

RAKETENTREIBSTOFFE

ARMIN DADIEU

RALF DAMM

ECKART W. SCHMIDT

MIT 278 ABBILDUNGEN
247 TABELLEN
UND 2770 LITERATURHINWEISEN



1968

SPRINGER-VERLAG
WIEN · NEW YORK

Prof. Dr. ARMIN DADIEU
Leiter des Instituts für Raketentreibstoffe
der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt
Stuttgart-Vaihingen
Dr. RALF DAMM
Leitender Wissenschaftler im Institut für Raketentreibstoffe
der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt
Stuttgart-Vaihingen
Dr. ECKART W. SCHMIDT
Institut für Raketentreibstoffe
der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt
Stuttgart-Vaihingen
Zur Zeit Senior Research Chemist bei der Rocket Research Corporation
Seattle, Washington, U.S.A.

ISBN 978-3-7091-7133-2

ISBN 978-3-7091-7132-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-7091-7132-5

Alle Rechte vorbehalten

Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung
des Springer-Verlages übersetzt oder in irgendeiner Form
vervielfältigt werden

© 1968 by Springer-Verlag/Wien

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1968

Library of Congress Catalog Card Number 67-28408

Vorwort

In den letzten 25 Jahren, seit dem großen Durchbruch in Peenemünde, hat die Raketentechnik ungeheure Erfolge erzielt. Sie hat damit nicht nur die Art der Kriegsführung grundlegend verändert und deren Möglichkeiten außerordentlich und gefährlich erweitert, sondern auch — was wesentlich erfreulicher ist — der Menschheit das Eindringen in den Weltraum ermöglicht. Satelliten mit den verschiedensten Aufgaben umkreisen heute die Erde, geostationäre Geräte ermöglichen ein weltweites Nachrichten- und Fernsystem, Instrumententräger erkunden Mond und Nachbarplaneten und die bemannte Raumfahrt hat begonnen: Erdumkreisungen, Aussteigen im Weltraum, Rendezvous-Manöver sind erfolgt und die bemannte Landung auf dem Mond wird wahrscheinlich noch in diesem Jahrzehnt vor sich gehen. Alle diese Erfolge wurden ausschließlich mit Hilfe chemisch angetriebener Raketen erzielt. Sie wären ohne die grundlegenden Erkenntnisse der Chemie der Raketentreibstoffe unmöglich gewesen. In der letzten Periode der Entwicklung der chemischen Antriebstechnik, nach dem erfolgreich gelungenen Einsatz der hochenergetischen Paarung Flüssigsauerstoff/Flüssigwasserstoff und besonders, nachdem es möglich geworden ist, die Leistungen von beliebigen Treibstoffkombinationen rasch und exakt theoretisch zu berechnen, sind nun die Grenzen absehbar geworden, die dieser Antriebsart gesetzt sind. Es erschien deshalb angebracht, eine Bilanz zu ziehen und den Entwicklungsstand der chemischen Energiequellen sowie die noch in ihnen liegenden ungenutzten Möglichkeiten zusammenfassend darzustellen; dies um so mehr, als es bis jetzt auch in der internationalen Literatur kein ausführliches Werk über Raketentreibstoffe gibt. Eine solche Darstellung, die eine möglichst vollständige Dokumentation und die kritische Ordnung aller Tatsachen und Kenntnisse über Raketentreibstoffe, über die Berechnung ihrer Leistungen, die Zusammenhänge zwischen Treibstoff und Triebwerksbau, aber auch den Vergleich des chemischen Antriebes mit möglichen nichtchemischen Zukunftsantrieben enthalten sollte, ist eine legitime Aufgabe des Instituts, dem die Verfasser angehören. Daher beruht das vorliegende Buch weitgehend auf der Institutsarbeit der vergangenen Jahre. Die erste Anregung dazu gab Professor Dr.-Ing. EUGEN SÄNGER (†) als Leiter des seinerzeitigen Forschungsinstituts für Physik der Strahlantriebe (FPS), dem der Erstgenannte der Autoren für manche Diskussion und wertvolle Ratschläge zu großem Dank verpflichtet ist. Auch die ersten systematischen Literaturrecherchen wurden noch im Rahmen des FPS durchgeführt.

Da die Beurteilung der Leistung und der übrigen raketentechnisch wichtigen Eigenschaften von Raketentreibstoffen nur aus der Kenntnis der grundlegenden Antriebsprinzipien erfolgen kann, war es unerlässlich, auf diese ausführlicher einzugehen und auch die entsprechenden Kenngrößen für Treibstoffe und Triebwerk zu definieren. Dadurch war eine gewisse Überschneidung mit anderen einschlägigen Werken, z. B. dem heute schon klassischen Buch „Raketenantriebe“ von BARRÈRE, JAUMOTTE, FRAELIS DE VEUBEKE und VANDENKERCKHOVE oder auch mit der elementaren Darstellung SUTTONS, „Rocket Propulsion Elements“, nicht zu vermeiden.

Um die Fülle des vorliegenden Tatsachenmaterials übersichtlicher darstellen zu können, wurde das Buch in zwei Teile gegliedert. Der allgemeine Teil (Kapitel 1 bis 10) beschreibt die Grundlagen des chemischen Antriebes, vergleicht diesen mit den verschie-

denen in Studium und Entwicklung befindlichen nichtchemischen Zukunftsantrieben und gibt eine allgemeine und kritische Übersicht über Leistung und Eigenschaften der drei großen Treibstoffgruppen — flüssig, fest und hybrid. Besonderes Gewicht glaubten wir den Grundlagen und den Methoden zur exakten Berechnung der Leistung von Raketentreibstoffen sowie den Verfahren und Programmen für die moderne Maschinenrechnung zuerkennen zu müssen; sie sind deshalb im Kapitel 4 ausführlicher behandelt. Den Zusammenhängen Treibstoff-Triebwerk, d. h. den Auswirkungen der verwendeten Treibstoffkombinationen auf die Auslegung des Motors, die mit dem immer höheren Energiegehalt der Treibstoffe und der sich dadurch steigernden Gefährlichkeit, Korrosivität und den zunehmend höheren Arbeitstemperaturen immer bedeutungsvoller werden, haben wir ein besonderes Kapitel gewidmet; es behandelt die für die Zusammenarbeit zwischen Treibstoffchemiker und Triebwerksingenieur wichtigen Faktoren.

Die gegenwärtig verwendeten Raketentreibstoffe sind noch nicht an der von der Natur gesetzten Grenze der Leistungsfähigkeit chemischer Raketentreibstoffe angelangt. Wegen der großen Bedeutung, die selbst kleine Steigerungen der Ausströmungsgeschwindigkeit für die Erhöhung des Nutzlastverhältnisses haben, haben wir die heute noch gegebenen Möglichkeiten zukünftiger Leistungssteigerungen in einem besonderen Kapitel einer Analyse unterzogen und die unseres Erachtens noch vorliegenden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben umrissen. Den Abschluß des allgemeinen Teiles bildet ein Kapitel über die wichtigsten Methoden zur Bestimmung der raketentechnisch wichtigen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Treibstoffen. Am Ende der einzelnen Kapitel befindet sich jeweils ein Verzeichnis der entsprechenden Schlüsselliteratur.

Der wesentlich umfangreichere „Spezielle Teil“ (Kapitel 11 bis 15) hat Handbuchcharakter; er sollte nicht nur möglichst vollständig die vorliegende Literatur referieren, sondern auch die für die Arbeit des Treibstoffchemikers und des Triebwerksingenieurs notwendigen Daten und Kenntnisse selbst enthalten. Ein Raketentreibstoff durchläuft in seiner Entwicklung drei wesentliche Stufen: 1. die Synthese und Charakterisierung im Labormaßstab, 2. die Erprobung als Raketentreibstoff auf dem Prüfstand und 3. die Anwendung im freifliegenden Gerät. An einigen Beispielen, z. B. asymmetrisches Dimethylhydrazin oder Monomethylhydrazin, ist diese innerhalb weniger Jahre erfolgende Entwicklung besonders gut zu verfolgen. Das Buch beschreibt die Raketentreibstoffe in ihren verschiedenen Entwicklungsstadien, wobei naturgemäß das meiste Material über solche Treibstoffe vorliegt, die sich bereits in der praktischen Anwendung befinden. Die mehr als 2000 Zitate umfassende Literatur des speziellen Teiles wurde in einem besonderen Verzeichnis an seinem Ende zusammengestellt, wobei die Literatur bis 1966 berücksichtigt ist. Einzelne neuere Literaturhinweise bis Februar 1968 wurden nach dem Umbruch noch eingefügt, jedoch ohne die Möglichkeit einer ausführlicheren Diskussion im Text.

Der gesamte im Buch dargestellte Stoff bezieht sich ausschließlich auf die frei zugängliche Literatur. Wir bedauern sehr, daß es infolge der in der UdSSR viel strenger geübten Geheimhaltung und wohl auch wegen der sich sehr ungünstig auswirkenden Sprachenschanke den Verfassern nicht möglich war, auf die großen raketentechnischen Leistungen der Sowjetunion gebührend einzugehen.

Die Ausstellung der Wostok-Trägerrakete auf der Pariser Luftfahrtschau 1967 und die Publikation des Filmes „Zehn Jahre Raumfahrt“ (1968) erfolgten so spät, daß die originelle, leistungsfähige und mit vergleichsweise sehr geringem materiellen Aufwand entwickelte Wostok-Trägerrakete nicht mehr berücksichtigt und die grundsätzlichen Unterschiede in der Entwicklung der Antriebstechnik in den USA und in der Sowjetunion nicht entsprechend hervorgehoben werden konnten.

Bei der Durchführung der Autorenkorrekturen wurde deutlich, in wie rascher Entwicklung sich dieses Fachgebiet noch befindet. In vielen Fällen waren in der Zeit zwischen Entstehung des Manuskriptes und der Drucklegung Leistungen erreicht worden, die im ursprünglichen Manuskript noch als zukünftige Entwicklungen vorausgesagt wurden. Es wurde versucht, das Fachgebiet so aktuell wie möglich darzustellen.

Bei der Abfassung des Buches haben uns verschiedene Institutionen, Industriefirmen und Persönlichkeiten wertvollste Hilfe geleistet. Ihnen allen möchten wir dafür unseren Dank aussprechen. Besonders danken wir der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V. und dem Präsidenten ihres Vorstandes, Professor Dr.-Ing. A. W. QUICK, für die Möglichkeit der Benützung ihrer Einrichtungen und die Möglichkeit der zum Teil dienstlichen Mitarbeit der Autoren und einer Anzahl anderer DVL-Angehöriger. Für wertvolle Diskussionen, Bilder und Unterlagen danken wir den Leitern der Schwesterinstitute, Professor Dr. P. H. BRODERSEN (†) und Dr. TH. PETERS. Besonderen Dank schulden wir dem von Direktor Dr. K. MEYER geleiteten Fraunhofer-Institut für Chemie der Treibstoffe (ICT), vor allem dessen führendem Mitarbeiter Dr. H. SCHUBERT. Er hatte die Freundlichkeit, das Kapitel 6 und die anderen Abschnitte über Festtreibstoffe einer Durchsicht zu unterziehen, und hat uns dabei eine Reihe wichtiger Korrekturen und Ergänzungen vorgeschlagen und sehr wertvolle Anregungen gegeben.

Für die großzügige Zurverfügungstellung von Bildmaterial haben wir den Firmen Allied Chemical, Aerojet-General Corporation, Lockheed Propulsion Company, Pratt & Whitney, Rocketdyne, Rocket Research Corporation, United Technology Center, ferner den Firmen Bölkow GmbH., Entwicklungsring Nord (ERNO), Julius Peters, der Société d'Étude de la Propulsion par Réaction (SEPR) sowie dem Office National d'Étude et de Recherches Aérospatiales (ONERA), dem DVL-Institut für chemische Raketenantriebe und Dozent Dr. H. LÖB von der Universität Gießen zu danken. Für das mehrfache Schreiben des Manuskriptes, für die ungeheuer mühevollste Abfassung des Namen- und des Sachverzeichnisses war uns Frau H. HAMMERSCHMIDT eine unermüdliche und unentbehrliche Hilfe; ihr sind wir zu großem Dank verpflichtet, ebenso Herrn F. ALBER, der sämtliche Zeichnungen für das Buch angefertigt hat.

Schließlich — last not least — danken wir dem Springer-Verlag in Wien für das verständnisvolle Eingehen auf alle unsere Wünsche, vor allem auch für die Möglichkeit, noch bei der Umbruchkorrektur letzte Ergänzungen in Text und Namenverzeichnis einzufügen, sowie für die traditionell gute Ausstattung des Buches.

Stuttgart-Vaihingen und Seattle, Washington, im September 1968

A. Dadiou, R. Damm, E. W. Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Allgemeiner Teil

	Seite
1. Einleitung; Begriff und Einteilung der Raketentreibstoffe	3
2. Der chemische Antrieb im Vergleich mit möglichen Zukunftsantrieben	4
2.1. Die Raketengrundgleichung. Parameter zum Leistungsvergleich der verschiedenen Antriebsarten	4
2.2. Freie Radikale und metastabile Atome als Raketentreibstoffe	6
2.2.1. Atomarer Wasserstoff	7
2.3. Verwendung nuklearer Energie zum Raketenantrieb.	9
2.3.1. Kernchemische Aufheizung von Arbeitsmedien durch Atomexplosionen (Projekt Orion)	10
2.3.2. Konvektive Aufheizung von Arbeitsmedien durch Kernreaktoren (Rover-Kiwi-Nerva-Projekt)	10
2.3.3. Konvektive Aufheizung durch Radioisotope (Poodle-System)	12
2.3.4. Gas-Core-Reaktoren	14
2.4. Elektrische Antriebe	15
2.4.1. Elektrothermische Antriebe	15
2.4.2. Elektromagnetische Antriebe	17
2.4.3. Elektrostatische (Ionen-)Antriebe	19
2.4.4. Energiequellen und Energiewandler für elektrische Antriebe	23
2.5. Photonenantrieb	24
2.5.1. Das Sonnensegel	26
2.6. Vergleich und Schlußfolgerung	27
Literatur zu Kap. 1 und 2	30
3. Der chemische Antrieb und seine Leistungsgrenzen	31
3.1. Eigenart, Vor- und Nachteile des chemischen Antriebes, Stufenprinzip	31
3.2. Grundtypen chemischer Antriebssysteme	33
3.2.1. Das Flüssigkeitstriebwerk mit zwei Komponenten	34
3.2.2. Das Flüssig-Monergol-Triebwerk	39
3.2.3. Das Feststofftriebwerk.	39
3.2.4. Geltriebwerke	44
3.2.5. Lithergole (hybride) Triebwerke	45
3.3. Energieausnützung und Wirkungsgrade	45
3.4. Wichtige Leistungs- und Triebwerksparameter	48
3.4.1. Leistungsparameter	48
3.4.1.1. Der Schub (F)	48
3.4.1.2. Die Ausströmungsgeschwindigkeit (w)	49
3.4.1.3. Der spezifische Impuls (I_s)	50
3.4.1.4. Der volumspezifische Impuls	51
3.4.1.5. Charakteristische Geschwindigkeit und Schubkoeffizient	52
3.4.2. Triebwerksparameter	52
3.4.2.1. Die charakteristische Länge L^*	52
3.4.2.2. Das Düsen-Querschnittsverhältnis	53
3.5. Theoretische Berechnung der raketentechnischen Leistungsparameter	53
3.5.1. Ideale Rakete	54
3.5.2. Grundbegriffe und Gleichungen	55
3.5.3. Düsentheorie und -auslegung (Lavaldüse)	58
3.5.4. Näherungsgleichungen für die charakteristischen Parameter	61
Literatur.	65

	Seite
4. Exakte Berechnung der Leistung von Raketentreibstoffen	66
4.1. Die Grundlagen der Rechnung. Die Vorgänge in Ofen und Düse	67
4.1.1. Berechnung der Feuergasdaten im Ofen	67
4.1.1.1. Das Feuergasgleichgewicht in der Brennkammer	67
4.1.1.2. Berechnung der Ofenbedingungen	70
4.1.2. Der Entspannungsvorgang in der Düse (Berechnung des Feuergaszustandes bei der Entspannung)	71
4.1.3. Thermodynamische Daten	74
4.2. Rechenverfahren zur Bestimmung der Leistungsdaten von Raketentreibstoffen	77
4.2.1. Zusammenstellung der verwendeten Formeln und Beziehungen	77
4.2.2. Aufstellung der Gleichungen für den Zustand in der Brennkammer	79
4.2.2.1. Graphische Lösungsmethoden	82
4.2.2.2. Die Lösung des Gleichungssystems nach dem Newton-Raphson-Verfahren	84
4.2.3. Die erstarrte Strömung	87
4.2.4. Die Gleichgewichtsströmung	89
4.2.5. Systeme mit kondensierten Phasen	93
4.2.6. Berechnungen mit den wirklichen Reaktionsgeschwindigkeiten	95
4.2.7. Verfügbare Programme und Literatur	97
Literatur.	97
5. Flüssigtreibstoffe	99
5.1. Einteilung	99
5.1.1. Einfachtreibstoffe (Monergole)	99
5.1.2. Zweifachtreibstoffe (Diergole)	99
5.1.3. Lagerbare und kryogene Treibstoffe	99
5.1.4. Chemische Einteilung	100
5.1.5. Einteilung nach Leistung	100
5.2. Leistungsdaten von Flüssigtreibstoffen	100
5.2.1. Meßgrößen für das Mischungsverhältnis	101
5.2.1.1. Allgemeine Übersicht der Leistungen flüssiger Kombinationen	102
5.2.2. Leistungen mit Flüssigsauerstoff (LOX), Flüssigfluor und OF_2	103
5.2.3. Ozon als Oxydator	108
5.2.4. Sauerstoffträger als Oxydatoren	109
5.2.5. Fluorträger als Oxydatoren	110
5.2.6. Boran-Hydrazinkombinationen als Raketentreibstoffe („BN-Konzept“)	112
5.2.7. Leistungsdaten monergoler Flüssigtreibstoffe	113
5.3. Andere raketentechnisch wichtige Eigenschaften flüssiger Treibstoffe	114
5.3.1. Physikalische Eigenschaften	114
5.3.2. Chemische Eigenschaften, Stabilität, Lagerfähigkeit, Handhabungssicherheit und Zündverhalten	115
5.3.3. Preis und Beschaffung	117
Literatur.	117
6. Festtreibstoffe	118
6.1. Allgemeines und Einteilung	118
6.1.1. Gestalt und Anordnung der Treibsätze (Treibsatzformen und -geometrie)	119
6.1.2. Einteilung der Festtreibstoffe	120
6.2. Homogene Treibstoffe	120
6.2.1. Zusammensetzung	120
6.2.2. Herstellungsverfahren	123
6.3. Heterogene Treibstoffe	125
6.3.1. Oxydatoren	125
6.3.2. Brennstoffbinder	126
6.3.2.1. Allgemeines	126
6.3.2.2. Treibstoffe mit Bindern linearer Struktur	129
6.3.2.3. Treibstoffe mit vernetzten Bindern	129
6.3.3. Zusätze	130
6.3.4. Herstellungsverfahren heterogener Treibstoffe	130
6.4. Empirische Grundlagen des Abbrandes von Festtreibstoffen	142
6.4.1. Die Abbrandgeschwindigkeit (r)	142
6.4.1.1. Druckabhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit	142
6.4.1.2. Temperaturabhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit	143

	Seite
6.4.1.3. Einfluß der Gasgeschwindigkeit auf die Abbrandgeschwindigkeit („Erosiver Abbrand“)	144
6.4.1.4. Empirische Daten über die Abbrandgeschwindigkeit verschiedener Treibstoffe	145
6.4.2. Abbrandkurven (Aufnahme und Auswertung)	146
6.5. Leistungsdaten von Festtreibstoffen	148
6.6. Mechanische Eigenschaften von Festtreibstoffen; Handhabung, Alterungsbeständigkeit, Zündung, Isolierung und Preis.	152
6.6.1. Mechanische Eigenschaften	152
6.6.2. Explosionssicherheit und Handhabung	154
6.6.3. Alterungsbeständigkeit	154
6.6.4. Zündung und Isolierung von Festtreibstoffen	155
6.6.4.1. Zündung von Festtreibstoffen	155
6.6.4.2. Isolierung der Treibsätze	156
6.6.5. Kosten und Beschaffung	156
6.7. Abbrandtheorien	157
6.7.1. Qualitative Vorstellungen über den Abbrand homogener Treibstoffe	158
6.7.2. Aufstellung der Grundgleichungen für den Abbrand homogener Treibsätze	160
6.7.3. Die Theorie von Rice und Ginell für den Abbrand homogener Treibsätze	162
6.7.4. Die Abbrandtheorie von Johnson und Nachbar	164
6.7.5. Qualitative Vorstellungen über den Abbrand heterogener Treibstoffe.	166
6.7.6. Die Theorie von Summerfield (Abbrand von Perchlorat-Compositen)	166
6.7.7. Das Sandwichmodell und die Theorie von Nachbar	169
6.7.8. Die Untersuchungen von Barrère und Nadaud	170
6.7.9. Die Abbrandtheorie von Chaiken und Anderson	170
6.7.10. Die Arbeiten von Friedman und Levy	174
6.8. Pastöse Treibstoffe	174
Literatur.	176
7. Lithergole Kombinationen und Antriebe	178
7.1. Allgemeines	178
7.1.1. Verschiedene Typen und Varianten lithergoler Antriebe	178
7.2. Die Verbrennungsvorgänge in Lithergol-Systemen.	179
7.3. Experimentelle Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit	182
7.4. Theorie der lithergolen Verbrennung	183
7.5. Stand der experimentellen Untersuchungen	187
7.6. Leistungsdaten lithergoler Kombinationen	188
Literatur.	190
8. Zusammenspiel Motor-Treibstoff	191
8.1. Unterschiede zwischen theoretischer und experimenteller Leistung	192
8.2. Einspritzsystem, Verbrennungswirkungsgrad und Brennkammergeometrie	193
8.2.1. Das Einspritzsystem.	193
8.2.2. Verbrennung und Strömung	195
8.2.3. Brennkammergeometrie	198
8.3. Düsenformen und Auslegung	201
8.3.1. Konische und parabolische Lavaldüsen	201
8.3.2. Ringhalsdüsen	203
8.3.2.1. Ringhalsdüse mit Parabolkegel (Spike Nozzle)	203
8.3.2.2. Ringhalsdüse mit geradem Kegel (Plug Nozzle)	203
8.3.2.3. E-D-Düse (Expansion-Deflection Nozzle)	203
8.3.2.4. Laval-Ringdüse (Shrouded Plug Nozzle)	204
8.3.2.5. Vorteile und Zukunftsaussichten der Ringhalsdüsen	204
8.3.2.6. Einfluß der Treibstoffwahl auf die Düsenkonstruktion	205
8.4. Wärmeübergänge und Kühlsysteme	206
8.5. Instabilitäten bei der Verbrennung	209
8.5.1. Niederfrequente Schwingungen	210
8.5.2. Hochfrequente Schwingungen.	212
8.5.3. Schwingungen in Feststoffraketen	213
8.5.4. Mittel zur Unterdrückung oder Verhinderung von Verbrennungsinstabilitäten	213
8.6. Einfluß der Treibstoffdichte auf Triebwerkskonstruktion und -leistung.	214
Literatur.	216

	Seite
9. Möglichkeiten der Leistungssteigerung durch Anwendung hochenergetischer Treibstoffe	218
9.1. Derzeitiger Stand der chemischen Antriebstechnik und die sich daraus ergebende Aufgabenstellung	219
9.2. Gesichtspunkte bei der Auswahl und Komposition von Hochleistungstreibstoffen	223
9.3. Steigerungsmöglichkeiten bei Oxydatoren	224
9.4. Steigerungsmöglichkeiten bei Brennstoffen (Verwendung von Leichtmetallen und deren Hydriden)	226
9.5. Probleme beim praktischen Einsatz leistungssteigernder Brennstoffzusätze	230
9.6. Leistungssteigerung bei Festtreibstoffen	232
9.6.1. Leistungserhöhung bei homogenen (doppelbasigen) Pulvern	232
9.6.2. Leistungserhöhung bei heterogenen (Composite-)Pulvern	232
9.6.2.1. Steigerung bei Oxydatoren	233
9.6.2.2. Leistungserhöhung bei Bindern und Weichmachern	233
9.6.2.3. Leistungserhöhung durch Zusatz von Leichtmetallen	234
9.7. Zusammenfassende Übersicht	235
Literatur	238
10. Experimentelle Bestimmung raketentechnisch wichtiger physikalischer und chemischer Eigenschaften	239
10.1. Hypergolität und Messung des Zündverzuges	239
10.1.1. Theoretische Betrachtungen zum Mechanismus der hypergolen Zündung	241
10.1.2. Qualitative Analyse des Zündvorganges	245
10.1.3. Methoden zur Messung des Zündverzuges	247
10.1.3.1. Die Tropfenmethode und deren Variationen	247
10.1.3.2. Die Methode der zusammengespritzten Strahlen	249
10.1.3.3. Messung des Zündverzuges nach Pino	253
10.1.3.4. Messung des Zündverzuges in Mikrobrennkammern	253
10.1.3.5. Dreikolbenapparatur nach Kilpatrick und Baker (Bombenmethode)	255
10.1.4. Allgemeine Ergebnisse der Zündverzugs-Messungen; Einfluß der verschiedenen Parameter	257
10.2. Experimentelle Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit von Festtreibstoffen	261
10.2.1. Bestimmung von r in der Crawford-Bombe	261
10.2.2. Bestimmung von r in Normbrennkammern	263
10.3. Messung der Leistung monergoler Treibstoffe in der ballistischen Bombe	265
10.4. Korngrößenmessungen und -klassifizierung bei Bestandteilen heterogener Raketepulver	267
10.4.1. Siebanalyse	267
10.4.2. Windsichtung	269
10.4.3. Sedimentationsanalyse	270
10.4.4. Mikroskopische Feinheitsbestimmung	273
10.5. Messung der Stoß- und Detonationsempfindlichkeit von Treibstoffen	273
10.6. Messung einiger raketentechnisch wichtiger physikalischer Eigenschaften	274
10.6.1. Bestimmung des Schmelzdiagramms binärer Systeme	275
10.6.2. Dampfdruckbestimmung	275
10.6.2.1. Statische Methoden	275
10.6.2.2. Dynamische Methode	277
10.6.3. Dichtebestimmung	277
10.6.4. Bestimmung der Viskosität	279
10.6.4.1. Ostwald- bzw. Ubbelohde-Viskosimeter	279
10.6.4.2. Höppler-Viskosimeter	279
10.6.5. Wärmeleitfähigkeitsmessungen	280
10.6.5.1. Messung der Wärmeleitfähigkeit fester Stoffe	281
10.6.5.2. Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten	283
10.6.5.3. Messung der Wärmeleitfähigkeit von Gasen	284
Literatur	284
Spezieller Teil	
Einleitung zum speziellen Teil (Kapitel 11 bis 15)	289
11. Oxydatoren	289
11.1. Fluor	289
11.1.1. Herstellung von Fluor	290

	Seite
11.4.3.2. Detonation von gasförmigem Ozon	376
11.4.3.3. Langsamer Abbrand von flüssigem oder festem Ozon	378
11.4.3.4. Detonation von flüssigem Ozon	378
11.4.3.5. Chemische Reaktivität von Ozon	380
11.4.3.6. Analyse von Ozon	380
11.4.4. Baumaterialien für den Umgang mit Ozon	381
11.4.5. Umgang mit Ozon und Ozon-Sauerstoff-Mischungen	382
11.4.6. Toxische Eigenschaften von Ozon	383
11.4.7. Ozonmischungen mit anderen Oxydatoren	384
11.5. Wasserstoffperoxyd	385
11.5.1. Herstellung von Wasserstoffperoxyd	386
11.5.2. Physikalische Eigenschaften von Wasserstoffperoxyd	386
11.5.3. Chemische Eigenschaften von Wasserstoffperoxyd	392
11.5.3.1. Langsame Zersetzung in flüssiger Phase	392
11.5.3.2. Langsame Zersetzung in der Dampfphase	394
11.5.3.3. Explosion und Abbrand von Wasserstoffperoxyd	394
11.5.3.4. Analyse von Wasserstoffperoxyd	397
11.5.4. Baumaterialien für Wasserstoffperoxyd	397
11.5.5. Umgang mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxyd	401
11.5.6. Toxische Eigenschaften von Wasserstoffperoxyd	404
11.6. Stickstoffoxyde	405
11.6.1. Distickstofftrioxyd	405
11.6.2. Distickstofftetroxyd	406
11.6.2.1. Physikalische Eigenschaften von Distickstofftetroxyd	406
11.6.2.2. Chemische Eigenschaften von Distickstofftetroxyd	410
11.6.2.3. Analyse von Distickstofftetroxyd	411
11.6.2.4. Baumaterialien für Distickstofftetroxyd	412
11.6.2.5. Umgang mit Distickstofftetroxyd	414
11.6.2.6. Toxische Eigenschaften von Distickstofftetroxyd	417
11.6.2.7. Treibstoffmischungen mit Distickstofftetroxyd	418
11.6.3. Distickstoffpentoxyd	424
11.6.3.1. Physikalische Eigenschaften von Distickstoffpentoxyd	425
11.6.3.2. Chemische Eigenschaften von Distickstoffpentoxyd	425
11.6.3.3. Mischungen mit N ₂ O ₅ als Raketentreibstoff	426
11.6.4. Stickstofftrioxyd	427
11.7. Salpetersäure	427
11.7.1. Physikalische Eigenschaften von Salpetersäure	428
11.7.2. Chemische Eigenschaften von Salpetersäure	438
11.7.3. Analyse und Reinheitskontrolle	442
11.7.3.1. Weißrauchende Salpetersäure	442
11.7.3.2. Rotrauchende Salpetersäure	443
11.7.4. Baumaterialien für Salpetersäure	444
11.7.4.1. Metalle	444
11.7.4.2. Korrosion durch Salpetersäure	445
11.7.4.3. Nichtmetalle	447
11.7.4.4. Konstruktionsteile für den Umgang mit Salpetersäure	448
11.7.5. Umgang mit rauchender Salpetersäure	448
11.7.6. Toxische Eigenschaften von Salpetersäure	450
11.7.7. Mischsäure	450
11.8. Organische Oxydatoren	451
11.8.1. Nitromethan	451
11.8.1.1. Physikalische Eigenschaften von Nitromethan	451
11.8.1.2. Chemische Eigenschaften von Nitromethan	452
11.8.1.3. Baumaterialien für Nitromethan	453
11.8.1.4. Umgang mit Nitromethan	453
11.8.1.5. Toxische Eigenschaften von Mononitroalkanen	453
11.8.2. Tetranitromethan	453
11.8.2.1. Physikalische Eigenschaften von Tetranitromethan	454
11.8.2.2. Chemische Eigenschaften von Tetranitromethan	455
11.8.2.3. Baumaterialien für Tetranitromethan	455

	Seite
11.8.2.4. Toxische Eigenschaften von Tetranitromethan	455
11.8.2.5. Treibstoffmischungen mit Tetranitromethan	455
11.8.3. Höhere Nitroalkane	456
11.8.4. Äthylnitrat	457
11.8.5. n-Propylnitrat	457
11.8.5.1. Physikalische Eigenschaften von n-Propylnitrat	457
11.8.5.2. Chemische Eigenschaften von n-Propylnitrat	458
11.8.5.3. Baumaterialien für n-Propylnitrat	458
11.8.5.4. Umgang mit n-Propylnitrat	458
11.8.6. Höhere Alkylnitrate	459
11.8.7. Andere organische Treibstoffe	459
11.9. Feststoffoxydatoren	459
11.9.1. Nitrosyl- und Nitylderivate	460
12. Brennstoffe	461
Anorganische Brennstoffe	461
12.1. Wasserstoff	461
12.1.1. Vorkommen, Herstellung und Verflüssigung	461
12.1.2. Physikalische Eigenschaften von Wasserstoff	463
12.1.3. Wärmeübergang an flüssigen und gasförmigen Wasserstoff	471
12.1.3.1. Wärmeübergang im Bereich freier Konvektion	471
12.1.3.2. Einfluß der Gravitation auf die Wasserstoffverdampfung	472
12.1.3.3. Wärmeübergang im Bereich erzwungener Konvektion	472
12.1.3.4. Wärmeübergang an Wasserstoffgas	474
12.1.3.5. Wärmeübergang an Wasserstoff im überkritischen Zustand bei erzwungener Konvektion	475
12.1.3.6. Wärmeübergang an kritischen Wasserstoff ohne Konvektion	475
12.1.3.7. Praxis des Wärmeübergangs an flüssigen Wasserstoff	475
12.1.4. Chemische Eigenschaften und Analyse von Wasserstoff	476
12.1.5. Baumaterialien für Wasserstoff	476
12.1.5.1. Metalle	476
12.1.5.2. Wärmeisolation	477
12.1.5.3. Andere Baumaterialien	479
12.1.6. Umgang mit flüssigem Wasserstoff	480
12.1.6.1. Lagerung	480
12.1.6.2. Transport von flüssigem Wasserstoff	485
12.1.6.3. Wasserstofftanks für freifliegende Raketen	486
12.1.6.4. Umfüllen und Fördern von flüssigem Wasserstoff	486
12.1.6.5. Armaturen	490
12.1.7. Gefahren beim Umgang mit Flüssigwasserstoff	492
12.1.8. Toxische Eigenschaften	494
12.2. Metalle der 1. und 2. Reihe des Periodensystems sowie deren Hydride	494
12.2.1. Lithium	495
12.2.1.1. Elementares Lithium	495
12.2.1.2. Lithiumhydrid	495
12.2.2. Beryllium	496
12.2.2.1. Elementares Beryllium	496
12.2.2.2. Berylliumhydrid	497
12.2.2.3. Toxische Eigenschaften von Beryllium und Berylliumverbindungen	497
12.2.2.4. Handhabung und Umgang mit Beryllium und Berylliumverbindungen	498
12.2.2.5. Anwendung von Beryllium als Raketentreibstoff	499
12.2.3. Bor	500
12.2.3.1. Elementares Bor	500
12.2.3.2. Borane	500
12.2.4. Natriumhydrid	507
12.2.5. Magnesiumhydrid	507
12.2.6. Aluminiumhydrid und komplexe Aluminiumhydride	507
12.3. Ammoniak	507
12.3.1. Physikalische Eigenschaften von Ammoniak	508
12.3.2. Chemische Eigenschaften von Ammoniak	513
12.3.3. Analyse und Reinheitskontrolle von Ammoniak	513
12.3.4. Baumaterialien für Ammoniak	514
12.3.5. Umgang mit Ammoniak	514

	Seite
12.3.6. Toxische Eigenschaften von Ammoniak	516
12.3.7. Brennstoffmischungen mit Ammoniak	516
12.3.7.1. Hypergolisierung von Ammoniak durch Zusatz von Alkali- oder Erdalkali- metallen	517
12.3.7.2. Physikalische Eigenschaften des Systems Lithium/Ammoniak	518
12.3.7.3. Hypergolisierung von Ammoniak durch Zumischung hypergolischer Brennstoffe	519
12.4. Hydrazin	520
12.4.1. Herstellung von Hydrazin und Hydrazinhydrat	520
12.4.2. Physikalische Eigenschaften von Hydrazin	522
12.4.3. Chemische Eigenschaften von Hydrazin	527
12.4.4. Analyse und Reinheitskontrolle von Hydrazin	528
12.4.5. Baumaterialien für Hydrazin	530
12.4.5.1. Metalle	530
12.4.5.2. Nichtmetalle	531
12.4.5.3. Bauelemente	532
12.4.6. Umgang mit absolutem Hydrazin	532
12.4.6.1. Reinigung und Passivierung der Anlagen	532
12.4.6.2. Gefahren beim Umgang mit absolutem Hydrazin	533
12.4.6.3. Flammpunkt und Zersetzungstemperatur	533
12.4.6.4. Tankanlagen für Hydrazin	534
12.4.6.5. Schutzkleidung	535
12.4.6.6. Vernichtung von Hydrazin und Löschen von Hydrazinbränden	535
12.4.7. Toxische Eigenschaften von Hydrazin	536
12.4.8. Brennstoffmischungen	537
12.4.8.1. Hydrazin/Ammoniak	537
12.4.8.2. Hydrazin/Alkohole	539
12.4.8.3. Hydrazin/Anilin	539
12.4.8.4. Hydrazin/Hydrazinnitrat	539
12.4.8.5. Andere Zusätze zu Hydrazin	541
Organische Brennstoffe	541
12.5. Kohlenwasserstoffe	541
12.5.1. Alkane	541
12.5.1.1. Spezifikationen und physikalische Eigenschaften	543
12.5.1.2. Sonstige Eigenschaften	548
12.5.1.3. Explosionsgrenzen	548
12.5.1.4. Umgang mit Kohlenwasserstoffen	548
12.5.1.5. Giftigkeit	549
12.5.1.6. Brennstoffmischungen mit Kerosin	549
12.5.1.7. Hypergolisierung von Kerosin	549
12.5.1.8. Metallbeimischung zu Kerosin	550
12.5.2. Cycloaliphatische Kohlenwasserstoffe	550
12.5.3. Olefine und Diene	551
12.5.4. Acetylen und Acetylderivate	551
12.6. Alkohole und Äther	552
12.6.1. Alkohole	552
12.6.1.1. Äthylalkohol	552
12.6.1.2. Furfurylalkohol	553
12.6.2. Äthylenoxyd	554
12.6.2.1. Chemische Eigenschaften von Äthylenoxyd	555
12.6.2.2. Baumaterialien für Äthylenoxyd	555
12.6.2.3. Umgang mit Äthylenoxyd	555
12.6.2.4. Toxische Eigenschaften von Äthylenoxyd	556
12.7. Cyanderivate	556
12.7.1. Dicyan	557
12.7.2. Dicyanacetylen	557
12.7.3. Dicyandiacetylen	557
12.8. Amine	557
12.8.1. Aliphatische Amine mit einem Stickstoffatom im Molekül	558
12.8.1.1. Methylamine	558
12.8.1.2. Äthylamine	559
12.8.1.3. Amine mit größeren Alkylresten	560
12.8.1.4. Imine	560

	Seite
12.8.2. Gesättigte aliphatische Amine mit mehr als einem Stickstoffatom im Molekül	561
12.8.2.1. Äthylendiamin	561
12.8.2.2. Diäthylentriamin	561
12.8.2.3. Hydryne	561
12.8.2.4. Andere aliphatische Amine mit mehr als einem Stickstoffatom im Molekül	563
12.8.3. Ungesättigte aliphatische Amine	563
12.8.4. Aromatische Amine	564
12.8.4.1. Anilin	564
12.8.4.2. Kernmethylierte Anilinderivate	565
12.8.4.3. N-Alkylierte Anilinderivate	565
12.9. Alkylhydrazine	566
12.9.1. Monomethylhydrazin	568
12.9.1.1. Physikalische Eigenschaften von MMH	568
12.9.1.2. Chemische Eigenschaften von MMH	570
12.9.1.3. Analyse von MMH	570
12.9.1.4. Baumaterialien für MMH	571
12.9.1.5. Umgang mit MMH	571
12.9.1.6. Toxische Eigenschaften von MMH	572
12.9.2. Asymmetrisches Dimethylhydrazin	573
12.9.2.1. Herstellung von UDMH	573
12.9.2.2. Physikalische Eigenschaften von UDMH	575
12.9.2.3. Chemische Eigenschaften von UDMH	576
12.9.2.4. Analyse und Reinheitskontrolle von UDMH	577
12.9.2.5. Baumaterialien für UDMH	578
12.9.2.6. Umgang mit UDMH	579
12.9.2.7. Toxische Eigenschaften von UDMH	581
12.9.3. UDMH in Treibstoffmischungen	581
12.9.3.1. Aerozin-50	582
12.9.3.2. Andere Brennstoffmischungen mit UDMH	584
12.9.4. Symmetrisches Dimethylhydrazin	585
12.9.5. Tetraalkyltetrazene	586
12.10. Alkylborane und Alkylaluminiumverbindungen	586
12.10.1. Bortrialkyle	586
12.10.2. Alkyldiborane	588
12.10.3. Alkylpentaborane	588
12.10.4. Alkyldekaborane	589
12.10.5. Borazole, Borazane und Aminoborane	589
12.10.6. Triäthylaluminium	590
13. Monergole Treibstoffe	590
13.1. Wasserstoffperoxyd als monergoler Treibstoff	590
13.1.1. Die exotherme rasche Zersetzung von flüssigem H ₂ O ₂	590
13.1.2. Anwendung von Wasserstoffperoxyd	593
13.1.2.1. Antrieb von Hilfsaggregaten	593
13.1.2.2. Anwendung von H ₂ O ₂ zum Antrieb von Starthilfen	593
13.1.3. Monergole Treibstoffmischungen mit Wasserstoffperoxyd.	594
13.2. Ammoniak, Amine, Nitrate und Salpetersäure als Bestandteil von monergolen Treibstoffmischungen	594
13.3. Hydrazin als monergoler Treibstoff	595
13.3.1. Die Hydrazin-Zersetzungsflamme	597
13.3.2. Katalysatoren für die Hydrazinzerersetzung	598
13.3.3. Praktische Anwendungen von Hydrazintriebwerken	598
13.3.4. Hydrazin mit Zusatz von Oxydationsmitteln als monergoler Treibstoff	600
13.4. Acetylderivate als monergole Treibstoffe	601
13.5. Äthylenoxyd als monergoler Treibstoff	602
13.6. Nitroverbindungen und Alkylnitrate als monergole Treibstoffe	605
13.6.1. Nitromethan als monergoler Treibstoff	606
13.6.1.1. Langsamer Abbrand von flüssigem Nitromethan	606
13.6.1.2. Explosion von Nitromethan	606
13.6.1.3. Anwendung von Nitromethan	607
13.6.2. Tetranitromethan als monergoler Treibstoff	607
13.6.2.1. Explosion von TNM und TNM-Brennstoff-Mischungen.	608
13.6.2.2. Anwendung von monergolen TNM-Treibstoffen	608

	Seite
13.6.3. Höhere Nitroalkane als monergole Treibstoffe	608
13.6.4. Alkylnitrite als monergole Treibstoffe	609
13.6.5. Alkylnitrate als monergole Treibstoffe	609
13.7. Fluorhaltige monergole Treibstoffe	610
14. Flüssige Treibstoffkombinationen	610
14.1. Kombinationen mit Fluor	610
14.1.1. Untersuchung der Verbrennung mit Fluor bei Normaldruck	613
14.1.2. Fluor/Wasserstoff	614
14.1.3. Fluor mit Alkalimetallen	617
14.1.4. Fluor/Diboran	617
14.1.5. Fluor/Pentaboran	617
14.1.6. Fluor/Kohlenwasserstoffe	618
14.1.7. Flüssiges Fluor mit Zusätzen als Oxydator für Kohlenwasserstoffe	618
14.1.7.1. Leistungsberechnungen mit Fluor/Sauerstoff-Gemischen als Oxydator	618
14.1.7.2. Fluor/Sauerstoff-Gemische mit Methan	619
14.1.7.3. Fluor/Sauerstoff-Gemische mit Kerosin JP-4	620
14.1.7.4. Fluor/Sauerstoff mit anderen Brennstoffen	625
14.1.7.5. Fluor/Ozon mit Kerosin JP-4	625
14.1.8. Fluor/Ammoniak	626
14.1.9. Fluor/Hydrazin + Ammoniak-Mischungen	628
14.1.10. Fluor/Hydrazin	631
14.1.11. Fluor mit Alkylhydrazinen	633
14.2. Kombinationen mit Nichtmetallfluoriden	633
14.2.1. Kombinationen mit Chlortrifluorid	633
14.2.1.1. Untersuchung der Verbrennung mit Chlortrifluorid bei Normaldruck	635
14.2.1.2. Chlortrifluorid/Wasserstoff	635
14.2.1.3. Chlortrifluorid/Borwasserstoffe	635
14.2.1.4. Chlortrifluorid/Kohlenwasserstoffe	636
14.2.1.5. Chlortrifluorid/Ammoniak	636
14.2.1.6. Chlortrifluorid/Hydrazin	636
14.2.2. Kombinationen mit Chlorpentafluorid und Brompentafluorid	638
14.2.3. Kombinationen mit Perchlorylfluorid (Chlortrioxylfluorid)	638
14.2.4. Kombinationen mit Stickstofftrifluorid	639
14.2.4.1. Stickstofftrifluorid/Wasserstoff	640
14.2.5. Kombinationen mit Tetrafluorhydrazin	640
14.2.5.1. Tetrafluorhydrazin/Hydrazin	641
14.2.6. Kombinationen mit Sauerstoffdifluorid	642
14.2.6.1. Sauerstoffdifluorid/Wasserstoff	643
14.2.6.2. Sauerstoffdifluorid/Diboran	643
14.2.6.3. Sauerstoffdifluorid/Ammoniak	644
14.2.6.4. Sauerstoffdifluorid/Ammoniak + Hydrazin	645
14.2.6.5. Sauerstoffdifluorid/Hydrazin	645
14.2.6.6. Sauerstoffdifluorid/Monomethylhydrazin	646
14.3. Kombinationen mit Sauerstoff	647
14.3.1. Sauerstoff/Wasserstoff	649
14.3.1.1. Sauerstoff/Wasserstoff-Verbrennung bei Normaldruck	649
14.3.1.2. Leistungsberechnungen der Kombination Sauerstoff/Wasserstoff	650
14.3.1.3. Anwendung von Sauerstoff/Wasserstoff in Raketentriebwerken	651
14.3.1.4. Zündung von Sauerstoff/Wasserstoff-Triebwerken	653
14.3.2. Sauerstoff/Diboran	654
14.3.3. Sauerstoff/Pentaboran	655
14.3.4. Sauerstoff/Metallalkyle	655
14.3.5. Sauerstoff/Kohlenwasserstoffe	657
14.3.5.1. Verbrennung von Sauerstoff/Kohlenwasserstoff bei Normaldruck	657
14.3.5.2. Anwendung von Sauerstoff/Kerosin in Raketentriebwerken	658
14.3.5.3. Sauerstoff/Kerosin mit Metallbeimischung	660
14.3.5.4. Sauerstoff/Acetylen	660
14.3.6. Sauerstoff/Äthylalkohol	660
14.3.7. Sauerstoff/Cyanderivate	661
14.3.8. Sauerstoff/Ammoniak	662
14.3.9. Sauerstoff/Hydrazin	664

	Seite
14.3.10. Sauerstoff/Amine und Sauerstoff/Alkylhydrazine	664
14.3.11. Hypergolisierung von Kombinationen mit Sauerstoff	665
14.3.11.1. Hypergolisierung von Sauerstoff durch Zusatz von Fluor	665
14.3.11.2. Hypergolisierung von Sauerstoff durch Zusatz von Ozonfluorid	665
14.4. Kombinationen mit Ozon	666
14.4.1. Ozon/Wasserstoff	667
14.4.2. Ozon/Kerosin	668
14.5. Kombinationen mit Wasserstoffperoxyd	668
14.5.1. Wasserstoffperoxyd/Wasserstoff	670
14.5.2. Wasserstoffperoxyd/Lithium	670
14.5.3. Wasserstoffperoxyd/Diboran	671
14.5.4. Wasserstoffperoxyd/Pentaboran	671
14.5.5. Wasserstoffperoxyd/Trimethylbor und Wasserstoffperoxyd/Äthyldecaboran	671
14.5.6. Wasserstoffperoxyd/Kohlenwasserstoffe	671
14.5.7. Wasserstoffperoxyd/Ammoniak	672
14.5.8. Wasserstoffperoxyd/Amine	672
14.5.9. Wasserstoffperoxyd/Hydrazin	672
14.5.10. Wasserstoffperoxyd/Hydrazin-Brennstoffmischungen	673
14.5.11. Wasserstoffperoxyd/UDMH	674
14.6. Kombinationen mit Stickstoffoxyden	674
Kombinationen mit Distickstofftetroxyd	675
14.6.1. Distickstofftetroxyd/Wasserstoff	676
14.6.2. Distickstofftetroxyd/Borwasserstoffe	676
14.6.3. Distickstofftetroxyd/Kohlenwasserstoffe	676
14.6.4. Distickstofftetroxyd/Ammoniak	677
14.6.5. Distickstofftetroxyd/Hydrazin	678
14.6.6. Distickstofftetroxyd/Aerozin-50	680
14.6.7. Distickstofftetroxyd/Monomethylhydrazin (MMH)	681
14.6.8. Distickstofftetroxyd/asymm. Dimethylhydrazin	682
14.7. Kombinationen mit Salpetersäure	682
14.7.1. Kombinationen mit rotrauchender Salpetersäure	682
14.7.1.1. Rotrauchende Salpetersäure/Kohlenwasserstoffe	683
14.7.1.2. Rotrauchende Salpetersäure/Kerosin + UDMH	683
14.7.1.3. Rotrauchende Salpetersäure/Ammoniak	684
14.7.1.4. Rotrauchende Salpetersäure/Amine	684
14.7.1.5. Rotrauchende Salpetersäure/Hydrazin	684
14.7.1.6. Rotrauchende Salpetersäure/UDMH	684
14.7.2. Treibstoffkombinationen mit weißrauchender Salpetersäure als Oxydator	685
14.7.2.1. Weißrauchende Salpetersäure/Gesättigte Kohlenwasserstoffe	685
14.7.2.2. Weißrauchende Salpetersäure/Kerosin + UDMH	687
14.7.2.3. Hypergolisierung von weißrauchender Salpetersäure/Kerosin durch Zusatz von Leichtmetallhydriden	687
14.7.2.4. Weißrauchende Salpetersäure/Ungesättigte Kohlenwasserstoffe	688
14.7.2.5. Weißrauchende Salpetersäure/Äthylalkohol	689
14.7.2.6. Weiß- bzw. rotrauchende Salpetersäure/Furfurylalkohol	689
14.7.2.7. Salpetersäure/Vinyläther	689
14.7.2.8. Weißrauchende Salpetersäure/Ammoniak	689
14.7.3. Treibstoffkombinationen von Salpetersäure mit Aminen	690
14.7.3.1. Salpetersäure/Methylamine	690
14.7.3.2. Salpetersäure/Äthylamine	691
14.7.3.3. Salpetersäure/Cyclische Amine	695
14.7.3.4. Salpetersäure/Amine mit mehreren N-Atomen im Molekül	695
14.7.3.5. Salpetersäure/Ungesättigte Amine	696
14.7.3.6. Salpetersäure/Aromatische Amine	696
14.7.4. Chemismus der hypergolen Zündung von Aminen	700
14.7.5. Andere Kombinationen mit Salpetersäure	702
14.7.5.1. Weißrauchende Salpetersäure/Hydrazin	702
14.7.5.2. Salpetersäure/Asymm. Dimethylhydrazin	703
14.7.5.3. Weißrauchende Salpetersäure/Mercaptane, Thioester und Phosphine	703
14.8. Kombinationen mit Nitroalkanen	705
14.9. Kombinationen mit Boranen und Hydrazin	705

	Seite
15. Lithergole Kombinationen	706
15.1. Lithergole Kombinationen mit Fluor	706
15.1.1. Fluor/Lithium	707
15.1.2. Fluor/Lithiumhydrid	707
15.1.3. Fluor/Bor	707
15.2. Lithergole Kombinationen mit Nichtmetallfluoriden	707
15.2.1. Chlortrifluorid/Bor	709
15.2.2. Chlortrifluorid/Organische Polymere	709
15.3. Lithergole Kombinationen mit Sauerstoff	709
15.4. Lithergole Kombinationen mit Wasserstoffperoxyd	709
15.4.1. Wasserstoffperoxyd/Polyäthylen	710
15.5. Lithergole Kombinationen mit Stickstoffoxyden und Salpetersäure	711
15.5.1. Lithergole Kombinationen mit Distickstofftetroxyd	711
15.5.2. Lithergole Kombinationen mit Salpetersäure	711
15.5.2.1. Salpetersäure/Organische Polymere	712
15.5.2.2. Salpetersäure/Polyäthylen	712
15.5.2.3. Salpetersäure/Polystyrol	712
15.5.2.4. Salpetersäure/Amine	713
15.6. Andere Lithergol-Kombinationen	713
15.6.1. Lithergole Kombinationen mit Nitroverbindungen	713
15.6.2. Inverse Lithergol-Kombinationen	713
15.6.3. Zusatzeinspritzung von Oxydatoren zu Festtreibstoffen	713
Literaturverzeichnis zum speziellen Teil	715
Namenverzeichnis	776
Sachverzeichnis	797

Symbolverzeichnis

<p><i>a</i> Schallgeschwindigkeit <i>A</i> Fläche <i>b</i> Beschleunigung <i>B</i> magnetische Induktion <i>B</i> Wärmeübergangsfaktor <i>c</i> Lichtgeschwindigkeit <i>c</i> wirksame Ausströmungsgeschwindigkeit <i>c*</i> charakteristische Geschwindigkeit <i>c_p</i> spezifische Wärme bei konstantem Druck (bezogen auf 1 g) <i>c_v</i> spezifische Wärme bei konstantem Volumen (bezogen auf 1 g) <i>C_F</i> Schubkoeffizient <i>C_D</i> Massenflußfaktor <i>C_p</i> spezifische Wärme bei konstantem Druck (bezogen auf 1 Mol) <i>C_v</i> spezifische Wärme bei konstantem Volumen (bezogen auf 1 Mol) <i>C_i</i> spezifische Wärme bei konstantem Druck der Substanz mit Index <i>i</i> (bezogen auf 1 Mol) <i>d</i> Durchmesser <i>D</i> Diffusionskoeffizient <i>E</i> Energie <i>E</i> Aktivierungsenergie <i>E</i> E-Modul <i>F</i> Schub <i>g</i> Gibbssches Potential/g <i>g</i> Erdbeschleunigung <i>G</i> Gibbssches Potential/Mol <i>Gr</i> Grasshoff-Zahl <i>h</i> Enthalpie der Masseneinheit <i>h</i> Plancksches Wirkungsquantum <i>h</i> Wärmeübergangskoeffizient <i>H</i> Enthalpie/Mol <i>I</i> Stromstärke <i>I_s</i> spezifischer Impuls <i>I_d</i> volumspezifischer Impuls <i>j</i> Stromdichte <i>j</i> Colburn Modul <i>k</i> Geschwindigkeitskonstante <i>K</i> Gleichgewichtskonstante <i>K</i> Klemmung (A_b/A_t) <i>L*</i> charakteristische Länge <i>m</i> Masse <i>ṁ</i> Massendurchsatz <i>m_i</i> Startmasse <i>m_f</i> Masse bei Brennschluß <i>m_T</i> Triebwerksmasse <i>M̄</i> mittleres Molekulargewicht <i>M</i> Machzahl <i>n</i> Molzahl <i>N</i> Leistung <i>Nu</i> Nusseltzahl <i>p</i> Druck <i>Pr</i> Prandtlzahl <i>q</i> Wärmemenge <i>Q</i> Reaktionsenthalpie</p>	<p><i>r</i> Mischungsverhältnis <i>r</i> Abbrandgeschwindigkeit (Feststoffe) <i>r</i> Wärmerückführungskoeffizient <i>i</i> Regressionsgeschwindigkeit (Lithergole) <i>R</i> Gaskonstante <i>R_o</i> universelle Gaskonstante <i>Re</i> Reynoldszahl <i>s</i> Entropie/g <i>S</i> Entropie/Mol <i>St</i> Stantonzahl <i>t</i> Zeit <i>T</i> Temperatur <i>u</i> Nutzlastverhältnis <i>U</i> elektrische Spannung <i>v</i> Geschwindigkeit <i>v_f</i> Geschwindigkeit bei Brennschluß <i>V</i> Volumen (pro Mol) <i>w</i> Ausströmungsgeschwindigkeit</p> <p><i>α</i> spezifische Strahlleistung <i>β</i> Verhältnis Geschwindigkeit/Lichtgeschwindigkeit <i>Γ</i> f (<i>κ</i>) <i>ε</i> Partikelladung <i>ε</i> Düsenquerschnittsverhältnis <i>ε</i> Dehnung <i>η</i> Wirkungsgrad <i>κ</i> Adiabatenkoeffizient <i>λ</i> Oxydatorüberschußverhältnis <i>λ</i> Wärmeleitfähigkeit <i>λ</i> Wellenlänge <i>μ</i> Partikelmasse <i>μ</i> Viskosität <i>ν</i> Frequenz <i>ν_i</i> stöchiometrischer Koeffizient <i>ξ_b</i> Qualitätsfaktor c^*_{exp}/c^*_{theor} <i>ξ_F</i> „ F_{exp}/F_{theor} <i>ξ_Q</i> „ $I_{s, exp}/I_{s, theor}$</p> <p><i>ρ</i> Dichte <i>σ</i> Spannung <i>τ</i> Antriebsdauer <i>τ</i> Zündverzug <i>Φ</i> Mischungsverhältnis <i>Φ*</i> Gleichwertigkeitsverhältnis <i>Φ_i</i> stöchiometrisches Mischungsverhältnis <i>Φ</i> Wärmeübergang</p> <p style="text-align: center;">Indices</p> <p><i>c</i> Brennkammer <i>e</i> Düsenende <i>exp</i> experimentell <i>g</i> Gas <i>i</i> Anfang <i>l</i> flüssig <i>s</i> fest <i>t</i> Düsenhals <i>th</i> theoretisch <i>w</i> Wand</p>
--	---