluminum/RP-1 gel propellant properties. AIAA-88-2821, July 1988.
- [5] Hodge K., Crofoot T. and Nelson S. Gelled propellants for tactical missile applications. *39th Joint Propulsion Conference*, Los Angeles, CA, USA, AIAA-99-2976, 1999.
- [6] Natan B and Rahimi S. The status of gel propellants in year 2000. in: *Combustion of energetic materials*, pp 172-194 (Eds.: KK Kuo and LT DeLuca), Begell House, USA, 2002.
- [7] Bartels N., von Kampen J., Ciezki H.K. and Begnini M. The atomization of gelled fuels with a doublet like-on-like impinging jet injector under ambient pressure and temperature conditions. *Novel Energetic Materials, Proc 9th Int. Workshop on Combustion and Propulsion (9-IWCP)*, Lerici, Italy, pp 39-1 – 39-13, September 2003.
- [8] Ciezki H.K., Robers A. and Schneider G. Investigation of the spray behavior of gelled jet A-1 fuels using an air and an impinging jet atomizer. *38th AIAA Joint Propulsion Conference*, Indianapolis, IN, USA, AIAA-2002-3601, July 2002.
- [9] Nachmoni G. and Natan B. Combustion characteristics of gel fuels. *Combustion Science and Technology*, Vol. 156, pp 139-157, 2000
- [10] Sutton G.P. *Rocket propulsion elements: an introduction to the engineering of rockets*. John Wiley, New York, USA, 1992, pp 298-311.
- [11] Ciezki H.K., Bartels N., von Kampen J. and Madlener K. Properties of gelled propellants for throttleable propulsion systems. *Proc Symposium on Energy Conversion Fundamental*, Istanbul, Turkey, June 2004.
- [12] Dodge D.W. and Metzner A.B. Turbulent flow of non-Newtonian systems. *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 5, No. 2, pp 189-204, 1959.
- [13] Ryan N.W. and Johnson M.N. Transition from laminar to turbulent flow in pipes. *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 5, No. 2, pp 433-438, 1959.
- [14] Heidmann M.F., Priem R.J. and Humphrey J.C. A study of sprays formed by two impinging jets. *NACA TN 3835*, 1957
- [15] Anderson W.E., Ryan H.M. and Santoro R.J. Impinging jet injector atomization. *Liquid Rocket Engine Instability*, Eds.: V Yang and WE Anderson, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, pp 215-246, 1995.
- [16] Bartels N., von Kampen J., Ciezki H.K. and Zanetti N. Investigation of the spray characteristic of an aluminized gelled fuel with an impinging jet injector. *Proc Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, Germany, 2004.
- [17] Bartels N., Ciezki H.K., Tiedt T. and von Kampen J. Investigation of the atomization behavior of a doublet like-on-like impinging jet atomizer in a wide range of Reynolds and Weber numbers. *ILASS 2004*, Nottingham, UK, September 2004.
- [18] Lai H.W., Huang W. and Jiang T.L. Characteristic Study on the Like-Doublet Impinging Jets Atomization, *J. Atomization and Sprays*, Vol. 9, pp. 277-289, 1999