

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Regelung des Swiss Motors für den Einsatz in der Praxis

Teilprojekt des Projektes Swiss Motor

ausgearbeitet durch:

Christian Nellen

Konstantinos Boulouchos

Institut für Energietechnik, LVV, ETHZ, 8092 Zürich

boulouchos@lvv.iet.mavt.ethz.ch

Christoph Schaer

Christopher Onder

Institut für Energietechnik, IMRT, ETHZ, 8092 Zürich

im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

1 INHALTSVERZEICHNIS

1	INHALTSVERZEICHNIS	2
2	ZUSAMMENFASSUNG.....	3
3	ABSTRACT	4
4	AUSGANGSLAGE UND ZIEL DER ARBEIT.....	5
5	LÖSUNGSWEG	5
6	HAUPTERGEBNISSE.....	8
6.1	LEISTUNGSRAMPEN	8
6.1.1	Leistungsrampe mit der „Waste-Gate“	8
6.1.2	Leistungsrampe mit der Drosselklappe	10
6.2	GASUMSCHALTUNGEN.....	11
6.2.1	Schaltung Gas 1 → Gas 2 (92%CH ₄ , 7%N ₂ , 1%C ₂ H ₆ → 92%CH ₄ , 1%N ₂ , 7%C ₂ H ₆)	11
6.2.2	Umschaltung Gas 2 → Gas 1 (92%CH ₄ , 1%N ₂ , 7%C ₂ H ₆ → 92%CH ₄ , 7%N ₂ , 1%C ₂ H ₆).....	13
7	VORSCHLÄGE FÜR DIE PRAXIS.....	14
8	DANKSAGUNG	14
9	SYMBOLVERZEICHNIS.....	14
10	LITERATURVERZEICHNIS	14

2 ZUSAMMENFASSUNG

An der ETH Zürich wurde ein neues Konzept für einen Gasmotor mit sehr hohem Wirkungsgrad und tiefen Emissionswerten (insbesondere NO_x) entwickelt. Das Ziel dieses Teilprojektes war, eine Regelung für dieses neue Konzept und den Einsatz in der Praxis zu realisieren. Die Regelung sollte folgende Eigenschaften gewährleisten:

- einen autonomen Motorbetrieb
- eine automatische Anpassung des Motorbetriebs und des Abgasnachbehandlung-Systems bei:
 - Variation der Motorlast
 - Änderung der Erdgaszusammensetzung

Die Regelung wurde in Zusammenarbeit mit dem IMRT (Institut für Mess- und Regelungstechnik) der ETHZ realisiert und auf dem Motorprüfstand an der EMPA/Abteilung Feuerung und Verbrennungsmotoren erprobt. Die Versuchsergebnisse sind hier kurz zusammengefasst:

- Im stationären Betrieb und während der Leistungsvariationen konnten (dank der Lambda-Regelung) die Abgasemissionen deutlich unter den Grenzwerten für die Stadt Zürich gehalten werden (**Fig. 3b und 4b**).
- Bei Gasumschaltung zwischen den beiden extremsten Gasqualitäten ergibt sich eine kurzfristige (Dauer weniger als 10 Sekunden) CO - bzw. NO_x -Spitze, gezeigt in **Fig. 6 und 8**. Solche Fälle finden in der Praxis nicht statt, weil die Erdgasqualität nie so schnell variiert. Die Versuche zeigen aber, dass die Regelung die Variation der Gaszusammensetzung erkennt und die schnelle Anpassung der Stellgrössen (Leistung, Lambda) ermöglicht.
- Folgende Regelkreise haben einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Motorprozesses und Abgasnachbehandlung:
 - Lambda-Regelung: Abgasnachbehandlung
 - Ladetemperatur: Leistung und Klopfintensität
 - Temperatur des rezirkuliertes Abgases: Einfluss auf die AGR-Rate und die Klopfintensität
 - Zündzeitpunkt: Klopfintensität, Leistung und Wirkungsgrad

Somit ist auch die Motorleistung ein Gütekriterium für die AGR-Rate, die Ladetemperatur und den Zündzeitpunkt.

Zusätzlich sind ein paar Vorschläge für die Praxis im Kapitel 7 aufgelistet.

Schlusskommentar

Alles in allem liess sich eine hervorragende Regelungscharakteristik realisieren, was für die Robustheit und Qualität des ETH-Konzeptes spricht und gleichzeitig günstige Aussichten auf eine erfolgreiche Anwendung unter realen Bedingungen in der Praxis erlaubt.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

3 ABSTRACT

At the ETH Zurich, a new concept for gas engines with very high efficiency and low emissions level (particularly NO_x) has been developed. The target of the present work was to realise an automatic control system for this new engine for its implementation in practice (cogeneration unit). The control strategy should be able to manage the following conditions:

- autonomous steady operation of the engine
- automatic adjustment of the engine operation and the exhaust gas aftertreatment system during the:
 - variation of the engine load
 - variation of the natural gas composition

The control system has been realised in collaboration with the IMRT (Measurement and Controlling Laboratory) and tested on the engine test bench at EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dep. I.C. Engines and Furnaces). The test results are here briefly summarised:

- in steady operation and during the load variations, the exhaust emissions could be kept – thanks to the air/fuel ratio controller - under the stringent limits for the city of Zurich (**Fig. 3b and 4b**).
- a short CO- respectively NO_x-Peak (less than 10 seconds, **Fig 6 and 8**) has been observed during the switching between different gas compositions. This characteristic doesn't occur in practice because the gas composition coming from the gas network does never change so fast. However, these tests have shown the ability of the control system to recognise the variation of the gas composition and its ability to adapt to the engine parameters (power, air/fuel ratio)
- the following control loops play a major role on the engine process quality and the exhaust gas aftertreatment:
 - air/fuel ration control system: aftertreatment
 - intake charge temperature: power and knocking tendency
 - temperature of the exhaust gas recirculation: EGR-Rate and knocking tendency
 - spark timing: knocking intensity, power and engine efficiency

Consequently, the engine power is a qualitative performance index for the EGR-Rate, the intake charge temperature and the spark timing.

In addition, a few proposals for the application are listed in chapter 7.

In brief

Altogether, an outstanding control system could be realised, which underpins the robustness and quality of the new ETH concept and at the same time is very promising for a successful application under real conditions in practice.

4 AUSGANGSLAGE UND ZIEL DER ARBEIT

Im stationären Betrieb erreichte der stationäre Gasmotor nach dem ETHZ-LVV-Konzept Weltrekordwerte beim Wirkungsgrad und bei den NO_x-Emissionen [1,2]. Ein wichtiger Schritt für die Umsetzung des innovativen Gasmotorkonzeptes (Einsatz vorgesehen hauptsächlich für BHKW's) in der Praxis ist die Beherrschung von "stochastischen" Änderungen der Erdgaszusammensetzung und der momentanen Anforderung an die Motorlast bzw. an die elektronische Leistungsabgabe. Das beantragte Projekt soll eine optimale Regelungsstrategie zur Optimierung und Überwachung des Betriebs ermöglichen. Diese soll dann im Grundsatz den Industriepartner (DIMAG und LIEBHERR) zur Verfügung gestellt werden, damit – nach allfälligen im individuellen Fall erforderlichen Anpassungen – jede Anlage im Feld effizient geregelt und überwacht wird. Es werden insbesondere automatisch der jeweils maximale Wirkungsgrad und die tiefstmöglichen Schadstoffemissionen unter Einhaltung der thermischen und mechanischen Belastungsgrenze sowie unter Vermeidung vom Klopfen angestrebt.

5 LÖSUNGSWEG

Im absolut stationären Betrieb (mit genau vorgegebener Last und gezielter Variation der Erdgaszusammensetzung) funktionierte die Anlage mit einer Steuerung (d.h. ohne geschlossenen Regelkreis) sehr gut. Im realen Praxisbetrieb ist jedoch die Abfolge der geforderten Leistung und der verfügbaren Erdgaszusammensetzung nicht a priori bekannt und kann mit unterschiedlichen charakteristischen Zeiten schwanken.

Das LVV hat deswegen in Zusammenarbeit mit dem auf diesem Gebiet über grosse Erfahrung verfügenden Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMRT) der ETHZ eine Regelungsstrategie entworfen, die jetzt am hochdynamischen Prüfstand der EMPA in Dübendorf durch aufwendige Messungen erprobt und optimiert werden soll. Zu diesem Zweck werden in variierender Reihenfolge Laständerungen durchgeführt bzw. dem Motor unterschiedliche Erdgaszusammensetzungen zugeführt.

Bei der entworfenen Regelung handelt es sich um verschiedene Hierarchien von Regelkreisen, welche die Einhaltung der geforderten Leistung, der Sicherheitsrandbedingungen (thermische und mechanische Belastung), der Verbrennungsstabilität (zyklische Variation, Vermeidung von Klopfen) und der Vorgaben für Wirkungsgrad und Schadstoffemissionen ermöglichen. Von besonderer Bedeutung sind dabei der Betrieb des Abgasturboladers, das thermische Management der Anlage, die Kontrolle über die Abgasrückführrate (AGR) und die Einhaltung des geeigneten λ -Fensters am 3-Weg-Katalysator bei jeweils optimalem Zündzeitpunkt.

Fünf Regelkreise wurden dabei realisiert:

Stellgrößen	Aktuator	Nr. im Bild 1
Lambda	Gasmischer	1
Ladetemperatur	Wasser-Durchgangsventil Ladeluftkühler	2
Leistung	Drosselklappe „Waste-Gate“	3
Temperatur des rezirkulierten Abgases	Wasser-Durchgangsventil Abgaskühler	5
Abgasrückführrate	AGR-Klappe	6

Der Abgasgegendruck (7) wurde bei der Nennleistung (200 kW) auf 70 mbar eingestellt. Die schematische Darstellung der Aktuatoren und der Gesamtregelung sind im **Bild 1** beziehungsweise **Bild 2** dargestellt.

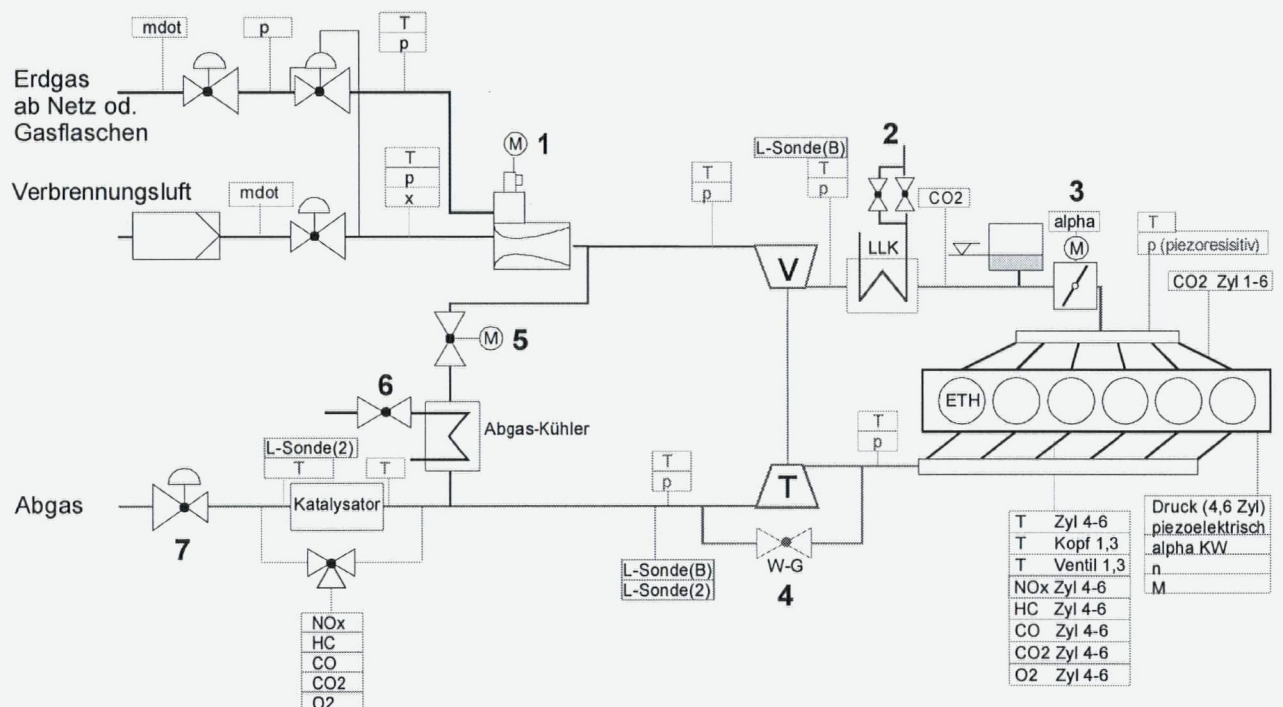


Bild 1: Schematische Darstellung des Prüfstandsbaus und der geregelten Aktuatoren.

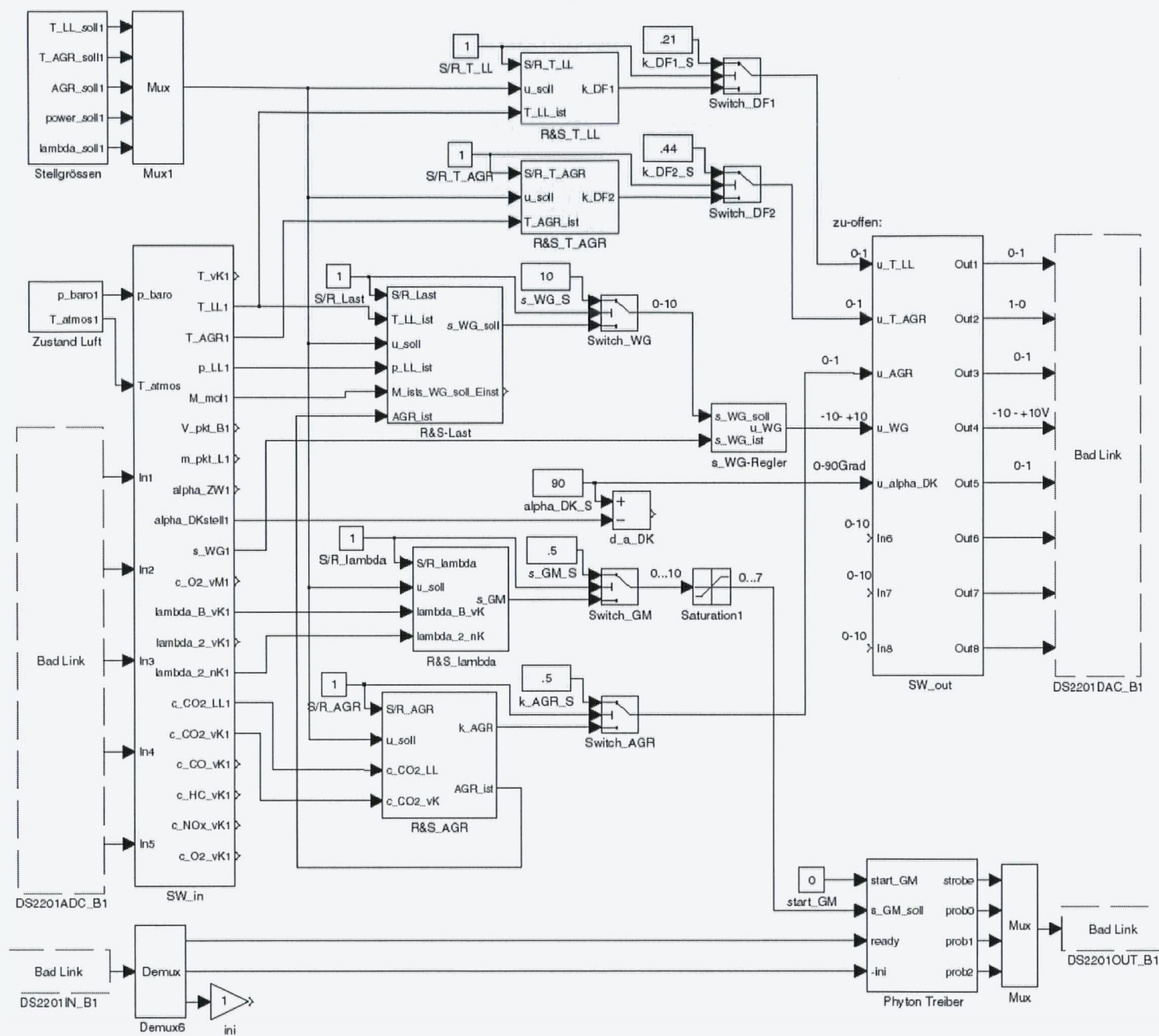


Bild 2: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Gesamterregung, realisiert mit Matlab Simulink durch das Institut für Mess- und Regeltechnik (IMRT).

6 HAUPTERGEBNISSE

6.1 Leistungsrampen

Nach Absprache mit der Firma DIMAG wurde der Ablauf der Leistungsrampen definiert:

- Reduktion der Leistung von 200 auf 100 kW in 10 Sekunden
- Stabilisierung des Motorbetriebs
- Erhöhung der Leistung von 100 auf 200 kW in 10 Sekunden

Für diese Variation haben wir zwei verschiedene Möglichkeiten vorgesehen:

1. Variation der Last mit der „Waste-Gate“: Dieses Ventil befindet sich vor der Turbine (abgasseitig, s. Bild 1 Nr.4) und hat einen direkten Einfluss auf den Ladedruck. Bei diesem Versuch ist die Drosselklappe 100% offen.
2. Variation der Last mit der Drosselklappe: Für eine einfache praktische Anwendung und aus Kostengründen möchte man auf die „Waste-Gate“ verzichten, deshalb wurde diese Lösung auch untersucht. Der Nachteil von dieser Variante ist ein höherer Verbrauch bei Teillast, gegeben durch die Drosselverluste. Bei diesem Versuch ist die „Waste-Gate“ auf einer festen Position bei 200 kW eingestellt.

Um eine Vorsteuerung den Aktuatoren während der Leistungsvariation zu realisieren, wurde zuerst ein Kennfeld aller Aktuatoren aufgenommen. In einer zweiten Phase erfolgte die Optimierung der Parametrierung der verschiedenen Regler. Hier musste ein Kompromiss zwischen einem stabilen Verhalten während dem stationären Betrieb (langsamer Regler) und einer schnellen Bewegung der Aktuatoren während des transienten Betriebs (schneller Regler) gefunden werden.

Es wurde zusätzlich versucht, die Leistungsrampen mit fixer Position der AGR-Klappe zu fahren.

6.1.1 Leistungsrampe mit der „Waste-Gate“

Das **Bild 3a** zeigt die Leistungsvariation mit der „Waste-Gate“. Die „Waste-Gate“ wird von 7.5 bis 27% in 10 Sekunden geöffnet. Die stufenweise Verstellung der „Waste-Gate“ zeigt den Ablauf der Vorsteuerung und seine nicht lineare Charakteristik in Abhängigkeit der Leistung. Der Abgasgegendruck (P_{Abg}) verhält sich wie die Leistung. Die Variation des Zündzeitpunktes (ZZP) erfolgt durch die Anti-Klopf-Regelung. Dem Wert 50% entspricht ein Zündzeitpunkt von 24°KWv.OT und dem Wert 0% ein solcher von 40°KWv.OT . Das Verhalten der Abgasrückföhrdaten (AGR) ist sehr erfreulich: während der Leistungsvariation sowie bei 100 kW und bei fixer Position der AGR-Klappe bleibt die AGR-Rate konstant (20%).

Bei Erhöhung der Leistung von 100 auf 200 kW steigt die Leistung auf über 200 kW während zwei Minuten. Dies kommt von der starken Reaktion des Turboladers und könnte mit einer weiteren Optimierung der Vorsteuerung verbessert werden.

Das **Bild 3b** stellt die Abgasemissionen CO und NO_x dar, sowie das Signal der Lambda-Sonde (in Volt) und wiederum die Leistung. Mit der Reduktion der Leistung wird das Gemisch fett (Lambda<1). Dies wird durch die Lambda- Sonde erkannt und die Lambda-Regelung korrigiert die Einstellung des Gasmischers, um Lambda=1 einzuhalten. Bei Erhöhung der Leistung wird eine NO_x-Spitze verhindert, jedoch macht sich eine CO-Spitze über circa 150 Sekunden bemerkbar. In beiden Fällen bleiben die Abgasemissionen unter den Grenzwerten für die Stadt Zürich.

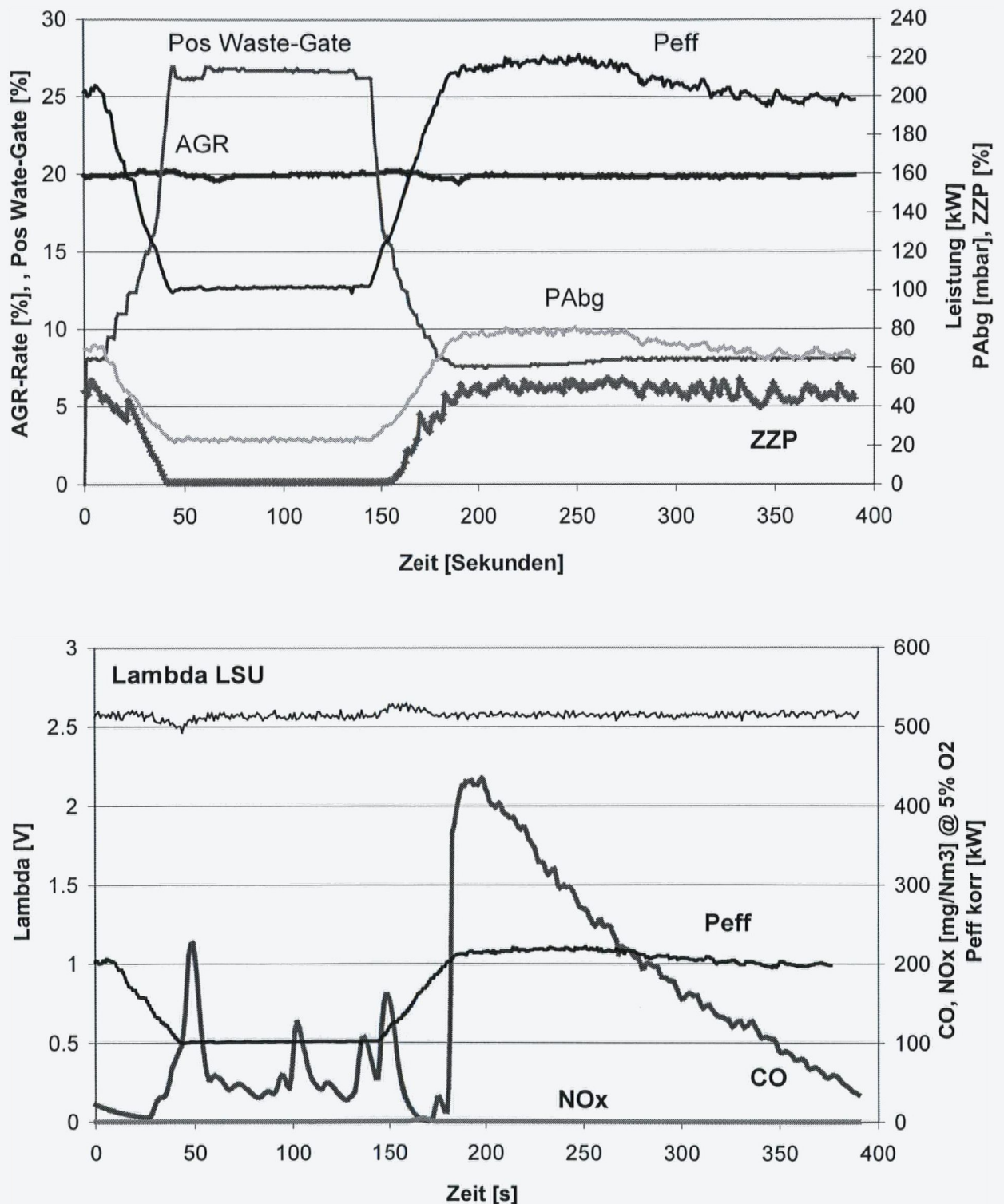


Bild 3a, 3b: Leistungsrampe mit der „Waste-Gate“.

6.1.2 Leistungsrampe mit der Drosselklappe

Aus Zeitgründen wurde die Drosselklappe mit der Prüfstandsbedienung direkt angesteuert. Das **Bild 4a** zeigt die Versuchsergebnisse. Die Drosselklappe wird linear in 10 Sekunden von 100%-Öffnung auf 29% geschlossen. Ab 50% beginnt die Leistung zu sinken, und somit findet die effektive Leistungsrampe in nur 3 Sekunden statt. Der Verlauf der anderen Parameter ist ähnlich wie mit der Variation mit der „Waste-Gate“. Die AGR-Rate bleibt konstant (die kleine Schwingungen kommen von der schnellen Rampe und somit von der Verzögerung zwischen den beiden CO₂ Messungen für die Bestimmung der AGR-Rate). Die Abgasemissionen bleiben unten den Grenzwerten der Stadt Zürich.

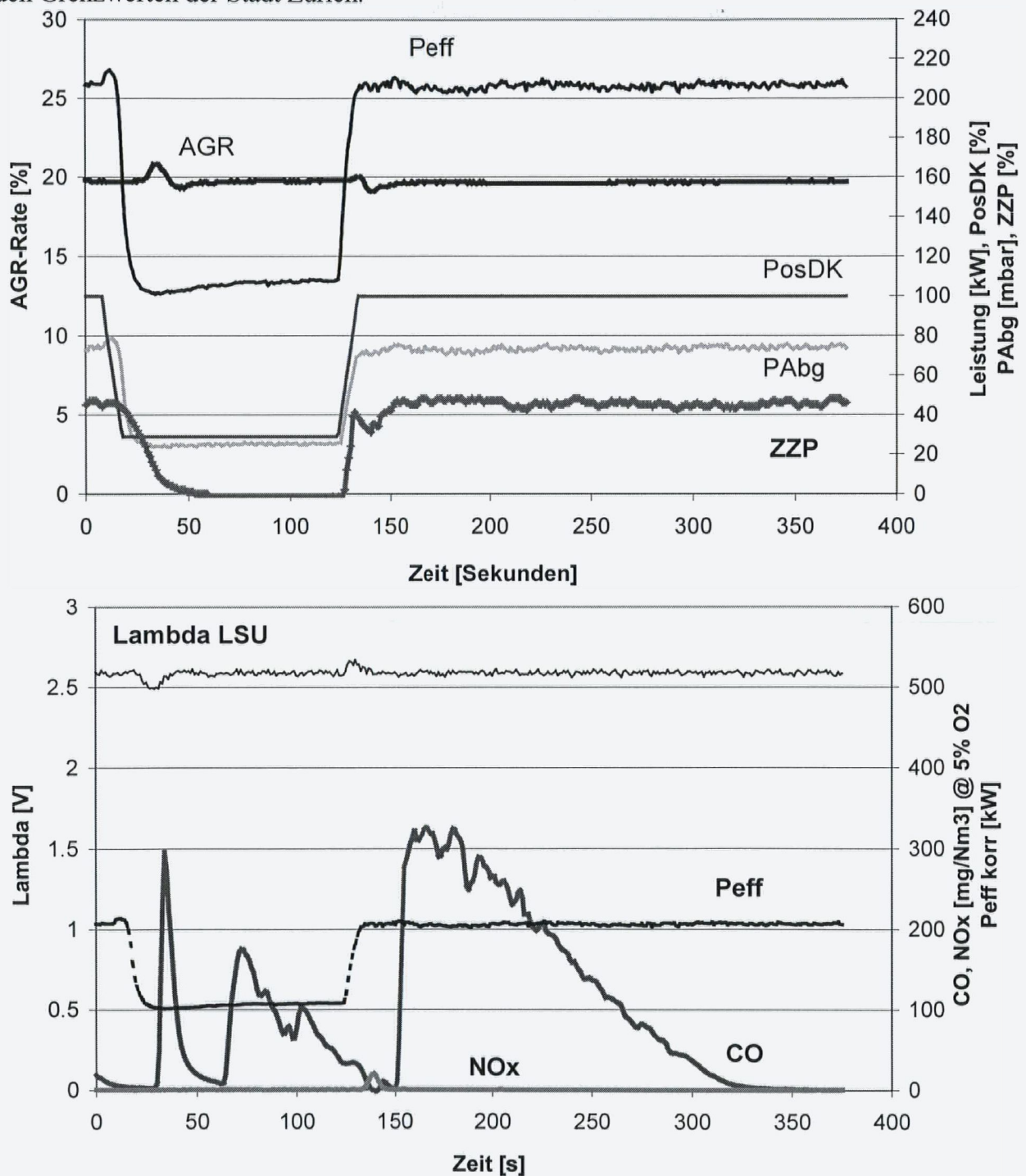


Bild 4a, 4b: Leistungsrampe mit Drosselklappe.

6.2 Gasumschaltungen

Die Gasschaltungen wurden mit Modellbrennstoffe realisiert, die die extremsten Variationen der Erdgaszusammensetzung darstellen. Ihre Eigenschaften sind in der **Tabelle 1** angegeben. Eine spezielle Infrastruktur erlaubt uns, entweder Erdgas direkt ab Netz oder vorbereitete Gasgemische ab Gasflaschen (Bündel) zu beziehen. Für diese Versuche fahren wir mit Brennstoff ab Flaschen.

Gastyp		Gas 1	Gas 2	Gas 3
Methan (CH_4)	%V	92	92	98
Stickstoff (N_2)	%V	7	1	1
Ethan (C_2H_6)	%V	1	7	1
Untere Heizwert	MJ/kg	44.22	48.89	49.11
Stoichiometrischer Luftbedarf	$\text{kg}_{\text{Luft}}/\text{kg}_{\text{Br.}}$	15.23	16.81	16.91
Dichte (1013mbar,273K)	kg/m^3	0.761	0.767	0.729

Tabelle 1: Eigenschaften der Modellbrennstoffe.

Ablauf der Versuche: Die Versuche wurden bei Nennleistung (200 kW) und ein Einlasstemperatur von 90°C durchgeführt. Die Umschaltung der beiden Gassorten wurden mit zwei 2 Wege-Ventilen realisiert.

Die Gase 2 und 3 haben sehr ähnliche Heizwerte und stoichiometrische Luftbedarfe. Der grösste Einfluss wurde mit der Umschaltung zwischen das Gas 1 und das Gas 2 bemerkt. Die Ergebnisse zeigen die Umschaltungen zwischen diesen beide Gasen.

6.2.1 Schaltung Gas 1 → Gas 2

(92% CH_4 , 7% N_2 , 1% C_2H_6 → 92% CH_4 , 1% N_2 , 7% C_2H_6)

Das **Bild 5** zeigt die zeitliche Veränderung der Gemischzusammensetzung sowie der relevanten Schadstoffemissionen CO und NO_x infolge des Gasprunges. Infolge des grösseren stoichiometrischen Luftbedarfs vom Gas 2 wird das Gemisch stark angereichert, was zu einer CO-Spitze führt. Gestützt auf das Signal der Lambda-Sonde wird die Lambda-Regelung ein stoichiometrisches Gemisch wieder herstellen. Die leichte Leistungserhöhung wird ebenfalls korrigiert. Der Zündzeitpunkt wird automatisch in Richtung spät verschoben (**Bild 6**) um das Klopfen zu vermeiden. Die höhere Klopfneigung mit Gas 2 ist die Konsequenz des grösseren Anteils an höheren Kohlenwasserstoffen im Brennstoff.

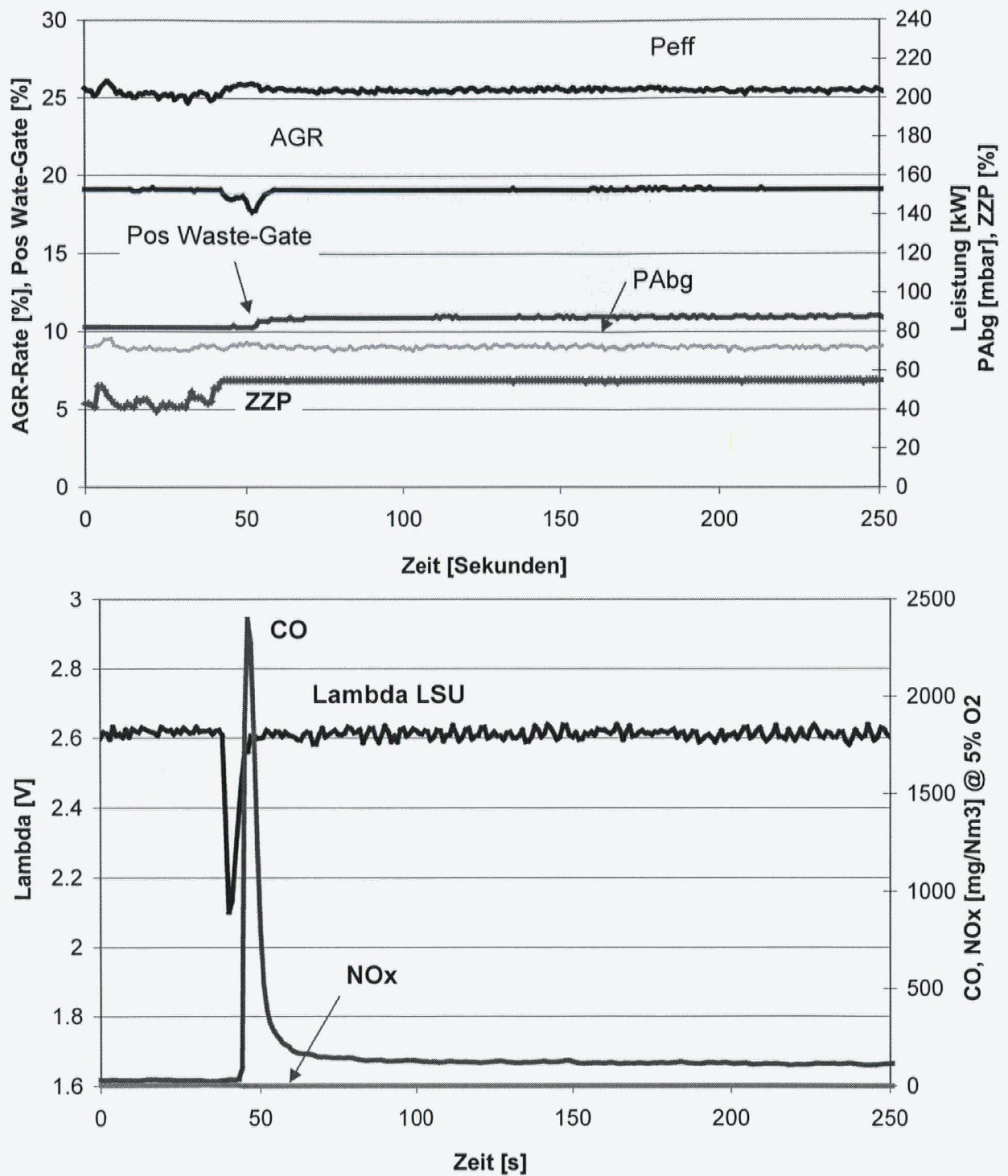


Bild 5 und 6 : Umschaltung 92%CH₄, 7%N₂, 1%C₂H₆ → 92%CH₄, 1%N₂, 7%C₂H₆.

6.2.2 Umschaltung Gas 2 → Gas 1

(92%CH₄, 1%N₂, 7%C₂H₆ → 92%CH₄, 7%N₂, 1%C₂H₆)

Die Umschaltung in die andere Richtung erweist ein umgekehrtes Verhalten bezüglich Leistung und Emissionen. Die resultierende Abmagerung führt zu einer NO_x-Spitze (Fig. 7). Mit diesem „schlechteren“ Brennstoff sinkt die Leistung. Hier wiederum kann die Regelung diese beide Abweichungen korrigieren. Der Zündzeitpunkt wird wieder in Richtung früh verstellt.

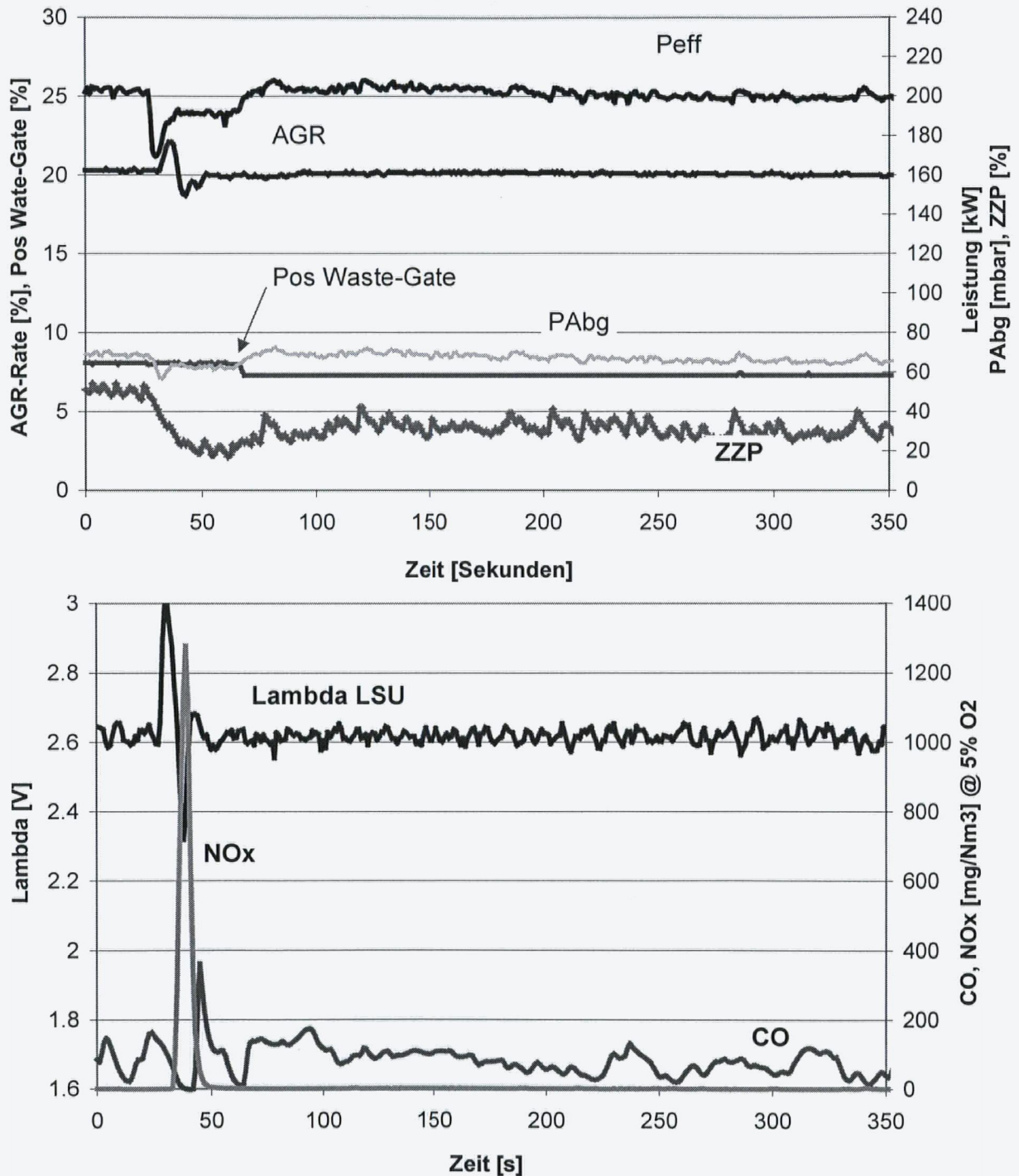


Bild 7 und 8: Umschaltung 92%CH₄, 1%N₂, 7%C₂H₆ → 92%CH₄, 7%N₂, 1%C₂H₆.

7 VORSCHLÄGE FÜR DIE PRAXIS

- Bei Variation der Motorleistung und fester Position der AGR-Klappe bleibt die Abgasrückführrate konstant. Wenn dieses Verhalten in der Praxis (*Dimag* Anlage) reproduzierbar ist, könnte das AGR-Ventil gesteuert werden, anstatt geregelt. Beispiel:
 - Position 1 beim Starten (wenig offen)
 - Position 2 bei Teillast: der Motor läuft besser mit weniger AGR-Rate bei mittlerer Leistung, die Abgastemperatur bleibt auf einem höheren Niveau, was vorteilhaft für die Abgasnachbehandlung ist
 - Position 3 bei Vollast
- Weil es aus Kostengründen nicht möglich ist, kontinuierliche Messungen der AGR-Rate zu realisieren (zwei CO₂-Messstelle sind nötig), sollte eine solche Messung für die Überprüfung der AGR-Rate bei der Wartung stattfinden. Bei einer allfälligen Abweichung sollte dann die AGR-Rate wieder justiert werden.
- Die Funktionalität der „Waste-Gate“ kann durch die Drosselklappe ersetzt werden. Als Nachteil ergibt sich einen leicht höheren Verbrauch bei Teillast (Drosselverluste)

8 DANKSAGUNG

Dieses Teilprojekt wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) finanziell unterstützt. Wir möchten uns auch herzlich bei den Mitarbeitern der Abteilung Feuerung und Verbrennungsmotoren der EMPA in Dübendorf bedanken, wo die Messungen stattgefunden haben: Dr. Paul und Herr Schweizer für die finanzielle Unterstützung sowie den Herren Graf, Ziegler und Mack für das Engagement bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen. Schliesslich sind wir unseren Kollegen am IMRT, der Prof. Guzzella und Herr Matter, für die Realisierung der Regelung zu Dank verpflichtet, sowie unseren Technikkollegen am LVV, die Herren Egli, Eberli, Obrecht, Décosterd und Sannemann für die Modifikationen am Versuchsträger.

9 SYMBOLVERZEICHNIS

°KWv.OT Grad Kurbenwelle vor dem Oberen Totpunkt

10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Nellen, Ch.; Boulouchos, K.: Turbocharged Gas Engine With EGR and 3-Way catalyst: Ultra Low Emissions with High Efficiency and Power Density, MTZ 61 (1), pp.17-20, 2000.
- [2] Nellen, Ch.; Boulouchos, K.: Natural Gas Engines for Cogeneration: Highest Efficiency and Near-Zero-Emissions through Turbocharging, EGR and 3-Way Catalytic Converter, SAE Technical Paper 2000-01-2825.

Regelung des SwissMotors für den praktischen BHKW-Einsatz

Am Institut für Energietechnik der *ETH Zürich* wurde ein neues Konzept für einen aufgeladenen Gasmotor mit Abgasrückführung entwickelt und in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma *LIEBHERR* erprobt. Der als *SwissMotor* bezeichnete Gasmotor erreicht gegenüber konventionellen Motoren mit stöchiometrischem Betrieb einen um rund 20% höheren mechanischen Wirkungsgrad (es wurden in der Leistungsklasse 150 bis 200 kW über 40% erreicht!), bei gleichem Hubvolumen um etwa 60% höhere Leistung und wesentlich tiefere Emissionswerte auf. Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden für den *SwissMotor* im Auftrag des Bundesamts für Energie eine Regelung zur automatische Anpassung des Motorbetriebs und des Abgasnachbehandlungssystems bei Variation der Motorlast und bei Änderung der Erdgaszusammensetzung entwickelt und experimentell erprobt:

Um diese Anforderungen zu erfüllen, sind folgende Regelkreise von Bedeutung: Lambda-Regelung (Abgasnachbehandlung), Ladetemperatur (Leistung und Klopfendenz), Temperatur des rückgeführten Abgases (Einfluss auf die Abgasrückführungsrate und die Klopfendenz) und Zündzeitpunkt (Klopfendenz, Leistung und Wirkungsgrad). Wie die Messungen auf dem Motorenprüfstand der *EMPA-Dübendorf* (Bild 1) zeigten, konnten mit dem neuen Regelungskonzept die gestellten Anforderungen voll erfüllt werden:

- Nicht nur im stationären Betrieb sondern auch bei Variation der Motorleistung konnten die Abgasemissionen deutlich unter den sehr strengen Grenzwerten für die Stadt Zürich gehalten werden.
- Das neue Regelungskonzept vermag die in der Praxis vorkommende Variation der Gaszusammensetzung hervorragend zu bewältigen. Selbst bei sprungartigen Zusammensetzungsänderungen verschwinden die damit verbundenen kurzzeitigen Peaks der CO- und NO_x-Emissionen innerhalb von weniger als 10 Sekunden.

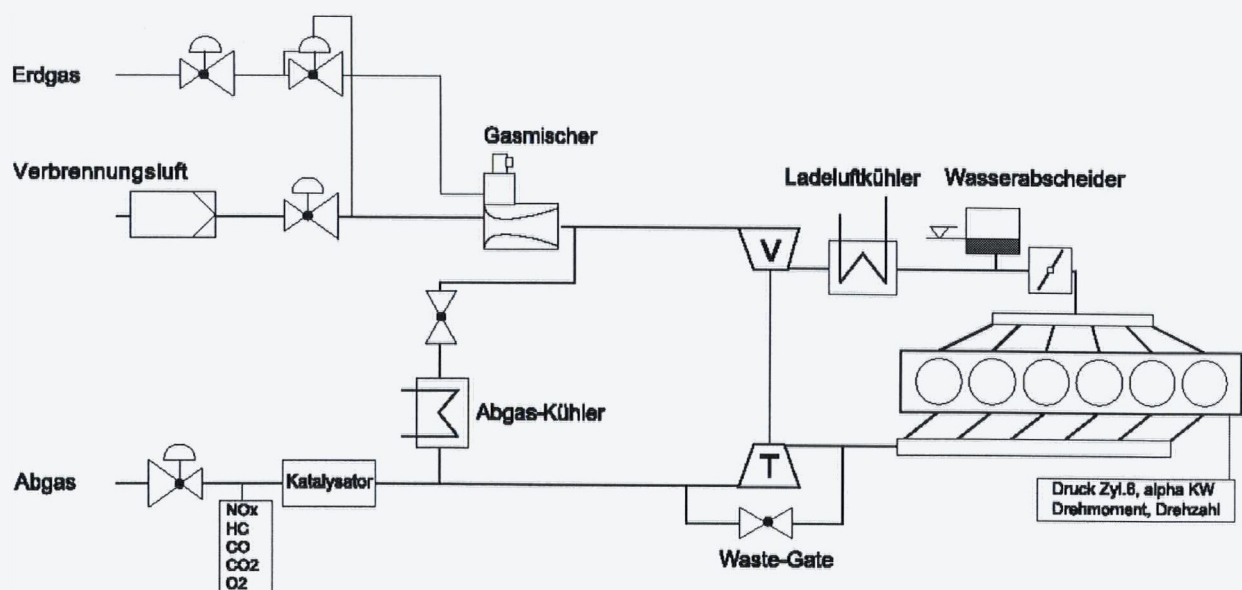


Bild 1: Versuchsanordnung zur Erprobung der Regelung des SwissMotors für Betrieb bei Teillast und variabler Erdgaszusammensetzung [aus Schlussbericht].

In einer nächsten Projektphase wird das Regelungskonzept auf das für den praktischen BHKW-Betrieb Notwendige vereinfacht. In einer anschliessenden Felderprobung wird dem weltrekordverdächtigen *SwissMotors* der Weg für den kommerziellen Einsatz in Blockheizkraftwerken mit höchsten elektrischen Wirkungsgraden und geringsten Emissionen geebnet.

Dr. Martin Zogg

Forschungsprogrammleiter Umgebungswärme, Abwärme, WKK (UAW) des Bundesamts für Energie www.waermepumpe.ch/fe martin.zogg@bluewin.ch

Ausführlicher Schlussbericht zu diesem BFE-Forschungsprojekt:

Ch.Nellen, K.Boulouchos, Ch.Schaer, Ch.Onder: Regelung des *SwissMotors* für den Einsatz in der Praxis, Bundesamt für Energie 2000.

Gratis Download in www.waermepumpe.ch/fe Rubrik „Berichte“

Bestellung der schriftlichen Fassung unter der ENET-Nummer 0039708 bei
ENET, Egnacherstrasse 69, 9320 Arbon, 071-440-02-55, enet@temas.ch