

Fortschrittsberichte des Instituts für Tribologie und
Energiewandlungsmaschinen

Band 4

Jens Berkan

**Modellierung des Schlepp- und Startverhaltens von
Verbrennungsmotoren bei tiefen Temperaturen**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4808-0

ISSN 1611-8154

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der BMW Group und als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen der Technischen Universität Clausthal.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.- Ing. Hubert Schwarze, für die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation und die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr.- Ing. Hans-Peter Beck danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit, die Übernahme des Koreferates und die damit verbundene Arbeit.

Der BMW Group und insbesondere meinen ehemaligen Kollegen Dr.- Ing. Michael Maurer, Heiko Iamandi, Steffen Lutz, Sönke Richter, Manfred Schmid, Andreas Rau und Peter Schreger danke ich für ihre Unterstützung und die Bereitstellung von Komponenten und Daten.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen. Im Einzelnen den Damen des Geschäftszimmers, den Mitarbeitern der mechanischen und elektronischen Werkstatt, den Kollegen für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und den Studien- und Diplomarbeitern.

Mein besonderer Dank für die tatkräftige Mithilfe bei der Durchführung und Auswertung der Messungen gilt Herrn Daniel Brenner, Joachim Rohde und Dennis Egler.

Ein ganz herzlicher Dank gebührt meiner Frau Kerstin und meinem Sohn Leon für ihr großes Verständnis und ihre uneingeschränkte Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Allen die mir zur Seite gestanden und mich unterstützt haben, ein herzliches „Dankeschön!“

Clausthal-Zellerfeld, im Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen, Benennungen, Einheiten	III
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Stand der Technik	3
2 Reibleistungsanalyse und Modellbildung des Verbrennungsmotors.....	9
2.1 Gaswechselerarbeit und dynamisches Moment	10
2.1.1 Anwendung der Bewegungsgleichungen auf Mehrzylindermotoren.....	13
2.1.2 Analyse und Modellierung der Arbeitstakte	15
2.1.3 Ansaugtakt.....	16
2.1.4 Verdichtungstakt.....	21
2.1.5 Einfluss der Gemischaufbereitung	42
2.1.6 Expansionstakt des geschleppten Motors.....	45
2.1.7 Expansionstakt des befeuerten Motors	47
2.1.8 Ausstoßtakt	57
2.2 Motorschleppmoment Grundmotor	57
2.2.1 Ölviskosität	58
2.2.2 Grundmotor-Schleppmoment	59
2.2.3 Reibmoment oszillierender Bauteile	63
2.3 Schleppmoment Drehmomentwandler	64
2.4 Schleppmoment Nebenaggregate	66
2.5 Gleichgewichtsbedingungen.....	67
2.6 Startverhalten und Anforderungen.....	69
2.7 Prüfstand und Messverfahren	70
2.7.1 Motoren- und Komponentenprüfstand	70
2.7.2 Schmierstoffuntersuchungen.....	72
3 Energiespeicher und elektrische Verbindung	73
3.1 Blei-Säure-Batterie	73
3.1.1 Batteriezustände.....	74
3.1.2 Chemische Grundreaktionen.....	74
3.1.3 Batteriemodelle	81
3.2 Doppelschichtkondensatoren	84
3.3 Vergleich zwischen Doppelschichtkondensatoren und Blei-Säure-Batterien	88
3.4 Leitungen und Massenanbindung	89

4 Elektrische Startermotoren	91
4.1 Gleichstrommaschine	92
4.2 Reihenschlussmaschine	97
4.3 Fremderregte Maschine	100
4.4 Arbeitspunkte	102
4.5 Drehfelderzeugung	103
4.6 Asynchronmaschine	104
4.7 Synchronmaschine	106
5 Messungen am Verbrennungsmotor.....	110
5.1 Vorversuche	110
5.2 Messergebnisse.....	110
5.2.1 Verdichtung und Polytropenexponent	111
5.2.2 Reibmoment Motor und Nebenaggregate	112
5.3 Messung an Startsystemen	115
6 Berechnung und Simulation des Startverhaltens.....	116
6.1 Verbrennungsmotormodell	119
6.2 E-Maschinenmodell	121
6.3 Kopplungselemente	123
6.4 Ergebnisausgabe.....	125
6.5 Bedienung, Benutzeroberfläche und Konfigurationsebene	126
7 Berechnungsergebnisse und Vergleich Messung - Rechnung	128
7.1 Kabelwiderstand	129
7.2 Ölsorten.....	136
7.3 Batterie und Doppelschichtkondensator	141
7.4 Startergenerator im Riementrieb.....	146
7.5 Einfluss der Massenträgheit.....	150
7.6 Kurbelwellenstartergenerator.....	151
7.7 Hochlauf und Zündung	152
7.8 Zusammenfassung der Variationsrechnungen.....	153
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	156
9 Literaturverzeichnis	158
Anhang Messungen.....	166
A1 Messergebnisse aus Vorversuchen	166
A2 Messergebnisse mit Serienstarter	172

Formelzeichen, Benennungen, Einheiten

Formelzeichen	Benennung	Einheiten
a	Beschleunigung	[m/s ²], [rad/s ²]
a _{Zi}	zylinderspezifische Kolbenbeschleunigung	[m/s ²], [rad/s ²]
A	Fläche	[m ²]
A ₀	Fläche	[m ²]
A _K	Kolbenfläche	[m ²]
A _Ö	Auslass öffnet	[°KW]
b _p	Polbreite	[mm]
B	magnetische Flussdichte	[T], [Wb/m ²], [V·s/m ²]
c _p	spezifische Wärmekapazität	[J/(g·K)], [kJ/(kg·K)]
C	Wärmekapazität	[J], [kJ]
C _{Masch}	Maschinenkonstante	[-]
C _{Masch}	Maschinenkonstante	[-]
C ₁	Konstante	[F]
C ₁	Kapazität	0,41
C ₂	Konstante	198
C ₂	Kapazität	[F]
C _N	Kapazität	[Ah]
d	Durchmesser	[m], [mm]
D	Durchmesser	[m], [mm]
DoD	Entladungszustand	[%]
e	Eulerzahl	2,718281...
e ₀	Elementarladung	1,602·10 ⁻¹⁹ As
E	elektrische Feldstärke	[V/m]
E _S	Einlass schließt	[°KW]
F	Kraft	[N]
F _{GAS}	Gaskraft auf den Kolben	[N]
F _K	Kolbenkraft in Zylinderachse	[N]
F _N	Normalkraft senkrecht auf Zylinderachse	[N]
F _R	Radialkomponente von F _S	[N]
F _S	Stangenkraft in Pleuelrichtung	[N]
F _T	Tangentialkomponente von F _S	[N]
G ^{0,S}	freie Reaktionsenthalpie	[J], [kJ]
h _E	spezifische Enthalpie	[J/kg], [kJ/kg]
h _A	spezifische Enthalpie	[J/kg], [kJ/kg]
h _{Leck}	spezifische Enthalpie	[J/kg], [kJ/kg]
H	magnetische Feldstärke	[A/m]

$H^{0,S}$	Reaktionsenthalpie	[J], [kJ]
H_i	Enthalpiestrom	[kJ/°]
H_{Leck}	Enthalpie	[J], [kJ]
H_U	Unterer Heizwert	[J/g], [kJ/kg], [MJ/kg]
$H_{U,Zyl.}$	Verbrennungswärme im Zylinder	[J], [kJ]
$H_{Zyl.}$	Verdampfungsenthalpie im Zylinder	[J], [kJ]
I	Strom	[A]
I_A	Ankerstrom	[A]
I_F	Feldstrom	[A]
l	Länge	[m]
L	Länge	[mm]
L_A	Ankerinduktivität	[H], [Wb/A]
L_F	Feldinduktivität	[H], [Wb/A]
m	Masse	[g], [kg]
m^*	Masse	[g], [kg]
m_E	Masse Luft, Einlass	[g], [kg]
m_A	Masse Luft, Auslass	[g], [kg]
m_{Leck}	Masse Leckage, Blow-By	[g], [kg]
m^*_{Leck}	Masse Leckage, Blow-By	[g], [kg]
$m_{(ES)}$	Masse Brenngas im Zylinder bei E_S	[g], [kg]
M_B	Beschleunigungsmoment	[Nm]
M_D	Drehmoment	[Nm]
M_E	Antriebsmoment elektrische Maschine	[Nm]
M_{EM}	Antriebsmoment Elektromotor	[Nm]
$M_{(ES)}$	Masse Luft im Zylinder bei Einlass schließt	[g]
M_{Ex}	dynamisches Expansionsmoment	[Nm]
M_G	Motorschleppmoment Grundreibung	[Nm]
M_{ges}	Gesamtschleppmoment	[Nm]
M_i	inneres Moment	[Nm]
M_K	dynamisches Kompressionsmoment	[Nm]
$M_{Kraftstoff, Zyl.}$	Masse Kraftstoff im Zylinder	[g]
$M_{Luft, Zyl.}$	Masse Brenngas im Zylinder	[g]
M_{MG}	Motorschleppmoment Grundreibung	[Nm]
$M_{n(i)}$	drehzahlabhängiges Drehmoment	[Nm]
M_N	Schleppmoment Nebenaggregate	[Nm]
M_{osz}	Kolbenreibmoment	[Nm]
$M_{(OT)}$	Masse Luft im Zylinder im OT	[g]
M_{VM}	Schleppmoment Verbrennungsmotor	[Nm]
n	Anzahl Teilchen	[-]
n	Drehzahl	[min ⁻¹ , s ⁻¹]
n	Polytrophenexponent	[-]

$n_{i,j}$	Zellwert Drehzahl-Temperatur-Matrix	
	Polytrophenexponent	[-]
n_K^*	korrigierter Polytrophenexponent für Kompression	[-]
n_E^*	korrigierter Polytrophenexponent für Expansion	[-]
n_0	Leerlaufdrehzahl	[min ⁻¹ , s ⁻¹]
n_d	Synchrondrehzahl	[min ⁻¹ , s ⁻¹]
n_{EM}	Drehzahl E-Maschine	[min ⁻¹ , s ⁻¹]
n_R	Zellenzahl	[-]
n_{th}	wärmebezogener Teilpolytrophenexponent	[-]
n_m	massebezogener Teilpolytrophenexponent	[-]
n_{VKM}	Drehzahl Verbrennungsmotor	[min ⁻¹ , s ⁻¹]
N_A	Avogadro-Konstante	6,023·10 ²³ /mol
N_F	Windungszahl	[-]
OT	oberer Totpunt	[°KW]
p	Druck	[N/m ²], [bar]
p_z	Zylinderdruck	[N/m ²], [bar]
p	Polpaarzahl	[-]
p_u	Umgebungsdruck	[N/m ²], [bar]
$p_{i,j} (^{\circ}KW)$	Zellwert Drehzahl-Temperatur-Matrix	
	Druckverlauf	[N/m ²], [bar]
p_{Zyl}	Druck im Zylinder	[N/m ²], [bar]
Δp_v	Druckverlust	[N/m ²], [bar]
P_i	innere Leistung	[W], [kW]
Q_B	Brennstoffwärme	[J], [kJ]
$Q_{Verbr.}$	Verbrennungswärme	[J], [kJ]
Q_W	Wandwärmeverluste	[J], [kJ]
Q_W^*	synthetische Wandwärmeverluste	[J], [kJ]
r	Radius	[mm]
R	allgemeine Gaskonstante	8,3143 J/(K·mol)
R_1	Widerstand	[mΩ], [Ω]
R_2	Widerstand	[mΩ], [Ω]
R_F	Feldwiderstand	[mΩ], [Ω]
R_i	Widerstand	[mΩ], [Ω]
$R_{i,ges}$	Summenwiderstand	[mΩ], [Ω]
R_L	Gesamtwiderstand	[mΩ], [Ω]
$R_{m,F}$	magnetischer Widerstand	[A/(V·s)]
R_V	Widerstand	[mΩ], [Ω]
s	Schlupf	[-]
S	Wegstrecke	[m]
S	Hub	[mm]
SoC	Ladungszustand	[%]

$S_{\text{eff, max}}$	effektiver maximal wirksamer Hub	[mm]
S_{Zi}	zylinderspezifischer Hub	[mm]
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[°C], [°K]
ΔT	Temperaturdifferenz	[°C], [°K]
u	spezifische innere Energie	[J/kg], [kJ/kg]
u	Gleitgeschwindigkeit	[m/s]
u_K	Kolbengleitgeschwindigkeit	[m/s]
$u_{q,L}$	induzierte Spannung	[V]
$u_{q,W}$	induzierte Spannung	[V]
U	innere Energie	[J], [kJ]
U	Spannung	[V]
U_q	induzierte Spannung	[V]
$U_{q,LL}$	induzierte Leerlaufspannung	[V]
U_0	Gleichgewichtsspannung	[V]
U_{Starter}	Spannung	[V]
U_{Batt}	Spannung	[V]
UT	unterer Totpunkt	[°KW]
v	Geschwindigkeit	[m/s], [rad/s]
v_k	Kolbengeschwindigkeit	[m/s]
v_{Zi}	zylinderspezifische Kolbengeschwindigkeit	[m/s], [rad/s]
V	Volumen	[m ³]
V_h	Hubvolumen	[m ³]
V_c	Schadvolumen	[m ³]
$V_{\text{heff, max}}$	effektives maximal wirksames Hubvolumen	[m ³]
W	Geschwindigkeit	[m/s]
W	Energie	[J], [kJ]
W_V	Verdichtungsarbeit	[J], [kJ]
$\dot{V}$	Fördermengenvolumenstrom	[m ³ /s]
$\dot{V}_h$	theoretisch maximaler Fördermengenvolumenstrom	[m ³ /s]
y	Spaltweite	[mm]
Z	Anzahl der Leiter	[-]
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² ·K)]
α_m	Verlustfaktor für Blow-By	[-]
ε	Verdichtungsverhältnis	[-]
$\varepsilon_{\text{eff, max}}$	maximales effektives volumetrisches Verdichtungsverhältnis	[-]
$\dot{\gamma}$	Schergefälle	[-]
η	dynamische Viskosität	[Pas], [Ns/m ²]
Θ	Massenträgheitsmoment	[kgm ²]

$\Theta_{\text{ges,KW}}$	Summe aller Massenträgheitsmomente, auf die Kurbelwelle reduziert	[kgm ²]
Θ	Durchflutung	[A]
κ	Isentropenexponent	1,41
λ	Pleuelstangenverhältnis	[-]
λ	Luft-Kraftstoffverhältnis	[-]
λ_L	Liefergrad	[-]
μ	absolute Permeabilität	[V·s/(A·m)]
μ_r	relative Permeabilität	[-]
μ_0	Permeabilitätskonstante	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ V·s/(A·m)}$
ξ_V	Drosselfaktor	[-]
π	Kreiskonstante	3,1415926...
ρ	Dichte	[kg/m ³]
τ	Schubspannung	[N/m ²]
φ	Drehwinkel	[°], [rad]
$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit	[°/s], [rad/s]
$\ddot{\varphi}$	Winkelbeschleunigung	[°/s ²], [rad/s ²]
$\ddot{\varphi}_{EM}$	Winkelbeschleunigung E-Maschine	[°/s ²], [rad/s ²]
$\ddot{\varphi}_{ges}$	Winkelbeschleunigung Gesamtsystem	[°/s ²], [rad/s ²]
$\ddot{\varphi}_{VM}$	Winkelbeschleunigung Verbrennungsmotor	[°/s ²], [rad/s ²]
φ_i	zylinderspezifischer Drehwinkel	[°], [rad]
$\Delta\varphi_i$	Drehwinkelversatz	[°], [rad]
φ_m	Phasenwinkel	[°], [rad]
φ_{el}	elektrischer Phasenwinkel	[°], [rad]
Φ	magnetischer Fluss	[Wb], [V·s]
Φ_A	Erregerfluss, Läufer	[Wb], [V·s]
Φ_H	Hauptfluss	[Wb], [V·s]
Φ_P	Erregerfluss, Feld	[Wb], [V·s]
ψ	Anlenkwinkel	[°], [rad]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung	[rad/s ²]