
Alternative Antriebe für Automobile

Cornel Stan

Alternative Antriebe für Automobile

Hybridsysteme, Brennstoffzellen,
alternative Energieträger

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Cornel Stan
Forschungs- und Transferzentrum e.V.
Westfälische Hochschule Zwickau
Zwickau, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Cornel Stan
Professor an den Universitäten Berkeley, Paris, Pisa, Perugia, Kronstadt
und an der Westfälischen Hochschule Zwickau

ISBN 978-3-662-48511-8 ISBN 978-3-662-48512-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48512-5

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, 2008, 2012, 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort

„Proportion ist in jeder Kraft, welche immer es sei“

Leonardo da Vinci (1452 – 1519)

... welche immer es sei, die Proportion oder die Kraft?

Das seit einigen Jahren meist debattierte Thema in der Kraftfahrzeugtechnik ist der Zukunftsantrieb.

Meinungen, Interessenlager, sogar nationale Trends zeigen eine Divergenz, die kaum zu übertreffen ist: Eine oft vertretene Richtung ist, dass der klassische, bewährte Kolbenmotor in der jetzigen Form noch mindestens 30-40 Jahre als Antrieb für Automobile bestehen wird. Diese Richtung zeigt zumindest eine Konvergenz mit einigen Prognosen, nach denen das Erdöl so gut wie unerschöpflich sei, obwohl andere Trends von einer Ressourcenbegrenzung auf 30-36 Jahre ausgehen. Ungeachtet dessen, setzen die Einen voll auf Wasserstoff als absolute Lösung für die Zukunft – obwohl derzeit Wasserstoff fast ausschließlich aus einem fossilen Energieträger hergestellt wird – aber auch dort sind die Richtungen geteilt: Wasserstoff im Verbrennungsmotor oder in der Brennstoffzelle? Die Anderen sehen Alkohole und Pflanzenöle als die bessere Alternative. In den USA und in Japan gewinnen Hybridantriebe, gebildet von Elektro- und Ottomotor, eindeutig an Popularität, was die wachsende Modellpalette und die Verkaufszahlen belegen; in Europa wird der Hybrid dagegen so gut wie abgelehnt, es wird als Alternative auf die Weiterentwicklung des Diesel-

motors gesetzt, der wiederum in den USA und in Japan keine Akzeptanz findet.

Die Meinungen sind in einer Richtung – der Kenngrößen des zukünftigen Antriebs – einig: Große Leistung, hohes Drehmoment, geringer Verbrauch, extrem stark verringerte Schadstoffe, geringe Masse und Abmessungen, geringe Kosten.

Ein universell einsetzbarer Antrieb der Zukunft ist genauso unwahrscheinlich wie ein universell einsetzbares Automobil, anstatt der Vielfalt von der Kompakt- bis zur Oberklasse. Erkennbar ist jedoch eindeutig die Tendenz zu einem effizienten Energiemanagement zwischen Antrieb und Energieversorgung an Bord des Automobils. Die modulare Funktionsverteilung innerhalb des Energiemanagements führt oft zu einem Rollenaustausch, der neue Potentiale aufdeckt: Die Rolle der Brennstoffzelle als moderner Stromerzeuger für einen Elektroantrieb kann sehr effizient auch von einem Wankel- oder Zweitaktmotor im Stationärbetrieb erfüllt werden; Wasserstoff kann durch Umwandlung aus einem Alkohol an Bord möglicherweise effektiver als die kryogene Speicherung sein.

Ziel des Buches ist es, auf Basis fundierter Kriterien zur Qualität eines Antriebs - wie Leistungsdichte, Drehmomentverlauf, Beschleunigungscharakteristik, spezifischer Energieverbrauch sowie Emission chemischer Stoffe und Geräusche – als auch umrahmender Kriterien – wie Verfügbarkeit, Umweltverträglichkeit und Speicherfähigkeit vorgesehener Energieträger sowie technische Komplexität, Kosten, Sicherheit, Infrastruktur und Service, die Bewertung, Gestaltung und Optimierung alternativer Antriebe für Automobile zu ermöglichen.

Die Struktur des Buches weist horizontale Ebenen und vertikale Säulen auf:

- Die horizontalen Ebenen entstehen durch zum Teil alternative Kombinationen von Antriebsmodulen, Energieträgern sowie Energiewandlern und -speichern, nach Szenarien, welche die aufgestellten Bewertungskriterien – von der Umweltverträglichkeit bis zur technischen Umsetzbarkeit – konsequent verfolgen.
- Die vertikalen Säulen gehen von der Prozessanalyse innerhalb einer gegebenen Konfiguration über ihre funktionellen und technischen Besonderheiten bis hin zu Einsatz- und Ergebnisbeispielen.

Diese Struktur wurde im Sinne einer ausreichenden Übersichtlichkeit komplexer Energiemanagement-Systeme im Automobil entwickelt: Die Elemente in der horizontalen Ebene, ihre Definition, Betonung und einige

besonderen Verknüpfungen entstanden insbesondere durch interaktive Arbeit mit Studenten, im Rahmen der Vorlesungsreihe „Alternative Antriebe für Automobile“, die der Autor seit 1992 an mehreren Universitäten in Europa und in den USA hält, weiterentwickelt und ständig aktualisiert. Die vertikalen Säulen wurden in vielen Fällen auf Forschungskooperationsvorhaben mit Industriepartnern aufgebaut – einige Beispiele sind im Literaturverzeichnis aufgeführt – die daraus abgeleiteten Erfahrungen sind für eine solches Vorhaben so gut wie unerlässlich gewesen.

Durch die Verknüpfung theoretischer Grundlagen, der Analyse von Potentialen und Grenzen sowie zahlreicher Ausführungsbeispiele wird den Forschungs- und Entwicklungsingenieuren der Automobilindustrie, den Studenten der Kraftfahrzeugtechnik, aber auch den vom Automobil begeisterten Nicht-Technikern eine Basis zur Bewertung der Entwicklungstrends der automobilen Antriebe geboten. Darüber hinaus wurden einige an sich bekannten Funktionsmodule in etwas unerwarteter Form verbunden, woraus interessante Ansätze entstanden: Der Autor hat sie jeweils bis zu einer gewissen Konfiguration geführt, allerdings – fest überzeugt von ihrem praktischen Nutzen – ihre weitere, konkrete Gestaltung in manchen Fällen der Kreativität des Lesers, als Investition in die Zukunft überlassen.

Vorwort zur 2. Auflage

Die Dynamik der Entwicklung auf dem Gebiet der Alternativen Antriebe für Automobile hat in den drei Jahren zwischen der 1. und der 2. Auflage dieses Buches erheblich zugenommen, zahlreiche neue Konzepte und technische Lösungen belegen diesen Trend. Im Zusammenhang mit den geplanten Gesetzen zur deutlichen Senkung der Kohlendioxidemission, mit der drastischen Limitierung der Schadstoffemissionen, aber auch mit dem rapiden Anstieg der Kraftstoffpreise steht diese Thematik auch im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses.

Sowohl die neusten Entwicklungskonzepte als auch die politischen, wirtschaftlichen und sozialen Analysen und Trends bestätigen die Prognose im Vorwort zur 1. Auflage dieses Buches: ein universeller Antrieb wird genauso unwahrscheinlich sein wie ein universell einsetzbares Automobil – die Vielfalt zwischen Kompakt- und Oberklasse wird eher zunehmen, was eine entsprechende Diversifizierung der Antriebsformen impliziert. Internationale Fachveranstaltungen in den letzten drei Jahren zeigen über die Antriebsanpassung an Fahrzeugklassen hinaus eine klare Tendenz zu regionspezifischen Lösungen.

Einige Aussagen von Automobilherstellern auf der 1. Internationalen Konferenz „Alternative Antriebe für Automobile“, die im Jahr 2007 in Berlin, vom Verfasser dieses Buches, zusammen mit Prof. G. Cipolla / General Motors, veranstaltet wurde bekräftigen diese Tendenz:

- Voll-Hybrid ist vorteilhaft für Stadtfahrten, Diesel ist besser auf Landstraße und Autobahn (Toyota).
- Wir bauen Hybridantriebe nur für den US-Markt, Diesel ist in den USA nicht realistisch, in Europa jedoch vorteilhaft (Ford).
- Two Mode Hybrid, entwickelt in Kooperation von General Motors, Daimler und BMW wird nur in den USA angeboten; in Europa ist Diesel eben vorteilhafter; Diesel ist empfehlenswert für Indien, aber nicht für China und USA (General Motors).
- Mikro- und Mild-Hybride werden den Markt erobern, wobei es eine klare Preisdifferenzierung geben wird: Mirco-Hybride mit 5-6kW für

300-800€, Mild-Hybride mit 10-20kW für 1000-2000€. Voll-Hybride werden wegen ihres hohen Preises – 4000-8000€ - nur für Nischenanwendungen in Frage kommen. (AUDI, BMW, Daimler, Ford, General Motors).

Ausgehend von den erwähnten Tendenzen wurden in der 2. Auflage dieses Buches zahlreiche repräsentative Entwicklungen neusten Datums in den Bereichen Antriebssysteme und ihre Kombinationen, neue Energieträger, Energiewandler und Energiespeicher hinzugefügt.

Darüber hinaus wurden zeitabhängige Daten und Trends in allen Kapiteln des Buches aktualisiert.

Juni 2008

Cornel Stan

Vorwort zur 3. Auflage

Die Diversifizierung der Automobiltypen und -klassen entsprechend der natürlichen, wirtschaftlichen, technischen und sozialen Umgebungsbedingungen wurde in den vergangenen Jahrzehnten immer ausgeprägter. Diese Entwicklung verlangt nach Antriebssystemen, die dem jeweiligen Einsatz gerecht sind und nicht nach einer universellen Antriebsart. Der Autor hat in den letzten 20 Jahren, durch intensive und extensive Erfahrungen in Lehre und Forschung diesen zunehmenden Trend begleitet.

Während der Zeit, als die erste Auflage des Buches Alternative Antriebe für Automobile in Vorbereitung war, stand das Drei-Liter-Auto und demzufolge der Antriebsverbrennungsmotor mit geringem Verbrauch im Mittelpunkt – eine Diversifizierung der zukünftigen Antriebe war noch kein populäres Thema.

Während der Zeit, als die zweite Auflage in Vorbereitung war, avancierte der Hybridantrieb für viele wirtschaftliche, politische und zum Teil auch technische Kreise zur Universallösung für die Kraftfahrzeugtechnik.

Während der Vorbereitung dieser dritten Auflage wurde das Elektroauto von den gleichen Kreisen zum Retter der allgemeinen Straßenmobilität deklariert. Erfahrungen werden eben stufenweise gewonnen. Gegenwärtig wird die Vielzahl der automobilen Antriebe als solche erkannt, allerdings noch zu oft verkannt und als Konzeptlosigkeit verstanden.

Umso mehr wurden bei der Gestaltung der 3. Auflage dieses Buches die Gründe, die Vorteile und die Effizienz der technischen Ausführungen einsatzgerechter Kategorien von Antriebssystemen durch neue Betrachtungen und Beispiele betont.

Die Entwicklungsszenarien alternativer Antriebe wurden gegenüber den ersten zwei Auflagen deutlicher abgeleitet und ausführlicher dokumentiert. Die Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren als Träger und Mitträger der Antriebsszenarien zukünftiger Automobile wurde mit zahlreichen aktuellen Beispielen dokumentiert. Die Betrachtung zukünftiger Kraftstoffe folgt der Argumentation, die in den ersten zwei Auflagen aufgebaut wurde – entgegen zwischenzeitlichen Trendercheinungen in Rich-

tung alleiniger, universell einsetzbarer Energieträger. Deswegen wurde die Argumentation in dieser 3. Auflage mit wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten ergänzt.

Die elektrischen Antriebe werden aufgrund der Aktualität dieser Thematik noch ausführlicher betrachtet und mit zahlreichen aktuellen Ausführungsbeispielen belegt.

Die Kombination von Antriebssystemen und Energieträgern, die gegenwärtige Spekulationen über eine Konzeptlosigkeit in der Kraftfahrzeugtechnik ernähren, wurden deutlicher begründet und mit zahlreichen aktuellen Beispielen belegt, um daraus eindeutige Kategorien, entsprechend dem Fahrzeugtyp und -einsatzbereich abzuleiten.

Diese dritte, stark überarbeitete und erweiterte Auflage bekräftigt die ursprüngliche These, wonach die Vielfalt der zukünftigen Automobile die Diversifizierung ihrer Antriebe, deren modulare Auslegung, aber auch deren verknüpfte Funktion bedingt.

Dem Springer Verlag gebührt ein herzlicher Dank für die eröffnete Möglichkeit, aussagekräftige, aber auch komplexe Bilder in Farbe darstellen zu dürfen.

Oktober 2011

Cornel Stan

Vorwort zur 4. Auflage

Vom ersten Vorwort zu diesem Buch sind zehn Jahre vergangen. „Ein universell einsetzbarer Antrieb der Zukunft ist genauso unwahrscheinlich wie ein universell einsetzbares Automobil...“ so stand es drin. Eine modulare Funktionsverteilung im Antriebssystem war dagegen als tragfähiges Konzept erachtet. In der zweiten Auflage des Buches wurden klare Tendenzen abgeleitet – Vollhybride für Städte, Dieselantriebe für Land und Autobahn, Mikro- und Mildhybride waren in vielen Serienausführungen und Konzeptfahrzeugen zu finden.

Die 3. Auflage entstand in einer Zeit, in der die Zukunft eines solchen Buches über alternative Antriebe für Automobile gar nicht mehr sicher war: das Elektroauto war zum Retter der allgemeinen Straßenmobilität gehievt. Im Mai 2010 wurde in Deutschland die Nationale Plattform Elektromobilität gegründet. Das deklarierte Ziel: „Bis zum Jahr 2020 sollen mindestens eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren.“ In der 3. Auflage des Buches wurden umso mehr Entwicklungsszenarien für vielfältige, modular aufgebaute Antriebssysteme deutlich abgeleitet und ausführlich dokumentiert.

Im Vorwort zur 4. Auflage muss festgestellt werden, dass im Januar 2015, zur Halbzeit der vorgenommenen Herausforderung, auf Deutschlands Straßen nur 19.000 Elektrofahrzeuge, dafür aber 44,4 Millionen Autos mit Otto- und Dieselmotoren mit Hybridantrieben fahren.

Bei allem Respekt und Verständnis für das Ziel Elektromobilität und für die komplexen, intensiven und extensiven Aktivitäten dafür, ist die Notwendigkeit einer Vielfalt der Automobile und ihrer Antriebe – nach geographischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen – von den derzeitigen Entwicklungstendenzen bestätigt.

In der vierten Auflage des Buches wurden repräsentative Neuentwicklungen hinzugefügt: zahlreiche und vielfältige Elektroautos – von leichten Autos, mit kompakter Batterie, bis zu über zwei Tonnen schweren Personewagen, wovon die Hälfte die Batterie ausmacht; Plug In Fahrzeuge als 2 in 1 Lösungen – sowohl Elektroauto für die Stadt, als auch Auto mit

Verbrennungsmotor, unterstützt von einem leichten Elektromotor für Land- und Autobahn.

Die Analyse der Entwicklungsbedingungen und –anforderungen wird in dieser Auflage vertieft. Es werden zahlreiche Beispiele aktueller Entwicklungen von Elektroautos, Hybridantrieben und Plug In Systeme aufgeführt.

August 2015

Cornel Stan

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Vorwort zur 2. Auflage	VIII
Vorwort zur 3. Auflage	X
Vorwort zur 4. Auflage	XII
Inhaltsverzeichnis.....	XV
Liste der Formelzeichen.....	XIX
1 Mobilität – Bedingungen, Anforderungen, Szenarien.....	1
1.1 Entwicklungsbedingungen.....	1
1.2 Entwicklungsanforderungen	15
1.3 Entwicklungsszenarien innerhalb eines Energiemanagements.....	32
2 Thermische Antriebe	47
2.1 Thermodynamische Prozesse – Umsetzbarkeit und Grenzen.....	47
2.2 Viertakt-Kolbenmotoren – Potentiale und Trends.....	72
2.2.1 Optimierung und Anpassung der Motorprozesse – Zukünftige Verbrennungsmotoren als Funktionsdienstleister um die Verbrennung.....	72
2.2.2 Konvergenz der Prozesse in Otto- und Dieselmotoren.....	157
2.3 Alternative Wärmekraftmaschinen	166
2.3.1 Zweitaktmotoren.....	166
2.3.2 Wankelmotoren	178
2.3.3 Strömungsmaschinen (Gasturbinen).....	181
2.3.4 Stirling- Motoren	193
3 Alternative Kraftstoffe	199
3.1 Energieträger: Ressourcen, Potentiale, Eigenschaften	199
3.2 Erdgas	212
3.3 Autogas.....	222

3.4 Alkohole: Methanol und Ethanol.....	226
3.5 Wasserstoff.....	249
3.6 Pflanzenöle	262
3.7 Dimethylether	270
3.8 Synthetische Kraftstoffe	273
4 Elektrische Antriebe	279
4.1 Elektromobilität	279
4.2 Elektromotoren	282
4.3 Elektroenergiespeicher: Batterien.....	288
4.4 Elektroenergiewandler an Bord: Brennstoffzellen	295
4.5 Automobile mit elektrischem Antrieb	319
5 Kombinationen von Antriebssystemen, Energieträgern, - wandlern und -speichern.....	335
5.1 Antriebskonfigurationen.....	335
5.2 Antrieb mittels Elektromotor, Wärmekraftmaschine als Stromgenerator (serielle Hybride).....	338
5.3 Antrieb mittels Verbrennungsmotor und/oder Elektromotor (parallele und gemischte Hybride)	365
5.3.1 Hybridklassen.....	365
5.3.2 Parallel-Voll-Hybrid mit einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor, verbunden über Planetengetriebe (Toyota Prius, Honda Insight).....	368
5.3.3 Parallel-Voll-Hybrid mit einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor, verbunden über Planetengetriebe, mit zusätzlichem separatem Elektro-Antriebsmotor (Lexus RX 400h).....	375
5.3.4 Vollhybrid mit einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor entlang einer Leistungsachse (Porsche)	377
5.3.5 Vollhybrid mit einem Verbrennungsmotor und zwei Elektromotoren entlang einer Leistungsachse (Daimler)	381
5.3.6 Vollhybrid mit Elektromotoren, die im Getriebe des Verbrennungsmotors integriert sind – Two-Mode-Hybrid (BMW – Daimler – GM).....	382
5.3.7 Hybrid mit Antrieb einer Fahrzeugachse durch Verbrennungsmotor und der zweiten Fahrzeugachse durch Elektromotor – ohne mechanische Verbindung beider Antriebe (Peugeot)	393
5.3.8 Übersicht der gegenwärtigen parallelen und gemischten Hybridantriebssysteme	394
5.4 Plug In Hybrid-Antriebe.....	407

6 Energiemanagement im Automobil als komplexes System	419
Literatur	435
Weitere Literaturstellen	440
Sachwortverzeichnis.....	443

Liste der Formelzeichen

A	$[m^2]$	Fläche
b_e	$\left[\frac{g}{kWh}\right]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeit
c	$\left[\frac{kg C}{kg Kst}\right]$	Kohlenstoffanteil im Kraftstoff bei Verbrennung
c_p	$\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	$\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
d	$[m]$	Durchmesser
E	$[J, kJ]$	Energie
F	$[N]$	Kraft
f	$[Hz]$	Frequenz
G	$[J, kJ]$	freie Enthalpie bei Verbrennung
H	$[J, kJ]$	Enthalpie
H^*	$[J, kJ]$	Ruheenthalpie
H_U	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	unterer Heizwert von Kraftstoffen bei Verbrennung
H_G	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	Gemischheizwert (massebezogen) bei Verbrennung
H_g	$\left[\frac{kJ}{m^3}\right]$	Gemischheizwert (volumenbezogen) bei Verbrennung

h	$\left[\frac{J}{kg}, \frac{kJ}{kg} \right]$	spezifische Enthalpie
h^*	$\left[\frac{J}{kg}, \frac{kJ}{kg} \right]$	spezifische Ruheenthalpie
I_λ	$\left[\frac{W}{m^3} \right]$	Strahlungsintensität bei Wärmestrahlung
k	$[-]$	Isentropenexponent
L_{st}	$\left[\frac{kg \text{ Luft}}{kg \text{ Kst}} \right]$	stöchiometrischer Luftbedarf bei Verbrennung
l	$[m]$	Länge
\overline{M}	$\left[\frac{kg}{kmol} \right]$	molare Masse
n	$[s^{-1}, min^{-1}]$	Drehzahl
P	$[W, kW]$	Leistung
p	$\left[\frac{N}{m^2} \right]$	Druck
Q	$[J, kJ]$	Wärme
\dot{Q}	$[W, kW]$	Wärmestrom
q	$\left[\frac{J}{kg}, \frac{kJ}{kg} \right]$	spezifische Wärme
\overline{R}	$\left[\frac{J}{kmolK} \right]$	universelle (molare, allgemeine) Gaskonstante
R	$\left[\frac{J}{kgK} \right]$	spezifische Gaskonstante
r	$[m]$	Radius
r	$\left[\frac{J}{kg}, \frac{kJ}{kg} \right]$	spezifische Verdampfungsenthalpie
S	$\left[\frac{J}{K}, \frac{kJ}{K} \right]$	Entropie
s	$\left[\frac{J}{kgK}, \frac{kJ}{kgK} \right]$	spezifische Entropie

T	$[K]$	Temperatur
t	$[^{\circ}C]$	Temperatur
t	$[s]$	Zeit
U	$[J, kJ]$	innere Energie
u	$\left[\frac{J}{kg}, \frac{kJ}{kg} \right]$	spezifische innere Energie
V	$[m^3]$	Volumen
V_H	$[m^3]$	Hubvolumen
v	$\left[\frac{m^3}{kg} \right]$	spezifisches Volumen
W	$[J, kJ]$	Arbeit
w	$\left[\frac{J}{kg}, \frac{kJ}{kg} \right]$	spezifische Arbeit
α	$[rad]$	Drehwinkel, Winkel
α	$[-]$	Stirling-Motor-Ausführung
β	$[-]$	Stirling-Motor-Ausführung
γ	$[-]$	Stirling-Motor-Ausführung
ε	$[-]$	Verdichtungsverhältnis
η	$[-]$	Wirkungsgrad
η_{th}	$[-]$	thermischer Wirkungsgrad
λ	$\left[\frac{kg \text{ Luft}}{kg \text{ Kst}} \right]$	Luftverhältnis bei Verbrennung
λ	$[m, \mu m]$	Wellenlänge bei Strahlung
λ	$\left[\frac{W}{mK} \right]$	Wärmeleitfähigkeit bei Wärmeleitung
π	$[-]$	Druckverhältnis
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Dichte
ω	$[s^{-1}]$	Winkelgeschwindigkeit