

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Philipp Skarke

Simulationsgestützter Funktionsentwicklungs- prozess zur Regelung der homogenisierten Dieselverbrennung



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.

Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Philipp Skarke

Simulationsgestützter Funktionsentwicklungs- prozess zur Regelung der homogenisierten Dieselverbrennung

Philipp Skarke
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-17114-8 ISBN 978-3-658-17115-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-17115-5

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 Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende für die wissenschaftliche und persönliche Betreuung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. habil. G. Hohenberg danke ich herzlich für das entgegengebrachte Interesse an der Arbeit und für die Übernahme des Koreferates.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Projektpartner Christian Auerbach für die gute Zusammenarbeit. Ich wünsche ihm für seine weitere Laufbahn alles Gute.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) sowie des Forschungsinstitutes für Kraftfahrzeuge und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), insbesondere bei Hans-Jürgen Berner, der mich während meiner Arbeit sehr unterstützt hat.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden bedanken, die mir während dieser interessanten, aber auch anstrengenden Zeit immer zur Seite standen.

Stuttgart

Philipp Skarke

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Symbolverzeichnis	XXIII
Kurzfassung	XXVII
Abstract	XXIX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Das konventionelle dieselmotorische Brennverfahren	3
2.2 Die Homogenisierung der dieselmotorischen Verbrennung	4
2.2.1 Der Ladedruckeinfluss auf die teilhomogene Verbrennung	6
2.2.2 Der Einfluss des Sauerstoffgehalts auf die teilhomogene Verbrennung	7
2.2.3 Der Einfluss der Ansaugtemperatur auf die teilhomogene Verbrennung	9
2.2.4 Der Einfluss des Einspritzpfads auf die teilhomogene Verbrennung	10
2.3 Die Luftpfadregelung des Dieselmotors	11
2.3.1 Die Luftpfadregelung bei konventioneller dieselmotorischer Verbrennung	11
2.3.2 Die Luftpfadregelung bei teilhomogener Verbrennung	16
2.4 Die simulationsgestützten Funktionsentwicklungsmethoden	17
2.4.1 Die Model-in-the-Loop Simulation	18
2.4.2 Die Software-in-the-Loop Simulation	19
2.4.3 Die Hardware-in-the-Loop Simulation	20

3 Entwicklungsumgebung	23
3.1 Der Versuchsträger	24
3.2 Die Thermodynamik des Verbrennungsmotors	27
3.2.1 Die Strömungsmechanik	27
3.2.2 Die Wärmeübertragung	28
3.2.3 Die Brennraummodellierung	29
3.2.4 Die Verbrennungsmodellierung	32
3.3 Das Simulationsmodell	39
3.4 Der Funktionsentwicklungsprozess	45
4 Funktionsrahmen der Luftpfadregelung	49
4.1 Die Regelung der niederdruckseitigen Abgasrückführung	49
4.1.1 Die Bestimmung des Sauerstoffgehalts nach der ND-AGR-Beimischung	51
4.1.2 Das Regelkonzept der ND-AGR	52
4.2 Die Regelung der hochdruckseitigen Abgasrückführung	67
4.2.1 Das Tot- und Laufzeitmodell zwischen beiden AGR-Zumischpositionen	68
4.2.2 Das HD-AGR-Streckenmodell	71
4.2.3 Das Sauerstoffbilanzmodell	79
4.3 Die Ladedruckregelung	86
4.3.1 Die Regelung mit kennfeldbasierter Vorsteuerung	86
4.3.2 Die modellbasierte Ladedrucksteuerung	88
4.3.3 Die modellbasierte Ladedruckregelung	99
4.3.4 Die Priorisierung der Sauerstoffregelung	103
4.4 Die Betriebsartenumschaltung	106
5 Funktionsrahmen der Kraftstoffpfadregelung	111
5.1 Die Lastregelung und Raildruckregelung	112
5.2 Die Motorschutzregelung	112
6 Ergebnisse	117
6.1 Die Regelung der ND-AGR-Strecke	118
6.2 Die Steuerung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	121
6.3 Die Ladedruckregelung	124
6.4 Die Regelung der Einspritzung	127
6.5 Die Emissionsbildung	130
6.6 Die Simulationsergebnisse	133

7 Schlussfolgerung und Ausblick	137
Literaturverzeichnis	141
Anhang	151

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kennfeldbereich der teilhomogenen Verbrennung	5
2.2	Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen im Ladedruck	7
2.3	Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen im Sauerstoffgehalt des Einlasskrümmers	8
2.4	Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen der Ansaugtemperatur	9
2.5	Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen des Einspritzzeitpunkts	10
2.6	Modellstruktur Ladedruck- und Luftmassenregelsystem	12
2.7	Schematische Darstellung eines HiL-Systems	20
3.1	CPU Rechenzeit unterschiedlicher Modellierungsansätze	23
3.2	Schematische Darstellung des Versuchsträgers	25
3.3	Schematische Darstellung der Diskretisierung	27
3.4	Brennraummodellierung	30
3.5	Druckverlaufsanalyse und Simulation	33
3.6	Phänomenologische Modellierung der konventionellen Dieselverbrennung	35
3.7	Validierung des Strömungsmodells	40
3.8	Validierung des Brennverlaufmodells bei konventionellem Dieselbrennverfahren	41
3.9	Validierung des indizierten Mitteldrucks	42
3.10	Validierung des Brennverlaufmodells bei teilhomogenem Dieselbrennverfahren	43
3.11	Validierung des indizierten Mitteldrucks und der maximalen Brennraumdruckgradienten	44
3.12	Modellvalidierung Ansaugtemperatur-, Ladedruck und AGR-Sensitivität	45
3.13	Schematischer Aufbau der Model-in-the-Loop Simulationsumgebung	46
3.14	Phasen der Reglerentwicklung	47
3.15	Einordnung des Reglerentwicklungsplans in ein XiL-System	48
4.1	Messergebnisse zur Sprungantwort des ND-AGR-Systems	50
4.2	Kalibrierung der Lambdasonde nach dem Verdichter	52

4.3	Kennlinie des ND-Aktorik-Äquivalents	53
4.4	Untersuchung unterschiedlicher Reglerparametrierungen des ND-AGR-Regelkreises bei 1000 U/min	54
4.5	Untersuchung unterschiedlicher Reglerparametrierungen des ND-AGR-Regelkreises bei 1600 U/min	54
4.6	Schematische Darstellung des ND-AGR-Streckenmodells	56
4.7	Γ -Kennfeld des ND-AGR-Kühlers und Drossel-Kennlinie des ND-AGR-Ventils	57
4.8	Berechnungsschema des ND-AGR-Modells	58
4.9	Simulationsergebnisse urbaner Bereich NEFZ: Γ -Modell Validierung	59
4.10	Prüfstandsergebnisse: Γ -Modell-Validierung des Massenstroms und des Sauerstoffgehalts nach dem Verdichter	60
4.11	Berechnungsschema der modellbasierten Vorsteuerung	63
4.12	Simulationsergebnisse: Sollwertsprünge mit modellbasierter ND-AGR-Steuerung	64
4.13	Prüfstandsergebnisse: Sollwertsprünge mit modellbasiertem ND-AGR-Regelungskonzept	65
4.14	Prüfstandsergebnisse: 1.Phase des NEFZ Stadtprofils mit modellbasiertem ND-AGR-Regelungskonzept	66
4.15	Simulationsergebnisse: Lastsprung 1000 U/min von $p_{mi} = 1 \text{ bar} - p_{mi} = 3.5 \text{ bar}$	67
4.16	Tot- und Verzögerungsverhalten der Strecke zwischen HD- und ND-AGR-Beimischung für unterschiedliche Drehzahlen	69
4.17	Berechnungsschema des Tot- und Trägheitsmodells der Strecke zwischen der ND- und HD-AGR-Beimischung	70
4.18	Prüfstandsergebnisse: Modellvalidierung des Totzeit- und Verzögerungsmodells der Strecke zwischen HD- und ND-AGR-Beimischung	71
4.19	Γ -Modell zur Abbildung der HD-AGR-Strecke	72
4.20	Γ -Kennfeld des HD-AGR-Kühlers und Drosselkennlinie des ND-AGR-Ventils	73
4.21	Simulationsergebnisse: Virtueller Sensor zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	74
4.22	Γ -Modell: Validierung des Systemmassenstroms und des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	75
4.23	Prüfstandsergebnisse: Validierung der virtuellen Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	76

4.24	Berechnungsschema der modellbasierten HD-AGR-Steuerung	76
4.25	Simulationsergebnisse: Lastsprung mit teilhomogener Verbrennung	78
4.26	Messergebnisse: Validierung der modellbasierten Steuerung des HD-AGR-Ventils Ausschnitt NEFZ Stadtprofil	79
4.27	Prüfstandsergebnisse: Alterungseffekt der Lambdasonde vor der Abgasnachbehandlung	80
4.28	Berechnungsschema des Sauerstoffbilanzmodells	81
4.29	Simulationsergebnisse: Instationäre Validierung des Sauerstoffbilanzmodells	83
4.30	Prüfstandsergebnisse: Stationäre Validierung des Sauerstoffbilanzmodells	83
4.31	Prüfstandsergebnisse: Instationäre Validierung des Sauerstoffbilanzmodells	84
4.32	Prüfstandsergebnisse: Sensorwertanpassung des Sauerstoffbilanzmodells	85
4.33	Simulationsergebnisse zur Ladedruckregelung mit kennfeldbasierter Vorsteuerung	87
4.34	Prüfstandsergebnisse: Trägheitsverhalten der Thermoelemente bei unterschiedlichen Lastsprüngen	89
4.35	Schematische Darstellung der Vereinfachung des Thermoelements	90
4.36	Prüfstandsergebnisse: Instationäre Validierung des Abgastemperaturmodells	91
4.37	Simulationsergebnisse: Validierung des echtzeitfähigen Massenstromkorrekturmodells	92
4.38	Berechnungsschema der modellbasierten Ladedrucksteuerung	94
4.39	Simulationsergebnisse: Validierung der modellbasierten Ladedruckstellung	96
4.40	Prüfstandsergebnisse: Validierung der Turboladerdrehzahl	96
4.41	Prüfstandsergebnisse: Stationäre Validierung des Druckverhältnisses der Turbine	97
4.42	Prüfstandsergebnisse: Stationäre Turbinenleistungsbilanz	97
4.43	Prüfstandsergebnisse: Stationäre Validierung des ATL-Modells	98
4.44	Prüfstandsergebnisse: Instationäre Validierung für einen Sollwertsprung	98

4.45	Prüfstandsergebnisse: Instationäre Validierung der modellbasierten Ladedrucksteuerung für ein Sollwerttreppenprofil	99
4.46	Prüfstandsergebnisse: Betriebspunktabhängige Sensitivität des Ladedrucks auf eine Veränderung der Turbinenleitschaufelposition	100
4.47	Simulationsergebnisse: Adaptive Ladedruckregelung	102
4.48	Integration des Funktionsrahmens der p_3 -Steuerung in den Algorithmus der Ladedruckregelung	104
4.49	Simulationsergebnisse: Priorisierung der Sauerstoffregelung	105
4.50	Einfluss der Luftpfadgrößen Ladedruck und Sauerstoffgehalt auf verbrennungsrelevante Parameter	106
4.51	Applikation der Luftpfadregelung	107
4.52	Sollwerte der Sauerstoffregelung	108
4.53	Geräusch- und Abgasemissionen im applizierten Kennfeldbereich	109
4.54	Rampenfunktion der Sollwerte des Luftpfads beim Betriebsartenwechsel	110
5.1	Sensitivität des Einspritzbeginns	113
5.2	Mess- und Simulationsergebnisse: Modellbasierte Druckgradientenregelung für eine Lastrampe bei 1000 U/min	115
6.1	Geschwindigkeitsprofil NEFZ, Sollwertvorgabe Motorbetriebspunkt im städtischen Anteil des NEFZ	117
6.2	Fahrprofil WLTC	118
6.3	Messergebnisse NEFZ Stadtprofil: Sauerstoffregelung der ND-AGR-Strecke	119
6.4	Messergebnisse WLTC-Low: Sauerstoffregelung der ND-AGR-Strecke	120
6.5	Messergebnisse Ausschnitt WLTC: Sauerstoffregelung der ND-AGR-Strecke	121
6.6	Messergebnisse NEFZ: Modellbasierte Steuerung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	122
6.7	Messergebnisse NEFZ Ausschnitt: Modellbasierte Steuerung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	123
6.8	Messergebnisse WLTC: Modellbasierte Steuerung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr	124
6.9	Messergebnisse NEFZ: Ladedruckregelung	125
6.10	Messergebnisse WLTC: Ladedruckregelung	126

6.11	Messergebnisse WLTC Ausschnitt: Potential der O ₂ -Priorisierungsfunktion	127
6.12	Messergebnisse NEFZ: Regelung der Einspritzung, Darstellung der gemittelten Indiziergrößen	128
6.13	Messergebnisse WLTC-Low: Lastregelung	129
6.14	Messergebnisse WLTC-Low: Brennraumdruckgradientenregelung	130
6.15	Messergebnisse städtischer Bereich NEFZ: Emissionen	131
6.16	Messergebnisse WLTC-Low: Stickoxid-, Ruß- und HC-Emissionen	132
6.17	Mess- und Simulationsergebnisse NEFZ	133
6.18	Mess- und Simulationsergebnisse WLTC-Low Ausschnitt . . .	134
A.1	Schema der PID-Regelung mit Vorsteuerung	151
A.2	Funktionsrahmen kennfeldbasierte Ladedruckregelung	152
A.3	Modellbasierte Lastregelung	153
A.4	Regelungsschema des Einspritzwinkels	154
A.5	Virtuelle Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr . . .	155
A.6	Berechnungsschema der Sensorwertanpassung	156

Tabellenverzeichnis

2.1 Literaturüberblick Luftpfadregelungssysteme	21
3.1 Kenndaten Versuchsmotor	25
3.2 Daten Forschungssteuergerät	26
3.3 Auswahl an Gleichungen des Zheng Mechanismus	37
3.4 Parametrierung Zheng Mechanismus	37
4.1 Unterschiedliche Parametrierung des ND-AGR-Reglers	53
4.2 Unterschiedliche Parametrierung der Ladedruckregelung	86
4.3 Übersicht der verwendeten Thermoelementtypen	89
4.4 Bedingungen für eine Ladedruckregleraktivierung	101
4.5 Mögliche Speicherstrukturen für den Turbinenwirkungsmultiplikator	102
5.1 Regelungssysteme des Kraftstoffpfads	111
5.2 Fallunterscheidung Motorschutzregelung	114
6.1 Schnelle Emissionsmesstechnik	130

Abkürzungsverzeichnis

Abs	Absolut
Abw	Abweichung
AGD	Abgasgegendruckklappe
AGR	Abgasrückführung
ASP	Arbeitsspiel
ATL	Abgasturbolader
BA	Betriebsart
CA	Crank Angle
CAN	Controller Area Network
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLD	Chemilumineszenz-Detektor
CO	Kohlenstoffmonoxid
cPCI	Compact Peripheral Component Interconnect
D	Dimension
DDR	Double data rate
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
DRV	Druckregelventil
ECU	Electronic Control Unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
F	Sonderform der Kraftstoffspezies
FID	Flammenionisationsdetektor
FL	Frischluft
FSN	Filter Smoke Number
FTP	Federal Test Procedure
G(s)	Übertragungsfunktion
gem	Gemessen
GT	Gamma Technologies

GW	Grenzwert
HC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe
HCLI	Homogeneous Charge Late Injection
HD	Hochdruck
HiL	Hardware-in-the-Loop
HP	High Pressure
HPLI	Highly Premixed Late Injection
I_1	Virtuelle Kraftstoffspezies
I_2	Virtuelle Kraftstoffspezies
KF	Kennfeld
KP	Kraftstoffpfad
KW	Kurbelwinkel
LLK	Ladeluftkühler
LP	Luftpfad
LP	Low Pressure
max	Maximal
MiL	Model-in-the-Loop
MSS	Micro Soot Sensor
MVM	Mean-Value-Model
N_2	Stickstoff
ND	Niederdruck
NDPF	Nach Dieselpartikelfilter
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCrNi	Nickel-Chrom-Nickel
NO_x	Stickoxid
NV	Nach Verdichter
O_2	Sauerstoff
PC	Personal Computer
PID	Proportional, Integral und Differential
POS	Position aus der Lagerückmeldung
PWM	Pulsweitenmodulation

RAM	Random-access memory
Ref	Referenz
Reib	Reibung
RP	Rapid Prototyping
SG	Systemgrenze
SiL	Software-in-the-Loop
sim	Simuliert
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SOI	Start of Injection / Einspritzzeitpunkt
Soll	Sollwert
SR	Saugrohr
SRAM	Static random-access memory
SZ	Schwärzungszahl
TE	Thermoelement
Turb	Turbine
TV	Tastverhältnis
u. a.	Und andere
Umg	Umgebung
VDOC	Vor Dieseloxydationskatalysator
VDPF	Vor Dieselpartikelfilter
Verd	Verdichter
VTG	Variable Turbinen Geometrie
vZOT	Vor dem oberen Totpunkt im Arbeitszyklus
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
XiL	Überbegriff MiL, SiL und HiL
xPC	Hardware-in-the-Loop Simulator von Mathworks
Y ₁	Virtuelle Kraftstoffspezies
ZME	Zumesseinheit
ZOT	Oberer Totpunkt im Arbeitszyklus