

Massenspektrometrisches Verfahren zur  
Charakterisierung der Ölverdampfung im  
Brennraum von Ottomotoren

Vom Promotionsausschuss der  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Sven Krause  
aus  
Paderborn

2009

Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Matz

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Thiemann

Tag der mündlichen Prüfung: 2009/04/14

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Messtechnik der Technischen Universität Hamburg Harburg. Ganz besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Matz für seine fachliche und persönliche Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferates aussprechen. Danken möchte ich weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Thiemann für die Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. H. W. Rulfs für seine Bereitschaft zur Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Bei den Kollegen sowie Mitarbeitern im Institut für Messtechnik bedanke ich mich für das angenehme Arbeitsklima und die unkomplizierte Zusammenarbeit. Mein Dank gilt hier vor allem Lars Schomann und Tobias Pilsak, deren Beiträge wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Prof. Dr.-Ing. R. Harig danke ich für die guten Anregungen und seinen fachlichen Rat.

Mein Dank gilt auch den wissenschaftlichen Mitarbeitern sowie den Technikern des Instituts für Antriebssystemtechnik der Helmut Schmidt Universität, insbesondere den Herren v. Hollen, Tietjen, Zerrath und Cohrt für die engagierte Mitarbeit ohne die die Untersuchungen nicht hätten durchgeführt werden können. Bedanken möchte ich mich weiterhin bei Prof. Dr.-Ing. G. Knoll und den Herren Brandt und Schlerege vom Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie der Universität Kassel, die mir wertvolle Einblicke in die Kolbenringmechanik gewährten. Des Weiteren gilt mein Dank der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. für die finanzielle Förderung und den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises, deren Unterstützung ich in zahlreichen Diskussionen erfahren durfte. Besonders möchte ich mich beim Obmann Dr.-Ing. A. Robota für die Begleitung bedanken.

Diese Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne eine ausgezeichnete massenspektrometrische Grundlage und die große fachliche und persönliche Unterstützung durch Herrn Dr.-Ing. Gohl, dem ich deshalb besonders dankbar bin.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Frau Pascale Livia für ihre Liebe und Geduld bedanken. Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für ihre Unterstützung während meines Studiums.

# Abstract

To reduce engine emissions caused by evaporation of oil, the investigation of this process in the combustion chamber is necessary. In order to understand the mechanisms of oil emission, the gas composition has to be monitored online for each combustion cycle. A mass spectrometer equipped with a new direct inlet-system optimised by computational fluid dynamics enables crank angle resolved monitoring with a rise time of 2.5 ms over the full speed-/torque-range of a spark-ignition engine. The allocation of the measurement data to the crank angle is calculated by a new software program based on a genetic algorithm using  $CO_2$  measurements and a model of the combustion process.

# Zusammenfassung

Die Emission von Kohlenwasserstoffen aus KFZ-Motoren ist dank der Optimierung des Verbrennungsprozesses so gering, dass jetzt der Ölemission eine größere Bedeutung zukommt. Das Schmieröl wird von den Kolbenringen als dünner Film auf die Zylinderwand aufgetragen. Die hochdynamischen Druck- und Temperaturänderungen im Zylinder bewirken, dass ein Teil des Öls verdampft und zusammen mit dem Abgas den Motor verlässt. Die Charakterisierung dieses Prozesses erfordert ein zeitlich hoch aufgelöstes Messverfahren, bei dem zwischen Öl und Kraftstoff unterschieden werden kann.

Ausgehend von einem schnellen massenspektrometrischen System zur Bestimmung des Schmieröls im Abgas wird hier die Messung der Ölkonzentration direkt im Brennraum durchgeführt. Der Gastransfer durch eine Kapillare in das Vakuum des Analysators wird durch die starken Druck- und Temperaturgradienten des Verbrennungsprozesses gestört. Als Folge der unterschiedlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Druck und Gas kann es zur Überlagerung mit Druckwellen, zur Umkehr der Strömungsrichtung und als Folge davon zur Verfälschung der zeitlichen Zuordnung der Messsignale kommen. Diese Phänomene sind mithilfe von Messungen untersucht und mit strömungsmechanischen Berechnungen des vollständigen Gaspfades simuliert worden. Als Ergebnis ist ein spezielles Einlasssystem mit vier Druckstufen und optimiertem kontinuierlichen Gastransport entwickelt worden. Die Korrektur der zeitlichen Zuordnung der Messsignale wird mit einem neu entwickelten Verfahren mithilfe eines genetischen Algorithmus auf Basis von Messdaten und einem Verbrennungsmodell durchgeführt.

Damit können zum einen der Öldampf im Brennraum sowie zum anderen die Reaktionspartner und -produkte der Verbrennung mit einer Anstiegszeit von 2,5 ms im gesamten Kennfeld eines Ottomotors gemessen werden. Zur Validierung des neuen Messverfahrens werden die Ergebnisse der Ölemission im Abgaskrümmen mit den integralen Ergebnissen der Brennraummessung verglichen, wobei sich ähnliche Abhängigkeiten von Drehzahl, Drehmoment und Kühlwassertemperatur ergeben.

Durch die zeitlich hoch aufgelöste Messung werden die maßgeblichen Beiträge zur Ölemission in der Expansions- und Ausschleppphase ermittelt. Das wird tendenziell durch parallel durchgeführte Ölverbrauchs-Simulationsberechnungen bestätigt. Mit dem neuen Messsystem lassen sich die Entstehungsmechanismen der Ölemission genauer beobachten. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen zum einen zur Steigerung der Vorhersagegenauigkeit in die Programmierung von Simulationssoftware ein, zum anderen werden sie zur gezielten Entwicklung von Motoren und Schmierölen und damit zur Minimierung der Ölemission genutzt.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Emissionen aus dem Schmieröl . . . . .	2
1.2	Bestimmung der Ölkonzentration im Brennraum . . . . .	7
1.2.1	Simulationsprogramme . . . . .	8
1.2.2	Messtechnik . . . . .	9
1.3	Aufgabenstellung . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Ölemissionsmessung im Brennraum</b>	<b>13</b>
2.1	Massenspektrometrische Messtechnik . . . . .	13
2.1.1	Einlasssystem . . . . .	14
2.1.2	Ionisierung . . . . .	15
2.1.3	Massenfilter . . . . .	15
2.1.4	MS/MS-Methode . . . . .	21
2.1.5	Detektor . . . . .	22
2.2	Auslegung der Probenahme . . . . .	22
2.2.1	Mathematisches Modell . . . . .	23
2.2.2	Numerisches Gitter . . . . .	24
2.2.3	Turbulenzmodell . . . . .	25
2.2.4	Gültigkeitsbereich . . . . .	26
2.2.5	Transiente Berechnung . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Apparatives und Methode</b>	<b>29</b>
3.1	Schnelle Datenaufnahme . . . . .	31
3.2	Massenfilter . . . . .	31
3.3	Einlasssystem für die Messung im Brennraum . . . . .	34
3.3.1	Schnelles Direkteinlasssystem . . . . .	39

3.3.2	Schnelles Direkteinlasssystem mit motornaher Druckstufe . . .	41
3.3.3	Schnelles Direkteinlasssystem mit 4 Druckstufen . . . . .	46
3.4	Berechnung des Gastransportes . . . . .	48
3.4.1	Geometrie . . . . .	48
3.4.2	Randbedingungen . . . . .	49
3.4.3	Strömungsmodell und Gültigkeitsbereich . . . . .	50
3.4.4	CFD-Lösung . . . . .	50
3.4.5	Ergebnisse . . . . .	51
3.5	Transferzeitkorrektur . . . . .	57
3.6	Kalibriertechnik . . . . .	63
3.6.1	Das Kalibriergerät – Pikal . . . . .	63
3.6.2	Der Verdampfungsprozess . . . . .	64
3.6.3	Verfahren . . . . .	66
3.6.4	Reproduzierbarkeit . . . . .	67
3.6.5	Bestimmung der Öldampfmenge im Brennraum . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>71</b>
4.1	Grundlagenuntersuchungen zum Abdampfverhalten dünner Schichten	71
4.2	Motorische Untersuchungen . . . . .	78
4.2.1	Versuchsträger . . . . .	78
4.2.2	Messungen im Brennraum . . . . .	80
4.2.3	Betriebspunktvariation . . . . .	82
4.2.4	Vergleich von Brennraum- und Abgaskrümmersmessung . . . . .	85
4.2.5	Vergleich der Brennraummessung mit der Simulation . . . . .	86
4.2.6	Instationäre Ölverbrauchseffekte . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Schlussbemerkung und Ausblick</b>	<b>91</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>94</b>
<b>A</b>	<b>Technische Daten des Motors</b>	<b>103</b>
<b>B</b>	<b>Technische Daten des Dosierventils</b>	<b>105</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Neutronenradiographie eines Ottomotors . . . . .	2
1.2	Das Tribosystem, bestehend aus Kolben, Kolbenring und Zylinder- lauffläche . . . . .	3
1.3	Ölverbrauchsmechanismen durch Wärme- und Gasströmungen . . . . .	5
1.4	Ölverbrauchsmechanismen der Kolbenbewegung . . . . .	5
1.5	Ölverbrauchsmechanismus, aufgrund der Öl-Kraftstoff-Interaktion . . . . .	6
1.6	Öleintrag in den Brennraum . . . . .	7
1.7	Mit dem Simulationsprogramm KOR3D/PRO berechneter Ölver- brauch . . . . .	9
2.1	Hochvakuumbereich eines Massenspektrometers . . . . .	13
2.2	Hauptkomponenten eines Massenspektrometers . . . . .	14
2.3	Quadrupol-Massenfilter . . . . .	16
2.4	Stabilität der Ionenflugbahnen . . . . .	18
2.5	Stabilitätsdiagramm mit zwei Arbeitsgeraden . . . . .	19
2.6	RF-Only-Betrieb mit resultierendem Hochpassmassenfilter . . . . .	20
2.7	Aufbau eines MS/MS-Massenspektrometers . . . . .	21
2.8	Unstrukturiertes numerisches Gitter eines Rohrquerschnitts . . . . .	25
3.1	Motorprüfstand und Massenspektrometer . . . . .	29
3.2	Schematische Darstellung der Messtechnik . . . . .	30
3.3	Schematische Darstellung eines Massenspektrums . . . . .	32
3.4	Kalibrierung der Hochpassfilter-Schnittkante mit MS/MS . . . . .	33
3.5	Einflussfaktoren auf den Gastransport im Einlasssystem . . . . .	34
3.6	Drucklaufzeit im Einlasssystem . . . . .	35
3.7	Drucklaufzeit und $O_2$ -Gaslaufzeit im Einlasssystem . . . . .	36
3.8	Änderung der Strömungsrichtung im Einlasssystem . . . . .	37

3.9	Schnelles Direkteinlasssystem . . . . .	39
3.10	Schema des Druckverlaufes über die Transferstrecke (SD) . . . . .	40
3.11	Schnelles Direkteinlasssystem mit motornaher Druckstufe . . . . .	41
3.12	Schema des Druckverlaufes über die Transferstrecke (SDMD) . . . . .	42
3.13	Laufzeitdiagramm des Ölsignals . . . . .	43
3.14	Betriebsgrenzen des Direkteinlasssystem SDMD . . . . .	44
3.15	Transferzeiten Messung SDMD . . . . .	45
3.16	Schnelles Direkteinlasssystem mit 4 Druckstufen . . . . .	46
3.17	Schema des Druckverlaufes über die Transferstrecke, SD4D . . . . .	47
3.18	Geometrie des Einlasssystems . . . . .	48
3.19	Druck- und Temperaturrendbedingungen am Einlass . . . . .	49
3.20	Lösungsschema einer transienten CFD-Simulation . . . . .	51
3.21	Druckverlauf im Einlasssystem $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ . . . . .	52
3.22	Druckverlauf im Einlasssystem $360^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$ . . . . .	52
3.23	Geschwindigkeitsverlauf im Einlasssystem $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ . . . . .	53
3.24	Geschwindigkeitsverlauf im Einlasssystem $360^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$ . . . . .	53
3.25	Entnommene und zugeführte Masse . . . . .	55
3.26	Konzentrationspfade durch das Einlasssystem . . . . .	56
3.27	Kurbelwinkelabhängige Transferzeit im Einlasssystems . . . . .	57
3.28	Verzerrung der zeitlichen Zuordnung . . . . .	58
3.29	Funktionsschema des genetischen Algorithmus . . . . .	60
3.30	Genetischer Algorithmus zur Transferzeitenbestimmung . . . . .	61
3.31	Transferzeitkorrigierte $CO_2$ -Messung und KPR-Rechnung . . . . .	62
3.32	Transferzeiten aus $CO_2$ -Messung und CFD-Rechnung . . . . .	62
3.33	Schematische Darstellung der Verdampfungskammer . . . . .	63
3.34	Verdampfungsprozess . . . . .	65
3.35	Dosiermasse in Abhängigkeit von Dosierdauer und Druck . . . . .	66
3.36	Kalibrierfolge . . . . .	68
3.37	Kalibriergeraden von drei aufeinander folgenden Messungen . . . . .	69
3.38	Abdampfrate des Öls $\dot{m}_{Oel,Zyl}(\varphi)$ in $\mu g/^\circ KW$ . . . . .	70
3.39	Eingedampfte Ölmenge $m_{Oel,Zyl}(\varphi)$ in mg . . . . .	70
4.1	Apparat zur dynamischen Verdampfung dünner Schichten . . . . .	73
4.2	Absorptionsspektren von Schmieröl . . . . .	74
4.3	Schichtdicke $x$ als Funktion der Rotationsfrequenz $f_{PT}$ . . . . .	75

4.4	Öldampfsignal in Abhängigkeit der Schichtdicke $x$ . . . . .	76
4.5	Schematische Darstellung des Motorenprüfstandes . . . . .	79
4.6	Probenahmeposition am Zylinder 1 des Versuchsmotors . . . . .	79
4.7	Messergebnisse von Sauerstoff, Kohlendioxid, Toluol und Öl . . . . .	80
4.8	Brennraumtemperatur aus Kreisprozessrechnung KPR . . . . .	81
4.9	Last- und Drehzahlvariation . . . . .	83
4.10	Beitrag der Arbeitstakte zur Gesamtölemission . . . . .	84
4.11	Gesamtkennfeld der verdampften Ölmenge pro Stunde . . . . .	84
4.12	Vergleich Brennraum- zu Abgasrümmermessung . . . . .	85
4.13	Qualitativer Vergleich von Messung und Simulation . . . . .	86
4.14	Vergleich Messung und Simulation (3. und 4. Takt) . . . . .	87
4.15	Brennraummessung im geschleppten Motorbetrieb . . . . .	88



# Tabellenverzeichnis

3.1	Direkteinlasssysteme für kontinuierliche Messungen: . . . . .	38
3.2	Fluidparameter . . . . .	49
3.3	Simulationsparameter . . . . .	50
3.4	Parameter für eine Öldampfkonzentration von $c_{Oel,Katib} = 100$ ppm . .	67
3.5	Mittelwert und Standardabweichung bei 0, 10, 20, 30 ppm . . . . .	67
3.6	Bestimmung der Kalibriergeraden mittels linearer Regression . . . . .	68
4.1	Vergleich der Prozessparameter . . . . .	77
4.2	Kenndaten des Versuchsträgers . . . . .	78
A.1	Technische Daten des Motors . . . . .	104
B.1	Technische Daten des Dosierventils . . . . .	105



# Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

$\mu\text{C}$ .....	Mikrocontroller
$k - \epsilon$ .....	Turbulenzmodell mit isotroper Dissipationsrate
$k - \omega$ .....	Turbulenzmodell mit Fortpflanzung der char. Frequenz
A/D .....	Analog-Digital-Wandler
ANSYS .....	Softwareproduzent
CAD .....	Computer Aided Design
CFD .....	Computational Fluid Dynamics
CFX .....	Programmname – Programm zur Computational Fluid Dynamics Berechnung
CI .....	Chemische Ionisierung
D/A .....	Digital-Analog-Wandler
DS .....	Druckstufe
EI .....	Elektronenstoß-Ionisierung
FC43 .....	Perfluorotributylamine
FVV .....	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
GA .....	Genetischer Algorithmus
GC-MS .....	Gaschromatographie - Massenspektrometrie
GOT .....	Oberer Totpunkt Gaswechsel
HC .....	Hydrocarbons - Kohlenwasserstoffe
HF .....	Hochfrequenz
HPM .....	Hochpass-Massenfilter
KORI3D .....	Programmname – Programm zur Berechnung von Kolbenringbewe- gungen
KPR .....	Kreisprozessrechnung

MS	.....	Massenspektrometer
MS/MS	.....	Tandemmassenspektrometrie
NIST	.....	National Institute of Standards and Technology
OPAC	.....	Programmname – Programm zur Berechnung von Kolbenringdynamik und Ölverbräuchen
P1,2	.....	Pumpe 1,2
PDGL	.....	Partielle Differenzialgleichung
PRO	.....	Programmname – Programm zur Berechnung von Ölverbräuchen
Q1	.....	Quadrupol 1
Q3	.....	Quadrupol 3
RF	.....	Radio-Frequency - Hochfrequenz
RK	.....	Restriktionskapillare
SD	.....	Schnelles Direkteinlasssystem
SD4D	.....	Schnelles Direkteinlasssystem mit 4 Druckstufen
SDMD	.....	Schnelles Direkteinlasssystem mit motornaher Druckstufe
SIM	.....	Selected Ion Monitoring
TK	.....	Transferkapillare
TOF	.....	Time-of-Flight
UT	.....	Unterer Totpunkt
ZOT	.....	Oberer Totpunkt Zündung
<b>b</b>	.....	Körperkraftvektor [N]
<b>f</b>	.....	Kraftvektor [N]
<b>I</b>	.....	Einheitstensor [–]
<b>T<sub>s</sub></b>	.....	Spannungstensor [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$ ]
<b>v</b>	.....	Geschwindigkeitvektor [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]
$\delta$	.....	Identitätsmatrix - Kronecker Delta-Funktion [–]
$\dot{m}$	.....	Massenstrom [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]
$\epsilon$	.....	Isotrope Dissipationsrate [ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$ ]
$\lambda$	.....	Mittlere freie Weglänge [m]
$\lambda$	.....	Wellenlänge [ $\mu\text{ m}$ ]
$\mu$	.....	Dynamische Viskosität [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ ]
$\nabla$	.....	Nabla-Operator [–]
$\omega$	.....	Frequenz der Wechsellspannung [Hz]
$\otimes$	.....	Dyadik-Operator [–]

$\phi_0$ .....	Potenzial an den Quadrupolstäben [V]
$\rho$ .....	Dichte [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
$\sigma$ .....	Moleküldurchmesser [m]
$\sigma_d$ .....	Oberflächenspannung [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$ ]
$\varphi$ .....	Kurbelwellenwinkel [°]
$\xi$ .....	Substitutionsvariable der Mathieu-Gleichung [–]
$A$ .....	Fläche [mm <sup>2</sup> ]
$a$ .....	Substitutionsvariable der Mathieu-Gleichung [–]
$a$ .....	Verstärkungsfaktor [–]
$c$ .....	Daten transferrate [ $\frac{\text{Mbits}}{\text{s}}$ ]
$c$ .....	Massenkonzentration [–]
$c_p$ .....	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck [ $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ ]
<i>counts</i> .....	Zählrate der Ionen [–]
$d$ .....	Durchmesser [mm]
$D_\phi$ .....	Diffusionskoeffizient [ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ]
$F$ .....	Kraft [N]
$f_a$ .....	Abtastrate [kHz]
$g$ .....	Arbeitsgerade des Quadrupols [–]
$h_{\text{Kolben}}$ .....	Kolbenhub [mm]
$h_{\text{tot}}$ .....	Totale Enthalpie [ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ ]
$I$ .....	Anzahl von Lösungskandidaten [–]
$I$ .....	Ionisierungsenergie [eV]
$k$ .....	Thermische Leitfähigkeit [ $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ]
$k$ .....	Turbulente kinetische Energie [ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ ]
$k_B$ .....	Boltzmann-Konstante [ $\frac{\text{J}}{\text{K}}$ ]
$Kn$ .....	Knudsenzahl [ $\frac{\text{N}}{\text{m}}$ ]
$L$ .....	Charakteristische Länge der Strömung [m]
$L$ .....	Leidenfrost-Temperatur [°C]
$l$ .....	Kapillarlänge [m]
$M$ .....	Drehmoment [Nm]
$m$ .....	Masse [kg]
$m/z$ .....	Masse zu Ladungsverhältnis [–]
$m_{\text{mol}}$ .....	Molare Masse [ $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ ]
$Ma$ .....	Mach-Zahl [–]

$N$ .....	Nukiyama-Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$n$ .....	Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]
$P$ .....	Population [–]
$p$ .....	Druck [Pa]
$q$ .....	Substitutionsvariable der Mathieu-Gleichung [–]
$r_0$ .....	Freier Radius im Quadrupol [mm]
$Re$ .....	Reynoldszahl [–]
$S$ .....	Lösungskandidat - Chromosom [–]
$S$ .....	Siedetemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$S$ .....	Transferzeitkorrekturfunktion [–]
$S_{\phi}$ .....	Quellenterm der Konzentration [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]
$S_E$ .....	Quellenterm der Energie [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^3}$ ]
$S_I$ .....	Quellenterm des Impulses [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\cdot\text{s}^2}$ ]
$T$ .....	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t$ .....	Zeit [s]
$t_{10-90}$ .....	Anstiegszeit [ms]
$U$ .....	Gleichspannungsanteil [V]
$U_B$ .....	Beschleunigungsspannung [V]
$V$ .....	Volumen [ $\text{m}^3$ ]
$V$ .....	Wechselspannungsanteil [V]
$v$ .....	Geschwindigkeit [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]
$w$ .....	Verdampfungsverlust nach Noack [%]
$We$ .....	Tropfen-Weber-Zahl [ $\frac{\text{s}}{\text{m}}$ ]
$x$ .....	Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ]
$x, y, z$ .....	Wegkoordinaten [m]

# Kapitel 1

## Einleitung

Die effizientere Nutzung der Energie und somit die Reduzierung des Verbrauches stehen im Mittelpunkt der Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Weltweit strengere Abgasgesetzgebungen fordern, dass die Emissionen von Automobilen weiter reduziert werden müssen [1]. In diesem Zusammenhang werden die Grenzwerte für den Ausstoß von Kohlenwasserstoffen (HC) reglementiert. Die Kohlenwasserstoffe stammen aus unverbranntem Kraftstoff und aus verdampften Anteilen des Schmieröls [2].

Das Motoröl ist maßgeblich für die Lebensdauer und Funktion des Motors, dabei übernimmt es im Motor wichtige Aufgaben wie [3]:

- Trennung der Gleitflächen
- Übertragung von Kräften an Stellen mit Mischreibung und Flüssigkeitsreibung
- Eliminierung unerwünschter Produkte:
  - Neutralisation flüssiger Verunreinigungen
  - Suspension fester Verunreinigungen
- Verschleißschutz an Reibstellen durch hydrodynamische Schmierung
- Korrosionsschutz der Oberflächen während des Stillstandes und vor aggressiven Gasen während des Betriebs
- Abdichten der Kolben-Kolbenringzone und Zylinderwand
- Kühlen

Es ist ein Ziel der Motoren- und Schmierstoffentwickler, diese Funktionen bei vertretbar geringen Ölemissionen zu optimieren.

## 1.1 Emissionen aus dem Schmieröl

Im Brennraum hat das Öl die Aufgabe, die Schmierung von Kolben, Kolbenring und Laufbahn zu gewährleisten. Es wird zuvor aus dem Ölvorrat dorthin transportiert. Die Drehbewegung der Pleuelwelle schleudert das Öl durch das Pleuellager. Davon spritzt ein Teil auf die Zylinderwand und den Pleuellager. Teilweise wird dieser zusätzlich auf der Unterseite mit einer Ölspritzdüse gekühlt [3, 4, 5], siehe Abbildung 1.1.

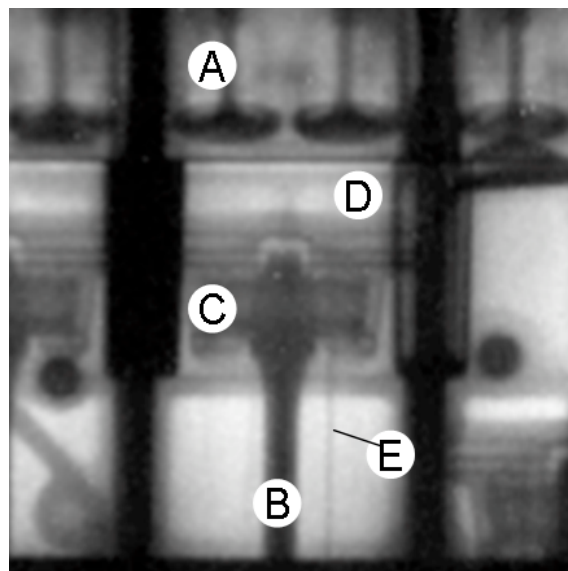


Abbildung 1.1: Neutronenradiographie eines Ottomotors:

**A** Ein- und Auslassventile, **B** Pleuelstange, **C** Pleuellager, **D** Pleuellagerfläche, **E** Ölstrahl zur Pleuellagerkühlung. Mit freundlicher Genehmigung von B. Schillinger ANTA-RES TU München [4, 5].

Die Abdichtung des Motorbrennraumes mit dem Pleuellager wird typischerweise mit einer Kombination aus drei Pleuellagerringen erreicht, die in den Pleuellagerfurchen sitzen. Sie vermindern das Durchströmen von Brennraumgas in das Pleuellagergehäuse (Blow-by), übertragen einen Teil der Wärme des Pleuellagers auf die Pleuellagerwand und

erzeugen während der Bewegung einen wenige Mikrometer dünnen Ölfilm auf der Zylinderwand, der die Reibung der Kolbengruppe vermindert [6]. Die Oberflächen der Kolbenringe bilden gemeinsam mit der Zylinderlaufwand und dem Schmieröl ein Tribosystem [7], siehe Abbildung 1.2.

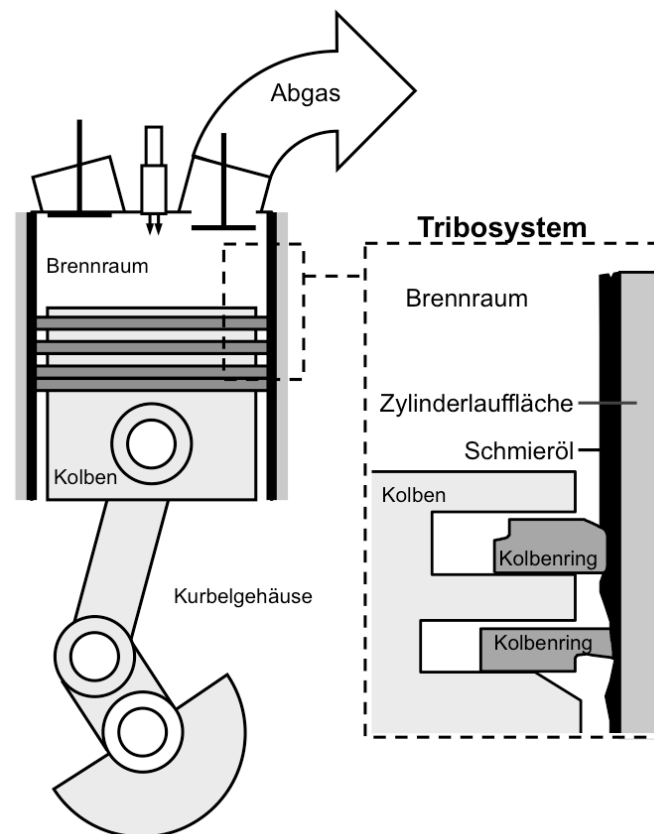


Abbildung 1.2: Das Tribosystem, bestehend aus Kolben, Kolbenring und Zylinderlauffläche:

Das Schmieröl im Brennraum hat die Aufgabe, den Verschleiß der beiden Reibpartner Pleuellringe und Zylinderlauffläche zu vermindern und den Brennraum zum Pleuellgehäuse hin abzudichten.

Die heißen Gase im Brennraum, die während der Arbeitstakte auftreten sowie die Pleuellbewegung und die Gasdynamik zwischen Brennraum und Pleuellgehäuse führen dazu, dass Öl über unterschiedliche Mechanismen in den Brennraum eingetragen wird.

Das in das Gas eingedrungene Schmieröl besteht überwiegend aus unverbrannten

Kohlenwasserstoffen und lagert sich u.a. an Partikeln im Rohabgas an. Es verlässt den Brennraum über den Abgaskrümmen [8]. Die Abgasmachbehandlung im Katalysator wird durch diese Stoffe langfristig beeinträchtigt. Die Konvertierungsleistung lässt nach und das führt zu höheren Emissionen. Die Optimierung der Ölemission kann u. a. mit den folgenden Parametern erreicht werden: Kolbendesign, Kolbenringgeometrie und -werkstoffe, Beschaffenheit der Zylinderlaufwand, Schmierölformulierung. Bei Direkteinspritzmotoren existiert zusätzlich eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Einspritzstrategie. Dazu ist die genaue Kenntnis der Mechanismen und deren Abhängigkeiten erforderlich.

### **Ölemissionsmechanismen**

Die bisher bekannten Mechanismen der Ölemission über das Tribosystem sind nachfolgend aufgeführt:

- Abdampfen von Oberflächen

Das Abdampfen von Oberflächen ist abhängig von der Gastemperatur, dem Druck, der Geschwindigkeit des Gases an der Phasengrenze, der Oberflächentemperatur des Schmierfilms, dem brennraumseitigen Wandwärmeübergangskoeffizienten sowie von der Ölzusammensetzung, siehe Abbildung 1.3a. Zum Abdampfen kommt es in allen Arbeitstakten des Motors, jedoch überwiegend im Expansions- und Ausschietakt [9, 10, 11].

- Reverse Blow-by

Das Durchblasen von Gas aus dem Zwischenringbereich in den Brennraum wird als Reverse Blow-by bezeichnet und ist abhängig von Druckdifferenzen zwischen den Kammervolumina der Kolbenringe und dem Brennraum sowie der Kolben- und Kolbenringgeometrie, siehe Abbildung 1.3b. Zur Ölemission kommt es hierbei vornehmlich in Phasen, in denen sich der Brennraumdruck reduziert, also während des Ansaugens bzw. in der Mitte der Expansion [9, 10].

- Blow-by

Blow-by bezeichnet den Gasstrom, der vom Brennraum an den Kolbenringen vorbei zum Kurbelgehäuse führt und mit einer Ölfracht beladen ist, siehe Abbildung 1.3c. Dieser Mechanismus ist mit der massenspektrometrischen Messtechnik im Brennraum nicht nachweisbar [21]. Blow-by tritt vorwiegend in der Kompressions- und Expansionsphase auf [9, 10, 11].

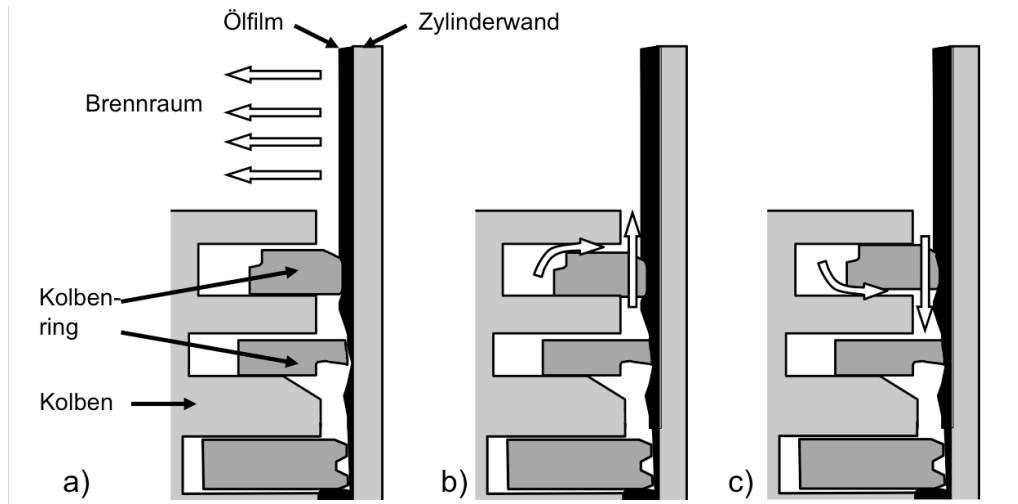


Abbildung 1.3: Ölverbrauchsmechanismen durch Wärme- und Gasströmungen:  
**a** Abdampfen von Oberflächen, **b** Reverse Blow-by, **c** Blow-by.

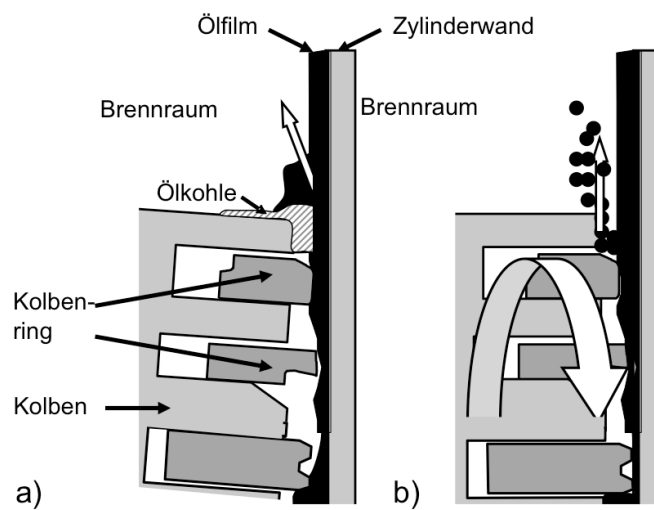


Abbildung 1.4: Ölverbrauchsmechanismen der Kolbenbewegung:  
**a** Abschaben des Ölfilms, **b** Abschleudern.

- Abschaben des Ölfilms

Ein Teil des Schmieröls von der Zylinderwand kann von der Oberkante des Kolbens abgeschabt werden, wenn sich im Feuerstegbereich Ölkohle angesammelt hat und der Kolben durch die Kolbensekundärbewegung verkippt wird, siehe Abbildung 1.4a. Dazu kann es am Ende der Expansion und des Ausschubens kommen [11].

- Abschleudern

Aufgrund von Massenkräften, die aus der Triebwerkskinematik resultieren, kann ein Teil des Schmieröls in den Brennraum geschleudert werden, siehe Abbildung 1.4b. Dazu kommt es in den Phasen, in denen die Kolbenbeschleunigung maximal ist, im Bereich des OT [10, 11].

- Öl-Kraftstoff-Interaktion

Hypothesen gehen von der Beaufschlagung des Ölwanfilms mit Kraftstoff aus, wodurch die Viskosität und das dynamische Abdampfverhalten sowie die Schichtdicke beeinflusst wird, siehe Abbildung 1.5. Es wird auch diskutiert, dass der Ölfilm lokal abgewaschen wird [12, 13].

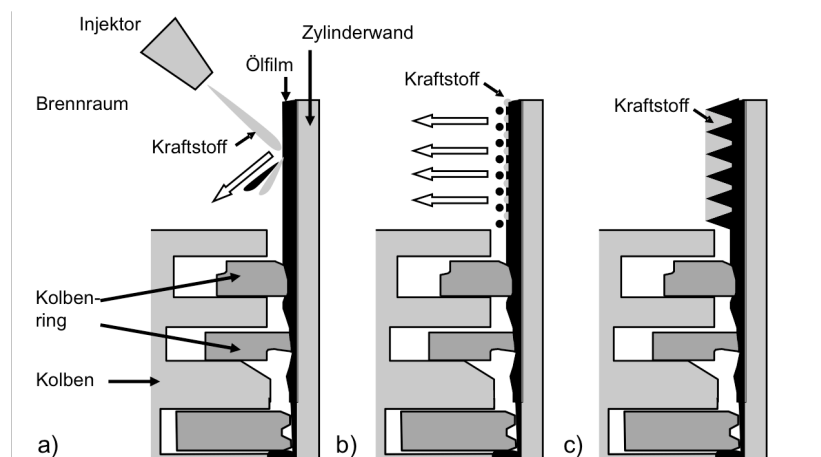


Abbildung 1.5: Ölverbrauchsmechanismus, aufgrund der Öl-Kraftstoff-Interaktion: **a** Abwaschen einer Ölmenge durch den injizierten Kraftstoff (Direkteinspritzer Ottomotor), **b** Verstärkte Abdampfneigung des mit Kraftstoff verdünnten Schmieröls, **c** Lokal vergrößerte Ölfilmstärke infolge einer Beaufschlagung mit Kraftstoff.



Messungen der Ölemission im Abgas sind in vorherigen Arbeiten durchgeführt worden [32, 33, 34]. Der Abgleich mit den Simulationsergebnissen ist über die Gesamtsumme möglich, siehe Abbildung 1.6.

### 1.2.1 Simulationsprogramme

Häufig verwendete Berechnungsprogramme für den Ölverbrauch sind: KOR3D und PRO der Universität Kassel [9, 17, 18], Glide der Firma AVL [14, 15] und OCAP des Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (MIT) [16]. Sie unterscheiden sich u. a. in den implementierten Ölverbrauchsmechanismen.

Mit der Programmkette KOR3D/PRO [9, 17, 18] lassen sich die Prozesse in zwei Schritten simulieren.

Mit KOR3D wird die Berechnung der Kolbenringbewegung in Abhängigkeit von Reibung und Gasdynamik dreidimensional durchgeführt. Sie bildet die Grundlage für die Bestimmung der Ölfilmstärke, die, ausgehend von der Kolbenringposition, von dem jeweiligen Ring erzeugt wird. Die Ölfilmstärke ist eine Eingangsgröße für PRO, das die Verdampfung berechnet.

Ausgehend von den im Brennraum herrschenden Temperaturen [19] und Wärmeströmen [20] werden die Randbedingungen berechnet, denen das Schmieröl während eines Arbeitsspiels ausgesetzt ist. Die Erwärmung des Ölfilms durch die Verbrennung führt zu einem Abdampfen, dessen Rate abhängig von den Öleigenschaften, Druck, Öldampfsättigungsgrad des umgebenden Gases und den herrschenden Gasgeschwindigkeiten ist.

Zusätzlich zum Abdampfen von der Zylinderwand ermittelt PRO das in den Brennraum emittierte Öl, welches abhängig von der Gasdynamik durch Reverse Blow-by eingetragen wird. Für jeden Arbeitstakt lassen sich die Anteile zum Ölverbrauch für die Ölverbrauchsmechanismen Abdampfen, Blow-by und Reverse Blow-by getrennt von der Software ausgeben [21], siehe Abbildung 1.7.

Zurzeit sind in keinem Berechnungsprogramm alle bekannten Ölverbrauchsmechanismen vollständig implementiert. Eine zielgerichtete Entwicklung kann durch den

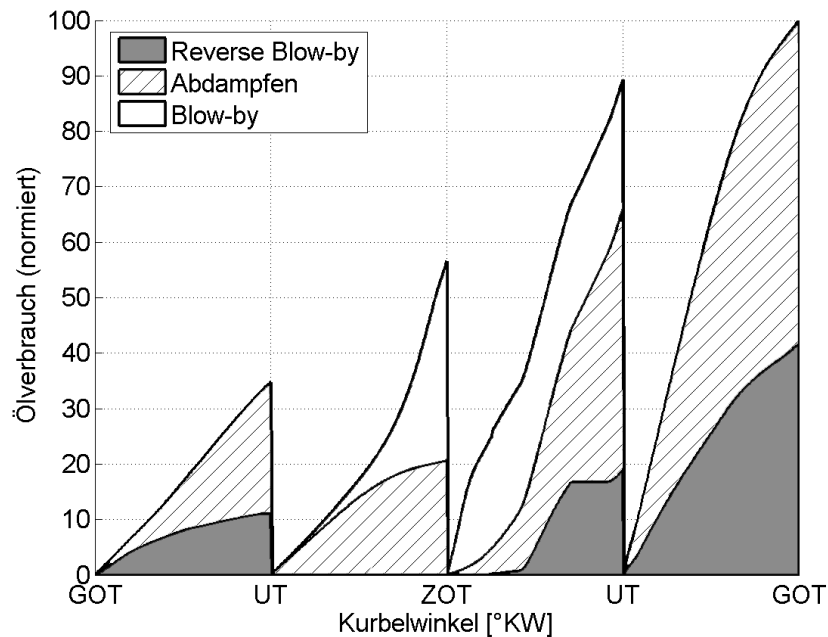


Abbildung 1.7: Mit dem Simulationsprogramm KOR3D/PRO berechneter Ölverbrauch:

Die Beiträge der Arbeitstakte als Funktion des Kurbelwinkels, aufgeschlüsselt auf die Ölverbrauchsmechanismen: Abdampfen, Blow-by und Reverse Blow-by.

Abgleich der Modelle mit Messungen erreicht werden, was jedoch neue, zeitlich hoch aufgelöste Messungen des Öls im Motorbrennraum notwendig macht [22].

## 1.2.2 Messtechnik

Aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung von Kraftstoffen und Schmierölen, die sich hauptsächlich durch die Länge der Kohlenwasserstoffketten unterscheiden, ist die Messung der Ölemission eine große Herausforderung.

Einige Methoden zur abgasseitigen Ölkonzentrationsbestimmung verwenden Markierungssubstanzen (Tracer). Diese werden dem Schmieröl vor der Messung zugesetzt. Vorwiegend wird dabei auf Tracer zurückgegriffen, die sich mit einfachen Analysatoren nachweisen lassen. Dabei ist es wichtig, dass das Messergebnis nicht durch Querempfindlichkeiten beeinträchtigt wird. Als chemische Tracer eignen sich u. a. Schwefeldioxid  $SO_2$  [24, 23] und Pyren  $C_{16}H_{10}$  [25]. Diese werden z. B. mit Fluo-

reszenzverfahren oder mit Massenspektrometern (MS) detektiert. Weiterhin werden Substanzen wie Tritium [26, 27] oder Brom [28, 29, 30] als Tracer eingesetzt. Bei diesen Methoden wird die Radioaktivität zur Bestimmung der Ölemission herangezogen [31].

Die Forderung nach einer Methode ohne Tracer, mit der - zeitlich hoch aufgelöst - einzelne Arbeitsspiele gemessen werden sollten, führte zur Entwicklung eines massenspektrometrischen Messsystems zur direkten Detektion der langkettigen, schwerflüchtigen Ölmoleküle [32, 33]. Da die emittierte Ölkonzentration bei modernen Motoren sehr gering ist, muss zur Messung der Unterschied der Molekülkettenlänge zwischen den Kraftstoff- und den Schmierölbestandteilen als Summenparameter genutzt werden. Dafür ist eine spezielle Filtercharakteristik für Quadrupol-Massenfilter realisiert worden, die dem Detektor nur die Fragmente der ölbürtigen Kohlenwasserstoffe zuführt, ein so genannter Hochpassmassenfilter (HPM) [34].

So ist erstmalig die Ölemission mit einer Anstiegszeit von  $t_{10-90} = 4$  ms im Abgas bestimmt worden. Zahlreiche Veröffentlichungen widmen sich dem transienten Verhalten der Ölemission auf dynamische Last- und Drehzahländerungen des Motors. Als Reaktion auf bestimmte Lastwechsel zeigt insbesondere das Ölemissions-signal einen systematischen Verlauf, der eine systemtheoretische Betrachtung der Verbrauchsmechanismen ermöglicht [12, 35]. Der Einfluss von Reverse Blow-by wurde ferner in einem Experiment nachgewiesen, bei dem der Stoß des Topringes erweitert wurde [36]. Hinweise auf die Interaktion von Kraftstoff und Öl sind mit Pyren als Tracer und einem Time-of-Flight (TOF) Massenspektrometer [13] und mit dem HPM [12] ermittelt worden. Beide zeigten eine Abhängigkeit der Ölemission vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis  $\lambda$ .

Bei allen aufgeführten Methoden wird das Gas aus dem Abgasstrang hinter dem Auslassventil entnommen. Damit lassen sich die Ölverbrauchsmechanismen im Zylinder nicht zeitlich aufgelöst erfassen. Dies ist jedoch zum tieferen Verständnis der Vorgänge und besonders zur Optimierung der Simulationsmodelle erforderlich. Deshalb soll die Ölverdampfung im Brennraum „kurbelwinkel“-aufgelöst gemessen werden. Dieses erfordert ein neues System, das in der vorliegenden Arbeit beschrieben wird.

## 1.3 Aufgabenstellung

Im Vergleich zu den Messungen im Abgasstrang erfordern die periodisch wechselnden Zylinderinnendrucke eines Ottomotors die Berücksichtigung eines wesentlich größeren Eingangsdruckbereiches für das Gasentnahmesystem. Damit ergibt sich eine Reihe von neuen Teilaspekten, die in dieser Arbeit untersucht und geklärt werden müssen. Für den Einsatz der schnellen, massenspektrometrischen Messtechnik mit Probenahme aus dem Brennraum ergeben sich daher neue Anforderungen, die anhand der Grundlagen erarbeitet werden sollen, siehe Kap. 2.

Die Messung im Brennraum erfordert die Entwicklung einer Datenaufnahme, die die Massenspektrometerdaten gleichzeitig mit dem Kurbelwinkel des Motors aufzeichnet, siehe Kap. 3.1.

Für die schnelle Analyse der Zylindergaszusammensetzung sind entsprechende MS-Aufnahmetechniken zu erstellen. Die Bestimmung der Ölverdampfung verlangt eine andere Messmethode als die, welche zur Messung der Reaktionspartner und Reaktionsprodukte verwendet wird, siehe Kap. 3.2.

Der Transfer des Gases vom Brennraum bei Drücken von einigen 10 bar zum Massenspektrometer, in dem Hochvakuum vorliegt, erfordert ein Gasentnahmesystem, das eine extreme Druckreduzierung bei wechselnden Eingangsdrücken aufrechterhalten kann. Es soll zu jeder Zeit zu einer Gasentnahme kommen, sowohl bei sehr hohen Drücken als auch in den Phasen, in denen ein deutlicher Unterdruck im Zylinder vorherrscht, z. B. während des Ansaugtaktes bei geringer Motorlast, siehe Kap 3.3.

Für den Bau einer derartigen Probenahme muss ein Berechnungsmodell entwickelt werden, das die dynamischen Randbedingungen des Brennraumes auf der einen Seite, das Vakuum des Massenspektrometers auf der anderen und die teilweise komplexe Geometrie des Einlasssystems mit Vorvakuumkammer und Druckregelung für transiente Berechnungen hinreichend genau abbilden kann, siehe Kap. 3.4.

Aufgrund der nicht konstanten Gaslaufzeit durch eine Kapillare, die mit Druckpulsen der motorischen Verbrennung beaufschlagt wird, kommt es zu einer takt-

abhängigen Transferzeit. Die Zuordnung der Messsignale auf den entsprechenden Drehwinkel der Kurbelwelle und somit zu den Arbeitstakten des Zylinders erfordert die Bestimmung der Gaslaufzeit durch das Einlasssystem, siehe Kap. 3.5.

Letztendlich soll die Ölemission wie allgemein üblich als Absolutwert in Gramm pro Stunde angegeben werden. Der Bezug der gemessenen Signale auf absolute Größen soll mit einem Kalibrierverfahren erreicht werden, siehe Kap. 3.6.

Die Charakterisierung der Abdampfeigenschaften eines Ölfilms, der den Brennraumbedingungen hinsichtlich Filmdicke und Form des Energieeintrags gerecht wird, soll bezüglich der Kraftstoff-Öl-Interaktion untersucht werden, siehe Kap. 4.1.

Motorische Untersuchungen (Kap. 4.2) sollen die Teilüberlegungen und das gesamte Verfahren zur Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum bestätigen. Zur Weiterentwicklung von Simulationsprogrammen soll es ermöglicht werden, zuvor unbekannte Parameter mithilfe der Messung zu ermitteln.

# Kapitel 2

## Grundlagen der Ölemissionsmessung im Brennraum

### 2.1 Massenspektrometrische Messtechnik

Die Abbildung 2.1 zeigt den Hochvakuumbereich des MS Varian 1200.

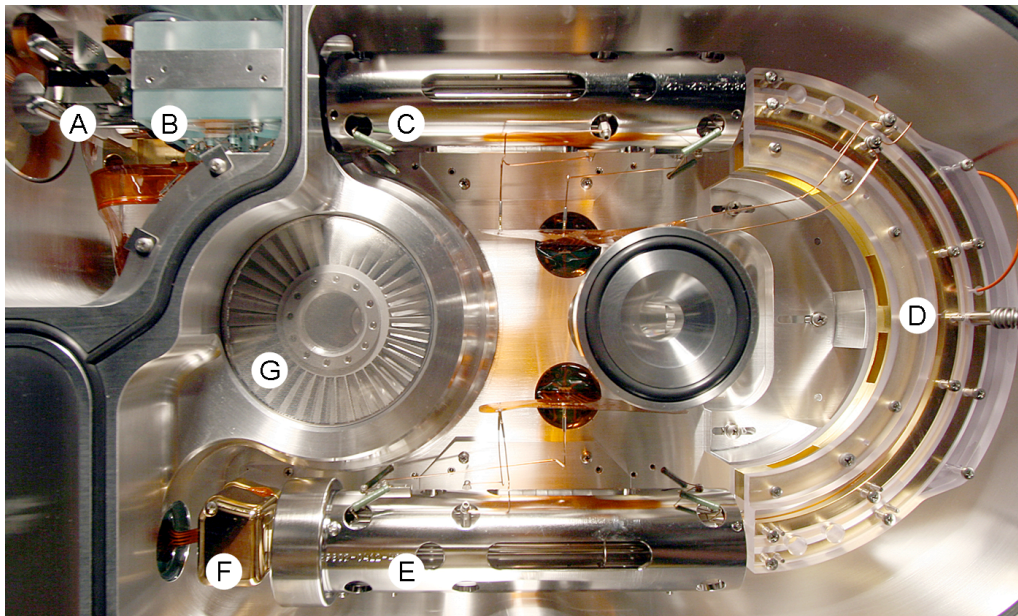


Abbildung 2.1: Hochvakuumbereich eines Massenspektrometers:

A Ionenquelle, B Linsen und Hexapol, C Quadrupol Massenfilter Nr. 1, D Quadrupol Nr. 2 mit Kollisionenzelle, E Quadrupol Massenfilter Nr. 3, F Detektor, G Turbomolekularpumpe.

Für die Bestimmung von Einzelkomponenten in Gasgemischen wie dem Öldampfgehalt im Brennraum sind Massenspektrometer besonders geeignet. Sie besitzen eine ausreichend hohe Zeitauflösung und Nachweisstärke zur Erfassung von schnellen Vorgängen im Zylinder. Die Hauptkomponenten eines Massenspektrometers sind in der Abbildung 2.1 und 2.2 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

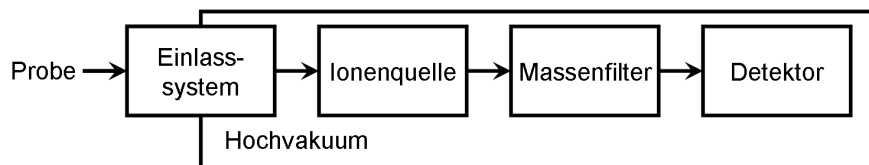


Abbildung 2.2: Hauptkomponenten eines Massenspektrometers:

### 2.1.1 Einlasssystem

Das Einlasssystem überführt die Probe aus dem atmosphärischen Druck in den Vakuumbereich. An dieser Stelle werden in der Laboranalytik häufig Gaschromatographen (GC) verwendet. Die Laufzeit der Probe durch eine GC-Kapillare beträgt ca.  $1 \text{ min} < t_{GC} < 60 \text{ min}$ . Typischerweise werden die gemessenen Massenspektren über die Laufzeit dargestellt. Da unterschiedliche Stoffe verschiedene Laufzeiten benötigen, können einzelne Substanzen getrennt und identifiziert werden. Zur kontinuierlichen Messung im Brennraum kann ein GC-Einlass aufgrund der kurzen Prozesszeit ( $20 \text{ ms} < t_{Arbeitspiel} < 120 \text{ ms}$ ) nicht verwendet werden.

Für schnelle Onlineanalysen werden Direkteinlasssysteme aufgrund ihrer geringen Durchlaufzeiten im Bereich weniger Millisekunden benutzt [34]. Wichtige Parameter für Einlasssysteme sind der durchgelassene Massenstrom  $\dot{m}$  und daraus folgend der Druck  $p$ , der sich im Hochvakuum bzw. der Ionenquelle einstellt. Die Betriebstemperatur  $T$  kann die Entmischung von Stoffgemischen beeinflussen, wenn die Taupunkttemperatur einzelner Stoffe unterschritten wird. Es kommt zur Kondensation an den Oberflächen der Transferkapillaren.

## 2.1.2 Ionisierung

Die Ionisierung der Probe in der Ionenquelle (IQ) ist die grundlegende Voraussetzung für die darauf folgende Massentrennung. Die Ionen werden im Vakuumteil durch elektromagnetische Felder beschleunigt und im Massenfilter getrennt. Der Ionisierungsenergie  $I$  kommt eine besondere Bedeutung zu. Von ihr hängt die Höhe der Ionenausbeute ab. Ist die verwendete Ionisierungsenergie größer als die Energie, die benötigt wird, um ein Molekül zu ionisieren, kommt es zum Zerschneiden des Moleküls. Wichtige Ionisierungsverfahren für die hier gestellte Aufgabe sind [37]:

- Elektronenstoß-Ionisierung (EI)

Bei der EI wird ein Elektronenstrahl auf der Achse eines Magnetfeldes erzeugt. Die Moleküle stoßen mit den Elektronen zusammen. Hierbei wird Energie übertragen, ein Elektron herausgestoßen und das Molekül somit ionisiert. Liegt die Ionisierungsenergie des Moleküls unterhalb der von der Quelle emittierten, kommt es zum Zerschneiden der Molekülstruktur (Fragmentierung). Je nach Stoffart entstehen dabei charakteristische Fragmentierungsmuster, die für eine Energie von  $I = 70 \text{ eV}$  in Bibliotheken gelistet sind und so eine Stoffidentifizierung ermöglichen.

- Chemische Ionisierung (CI)

Bei CI wird ein Gas durch Elektronenbeschuss angeregt. Das Gas tauscht durch Stoßprozesse mit den Molekülen der Probe Ladungen aus. Das Zerschneiden von größeren Molekülen ist hier weniger wahrscheinlich als bei EI, da die überschüssige Energie während des Stoßes klein ist. Die Analytitionen werden vergleichsweise schonend ionisiert.

## 2.1.3 Massenfilter

Das Massenfilter charakterisiert das Massenspektrometer und bestimmt den Einsatzbereich des Instruments maßgeblich. Im Filter werden die Ionen ihrem Masse-zu-Ladungs-Verhältnis ( $m/z$ ) entsprechend selektiert. Hierbei kommen den Kennwerten obere und untere Massengrenze sowie dem Massenaufklärungsvermögen eine besondere Bedeutung zu. Sie bestimmen die analytischen Fähigkeiten des MS. Das Quadrupol-Massenfilter (Abbildung 2.3) eignet sich mit einer speziellen Filtercharakteristik besonders für diese Aufgabe, wenn er wie in dem hier beschriebenen

Verfahren angesteuert wird.

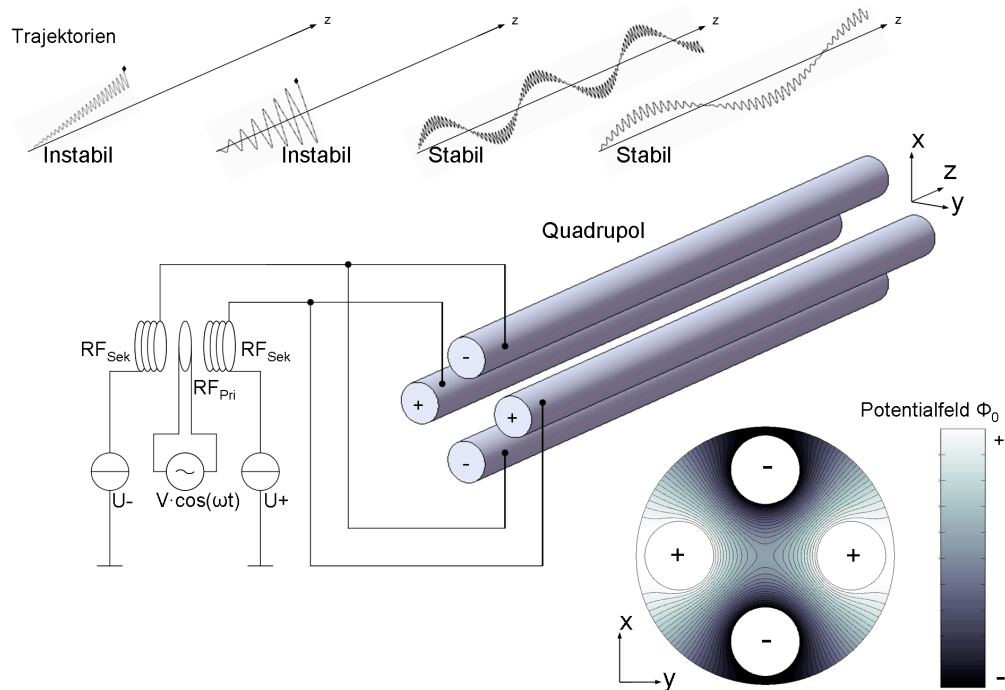


Abbildung 2.3: Quadrupol-Massenfilter:

Zwischen den Stäben wird in der X-Y-Ebene ein hyperbolisches Potenzialfeld generiert.

Ein Quadrupol-Massenspektrometer nutzt zur Massentrennung vier parallele Stabelektroden, die mit einem elektrischen Hochfrequenz-Feld (HF) betrieben werden. Das HF-Feld wird für die Analyse so eingestellt, dass die Flugbahn nur für Ionen eines bestimmten Masse-zu-Ladungs-Verhältnisses stabil ist, für alle anderen nicht. Das an die Elektroden angelegte Potenzial  $\Phi_0$  erzeugt ein näherungsweise hyperbolisches E-Feld senkrecht zur Z-Achse.

Für die folgenden Erkenntnisse ist Paul 1989 [38] mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet worden:

$$\Phi_0 = U + V \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$\Phi(x, y, t) = \frac{x^2 - y^2}{2r_0} \Phi_0 \quad (2.2)$$

Das E-Feld bewirkt eine Kraft  $\vec{F}$  auf elektrische Ladungsträger:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} m \cdot \ddot{x} \\ m \cdot \ddot{y} \\ m \cdot \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{x}{r_0^2} e \cdot (U + V \cos(\omega t)) \\ +\frac{y}{r_0^2} e \cdot (U + V \cos(\omega t)) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Hieraus lassen sich die Bewegungsgleichungen direkt ableiten:

$$m \cdot \ddot{x} + \frac{x}{r_0^2} e \cdot (U + V \cos(\omega t)) = 0 \quad (2.4)$$

$$m \cdot \ddot{y} - \frac{y}{r_0^2} e \cdot (U + V \cos(\omega t)) = 0 \quad (2.5)$$

$$m \cdot \ddot{z} = 0 \quad (2.6)$$

Durch die folgende Substitution erhält man die Mathieu-Gleichung:

$$\xi = \frac{\omega \cdot t}{2}, a = \frac{4 \cdot e \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega}, q = \frac{2 \cdot e \cdot V}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega} \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2 x}{d\xi^2} + (a + 2q \cdot \cos(2\xi)) \cdot x = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{d^2 y}{d\xi^2} + (a + 2q \cdot \cos(2\xi)) \cdot y = 0 \quad (2.9)$$

Aus der allgemeinen Lösung lassen sich Grenzen für die Stabilität der Ionenflugbahnen in Abhängigkeit von den Parametern ableiten [39, 40, 41], siehe Abbildung 2.4.

Die Umrechnung der Parameter  $a$  und  $q$  in Gleich- und Wechselspannung wird anhand eines Beispiels für die einfach geladenen Masse gezeigt. In Abbildung 2.5 ist das Stabilitätsdiagramm für die Parameter:  $r_0 = 10 \text{ mm}$ ,  $\omega = 1 \text{ MHz}$ ,  $m/z = 170$  dargestellt.

Die Charakteristik des Massenfilters wird durch eine Arbeitsgerade  $g$  bestimmt. Sie legt das Verhältnis von Gleich- und Wechselspannung fest, mit der der Quadrupol betrieben wird. Mit diesem Filter können Substanzen einer konstanten Ionenmasse bei einer hohen Geschwindigkeit und variierbaren Filtereigenschaften gemessen werden.

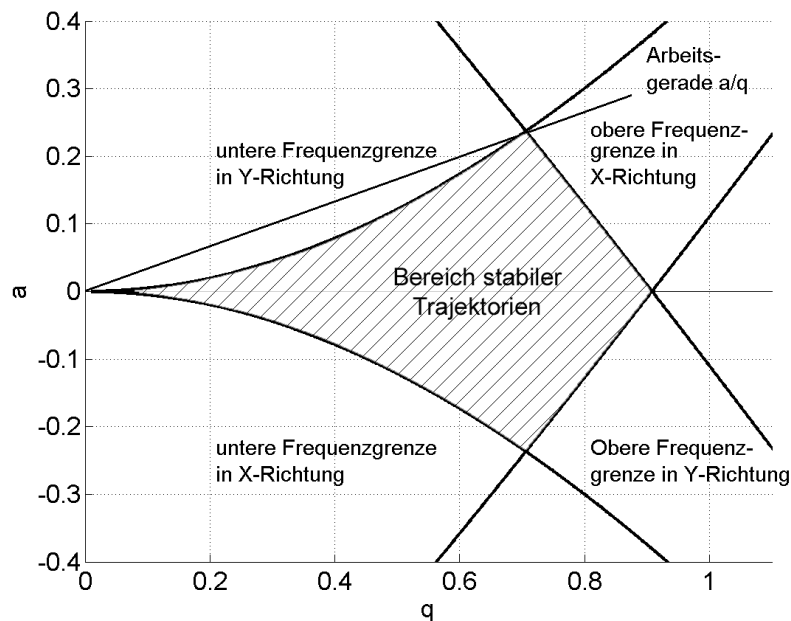


Abbildung 2.4: Stabilität der Ionenflugbahnen:

Lösungen der Mathieu-Gleichung begrenzen den Parameterraum von  $a$  und  $q$ , in dem ein Ion den Quadrupol auf einer stabilen Trajektorie passieren kann.

In Triple-Quad-Massenspektrometern werden drei dieser Filter hintereinander geschaltet und ermöglichen damit die Tandemmassenspektrometrie (MS/MS), siehe Kapitel 2.1.4.

Abbildung 2.5 zeigt, dass die Arbeitsgeraden  $g_1$  und  $g_2$  je nach Steigung  $a/q$  unterschiedliche Durchlassbereiche für den Quadrupolfilter erzeugen [41]. Anhand des Stabilitätsdreiecks lassen sich drei Betriebsmodi für den Quadrupol-Massenfilter ableiten.

**Spektrumaufnahme - SCAN:** Ein komplettes Massenspektrum wird durch kontinuierliche Erhöhung der Spannungen  $U$  und  $V$  (im festen Verhältnis) abgetastet. Hierbei sind während eines Durchlaufes in einem Zeitabschnitt zunehmend höhere Ionenmassen auf einer stabilen Trajektorie durch den Filter unterwegs. Die Masse wird über die Spannung bestimmt, die zum Zeitpunkt der Detektion herrschte.

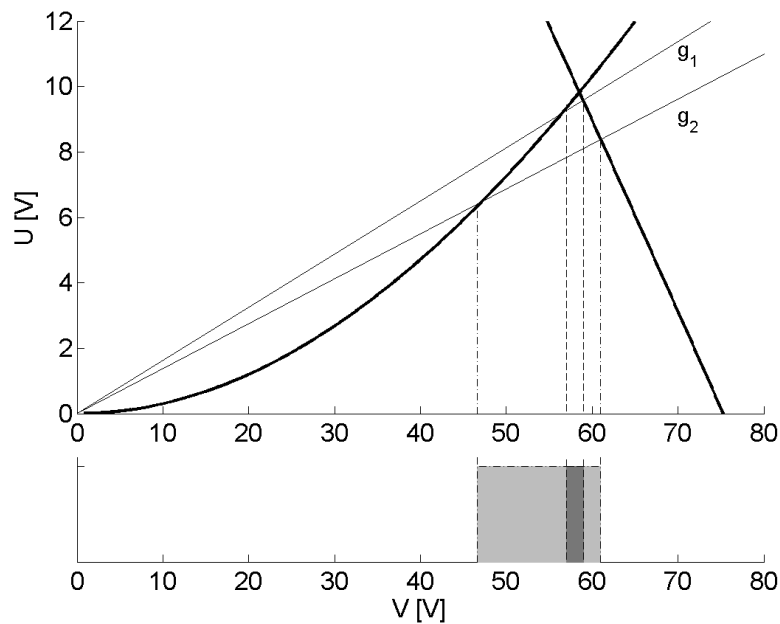


Abbildung 2.5: Stabilitätsdiagramm mit zwei Arbeitsgeraden:

Die Geraden  $g_1$  und  $g_2$  repräsentieren je ein Spannungsverhältnis, bei dem der Quadrupol betrieben wird. Unten ist die resultierende Filterbreite dargestellt.

**Selected Ion Monitoring - SIM:** Ausgewählte diskrete Ionenmassen können transmittiert werden, indem nicht nur das Verhältnis  $U/V$ , sondern auch die Spannung  $U$  konstant gehalten wird.

**Hochpassfiltermodus - HPM:** Zum schnellen Nachweis ölbürtiger Kohlenwasserstoffionen ist erstmalig der Hochpassmodus (HPM) [34] eingesetzt worden. Im so genannten RF-Only-Betrieb wird eine spezielle Filtercharakteristik generiert. Ionen mit einer Masse, die größer ist als die der festgelegte Filterschnittkante, können den Quadrupol passieren, alle andere werden ausgeschleust. Hierzu wird der Quadrupol mit einer reinen Wechselspannung  $\Phi_0 = V \cos(\omega t)$  betrieben. Das Funktionsprinzip ist anhand eines Beispiels in Abbildung 2.6 dargestellt.

Für jedes Masse-zu-Ladungs-Verhältnis  $m/z$  ergibt sich im Spannungsraum ein Dreieck, das mit zunehmender Masse einen größeren Stabilitätsbereich begrenzt. Für die Hochpassfilterung wird der Quadrupol in einem Arbeitspunkt betrieben ( $U = 0 \text{ V}$ ;  $V = 320 \text{ V}$ ). Alle Stabilitätsdreiecke, die diesen Punkt beinhalten, markieren

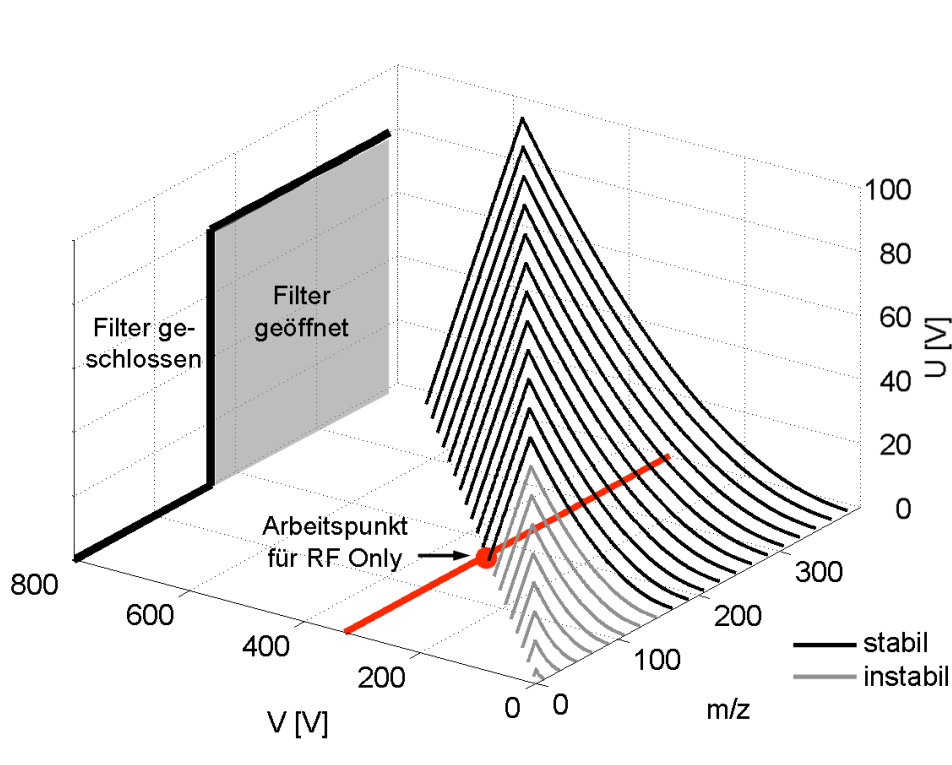


Abbildung 2.6: RF-Only-Betrieb mit resultierendem Hochpassmassenfilter:

Mit zunehmenden Masse-zu-Ladungs-Verhältnis der Ionen umschließt das entsprechende Stabilitätsdreieck größerer Flächen im Gleich- / Wechselfeldraum  $U; V$ . Bei fehlendem Gleichspannungsanteil  $U = 0 \text{ V}$  und  $V = 320 \text{ V}$  ergibt sich ein Durchlassbereich für Ionen mit  $m/z \geq 170$ ;  $r_0 = 10 \text{ mm}$ ;  $\omega = 1 \text{ MHz}$ .

die Masse der Ionen, deren Trajektorien durch den Quadrupol stabil sind. Für den in Abbildung 2.6 gewählten Arbeitspunkt ist der Filter aber einer Massengröße von  $m/z \geq 170$  geöffnet.

Die schnelle Detektion von ölbürtigen Kohlenwasserstoffen im Abgas von Verbrennungsmotoren erfordert keine hohe Selektivität. Die Trennung der Schmierölanteile  $C_{20}$  bis  $C_{32}$  von Kohlenwasserstoffen aus dem Otto-Kraftstoff  $C_5$  bis  $C_{10}$  erfolgt ab einer Filterschnittkante bei  $m/z = 170$  entsprechend einem  $C_{12}$ -Alkan.

Mit diesem Hochpassfilter werden alle Ionen, deren Masse darüber liegt, auf den Detektor geleitet und entsprechend ausgewertet. Die Betriebsparameter des Quadrupols verändern sich mit der Zeit nicht. Auf diese Weise wird ein kontinuierlicher,

schneller Messbetrieb mit dem Massenfilter realisiert.

### 2.1.4 MS/MS-Methode

Die Kopplung mehrerer Massenfilter hintereinander ermöglicht eine Verbesserung der Selektivität und Sensitivität des Gesamtsystems. Die Tandem-Massenspektrometrie, auch bekannt unter der Abkürzung MS/MS, ermöglicht einen tieferen Einblick in den Molekülaufbau. Das ist u. a. dann sinnvoll, wenn verschiedene Moleküle mit gleicher Masse getrennt werden sollen. Hierbei können verschiedene Analysatoren miteinander kombiniert werden.

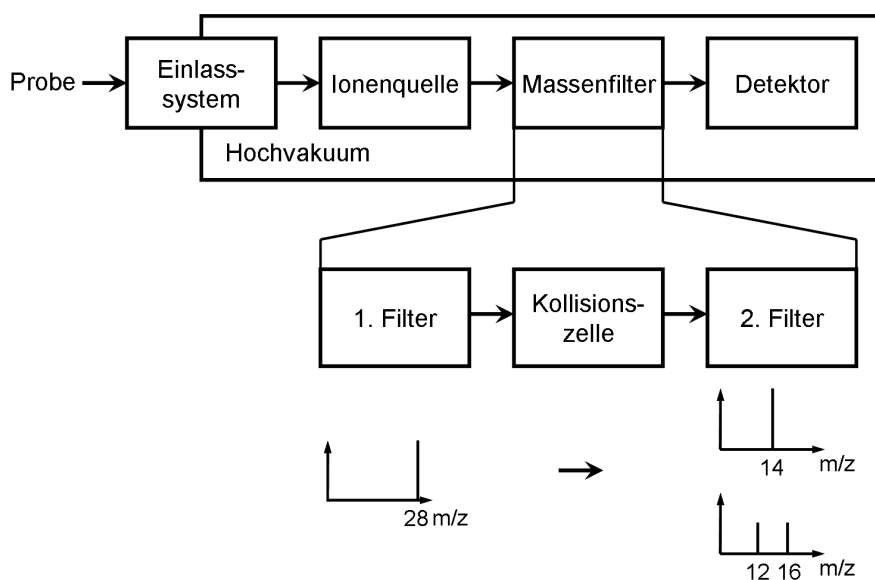


Abbildung 2.7: Aufbau eines MS/MS-Massenspektrometers:

Die Massenfiltereinheit besteht aus zwei Filtern und einer Kollisionszelle. Mit dem 1. Filter wird das Mutterion im SIM-Modus ausgeschleust, daraufhin in der Kollisionszelle mit einem Edelgas, z. B. Argon, fragmentiert und mit dem 2. Filter werden im SCAN-Betrieb die Tochterionen analysiert.

Abbildung 2.7 zeigt den Aufbau eines MS/MS – Systems. Am Beispiel des mit dem 1. Filter diskriminierten Mutterions bei  $m/z = 28$  wird dargestellt, wie auf die Molekülstruktur zurückgeschlossen werden kann. Stickstoff  $N_2$  und Kohlenmonoxid  $CO$  überlagern sich in diesem Massebereich und sind mit einem einfachen Quadrupol

nicht zu trennen. Das Fragmentierungsmuster, das mit dem 2. Filter aufgenommen wird, zeigt, ob das Molekül aus zweifachem Stickstoff ( $m/z = 14$ ) oder aus Sauerstoff ( $m/z = 16$ ) und Kohlenstoff ( $m/z = 12$ ) besteht.

### 2.1.5 Detektor

Detektoren generieren zum Nachweis der transmittierten Ionen aus den auftretenden elektrischen Ladungen einen messbaren Strom. Dieser wird dem Datensystem als digitalisierter Messwert zugeführt. Zur Verstärkung des Stroms wird das Prinzip der Sekundärelektronenvervielfachung angewendet. Dabei reagiert ein Material mit einer geringen Austrittsarbeit, wenn es an eine Beschleunigungsspannung  $U_B$  angeschlossen ist, auf das Auftreffen eines Ladungsträgers (Ion, Elektron) mit der Emission von mehreren, freien Elektronen. Die Hintereinanderschaltung mehrerer solcher Stufen erzeugt bei jedem zu detektierenden Ion eine messbare Lawine von Elektronen, sodass sich eine Verstärkung von typischerweise  $a = 10^6$  ergibt. Detektoren dieser Art sind Sekundärelektronenvervielfacher wie z. B. Kanalelektronenvervielfacher (Channeltron) und Mikrokanalplatten (Microchannel plates).

## 2.2 Auslegung der Probenahme

Da das Gas aus dem Brennraum bei Drücken im Bereich  $3 \cdot 10^4 \text{ Pa} < p < 4 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  entnommen werden soll, kommt der Bestimmung der Gasdynamik im Entnahmesystem eine besondere Bedeutung zu. Für die Entwicklung ist es sinnvoll, anstelle von empirischen Untersuchungen, die Strömungsvorgänge in Abhängigkeit von der komplexen Sondengeometrie mit einem dreidimensionalen Berechnungsmodell vorherzusagen. Dabei müssen die Druck- und Temperaturänderungen im Brennraum sowie in der Verbindungsstrecke zum Massenspektrometer und der Bereich bis kurz vor die Ionenquelle berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall ist das zu erwartende Verhältnis von der Strömungsgeschwindigkeit zu der Schallgeschwindigkeit im Fluid der Entnahmestrecke teilweise sehr groß (Mach-Zahl  $Ma$ ). Ab  $Ma > 0,3$  muss das Fluid als kompressibel angenommen werden. Weiterhin ist aufgrund der auftretenden hohen Reynoldszahl mit einer turbulenten Strömung zu rechnen. Zusätzlich sollen die Gastransferzeiten durch das Entnahmesystem bestimmt werden. Die Berechnung erfordert ein mathematisches Modell, das diese Eigenschaften abbildet.

## 2.2.1 Mathematisches Modell

Grundlage des Differenzial-Gleichungssystems sind die Prinzipien der Erhaltung von Masse und Impuls in einem Kontrollvolumen (KV), d. h. in einem vorgegebenen Raum im Gegensatz zu einer vorgegebenen Menge (Kontrollmasse, KM). Für die Herleitung werden die Erhaltungsgleichungen zunächst für eine Kontrollmasse formuliert [42, 45]:

Erhaltungsgleichung für die Masse, die Änderungsrate der Menge in einer gegebenen Kontrollmasse:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (2.10)$$

$m$ : Masse;  $t$ : Zeit.

Erhaltungsgleichung für den Impuls, durch die Wirkung von Kräften kann der Impuls einer Kontrollmasse geändert werden, es gilt das zweite Newtonsche Bewegungsgesetz:

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \sum \mathbf{f} \quad (2.11)$$

$m$ : Masse;  $\mathbf{v}$ : Geschwindigkeitsvektor;  $t$ : Zeit;  $\mathbf{f}$ : Kräfte auf die Kontrollmasse.

Die Übertragung des Massenerhaltungssatzes in eine differenzielle Kontrollvolumenform erfordern die Einführung der Dichte  $\rho$  (Masse pro Volumeneinheit):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.12)$$

$\rho$ : Dicht im Kontrollvolumen;  $\mathbf{v}$ : Geschwindigkeitsvektor;  $t$ : Zeit.

Für die Übertragung der Impuserhaltung wird zusätzlich der Spannungstensor  $\mathbf{T}_S$  der die molekulare Transportrate des Impulses wiedergibt eingeführt. Die Kräfte  $\mathbf{f}$  werden in Körperkräfte pro Masseneinheit überführt  $\mathbf{b}$ :

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \nabla \cdot \mathbf{T}_S + \rho \mathbf{b} + S_I \quad (2.13)$$

$\rho$ : Dicht im Kontrollvolumen;  $\mathbf{v}$ : Geschwindigkeitsvektor;  $\mathbf{T}_S$ : Spannungstensor;  $\mathbf{b}$ : Körperkräfte;  $S_I$ : Quellen des Impulses.

Im vorliegenden Fall wird von einem kompressiblen Newtonschen Fluid ausgegangen, damit ergibt sich der folgende Spannungstensor

$$\mathbf{T}_S = -\left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla \cdot \mathbf{v}\right)\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{D} \quad (2.14)$$

$p$ : Druck;  $\mu$ : dynamische Viskosität;  $\mathbf{I}$ : Einheitstensor;  $\mathbf{v}$ : Geschwindigkeitsvektor;  $\mathbf{D}$ : Deformationsrate.

Die Berechnung von konvektiven Wärmeübergängen und Wärmeleitung erfordert eine zusätzliche Energiegleichung:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h_{tot}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{T}_S) + S_E \quad (2.15)$$

$\rho$ : Dichte;  $t$ : Zeit;  $\mathbf{v}$ : Geschwindigkeitsvektor;  $p$ : Druck;  $h_{tot}$ : Totale Enthalpie,  $k$ : Thermische Leitfähigkeit;  $T$ : Temperatur;  $\mathbf{T}_S$ : Spannungstensor;  $S_E$ : Quellenterm der Energie.

Die Gastransferzeit wird mithilfe einer Transportgleichung bestimmt:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi) = \nabla \cdot (\rho D_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (2.16)$$

$\rho$ : Dichte;  $t$ : Zeit;  $\mathbf{v}$ : Geschwindigkeitsvektor;  $\phi$ : Konzentration;  $D_\phi$ : Diffusionskoeffizient;  $S_\phi$ : Quellenterm der Konzentration.

### 2.2.2 Numerisches Gitter

Das geometrische Gebiet, in dem die Strömung berechnet werden soll, wird durch ein numerisches Gitter repräsentiert. Es definiert die diskreten Punkte, in denen die Variablen ermittelt werden. Unterschieden werden strukturierte und unstrukturierte Gitter. Strukturierte Gitter können nur für einfache geometrische Figuren verwendet werden, da sie dem kartesischen Gitter äquivalent sind. Die Nachbildung von komplexen Geometrien kann mit unstrukturierten Gittern erreicht werden. Dazu wird häufig das Volumen mit Tetraedern oder Würfeln einer eingestellten maximalen Kantenlänge gefüllt.

Die Kantenlänge muss an die Geometrie dergestalt angepasst werden, dass feine Strukturen mit kleinen Elementen und grobe Strukturen mit entsprechend größeren

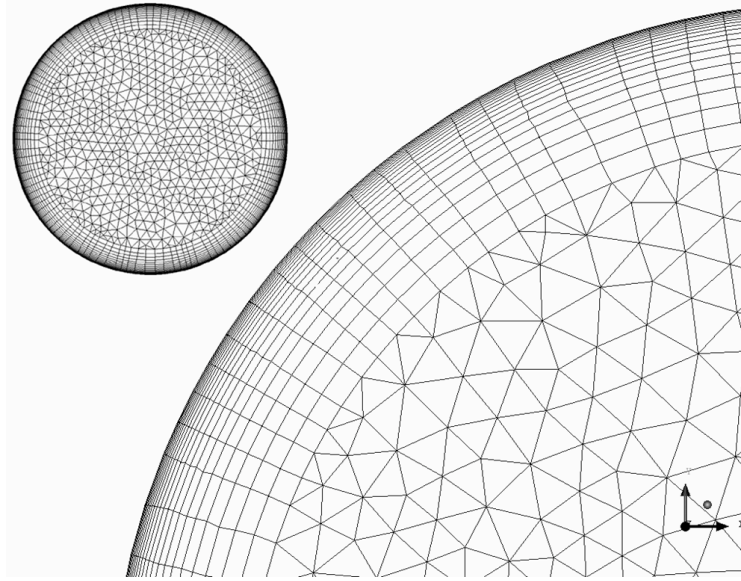


Abbildung 2.8: Unstrukturiertes numerisches Gitter eines Rohrquerschnitts:  
Am Rand werden exponentiell wachsende Prismengitter verwendet, um Strömungseffekte im Wandbereich hinreichend genau aufzulösen.

Elementen gefüllt werden. Wie in Abbildung 2.8 am Beispiel eines Rohrquerschnitts dargestellt ist, wird bei der Rechengittererzeugung auf die Strömungsvorgänge im Wandbereich geachtet. Um eine ausreichend hohe Ortsauflösung gewährleisten zu können, werden auf Wandflächen mehrere Schichten Prismen gelegt, deren Höhe mit zunehmendem Abstand von der Wand exponentiell anwächst [42, 43, 44].

### 2.2.3 Turbulenzmodell

Die Rohrströmungen mit teilweise hohen Reynoldszahlen ab  $Re \geq 2300$  erfordern die zusätzliche Anwendung eines Turbulenzmodells, um die Verwirbelungen der nicht mehr laminar verlaufenden Strömung abzubilden. Räumlich wie auch zeitlich findet Turbulenz auf sehr unterschiedlichen Skalen statt. Dies bedeutet, dass sowohl das Rechengitter als auch die Zeitschritte so klein sein müssen, dass die kleinste Turbulenzeinheit noch erfasst werden kann. Um die Anforderungen an die Rechenzeit entsprechend zu beschränken, ist eine Vielzahl von Modellen entwickelt worden. Sie gliedern sich in statistische Modelle, Large Eddy- und Detached Eddy-Simulationen. Nachfolgend soll kurz auf zwei verbreitete, statistische Wirbelviskositätsmodelle eingegangen werden.

Standardmäßig wird auf das  $k - \epsilon$  Turbulenzmodell zurückgegriffen. Es berechnet mit zwei partiellen Differenzialgleichungen (PDGL) die Ausprägung der turbulenten kinetischen Energie  $k$  und der isotropen Dissipationsrate  $\epsilon$ . Hierbei fließen vereinfachende Modellannahmen ein, die den Anwendungsrahmen stark eingrenzen. Es ist beispielsweise nicht für Strömungen mit hohen Geschwindigkeiten nutzbar [42, 45].

Ein überkritisch betriebenes Kapillarsystem beinhaltet immer Bereiche, in denen das Fluid die Schallgeschwindigkeit erreicht. Bei Strömungen mit hohen auftretenden Geschwindigkeiten und hohen Reynoldszahlen  $Re$  ist das  $k - \omega$  Turbulenzmodell gut einsetzbar. Es basiert ebenfalls auf zwei PDGL, einer Transportgleichung für die Energie  $k$  und einer zweiten, die die Fortpflanzung der charakteristischen Frequenz  $\omega$  der energiedissipierenden Wirbel beschreibt. Zusätzlich ist dieses Modell mit einer automatischen Gitterpunktverfeinerung in Wandnähe ausgerüstet, welche die Robustheit bei schlecht konditionierten Rechengittern erhöht. Für die dynamische Berechnung der Strömungsvorgänge im Einlasssystem ist das Turbulenzmodell gut geeignet [42, 45].

## 2.2.4 Gültigkeitsbereich

Die Knudsen-Gleichung setzt die mittlere freie Weglänge der Moleküle im Gas  $\lambda$  zu einer charakteristischen Länge  $L$  der Geometrie ins Verhältnis [46]. Im vorliegenden Fall ist  $L$  der Innendurchmesser der Kapillare. Die Knudsen-Zahl ist maßgeblich für den Gültigkeitsbereich der folgenden kontinuumsmechanischen Beschreibungen. Die Bedingungen dafür sind im gesamten Bereich des Entnahmesystems erfüllt.

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot p \cdot L} \quad (2.17)$$

$\lambda$ : Mittlere freie Weglänge;  $L$ : charakteristische Länge der Strömung;  $k_B$ : Boltzmann-Konstante;  $T$ : Temperatur;  $p$ : Druck;  $\sigma$ : Moleküldurchmesser

## 2.2.5 Transiente Berechnung

Transiente Strömungsvorgänge werden mit CFD iterativ berechnet. Die Berechnung beginnt mit der Ermittlung eines stabilen, abgeklungenen Zustandes, d. h., dass die gefundene Lösung zum Zeitpunkt  $\lim t \rightarrow \infty$  gilt und sich über die Zeit nicht mehr ändert.

Die Auswirkungen von periodisch wechselnden Randbedingungen werden ermittelt, indem zunächst eine Lösung des abgeklungenen Zustandes bestimmt wird. Diese wird als Ausgangspunkt für die folgende transiente Berechnung genutzt. Jede weitere Lösung zum Zeitpunkt  $t = x$  ist also abhängig von den Randbedingungen zu  $t = x$  und dem Systemzustand, der zu  $t = x - 1$  bestand.

Auf diese Weise ist es möglich, die dynamischen Vorgänge in einem Einlasssystem zu beschreiben. Dazu müssen die periodischen Randbedingungen Druck und Temperatur dem System mehrfach hintereinander aufgeprägt werden. Eine eingeschwungene zeitabhängige Lösung ist auf diese Weise generiert. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse über ein Arbeitsspiel nach der ersten Wiederholung nicht mehr wesentlich von denen des vorherigen abweichen.

Das Programmpaket CFX (Ansys) ist für die Berechnung der Strömungsvorgänge gut geeignet, da es die oben aufgeführten Gleichungen in ihrer Gesamtheit lösen kann. Dabei werden alle relevanten Größen, die für die Auslegung der Probenahme erforderlich sind, bestimmt.



# Kapitel 3

## Apparatives und Methode

Der Messaufbau zur Bestimmung der Ölverdampfung im Brennraum wird in Abbildung 3.1 gezeigt. Am Motorenprüfstand ist das Messsystem direkt neben dem Ottomotor auf einem Tisch installiert.

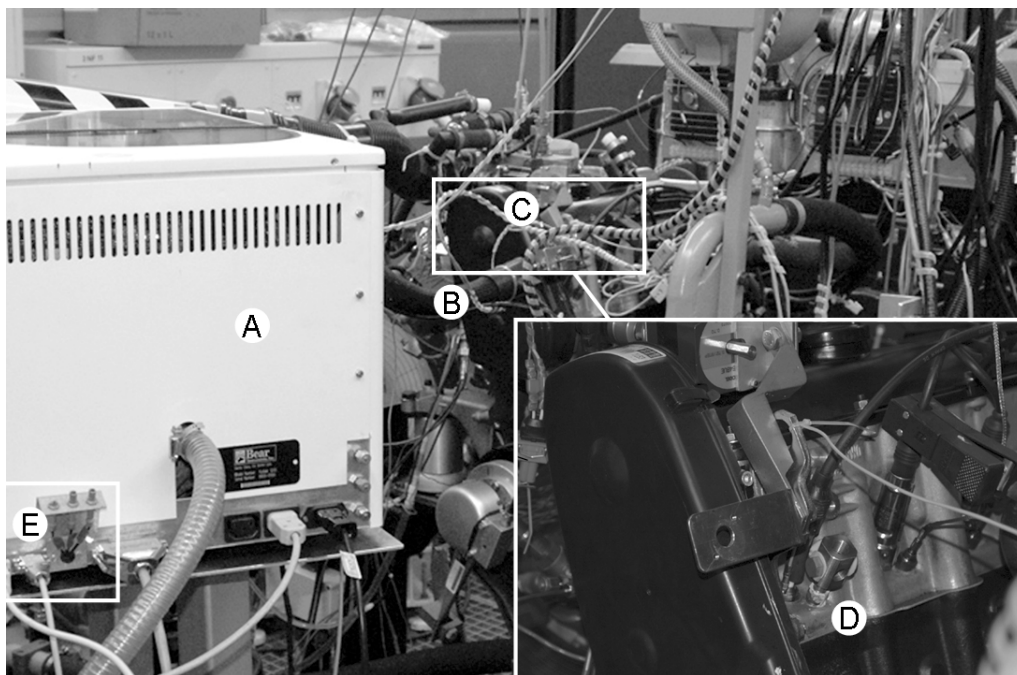


Abbildung 3.1: Motorprüfstand und Massenspektrometer:

**A** Triple-Quad-Massenspektrometer, **B** Einlasssystem, **C** Motor, **D** Sondenspitze der Probenahme am Zylinder 1, **E** Anschlüsse der schnellen Datenaufnahme.

Der Messaufbau gliedert sich in vier Bestandteile, die in den nachfolgenden Kapiteln im Detail beschrieben werden. Abbildung 3.2 stellt diese Komponenten schematisch dar. Für die Analyse hat sich das Triple-MS-System als besonders stabil, nachweisstark und benutzerfreundlich erwiesen [34]. Es wird auch in dieser Arbeit verwendet.

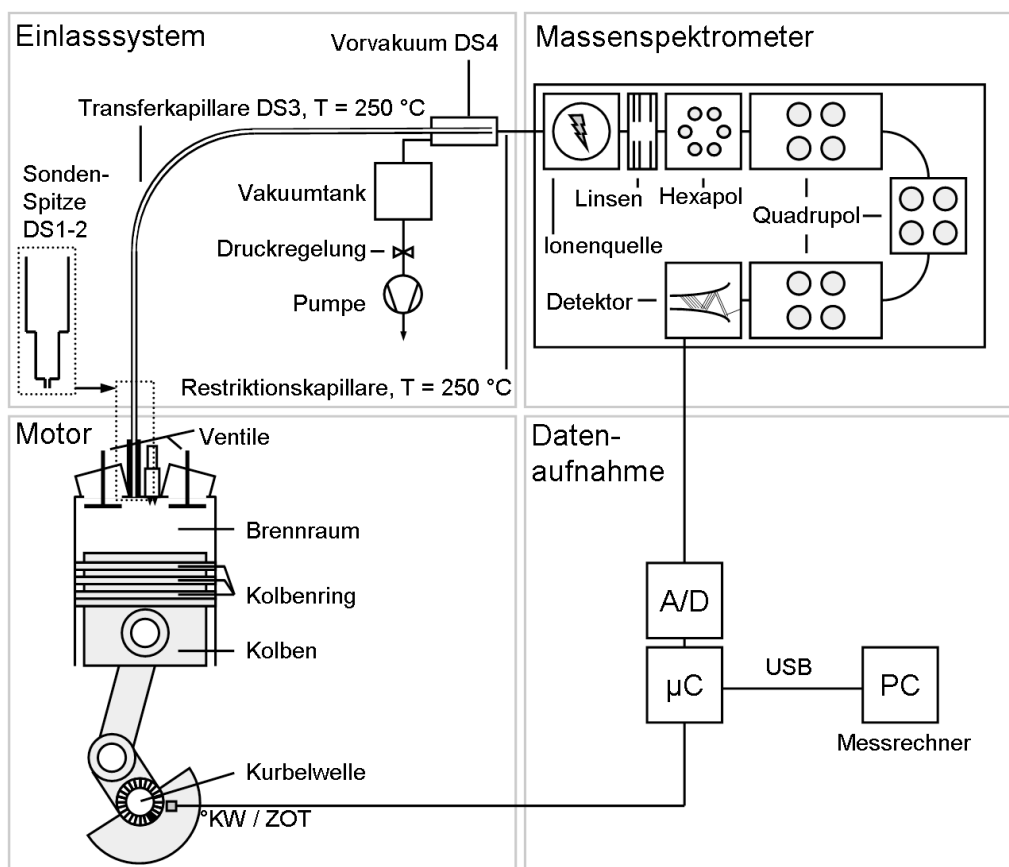


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Messtechnik:

Dem Brennraum wird mit dem Einlasssystem die Probe über eine Pumpe entnommen, ein Teil davon gelangt in die Ionenquelle des Massenspektrometers. Zur Trennung der ölbürtigen Kohlenwasserstoffe kommen die Quadrupole zum Einsatz. Das Detektorsignal wird gemeinsam mit der Pleuellagerungsposition gespeichert.

### 3.1 Schnelle Datenaufnahme

Die Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum erfordert eine schnelle Messdatenaufzeichnung. Mit einem herkömmlichen Labormassenspektrometer wie dem hier verwendeten ist diese nicht ohne Weiteres möglich. Deshalb ist speziell für diese Aufgabe eine Aufzeichnungselektronik entwickelt worden. Die Erfassung von Messwerten mit einer Auflösung von  $1,0^\circ$  Kurbelwinkel verlangt bei einer Motordrehzahl von  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  eine Abtastrate  $f_a = 12 \text{ kHz}$ .

Das Detektorsignal des Massenspektrometers wird mit einem A/D-Wandler diskretisiert und in digitaler Form mit  $f_a = 12,5 \text{ kHz}$  an den zentralen Mikrocontroller (Atmega 128) weitergeleitet. Gemeinsam mit den Positionsgebern der Kurbelwelle (Kurbelwinkel, oberer Totpunkt Zündung) werden außerdem analoge Messwerte von der Recheneinheit verarbeitet.

Die Datenübertragung an den Messrechner außerhalb des Motorenprüfstandes ist mit einem USB-Modul realisiert worden. Die Datentransferrate zum Messrechner während der Messungen beträgt  $c = 1,1 \text{ Mbit/s}$ .

Ein Visualisierungsprogramm ermöglicht eine Echtzeitdarstellung indem es die Messdaten als Funktion des Kurbelwinkels anzeigt [47].

### 3.2 Massenfilter

Im Analysebetrieb werden mit einem Massenspektrometer typischerweise komplette Massenspektren aufgezeichnet, wie das Beispiel einer Abgasprobe in Abbildung 3.3 zeigt.

Zur schnellen Messung von einzelnen Substanzen oder ausgewählten Ionen wird der Massenfilter im SIM-Betrieb auf das entsprechende Masse-zu-Ladung-Verhältnis ( $m/z$ ) fest eingestellt.

Mit dieser Methode können u. a. die wesentlichen Reaktionspartner der Verbrennung,  $O_2$  und Toluol ( $C_7H_8$ ) als typische Kraftstoffkomponente sowie deren Reaktionsprodukte  $H_2O$  und  $CO_2$  mit höchster Zeitauflösung gemessen werden.

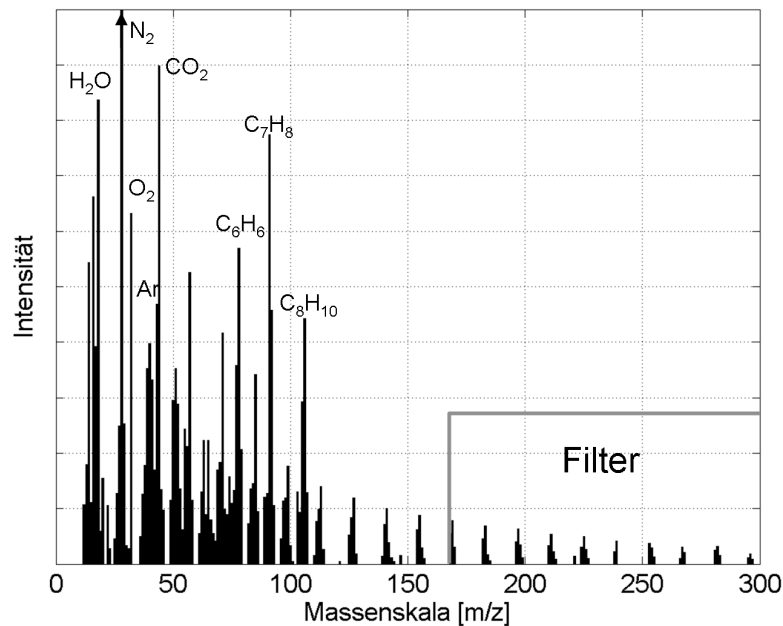


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Massenspektrums:

Dargestellt sind Komponenten aus der umgebenden Luft ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ) und der Verbrennung ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ), Kohlenwasserstoffe des Kraftstoffes ( $C_6H_6$ ,  $C_7H_8$ ,  $C_8H_{10}$  und weitere bis  $m/z < 120$ ) und Kohlenwasserstoffe des Schmieröls.

Da sich das Schmieröl aus einer Vielzahl einzelner Kohlenwasserstoffmoleküle zusammensetzt und jede Einzelkomponente nur in geringen Konzentrationen vorhanden ist, heben sich ölbürtige Kohlenwasserstoffe nicht durch signifikante Molekülionenpeaks im Spektrum ab. Für deren Detektion wird der Quadrupol im Hochpassfilter-Modus HPM betrieben.

Die Bestimmung des Massenbereiches der Ölkonzentration erfordert die Kalibrierung der Schnittkante des Hochpassfilters. Dafür wird der MS/MS-Modus verwendet. Abbildung 3.4 verdeutlicht die Vorgehensweise.

Auf der X-Achse ist der Arbeitsbereich des Quadrupols Q1 (im SIM-Betrieb) aufgetragen. Die Y-Achse zeigt die Massenskala, die vom Quadrupol Q3 im SCAN-Betrieb abgetastet wird. Die Zählrate der Ionen liegt auf der Z-Achse. Mit steigender Masseneinstellung von Q1 wird der Bereich, ab dem mit Q3 Ionen detektiert werden, hin zu hohen Massen verschoben. Die RF Amplitude  $V = D$  am Q1 generiert eine

Schnittkante ab dem Massebereich  $m/z > 170$ . Im weiteren Messbetrieb behält Q1 diese Einstellung und Q3 wird auf Transmission geschaltet.

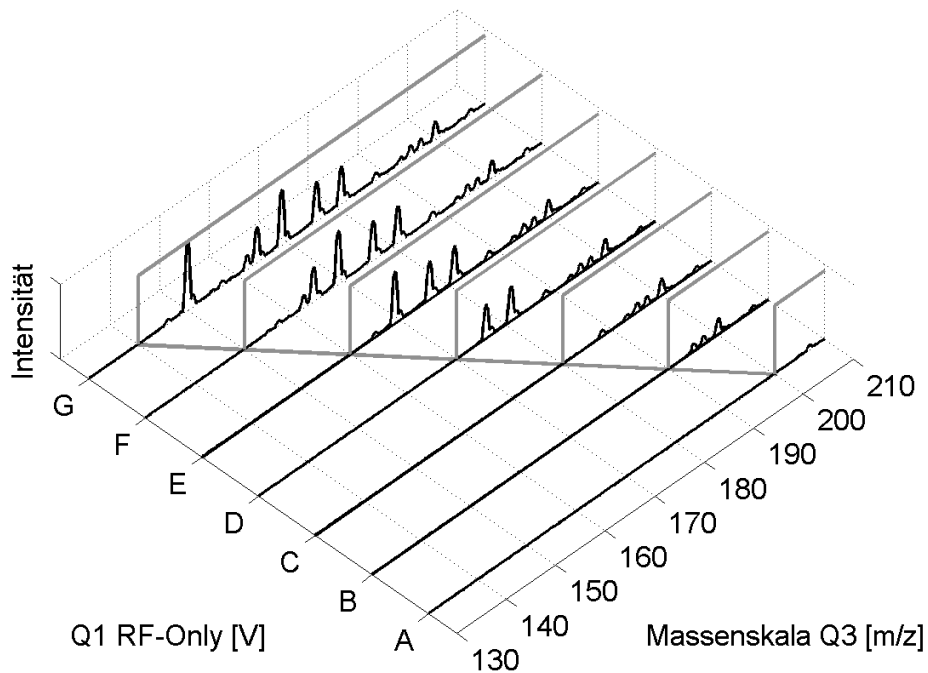


Abbildung 3.4: Kalibrierung der Hochpassfilter-Schnittkante mit MS/MS: Quadrupol Q3 scannt den Massenbereich  $130 < m/z < 210$  ab. Quadrupol Q1 wird im RF-Only-Modus bei verschiedenen Amplituden A bis G betrieben. Die resultierende Filtercharakteristik ist grau dargestellt. Probe: Perfluorotributylamine (FC43).

### 3.3 Einlasssystem für die Messung im Brennraum

Das Gas muss vom Brennraum ( $0,3 \text{ bar} < p < 40 \text{ bar}$ ) durch eine Kapillare in das Vakuum ( $p = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ bar}$ ) der Ionenquelle überführt werden. Ein adäquates Einlasssystem muss den Druck also um 6 Größenordnungen reduzieren können. Dabei kann der Gastransfer durch den periodisch wechselnden Eingangsdruck und die Brennraumtemperatur beeinflusst werden, siehe Abbildung 3.5. Die folgenden Effekte können auftreten:

- Überlagerung von Druckwellen
- Änderung der Strömungsrichtung im Einlasssystem
- Die zeitliche Zuordnung der Messsignale wird verfälscht

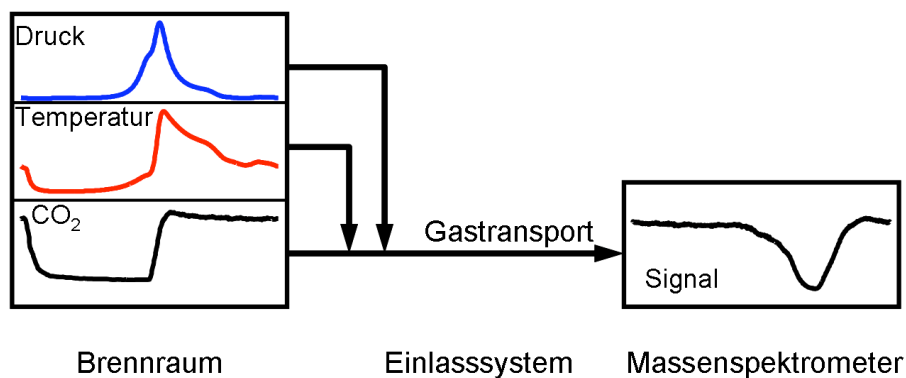


Abbildung 3.5: Einflussfaktoren auf den Gastransport im Einlasssystem:

Brennraumdruck und -temperatur koppeln in den Gastransportprozess ein und wirken sich auf den Gastransfer aus. Das vom Massenspektrometer detektierte Signal (z. B.  $CO_2$ ) wird auf der Zeitachse verzerrt dargestellt.

**Auswirkungen von Druckwellen:** Der im Brennraum während der Phase von Kompression und Zündung auftretende Druckpuls durchläuft das Einlasssystem mit der Schallgeschwindigkeit. Es ist ein Verfahren entwickelt worden, mit dem die Durchlaufzeit in einem Diagramm dargestellt werden kann. Dazu wird mit dem Massenspektrometer während einer Drehzahlrampe  $1000 \text{ min}^{-1} > n > 4500 \text{ min}^{-1}$  das aus der Atmosphäre stammende Edelgas Argon  $Ar$  gemessen. Da es an dem Verbrennungsprozess nicht beteiligt ist, bleibt die Argonkonzentration konstant. Eine

Erhöhung des Argonsignals kann als Druckeffekt interpretiert werden. Abbildung 3.6 zeigt ein Laufzeitdiagramm von Argon. Die Intensität ist auf einer Fläche über den Kurbelwellenwinkel und die Drehzahl dargestellt. Mit zunehmender Drehzahl werden Ereignisse, die sich im Einlasssystem mit einer konstanten Zeit  $t$  fortpflanzen, auf der X-Achse nach rechts verschoben. Sie bilden Linien, die mit der Y-Achse einen Winkel einschließen, an dem sich die Transferzeit ablesen lässt.

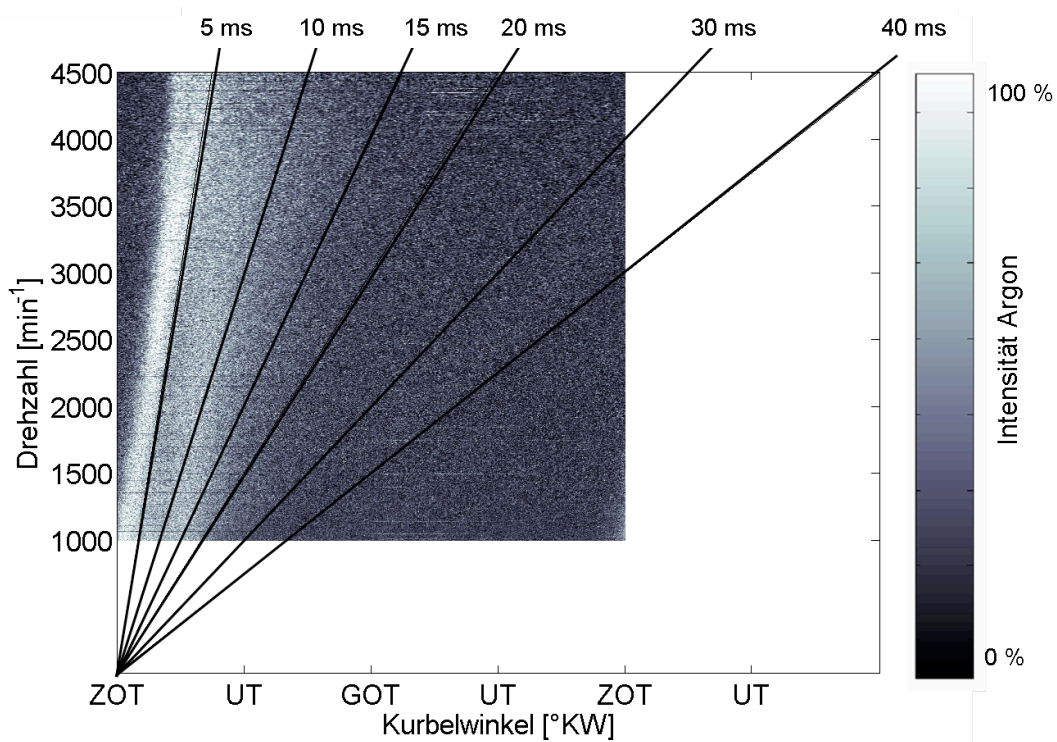


Abbildung 3.6: Drucklaufzeit im Einlasssystem:

Der Druckpuls der Zündung setzt sich im Einlasssystem mit der Laufzeit  $t_{Druck} = 5\text{ ms}$  fort.

Dieses Verfahren kann auch für die Laufzeitbestimmung von Gasen verwendet werden, deren Konzentration sich mit der Verbrennung bei ZOT oder während des Ladungswechsels ändert (GOT). Bei Sauerstoff  $O_2$  kann von einer signifikanten Reduktion mit dem Einsetzen der Reaktion ausgegangen werden. Anhand dieser Linie im Laufzeitdiagramm ist die Bestimmung der Gastransferzeit möglich. In Abbildung 3.7 zeigt sich, dass diese Laufzeit  $t_{O_2} = 40\text{ ms}$  deutlich größer ist als die des Druckes. Das Messsignal wird zusätzlich von dem Druckpuls mit der Laufzeit

$t_{Druck} = 5 \text{ ms}$  überlagert. Bei einer Drehzahl  $n = 3500 \text{ min}^{-1}$  schneiden sich die Linien konstanter Laufzeit von  $O_2$  und die Druckwelle der nachfolgenden Zündung. Die Druckwelle verändert die Verteilung der Gaszusammensetzung im Einlasssystem bei höheren Drehzahlen  $n > 3500 \text{ min}^{-1}$  deutlich. Messungen oberhalb dieser Drehzahl sind bei dieser Einlasskonfiguration nicht mehr sinnvoll.

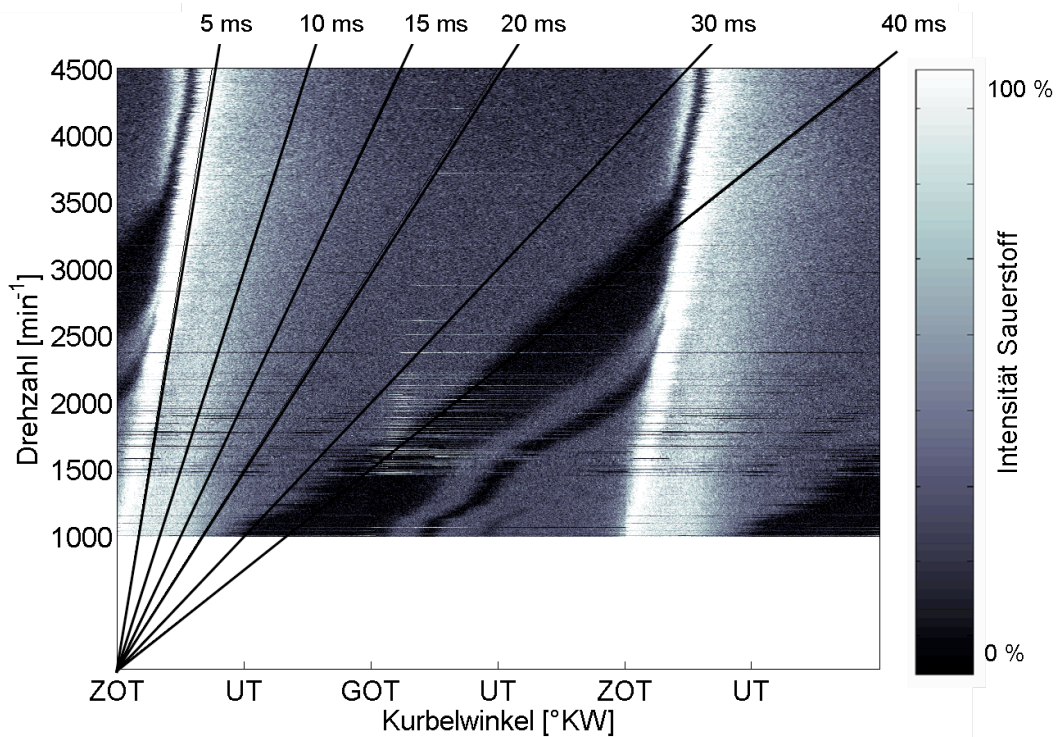


Abbildung 3.7: Drucklaufzeit und  $O_2$ -Gaslaufzeit im Einlasssystem:

Die Druckpuls Laufzeit  $t_{Druck} = 5 \text{ ms}$  und die  $O_2$ -Gaslaufzeit  $t_{O_2} = 40 \text{ ms}$  führen zu einem Konflikt: die Druckwelle der nachfolgenden Zündung manipuliert die Gasverteilung im Einlasssystem  $n > 3500 \text{ min}^{-1}$ .

**Änderung der Strömungsrichtung im Einlasssystem:** Je nach geometrischer Beschaffenheit des Einlasssystems wird in Phasen starker, negativer Druck-Zeit-Gradienten am Eingang der Transferleitung eine Umkehr der Strömungsrichtung verursacht. Diese hat zur Folge, dass während dieser Zeit kein Gas aus dem Brennraum entnommen werden kann. Des Weiteren kommt der Druckdämpfungseigenschaft der Transferstrecke eine wichtige Rolle zu. Transient auftretende Druckpulse können den Pfad bis zum Massenspektrometer durchlaufen und in der Ionenquelle

die Ionenerzeugung beeinflussen. Diese müssen von dem Einlasssystem vollständig unterdrückt werden.

Zur Verdeutlichung wird in einer Strömungssimulation der Eingangsdruck einer einfachen Kapillarrohrstrecke von  $p_{Ein} = 1 \cdot 10^5$  Pa zum Zeitpunkt  $t = 0$  ms auf  $p_{Ein} = 0,5 \cdot 10^5$  Pa reduziert. Der Druck-Zeit-Gradient beträgt in diesem Fall  $|\frac{dp_{Ein}}{dt}| = 1250$  bar/ms. Abbildung 3.8 zeigt das Verhalten von Druck  $p(x, t)$  und Gasgeschwindigkeit  $v(x, t)$  in einer Kapillare mit dem Innendurchmesser  $ID = 1$  mm und einer Länge von  $l = 0,5$  m. Der Druckverlauf zeigt deutlich das schnelle Absinken am Eingang auf der linken Seite sowie ein Maximum, das mit der Zeit nach rechts auswandert. Die daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit ist während dieser Phase am Kapillareingang negativ.

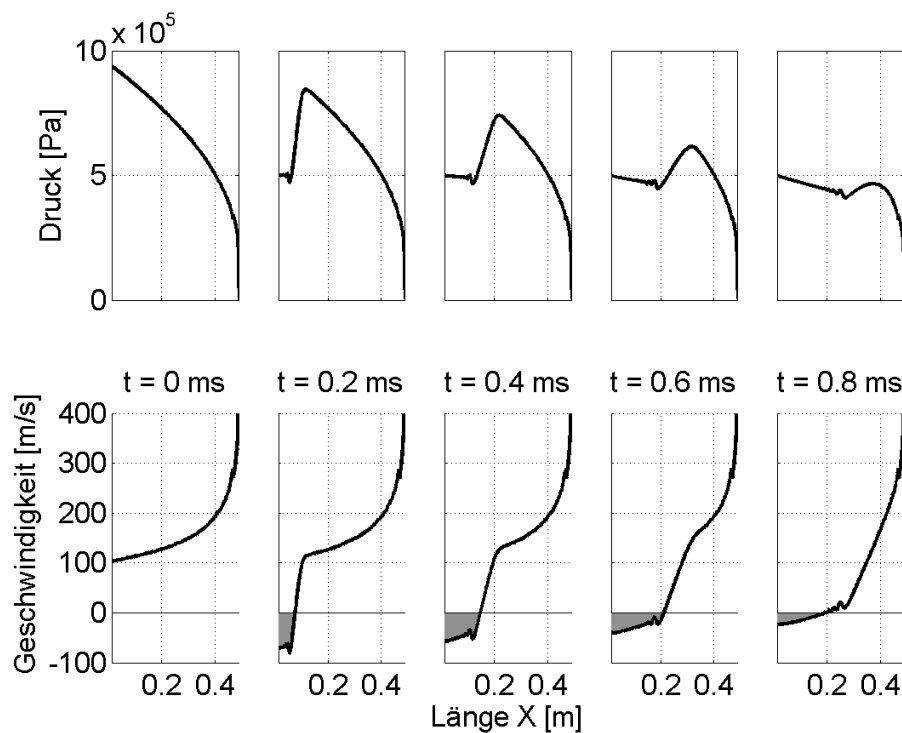


Abbildung 3.8: Änderung der Strömungsrichtung im Einlasssystem

Die Druckreduktion am Eingang bei  $t = 0$  ms wirkt sich mit der Zeit entlang der Kapillare aus. Das überschüssige Gas strömt über den Kapillareingang bei  $x = 0$  m aus. Das hat eine negative Strömungsgeschwindigkeit zur Folge. Durch die entstandene Rückströmung wird während der Ausgleichphase kein Gas entnommen.

**Verfälschung der zeitlichen Zuordnung des Messsignals:** Selbst wenn es nicht zu einer Strömungsumkehr kommt, bewirken die periodisch wechselnden Druck- und Temperaturbedingungen im Zylinder eine Geschwindigkeitsvariation entlang der Transferstrecke, siehe Abbildung 3.8. Die Durchlaufzeit des Gases vom Brennraum zum Analysator wird dadurch zyklisch verändert. Als Folge ist das gemessene Signal zu den im Brennraum herrschenden Bedingungen zeitlich versetzt.

Für ein optimales Einlasssystem lassen sich die folgenden Eigenschaften ableiten:

- Das Gas wird stets in Richtung des Analysators geleitet, d. h., dass in allen Betriebspunkten des Motors und während des gesamten Arbeitsspieles die Strömungsgeschwindigkeit im Einlasssystem positiv sein muss.
- Druck- und Temperaturänderungen werden über die Transferstrecke abgebaut, sodass der Massenstrom in den Analysator konstant ist.
- Die Variation der Gaslaufzeit über ein Arbeitsspiel muss bestimmbar sein, damit das Messsignal dem Kurbelwellenwinkel korrekt zugeordnet werden kann.

Tabelle 3.1: Direkteinlasssysteme für kontinuierliche Messungen:

	Schnelles Direkt-einlasssystem SD	Schnelles Direkt-einlasssystem mit motornaher Druckstufe SDMD	Schnelles Direkt-einlasssystem mit vier Druckstufen SD4D
Temperaturregelung	•	•	•
Druckregelung	–	•	•
Druckstufen	–	1	4
Beobachtbares Kennfeld	–	Eingeschränkt in den Takten 1, 2, 3, 4	Vollständig in allen Takten
Druckpulsdämpfung	Gering	Stark	Vollständig

Die folgenden Einlasssysteme sind auf der Basis des von Gohl [34] entwickelten „Schnellen Direkteinlasssystems“ (SD) im Rahmen dieser Arbeit schrittweise entwickelt, erprobt und optimiert worden. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen im Druckverlauf über die Kapillarlänge, der die Transfercharakteristik von Druck- sowie Konzentrationspulsen zum MS bestimmt, siehe Tabelle 3.1. Am Beispiel der Entwicklungsschritte lassen sich die strömungstechnischen Effekte im Folgenden beschreiben.

### 3.3.1 Schnelles Direkteinlasssystem (SD)

Zur Messung von Ölkonzentrationen im Abgas wurde ein beheiztes, schnelles Direkteinlasssystem (SD) entwickelt [34]. Dabei mussten Anforderungen an die Druckverhältnisse, die analytische Integrität und auch an die Transferzeiten erfüllt werden.

Abbildung 3.9 zeigt das differenziell aufgebaute System. Es besteht aus einem beheizten Einlasskörper, in dem mit einer Drehschieber-Pumpe ein Vorvakuum von  $p_V = 5 \cdot 10^3$  Pa generiert wird. Diese Kapillare dient der schnellen Überführung des Abgases. Am Motor auftretende mechanische Schwingungen werden von dieser Kapillare ausgekoppelt und nicht an das Massenspektrometer weitergeführt.

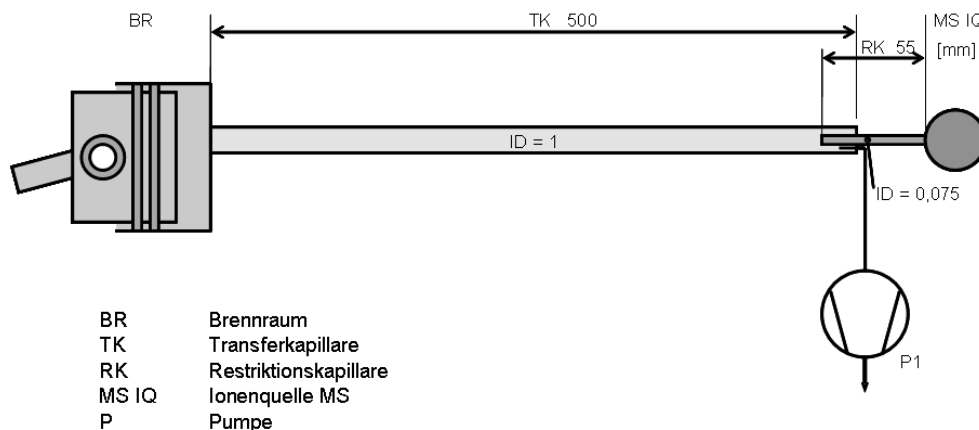


Abbildung 3.9: Schnelles Direkteinlasssystem:

Eine Transferkapillare TK führt direkt vom Brennraum BR des Zylinders zum Vorvakuum, das von der Pumpe P1 erzeugt wird. Eine Restriktionskapillare RK steckt in TK und überführt einen Teil des Massenstroms in die Ionenquelle IQ des Massenspektrometers MS.

Beide Kapillaren (TK, RK) werden systembedingt in einem überkritischen Zustand betrieben. D. h., dass bei einem konstantem Einlassdruck  $p_{Ein}$  eine weitere Absenkung des Auslassdruckes  $p_{Aus}$  keine Veränderung von Druckverteilung  $p(x, t)$  und Massenstrom  $\dot{m}$  in der Kapillare zur Folge hat. Eine zusätzliche Druckreduzierung kann erst hinter der Kapillare erfolgen.

Die Erhöhung des Einlassdruckes  $p_{Ein}$  führt zwangsläufig zu einer Steigerung des Massenstromes  $\dot{m}$  und somit auch zu einer Erhöhung des Ausgangsdruckes  $p_{Aus}$  am Ende der Kapillare. Das beschriebene Einlasssystem koppelt die Transfer- und die Restriktionskapillare direkt aneinander. Damit wirkt sich eine Erhöhung des Eingangsdruckes  $p_{Ein}$  bis in die Ionenquelle aus.

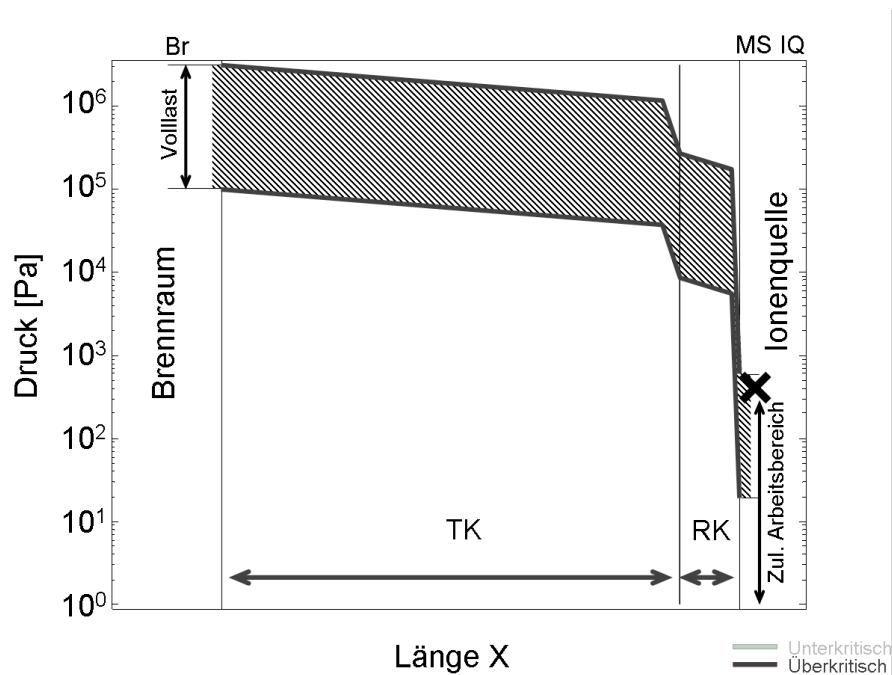


Abbildung 3.10: Schema des Druckverlaufes über die Transferstrecke (SD):

Die Variation des Eingangsdruckes  $p_{Ein}$  bei einem Volllast Betriebspunkt  $M = 145 \text{ Nm}$  überträgt sich in Folge der überkritisch betriebenen Kapillaren TK und RK bis in die Ionenquelle des Massenpektrometers. Dabei wird der zulässige Arbeitsdruck der Ionenquelle teilweise überschritten (Markierung X) und es besteht die Gefahr eines Systemdefektes.

Der in der Abbildung 3.10 markierte Eingangsdruckbereich, der sich während eines Arbeitsspieles im Brennraum ( $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ,  $M = 145 \text{ Nm}$ ) ergibt, würde

folglich zu einem ebenso breiten Ausgangsdruckbereich (Verhältnis von Maximaldruck zu Minimaldruck) in der Ionenquelle führen, der die Grenzen des zulässigen Druckbereiches übersteigt.

Das Einlasssystem ist aufgrund der oben aufgeführten Bedingungen für Probenahmen im Druckbereich des Abgaskrümmers sehr gut einsetzbar. Es ermöglicht schnelle Messungen mit einer Anstiegszeit von  $t_{10-90} = 4$  ms. Für die kontinuierliche Gasentnahme aus dem Brennraum kann es jedoch nicht genutzt werden, da der differenzielle Aufbau zu einem nicht zulässigen Ionenquellendruck führt. Mit diesem Einlasssystem ist jedoch eine Basis für die folgenden Gasentnahmesysteme geschaffen worden.

### 3.3.2 Schnelles Direkteinlasssystem mit motornaher Druckstufe (SDMD)

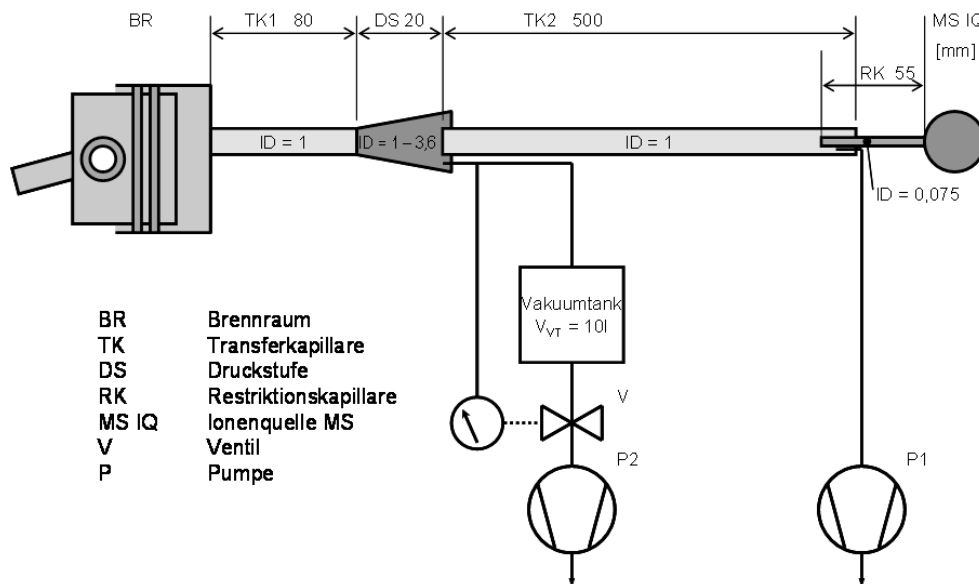


Abbildung 3.11: Schnelles Direkteinlasssystem mit motornaher Druckstufe:

Eine Transferkapillare TK1 führt direkt vom Brennraum BR des Zylinders zu einer Druckstufe DS. Anschließend führt eine Transferkapillare TK2 zum Vorvakuum. Eine Restriktionskapillare RK steckt in TK2 und überführt einen Teil des Massenstroms in die Ionenquelle IQ des Massenspektrometers MS.

Der erste Ansatz, für ein Brennraum-Gasentnahmesystem mit einer Druckreduktionsstufe im vorderen Bereich der Transferstrecke ist mit dem „Schnellen Direkteinlasssystem mit motornaher Druckstufe“ (SDMD) verfolgt worden, siehe Abbildung 3.11. Direkt nach der Durchführung durch den Zylinderkopf TK1 schließt sich ein Diffusor an, der mit einer druckgeregelten Pumpe durch ein Ausgleichgefäß  $V_T = 10\text{ l}$  bepumpt wird. Das Druckniveau an der Stelle wird auf  $p_{DS} = 8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$  geregelt. In den Diffusor ragt die zweite Transferkapillare TK2, die das Gas in das Vorvakuum transferiert. Dort wird ein Teilmassenstrom über eine Restriktionskapillare RK in die Ionenquelle geleitet.

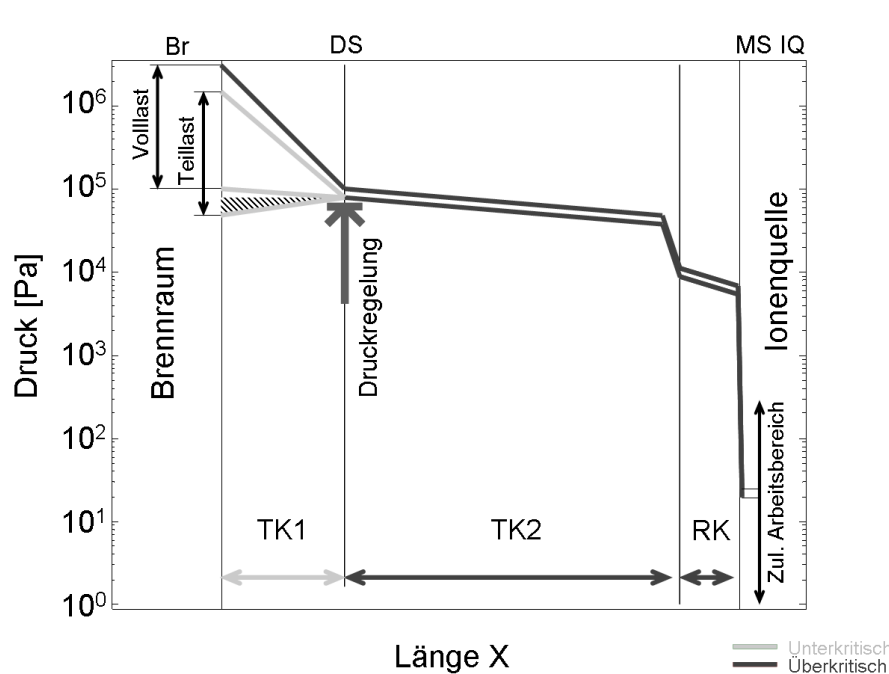


Abbildung 3.12: Schema des Druckverlaufes über die Transferstrecke (SDMD):

Die Variation des Eingangsdruckes  $p_{Ein}$  bei einem Volllast Betriebspunkt  $M = 145 \text{ Nm}$  führt nicht zu einer Verletzung des zulässigen Arbeitsdruckes der Ionenquelle. Im Teillastbetrieb des Motors ( $M = 20 \text{ Nm}$ ) liegt der Einlassdruck  $p_{Ein}$  teilweise unter dem Vorgabewert der Druckstufe  $p_{DS} = 8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ .

Die Kapillaren TK2 und RK werden wie im SD überkritisch und TK1 überwiegend im unterkritischen Zustand betrieben, siehe Abbildung 3.12. Wird im Brennraum bei Volllast der Maximaldruck erreicht, arbeitet TK1 kurzfristig im überkritischen Stadium. Sinkt der Zylinderdruck jedoch unter den Ausgangsdruck der DS ( $p_{DS} =$

$8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ), dreht sich die Strömungsrichtung in TK1 um. In dieser Zeit kann keine Gasprobe aus dem Zylinder entnommen werden (schraffierter Bereich).

Um den Einsatzbereich der Probenahme beschreiben zu können, ist bei konstanter Last und ansteigender Drehzahl des Motors das Ölemissionssignal in einer kontinuierlichen Messung aufgenommen worden. Abbildung 3.13 zeigt den Verlauf der Intensität des Ölsignals über dem Kurbelwinkel für eine Drehzahl von  $1000 \text{ min}^{-1} < n < 3700 \text{ min}^{-1}$ . Hierbei entsprechen dunkle Bereiche einer niedrigen und helle Bereiche einer hohen Ölkonzentration (Abb. 3.13).

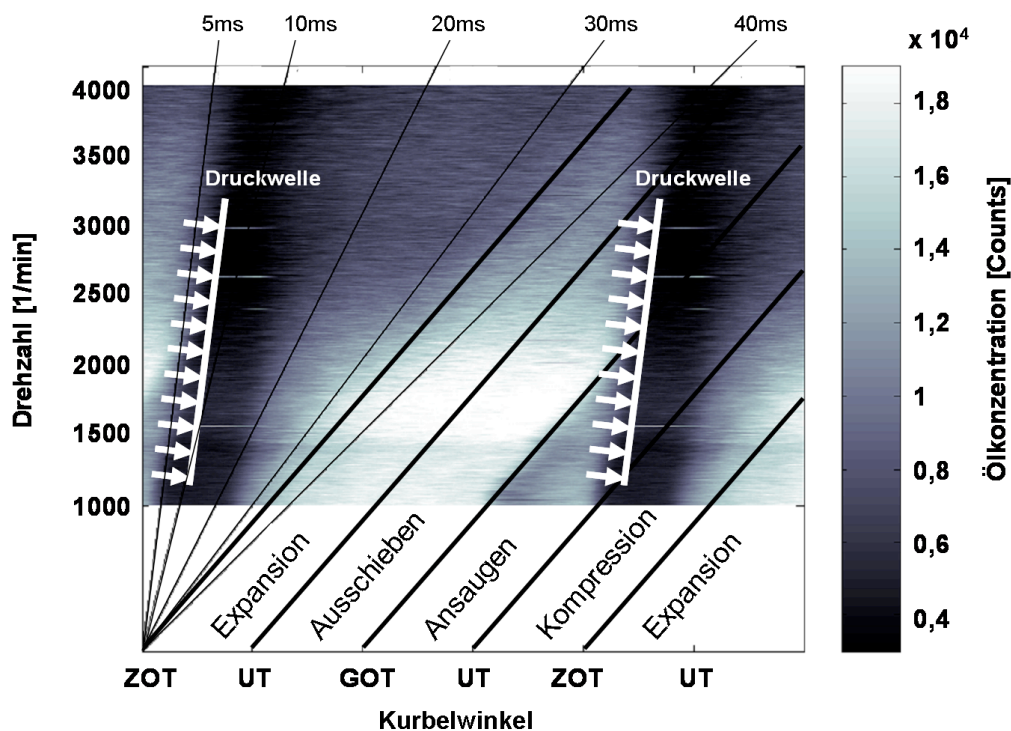


Abbildung 3.13: Laufzeitdiagramm des Ölsignals:

Das Diagramm belegt zwei Phänomene: Schwarze Bereiche liegen auf einer Linie von Ereignissen, die nach einer Zeit von  $t = 5 \text{ ms}$  auf die Zündung folgen. Sie werden der Druckwelle zu geordnet, die kurzfristig die Ionisierungsleistung beeinträchtigt. Helle Bereiche, hohe Ölkonzentrationen, liegen zwischen *ZOT* und *GOT* entlang einer Geraden nach  $t = 35 \text{ ms}$ , dies entspricht der Gastransferzeit. Betriebspunkt:  $1000 \text{ min}^{-1} < n < 3700 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 120 \text{ Nm}$ .

Das Diagramm für die Laufzeit von Gaskonzentrationen und Druckpulsen eignet sich, um die systematischen Betriebsgrenzen festzulegen.

Der Zylinderdruck löst eine Druckwelle aus, die sich mit Schallgeschwindigkeit im Einlasssystem ausbreitet und den Signalverlauf des Massenspektrometers beeinflusst. Die Laufzeit der Druckwelle ist rund siebenmal kürzer als die des Gastransportes bei GOT. Die gemessene Ölintensität steigt nach der Verbrennung an und mit dem Gaswechsel sinkt die Ölkonzentration wieder. Die Schnittpunkte zwischen den Druck- und Konzentrationslinien im Laufzeitdiagramm markieren die Drehzahlgrenzen der Transferleitung. Der Saugrohrdruck in den ersten beiden Takten, bei dem es zu einer Strömungsumkehr in der Sonde kommt, bildet eine Lastgrenze nach unten. Für das Einlasssystem SDMD sind die messbaren Bereiche in Abbildung 3.14 als Kennfeld dargestellt.

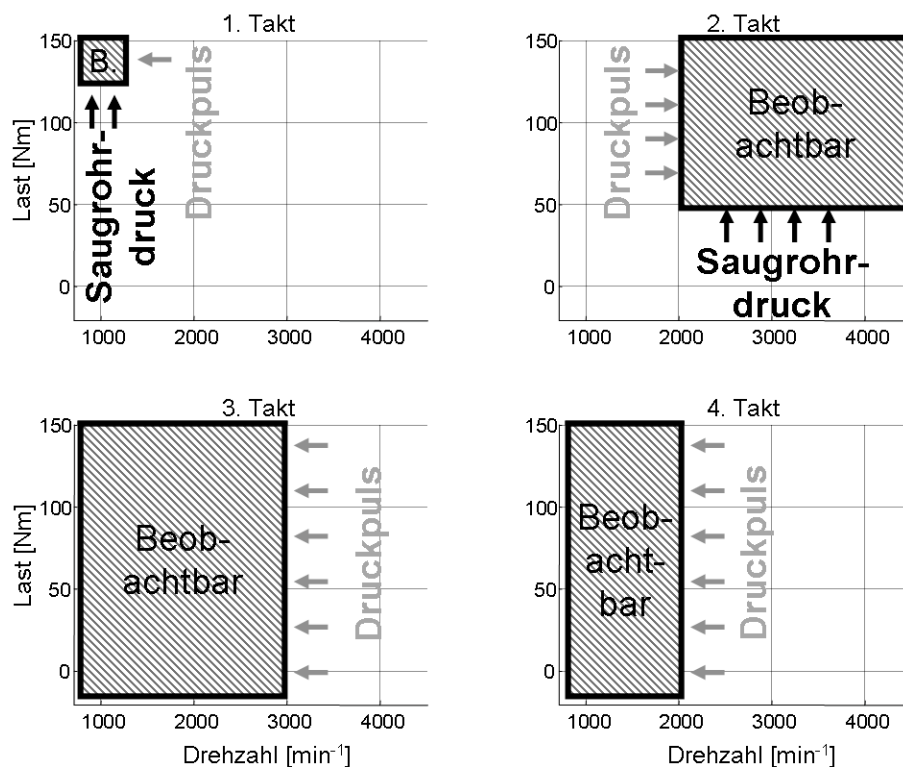


Abbildung 3.14: Betriebsgrenzen des Direkteinlasssystem SDMD

Die kurbelwinkelabhängige Transferzeit des Einlasssystems wurde mit einem getakteten Ventil bestimmt [21]. Das Ventil leitete zu einem vorgegebenen Kurbelwel-

lenwinkel eine geringe Menge des Edelgases Argon  $Ar$  in den vorderen Teil der Transferstrecke ein. Die Transferzeit, nach der das Gas im Massenspektrometer detektiert wurde, ist in Abbildung 3.15 aufgetragen und variiert im Laufe eines Arbeitsspiels um etwa 40 %. Das bedeutet, dass das gemessene Signal die zeitliche Abfolge am Einlass nicht richtig wiedergibt. Dieser Effekt muss bei einem optimalen System korrigiert werden, (Kap 3.4).

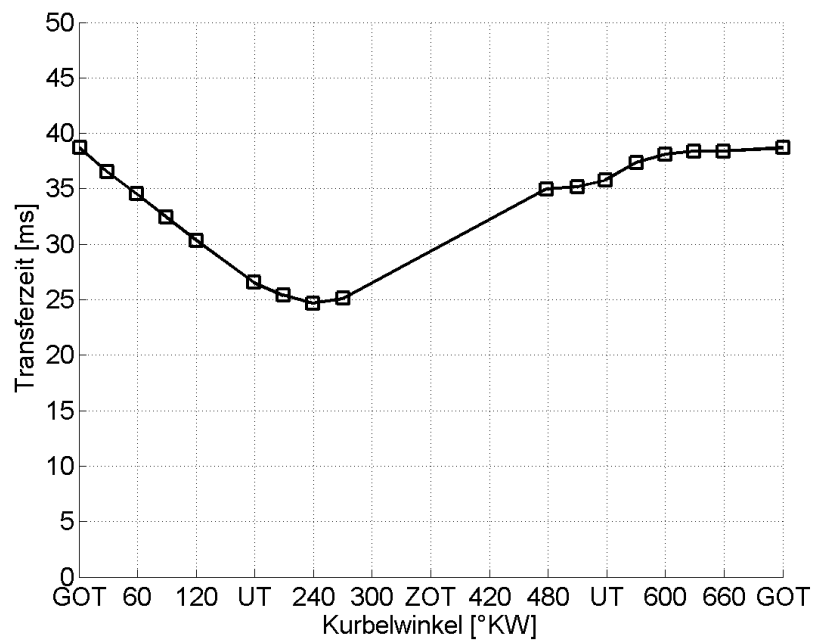


Abbildung 3.15: Transferzeiten Messung SDMD

Betriebspunkt:  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 120 \text{ Nm}$ .

### 3.3.3 Schnelles Direkteinlasssystem mit 4 Druckstufen (SD4D)

Mithilfe von dynamischen, dreidimensionalen Strömungsberechnungen (CFD) ist ein Brennraum-Gasentnahmesystem entwickelt worden, das 4 Druckstufen im Transferkapillarbereich besitzt (SD4D). Es erfüllt die Anforderungen, die für ein optimales Einlasssystem in der Einleitung des Kap. 3.3 festgelegt wurden.

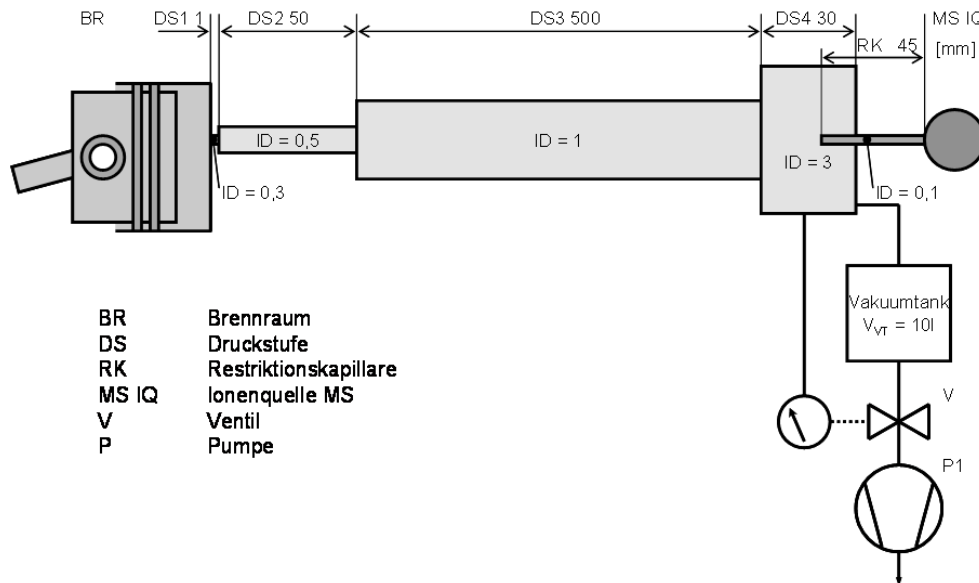


Abbildung 3.16: Schnelles Direkteinlasssystem mit 4 Druckstufen:

Der Weg vom Brennraum BR des Zylinders zum Vorvakuum gliedert sich in 4 Druckstufen DS1-4 auf. Sie werden jeweils durch eine Ausweitung des Innendurchmessers  $ID$  realisiert. DS4 wird von einer Pumpe P1 mit geregelterm Unterdruck  $p_V$  bepumpt. Eine Restriktionskapillare RK steckt in DS4 und überführt einen Teil des Massenstroms in die Ionenquelle IQ des Massenspektrometers MS.

Das in Abbildung 3.16 gezeigte System besteht im Wesentlichen aus einer Sondenspitze, einer Transferstrecke und einem Vorvakuumbereich. Die Sondenspitze verbindet den Brennraum mit der Transferleitung. Zu diesem Zweck wird in den Zylinderkopf ein Schraubadapter installiert. Die Adaptervorderseite schließt bündig mit der Brennraumwand ab und ist mit einer Bohrung versehen, die die erste Stufe im Einlasssystem bildet. Im weiteren Aufbau zum Massenspektrometer folgt eine Reihe von Kapillaren, deren innerer Durchmesser stufenweise zunimmt. Hierbei wird ein Querschnittsflächenverhältnis von Eingang zum Ausgang von  $\frac{A_{Ein}}{A_{Aus}} = 1/100$  erreicht.

In den Ausgangsbereich der Transferkapillare ragt die Restriktionskapillare hinein, die zur Ionenquelle führt. An dieser Stelle ist über ein T-Stück ein Sensor installiert, der den Absolutdruck zur Druckregelung misst. Eine Pumpe P1 generiert, getaktet über ein Ventil, am Ausgang der Transferkapillaren einen einstellbaren Druck  $p_V$ . Mit einem Vakuumtank  $V_{VT} = 101$  werden Druckpulsationen der Druckregelung abgedämpft. Alle Bauteile sind auf  $T = 250\text{ °C}$  beheizt.

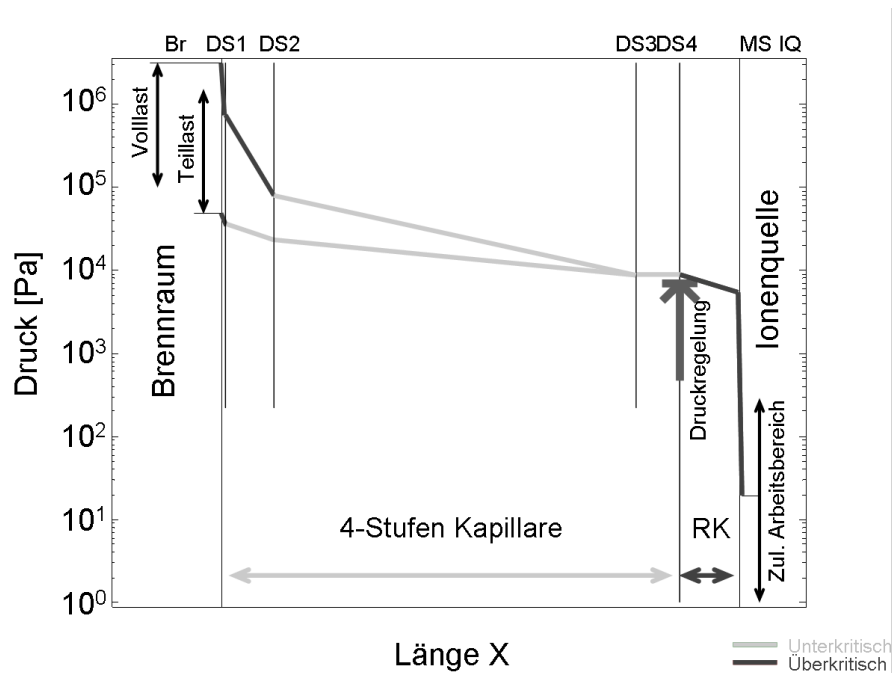


Abbildung 3.17: Schema des Druckverlaufes über die Transferstrecke, SD4D:

Die Variation des Eingangsdruckes  $p_{Ein}$  bei Voll- und Teillast kann von der 4-Stufen Kapillare vollständig kompensiert werden. Die einzelnen Kapillarstufen wechseln mit zunehmendem Druck von dem unterkritischen in den überkritischen Betriebszustand.

Abbildung 3.17 stellt die Druckverhältnisse im Kapillarverlauf schematisch dar. Anhand des Diagramms wird deutlich, dass der durch den Brennraum generierte Eingangsdruckbereich bei Voll- und Teillast über die verschiedenen Druckstufen DS vollständig bis hin zum Eingang der Restriktionskapillare RK am Ende der Stufe DS4 abgebaut werden kann. Mit zunehmendem Eingangsdruck erreichen die Druckstufen von DS1 bis DS3 sukzessive den überkritischen Betriebszustand. Dabei bleibt DS4 immer unterkritisch und Druckpulsationen werden so nicht mehr über die Restriktionskapillare an die Ionenquelle weitergeleitet.

## 3.4 Berechnung des Gastransportes

Die Strömungsberechnung des Einlasssystems wurde mit ANSYS CFX durchgeführt. In einem ersten Schritt sind die Abmaße der Entnahmestrecke in einer für das Programmpaket lesbaren Form importiert worden (Kap. 3.4.1). Nach der Definition der Randbedingungen von Druck und Temperatur sowie der Bestimmung des Fluids (Kap. 3.4.2) ist das Strömungsmodell festgelegt worden (Kap. 3.4.3). Die Lösung der CFD-Gleichungen erfordert eine spezielle Vorgehensweise, in der ein Initialisierungsschritt den dynamischen Berechnungen vorangeht (Kap. 3.4.4). Die ermittelten Ergebnisse beinhalten Druck- und Geschwindigkeitsverläufe über die Kapillare für  $1^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$ . Sie belegen, dass das System in allen Phasen rückströmungsfrei ist. Gemeinsam mit einer Massenbilanz wird gezeigt, dass Druckpulsationen in das Massenspektrometer erfolgreich ausgekoppelt worden sind. Ferner werden die Auswirkungen auf die Gastransferzeit dargestellt (Kap. 3.4.5).

### 3.4.1 Geometrie

Die Geometrie des Einlasssystems wurde dreidimensional mit CAD erzeugt und für CFX mit dem Programm ICEM-CFD in ein unstrukturiertes Rechengitter umgewandelt. Hierbei ist der gesamte, am Gastransport beteiligte Bereich des Einlasssystems berücksichtigt worden, siehe Abbildung 3.18. Die verwendeten Kapillaren sind innen mit Quarzglas beschichtet. Deshalb wurden diese Teile in der CFD-Simulation als glatt definiert. Der Bereich des Brennräume und die Ionenquelle wurden mit einem zylindrischen Volumen dargestellt.

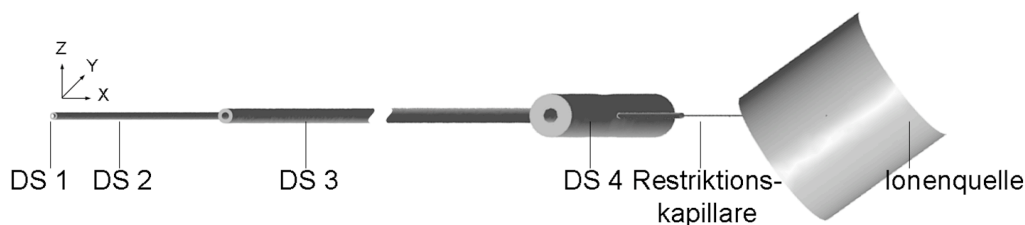


Abbildung 3.18: Geometrie des Einlasssystems

### 3.4.2 Randbedingungen

Die thermischen Randbedingungen der Wandungen im Einlasssystem wurden statisch bei einer konstanten Temperatur von  $T = 250\text{ °C}$  vorgegeben. Der Ausgang am Ende der Stufe 4 ist als statische Druckvorgabe im Vorvakuum mit  $p_V = 2 \cdot 10^4\text{ Pa}$  definiert. Die Ionenquelle geht mit einem Druck von  $p_{IQ} = 1,33\text{ Pa}$  als Auslass in das Modell ein. Das Fluid für die Berechnungen wird als Luft (ideales Gas) mit den folgenden Parametern definiert, Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Fluidparameter

Fluid	Luft - Ideales Gas
Molare Masse $m_{mol}$	28,96 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right]$
Spezifische Wärmekapazität $c_P$	1004,4 $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
Thermische Leitfähigkeit $k$	0,0261 $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$

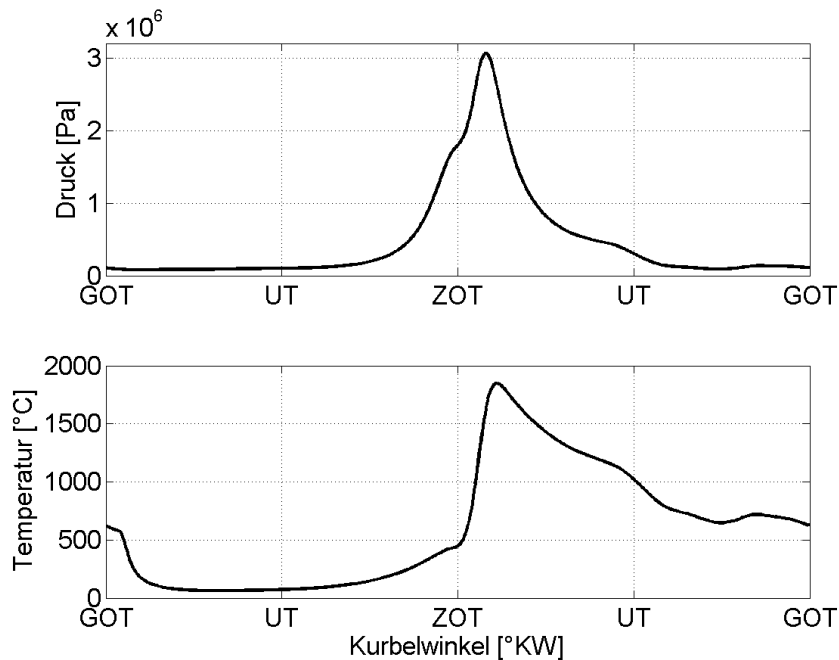


Abbildung 3.19: Druck- und Temperaturrandbedingungen am Einlass BR/DS1:

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90\text{ °C}$ ;  $n = 2000\text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145\text{ Nm}$ .

Brennraumseitig ist eine Öffnung mit dynamischen Randbedingungen definiert worden. An dieser Stelle wurde der Druckverlauf im Brennraum BR aus Messungen am Versuchsträger vorgegeben. Die kurbelwinkelabhängige Brennraumtemperatur aus der Kreisprozessberechnung bildet die Temperaturbedingungen am Eingang ab. Diese Daten sind betriebspunktabhängig. In Abbildung 3.19 werden die Werte für den Betriebspunkt  $T_{KW} = 90\text{ °C}$ ;  $n = 2000\text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145\text{ Nm}$  gezeigt [21].

### 3.4.3 Strömungsmodell und Gültigkeitsbereich

Die Simulationsparameter für die CFD-Berechnung setzen sich aus dem Fluid, dem Wärmeübergangsmodell, dem Turbulenzmodell sowie einer zusätzlichen Variablen der Konzentration zusammen, siehe Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Simulationsparameter

Fluid	Einphasig Luft - Ideales Gas
Wärmeübergangsmodell	Totale Energie
Turbulenzmodell	$K - \omega$
Konzentration	Volumetrischer Transport

Im Bereich der Ionenquelle verlieren die Navier-Stokes-Gleichungen aufgrund des dort vorherrschenden niedrigen Druckes ihre Gültigkeit. Hier kommt es zu einer molekularen Strömungsform, die nicht mit CFD berechnet werden kann. Für die Berechnung des Gastransportes ist dies unerheblich, da die in diesem Bereich herrschende Schallgeschwindigkeit einen idealen Gastransfer bedingt. Der gesamte, für Strömungsvorgänge interessante Teil vom Brennraum BR bis zu der Ionenquelle IQ liegt im Gültigkeitsbereich der CFD-Rechnung.

### 3.4.4 CFD-Lösung

Der CFX-Löser wird mit den Bedingungen  $p_{Ein}(\varphi = 0^\circ)$  und  $T_{Ein}(\varphi = 0^\circ)$  zu  $t = 0\text{ s}$  initialisiert. Die errechnete Lösung wird als Startwert für die transiente Berechnung verwendet. Der Druck  $p_{Ein}(\varphi)$  und die Temperatur  $T_{Ein}(\varphi)$  sind für den nächsten Zeitschritt als Eingangsrandbedingung eingesetzt worden. Dies wird für ein Arbeitsspiel durchgeführt, bis  $\varphi = 720^\circ\text{KW}$  erreicht ist. Die letzte Lösung findet

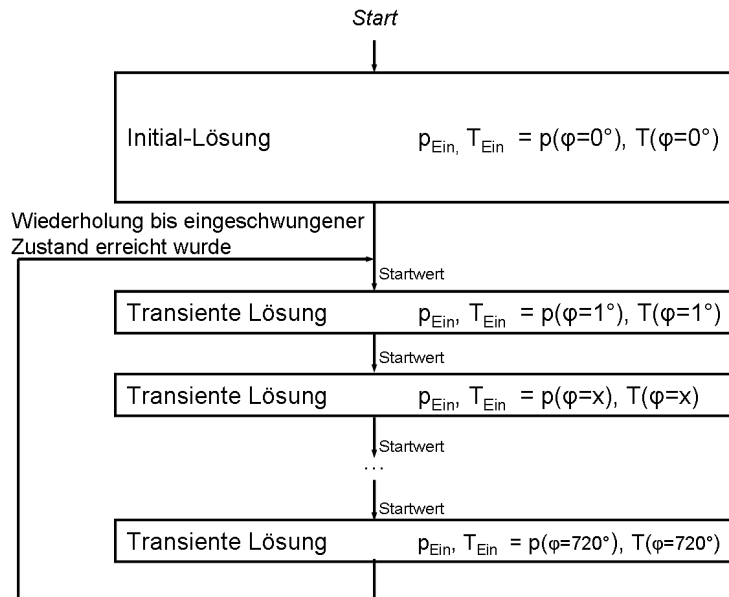


Abbildung 3.20: Lösungsschema einer transienten CFD-Simulation:

Ausgehend von einer Initial-Lösung werden die transienten Lösungen für  $1^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$  sequenziell berechnet.

anschließend Verwendung, um eine erneute transiente Berechnung zu initialisieren. Diese Schritte werden wiederholt, bis das System einen eingeschwungenen Zustand erreicht, siehe Abbildung 3.20. Bei ausbleibender Konvergenz der Lösung werden Zeitwischenschritte eingefügt, bis die Konvergenzgrenze unterschritten wird.

### 3.4.5 Ergebnisse

Zu den Ergebnissen der CFD-Berechnung gehören der Druck und die Geschwindigkeit – jeweils als Funktion des Ortes und der Zeit. Daraus ergeben sich die Massenbilanz der Ein- und Auslassöffnungen und die Gastransferzeiten von vorgegebenen Konzentrationspulsen.

**Druck:** Abbildung 3.21 zeigt den Druckverlauf als Funktion des Ortes für die erste Umdrehung der Kurbelwelle. Die Takte 3 und 4 sind in Abbildung 3.22 dargestellt. In allen Fällen ist der Druck-Zeit-Gradient vom Brennraum zur Ionenquellen hin negativ, eine Rückströmung kann ausgeschlossen werden.

Weiterhin ist der Druckverlauf im vorderen Teil der 4-Stufen Kapillare stark vom wechselnden Zylinderdruck abhängig. Im hinteren Bereich ist das nicht der Fall.

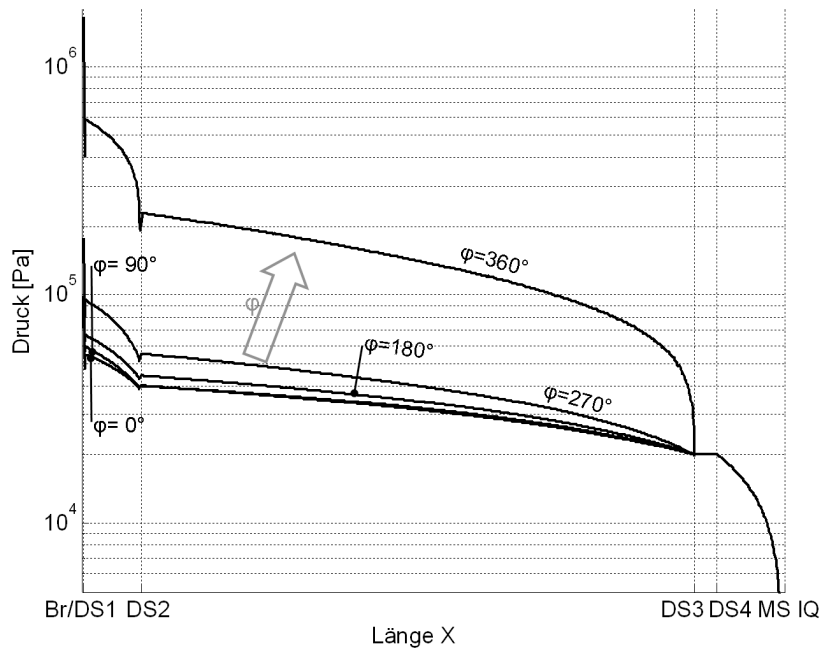


Abbildung 3.21: Druckverlauf im Einlasssystem  $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$

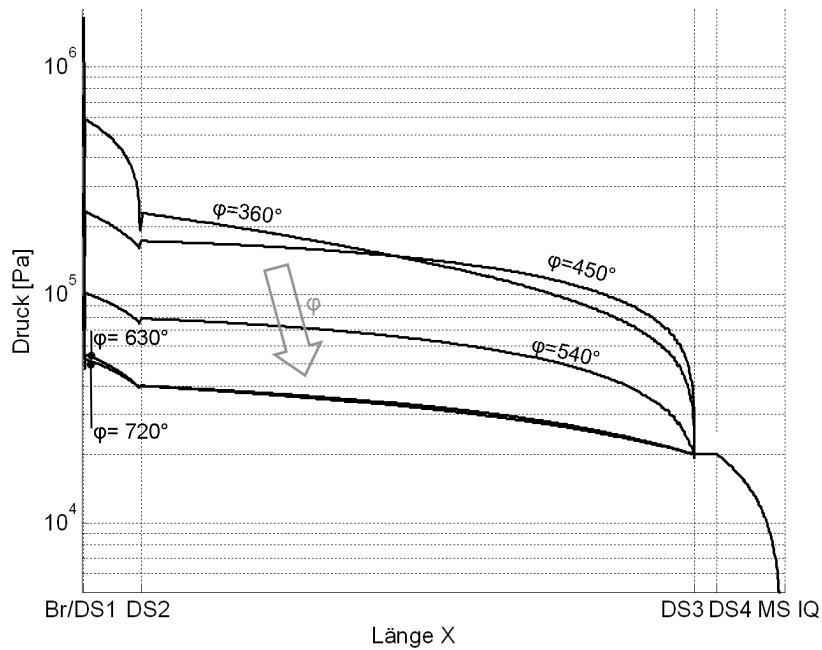


Abbildung 3.22: Druckverlauf im Einlasssystem  $360^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$ :

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000\text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145\text{ Nm}$ .

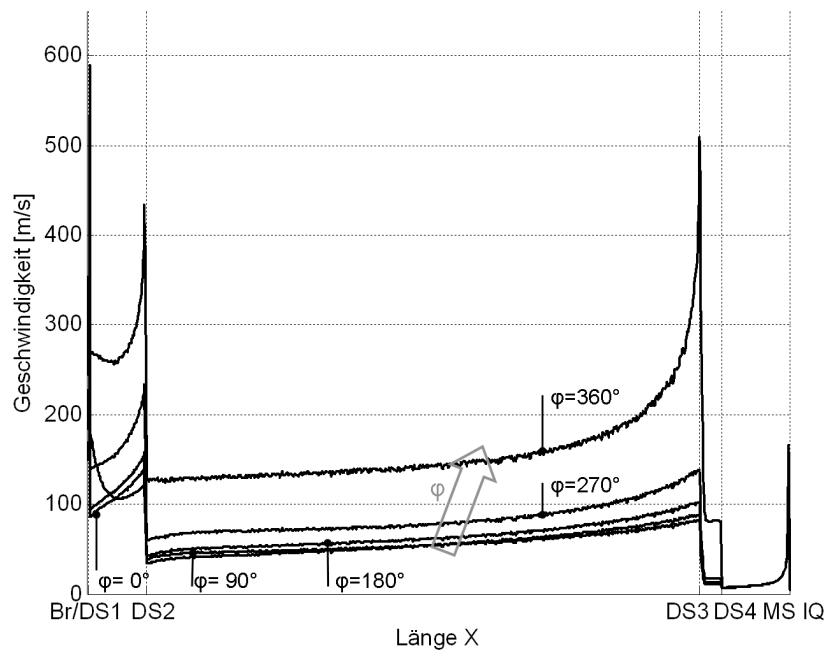


Abbildung 3.23: Geschwindigkeitsverlauf im Einlasssystem  $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$

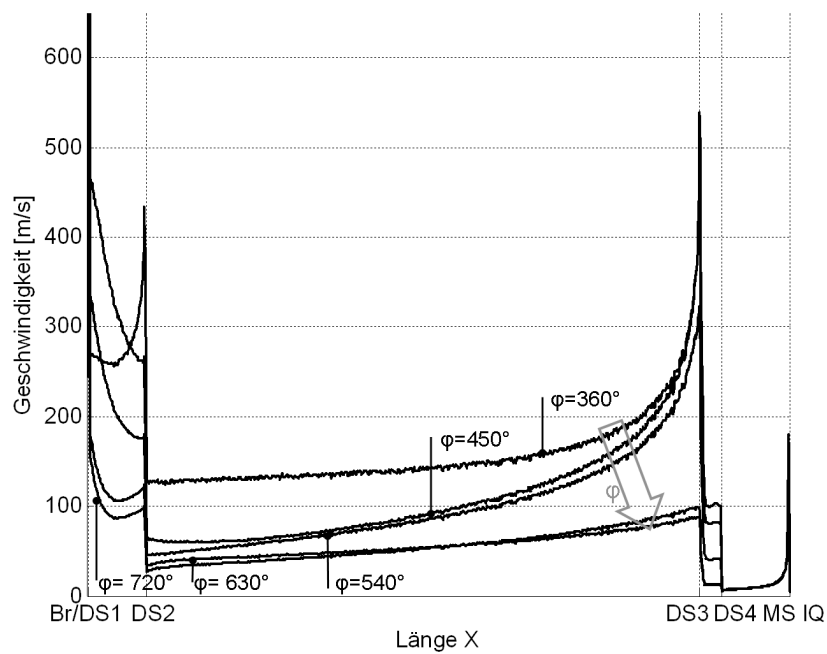


Abbildung 3.24: Geschwindigkeitsverlauf im Einlasssystem  $360^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$ :

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

**Geschwindigkeit:** Die Geschwindigkeitsprofile in Abbildung 3.23 und Abb. 3.24 spiegeln dieses Verhalten wider. Es ist zu erkennen, dass für alle Kurbelwinkel der Geschwindigkeitsverlauf für den Gastransport stets positiv ist. Eine kontinuierliche Gasentnahme aus dem Brennraum ist somit in allen Takten sichergestellt. Weiterhin wird gezeigt, dass die Transfergeschwindigkeit im Einlasssystem nicht konstant ist.

Dieses Verhalten wird durch eine starke Druckabsenkung im vorderen Bereich des Einlasssystems erreicht. Die Stufen DS1 und DS2 bewirken in diesem Fall eine Verringerung der in der Transferstrecke enthaltenen Masse  $m$ . Das ermöglicht ein schnelles Folgeverhalten des ganzen Systems auf wechselnde Eingangsdruckbedingungen  $p_{Ein}(\varphi)$ .

Dieses schnelle Druckfolgeverhalten des SD4D steht im Gegensatz zu einer einfachen Kapillarverbindung (SD), in der der Druckabbau vorwiegend im hinteren Teil der Transferstrecke stattfindet. Die im vorderen Bereich des Systems enthaltene Masse  $m$  steht einer schnellen Druckänderung durch ihre Trägheit im Wege.

**Massenbilanz:** Die Auswertung der Massenströme ergibt die Tatsache, dass während eines Arbeitsspiels dem Zylinder  $m_{BR} = 2 \text{ mg}$  Masse entnommen werden, siehe Abbildung 3.25. In dieser Zeit werden der Ionenquelle des Massenspektrometers in einem zeitlich konstanten Gasstrom insgesamt  $m_{IQ} = 0,2 \text{ } \mu\text{g}$  der Brennraummasse zur Analyse zugeführt.

Die speziell abgestimmte Geometrie der 4-Stufen-Kapillare ermöglicht die Gasentnahme in allen 4 Arbeitstakten des Motors. Das entwickelte Probenahmesystem kann mit den folgenden Eigenschaften für zeitlich hoch aufgelöste Messungen im Brennraum verwendet werden:

- bei neg. Druck-Zeit-Gradienten rückströmungsfrei bis zu  $\left| \frac{dp_{Ein}}{dt} \right| = 1250 \text{ bar/ms}$ ,
- konstanter Massenstrom  $\dot{m}_{IQ}$  in die Ionenquelle des Analysators.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der hier beschriebenen Einlasssysteme sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Das System SD4D ist insofern als optimal anzusehen, da es sämtliche Last- und Drehzahlbereiche, die bei der Messung im Brennraum an dem

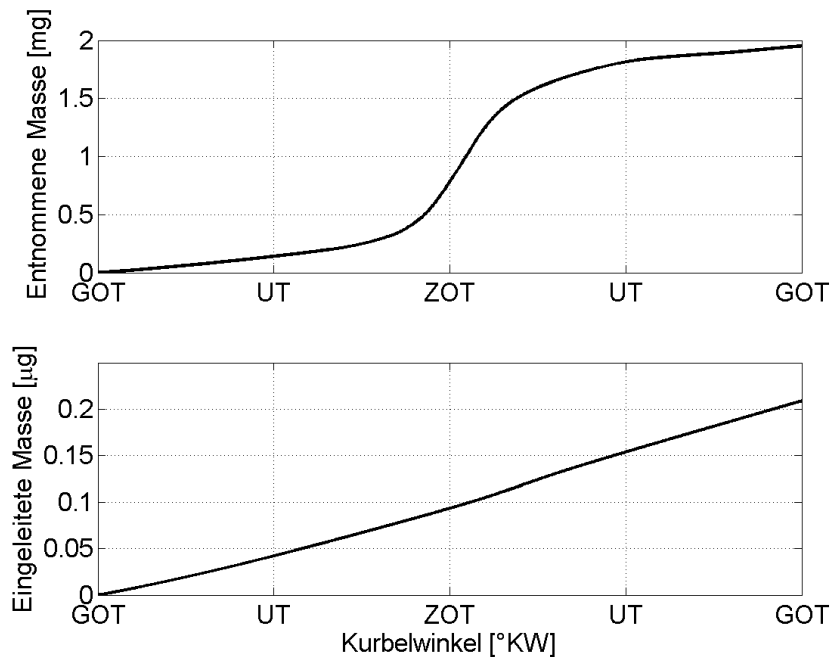


Abbildung 3.25: Entnommene und zugeführte Masse:

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

verwendeten Ottomotor auftreten, abdeckt, siehe Abbildung 3.14. Es wird dabei in allen Takten ein Gastransport mit positiver Strömungsgeschwindigkeit gewährleistet [48, 49, 50].

**Transferzeit:** Die Ermittlung der Gastransferzeit durch das Einlasssystem erfolgt in der CFD-Berechnung mithilfe von Transportgleichungen.

Hierzu werden am Eingang des Systems in regelmäßigen Abständen ( $60^\circ\text{KW}$ ) simulierte Konzentrationspulse vorgegeben. Deren Ausbreitungsweg durch das System ist abhängig von der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Die Zeitspanne zwischen dem Start am Einlass und der Ankunft in der Ionenquelle entspricht der Transferzeit. Abbildung 3.26 zeigt den Pfad der Konzentrationspulse für ein Arbeitsspiel. Flache Pfade zeigen eine hohe, steile eine niedrige Gasgeschwindigkeit an.

Die daraus resultierende Transferzeit über ein Arbeitsspiel ist der Abbildung 3.27 zu entnehmen. Im Mittel benötigt das Gas  $\bar{t} = 22,7 \text{ ms}$  für das Passieren der Strecke. Maximal werden beim Gaswechsel  $t_{GOT} = 26 \text{ ms}$  für den Transport benötigt. Die

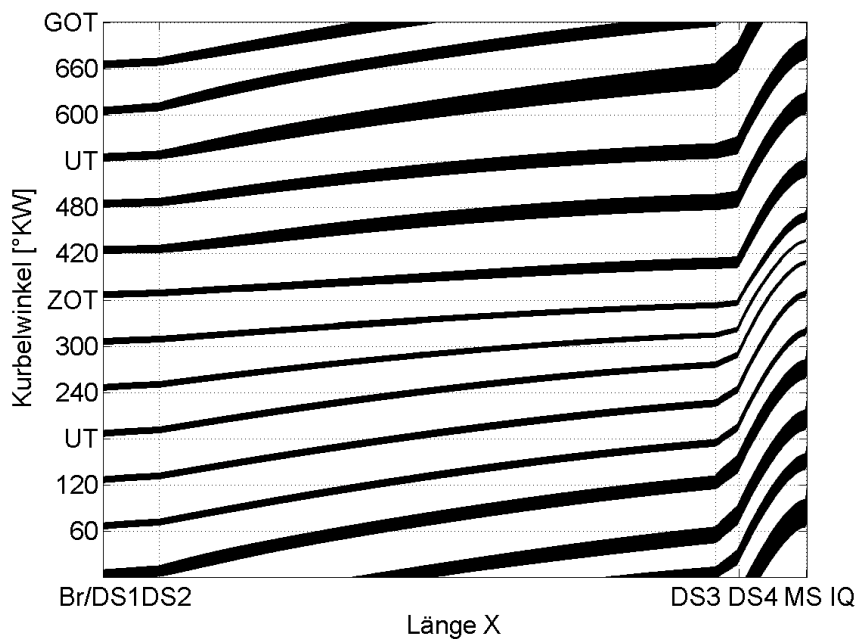


Abbildung 3.26: Konzentrationspfade durch das Einlasssystem:

Eine Serie von Testkonzentrationen im Abstand von  $\varphi = 60^\circ$  wird am Einlass BR der Transferstrecke vorgegeben. Die Pfade markieren den Konzentrationstransport entlang der Länge  $X$  bis zur Ionenquelle IQ. Der Einfluss der Druckstufen DS1-4 ist deutlich erkennbar. Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

minimale Transferzeit tritt kurz vor der Zündung mit  $t_{ZOT} = 17 \text{ ms}$  auf. Das hat zur Folge, dass die mit dem Massenspektrometer detektierten Signale in Bezug auf die Verhältnisse im Zylinder auf der Zeitachse verschoben und verzerrt wiedergegeben werden.

Diese Verhältnisse stimmen tendenziell mit den Messungen (Abbildung 3.15) überein, die am Einlasssystem SDMD erzielt wurden und belegen die Notwendigkeit einer Transferzeitkorrektur.

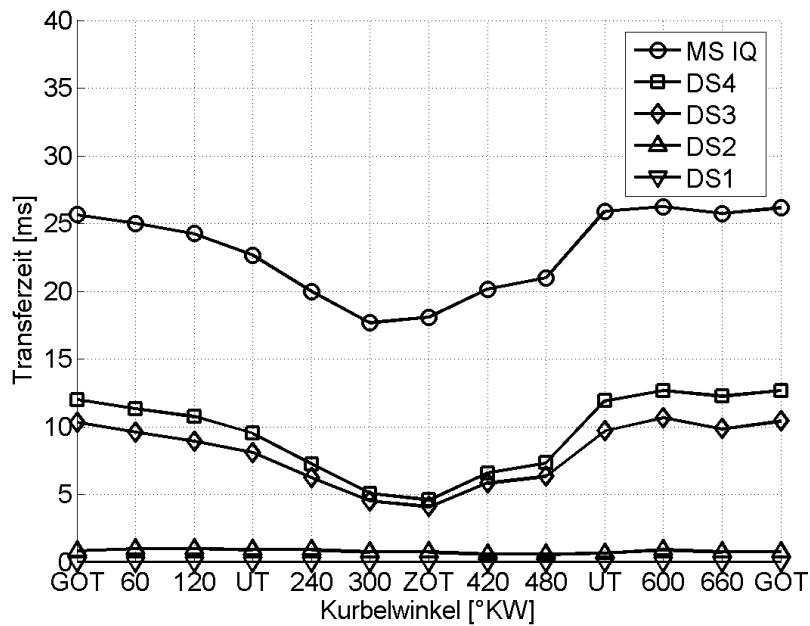


Abbildung 3.27: Kurbelwinkelabhängige Transferzeit des Einlasssystems:  
 Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

### 3.5 Transferzeitkorrektur

Die zeitlich richtige Zuordnung des Detektorsignals  $y(t)$  erfordert die Berücksichtigung der Übertragungseffekte, die sich aus der Transferstrecke ergeben. In der Nachrichtentechnik wird dazu bei linearen zeitinvarianten Systemen (LTI) zunächst die Übertragungsfunktion  $G(s)$  der Strecke im Frequenzbereich ermittelt [51].

$$G(s) = G(0) \frac{1 + \sum_{j=1}^m a_j s^j}{1 + \sum_{i=1}^n b_i s^i} \quad (3.1)$$

Aus der Übertragungsfunktion lässt sich die Impulsantwort mit einer Fouriertransformation ermitteln:

$$G(s) \bullet \text{---} \circ g(t) \quad (3.2)$$

Das Ausgangssignal  $y(t)$  des Messsystems erhält man durch Faltung des Eingangssignals  $u(t)$  mit der Impulsantwort  $g(t)$  des Messsystems [52].

$$y(t) = g(t) * u(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \cdot u(t - \tau) d\tau \quad (3.3)$$

Im einfachen Fall einer zeitinvarianten Totzeit ist der Wert des Ausgangssignals  $y(t)$  um eine feste Zeitdifferenz  $t_{tot}$  vom Eingangssignal  $u(t)$  verschoben [53].

$$y(t) = u(t - t_{tot}) \quad (3.4)$$

Die CFD-Ergebnisse zeigen, dass der 1. und 2. Takt gestaucht (sinkende Transferzeit in dieser Phase) bzw. der 3. und 4. gestreckt werden – ansteigende Transferzeit. In Abbildung 3.28 wird dies für die Arbeitstakte dargestellt.

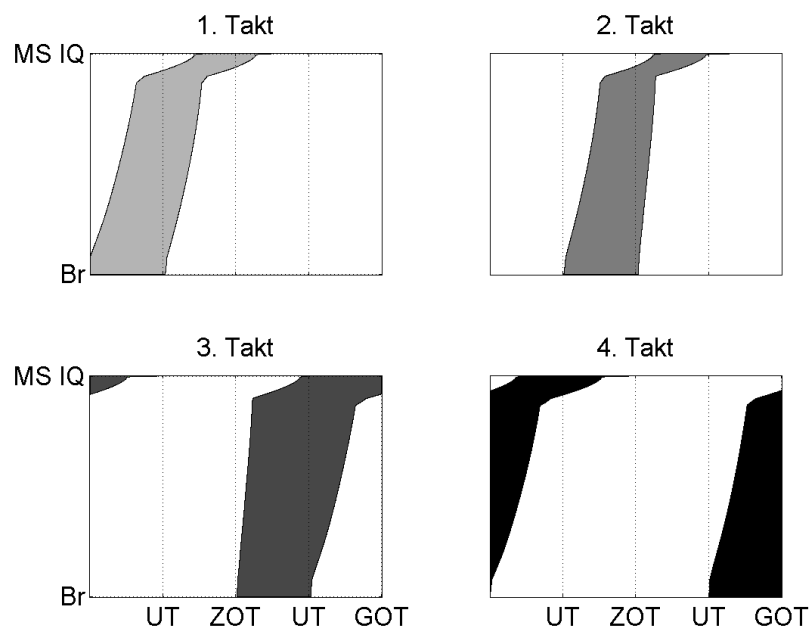


Abbildung 3.28: Verzerrung der zeitlichen Zuordnung:

Die periodisch variierende Transferzeit des Einlasssystems bewirkt eine Stauchung bzw. eine Streckung der Arbeitstakte. (BR) Brennraum, (MS IQ) Ionenquelle MS, Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

Das bedeutet, dass die Totzeit des Übertragungssystems nicht zeitinvariant ist. Sie verändert sich insbesondere periodisch mit dem Drehwinkel der Kurbelwelle  $\varphi$ ,

sodass die Rückrechnung um die variierende Totzeit  $t_{tot}(\varphi)$  erweitert wird.

$$y(t) = u(t - t_{tot}(\varphi)) \quad (3.5)$$

Die kurbelwinkelabhängige Laufzeit  $t_{tot}(\varphi)$  kann prinzipiell mit einer Messung oder einer Berechnung bestimmt werden.

Die Berechnung nach der vorgestellten Methode mit CFD beinhaltet Risiken. Die physikalischen Randbedingungen, die während der Messung gelten, müssen dazu exakt abgebildet werden. Weiterhin ist die Rechnung zeitintensiv, d. h., pro Betriebspunkt wird ca. ein Tag auf einem aktuellen PC-System (2,40 GHz Intel Core 2 Duo) benötigt.

Laufzeitmessungen können, wie in Kap. 3.3 beschrieben, mit einem getakteten Ventil und einem Tracer-Gas durchgeführt werden. Auf Basis der erzielten Ergebnisse ist die genaue Zuordnung des Detektorsignals auf den Kurbelwinkel möglich. Diese Methode bringt jedoch einen erheblichen apparativen Aufwand mit sich und benötigt je nach Anzahl der Tracermarken über den Kurbelwinkel etwa 2 Stunden pro Betriebspunkt.

Damit diese Korrektur in Echtzeit und ohne zusätzlichen Aufwand vorgenommen werden kann, ist eine neue, wesentlich schnellere Methode im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt worden. Sie basiert auf Messdaten des Massenspektrometers und Kohlendioxid-Konzentrationsvorgaben  $CO_{2,Sim}$  aus einer Kreisprozessrechnung (KPR) [21]. Sie sind mit dem installierten Einlasssystem in dem zu untersuchenden Betriebspunkt ermittelt wurden. Als Eingangsgröße wird der zeitliche Verlauf der Messung von Kohlendioxid  $CO_2$  im SIM-Modus über einen Arbeitsspiel  $CO_{2,Mess}$  herangezogen. Das Messsignal  $CO_{2,Mess}(\varphi)$  wird mit einer Transferzeitkorrekturfunktion  $S(\varphi)$  auf die Bildfunktion  $CO_{2,Mess,Korr}(\varphi)$  abgebildet.

$$CO_{2,Mess}(\varphi) \longrightarrow CO_{2,Mess,Korr}(\varphi) \quad (3.6)$$

Der Abstand  $f = \|CO_{2,Sim} - CO_{2,Mess,Korr}\|$  bildet die Zielfunktion und die Transferzeitkorrekturfunktion  $S(\varphi)$  den Parameterraum für ein Optimierungsproblem. Unterschiedliche Optimierungsverfahren kommen für die Lösung in Betracht. Die klassischen Verfahren gliedern sich in ableitungsfreie Methoden wie z. B. das Intervallhalbierungsverfahren und Methoden, die die 1. bzw. 2. Ableitung im Parameterraum

bilden (Gradientenverfahren oder Newton-Verfahren). Die genannten Methoden unterscheiden sich je nach Art des zu lösenden Problems in der numerischen Stabilität, der Laufzeit und der Genauigkeit der Lösung [54, 55]. Generell gute Resultate bei geringem Implementierungsaufwand und vertretbaren Rechenzeiten bieten genetische Algorithmen.

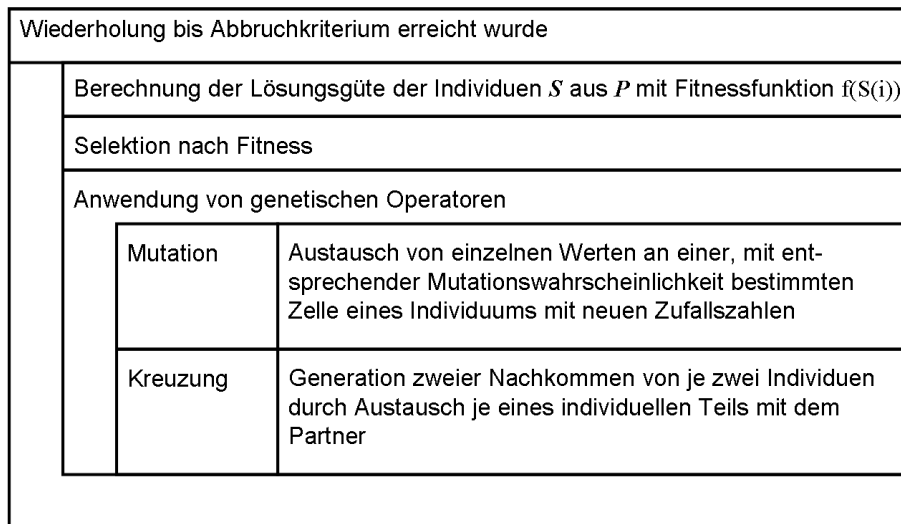


Abbildung 3.29: Funktionsschema des genetischen Algorithmus

Ein genetischer Algorithmus (GA) wendet evolutionäre Strategien auf eine Population  $P$  von  $I$  Lösungskandidaten  $S(\varphi)$  an [56]. Die Individuen werden in einer Initialisierungsphase mit zufällig gewählten Startwerten versehen. Ein Funktionsblock wird nachfolgend iterativ bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums durchlaufen, siehe Abbildung 3.29. Im vorliegenden Fall generiert der GA eine Transferzeitkorrekturfunktion  $S$ . Diese wird auf die Messung  $CO_{2, Mess}$  angewandt und der Unterschied zur bekannten Konzentrationen  $CO_{2, Sim}$  wird in einem iterativen Verfahren minimiert (Abbildung 3.30). Ist dieser minimal, kann die Transferzeitkorrekturfunktion  $S$  verwendet werden, um alle weiteren im Betriebspunkt gemessenen Komponenten auf der Zeitachse zuzuordnen, siehe Abbildung 3.31.

Das an  $CO_2$  erprobte Verfahren ist prinzipiell auf alle im Brennraum vorkommenden Gase anwendbar, die an der Verbrennung beteiligt sind. Die Komponente muss jedoch mess- und simulationstechnisch erfassbar sein. Die Anwendung der Trans-

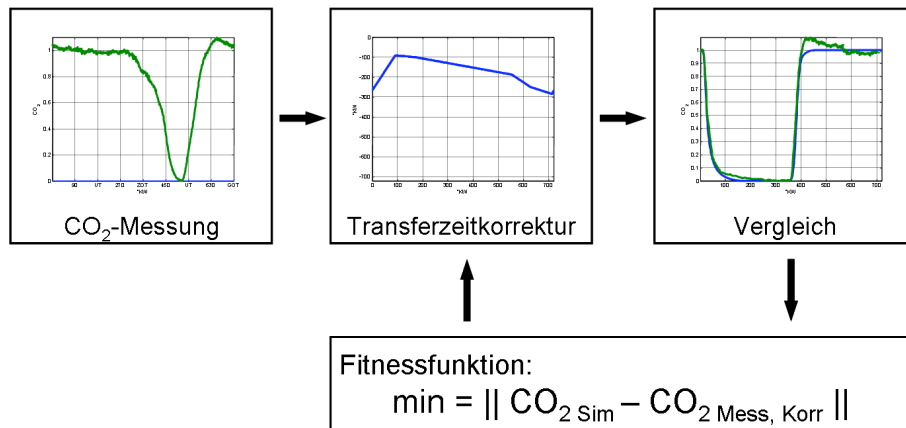


Abbildung 3.30: Genetischer Algorithmus zur Transferzeitenbestimmung:

Eine Transferzeitkorrekturfunktion  $S \in P$  wird auf den gemessenen  $\text{CO}_2$ -Verlauf angewandt. Diese wird in einer Fitnessfunktion  $f(S(i))$  mit dem berechneten  $\text{CO}_2$ -Verlauf verglichen.

ferzeitkorrekturfunktion auf die Messungen von Substanzen mit unterschiedlichen Molekülmassen ( $m/z = 32; 92$ ) zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Brennverlauf.

Die Gegenüberstellung der gemessenen Transferzeit, die sich aus  $S$  ergibt, mit den Pulslaufzeiten aus der CFD-Berechnung wird in Abbildung 3.32 gezeigt. Die Ergebnisse zeigen einen vergleichbaren Verlauf mit einem Maximum bei GOT und einem Minimum um ZOT. Die absoluten Werte weichen bei GOT um maximal  $t = 6$  ms voneinander ab.

Das Verfahren der Transferzeitkorrektur wird mithilfe eines genetischen Algorithmus bei minimalem apparativem Aufwand durchgeführt. Die kurbelwinkelabhängige Verzerrung des detektierten Signals wird damit eliminiert. Die Qualität der Korrektur ist anhand der Kohlendioxidmessung und der Kreisprozessrechnung überprüfbar.

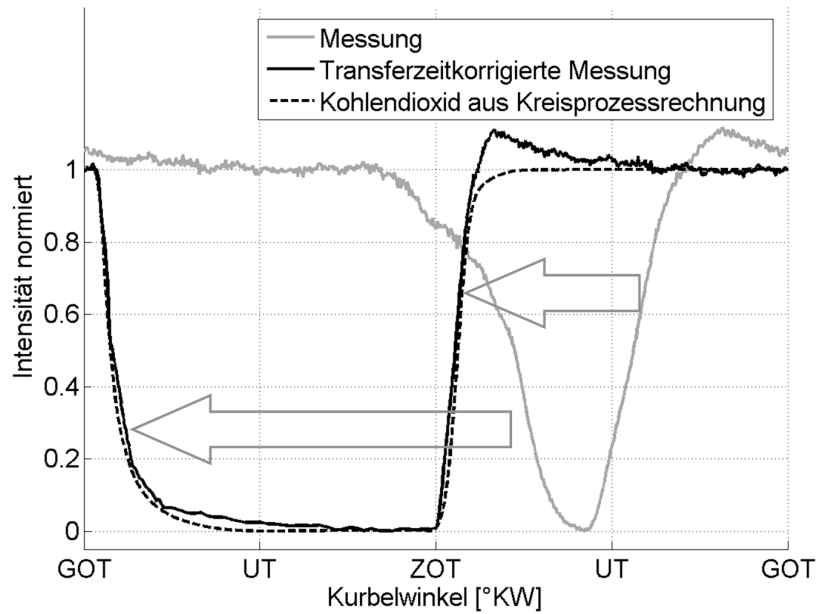


Abbildung 3.31: Transferzeitkorrigierte  $CO_2$ -Messung und KPR-Rechnung:

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000\text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145\text{ Nm}$ .

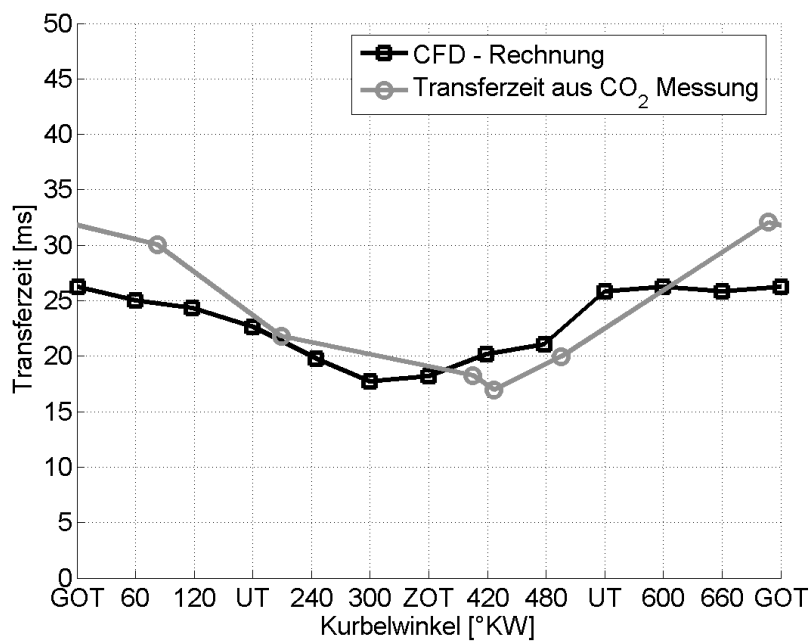


Abbildung 3.32: Transferzeiten aus  $CO_2$ -Messung und CFD-Rechnung:

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000\text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145\text{ Nm}$ .

## 3.6 Kalibriertechnik

Vom Massenspektrometer detektierte Intensitäten werden als Zählrate der Ionen in *counts* angegeben. Um diese in Beziehung zu absoluten Konzentrationen setzen zu können, ist eine Kalibrierung notwendig.

### 3.6.1 Das Kalibriergerät – Pikal

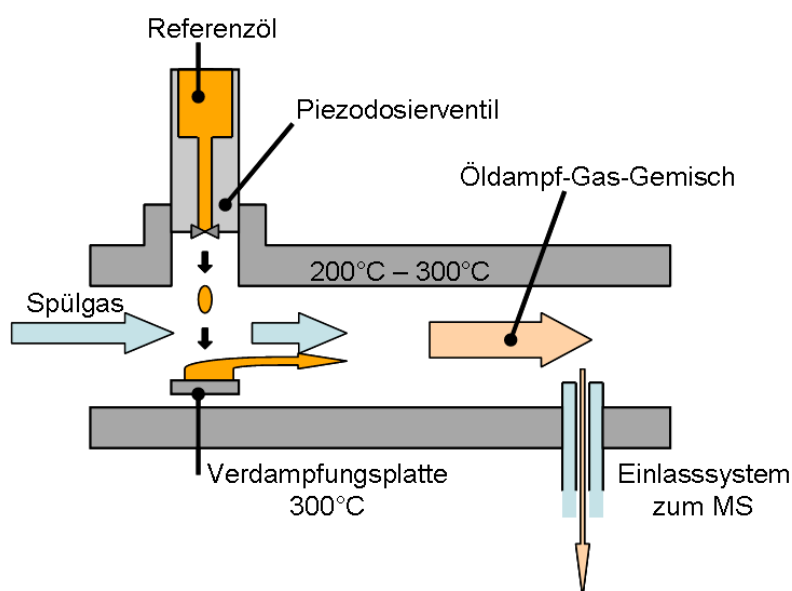


Abbildung 3.33: Schematische Darstellung der Verdampfungskammer:

Der Spülgasstrom führt über die Verdampfungsplatte, auf die das Referenzöl mithilfe eines Ventils dosiert wird. Das Öldampf-Gas-Gemisch wird dem MS zugeführt.

Dazu ist eine Apparatur notwendig, mit der dem Messsystem eine definierte Öldampfkonzentration vorgegeben werden kann. Der Messwert in *counts* dieser Referenzprobe wird dann auf die von dem Apparat erzeugte Massenkonzentration  $c_{Oel,Kalib}$  bezogen. Zur Erzeugung des Öldampfes muss eine genau bestimmbare Menge flüssiges Öl  $\dot{m}_{Oel}$  in einen Trägergasstrom mit bekanntem Massenstrom  $\dot{m}_{Luft}$  eingedampft werden. Hierzu ist – basierend auf einem Dosierventil – ein Kalibrator (Pikal) entwickelt worden, der im nachfolgenden Teil beschrieben wird [57].

Der Aufbau des Kalibriersystems besteht aus einer Steuereinheit und einer Dosiereinheit. In der Dosiereinheit befindet sich die Verdampfungskammer, sie wird in Abbildung 3.33 dargestellt. Ein heißer Luftstrom mit  $T = 250\text{ °C}$  wird auf eine beheizte Verdampfungsplatte geleitet und entweicht druckfrei über den Auslass. Mit dem Dosierventil werden Flüssigkeitstropfen des Kalibriermediums auf die Verdampfungsplatte dosiert, dort in die Gasphase überführt und in den Luftstrom eingetragen. Nach dem Durchlaufen einer Mischstrecke wird ein Teil des Gemisches dem Massenspektrometer zur Analyse zugeführt.

### 3.6.2 Der Verdampfungsprozess

Die Verdampfungsdauer aufgelegter Tröpfchen ist abhängig von der Temperatur des Untergrundes bzw. der Wand  $T_W$ . Der Verdampfungsprozess wird in vier Kategorien eingeteilt [58], siehe Abbildung 3.34.

- Unterhalb der Siedetemperatur der Flüssigkeit  $S$  findet ein konvektiver Wärmeübergang statt.
- Oberhalb der Siedetemperatur stellt sich bis zum Erreichen der Nukiyama-Temperatur  $N$ , bei der der Wärmestrom maximal ist, das Blasensieden ein.
- Zwischen  $N$  und Leidenfrost-Temperatur  $L$  kommt es beim Übergangssieden zu Dampfpolstern, die den Wärmeübergang stören und die Verdampfungsdauer erhöhen.
- Beim Filmsieden befindet sich ein vollständiger Dampffilm zwischen Tropfen und Wand, dabei ist die  $T_W$  größer als  $L$ .

Nukiyama- und Leidenfrost-Temperatur werden experimentell ermittelt und sind abhängig von Parametern wie Umgebungsdruck, Wandmaterial und Beschaffenheit der Flüssigkeit.

Tröpfchen, die aus dem Flug auf eine heiße Wand treffen, haben ein Kollisionsmuster, das zusätzlich zu den oben aufgeführten Parametern abhängig von der axia-

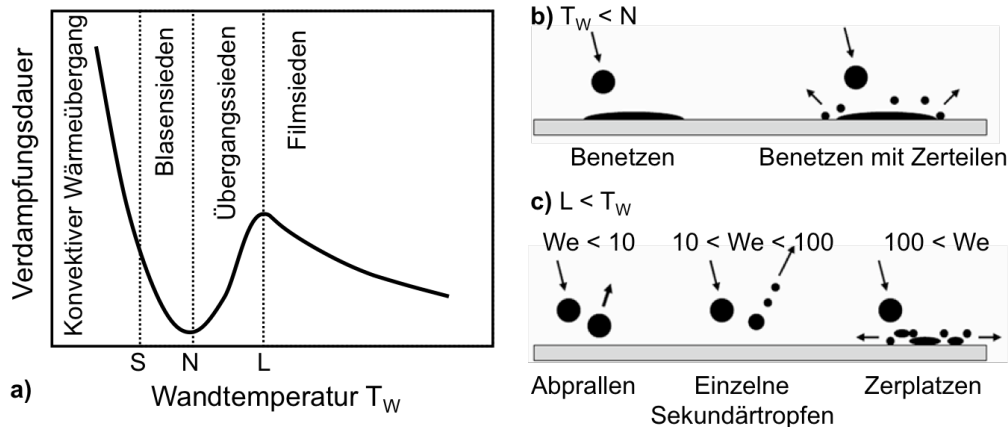


Abbildung 3.34: Verdampfungsprozess:

**a** Verdampfungsdauer von aufgelegten Tröpfchen in Abhängigkeit von der Wandtemperatur  $T_W$ ,  $S$ : Siedetemperatur;  $N$ : Nukiyama-Temperatur;  $L$ : Leidenfrost-Temperatur; Verhalten von auftreffenden Tröpfchen, wenn: **b** die Wandtemperatur  $T_W$  kleiner als die Nukiyama-Temperatur ist, oder **c** die Wandtemperatur  $T_W$  größer als die Leidenfrost-Temperatur ist.

len Geschwindigkeit ist. Es gilt bei Wandtemperaturen oberhalb der Leidenfrost-Temperatur eine so genannte Tropfen-Weber-Zahl  $We$ :

$$We = \frac{\rho_d \cdot v_d \cdot d_d}{\sigma_d} \quad (3.7)$$

$\rho_d$ : Dichte des Tröpfchens,  $v_d$ : axiale Geschwindigkeit des Tröpfchens,  $d_d$ : Durchmesser des Tröpfchens,  $\sigma_d$ : Oberflächenspannung des Tröpfchens

Typische Kollisionsmuster sind Benetzen, Benetzen mit Zerteilen, Abprallen, einzelne Sekundärtropfen und Zerplatzen, siehe Abbildung 3.34.

Die Verwendung von Hexan als Trägermedium für das Schmieröl erzeugt eine Weberzahl  $We > 100$  s/m. Folglich zerplatzt der auftreffende Tropfen auf der Dosierfläche und gelangt dabei in den Gasstrom. Durch die schlagartige Vergrößerung der Oberfläche im Verhältnis zur injizierten Tropfenmenge wird die Verdampfung begünstigt.

Der Verdampfungsprozess findet deshalb in sehr kurzer Zeit  $t \ll 1$  s statt und ist für die schnelle Erzeugung einer definierten Öldampfkonzentration gut geeignet.

### 3.6.3 Verfahren

Die Eigenschaften des Dosierventils sind experimentell untersucht worden. In Versuchsreihen ist ein Kennfeld bestimmt worden, das die Zusammenhänge zwischen Dosiermenge  $m_d$ , Dosierdruck  $p_{VD}$  und Dosierdauer  $t_{DD}$  wiedergibt, siehe Abbildung 3.35. Dabei sind sowohl lineare Verhältnisse zwischen Ventilöffnungszeit und Dosiermasse als auch zwischen Vordruck und Dosiermasse nachgewiesen worden.

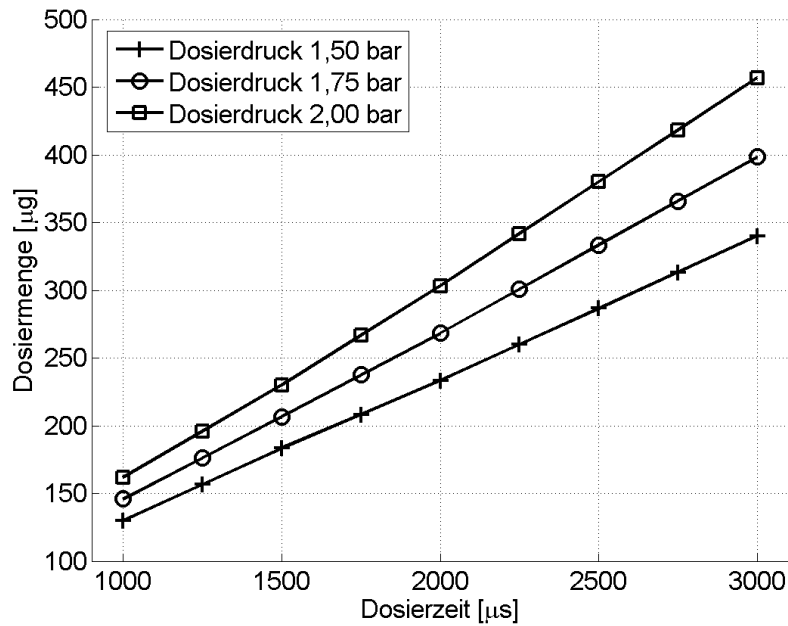


Abbildung 3.35: Dosiermasse in Abhängigkeit von Dosierdauer und Druck

Die Öffnungsdauer und die Pulsfolge des Ventils bestimmen die Öldampfkonzentration  $c_{Oel}$ . Sie können mit einem PC-Programm über einen Mikrocontroller vorgegeben werden. Unter Berücksichtigung des eingestellten Gasflusses  $\dot{m}_{Luft}$ , der Dosierfrequenz  $f_{DF}$  und des Ölgewichtes pro Tröpfchen  $m_d$  ergibt sich eine Konzentration  $c_{Oel,Kalib}$ . Die Umrechnung der  $counts_{Oel}$  in eine Konzentration  $c_{Oel,Mess}$  erfolgt mit der Kalibriergeraden.

Die Betriebsparameter für eine Konzentration von  $c_{Oel,Kalib} = 100$  ppm zeigt Tabelle 3.4. Die Bestimmung der Tröpfchenmasse erfolgt zuvor gravimetrisch [57].

Tabelle 3.4: Parameter für eine Öldampfkonzentration von  $c_{Oel,Kalib} = 100$  ppm

Temperatur Verdampfungsplatte $T_{VP}$	250 °C
Temperatur Luftheizer $T_{Luft}$	250 °C
Luftmassenstrom $\dot{m}_{Luft}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$ kg/min
Ölmassenstrom $\dot{m}_{Oel}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$ kg/min
Dosierdauer $t_{DD}$	0,8 ms
Dosierdauer $f_{DF}$	1 Hz
Vordruck im Tank	2 bar

### 3.6.4 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit wurde anhand einer Konzentrationsfolge von  $c_{Oel,Kalib} = \{0; 10; 0; 20; 0; 30; 0\}$  ppm untersucht, die je dreimal wiederholt wurde. Abbildung 3.36 zeigt die Werte der einzelnen Messungen.

Die integrierten Messwerte der einzelnen Dosisvorgaben sind in Abbildung 3.37 dargestellt. Die Streuung der Einzelwerte wurde über die einfache Standardabweichung  $\sigma$  bestimmt, siehe Tabelle 3.5.

Tabelle 3.5: Mittelwert und Standardabweichung bei 0, 10, 20, 30 ppm

	0 ppm	10 ppm	20 ppm	30 ppm
Mittelwert [counts]	$1,11 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^6$	$1,33 \cdot 10^6$	$1,43 \cdot 10^6$
Standardabweichung [%]	2	12	2	3

Die Kalibriergerade ergibt sich aus der einfachen linearen Regression:

$$counts_{Oel} = a \cdot c_{Oel} + b \quad (3.8)$$

Die Ergebnisse der Regressionsrechnung sind in Tabelle 3.6 aufgeführt. Sie zeigen, dass die Kalibrierung des Messsystems mittels Pikal-Kalibrator mit einer hohen Reproduzierbarkeit durchgeführt werden kann.

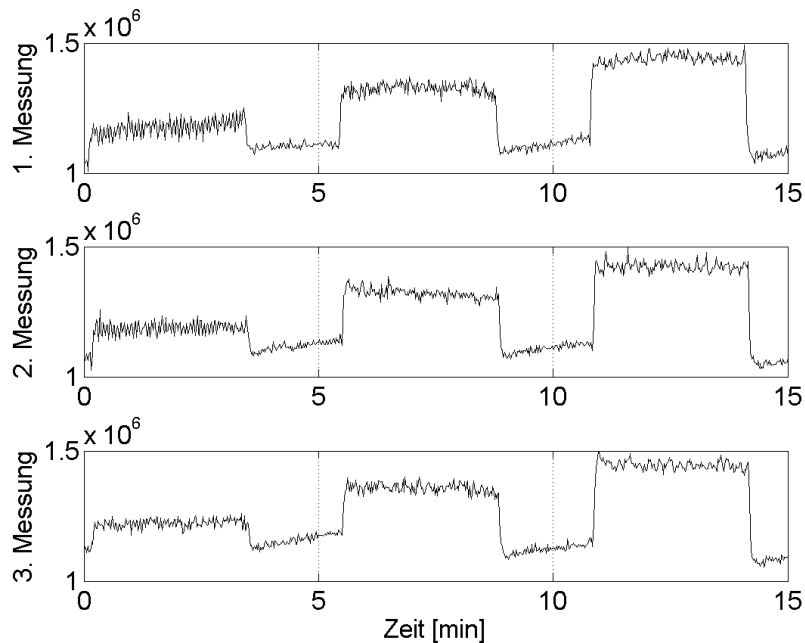


Abbildung 3.36: Kalibrierfolge  $c_{Oel,Kalib} = \{0; 10; 0; 20; 0; 30; 0\}$  ppm.

### 3.6.5 Bestimmung der Öldampfmenge im Brennraum

Zum Abgleich der Messungen mit den Ergebnissen von Ölverbrauchsprogrammen ist die Menge, die während eines Arbeitsspiels in den Brennraum gelangt, absolut zu bestimmen. Unter der Annahme, dass das Gas im Brennraum ideal durchmischt ist, ergibt die Kreisprozessrechnung KPR die im Brennraum enthaltene Luft-Kraftstoff-Masse  $m_{Zyl}(\varphi)$ . Die in den Brennraum pro Grad Kurbelwinkel eingedampfte Ölmenge  $\dot{m}_{Oel,Zyl}(\varphi)$  [mg/°KW] ist die Ableitung des Produktes von Brennraum-Gas-

Tabelle 3.6: Bestimmung der Kalibriergeraden mittels linearer Regression

	$a$	$b$
1. Messung	10938	$1,0948 \cdot 10^6$
2. Messung	10633	$1,0947 \cdot 10^6$
3. Messung	10594	$1,1244 \cdot 10^6$
Mittelwert	10721	$1,1046 \cdot 10^6$
Standardabweichung	1,7 %	1,5 %

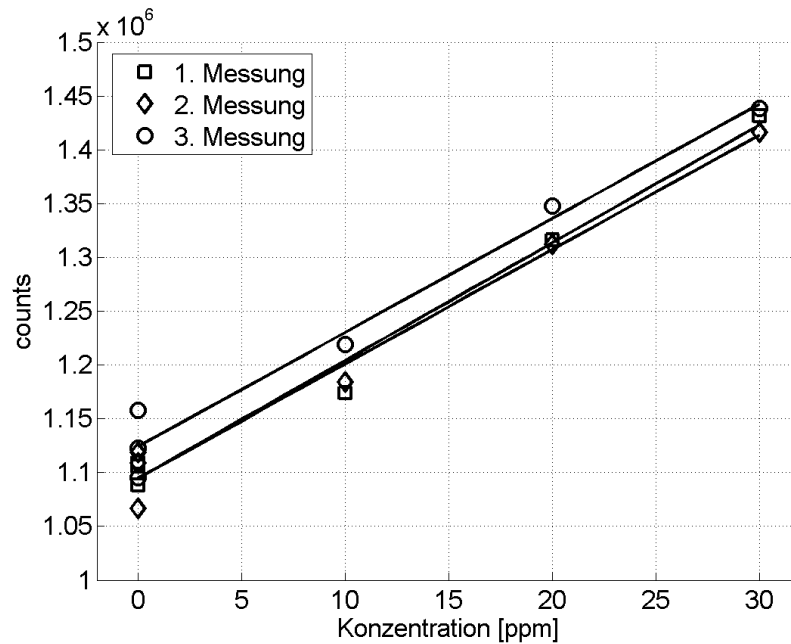


Abbildung 3.37: Kalibriergeraden von drei aufeinander folgenden Messungen

Masse  $m_{Zyl}(\varphi)$  und der gemessenen Ölkonzentration  $c_{Oel}(\varphi)$  [21], siehe Abbildung 3.38.

$$\dot{m}_{Oel,Zyl}(\varphi) = \left( \frac{d}{d\varphi} c_{Oel}(\varphi) \right) \cdot m_{Zyl}(\varphi) + c_{Oel}(\varphi) \cdot \left( \frac{d}{d\varphi} m_{Zyl,Ein}(\varphi) + \frac{d}{d\varphi} m_{Zyl,Aus}(\varphi) \right) \quad (3.9)$$

Die Integration von Gleichung 3.9 bestimmt den Beitrag der einzelnen Takte in Milligramm pro Hub. Abbildung 3.39 zeigt die Auswertung für einen Betriebspunkt. Diese Verläufe sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Ölverbrauchssimulation KOR3D und Pro.

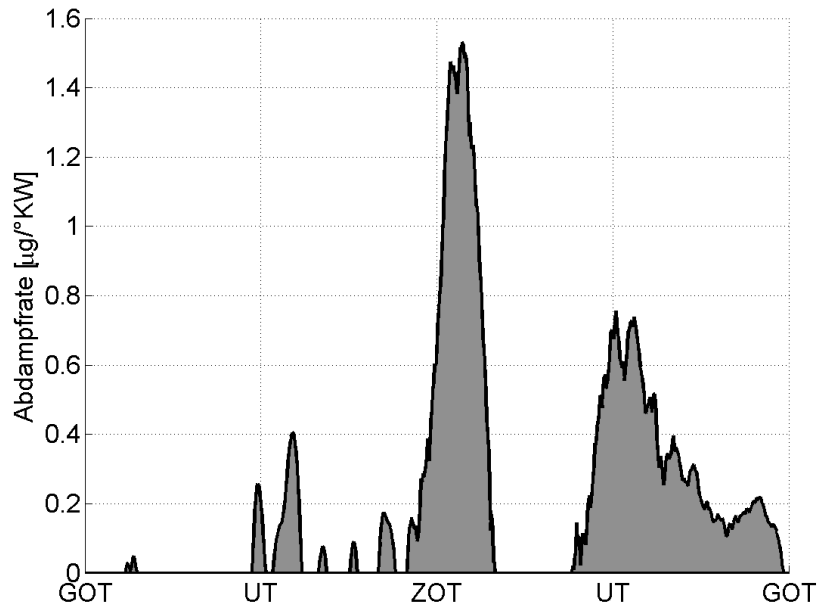


Abbildung 3.38: Abdampfrate des Öls  $\dot{m}_{Oel,Zyl}(\varphi)$  in  $\mu\text{g}/^\circ\text{KW}$ :

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

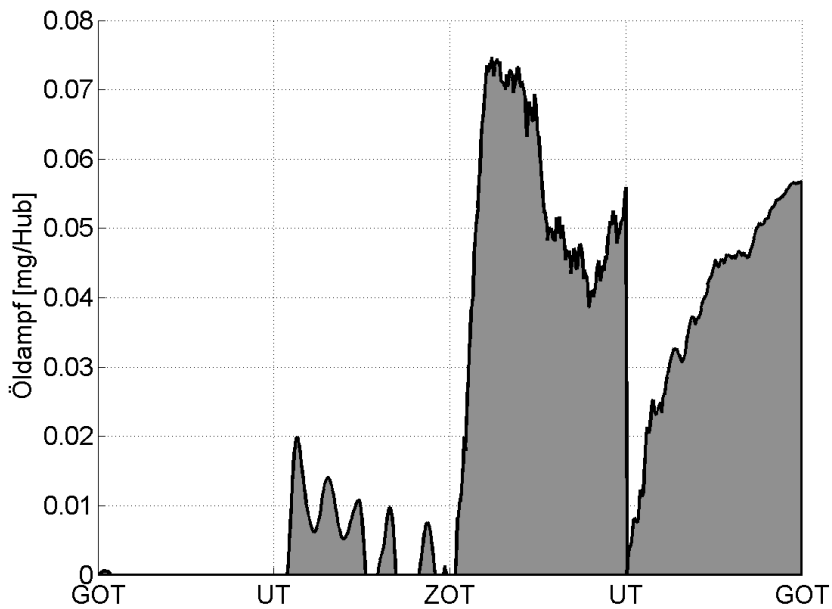


Abbildung 3.39: Eingedampfte Ölmenge  $m_{Oel,Zyl}(\varphi)$  in  $\text{mg}/\text{Hub}$ :

Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

# Kapitel 4

## Messergebnisse

Die Untersuchungen zur Ölemission gliedern sich in zwei Teilbereiche. Das dynamische Abdampfverhalten von dünnen Ölschichten bei brennraumähnlichen Bedingungen ist in Laborversuchen untersucht worden. Es sind hierbei weitere Hinweise zum Ölverbrauchsmechanismus der Kraftstoff-Öl-Interaktion gesammelt worden, der mit dem Versuchsmotor nicht dargestellt werden konnte (Kap 4.1). Anschließend werden Messungen der Ölverdampfung im Brennraum nach einer kurzen Beschreibung des Versuchsmotors im zweiten Teil dargestellt. Die Einflüsse von Last- und Drehzahl-Variationen sind im Motorkennfeld untersucht worden. Diese werden mit Messungen im Abgaskrümmen des gleichen Zylinders sowie Ergebnissen der Ölverbrauchssimulation verglichen (Kap 4.2).

### 4.1 Grundlagenuntersuchungen zum Abdampfverhalten dünner Schichten

Für den Verdampfungsprozess im Brennraum von Motoren gelten zwei besondere Bedingungen. Zum einen ist die Zeit  $t$ , in der die Energie in den Ölfilm eingetragen wird, sehr kurz. Sie liegt im Bereich weniger Millisekunden. Zum anderen werden typischerweise nur wenige Molekülschichten pro Arbeitsspiel abgedampft, wie die folgende Überschlagsrechnung für einen 4-Zylinder Motor zeigt:

Drehzahl:	$n = 6000 \text{ min}^{-1}$
Ölverbrauch des Motors:	$\dot{m}_{Oel} = 60 \text{ g/h} = 1 \text{ g/min}$
Dichte des Öls:	$\rho_{Oel} = 0,85 \text{ g/cm}^3$
Zylinderdurchmesser:	$d_{Zyl} = 80 \text{ mm}$
Kolbenhub:	$h_{Kolben} = 100 \text{ mm}$
Ölverbrauch pro Arbeitsspiel pro Zylinder:	

$$m_{Oel} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1 \frac{\text{g}}{\text{min}}}{3000 \frac{720^\circ}{\text{min}}} = 0,08\bar{3} \frac{\text{mg}}{720^\circ} \quad (4.1)$$

$$V_{Oel/720^\circ} = \frac{m_{Oel}}{\rho_{Oel}} = 98 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \quad (4.2)$$

Zylinder Lauffläche:

$$A = \pi \cdot d_{Zyl} \cdot h_{Kolben} = 251,33 \text{ cm}^2 \quad (4.3)$$

Abgedampfte Schichtdicke:

$$x = \frac{V_{Oel/720^\circ}}{A} = 3,90 \text{ nm} \quad (4.4)$$

Bei einem Moleküldurchmesser von  $0,3 \text{ nm} > \sigma > 1 \text{ nm}$  würden pro Arbeitsspiel zwischen 4 und 13 Molekülschichten bei einer vollständig freigelegten Lauffläche verdampfen. Die Kolbenbewegung reduziert die mittlere Fläche während eines Arbeitsspiels auf die Hälfte, dementsprechend würden zwischen 8 und 26 Schichten verdampfen.

Der Verdampfungsverlust ist von der Ölzusammensetzung abhängig und wird bisher mit genormten Verfahren bestimmt. Zum Einsatz kommt entweder das Verfahren nach Noack [59] oder ein gaschromatographisches Verfahren [60].

Bei der Bestimmung des Verdampfungsverlustes nach Noack wird die Ölprobe der Menge  $M_1 = (65 \pm 1) \text{ g}$  für die Dauer von  $t = 1 \text{ h}$  in einem Verdampfungstiegel  $d = 52 \text{ mm}$  einer Temperatur von  $T = 250^\circ \text{C}$  ausgesetzt. In dem Gasraum oberhalb der Probenoberfläche wird mit einer Vakuumpumpe und einem Entlüftungsventil ein Unterdruck von  $p = 196 \text{ Pa}$  eingestellt. Die Masse der Probe  $M_2$  wird nach Ablauf der Zeit mit einer Waage bestimmt. Der Verdampfungsverlust  $w(V)$  der Probe wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$w(V) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (4.5)$$

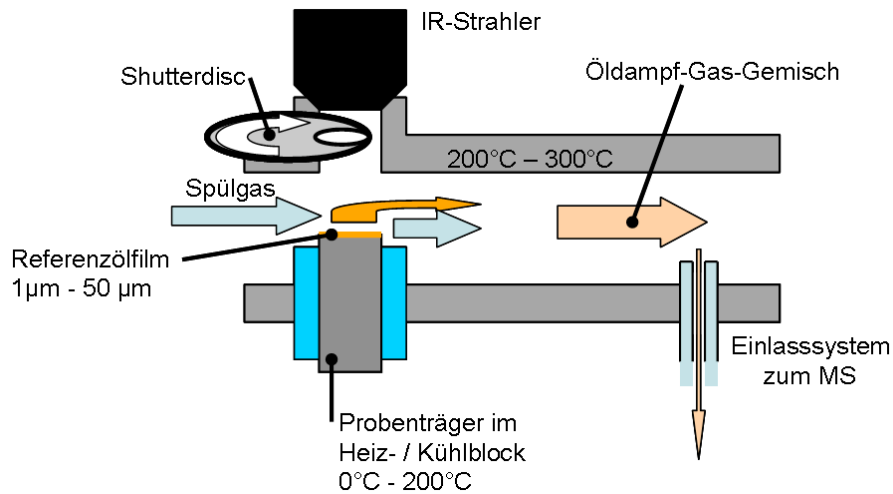


Abbildung 4.1: Apparat zur dynamischen Verdampfung dünner Schichten:

Der Spülgasstrom strömt über den Probenträger, auf dem zuvor eine wenige Mikrometer dicke Ölschicht aufgebracht wurde. Der Energieeintrag geschieht mittels Belichtung durch eine IR-Quelle. Das Öldampf-Gas-Gemisch wird dem MS zugeführt.

Bei typischen Noackwerten für Schmieröl  $6\% < w(V) < 15\%$  wird eine Schichtdicke von etwa  $7\text{ nm} < x < 18\text{ nm}$  verdampft. Dies entspricht je nach Moleküldurchmesser zwischen  $6 \cdot 10^6$  und  $60 \cdot 10^6$  Molekülschichten.

Die Randbedingungen des Abdampfprozesses im Brennraum weisen hinsichtlich Ablaufzeit und verdampfter Schichtdicke große Unterschiede zum Verfahren nach Noack auf, bei dem die verschiedenen Moleküle unter Beibehaltung des thermischen Gleichgewichtes ihrem Dampfdruck entsprechend ausdampfen. Es stellt sich die Frage, inwiefern das Abdampfen von dünnen Ölschichten im Brennraum mit dem durch Noack bestimmten Verdampfungsverlust beschrieben werden kann.

Deshalb ist eine Apparatur (Abbildung 4.1) entwickelt worden, mit der das Abdampfverhalten von dünnen Ölschichten mit dem Massenspektrometer untersucht werden kann. In der Verdampfungskammer wird ein Probenträger eingelegt, auf dem zuvor die Probe in Form eines wenige Mikrometer dicken Filmes durch ein Rotationsbeschichtungsverfahren aufgebracht wurde. Befestigt wird der Träger in einem Block, dessen Temperatur im Bereich  $20^\circ\text{C} < T_{Block} < 200^\circ\text{C}$  vorgegeben werden kann. Ein variabel einstellbarer Spülgasvolumenstrom mit der Temperatur  $T$  führt

das Öldampf-Gas-Gemisch zum Einlasssystem des Massenspektrometers [61, 62].

Der Energieeintrag erfolgt durch eine Infrarotquelle, welcher die Probe durch eine Shutterdisc, moduliert mit  $3 \text{ ms} < t < 250 \text{ ms}$ , beleuchtet. Die Quelle erreicht auf dem Fokaldurchmesser von  $d_{Fokal} = 6,4 \text{ mm}$  eine spezifische Flächenleistung von  $P_{Flaeche} = 170 \text{ W/cm}^2$  bei einem durch das Strahlungsgesetz bestimmten breitbandigen Emissionsspektrum mit einer Peakwellenlänge von  $\lambda = 1,1 \text{ }\mu\text{m}$ .

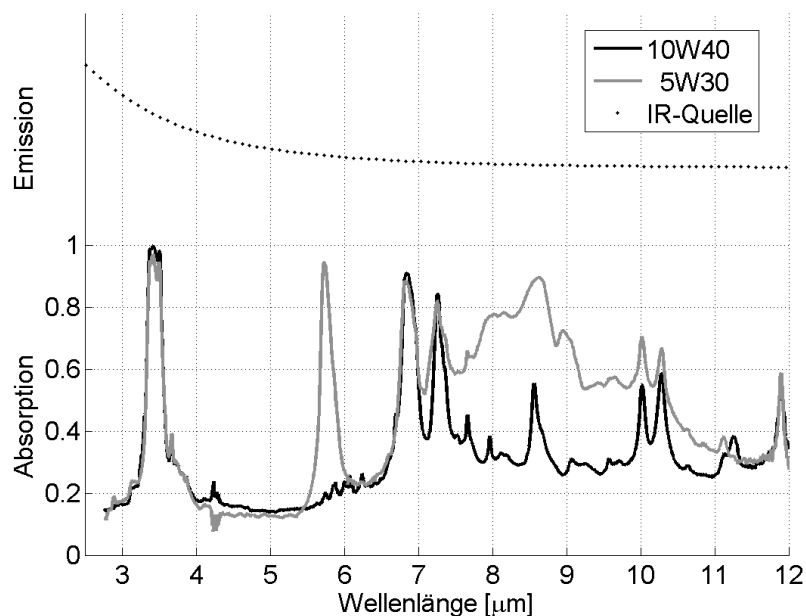


Abbildung 4.2: Absorptionsspektren von Schmieröl:

Mineralöl: 10W40 und synthetisches Öl: 5W30 Qualitativer Verlauf des Emissionsspektrums der IR-Quelle.

Das Absorptionsspektrum von Schmieröl, gemessen mit einem Infrarotabsorptionsspektrometer, ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Das Mineralöl 10W40 unterscheidet sich im Wellenlängenbereich  $7 \text{ }\mu\text{m} < \lambda < 11 \text{ }\mu\text{m}$  von dem synthetischen Öl 5W30. Die höhere Absorption des 5W30 lässt sich anhand der enthaltenen, ungesättigten Kohlenwasserstoffe (Alkene bzw. Polyalphaolefine) erklären.

Die Abbildung zeigt, dass die unterschiedlichen Ölproben mit der verwendeten IR-Quelle auf einem breiten Spektrum angeregt werden. Die Quelle wird zusammen mit

der Shutterdisc genutzt, da auf diese Weise ein schneller, intensiver Energieeintrag in Ölproben sichergestellt werden kann. Die Flächenleistung und Prozesszeit gleichen den Bedingungen im Brennraum.

Um vergleichbare Verhältnisse im Hinblick auf die verwendete Ölfilmstärke zu erzeugen, wird die Schichtstärke in einem Rotationsbeschichtungsverfahren eingestellt. Die Ölprobe wird auf den Probenträger aufgetragen und danach in eine Konditionierungskammer eingelegt.

Die Schichtdicke wird mit einem mikrocontrollergesteuerten Ablauf nach einer Konditionierungsphase durch die Rotation des Probenträgers mit  $10 \text{ Hz} < f_{PT} < 200 \text{ Hz}$  generiert. Abbildung 4.3 stellt die gravimetrisch bestimmte Schichtdicke  $x$  als Funktion der Drehfrequenz  $f_{PT}$  dar. Das Beschichtungsverfahren ermöglicht es, Schichtdicken im Bereich  $1 \mu\text{m} < x < 20 \mu\text{m}$  herzustellen. Insbesondere bei geringen Filmdicken ist das Verfahren zur Probenvorbereitung sehr präzise.

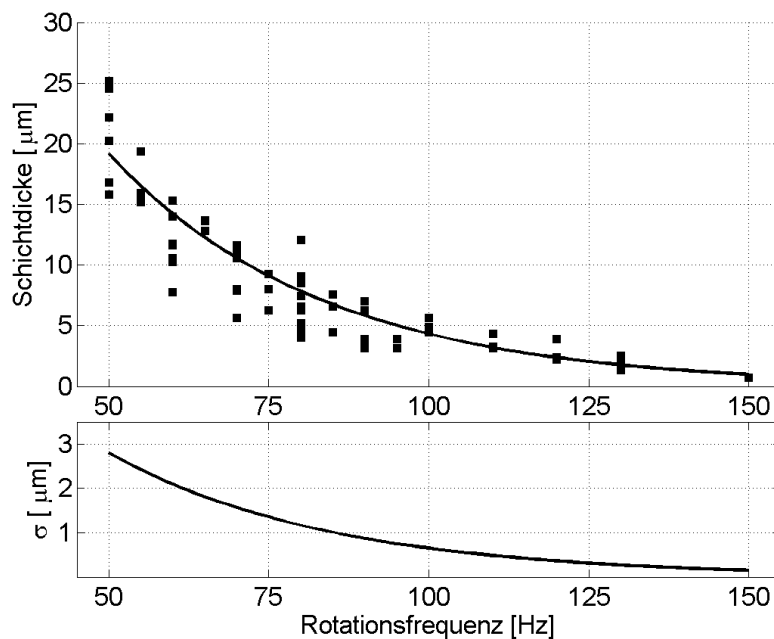


Abbildung 4.3: Schichtdicke  $x$  als Funktion der Rotationsfrequenz  $f_{PT}$ : Mittelwert und Standardabweichung  $\sigma$ .

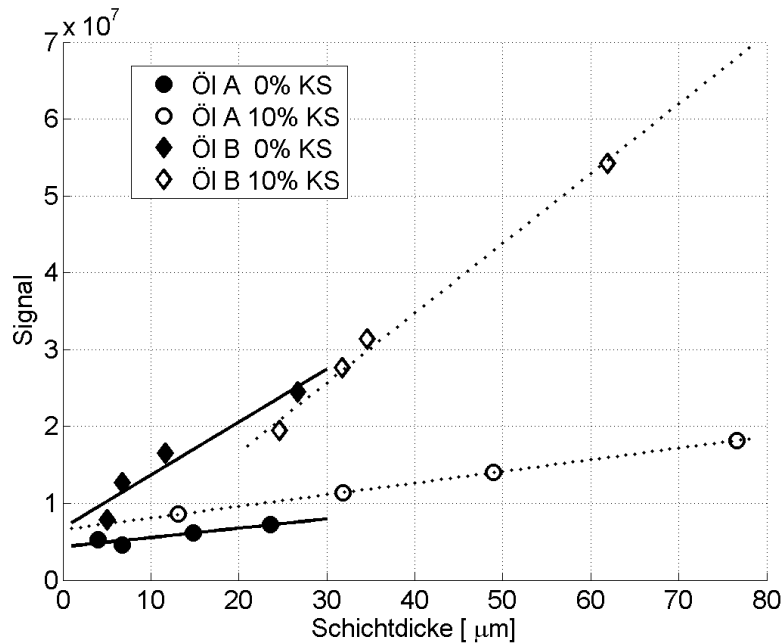


Abbildung 4.4: Öldampfsignal in Abhängigkeit der Schichtdicke  $x$ .

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Abdampfverhaltens dünner Schichten lassen zwei Erkenntnisse zu (Abbildung 4.4):

1. Die abgedampfte Ölmenge ist abhängig von der aufgetragenen Schichtdicke  $x$ .
2. Mit Isooktan-Kraftstoff verdünnte Proben besitzen ein verändertes Abdampfverhalten.

Der Vergleich der Prozessparameter in Tabelle 4.1 weist zunächst bezüglich der Ablaufzeit auf eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem Verfahren nach Noack und der Ölverdampfung im Brennraum hin. Aufgrund der Laufzeit des Experimentes nach Noack ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Großteil der enthaltenen Stoffe an der Oberfläche ihrem Dampfdruck entsprechend ausdampfen, sehr hoch. Es kommt in diesem Fall zu einer Entmischung der Probe, die durch die molekulare Beweglichkeit und die lange Laufzeit begünstigt wird. Im idealen Fall einer Öl-Kraftstoff-Mischung wird bei einer entsprechenden Temperatur der Kraftstoff komplett ausgedampft, während das enthaltene Öl im Probenbehälter nicht durch Verdampfung verloren geht.

Tabelle 4.1: Vergleich der Prozessparameter

	Noack	Dyn. Ölverdampfung	Brennraum
Flächenleistung	$\ll 100 \text{ W/cm}^2$	$\approx 170 \text{ W/cm}^2$	$\approx 10000 \text{ W/cm}^2$
Energieeintragszeit	$3,6 \cdot 10^6 \text{ ms}$	$3 \text{ ms} < t_{EE} < 250 \text{ ms}$	$5 \text{ ms} < t_{EE} < 60 \text{ ms}$
Abgedampfte Schichtdicke	$10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$\ll 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$10 \cdot 10^{-9} \text{ m}$
Abgedampfte Molekülschichten	$10 \cdot 10^6$	$\ll 1000$	10

Bei einer mit Kraftstoff verdünnten Ölprobe wird eine höhere Abdampfneigung des Öls gemessen. Die Zeit, in der die Energie dem Ölfilm zugeführt wird, ist um den Faktor  $10^6$  kürzer als im oben beschriebenen Beispiel. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit zur vollständigen, dem Dampfdruck entsprechenden Entmischung der Probe, wie es bei dem Verfahren nach Noack der Fall ist, als sehr viel geringer einzuschätzen.

Die abgedampfte Schichtdicke ist in diesem Prozess ebenfalls um den Faktor  $10^6$  dünner. Eine Betrachtung auf molekularer Ebene legt viel mehr die Vermutung nahe, dass es bei den auftretenden kurzen und intensiven Energieeinträgen zum vollständigen Ablösen der Molekülschichten kommt. Getrieben durch die höhere Beweglichkeit der Kraftstoffmoleküle, werden die Moleküle des Öls mit in die Gasphase gerissen und können dort gemessen werden.

## 4.2 Motorische Untersuchungen

### 4.2.1 Versuchsträger

Die motorischen Untersuchungen sind an einem Vierzylinder-Ottomotor (Hersteller: Volkswagen) durchgeführt worden [21], in der Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Kennwerte dargestellt.

Tabelle 4.2: Kenndaten des Versuchsträgers

Hubraum	1968 cm <sup>3</sup>
Bohrung	81,0 mm
Hubraum	1968 cm <sup>3</sup>
Hub	95,5 mm
Nennleistung	62 kW bei 4300 min <sup>-1</sup>
max. Moment	159 Nm bei 2200 min <sup>-1</sup>
Betrieb	$\lambda = 1$ geregelt

Abbildung 4.5 gibt eine schematische Übersicht über den Prüfstands Aufbau und die installierte Messtechnik. Das Blow-by-Gas aus dem Kurbelgehäuse wird nicht wie sonst üblich in den Ansaugpfad zurück, sondern mit einer Leitung ins Freie geführt.

Die Automatisierung des Prüfstandes ermöglichte es, die Drehzahl  $n$ , das Drehmoment  $M$  und die Kühlwassertemperatur  $T_{KW}$  des Motors im stationären Betrieb auf vorgebbare Sollwerte zu regeln. Alle Messwerte der dargestellten Sensoren werden während der Messung zentral auf einem Steuer-PC gespeichert.

Die Untersuchungen sind am Zylinder 1 durchgeführt worden. Der Brennraumdruck wird mit einer Indizierzündkerze kurbelwinkelaufgelöst gemessen.

Abbildung 4.6 zeigt den Ort der Brennraum-Probenahme, der sich zwischen dem Einlassventil und der Zündkerze im Zylinder 1 befindet. Das Abgas wird über eine getrennte Leitung zu einer Absauganlage geführt, damit wird eine Querbeeinflussung durch die Nachbarzylinder im Abgasstrang vermeiden.

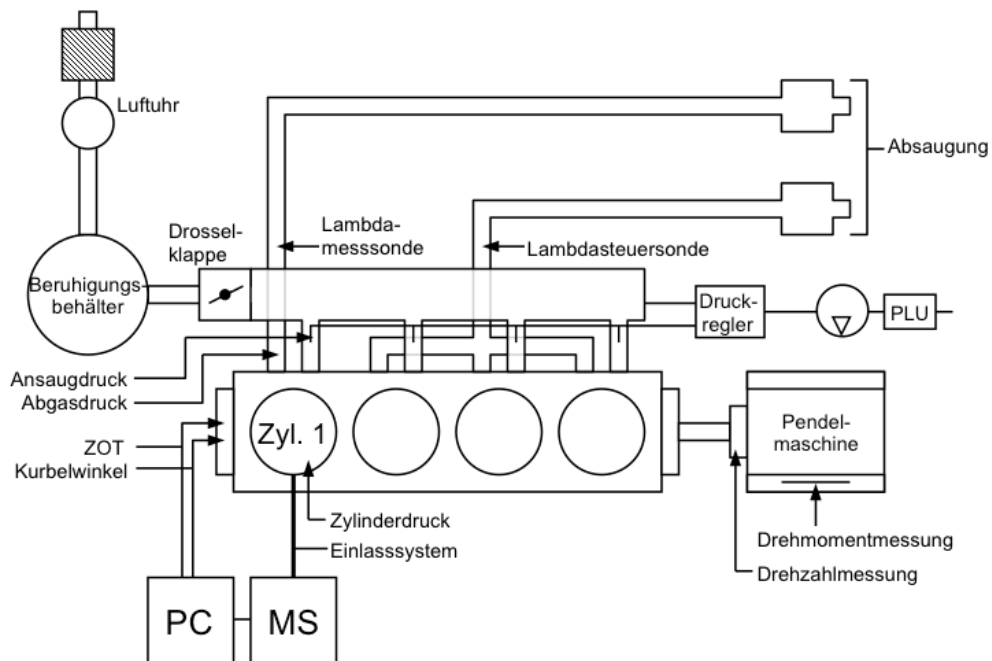


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Motorenprüfstandes

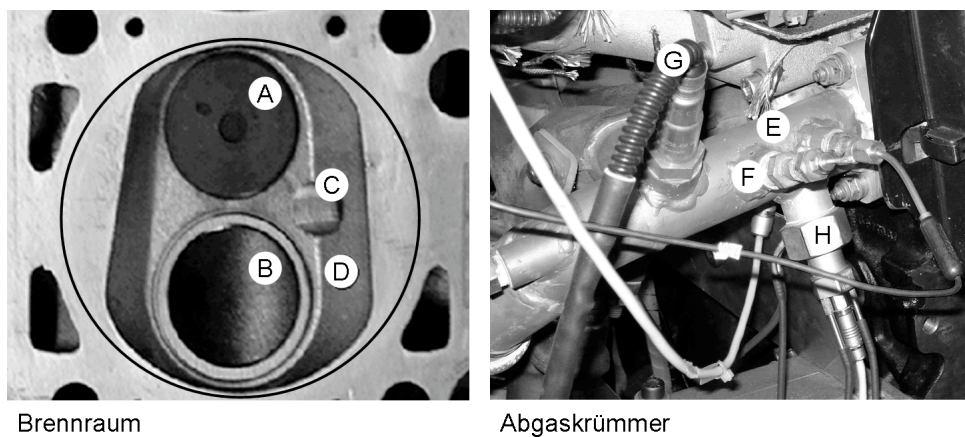


Abbildung 4.6: Probenahmeposition am Zylinder 1 des Versuchsmotors:

Brennraum: **A** Auslassventil, **B** Einlassventil, **C** Zündkerze, **D** Probenahme MS;

Abgaskrümmen: **E** Krümmen des Zylinder 1, **F** Probenahme MS, **G** Lambdasonde, **H** Drucksensor.

## 4.2.2 Messungen im Brennraum

Die Gaszusammensetzung im Brennraum des Zylinders 1 ist mit dem Messsystem und dem SD4D durchgeführt worden. In Abbildung 4.7 sind Sauerstoff  $O_2$ , Toluol  $C_7H_8$ , Kohlendioxid  $CO_2$  und die Ölkonzentration qualitativ dargestellt. Die Transferzeitkorrektur wurde, wie im Kap. 3.5 beschrieben, auf die Messdaten angewendet.

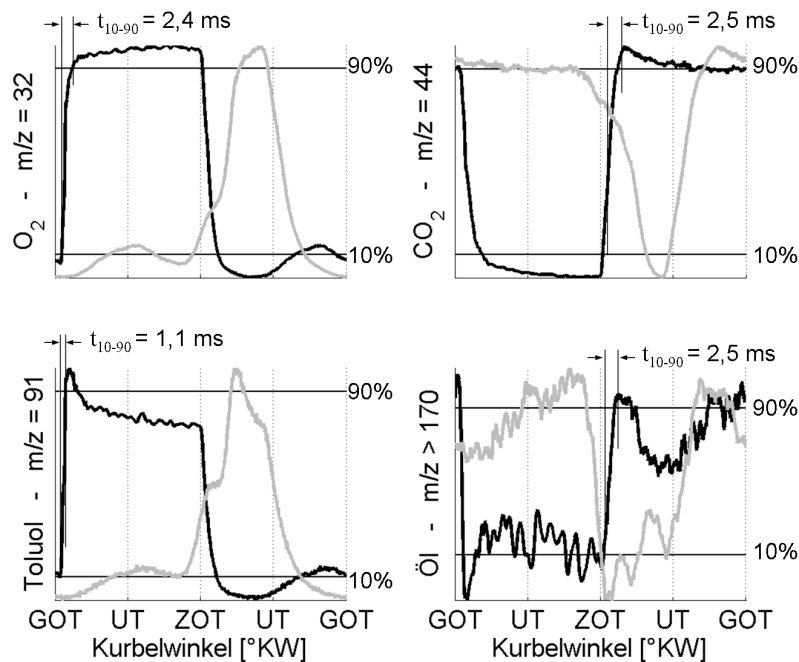


Abbildung 4.7: Messergebnisse von Sauerstoff, Kohlendioxid, Toluol und Öl:  
 Grau: ohne Transferzeitkorrektur, Schwarz: mit Transferzeitkorrektur, Betriebspunkt:  
 $T_{KW} = 90^\circ C$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$ .

Die gemessenen Konzentrationen der Komponenten Sauerstoff, Toluol und Kohlendioxid zeigen den Arbeitstakten entsprechend plausible Signalverläufe. Das Sauerstoffsignal weist zu Beginn der Ansaugphase bei GOT einen niedrigen Wert auf. Das hier detektierte Restgas aus dem Kompressionsvolumen stammt aus dem vorherigen Arbeitsspiel. Durch die Abwärtsbewegung des Kolbens wird frisches Luft-Kraftstoff-Gemisch über das Einlassventil angesaugt. Das hat einen Anstieg der Sauerstoffkonzentration zur Folge. Die einsetzende Verbrennung bei ZOT reduziert die Sauerstoffkonzentration, da eine Reaktion mit den Kohlenwasserstoffen des Kraftstoffes  $C_n H_{2n+2}$  und zu  $H_2O$  und  $CO_2$  stattfindet. Die folgende Reaktionsgleichung für

gesättigte Kohlenwasserstoffe beschreibt diese Umsetzung nach stöchiometrischen Gesetzmäßigkeiten:

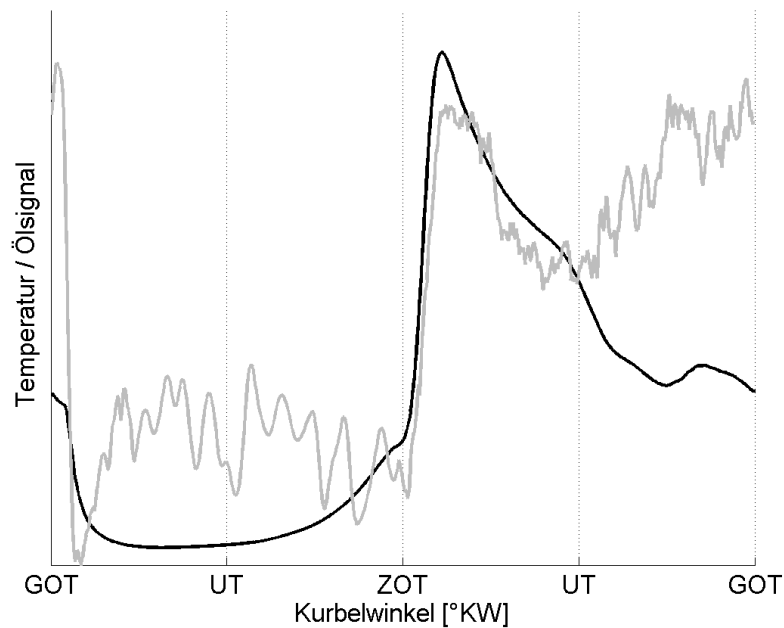
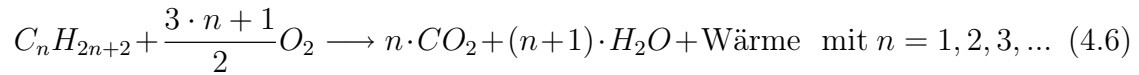


Abbildung 4.8: Brennraumtemperatur aus Kreisprozessrechnung KPR:  
Betriebspunkt:  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ ;  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ;  $M = 145 \text{ Nm}$  Grau: Ölsignal.

Toluol ist ein aromatisches Kohlenwasserstoffmolekül, das typischerweise aus dem Kraftstoff stammt. Es weist ein mit dem Sauerstoff vergleichbares Verhalten auf. Die leichte Überhöhung direkt nach GOT, die im Sauerstoffsignal nicht enthalten ist, könnte auf eine Inhomogenität während der Gemischbildung hinweisen.

Das Verbrennungsprodukt Kohlendioxid zeigt ein plausibles, gegenläufiges Verhalten. Das im Kompressionsvolumen enthaltene  $CO_2$ -Restgas wird durch das einströmende Luft-Kraftstoff-Gemisch verdünnt und sinkt im Verlauf der Kompressionsphase auf ein Minimum. Mit einsetzender Verbrennung bei ZOT ist ein steiler Signalanstieg zu beobachten. Das Signal stabilisiert sich auf einem hohen Niveau während der Verbrennungs- und Ausschleppphase.

Das Öl-Signal weist im Restgas des Kompressionsvolumens bei GOT ebenfalls eine hohe Konzentration auf. Der deutlichste Signalanstieg wird durch die auf die Zündung folgende Verbrennung generiert. Im 3. Takt korreliert der Signalverlauf stark mit dem der Brennraumtemperatur, siehe Abbildung 4.8. Während der Ausschlebe- phase im 4. Takt herrschen im Zylinder bezüglich Druck und Temperatur vergleichs- weise stabile Bedingungen. Die Ölkonzentration steigt während dieser Phase stetig auf ein Maximum an.

### 4.2.3 Betriebspunktvariation

Mit dem beschriebenen Messsystem lässt sich der Einfluss von Last- und Drehzahl auf die Ölverdampfung im Brennraum untersuchen, siehe Abbildung 4.9. Nach einer Betriebspunktstabilisierungsphase von jeweils  $t = 5$  min wurde die Messung durch- geführt.

Bei allen Drehzahlen zeigt die Lastvariation mit zunehmendem Drehmoment einen signifikanten Anstieg der in den Zylinder eingedampften Ölmenge pro Ar- beitspiel. Der größte Beitrag zur Ölemission wurde in der Expansions- (3. Takt) und Ausschubphase (4. Takt) des Arbeitsspiels detektiert.

Die Ergebnisse aus der Brennraummessung ermöglichen die Berechnung von ab- soluten Ölemissionswerten in Gramm pro Stunde für den gesamten Motor. In einem Motorkennfeld sind die Werte über Drehzahl und Drehmoment in Form von Höhen- linien eingetragen. Abbildung 4.10 zeigt die Beiträge der einzelnen Arbeitstakte an der Ölemission in einer Kennfelddarstellung.

$$\dot{m}_{Oel, Motor} \left[ \frac{g}{h} \right] = 4 [Zyl] \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{720^\circ}{360^\circ} \right] \cdot 60 \left[ \frac{min}{h} \right] \cdot n \left[ \frac{360^\circ}{min} \right] \cdot \int_{0^\circ}^{720^\circ} \frac{d}{d\varphi} m_{Oel, Zyl}(\varphi) d\varphi \left[ \frac{g}{720^\circ \cdot Zyl} \right] \quad (4.7)$$

Es wird deutlich, dass während der Ansaugphase im 1. Takt kein Schmieröl detektiert wird. In dieser Phase findet aufgrund der niedrigen Temperaturen des angesaugten Gemis- ches zu geringes Abdampfen statt. Während der Verdichtungsphase werden insbesondere bei steigenden Drehzahlen leicht erhöhte Ölemissionen gemessen. Der wesentliche Beitrag entsteht jedoch während der Takte 3 und 4, in denen die Brennraumtemperaturen am höchsten sind. Die Summe der Ölverdampfung der einzelnen Takte ergibt ein Kennfeld, das die Ölemission des Motors repräsentiert, siehe Abbildung 4.11.

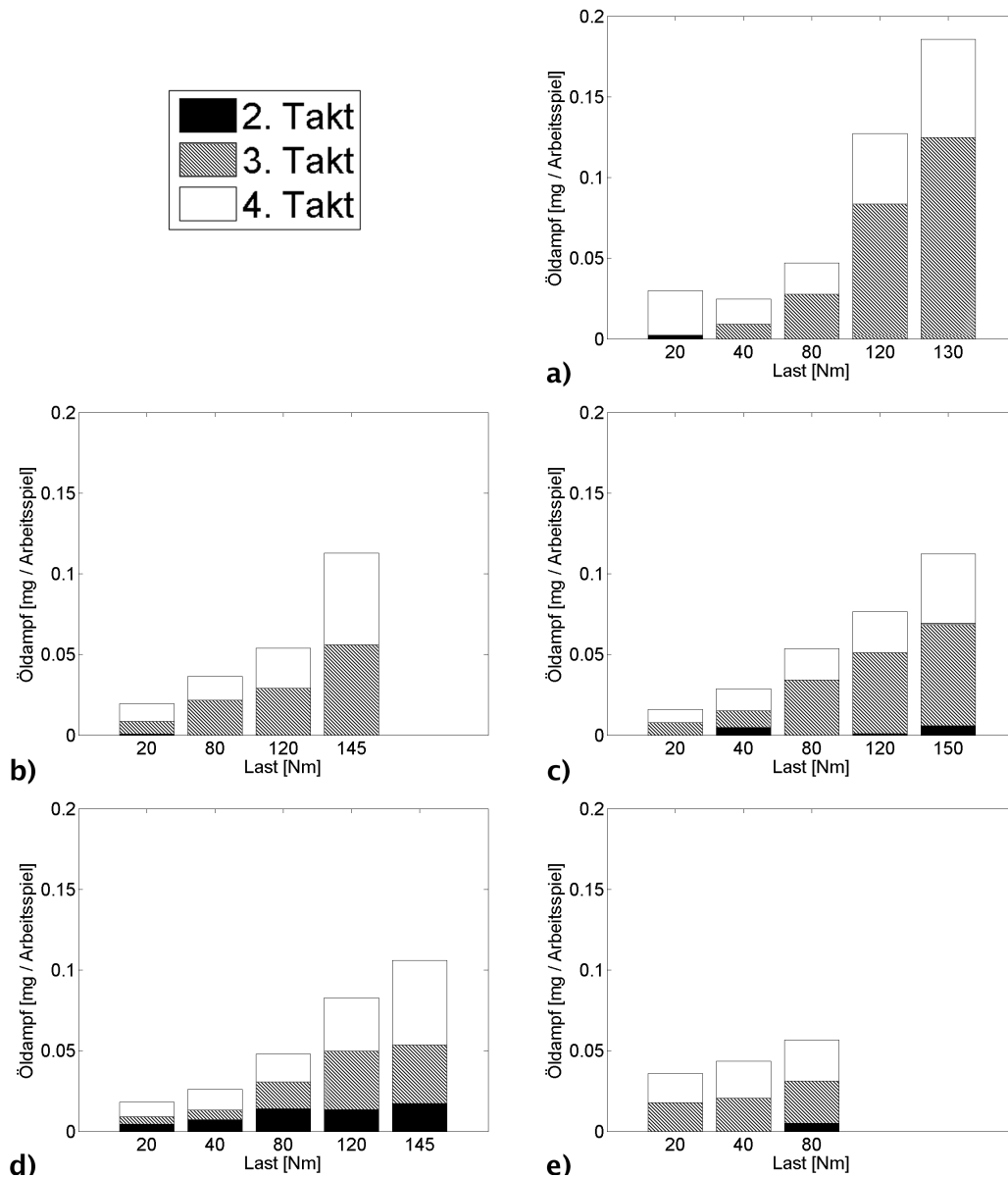


Abbildung 4.9: Last- und Drehzahlvariation:

Im 1. Takt wurde keine Zunahme der Ölkonzentration gemessen.

**a** Drehzahl  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ , **b** Drehzahl  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ , **c** Drehzahl  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ ,

**d** Drehzahl  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ , **e** Drehzahl  $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ .

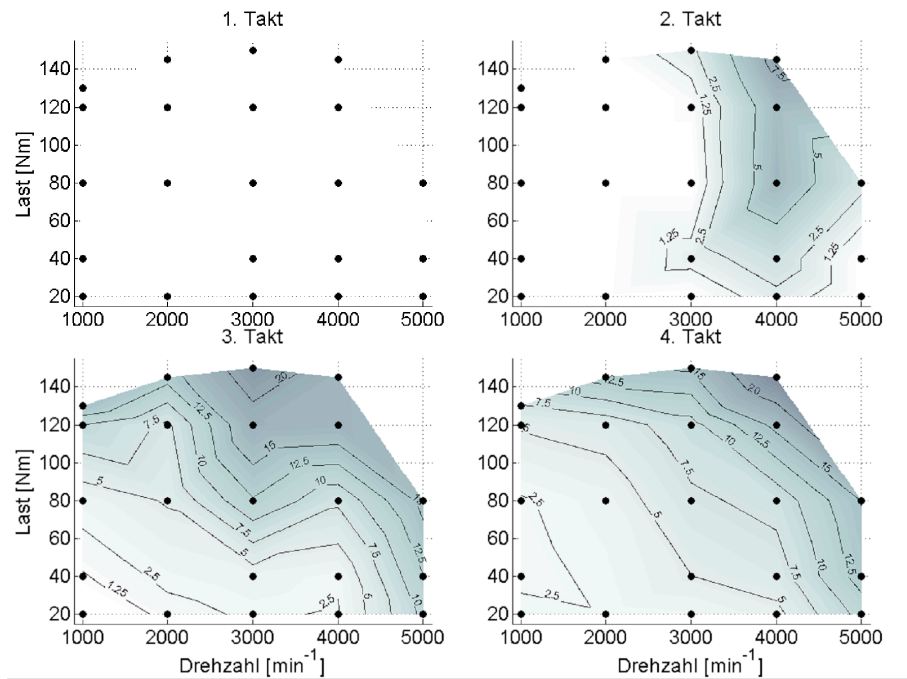


Abbildung 4.10: Beitrag der Arbeitstakte zur Gesamtölemission

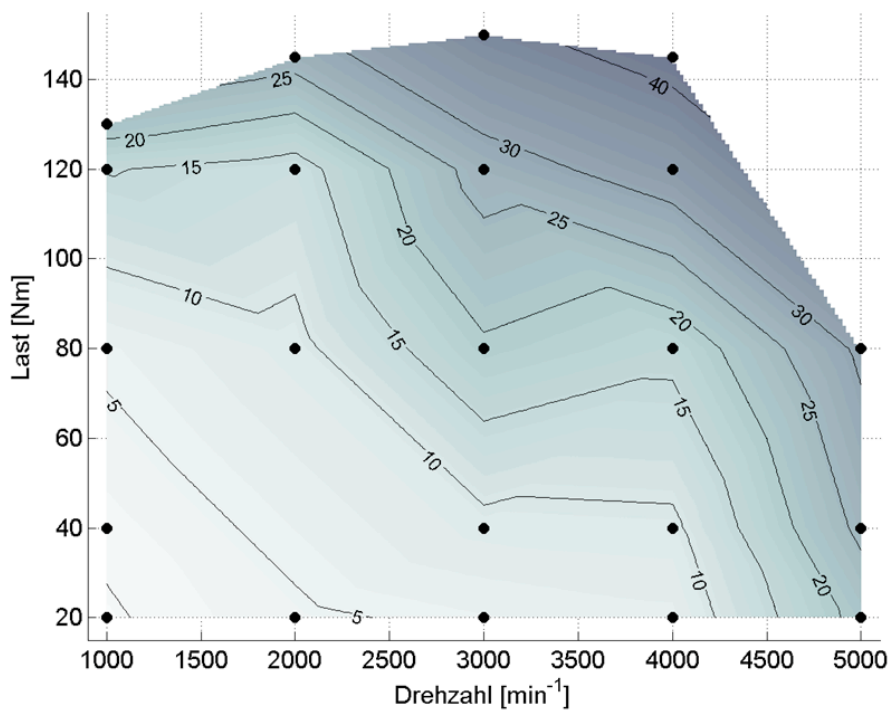


Abbildung 4.11: Gesamtkennfeld der verdampften Ölmenge pro Stunde

#### 4.2.4 Vergleich von Brennraum- und Abgaskrümmersmessung

Die Gegenüberstellung der integralen Werte über den Signalverlauf  $0^\circ \leq \varphi \leq 720^\circ$  mit den Ergebnissen aus der Abgaskrümmersuntersuchung des gleichen Zylinders werden in Abbildung 4.12 dargestellt. Qualitativ gleichen sich die Kennfelder. Im mittleren Bereich liegen die Inzylinderwerte über den entsprechenden Werten der Messungen im Abgaskrümmers, vgl.  $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ .

Insgesamt ergibt das Kennfeld der Brennraummessung eine etwas höhere Drehzahlabhängigkeit, vgl.  $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ . In diesem Bereich sind die absoluten Werte höher als bei den Krümmersmessungen. Der Betriebspunkt mit der höchsten spezifischen Ölemission bei der Krümmersmessung liegt bei  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ ,  $M = 130 \text{ Nm}$ . Auch die Inzylindermessung hat in diesem Punkt eine relativ zur abgegebenen Leistung hohe Öldampfmenge nachgewiesen.

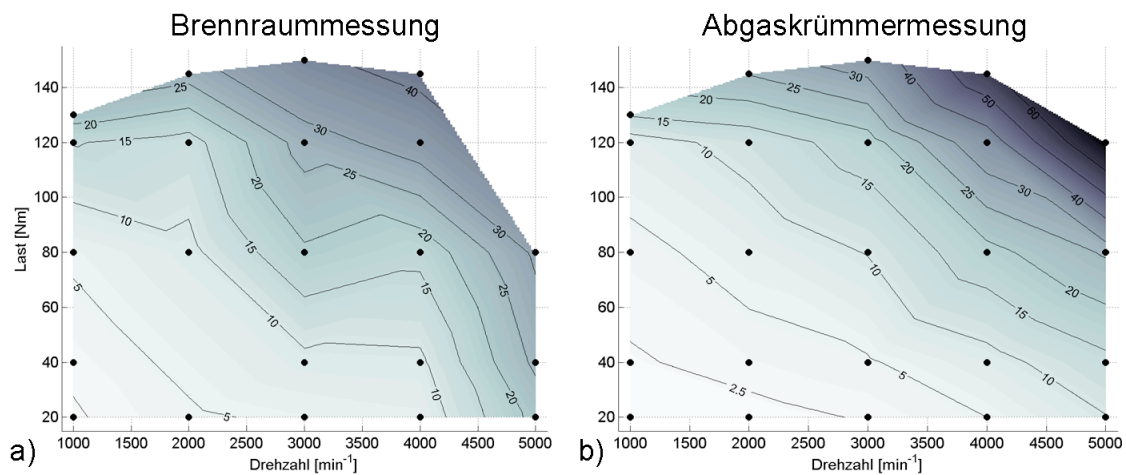


Abbildung 4.12: Vergleich Brennraum- zu Abgaskrümmersmessung:

**a** Kennfeld aus Brennraummessung, Zylinder 1, **b** Kennfeld aus Abgaskrümmersmessung, Zylinder 1.

Die Unterschiede in den absoluten Werten der beiden Kennfelder können daraus resultieren, dass die Probe bei der Abgaskrümmersmessung insgesamt besser durchmischt ist. Bei der Messung im Brennraum wird nur eine kleine Gasprobe, die ca.

3% der Gesamtmenge entspricht, entnommen und analysiert. Je nach Homogenität der Mischung werden die Verhältnisse im Brennraum dadurch gut repräsentiert.

#### 4.2.5 Vergleich der Brennraummessung mit der Simulation

Der Einfluss der Kühlwassertemperatur  $T_{KW}$  auf den Ölverbrauch ist mit dem Simulationsprogramm PRO untersucht worden [48]. Die Randbedingungen des Versuchsträgers und der Betriebsstoffe wurden in das Modell integriert. Dazu gehören Zylinderverzugsmessungen des Kurbelgehäuses, Kolben und Kolbenringgeometrie sowie die jeweiligen Werkstoffeigenschaften. Die kurbelwinkelabhängigen Druck- und Temperaturverläufe im Brennraum stammen von einer Kreisprozessberechnung.

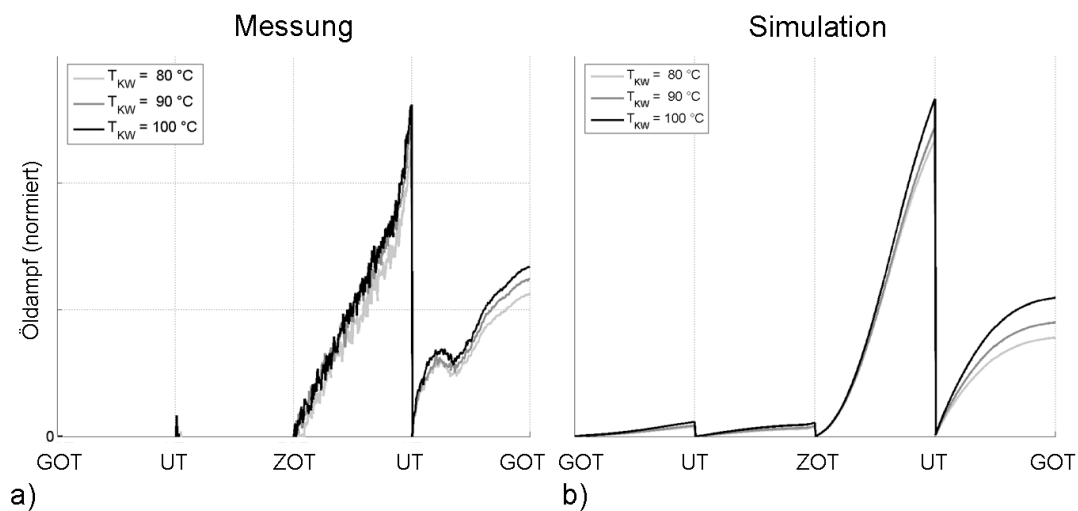


Abbildung 4.13: Qualitativer Vergleich von Messung und Simulation:

**a** Messergebnis **b** Simulationsergebnis, qualitativ Betriebspunkt  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$  und  $M = 130 \text{ Nm}$ , bei  $T_{KW} = 80^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$ .

Die Abbildung 4.13 zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen für den Betriebspunkt  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$  und  $M = 130 \text{ Nm}$ , bei  $T_{KW} = 80^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  und  $100^\circ\text{C}$ . Der Simulationsverlauf der in den Brennraum eingedampften Ölmenge weist im Vergleich zu den Messungen in den gleichen Betriebspunkten qualitativ die gleiche Struktur auf. Es wird ein geringer Beitrag zur Ölemission in der Einsaug- und Kompressi-

onsphase ermittelt. Der größte Beitrag wird in der Expansionsphase berechnet, in der Ausschubphase liegt er etwa auf der Hälfte dieses Wertes. Die Variation der Kühlwassertemperaturen zeigt in den ersten zwei Takten nur einen sehr geringen Einfluss, während des 3. und 4. Taktes ist er jedoch signifikant.

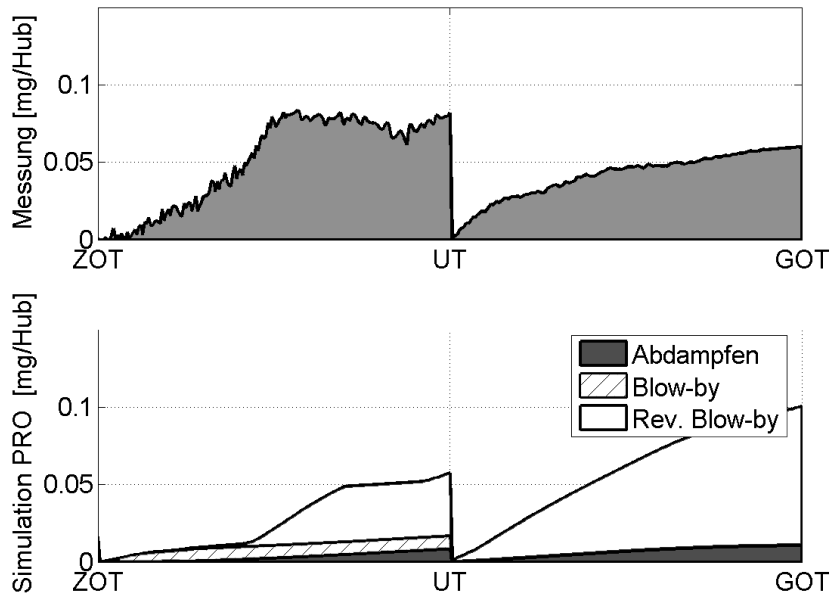


Abbildung 4.14: Vergleich Messung und Simulation (3. und 4. Takt):  
Betriebspunkt  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  und  $M = 145 \text{ Nm}$ , bei  $T_{KW} = 90^\circ \text{C}$ .

Die Ergebnisse aus der Simulation erlauben die Aufschlüsselung des Gesamtölverbrauches auf die verschiedenen, in das Berechnungsmodell implementierten Ölverbrauchsmechanismen: Blow-by, Reverse Blow-by und Abdampfung, siehe Abbildung 4.14.

Die Simulationsergebnisse für den Ölverbrauchsmechanismus Reverse Blow-by zeigen in der Expansionsphase charakteristische Strukturen. Diese sind auch im 3. Takt in den Messergebnissen enthalten. Die Übereinstimmung im 4. Takt ist in der Form gegeben, jedoch ist der Beitrag in der Simulation im Gegensatz zu den Messergebnissen höher als der des 3. Taktes.

Die Ergebnisse zeigen, dass einzelne Ölverbrauchsmechanismen anhand der Messungen im Brennraum identifiziert werden können. Die Zuordnung zu den Simulationsergebnissen ermöglicht die Anpassung der Simulationsparameter und damit die Optimierung der Simulationskette.

#### 4.2.6 Instationäre Ölverbrauchseffekte

Ein instationäres, periodisches Ölemissionsverhalten wurde im Brennraum des Versuchsträgers im geschleppten Motorbetrieb festgestellt. Für diesen Zweck ist der Motor ohne Kraftstoffeinspritzung mit geschlossener Drosselklappe betrieben worden. Der Druck im Saugrohr  $p_{\text{Saugrohr}} = 150 \text{ mbar}$  ist dabei deutlich geringer als im Kurbelgehäuse  $p_{\text{Kurbelgehäuse}} = 1000 \text{ mbar}$ .

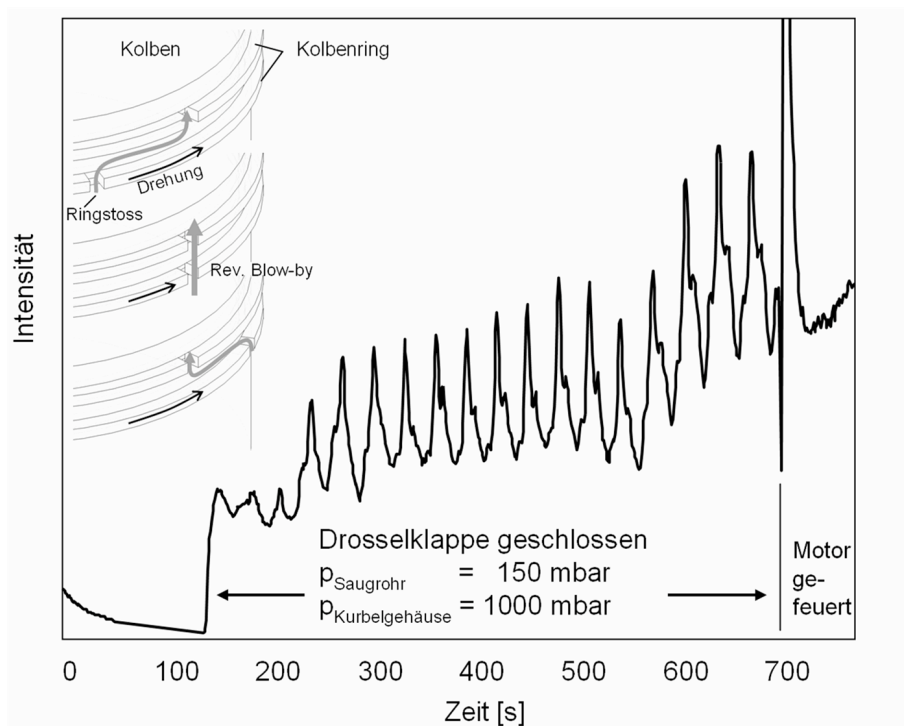


Abbildung 4.15: Brennummessung im geschleppten Motorbetrieb:

Betriebspunkt:  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  und  $M = -15 \text{ Nm}$ , bei  $T_{KW} = 90^\circ\text{C}$ .

Der Druckunterschied wirkt direkt auf das Tribosystem und führt zu einem Ausgleichsprozess, dem Reverse Blow-by. In Abbildung 4.15 wird die Messung der Öl-

konzentration im Brennraum dargestellt. Auf das Schließen der Drosselklappe und damit das Absenken des Saugrohrdruckes reagiert das Messsignal zunächst mit einem Anstieg. Nach einer Zeit von ca. 60 s beginnt ein periodischer Signalverlauf mit zunehmender Intensität.

Die Periodizität lässt sich in Verbindung mit dem Ölverbrauchsmechanismus Reverse Blow-by anhand von Drehbewegungen der Kolbenringe erklären. Decken sich die freien Flächen der Stöße von zwei Kolbenringen, wird der Strömungswiderstand des Reverse Blow-bys deutlich verringert. Folglich gelangt in dieser Zeit mehr Öl aus dem Tribosystem in den Brennraum. Wenn die Kolbenringe in Drehung versetzt werden, so kommt es in periodischen Abständen zu diesem Effekt. Aus der Messung lässt sich eine Umlaufzeit  $T \approx 25$  s ablesen. Unter der Annahme eines fixierten und eines frei laufenden Ringes entspricht dies einer Umfangsgeschwindigkeit des freien Kolbenringes von  $v \approx 1$  cm/s. In einer Untersuchung zur Kolbenring Drehbewegung wurde ein damit vergleichbarer Wert von  $v = 0,2$  cm/s ermittelt [63].



# Kapitel 5

## Schlussbemerkung und Ausblick

Mit dem in dieser Arbeit neu entwickelten Messverfahren kann erstmals die Ölverdampfung im Brennraum von Ottomotoren online bestimmt werden. Es ist zusätzlich möglich, den zeitlichen Verlauf des Verbrennungsprozesses anhand der Reaktionspartner und -produkte zu betrachten, z. B. verschiedene Klassen von Kohlenwasserstoffen aus dem Kraftstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid oder Wasser.

Die Technik basiert auf einem Massenspektrometer für die Laboranalytik, das für die Messaufgabe mit zusätzlichen Modulen ausgestattet wurde. Dazu gehört eine neu entwickelte Datenaufnahmeelektronik, die die Messwerte und die Kurbelwellenposition mit einer ausreichenden Zeitauflösung speichert. Die analytische Trennung der ölbürtigen Kohlenwasserstoffe wird mit einem Hochpassmassenfilter realisiert, dessen Filterschnittkante mit einer neuen MS/MS-Methode kalibriert wird.

Das Gas aus dem Brennraum wird mit einem Einlasssystem in die Ionenquelle des Massenspektrometers überführt. Dabei beeinflussen Brennraumdruck und -temperatur den Gastransfer. Auf Basis von strömungsmechanischen Berechnungen (CFD) ist ein schnelles Direkteinlasssystem mit vier Druckstufen entwickelt worden. Es erlaubt aufgrund seiner optimierten Eigenschaften einen rückströmungsfreien Transfer der Gasprobe und erzeugt einen konstanten Massenstrom in das MS. Damit kann in allen Arbeitstakten im gesamten Drehzahl- und Drehmomentbereich

eines Ottomotors gemessen werden. Mit einer Signalanstiegszeit von 2,5 ms können die Prozesse im Zylinder während eines Arbeitsspiels beobachtet werden.

Die Zuordnung der gemessenen Signale auf die einzelnen Arbeitstakte des Motors erfordert eine genaue Bestimmung der Transferzeiten. Hierzu ist eine Methode entwickelt worden, die mit Realkreisprozessrechnungen und genetischen Algorithmen Korrekturfunktionen für die Zeitachse bestimmt. Die Messwerte können damit der Kurbelwellenposition zugewiesen werden. Die Methode wurde durch Messungen der  $CO_2$ -Konzentration im Brennraum und entsprechenden CFD-Rechnungen validiert.

Zur quantitativen Bestimmung der Ölkonzentration im Zylindergas ist ein neues Kalibriersystem entwickelt worden. Die Ölmenge wird in Form von Tröpfchen mit einem Dosierventil auf eine beheizte Platte dosiert und innerhalb von Millisekunden verdampft. Definierte Öldampfkonzentrationen von 0,1 ppm bis hin zu einigen 100 ppm werden computergesteuert für die Kalibrierung generiert.

Mit dem Messsystem kann der Einfluss von Kraftstoff auf den Verdampfungsverlust von Schmieröl ermittelt werden. Mit einer neu entwickelten Apparatur wird Öl einer intensiven Infrarotstrahlung für kurze Zeit ausgesetzt. Dabei sind die Größen wie Prozesszeit, Intensität und die Schichtdicke des Öls mit denen im Brennraum vergleichbar. Damit kann die Öl-Kraftstoff-Interaktion isoliert vom Motor betrachtet werden. Die Messungen zeigen signifikante Abhängigkeiten der Ölverdampfung von der enthaltenen Kraftstoffmenge.

Als motorische Untersuchung sind mit dem System Messungen im Brennraum eines Ottomotors mit äußerer Gemischbildung durchgeführt worden. Dabei sind verschiedene thermodynamische Bedingungen in unterschiedlichen Betriebspunkten untersucht worden. Die Einflüsse von Drehzahl, Drehmoment und Kühlwassertemperatur auf die Ölemission konnten hierbei bestimmt werden. Zum Vergleich sind Messungen der integralen Ölemission im Abgaskrümmern desselben Zylinders durch-

geführt worden. Die Ergebnisse beider Messungen weisen über das gesamte Motor-kennfeld eine hohe Korrelation auf und validieren damit das neue Verfahren.

Die Ergebnisse der zeitlich hoch aufgelösten Messungen zeigen, dass die größten Anteile der Gesamtölemission während der Expansions- und Ausschiebephase in den Brennraum eingetragen werden. Simulationsrechnungen auf der Basis von Schmierstoffeigenschaften, Verzugsmessungen, Kolben- und Kolbenringgeometrie, Brennraumtemperatur und -druck zeigen tendenziell eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Das neue Verfahren bietet damit eine Grundlage für weitere Modellabstimmungen und Erweiterungen.

Der bisher nicht implementierte Ölverbrauchsmechanismus der Kraftstoff-Öl-Interaktion wird gegenwärtig an einem Einzylinder-Forschungsmotor mit innerer Gemischbildung untersucht. Dabei wird das Messsystem sowohl für die Bildung von Grundlagenwissen als auch für die motorischen Untersuchungen verwendet [64].

Zukünftige Fragestellungen für diese Messverfahren können der Einfluss von alternativen Kraftstoffen [65, 66], Ölalterung [67], Tribomutation und Verschleiß [68, 69, 70, 71] auf die Ölemission sein.

Durch die Optimierung des Tribosystems mithilfe dieses schnellen massenspektrometrischen Verfahrens wird der Ölverbrauch und indirekt auch der Kraftstoffverbrauch minimiert. Im Ergebnis wird die Umweltbelastung durch den KFZ-Verkehr reduziert.



# Literaturverzeichnis

- [1] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft: *Richtlinie 94/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*, Nr. L 100/42, 19.4.94.
- [2] Lübbing, B. E.; Gneithing, B. *Berechnung Ölverbrauch von Hubkolben – Verbrennungsmotoren* VDI Berichte 1007, 1992.
- [3] v. Basshuysen, R.; Schäfer, F. *Handbuch Verbrennungsmotoren* 3. Auflage Vieweg, 2005.
- [4] B. Schillinger, B.; Abele, H.; Brunner, J.; Frei, G.; Gähler, R.; Gildemeister, A.; Hillenbach, A.; Lehmann, E.; Vontobel, P. *Detection systems for short-time stroboscopic neutron imaging and measurements on a rotating engine* Nucl. Inst. and Meth. A 542 (2005) 142-147
- [5] B. Schillinger, B.; Brunner, J.; Calzada, E. *A study of oil lubrication in a rotating engine using stroboscopic neutron imaging* Physica B: Condensed Matter, Vol. 385-386, Part 2, 15 Nov. 2006, pp. 921-923
- [6] Thirouard, B. *Characterization and Modeling of the Fundamental Aspects of Oil transport in the Piston-Ring Pack of Internal Combustion Engines* Department of Mechanical Engineering, MIT, 2001.
- [7] Steinhilper, W.; Sauer, B. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

- [8] Tritthart, P. *Dieselpartikelemissionen: Analysetechniken – Erfahrungen – Ergebnisse* in: Mineralöltechnik, Heft 8, Juli 1994; Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik mbH, Hamburg.
- [9] Knoll, G.; R. Lechtape-Grüter *Ölverbrauchssimulation* AIF-Nr. 10673, 1996-1999; FVV-Forschungsheft 707, 2001.
- [10] Yilmaz, E. *Sources and Characteristics of Oil Consumption in a Spark-Ignition Engine* Department of Mechanical Engineering, MIT, 2003.
- [11] Orthaber, G. C. *Berechnungsverfahren für Ölverbrauch und Blow-by-Gase zwischen Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbuchse* Diss. TU Graz, 1992.
- [12] Rehr, A. *Innovative Ölverbrauchsmesstechnik – Chancen und Erkenntnisse aus der Anwendung der Massenspektroskopie an Otto-Hochleistungsmotoren* Vortrag auf dem Symposium „Ölkreislauf im Verbrennungsmotor“, Chemnitz 11.-13.4.2005.
- [13] Püffel, P. K. *Resonante Lasermassenspektrometrie zum Spurennachweis von Ölbestandteilen in Abgasen von Verbrennungsmotoren* Diss. TU-München, 1998.
- [14] Pribsch, H. H.; Herbst, H. M. *Simulation des Einflusses von Kolbenringparametern* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 60 (1999).
- [15] Herbst, H. M.; Pribsch, H. H. *Simulation of Piston Ring Dynamics and their Effect on Oil Consumption* SAE Paper No. 2000-01-0919.
- [16] Yilmaz, E.; Tian, T.; Wong, W.; Heywood, J. *An Experimental and Theoretical Study of the Contribution of Oil Evaporation to Oil Consumption* SAE-Paper No. 2002-01-2684, 2002.
- [17] Peecken, H.; Knoll, G.; Lechtape-Grüter, R. *Kolbenringreibung I* FVV-Forschungsheft 502, 1992 und 513, 1993.
- [18] Knoll, G., Lechtape-Grüter, R. *Kolbenringreibung II* FVV-Forschungsheft 570-1, 1994 und 570-2, 1995.

- [19] Hering, A. *Ein Ansatz zur Berechnung von Ansaug- und Abgasgegendruck für schnelle Motorprozessrechnung* Selbstverlag, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, 2006.
- [20] Woschni, G. *Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren* Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 31. Jahrgang Nr. 12, 1970, S. 491-499.
- [21] Thiemann, W.; Matz, G.; Knoll, G.; v. Hollen, P.; Krause, S.; Schlerege, F. *Ölverdampfung im Brennraum von Verbrennungsmotoren, Messung und Modellierung* FVV Vorhaben Nr. 826, AIF Nr. 13760 N/1. Abschlussbericht, 2007.
- [22] Gohl, M.; Knoll, G. *Online-Messung und Simulation von Ölemission Ölkreislauf im Verbrennungsmotor II*. Expert Verlag, 2007.
- [23] Ariga, S.; Sui, P. C.; Shahed, S. M. *Instantaneous unburned oil consumption measurement in a Diesel engine using SO<sub>2</sub> tracer technique* SAE Paper Nr. 922196, 1992.
- [24] Ariga, S.; Sui, P.C.; Bailey, B.; Kumakiri, T.; Osumi, Y.; Sakamoto, A. *On-line oil consumption measurement and characterization of an automotive gasoline engine by SO<sub>2</sub> method* SAE technical paper series 920652, 1992.
- [25] Püffel, P. K. *Eine neue Methode zur schnellen und exakten Ölverbrauchsmessung* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 60, 1999, S. 820-824.
- [26] Rulfs, H. W. *Untersuchung des Schmierölverbrauchs eines aufladbaren Dieselmotors unter Anwendung eines Radioisotops* VDI-Forschungsheft Nr 601, 1980.
- [27] Sasse, I. *Erprobung und Anwendung der Tritium-Durchflußmethode zur Ölverbrauchsmessung an einem aufladbaren Einzylinder-Dieselmotor* Diss. Universität Hannover, 1975.
- [28] Bergmann, M. *Methode zur Ölverbrauchsmessung durch Markierung mit radioaktivem Brom* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 58, 1997, S.102-107.

- [29] Bergmann, M. *Untersuchung der Ölverbrauchswege bei Verbrennungsmotoren* FVV Abschlussbericht, Heft 608, 1996.
- [30] Zellbeck, H.; Bergmann, M.; Röthig, J.; Seibold, J.; Zeuner, A. *Oil Consumption Measuring Method by Labelling with Radioactive Bromine* TU Dresden, Techn. Akademie Esslingen, 1998.
- [31] Deconninck, B. *A New Methodology for On-Line Lubricant Consumption Measurement* SAE, 2005-01-2172, 2005.
- [32] Matz, G.; Kuhlmann, P.; Gohl, M.; Ihme, H. *Massenspektrometrische Bestimmung des Ölverbrauches von Verbrennungsmotoren und dessen Einfluss auf die HC-Emissionen* FVV-Forschungsheft 691, 2000.
- [33] Matz, G.; Kuhlmann, P.; Gohl, M.; Ollesch, T. *Massenspektrometrische Bestimmung der Ölemission im Abgas von Otto- und Dieselmotoren* FVV-Forschungsheft 764, 2003.
- [34] Gohl, M. *Massenspektrometrisches Verfahren zur dynamischen Online-Messung der Ölemission von Verbrennungsmotoren* Diss. Technische Universität Hamburg- Harburg, Düsseldorf: VDI Verlag Fortschr.-Ber. Reihe 8, Nr. 1021, 2004.
- [35] Knirsch, S.; Kerkau, M.; Neußer, H. J. *Die neuen 6-Zylinder-Boxermotoren für den PORSCHE 911 Carrera* 26. Internationales Wiener Motorensymposium; Wien 28/29.04.2005.
- [36] Appel, N.; Gohl, M.; Robota, A. *Vergleichende Untersuchungen zwischen Ölverbrauch und Ölemissionen an einem Ottomotor* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 67 (2006) 5 , S.360-367.
- [37] Hesse, M.; Meier, H.; Zeeh, B. *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie* Thieme, Stuttgart, 2007.

- [38] Paul, W.; Reinhard, H. P.; v. Zahn, U. *Das elektrische Massenfilter als Massenspektrometer und Isotopentrenner* Z. Phys. 152 (143 – 182) 1958.
- [39] Dawson, P. H. *Quadrupole Mass Spectrometry an its Applications* Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam/ New York 1976.
- [40] Pedder, R. E. *Practical Quadrupole Theory* 49th ASMS Conference on Mass Spectrometry, 2001.
- [41] Pedder, R. E.; Kero, F.; Yost, A. *Quadrupole mass analyzers: theoretical and practical considerations* John Wiley and Sons, 2005.
- [42] Ferziger, J. H.; Peric, M. *Numerische Strömungsmechanik* Springer, Berlin-Heidelberg, 2008.
- [43] Schäfer, M. *Numerik im Maschinenbau* Springer, 1999.
- [44] ANSYS *User Manual ICEM CFD* ICEM CFD Programm zur Gittererzeugung von ANSYS, 2007.
- [45] ANSYS *CFX-Solver Theory Guide* CFX: Programm zur CFD-Simulation von ANSYS, 2006.
- [46] Siegloch, H. *Technische Fluidmechanik* Springer, 2007.
- [47] Pilsak, T. *Entwicklung und Realisierung einer schnellen Datenaufnahme und Online-Visualisierung für die taktaufgelöste Ölemissionmessung im Brennraum* Diplomarbeit, TU Hamburg-Harburg, 2006.
- [48] Thiemann, W.; Matz, G.; Knoll, G.; v. Hollen, P.; Krause, S.; Schlerege, F. *Ölverdampfung im Brennraum I-III* Vortrag auf der FVV Frühjahrstagung, 2008.
- [49] Krause, S.; Matz, G. *Dynamic Method for Mass Spectrometric Determination of In-Cylinder Oil Evaporation* Vortrag auf der Pittcon 2008, New Orleans, USA, 2008.

- [50] Knoll, G.; Schlerege, F.; Matz, G.; Krause, S.; Thiemann, W.; v. Hollen, P.; Robota, A. *Ölemission eines Ottomotors, Verfahrensentwicklung zur Messung und Simulation* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 70 (2009) 2, S. 166-173.
- [51] Lüke, H. D.; Ohm, J. R. *Signalübertragung* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [52] Kiencke, U.; Eger, R. *Messtechnik – Systemtheorie für Elektrotechniker* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [53] Lunze, J. *Regelungstechnik 1* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [54] Floudas, C. A.; Pardalos, P. M. *Encyclopedia of Optimization* Springer New York, 2009.
- [55] Jungnickel, J. *Optimierungsmethoden* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [56] Gerdes, I.; Klawonn, F.; Kruse, R. *Evolutionäre Algorithmen* Vieweg+Teubner Verlag, 2004.
- [57] Schomann, L. *Entwicklung und Realisierung einer schnellen Kalibriermethode zur zeitlich hochaufgelösten Ölemissionmessung im Brennraum* Diplomarbeit, TU Hamburg-Harburg, 2005.
- [58] Wruck, N. *Transientes Sieden von Tropfen beim Wandaufprall* Dissertation, RWTH Aachen, Aachen 1999.
- [59] Norm DIN 51581-1, Teil 1 *Verfahren nach Noack* Februar 2003.
- [60] Norm DIN 51581-2, Teil 2 *Gaschromatographisches Verfahren* Mai 1997.
- [61] Meißner, J. *Versuchsaufbau zur Erzeugung und Messung dünner Ölschichten* Bachelorarbeit, TU Hamburg-Harburg, 2008.
- [62] Maas, P. *Entwicklung und Realisierung eines Versuchsaufbaus zur Messung von dynamischen Abdampfeffekten dünner Ölschichten* Bachelorarbeit, TU Hamburg-Harburg, 2008.

- [63] Kollmann, K.; Stegmann, D. *Messung der Drehbewegung von Kolbenringen im Motorbetrieb und deren Einfluss auf die Abdichtung* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 24 (1963).
- [64] Pischinger, S.; Matz, G.; Knoll, G.; Stein, C.; Krause, S.; Brandt, S. *Gemischbildung und Ölemission - Zwischenbericht* FVV Informationstagung Motoren, Bad Neuenahr, 03.04.2009.
- [65] Harndorf, H.; Schümann, U.; Wichmann, V.; Fink, C. *Motorprozessverhalten und Abgasemissionen alternativer Kraftstoffe im Vergleich mit Dieselkraftstoff* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 69 (2008) 7-8, S. 640-646.
- [66] Luther, R. *Alternative Kraftstoffe aus Sicht der Motorenschmierung* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 69 (2008) 3, S. 230-236.
- [67] Schwarze, H.; Brouwer, L.; Knoll, G.; Schlerege, F.; Müller-Frank, U.; Kopnarski, M.; Emrich, S. *Ölalterung und Verschleiß im Ottomotor* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 69 (2008) 10, S. 878-886.
- [68] Walte, A.; Münchmeyer, W. *Charakterisierung verschiedener Motoröle mittels GC/MS Analysen mit unterschiedlichen Ionisierungsmethoden* WMA Airsense Analysetechnik GmbH, Schwerin, November 1998.
- [69] Walte, A.; Münchmeyer, W. *GC/MS Untersuchungen zur Änderung von Inhaltsstoffen in Motoröl bei unterschiedlichen Laufleistungen* WMA Airsense Analysetechnik GmbH, Schwerin, Dezember 1999.
- [70] Huck, A. *Beitrag zur Optimierung des Tribosystems Kolbenring - Zylinderlaufbuchse* Diss. Universität Hannover, Düsseldorf: VDI Verlag Fortschr.-Ber. Reihe 5, Nr. 281, 1992.
- [71] Gervé, A.; Oechsner, H.; Kehrwald, B.; Kopnarski, M. *Tribomutation von Werkstoffoberflächen im Motorenbau am Beispiel des Zylinderzwickels* Frankfurt: FVV-Heft R 497, 1998.



# Anhang A

## Technische Daten des Motors

Tabelle A.1: Technische Daten des Motors:

M-Art	OTTO	M-Typ	2,0 l
Klasse	T	Modell	T4
Aggregate-Nr.	044.3	Bohrung	81,00 mm
EA-Nr.	032/00	Hub	95,50 mm
Kennbuchstabe	AAC	S/D	1,179
Hubraum	1968 cm <sup>3</sup>	Pleullänge	150,00 mm
Zylinderzahl	4	Pleulst. Verh.	0,318
Bauart Zylinder	Reihe	Verdichtung	8,5
Zylinderabstand	88,00 mm	Ventile/Zyl	2
Nennleistung	62 kW bei	Nenn Drehzahl	4300 min <sup>-1</sup>
Drehmoment max.	159 Nm bei	Drehzahl	2200 min <sup>-1</sup>
Mitteldruck max.	9,5 bar bei	Drehzahl	2200 min <sup>-1</sup>
Kraftstoffart	ROZ 91, unverbleit	Ölvolumen	4,5 l
Gemischbildner	Digifant	Kühlmittelvolumen	10,0 l
Typenbezeichnung	1.2		
Abschaltdrehzahl	5300 min <sup>-1</sup>		
Leerlaufdrehzahl	800 min <sup>-1</sup>		
Zündzeitpkt. LL	6° vor O. T.	Abgasdruck	350 mbar
Einlassventil D.	40,0 mm	EOE (1 mm Hub)	1,5° nach O.T.
Auslassventil D.	33,0 mm	ES (1 mm Hub)	17,5° nach U.T.
Ventilhub-Einl.	8,40 mm	AOE (1 mm Hub)	21,5° vor U.T.
Ventilhub-Ausl.	8,40 mm	AS (1 mm Hub)	5,5° vor O.T.

# Anhang B

## Technische Daten des Dosierventils

Tabelle B.1: Technische Daten des Dosierventils:

Typ	DV200
Hersteller	Picodostec
Dosierbarer Viskositätsbereich	ca. 50 – 200.000 mPas
Minimale Dosierzeit	10 $\mu$ s (einmal Öffnen und Schließen)
Minimale Dosierzeit für vollen Hub	250 $\mu$ s (einmal Öffnen und Schließen)
Minimale Pausenzeit	10 $\mu$ s (zwischen zwei Dosierungen)
Dosierfrequenz	1000 Hz
Maximaler Betriebsdruck	100 bar
Durchmesser Standarddüse	300 $\mu$ m

## Liste eigener Veröffentlichungen

### Veröffentlichungen in chronologischer Reihenfolge

- 2009 Pischinger, S.; Matz, G.; Knoll, G.; Stein, C.; Krause, S.; Brandt, S. *Gemischbildung und Ölemission - Zwischenbericht* FVV Informationstagung Motoren, Bad Neuenahr, 03.04.2009.
- 2009 Krause, S.; Matz, G.; Gohl, M. *DynOil: A New Method for Oil Characterization: Fast Evaporation of thin Oil Layers and Measurement with the Lubrisense Mass Spectrometer* Pittsburgh Conference, Pittcon, Chicago, Il, USA, März 2009.
- 2009 Knoll, G.; Schlerege, F.; Matz, G.; Krause, S.; Thiemann, W.; v. Hollen, P.; Robota, A. *Ölemission eines Ottomotors, Verfahrensentwicklung zur Messung und Simulation* Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 70 (2009) 2, S. 166-173.
- 2008 Thiemann, W.; Matz, G.; Knoll, G.; v. Hollen, P.; Krause, S.; Schlerege, F. *Ölverdampfung im Brennraum I-III* Vortrag auf der FVV Frühjahrstagung.
- 2008 Krause, S.; Matz, G.; Schomann, L.; Gohl, M.; Löprich, A. *Real-Time Monitoring of Wear Particles in Lubricating Oil* Pittsburgh Conference, Pittcon, New Orleans, USA.
- 2008 Krause, S.; Matz, G. *Dynamic Method for Mass Spectrometric Determination of In-Cylinder Oil Evaporation* Pittsburgh Conference, Pittcon, New Orleans, USA.
- 2007 Thiemann, W.; Matz, G.; Knoll, G.; v. Hollen, P.; Krause, S.; Schlerege, F. *Ölverdampfung im Brennraum von Verbrennungsmotoren, Messung und Modellierung* FVV Vorhaben Nr. 826, AIF Nr. 13760 N/1. Abschlussbericht.

- 2007 Krause, S.; Matz, G; Gohl, M. *Ultra Fast In-Cylinder-Measurement of Oil evaporation* Pittsburgh Conference, Pittcon, Chicago, Il, USA.
- 2006 Thiemann, W.; Matz, G.; Knoll, G.; v. Hollen, P.; Piatek, J.; Krause, S.; Schlerege, F. *Ölverdampfung im Brennraum von Verbrennungsmotoren Messung und Modellierung* FVV Vorhaben Nr. 826, Zwischenbericht, FVV Informationstagung Motoren, Frankfurt, 30.03.2006.
- 2006 Krause, S.; Matz, G; Schomann, L.; Gohl, M. *New Mass Spectrometric System for Combustion Engine Development: Ultra-fast In-cylinder Measurements of HC-Components* Pittsburgh Conference, Pittcon, Proc. 980-3P, Orlando, Fl, USA 2006

## Lebenslauf

### Sven Krause

Adresse:           Hinzeweg 7  
                      21075 Hamburg

Geboren am:       28. August 1974

Ort:                Paderborn

Familienstand:    verheiratet

Nationalität:     deutsch

### Ausbildungsdaten

2004 – 2009       Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Messtechnik der  
                      Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

1998 – 2004       Studium der Elektrotechnik an der TUHH

1995 – 1998       Berufsausbildung als Energieelektroniker an der Flensburger Schiffbau-  
                      Gesellschaft (FSG)

### Abschlüsse

2004              Dipl.-Ing. TUHH

1998              Energieelektroniker Fachrichtung Anlagentechnik

1994              Abitur (Technisches Gymnasium Schleswig)