

DESIGNOPTIMIERUNG DES TRIEBWERKS SIMP-LEX FÜR DIE MONDMISSION BW1

T. Schönherr, Universität Tokyo, Kashiwa-no-ha 5-1-5, 277-8561 Kashiwa, Japan

A. Nawaz, NASA Ames RC, Moffett Field, CA 94035, USA

G. Herdrich, Universität Stuttgart – IRS, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Das gepulste magnetoplasmadynamische Triebwerk SIMP-LEX wird für den Einsatz als Hauptantriebssystem auf der vom Institut für Raumfahrtsysteme (IRS) der Universität Stuttgart geplanten Mondmission Lunar Mission BW1 entwickelt. Eine Optimierung der Leistungsdaten ist dabei notwendig um den Wirkungsgrad und die mittlere Austrittsgeschwindigkeit des Triebwerks zu erhöhen, ohne die Systemmasse oder die Energieanforderungen signifikant zu steigern. Experimentelle Ergebnisse für geometrische Veränderungen der Elektroden sowie der Ladespannung werden gezeigt und die Auswertung mit Hilfe eines statistischen Ansatzes dargelegt. Des Weiteren wurde eine analytische Methode zur Berechnung des Magnetfeldes und der plasmabedingten Induktivitätsänderung sowie der resultierenden Leistungsdaten für diese Parameter erweitert und die Ergebnisse werden präsentiert. Sowohl eine Änderung des Winkels zwischen den Elektroden als auch die Formänderung dieser zeigen eine Verbesserung der Leistung, wobei ein Maximum für einen Winkel von 20° gefunden wurde.

1. EINLEITUNG

Die Satellitenmission Lunar Mission BW1 (Baden-Württemberg 1), als Teil des im Jahre 2002 am IRS initiierten Stuttgarter Kleinsatellitenprogramms, zielt darauf ab, einen ausschließlich elektrisch betriebenen Satelliten zum Mond zu schicken [1]. Auf Grund seiner Abmaße von $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ und seiner Masse von etwa 200 kg sind die Möglichkeiten für Leistungsverorgung und Treibstoffspeicherung für die Antriebssysteme begrenzt. Daher wird das gepulste instationäre magnetoplasmadynamische (MPD) Triebwerk SIMP-LEX (Stuttgart Impulsing Magnetoplasmadynamic Thruster for Lunar Exploration) als eines der Hauptantriebssysteme für Lunar Mission BW1 entwickelt, weil es sich durch seine vergleichsweise geringe Masse und durch seinen flexiblen Leistungsbedarf gegenüber chemischen oder anderen elektrischen Triebwerken auszeichnet.

Da eine optimale Leistungsfähigkeit des Triebwerks sich direkt auf die Nutzlastkapazität und damit auf die wissenschaftlichen Möglichkeiten der Mission auswirkt, wurden mehrere Geometrieänderungen und deren Einflüsse untersucht [2]. Zu diesem Zwecke wurde der Abstand der Elektroden, der Öffnungswinkel zwischen den Elektroden und die Form der Elektroden, rechteckig oder spitz zulaufend, verändert, sowie die Ladespannung variiert. Besonders Winkel und Form wurden, auch basierend auf ähnlichen Forschungen an anderen Einrichtungen [3-7], als geeignete Kandidaten für eine Leistungssteigerung in Betracht gezogen, ohne die Masseanforderungen des Triebwerks zu erhöhen. Die vorliegende Veröffentlichung stellt die Ergebnisse der sowohl experimentellen als auch analytischen Untersuchungen dar sowie deren Vergleich und Auswirkungen auf das zukünftige Triebwerksdesign (siehe auch [8]).

2. TRIEBWERK UND EXPERIMENTE

2.1. Aufbau und Funktionsweise

SIMP-LEX ist ein gepulstes, instationäres MPD-Triebwerk mit einer Größe von etwa $40 \times 25 \times 10 \text{ cm}^3$ und sein Aufbau ist in Bild 1 gezeigt.

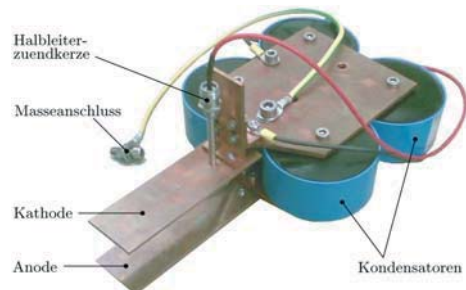


BILD 1. Aufbau von SIMP-LEX.

Vier Kondensatoren mit einer Gesamtkapazität von $35 \mu\text{F}$ sind mit einem Paar Kupferelektroden verbunden. In die Kathode ist eine Halbleiterzündkerze eingebaut, die als Zünder für das Triebwerk fungiert. Das Ingenieurmodell von SIMP-LEX ist so konzipiert worden, dass parametrische Untersuchungen durch austauschbare Elektroden mit anpassbarem Abstand möglich sind. Die Breite und die Länge der Elektroden wurden nicht verändert, und entsprechen 40 bzw. 87 mm. Als Treibstoff wird festes Polytetrafluorethylen (PTFE; TeflonTM) verwendet und zwischen die Elektroden eingebracht. Die an die Kondensatoren von außen angelegte Spannung wurde zwischen 1500 und 2000 V variiert, so dass die gespeicherte Energie 40 bis 70 J entspricht. Bild 2 zeigt ein Schema des Triebwerks in der sogenannten breech-fed-Anordnung, bei der der Treibstoff längs der Elektroden zugeführt wird. SIMP-LEX verwendet die

sogenannte side-fed-Anordnung, die sich durch eine seitliche Einfuhr des Treibstoffs auszeichnet.

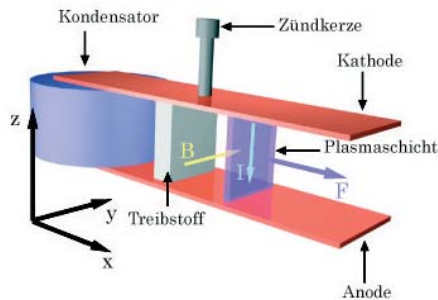


BILD 2. Schematische Darstellung eines gepulsten MPD-Triebwerks.

Sobald die Kondensatoren durch eine externe Leistungsverorgung aufgeladen sind, löst die Zündkerze eine kurzzeitige Lichtbogenentladung aus, die dazu führt, dass entlang der Oberfläche des Treibstoffs dieser teilweise ionisiert, und damit leitend wird. Dadurch wird eine Entladung des Hauptstromkreises ausgelöst, und mehr Treibstoff wird ablatiert und ionisiert, welcher eine Plasmaschicht bildet. Der gesamte Treibstoffverbrauch eines einzelnen Entladungspulses wird als Massenbit bezeichnet. Durch den Stromfluss wird ein Magnetfeld induziert, welches dann die Ladungsträger mit Hilfe der Lorentzkraft beschleunigt. Dies erzeugt letztendlich den Schub des Triebwerkes. Abhängig von den elektrischen Eigenschaften des Triebwerkes liegt die Entladungszeit bei etwa 30 μs und kann anhand der Spannungskurve bestimmt werden. Bild 3 zeigt SIMP-LEX in Betrieb, und Bild 4 eine Spannungskurve der Entladung.



BILD 3. SIMP-LEX in Betrieb.

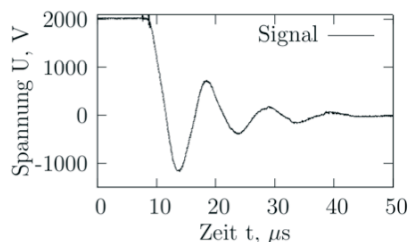


BILD 4. Spannungssignal der Entladung.

2.2. Experimentalaufbau und Messmethodik

Für die Experimente mit SIMP-LEX wurde eine Vakuumkammer verwendet, die eine Druckumgebung von minimal 4×10^{-4} mbar bereitstellt. Ausgestattet ist die Vakuumkammer mit einer Schubmesswaage [2], um den vom Triebwerk erzeugten Impuls zu messen. Da der Impuls und die Entladungszeit sehr gering sind, ergibt sich systembedingt für den gemessenen Impuls ein Fehler von maximal 11% bei einer Messauflösung von 0,1% des gemessenen Signals. Die pro Puls ablatierte Treibstoffmenge stellt einen Mittelwert des bei mindestens 200 Pulsen verbrauchten Treibstoffs pro Experiment dar. Die ablatierte Treibstoffmasse wird mit einer Waage

bestimmt, deren Auflösung 100 μg entspricht. Ein Standardfehler von 6% konnte für die Massenbestimmung ermittelt werden.

Aus dem Impuls und der ablatierten Masse kann die mittlere Austrittsgeschwindigkeit des Plasmas sowie der Schubwirkungsgrad des Triebwerks berechnet werden zu:

$$(1) \quad c_e = \frac{I_{bit}}{m_{bit}}$$

$$(2) \quad \eta_{Schub} = \frac{I_{bit}^2}{2 \cdot m_{bit} \cdot E_0}$$

, wobei I_{bit} dem Impuls, m_{bit} der ablatierten Masse, c_e der Austrittsgeschwindigkeit, η_{Schub} dem Schubwirkungsgrad und E_0 der Anfangsenergie in den Kondensatoren entspricht. Mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung ergibt sich ein Standardfehler für diese Zielgrößen von 12% bzw. 22%.

2.3. Durchgeführte Experimente

Zur Definition und Auswertung der Experimente wurde eine statistische Methode, die sogenannte Taguchi-Methode, angewandt [9]. Die wesentliche Idee besteht dabei darin, für die Bestimmung des Einflusses von verschiedenen Parametern und ihrer Wechselwirkungen auf eine Zielgröße, die Messwerte in geeigneter Form anzuordnen, und mit statistischen Hilfsmitteln auszuwerten. Durch eine geeignete Anordnung müssen nicht alle Kombinationen von Parametern untersucht werden. Dadurch wird wertvolle Experimentierzeit gespart. Dennoch birgt auch diese Methode Nachteile, die sich vor allem bei nichtlinearen Verläufen der Einflüsse und bei voneinander beeinflussten Ergebnissen zeigen. Daher ist die Wahl der Parameter und ihrer Werte entscheidend für die Qualität der Ergebnisse. Für die Untersuchungen mit SIMP-LEX wurden die in Tabelle 1 zusammengefassten Parameterwerte untersucht.

TAB 1. Untersuchte Parameter und Werte.

	Parameter	Werte
A	Öffnungswinkel α , °	0, 10, 20, 30
B	Elektrodenform	Rechteckig (R), Spitz (S)
C	Elektrodenabstand h, mm	21, 36
D	Spannung U, V	1500 (1,5 kV), 2000 (2 kV)

Für die Taguchi-Methode wird eine Matrix aufgebaut, in der jeder Parameter einer Spalte zugewiesen wird, während jede Zeile einem Experiment entspricht. Zusätzlich ergeben sich Spalten in denen gemischte Einflüsse, also Einflüsse bei gleichzeitiger Veränderung von 2 oder mehr Parametern, bestimmbar sind. So ist der Einfluss von Abstand (C) und Spannung (D) einer eigenen Spalte CD zugeordnet. Auf Grund ihrer Struktur ergibt sich für die Matrix, dass dem Öffnungswinkel 3 Spalten zugewiesen werden.

Für die Untersuchungen mit SIMP-LEX ergab sich die in Tabelle 2 dargestellte Taguchi-Matrix mit insgesamt 16 Experimenten. In die „Wert“-Spalte wird der Mess- oder Ergebniswert für die Zielgröße eingetragen, und dann entlang der Zeile kopiert, wobei graue Felder ausgelassen werden. Jede Spalte hat 2 Unterspalten, die für einen niedrigen und einen hohen Wert stehen.

TAB 2. Leere Taguchi-Matrix.

Versuchsnummer	Wert	1 A	2 A	3 B	4 C	5 A	6 AB	7 AC	8 AB	9 AC	10 BC	11 CD	12 BD	13 AD	14 AD	15 D
1				R	S	21	36									1,5 2
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
Gesamt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Werte	16	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Mittel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Effekt		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Der Mittelwert wird dann für jede Unterspalte berechnet, und die Differenz zwischen den Mittelwerten der Unterspalten für eine Spalte ist der sogenannte Effekt des Parameters, wenn dieser von niedrig nach hoch verändert wird. Dieser Effekt ist dann durch die Fehler der einzelnen Messwerte mit einem Gesamtfehler versehen, der sich aus der Fehlerfortpflanzung ergibt. Da der Öffnungswinkel für 4 statt der üblichen 2 Werte untersucht wurde, wird er entsprechend Tabelle 3 dargestellt. Verschiedene Winkel werden durch Kombination der Spalten 1 und 2 erzeugt, während die Spalte 5 die Überlagerung beider Effekte, also den Effekt selbst enthält. Daher ergibt sich die Zuordnung mit 3 Spalten.

TAB 3. Werte des Öffnungswinkels.

	1 A	2 A	5 A
0°			
10°			
20°			
30°			

Für die Experimente ergaben sich die 16 Permutationen, wie sie in Tabelle 4 dargestellt sind. Um einen zusätzlichen Blick auf die zu erwartende Nichtlinearität der Zielgrößen in Abhängigkeit des Öffnungswinkels zu untersuchen, wurden 4 weitere Experimente hinzugefügt, wie sie in Tabelle 5 zusammengefasst sind.

TAB 4. Parametermatrix für die Experimente.

Versuchsnummer	Öffnungswinkel, °	Form	Abstand, mm	Spannung, V
1	0	Rechteckig	21	2000
2	0	Rechteckig	36	1500
3	0	Spitz	21	1500
4	0	Spitz	36	2000
5	10	Rechteckig	21	1500
6	10	Rechteckig	36	2000
7	10	Spitz	21	2000
8	10	Spitz	36	1500
9	20	Rechteckig	21	1500
10	20	Rechteckig	36	2000
11	20	Spitz	21	2000
12	20	Spitz	36	1500
13	30	Rechteckig	21	2000
14	30	Rechteckig	36	1500
15	30	Spitz	21	1500
16	30	Spitz	36	2000

TAB 5. Experimente für Nichtlinearität.

Versuchsnummer	Öffnungswinkel, °	Form	Abstand, mm	Spannung, V
4a	0	Rechteckig	36	2000
6b	10	Spitz	36	2000
10b	20	Spitz	36	2000
16a	30	Rechteckig	36	2000

3. THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN

3.1. Berechnung des Magnetfeldes und des Induktivitätsverlaufs

Für die Berechnung des Magnetfeldes zwischen den Elektroden existieren mehrere Modelle, die unterschiedliche Annahmen treffen. Ein einfaches Modell [10] für ausreichend breite Elektroden resultiert in einem konstanten Magnetfeld im Querschnitt zwischen den Elektroden, dessen Integration über das Volumen bis zur aktuellen Plasmagrenze die von der Plasmalage abhängige Induktivitätsänderung durch das Plasma ergibt, die zur Grundinduktivität L_0 des Triebwerks hinzukommt. Für die divergierenden und spitzen Elektroden von SIMPLEX sind Breite und Abstand der Elektroden positionsabhängig, siehe Bilder 5 und 6.

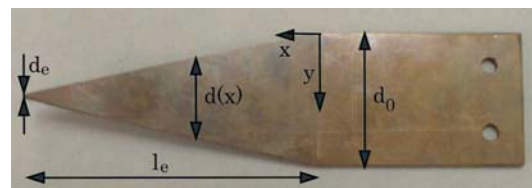


BILD 5. Spitze Form der Elektroden.

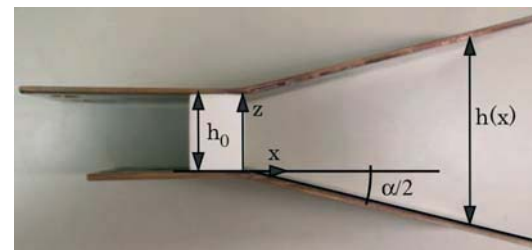


BILD 6. Divergierende Form der Elektroden.

Die Integration liefert dann für beliebige Breiten- und Abstandsverläufe $d(x)$ bzw. $h(x)$ die Induktivitätsänderung für jede Plasmalage x_p :

$$(3) \quad \Delta L = \mu_0 \int_0^{x_p} \frac{h(x)}{d(x)} dx$$

Wendet man das Ampèresche Gesetz auf unendlich lange Stromfäden an, so ergibt sich eine zweite Berechnungsmethode. Entsprechend Bild 7 wird dabei der Strom in den Elektroden auf Stromfäden aufgeteilt, und das induzierte Magnetfeld für jeden einzelnen Faden berechnet und aufintegriert.

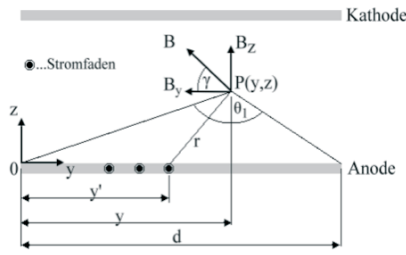


BILD 7. Induziertes Magnetfeld eines Stromfadens.

Das Magnetfeld in einem Punkt des Querschnitts zwischen den Elektroden ist dann für einen Stromfaden:

$$(4) \quad B(y, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r d}$$

mit dem Gesamtstrom I und dem Abstand zwischen Stromfaden und Ort r . Integration der zur Beschleunigung des Plasmas beitragenden Komponente B_y über alle Stromfäden ergibt schließlich das tatsächliche Magnetfeld in jedem Querschnittspunkt. Die Integration muss beide Elektroden berücksichtigen, da der rückwärtige Strom ebenfalls einen Anteil am Magnetfeld hat. Da Breite und Abstand der Elektroden wieder von x abhängen, ergibt sich dann das Magnetfeld für SIMP-LEX:

$$(5) \quad B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot d(x)} \cdot (\theta_1 + \theta_2)$$

mit den 2 Winkeln θ definiert zu:

$$(6) \quad \begin{aligned} \theta_1 &= \arctan\left(\frac{y}{z}\right) + \arctan\left(\frac{d(x) - y}{z}\right) \\ \theta_2 &= \arctan\left(\frac{y}{h(x) - z}\right) + \arctan\left(\frac{d(x) - y}{h(x) - z}\right) \end{aligned}$$

Mit Hilfe des Magnetfeldes kann wieder eine Induktivitätsänderung ermittelt werden. Dazu wird der magnetische Fluss durch Integration des Magnetfeldes in z - x -Ebenen entlang der y -Achse über die Elektrodenbreite d und bis zur Plasmalage in x -Richtung ermittelt und anschließend über die Breite der Elektroden gemittelt. Die Division durch den Gesamtstrom in den Elektroden ergibt dann die gemittelte Induktivitätsänderung für jede Plasmalage:

$$(7) \quad \Delta \bar{L}(x_p) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \int_0^{x_p} \frac{1}{d(x)} \int_0^{d(x)} \int_0^{h(x)} \frac{1}{d(x)} (\theta_1 + \theta_2) dz dy dx$$

Für eine noch genauere Berechnung wurde das Biot-Savart-Gesetz angewendet. Dieses nimmt die Stromfäden nicht mehr als unendlich lang an, anders als im oben beschriebenen Modell. Damit ist das Magnetfeld eines Punktes im Querschnitt des Elektrodenzwischenraumes nicht nur von der relativen Position zu den Stromfäden im Querschnitt abhängig, sondern auch in Bezug auf Anfang und Ende der Fäden. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die Fäden dort enden, wo sich die Grenze des Plasmas befindet. Das Magnetfeld in einem beliebigen Punkt erzeugt durch einen Stromfaden ist dann:

$$(8) \quad \vec{B} = -\frac{\mu_0 I_{\text{faden}}}{4\pi} \int \frac{\vec{e} \times d\vec{s}}{(\Delta r)^2}$$

wobei \vec{e} dem Einheitsvektor zwischen einem Punkt auf dem Stromfaden und dem Berechnungspunkt, $d\vec{s}$ dem Differential entlang des Stromfadens und Δr dem Abstand beider Punkte entspricht. Die Integration erfolgt dann

entlang des Stromfadens, um das Magnetfeld in einem Punkt (x, y, z) zwischen den Elektroden zu berechnen. Zur Lösung des Integrals wird jeder Stromfaden vektoriell beschrieben. Anfangs- und Endpunkte der Fäden wurden äquidistant über die Elektrodenbreite verteilt. Die Integration erfolgt wieder nur bis zur aktuellen Plasmalage. Da eine analytische Lösung für das Integral über alle Stromfäden zu komplex ist, wird eine finite Anzahl Stromfäden angenommen und das Magnetfeld für jeden Punkt aufsummiert. Die Integration des Magnetfeldes zum magnetischen Fluss bzw. zur Induktivitätsänderung ergibt sich dann aus der numerischen Integration über das diskrete Gitter an Punkten, für die das Magnetfeld berechnet wird. Dementsprechend wirken sich Gittergröße und Anzahl der Fäden auf das Ergebnis aber auch auf die Rechenzeit aus. Auch für das Modell mit dem Biot-Savart-Gesetz lässt sich die plasmabedingte Induktivitätsänderung für jede Plasmalage und beliebige Elektrodengeometrien, im Rahmen der oben beschriebenen Formen, bestimmen.

Um die Modelle zu vergleichen, wurden für verschiedene Geometrien die Verläufe der Induktivitätsänderung berechnet. Bild 8 zeigt die Kurven für eine Konfiguration mit einem Basisabstand h_0 von 21 mm, einer Basisbreite d_0 von 40 mm, einer Länge l_e von 87 mm, einem Öffnungswinkel von 20° und spitzen Elektroden.

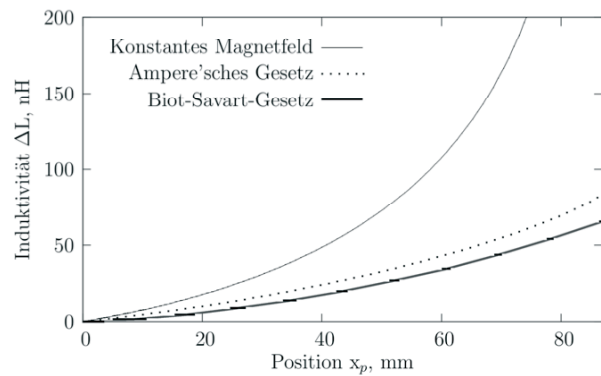


BILD 8. Vergleich der Magnetfeldmodelle.

Je detaillierter das Modell, desto geringer fällt die berechnete Induktivitätsänderung aus. Im Falle eines konstanten Magnetfeldes wird die Induktivität singulär, sobald das Plasma das Ende der Elektroden erreicht. Dies entspricht natürlich nicht der Realität. Im Allgemeinen lässt sich ein Anstieg der Induktivitätsänderung mit fortschreitendem Plasma feststellen, der je nach Geometrie unterschiedlich ausfällt. Bild 9 zeigt die berechneten Induktivitäten für unterschiedliche Öffnungswinkel der Elektroden bei konstanter sonstiger Geometrie mit Hilfe des Biot-Savart-Modells. Für eine Steigerung des Winkels lässt sich eine Vergrößerung der Induktivität feststellen, wobei der Zugewinn kleiner ausfällt, je größer der Winkel schon ist. Da die Induktivitätsänderung direkt in den elektrischen Wirkungsgrad des Triebwerks und damit auch in den Schubwirkungsgrad eingeht, erwartet man aus theoretischer Sicht eine Verbesserung der Leistungsdaten für einen größeren Winkel. Analog lässt sich eine potentielle Steigerung für eine Formänderung zu spitzen Elektroden feststellen.

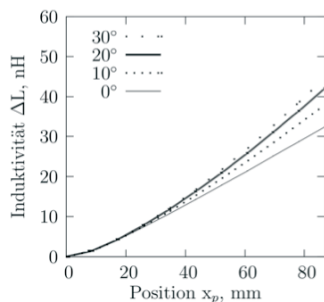


BILD 9. Einfluss des Öffnungswinkels auf die Induktivitätsänderung.

3.2. Kolbenmodell

Das Kolbenmodell [10, 11] ist ein gängiges Modell zur einfachen Beschreibung von gepulsten MPD-Triebwerken. Es basiert auf zwei wesentlichen Gleichungen. Zum einen der Anwendung des 2. Kirchhoff'schen Gesetzes auf das Ersatzschaltbild des Triebwerksschwingkreises inklusive der erzeugten Induktivitäts- und Widerstandsänderung. Zum anderen auf der Bewegungsgleichung, wie sie aus dem 2. Newton'schen Gesetz entsteht, unter Anwendung der Lorentzkraft. Die Lösung beider Differentialgleichungen liefert den örtlichen Verlauf des Plasmas und der elektrischen Größen des Schwingkreises über der Zeit. Damit lässt sich direkt eine Plasmageschwindigkeit berechnen. Für SIMP-LEX wurde das Modell so angepasst, dass mehrere Plasmaschichten berücksichtigt werden, wie sie auch nachgewiesen wurden [11]. Mit Hilfe des Massenbits lässt sich anschließend der Gesamtimpuls des Triebwerks für eine spezielle Geometrie und die Anfangsbedingungen im Schwingkreis berechnen. In dieses Modell geht direkt der Verlauf der Induktivitätsänderung ein, wie sie in Kapitel 3.1 berechnet wurde, d.h. für jede Geometrie im Kolbenmodell wird mit dem passenden Induktivitätsverlauf gerechnet. Dadurch lassen sich analytische und experimentelle Werte vergleichen.

4. ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG

4.1. Ergebnisse der Taguchi-Matrix

Für die in Tabelle 4 dargestellten Experimente wurde der Impuls und das Massenbit gemessen und die mittlere Austrittsgeschwindigkeit sowie der Schubwirkungsgrad berechnet. Für alle 4 Zielgrößen wurden die Effekte mit den Taguchi-Matrizen berechnet und sind in Tabelle 6 dargestellt.

TAB 6. Effekte der Parameter (I_{bit} in μNs , m_{bit} in μg , c_e in km/s , η_{Schub} in %).

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		A	A	B	C	A	AB	AC	AB	AC	BC	CD	BD	AD	AD	D
Effekt	I_{bit}	-4	-61	52	327	-94	37	32	-2	21	-24	218	22	-39	-21	632
Effekt	m_{bit}	-0.7	-3.7	-2.8	44.6	-1.4	3.6	0.4	-0.6	2.6	2.9	-1.9	-5.6	4.1	-0.4	44.5
Effekt	c_e	0.0	-0.1	0.6	-1.3	-0.7	0.2	0.2	0.0	-0.1	-0.4	1.9	0.6	-0.6	-0.1	1.1
Effekt	η_{Schub}	0.5	-0.4	0.9	1.2	-1.3	0.6	0.4	0.1	0.1	-0.4	3.5	0.6	-0.9	-0.3	0.6

Ein positiver Wert bedeutet dabei eine Steigerung der Zielgröße, wenn der betreffende Parameter von „niedrig“ auf „hoch“ verändert wird. Je größer der Wert, umso größer der Einfluss des Parameters. Für den Impuls lässt sich feststellen, dass eine größte Veränderung durch die Änderung der Parameter Elektrodenabstand (C) und Spannung (D) sowie der Überlagerung beider auftritt. Dies bedeutet, dass eine gleichzeitige Änderung beider Parameter eine zusätzliche Steigerung des Impulses zur Folge hat. Ein größerer Abstand bedeutet direkt eine

Zunahme der ablatierten Masse, da eine größere Treibstofffläche zur Verfügung steht. Die Beschleunigung des Treibstoffs hängt stark von der Ladespannung und der daraus resultierenden Stromstärke ab. Dadurch wird der Impuls stark von beiden Parametern beeinflusst.

Alle 3 Spalten für den Öffnungswinkel (1, 2 und 5) zeigen negative Werte für den Impuls. Um dieses Phänomen näher zu untersuchen, kann die Taguchi-Matrix in Untermatrizen aufgespalten werden, so dass der Einfluss jeder einzelnen Winkeländerung berechnet wird. Die Ergebnisse für die entsprechende Spalte der Untermatrizen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

TAB 7. Effekte des Öffnungswinkels.

(a) 0° auf 10°.		(b) 10° auf 20°.		(c) 20° auf 30°.	
	1		1		1
	A		A		A
I_{bit}	33	I_{bit}	57	I_{bit}	-155
m_{bit}	-2.3	m_{bit}	3.0	m_{bit}	-5.0
c_e	0.6	c_e	0.1	c_e	-0.8
η_{Schub}	0.9	η_{Schub}	0.9	η_{Schub}	-1.7

Es zeigt sich deutlich, dass eine Steigerung des Winkels auf über 20° zu einer Verschlechterung der Leistungsdaten führt, während die Zielgrößen bis 20° i.A. eine Verbesserung erfahren.

Eine Veränderung der Elektrodenform (B) steigert ebenfalls den Impuls, wie nach den Berechnungen in Kapitel 3.1 erwartet. Auch wenn der Zugewinn geringer ausfällt als bei z.B. dem Elektrodenabstand, so kann es als Bestätigung der Theorie angesehen werden. Die meisten Wechselwirkungen (gemischte Spalten) scheinen vernachlässigbar zu sein. Für die ablatierte Masse ergeben sich ähnliche Schlussfolgerungen. Sowohl der Abstand zwischen den Elektroden als auch die Spannung haben den größten Effekt. Allerdings hat diesmal weder die Form noch die Wechselwirkung aus Abstand und Spannung einen signifikanten Effekt.

Die Ergebnisse für die mittlere Austrittsgeschwindigkeit zeigen eine Steigerung bei erhöhter Spannung und einen Leistungsabfall bei größerem Abstand, bedingt dadurch, dass mehr Masse beschleunigt werden muss. Die Wechselwirkung zwischen beiden Parametern zeigt den größten Effekt, d.h. eine gleichzeitige Steigerung von Abstand und Spannung kompensiert den negativen Effekt des Abstandes und führt zu einer signifikanten Steigerung der Austrittsgeschwindigkeit. Die Elektrodenform zeigt ebenfalls eine Steigerung der Leistung, während für den Öffnungswinkel nur bis zu einem Winkel von 10° ein wesentlicher Einfluss festgestellt wurde.

Der Schubwirkungsgrad zeigt ähnliche Tendenzen wie der erzeugte Impuls, nur dass die Spannung einen sehr kleinen Einfluss hat. Auch hier ist die größte Steigerung wieder bei einer gleichzeitigen Steigerung von Abstand und Spannung zu finden, der durch die immense Impulssteigerung erfolgt. Die Form und der Abstand selbst haben ebenfalls einen positiven Effekt auf den Wirkungsgrad. Für den Öffnungswinkel lässt sich eine Steigerung bis zu einem Winkel von 20° feststellen. Da sehr viele Messwerte in den Wirkungsgrad einfließen, ergibt sich ein Fehler von maximal $\pm 1,1$ Prozentpunkten.

4.2. Nichtlinearität

Wie schon in Kapitel 2.3 erwähnt, wurde für den

Öffnungswinkel eine Nichtlinearität in den Zielgrößen erwartet. Mit Hilfe der in Tabelle 4 und 5 beschriebenen Experimente lassen sich die Einflüsse der Parameter Öffnungswinkel und Elektrodenform direkt von den Messwerten ablesen. Die Bilder 10 bis 13 zeigen die aufgenommenen Messwerte der Leistungsdaten für eine Variation in den genannten Parametern und einfachem Standardfehler.

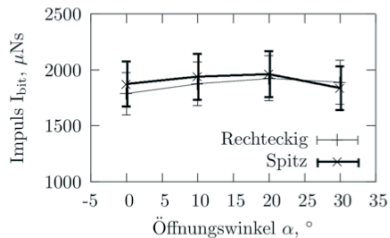


BILD 10. Impuls in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der Elektrodenform

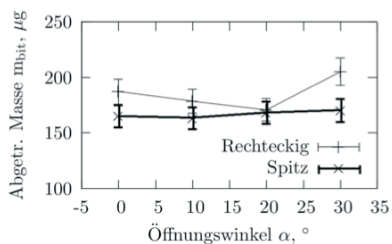


BILD 11. Massenbit in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der Elektrodenform

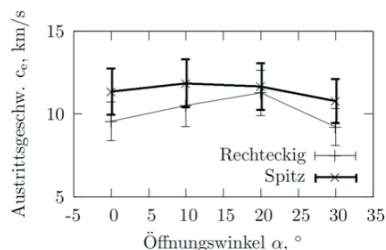


BILD 12. Mittlere Austrittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der Elektrodenform

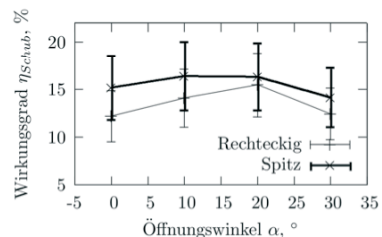


BILD 13. Schubwirkungsgrad in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und der Elektrodenform

Wie in Bild 10 zu erkennen ist, sinkt der Impuls ab einem Öffnungswinkel von 20°. Für 30° erreicht er sogar einen geringeren Wert als für parallele Elektroden, d.h. 0°. Die stark divergente Form verursacht wahrscheinlich eine Ablösung des Plasmas von den Elektroden bzw. zu starke Divergenzverluste, so dass der Vorteil durch die berechnete erhöhte Induktivitätsänderung verloren geht. Eine gleiche Tendenz lässt sich auch in der Austrittsgeschwindigkeit und dem Schubwirkungsgrad

feststellen, unabhängig von der Form der Elektroden.

Dieser Effekt führte zu den widersprüchlichen Werten in der Taguchi-Matrix in Tabelle 6 für die Spalten 1, 2 und 5 (A). Bis zu einem Winkel von 20° ist eine Leistungssteigerung ersichtlich, und dies ist ein wesentliches Ergebnis der Optimierung. Des Weiteren zeigt sich deutlich eine Verbesserung der Leistungsdaten, d.h. Impuls, Austrittsgeschwindigkeit und Schubwirkungsgrad durch die Veränderung der Elektrodenform hin zu spitzen Elektroden. Dies bestätigt die Erwartungen, und kann ebenfalls als wesentliches Ergebnis gewertet werden.

4.3. Vergleich Experimente und Theorie

Für die experimentell untersuchten Konfigurationen wurde der Verlauf der Induktivitätsänderung berechnet, und in das Kolbenmodell eingearbeitet. Auf Grund dessen, dass noch kein geeignetes Ablationsmodell implementiert werden konnte, wurden für die Berechnungen die experimentellen Daten der ablatierten Masse eingesetzt. Die Masse wurde auf 3 Plasmawellen aufgeteilt [11] und für jede Welle die Ausbreitung des Plasmas eindimensional berechnet. Aus der mittleren Geschwindigkeit jeder Welle wurde der Impuls berechnet, und zu einem Gesamtimpuls aufsummiert. Bild 14 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen für die Magnetfeldmodelle mit dem Ampèreschen Gesetz und dem Biot-Savart-Gesetz, verglichen mit den experimentell gefundenen Werten. Alle Werte wurden auf Konfiguration 1 in Tabelle 4 normiert, um Tendenzen besser ablesen zu können, und über dem Massenbit aufgetragen, da dieses für Experiment und Berechnung identisch ist.

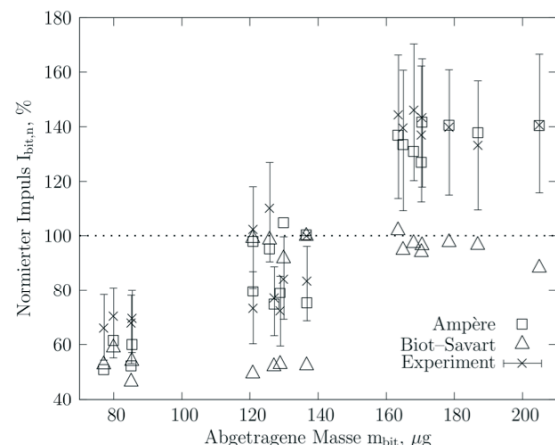


BILD 14. Vergleich des normierten Impulses vs. ablatierte Masse für Experiment und Modell

Es zeigt sich, dass sich 3 Punktwolken herausbilden. Dies resultiert aus dem starken Einfluss von Elektrodenabstand und Spannung auf die ablatierte Masse. Eine Erhöhung des Abstandes, wie beim Sprung von 120-140 μg auf 160-200 μg, wird vom Ampèreschen Modell allerdings besser nachgebildet als vom Biot-Savart-Gesetz, obwohl dieses eigentlich detaillierter rechnet. Der gleiche Effekt lässt sich auch bei niedrigerer Spannung feststellen. Eine Veränderung der Spannung wird von beiden Modellen gleich gut erfasst. Eine mögliche Ursache für die Unterschiede ist in der Aufteilung der Massen auf die Plasmawellen, den elektrischen Parametern des Entladungsschwingkreises und im Fehlen eines geeigneten Modells für den Plasmawiderstand zu finden.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Ein Vergleich der experimentell ermittelten Leistungsdaten des gepulsten instationären MPD-Triebwerks SIMP-LEX mit Daten anderer Forschungsinstitute zeigt eine gute Übereinstimmung. Eine Zunahme des erzeugten Impulses und der Austrittsgeschwindigkeit durch eine Erhöhung des Öffnungswinkels konnte auch in anderen Studien für unterschiedliche Energien festgestellt werden [3-5, 7]. Der Leistungsrückgang ab einem Winkel von über 20° wurde auch von Palumbo und Guman [3] beobachtet, obwohl die Energie des Triebwerks mit 450 bis 700 J deutlich höher lag. Dies bedeutet, dass dieser Effekt unabhängig von Aufbau und Energie des Triebwerks sein könnte, und eine allgemeine Eigenschaft gepulster MPD-Triebwerke ist. In allen durchgeführten Experimenten ließ sich ein Leistungszuwachs durch die Einführung der spitzen Elektroden feststellen. Durch beide Änderungen konnte der Schubwirkungsgrad um fast 35% gesteigert werden (Konfigurationen 1 und 11), weit mehr als die von Antropov et al. [6] festgestellten 5-10%. Da SIMP-LEX für eine Langzeitmission vorgesehen ist, profitiert das Triebwerk und ebenso Lunar Mission BW1 immens von dieser Steigerung, die die Energie- und Masseanforderungen nicht verändert.

Der Einfluss der Geometrie auf die Induktivitätsänderung wurde mit 3 Magnetfeldmodellen analytisch untersucht, und die Ergebnisse genutzt, um mit Hilfe des Kolbenmodells die zu erwartenden Leistungsdaten zu berechnen. Ein Vergleich mit den experimentellen Werten zeigte eine gute Übereinstimmung der Größenordnung und der allgemeinen Tendenzen der Zielgrößen. Jedoch zeigte das Modell mit dem Biot-Savart-Gesetz eine Schwäche bei der Nachbildung des Einflusses des Elektrodenabstandes. Unter Verwendung eines geeigneten Modells für die Ablation und den Plasma-widerstand könnten diese Ergebnisse verbessert werden.

Die Konfiguration mit der höchsten mittleren Austrittsgeschwindigkeit (11,9 km/s) wurde für einen Abstand von $h=36$ mm und eine Spannung $U=2000$ V gefunden.

Für zukünftige Triebwerksmodelle ist daher die Benutzung von spitzen und divergierenden (20°) Elektroden, sowie eine große Entladungsenergie, empfehlenswert. Der Effekt der Energieerhöhung muss allerdings mit Hinblick auf die Mission gegebenenfalls überdacht werden, da die Energieanforderungen an den Satelliten steigen. Ebenso führt eine Erhöhung des Abstandes auf eine Steigerung der ablatierten Masse, und verändert damit den mittleren Treibstoffverbrauch. Dies verändert die Flugbahn signifikant, und muss für die Konzeption des Flugmodells mit bedacht werden.

Danksagung

Das Projekt SIMP-LEX wurde gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unter der Fördernummer FKZ-50-JR-0446. Für die Hilfe bei der experimentellen Durchführung und der Diskussion der Ergebnisse gilt der Dank Dipl.-Ing. Matthias Lau und Dipl.-Ing. Bastian Steiner.

Referenzen

- [1] Laufer, R., Röser, H.-P., und das Lunar Mission BW1 Project Team, „The Stuttgart Moon Orbiter Lunar Mission BW1,“ First CEAS European Air and Space Conference Century Perspectives, Sept. 2007.
- [2] Nawaz, A., Herdrich, G., Kurtz, H., Schönherr, T., und Auweter-Kurtz, M., „SIMP-LEX: Systematic Geometry Variation Using Thrust Balance Measurements,“ International Electric Propulsion Conference, IEPC07-168, Sept. 2007
- [3] Palumbo, D. J., und Guman, W. J., „Effects of Propellant and Electrode Geometry on Pulsed Ablative Plasma Thruster Performance,“ Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 13, No. 3, März 1976, pp. 163–167
- [4] Meckel, N. J., Hoskins, W. A., Cassady, R. J., Myers, R. M., Oleson, S. R., und McGuire, M. L., „Improved Pulsed Plasma Thruster Systems for Satellite Propulsion,“ AIAA Paper 96-2735, Juli 1996
- [5] Arrington, L. A., Haag, T. W., Pencil, E. J., und Meckel, N. J., „A Performance Comparison of Pulsed Plasma Thruster Electrode Configurations,“ International Electric Propulsion Conference, IEPC97-127, Aug. 1997; auch NASA TM 97-206305
- [6] Antropov, N. N., Diakonov, G., Orlov, M., Popov, G. A., Tyutin, V., und Yakovlev, V., „Development and Refinement of Highly Efficient 150 J APPT,“ International Electric Propulsion Conference, IEPC03-061, März 2003
- [7] Kawahara, K., Kumagai, N., Sato, K., Tamura, K., Koide, T., Harima, K., Fukushima, T., und Takegahara, H., „Study on Plume Characteristics of Pulsed Plasma Thruster,“ International Electric Propulsion Conference, IEPC03-160, März 2003
- [8] Schönherr, T., Nawaz, A., Herdrich, G., Röser, H.-P., und Auweter-Kurtz, M., „Influence of Electrode Shape on Performance of Pulsed Magnetoplasma-dynamic Thruster SIMP-LEX,“ Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 2, März-April 2009, pp. 380-386
- [9] Lochner, R. H., and Matar, J. E., „Designing for Quality: An Introduction to the Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design“, Quality Resources, White Plains, NY, 1st ed., 1990
- [10] Jahn, R. G., „Physics of Electric Propulsion“, Dover, Mineola, NY, 2006
- [11] Nawaz, A., Bauder, U., Böhrk, H., Herdrich, G., und Auweter-Kurtz, M., „Electrostatic Probe and Camera Measurements for Modeling the iMPD SIMP-LEX,“ AIAA Paper 2007-5280, Juli 2007