

# DSMC-Simulation eines Kaltgas Lichtbogentriebwerks

hbi00026: DSMC-Simulation einer verdünnten Edelgasströmung innerhalb eines Kaltgas-Arcjets

T. Frieler, PD Dr.-Ing. R. Groll, ZARM - Center of Applied Space Technology and Microgravity

## Kurzgefasst

- Numerische Kaltgas-Simulationen eines Lichtbogentriebwerks mittels DSMC-Methoden.
- Modifikation des DSMC-Solvers *dsmcFOAM* zur Beschleunigung der Rechnung.
- Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen.

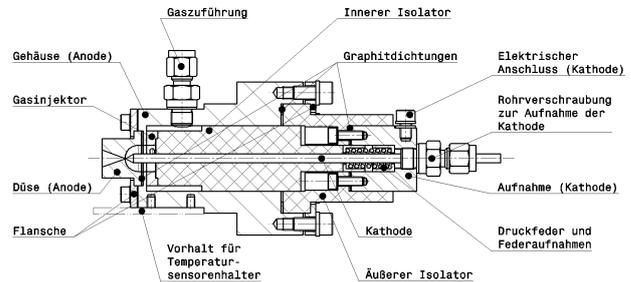


Abbildung 1: Querschnittsdarstellung des INGA IV Lichtbogentriebwerks.

Elektrische Raumfahrtantriebe sind heutzutage bereits in einer Vielzahl von Weltraummissionen erfolgreich im Einsatz und werden beispielsweise zur Bahn- und Lageregelung auf geostationären Kommunikationssatelliten oder für interplanetare Langzeitmission genutzt. Ein in den letzten Jahren wieder gestiegenes Interesse an elektrothermischen Triebwerken niedriger Leistungsklassen mit hohem spezifischem Impuls machen diese hierbei zum interessanten Forschungs- und Entwicklungsobjekt. Für die Entwicklung neuer Triebwerke sind unter anderem Leistungsmerkmale, wie Antriebsleistung (spezifischer Impuls), Treibstoffverbrauch (Treibstoffeffizienz) und Regelverhalten (Schubcharakteristik) von großer Bedeutung.

Um eine Aussage über Treibstoffeffizienz und die Schubcharakteristik eines Triebwerks machen zu können, ist es sinnvoll den Schub  $F_s$  bestimmen zu können. Im Rahmen des Forschungsprojektes MOLETHRUSTBALANCE soll einerseits ein Versuchstand zur Messung und Untersuchung des Schubs von elektrischen Triebwerken niedriger Leistungsklassen entwickelt und aufgebaut werden [2], sowie andererseits numerische Kaltgas-Simulationen mittels DSMC-Methoden durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus den Simulationen und den durchgeführten Versuchen sollen anschließend verglichen werden, um so Erkenntnisse für die weitere Optimierung des Triebwerks sammeln zu können.

Das in dem Projekt MOLETHRUSTBALANCE untersuchte Triebwerk ist das am ZARM neu entworfene Lichtbogentriebwerk INGA IV. Ein Querschnitt des Triebwerks mit Bezeichnungen für alle wichtigen Komponenten ist in Abbildung 1 dargestellt (Weitere Informationen zum Triebwerk unter [1]). Abbildung 2 zeigt die für die numerischen Berechnungen relevante, abgeleitete Geometrie.

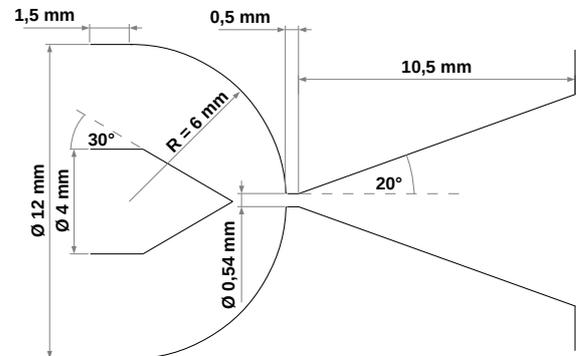
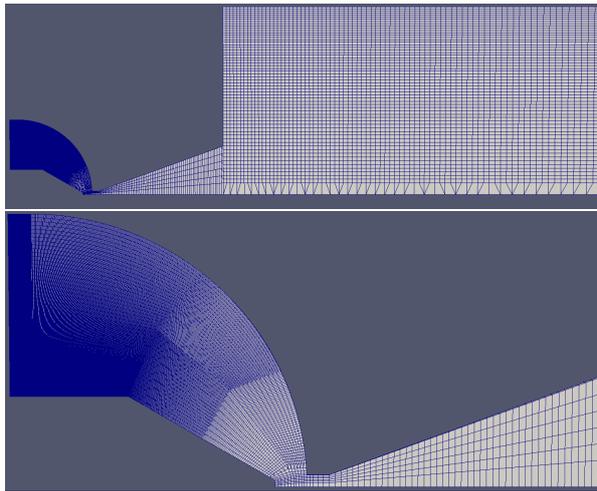


Abbildung 2: Schematische Darstellung der relevanten Geometrie des INGA IV Lichtbogentriebwerks.

Für die in dem Projekt MOLETHRUSTBALANCE durchgeführten Berechnungen wurde aufgrund der in dem Lichtbogentriebwerk INGA IV auftretenden, stark verdünnten Edelgasströmungen eine modifizierte Variante [3] des DSMC-Solvers *dsmcFoam* im freien Softwarepaket OpenFOAM ausgewählt. Die Modifikationen umfassen die Implementierung eines neuen Inflowmodells *ZARMInOutflow*, welches beispielsweise dem Nutzer ermöglicht genau definierte Massen- oder Volumenströme über die Volumenränder am Inlet vorzugeben. Eine weitere Modifikation stellt die Implementierung eines *Collision-limiters* dar, welcher die Zahl der möglichen Kollisionen der Testpartikel pro Zelle und pro Zeitschritt begrenzt. Für die Berechnungen wurde ein voll parametrisiertes, strukturiertes Gitter erstellt, von dem eine Variante in Abbildung 3 dargestellt ist. Das Wedge-Gitter besitzt einen Öffnungswinkel von  $2,5^\circ$  in Umfangsrichtung. Das Gitter wurde in verschiedenen Bereichen mehrstufig verfeinert, um eine Ausgewogenere Verteilung der Testpartikel pro Zelle im Stationären

Zustand zu erreichen und so die Effizienz der Rechnung zu erhöhen. Hierbei sind zwei Faktoren für die Stufe der Verfeinerung ausschlaggebend: Das reaktive Zellvolumen (Im Verhältnis zu den übrigen Zellvolumina) und der Druckgradient, welcher sich beginnend am Düseninlass bis zum Diffusorende über das simulierte Volumen einstellt. Aufgrund der hohen Testpartikelanzahlen in dem Brennkammerbereich ist eine weitere Gitterverfeinerung sinnvoll.

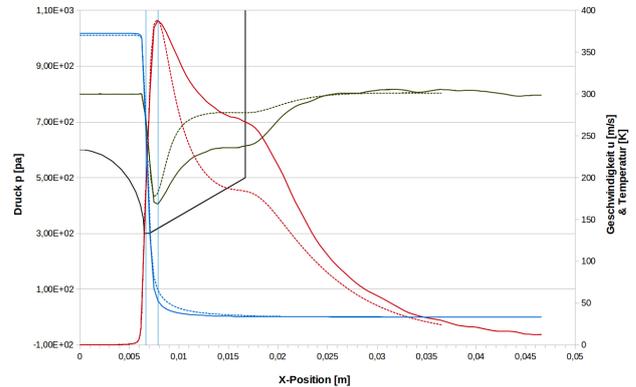


**Abbildung 3:** Oben: Gesamtansicht des Wedge-Gitters mit 2-stufiger Gitterverfeinerung im Brennkammerbereich und 1-stufiger Verfeinerung im Outletbereich. Unten: Detailansicht der 2-stufigen Gitterverfeinerung im Brennkammerbereich

Um die molekulare Charakteristik der simulierten Strömung zu verdeutlichen wurden die numerischen Ergebnisse der DSMC-Methode mit einer kontinuierlichen Finite-Volumen-Methode (FVM) verglichen. Als Solver für die kontinuierliche Simulation der kompressiblen Navier-Stokes Solver *rhoCentralFoam* verwendet, welcher ebenfalls in OpenFOAM zur Verfügung steht.

Die Verläufe des Drucks  $p$ , der Temperatur  $T$  und der Geschwindigkeit  $U$  über die Düsengeometrie sind in Abbildung 4 für die beiden Methoden dargestellt. Um einen besseren Vergleich der molekülbasierenden DSMC-Methode mit der kontinuierlichen Finite Volumen Methode zu ermöglichen sind in der Abbildung noch zwei blaue Linien eingezeichnet, welche aus dem Knudsen-Zahl Feld der DSMC-Rechnung ermittelt wurden. Die linke Linie stellt mit einer Knudsen-Zahl von 0,02 den Übergangsbereich von der Kontinuumsströmung zur Gleitströmung dar, während die rechte Linie bei einer Knudsen-Zahl von 0,1 den Übergangsbereich zur nahezu freien Molekülströmung darstellt. Gut zu erkennen ist, dass im Anfangsbereich der Brennkammer die Größen Druck, Temperatur und Geschwindigkeit der DSMC- und der FVM-Methode nahezu identisch sind. Mit Erreichen

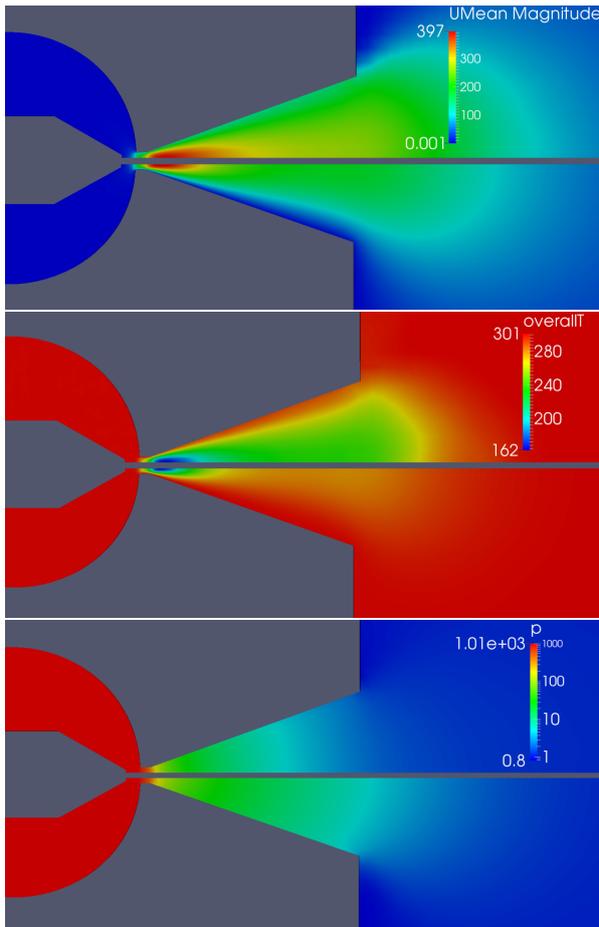
des Übergangsbereichs bei einer Knudsen-Zahl von 0,02 beginnen sich die Verläufe der Kurven für  $p$ ,  $T$  und  $U$  zu unterscheiden.



**Abbildung 4:** Verläufe für Druck  $p$  (blaue Kurven), Temperatur  $T$  (grüne Kurven) und Geschwindigkeit  $U$  über die Düsengeometrie für die DSMC-Methode (kontinuierliche Linien) und die FVM-Methode (gestrichelte Linien).

Die unterschiedlichen Verläufe der Kurven sind nochmals in Abbildung 5 anhand der Felder für  $p$ ,  $T$  und  $U$  verdeutlicht. Gut zu erkennen ist, dass bei der DSMC-Methode die Geschwindigkeit an der Wand des Diffusors nicht null ist und gleichzeitig die Geschwindigkeiten zur Mittelachse hin größer sind, als bei der FV-Methode (oben). Der Unterschied der Temperaturverläufe ist nochmals in Abbildung 5 (mitte) verdeutlicht. Insgesamt kommt es durch die höheren Geschwindigkeiten an der Wand zu einer Erhöhung des Geschwindigkeitsprofils in axialer Richtung. Der Temperaturunterschied lässt sich aus der Zerlegung der Molekülgeschwindigkeit in Strömungs- und Eigengeschwindigkeit herleiten. Da die Strömungsgeschwindigkeit der DSMC-Methode höhere Werte erreicht muss gleichzeitig die Eigengeschwindigkeit und somit Temperatur sinken. Weiterhin sind in Abbildung 5 (unten) die unterschiedlichen Druckverläufe verdeutlicht, wobei zur besseren Sichtbarkeit die Abbildung 5 logarithmisch skaliert sind.

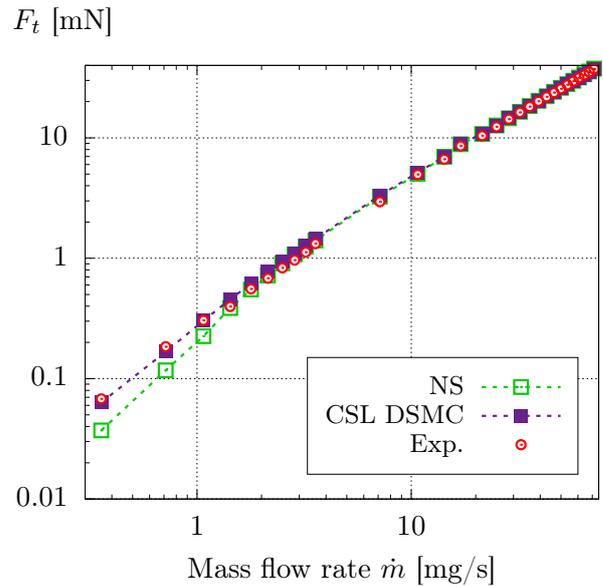
In dem Forschungsprojekt MOLETHRUSTBALANCE sollen aus numerischen Simulationen des Schubs, sowie experimentellen Schubmessungen Erkenntnisse für die Optimierung des INGA IV Triebwerks gesammelt werden. Hierfür sollen sowohl im experimentellen Aufbau, sowie bei den numerischen Berechnungen eine Reihe von Parametern innerhalb einer Parameterstudie variiert und deren Einfluss ausgewertet werden. Im letzten Antragszeitraum wurde eine Parameterstudie für 30 unterschiedliche Argon Massenströme unter Verwendung zweier numerischer Methoden durchgeführt. In der Studie wurden die numerischen Ergebnisse untereinander, als auch



**Abbildung 5:** Oben: Geschwindigkeitsfelder der Rechnung, Ergebnisse des DSMC-Solvers über denen der FVM-Methode. Mitte: Temperaturfelder der Rechnung, Ergebnisse des DSMC-Solvers über denen der FVM-Methode. Unten: Druckfelder der Rechnung, Ergebnisse des DSMC-Solvers über denen der FVM-Methode.

mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Strömungsmechanische Effekte von verdünnten Gasströmungen, wie auch der Einfluss des verwendeten collision limiters auf makroskopische Messgrößen die den Brennkammerdruck innerhalb des Triebwerks wurden untersucht und quantifiziert. Der Einfluss unterschiedlicher Wandreibungskoeffizienten wurde im Hinblick auf die Optimierung der numerischen Ergebnisse für verschiedene Massenströme untersucht. Die Antriebsperformance des Triebwerks wurde numerisch und experimentell über die Schubkraft für den Massenstrombereich bestimmt, wobei auch Unterschiede in den Ergebnissen der beiden numerischen Methoden aufgezeigt wurden. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse der Studie für die Schubkraft sind in Abbildung 6 dargestellt. Der Einfluss der Diffusorlänge auf die Schubkraftwerte in Abhängigkeit des Massenstroms wurde ebenfalls untersucht. Letztendlich wurde das Modifizierte In-

flowmodell noch an einer bekannten experimentellen Studie von Rothe validiert.



**Abbildung 6:** Experimentelle und numerische Daten für die Schubkraft  $F_t$ .

## WWW

<https://www.zarm.uni-bremen.de/>

## Weitere Informationen

- [1] <https://www.zarm.uni-bremen.de/research/space-science/thermofluid-dynamics/projects/inga-iv.html#c5866>
- [2] <https://www.zarm.uni-bremen.de/research/space-science/thermofluid-dynamics/projects/thrustbalance.html#c5864>
- [3] <https://www.zarm.uni-bremen.de/research/space-science/thermofluid-dynamics/tools/zarm-dsmc-foam.html#c6474>

## Förderung

Land Bremen