

# ARBEITEN AUF DEM WEG ZUR ENTWICKLUNG DER BRENNKAMMERPROZESSFÜHRUNG BEI GELANTRIEBEN

H.K. Ciezki<sup>1</sup>, K. Madlener, J. von Kampen, A. Feinauer  
DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Raumfahrtantriebe  
Lampoldshausen  
D-74239 Hardthausen, Deutschland

## Zusammenfassung

Für die Entwicklung regelbarer Triebwerke sind gelförmige Treibstoffe von großem Interesse, da sie auch einfach zu handhaben und zu lagern sind. Bedingt durch ihre nicht-Newtonschen rheologischen Eigenschaften, die im Wesentlichen als scherverdünnend zu bezeichnen sind, unterscheiden sich ihre Fließ-, Versprühungs- und Verbrennungseigenschaften deutlich von den üblicherweise eingesetzten flüssigen Treibstoffen mit Newtonschem Verhalten. Diese Veröffentlichung gibt eine Übersicht über wesentliche Ergebnisse der Arbeiten auf dem Weg zur Entwicklung der Brennkammerprozessführung mit gelförmigen Treibstoffen, die im DLR-Institut für Raumfahrtantriebe durchgeführt wurden. Die Arbeiten beinhalten grundlagennahe Untersuchungen zur Rheologie, zu Fließ-, Versprühungs- und Verbrennungsvorgängen sowie Entwicklungsarbeiten zur Brennkammerprozessführung.

## 1. EINLEITUNG

Gelförmige monergole Treibstoffe als auch Kombinationen aus gelförmigen Brennstoffen und Oxidatoren eröffnen die Möglichkeit regelbare Antriebe mit ähnlichen einfachen Lager- und Handhabungseigenschaften wie Feststoffantriebe zu schaffen. Gelförmige Stoffe sind im Ruhezustand aufgrund ihrer hohen Viskositätswerte und einer in den meisten Fällen deutlich ausgeprägten Fließgrenze (betrachtet auf kurzen Zeitskalen) nicht fließfähig. Unter Einfluss einer Scherspannung deutlich oberhalb dieser Fließgrenze, wie sie zum Beispiel innerhalb bestimmter Injektorkonfigurationen erzeugt werden kann, werden Gele fließfähig und erlauben eine Förderung in Rohrleitungen vom Tank in die Brennkammer.

Dieses scherverdünnende Viskositätsverhalten der Gele führt bei sehr hohen Scherraten zu einer Reduzierung der Viskosität sogar bis hin zu Werten nahe üblicher flüssiger Treibstoffe. Dies ermöglicht eine Regelung der Treibstoffmassenströme ins Triebwerk, eine Treibstoffaufbereitung in Injektoren ähnlich Newtonscher Fluide und somit eine zeitlich und großemäßig frei wählbare Variation der Schubstärke. Die Kombination von Schubregelbarkeit, wie sie Flüssigtriebwerke aufweisen, mit den guten Handhabungs- und Lagereigenschaften eines Feststofftriebwerkes - wobei wesentliche Nachteile beider Antriebssysteme nicht in Kauf genommen werden müssen - eröffnet die Möglichkeit zur Entwicklung neuer Antriebssysteme mit völlig neuen Einsatzspektren und Fähigkeiten. Eine detaillierte Beschreibung der Vorteile von Gelantrieben ist zum Beispiel in Ref. [ 1 ] gegeben.

Seit den sechziger Jahren sind in den Vereinigten Staaten (siehe zum Beispiel Ref. [ 2, 3 ]) und in den folgenden Jahren auch anderenorts Bemühungen unternommen worden, Antriebssysteme mit vergelten Treibstoffen zu entwickeln. Die ersten erfolgreichen Flugdemonstrationen wurden in 1999 und 2000 von TRW [ 4 ] mit zwei Testflugkörpern durchgeführt. Detaillierte Informationen über diese und andere Arbeiten können dem Übersichtsartikel von Natan und Rahimi [ 5 ] sowie den Ref. [ 6, 7 ] entnommen werden.

Diese hier vorgelegte Veröffentlichung gibt einen kurzen Überblick über wesentliche Ergebnisse der seit 1999 im DLR-Institut für Raumfahrtantriebe durchgeführten Arbeiten auf dem Weg zur Entwicklung einer Brennkammerprozessführung für Gelantriebe. Die Arbeiten beinhalten zum einen detaillierte grundlagennahe Untersuchungen zur Rheologie sowie zum Fließ-, Versprühungs- und Verbrennungsverhalten von gelförmigen Brennstoffen, da die hier ablaufenden Vorgänge wesentlich komplexer sind als bei flüssigen Newtonschen Treibstoffen und einer Klärung bedürfen. Aufbauend auf diesen Arbeiten werden zum anderen Arbeiten zur Entwicklung der Brennkammerprozessführung mit gelförmigen Treibstoffen an einem Modelltriebwerk durchgeführt. Insbesondere die letzteren Arbeiten sind Bestandteil des Deutschen Nationalen Gel-Technologieprogramms, in dem die Technologie entwickelt wird um ein Demonstratortriebwerk auf Geltreibstoffbasis zu bauen und dessen überragende Fähigkeiten durch einen Flugversuch zu demonstrieren [ 1 ]. Ausgewählte Fragestellungen im grundlagennahen Bereich werden auch in verschiedenen nationalen und internationalen Kooperationen bearbeitet. Für weitergehende Informationen sei hier zum Beispiel auf die anderen Vorträge in der Session beziehungsweise der Fachsitzung

<sup>1</sup> Kontakt: helmut.ciezki@dlr.de

„Raumfahrtantriebe: Gel-Treibstoffe“ des Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses 2008 [1, 8, 9] aber auch auf Einzelpublikationen hingewiesen [10, 11].

Im Folgenden können aufgrund der limitierten Seitenzahl lediglich nur einige aber wichtige Ergebnisse kurz skizziert werden. Für den interessierten Leser werden in den einzelnen Kapiteln an geeigneter Stelle Hinweise auf Veröffentlichungen mit weitergehenden Informationen gegeben.

## 2. RHEOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN UND FLIEßVERHALTEN

Durch die Vergelung herkömmlicher flüssiger Brennstoffe, die üblicherweise Newtonsche Fluide mit konstanter Viskosität sind, ändern sich deren rheologische Eigenschaften grundlegend. Im Diagramm in Bild 1 ist am Beispiel eines Gels auf Kerosinbasis die Abhängigkeit der dynamischen Scherviskosität  $\eta$  und der Scherspannung  $\tau$  von der angelegten Scherrate  $\dot{\gamma}$  dargestellt. Die offenen Symbole im Diagramm kennzeichnen hierbei die Messungen, die mit einem Rotationsrheometer, und die (grau)gefüllten Symbole die, die mit einem Kapillarrheometer ermittelt wurden. Der Einsatz zweier unterschiedlicher Rheometer war notwendig um den gesamten antriebsrelevanten Scherratenbereich  $10^{-2} < \dot{\gamma} < 10^6 \text{ s}^{-1}$  abdecken zu können, der sich über acht Dekaden erstreckt und für den Bereich von der Lagerung bis hin zur Versprühung von Bedeutung ist. Das untersuchte Gel besteht aus 85 Gew.-% Jet A-1, das mit 7,5 Gew.-% Thixatrol ST, einem Rizinolsäureamidester, und 7,5 Gew.-% 5-Methyl-2-Hexanon (Miak), als Lösungsmittel für den Vergelungsprozess, vergelt wurde.

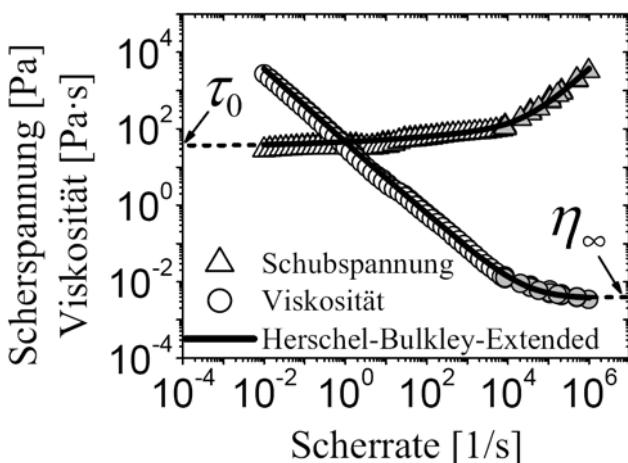


BILD 1. Scherviskosität  $\eta$  und Schubspannung  $\tau$  in Abhängigkeit der Scherrate  $\dot{\gamma}$  für ein JetA-1/ThixatrolST-Gel

Dieses Gel zeigt über einen weiten Scherratenbereich ein scherverdünnendes Verhalten, d.h. es treten abnehmende dynamische Scherviskositätswerte  $\eta$  mit steigender Scherrate  $\dot{\gamma}$  auf. Bei sehr niedrigen Scherraten kleiner

etwa  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  liefert das eingesetzte Rotationsrheometer allerdings keine verlässlichen Daten. Dies ist auf die Existenz einer Fließgrenze  $\tau_0$  zurückzuführen unterhalb derer sich ein Gel elastisch, d.h. ähnlich wie ein Festkörper, verhält. Diese Fließgrenze kann aus dem Diagramm in Bild 2 ermittelt werden. Der elastische Bereich ist durch die Steigung 1 im Diagramm bei doppelt-logarithmischer Auftragung gekennzeichnet. Beginnt man durch eine Erhöhung der angelegten Schubspannung  $\tau$  über die Fließgrenze  $\tau_0$  hinaus die internen Gelbildnerstrukturen zu zerstören, so zeichnet das Rheometer deutlich höhere  $\gamma$ -Werte auf.

Bei sehr hohen Scherraten begründet die weitgehende Zerstörung der Gelbildnerstrukturen das Auftreten eines konstanten Grenzwertes der Scherviskosität  $\eta_\infty$ , der im Diagramm in Bild 1 sichtbar wird. Dieser Wert wird auch als oberes Newtonsches Plateau bezeichnet und ist oftmals der konstanten Scherviskosität des (flüssigen) Basisfluids ähnlich. Die Existenz eines solchen Grenzwertes bedeutet, dass die untersuchten Gele sich unter sehr hohen Scherraten ähnlich einem Newtonschen Fluid verhalten.

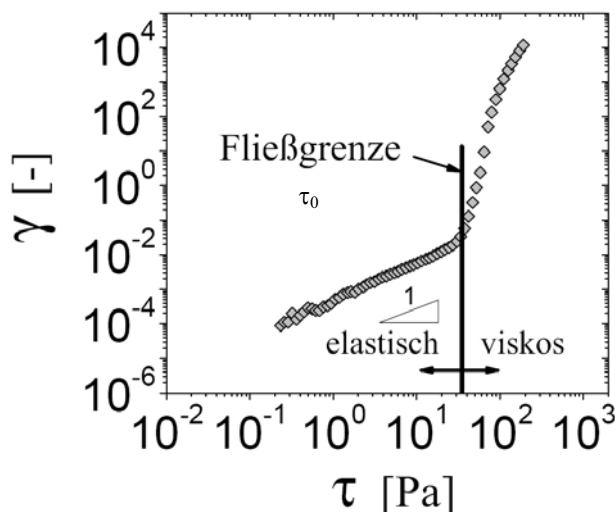


BILD 2. Scherdeformation  $\gamma$  in Abhängigkeit der Scherspannung  $\tau$ , (JetA-1/ThixatrolST-Gel)

Oftmals kann für bestimmte Anwendungen das Verhalten scherverdünnender Fluide durch die Power-Law-Gleichung (1), die auch Oswald-DeWaele-Gleichung genannt wird, beschrieben werden.

$$(1) \quad \eta_{PL} = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

Diese Gleichung kann bei den hier untersuchten Gelen allerdings nur den mittleren Scherratenbereich zufriedenstellend wiedergeben und versagt im Bereich sehr kleiner Scherraten, der für Lager- und Transportrandbedingungen gilt, und im Bereich sehr hoher Scherraten, der für die Versprühungsvorgänge relevant ist. Die in Gleichung (2) beschriebene erweiterte Version der Herschel-Bulkley-Gleichung (Herschel Bulkley Extended, abgekürzt HBE) berücksichtigt sowohl die Fließgrenze  $\tau_0$  als auch das obere Newtonsche Plateau  $\eta_\infty$ .

$$(2) \quad \eta_{HBE} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} + \eta_\infty$$

Sie ermöglicht es, den gesamten antriebstechnisch relevanten Bereich von der Lagerung über die Förderung bis hin zur Versprühung im Scherratenbereich bei etwa  $10^2 < \dot{\gamma} < 10^6 \text{ s}^{-1}$  mit guter Näherung zu beschreiben. Eine detaillierte Untersuchung zum Einsatz der HBE-Gleichung ist zum Beispiel in Ref. [ 12, 13 ] beschrieben.

Im Diagramm in Bild 3 ist der Einfluss des Exponenten  $n$  der Power-Law-Gleichung (PL) auf die dimensionslosen Geschwindigkeitsprofile ausgebildeter laminarer und stationärer Rohrströmungen dargestellt (siehe auch Ref. [ 14 ]). Hierbei ist die Geschwindigkeit  $u=u(r)$  auf die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$  und die radiale Koordinate  $r$  auf den Rohrradius  $R$  normiert. Für  $n=1$  ergibt sich das bekannte parabolische Profil einer Newtonschen Flüssigkeit. Mit kleiner werdendem  $n$  ergeben sich abnehmende normierte Geschwindigkeiten nahe der Rohrachse sowie zunehmende Geschwindigkeitsgradienten in Wandnähe.

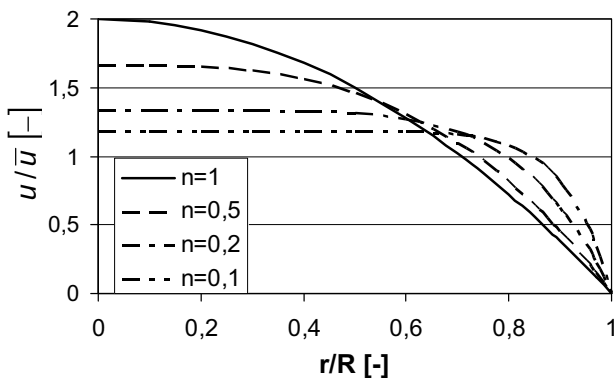


BILD 3. Berechnete dimensionslose Geschwindigkeitsprofile  $u/\bar{u}$  für Power-Law-Fluide

Die Berücksichtigung der Fließgrenze  $\tau_0$  als auch des oberen Newtonschen Plateaus  $\eta_\infty$  führt nun zu deutlichen Änderungen des PL-Geschwindigkeitsprofils, wie dies in Bild 4 dargestellt ist. Für alle theoretischen Viskositätsgesetze wurde hier ein Verhältnis der Fließgrenze zur Wandschubspannung  $\tau_0/\tau_w = 0,05$  angesetzt. Die Gleichung für ein Bingham-Fluid mit  $\eta_B = \tau_0/\dot{\gamma} + \eta_\infty$  erweitert die Viskositätsgleichung für das Newtonsche Fluid um die Fließgrenze  $\tau_0$ . Dies führt zu einer Kernströmung (grau schraffiert) mit konstanter Geschwindigkeit, auch Pfropfenströmung oder Plug Flow genannt, da in diesem Bereich die auftretenden Schubspannungen unterhalb der Fließgrenze  $\tau_0$  liegen.

Das Gesetz  $\eta_{HB} = \tau_0/\dot{\gamma} + K \dot{\gamma}^{n-1}$  von Herschel-Bulkley (HB) führt zu „breiteren“ Geschwindigkeitsprofilen ähnlich dem Übergang vom Newtonschen zum Power-Law-Profil, wobei hier zusätzlich der Plug-Flow-Bereich existiert. Beim HBE-Fluid treten geringere Geschwindigkeitsgradienten als beim HB-Fluid im wandnahen Bereich auf, da bei hohen Geschwindigkeiten und damit bei hohen

Scherraten beim HBE-Fluid das konstante obere Newtonsche Plateau erreicht wird, während das HB-Gesetz unrealistisch niedrige Viskositätswerte liefert.

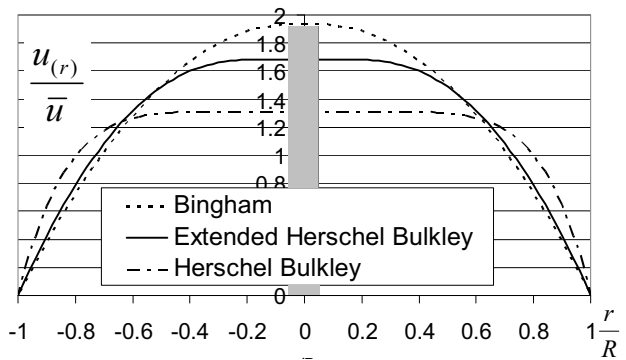


BILD 4. Berechnete dimensionslose Geschwindigkeitsprofile einer Rohrströmung für ein Paraffin-Gel mit  $\tau_0/\tau_w = 0,05$ . (Ref. [ 13 ])

Zur Charakterisierung oder zum Vergleich von Strömungszuständen werden üblicherweise dimensionslose Kennzahlen benutzt. Aus den Erhaltungsgleichungen kann unter anderem die Reynolds-Zahl  $Re$  abgeleitet werden, die als Verhältnis der Trägheitskräfte zu den viskosen Kräften in einer Strömung interpretiert werden kann. Für Rohrströmungen Newtonscher Fluide wurde von Osborne Reynolds die Gleichung  $Re = \rho D \bar{u} / \eta$  gefunden, die die Dichte  $\rho$ , den Rohrdurchmesser  $D$ , die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$  und die dynamische Scherviskosität  $\eta$  enthält.

Für nicht-Newtonsche Fluide kann diese aufgrund der veränderlichen Viskosität nicht verwendet werden. So wurde eine generalisierte Reynoldszahl (3) abgeleitet, die zur Charakterisierung von Rohrströmungen von Gelen entsprechend der HBE-Gleichung (2) genutzt werden kann. Der Vergleich mit experimentellen Daten zeigte befriedigende Ergebnisse. Eine detaillierte Beschreibung ist in Ref. [ 12 ] gegeben.

$$(3) \quad Re_{genHBE} = \frac{\rho \cdot \bar{u}^{2-n} \cdot D^n}{\frac{\tau_0}{8} \left( \frac{D}{\bar{u}} \right)^n + K \left( \frac{3m+1}{4m} \right)^n 8^{n-1} + \eta_\infty \frac{3m+1}{4m} \left( \frac{D}{\bar{u}} \right)^{n-1}}$$

$$\text{mit } m = \frac{n \cdot K \left( \frac{8\bar{u}}{D} \right)^n + \eta_\infty \left( \frac{8\bar{u}}{D} \right)}{\tau_0 + K \left( \frac{8\bar{u}}{D} \right)^n + \eta_\infty \left( \frac{8\bar{u}}{D} \right)}$$

### 3. GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN ZUM VERSPRÜHUNGS- UND VERBRENNUNGS-VERHALTEN

#### 3.1. Versprühungsverhalten

Durch das Aufbringen hoher Scherraten während des Einspritzvorganges ist es möglich, relativ niedrige Viskositätswerte und somit eine weitgehende Verflüssigung im

Bereich des Injektorauslasses in bestimmten Injektor-konfigurationen zu erreichen. Dadurch wird ein Injektionsvorgang, der dem herkömmlicher Flüssigtreib-stoffe ähnelt, für bestimmte Einspritzzustände und -einstellungen möglich, wie dies in detaillierten vorher-gehenden Untersuchungen gezeigt wurde (siehe zum Beispiel die Ref. [ 5, 6, 15-18 ]). Allerdings ist dieser Prozess schwieriger als im Falle der üblichen unvergellten Newtonschen Brenn- und Treibstoffe durchzuführen.

So zeigte sich, dass Prallinjektoren zufriedenstellende Versprühungseigenschaften bei vergleichsweise moderatem Förderdruck aufweisen. Diese Injektorart wird auch wegen ihrer Einfachheit und ihrer guten Versprühungs- und Mischeigenschaften [ 19 ] häufig in Raketenmotoren genutzt, die mit lagerfähigen flüssigen Newtonschen Treibstoffen betrieben werden. In Bild 5 ist ein einge-setzter experimenteller Aufbau für die Versprühungs-untersuchungen skizziert. Die Gelversorgung besteht aus einer Kartusche, die den vergellten Brennstoff enthält, einer hydraulischen Antriebseinheit und einer austausch-baren Injektoreinheit. Das Gel wird mit Hilfe eines in der Kartusche befindlichen Kolbens durch Schläuche zum Injektor gefördert. Für die Visualisierung der Versprühungsvorgänge aus zwei senkrecht zueinander stehen-den Blickrichtungen werden Schattenaufnahmen mittels Xenon-Funkenblitze erzeugt. Zur Ermittlung von Tropfen-größenverteilungen wird ein Malvern Spraytec eingesetzt. Nähere Informationen sind zum Beispiel in Ref. [ 20 ] gegeben.

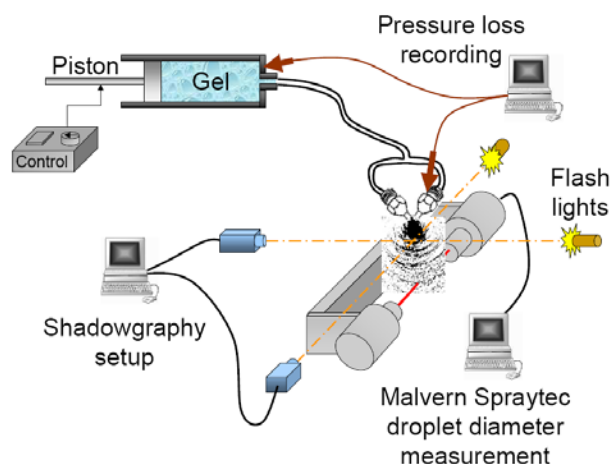
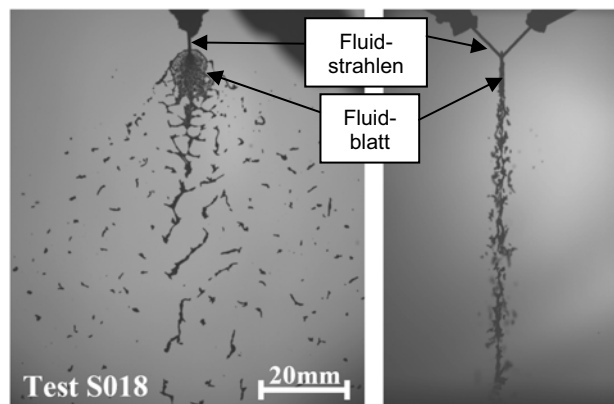


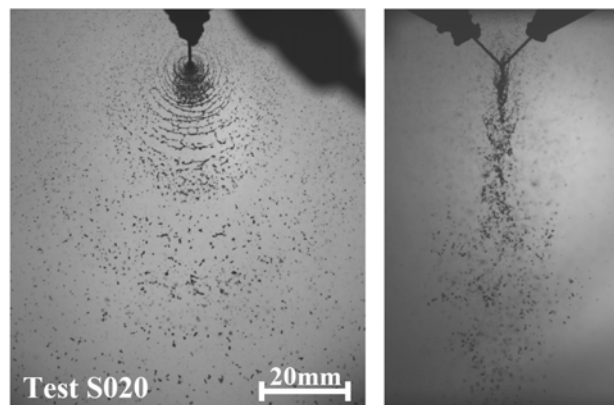
BILD 5. Skizze des erweiterten experimentellen Aufbaus für Versprühungsuntersuchungen

Bei dem untersuchten Prallinjektor in Doublet-Ausführung werden zwei gleiche Fluidstrahlen gegeneinander ge-schossen. Am Schnittpunkt beider Strahlen entsteht ein dünnes Fluidblatt (auch Lamelle genannt), das senkrecht zur Ebene, in der die beiden Gelstrahlen liegen, steht und das im weiteren Verlauf zerfällt. Dieses Verhalten ist auf den Schattenaufnahmen in Bild 6 erkennbar, die aus zwei senkrecht zueinander stehenden Blickwinkeln aufgenom-men wurden. Dieses Fluidblatt zerfällt in Abhängigkeit ver-schiedener Parameter wie Strahlgeschwindigkeit, Auf-prallwinkel, Fluideigenschaften, usw. auf unterschiedliche Art.

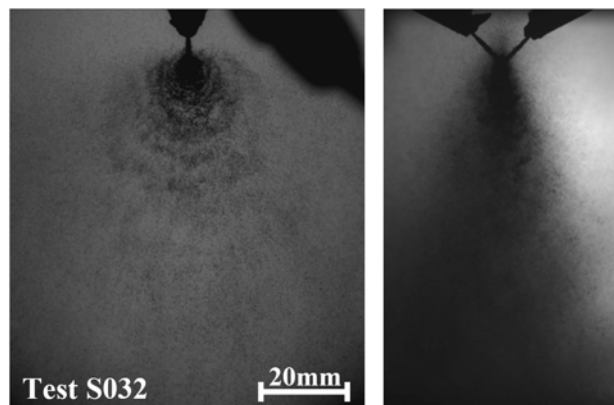
Alle hier präsentierten Experimente in den Bildern 6 und 7 wurden unter Umgebungsdruck und -temperatur mit einem Prallwinkel von  $90^\circ$  und gleichem Injektoraustritts-durchmesser von  $d=0,7$  mm durchgeführt. Lediglich von Tiedt (siehe Ref. [ 17 ]) wurde ein Durchmesser von  $0,5$  mm verwendet.



a)  $\bar{u} = 3,9$  m/s,  $Re_{gen\ HBE} = 195$   
(Strahlenförmige Strukturen)



b)  $\bar{u} = 9,1$  m/s,  $Re_{gen\ HBE} = 695$   
(Ligament-Strukturen)



c)  $\bar{u} = 58,5$  m/s,  $Re_{gen\ HBE} = 7770$   
(Voll entwickeltes Muster)

BILD 6. Schattenaufnahmen eines JetA-1/ThixatrolST-Gels mit 30 Gew.-% Aluminiumpartikelzusatz. (Ref. [ 21 ])

Bild 6 zeigt typische Schattenaufnahmen eines JetA-1/ThixatrolST-Gels, dem 30 Gew.-% Aluminiumpartikel mit einem mittleren Durchmesser  $D_{3,2} = 85 \mu\text{m}$  zugesetzt wurden. Metallisierte Gele, insbesondere solche mit Aluminium- oder Borpartikeln, sind interessant, da ihr volumenspezifischer Heizwert deutlich über dem der kohlenwasserstoffbasierenden Basisfluide liegt. Deutlich ist erkennbar, dass unterschiedliche Zerfallsmuster des Fluidblattes in Abhängigkeit der Strahlaustrittsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  und der mittels der HBE-Gleichung berechneten generalisierten Reynoldszahl  $Re_{gen\ HBE}$  auftreten.

Bei niedrigen  $Re_{gen}$  (Bild 6a) tritt eine strahlenförmige Struktur, mit ihrem Ursprung nahe dem Kollisionspunkt der Gelstrahlen, auf der Oberfläche des Blattes bzw. der Lamelle auf. Dieses Blatt zerfällt nach außen gehend zuerst in eine netzartige Struktur, die weiter stromab in kleinere Ligamente und in größere Tröpfchen weiter zerfällt. Dieses Muster wurde erstmals bei Gelen beobachtet [17] und konnte mittlerweile auch bei hochviskosen Newtonschen Fluiden gezeigt werden [22].

Bei mittleren  $Re_{gen}$  (Bild 6b) treten kreisförmige wellenähnliche Strukturen auf der Oberfläche des Gelblattes bzw. der Lamelle auf und große bogenförmige Ligamente werden in regelmäßigen Abständen vom Rand abgetrennt. Diese Ligamente zerfallen stromabwärts in kleinere Ligamente und hiernach in Tröpfchen. Des Weiteren wird erkennbar, dass auch außerhalb der Fluidblattebene Tröpfchen aufzufinden sind.

Bei sehr hohen  $Re_{gen}$  (Bild 6c) 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, wobei sie sich in einem deutlich größeren Winkelbereich senkrecht zur Blattebene bewegen als bei niederen Geschwindigkeiten.

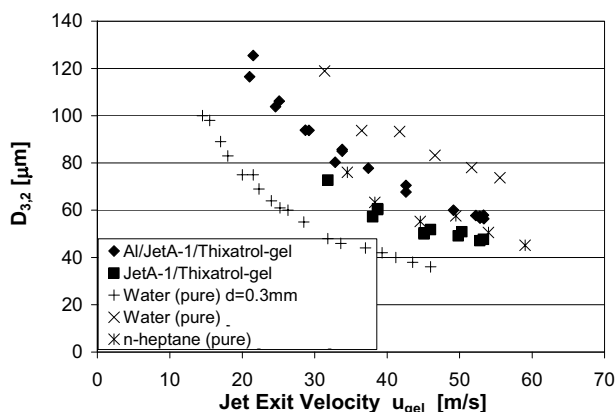


BILD 7. Mittlerer Tropfendurchmesser  $D_{3,2}$  über der Strahlaustrittsgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , für verschiedene reine Stoffe und Gele (Ref. [17]).

Für einen effektiven Verbrennungsprozess in Brennkammern ist eine Treibstoffaufbereitung mittels Injektoren wichtig, die möglichst kleine Tropfen und damit eine möglichst große gemeinsame Oberfläche für den Oxidatorzugang ermöglicht. Das Diagramm in Bild 7 zeigt die mittleren Tropfengrößen als Sauter-Durchmesser  $D_{3,2}$  für 2

Gele sowie Wasser und n-Heptan als Newtonsche Fluide. Alle Fluide zeigen abnehmende  $D_{3,2}$  mit zunehmender Strahlaustrittsgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , wobei die Kurvenverläufe zu höheren Geschwindigkeiten hin abflachen.

Der quantitative Vergleich zeigt, dass bei Gelen ähnliche Tropfengrößen wie bei Newtonschen Fluiden erreicht werden können. Für weitergehende Informationen sei als Beispiel auf die Veröffentlichungen [17, 21] sowie auf die Übersicht hinsichtlich der Forschung zur Prallinjektor-Zerstäubung Newtonscher Fluide bis 1995 in der Veröffentlichung von Santoro, Anderson et al. [23] hingewiesen.

### 3.2. Verbrennungsverhalten von Brennstoffgelen in Luft

Zur Entwicklung einer effektiven Brennkammerprozessführung spielen neben der Treibstoffaufbereitung auch andere Vorgänge wie z.B. Verdampfungsverhalten, heterogene Verbrennungsprozesse, slurryspezifische Prozesse, konvektiver Wärmeaustausch, Strahlungsaustausch, etc. eine wichtige Rolle. So ist zum Beispiel die Verdampfungsrate von Gelen im Vergleich mit denen der flüssigen unvergerten Brennstoffe niedriger. Bei Treibstoffschlämmen (slurries) erschweren Schalenbildungsvorgänge beim Abbrand eine schnelle Umsetzung, siehe zum Beispiel Ref. [24, 25]. Des Weiteren wurden beim Abbrand einzelner ungescherter Geltropfen schwammartige Strukturen beobachtet, die ebenfalls den Verbrennungsprozess beeinflussen [26]. Dies bedingte, dass das Verbrennungsverhalten eines Gelsprays detailliert zu untersuchen und zu optimieren war, bevor die eigentlichen Brennkammerarbeiten beginnen konnten.

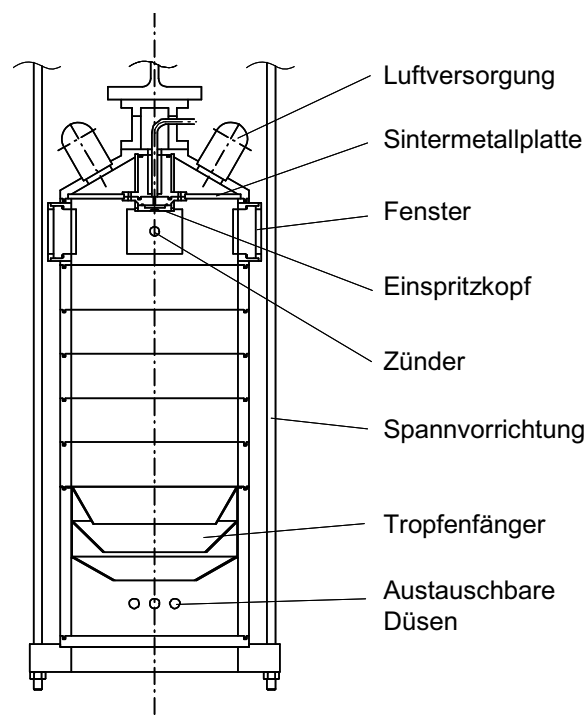


BILD 8. Skizze des experimentellen Aufbaus für Verbrennungsuntersuchungen in Luft mit einem einzelnen Injektor

Somit wurde als erster Schritt ein grundlegendes Experiment zur Untersuchung des Verbrennungsprozesses bei einem einzelnen Injektor aufgebaut, das einen optischen Zugang zum Verbrennungsprozess für diagnostische Verfahren besitzt. Die Skizze in Bild 8 zeigt die Skizze der Druckkammer, in der unter ramjetrelevanten Randbedingungen bezüglich Brennkammerdruck und Lufteintrittstemperatur Verbrennungsuntersuchungen zur Verbrennung von Brennstoffgele in Luft durchgeführt werden können. Nähere Informationen sind zum Beispiel in Ref. [ 21 ] gegeben.



BILD 9. Brennversuch mit einem gelförmigen Brennstoff

Bei diesen Untersuchungen wurden metallisierte und nichtmetallisierte Gele eingesetzt. Bild 9 zeigt ein brennendes Gelspray. Im Diagramm in Bild 10 sind als Beispiel mittlere Wirkungsgrade  $\bar{\varepsilon}$  des Verbrennungsprozesses aluminiumpartikelhaltiger Gele in Abhängigkeit des Aluminium-Massenbruchs aufgetragen. Hierbei ist erkennbar, dass zum einen mit zunehmendem Kammerdruck höhere Wirkungsgrade auftreten. Zum anderen zeigt sich beim niederen Kammerdruck ein Maximum des Verbrennungswirkungsgrades bei ca. 30 Gew.-%, welches bei höherem Druck nicht ausgeprägt ist.

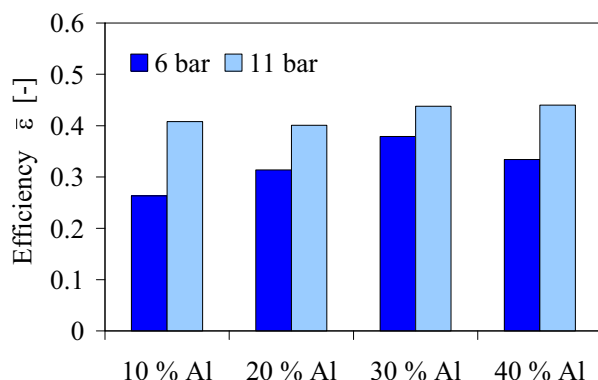


BILD 10. Mittlerer Wirkungsgrad  $\bar{\varepsilon}$  von Gelen mit unterschiedlichen Aluminiumpartikelanteilen bei 2 Brennkammerdruckniveaus [ 21 ]

#### 4. BRENNKAMMERPROZESSENTWICKLUNG

Für die Entwicklung und Demonstration der Verbrennungsprozessführung unter antriebsrelevanten Randbedingungen wurde ein Experimentalaufbau, genannt „Technologiedemonstrator-Brennkammerprozess“ (TD-B), mit zwei verschiedenen Modellbrennkammern entwickelt und aufgebaut. Die Basiskammer dieses Experiments, die in Bild 11 zu sehen ist, ist eine leicht modifizier- und zerlegbare Brennkammer, die überwiegend für Arbeiten im Bereich Handhabung, Förderung und Zündung genutzt wird.

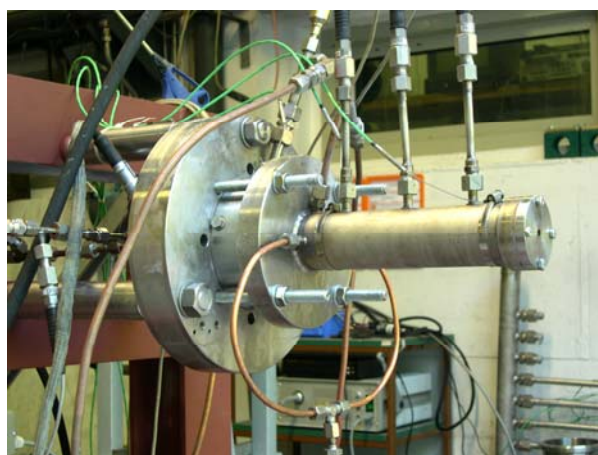


BILD 11. Zündkammeraufbau des Technologiedemonstrator-Brennkammerprozess (TD-B)

Des Weiteren wurde eine modulare Brennkammer für den TD-B geschaffen, die für weitergehende Untersuchungen eingesetzt wird. Dieser Versuchsaufbau erlaubt unter Anderem die Ermittlung lokaler Wärmeströme zur Brennkammerwand und durch seine Modularität Optimierungsarbeiten zur Brennkammerprozessführung und zur Brennkammergeometrie.

Zur Vorbereitung der TD-B-Versuche wurden verschiedene Gele, die für den Raketenbrennkammerprozess als aussichtsreich einzustufen sind, in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie entwickelt. Diese Entwicklungsarbeiten beinhalteten im ersten Schritt gemäß der im vorherigen Kapitel aufgezeigten Vorgehensweise auch Versprühungsuntersuchungen mit dem atmosphärischen Aufbau und Verbrennungsuntersuchungen in der Druckkammer. Hierauf aufbauend wurden Untersuchungen am Technologiedemonstrator-Brennkammerprozess (TD-B) durchgeführt.

Das Diagramm in Bild 12 zeigt als Beispiel zeitliche Druck- und Schubverläufe eines Experimentes, bei dem der in die Brennkammer geförderte Gelmassenstrom und damit auch der Schub mehrfach um etwa den Faktor Zwei geändert wurden. Die Ergebnisse belegen zum einen, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen ein stabiler Verbrennungsprozess durchgeführt werden kann und dass keine Brennkammerinstabilitäten auftreten. Zum Anderen ist aus Bild 12 ersichtlich, dass die Änderungen im Schubverlauf dichtauf den Änderungen des Druckverlaufs und des Massenstroms folgen. Somit wurde gezeigt, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen



eine auf den momentanen Bedarf ausgerichtete zeitlich und größenmäßig frei wählbare Schubvariation mit Geltreibstoffen realisiert werden kann. Dies bedeutet, dass für Gelantriebe in Deutschland im Jahr 2005 der Technologiereifegrad TRL3 (technology readiness level) erreicht wurde, der besagt, dass kritische Funktionalitäten experimentell und analytisch nachgewiesen wurden.

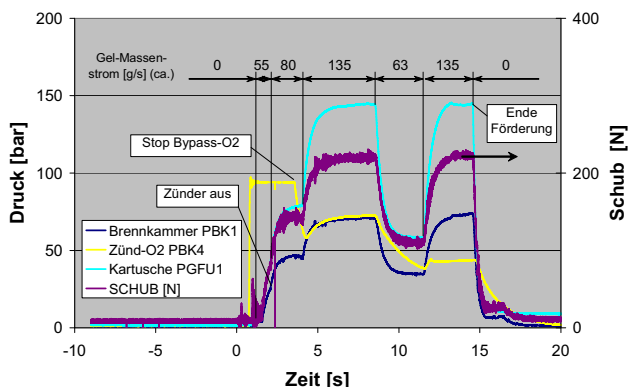


BILD 12. Verläufe von Brennkammerdruck (PBK1) und Schub bei einem Versuch mit Variation des Gelmassenstroms um den Faktor 2

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Für die Entwicklung der Brennkammerprozessführung mit gelförmigen Treibstoffen wurden seit dem Jahr 1999 umfangreiche Forschungs- und Technologieentwicklungsarbeiten im DLR-Institut für Raumfahrtantriebe eigenständig aber auch in enger Zusammenarbeit mit den Partnern im Deutschen Nationalen Gel-Technologieprogramm durchgeführt.

Die untersuchten Gele zeigen in Bezug auf ihre rheologischen Eigenschaften in weiten Bereichen ein scherverdünnes nicht-Newtonsches Verhalten. Ihr Scherviskositätsverlauf kann mittels der Erweiterten Herschel-Bulkley-Gleichung (HBE-Gleichung) im antriebsrelevanten Scherratenbereich zufriedenstellend dargestellt werden. Die detaillierten grundlagennahen Untersuchungen der Fließ-, Versprühungs- und Verbrennungseigenschaften von gelförmigen Treibstoffen zeigen, dass diese Eigenschaften zum einen sich in wesentlichen Punkten von denen üblicherweise eingesetzter flüssiger Treibstoffe mit Newtonschen Eigenschaften unterscheiden. Dennoch lassen sich geeignete Gele fördern und bei entsprechender Behandlung in Injektoren mit ausreichender Ähnlichkeit zu flüssigen Treibstoffen versprühen und verbrennen, wie die durchgeführten Untersuchungen zeigen. Zum anderen sind Fließ-, Versprühungs- und Verbrennungsvorgänge wesentlich stärker miteinander vernetzt als bei Newtonschen Fluiden. Zum Beispiel lassen sich ohne eine detaillierte Kenntnis der Viskositätseigenschaften Ergebnisse von Strömungs- und Versprühungsuntersuchungen nur bedingt klassifizieren und skalieren. Unter Anderem trägt die hergeleitete generalisierte Reynoldszahl hier erheblich zur Klärung bei.

Aufbauend auf diesen grundlagennahen Untersuchungen

konnten wesentliche Grundlagen der Brennkammerprozessführung mit gelförmigen Treibstoffen erarbeitet und kritische Funktionalitäten nachgewiesen werden. Die in dieser Veröffentlichung präsentierten Arbeiten liefern wichtige Ergebnisse, die für die Triebwerksentwicklung im Rahmen des Deutschen Nationalen Gel-Technologieprogramms für die Entwicklung eines Gel-Triebwerks genutzt werden, siehe zum Beispiel Ref. [ 9 ].

Um das Potential, das Gelantriebe bieten, erfolgreich zu nutzen, sind weiterhin detaillierte Arbeiten zur Verbesserung der Brennkammerprozessführung notwendig. Die Komplexität dieser Arbeiten erfordert aufgrund der nicht-Newtonschen Eigenschaften gelförmiger Treibstoffe somit nicht nur Arbeiten am Technologiedemonstrator-Brennkammerprozess sondern auch weiterhin detaillierte grundlagenorientierte Untersuchungen experimenteller und analytischer Art um zu einem tieferen Verständnis der ablaufenden Vorgänge bei Förderung, Versprühung und Verbrennung zu kommen.

## 6. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die im Rahmen der Grundfinanzierung gewährte Unterstützung dieser Arbeiten durch das Bundesministerium für Verteidigung und das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung. Des Weiteren sei den Kollegen des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie für die Herstellung der Gele für die Technologiedemonstratorarbeiten gedankt.

## 7. NOMENKLATUR

$D$	Rohrdurchmesser, [m]
$D_{3,2}$	Sauter-Durchmesser, [m]
$d$	Düsenaustrittsdurchmesser, [m]
$K$	prä-exponentieller Faktor, [Pa·s <sup>n</sup> ]
$m$	lokaler PL-Exponent, [ - ]
$n$	exponentieller Faktor, [ - ]
$Re$	Reynolds-Zahl, [ - ]
$r$	Radialkoordinate, [m]
$u$	Geschwindigkeit, [m/s]
$\bar{u}$	mittlere Geschwindigkeit [m/s]
$\gamma$	Scherdeformation, [ - ]
$\dot{\gamma}$	Scherrate, [s <sup>-1</sup> ]
$\bar{\epsilon}$	mittlerer Wirkungsgrad, [ - ]
$\rho$	Dichte, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	dynamische Scherviskosität, [Pa·s]
$\eta_{\infty}$	Scherviskosität im oberen Newtonschen Plateau, [Pa·s]
$\tau$	Scherspannung, [Pa]
$\tau_0$	Fließgrenze, [Pa]
B	Bingham
gen	generalisiert
HB	Herschel-Bulkley
HBE	Herschel-Bulkley-Extended
PL	Power-Law

## 8. LITERATUR

- [1] Ciezki H.K., Hürttlen J., Madlener K., Naumann K.W., Radloff R., Stierle R. und Weiser V. Das Deutsche Nationale Gel-Technologieprogramm. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2008*, Darmstadt, September 2008.
- [2] Rapp D.C. and Zurawski R.L. Characterization of aluminum/RP-1 gel propellant properties. AIAA-88-2821, July 1988.
- [3] Schindler R.C., Olson A.M. and Arnold C.J. A Gelled Propellant Sustainer Stage. AIAA paper 92-1122, 1992.
- [4] Hodge K., Crofoot T. and Nelson S. Gelled propellants for tactical missile applications. *39<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference*, Los Angeles, CA, USA, AIAA-99-2976, 1999.
- [5] Natan B. and Rahimi S. The status of gel propellants in year 2000. in: *Combustion of Energetic Materials*, pp 172-194 (Eds.: K.K. Kuo and L.T. DeLuca), Begell House, USA, 2002.
- [6] Ciezki H.K. and Natan B. An overview of investigations on gel fuels for ramjet applications, *ISABE2005*, 17<sup>th</sup> Int. Symposium on Airbreathing Engines, München, September 2005.
- [7] 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.
- [8] Bohn M.A., Hürttlen J., Menke K., Roth E. und Weiser V. Entwicklung und Charakterisierung umweltfreundlicher Geltreibstoffe für schubgeregelte Raketenantriebe. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2008*, Darmstadt.
- [9] Stierle R., Ramsel J., Schmid K. und Naumann K.W. Das Gel-Triebwerk der Bayern-Chemie. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2008*, Darmstadt.
- [10] von Kampen J., Ciezki H.K., Bartels N., Hürttlen J., Förter-Barth U., Menke K., Dornick G. First Experimental Results on the Spray Behavior of Nitromethane Gels. *Proceedings of 37<sup>th</sup> Int. Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, Germany, June 2006, pp. 156-1 - 156-10.
- [11] Desyatkov A., Madlener K., Ciezki H.K. and Benveniste Natan. Experimental Investigation of Gelled Fuel with High Vapor Pressure Species and Metal Additives. *44<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference*, Hartford, USA, AIAA-2008-4873, July 2008.
- [12] Madlener K., Frey B. and Ciezki H.K. Generalized Reynolds Number for Non-Newtonian Fluids. *EUCASS2007*, paper no. 5.11.07, Brussels, Belgium, July 2007.
- [13] Madlener K. and Ciezki H.K. Theoretical Investigation of the flow Behavior of Gelled Fuels of the Extended Herschel-Bulkley Type. *EUCASS2005*, Moscow, Russia, July 2005.
- [14] Böhme G. *Strömungsmechanik nichtnewtonscher Fluide*. Teubner Verlag, 2. Auflage, 2000.
- [15] 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. 9<sup>th</sup> Int. Workshop on Combustion and Propulsion (9-IWCP)*, Lercici, Italy, pp. 39-1 – 39-13, September 2003.
- [16] 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. *38<sup>th</sup> AIAA Joint Propulsion Conference*, Indianapolis, IN, USA, AIAA-2002-3601, July 2002.
- [17] Bartels N., von Kampen J., Ciezki H.K. and Zanetti N. Investigation of the Spray Characteristics of an Aluminized Gel Fuel with an Impinging Jet Injector. *Proceedings of 35<sup>th</sup> Int. Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, Germany, 2004, pp. 17-1 – 17-14.
- [18] von Kampen J., Alberio F. and Ciezki H.K. Spray and combustion characteristics of aluminized gelled fuels with an impinging jet injector. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 11, 2007, pp. 77–83
- [19] Sutton G.P. *Rocket propulsion elements: an introduction to the engineering of rockets*. John Wiley, New York, USA, 1992, pp. 298-311.
- [20] Madlener K., Moser H.A. and Ciezki H.K. Influence of the Injector Inlet Angle on the Flow and Spray Behavior of Shear Thinning Fluids in Impinging Jet Injectors. *Energetic Materials, 38th Int. Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, Germany, June 2007, pp. 5-1 - 5-12.
- [21] Madlener K., Sinatra C. and Ciezki H.K. Investigation on the Influence of Particle Size and Concentration on the Spray and Combustion Characteristics of Aluminium Particle Containing Gels with an Impinging Jet Injector. *EUCASS2007*, paper no. 5.11.01, Brussels, Belgium, July 2007.
- [22] 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.
- [23] Anderson W.E., Ryan H.M. and Santoro R.J. Impinging jet injector atomization. in: V. Yang, W.E. Anderson (Eds.), *Liquid Rocket Engine Instability*, in: Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, 1995, pp. 215–246.
- [24] Lee A. and Law C.K., Gasification and Shell Characteristics in Slurry Droplet Burning. *Combustion and Flame*, Vol. 85, 1991, pp. 77-93.
- [25] Mueller D.C. and Turns S.R. Some aspects of secondary atomization of aluminum/hydrocarbon slurry propellants. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 3, 1993, pp. 345-352.
- [26] Solomon Y. and Natan B. Experimental Investigation of the Combustion of Organic-Gellant-Based Gel Fuel Droplets. *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, No. 6, June 2006, pp. 1185-1199.