

Ismet Demirdelen

Nutzung der keramischen Glühkerze als Sensorelement

Ismet Demirdelen

Nutzung der keramischen Glühkerze als Sensorelement

Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik
Band 29

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände
finden Sie am Ende des Buchs.

Nutzung der keramischen Glühkerze als Sensorelement

von
Ismet Demirdelen

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Industrielle Informationstechnik

Nutzung der keramischen Glühkerze als Sensorelement

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.) von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informations-
technik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte
Dissertation

von Ismet Demirdelen

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Januar 2022
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. M. Heizmann, KIT
Korreferent: Prof. Dr. sc. techn. T. Koch, KIT

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2024 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2190-6629
ISBN 978-3-7315-1265-3
DOI 10.5445/KSP/1000153073

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Industrielle Informationstechnik am Karlsruher Institut für Technologie.

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinem verstorbenen Doktorvater Fernando Puente León für die hervorragende fachliche Unterstützung und Betreuung. Die konstruktiven Gespräche mit Prof. Dr.-Ing. Puente León leiteten schließlich diese Arbeit in die Wege.

Prof. Michael Heizmann danke ich vom ganzen Herzen für die Übernahme der Betreuung und die konstruktive Kritik. Dadurch konnte die Arbeit zu Ende gebracht werden.

Bei der Gelegenheit sei auch dem Herrn Prof. Koch gedankt, der als Zweitgutachter die Arbeit beurteilt hat.

Besonders hervorheben möchte ich Dr. Toedter, der seitens BorgWarner diese Arbeit in die Wege geleitet und mich von Anfang an mit Anregungen tatkräftig unterstützt hat. Bei der Unternehmungsleitung von BorgWarner bedanke ich mich für die finanzielle Unterstützung. Nicht unerwähnt lassen möchte ich die Unterstützung von Markus Wetzel sowie die Kollegen bei BorgWarner für meine Aktivitäten bei BorgWarner.

Mein Dank gilt zudem an Kollegen, insbesondere an Kristine Back und Oliver Opalko, die mich energisch durch erfrischende Diskussionen und konstruktive Kritik oder auch durch verschiedene Aktivitäten bei meiner Promotion emotional und physisch motiviert und unterstützt haben.

Ein aufrichtiges Dankeschön geht an Frau Moritz und Herrn Brandt, die mich während meiner Zeit im Institut als Ansprechpartner bei organisatorischen Angelegenheiten unterstützten.

Ein spezieller Dank gilt an die Studenten, die mit ihrer tatkräftigen Hilfe und wissenschaftlichen Arbeiten zum Gelingen meiner Arbeit beitrugen.

Zu guter Letzt gilt mein herzlicher Dank meiner Frau Selin Demirdelen, meinen Eltern Ahmet und Fatma Demirdelen, meinen Geschwistern Iskan und Ispek Demirdelen, meinen Kindern Defne und Arya, außerdem übrigen Famili-

enmitgliedern sowie meinen Freunden, die in jeder Situation mich mit Rat und Tat motiviert, einen moralischen Beistand geleistet haben, und vor allem auf das Geleistete stolz waren. Meiner Familie möchte ich demzufolge diese Arbeit widmen.

Karlsruhe, Oktober 2023

Ismet Demirdelen

Abstract

The high cycle rate of technological advancement in the automotive sector enables information extraction from the engine compartment with using of existing hardware in the vehicle, without additional space, material and cost. Above all, the shortage of space in the engine block makes it difficult to use additional sensors in the combustion chamber. In this context, ceramic glow plugs, which are used in diesel vehicles to support and optimize the combustion process, are investigated. They usually remain active for three minutes. The ceramic glow plug differs from metal glow plugs primarily in terms of start time and heat provided. It has a higher resistance at the cap, which extends into the combustion chamber.

The question is what these could be useful for after three minutes. On the one hand, ceramic glow plugs could remain active as an actuator to reduce emissions. On the other hand, these can be used as a sensor. This work is shown that glow plugs are able to reliably provide useful information from the combustion chamber of a diesel vehicle. The first step is a simulative analysis of the glow plug, using an FDM model. Starting from the conversion of electrical energy into heat, the quality of heat absorption determines the basis of this analysis. It turned out that temperature changes in the immediate vicinity of the glow plug modify its resistance. The results of the simulation can be confirmed with measurement data.

The resistance of the ceramic glow plug, which has a dependence with the environmental influences such as temperature, is used as a sensor signal. This signal is filtered with a bandpass filter so that the high-frequency noise and the changes of the low-frequency temperature are suppressed as much as possible.

A total of four variables are determined using these sensor signals: the speed, the moment and duration of injection, the combustion chamber temperature and the pressure. The exact determination of the speed (5 % standard deviation of the speed), the moment of injection as well as its duration can be determined using the sensor signal. Using existing measurement data, the moment of injec-

tion could only be sufficiently verified in the lower speed range up to 1500 min^{-1} and satisfactory results were obtained.

The temperature and pressure are determined using a Hammerstein model. The measurement data recorded during this work does not include all engine operating points. In particular, the dynamic combustion temperature signal could not be recorded on the engine test bench to verify the estimate for various reasons.

This work shows that the initialization of the glow plug must be improved. This would make the estimation methods of the temperature and pressure less dependent on the scattering of the glow plug parameters, which has a direct negative effect on the error of the specific pressure/temperature. Another interesting topic would be a combustion chamber design for measuring the temperature with a higher sampling rate by a camera, or using a CFD combustion chamber model to verify the temperature estimation results. The models must then be optimized and verified using new measurement data.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Abstract	iii
Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Gliederung und Überblick	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Sensoren	5
2.2 Sensoren im Brennraum	6
2.3 Erkennung des Einspritzbeginns und -endes	11
2.4 Drehzahlermittlung	13
2.5 Ermittlung der Brennraumtemperatur	16
2.6 Ermittlung des Brennraumdrucks	20
2.7 Fazit	23
3 Keramikglühkerze	25
3.1 Aufbau der Keramikglühkerze	27
3.1.1 Herstellung des elektrisch leitfähigen Keramikteils	28
3.1.2 Geometrische Darstellung und Materialeigenschaften	30
3.2 Kaltstarthilfe: Funktionalität der Keramikglühkerze als Aktuator	32
3.3 Herstellungsbedingte Streuung der Keramikglühkerzen	35
3.4 Fazit	37
4 Dieselmotoren	39
4.1 Dieselmotor: Grundlagen der Verbrennung	40
4.2 Position und Rolle der Keramikglühkerze im Brennraum	43

4.3	Common-Rail-Direkteinspritzung	44
4.3.1	Einspritzdüsenformen	45
4.3.2	Eindringtiefe, Lage des Injektors und Kraftstoffmasse	47
4.3.3	Einspritzdruck und -temperatur	48
4.3.4	Mehrfacheinspritzung und Einspritzstellen	49
4.4	Verbrennung mit Zündverzug	51
4.4.1	Fazit	51
5	Sensorsignale	53
5.1	Modellbasierte Analyse der Glühkerzen	53
5.1.1	Finite-Differenzen-Methode	56
5.1.2	Diskretisierung des zu modellierenden Kerzenbereichs	62
5.1.3	Ermittlung der vom Ohmschen Gesetz postulierten Größen	62
5.1.4	Anpassung und Optimierung des bestehenden KGK-Modells	65
5.2	Durchgeführte Messungen	70
5.2.1	Keramikglühkerze als Heizelement	72
5.2.2	Keramikglühkerze als Signalgeber	77
5.3	Fazit	98
6	Intelligente Informationsgewinnung aus dem Brennraum	101
6.1	Methode zur Detektion des Einspritzbeginns und -endes	102
6.1.1	Messprinzip	103
6.1.2	Schätzmethode	106
6.1.3	Fazit	120
6.2	Methode zur Bestimmung der Motordrehzahl	122
6.2.1	Messprinzip	122
6.2.2	Diskussion der Abhängigkeiten der Signale	123
6.2.3	Vorgehensweise	127
6.2.4	Diskussion der Messdaten	133
6.2.5	Fazit	139
6.3	Methode zur Schätzung der Brennraumtemperatur	140
6.3.1	Einfluss der Temperatur auf den Widerstand	141

6.3.2	Lineare Systembetrachtung mit Modellvereinfachungen	142
6.3.3	Erweiterte Systembetrachtung mit Nichtlinearitäten . .	165
6.3.4	Diskussion der Messdaten	177
6.3.5	Fazit	193
6.4	Methode zur Schätzung des Brennraumdrucks	196
6.4.1	(Nichtlineare) Modellierung	199
6.4.2	Fazit	212
7	Zusammenfassung und Ausblick	213
	Literaturverzeichnis	219
	Eigene Veröffentlichungen	228
	Betreute studentische Arbeiten	228

Symbolverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CARS	Kohärente Anti-Stokes-Raman-Streuung Coherent anti-Stokes Raman Scattering
CGP	<i>Ceramic Glow Plug</i>
DWK	Druckwellenkorrektur
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
ECU	Motorsteuergerät
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FVM	Finite-Volumen-Methode
HE	Haupteinspritzung
HM	Hammerstein-Modell
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
IMA	Injektormengenabgleich
ISS	<i>Instant Start System</i> Schnellstartsystem
KGK	Keramikglühkerze
KW	Kurbelwellenwinkel
LIN	<i>Local Interconnect Network</i>
LKW	Lastkraftwagen
LS	Least squares Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate
MI	Magnetinjektoren
MGK	Metallglühkerze

MMA	Mengenmittelwertadaption
MBP	Motorbetriebspunkt
MTZ	Motortechnische Zeitschrift
MW	Mittelwert
NMK	Nullmengenkalibrierung
OT	Oberer Totpunkt
PDE	Partielle Differentialgleichung
PI	Piezoinjektoren
PKW	Personenkraftwagen
PSG	<i>Pressure Sensor Glow Plug</i> Drucksensor-Glühkerze
PWM	Pulsweitenmodulation
PTC	Positiver Temperaturkoeffizient
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RLS	<i>Recursive Least squares</i> Rekursives Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate
SVM	Support vector machine
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
TYP-R	Thermoelement, Materialien <i>Pt13Rh – Pt</i>
UM	Uryson-Modell
UT	Unterer Totpunkt
VE	Voreinspritzung

Symbole

AlN	Aluminiumnitrid
MoSi ₂	Molybdändisilizid
Pt13Rh – Pt	PlatinRhodium-Platin
Si ₃ Ni ₄	Siliziumnitrid
Y ₂ O ₃	Yttriumoxid

Parameter

A	Fläche
A_D	Düsenlochquerschnitt
a	Wärmeleitkoeffizient
α	Stefan-Boltzmann-Konstante
c	Spezifische Wärmekapazität
Δ_p	Differenzdruck
ϵ	Emissionsgrad des Strahlers
inj	Einspritzmenge
λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	Mittelwert
μ_n	Negative Ladungsträgerbeweglichkeit
μ_p	Positive Ladungsträgerbeweglichkeit
m	Stoffmenge
N	Negative Ladungsträgerdichte
n	Motordrehzahl
n_M	Brechzahl eines Mediums
O	Oberfläche
P	Positive Ladungsträgerdichte
p	Druck
p_{eff}	Effektiver Druck
q	Ladung
Q	Energiestrom
Q_{in}	Wärmezufuhr
Q_{aus}	Wärmeabfuhr
Q_{th}	Thermische Wärmezufuhr
R	Widerstand
R_m	Molare Gaskonstante
ρ	Spezifischer Widerstand
ρ_K	Kraftstoffdichte
σ	Varianz
T	Temperatur
T_{abs}	Absolute Temperatur
T_{cool}	Kühlwassertemperatur
τ	Verzögerungszeit

U	Spannung
W	Arbeit
W_e	Leistungsdichte
V	Volumen
V_K	Einspritzvolumen
z	Zylinderanzahl

1 Einleitung

Dieselmotoren spielen trotz ihres schlechten Wirkungsgrades¹ sowie des Abgas-Skandals mit einem Anteil von 31,7 %² hierzulande eine relevante Rolle, da sie mit einem spezifischen Kraftstoffverbrauch in der Größenordnung von 180 g/kWh³ [23] die wirtschaftlichsten aller Verbrennungsmotoren sind. Der Verbrennungsprozess des Dieselmotors unterscheidet sich vom fremdgezündeten Benzinmotor darin, dass das Luft-Diesel-Gemisch ohne Fremdzündung (Selbstzündung) bei bestimmtem Druck und Temperatur verbrennt und zum Antrieb des Kolbens führt. Damit dieser Verbrennungsprozess im kalten Motorzustand ein Ottomotor-ähnliches Verhalten ohne „Nageln“ aufweist, kommen Glühkerzen standardmäßig zum Einsatz. Das (Kaltstart-)Nageln entsteht, da der Diesel-Kraftstoff sich schlagartig entzündet (explosionsartige Entflammung mit vergrößertem Zündverzug).

Glühkerzen sind Heizelemente, die mit der beheizbaren Spitze in den Brennraum hineinragen und lassen sich durch Elektronik ansteuern. Dies unterstützt als Starthilfe die (Selbst-)Verbrennung des Luft-Diesel-Gemisches im kalten Zustand der Brennraumwände immens. Auf dem Markt waren zuerst die Metallglühkerzen mit eingeschränkten Funktionalitäten erhältlich. Sie liefern üblicherweise nach einer gewissen Zeit (4 bis 7 s) an der Kappe mit Heizwendel Temperaturen bis zu 950 °C [15]. Mit der Verbesserung der Elektronik und Datenkommunikation im Fahrzeug (CAN-Bus, LIN-Bus usw.) sind andere Aufgaben mit Glühkerzen vorstellbar. Das heißt, nicht nur das sichere und schnelle Anspringen an kalten Tagen, sondern auch das Verhalten während des Motorbetriebs steht im Fokus.

Das optimale Verhalten während des Motorbetriebs in diversen Betriebspunkten (Schubbetrieb sowie Volllast) ist in vieler Hinsicht relevant. Wie alle realen Prozesse zeigen auch die Diesel-Verbrennungsprozesse in einigen Berei-

¹ Wirkungsgrad der Elektromotoren liegt über 90 %.

² Aus Pressemitteilung Nr. 6/2020 des Kraftfahrtbundesamtes

³ Beispielsweise liefert der C 220 CDI T Motor den Wert von 196 g/kWh.

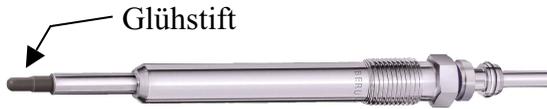


Abbildung 1.1 Foto einer Keramikglühkerze (BorgWarner).

chen ein suboptimales Verhalten. Die gleichmäßige sowie möglichst vollständige Verbrennung des Luft-Diesel-Gemisches, die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, das geräuschlose Verbrennungsverhalten sowie die Minimierung der Schadstoffemission (siehe die EU-Verordnung der CO_2 -Emissionsnormen [104]) müssen verbessert werden, ohne dabei die Verbrennungsgüte, also das Verhältnis der Leistung zu Kraftstoffverbrauch, zu verschlechtern. Dies erfordert unter anderem Optimierung der Aktoren entlang des Antriebsstranges, wozu das Glühkerzensystem neben dem Einspritzsystem zählt.

Als Nächstes wurden Steuergeräte mit steuerbaren Metallglühkerzen entwickelt, welche die gewünschten Temperaturen gezielt in jedem Motorbetriebszustand zur Verfügung stellen. Somit lassen sich diverse Glüh-Phasen (Vorheizphase, Startphase, unmittelbar nach dem Starten sowie während des Motorbetriebs) abhängig von verschiedenen Motorparametern (wie etwa der Kühlwassertemperatur) sehr genau behandeln. Die Metallglühkerzen wurden allerdings durch die Entwicklung der Keramikglühkerzen in den Schatten gestellt.

Die Keramikglühkerze, wie in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt, besteht hauptsächlich aus den Halbleiterbauelementen Molybdändisilizid (elektrisch leitfähiger Keramikwerkstoff) und Siliziumnitrid (Nichtoxid-Keramik). Diese auf Hochleistungskeramiken basierende Entwicklung liefert Temperaturen bis zu $1300^\circ C$ [15], welche ohne Alterungserscheinungen stabil zur Verfügung gestellt werden können. Die Aufheizzeit von unter 2 Sekunden, die bessere Regelbarkeit/ Steuerbarkeit in allen Glühphasen sowie die hohe Belastbarkeit sprechen als weitere Argumente für den Einsatz der Keramikglühkerzen als Heizelement.

Die vorliegende Arbeit stellt nun Verfahren zur Nutzung der Keramikglühkerze vor. Das heißt, die Keramikglühkerze (KGGK) wird nicht nur ihrer konventionellen Aufgabe als Heizelement nachgehen, sondern auch als Sensor Informationen aus dem Brennraum liefern. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf

die Widerstandsänderung, vor allem unter Einfluss einer Temperaturänderung, in unmittelbarer Umgebung der Keramikglühkerze gelegt.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin zu untersuchen, inwieweit sich die bis jetzt als Aktuator eingesetzte Keramikglühkerze als Sensorelement ohne Zusatzaufbauten für den Informationsgewinn aus dem Brennraum, d. h. zur Bestimmung einer Reihe von Größen wie etwa Drehzahl, Einspritzzeitpunkte, Druck sowie Temperatur eignet. Dabei ist die Modellierung der Keramikglühkerze unter Berücksichtigung des Kleinsignalverhaltens – bei höheren Frequenzen – von besonderem Interesse. Zusätzlich dazu wird das Nutzsignal, d. h. der Kerzen-Widerstand, weitestgehend von Störeinflüssen durch den Einsatz von Filtern befreit. Dies ermöglicht schließlich eine Aussage über die Signalgeber-Charakteristik der Keramikglühkerze.

1.1 Gliederung und Überblick

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert. Das nächste Kapitel fokussiert sich auf den Stand der Technik im Bereich des Verbrennungsvorgangs, wobei die aktuelle Sensorik und die Keramikglühkerzen als Aktuatoren im Antriebsstrang in den Blick genommen werden.

Ebenfalls als Grundlage wird das Kapitel der Dieselmotoren behandelt. Es soll die Funktionsweise des Diesel-Verbrennungsmotors sowie seine Geometrie erläutern.

Die Keramikglühkerze wird im darauf folgenden Kapitel detailliert dargestellt. Die Anforderungen, die an eine moderne Glühkerze zu stellen sind, die Funktionalität als Aktuator, der Aufbau der Kerze und die technische Zusammensetzung der KGK-Materialien sowie die Analyse der Keramikglühkerze als Signalgeber werden partiell diskutiert.

Das Hauptaugenmerk wird anschließend auf die Vorgehensweise zur Informationsgewinnung aus dem Sensorsignal gelegt, wobei die Signalverarbeitung und die Vorstellung der Methoden im Vordergrund stehen. Die vorgestellten Verfahren werden anhand von Messdaten, die einerseits an einem Fahrzeug und andererseits an einem Indiziermotor (Motorprüfstand) aufgezeichnet wurden, verifiziert.

Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

2 Stand der Technik

Im Brennraum kommt es während eines Verbrennungsvorganges zu einer Energieumwandlung. Die chemische Energie wird durch die diskontinuierliche innere Verbrennung in die „innere“ Energie und anschließend in die mechanische Arbeit umgewandelt. In diesem Kreisprozess entstehen die zwei direkt messbaren thermo-dynamischen Zustandsgrößen Temperatur und Druck. Dabei zeigt sich die in den Brennraum hineinragende Kerze gegenüber der Brennraumtemperatur in unmittelbarer Umgebung sehr empfindlich. Basierend auf diesem Umstand wird mithilfe des Kerzenwiderstandes die Ermittlung der vier Größen Drehzahl, Einspritzmenge, Temperatur sowie Druck, somit also die Eignung der Kerze als Sensor, in dieser Arbeit vorgestellt.

In erster Linie werden die Sensorarten zur Informationsgewinnung aus dem Brennraum diskutiert. Bevor der Blick sich auf die Betrachtung der Keramikglühkerze als Sensor richtet, soll in diesem Kapitel als Nächstes auf die bestehenden Techniken zur Messung sowie Bestimmung der soeben erwähnten Größen eingegangen werden.

2.1 Sensoren

Elektrische Sensoren sind Bauteile, die mit Hilfe von physikalischen Prinzipien eine Umformung von Größen (z. B. mechanische) – qualitativ oder quantitativ – in elektrische Größen durchführen [90]. Aktive Sensoren enthalten signalförmende und intern verstärkende Bauelemente und erzeugen ein weiter verarbeitbares elektrisches Signal. Passive Sensoren enthalten dagegen nur passive Elemente (Widerstand, Kondensator, Spule), die ihre Eigenschaften in Abhängigkeit der Messgröße ändern und benötigen zur Auswertung eine externe Energiespeisung. Das aufgenommene Signal muss in vielen Fällen vor der Nutzung verarbeitet/umgeformt werden. In Abbildung 2.1 lassen sich an dem Beispiel der Druckermittlung beide Messfühlermöglichkeiten – mit und ohne

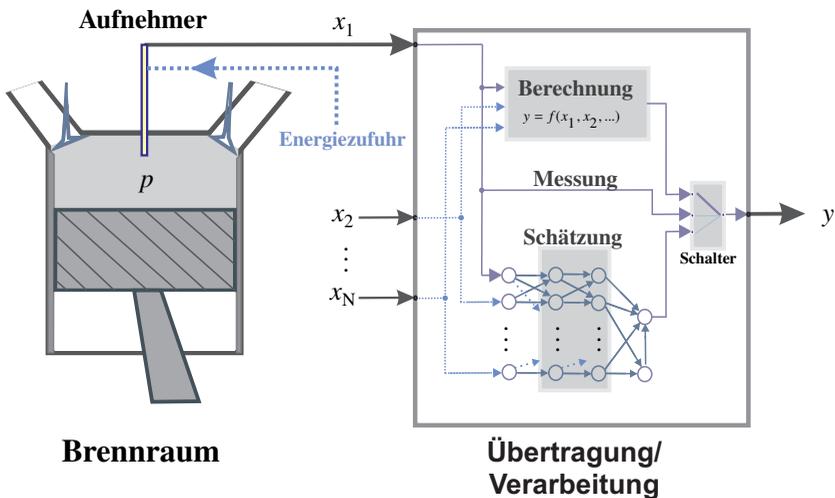


Abbildung 2.1 Mögliche Logik eines Sensors. Darstellung anhand des Beispiels der Druckermittlung mit möglichen Verarbeitungsarten. x_1 : Sensorsignal, $x_2 \dots x_N$: Weitere Eingangsgrößen, $y = \hat{p}$: Geschätzter Druck als Ausgangsgröße, p : (Brennraum-)Druck.

Energiezufuhr – sowie mögliche Verarbeitungsarten erkennen, wobei die Übertragungsmöglichkeit „Messung“ keine Verarbeitung des Aufnehmersignals vorsieht [87].

2.2 Sensoren im Brennraum

Sensoren sind mehr denn je im Brennraum erwünscht. Die thermisch mechanische Belastung (hohe Temperatur- und Druckwerte, siehe Abbildung 2.2) im Brennraum erfordert Sensor-Materialien mit hoher Stabilität und Robustheit. So werden unter anderem Werkstoffe wie etwa Silizium [9] oder Molybdän [51] eingesetzt. Derzeit werden vor allem Drucksensoren basierend auf drei unterschiedlichen Messprinzipien **piezo-elektrisch**, **(faser-)optisch** sowie **piezoresistiv** entwickelt [46] [59].

Piezo-elektrisch (*altgr. πιέζειν piezein*: „drücken“, ἤλεκτρον *élektron*: von Ηλέκτρα, welche die Tochter des Königs von Mykene, Agamemnon, ist und „die Leuchtende“ bedeutet.) [69]: Sensortechnisch betrachtet entsteht bei

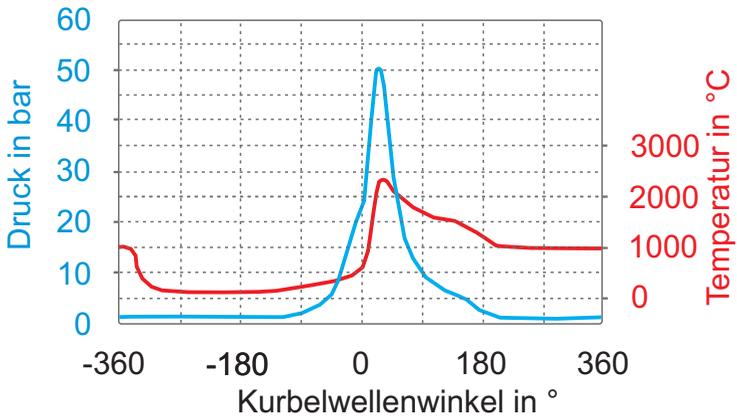


Abbildung 2.2 Druck- und Temperaturverhalten bei einem Vier-Takt-Motor.

diesem Effekt aus einem mechanischen Druck eine elektrische Spannung U . Durch die Verlagerung des positiven Ladungsschwerpunktes q^+ und des negativen Ladungsschwerpunktes q^- (Ladungsverschiebung) entsteht eine Spannung (Potentialdifferenz, Dipol), siehe Abbildung 2.3. Dieser Effekt stellt eine Interaktion zwischen der Mechanik und Elektrostatik dar und basiert bei Metallen lediglich auf einer Änderung der Geometrie. Piezoelektrische Materialien sind Kristalle, Keramiken sowie Kunststoffe, bei denen sich die Piezoelektrizität hingegen von Eigenschaften wie etwa der Perowskit-Struktur¹ oder Kristallsymmetrie ableitet. Folgende Materialien weisen beispielsweise eine Piezoelektrizität auf [94] [105]:

- **Kristalle:** Quarz (SiO_2), Turmalin, Lithiumniobat, Galliumorthophosphat.
- **Keramiken:** Bariumtitanat ($BaTiO_3$), Blei-Zirkonat-Titanate. Als elektromechanischer Wandler induzieren die Piezokeramiken lediglich unterhalb der Curietemperatur ihre piezoelektrischen Eigenschaften, da die rhomboedrischen bzw. tetragonalen Kristallitphasen sich in dem Be-

¹ Die zentrosymmetrische Perowskit-Struktur wechselt unterhalb einer kritischen Curie-Temperatur zu einem nicht-zentrosymmetrischen Perowskit-Struktur. Dabei verhält sich das Material ferroelektrisch.

reich herausbilden. Bei Einspritzsystemen werden piezoelektrische Keramiken bereits als piezoelektrisch gesteuerte Injektoren (Aktuatoren) eingesetzt.

- Kunststoffe:** Polyvinylidenfluorid sowie poröse Polymere, wo Ladungen innerhalb des Materials erzeugt und an den Oberflächen der Poren eingelagert werden.

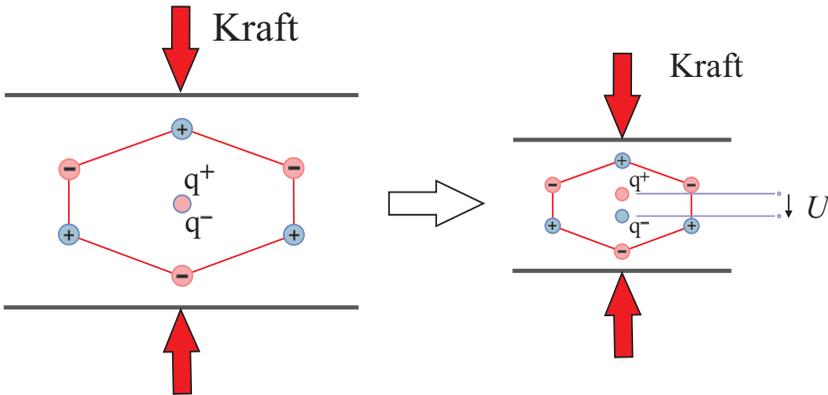


Abbildung 2.3 Direkter Piezoeffekt beim (Schwing-)Quarz [94].

Aufgrund der kurzen Ansprechzeiten wird dieses Messprinzip im Brennraum oft eingesetzt.

(Faser-)optisch (bekannt auch als *Fiberoptik* oder *fused fiber optics*): Bei dieser Technik werden optoelektrische Komponenten zur Messung verschiedener physikalischer Größen wie Druck oder Temperatur eingesetzt. Wie in Abbildung 2.4 beispielhaft dargestellt, breitet sich das Licht in Faserrichtung in der optischen Faser aus. Im Bereich der Glasfaser werden die Eigenschaften von Lichtleitungen lokal geändert. Die Lichtstrahlen wandern durch die Glasfaser, bis sie auf eine optische Unstetigkeit treffen. Dort wird ein Teil des Strahls mit speziellen Wellenlängen reflektiert. Das restliche Bündel elektromagnetischer Wellen geht in die transparente temperaturempfindliche Schicht hinein, wo die Laufzeit des Lichtes sich temperaturabhängig ändert. Diese Änderung ruft eine Phasenverschiebung hervor. An der nächsten Unstetigkeitsstelle zwischen dieser Schicht und dem Metall wird anschließend das elektromagnetische Wellenbündel vollständig reflektiert. Aus der Phasendifferenz zwischen

den reflektierten Strahlen lässt sich anschließend die Brechzahl des Mediums n_M ermitteln, welche wiederum unter anderem von der zu bestimmenden Temperatur abhängt: $n_M = f(T)$. Externe elektromagnetische Interferenzen und Rauschen weisen keine Auswirkungen auf die optische Faser auf.

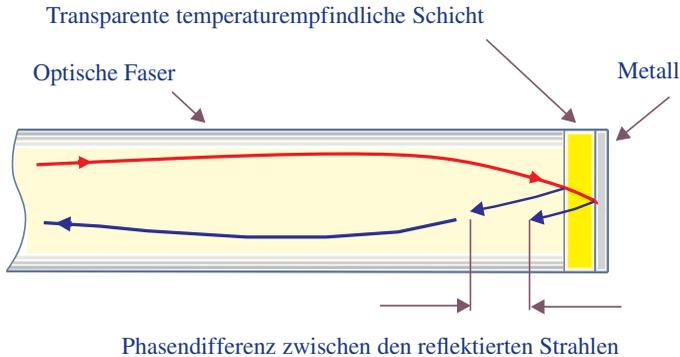


Abbildung 2.4 Faseroptischer Temperatursensor (Bewertung des Phasenunterschieds). 2010 Chipkin Automation Systems Inc.

Piezoresistiv: Bei diesem Effekt wird die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von den mechanischen Belastungen im Metall oder in Halbleiterkristallen genutzt. Ein gutes Beispiel ist die Siliziummembran, welche sich wie eine Feder verhält und an einigen Stellen n- oder p-dotiert wird. Basierend auf einer Wheatstone'schen Messbrücke wird das Sensorsignal ermittelt. Für die Widerstandsänderung gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho}, \rho = \frac{1}{|q| \cdot (N \cdot \mu_n + P \cdot \mu_p)},$$

wobei ρ der spezifische Widerstand, N die negative und P die positive Ladungsträgerdichte, μ_n die negative sowie μ_p die positive Ladungsträgerbeweglichkeit wiedergeben. Abgesehen von der Grundlogik werden beim Entwickeln von piezoresistiven Sensoren die mechanischen, thermischen und elektrischen Effekte sowie deren Wechselwirkungen im Sensor ebenfalls berücksichtigt. Die Verkopplung möglicher physikalischer Effekte sowie Parameter wird in Abbildung 2.5 illustriert. Als Folge der von außen in den Sensor eintretenden Wärmemenge Q_{th} (entspricht der Wärmeenergie), dem auf den Sensor einwirkenden Druck p sowie der eingespeisten elektrischen Energie I (Strom) als Anrege-

signal entstehen im piezoresistiven Drucksensorensystem Interaktionen zwischen den mechanischen, thermischen und elektrischen Domänen. Die Wechselwirkungen sind dabei bei der Messung des Druckes anhand der Spannung U zu berücksichtigen.

Der Messbereich von 0,02 bis 400 bar deckt den ganzen Druckbereich der dieselmotorischen Verbrennung ab. Das piezoresistive Prinzip wird aufgrund seiner Mess- und Kalibrierungskapazität oft angewendet.

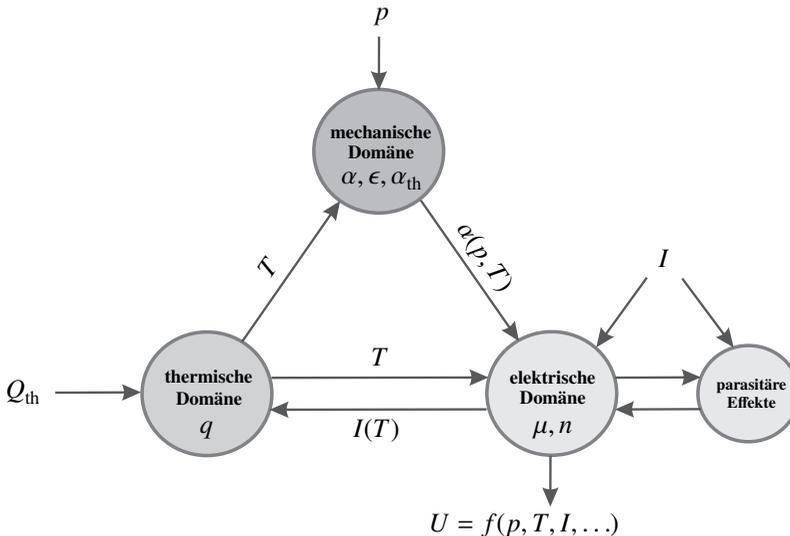


Abbildung 2.5 Physikalische Effekte in einem piezoresistiven Drucksensor [24].

Ein weiteres erwähnenswertes² Messprinzip ist die auf dem **Ionenstromeffekt** basierenden Messprinzip. Dieses kann beispielsweise zur Detektion klopfender Verbrennung [41] oder um Rückschlüsse über den Verbrennungsvorgang ([100] und [34]) zu erhalten eingesetzt werden. Die zur Ionenstrommessung verwendeten Glühkerzen weisen hierbei eine Messelektrode in der Glühkerzenspitze auf. Der Verbrennungsvorgang erzeugt dort Ionen, die einen Stromfluss, welcher anschließend zur Informationsgewinnung dient, verursachen.

² Einsatz dieses Prinzips mit Glühkerzen

2.3 Erkennung des Einspritzbeginns und -endes

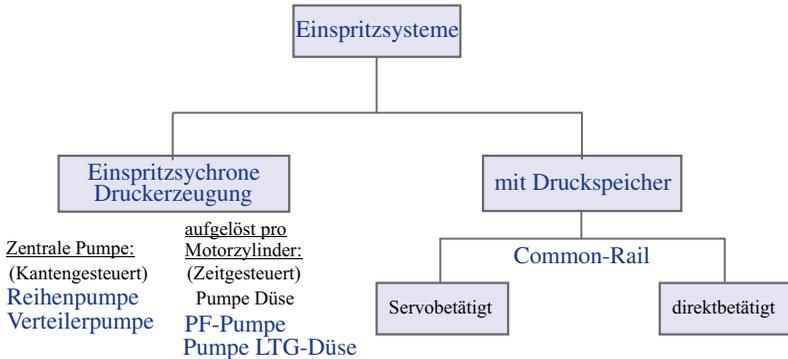


Abbildung 2.6 Entwickelte Einspritzsysteme mit Mehrlochdüsen [25] [102].

Ausgehend von der theoretischen und praktischen Feststellung, die Kraftstoffverbrennung in Dieselmotoren könne stark von der aktiven technischen Einbringungsform des Kraftstoffes in den Brennraum abhängen, wurden in der Geschichte der Dieselmotoren diverse Techniken zur Einspritzung des Kraftstoffes in den Brennraum untersucht und getestet. Dabei ist in erster Linie das Ermöglichen eines optimalen Luft-Kraftstoff-Gemisches innerhalb eines Arbeitszyklus relevant. Diese effiziente innere Gemischbildung kann einerseits Kraftstoffverbrauch und andererseits Geräusche, Emission und Motorschäden mindern. Ein weiterer gewünschter Aspekt ist die Erhöhung der Motorleistung. Letzten Endes setzte sich die Direkteinspritztechnologie durch, da sie diesen Erwartungen am meisten gerecht wird. Generell werden die Einspritzsysteme mit Mehrlochdüsen in zwei Gruppen aufgeteilt: einspritzsynchrone Druckerzeugung und Common-Rail, siehe Abbildung 2.6.

Im Vergleich zu den Nocken gesteuerten Druckerzeugungsverfahren ist das Common-Rail-System am flexibelsten. Mit dem Common-Rail-System, welches den von einer Pumpe hoch verdichteten Dieselmotorkraftstoff in das Speicherrohr transportiert und dort mit einem sehr hohen Druck (150 bar im Leerlauf sowie bis zu 2500 bar im Vollastbetrieb) für die Einspritzung bereitstellt – Druckerzeugung vollständig getrennt vom Einspritzvorgang –, kann das Ein-

bringen des Kraftstoffes durch den im Zylinderkopf angeordneten Injektor, nur von Kennfeldern angesteuert, in den Brennraum innerhalb kürzester Zeit erfolgen [84]. Der hohe Einspritzdruck ermöglicht durch die optimale sowie zylinderindividuelle (An-)steuerung der Einspritzmenge und -zeitpunkte für alle Motorbetriebspunkte bessere Motorleistungen. Einen elementaren Beitrag leisten dabei Piezo- oder Magnetventil-Injektoren. Bezüglich der genauen Einstellung der Einspritzzeitpunkte und des Auf- und Zuschließens sind die Piezo-Injektoren genauer als Magnet-Injektoren [96]. Dies führt dazu, dass sehr kleine Kraftstoffmengen in den Brennraum eingebracht werden können. Durch diese bessere Regulierung fällt der Kraftstoffverbrauch kleiner aus. Die Motorleistung bei niedrigen Umdrehungszahlen ist beim Common-Rail-System stabiler und die Möglichkeit der Nacheinspritzung vermindert die innermotorische Rußbildung [10].

Die Kraftstoffeinspritzung erfolgt über Ansteuerungskennfelder im Motorsteuergerät zylinderindividuell. Diese Kennfelder werden mit hohem Applikationsaufwand im Vorfeld bestimmt. Folgende Methoden werden zur Kalibrierung von Einspritzmengen verwendet [75]:

- Injektormengenabgleich (IMA),
- Druckwellenkorrektur (DWK),
- Mengennittelwertadaptation (MMA) und
- Nullmengenkalibrierung (NMK).

Durch den Einsatz dieser Funktionen lassen sich möglichst genaue Einspritzungen (exakte Einspritzung von kleinen Mengen) realisieren. In [83] werden diese Funktionen kurz beschrieben.

Alters- oder störungsbedingt können sich die spezifizierten Eigenschaften des Common-Rail-Systems verändern. Dies kann dazu führen, dass das Common-Rail-System zum Teil (z. B. ein Injektor funktioniert nicht richtig) oder komplett in Funktionstüchtigkeit nachgibt. Eine Funktionsstörung am Injektorventil ist ein häufiger Grund für Motordefekte. Um solche Fälle in den Griff zu bekommen, sollten sämtliche oder relevante Einflussgrößen durch Sensoren überwacht werden.

Parallel zur Entwicklung der Einspritztechnologien entstanden auch einige Arbeiten, die beim Einspritzen – am Motorprüfstand oder in Echtzeit – für die

Fehlererkennung oder Systembeobachtung sowie -optimierung Methoden vorstellen. Beispielhaft werden einige Methoden an dieser Stelle erwähnt. In der Veröffentlichung [35] wird ein geregeltes System zur optimalen Nutzung der Magneteinspritzventile vorgestellt. Dabei werden die Stellgrößen Spannung und Strom zur Ansteuerung der Ventile, aber auch zur Detektion der Einspritzmengen verwendet. Ein weiteres Verfahren zur Detektion einer systembedingten Leckage an der Düse wird in [13] diskutiert. Dabei erfolgt die Leckage-Detektion bei einer Änderung des Leerlaufbedarfs mit zwei unterschiedlichen Raildrücken. Dieses Problem kann schließlich zu einer schlechten Dosierung des Kraftstoffes und anschließend zu einer schlechten Verbrennung führen. Der Leerlaufregler kann dadurch problemlos korrigiert werden. Ein Patent mit dem Titel „Verfahren zur Regelung einer Einspritzmenge eines Injektors einer Brennkraftmaschine“ [70] zeigt eine weitere Möglichkeit zur aktiven Ansteuerung der Einspritzmenge. Die im Injektor gespeicherte Energie spielt dabei die Schlüsselrolle.

In [32] wird dagegen die Körperschall-Emission auf dem Zylinderkopf genutzt, um auf die Funktionstüchtigkeit einzelner Injektoren zu schließen. Die Untersuchungen ergaben hierbei, dass durch die Analyse der Frequenzen nicht nur die Defekte von Injektoren, sondern auch weitere Probleme detektiert werden. Ein weiteres Verfahren [57], das ebenfalls die Körperschallwellen verwendet, versucht für Benzin-Direkteinspritzsysteme mit Magnet-Injektoren die Ansteuerungsparameter zu kalibrieren. Ein Klopfsensor wird zur Ermittlung der von der Einspritzung hervorgerufenen Körperschallwellen verwendet.

Diese ausgewählten Arbeiten zeigen, dass die Bestimmung von Einspritzzeitpunkten und -dauern pro Arbeitszyklus während der Verbrennung im Interessenbereich der Entwickler steht. Neben den aufgezählten Gründen ist die Regelung des Verbrennungsprozesses ebenfalls zu erwähnen. Aufgrund der kontinuierlich strenger werdenden gesetzlichen Richtlinien und des steigenden Bedarfs an Rohstoffen wird die geregelte Verbrennung in absehbarer Zukunft sehr wahrscheinlich der Standard. Solche Regelkreise brauchen Größen, die fortlaufend erfasst werden können.

2.4 Drehzahlermittlung

Heutzutage sind Kraftfahrzeuge ohne Drehzahlmessung undenkbar. Es gibt dafür aktive und passive Sensoren. Die aktiven Sensoren werden bevorzugt, weil

sie viel genauer messen können [34]. Sie brauchen jedoch eine externe Versorgung. Die inkrementellen Sensoren werden standardmäßig zur Ermittlung der Motordrehzahl eingesetzt.

In Abbildung 2.7 ist **ein inkrementales Aufnahmesystem** (auch *Induktionsgeber, Induktivgeber oder Induktiver Sensor, Variable Reluktanz*) zu sehen. Durch die Drehung des ferromagnetischen Zahnrades wird eine zeitliche Änderung des Magnetflusses in der Spule verursacht, die wiederum eine Spannung induziert. Besitzt das Zahnrad eine gleichmäßige Zahnstruktur, so wird der Spannungsverlauf einem sinusähnlichen Verlauf entsprechen. Über drehzahlproportionale Nulldurchgänge wird anschließend die Drehzahl bestimmt. Dabei wird ein Zahn (gestrichelte Linie, rot) ausgelassen, damit es eine Bezugs-*marke* für die Zündung gibt. Die drehrichtungsabhängige und berührungslose Drehzahlmessung erfolgt auch für hohe Lasten äußerst robust.

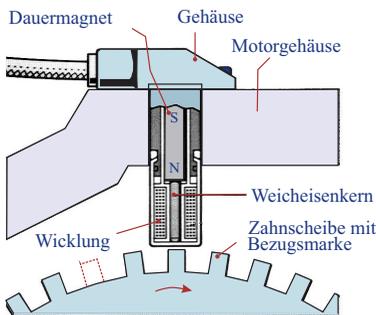


Abbildung 2.7 Drehzahlfühler [34].

Der **Hall-Sensor** ist ein weiteres System zur Messung von Drehzahlen, siehe Abbildung 2.8. Dabei bilden die Hall-Elemente, die wegen des magnetischen Flusses und eines Stromes (sie stehen senkrecht zueinander) Spannung erzeugen, den Kernbereich. Anschließend muss die erzeugte Spannung im aktiven Bereich der Drehzahl aufbereitet werden. Im Vergleich zu induktiven Sensoren liefern sie immer ein Ergebnis, da sie unabhängig von der Raddrehzahl arbeiten. Die induktiven Sensoren sind hingegen auf Bewegungen angewiesen, stationäre Zustände (keine Bewegung von Magnet und Spule) führen zu keinem Ergebnis. Bei dem Sensor läuft die Drehzahlmessung für hohe Anforderungen ebenfalls sehr robust.

Neben induktiven und Hall-Sensoren gibt es auch weitere Messmöglichkeiten für die Drehzahl:

- Differenzial-Feldplattensensor,
- Gradienten-Sensoren,
- Magnetoresistive Sensoren,
- Wiegand-Sensoren,

- Tangential-Sensoren,
- Piezoelektrische Drehratensensoren,
- Mikromechanische Silizium-Drehratensensoren.

Die aktiven Hall- und magnetoresistiven Sensoren beherrschen mittlerweile den Markt. Je nach Messprinzipien werden die Drehsensoren entweder als Kurbelwellensensor, Nockenwellensensor oder Getriebedrehzahlsensor eingesetzt [101]. Eine detaillierte Beschreibung dieser Verfahren ist im Kraftfahrzeugtechnischen Taschenbuch zu finden [10].

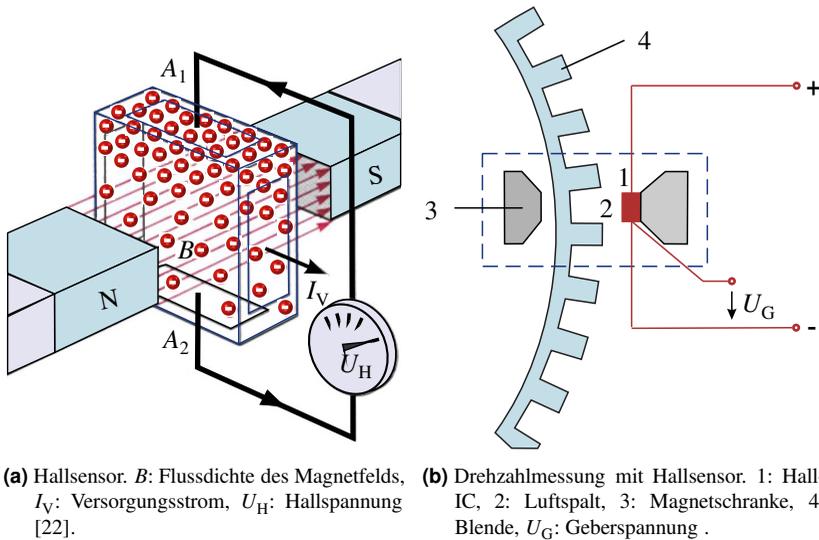


Abbildung 2.8 Drehzahlaufzeichnung nach dem Hall-Prinzip [96].

Sowohl bei der zeitsynchronen Abtastung³ als auch bei der winkelsynchronen Abtastung⁴ erfolgt eine Quantisierung bei fortlaufender Periodendauermessung. Nicht nur die Quantisierung mit dem Quantisierungsfehler, sondern auch

³ Drehzahl wird über die Anzahl der in einer Referenzperiode T_{ref} einlaufenden Flankenimpulse des Sensorsignals bestimmt [82].

⁴ Bestimmung der Drehzahl über das Zählen der Impulse eines Referenztaktes $f_0 = 1/T$ zwischen zwei Flanken des Sensorsignals [82].

die Mittelwertbildung, Abtastung und Korrekturberechnung des Sensorsignals eines Inkrementalgebers beschreibt Puente in seinem Buch Messtechnik ausführlich [82].

Neben diesen gängigen Methoden gibt es auch weitere Möglichkeiten, die Drehzahl zu ermitteln. Beispielsweise stellt Song et al. in seinem Beitrag einen auf Vibrationssignalen basierten Algorithmus zur Drehzahlmessung vor [111]. Eine Drehzahlabweichung bis zu 1,01 % gegenüber dem Sollwert kommt bei dem Verfahren vor. Das Motorvibrationssignal wird ebenfalls von Lin und Ding zur Ermittlung der Drehzahl verwendet [65]. Alternativ zu den auf das Vibrationssignal basierenden Ansätzen existiert beispielsweise ein Verfahren zur Entwicklung eines magnetoelektrischen Drehzahlsensors für Motoren mit hoher Umweltpassungsfähigkeit, siehe [64].

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Induktivsensoren bei niedrigen Drehzahlen (drehzahlabhängige Amplitude) ungenau sind. Sie lassen nur geringe Luftspalte und Luftspaltschwankungen⁵ zu. Die magnetostatische Sensoren wie etwa Hall können dagegen extrem niedrige Drehzahlen mit hoher Genauigkeit erfassen [85]. Mit einer Auflösung bis 17 bit/Umdrehung (131.072 Puls/Umdrehung) sowie hoher Signalamplitude sticht der magnetoresistive Sensor (TMR-Sensor) ins Auge. Erwähnenswert ist die Winkelgenauigkeit von $\pm 0,1^\circ$. Ein Induktivsensor von ZF kann laut Datenblatt eine Genauigkeit bis zu $0,09^\circ$ (basierend auf einer Skala von 360°)⁶ liefern.

2.5 Ermittlung der Brennraumtemperatur

Die Intensitätsgröße „Temperatur“ ist eine thermodynamische Größe, die allgemein nicht immer einfach zu ermitteln ist, obwohl eine Temperaturermittlung mit und ohne Berührung in einem großen Temperaturbereich mit vielen Materialien vorstellbar ist. Der Hauptgrund dafür sind die Wechselwirkungen in thermischen physikalischen Vorgängen. Aufgrund der erwähnten EU-Abgasnormen und Wünsche zur Verbrennungsoptimierung setzt sich die Nutzung der Temperatursensoren an verschiedenen Stellen am Motor (Beispiele: Kühlwassertemperatur, Ansauglufttemperatur, Kraftstofftemperatur, Öltemperatur, Ladelufttemperatur usw.) von Jahr zu Jahr fort. Parallel dazu entwickeln

⁵ Luftspalt: Abstand zwischen dem Sensor und dem Zahnrad/Geberrad/Impulsrad

⁶ <https://switches-sensors.zf.com/position-and-speed-sensor-types/>

sich ebenfalls die Temperatur-Messeinrichtungen an Indiziermotoren, die eine Kalibrierung der Sensoren für eine präzise Temperaturmessung ermöglichen.

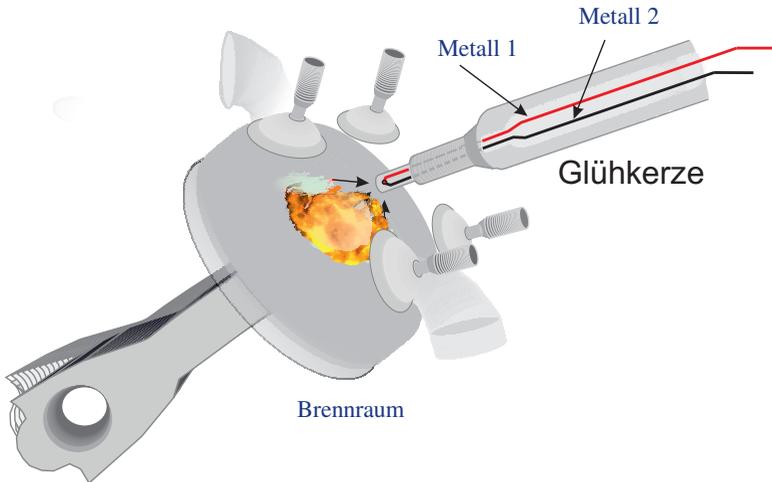


Abbildung 2.9 Keramikglühkerze mit einem integrierten Thermoelement (Type-R, Pt13Rh-Pt).

Eine weitere relevante Größe in dieser Arbeit ist die Brennraumtemperatur. Im Vergleich zu den oben erwähnten Temperaturen gibt es derzeit keine aktiven, serienmäßig integrierten Sensoren für die Bestimmung dieser Größe. Der komplizierte Diesel-Verbrennungsvorgang bei verschiedenen Umgebungsbedingungen sorgt dafür, dass die Brennraumtemperaturermittlung ohne die Berücksichtigung unzähliger physikalischer Effekte nicht problemlos verläuft. Auf den Arbeitsprozess eines Dieselmotors wird später eingegangen.

Ein möglicher Sensor zur Messung der mittleren Brennraumtemperatur (vor allem an Indiziermotoren) ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Dabei wird ein Thermoelement, welches die Wärme mit Hilfe von zwei verschiedenen Metallen (Thermoelektrizität) in elektrische Energie umwandelt, in den zuvor gebohrten keramischen Glühstift eingesetzt. Solch ein Aufbau wird in der Literatur Mantelthermoelement genannt. Abbildung 2.10 illustriert das Ergebnis einer während dieser Arbeit durchgeführten Messung. Das Mantelthermoelement gibt im Niederfrequenzbereich den mittleren Wert der Umgebungstemperatur wieder. Hohe Temperaturwerte bei Dieselmotoren (Verbrennungstemperatur bis

zu 2500 K) können allerdings zu Änderungen im Glühstift führen, die eine Verfälschung der Messergebnisse zur Folge haben [74].

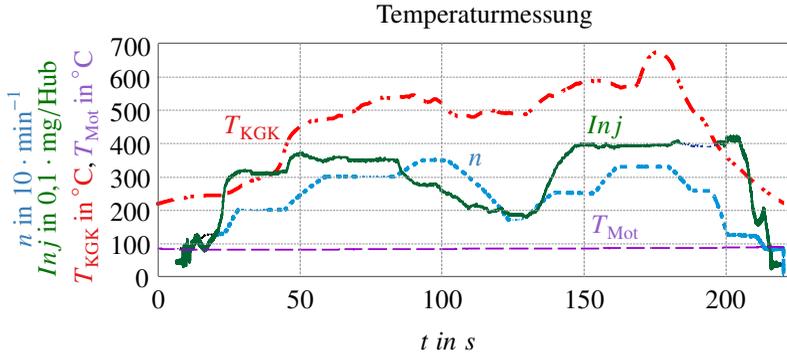


Abbildung 2.10 Temperatur (—) mit einem Mantelthermoelement gemessen. Motorparameter: Drehzahl (---): n in $10 \cdot \text{min}^{-1}$, Einspritzmenge (—): Inj in $0,1 \cdot \text{mg}/\text{Hub}$ und Motortemperatur (---): T_{Mot} in $^{\circ}\text{C}$.

Ein weiterer Weg der Bestimmung ist die Nutzung des physikalischen Zusammenhanges zwischen dem Druck und der Temperatur. Diese Wechselwirkung lässt sich einfach in der Gleichung des idealen Gases beobachten:

$$p \cdot V = m \cdot R_m \cdot T, \quad (2.1)$$

wobei p den Druck, V das Volumen, m die Stoffmenge, R_m die molare Gaskonstante und T die Temperatur darstellen. Bei diesem Weg wird der Verlauf des homogen verteilten Drucks aufgenommen und anschließend erfolgt die Bestimmung der Temperatur mit Hilfe motorspezifischer Parameter. Je nach Komplexität und Methode kann diese Variante der Temperaturbestimmung reproduzierbare und eindeutige Ergebnisse liefern, wenn die Motorprozessrechnung alle Einflussgrößen mitberücksichtigt.

Die vollständige simulationstechnische Analyse des Brennraums nahm in den letzten 20 Jahren immens zu. Mittlerweile existieren diverse Motorprozessrechnungen durch 0-, 1- und 3-dimensionale Modelle, die ganz oder teilweise die zeitliche und räumliche Änderung der Zustandsgrößen mitberücksichtigen [5] [108]. Diese Wege der Ermittlung unter anderem von Druck- und Temperaturverläufen innerhalb eines Arbeitszyklus bieten reichliche Möglichkeiten zur Untersuchung der Verbrennung. Für die zielgerichtete Optimierung

verschiedener Funktionen oder während der verbrennungsspezifischen Applikationen, wie etwa der Einstellung der Einspritzzeitpunkte, sind solche Modelle äußerst gut geeignet.

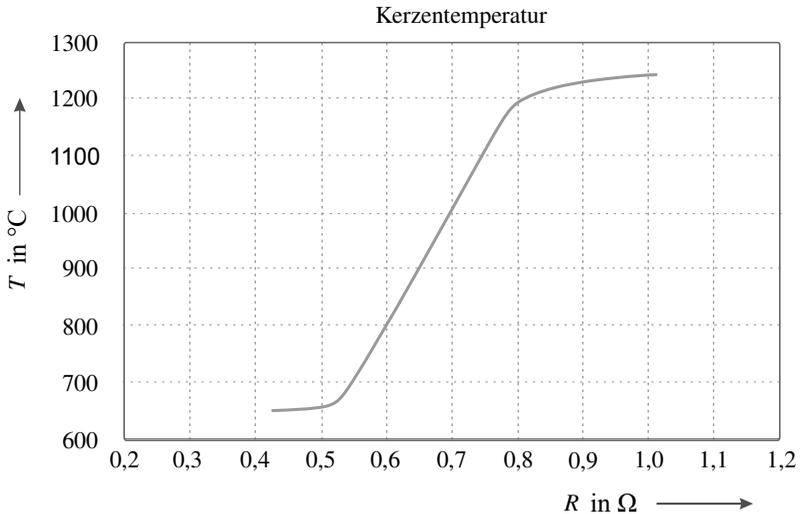


Abbildung 2.11 Messung der Temperatur von KGK an ruhender Luft. Dargestellt über dem elektrischen Widerstand. Anregungsspannung = 6,7 V.

Im Jahre 2013 wurde eine Untersuchung zur Bestimmung der innermotorischen Gemischbildung durch optisches Indizieren in der MTZ vorgestellt [14]. Mit hoher zeitlicher Auflösung werden hierbei die Brennraumgrößen neben den Kraftstoffverläufen, Restgasdichten sowie auch Druck- und Temperaturverläufe über den ganzen Zylinderquerschnitt bei Serienmotoren aufgenommen. Solch eine vollständige Charakterisierung der Gemischbildung machen Sensoren möglich.

Weiterhin gibt es auch spektroskopische Untersuchungen des Brennraums, welche beispielhaft in [78] und [81] ausführlich beschrieben sind. Aufgrund geringer Intensität wird anstatt der Raman-Spektroskopie die laserinduzierte Fluoreszenz oder CARS-Spektroskopie angewandt. In den Büchern [28] und [61] sind die physikalischen Grundlagen dieser Verfahren zu entnehmen. Die holografischen Interferometrie-Laser werden ebenfalls zur Temperaturbestimmung eingesetzt, siehe [113]. In [50] stellten Akihiko Kakuho und seine Kol-

legen eine Methode zur Visualisierung der Gemischtemperatur-Verteilung im Zylinder vor. Die Auswirkungen dieser Temperaturverteilung vor der Zündung auf die homogene Ladungskompressionszündung (HCCI) werden anschließend mit einem experimentellen Verfahren analysiert [50].

Es gibt auch Veröffentlichungen (z. B. [107]), die Verfahren zur Überwachung der Temperaturen von brennraumgrenzenden Materialien (direkt oder indirekt) wie etwa die Brennraumoberfläche diskutieren. Praktisch sehen all diese Verfahren einen Eingriff in das bestehende Hardware-/ Mechaniksystem vor.

In Abbildung 2.11 ist ein PTC-Verhalten von KGK im niederfrequenten Bereich zu sehen. Gemessen wurden die Kerzentemperatur und der Kerzenwiderstand an mehreren Kerzen. Den Widerstand ungefähr von $0,75 \Omega$ erreichen die Keramikglühkerzen innerhalb von 2 s (Einsatz als Aktuator). Es lässt sich erkennen, dass eine gewisse Abhängigkeit zwischen dem KGK-Widerstand und der KGK-Temperatur besteht. Die Eigenerwärmung ist hierbei die Folge der Energiezufuhr. Die KGK-Temperatur ändert sich, wie bereits erwähnt, ebenfalls durch die Änderung der Umgebungstemperatur.

2.6 Ermittlung des Brennraumdrucks

Zur Auswertung oder Erkennung der Arbeitstakte diente früher beispielsweise das Verhalten der Kurbelwelle, die direkt als Teil des Antriebsstranges mit dem Zylinderkolben in Verbindung steht, siehe [16]. Eine ungenaue Einspritzung sowie die damit verbundenen hohen Emissionen waren die Folge. Der Fortschritt in der Computer-, Material- und Halbleiter-Technologie (mehr Innovationsstrategien) führte dazu, dass heutzutage sehr viele Prozesse im Fahrzeug elektronisch gesteuert⁷, sowie geregelt⁸ und modellbasiert⁹ untersucht werden können.

Zu den gesteuerten Vorgängen gehört seit Mitte der 80er Jahre auch die Verbrennung. Zur Abstimmung der Motoren liefert die Zylinderdruckindizierung hierbei wertvolle Daten (Einsatz der Brennraumdrucksensoren). Dies, also die Optimierung der Verbrennungssteuerung geschieht im Vorfeld an Indiziermo-

⁷ Beispiel: Einspritzvorgänge des Common-Rail-Systems werden von Kennfeldern angesteuert.

⁸ Beispiel: Regelung der Glühkerzentemperatur

⁹ Beispiel: Simulation des Verbrennungsvorgangs

toren mit hohem Applikationsaufwand. Aus unterschiedlichen Gründen geht aber die Tendenz dahin, diesen Vorgang in Echtzeit, also bei laufendem Motor mit einer hohen Genauigkeit zu beobachten und zu regeln.

Die immer strenger werdenden Emissionsnormen zwingen Ingenieure dazu, nach innovativen Wegen zu suchen, um den Verbrennungsprozess zur Emissionskontrolle optimaler ablaufen zu lassen. Dies forciert die Realisierung der Brennraum-Drucksensoren (mit Erschöpfung des Potenzials von bekannten Messprinzipien). Die hauptsächlich auf die Druckmessung konzentrierte Brennraumbeobachtung ist verständlich, da der Druck sich aufgrund seiner homogenen Verteilung, also Messortsunabhängigkeit, im Vergleich zu anderen Zustandsgrößen oder Parametern besser auf die Abläufe im Brennraum schließt.

Es gibt derzeit eine Reihe von mit Glühkerzen untersuchten Druckmesssystemen, welche aufgrund der Thematik dieser Arbeit vorzugsweise vorgestellt werden sollen, siehe [46], [73], [1], [8], [100], [42], [46], [47], [67], [109], [33] und [95].

In der Veröffentlichung [46] wird eine Lösung mit Glühkerzen präsentiert. Das verwendete Messprinzip beruht auf dem in Fahrzeugen etablierten piezoresistiven Effekt mit einer Membran. Anhand der gemessenen Spannung wird die Widerstandsänderung unter Einwirkung des mechanischen Drucks ermittelt.

An nächster Stelle ist die kreative Realisierung eines **Zylinderdrucksensors mithilfe der Glühkerze** (PSG-Drucksensor, *Pressure Sensor Glow Plug*) erwähnenswert, siehe Abbildung 2.12. Da die Glühkerzen ein fester Bestandteil des Dieselfahrzeugs sind, müssen hierbei keine geometrischen Änderungen am Zylinder oder Zylinderrand konzipiert werden. Der piezoresistive Effekt mit einer Membran kommt dabei zum Einsatz. Die Wahl dieses Prinzips ist ein Ergebnis von Voruntersuchungen mit allen zuvor beschriebenen Messprinzipien „Ionenstrom“, „(faser-)optisch“, „piezoelektrisch“ und „piezoresistiv“, siehe die Bewertungsmatrix der vier untersuchten Systeme in [46]. Eine Siliziummembran, eine Leiterplatte mit Elektronik (die basierend auf der Wheatstone'schen Brücke das Messsignal liefert) und zur Versorgung des Systems ein Hochstromanschluss sowie Stecker sind die Bestandteile dieses integrierten Drucksensors. Laut [73] liefert dieser PSG-Drucksensor sehr verlässliche Ergebnisse. Das rauscharme Kistler-Druckmesssystem, welches die Darstellung

der Phasenverschiebungen ebenfalls ermöglicht, diente dabei als Referenzsignalgeber [1].

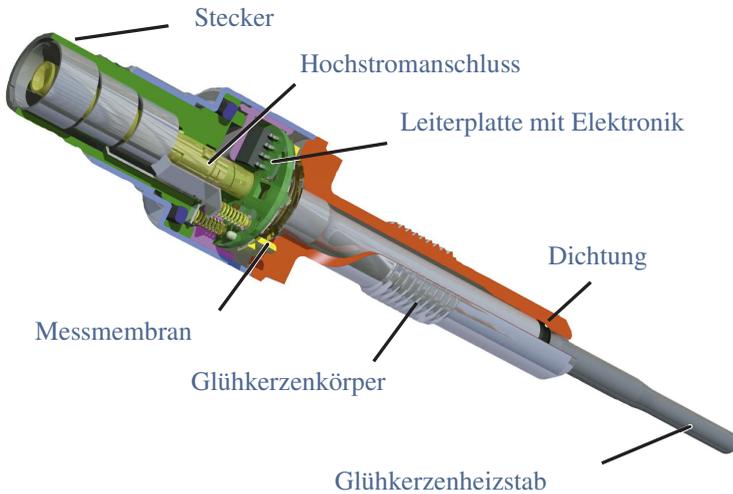


Abbildung 2.12 Glühkerze mit einem integrierten piezoresistiven Drucksensor [46].

Eine weitere Methode stellt die Glühkerze als Drucksensor mit dem Ionenstromeffekt vor. Hierbei wird der Ionenstrom an einem Widerstand zwischen der Glühkerze und dem Fahrgestell gemessen, welcher über einen Verstärker ausgegeben wird. In [8], [100], [42], [46], [47], [67], [109] und weiteren Veröffentlichungen sowie Patenten wird gezeigt, dass die mehrfache Drucksignalerfassung innerhalb eines Arbeitsspiels mit dem Ionenstromeffekt genauso vorstellbar sein sollte.

Neue Technologien mit Hilfe von technischen Keramiken wie etwa Siliziumcarbid (siehe [33], [26] und [95]) zur Messung des Druckes stehen wegen der Robustheit im Visier der Entwickler und Forscher. Bei all diesen Methoden wird versucht, den Druck entweder zu berechnen oder mittels anderer Verfahren (z. B. einem neuronalen Netz [27]) zu schätzen.

Vorzugsweise wurden die Lösungen zur Druckmessung mit Glühkerzen präsentiert. Nicht nur die Vorstellung der Drucksensoren funktionsweise sollte in

den Vordergrund kommen, sondern auch die Nützlichkeit der bereits in Dieselfahrzeugen etablierten Glühkerzen.

2.7 Fazit

Es wurde in diesem Kapitel vorgestellt, dass viele Methoden zur Bestimmung der hier behandelten Größen „Einspritzzeitpunkt“, „Motordrehzahl“, „Temperatur“ sowie „Druck“ durch die Verbesserung der Materialien und den Fortschritt der Technik möglich geworden sind. Vor allem der ubiquitäre Wunsch für eine schadstoffärmere / emissionsfreie und leistungsoptimierte Verbrennung brachte diesen Fortschritt.

Neben den generellen Erwartungen an Verbrennungsmotoren sind heutzutage ebenso hohe Anforderungen an Messeinrichtungen gestellt. Unter Berücksichtigung der besonderen Motor-Umgebungsbedingungen sollen solche Messsysteme einwandfrei funktionieren. Das heißt, die Präzision¹⁰, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Resistenz, Empfindlichkeit, Robustheit sowie Langzeitstabilität sind einige Anforderungen an diese Systeme. Diese Anforderungen werden meist über die *Messabweichung (Messfehler)* analysiert. Steht eine Größe als Messgröße fest, so kann der Messfehler dieser Größe bestimmt werden.

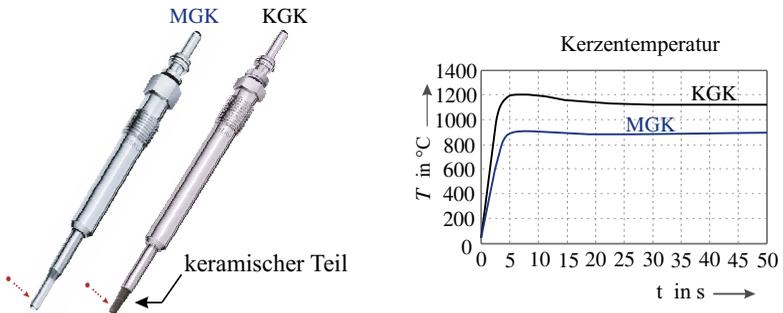
Die fortlaufende Messung verschiedener Größen in Dieselmotoren nimmt zu. Damit werden die lokalen und globalen Regelkreise bedient und Steuerkennfelder angepasst. Die hier vorgestellten Systeme sehen allerdings einen Eingriff in die Hardware vor. Ein Beispiel für den Minimaleingriff ist die Glühkerze mit einem integrierten Brennraumdrucksensor und Beispiele für den lokalen Regelkreis sind die Antriebsschlupfregelung sowie die Brennraumdruckregelung von Dieselmotoren mit homogener Kompressionszündung [49].

In dieser Arbeit wird eine Lösung vorgeschlagen, welche einerseits aus Kostengründen und andererseits aus Platzgründen sinnvoll wäre, da kein Redesign von Hardware vorgesehen ist. Diese Lösung stellt die serienmäßig eingebaute Keramikglühkerze auch als Sensor vor.

¹⁰ Präzision gibt an, wie exakt eine Messung – mehrmalige Wiederholung unter sonst gleichen Umständen – ist.

3 Keramikglühkerze

Die Verbesserungen der im Fahrzeug standardmäßig eingesetzten Glühkerzen kommen dem Fortschritt im Bereich der Dieselerbrennungsmotoren zugute. Schon in den neunziger Jahren ermöglichten (Selbstregelnde Stab-)Glühkerzen aus Metall in schlanker Form – vor allem im kalten Motorzustand – sowohl eine ruhige und weiche Dieselerbrennung (kein Kaltstartnageln) als auch eine Reduzierung der Schadstoffemissionen, siehe [99], [15] sowie [31].



- (a) MGK: Metallglühkerze, KGK: Keramikglühkerze. Temperaturmesspunkte: rote Punkte an den Kapfen der Kerzen.
- (b) Temperaturverläufe für beide Kerzentypen. Aufgezeichnet unter gleichen Bedingungen mit identischer Ansteuerungsspannung.

Abbildung 3.1 Aufheizkurven der Glühkerzen (metallisch und keramisch).

Bedingt durch die Wünsche nach einem komfortablen Start, einer möglichst geringen Umweltbelastung und einer besseren Verbrennung wurde die Entwicklung der Glühkerzentechnologie stark vorangetrieben.

In diesem Zusammenhang wurden moderne Glühkerzensteuerungssysteme entwickelt¹. Einer davon ist das ISS (Instant Start System, Schnellstartsys-

¹ In [45] stellt Hans Houben zukünftige Diesel-Kaltstartsysteme von BERU im Jahre 2005 vor.

tem) der BERU Ingenieure [18]. Das BERU ISS macht einen sicheren Start selbst bei Temperaturen von $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich und liefert eine extrem schnelle Aufheizzeit. Zu nennen sind hier vor allem die Funktionen die Steuerbarkeit der Glühkerzentemperatur in Abhängigkeit der Betriebszustände, die separate Überwachung einzelner Glühstromkreise sowie der verbesserte Wirkungsgrad des Systems [15]. Einige zum Patent angemeldeten Funktionen wie etwa das Verfahren zum Betreiben einer Glühkerze [98], die Methode zum Betreiben eines Heizelements in einem Kraftfahrzeug durch Pulsweitenmodulation [17], das Verfahren zum Betreiben einer keramischen Glühkerzen [29], das Verfahren zum Ansteuern einer Gruppe von Glühkerzen in einem Dieselmotor [52], [53], das Verfahren zum Ansteuern der Glühkerzen in Abhängigkeit glühkerzentypischer Parameter [12], die Verschachtelung des Glühkerzenstroms, das Verfahren zum Erkennen eines Glühkerzenwechsels [20], das Verfahren zum Regeln einer Glühkerze [86], das Verfahren zum Regeln der Temperatur von Glühkerzen [19] und das leistungsgesteuerte Aufheizen der Glühkerzen bedient sich das Glühsteuergerät.

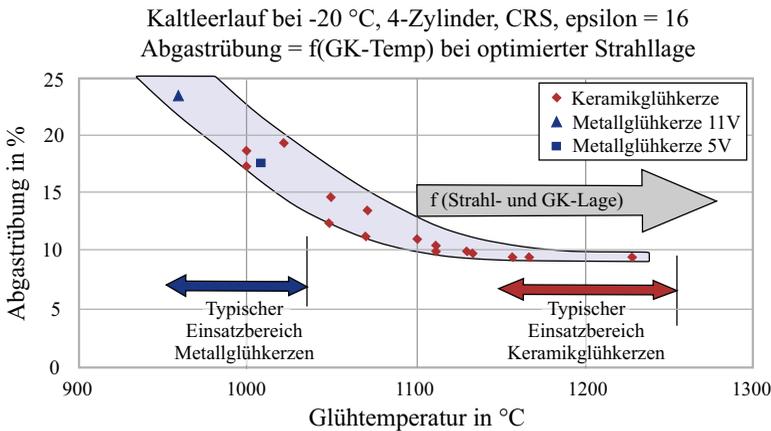


Abbildung 3.2 Zusammenhang zwischen Glühtemperatur und der sogenannten Abgastrübung beim modernen direktinspritzenden Dieselmotor [88].

Aufgrund der materialbedingten Begrenzungen wurden die Metallglühkerzen durch Keramikglühkerzen (Abbildung 3.1(a)) substituiert, was einen Anstieg der maximal möglichen Glühtemperatur von $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit sich brachte, siehe Abbildung 3.1(b). Mit Keramikglühkerzen sind auch verschiede-

ne Glühstrategien möglich. Ein Vergleich des Kaltstartverhaltens eines Dieselmotors mit Stahl- und mit Keramikglühkerzen stellte Bruno Lindl in [66] vor. Die Abgastrübung beim Kaltstart- und Kaltleerlauf kann mit dem Einsatz der Keramikglühkerze (Temperaturen über 1050 °C) reduziert werden [88], siehe Abbildung 3.2.

Den Einfluss der Glühtemperatur auf Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch diskutieren Olaf Toedter, Marc Rottner und Jörg Stöckle in [99] und [97] mit Motormessungen. Ein weiterer Beitrag [62] stellt den Einfluss moderner Dieselmotorkaltstarthilfen auf den dieselmotorischen Kaltstart, Warmlauf und Emissionen vor. Die Diplomarbeit von Gert Schüttler [89] thematisiert den Einfluss der Glühsteuerungsparameter auf den dieselmotorischen Kaltstart, Warmlauf und Emissionen. Im Gegensatz zu diesen Analysen setzen Markus Kernwein und Rüdiger Hanf die Glühkerze als Signalgeber ein und präsentieren in [39] ein Verfahren zur Motorsteuerung eines Dieselmotors, bei dem der GK-Widerstandsverlauf fortlaufend ermittelt und ausgewertet wird. In Anbetracht dessen, dass die Keramikglühkerzen als Heizelement zunehmend den Markt beherrschen, werden sie im Rahmen dieser Arbeit für weitere Einsatzmöglichkeiten grundlegend untersucht.



Abbildung 3.3 Durchsichtige Darstellung der Keramikglühkerze.

3.1 Aufbau der Keramikglühkerze

Während Metallglühkerzen die angeforderte Hitze über eine Heizwendel im Kappenbereich (im Glührohr) erzeugen, wird diese Aufgabe bei Keramikglühkerzen von den technischen keramischen Werkstoffen an der vorderen Seite übernommen. Die dafür konzipierte Kerze setzt sich aus einem keramischen Glühstift und einem metallischen Körper zusammen [4].

Abbildung 3.3 (BorgWarner) illustriert mit einer durchsichtigen Darstellung sowohl die innere Geometrie als auch die elektrisch leitende Vollkeramik. Die

Spitze, welche in den Brennraum hineinragt, besitzt keine Inconel²-Hülse (dargestellt mit Rubinrot). Die Gesamtlänge der Keramikglühkerze sowie die Form kann je nach Motor – Anpassung an den Brennraum unterschiedlich ausfallen, was bei Metallglühkerzen ebenfalls der Fall ist, weil beide Kerzen von außen ähnlich aussehen und eine etwa identische Geometrie aufweisen [15].

3.1.1 Herstellung des elektrisch leitfähigen Keramikteils

Der elektrisch leitfähige, keramische Glühstift setzt sich aus folgenden technischen keramischen Werkstoffen zusammen.

- **Siliziumnitrid Si_3Ni_4** : Siliziumnitrid ist eine chemische Verbindung aus den Elementen Silizium sowie Stickstoff und fängt ab 1900 °C an zu schmelzen. Da beim Dieselmotor eine oxidierende Atmosphäre im Brennraum herrscht, liegt die maximale Einsatztemperatur bei 1300 °C. Den Einsatz in extremen Bereichen verdankt dieser Stoff seiner Gefügestruktur, die eine äußerst gute Thermoschockbeständigkeit und eine hohe Bruchfestigkeit aufweist.
- **Molybdändisilizid MoSi_2** : Dies ist eine Verbindung von dem Übergangsmetall Molybdän (Schmelzpunkt: 2623 °C) und dem Halbmetall Silizium (Schmelzpunkt: 1410 °C). Diese intermetallische Verbindung wird aufgrund des hohen Schmelzpunktes von 2030 °C, ihrer Leitfähigkeit sowie der ausgezeichneten Oxidationsbeständigkeit oft in solchen Heizelementen eingesetzt. Der Einsatz bei Heizelementen wird in der Regel durch Sinterung ermöglicht.
- **Aluminiumnitrid AlN** : Aluminiumnitrid ist eine chemische Verbindung aus den Elementen Aluminium und Stickstoff. Der Schmelzpunkt dieses weißen (pulverförmigen) Feststoffes liegt bei 2150 – 2200 °C. Die AlN -Keramik besitzt eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit sowie sehr gute elektrische Isolationsfähigkeit. Eine sehr schwache Piezoelektrizität gehört ebenfalls zu ihren Eigenschaften. Obwohl das Material AlN eine gewisse Hydrolyse-Empfindlichkeit aufweist, lässt sich im gesinterten Zustand überhaupt nichts davon wahrnehmen.

² Korrosionsbeständige Nickelbasislegierungen

- **Yttriumoxid Y_2O_3** : Das weiße Yttriumoxid ist eine Verbindung aus den Elementen Sauerstoff und Yttrium und schmilzt erst beim Erreichen der Temperatur von 2410 °C. Da dieser Stoff thermodynamisch gesehen äußerst stabil ist, wird Y_2O_3 als Sinteradditiv (Sinterhilfsmittel) beim Flüssigphasensintern für keramische Materialien verwendet, vor allem mit der AlN- oder Si_3Ni_4 -Keramik.

Obwohl die keramischen Mischungen sich hauptsächlich aus den ersten beiden Werkstoffen und in kleinen Mengen Aluminiumnitrid, Yttriumoxid sowie weiteren Materialien zusammensetzen, kann aufgrund der geringen Sinteraktivität der ersten beiden Nichtoxidkeramiken auf diese Mischung nicht verzichtet werden. Die Werkstoffinformationen wurden aus der Quelle [103] übernommen.

Zur Herstellung des Glühstiftes kommt ein **Sinterverfahren** zum Einsatz. Die hier aufgelisteten feinkörnigen nichtoxidischen Stoffe werden dabei wie folgt zusammengeführt: Zuerst werden die fein gemahlene Rohstoffe (Pulver) miteinander vermischt [1. Phase: „Compoundierung“], wobei der prozentuale Anteil des Molybdändisilizides die Leitfähigkeit festlegt. Es wird in der Aufbereitungsphase eine möglichst homogene Masse hergestellt. Im zweiten Schritt findet die Formgebung des sogenannten Grünling statt [2. Phase: „Koeextrusion“, Spritzgießen und Drehen]. Abhängig von den Primärkorngößen wird unterhalb des Schmelzpunktes eine Sintertemperatur eingestellt, die über der Tamman-Temperatur³ liegen muss. Beim Mischen mehrerer Stoffe wird in der Praxis ein Wert unterhalb des kleinsten Schmelzpunktes gewählt. Die Formgebung erfolgt anschließend durch ein Pressverfahren. Dieses Verfahren wird unter hohem Druck durchgeführt. Die endgültigen Werkstoffeigenschaften bilden sich im Anschluss durch Wärmebehandlung der Grünkörper. Nach dem Entfernen des Binders und der Verdichtung (3. Phase: „Sintern“) geht die Herstellung in die 4. Phase „mechanische Nachbearbeitung“. Der eigentliche Keramikstift ist ein Ergebnis der mechanischen Nachbearbeitung, siehe [38] sowie [3]. In [2] und [40] werden ebenfalls Verfahren zur Herstellung eines Heizstabs/ keramischen Glühstiftes diskutiert.

Anhand verschiedener Methoden wie der Rasterelektronenmikroskopie (REM) und der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) wird die Quali-

³ Die Tamman-Temperatur ist ungefähr halb so groß wie die Schmelztemperatur und gibt an, wann die Sinterung – Atome bewegen sich und Diffusion beginnt – tatsächlich anfängt.

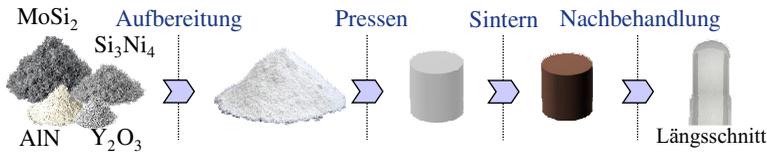


Abbildung 3.4 Entstehung des keramischen Glühstiftes mittels Sinterverfahren [96].

tät nach dem Herstellungsprozess untersucht. Die Prüfung auf Mikrorisse, Ver-
setzungen, Mikrostrukturen, Ausscheidungen von Körnern, Fehler usw. bilden
den Hauptteil dieser Untersuchung.

Tabelle 3.1 Zonen der Keramikglühkerze.

Zone	Bezeichnung	Aufgabe
V59	Hinleiter	Strom fließt über V59 zur Kappe V53
V53	Heizzone	In diesem Bereich wird Wärme erzeugt
V57	Rückleiter	Strom fließt durch diesen Leiter zurück
V35	Isolator	Trennung der Hin- und Rückleiter

3.1.2 Geometrische Darstellung und Materialeigenschaften

Damit die gewünschten Temperaturwerte in angeforderten Bereichen entste-
hen, also kurz vor der Spitze, wurde die Keramikgeometrie, wie in Abbil-
dung 3.4 Längsschnitt dargestellt, entworfen. Eine vergrößerte Darstellung die-
ses Bereiches mit vier Mischzonen ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Dabei wird
mithilfe des Buchstabens **V** auf technische keramische Werkstoffe und mit der
Zahl auf den prozentualen Anteil des Molybdändisilizides MoSi_2 in den jewei-
ligen Mischzonen hingewiesen. Aufgrund ihrer Aufgaben sind die Zonen wie
folgt zu verstehen:

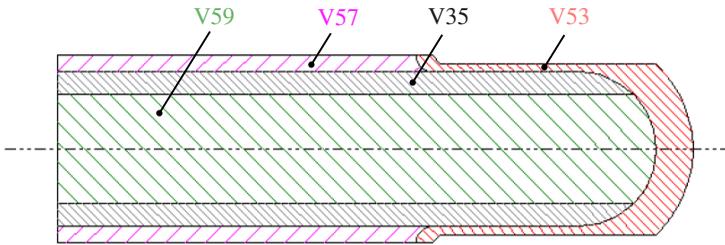


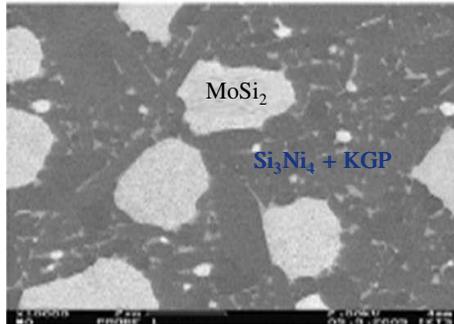
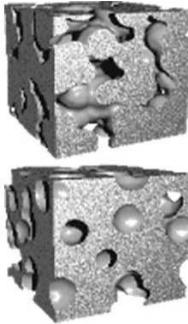
Abbildung 3.5 Längsschnitt eines keramischen Glühstifts. Materialbelegung mit unterschiedlichen Mischverhältnissen [36].

Dabei sind V57 und V59 als Leitmaterial und V53 (Kappe) als Glühmaterial zu verstehen. Die erzeugten Temperaturen in dem Bereich sind sehr hoch. Deshalb wurde der Isolator ebenfalls aus keramischen Stoffen, jedoch mit wenig MoSi_2 hergestellt. Wegen dieser geometrischen Herausforderungen ist die im vorherigen Unterkapitel 3.1.1 beschriebene Herstellung komplex.

Es ist nicht möglich, immer die gleichen Perkolationen (3.6) und exakt identischen Geometrien für alle Zonen zu gewährleisten. Als Folge hiervon ergeben sich Kerzenstreuungen.

Die ungleichen Mischverhältnisse in den 4 Zonen verursachen unterschiedliche Materialeigenschaften. In Abbildung 3.7 und 3.8 sind beispielhaft die 4 relevanten Eigenschaften (spezifischer elektrischer Widerstand, Temperaturleitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität) einer Kerze zu sehen, wobei diese Verläufe nur im begrenzten Temperaturbereich gültig sind. Das heißt, diese Kurvenverläufe können je nach Kerze unterschiedlich sein. Eine Modellierung der Kerze (5.1) benötigt allerdings inine Größen wie etwa den Wärmeübergangskoeffizienten α für eine erzwungene Konvektion sowie den thermischen Ausdehnungskoeffizienten β für eine freie Konvektion.

Bei 25°C weist diese technische Keramikmischung einen spezifischen elektrischen Widerstand von $\rho_{el} = 1,0 \cdot 10^6 \Omega\text{m}$ auf. Da die Resistivität des Isolators zu hoch ist, wurde sie in Abbildung 3.7(a) nicht dargestellt. Es fließt außerdem durch den Isolator keinen Strom.



3D-Grenzschichtübergänge

Zusammenfassung im Schliff

Abbildung 3.6 Gefüge des Mischpulvers und seine Perkolationen. Die Perkolationstheorie (lat. percolare – durchsickern) beschreibt das Ausbilden zusammenhängender Gebiete bei zufallsbedingtem Besetzen von Strukturen (Wikipedia). KGP: Korngrenzphase [36].

3.2 Kaltstarthilfe: Funktionalität der Keramikglühkerze als Aktuator

Die oben genannte Materialbelegung sowie Geometrie sind ein Ergebnis der Anforderungen an Keramikglühkerzen für eine Nutzung als Aktuator (Heizelement). Das Ziel ist es dabei, die Startbereitschaft des Dieselmotors durch Keramikglühkerzen innerhalb kürzester Zeit zu ermöglichen. Abbildung 3.9 illustriert ein Ansteuerungsbeispiel der modernen Keramikglühkerzen für diese Anforderung. So ist eine Startbereitschaft durch schnelles Aufheizen der KGK innerhalb von 1 – 2 s zu realisieren.

Das schnelle Aufheizen läuft energiegesteuert ab, d. h. der jeweiligen Glühkerze wird eine Energie zugeführt, die so vorbestimmt ist, dass die Beharrungstemperatur auf jeden Fall erreicht wird. Vorzugsweise wird die Beharrungstemperatur zunächst einmal überschritten und sinkt danach auf die Beharrungstemperatur ab, siehe [53]. In den Phasen II, III und IV wird dagegen PWM⁴ getak-

⁴ Die **Pulsweitenmodulation** ist ein Rechtecksignal mit konstanter Periodendauer, welches zwischen zwei verschiedenen Spannungspegeln oszilliert [54].

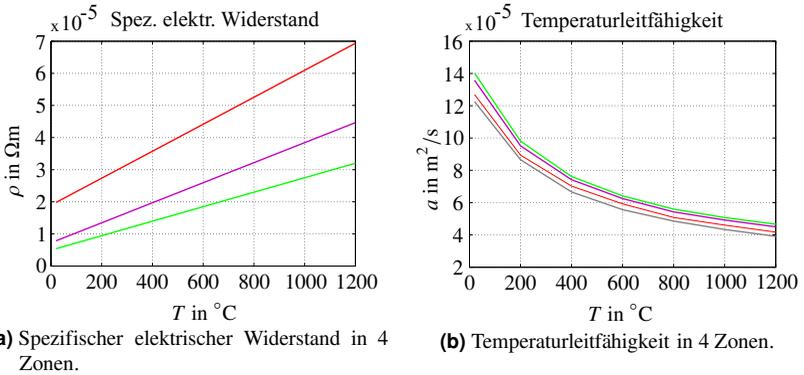


Abbildung 3.7 Materialeigenschaften der technisch keramischen Mischungen. Farbzunordnung, siehe Abbildung 3.5 [56].

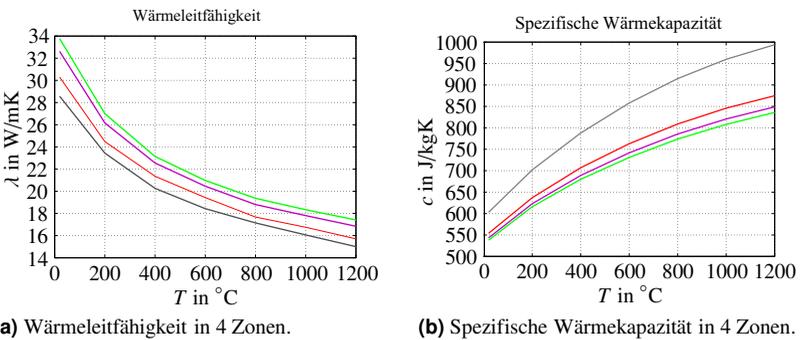


Abbildung 3.8 Materialeigenschaften der technisch keramischen Mischungen. Farbzunordnung, siehe Abbildung 3.5 [56].

tet betrieben. Bei der Steuerung der Keramikglühkerze stehen die im Vorfeld applizierten Spannungsprofile (Kennfelder, wie etwa in Abbildung 3.10) zur Anpassung an die wichtigen Motorbetriebspunkte bereit, sodass die gewünschte Glühkerzentemperatur T_{IV} im Beharrungszustand jederzeit möglich ist.

Ausgehend von dem motorspezifisch und zeitaufwendig erstellten Spannungsprofil ist es deutlich, dass der Umgebungseinfluss auf die Keramikglühkerze einerseits die Ermöglichung eines stationären Betriebes erschwert, andererseits die Nutzung der Keramikglühkerze als Signalgeber vorstellbar macht.

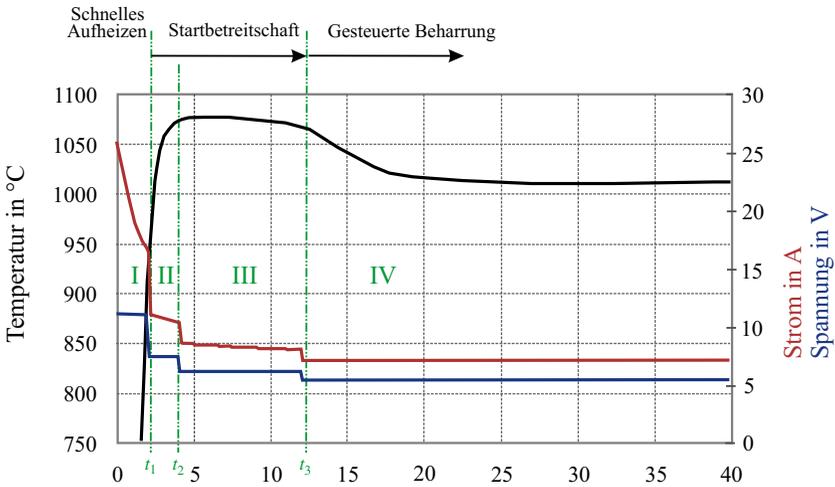


Abbildung 3.9 Kennlinienbeispiel für eine elektronisch gesteuerte Glühkerze [52]. Grüne Zahlen (I, II, III und IV) bezeichnen dabei die Steuerungsphasen.

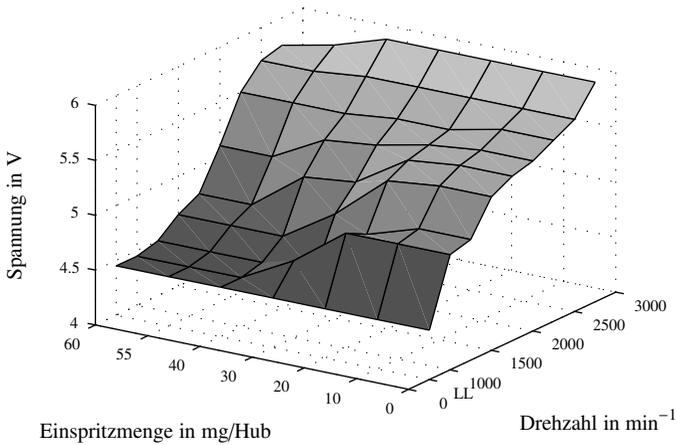


Abbildung 3.10 Spannung zur Gewährleistung der Glühkerzentemperatur T_{IV} an allen Motorbetriebspunkten. LL: Leerlauf.

Das materialbedingte Verhalten steht beim Regeln der Kerze ebenfalls im Mittelpunkt [114]. Hinsichtlich dieses Zieles „Keramikglühkerze als Signalgeber“

gibt es allerdings einige Hindernisse zu bewältigen. Eins davon ist die herstellungsbedingte Streuung der Keramikglühkerzen.

3.3 Herstellungsbedingte Streuung der Keramikglühkerzen

Die Herstellung (3.1.1) des Heizstabs – mit Halbleitern bestehend aus kristallinen Pulvern – kann makroskopisch betrachtet niemals hundertprozentig identische Geometrien und Halbleiterperkolationen garantieren. Abbildung 3.11 illustriert einige ausgesuchte Prüfmaße mit jeweiligen Abweichungen. Demnach sind Abweichungen nicht nur in axialer sondern auch radialer Richtung möglich.

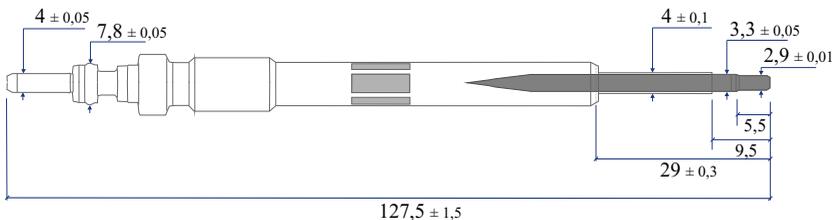


Abbildung 3.11 Geometriedaten der Keramikglühkerze (Beschriftung der ISS-Keramikglühkerze nach BEN 103: BERU FD. Sachnummer: P010.980.001.03.00). Heizstab (Keramik): grauer Bereich. Prüfmaß mit der Abweichung von einer Charge, d. h. der Produktion innerhalb einer Woche mit gleichen Einstellungen an einer Produktionslinie.

Die Kappe wird beispielsweise ungefähr 5 mm in den Brennraum hineinragen, dann kann die sichtbare Oberfläche zwischen $126,1 \text{ mm}^2$ und $127,1 \text{ mm}^2$ (angenähert als gerader Kreiszyylinder: $O = 2\pi \cdot r \cdot h + \pi \cdot r^2$) liegen. Allein die Betrachtung dieser Fläche zeigt, dass die Toleranz die Eingriffsfläche im Brennraum für äußere Einflüsse erhöht. Auf den ersten Blick sind Abweichungen im Innenbereich des Glühstabs nicht zu sehen. Das Sinterverfahren verursacht hierbei ebenfalls Unterschiede, sowohl in radialer als auch in axialer Richtung. Die Betrachtung eines Querschnitts in KGK-Längsrichtung kann nicht zeigen, dass die Zonen (Abbildung 3.5) nicht immer einem exakten Kreis entsprechen.

Für den Fall des Heizelements sind die entstehenden Unterschiede relevant. Abhängig vom Zustand der Produktionslinien können die Abweichungen unterschiedlich ausfallen. Da die Applikation der Spannungskennfelder nicht für

jede Kerze separat erfolgen kann, werden Kerzen außerhalb eines vordefinierten Bereiches aussortiert. Dadurch können die überhitzungsbedingten Kerzenausfälle sowie das Kaltbleiben von Kerzen während des Betriebes verhindert werden. Es wird nicht möglich sein, dass die ausgebeuteten⁵ Kerzen mit den im Vorfeld applizierten Spannungskennfeldern ihre optimale Leistung erbringen. Vor allem im Falle einer Regelung oder Nutzung als Sensor ist die Erkennung der individuellen Kerzendaten relevant.

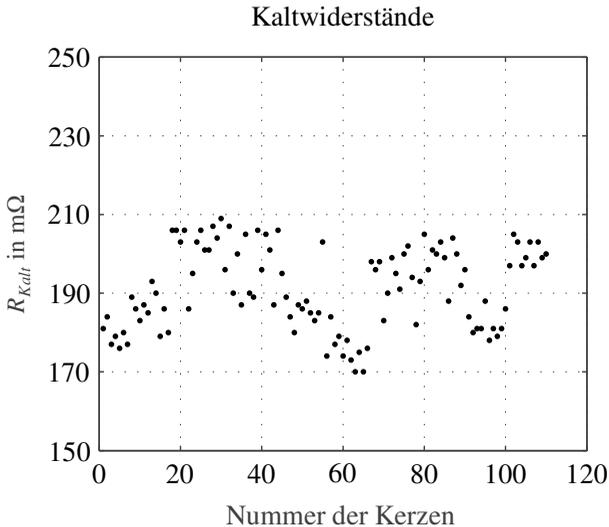


Abbildung 3.12 Aufzeichnung der Kaltwiderstände (R_{kalt}) verschiedener zum Nutzen freigegebener BorgWarner-Keramikglühkerzen.

Ganz unabhängig vom Nutzungsziel stellt sich allerdings die Frage, was denn nun die Messung dieser Kerzenunterschiede (Streuung) ermöglichen sollte. Bei den im Fahrzeug eingebauten Kerzen stehen derzeit nur 2 Signale zur Verfügung, nämlich Spannung und Strom. Demzufolge muss das System mit diesen beiden fortlaufend gemessenen Signalen auskommen. Der Widerstand lässt sich bekanntlich aus Strom und Spannung ermitteln und sein Wert bei Raumtemperatur wird zum Aussortieren der als untauglich deklarierten Kerzen verwendet, da die Keramikglühkerzen im Kaltzustand verschiedene Kalt-

⁵ In der Produktionssprache steht es für die verwendbaren Kerzen.

widerstände aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Kaltwiderstände diverser Keramikglühkerzen gemessen, siehe Abbildung 3.12.

3.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Keramikglühkerze als Heizelement vorgestellt. Angefangen von der Herstellung der Keramikglühkerze bis hin zu Materialeigenschaften und Nutzung als Heizelement entstand eine kurze Darstellung der Kerze. Dabei wurde gezeigt, dass die Keramikmischverhältnisse in jeder Zone der Kerze etwas unterschiedlich ausfallen kann. Dies erfordert eine komplexe thermische und elektrische Analyse der keramischen Glühkerzen. Ausgehend von der Kerzen-Streuung kann gesagt werden, dass die Steuerungs-, Regelungs- sowie Signalgeberaufgaben ohne weitere Signalverarbeitungsschritte schwer zu realisieren sind, da beispielsweise der gemessene Widerstand von Kerze zu Kerze bei gleicher Umgebungsbedingungen sich variieren kann. Das heißt, die Eigenschaften einzelner Glühkerzen müssen in den in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsalgorithmen, je nach Art und Umfang der Aufgaben, mehr oder weniger mitberücksichtigt werden.

4 Dieselmotoren

Die Erfindung des Dieselmotors von Rudolf Diesel war mit Sicherheit einer der großen Schritte der europäischen Industrialisierung im zu Ende gehenden 19. Jahrhundert. Bis heute gilt dies als ein Aufbruch in eine neue Ära der Mobilität. Im Vergleich zu bereits im Jahre 1876 entwickelten Viertakt-Benzinmotoren waren die Dieselmotoren Selbstzünder, das heißt, sie arbeiteten ohne äußere Zündung bei einer gewissen Temperatur und einem gewissen Druck. Kurz nach der Entwicklung dieses selbstzündenden Verbrennungsmotors entstanden einige Firmen, die diese Technologie in vielen Bereichen der Industrie sowie bei LKWs und Schiffen nutzten und ein maßgebliches Zeichen setzten. Einige der wichtigsten und größten Probleme für diese Pionierarbeit bei Dieselmotoren waren die selbst verursachten Vibrationen und das Gewicht. Der erste Diesel-PKW der Welt wurde dennoch im Jahre 1937 serienreif produziert und setzte damit als eine effektive Alternative zu Ottomotoren einen Meilenstein.

In vieler Hinsicht bietet diese Technologie Vorteile. An erster Stelle sind der geringere Kraftstoffverbrauch sowie der niedrige Kraftstoffpreis gegenüber vergleichbaren Benzinmotoren zu erwähnen. Vor allem für die Fahrzeughersteller war die komplexe und teure Herstellung jedoch ein Dorn im Auge, was eventuell zu Unbeliebtheit dieser Motoren in der restlichen Welt führte.

Um diesen Nachteil zu kompensieren, wird seit vielen Jahren versucht, Dieselmotoren möglichst gut zu optimieren, damit sie einerseits ein Ottomotorähnliches Verbrennungs- und Leistungsverhalten aufweisen und andererseits den gesetzlichen Abgasnormen nachkommen können. Dies geschieht selbstverständlich ohne Einbußen des Fahrkomforts.

Mit den Zielen Verbrennungsoptimierung, Reduzierung der Schadstoffbildung und Erhöhung des akustischen Komforts sind einige grundlegende Systemänderungen im Fahrzeug vorgenommen worden.

Dank neuartiger Glühkerzentechnologien und Piezoinjektoren sind ebenso Verdichtungsverhältnisse von 16:1¹ möglich geworden, welche früher über 18:1 lagen. Diese Verbesserung führt zu reduzierten Rußemissionen und Stickoxiden [58]. Ohne die hochentwickelte Elektronik wären viele gesetzliche Normen sowie Verbraucherwünsche nicht zu realisieren, da diese Technologien zum größten Teil nicht funktionieren würden.

Um den Anforderungen an Dieselmotoren gerecht zu werden, wird in Zukunft von heutigen gesteuerten (Verbrennungs-)Systemen zu geregelten Systemen übergegangen. Dies erfordert eine fortlaufende Messung einiger systemrelevanter Größen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die innermotorischen Maßnahmen dabei eine entscheidende Rolle spielen werden.

4.1 Dieselmotor: Grundlagen der Verbrennung

Als Selbstzünder sind Dieselmotoren effektive Nutzer der Diffusionsflamme, da sie vor der eigentlichen Verbrennung durch Diffusion Kraftstoff und Luft vermischen. Diese Vermischung findet entweder in der Vorkammer, Wirbelkammer oder dem Brennraum statt. Schon seit längerem wird die Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum mittels Direkteinspritztechnologien verwirklicht. Das erzeugte Kraftstoff-Luft-Gemisch wird verdichtet und zündet nach dem Erreichen einer Temperatur im Zylinder von selbst.

Dieser dieselmotorische Verbrennungsprozess läuft am Beispiel Viertakt-Dieselmotor mit einem Direkteinspritzsystem folgendermaßen ab:

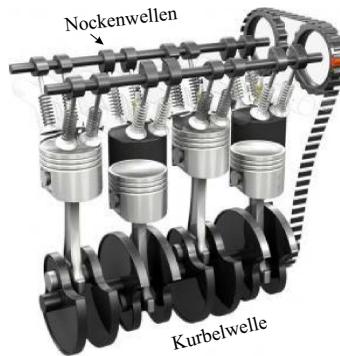


Abbildung 4.1 4-Takt-Dieselmotor mit Kurbel- und Nockenwellen.

¹ Der Mazda-Motor Skyactiv-D macht sogar ein Verdichtungsverhältnis von 14:1 möglich (Presse-Information von Mazda)

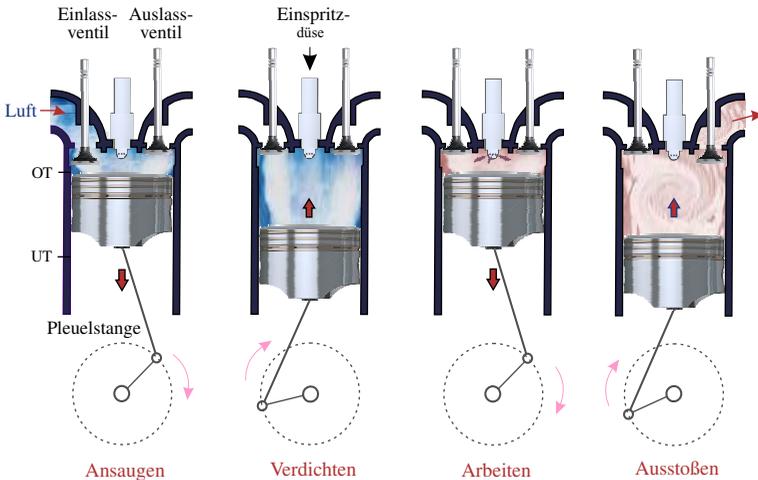


Abbildung 4.2 Die vier Arbeitsspiele einer dieselmotorischen Verbrennung [96].

1. **Ansaugen:** Bei Dieselmotoren werden die Ein- und Auslassventile von den Nockenwellen gesteuert, die durch die direkte Verbindung zur Pleuellstange einen vordefinierten Drehwinkel pro Arbeitsspiel absolvieren, siehe Abbildung (4.1). Eine halbe Umdrehung (180° KW²) ist Standard bei vielen Serienfahrzeugen. Mit dem Öffnen des Einlassventils strömen die Fluide³ (Luft, Abgas wegen Rückführung) in den Brennraum ein, da dort im Brennraum ein Unterdruck herrscht. Diesen Schritt wird der sich nach unten bewegende Pleuellstange nach Erreichen des unteren Totpunktes (UT) beenden.
2. **Verdichten:** In diesem Schritt beginnt der Pleuellstange sich in Richtung des oberen Totpunktes (OT) zu bewegen, während beide Ventile geschlossen sind. Dabei verkleinert sich das Volumen. Diese Volumenverkleinerung führt dazu, dass die Luft komprimiert und sich fortlaufend erwärmen wird.

² Pleuellstangenwinkel

³ Flüssigkeiten und Gase werden generell Fluid genannt.

3. **Arbeiten:** Je nach Motorapplikation befindet sich die Kraftstoff-einspritzung kurz vor dem OT. Danach beginnt das entstandene Luft-Kraftstoff-Gemisch zu verbrennen. Dies führt dazu, dass der Kolben sich nach unten bewegt und die thermische Energie über die Pleuelstange in mechanische Energie umwandelt und die Kurbelwelle antreibt.
4. **Ausstoßen:** Nachdem der Kolben wiederum zum unteren Totpunkt gelangt, beginnt die Ausstoßphase. Das heißt, der Kolben bewegt sich nochmals nach oben und das Auslassventil öffnet sich. Durch das geöffnete Auslassventil strömt das gasförmige Medium aus. Somit kommt ein Zyklus zum Ende und ein neuer Zyklus (vier Arbeitsspiele) kann beginnen. Der Übergang (4 → 1) ist wegen des Restdruckes vom Gas für den Unterdruck verantwortlich. Nicht zu vergessen ist die sogenannte Überschneidung, d. h. die Zeit, in der sich die beiden Ventile gleichzeitig im geöffneten Zustand befinden.

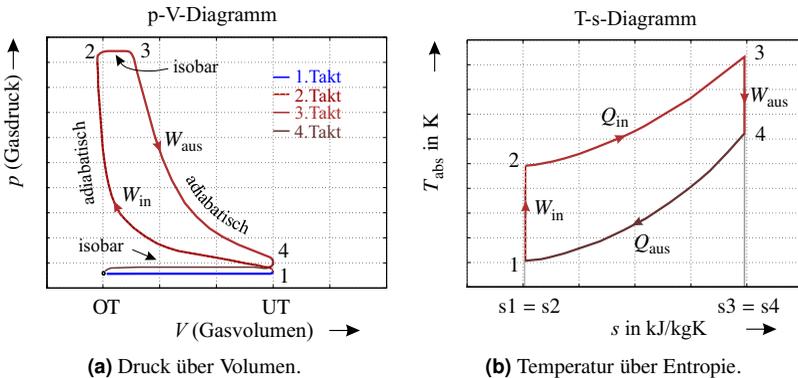


Abbildung 4.3 Der Kreisprozess beim Dieselmotor. OT: Oberer Totpunkt, UT: Unterer Totpunkt, T_{abs} : Absolute Temperatur, s : Entropie, Q_{in} : Wärmezufuhr, Q_{aus} : Wärmeabfuhr, W_{in} : Arbeit, W_{aus} : Arbeit.

Abbildung 4.3 veranschaulicht den beim Dieselmotor auftretenden Kreisprozess mit einem p-V sowie einem T-s-Diagramm. Die thermodynamischen Ereignisse in einzelnen Schritten werden wie folgt spezifiziert:

- 1 → 2: Isentrope oder adiabatische Zustandsänderung: kein Wärmeaustausch mit der Umgebung.

- 2 → 3: Isobare Zustandsänderung: während der Volumenänderung bleibt der Druck im System konstant. Die Wärmemenge wird dabei in Arbeit W_{aus} umgewandelt.
- 3 → 4: Isentrop: Obwohl die Entropie⁴ konstant bleibt, reduzieren sich die Temperatur und der Druck im System.
- 4 → 1: Isochor: Druckänderung führt nicht zu Volumenänderung.

Der Dieselmotorenprozess ist auch als Gleichdruckprozess bekannt, da die Wärmezufuhr hauptsächlich im isobaren Takt stattfindet. So ideal wie es hier beschrieben wurde, wird der Verbrennungsprozess im realen Motor jedoch auf keinen Fall stattfinden. Es entstehen sogenannte Zyklenschwankungen, die als Folgen der Zufälligkeiten in den Entflammungsphasen sind.

4.2 Position und Rolle der Keramikglühkerze im Brennraum

Die Positionierung der Keramikglühkerze ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Im Vergleich zu der zentralen Lage des Injektors wird die Keramikglühkerze etwas versetzt und mit einem gewissen Winkel eingebaut. Der hineinragende Teil variiert von Motor zu Motor und besteht ausnahmslos aus technischen keramischen Werkstoffen. Dabei ist es allerdings relevant, dass der Kraftstoff auf die warme Keramikoberfläche nicht direkt eingespritzt wird. Die fein zerstäubten Kraftstofftropfen der Hochdruckinjektion können auf Dauer die Keramikeigenschaften verschlechtern.

Injektor Keramikglühkerze

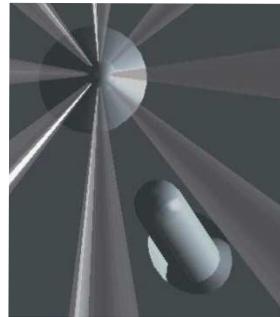
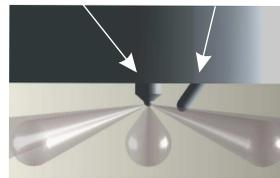
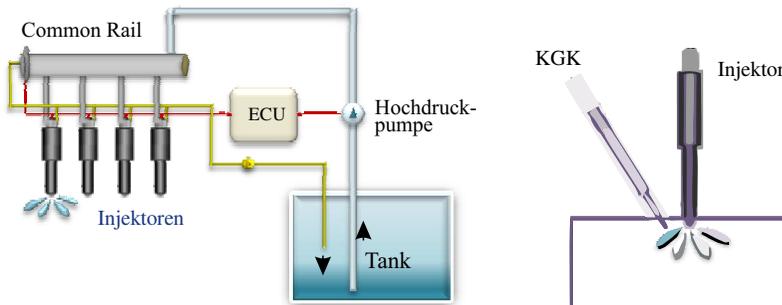


Abbildung 4.4 Positionierung der Keramikglühkerze im Brennraum mit Seitenansicht (oben) und Untersicht (unten). Quelle: Firma BorgWarner.

⁴ Jedes thermodynamische System besitzt eine extensive Zustandsgröße, die Entropie genannt wird [106].

4.3 Common-Rail-Direkteinspritzung

Um den bis dato strengsten Schadstoffemissions-Richtlinien der Europäischen Union nachzukommen und eine kraftstoffsparende Verbrennung zu gewährleisten, ergriffen die Automobilhersteller zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung des Emissionsverhaltens und der Gemischbildung. Eine relevante Komponente war die Entwicklung und Implementierung eines Einspritzsystems.



a) Common-Rail-System

b) Einspritzung in einem Zylinder

Abbildung 4.5 Schematische Darstellung eines Direkteinspritzsystems nach dem Common-Rail-Prinzip.

Wie bereits erwähnt, erfordern die Selbstzünder ein möglichst gutes Gemisch von Kraftstoff und Luft. Um diese Anforderung der Kompressionsverbrenner zu erfüllen, wurden verschiedene Einspritzkonzepte realisiert. Wie aus Kapitel 2 zu entnehmen ist, konnten viele Techniken aufgrund ihrer unpraktischen bzw. ungenauen Ansteuerungsmechanismen sich bis heute nicht etablieren. Ein gutes Beispiel dafür ist die Pumpe-Düse-Technik zur Einspritzung des Kraftstoffes in Abhängigkeit der Drehzahl und Einspritzmenge, die über die Nockenwelle direkt angesteuert wird. Wegen der nicht optimalen Kraftstoffdosierung blieb diese Technik unbeliebt.

Durchsetzen konnte sich das moderne Common-Rail-System, welches ebenfalls als Speichereinspritzung bekannt ist. Wie in Abbildung 4.5 zu sehen, steht der Kraftstoff in der Speichereinrichtung (engl. *common rail*) unter einem hohen Druck (300 bis 2000 bar). Durch die gezielte Steuerung des Injektor-

Aktors über die im Motorsteuergerät (engl. *electronic control unit*, ECU) hinterlegten Steuerungskennfelder wird die richtige Kraftstoffmenge zum richtigen Zeitpunkt in den Brennraum eingespritzt. Die gängigen Injektor-Aktoren sind dabei Magnetventile und Piezoelemente. Es gibt einige Gründe, die entweder für Magnetventile oder für Piezoelemente sprechen:

Tabelle 4.1 Vergleich der Injektor-Aktoren. VE: Voreinspritzung, x-Injektionen: Mehrfacheinspritzung, PI: Piezoinjektoren, MI: Magnetinjektoren [10].

	Magnetventile	Piezoaktoren
Druck:	Hohes Druckangebot bei beiden Injektorarten nur höhere Einspritzdrücke	auch geringere Einspritzdrücke
Druckbereich:	120 – 2000 bar	bis 2200 bar
x-Injektionen:	PIs ermöglichen im Vergleich zu MIs sehr kleine Abstände	
VE:	kleine Mengen	sehr kleine Mengen
Diesel:	gute Mengenstabilität	sehr gute Mengenstabilität
Bauraum:	Piezo-Aktor im Injektorgehäuse: Bauraum und Gewicht ist deshalb weniger	
Produktion:	niedriger Aufwand und günstig	aufwendig und teuer

Piezoelemente-Injektoren besitzen wie aus Tabelle 4.1 zu entnehmen viele Vorteile gegenüber den Magnetventilen. Sogar bei kritischen Kraftstoffverunreinigungen funktionieren sie einwandfrei. Darüber hinaus können Piezoinjektoren zehnmal höhere Kraft leisten und ohne Permanentleckage niedrige Kraftstofftemperaturen gewähren [10]. Dies mindert die Verlustleistung und erfordert keine zusätzliche Diesellabkühlung.

Magnetinjektoren lassen sich dagegen mit niedrigem Aufwand und günstig herstellen.

4.3.1 Einspritzdüsenformen

Die Aufgabe des Common-Rail-Systems ist, die zwischen 1 bis 350 mm³ liegende Einspritzmenge innerhalb kürzester Zeit (1 – 2 ms) in den Brennraum zu bringen. Um eine möglichst gute Verteilung des Kraftstoffes im Brennraum

zu ermöglichen, wurden für alle Einspritzsysteme passende Einspritzdüsen entwickelt. In Abbildung 4.6 sind diverse Düsenformen, die sich aus dem Düsenkörper und der Düsennadel zusammensetzen, zu sehen. Die ersten drei werden bei Kammermotoren eingesetzt.

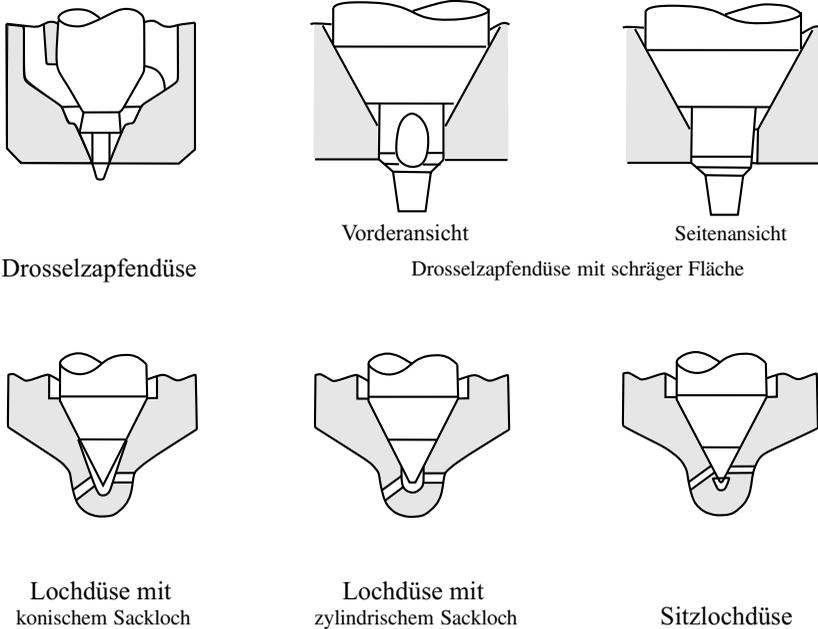


Abbildung 4.6 Verschiedene Düsenausführungen [72].

Bei den hier behandelten Common-Rail-Einspritzsystemen kommen dagegen die Lochdüsen zum Einsatz. Ohne den von diesem System erzeugten Kraftstoffdruck kann der Kraftstoff durch die Düsenbohrungen nicht eingespritzt werden. Die Düsennadel wird direkt von einem Elektromagneten oder Piezoaktor leakagefrei angesteuert und agiert dementsprechend unabhängig vom Systemdruck. Die eingespritzte Kraftstoffmenge hängt von den Parametern Querschnitt der Düsenbohrungen, Kraftstoffdruck sowie Öffnungsdauer der Ventile ab. Nach dem Schließen der Ventile wird der überschüssige Diesel mittels Niederdruckpumpe zurückgefördert.

Die Anzahl der Düsenlöcher, die einen Durchmesser im Bereich von 80 bis 200 μm aufweisen, kann dabei variieren. Inzwischen sind Injektoren mit 6 – 8 Löchern beliebt. Außerdem sind Düsenlocheinlauf-Formen mit und ohne hydroerosive Verrundung möglich. Das zylindrische oder konische Spritzloch mit diversen Verrundungen sind einige mögliche Ausführungen [10].

4.3.2 Eindringtiefe, Lage des Injektors und Kraftstoffmasse

Die Eindringtiefe und Lage des Injektors sind wichtig, da der Ausbreitungswinkel sowie die Konzentration des Kraftstoffes davon abhängen. Da das Einspritzsystem an den jeweiligen Motor exakt angepasst werden muss (Applikation), wird die Eindringtiefe und Lage des Injektors dabei motorspezifisch eingestellt. Vorzugsweise werden die Injektoren senkrecht ungefähr in die Mitte des Zylinders eingebaut, sodass nur die Düsenstritzlöcher im Inneren des Brennraums bleiben und der Brennstoff ohne weiteres in den Brennraum gelangen kann, siehe Abbildung 4.5 (b). Im Falle einer dezentralen Anordnung ist der Injektor um einen bestimmten Winkel geneigt, so dass die Höhenwinkel der Einspritzstrahlen einzelner Spritzlöcher unterschiedlich ausfallen. Damit wird die Dezentralität zur Kolbenmulde behoben [79].

Die Kraftstoffmasse wird allerdings motorspezifisch mit Beachtung folgender Parameter berechnet [101]:

- Drehzahl,
- Abgastemperatur,
- Drehmoment- und Drehzahlobergrenzen,
- Maximaler zulässiger Zylinderdruck,
- Rauchgrenze.

Für das erforderliche Einspritzvolumen gilt

$$V_K = \frac{P_e \cdot b_e \cdot 2}{z \cdot n_M \cdot \rho_K}, \quad (4.1)$$

wobei P_e die effektive Motorleistung, b_e den spezifischen Kraftstoffverbrauch, z die Zylinderanzahl, n_M die Motordrehzahl und ρ_K die Kraftstoffdichte darstellt [101].

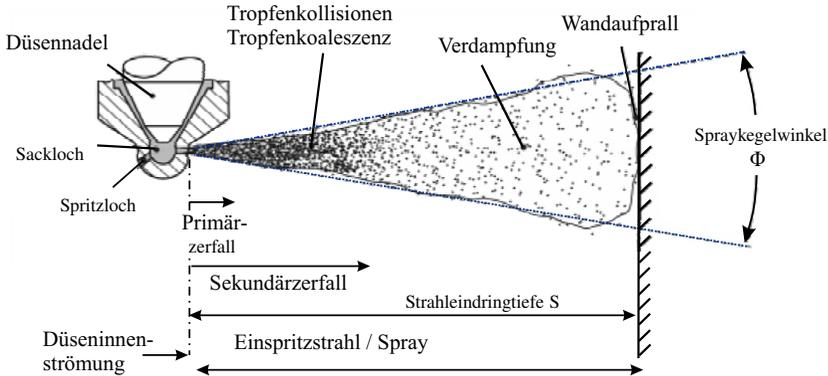


Abbildung 4.7 Ausbreitung des Einspritzstrahles [72].

Mit der Formel

$$V_{\text{Aus}} = A_D \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_K} \cdot \Delta p} \quad (4.2)$$

kann das an der Düse austretende Kraftstoffvolumen berechnet werden. Dabei entspricht A_D dem geometrischen Düsenlochquerschnitt, Δt der Einspritzdauer, α dem Durchflusswert, ρ_K der Kraftstoffdichte und Δp dem Differenzdruck (Kraftstoffseite – Brennraumseite) [101].

Abbildung 4.7 stellt den Einspritzstrahl grafisch dar. Beim Bilden des Luft-Kraftstoff-Gemisches spielt die im Brennraum entstehende Strömung (Drall, Quetsch und Turbulenz) eine relevante Rolle, die auch den vordefinierten Abstand der Keramikglühkerze zu diesem Einspritzstrahl ebenfalls beeinflusst.

4.3.3 Einspritzdruck und -temperatur

Die Common-Rail-Systeme ermöglichen hohe Einspritzdrücke von über 2500 bar. Es wird versucht, den Einspritzdruck so weit wie möglich zu steigern [7]. Durch die Erhöhung des Injektionsdrucks wird eine Reduzierung von Emissionswerten und eine bessere Verbrennung ermöglicht.

Es gibt derzeit keine ausreichenden Untersuchungsergebnisse, die aussagen, wo das Optimum der Druckerhöhung liegt. Dies bedeutet, bis zu welchem Wert die Injektionsdruckerhöhung für Emissionsminderung sorgen wird, ist unklar.

Die Änderung des Raildruckes hat lokal betrachtet einen Einfluss auf den Einspritzstrahlwinkel [80]. Einen Überblick über die Raildruckeinstellung gibt Abbildung 4.8.

Die Temperatur des eingespritzten Kraftstoffes liegt im Bereich von 100 bis 150 °C. Aufgrund des hohen Drucks entsteht vor allem beim Vollastbetrieb im Injektorbereich Wärme, die mithilfe eines Kraftstoffkühlers kompensiert wird. Mittlerweile gibt es auf dem Markt Common-Rail-Systeme, die wegen der reduzierten hydraulischen Verlustleistung niedrige Kraftstofftemperaturen aufweisen und keine zusätzliche Kühlung benötigen [7].

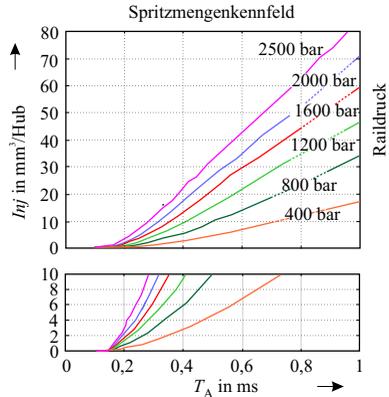


Abbildung 4.8 Mengen über Einspritzdauer [71].

4.3.4 Mehrfacheinspritzung und Einspritzstellen

Die hohen Einspritzdrücke machen das Einbringen größerer Kraftstoffmengen in kürzester Einspritzdauer möglich. In Abbildung 4.8 ist dies anschaulich belegt. Die Reduktion der Einspritzdauer führt dazu, dass mehr Einspritzungen, wie Abbildung 4.9 illustriert, innerhalb eines Arbeitsspieles (Zyklus) realisierbar sind. Mit dieser Strategie der Mehrfacheinspritzung wird das Potential des CR-Einspritzsystems optimal ausgeschöpft.

Aufgeteilt ist die Mehrfacheinspritzung in drei Hauptgruppen: Piloteinspritzung (Voreinspritzung), Haupteinspritzung sowie Nacheinspritzung. Diese Einspritzregime kann in Abhängigkeit der Motorbetriebspunkte unterschiedlich ausfallen. Ein gutes Beispiel dafür sind die hohen Drehzahlen, welche wegen der kürzeren Arbeitsspielzeit die Piloteinspritzung nicht ermöglichen, siehe Abbildung 4.9. Die Portionen der Pilot- und Nacheinspritzung fallen im Vergleich zur Haupteinspritzung kleiner aus. Es ist außerdem möglich, die Aufgabe dieser Einspritzungsgruppen mit bis zu drei Teilinjektionen reibungslos durchzuführen. Die Kraftstoffportionierung – angepasst an den momentanen Betriebspunkt – geht mit dem Ziel einher, einerseits die Leistung und den

Kraftstoffverbrauch und andererseits die Emissionen zu optimieren.

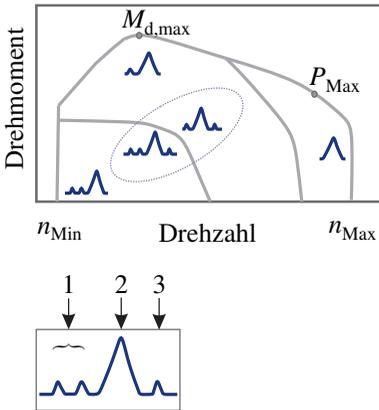


Abbildung 4.9 Mögliche Anwendungsgebiete von Mehreinspritzungen: 1) Vor-, 2) Haupt-, 3) Nacheinspritzung [30].

Die Aufgabe der Pilotinspritzung besteht darin, das thermodynamische Niveau für die Selbstzündung anzuhoben [6]. Diese Vorkonditionierung des Brennraums senkt die Verbrennungsgeräusche, konträr dazu werden Rußemissionen und Kraftstoffverbrauch erhöht. Dieser Nachteil kann durch die Nacheinspritzung kompensiert werden.

Es ist in Abbildung 4.10 zu erkennen, wie mittels ECU der Ansteuerbeginn von Vor- und Haupteinspritzung bei modernen PKW-Dieselmotoren entsprechend den Wünschen des momentanen Motorbetriebspunktes eingestellt werden kann. Diese Erkenntnis ist vor allem für die Bestimmung der Einspritzzeitpunkte relevant, da die Injektionen nicht in jedem Zyklus bei gleichem Kurbelwellenwinkel beginnen.

nicht in jedem Zyklus bei gleichem Kurbelwellenwinkel beginnen.

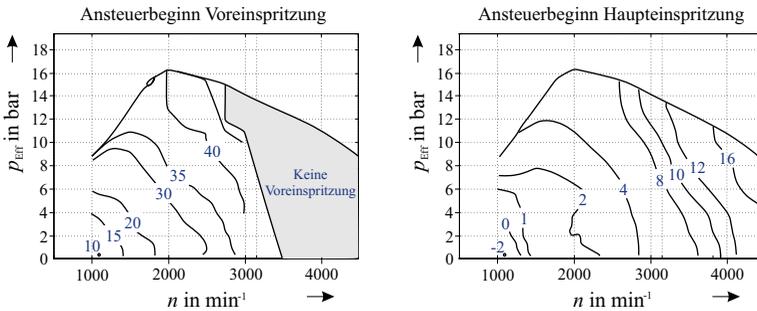


Abbildung 4.10 Beispiel für den Ansteuerbeginn von Vor- und Haupteinspritzung im Kurbelwellenwinkel (blau) vor OT (Oberer Totpunkt). p_{eff} : Effektiver Mitteldruck [101].

4.4 Verbrennung mit Zündverzug

Der Zündverzug τ_{ZV} beschreibt den Zeitraum vom Einspritzbeginn bis zum Entflammen des Luft-Kraftstoff-Gemisches. In Abbildung 4.11 ist dies anschaulich dargestellt. In Abhängigkeit der Temperatur T und des Druckes p ändert sich dieser Zündverzug [72]. Da die Bestimmung des tatsächlichen Brennbeginns nicht komplex ist, gab es in der Vergangenheit sehr viele Ansätze, das Gemischentflammen nach dem Einspritzbeginn zu bestimmen. Pischinger (1991), Hiroyasu (1975), Wiesser (2001) sowie Barba (2001) sind einige relevante Arbeiten. Vor allem Barba nutzte diverse Methoden zur Abstimmung seines Ansatzes für Pilot- und Haupteinspritzung.

Dementsprechend gilt

$$\tau_{ZV} = \tau_{\text{phys}} + 4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^{-1,2} \cdot \lambda^{0,2} \cdot e^{\frac{6600}{T}} \quad (4.3)$$

und für den physikalischen Teil

$$\tau_{\text{phys}} = c \cdot u_{\text{Tropfen}} \cdot d_{\text{Düse}} = c \cdot \sqrt{2/\rho_{\text{Kst}} \cdot p_{\text{inj}}} \cdot d_{\text{Düse}}, \quad (4.4)$$

wobei c den Parameter der Aktivierungsenergie, $d_{\text{Düse}}$ den Düsendurchmesser, ρ_{Kst} die Dichte des Kraftstoffes, p_{inj} den Injektionsdruck, λ das Luftverhältnis, p_{ref} den Druck des Referenzpunktes und u_{Tropfen} die Tropfengeschwindigkeit beschreiben [11].

Ausgehend von dem Zündverzug ist es deutlich, wie die zu bestimmenden Einspritzzeitpunkte das Entflammen des Kraftstoff-Luft-Gemisches beeinflussen. Nicht nur der Einspritzbeginn, sondern auch die eingespritzte Kraftstoffmischung (Cetanzahl⁵) spielen eine relevante Rolle für den Brennverlauf.

4.4.1 Fazit

Im diesem Kapitel wurde der Dieselmotor kurz erläutert. Die vier Arbeitsspiele, welche sich zyklisch wiederholen, ermöglichen einen Einblick in den Prozess einer Dieselverbrennung. Außerdem bildete die Thematisierung der Einspritz-

⁵ Cetanzahl gibt die Zündwilligkeit des Diesels an. Bei handelsüblichen Dieselmotorkraftstoffen liegt diese Zahl zwischen 54 und 56. Gewünscht sind allerdings etwas höhere Werte.

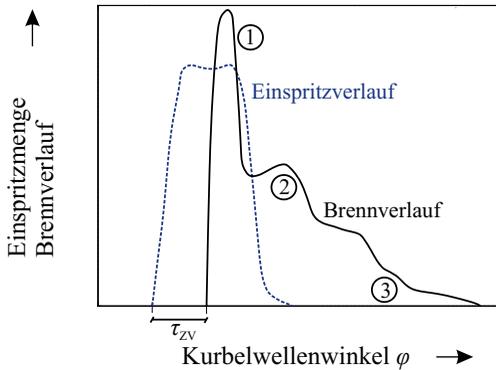


Abbildung 4.11 Möglicher Einspritz- und Brennverlauf im Dieselmotor. 1: initiale vorgemischte Verbrennung, 2: mischungskontrollierte Verbrennung, 3: reaktionskinetisch kontrollierte Verbrennung [72].

technologie, welche den Kraftstoff für eine 4-Takt-Verbrennung auf den Kurbelwellenwinkel genau mit Hochdruck bereitstellt, einen wichtigen Teil dieses Kapitels. Dabei ist die Positionierung des Einspritzinjektors im Brennraum ebenfalls detailliert erklärt worden, da die Lage der Keramikglühkerze davon abhängt. Die optimierten Injektorkennlinien sorgen schließlich für präzise Einspritzungen.

Abgesehen von diesen Grundlagen spielen die Einspritzzeitpunkte und -dauern für diese Arbeit eine relevante Rolle, weshalb sie ebenfalls vorgestellt wurden. Durch die anschauliche Präsentation des Zündverzuges ließ sich die Erklärung der Dieselverbrennung vervollständigen.

5 Sensorsignale

Das Sensorsignal wird durch die aktive Umkehrung des physikalischen Aktorprinzips an der Keramikglühkerze erzeugt, da ein PTC-Effekt vorliegt (grob formuliert). Das heißt, durch den von außen zugeführten Strom wird eine Widerstandsänderung der KGK mittels eines aufgezeichneten Spannungssignals ermittelt. Die Widerstandsänderung ist die Folge einer Temperaturänderung in der Kerze und kann sowohl als statische, quasistatische als auch dynamische Messgröße betrachtet werden.

Das KGK-Signal wird in diesem Kapitel analysiert. Deshalb wird im Folgenden die modellbasierte Darstellung der Keramikglühkerze diskutiert. Hierbei wird das bereits existierende Modell [36] hinsichtlich der Kappenkerzen, die in dieser Arbeit verwendet werden und einen höheren Widerstand im Spitzenbereich aufweisen, optimiert. Bei dem Modell verändern sich die Ausgangsgrößen Kerzenwiderstand und Kerzentemperatur in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen Umgebungstemperatur sowie Anregungsstrom. Der messbare Kerzenwiderstand ist schließlich als Sensorsignal die relevante Eingangsgröße des Sensormodells. Da das Sensorsignal Informationen über den Brennraum liefern soll, wurde das Brennraummodell mit den wichtigen Parametern ebenfalls behandelt. Mit Hilfe dieser Modelle, sowie der Messdaten, erfolgte am Ende eine Analyse sowie Verfahren zur Vorverarbeitung dieses Sensorsignals.

5.1 Modellbasierte Analyse der Glühkerzen

Basierend auf den in Kapitel 3 erläuterten KGK-Grundlagen kann modellierungstechnisch die Kerze in einzelne Komponenten unterteilt werden. Abbildung 5.1 stellt die Unterteilung der Keramikglühkerze in fünf Komponenten dar. Der vordere Bereich der Keramikglühkerze, der ausschließlich für die Modellierung verwendet wird, besteht aus einem Metallkörper, einer Stahllegierung, einem Heizelement und einer Schutzhülse. Der vordere Bereich ist un-

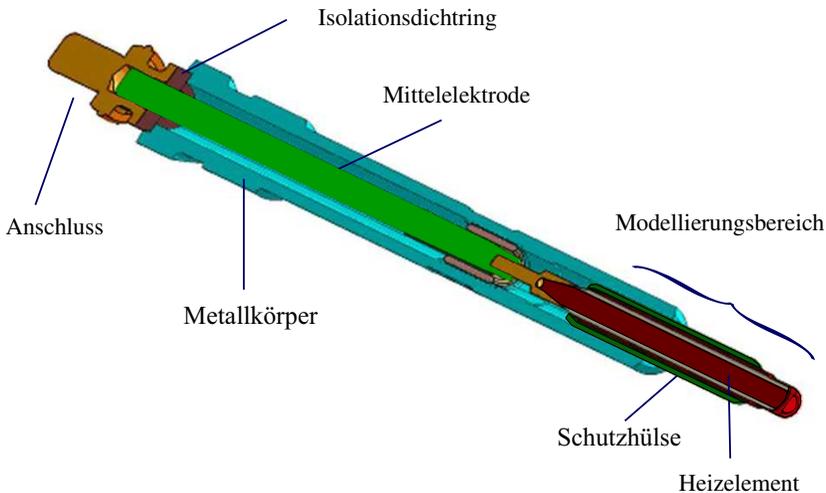


Abbildung 5.1 Hauptkomponenten der Keramikglühkerze (3D-Darstellung der Glühkerze im Längsschnitt).

gefähr 40 mm lang und von großem Interesse, da dieser Teil der KGK den größten Temperaturänderungen ausgesetzt ist. Abbildung 5.2 illustriert diesen Bereich mit den in Kapitel 3 vordefinierten Farben.

Die Modellierung solcher keramischer Materialien muss die Form und die Interaktion verschiedener Bereiche sowohl in radialer als auch in axialer Richtung berücksichtigen. Das heißt, die zuvor diskutierten Perkolationsunterschiede und Materialeigenschaften in einzelnen Zonen (Abbildung 5.2) müssen in einer realitätsnahen Simulation der Kerzenfunktionen in Betracht gezogen werden. Durchgeführt wird dies anhand der mathematischen Beschreibung der elektrischen sowie thermischen Eigenschaften einzelner Zonen. Die Randbedingungen der einzelnen Zonen gehören ebenfalls dazu. Da beim Aufheizen oder Abkühlen der Keramikglühkerze keine signifikante Geometrieänderung¹ eintritt, kann diese vernachlässigt werden. Im Gegensatz zum Wärmeaustausch

¹ Die ingenieurkeramischen Werkstoffe des Heizelements heben sich vor allem durch die sehr hohe Bruchzähigkeit, die Korrosionsbeständigkeit sowie die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen ab und weisen Thermoschock-resistente Strukturen auf ([2] und [40]).

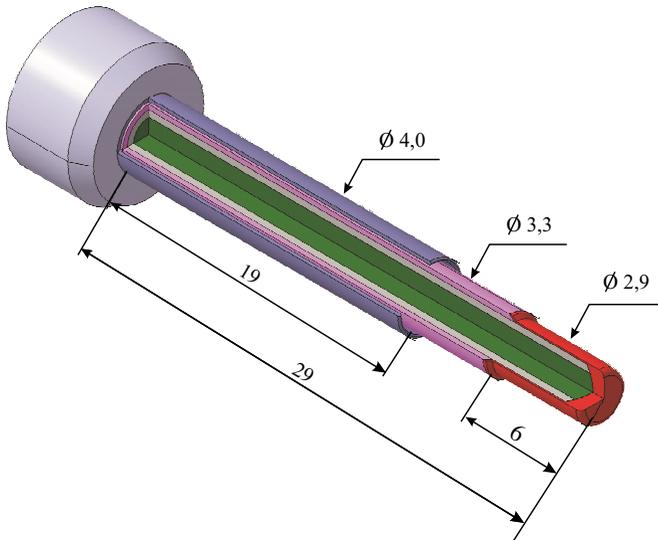


Abbildung 5.2 Aufbau des KGK-Vorderbereichs mit Sollwerten (3D-Darstellung der Glühkerze im Längsschnitt) [36].

entsteht außerdem keine (Wärme-)Strahlung zwischen den Zonen. Dies führt dazu, dass bei der Modellierung der KGK zumindest in diesem Punkt von konstanten Werten ausgegangen werden kann. Dazu erfolgt zuerst eine eindimensionale Betrachtung der Kerze in axialer Richtung, d. h. von der Spitze in die Achse der Kerze schauend. Es ist in Abbildung 5.2 ersichtlich, dass die hülseförmigen Schichten ineinander verschachtelt sind. Prinzipiell können Materialien mit solch einer Geometrie mit Hilfe diverser Methoden zweckdienlich idealisiert werden, wie beispielsweise mittels analytischer sowie numerischer Methoden.

Aufgrund der Komplexität von KGK sind gute Annäherungen nur mit erheblichem Aufwand zu erreichen, obwohl die Kerze sich wie bei vielen anderen thermisch-elektrischen Problemen ebenfalls durch Differentialgleichungen beschreiben lässt. Um dieses Problem zu umgehen, wird die Keramikglühkerze diskretisiert. Betrachtet wurde die Kerze schließlich mittels einer numerischen Lösung, die die Finite-Differenzen-Methode verwendet.

5.1.1 Finite-Differenzen-Methode

In der Finite-Differenzen-Methode (FDM) wird eine Lösung zu thermodynamischen Festkörperproblemen angenähert. Die FDM ist ein Diskretisierungsverfahren genauso wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Finite-Volumen-Methode (FVM). All diese Verfahren unterteilen die Geometrie in endlich viele Rechenzellen und weisen verschiedene Diskretisierungsarten auf. Im Vergleich zu dem numerischen Näherungsverfahren FEM sind bei FDM die Anforderungen an das Gitter zur Berechnung der Lösung wesentlich strenger, dafür ist allerdings aufgrund der Differenzenquotienten der Implementierungsaufwand geringer. Die Flexibilität von FEM ist andererseits für komplexere Geometrien mit der Nutzung der thermischen Basisfunktionen sinnvoll. Bei einfachen, zylinderförmigen Objekten, wie es bei der Keramikglühkerze der Fall ist, ist die Flexibilität von FEM jedoch nicht erforderlich.

5.1.1.1 Schrittweise Durchführung

Ein strukturiertes Gitternetz, welches aus den parallelen, senkrecht aufeinander stehenden Gitterlinien besteht, wird zuerst über das Lösungsgebiet gelegt. Zu jedem Knotenpunkt (diskrete Punkte) wird anschließend die Lösung der Differenzialgleichung (DGL) bestimmt. Dies geschieht durch Differenzenquotienten (Ersetzung räumlicher sowie zeitlicher Ableitungen von DGLs mittels finiter Ausdrücke), die sich mittels Taylorentwicklung approximieren lassen. Die ermittelten Differenzenausdrücke liefern in jedem diskreten Knotenpunkt ein Gleichungssystem. Eine ausführliche Darstellung zu diesem Verfahren findet sich in [43].

5.1.1.2 Anwendung mit KGK

Der thermische Zustand der Keramikglühkerze wird bekanntlich mit der Temperatur charakterisiert. Die Temperatur in einem Knotenpunkt hängt nicht nur von dem Ort, sondern auch von der Zeit ab, weshalb das Temperaturfeld instationär angenommen wird. Wegen der Anordnung innerhalb der Keramikglühkerze (ineinander liegende Hülsen) ergibt sich eine Rotationssymmetrie. Für die Rotationssymmetrie gilt:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \alpha^2} = 0, \quad (5.1)$$

wobei α dem Winkel entspricht. Nachdem das zu modellierende Glühkerzenfeld mit einem Gitternetz überzogen wurde, wird die Wärmeleitung durch eine Taylor-Reihe angenähert. Wegen der symmetrischen, zylindrischen Anordnung der Keramikglühkerze genügt die geometrische Betrachtung des Wärmeeinflusses in axialer und radialer Richtung. Die elliptische partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung (auch bekannt als Poisson-Gleichung) des Wärmeleitungsproblems wird mit

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \underbrace{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)}_{\text{Wärmeleitung}} \quad (5.2)$$

und (umgeformt)

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}_{\text{Wärmeleitung in axialer Richtung}} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{Wärmeleitung in radialer Richtung}} \quad (5.3)$$

angegeben, wobei a den Wärmeleitungskoeffizienten, also den Transportkoeffizienten der instationären Wärmeleitung in m^2/s , ρ die Massendichte in kg/m^3 , c die spezifische isobare Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ und λ die Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ darstellen. Zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung werden in der Mathematik üblicherweise numerische Verfahren eingesetzt. Die Methode der finiten Differenzen (explizit oder implizit) sowie das Crank-Nicolson-Verfahren eignen sich zur Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung. Die zweidimensionale Wärmeleitungsgleichung lässt sich dagegen mithilfe der Methode der finiten Differenzen mit 5-Punkt-Formel oder des impliziten Verfahrens der alternierenden Richtungen (ADI-Verfahren) bewerkstelligen [77]. Entsprechend der Finite-Differenzen-Methode wird hierbei diese Differentialgleichung an diskreten Gitterrechenzellen anhand der Differenzengleichung gelöst. Somit wird das Gesamtsystem approximiert. Der selbstadjungierte Differenzialoperator schreibt sich als:

$$D = \frac{\partial}{\partial r} \left(f \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.4)$$

mit

$$f = r^m \lambda(T) \quad \text{und} \quad m = 0, 1, 2. \quad (5.5)$$

Mit dem zentralen Differenzenquotienten wird es exemplarisch in radialer Richtung ($m = 1$) durchgeführt. Damit ergibt sich für die Gleichungen (5.4) und (5.5)

$$D_i^k = \frac{1}{\Delta r_i} \left[\left(f \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i+\frac{1}{2}}^k - \left(f \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i-\frac{1}{2}}^k \right] \quad (5.6)$$

$$= \frac{1}{\Delta r_i} \left[\frac{2 \cdot f_{i+1/2} \cdot (T_{i+1} - T_i)}{\Delta r_i + \Delta r_{i+1}} - \frac{2 \cdot f_{i-1/2} \cdot (T_i - T_{i-1})}{\Delta r_i + \Delta r_{i-1}} \right] \quad (5.7)$$

und für

$$f_{i\pm\frac{1}{2}}^k = \left(r_i \pm \frac{\Delta r_i}{2} \right)^m \lambda(T_{i\pm\frac{1}{2}}), \quad m = 0, 1, 2, \quad (5.8)$$

wobei i einem diskreten Punkt des zentrierten Gitters entspricht. Die Differenzgleichungen müssen die Änderungen der Materialeigenschaften in einzelnen Punkten berücksichtigen, da eine Temperaturänderung dies ebenfalls verursacht. Für die Wärmeleitfähigkeit ergibt sich

$$\lambda_{i\pm\frac{1}{2}}^k = \frac{2\lambda_i^k \lambda_{i\pm 1}^k}{\lambda_i^k + \lambda_{i\pm 1}^k}. \quad (5.9)$$

Setzt man die Gleichung (5.9) mit T_i und $T_{i\pm 1}$ in (5.8) und die daraus resultierende Gleichung in (5.8) und anschließend in (5.3) ein, so lässt sich die Finite-Differenzen-Lösung der Differentialgleichung in radialer Richtung wie folgt beschreiben:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\lambda_i}{r_i \Delta r_i} \left(\left[\frac{(2r_i \lambda_{i+1} + \Delta r_i \lambda_{i+1})(T_{i+1} - T_i)}{(\lambda_i + \lambda_{i+1})(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} \right] - \left[\frac{(2r_i \lambda_{i-1} - \Delta r_i \lambda_{i-1})(T_i - T_{i-1})}{(\lambda_i + \lambda_{i-1})(\Delta r_i + \Delta r_{i-1})} \right] \right). \quad (5.10)$$

Die Berechnung in axialer Richtung kann analog zu Gleichung (5.10) erfolgen. Eine Halbkugel an der Spitze erfordert jedoch die Wärmeleitung über den

gemittelten radialen Abstand $\frac{1}{2} \cdot (\Delta z + \frac{\pi}{2} r_i)$ zu ermitteln, statt über Δz . Die Gesamtdifferenzengleichung der PDE ist

$$\begin{aligned}
 c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = & \overbrace{\frac{4\lambda_i}{\Delta z_i} \left[\frac{\lambda_{i+1}(T_{i+1} - T_i)}{(\lambda_i + \lambda_{i+1})(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})} - \frac{\lambda_{i-1}(T_i - T_{i-1})}{(\lambda_i + \lambda_{i-1})(\Delta z_i + \Delta z_{i-1})} \right]}^{\text{Wärmeleitung in axialer Richtung}} \\
 & + \underbrace{\frac{2\lambda_i}{r_i \Delta r_i} \left[\frac{(2r_i \lambda_{i+1} + \Delta r_i \lambda_{i+1})(T_{i+1} - T_i)}{(\lambda_i + \lambda_{i+1})(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} - \frac{(2r_i \lambda_{i-1} - \Delta r_i \lambda_{i-1})(T_i - T_{i-1})}{(\lambda_i + \lambda_{i-1})(\Delta r_i + \Delta r_{i-1})} \right]}_{\text{Wärmeleitung in radialer Richtung}}.
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Bei der Beschreibung des Temperaturfeldes wurden neben der physikalischen Wärmeleitung auch weitere relevante Punkte, wie die durch den Strom erzeugte Wärme und durch Strahlung und Konvektion verloren gegangene Wärme, in Betracht gezogen. Dementsprechend wird die Gleichung (5.11) erweitert:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{1}{c\rho} \overbrace{\frac{4\lambda_i}{\Delta z_i} \left[\frac{\lambda_{i+1}(T_{i+1} - T_i)}{(\lambda_i + \lambda_{i+1})(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})} - \frac{\lambda_{i-1}(T_i - T_{i-1})}{(\lambda_i + \lambda_{i-1})(\Delta z_i + \Delta z_{i-1})} \right]}^{\text{Wärmeleitung in axialer Richtung}} \\
 & + \frac{1}{c\rho} \underbrace{\frac{2\lambda_i}{r_i \Delta r_i} \left[\frac{(2r_i \lambda_{i+1} + \Delta r_i \lambda_{i+1})(T_{i+1} - T_i)}{(\lambda_i + \lambda_{i+1})(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})} - \frac{(2r_i \lambda_{i-1} - \Delta r_i \lambda_{i-1})(T_i - T_{i-1})}{(\lambda_i + \lambda_{i-1})(\Delta r_i + \Delta r_{i-1})} \right]}_{\text{Wärmeleitung in radialer Richtung}} \\
 & + \underbrace{\frac{W_e}{c \cdot \rho}}_{\text{Wärmeentstehung}} - \underbrace{\frac{\dot{Q}}{c \cdot \rho}}_{\text{Wärmeverlust}},
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

wobei W_e der Leistungsdichte und \dot{Q} der Wärmeenergie bei dem Wärmeverlust entspricht. Mit Hilfe des spezifischen elektrischen Widerstandes lässt sich die Wärmeentstehung einfach berechnen:

$$W_e(T, x, t) = \rho_{\text{el}}(T) \cdot i_{\text{el}}^2 = \frac{I_{i,j}^2 \cdot R_{i,j}}{\underbrace{\Delta x \cdot A_{i,j}}_{\text{Für einzelne Knoten}}}. \tag{5.13}$$

Der Wärmeverlust lässt sich wie folgt interpretieren:

Der Wärmestrom \dot{Q} ist im Grunde genommen die Wärmeleistung, welche den Unterschied der emittierten und absorbierten Wärmestrahlung angibt. Das heißt, der nichtstoffgebundene Energietransport findet mittels elektromagnetischer Wellen von der höheren zur niedrigeren Temperatur (2. Hauptsatz der Thermodynamik) statt. Aus der Definition

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T^4 - T_A^4) \quad (5.14)$$

wird die Wärmestromdichte

$$q_S = \frac{\dot{Q}}{A} = \sigma \cdot \epsilon(T) \cdot (T^4 - T_A^4) \quad (5.15)$$

ermittelt. Dabei gibt $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ die Stefan-Boltzmann-Konstante, $\epsilon(T)$ den Emissionsgrad des Strahlers, A die Fläche und der Index A den Außenbereich der Kerze an. In diesem System gibt es nicht nur über die Wärmestrahlung Wärmeverluste, sondern auch über die Konvektion. Die Konvektion ist ein weiterer Wärmetransportmechanismus, der stoffgebundenen Energietransport in einem Fluid beschreibt. Mit Hilfe des massegebundenen Wärmestroms

$$\dot{Q} = \alpha_K \cdot A \cdot (T_W - T_L) \quad (5.16)$$

lässt sich die Wärmestromdichte

$$q_W = \frac{\dot{Q}}{A} = \alpha_K \cdot (T_W - T_L) \quad (5.17)$$

ermitteln. T_W entspricht der Wand und T_L der Luft. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_K wird in der Praxis über die dimensionslosen Kennzahlen wie etwa die Nußelt-Zahl² ermittelt.

² Die Nußelt-Zahl ermöglicht die Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs von einem Körper zum strömenden Fluid und ist abhängig von der Temperaturgrenzschicht, vom Strömungszustand, von der Wärmestrom-Richtung und von der Geometrie [68].

5.1.1.3 Ermittlung der Materialeigenschaften

Um den Transportkoeffizienten der Wärmeleitung in jeder Rechenzelle ermitteln zu können, werden die im Unterkapitel 3.1.2 dargestellten Messkurven der Materialeigenschaften a , ρ , c sowie λ für die vier Halbleiterzonen mit diversen Mischverhältnissen (siehe Abbildung 3.5) approximiert. In Abbildung 5.3 ist die Approximation demonstrativ für die Wärmeleitfähigkeit der Zone V53 anschaulich dargestellt.

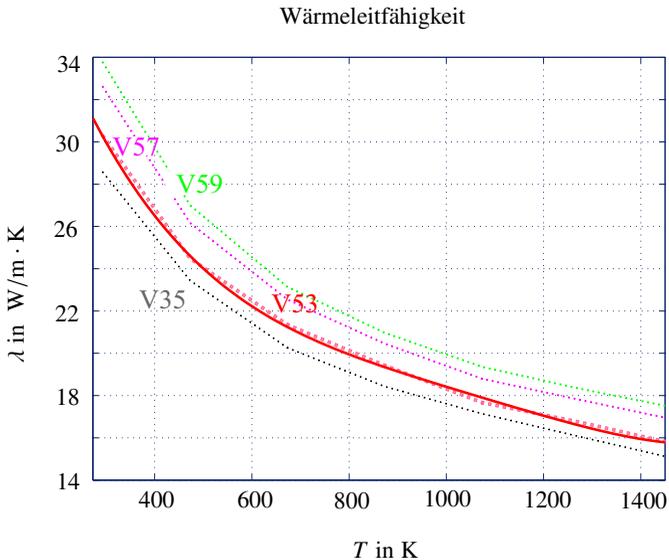


Abbildung 5.3 Approximation der Wärmeleitfähigkeit für die Zone V53:
 $\lambda_{V53}(T) \approx 1,8 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 7,6 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 0,00012 \cdot T^2 - 0,096 \cdot T + 50$.

Sowohl die Messpunkte der Wärmeleitfähigkeit als auch die spezifische Wärmekapazität und die Temperaturleitfähigkeit wurden mit einem Polynom 4. Grades angenähert. Für die Messpunkte des spezifischen elektrischen Widerstandes war eine lineare Annäherung ausreichend.

5.1.2 Diskretisierung des zu modellierenden Kerzenbereichs

Ein- und Ausgangsgrößen des Modells sind folgende Größen:

- **Eingangsgrößen:** Spannung, Umgebungstemperatur, Luftströmung,
- **Ausgangsgrößen:** Kerzenwiderstand, Kerzentemperatur.

Durch die Variation der angelegten Spannung wird in der Praxis die benötigte Kerzentemperatur (Kerzenwiderstand) direkt eingestellt. Bei der Kerzenansteuerung beeinflussen die thermischen Änderungen in der Kerzen-Umgebung (Umgebungstemperatur und Luftströmung) die Reaktion der Keramikglühkerze. Die Wahl dieser Größen ist dadurch plausibel.

Nachdem die Ein- und Ausgangsgrößen des Modells definiert wurden, wird für die numerische Simulation mit der FDM-Methode die Kerze diskretisiert. Die Diskretisierung findet sowohl in axialer als auch in radialer Richtung statt.

Diskretisierung in axialer Richtung: Wie in Abbildung 5.2 zu sehen, ist der Glühstift etwa 29 mm lang und der als Glühkörper anzusehende Bereich ungefähr 11 mm. Die Kerze wird entlang der Rotationsachse in 39 gleich lange Scheiben mit der Länge von $dx = 1$ mm und eine aufgrund der kugelförmig abgerundeten Spitze mit der Länge von 0,87 mm aufgeteilt.

Diskretisierung in radialer Richtung: Entsprechend der Materialbelegung innerhalb der Keramikglühkerze (Abbildung 3.5) teilt sich in radialer Richtung die Anzahl der Bereiche mit der Dicke dr pro Scheibe auf.

5.1.3 Ermittlung der vom Ohmschen Gesetz postulierten Größen

Der KGK-Gesamtwiderstand lässt sich aus den Teilwiderständen bestimmen. Bei der Berechnung sind das induktive sowie kapazitive Verhalten zu vernachlässigen. In Abbildung 5.4 ist dies anschaulich dargestellt. Außer dem Isolator werden alle Teilwiderstände entsprechend den zuvor erwähnten Zonen ermittelt. Nicht nur die Gesamt- und Teilwiderstände sind interessant für die Modellierung, sondern auch die Gesamt- und Teilstromstärken. Dies erfordert eine Anpassung des Ersatzschaltbildes. In Abbildung 5.5 ist die schaltungstechnische Darstellung für die Teilströme zu sehen.

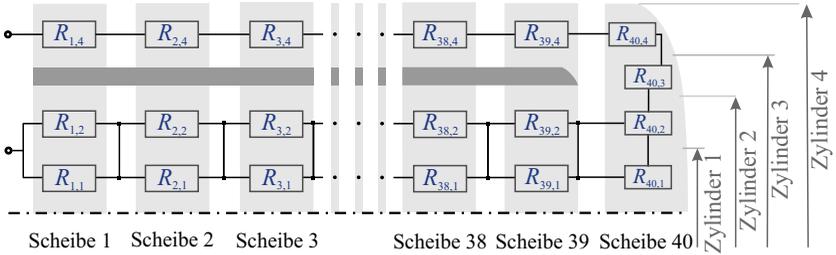


Abbildung 5.4 Widerstandsverbindungen in K GK (Wegen Symmetrie: nur eine Hälfte des Längsschnitts dargestellt).

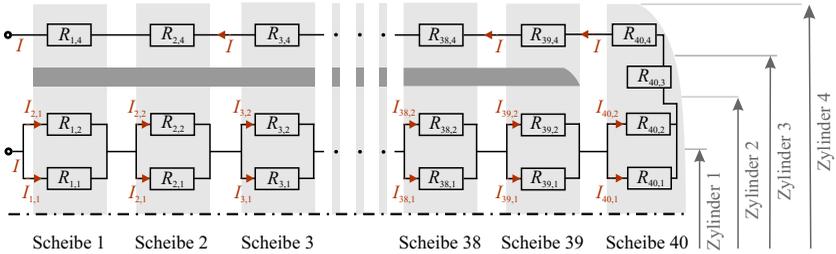


Abbildung 5.5 Darstellung der Widerstandsschaltung in K GK (Wegen Symmetrie: nur eine Hälfte des Längsschnitts dargestellt. Umgeformt für die Teilströme).

Mit Hilfe des spezifischen Widerstandes lassen sich die einzelnen Teilwiderstände berechnen:

$$R_{i,j} = \rho(T) \cdot \frac{\Delta x}{A}. \quad (5.18)$$

Aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften ist dieser Widerstand temperaturabhängig. Entsprechend der Widerstandsregel von Reihen- und Parallelschaltungen gilt für den Gesamtwiderstand:

$$R_{\text{Ges}} = \sum_{i=1}^{i=40} \left[\frac{R_{i,1} \cdot R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} + R_{i,4} \right] + R_{40,3}. \quad (5.19)$$

Die Teilwiderstände $R_{i,4}$ errechnen sich je nach Anzahl der Schichten aus verschiedenen Teiltwiderständen. Für den Strom gilt:

$$I = \frac{U}{R_{\text{Ges}}} . \quad (5.20)$$

Die Teilströme lassen sich dabei wie folgt berechnen:

$$I_{j,1} = \frac{I \cdot R_{j,2}}{R_{j,1} + R_{j,2}} \quad \text{bzw.} \quad I_{j,2} = \frac{I \cdot R_{j,1}}{R_{j,1} + R_{j,2}} . \quad (5.21)$$

Grzegorz Maksym stellt in seiner Diplomarbeit [36] den Abgleich und die Verfeinerung eines bestehenden Keramikglühkerzen-Modells (ein Modell der Firma BorgWarner) basierend auf den in den Unterkapiteln 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 erläuterten Berechnungsmethoden vor. Das Modell, welches mittels bekannter Materialeigenschaften in Matlab/ Simulink (mit variabler Abtastzeit) erstellt wurde, ist in der Lage, für eine bestimmte Serienglühkerze (BERU /BorgWarner) gute Ergebnisse zu liefern. Zur Untersuchung des Kerzenverhaltens hinsichtlich Geometrie-Änderung oder aktive Kühlung kann das Modell beispielsweise eingesetzt werden. Abbildung 5.6 stellt das Modell vereinfacht dar. Bei anderen Kerzen müssen die Parameter entsprechend angepasst werden.



Abbildung 5.6 Vereinfachtes Glühkerzenmodell. $U(t)$: Spannung, $T_A(t)$: Temperatur in unmittelbarer Umgebung der Kerze, $R_{\text{KGK}}(t)$: Kerzenwiderstand sowie $T_{\text{KGK}}(t)$: Kerzentemperatur.

Abgesehen von diesem Modell sind die Veröffentlichungen von Ramita Suteekarn erwähnenswert. Ihre Masterarbeit [91] stellt zur Ermittlung des thermisch-elektrischen Verhaltens der Keramikglühkerze im Brennraum einen robusten und dynamischen Beobachter vor. Dieser Beobachter ist in der Lage in Abhängigkeit von Motorparametern wie etwa Drehzahl, Druckkennfelder, Kerzenspannung, die Glühkerzentemperatur (Abweichung weniger als 13 %) zu bestimmen. In [93] und [92] zeigt Ramita Suteekarn ein robustes Kaskadenmo-

dell zur Regelung der Oberflächentemperatur von keramischen Glühkerzen in einem Dieselmotor.

Im folgenden Unterkapitel wird die Anpassung des von Grzegorz Maksym optimierten Modells für Kerzen mit etwas höheren Widerstandswerten an der Spitze vorgestellt.

5.1.4 Anpassung und Optimierung des bestehenden KGK-Modells

Für die Sensoraufgabe werden Kerzen mit etwas höheren Widerstandswerten an der Spitze analysiert. Der Unterschied macht sich in den Widerstands- und Temperaturwerten bemerkbar und ist in Abbildung 5.7 mit den Verläufen von Widerständen und Temperaturen bei einer angelegten Spannung $U = 5,6 \text{ V}$ ersichtlich.

Die Temperaturverläufe repräsentieren die Werte der heißesten Stelle, die von der Spitze leicht nach hinten ($\approx 3 \text{ mm}$) versetzt ist. Die Widerstände der Kappenkerzen erreichen Werte bis zu $1200 \text{ m}\Omega$ und nehmen im Schnitt höhere Werte im Vergleich zu Serienkerzen an. Aufgrund des erhöhten Kaltwiderstandes ist dies verständlich. Im Gegensatz zu den Widerstandsverläufen sind diese Temperaturverläufe nicht sehr ähnlich. Die Serienkerzen erreichen einen Hochpunkt, bevor sie in den Beharrungszustand übergehen. Nach circa 20 Sekunden fallen die Temperaturen der Serienkerzen leicht ab, was bei Kappenkerzen nicht der Fall ist.

Die Untersuchung bezieht sich auf Werte größer gleich $550 \text{ }^\circ\text{C}$, da die Pyrometer-Einstellung nur die Messung größerer Werte erlaubt. Allerdings werden die Verläufe für Temperaturen kleiner als $550 \text{ }^\circ\text{C}$ extrapoliert. Auf die Messung und Kerzenstreuung wird später eingegangen. Basierend auf dem kurzen Vergleich lässt sich zusammenfassend sagen, dass das bestehende Modell für die Kappenkerzen nicht geeignet ist.

Diesbezüglich wird das Modell im Rahmen dieser Arbeit modifiziert. Es folgt zuerst die geometrische Optimierung, die darin besteht, einerseits das Modell zu vereinfachen und andererseits die Länge des Gesamtkörpers für die untersuchten Kappenkerzen zu modifizieren. Das heißt, die Anzahl der zylindrischen Scheiben, sowie die Länge in radialer und axialer Richtung (dz und dr) entsprechend dieses Kerzentyps werden variiert, um einerseits vor allem

das gewollte Verhalten zu erreichen und andererseits den Rechenaufwand zu verringern.

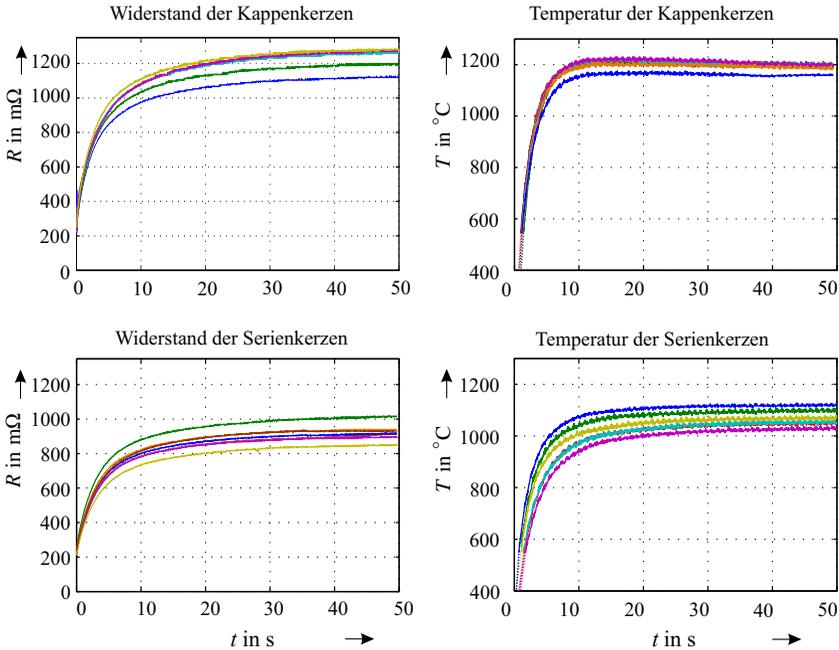


Abbildung 5.7 Vergleich von Serien- und Kappenkerzen. Jede Farbe steht für eine Kerze.

5.1.4.1 Scheibenanzahl

Die Anpassung der Scheibenanzahl (Maschenweite des Gitters) entsprechend den neuen Kerzen wurde wie folgt durchgeführt.

Durch die Anpassung ist die Gesamtanzahl der 40 Scheiben im neuen Modell auf 22 gesunken. In Abbildung 5.8 ist erkennbar, dass die Scheibenanzahl vor allem im hinteren Bereich der Kerze verringert wurde. An der Kappe, wo Temperaturwerte bis zu $1300^{\circ}C$ erreicht werden können und aufgrund der Temperaturabhängigkeit die Änderungen der Materialeigenschaften dementsprechend stärker ausfallen, ist die Anzahl der Scheiben näherungsweise gleich geblieben. Sogar die letzte Scheibe, also die Spitze mit einer Halbkugelform,

wurde mit kleineren Maßen modelliert. Für die substanziellen Längen Δx ergeben sich demgemäß die Werte in Tabelle 5.1.

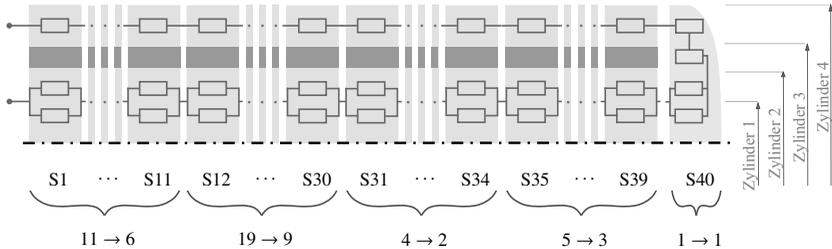


Abbildung 5.8 Anpassung der Scheibenanzahl von 40 auf 22.

Tabelle 5.1 Scheibendicken (Zylinderform).

Scheibe	Länge pro Scheibe in mm
1 bis 6	1,833
7 bis 16	2,11
17 bis 18	2
19 bis 21	1,66
22	0,7

Folglich kann jeder Knoten den Wärmeaustausch in radialer sowie axialer Richtung mit seinen direkten Nachbarknoten weiterhin leisten.

5.1.4.2 Anpassungsparameter

Ohne jegliche Anpassung der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Materialeigenschaften liefert das Modell Temperaturverläufe ohne Überschwinger, sodass die Temperaturverläufe der gewünschten Kappenkerzen (siehe Abbildung 5.7) den Messkurven entsprechen. Die Temperaturwerte im Beharrungszustand liegen allerdings 200 – 300 °C über den Sollwerten. Die gestrichelte Kurve in Abbildung 5.7 illustriert dies für die dunkelgrün dargestellte Kerze. Damit die Mess- und Simulationsergebnisse übereinstimmen, müssen die Materialeigenschaften entsprechend den inneren Perkolationen von einzelnen Zonen angepasst werden. Dies bedeutet, die große Beeinflussung der Stoffkennwerte

erfordert eine individuelle Einstellung des Modells für jede einzelne Kerze. Da der spezifische elektrische Widerstand ρ_{el} , die Wärmeleitfähigkeit λ sowie die Wärmekapazität c als relevante Materialkennwerte nicht für jede Kerze anhand der Messungen bestimmt werden können, müssen sie iterativ durch Simulation ermittelt werden.

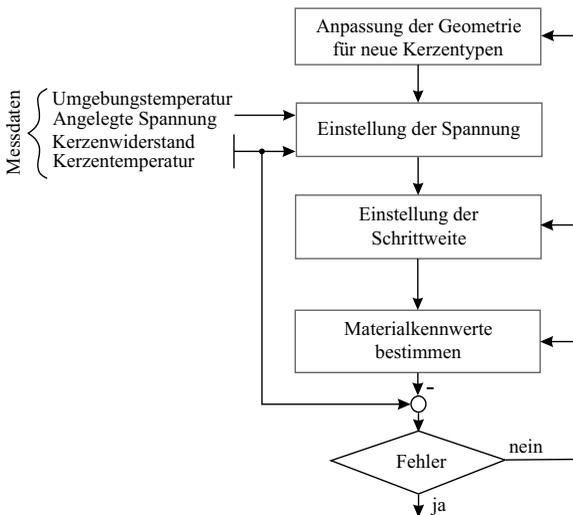


Abbildung 5.9 Iterative Anpassung des KGK-Modells für eine neue Keramikglühkerze.

Einen möglichen Ablauf der iterativen Anpassung des Modells für eine neue Kerze ist in Abbildung 5.9 veranschaulicht. Dabei ist es allerdings wichtig, dass die neue Kerze keine großen geometrischen sowie materialbedingten Änderungen erfordert. Bei großen Abweichungen kann das Modell nur durch erneute Berechnung die gewünschten Werte liefern. Vor allem nimmt der Schritt „Materialkennwerte bestimmen“ äußerst viel Rechenzeit in Anspruch, da alle drei Materialkennwerte sich jeweils in jedem leitenden Bereich an die optimale Kurve möglichst annähern sollen. Abgesehen vom Isolator muss diese Optimierung sich auf alle leitenden Materialien erstrecken.

Der spezifische elektrische Widerstand ρ_{el} muss im Kaltzustand (ρ_{Kalt}) ebenfalls angepasst werden, damit die Temperatur und der Widerstand im Beharungszustand die richtige Konstellation aufweisen. Als anschauliches Beispiel

sollen die in Abbildung 5.10 dargestellten Approximationsbereiche des spezifischen elektrischen Widerstandes dienen. Der spezifische elektrische Widerstand des für die elektrische Leitfähigkeit sorgenden Halbleiters MoSi_2 ist ebenfalls in dieser Abbildung zu sehen.

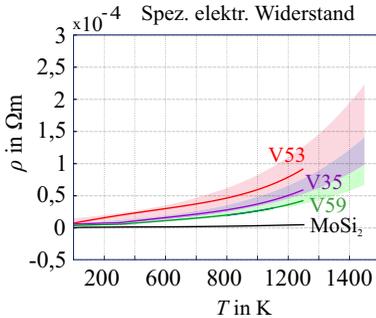


Abbildung 5.10 Exponentielle Approximation des spez. elektrischen Widerstandes

in verschiedenen Intervallen der Temperatur- und Widerstandskurven abgearbeitet wird. Im Rahmen dieses Projektes wurden fünf Inkremente getestet. Somit war eine Anpassung des Modelles für eine Kappenkerze, die im Gegensatz zur Serienkerze an der Spitze einen größeren Widerstand aufweist, im stationären Zustand möglich. Nichtsdestotrotz muss für weitere Kappenkerzen dieser Vorgang – möglicherweise ohne geometrische Anpassung – wiederholt werden.

Abbildung 5.12 zeigt, dass sowohl die Widerstandskurve als auch die Temperaturkurve mit diesem Modell mit oder ohne Störung angenähert werden können. Im Bereich von 50 bis 70 Sekunden ist sogar der äußere Einfluss auf die Kerze eindeutig. Mittels der empirischen Gleichungen der erzwungenen Konvektion nach Whitaker wird für diesen angeströmten Fall das Modell angepasst. Die Temperatur des heißesten Punktes wurde hierbei dargestellt, da die Wärmeverteilung in radialer sowie axialer Richtung keine Homogenität aufweist. Sogar an der Spitze der Keramikglühkerze verteilt sich die Temperatur nicht gleichmäßig. Mit dem hierbei erstellten Modell werden schließlich die Eigenschaften der Kerze als Sensorelement untersucht.

Die Kennwerte der Wärmeleitung können schließlich die Temperaturkorrektur vornehmen. Durch die Variation im gültigen Bereich der Stoffkennwerte entstehen diverse Cluster, siehe Abbildung 5.11. Die Cluster dienen bei dieser iterativen Einstellung des Modells dazu, die Zielkurve durch Klassifikation schneller einzustellen. Die iterative Suche nach der Sollkurve wird anhand eines inkrementellen Verfahrens realisiert. Inkrementell heißt hierbei, dass die Suche nach der passenden Einstellung in

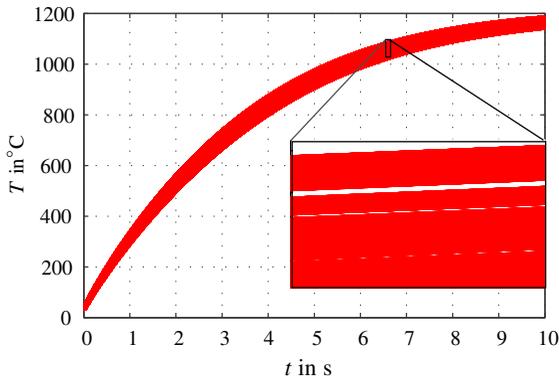


Abbildung 5.11 Temperaturverläufe mittels der Variation von Wärmekapazität, Temperaturleitfähigkeit und Dichte.

5.2 Durchgeführte Messungen

Die Empfindlichkeit der Keramikglühkerze gegenüber den bestimmten Umgebungsgrößen kann anhand der Stoffkennwerte der Materialien – wie in Kapitel 3 – gezeigt werden. Allein durch diese theoretische Betrachtung sind allerdings die Aussagen nicht ausreichend. Eine messtechnische Untersuchung der Keramikglühkerze soll vorgenommen werden, damit die physikalische Beschreibung des thermisch-elektrischen Verhaltens der KGK mit tatsächlichen Ereignissen konsistent ist. Darüber hinaus erfordern solche Analysen Aufzeichnungen von relevanten Signalen der KGK.

Die messtechnische Untersuchung besteht hierbei aus zwei Teilen: Messungen mit KGK als Aktuator und als Sensor. Dabei werden unterschiedliche Strategien herangezogen.

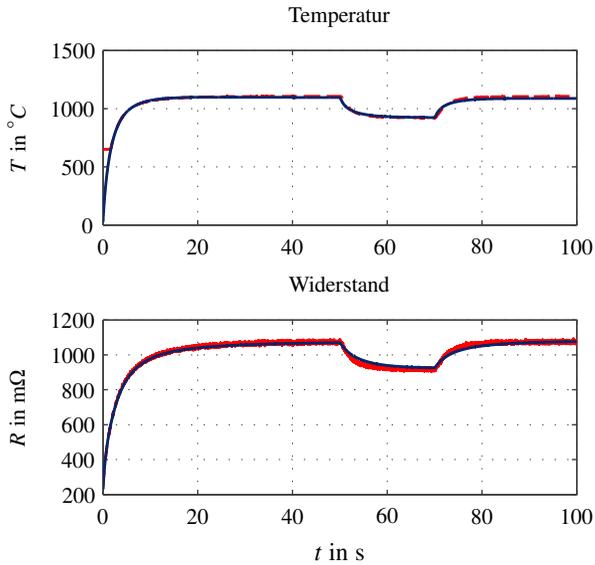
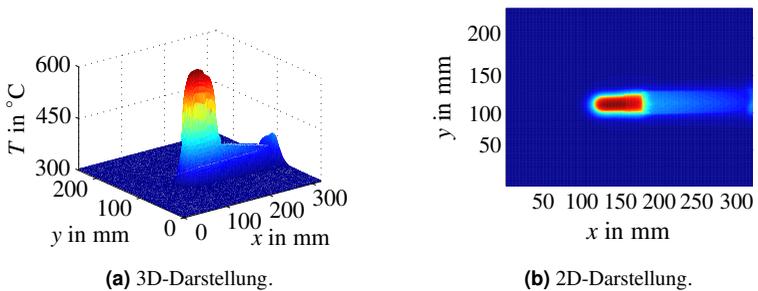


Abbildung 5.12 Temperatur- und Widerstandsverläufe für die Kerze mit der Nummer (#06).
 - - : Messung, — : Simulation.



(a) 3D-Darstellung.

(b) 2D-Darstellung.

Abbildung 5.13 Wärmeverteilung im vorderen Bereich der Kerze. Angelegte Spannung $U = 2\text{ V}$.

5.2.1 Keramikglühkerze als Heizelement

Als Erstes wird die Temperaturverteilung im stationären Zustand mit einer Wärmebildkamera³ aufgenommen, welche wegen der Emissionseinstellungen Messungen ab 300 °C ermöglicht. Wie in Abbildung 5.13 zu sehen, nimmt die Temperatur in axialer Richtung rapide ab. Es ist auch eindeutig, dass die Temperatur nicht an der Spitze, sondern kurz davor das Maximum erreicht. Die Wärme konzentriert sich also im Kapfenbereich.

Die Erhöhung der angelegten Spannung macht sich primär im vorderen Bereich bemerkbar. Der hintere Teil aus dem Keramikglühstift und der Inconelhülse erwärmt sich kaum. Trotz des diskreten Spannungsanstiegs bleibt die Temperaturänderung im hinteren Bereich – beispielhaft für den Punkt $(x, y)=(305, 117)$ in Abbildung 5.13 (b) – jedesmal unter 5 %. Abbildung 5.14 illustriert die Endtemperatur der Glühkerze (nach 100 s) bei den stationären Spannungswerten in 3D anschaulich.

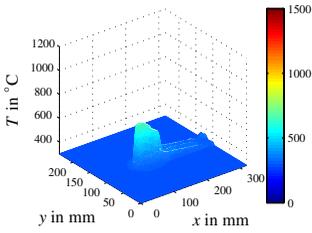
Es wird von den Keramikglühkerzen erwartet, dass sie als Heizelement möglichst schnell die Betriebstemperatur für das Motorstarten bereitstellen. Deshalb wird die eingebrachte Energie in der Vorphase dementsprechend eingestellt. In Abbildung 5.15 ist beispielhaft mit jeweils einer Kerze (für beide Kerzentypen) ein schneller Aufheizvorgang dargestellt. Obwohl die maximale Spannung $U_{\text{Kap}} = 7,01 \text{ V}$ bei der Kapfenkerze unter der Spannung der Serienglühkerze $8,9 \text{ V}$ liegt und einen anderen Verlauf hat, wird in beiden Fällen die Endtemperatur nach wenigen Sekunden (2 – 3 s) erreicht.

Für die Nutzung der Keramikglühkerze ist jedoch das Verhalten des Widerstandes in erster Linie ausschlaggebend. Die angelegte Spannung sorgt beispielsweise über die Aufheizung der Kerze indirekt für eine Widerstandsänderung. Die Temperatur macht sich bekanntlich bei den Halbleitern über einen nichtlinearen Zusammenhang in der physikalischen Größe R bemerkbar. Durch einen Potenzreihenansatz führt dies zu folgender Gleichung:

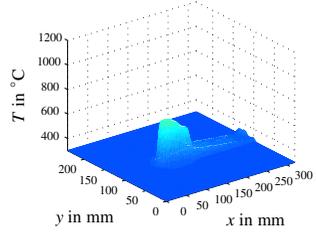
$$R = R_{T_0} \cdot \left(1 + \sum_i \alpha_i (\Delta\theta)^i \right), \quad (5.22)$$

wobei i die entsprechende Anzahl der Temperaturkoeffizienten α ; und $\Delta\theta$ die Temperaturabweichung von T_0 angibt. Im Gegensatz zu der Temperatur

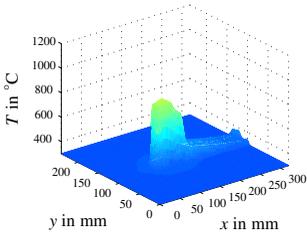
³ Die Kamera kann Wärmebilder mit einer Auflösung von 464 x 348 (161.472) Pixeln aufnehmen.



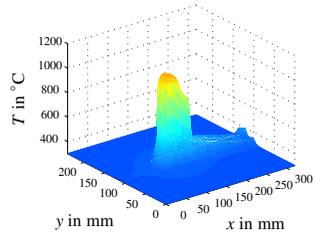
(a) Angelegte Spannung $U = 1 \text{ V}$.



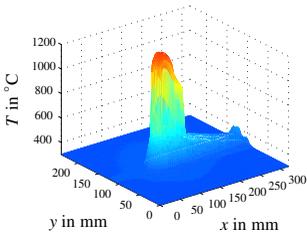
(b) Angelegte Spannung $U = 2 \text{ V}$.



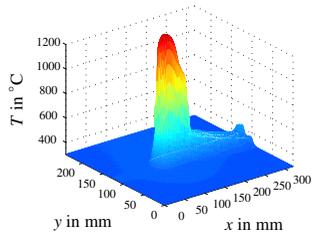
(c) Angelegte Spannung $U = 3 \text{ V}$.



(d) Angelegte Spannung $U = 4 \text{ V}$.



(e) Angelegte Spannung $U = 5 \text{ V}$.



(f) Angelegte Spannung $U = 6 \text{ V}$.

Abbildung 5.14 Wärmeverteilung im vorderen Bereich der Kerze.

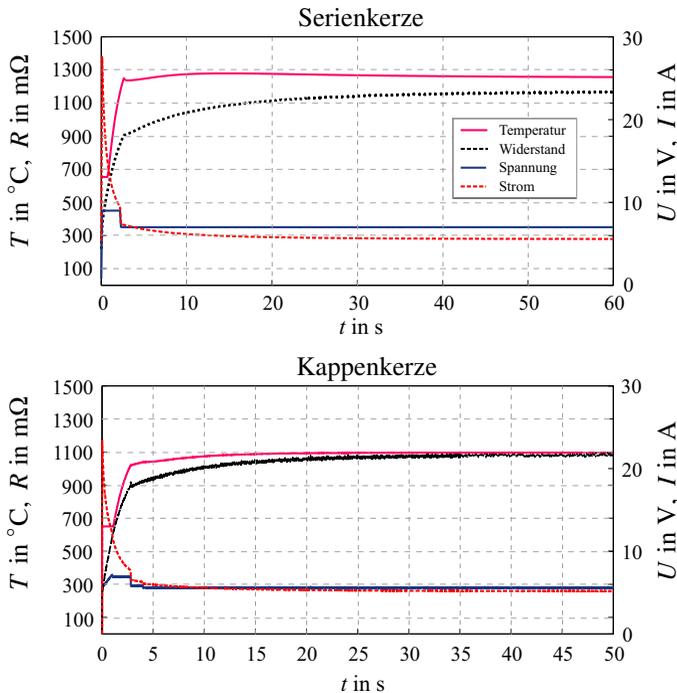
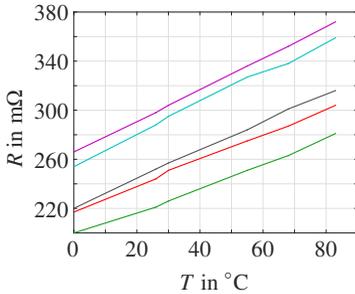


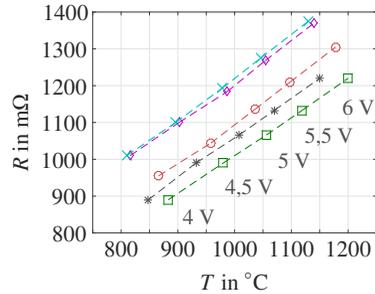
Abbildung 5.15 Temperatur-, Widerstands-, Spannungs- und Stromverläufe bei einem schnellen Aufheizvorgang.

besitzt der Widerstand in der Aufheizphase keinen großen Anstieg. Obwohl die Temperatur nach 3 Sekunden schon im stationären Zustand ist, braucht der Widerstand mit ca. 30 s etwas länger.

Zuerst wurde die Reaktion der Keramikglühkerze in einem Kälte-/Temperaturschrank mit digitalem Regelsystem über eine kleine Öffnung mit einem Durchmesser von 15 cm in der Seitenwand aufgezeichnet. Dabei kam eine Temperatursonde zur Überwachung der Temperatur zum Einsatz. In Abbildung 5.16(a) ist das Ergebnis dargestellt. Eingestellt wurden die Temperaturwerte von 0, 26, 30, 55, 68 sowie 83 °C nacheinander und anschließend wurde nach einer Wartezeit von 10 min der Endwiderstand erfasst. Wie erwartet entspricht der Trend der Kerzenwiderstände im stationären Zustand dem PTC-Halbleiter-



(a) Kerzenwiderstand über Temperatur aus Messungen im Temperaturschrank.



(b) Widerstandstemperaturverlauf bei unterschiedlich angelegten Spannungen.

Abbildung 5.16 Reaktion der Kerzen auf den Temperatur- und Spannungsanstieg. Die Verläufe der Kerzen sind einer bestimmten Farbe zugeordnet: —: #03, —: #06, —: #07, —: #08 und —: #10.

Verhalten. In diesem niedrigen Temperaturbereich zeigen offensichtlich alle zur Verfügung stehenden Kerzen (#03, #06, #07, #08 und #10) eine quasi lineare Abhängigkeit von der Temperatur.

Als Nächstes wurden – wie in Abbildung 5.16(b) illustriert – diese Kerzen schrittweise mit einer konstanten Spannung (4 V, 4,5 V, 5 V, 5,5 V oder 6 V) aufgeheizt. Die Abhängigkeit der Kerzentemperatur vom Widerstand ist sehr deutlich zu erkennen und ist linear. Im Gegensatz zu den Messungen im Temperaturschrank fallen die Messpunkte von zwei Kerzen übereinander. Es ist außerdem ersichtlich, dass die approximierten Temperatur- sowie Widerstandsverläufe der einzelnen Kerzen stark voneinander abweichen.

Abbildung 5.17 zeigt, wie der Widerstand und die Temperatur von drei Kappenkerzen und einer Serienkerze #947 sich anhand der Spannungsänderung anpassen, wobei die Kerze im Vergleich zu den anderen Serienkerzen ebenfalls einen höheren Widerstand aufweist. Aufgenommen werden R und T über eine Zeitdauer von 120 s bei einer Umgebungstemperatur von etwa 25 °C. Durch das Anlegen vier verschiedener Spannungen wird das Aufheiz- und Abkühlverhalten der Kerze dargestellt. Die Widerstandskurven nähern sich dem Endwert (oder besser: ihrer Asymptote) langsamer an, als es bei den Temperaturverläufen der Fall ist. Je größer die Änderung, desto langsamer nähert sie sich ihrer Asymptote. Relativ betrachtet sind die Änderungen bei den beobachteten Grö-

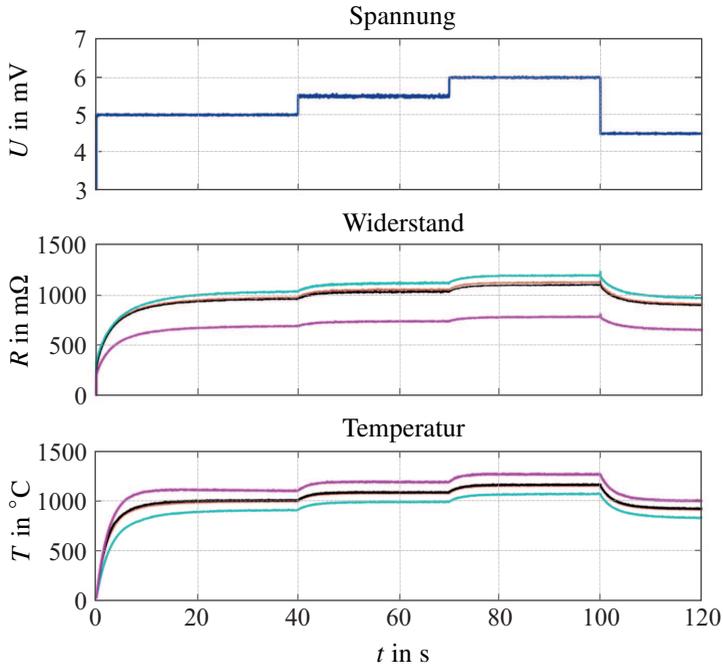


Abbildung 5.17 Reaktion der Kerzen auf Spannungsänderungen.

—: #06, —: #07, —: #13 und —: #947.

ßen nicht proportional. Vor allem nimmt die Abkühlung etwas mehr Zeit in Anspruch.

Dieses Verhalten wird in Abbildung 5.18 für $U_{\text{GK}} = 7 \text{ V}$ (im getakteten Betrieb) illustriert. In einem Zyklus (z. B. von 0 bis t_2), in dem die Batteriespannung U_{Bat} für einen gewissen Zeitbereich (in diesem Falle von 0 bis t_1) auf 12 V liegt, heizt sich die Kerze auf und bei einer Spannung von 0 V kühlt sich die Kerze dagegen ab. Die Zyklusdauer t_2 ist dabei 32,768 ms und t_1 berechnet sich für die obigen Werte wie folgt:

$$t_1 = \frac{U_{\text{GK}} \cdot t_2}{20 \text{ V}} = 11,5 \text{ ms}.$$

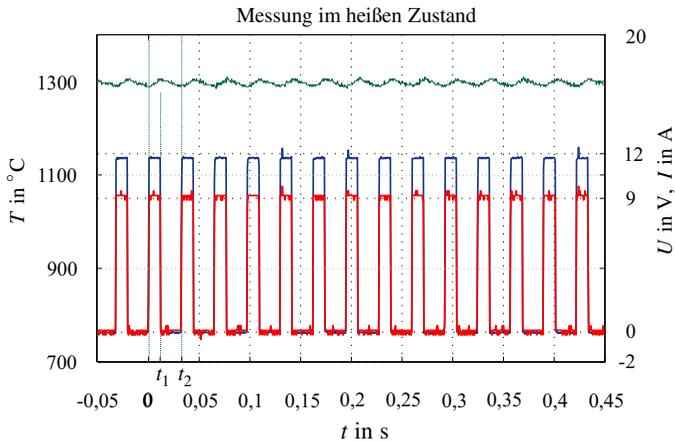


Abbildung 5.18 Temperaturverlauf beim getakteten Betrieb.
 —: Temperatur, —: Strom, —: Spannung.

Aus diesem Abschnitt geht deutlich hervor, dass die Kerzentemperatur und der Kerzenwiderstand durch die hinzugeführte Energie beeinflusst wird. Außerdem lässt sich erkennen, dass sich die Wärmezufuhr hauptsächlich im Kapfenbereich der Kerze bemerkbar macht. Bisher war bei allen Messergebnissen, neben der Abhängigkeit der KGGK-Temperatur von der Energiezufuhr, auch die Streuung der Keramikglühkerzen, welche in Abschnitt 3 erläutert wird, deutlich zu sehen. Damit ein brauchbares Ergebnis sichergestellt werden kann, muss die eingebaute Kerze initialisiert werden. Die Initialisierung kann in der Aktorphase erfolgen. Dabei muss das Erkennungssystem mit den fortlaufend messbaren Signalen I und U (Abbildung 5.18) auskommen. Trotz verschiedener untersuchter Methoden wird auf die Vorstellung der Initialisierung verzichtet.

5.2.2 Keramikglühkerze als Signalgeber

Im Gegensatz zum Einsatz als Heizelement ist die erzwungene Aufheizung der Kerze durch den Strom nicht erwünscht, wenn sie als Signalgeber zum Einsatz kommt. Stattdessen soll sich die Kerze möglichst durch die äußeren Einflüsse / ihr äußeres Umfeld erwärmen. Da die Reaktion der Kerze auf die Umgebung

über ein Spannungssignal erfasst werden muss, wird die Kerze mit einem konstanten Strom angeregt. Dabei stellt sich die Frage, wie heiß die Kerze durch die in Frage kommenden Ströme wird. Demnach wurden im Labor zunächst zwei Kerzen mit den Stromstärken von 0 A, 0,5 A, 1 A, 1,5 A sowie 2 A angeregt. Dabei wurde die Erwärmung der jeweiligen Kerze am heißesten Punkt beobachtet. Der Gradient konnte an einem anderen Punkt im Kappenbereich ebenfalls dargestellt werden. Abbildung 5.19 zeigt welche Werte sich einstellen, wenn die KGK mit einem Konstantstrom angeregt werden. Es kann beobachtet werden, dass die Temperatur der Kerzen in Abhängigkeit des Ansteuerungsstroms quadratisch ansteigt. Mit zunehmender Temperatur nimmt der Widerstand der Kerzen ebenfalls zu.

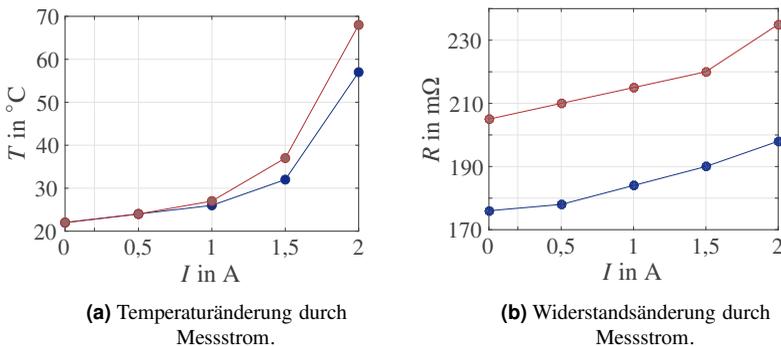


Abbildung 5.19 Kerzenzustände in Abhängigkeit des Messstromes, durchgeführt mit zwei Kerzen. —: #06, —: #07.

Ähnlich zu Serienkerzen reagieren auch Kappenkerzen auf Stromänderungen, wie Abbildung 5.20 veranschaulicht. Bei einer Stromstärke von 1 A (blauer Verlauf) wird an der Kerze eine nahezu konstante Spannung und Temperatur über die Zeit gemessen. Ein langsamer Anstieg der Werte kann trotzdem beobachtet werden. Der Ansteuerungsstrom von 1,5 A sorgt allerdings dafür, dass sich die Spannungs- sowie Temperaturverläufe dem Verlauf einer ansteigenden Exponentialfunktion langsam annähern. Für den Strom $I = 2$ A (in Abbildung 5.20 cyanfarben dargestellt) lässt sich der näherungsweise exponentielle Anstieg der Temperatur sowie der Spannung deutlich erkennen. Abgesehen von der Spannung kann über die Temperatur in Abhängigkeit des Stromes nur bei einer Kerze keine Aussage getroffen werden.

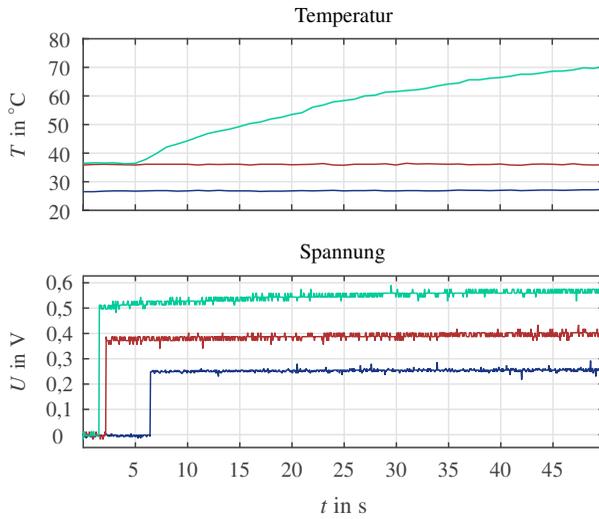


Abbildung 5.20 Temperatur- und Spannungsänderung für die Kerze #06 durch die Ansteuerungsströme: —: 1 A, —: 1,5 A und —: 2 A.

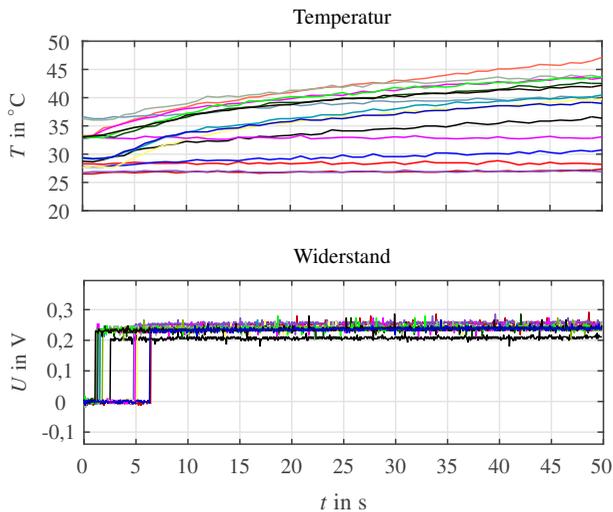


Abbildung 5.21 Temperaturentwicklung im Glühstift durch den Strom von 1 A. Durchgeführt mit insgesamt 13 Kerzen.

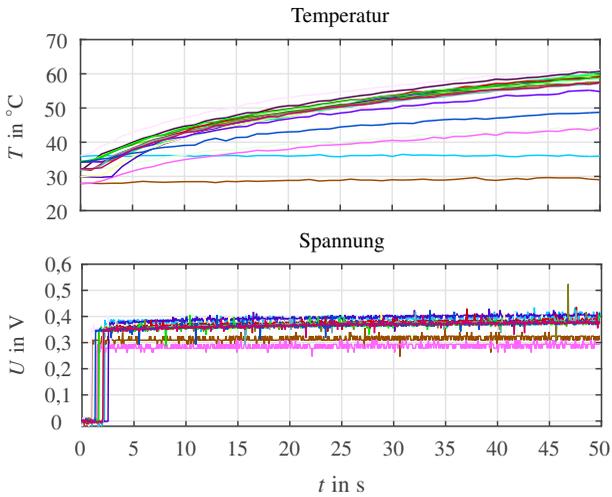


Abbildung 5.22 Temperaturentwicklung im Glühstift durch den Strom von 1,5 A. Durchgeführt mit insgesamt 13 Kerzen.

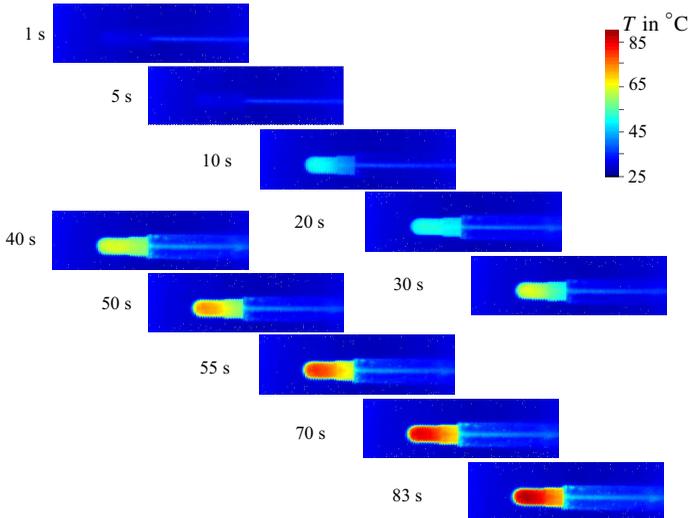


Abbildung 5.23 Temperaturentwicklung im Glühstift (vordere 25 cm) durch einen Strom von 2 A.

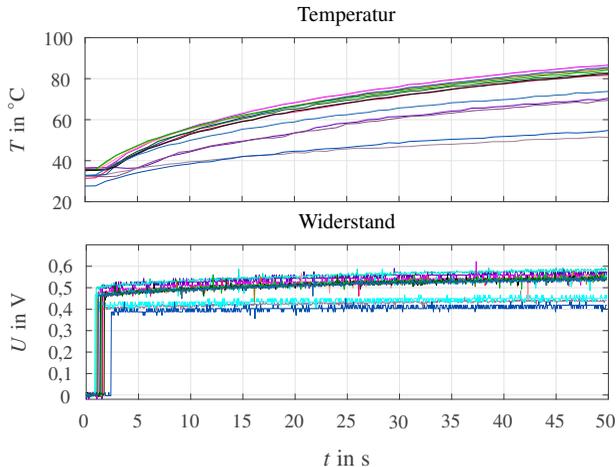
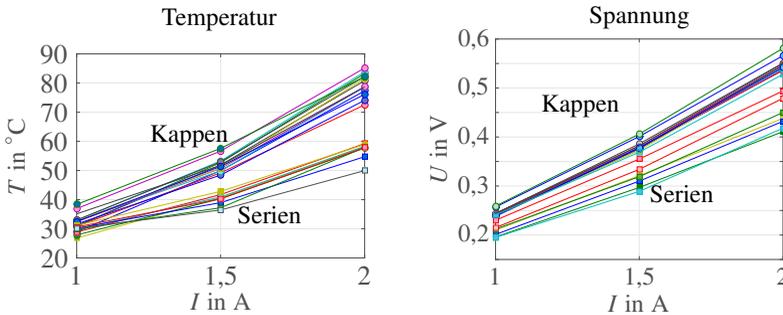


Abbildung 5.24 Temperaturentwicklung im Glühstift durch einen Strom von 2 A. Durchgeführt mit insgesamt 13 Kerzen.

Abbildungen 5.21, 5.22, 5.23 sowie 5.24 veranschaulichen das Verhalten mehrerer Kerzen bei Anregung mit einem konstanten Strom. Je nach Kerze kann das Erreichen des Beharrungszustandes von Temperatur und Spannung unterschiedlich ausfallen. Die Erwärmung der Kerze durch den Strom wird allerdings nur für eine ausgewählte Kerze annäherungsweise abgebildet. Ähnlich wie bei der Kerze #06 (Abb. 5.20) zeigt die Temperatur- und Spannungszunahme eine ansteigende Exponentialfunktion. Die Messung der Temperatur für 2 A ist nicht plausibel und falsch. Dem Spannungssignal ist lediglich ein Rauschen überlagert, welches um den Mittelwert von null schwankt. Die Varianz lässt sich für jede Messreihe aus den Signalanteilen, die vom eigentlichen Nutzsinal getrennt werden, ermitteln. Die detaillierte Untersuchung des Rauschen (z.B. thermische Rauschspannung) ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

In Abbildung 5.25 sind für den stationären Fall die Unterschiede zwischen Serien- und Kappenkerzen deutlich erkennbar. Bei einem Anregungsstrom von 1 A weichen die resultierenden Temperaturen für beide Kerzentypen deutlich geringer ab als bei 2 A. Die Temperaturunterschiede von Kappen- und Serienkerzen sind bei 1 A kleiner als 10 K. Bei 1,5 A und 2 A unterscheiden sich



(a) Endtemperatur in Abhängigkeit der Ansteuerungsströme. (b) Kerzenspannung in Abhängigkeit der Ansteuerungsströme.

Abbildung 5.25 Reaktion der Kerzen auf die Stromänderung.

dagegen beide Kerzentypen deutlich voneinander. Je höher der Laststrom, desto größer ist der Unterschied in der Endtemperatur zwischen Kappen- und Serienkerzen.

Für den Strom $I = 2 \text{ A}$ ist die Wärmeentwicklung im Glühstift für diverse Zeitpunkte in Abbildung 5.23 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kappe – wie erwartet – die wärmste Stelle des Glühstiftes wird. Bei allen Zeitpunkten nimmt die Wärme im Hülsenbereich (Betrachtung in axialer Richtung) sehr leicht zu. Das heißt, die Temperatur ändert sich im Hülsenbereich (bei Betrachtung in axialer Richtung) deutlich geringer als im Glühstift. Im Allgemeinen lässt sich der thermische und elektrische Einfluss der Eingangsgröße I auf U , R sowie T deutlich erkennen.

Als Nächstes wurden Messungen in einem Rohrofen mit unterschiedlichen Kerzen durchgeführt. Dabei wurde eine Konstantstromquelle mit einem sehr hohen Innenwiderstand R_i verwendet, damit der Strom unabhängig von der Keramikglühkerze und der darüber abfallenden Spannung als annähernd konstant betrachtet werden kann.

Der in Abbildung 5.26 repräsentierte Messaufbau zeigt die schaltungstechnische Realisierung der Messungen mit dem Rohrofen, welcher Temperaturwerte bis zu $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erlaubt. Bei Einstellung eines konstanten Wertes nimmt er eine Stabilisierungszeit von bis zu 15 min in Anspruch. Dies wird mit einem externen Temperaturfühler überwacht. Nachdem die eingestellte Temperatur sich

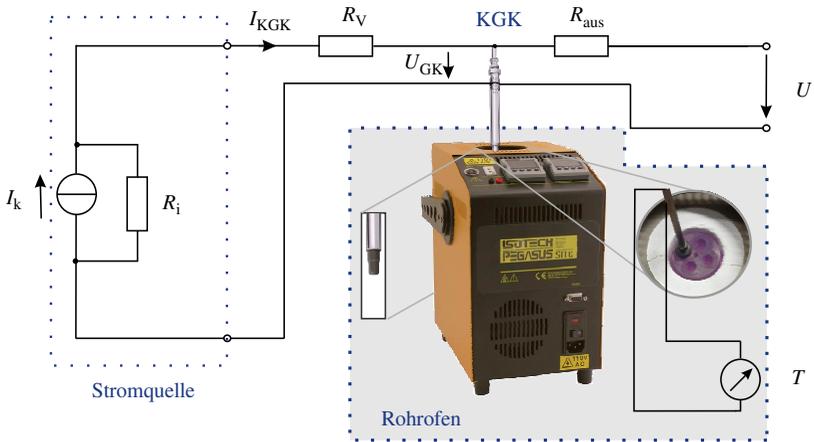


Abbildung 5.26 Messdatenaufzeichnung an einem Heißofen.

im stationären Zustand befindet, wird die mit 1 A bestromte Keramikglühkerze zum Zeitpunkt 0 s der Messaufzeichnung 25 cm in eine der aus vier technischen Keramiken bestehenden Röhren hineingesteckt. Der Glühstift ragt dabei senkrecht in den Rohröfen, damit ein Kontakt mit dem Ofen vermieden werden kann. Eine aktive Abkühlung mit einem Adapter wird bei der Messung nicht verwirklicht. Zur Kompensation dieser fehlenden Schutzfunktionalität wird die Verweildauer der Kerze im Rohröfen sowie der Temperaturbereich beschränkt. Demnach entstehen mit acht Kappenkerzen (#3, #6, #7, #10, #11, #12, #13 und #14) Messdaten von zwölf Temperaturwerten. Abgesehen von der Raumtemperatur werden in 50 K-Schritten Werte von 300 bis 800 °C als Messpunkte vorgegeben.

Abbildung 5.27 illustriert die mit 10 Hz abgetasteten Spannungsverläufe für alle Kerzen mit unterschiedlichen Ansteuerungsströmen beispielhaft bei einer Rohröfentemperatur von 700 °C. Die Spannung der Keramikglühkerze ergibt sich dabei durch den Abzug der am Kabel abfallenden Spannung von der Messspannung $U_{GK} = U - U_{cable}$. Obwohl U_{cable} intern weiterhin in Betracht gezogen wird, werden von nun an zur Vereinfachung die Spannungen U und U_{GK} als identisch angenommen. Die Reaktion der kalten Kerzen auf die Umgebungstemperatur (im vorderen Kerzenbereich) ist in Abbildungen 5.27(a),

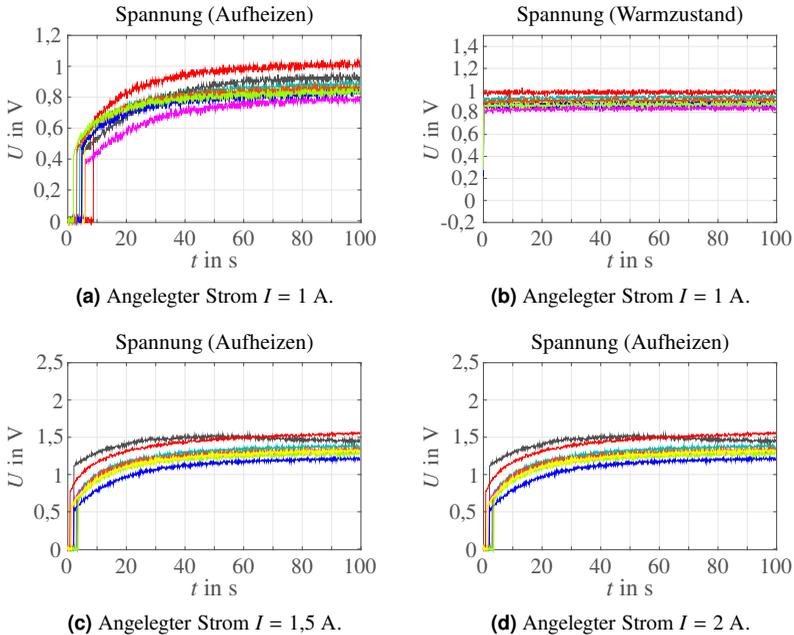


Abbildung 5.27 Spannung U_{GK} bei der Rohroftemperatur von 700 °C. —: #3, —: #7, —: #6, —: #10, —: #11, —: #12, —: #13 und —: #14.

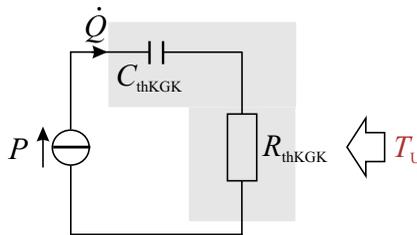


Abbildung 5.28 Eigenerwärmung durch den Anregungsstrom I . Der Wärmestrom \dot{Q} ist abhängig von I . Dabei wird die Umgebungstemperatur T_U vernachlässigt.

5.27(c) und 5.27(d) für die Stromstärken 1 A, 1,5 A und 2 A zu sehen. Die Spannung gibt die Widerstandsänderung der Keramikglühkerze an und ist bekanntlich von der Temperatur der Glühkerze abhängig. Zur Erfüllung des nullten Satzes der Thermodynamik im Glühstiftbereich braucht die kalte Kerze

allerdings mehr als 60 s. Der Grund für die Zeit lässt sich wie folgt verstehen: Der thermische Kreis kann durch die Reduktion der Keramikglühkerze auf ihre Wärmekapazität C_{thKGK} und den Wärmedurchlasswiderstand R_{thKGK} vereinfacht verstanden werden. In Abbildung 5.28 ist eine mögliche Darstellung repräsentiert.

Entsprechend der Schaltung, Abbildung 5.28, lässt sich die Zeitkonstante $\tau = R_{\text{thKGK}} \cdot C_{\text{thKGK}}$ ermitteln. In der Praxis wird davon ausgegangen, dass der Endwert der Kerzenspannung – in Folge der Energiezufuhr – nach $5 \cdot \tau$ erreicht wird. Bei der Kerze #7 ergibt sich ein Wert von 63,2 s. Der Mittelwert aller verfügbaren Kerzen liegt dabei bei 65,1 s.

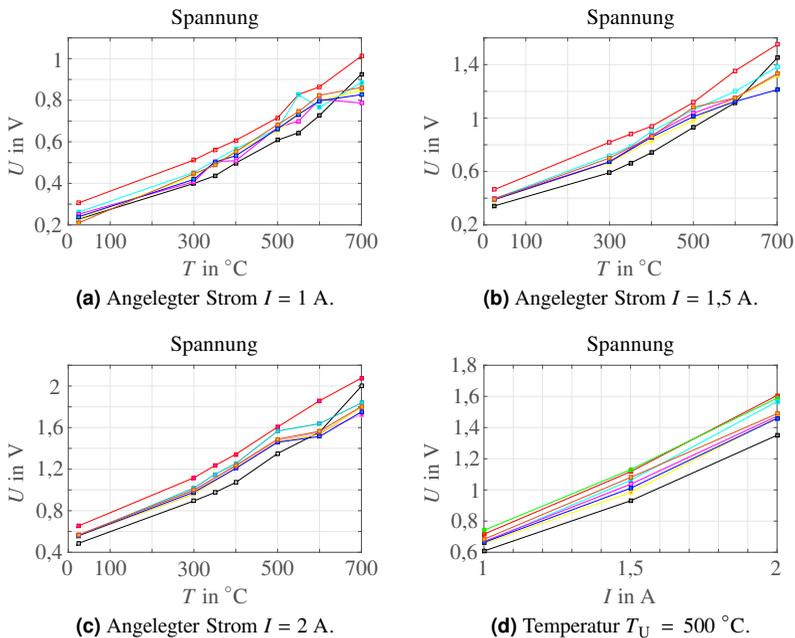


Abbildung 5.29 Spannung im stationären Zustand bei Temperaturen von 25 °C bis 700 °C. —: #3, —: #7, —: #9, —: #10, —: #11, —: #12, —: #13 und —: #14.

In Abbildung 5.29 sind die Spannungsverläufe bei verschiedenen Temperaturen sowie Stromstärken zu sehen, wobei die Spannungswerte die Endwerte im Beharrungszustand repräsentieren. Es ist ersichtlich, dass die Spannung abhängig von der Temperatur bis 500 °C steil ansteigt und abgesehen von den drei Kerzen #3, #7 und #10 oberhalb dieses Wertes abflacht. Der

Grund für diesen Unterschied ist, dass die anderen Kerzen zu einer anderen Charge⁴ zuzuordnen sind. Die Zonen-Geometrien sowie Perkolationen können von Charge zu Charge unterschiedlich ausfallen. Die Zunahme der Spannung in Abhängigkeit der Stromstärke wird stellvertretend anhand des Temperaturpunktes 500 °C in Abbildung 5.29(d) illustriert. Wie in diesem Punkt zu sehen ist, sorgt eine Stromerhöhung lediglich für einen nahezu linearen Anstieg der Kerzenspannung.

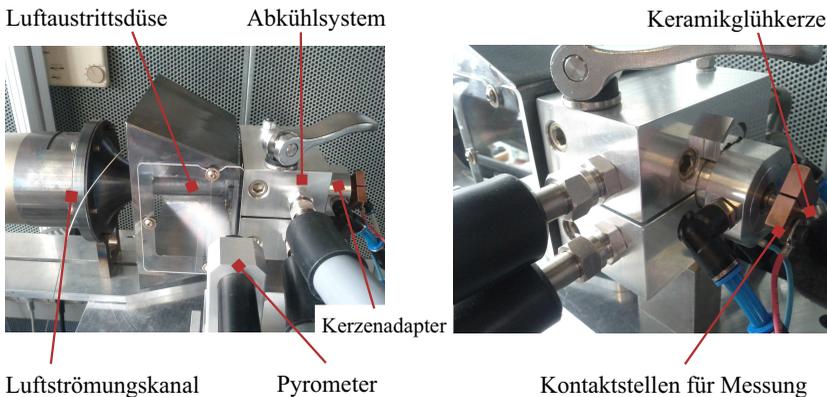


Abbildung 5.30 Heißluftanlage für thermische Analyse.

Eine weitere Messreihe wurde an einer [Heißluftanlage](#) durchgeführt. In Abbildung 5.30 ist der Messplatz zu sehen. Die Keramikglühkerze wird entsprechend dem Kerzentyp (die geometrischen Eigenschaften wie etwa die Form von Kerzen variieren in Abhängigkeit des Motortyps) mit dem passenden Adapter eingebaut. Die im Rahmen dieser Messung verwendeten Kerzen ragen – wie es im Brennraum der Fall ist – um 6 mm heraus. Der Wirklichkeit entsprechend ist eine aktive Kühlung der Kerze ebenfalls vorgesehen. Zur Abkühlung bedient sich das System allerdings kalten Wassers. Dieser Messaufbau soll im Prinzip möglichst nahe an einen typischen Betriebszustand im Fahrzeug herankommen. Um die Simulation der Luftströmung zu ermöglichen, wird ein Luftströmungskanal eingesetzt. Zum Erzielen der gewünschten Luftaustritts-

⁴ Charge bezeichnet in der Produktion eine Kerzenserie, welche unter gleichen Bedingungen in einer Woche hergestellt wurde.

leistung lässt sich die passende Luftaustrittsdüse entsprechend dem Kerzentyp einbauen. Das heißt, der Eintritts- sowie Austrittsdurchmesser sind variabel. Über die Soll-Luftmasse und Gebläsedrehzahl wird der Luftmassenstrom gesteuert. Das Gebläse liefert eine Kühlluftströmung, sodass diese Luft im Lufterhitzer auf die gewünschte Temperatur und die Anströmungsgeschwindigkeit gebracht werden kann. In der letzten Phase trifft diese Heißluft auf die Spitze der Keramikglühkerze.

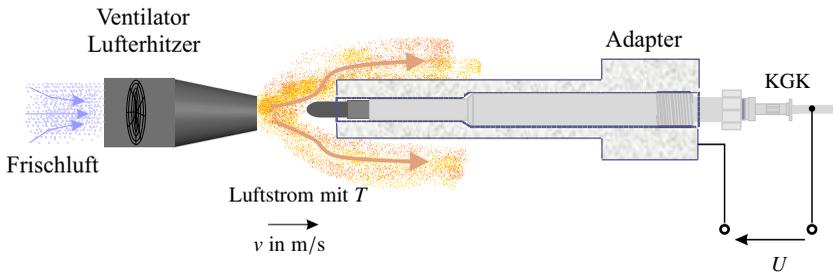


Abbildung 5.31 Heißluftanlage für thermische Analyse.

Dank des an der Düse stationierten Thermoelements und des auf die Kerzenspitze fixierten Pyrometers besteht die Möglichkeit, die Temperaturabweichung von dem Sollwert gut zu regeln. Die abfallende Spannung ließ sich mit einem Oszilloskop mit einer Abtastrate von $f_A = 20$ Hz aufzeichnen. Die Temperatur variierte bei diesen Messungen zwischen 25 °C und 600 °C und die Luftgeschwindigkeit zwischen 0 m/s und 150 m/s. Wie bei der vorherigen Messung war die Stromstärke entweder 1 A, $1,5$ A oder 2 A. Aufgrund der zeitlichen Einschränkung ließen sich die geplanten Messungen an der Heißluftanlage ausschließlich mit den Kappenkerzen (#3, #6, #7, #10, #11, #20) und der Serienkerze (#394) verwirklichen.

Die am Anfang der Messung getroffenen allgemeinen Einstellungen blieben dabei konstant:

- Umgebungsdruck: $p_{\text{Luft}} = 101$ kPa,
- Durchmesser der Luftaustrittsdüse: $d_{\text{Düse}} = 19$ mm,
- Emissionsfaktor des Pyrometers: $\epsilon = 0,9$,
- Kühlwassertemperatur $T_{\text{cool}} = 60$ °C.

In Tabelle 5.2 sind die verwendeten Kombinationen der Größen I , T und v aufgelistet. Aus technischen Gründen lassen sich einige erdenklichen Kombinationen nicht realisieren. Entsprechend der Temperaturerhöhung muss die Luftgeschwindigkeit angepasst werden.

Tabelle 5.2 Durchgeführte Messungen mit den Stromstärken 1 A (\otimes), 1,5 A (\oplus) sowie 2 A (\ominus). v_{Luft} : Luftgeschwindigkeit.

v_{Luft} in m/s	Temperatur in °C							
	25	50	100	200	300	400	500	600
0	\otimes
50	\otimes	$\otimes \oplus \ominus$	$\otimes \oplus \ominus$	$\otimes \oplus \ominus$
90	\otimes
100	.	.	$\otimes \oplus \ominus$					
120	.	.	.	$\otimes \oplus \ominus$
140
150	$\otimes \oplus \ominus$	$\otimes \oplus \ominus$	$\otimes \oplus \ominus$

In Abbildung 5.32 ist ein Ergebnis für die Kerze #06 vorgestellt. Die Messsignale sind stark verrauscht und die Störanteile konnten durch eine Tiefpassfilterung geglättet werden. Infolge einer nicht idealen Versuchsumgebung (mechanische Schwingungen und Störquellen im Raum) beinhalten die Spannungsverläufe im stationären Zustand Rauschanteile. Durch Bildung des gleitenden Mittelwertes lassen sich die Endspannungswerte für die drei Stromstärken berechnen. Demnach liegt die Spannung für 1 A bei 0,26 V, für 1,5 A bei 0,40 V und für 2 A bei 0,55 V. Im Vergleich mit dem in Abbildung 5.20 veranschaulichten Ergebnis fällt auf, dass die Spannungswerte hierbei leicht niedriger ausfallen. Bis auf die unterschiedlichen Aufbauten liefern beide Messungen identische Ergebnisse. Die Abweichungen können dadurch erklärt werden, dass die Außentemperaturen (Temperatur des Luftstromes, Abkühlwassertemperatur) die Aufheizung der Kerze und somit auch den Widerstandsanstieg mindern.

Der Einfluss der Temperatur sowie der Luftgeschwindigkeit ist in Abbildung 5.33 dargestellt. Die untere Abbildung zeigt, dass die Spannung in einen stationären Zustand eintritt und der gleitende Mittelwert nahezu linear von der Temperatur abhängt. Die Spannungskurven entstehen – von unten nach oben – bei konstanten Temperaturwerten von 100 °C bis 600 °C. Auf dem oberen Bild kann dagegen der Einfluss der Luftgeschwindigkeiten von $v = 100$ m/s

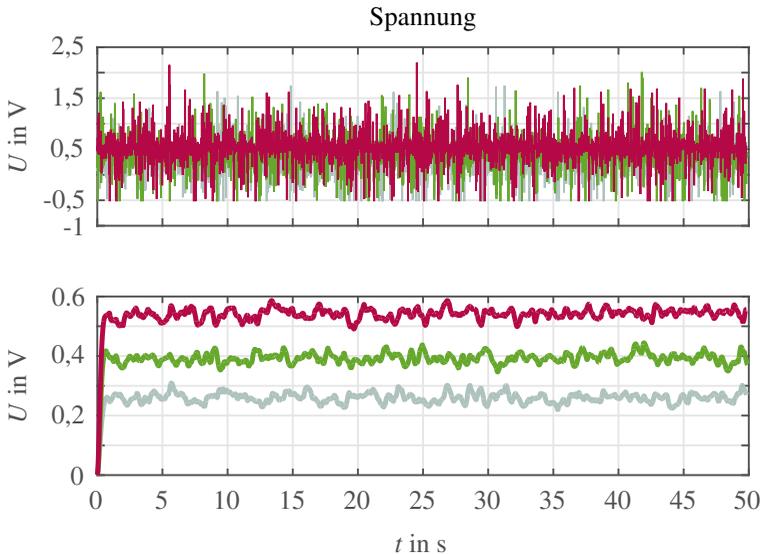


Abbildung 5.32 Spannung (Oben: Rohsignale. Unten: Tiefpassgefilterte Signale.) der Kerze #06 mit 1 A (—), 1,5 A (—) sowie 2 A (—). Temperatur $T = 50\text{ °C}$ und Luftgeschwindigkeit $v = 50\text{ m/s}$.

(—) und 150 m/s (—) beobachtet werden. Auf den ersten Blick lässt sich keine Änderung feststellen. Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit sorgt allerdings dafür, dass der stationäre Spannungswert kaum erkennbar nach oben verschoben wird.

Das heißt, bei 1 A geht der gemittelte Spannungswert von 0,51294 V auf 0,51455 V, bei 1,5 A von 0,78016 V auf 0,78716 V und bei 2 A von 1,0603 V auf 1,0824 V. Die Standardabweichungen hingegen werden kleiner, sodass beispielsweise bei 1 A σ von 0,14 V auf 0,99 V fällt. Diese leichte Spannungsveränderung ist offensichtlich eine Folge der durch die angeströmte Luft vergrößerten Wirkfläche der Keramikglühkerze. Der Geschwindigkeitsanstieg verkleinert die mittlere Abweichung vom Erwartungswert der Solltemperatur. Folglich macht sich dieses Verhalten anhand der gemessenen Spannung bemerkbar. Solch ein temperatur-, strom- sowie luftgeschwindigkeitsabhängiges

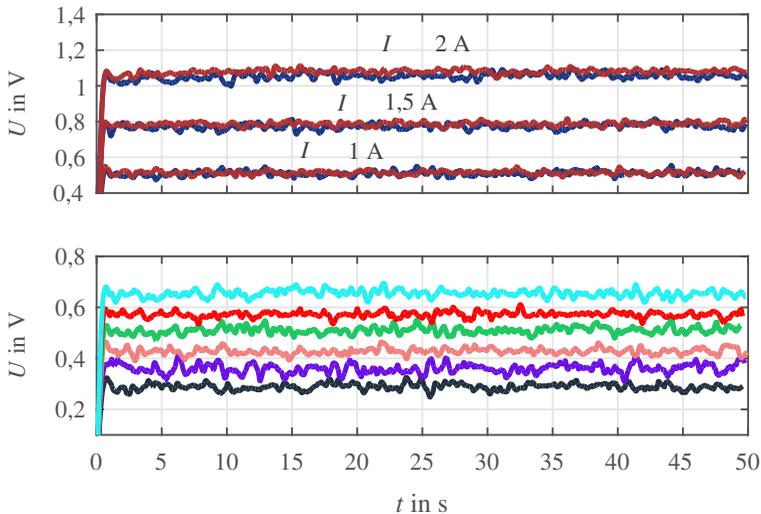


Abbildung 5.33 Oberes Bild: Änderung der Messspannung in Abhängigkeit der Stromstärke und der Luftgeschwindigkeit. —: bei 100 m/s, —: bei 150 m/s. Unteres Bild: Änderung der Messspannung in Abhängigkeit der Temperatur. —: bei 100 °C, —: bei 200 °C, —: bei 300 °C, —: bei 400 °C, —: bei 500 °C, —: bei 600 °C.

Verhalten ließ sich mit unterschiedlichen Werten bei allen zur Verfügung stehenden Kerzen beobachten.

In den Abbildungen 5.34(a), 5.34(b) und 5.34(c) sind die Abhängigkeiten der Endspannungen von konstanten Temperaturwerten bei den Strömen 1 A, 1,5 A und 2 A zu sehen. Abgesehen von den Kerzen #03 (—) (Nachmessungen zeigten, dass die Halbleiterfunktionalität dieser Kerze nicht mehr stimmt) und #07 (—) liegen die Kurven der Restkerzen dicht beieinander. Die Endspannung nimmt bei hohen Temperaturwerten langsamer zu, sodass die Spannung ab 500 °C in die Sättigung läuft. Genauso wie bei vorigen Messungen ist bei der Heizluftanlage die Stromabhängigkeit linear, siehe Abbildung 5.34(d).

Als Nächstes wurden Messungen an einer Abgasrohranlage durchgeführt. Wie in Abbildung 5.35 dargestellt, lässt sich das Abgas unter Zuhilfenahme eines Gebläsemotors produzieren. Dem Motor lassen sich die Durchflussgeschwindigkeit und die Temperatur des Abgases als Sollwerte übergeben. Die Regelung dieses Gebläsemotors geschieht hierbei anhand des Messens der zu

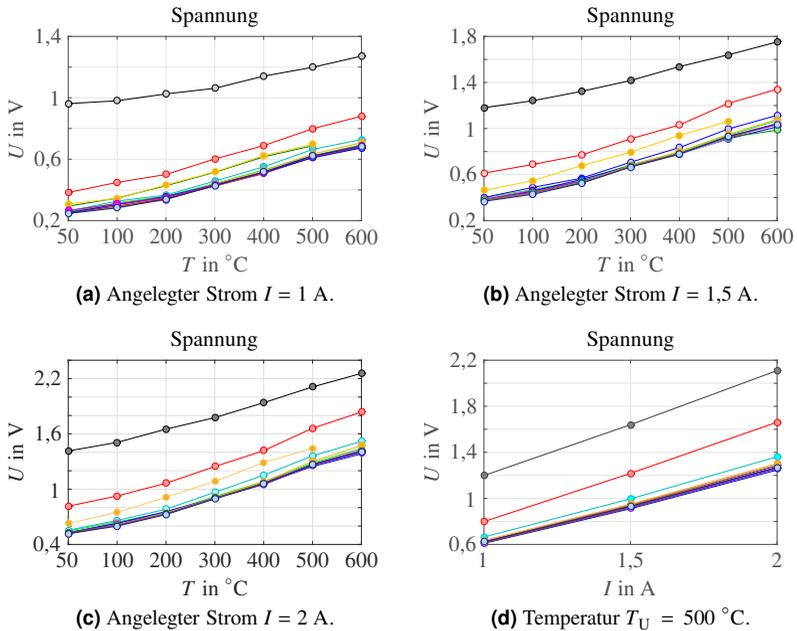


Abbildung 5.34 Spannung im stationären Zustand bei Temperaturen von 25 °C bis 500 °C.
 —: #3, —: #6, —: #7, —: #10, —: #11, —: #12, —: #13, —: #14, —: #15, —: #16, —: #17, —: #18, —: #19 und —: #20.

beeinflussenden Größen Temperatur (T-Sensor 1 und T-Sensor 2) sowie Durchflussgeschwindigkeit. Der an dem Kühlkreis angeschlossene Kerzenadapter ist so platziert, dass die Temperatur des Abgases vor und nach der Kerze gemessen werden kann. Das Betreiben der Pumpe für den Kühlkreis erfolgt separat. Die Kühlwasser-Temperatur liegt für alle Messungen bei 25 °C. An dem Prüfstand wurden insgesamt drei Messabläufe mit drei unterschiedlichen Strömen 100 mA, 200 mA und 300 mA realisiert. Bei der Einstellung der Ziel-Temperatur 850 °C und der Luftgeschwindigkeit 50 m/s sind im Beharrungszustand die Spannungswerte von 0,0762 V, 0,161 V und 0,227 V zu beobachten. Dies bedeutet, dass die Abhängigkeit der Kerzenspannung vom Anregungsstrom I linear dargestellt werden kann.

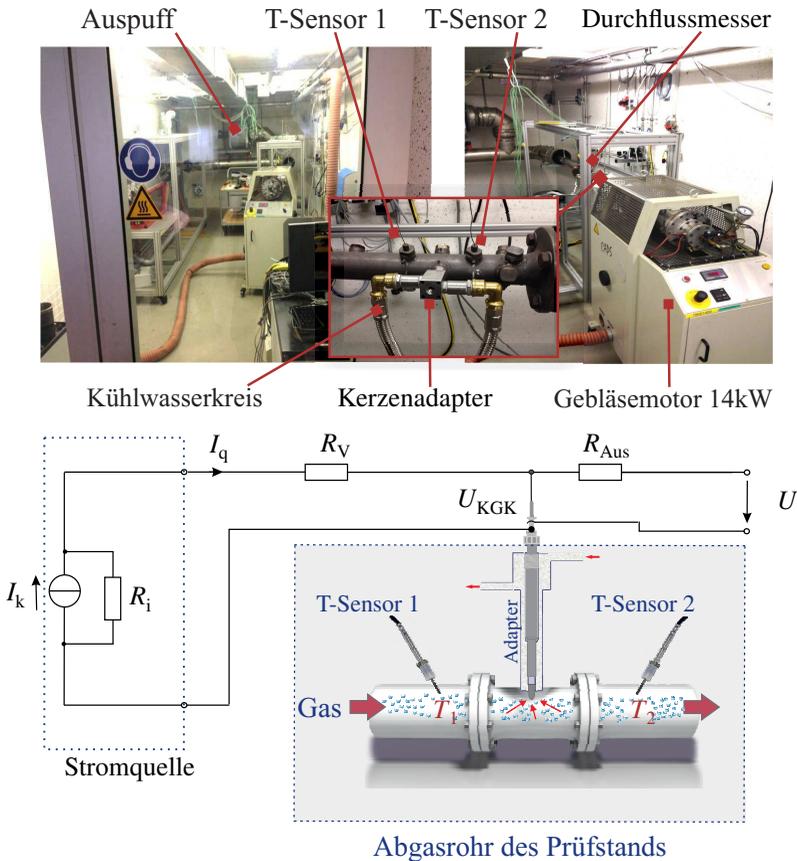


Abbildung 5.35 Abgasrohranlage für thermische Analyse.

Wie bereits erwähnt, ändert sich sowohl beim Aufheizen als auch beim Abkühlen der Umgebungsluft der Kerzenwiderstand, der anhand des Spannungssignals aufgezeichnet wird. Das Ergebnis der Messung 1 (mit dem Anregungsstrom von 100 mA) wird in Abbildungen 5.36 und 5.37 anschaulich illustriert. Dabei wird die Temperatur einerseits in 100 s von 65 °C auf 850 °C erhöht und im zweiten Schritt von 850 °C auf 200 °C gesenkt. Das Spannungssignal ist bei beiden Beobachtungen mit Störungen additiv überlagert. Nach der Tiefpassfil-

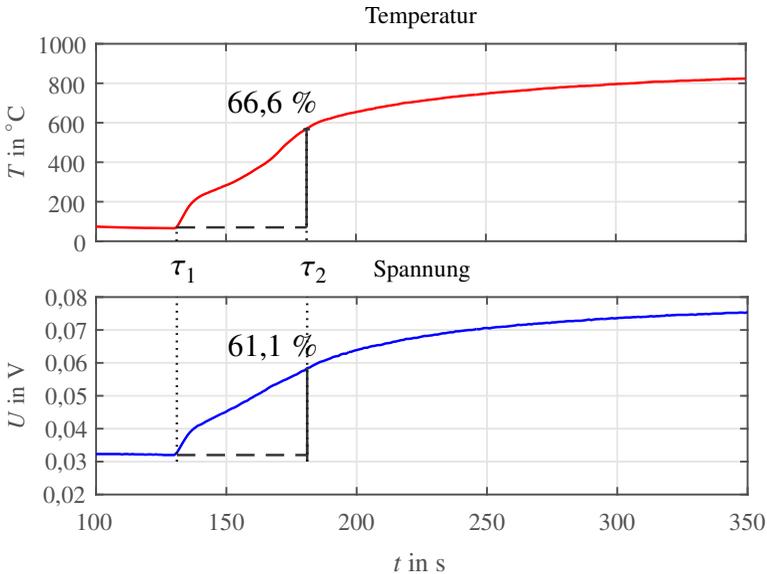


Abbildung 5.36 Spannungsverlauf einer Kerze beim Erhöhen der Umgebungstemperatur von $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $840\text{ }^{\circ}\text{C}$.

terung ist es ersichtlich, dass das Signal dem Temperatursignal sowohl beim Abkühlen als auch beim Aufheizen in allen Bereichen mit einer Verzögerung folgt. Bei der konstanten Temperatur von $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ lässt sich erkennen, wie die Kerzenspannung bei dem Wert $0,0762\text{ V}$ beharrt. Die Verzögerung fällt allerdings beim Abkühlen etwas größer aus. Dies ist vor allem beim Vergleich der Anstiegsgradienten plausibel. Trotz der kleinen Verzögerung kann die Spannung sich entsprechend der Temperaturänderung anpassen, da die Änderung sehr träge ist.

Berücksichtigung des Kleinsignalverhaltens: Abgesehen von den konstanten Temperaturvorgaben wird im Folgenden die Auswirkung der sich dynamisch ändernden Temperatur auf den Kerzenwiderstand untersucht. Dieser Schritt ist notwendig, da die Arbeitsspiele eines Verbrennungsmotors – wie zuvor erwähnt – sich zyklisch wiederholen und zyklische Brennraum-Tempe-

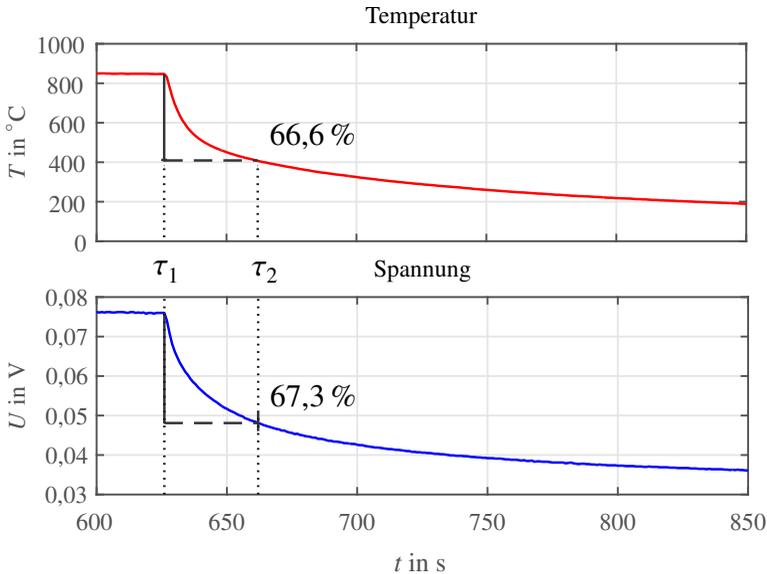


Abbildung 5.37 Spannungsverlauf einer Kerze beim Absenken der Umgebungstemperatur von $847\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

aturverläufe erzeugen, wobei die Periodendauer (Zyklusdauer) je nach Drehzahlanforderung variiert.

Mit dem Kleinsignalverhalten ist hierbei die Antwort der Keramikglühkerze auf die zuvor erwähnten periodischen Änderungen der Eingangs- sowie Störungsgröße wie etwa Brennraumtemperatur T_U gemeint. Das heißt, um einen zuvor erreichten Arbeitspunkt lassen sich die Ausgangsgrößen R_{KGK} und T_{KGK} mit marginalen Änderungen aussteuern. Um das intendierte Verhalten zu diskutieren, wird unter Zuhilfenahme des zuvor dargestellten Keramikglühkerzenmodells Folgendes durchgeführt. Die zwei relevanten Eingangsgrößen I_A und T_U werden variiert. Um eine realitätsnahe Ausführung möglichst gut wiederzugeben, nimmt der Strom nur stationäre Werte an. Die Brennraumtemperatur ist dagegen ein periodisches Signal.

Abbildung 5.38 stellt die Reaktion des KGK-Modells auf die Strom- und Temperaturänderungen dar. Von 0 bis 80 s werden die Kurven nicht abgebildet, da die Temperatur und Spannung der KGK den Verlauf einer e-Funktion (PT1-

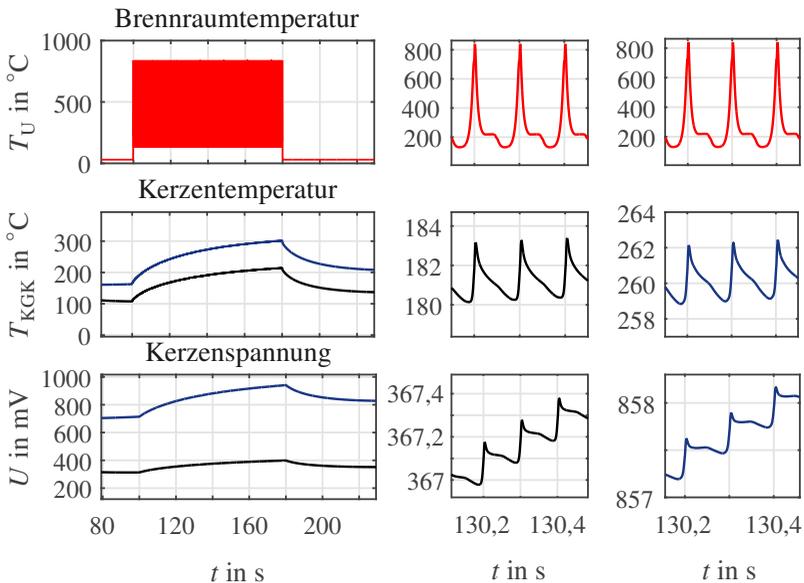


Abbildung 5.38 Simulierte Reaktion der Kerze auf die Strom- und Temperaturänderungen (—). Der Temperatur- und Widerstandsanstieg wird erst ab 80 s dargestellt: —: $I_A = 1$ A, —: $I_A = 2$ A.

Glied), d. h. eine langsame Temperaturänderung besitzen. Der Grund dafür ist, dass ein konstanter Strom von 1 oder 2 A und eine Umgebungstemperatur von 30°C eingeschaltet sind und zuvor analysiert wurden. Im Bereich zwischen 100 und 180 s ist es deutlich zu sehen, dass die Kerze auf das periodische Temperatursignal reagiert. Nicht nur im niederfrequenten Bereich, sondern auch im hochfrequenten Bereich um die Arbeitspunkte steige die KGK-Temperatur sowie -Spannung an. Dies führt im niederfrequenten Bereich zu einem neuen Beharrungszustand. Bevor die periodische Temperatur eingestellt wird, liefert die KGK mit 1 A im Beharrungszustand eine Spannung von 312 mV und eine Temperatur von 107°C . Mit dem Effektivwert der periodischen Temperatur steuern die Spannung und Temperatur auf neue Beharrungszustandswerte (400 mV und 220°C). Dieses Verhalten ist auch mit anderen Stromstärken zu beobachten. Die Ausschnitte (Abbildung 5.38, rechts) zeigen die marginale Änderung der KGK-Temperatur und -Spannung über drei Arbeitspunkte. Dies

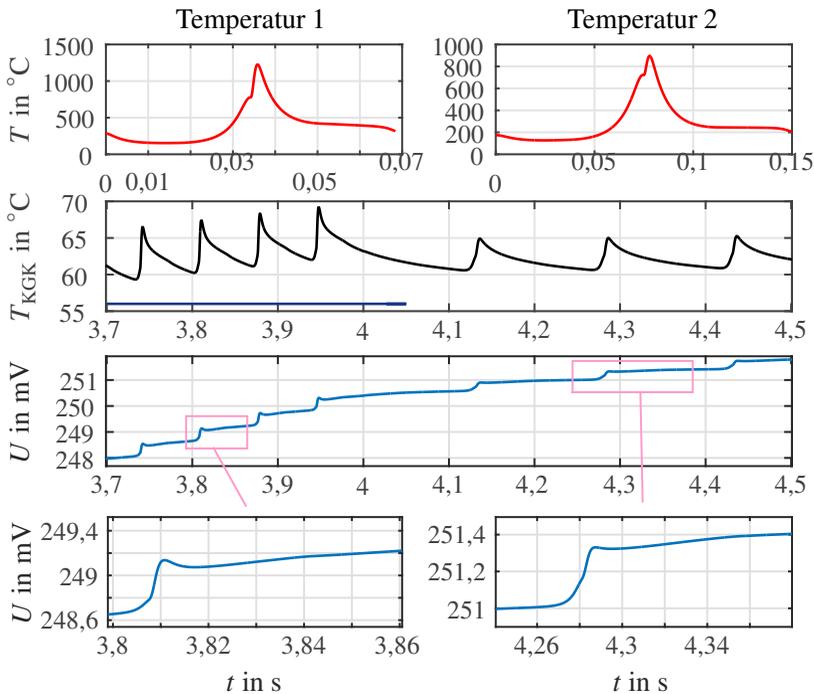


Abbildung 5.39 Simulierte Reaktion der Kerze auf zwei unterschiedliche Temperaturen, wobei die blaue und konstante Linie die Wirkungsdauer der Temperatur 1 wiedergibt. Die Antwort der KGK über 7 Zyklen. Signale über Zeit in s aufgetragen. —: Brennräumtemperatur T , —: Kerzentemperatur T_{KGK} , —: Kerzenspannung U .

entspricht, in Zahlen ausgedrückt, einer Temperatur-Aussteuerung von 3 K und einer Spannungs-Aussteuerung von 0,2 mV bei 1 A und 0,4 mV bei 2 A. Abgesehen von diesen marginalen Änderungen der Signale kann das Verhalten der Kerze für diverse Bereiche als linear angenommen werden.

Abbildung 5.39 stellt zwei Temperaturverläufe (Temperatur 1 und 2) dar, welche periodisch hintereinander auf die Kerze einwirken, und zeigt die Antwort der KGK bei einem konstanten Strom von 1 A. Es wird nur ein Teilbereich der Simulation präsentiert, in dem die Temperatur 1 bis 4,05 s die Eingangsgröße ist und anschließend die Temperatur 2. Beide Temperaturkurven zeigen den

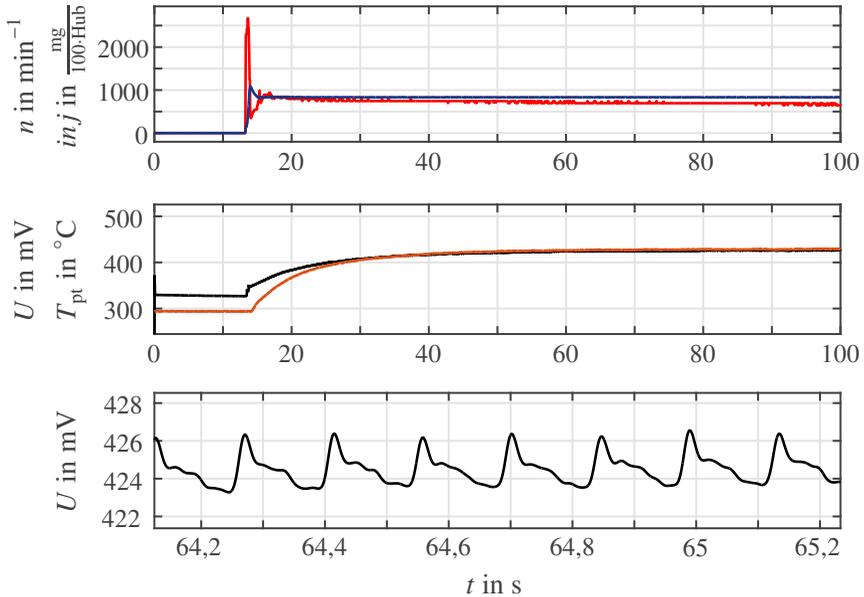


Abbildung 5.40 Reaktion der Kerze #06 auf die Brennraumtemperatur im Leerlaufbetrieb. Signale über Zeit in s aufgetragen. —: Einspritzmenge inj , —: Drehzahl n , —: Kerzenspannung U , —: Raumtemperatur T_{pt} mit Thermoelement gemessen.

Unterschied vor allem an den Spitzenwerten (Peaks) und der Periodendauer. Dass die Kerze auf differierende Temperaturkurven nicht identisch reagiert, lässt sich an der marginalen Änderung der Kerzentemperaturkurve T_{KKG} und der Kerzenspannungskurve bemerken. In absoluten Zahlen ausgedrückt bedeutet das: Temperatur 1 mit dem 1230 $^{\circ}C$ -Peak bewirkt eine KKG-Temperatur-Aussteuerung von 6,7 K und eine KKG-Spannung-Aussteuerung von 0,4 mV. Temperatur 2 mit dem 896 $^{\circ}C$ -Peak erzielt dagegen lediglich eine maximale Temperaturänderung von 4,1 K und eine maximale Spannungsänderung von 0,29 mV. Dies deutet darauf hin, dass die Größe der marginalen Änderung um den Arbeitspunkt (pro Arbeitszyklus) herum Rückschlüsse über die auf das System einwirkende Temperatur erlauben wird. Es ist außerdem zu beobachten, dass die Anstiegszeit der Kerzenspannung sowie -temperatur sich mit steigender Eingangstemperatur reduziert.

Die Reaktion der Keramikglühkerze auf die thermischen Änderungen in ihrer Umgebung lässt sich anhand der Messdaten ebenfalls erkennen. Abbildung 5.40 illustriert die Aufzeichnung der Kerzenspannung sowie der mittleren Temperatur in einem stationären Zustand, also im Leerlaufbetrieb. In diesem Betriebszustand dreht sich der Motor mit 830 min^{-1} und verbraucht 4 – 6 mg/Hub. Im vierten Zylinder wird mit einem Thermoelement die Temperatur des Brennraums (Trend, nicht die hochfrequente Änderung) aufgezeichnet, wobei das Thermoelement die Form einer Kerze hat und aus der selben Position misst. Die Kerzenspannung reagiert einerseits mit einer 2,5 mV-Änderung auf die Brennraumtemperatur im Leerlauf. Andererseits dauert die Aufheizung der Kerze (wie von dem mittleren Bild zu entnehmen) ca. 25 s.

5.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde in erster Linie die in Kapitel 3 vorgetragene Keramikglühkerze mit einem FD-Modell präsentiert. Dieses Modell stellt eine Anpassung des zuvor entwickelten Modells an die hierbei verwendeten Kappenkerzen dar, welche im Vergleich zu den Serienkerzen an der vorderen Spitze einen signifikant höheren Widerstand aufweisen. Dabei ließ sich feststellen, dass das Modell einerseits für jede Kerze separat angepasst werden muss und andererseits wegen des Rechenaufwandes nicht echtzeitfähig ist. Dennoch kann mit Hilfe dieses KGK-Modells die Empfindlichkeit der Kerze auf die in unmittelbarer Umgebung herrschenden Temperaturen sowohl dynamisch als auch statisch gezeigt werden. Dies beruht eindeutig auf dem thermisch elektrischen Verhalten der verwendeten technischen Halbleiterwerkstoffe.

Die Diskussion der während dieser Arbeit durchgeführten Messungen – hinsichtlich der Keramikglühkerze als Sensor – fand im nächsten Schritt statt. Messungen von diversen Prüfständen standen zur Diskussion. Deutlich zu sehen war dabei, dass die Kerzen sich sowohl von dem Anregungsstrom als auch von der Umgebungstemperatur erwärmen lassen. Der bekannte Einfluss der Temperatur auf den Widerstand führt schließlich zu einer Widerstandsänderung, welcher sich über das Spannungssignal aufzeichnen ließ.

Ausgehend von diesen Messungen wurde die Streuung der Kerzenwiderstände bei identischen Eingangsgrößen ebenfalls analysiert. Dies führte dazu, dass die Charakteristik von eingebauten Kerzen nur mit wenigen Größen, bekanntlich mit Spannung und Strom, bestimmt werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit

wurden verschiedene Verfahren diskutiert, die mit unterschiedlichen Methoden diverse Stärken zur Klassifikation gewähren.

6 Intelligente Informationsgewinnung aus dem Brennraum

Dieses Kapitel widmet sich den gewonnenen Erkenntnissen, wie die Keramikglühkerze als mittlerweile fester Bestandteil des Dieselmotors zur Informationsgewinnung eingesetzt werden und dadurch nicht nur verschiedene Motorsteuerungsprozesse unterstützen kann, sondern auch die Machbarkeit neuartiger Regelungstechnologien in Aussicht stellt. Beispielsweise könnte die temperaturbedingte Widerstandsänderung der Keramikglühkerze zur kontinuierlichen Anpassung der Einspritzansteuerung zur Emissionsreduktion oder Leistungserhöhung verwendet werden.

Es werden im Folgenden die Methoden zur Bestimmung der Größen Drehzahl, Einspritzzeitpunkte, Brennraumtemperatur sowie -druck mithilfe dieses Sensorsignals vorgestellt. Wie bereits erwähnt, setzen mit Temperaturveränderungen in unmittelbarer Umgebung der Kerze zugleich Änderungen des Kerzenwiderstandes ein. Diese Abhängigkeit bildet die Basis dieser Verfahren.

Als Erstes werden die Bestimmung von Einspritzbeginn und -ende sowie ein Filter zur Unterdrückung unerwünschter Signalanteile präsentiert. Auf dieser Grundlage folgt im Anschluss die Vorstellung einer weiteren Methode, welche die Drehzahl ohne großen Rechenaufwand im Fahrzeug zur Verfügung stellt. Die Bestimmungsversuche der Brennraumtemperatur sowie des Brennraumdrucks werden ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt. Dabei werden die Trägheit der Keramikglühkerze sowie die Rolle der Abtastfrequenz deutlich gemacht.

6.1 Methode zur Detektion des Einspritzbeginns und -endes

Die Direkteinspritzung des Diesel-Kraftstoffs in den Brennraum bildet derzeit aufgrund des verbesserten Verbrennungsprozesses und der reduzierten Luftverunreinigung den Standard. Die Autohersteller setzen einerseits das Common-Rail-System, welches aus einer Düse, Hochdruckpumpe sowie Hochdruckrohr besteht, ein. Andererseits ist der Einsatz von Pumpe-Düse-Einspritzsystemen, die Einspritzdrücke bis zu 3000 bar zur Verfügung stellen, genauso verbreitet. Im Vergleich zu Common-Rail-Systemen bilden Pumpe und Injektor pro Zylinder eine separate Einheit. Nichtsdestotrotz befinden sich beide Systeme eingebaut in dem Zylinderkopf und werden elektrisch angesteuert. Dies bedeutet, die Einspritzmenge, -zeit, -dauern sowie -anzahl sind über bestimmte Kennfelder festgelegt, die wiederum von anderen Größen abhängen. Beispielsweise gibt es beim Common-Rail-System ebenso Kennfelder für den passenden Raildruck.

Obwohl die hochpräzisen Systeme den Kraftstoff mit Hochdruck – das Common-Rail-System mit 1600 bar und das Pumpe-Düse-Einspritzsystem mit 3000 bar – in den Brennraum gezielt injizieren, können gewisse Unsicherheiten bei der Kraftstoffdosierung über die Kennfelder entstehen. Das Grundproblem besteht darin, dass die eingesetzten Bauteile bestimmte Toleranzen aufweisen können. Die gewollten Sprühmuster setzen voraus, dass die Düsenöffnungen fertigungsbedingt keine Streuung, keine Alterungserscheinung in Form einer Düsenverkockung sowie keine Verunreinigungen aufweisen, was in der Realität nicht einfach zu gewährleisten ist. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist der indirekt über das Magnetventil gesteuerte und nicht messbare Brennstoffdruck.

Wie im Kapitel 2 erläutert, existieren bereits Methoden, die diese Problematik aus verschiedenen Perspektiven behandeln. Eine Anpassung der Einspritzzeitpunkte und -dauern während des aktiven Brennverlaufs ist jedoch bis dato nicht vorgesehen.

Dieses Kapitel stellt ein Verfahren zur Ermittlung der Einspritzstellen (Beginn und Ende) vor, damit sie als Messgrößen für die Korrektur der im Vorfeld applizierten Einspritzkennfelder angewendet werden können. Weitere mögliche Anwendungsmöglichkeiten finden sich in einem breiten Spektrum: Anpassung der Kennfelder der KGK, Unterstützung der Verbrennungsregelung, Detektion der Funktionsstörung von Injektoren usw. Dieses Verfahren zieht

die Keramikglühkerzen heran und sieht keine Änderungen am Motorgehäuse vor, siehe Abbildung 6.1.

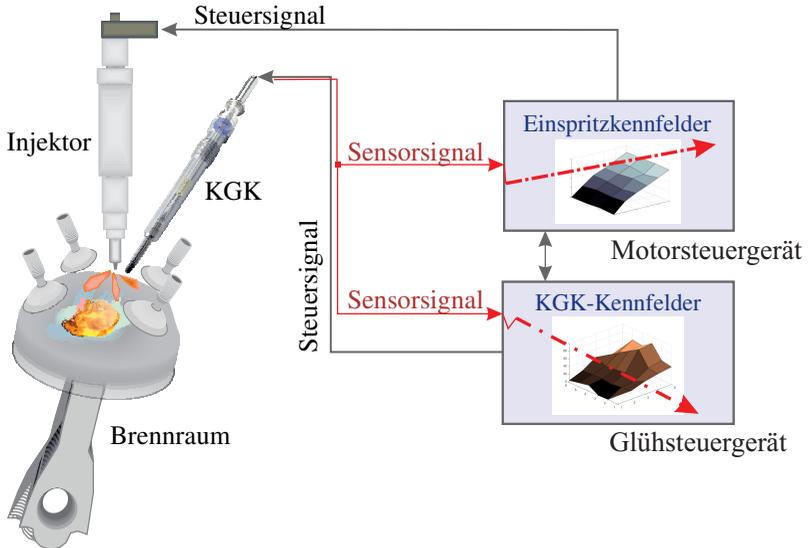


Abbildung 6.1 Aufbau sowie Steuerung der KGK und des Injektors im Motor. Mögliche Verwendung des Sensorsignals (Einspritzbeginn und Einspritzende): Optimierung verschiedener Kennfelder.

Anfangen von der modellbasierten Untersuchung der Keramikglühkerze bezüglich der Detektion des Einspritzbeginns und -endes geht es im darauffolgenden Abschnitt um die entworfenen Detektionsverfahren und die damit erzielten Ergebnisse.

6.1.1 Messprinzip

In Abbildung 6.2 ist die Anordnung der Keramikglühkerze sowie des Injektors im Brennraum des Versuchsfahrzeugs zu sehen. Diese Positionierung wird

gewählt, um eine Beschädigung der Keramikglühkerze durch ein direktes Anspritzen¹ des aus den Düsen des Injektors austretenden Kraftstoffes mit hohem Druck auszuschließen. Dies würde hauptsächlich die thermoelektrischen Werkstoffe des Glühbereichs des Keramikglühstifts (Kappenbereich, Abbildung 6.2 roter Bereich) betreffen und die Funktionalität beeinträchtigen. Der Winkel und Abstand zwischen den beiden Bauteilen ermöglichen der Keramikglühkerze u. a. eine effektive Kaltstarthilfe und Minimierung der Emmission. Mehr Informationen zur Einspritzung und zur Vorheizung sind Abschnitt 4 zu entnehmen.

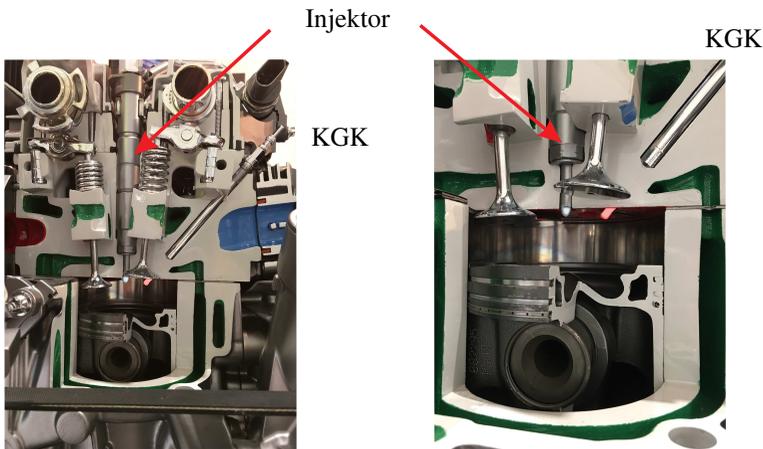


Abbildung 6.2 Ausschnitt des Brennraums eines Dieselmotors. Position des Injektors sowie der Keramikglühkerze.

Das Messprinzip baut auf dieser Anordnung auf, d. h. die Positionierung der KGK nahe des Injektors sorgt dafür, dass der mit hohem Druck eingespritzte Kraftstoff, mit anderer Temperatur als die lokale Brennraumtemperatur, zu der notwendigen Temperaturänderung in unmittelbarer Umgebung der KGK-Kappe führt. Wie in Abschnitt 5 geschildert, zieht dieses Phänomen die Widerstandsänderung nach sich. Die logische Betrachtung der Abhängigkeiten

¹ Der aus inhomogen verteilten und unterschiedlich großen Dieseltropfen bestehende Injektorstrahlkegel entwickelt sich in einem vordefinierten Abstand zur KGK.

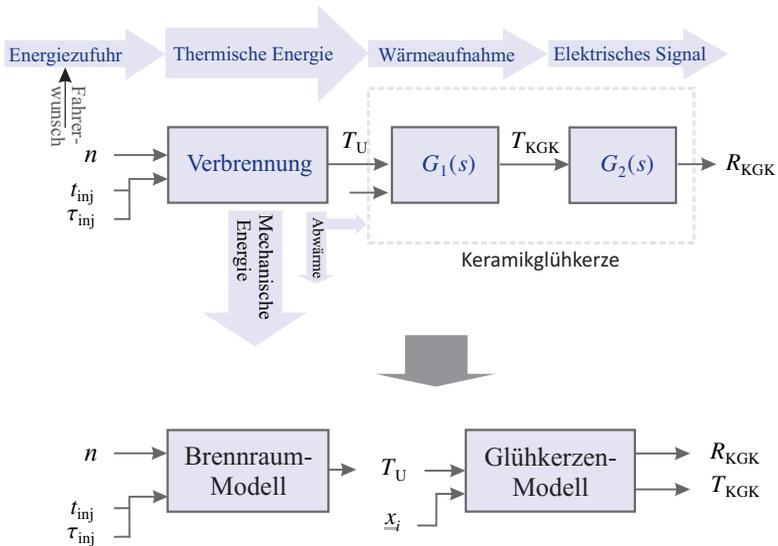


Abbildung 6.3 Betrachtung der Abhängigkeiten und Wirkungsweisen der verwendeten Signale. t_{inj} : Einspritzzeitpunkt, τ_{inj} : Einspritzdauer, n : Drehzahl, T_U : Brennraumtemperatur, $T_{K GK}$: Glühkerzentemperatur, $R_{K GK}$: Glühkerzenwiderstand, x_i : Weitere Eingangsgrößen.

und Wirkungsweisen der verwendeten Signale sind Abbildung 6.3 zu entnehmen. Dies erklärt sich wie folgt: Dem Fahrerwunsch entsprechend kann die Drehzahl² n beim Brennraum als Eingangsgröße betrachtet werden. Als weitere Eingangsgrößen liegen die Einspritzparameter t_{inj} und τ_{inj} vor. Die Keramikglühkerze bekommt anschließend die Brennraumtemperatur T_U , welche wiederum die KGK-Temperatur $T_{K GK}$ beeinflusst und am Ausgang dieser Betrachtung den KGK-Widerstand $R_{K GK}$ in Abhängigkeit dieser Größen liefert. Ein entsprechendes Signalmodell zeigt Abbildung 6.3 (unten). Die anschließende modellbasierte Untersuchung bedient sich dieser Modellbetrachtung.

² Entsprechend der Soll Drehzahl stellt sich eine Ist Drehzahl, welche auf die momentane Verbrennung direkt auswirkt, ein.

6.1.2 Schätzmethode

6.1.2.1 Modellbasierte Untersuchung

Zuerst kommt zur Simulation der Brennraumtemperatur T_U pro Zyklus das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Brennraummodell, wie in [130] gezeigt wird, zum Einsatz. Um dem Dieselprozess, oder besser gesagt, den jeweiligen Motorbetriebspunkten, gerecht zu werden, ist es notwendig, die Parameter Drehzahlwert, Einspritzmenge, -dauer sowie -zeitpunkte pro Zyklus passend zu wählen. Diese werden deshalb anhand der Messdaten eingestellt. Die Einspritzung geschieht dabei in zwei Schritten: Vor- und Haupteinspritzung. Der Ansteuerbeginn kurz vor dem OT ermöglicht anschließend die Bestimmung der Brennraumtemperatur.

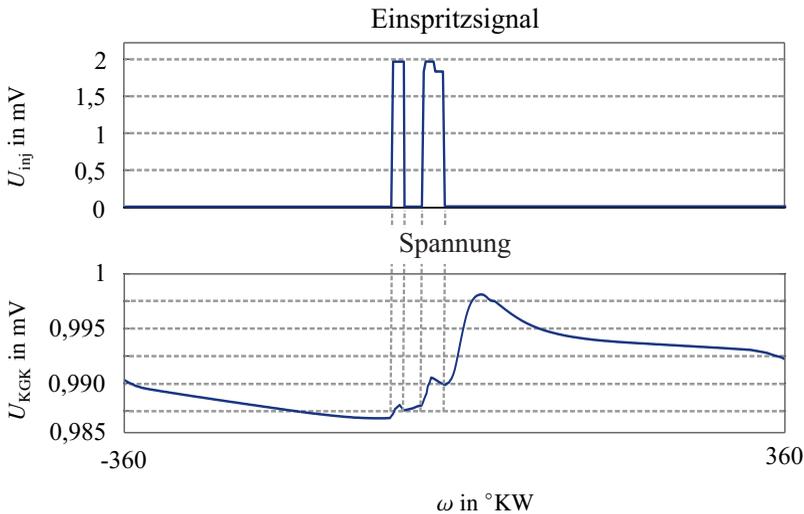


Abbildung 6.4 Simulationsergebnis für eine simulierte Brennraumtemperatur und ein gemessenes Injektorsignal.

Viel interessanter ist die Reaktion der Keramikglühkerze auf die auf ihre Kappe einwirkende Brennraumtemperatur. Abgesehen von dieser Größe wird dem für solche Untersuchungen konzipierten FDM-Glühkerzenmodell (Abschnitt 5.1) eine Stromstärke von 1 A als Anregungsgröße bereitgestellt. Außer dem Kapfenbereich erfährt der Kerzenmantel die Motortemperatur, welche

ebenfalls als eine konstante Eingangsgröße dient. Die Vor- und Haupteinspritzungssignale sowie die Reaktion der abfallenden Spannung (Widerstand) auf die Brennraumtemperatur zeigt Abbildung 6.4 exemplarisch für einen Zyklus.

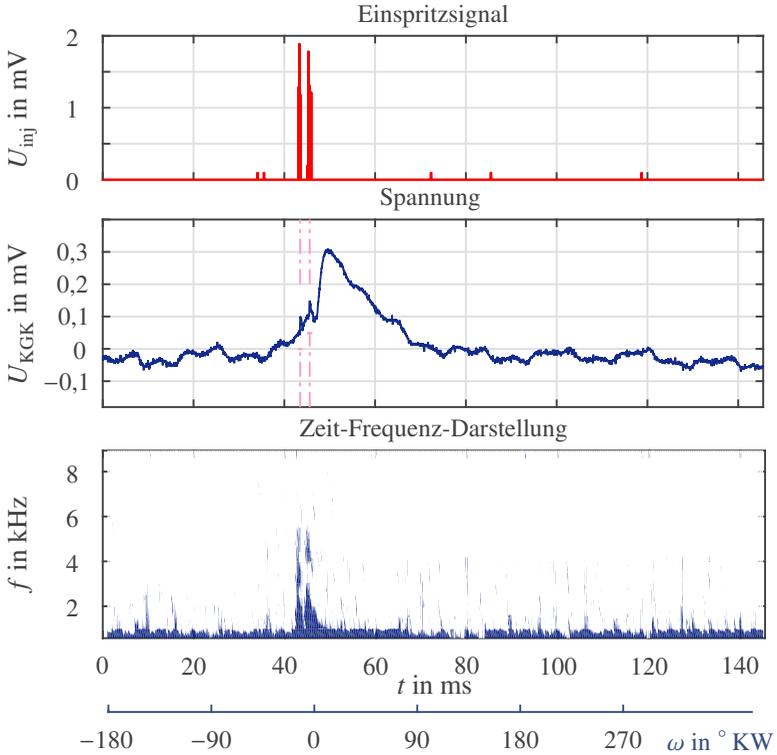


Abbildung 6.5 Messsignal bei der Einspritzung sowie dessen Frequenzgehalt in Abhängigkeit der Zeit für einen Zyklus. Frequenzen auf der Spannung bis zu 6 kHz werden an den Einspritzstellen angeregt.

Die Vor- und Haupteinspritzung mit unterschiedlichen Dauern lassen sich in dem Spannungssignal erkennen. Der Spannungsanstieg mit einem Peak an den jeweiligen Stellen spiegelt die Dauer der Einspritzvorgänge wider. Dies bestätigt die zuvor beschriebene Reaktion der Kerze auf die dynamischen Temperaturänderungen in unmittelbarer Umgebung der Kerze.

Im Vergleich zu diesem Simulationsergebnis zeigt Abbildung 6.5 ein Messergebnis. Die Kraftstoffeinspritzung in zwei Schritten macht sich in dem KGK-Spannungssignal mit 2 kleinen Peaks bemerkbar. Die angeregten Frequenzen auf der abfallenden Spannung während der Kraftstoffeinspritzung sind in der Zeit-Frequenz-Darstellung erkennbar. An diesen Stellen kommt es aufgrund der Einspritzung zu hochfrequenten Temperaturänderungen in unmittelbarer Nähe der KGK-Kappe, d. h. die Anregung entsteht als Folge der Erwärmung: $U_{KGK}(t) = f(T_U(t))$.

Anhand einer auf Messdaten basierten Methode wird im Folgenden dargestellt, wie aus diesem Spannungssignal die Einspritzbeginne und -enden detektiert werden können.

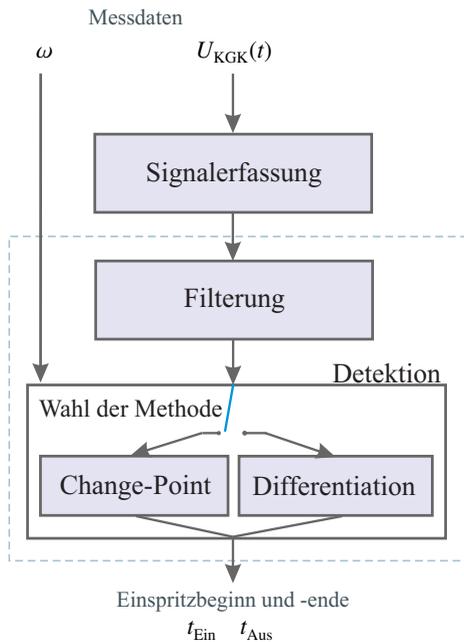


Abbildung 6.6 Verarbeitungsphasen der Detektion.

6.1.2.2 Verarbeitungsschritte der Detektion und Ergebnisse

Die Verarbeitung zur Detektion teilt sich in verschiedene Schritte ein. Wie in Abbildung 6.6 ersichtlich, wird das Signal in der ersten Phase aufgezeichnet. Nach der Signalerfassung beginnt die tatsächliche Detektion der Einspritzbeginne und -enden: Filterung und Detektionsalgorithmus. Dieser Ablauf wird nun sukzessive erläutert.

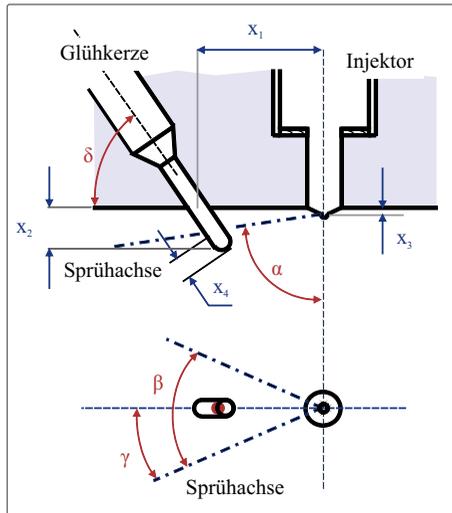


Abbildung 6.7 Positionierung der Keramikglühkerze im Messfahrzeug (Quelle: BorgWarner).

Messdatenaufzeichnung / Signalerfassung: Da die Detektion auf Messdaten basiert, wird zuerst die genaue Anordnung der Keramikglühkerze zum Injektor in dem am Motorprüfstand eingesetzten Motor in Abbildung 6.7 präsentiert. Alle Abstände x_1, \dots, x_4 und alle Winkel α, β, γ sowie δ sind fest vorgegeben. Vor allem α und β sorgen dafür, dass die Düsen den Kraftstoff ohne die Kappe zu treffen in den Brennraum sprühen.

An diesem Vierzylinder-Indiziermotor unter Berücksichtigung externer Einflüsse wird das Messsignal $U_{\text{KGK}}(t)$ mit folgender Einstellung erfasst:

- Anregungsstrom: $I_A = 1 \text{ A}$,
- Abtastzeit: $t_A = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$,

- regelbare Keramikglühkerze³,
- Messreihen:
 - Drehzahl: 800 min^{-1} und Drehmoment: 5 Nm (Leerlauf),
 - Drehzahl: 1000 min^{-1} und Drehmoment: 50 Nm,
 - Dreieckförmige Drehzahlvorgabe: von 1000 min^{-1} auf 2000 min^{-1} , Anstiegs- und Abfalldauer: 15 s und Drehmoment: 100 Nm,
 - Dreieckförmige Drehzahlvorgabe: von 1000 min^{-1} auf 2500 min^{-1} , Anstiegs- und Abfalldauer: 15 s und Drehmoment: 100 Nm,
 - Dreieckförmige Drehzahlvorgabe: von 1000 min^{-1} auf 2500 min^{-1} , Anstiegs- und Abfalldauer: 15 s und Drehmoment: 200 Nm.

Vom ECU geliefert liegen der Kurbelwellenwinkel und das Einspritzsignal ebenfalls vor. Die Messdaten spiegeln diverse Motorbetriebspunkte wider, welche durch Variation der Drehzahl und des Drehmoments im Hinblick auf die Detektion der Einspritzstellen eingestellt werden und somit die Eignung der Keramikglühkerze als Sensor besser prüfen lässt. Eines der aufgezeichneten Sensorsignale zeigt Abbildung 6.8. Sowohl die Drehzahl als auch die Einspritzmenge (pro Zyklus dargestellt) deuten auf abrupte Änderungen der Motorbetriebspunkte hin. Nichtsdestotrotz hinterlässt dieses Verhalten im Spannungssignal seine Spuren. Im kalten Zustand des Motors, also beim nicht laufenden Motor ($t < 9 \text{ s}$), gibt die Spannung – abgesehen von Störungen – nur den Kaltwiderstand an.

Filterung: Abbildung 6.9 zeigt das DFT-Betragspektrum (im Leerlaufbetrieb), welches die im Messsignal vorkommenden Frequenzen darstellt. Die relevanten Einspritzstellen sind mit Störsignalen überlagert, was die Detektion erschweren wird.

Damit werden die niederfrequenten Temperatureinflüsse⁴ (siehe Abbildung 6.8, unten) sowie die unerwünschten hochfrequenten Signalanteile (Rauschanteile), die in Abbildung 6.10 deutlich sichtbar sind, anhand eines Bandpassfilters unterdrückt (Abbildung 6.11). Im Bereich der Einspritzvorgänge (-20 bis 20°KW) bleibt das Messsignal unverzerrt.

³ A priori werden alle Kerzen als regelbar eingestuft, wenn sie einen großen Widerstand an der Kappe aufweisen.

⁴ Phänomen: Als Folge der Kerzen-Erwärmung steigt die anfallende Spannung ebenfalls an

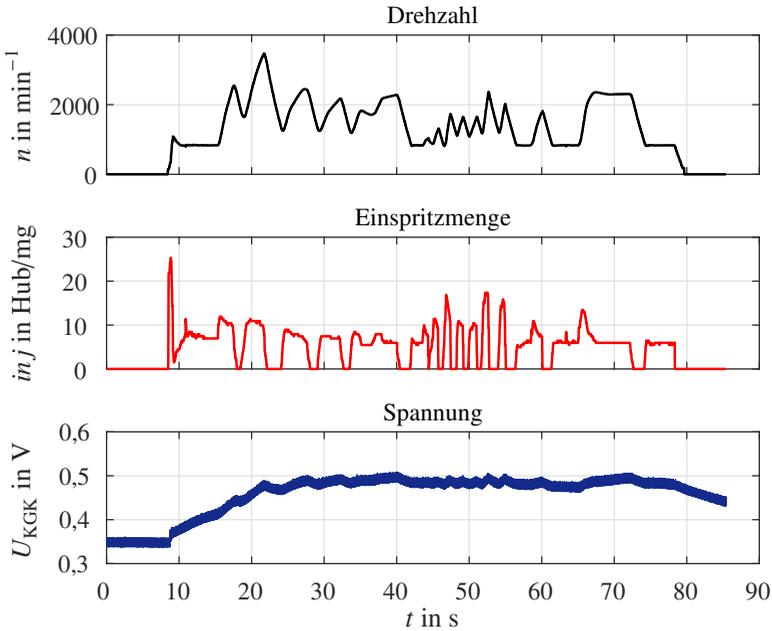


Abbildung 6.8 Sensorsignal $U(t)$, aufgenommen mit KGK und I_A von 1 A an einem Motorprüfstand.

Es wird ein Tschebyscheff-Filter vom Typ II (IIR-Filter) eingesetzt, da diese rekursive Filterung wesentlich weniger Koeffizienten als ein vergleichbares FIR-Filter benötigt (Filterordnung niedrig, relevant für die Implementierbarkeit). Charakteristisch für dieses Filter sind das starke Abknicken der Übertragungsfunktion ab Grenzfrequenz und die Welligkeit im Sperrbereich. Der Gleichanteil wird anhand eines Tiefpassfilters 1. Ordnung ermittelt und anschließend von dem Originalsignal abgezogen. Die Grenzfrequenz f_{pass} beträgt 40 Hz und die Sperrfrequenz f_{stop} 400 Hz. Die Abtastfrequenz f_A ist hierbei 100 kHz.

Die Systemfunktion $H_{\text{HP}}(z)$ des Hochpasses zur Unterdrückung der niederfrequenten Temperatureinflüsse kann wie folgt angegeben werden:

$$H_{\text{HP}}(z) = 1 - H_1(z), \quad (6.1)$$

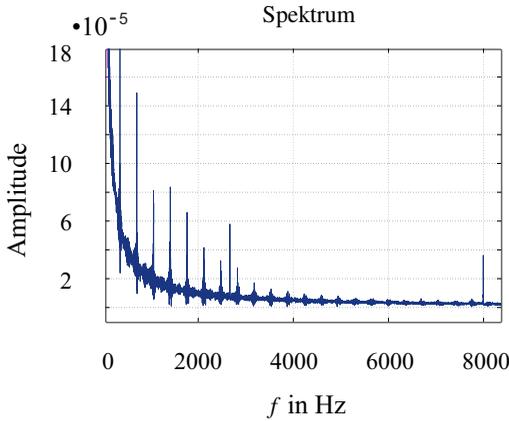


Abbildung 6.9 DFT-Betragspektrum.

wobei das Filter

$$H_1(z) = \frac{0,0002 z^{-1}}{1 - 0,9998 z^{-1}} \tag{6.2}$$

Tiefpasscharakteristik aufweist. Anhand der FFT-Analyse stellt sich heraus, dass hauptsächlich die Frequenzen kleiner 300 Hz (f_{pass}) für die Form und die Frequenzen bis 20 kHz (f_{stopp}) für die Einspritzstellen wichtig sind. Damit ist der Übergangsbereich definiert. Die Toleranz der Amplitudendämpfung im Durchlassbereich beträgt 1 dB und im Sperrbereich 20 dB. Gewählt wird eine Filterordnung von 4 (erwies sich besser geeignet).

Der Tiefpass $H_2(z)$ entsteht gemäß⁵:

$$H_2(z) = H_{21}(z) \cdot H_{22}(z) \tag{6.3}$$

mit

$$H_{21}(z) = 0,008 \cdot \frac{1 - 1,971 z^{-1} + z^{-2}}{1 - 1,988 z^{-1} + 0,9884 z^{-2}} \tag{6.4}$$

⁵ Die Filterberechnung führt zu einem Signalfussgraphen mit den reellen Teil-Übertragungsfunktionen $H_{21}(z)$ und $H_{22}(z)$

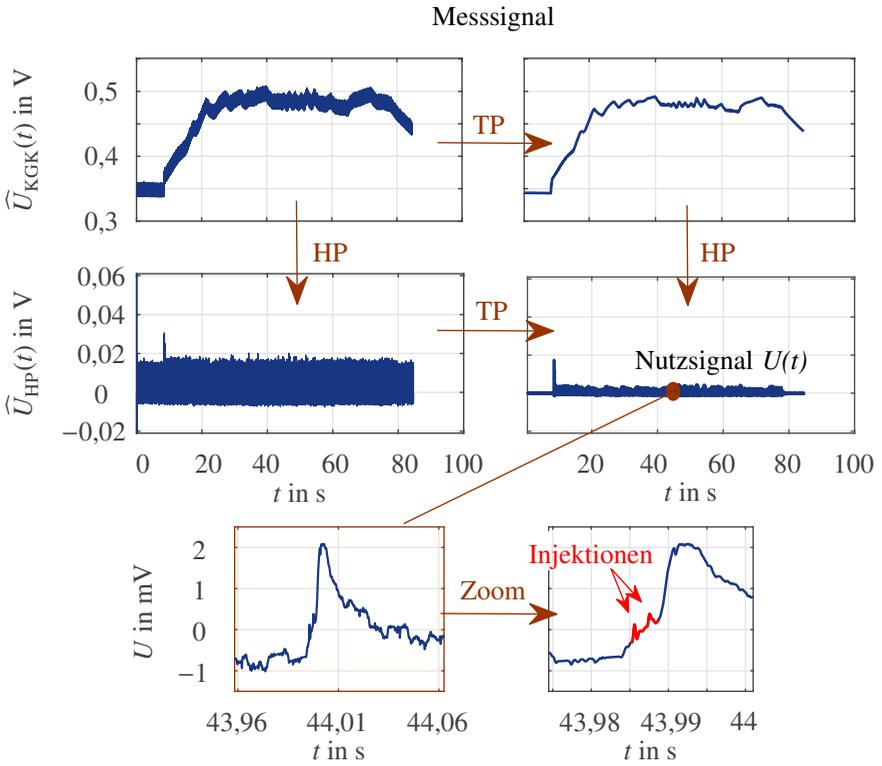


Abbildung 6.10 Messsignal $\widehat{U}(t)$ wird mit einem Bandpass gefiltert.

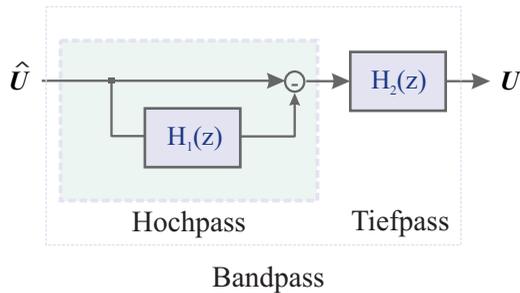


Abbildung 6.11 Angewendete Filterstruktur.

und

$$H_{22}(z) = 0,00143 \cdot \frac{1 - 1,837z^{-1} + z^{-2}}{1 - 1,9718z^{-1} + 0,972z^{-2}}. \quad (6.5)$$

Somit ergibt sich für $H_2(z)$ folgende Übertragungsfunktion:

$$H_2(z) = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1,144 - 4,356z^{-1} + 6,43z^{-2} - 4,356z^{-3} + 1,144z^{-4}}{1 - 3,96z^{-1} + 5,88z^{-2} - 3,881z^{-3} + 0,9607z^{-4}}, \quad (6.6)$$

dabei liegen alle Polstellen im Einheitskreis und sichern die notwendige Stabilität des Filters. Die Dimensionierung des Bandpassfilters sieht vor, dass der Einsatz für weitere Aufgaben wie etwa die Berechnung der Drehzahl möglich ist. Abgesehen von diesem Digitalfilter ermöglicht das in Kapitel 6.2 (siehe Unterkapitel 6.2.3 und Abbildung 6.23) vorgestellte Analogfilter, dessen Einsatz hier jedoch nicht vorgestellt wird, vergleichbare Filterungsergebnisse.

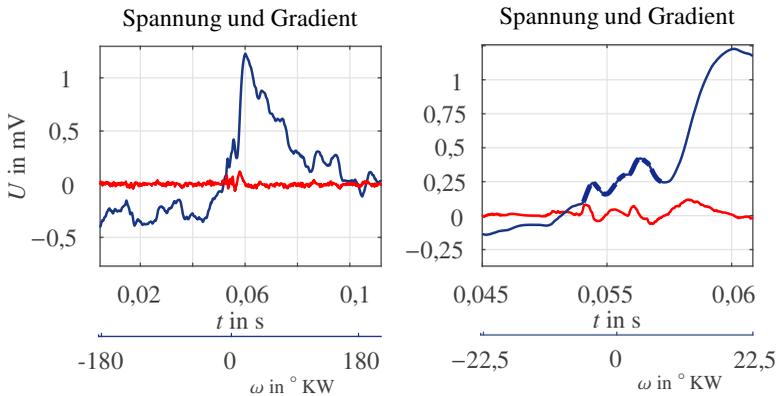


Abbildung 6.12 Detektion der Einspritzbeginne und -enden mittels zeitdiskreter Differentiation. —: Messsignal und —: Gradient faktorisiert mit 20.

Detektion mittels Differentiation: Die erste Methode, die in der letzten Verarbeitungsphase (6.6) die Detektion der Tipins und -outs⁶ von Einspritzstellen ermöglicht, ist die zeitdiskrete Differentiation des Messsignals. Wie in Schritt

⁶ Tipin: Einspritzbeginn, Tipout: Einspritzende

2 der Drehzahlberechnung dargestellt, lassen sich die lokalen Änderungen des Messsignals durch die zeitdiskrete Differenziation wie folgt ermitteln:

$$\frac{\partial f}{\partial t_k} \approx \frac{f(t_k) - f(t_k - t_A)}{t_A}, \quad (6.7)$$

wobei der rückwärtige Differenzenquotient an einem zu t_k benachbarten Zeitpunkt $t_k - t_A$ berechnet wird. Ein Beispiel der Differentiation für einen Zyklus ist in Abbildung 6.12 zu sehen.

Als Erstes wird über den Kurbelwellenwinkel ein geeignetes Suchfenster definiert. Dieser Suchbereich kann online jederzeit in Abhängigkeit der vordefinierten Einspritzparameter entsprechend angepasst werden. Dies minimiert die Fehldetektionsrate. Anhand der Abbildung 6.13 lässt sich die eigentliche Detektion wie folgt veranschaulichen: Dieses Verfahren nutzt zur Detektion

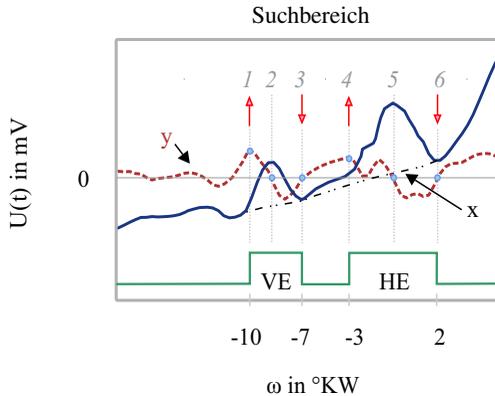


Abbildung 6.13 Detektion der Einspritzbeginne und -enden in einem eingeschränkten Bereich. VE: Voreinspritzung, HE: Haupteinspritzung, x: Verlauf ohne Injektionen, y: Ergebnis der Differenziation.

von Tipins, also den Stellen 1 und 4, lokale Maxima oberhalb eines vordefinierten Schwellwertes. Der nächste Nulldurchgang – von plus nach minus – liefert den Hochpunkt der jeweiligen Einspritzung. In Abbildung sind die Stellen mit 2 und 5 gekennzeichnet. An dem nächsten Nulldurchgang – von minus nach plus – gibt das Ableitungssignal schließlich das Tipout an (Damit sind

die mit 3 und 6 hervorgehobenen Stellen gemeint). Aus den Simulations- und Messergebnissen (an einem Indiziermotor) konnte entnommen werden, dass die Einspritzbeginne und -enden genau an den Stellen zu finden sind. Die Berechnung der Einspritzdauer ergibt sich aus der Differenz zwischen den Zeitpunkten von Tipin und Tipout.

Zusätzlich zu den elementaren Einstellungen „Suchfenster“ und „Schwellwert“ kommt die Betrachtung der Filter- und Detektionsverzögerung für eine optimale Detektion hinzu, damit eine zeitliche Verfälschung vermieden werden kann. Dem Einsatz als ein echtzeitfähiges Detektionssystem steht schließlich nichts im Wege. Die auf dem verschiebungsfreien Differenzenquotienten basierende Detektionsmethode erkennt sowohl fehlerbehaftete als auch injektionsfreie Zyklen. In Tabelle 6.1 sind die Erkennungsraten (ER) der Einspritzstellen sowie die Falschalarmraten (FAR) zu sehen.

Tabelle 6.1 Detektionsrate mit den bestehenden Messdaten. Ohne Kurbelwellenwinkel heißt: Das Suchfenster wird mit Hilfe des Sensorsignals vorgeben.

mit Kurbelwellenwinkel			ohne Kurbelwellenwinkel		
Drehzahlbereich in min^{-1}	ER ^a in %	FAR ^b in %	Drehzahlbereich in min^{-1}	ER in %	FAR in %
$n \leq 1300$	99,02	0,5	$LL < n \leq 1000$	97,9	0,6
$n > 1300$	92,5	0,71	$1000 < n < 1500$	70	0,93
			$n \geq 1500$	64,7	4,15

^a Erkennungsrate

^b Falschalarmrate

Wie dort ersichtlich, liefert das Verfahren mit den zur Verfügung stehenden Messdaten nicht immer die richtigen Ergebnisse. Das heißt, es gibt auch Fehldetektionen. Bei dem niedrigen Stichprobenumfang werden manche Einspritzungen überhaupt nicht detektiert. Dies könnte damit begründet werden, dass die zufällig ausgesuchte Keramikglühkerze für die Messdatenaufzeichnung bei hohen Drehzahlen nicht gut geeignet ist. Neben den erreichten Erkennungsraten bestätigt die Standardabweichung der Schätzung mit $0,21^\circ \text{KW}$ den erzielten Qualitätsstand. Das Verfahren erkennt außerdem verbrennungsfreie Zyklen korrekt. Im Vergleich zur Fehldetektion (im Sinne von Nichterkennen der Einspritzstellen) ist die Falschalarmrate in allen Drehzahlbereichen sehr niedrig.

Detektion mittels Change-Point-Methode:

Um die Wechselpunkte in einem Signal zu detektieren, gibt es neben dem Differenzenquotienten auch weitere Verfahren. Einer davon ist die Change-Point-Methode, welche in der Signalanalyse zur Detektion von plötzlichen Änderungspunkten eingesetzt wird. Die Segmentierung eines Signals läuft hierbei unter Berücksichtigung der Signalcharakteristik wie etwa der Varianz, des Mittelwertes oder der Steigung.

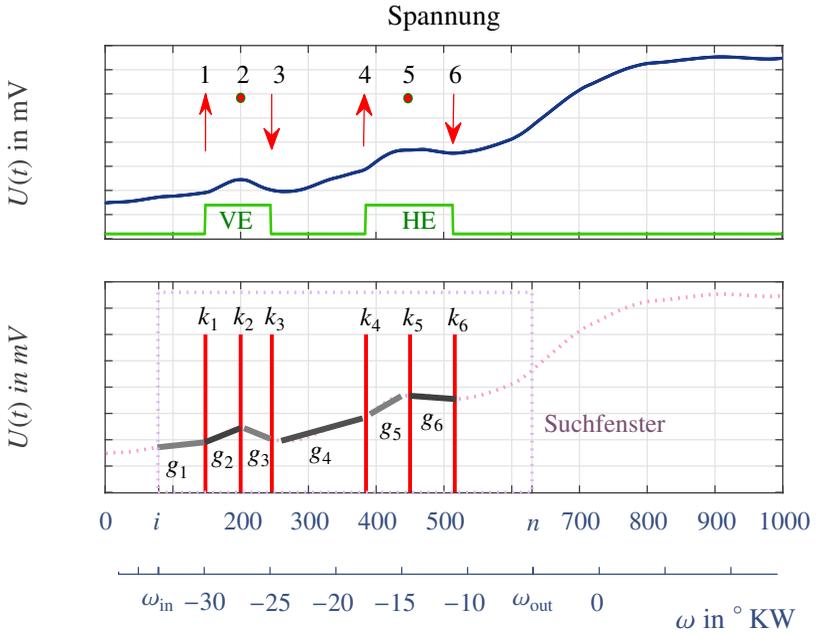


Abbildung 6.14 Ermittlung der Einspritzzeitpunkte und -dauern mittels Change-Point-Detektion. —: Injektorsignal, VE: Voreinspritzung, HE: Haupteinspritzung, —: Trennlinien (k_1, \dots, k_6), g_1, \dots, g_6 : Angelegte Geraden in jeweiligen Segmenten, $n - i$: Messpunkte ($i = 80, n = 630$), ω : Kurbelwellenwinkel.

Im Rahmen dieser Aufgabe kommt diese Methode folgendermaßen zum Einsatz. Zuerst wird ein passendes Suchfenster definiert. Die zyklische Anpassung des Suchfensters ist in Abhängigkeit des Injektorvorgangs möglich. Das Signal x besitzt im Suchfenster n Werte.

Es wird davon ausgegangen, dass der gewählte Suchbereich die Vorgänge Vor- bzw. Haupteinspritzung beinhaltet. Dies bedeutet, dass das Sensorsignal

im Suchfenster 7 Segmente mit 6 Trennlinien, also 2 Tipins, 2 Tipouts sowie 2 Extrema aufweist, siehe Abbildung 6.14.

Von Anfang des Suchfensters ω_{in} bis k_1 ist das Segment 1. Der Teil von der Trennlinie k_6 bis zum Ende des Suchfensters ω_{out} entspricht dem Segment 7 und zwischen den Trennlinien befinden sich dementsprechend die restlichen 5 Segmente. Die Anzahl der Trennlinien, also Change-Points, k_i wird für die Suche mit $i = 6$ fest vorgegeben. Um die richtigen Positionen der Trennlinien zu bestimmen, wird die Signalcharakteristik einzelner Segmente mit Anlegen einer Gerade g_i voneinander unterschieden. Das heißt, die Steigung der Gerade eines Segments ändert sich beim Überschreiten der Trennlinie sprunghaft, siehe Abbildung 6.14.

Die Stellen, wo die Change-Points optimalerweise zu platzieren sind, werden mit Hilfe der Minimierung des Gesamtrestfehlers ermittelt:

$$\begin{aligned} J(k_1, \dots, k_{H=6}) &= \sum_{h=1}^H \sum_{j=k_{h-1}+1}^{k_h} (x_j - \mu_x)^2 \\ &= \sum_{h=1}^H \sum_{j=k_{h-1}+1}^{k_h} (x_j - \bar{x}_{k_{h-1}+1:k_h})^2, \end{aligned} \quad (6.8)$$

wobei $\mu_x =$

$$\bar{x}_{k_{h-1}+1:k_h} = \frac{1}{k_h - k_{h-1}} \sum_{j=k_{h-1}+1}^{k_h} x_j \quad (6.9)$$

dem Mittelwert und $\sigma_x^2 =$

$$\frac{1}{n-i} \sum_{h=1}^H \sum_{j=k_{h-1}+1}^{k_h} (x_j - \mu_x)^2 \quad (6.10)$$

der Varianz entspricht [63]. Diese Gleichung liefert somit pro Segment die Restabweichung der angelegten Gerade zu den Messdaten. Die Minimierung dieser Gleichung entspricht der Maximierung der Log-Likelihood-Funktion, welche für alle Segmente separat ermittelt werden kann. In Abbildung 6.14

beinhaltet der Suchbereich $m = n - i = 550$ Messwerte des Sensorsignals. Es ergibt sich demzufolge für mögliche Kombinationen der 6 Change-Points einen Rechenaufwand von $O\binom{n}{6}$. In [55] ist ein Algorithmus zur Bewältigung solcher Aufgabe vorgestellt.

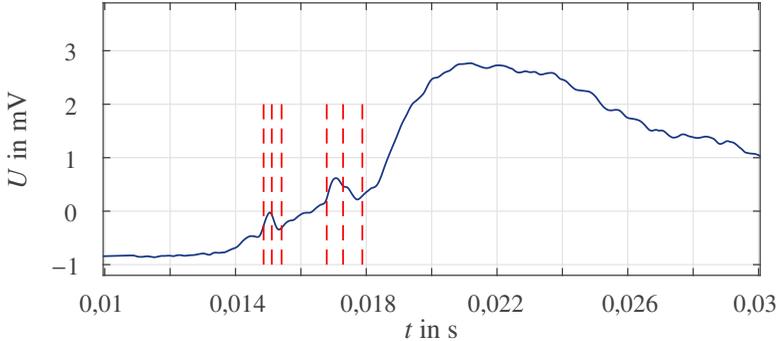


Abbildung 6.15 Ergebnis in einem Zyklus mittels Change-Point-Detektion. —: Sensorsignal, —: Trennlinien (k_1, \dots, k_6).

Solch ein algorithmisches Minimierungsproblem lässt sich im Falle dieser Herausforderung wie folgt umgehen. Die Definition des Suchfenster-Anfangs erfolgt in Abhängigkeit des Motorbetriebspunktes. Die Länge des Suchfensters beinhaltet allerdings eine identische Anzahl von Messpunkten. Die Anzahl der Segmente sowie der Change-Points sind wie in Abbildung 6.14 konstant. Zur Minimierung des Restfehlers einzelner Segmente bedient sich dieses Verfahren auch der Gleichung (6.8). Hierbei werden jedoch die einzelnen abrupten Änderungsstellen hintereinander ermittelt. Der Bewegungsbereich der Trennlinien ist fest vorgegeben. Die Position der Trennlinie wird solange variiert, bis die Gerade im vorherigen Segment minimal von dem tatsächlichen Signalverlauf abweicht. Zur Kontrolle dieser Anforderung wird ein Schwellwert definiert. Die Suche wird abgebrochen, sobald der Restfehler diesen Schwellwert unterschreitet.

Ein Beispiel des Detektierens ist in Abbildung 6.15 zu sehen. Der Zyklus zeigt den Injektionsvorgang im Leerlauf ($\approx 850 \text{ min}^{-1}$, 5 mg/Hub). Mit dem Verfahren gelingt es, die Vor- und Haupteinspritzvorgänge zu detektieren. Die erste Trennlinie ergibt demnach den Beginn der Voreinspritzung t_{Ein} , die dritte das Ende der Voreinspritzung. Die Haupteinspritzung liegt dagegen zwischen

den Trennlinien vier und sechs. Die Berücksichtigung der Filterverzögerung wird bei der Berechnung berücksichtigt.

Tabelle 6.2 Detektionsrate mit den bestehenden Messdaten. Die Change-Point-Detektion nutzt den Kurbelwellenwinkel für das Suchfenster.

mit Kurbelwellenwinkel		
Drehzahlbereich in min^{-1}	ER ^a in %	FAR ^b in %
$n \leq 1300$	90	1,5
$n > 1300$	81,5	4,07

^a Erkennungsrate

^b Falschalarmrate

Tabelle 6.2 zeigt sowohl die Erkennungsrate als auch die Fehlalarmrate dieser Methode. Im unteren Drehzahlbereich, wo die Injektion im Sensorsignal ausgeprägter ist, sind bessere Ergebnisse zu erzielen. Im Gegensatz dazu steigt mit dem vereinfachten Change-Point-Verfahren in oberen Drehzahlbereichen die Anzahl der nicht erkannten oder falsch detektierten Injektionsstellen an. Die Standardabweichung der Bestimmung liegt dabei bei $0,3^\circ$ KW.

Im Vergleich zu der auf Differentiation basierenden Methode liefert die Change-Point-Detektion mit den bestehenden Daten etwas schlechtere Ergebnisse. Ein anderer Vorteil der Differentiation ist, dass sie einen kleineren Zeit- und Rechenaufwand erfordert. Nichtsdestotrotz ermöglichen beide Verfahren die Detektion der Einspritzbeginne und -enden.

6.1.3 Fazit

Sowohl die Differentiationsmethode als auch das Change-Point-Verfahren ermöglichen die Detektion der Einspritzzeitpunkte und -dauern. Dies bedeutet, dass die Keramikglühkerze als Sensor – ohne zusätzliche Information – für solch eine Aufgabe in Frage kommen kann. Diese Information ist beispielsweise für Diagnosezwecke nützlich.

Die erste Methode bedient sich der Ableitung des Sensorsignals. Mittels der verschiebungsfreien Differentiationsmethode wird die erste Ableitung des zeit-

diskret aufgezeichneten Sensorsignals ermittelt. Die Bestimmung der Injektionsstellen erfolgt schließlich durch Detektion der Nulldurchgänge der ersten Ableitung in einem vordefinierten Suchfenster ohne komplexe Algorithmen. Trotz der schlecht aufgezeichneten Messdaten bestätigen die gute Erkennungsrate sowie geringe Standardabweichung der geschätzten Einspritzdauern die Verlässlichkeit dieser Schätzung. Dem Verfahren gelingt es bei niedrigen Drehzahlbereichen, fast alle Injektionsvorgänge zu erkennen. In [117] wurde die erste Version dieser Methode veröffentlicht, die einen Algorithmus ohne optimierte Korrekturfunktion und ein vereinfachtes Filter verwendet (anderer Funktionsablauf).

Die zweite Methode setzt auf die Detektion der abrupten Änderungsstellen im Sensorsignal. In einem vordefinierten Suchfenster werden die abrupten Änderungsstellen, Change-Points, mit Hilfe der angelegten Geraden, welche vor und nach dem Change-Point eine möglichst minimale Abweichung zum Sensorsignalverlauf aufweisen, gesucht. Dieses Verfahren liefert gute und reproduzierbare Ergebnisse. Die Standardabweichung der geschätzten Einspritzdauern sowie die Erkennungsrate fällt allerdings im Vergleich zur Differentiationsmethode etwas schlechter aus.

Damit die Keramikglühkerze in allen Drehzahlbereichen auf jeden Injektionsvorgang mit deutlich erkennbaren Spannungspeaks reagiert, ist die Optimierung der Keramikglühkerze essenziell. Eine bessere Schätzgenauigkeit könnte – beispielsweise mittels Erhöhung des Kappenwiderstandes – erreicht werden. Eine Verbesserung des Change-Point-Verfahrens mit ausreichend guten Messdaten ist ebenfalls möglich. Solche Korrekturen bringen weitere Einsatzgebiete wie etwa die Anpassung der Steuerungskennfelder des Heizelements sowie die Korrektur der im Vorfeld applizierten Einspritzkennfelder näher.

6.2 Methode zur Bestimmung der Motordrehzahl

Die standardmäßig mithilfe eines Hall- oder induktiven Sensors gemessene Drehzahl kann unter Zuhilfenahme einer serienmäßig eingebauten Keramikglühkerze bei einem Dieselmotor ebenfalls ermittelt werden. Die thermoelektrische Empfindlichkeit der Keramikglühkerze gegenüber ihrer Umgebung führt zu einer Widerstandsänderung. Die Ursache dieser Sensibilität liegt in den spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe begründet, siehe Kapitel 3. Das (thermische) Übertragungsverhalten der KGK erlaubt, sowohl nieder- als auch hochfrequente Temperaturänderungen zu messen. Diese Abhängigkeit des KGK-Widerstandes von der Umgebungstemperatur, also Brennraumtemperatur, dient als Eingangsgröße zur Ermittlung der Motordrehzahl. Aufgrund des empfindlichen Widerstands-Verhaltens auf die Temperaturänderungen im Brennraum wird die Drehzahlbestimmung im ganzen Drehzahlpektrum untersucht, um auch die Eignung bei hohen Drehzahlen nachzuweisen. Abbildung 6.16 zeigt dieses Verhalten beispielhaft.

6.2.1 Messprinzip

Die Bestimmung der Umdrehungen der Kurbelwelle in einer bestimmten Zeit, also Drehzahl, stellt eine Standardaufgabe vor allem zur Überwachung von Verbrennungsmotoren dar. Derzeit gelingt dies hauptsächlich mit Hilfe der Hall- oder induktiven Sensoren an der Nockenwelle oder Kurbelwelle [101].

Im Weiteren wird der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Ansatz zur Bestimmung der Drehzahl erläutert. Wie in Abbildung 6.17 vorgestellt, ermöglicht der Verbrennungsprozess wegen der thermisch-elektrischen Wirkungsweise der KGK den folgenden Ansatz: Die thermische Arbeit im Brennraum wird zyklisch in Abhängigkeit der Soll Drehzahl (Fahrerwunsch) verrichtet. Dies bedeutet, dass die Brennraumtemperatur sowie der Brennraum-Druck sich ebenfalls zyklisch verändern. Aufgrund der KGK-Lage führt solch eine zyklische Änderung der Brennraumtemperatur unumgänglich zu einer zyklischen Änderung der Kerzentemperatur, was die Widerstandsänderung herbeiführt. Der Entwurf einer Methode zur Ermittlung der Motordrehzahl wird anhand dieser logischen Abhängigkeiten erfolgen.

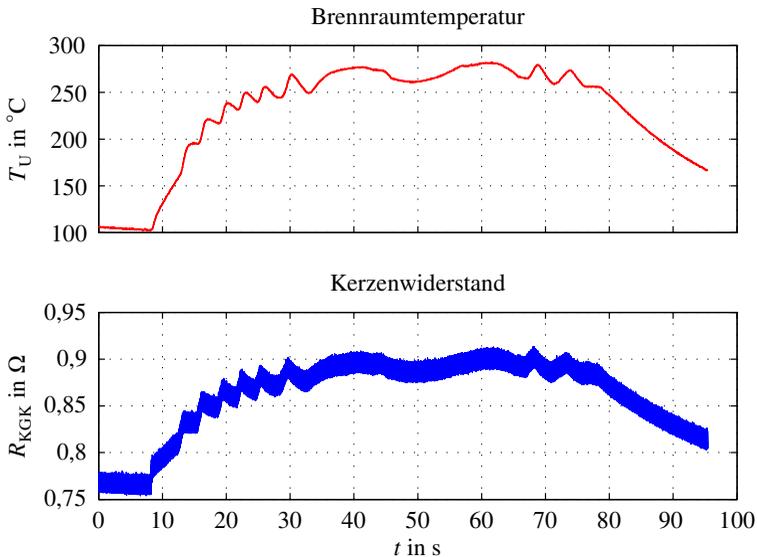


Abbildung 6.16 T_U : Lokale Brennumtemperatur (gemessen mit Thermoelement beim heißen Motorzustand), R_{KGK} : Gemessener Widerstand der Keramikglühkerze.

6.2.2 Diskussion der Abhängigkeiten der Signale

Es muss in erster Linie aufgezeigt werden, dass die in Abbildung 6.17 dargestellten Größen voneinander abhängen, wobei die Abhängigkeit der Brennumtemperatur von dem Fahrerwunsch trivial ist und an der Stelle nicht näher erläutert wird. Nicht die Führungsgröße (Fahrerwunsch), sondern die Motordrehzahl n dient als Vergleichsgröße für die Schätzung. Deshalb heißt sie hierbei Ist-drehzahl. Es ist jedoch zu konstatieren, dass die Drehzahlbestimmung aus dem Kerzenwiderstand zuverlässig erfolgen kann.

Das mithilfe der Finite-Differenzen-Methode (FDM) erstellte Modell im Abschnitt 5.1 wird zur Untersuchung dieser Aufgabe herangezogen. Vereinfacht kann das Modell für die Aufgabe wie folgt in Abbildung 6.18 verstanden werden.

Hierbei gibt es zwei Eingangsgrößen Brennumtemperatur T_U und Strom I sowie zwei Ausgangsgrößen Kerzentemperatur T_{KGK} und -widerstand R_{KGK} .

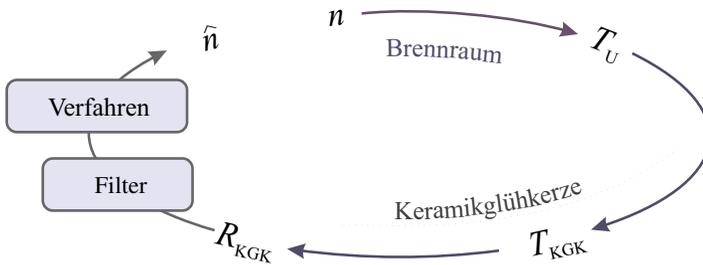


Abbildung 6.17 Logische Zusammenhänge und Wirkprinzipie der verwendeten Signale. n : Ist-drehzahl, \hat{n} : Geschätzte (Ist-)Drehzahl, T_U : Brennraumtemperatur, T_{KGK} : Glühkerzentemperatur, R_{KGK} : Glühkerzenwiderstand.

Zu den weiteren Eingangsgrößen können Größen wie etwa die Kühlwassertemperatur gezählt werden. Abgesehen von dem Kappenbereich gibt es nämlich Wärmewechsel mit dem Motorblock, welcher mithilfe des Kühlwasserkreises gekühlt wird. Das Modell ahmt – vereinfacht formuliert – das nichtlineare thermisch-elektrische Verhalten der Keramikglühkerze nach. Das Modell liefert allerdings nur für eine bestimmte Keramikglühkerze zutreffende Ausgangswerte. Für andere Kerzen muss das Modell angepasst werden, um der Streuung von KGK entgegenzuwirken. Zu den Zwecken der Drehzahlermittlung ist dies allerdings nicht notwendig, da das Modell nur für die Abhängigkeitenanalyse eingesetzt wird. Andererseits kommt zur Simulation der Brennraumtemperatur ein vereinfachtes Brennraummodell des direkteinspritzenden Dieselmotors, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, zum Einsatz, siehe Abbildung 6.18. Dieses Modell zeigt, dass die Solldrehzahl die Brennraumtemperatur beeinflusst.

Die Beziehung zwischen Ein- und Ausgangsgrößen wird als Nächstes anhand eines Beispiels erklärt.

Brennraumtemperatur: Für die Eingangsgröße $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ ergibt sich ein Verlauf der resultierenden Brennraumtemperatur, siehe Abbildung 6.19. Die zweite Eingangsgröße Einspritzmenge ist $inj = 5 \text{ mg/Hub}$. Die Zyklusdauer hängt nur von der Motordrehzahl ab.

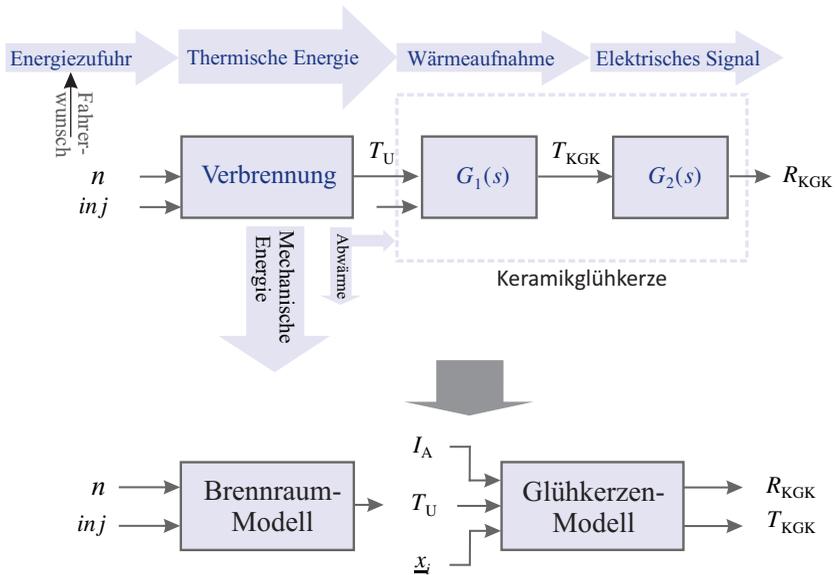


Abbildung 6.18 Modellbasierte Betrachtung der Signale. n : Solldrehzahl, inj : Einspritzmenge, T_U : Brennräumtemperatur, T_{KGK} : Glühkerzentemperatur, R_{KGK} : Glühkerzenwiderstand, I_A : Anreizungsstrom, \underline{x} : Weitere Eingangsgrößen.

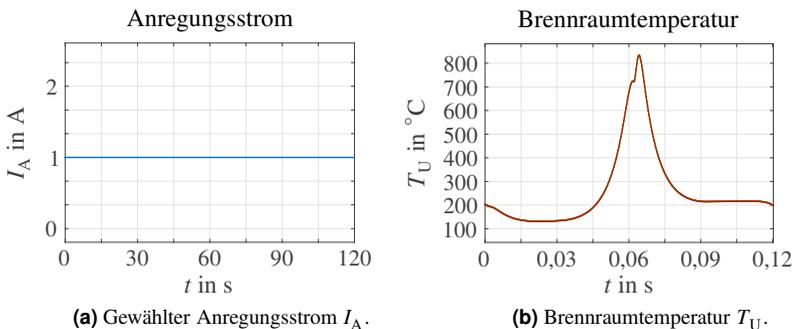


Abbildung 6.19 Eingangsgrößen der Simulation. Die auf die KGK-Kappe einwirkende Brennräumtemperatur wird dabei periodisch wiederholt. Die Kühlwassertemperatur liegt bei 60°C .

Glühkerzentemperatur und -widerstand: Die Reaktion der mit einem konstanten Strom $I(t) = 1$ A angeregten Keramikglühkerze auf

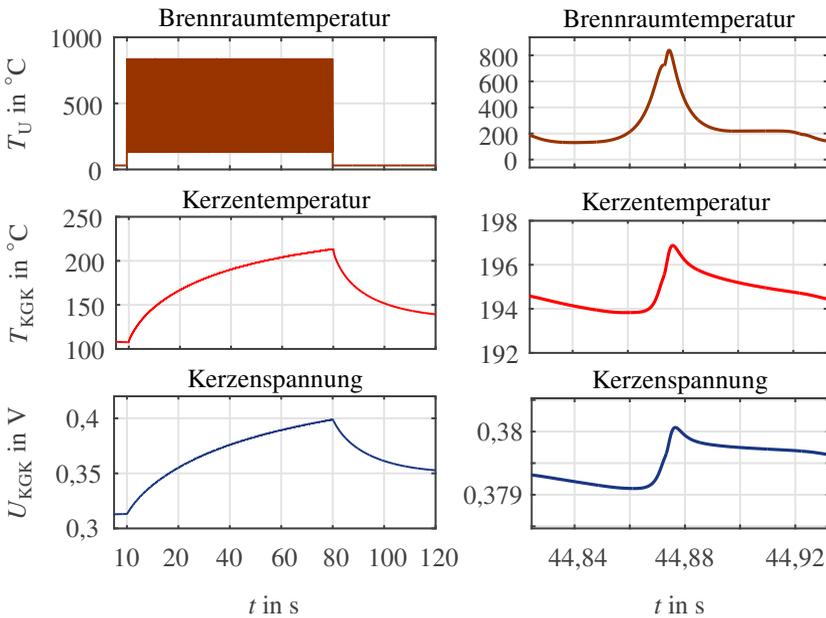


Abbildung 6.20 Auswirkung der Brennraumtemperatur auf die Kerze. Ergebnis der modellbasierten Untersuchung mit einer Simulationszeit von 120 s.

die Umgebungstemperatur, also Brennraumtemperatur, wird als Nächstes simuliert. Die Simulation dauert 120 s, damit die Kerze sowohl die niederfrequenten als auch die hochfrequenten Änderungen durch die Brennraumtemperatur aufzeigt. In der Annahme, dass die Drehzahl während dieser Zeit konstant bleibt, wird die zuvor für einen Arbeitsspiel (Zyklus) simulierte Brennraumtemperatur als ein dynamisches und sich während der Simulation zyklisch wiederholendes Signal eingegeben. Die sich dabei ergebenden Ausgangsgrößen KGGK-Temperatur und -Widerstand sind in Abbildung 6.20 zu sehen, wobei die Temperatur den Wert am heißesten Punkt der Kappe wiedergibt. Diese Abbildung stellt die Reaktion der Kerze im niederfrequenten Bereich dar, d. h. die Kerze wärmt sich langsam auf. Die Betrachtung dieses Temperaturtrends liefert bezüglich der Drehzahlermittlung keine Informationen.

Simulationsergebnis: Abbildung 6.20 illustriert die Ergebnisse der Simulation mit dem vorgegebenen Brennraumtemperaturverlauf, wobei die Verbren-

nung nur im Bereich von 10 s bis 80 s vorgesehen ist. Auf der rechten Seite sind jeweils Teilbereiche der Abbildungen links dargestellt. Sie zeigen dagegen das Verhalten der Keramikglühkerze im hochfrequenten Bereich. Wie dort ersichtlich, trägt das resultierende Temperatursignal (oder Widerstandssignal) der KGK die Information von der sich zyklisch ändernden Brennraumtemperatur mit sich. Der Peak, der den signifikanten Spitzenwert eines Messsignals innerhalb eines Verbrennungszyklus bezeichnet, wird zur Ermittlung der Drehzahl verwendet, da die Zeitdauer zwischen zwei Peaks der Umdrehungsdauer entspricht.

Anstatt eine Aussage über die eindeutige Ursache-Wechselwirkung zu treffen, reicht es für die Drehzahl schätzung aus, wenn die deutlich erkennbare Ähnlichkeit zwischen der Umgebungstemperatur T_U , also Brennraumtemperatur, und der Kerzenspannung U_{KGK} nachgewiesen wird. Beide Signale liegen als diskrete Zeitsignale vor.

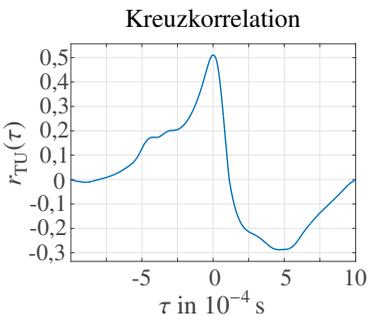


Abbildung 6.21 Normierte Kreuzkorrelation r_{TU} , welche als Funktion der Zeitdifferenz dargestellt wird.

In Abbildung 6.21 ist die Kreuzkorrelation zwischen der Eingangsgröße Brennraumtemperatur und der Ausgangsgröße Kerzenspannung zu sehen. Es ist offensichtlich, dass der aussagekräftige Zusammenhang beider Signale mit dem Korrelationskoeffizienten von 0,52 die Bestimmung der Drehzahl aus der Kerzenspannung möglich macht. Ausgehend von diesem – im Großen und Ganzen – positiven Ergebnis wird im Folgenden schrittweise das Verfahren zur Drehzahlbestimmung erläutert.

6.2.3 Vorgehensweise

Schritt 1: Anhand eines Bandpassfilters wird das Sensorsignal sowohl von den niederfrequenten Temperatureinflüssen als auch von den unerwünschten stochastischen Signalanteilen (Rauschanteilen) weitestgehend befreit. Der niederfrequente Anteil wird – wie bereits erläutert – hauptsächlich einerseits vom Eingangsstrom I_A und andererseits von der auf die KGK-Kappe einwir-

kenden stationären Brennraumtemperatur herbeigeführt. Der hochfrequente Effekt entsteht dagegen als Folge von Störquellen und des periodischen Arbeitszyklus, d. h. die Temperaturschwankungen machen sich in Form marginaler Spannungsänderungen sichtbar. Das Unterdrücken der entbehrlichen Signalanteile führt schließlich dazu, dass die arbeitszyklusabhängigen Änderungen des Spannungssignals übrig bleiben. Dieses Signal ist letztendlich lokal mittelwertfrei.

Die Zeit-Frequenz-Darstellung des gefilterten Messsignals ist in Abbildung 6.22 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Messsignal (Kerzenspannung) die Drehzahlinformation (Abb. 6.22 oben), welche über Temperaturänderung im Brennraum an die Kerze weitergegeben wird, erhält. Zusätzlich zu dem digitalen Filter – siehe Unterkapitel 6.1 und Gleichungen (6.4) und (6.5) – lässt sich ein analoges Filter wie in Abbildung 6.23 dimensionieren. Das Hochpassfilter dient dabei dazu, den langsamen und niederfrequenten Erhitzungstrend der Keramikglühkerze zu unterdrücken. Das Tiefpassfilter muss dagegen das hochfrequente Rauschen dämpfen. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, für die im Bereich von 800 bis 5500 min^{-1} liegende Drehzahl werden die Frequenzen im Bandbereich von $13, \bar{3}$ Hz bis $91, \bar{6}$ Hz durchgelassen.

Das in Abbildung 6.23 dargestellte Filter, welches vor allem wegen des rückwirkungsfreien Zusammenschaltens der Filterteile zum Einsatz kommt, wird wie folgt parametrisiert:

1) Hochpass: Orientiert an der großzügig gewählten Grenzfrequenz von 5 Hz und der Gleichung $f_u^7 = 1/(2\pi R_1 C_1)$ ergibt sich für $C_1 = 33 \text{ nF}$, wobei $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ vorgegeben wurde.

2) Tiefpass: Für die Tiefpassfilterung lässt sich die Sallen&Key-Schaltung einsetzen. Der Grund für die Wahl ist die niedrige Empfindlichkeit gegenüber der Bauelementtoleranzen. Die gewählte Grenzfrequenz f_o^8 ist 100 Hz. Dabei werden die Widerstände und Kondensatoren beispielsweise mit der Gleichung $f_o = 1/(2\pi \sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3})$ ermittelt. Entweder Kondensatoren oder die

⁷ untere Grenzfrequenz des Durchlassbereichs

⁸ obere Grenzfrequenz des Durchlassbereichs

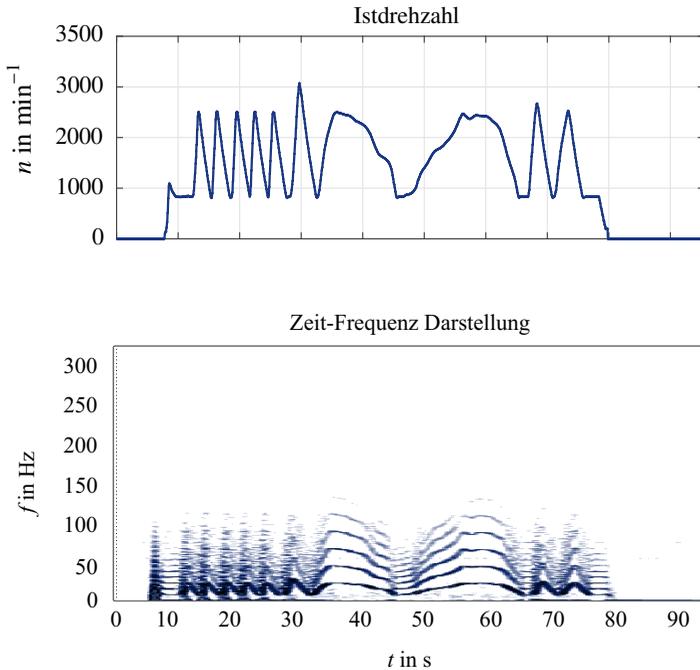


Abbildung 6.22 Istdrehzahl und die Zeit-Frequenz-Darstellung des gefilterten Sensorsignals.

Widerstände werden vorgegeben. Folgende Übertragungsfunktion beschreibt dieses Filter für die innere Verstärkung von 1:

$$G(s) = \frac{1}{1 + \underbrace{2\pi f_0 C_2 (R_2 + R_3)}_{a_1} s + \underbrace{(2\pi f_0)^2 C_2 C_3 R_2 R_3}_{a_2} s^2}, \quad (6.11)$$

wobei bei der Dimensionierung dieser Schaltung genügt, wenn

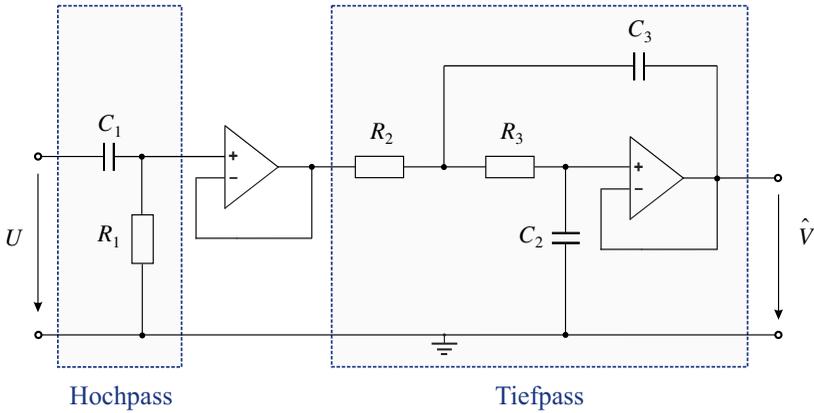


Abbildung 6.23 Struktur des analogen Bandpassfilters.

$$\frac{C_2}{C_3} \geq \frac{4a_2}{a_1} \quad (6.12)$$

erfüllt ist. Mit $R_2 = R_3 = 6 \text{ k}\Omega$ und $C_2 = 260 \text{ nF}$ ergibt sich für den zweiten Kondensator $C_3 = 270,62 \text{ nF}$. Der erste Impedanzwandler mit der Spannungsverstärkung von 1, also Spannungsfollower, sorgt dafür, dass das Hochpassfilter in dieser Reihenschaltung unbelastet und isoliert bleibt. Trotz dieser Erweiterung kann das passive CR-Filter unverändert seinen Aufgaben nachgehen. Die vom Filter verursachte Phasenverschiebung beeinflusst die Drehzahlermittlung nicht.

Abbildung 6.24 (oben rechts) illustriert ein Beispiel der Filterungsergebnisse (über 3 Zyklen).

Schritt 2: Die Entwicklung einer Taylorreihe ermöglicht, das durch die äquidistante Abtastung t_A aufgezeichnete Sensorsignal als eine analytische Funktion darzustellen. Dies ist notwendig, da solche zeitdiskrete Funktionen nicht ohne weiteres differenzierbar sind. An einem zu t_k benachbarten Zeitpunkt $t_k - t_A$ ergibt sich demnach folgende Taylorreihe:

$$f(t_k - t_A) \approx f(t_k) + (-t_A) \frac{\partial f}{\partial t_k} + \frac{(-t_A)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial t_k^2} + \dots \quad (6.13)$$

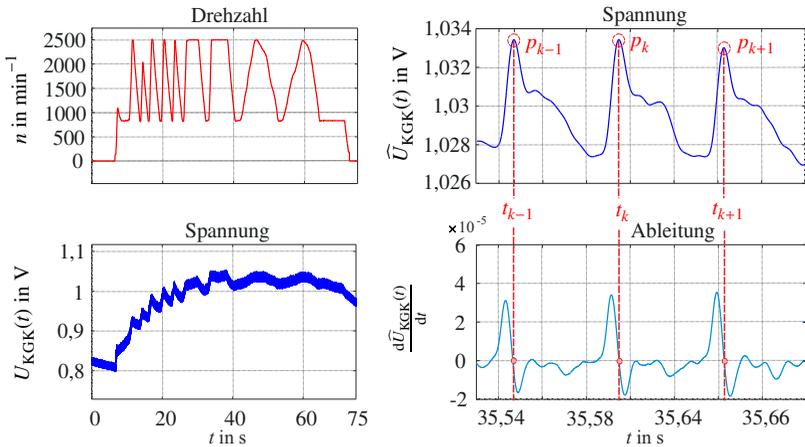


Abbildung 6.24 Signalaufnahme während des Motorbetriebs mit stark schwankender Drehzahl. Links: Extern aufgezeichnete Motordrehzahl und Spannung. Rechts: Detektion der Spannungspicks der Zyklen. Es gibt einen Peak pro Zyklus.

Durch die zeitdiskrete Differenzierung der Gleichung (nach dem ersten Glied abgebrochen) 6.13 erfolgt die Berechnung der lokalen Änderungen des Sensorsignals:

$$\frac{\partial f}{\partial t_k} \approx \frac{f(t_k) - f(t_k - t_A)}{t_A}. \quad (6.14)$$

Dieser unsymmetrische rückwärtige Differenzenquotient liefert bei Nulldurchgängen – von plus nach minus – die Peaks (Maximalwerte) des Sensorsignals, siehe Abbildung 6.24 unten rechts. Da die erste Ableitung auch weitere Nulldurchgänge besitzt, werden die gewünschten Nulldurchgänge erst nach der Überschreitung eines vordefinierten Schwellwertes ermittelt. Die Eingabe der maximal und minimal möglichen Periodendauern ist eine weitere Maßnahme, um den Suchaufwand einzuschränken. Eine weitere Hilfsgröße hierbei ist die zweite Ableitung der Sensorsignale, welche an den Stellen Extrema aufweist. Bei einer möglichen Fehldetektion – beispielsweise aufgrund einer Störung liegt der Wert nicht im akzeptablen Bereich – wird die Korrekturstrategie an-

hand der letzten 3 Perioden vorgenommen. Der falsche Wert lässt sich anhand folgender Strategie extrapolieren:

$$\widehat{n}_k = \begin{cases} \frac{(\widehat{n}_{k-1} - \widehat{n}_{k-2})}{t_A} t + \widehat{n}_{k-2} & \text{für } t_{k-3} < t_{k-2} < t_{k-1}, \\ & \forall m_i \geq 0,5 \cdot 10^6 \\ \frac{(\widehat{n}_{k-1} - \widehat{n}_{k-2})}{t_A} t + \widehat{n}_{k-2} & \text{für } \forall t_i \leq -0,5 \cdot 10^6 \\ \frac{1}{4}(\widehat{n}_{k-1} + \widehat{n}_{k-2} + \widehat{n}_{k-3} + \widehat{n}_{k-4}) & \text{sonst,} \end{cases} \quad (6.15)$$

wobei $\forall t_i (t_{k-3}, t_{k-2}, t_{k-1})$ die letzten 3 Stützpunkte des Differenzenquotienten der geschätzten Drehzahlwerte beschreibt. \widehat{n}_{k-1} , \widehat{n}_{k-2} und \widehat{n}_{k-3} entsprechen den letzten drei geschätzten Drehzahlwerten. Abgesehen von den Stützwerten des Differenzenquotienten, die zwischen $-0,5 \cdot 10^6$ und $0,5 \cdot 10^6$ liegen, muss der aktuelle Drehzahlwert \widehat{n}_k bei der Reihenfolge abfallender Stützwerten im positiven Bereich ebenfalls mithilfe des arithmetischen Mittels extrapoliert werden. Für alle anderen Fälle wird eine lineare Kurve durch die letzten 4 geschätzten Drehzahlwerte gelegt. Der Wert des aktuellen Zeitpunkts lässt sich anschließend extrapolieren. Obwohl der Differenzenquotient verschiebungsfrei ist, gibt es aufgrund der Filterung eine Verzögerungszeit τ , welche bei der Berechnung mitzubersichtigen ist.

Schritt 3: Zu guter Letzt lässt sich mittels der Nulldurchgänge die Perioden- bzw. Arbeitszyklusdauer berechnen. Die Ermittlung der Dauer für den Zyklus k^9 erfolgt durch:

$$T_k = \frac{1}{3} \sum_{j=0}^2 \left(\frac{t_{k+1-j} - t_{k-j}}{2} - \frac{t_{k-j} - t_{k-1-j}}{2} \right). \quad (6.16)$$

Die Periodendauerberechnung bleibt unverändert, selbst wenn sich der Peak zu verschiedenen Motorbetriebspunkten hin verschiebt. Dies führt lediglich zu einer Verschiebung in der Zeitachse.

⁹ Die Mittelung wird aufgrund der guten Ergebnisse sowie des niedrigen Aufwandes über 4 Zyklen durchgeführt und könnte genauso gut über mehrere Zyklen durchgeführt werden.

6.2.4 Diskussion der Messdaten

Eine Reihe von Messungen wurden mit einer Abtastfrequenz von 40 kHz an einem Versuchsfahrzeug durchgeführt, um die Qualität der Methode zur Ermittlung der Drehzahl zu untersuchen. Ein Beispiel der Messergebnisse ist in Abbildung 6.24 dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass eine Veränderung der Motorbetriebspunkte durch Drehzahlvariation nicht nur Effekte im niederfrequenten Bereich (langsame Spannungsänderung, unten links), sondern auch im gewünschten hochfrequenten Bereich (oben rechts) aufweist. In einem kleinen Zeitintervall betrachtet ergibt sich ein ähnliches Kleinsignalverhalten wie in Abbildung 6.20. Die Keramikglühkerze wird als Heizelement mit niedrigen

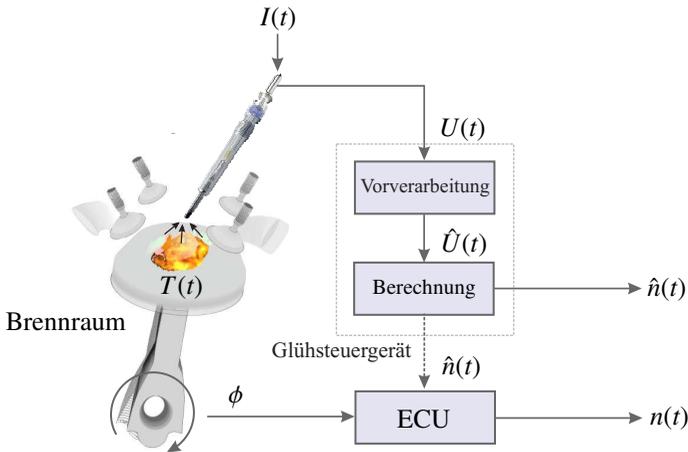


Abbildung 6.25 Struktur der Methode zur Drehzahlbestimmung.

Taktfrequenzen (z. B. ≈ 30 Hz) gesteuert. Um welchen Betrag die Abtastfrequenz erhöht werden muss, wird im nächsten Schritt analysiert.

Abtastung: Die Abtastzeit des Systems muss laut Shannon [82] größer als das Doppelte der im System vorkommenden Frequenz sein. Es gilt

$$f_A > 2 \cdot f_g, \quad (6.17)$$

wobei f_g die größte im Signal auftretende Frequenz darstellt [54]. Für einen konventionellen Dieselmotor, dessen Drehzahl sich normalerweise zwischen

800 und 5500 min^{-1} befindet, liegen die entsprechenden Abtastfrequenzen zwischen $13,3 \text{ Hz}$ bis $91,6 \text{ Hz}$. Es lässt sich vermuten, dass Signalanteile maxima-

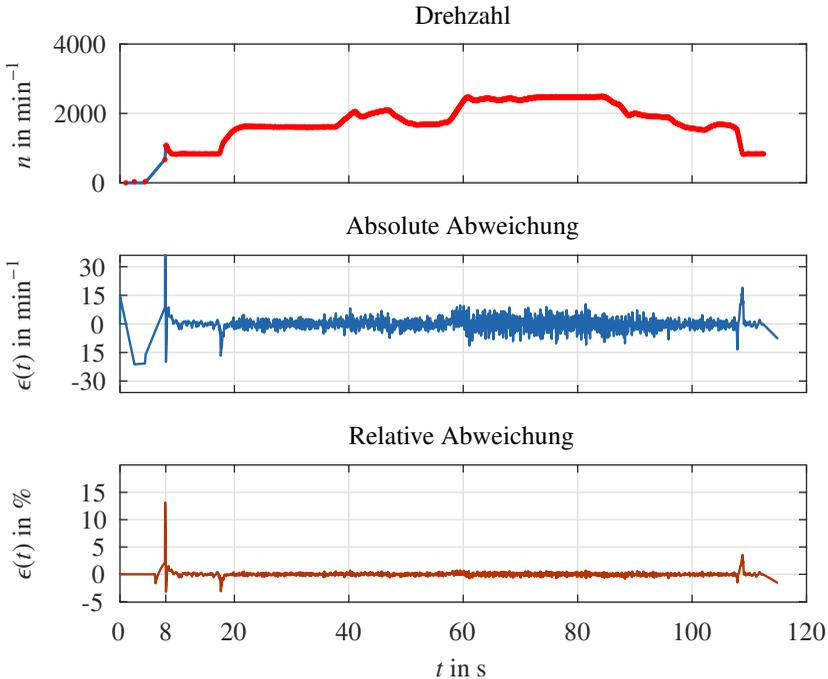


Abbildung 6.26 Vergleich der ECU-Drehzahl (—) und der berechneten Drehzahl (•). Kerze: #10 mit Messdatensatz V10. Die Motorstartzeit liegt bei 8 s.

ler Frequenz bei der höchsten Motordrehzahl vorkommen. Basierend auf einer umfangreichen Analyse von Messungen wurde die Grenzfrequenz auf 140 Hz geschätzt, siehe auch Abbildung 6.22. Eine Abtastfrequenz $f_A \geq 500 \text{ Hz}$ gewährleistet eine sichere Abdeckung des gesamten Drehzahlbereichs.

Anwendung: Durch die Anwendung der in Abschnitt Vorgehensweise vorgestellten Methode mit Gleichung (6.16) auf die Messdaten konnte das Ergebnis in Abbildung 6.28 ohne zusätzliche Korrekturingriffe erzielt werden. Der Fehler bewegt sich im niedrigen Prozentbereich. Die nachfolgenden Überlegungen beruhen auf einer Quantisierung von 5 Bits. Abbildung 6.26 illustriert die Abweichung der mit der Glühkerze ermittelten Drehzahl \hat{n} von der vom

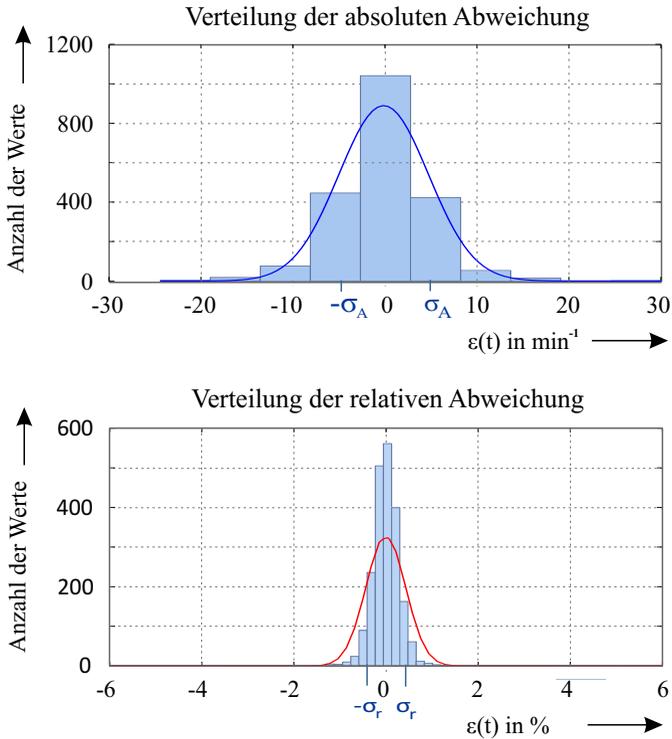


Abbildung 6.27 Abweichung der mit der Glühkerze ermittelten Drehzahl von der vom Motorsteuergerät bestimmten Drehzahl.

Motorsteuergerät bestimmten Drehzahl n . Die Werte des Motorsteuergerätes ließen sich dabei mit winkelsynchroner Drehzahlmessung induktiv ermitteln. Außerhalb der höheren Drehzahlbereiche, wo die Fehleramplitude Werte bis zu 20 min^{-1} aufweist und der Unstetigkeitsstellen, wo der Wechsel vom und zum Leerlauf stattfindet, liegen die Fehlerpeaks unter dem Wert von 4 min^{-1} . In Abbildung 6.26 wird deutlich, dass der größte Fehler bei der Aufheizphase der Keramikglühkerze (T_A) vorkommt. Dies ist insbesondere der Fall, wenn sich die Kerze im kalten Zustand befindet und der Motor mit niedriger Drehzahl läuft. Die Grafiken verdeutlichen außerdem, dass auch bei niedrigen Drehzahlen im Leerlaufbereich – nachdem der Motor gestartet wurde – eine gute

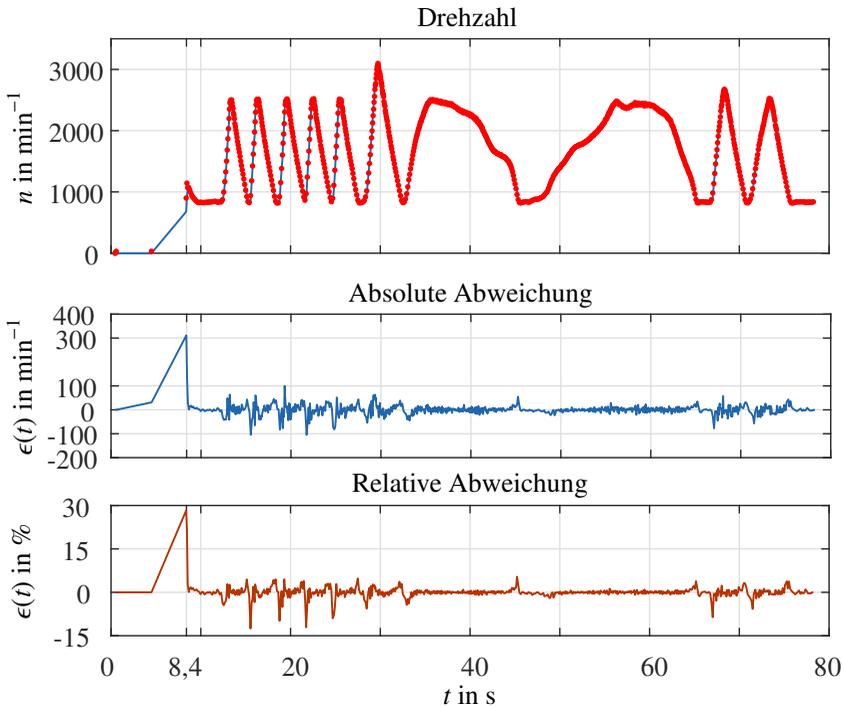


Abbildung 6.28 Vergleich der ECU-Drehzahl (—) und der berechneten Drehzahl (•). Kerze: #07 mit Messdatensatz V11 (Digital gefiltert). Die Motorstartzeit liegt bei 8,4 s.

Berechnungsqualität gegeben ist. Die Standardabweichung des relativen Fehlers liegt in allen Drehzahlbereichen unter 0,46 %, wie in Abbildung 6.27 (σ_r) ersichtlich ist.

Insbesondere an den Stellen, an denen es zu Drehzahlsprüngen kommt, ist die mögliche Fehlerspanne bei der Drehzahlbestimmung signifikant (von -20 bis 20 min^{-1}). Die angewendete Methode zur Drehzahlbestimmung erzielt mit einer Standardabweichung von $\sigma_A = 5,15 \text{ min}^{-1}$ (Abbildung 6.27) ein gutes Ergebnis.

Die Darstellung des relativen Fehlers in Abbildung 6.27 ($\sigma_r = 0,46 \%$) unterstreicht das positive Ergebnis. Um mögliche Auswirkungen der Kerzenwiderstandstreuung zu berücksichtigen, wurde diese Methode ebenfalls mit verschie-

denen Kerzendaten durchgeführt.

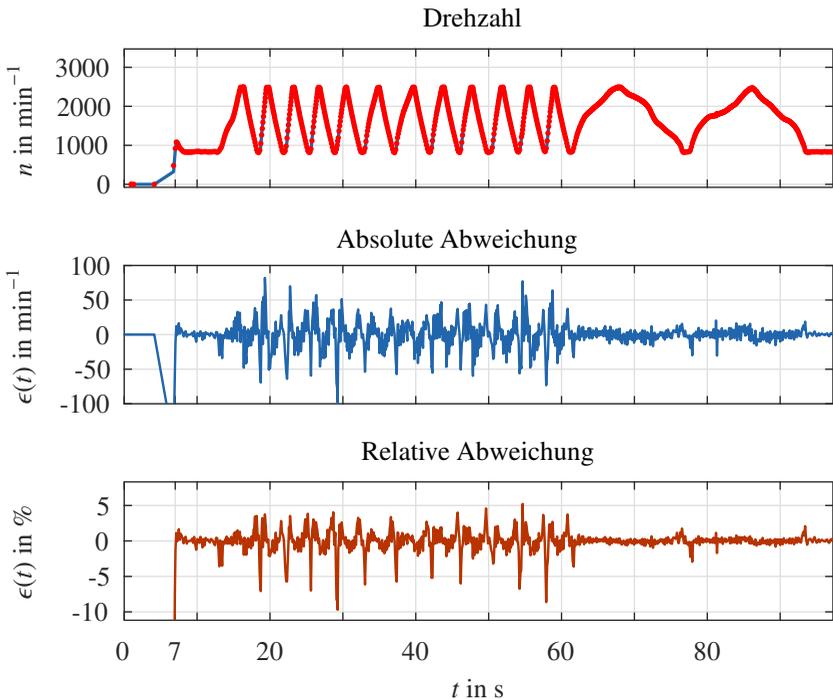


Abbildung 6.29 Vergleich der ECU-Drehzahl (—) und der berechneten Drehzahl (•). Kerze: #07, Messung: V11 (Analog gefiltert). Die Motorstartzeit liegt bei 7 s.

In Abbildung 6.28 wird ein anderes Ergebnis mit einer anderen Kerze im selben Fahrzeug illustriert, wobei dieses Mal die Drehzahländerungen nicht gewöhnlich sind. Damit ist gemeint, dass solche Drehzahländerungen innerhalb kürzester Zeit während der normalen Fahrt nicht zu erwarten sind. Nichtsdestotrotz entstehen an den Unstetigkeitsstellen – wo große Drehzahlsprünge zu sehen sind – größere Fehleramplituden. Es kommen absolute Abweichungsamplituden bis zu 4,40 % vor. Mit einer Standardabweichung von etwa $13,21 \text{ min}^{-1}$ (relativ 1,06 %) bleibt das Ergebnis vergleichbar gut.

In Abbildung 6.29 wird ein anderes Ergebnis mit einer anderen Kerze im selben Fahrzeug zur Verifizierung illustriert, wobei das Sensorsignal $U(t)$ bei der Messung mit dem Analogfilter 6.23 aufbereitet wurde. Die Drehzahländerun-

gen in diesem Fahrzeug entsprechen nicht einem gewöhnlichen Fahrverhalten. Es fällt dabei auf, dass das Ergebnis trotz der neuen Kerze und Filterung ein ähnliches Verhalten aufweist. Das heißt, an den Unstetigkeitsstellen, wo große ungewöhnliche Drehzahlsprünge zu beobachten sind, fällt die Fehleramplitude etwas größer aus. Die größte Abweichungsamplitude liegt bei 5,17 % vor. Mit einer Standardabweichung von etwa $15,24 \text{ min}^{-1}$ (relativ 1,59 %) bleibt das Ergebnis im Erwartungsbereich.

Tabelle 6.3 Vergleich der Ergebnisse. Abweichung der berechneten Drehzahl von der ECU-Drehzahl: Auswertung über die Standardabweichung σ_r (relativ), σ_A (absolut) sowie über die maximale Fehleramplitude ϵ_{Max} bei einer Messreihe.

Aufnahme			Drehzahlschätzung			
Kerze	Messstelle	Datensatz	Filterart	Auswertung		
				σ_A in min^{-1}	σ_r in %	ϵ_{Max} in %
#06	Fahrzeug	V10	Digital	4,27	0,48	2,33
#06	Fahrzeug	V11	Digital	9,75	1,11	4,23
#07	Fahrzeug	V11	Digital	13,21	1,06	4,40
#07	Fahrzeug	V11	Analog	15,24	1,59	5,17
#10	Fahrzeug	V42	Digital	4,71	0,41	3,68
#10	Fahrzeug	V47	Analog	10,71	1,09	4,98
#02	Prüfstand	V150	Digital	8,34	0,67	4,22
#02	Prüfstand	V250	Digital	7,90	0,68	4,24

In Tabelle 6.3 lassen sich die Schätzergebnisse verschiedener Messungen zusammenfassen. Die Ergebnisse der KGK #06 für den Messdatensatz V10 und #07 für den Messdatensatz V11 – sowohl mit einem analogen als auch digitalen Filter – wurden zuvor in den Abbildungen 6.26, 6.28 sowie 6.29 grafisch vorgestellt. Diese Messungen mit dem Datensatz V11 unterschieden sich von den anderen dadurch, dass sie eine unangenehme Drehzahländerung, also „gezielt harte Gradienten“ aufweisen. Diese schlagartigen Änderungen führen zu größeren Abweichungen an den Unstetigkeitsstellen. Dies bedeutet, die Fehleramplituden fallen etwas größer aus. Mit dem analogen Filter wird die Fehleramplitude sogar etwas größer. Bei den Messungen V10, V42, V150 und V250 entspricht die Drehzahländerung dagegen einem realen Fahrzyklus. Dementsprechend sind die Schätzgenauigkeiten in diesen Fällen besser, d. h. die Standardabweichung bleibt unter dem Wert von 0,70 %. Der Messdatensatz V47 weist ein

Fahrprofil zwischen V10 und V11 auf. Die Standardabweichung des relativen Fehlers liegt ungefähr bei 1,1 %. Es ist ebenfalls zu beobachten, dass die Schätzergebnisse mit den Daten vom Motorprüfstand trotz der größeren Last bis zu 150 Nm besser ausgefallen sind. Der Schätzfehler hat sich für diverse Kerzen bestätigt.

6.2.5 Fazit

In diesem Unterkapitel wurde eine neue Methode zur Ermittlung der Drehzahl basierend auf bestehender Hardware entwickelt. Hierbei wurde die Keramikglühkerze genutzt, da sie ein Teil des Antriebsstranges ist und auch auf die Drehbewegungen der Kurbelwellen sensibel reagiert. Sie ist kein konventioneller Drehzahlsensor, da die Drehzahlerfassung über die Glühkerzenspannung, die eine Antwort der Kerze auf die Temperaturänderung im Brennraum ist, geschieht. Ergebnisse mit den Messdaten zeigen, dass das vorgestellte Verfahren in der Lage ist, die Drehzahl sowie Zyklusdauer mit einer Standardabweichung des relativen Fehlers kleiner als 1,6 %¹⁰ zu bestimmen. Das Zwischenergebnis [116] stellt dagegen eine vereinfachte Methode dar, die sich vor allem in Bezug auf den Prozessablauf, die Anzahl der verwendeten Berechnungsperioden, die Korrekturstrategie sowie die angewandte Filtermethode von dieser Herangehensweise unterscheidet.

Zudem fällt hierbei auf, dass niedrige Drehzahlen (ohne Berücksichtigung des Kaltstartverhaltens der KGK) im Vergleich zu hohen Drehzahlen präziser bestimmbar sind. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass eventuelle Kerzenstreuungen das Ergebnis nicht signifikant beeinflussen. Die Drehzahl wird in drei Schritten ermittelt: Zunächst erfolgt eine Filterung des Messsignals, dann werden die Zyklusgrenzen durch den Differenzenquotienten bestimmt und schließlich findet die Drehzahlberechnung sowie die Korrektur potenziell fehlerhafter Drehzahlwerte statt.

¹⁰ Beispielsweise liefert der in [111] vorgestellte Algorithmus, welcher auf Basis der Grundfrequenz des Vibrationssignals die Motordrehzahl ermittelt, eine Fehlerrate bis zu 1 %. Der untersuchte Drehzahlbereich liegt allerdings zwischen 800 min^{-1} und 2500 min^{-1} . Lin und Ding [65] erreichen mit ihrem vergleichbaren Ansatz ähnliche Fehlerraten. Solche Verfahren sind jedoch aufgrund der Vibrationssignale im Fahrzeug störanfälliger. Verglichen mit den konventionellen Sensoren (Genauigkeit unter 2 %) steht der Nutzung der in dieser Arbeit vorgestellten Methode mit Zusatzhardware (Analogfilter) oder ohne Zusatzhardware (Digitalfilter) nichts entgegen.

6.3 Methode zur Schätzung der Brennraumtemperatur

Wie bereits in den letzten Unterkapiteln 6.1 und 6.2 vorgeführt, bedienen sich beide Methoden zur Ermittlung der Größen Drehzahl und Einspritzzeitpunkte lediglich der temperaturbedingten Änderung des Kerzenwiderstandes. Somit stellt sich die Frage, inwiefern sich die Temperatur in unmittelbarer Umgebung der Keramikglühkerze anhand des Kerzenwiderstandes eruieren lässt. Gemeint ist damit vor allem die Brennraumtemperatur T_U , die an der Kappe ihren Einfluss zeigt, wie es in Abbildung 6.30 dargestellt ist.

Dieses Kapitel befasst sich mit der Ermittlung der Brennraumtemperatur, wobei die Untersuchung auf dem thermisch-elektrischen Zusammenhang basiert. Vor allem werden Antworten auf die Frage „Wie genau kann die Temperatur mit Hilfe von KGK bestimmt werden?“ aufgezeigt. Bei den Untersuchungen des Messsignals wird gezeigt, dass die Methode in einem Frequenzbereich, wo die thermischen Änderungen im Brennraum pro Arbeitsspiel in dem Messsignal zu erkennen sind, eine qualitative Ermittlung der Brennraumtemperatur ermöglicht.

Die Temperaturbestimmung ohne Zusatzhardware stellt ein neues Konzept dar und kann aufgrund der (teil-)geregelten Verbrennungskonzepte in Zukunft eine relevante Messgröße werden.

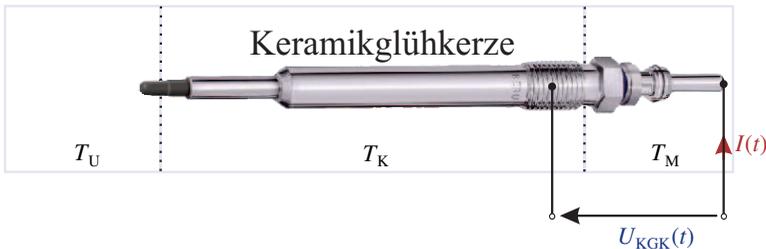


Abbildung 6.30 Temperaturbereiche angrenzend zur KGK: T_U : Brennraumtemperatur, T_K : Temperatur der Brennraumwand, T_M : Temperatur im Motorraum, $I(t)$: Anregungsstrom und $U_{KGK}(t)$: Kerzenspannung.

6.3.1 Einfluss der Temperatur auf den Widerstand

Neben dem Brennraumdruck trägt die Brennraumtemperatur wesentliche Informationen über den aktuellen und zyklischen Verbrennungsprozess mit sich. Abhängig von den Kombinationen der Eingangsgrößen, die als Motorbetriebspunkte definiert werden können, entstehen die Brennraumtemperatur und der Brennraumdruck als Prozessantwort. Die im Treibstoff gespeicherte Energie wird mit Hilfe dieser Größen in die mechanische Energie umgewandelt, d. h. die Antriebswelle fängt an sich zu drehen. Der Wirkungsgrad dieser Transformation liegt bei etwa 50 %. Diesem gesteuerten System stehen üblicherweise keine dieser Prozessantwortgrößen als Messgröße zur Verfügung.

Wie bereits erwähnt, soll die Brennraumtemperatur durch Nutzung der serienmäßig eingebauten Keramikglühkerze fortlaufend ermittelt werden. Dabei ist die Reaktion des Kerzenwiderstandes auf die Umgebungstemperatur äußerst relevant. Eingeschränkt auf die Brennraumtemperatur sind in Abbildung 6.31 die relevanten Größen vereinfacht dargestellt.

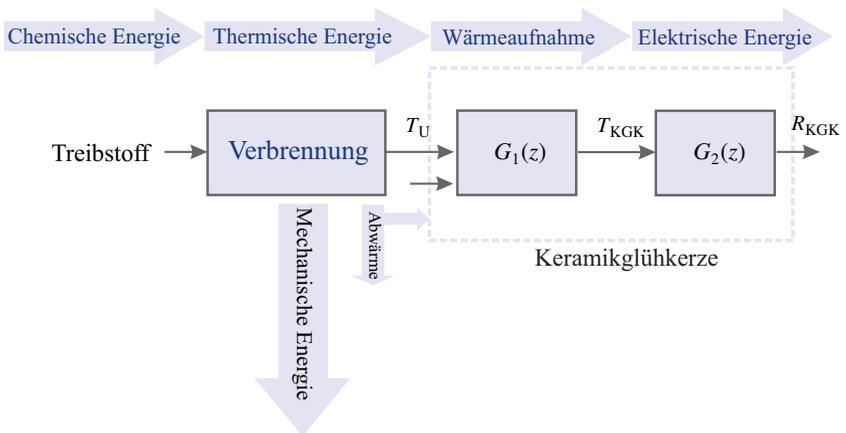


Abbildung 6.31 Vereinfachte Wirkungsweise relevanter Größen auf Ebene der Brennraumtemperatur. T_U : Brennraumtemperatur, $T_{K GK}$: Kerzentemperatur und $R_{K GK}$: Kerzenwiderstand.

Wie in Abbildung 6.31 skizziert, lässt sich die Energie während des Verbrennungsprozesses umwandeln. Ein Teil der Wärme wird von der Keramikglühkerze

ze absorbiert. Analog zum Wandwärmestrom Q_W kann der Kerzenwärmestrom Q_{KGK} bezogen auf den Kurbelwinkel wie folgt angegeben werden:

$$\frac{d Q_{KGK}}{d \varphi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \alpha \cdot A \cdot (T_U - T_{KGK}), \quad (6.18)$$

wobei n die Drehzahl, A die Kappenoberfläche (siehe Unterkapitel 3.3) und α den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten darstellt. Die Kerzentemperatur T_{KGK} ist am Anfang jeder Messung etwas höher als die Brennraumwandtemperatur (300 – 400 K), da der Anregungsstrom zu einer zusätzlichen Wärmeleistung in der KGK führt, siehe Kapitel 5.1.1. Während des Kerzenbetriebs als Sensor wird allerdings die Stromstärke (ein Wert ≤ 2 A) konstant gehalten, um den Einfluss gering zu halten. Entsprechend der thermischen Systemträgheit stellt sich schließlich eine Wärmeleistung (Kerzentemperatur) ein. Das heißt, dieser Vorgang wird dazu führen, dass sich die Kerze abhängig von den keramischen Eigenschaften verzögert erwärmt (Kapitel 3). Somit stellt die Keramikglühkerze eine Wärmesenke dar. Synchron bewirkt dies entsprechend der Erwärmung eine Änderung des Kerzenwiderstandes.

6.3.2 Lineare Systembetrachtung mit Modellvereinfachungen

Der logische Zusammenhang in Gleichung (6.18), der eine pragmatische und strukturelle Verhaltensbeschreibung ermöglichen soll, wurde mit dem zuvor vorgestellten rechenaufwändigen CFD-Modell und Messdaten (Kapitel 5) aufgezeigt. Hierbei geht es viel mehr darum, neue Verfahren zu integrieren, die die Temperaturschätzung zweckgebunden für die Echtzeitberechnungen ermöglichen.

Eingeschränkt auf die Keramikglühkerze (gestrichelter Bereich in Abbildung 6.31 und 6.30) können die Ein- und Ausgangsgrößen des Systems festgelegt werden. Anhand eines vereinfachten Signalflussplans (Abbildung 6.32) lässt sich dessen Verknüpfung anschaulich darstellen.

Unter weiteren Größen sind die ECU-Größen zu verstehen, welche fortlaufend gemessen werden und einen direkten Einfluss auf die Außentemperatur – somit einen indirekten auf die KGK-Temperatur – aufweisen. Die im Offlinebetrieb messbare Kerzentemperatur steht im Onlinebetrieb nicht zur

Verfügung und der Kerzenwiderstand wird aus den messbaren Größen Strom und Spannung berechnet.

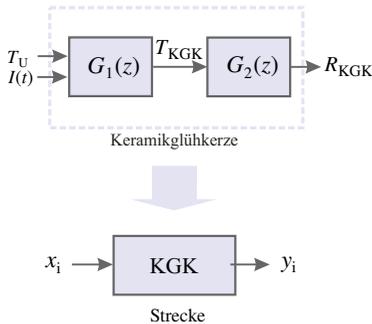


Abbildung 6.32 Vereinfachte Strecke. x_i : Eingangsgrößen, y_i : Ausgangsgrößen.

Weiterhin ist aus den vorherigen Kapiteln bekannt, dass das Sensorsignal (Ausgangssignal des Modells) nur von den aktuellen und vergangenen Werten der Einflussgrößen abhängt, d. h. **kausal** ist. Andererseits weist die KGK – in Kapitel 5.2.2 ersichtlich – ein **nichtlineares Verhalten** auf. Die Systemeigenschaft **Zeitinvarianz** gilt bei diesem Echtzeitsystem ebenfalls, da sich seine Systemparameter mit der Zeit nicht ändern (Annahme). Ausgehend von diesen Erkenntnissen ist klar, dass das zu entwickelnde Verfahren die unbekannte Eingangsgröße T_U mit Hilfe der fortlaufend messbaren Größen ermitteln soll. Um den daraus entstehenden Schätzaufwand zu reduzieren, wird das Modell nicht der Strecke, sondern der invertierten Strecke entsprechen, sodass das Sensorsignal R_{KGK} als Eingangsgröße und die zu bestimmende Größe T_U als Ausgangsgröße wirken. Die Basislogik ist in Abbildung 6.33 vereinfacht für die zwei Größen dargestellt.

Zur Bestimmung beider Modelle können mehrere Einflussgrößen herangezogen werden. Durch das quadratische Minimieren der Widerstandsabweichung wird das KGK-Modell geschätzt. Das inverse Modell muss dagegen die Temperaturabweichung als Optimierungsmaß annehmen. Im Falle einer linearen Modellierung geschieht das Invertieren deutlich einfacher als bei einem nichtlinearen Modellieren. Ausgehend von der bestehenden Wärmeleitung in der Keramikglühkerze wird angenommen, dass alle Scheiben (siehe Kap. 3) den gleichen Wärmewiderstand R_{th} aufweisen. Die Wärmeaufnahme

Die Eingangsgrößen x_i dieses Systems sind

- Außentemperaturen: T_U , T_K und T_M
- Strom $I(t)$
- weitere Größen

und die Ausgangsgröße y_i

- Kerzenwiderstand: R_{KGK}

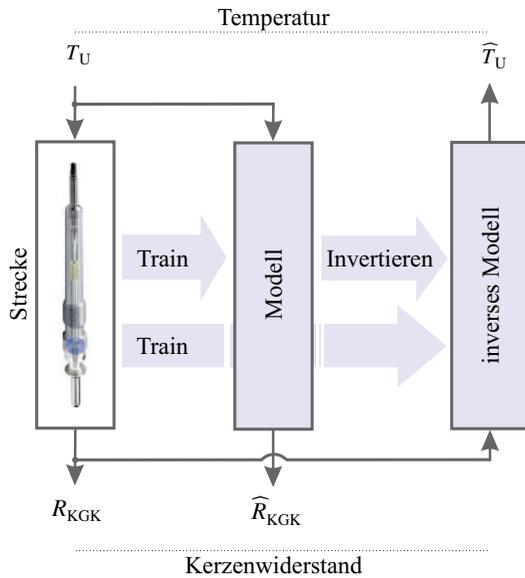


Abbildung 6.33 Basislogik der Ein- und Ausgangsgröße für 2 Modelle.

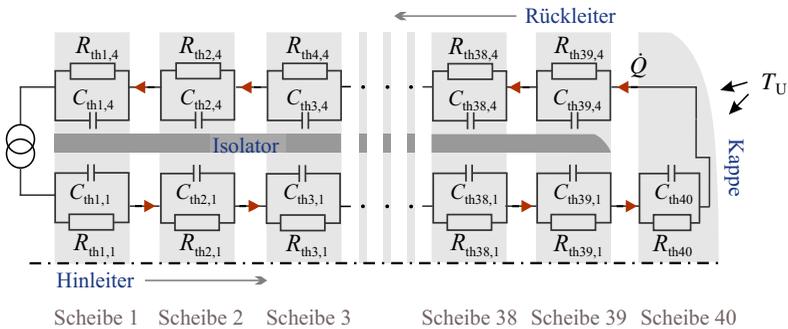


Abbildung 6.34 Wegen der Rotationssymmetrie: Thermische Betrachtung von einer Hälfte des Längsschnitts eines keramischen Glühstifts. \dot{Q} : Wärmestrom, T_U : Brennraumtemperatur. Indizes: 1. Nummer: Scheibennummer, 2. Nummer: Zylinder Nummer von innen nach außen.

geschieht dagegen in Abhängigkeit der Wärmekapazität C_{th} zeitverzögert. Diese Verzögerung (Zeitkonstante) beträgt $\tau = R_{th} \cdot C_{th}$. In Abbildung 6.34 ist

das thermische Ersatzschaltbild der Keramikglühkerze zu sehen, womit sich die Wärmeleitung berechnen lässt.

Die Betrachtung der KGK wird im ersten Schritt stark vereinfacht. Das heißt, es wird angenommen, dass die drei leitenden Bereiche (Hinleiter, Rückleiter und Kappe) sowie Isolator (dunkelgrauer Bereich) identische und homogene Mischverhältnisse (Kapitel 3) aufweisen. Die thermische Betrachtung der KGK, wie in Abbildung 6.34 zu sehen ist, wird auf die wie in Abbildung 6.35 dargestellte Schaltung reduziert. Mit Hilfe der thermischen Betrachtung beträgt die gewünschte Wärmemenge

$$Q = C_{\text{thKGK}} \cdot T_{\text{KGK}} \quad (6.19)$$

und der Wärmestrom

$$\dot{Q} = \frac{T_U - T_{\text{KGK}}}{R_{\text{thKGK}}} = C_{\text{thKGK}} \cdot \frac{dT_{\text{KGK}}}{dt} \quad (6.20)$$

umgeformt

$$T_U = T_{\text{KGK}} + (R_{\text{thKGK}} \cdot C_{\text{thKGK}}) \cdot \dot{T}_{\text{KGK}}, \quad (6.21)$$

wobei die Temperatur T_{KGK} der Kerzentemperatur entspricht. Die in (6.21) dargestellte Differentialgleichung 1. Ordnung im Zeitbereich kann schließlich durch Einsetzen der Zeitkonstante in die Form

$$T_U = T_{\text{KGK}} + \tau \cdot \dot{T}_{\text{KGK}} \quad (6.22)$$

überführt werden und die anschließende Transformation in den Bildbereich durch (6.23)

$$\tau \cdot \dot{T}_{\text{KGK}} + T_{\text{KGK}} = T_U \quad \Leftrightarrow \quad \tau \cdot T_{\text{KGK}}(s) \cdot s + T_{\text{KGK}}(s) = T_U(s) \quad (6.23)$$

angegeben werden. Da die Sprungantwort dieser Differentialgleichung einer Exponentialfunktion entspricht, wird sich T_{KGK} asymptotisch dem Endwert von T_U annähern. Die Übertragungsfunktion lautet damit:

$$G(s) = \frac{T_{\text{KGK}}(s)}{T_U(s)} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}. \quad (6.24)$$

Es handelt sich dabei um ein PT_1 -Übertragungsglied, welches eine inverse Betrachtung möglich macht und für ein Grundverständnis gut geeignet ist.

Um das thermische Verhalten der Keramikglühkerze modellierungstechnisch besser wiederzugeben, wird sie in 4 Bereiche aufgeteilt (Hinleiter, Rückleiter, Kappe sowie Isolator). Die Wärmegeleichungen zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens erhalten der Übersichtlichkeit halber die gleiche Nummerierung wie die Wärmebereiche, die in Abbildung 6.36 illustriert sind.

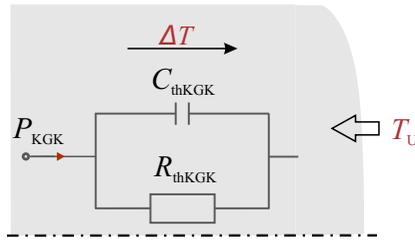


Abbildung 6.35 Ersatzschaltbild der Kerze für eine homogene Mischung. P_{KGK} : Wärmeleistung.

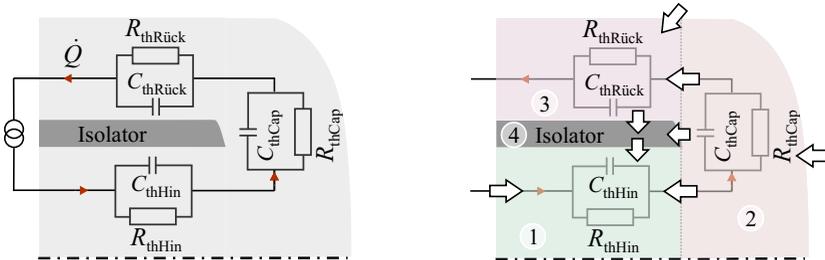


Abbildung 6.36 Wärmeströme in der Keramikglühkerze. Vier Bereiche: Hinleiter (1), Kappe (2), Rückleiter (3) und Isolator (4). Aus Symmetriegründen auf eine Teihälfte des Längsschnitts reduziert. Wärmeübergänge mit Pfeilen markiert.

Unter Vernachlässigung des Anregungsstroms (also Wärmeentstehung) kann mit Hilfe der Wärmestromgleichungen (das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung) für das Ersatzschaltbild (vgl. Abbildung 6.36) folgende Gleichungen aufgestellt werden.

▪ **Hinleiter**

Mit

$$V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = A_1 \cdot \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) + A_{14} \cdot \alpha_4 \cdot (T_4 - T_1) \quad (6.25)$$

entsteht umgeformt:

$$V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot \dot{T}_1 = -(A_1 \cdot \alpha_1 + A_{14} \cdot \alpha_4) \cdot T_1 + A_1 \cdot \alpha_1 \cdot T_2 + A_{14} \cdot \alpha_4 \cdot T_4 \quad (6.26)$$

■ Kappe

Mit

$$V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = A_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_U - T_2) - A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - A_1 \cdot \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) - A_{14} \cdot \alpha_4 \cdot (T_2 - T_4) \quad (6.27)$$

entsteht umgeformt:

$$V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2 \cdot \dot{T}_2 = A_1 \cdot \alpha_1 \cdot T_1 - (A_2 \cdot \alpha_2 + A_{23} \cdot \alpha_3 + A_1 \cdot \alpha_1 + A_{14} \cdot \alpha_4) \cdot T_2 + A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot T_3 + A_{14} \cdot \alpha_4 \cdot T_4 + A_2 \cdot \alpha_2 \cdot T_U \quad (6.28)$$

■ Rückleiter

Mit

$$V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = A_3 \cdot \alpha_3 \cdot (T_U - T_3) + A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - A_{34} \cdot \alpha_4 \cdot (T_3 - T_4) \quad (6.29)$$

entsteht umgeformt:

$$V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3 \cdot \dot{T}_3 = A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot T_2 - (A_3 \cdot \alpha_3 + A_{23} \cdot \alpha_3 + A_{34} \cdot \alpha_4) \cdot T_3 + A_{34} \cdot \alpha_4 \cdot T_4 + A_3 \cdot \alpha_3 \cdot T_U \quad (6.30)$$

■ Isolator

Mit

$$V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4 \cdot \frac{dT_4}{dt} = A_{34} \cdot \alpha_3 \cdot (T_3 - T_4) + A_{24} \cdot \alpha_2 \cdot (T_2 - T_4) - A_{14} \cdot \alpha_1 \cdot (T_4 - T_1) \quad (6.31)$$

entsteht umgeformt:

$$V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4 \cdot \dot{T}_4 = A_{14} \cdot \alpha_1 \cdot T_1 + A_{24} \cdot \alpha_2 \cdot T_2 + A_{34} \cdot \alpha_3 \cdot T_3 - (A_{34} \cdot \alpha_3 + A_{24} \cdot \alpha_2 + A_{14} \cdot \alpha_1) \cdot T_4. \quad (6.32)$$

Die Wärmeübergangskoeffizienten α_j in den obigen Gleichungen lassen sich im Falle einer Wärmeleitung (keine Konvektion) im Festkörper mit der Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Stoffe ersetzen. In Abbildung 5.3 sind die temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeitskurven zu sehen. Dabei stehen die Kontaktstellen für die Umrechnung mit folgenden Annahmen fest:

- **Grenzschicht zwischen der Kappe und dem Isolator (A_{24} oder A_{42}):** eine dünne Scheibe mit der Dicke d_{24} und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{24}(T)$. Für die Wärmeleitfähigkeit gilt:
 $\lambda_{24}(T) = \frac{1}{2} \cdot [\lambda_2(T) + \lambda_4(T)]$.
- **Grenzschicht zwischen der Kappe und dem Hinleiter (A_{12} oder A_{21}):** eine dünne Scheibe mit der Dicke d_{12} und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{12}(T)$. Für die Wärmeleitfähigkeit gilt:
 $\lambda_{12}(T) = \frac{1}{2} \cdot [\lambda_1(T) + \lambda_2(T)]$.
- **Grenzschicht zwischen der Kappe und dem Rückleiter (A_{32} oder A_{23}):** eine dünne Scheibe mit der Dicke d_{23} und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{23}(T)$. Für die Wärmeleitfähigkeit gilt:
 $\lambda_{23}(T) = \frac{1}{2} \cdot [\lambda_2(T) + \lambda_3(T)]$.

Der Übersicht halber werden die Koeffizienten der Gleichungen (6.26), (6.28), (6.30) und (6.32) zusammengefasst. Damit ergeben sich die Gleichungen

$$\dot{T}_1 = -\xi_{11} \cdot T_1 + \xi_{12} \cdot T_2 + \xi_{14} \cdot T_4, \quad (6.33)$$

$$\dot{T}_2 = +\xi_{21} \cdot T_1 - \xi_{22} \cdot T_2 + \xi_{23} \cdot T_3 + \xi_{24} \cdot T_4 + \beta_2 \cdot T_U, \quad (6.34)$$

$$\dot{T}_3 = +\xi_{32} \cdot T_2 - \xi_{33} \cdot T_3 + \xi_{34} \cdot T_4 + \beta_3 \cdot T_U, \quad (6.35)$$

sowie

$$\dot{T}_4 = +\xi_{41} \cdot T_1 + \xi_{42} \cdot T_2 + \xi_{43} \cdot T_3 - \xi_{44} \cdot T_4 \quad (6.36)$$

mit den Koeffizienten

$$\xi_{11} = -\frac{(A_1 \cdot \alpha_1 + A_{14} \cdot \alpha_4)}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = -\frac{(A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}} + 2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\lambda_{14}}{d_{14}})}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1},$$

$$\xi_{12} = \frac{A_1 \cdot \alpha_1}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = \frac{A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}}}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1},$$

$$\xi_{14} = \frac{A_{14} \cdot \alpha_4}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = \frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\lambda_{14}}{d_{14}}}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1}, \quad (6.37)$$

$$\xi_{21} = \frac{A_1 \cdot \alpha_1}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} = \frac{A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}}}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2},$$

$$\xi_{22} = -\frac{(A_2 \cdot \alpha_2 + A_{23} \cdot \alpha_3 + A_1 \cdot \alpha_1 + A_{14} \cdot \alpha_4)}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}$$

$$= -\frac{(A_2 \cdot \alpha_2 + A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}} + A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}} + 2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\lambda_{14}}{d_{14}})}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2},$$

$$\xi_{23} = \frac{A_{23} \cdot \alpha_3}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} = \frac{A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}}}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2},$$

$$\xi_{24} = \frac{A_{14} \cdot \alpha_4}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} = \frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\lambda_{14}}{d_{14}}}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}, \quad (6.38)$$

$$\xi_{32} = \frac{A_{23} \cdot \alpha_3}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3} = \frac{A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}}}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3},$$

$$\xi_{33} = -\frac{(A_3 \cdot \alpha_3 + A_{23} \cdot \alpha_3 + A_{34} \cdot \alpha_4)}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3}$$

$$= -\frac{(A_3 \cdot \alpha_3 + A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}} + 2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_4)}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3},$$

$$\xi_{34} = \frac{A_{34} \cdot \alpha_4}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3} = \frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\lambda_{34}}{d_{34}}}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3}, \quad (6.39)$$

$$\xi_{41} = \frac{A_{14} \cdot \alpha_1}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4} = \frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_1}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4},$$

$$\xi_{42} = \frac{A_{24} \cdot \alpha_2}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (r_1^2 - r_i^2) \cdot \alpha_2}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4},$$

$$\xi_{43} = \frac{A_{34} \cdot \alpha_3}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4} = \frac{2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_3}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4},$$

$$\xi_{44} = - \frac{(A_{34} \cdot \alpha_3 + A_{24} \cdot \alpha_2 + A_{14} \cdot \alpha_1)}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4}$$

$$= - \frac{(2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_3 + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (r_1^2 - r_i^2) \cdot \frac{\lambda_{24}}{d_{24}} + 2 \cdot r_1 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_1)}{V_4 \cdot \rho_4 \cdot C_4}, \quad (6.40)$$

$$\beta_2 = \frac{A_2 \cdot \alpha_2}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}$$

und

$$\beta_3 = \frac{A_3 \cdot \alpha_3}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3}, \quad (6.41)$$

wobei α_4 den Isolator-Wärmeübergangskoeffizienten, α_2 den Wärmeübergangskoeffizienten vom Gas in die Kappe und α_3 den Wärmeübergangskoeffizienten vom Gas in den Rückleiter beschreibt. Im Falle einer Betrachtung der Strömung im Brennraum müssen α_2 und α_3 durch Einsetzen eines bestehenden Ansatzes, wie etwa nach Hohenberg [44] oder Woschni [110], ermittelt werden.

Die obigen Koeffizienten sind wegen $\alpha_j = \alpha_j(T_j)$, $\rho_j = \rho_j(T_j)$ und $C_j = C_j(T_j)$ mit $j = 1, 2, 3$ in der Realität nicht konstant. In Abbildung 3.7 und 3.8 sind die Koeffizienten in Abhängigkeit der Temperatur zu sehen. In einem Betriebspunkt ermöglichen sie allerdings eine vereinfachte lineare Betrachtung des Keramikglühkerzenmodells:

$$\dot{\underline{x}} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\xi_{11} & \xi_{12} & 0 & \xi_{14} \\ \xi_{21} & -\xi_{22} & \xi_{23} & \xi_{24} \\ 0 & \xi_{32} & -\xi_{33} & \xi_{34} \\ \xi_{41} & \xi_{42} & \xi_{43} & -\xi_{44} \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underline{x} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\underline{b}} \cdot T_U. \quad (6.42)$$

Eine Zustandsraumdarstellung höherer Ordnung (Beispielsweise 15. Ordnung) könnte die Kerze genauer wiedergeben. Eine mathematische Modellierung erfordert jedoch eine genaue Abbildung der Wärmeübergänge. Die hierzu erstellten Arbeiten, also die gebräuchlichsten Ansätze, wie etwa Woschni, Hohenberg und Bargende zeigen, dass die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten komplexe Differenzialgleichungen mit nicht konkret bekannten und abhängigen Parametern einsetzt und zum Teil iterativ abläuft. Eine mögliche Integration in die bestehenden Motorsteuergeräten könnte dabei eine große Herausforderung werden.

Der Fokus liegt deshalb auf der Erstellung eines vereinfachten Modelles (3. oder 4. Ordnung) der Keramikglühkerze. Die Sachgründe, wie etwa die 3 leitenden Bereiche sowie Isolator mit den bereits bestehenden Messdaten der Materialeigenschaften, führten hauptsächlich zu dieser Entscheidung (Modellordnung). Das Modell 3-ter Ordnung lässt sich unter Vernachlässigung des Anregungsstroms (vgl. Abbildung 6.37) analog zu den obigen Gleichungen wie folgt aufstellen und wird anschließend bei der Schätzung der Brennraumtemperatur und des Brennraumdrucks eingesetzt. Der dunkelgrau hinterlegte Isolator (elektrisch) wird hingegen beim Wärmeübergang mitberücksichtigt.

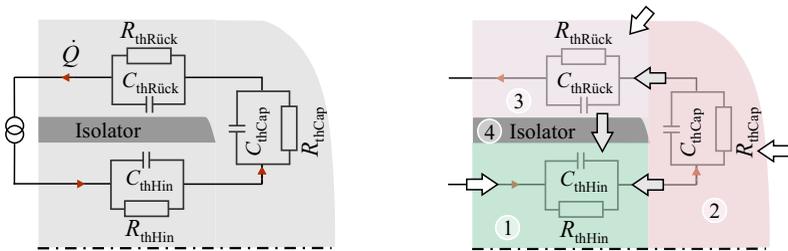


Abbildung 6.37 Wärmeströme in der Keramikglühkerze. Drei Bereiche: Hinleiter (1), Kappe (2), Rückleiter (3). Aus Symmetriegründen auf eine Teilhälfte des Längsschnitts reduziert. Wärmeströme mit Pfeilen markiert.

■ Hinleiter

Mit

$$V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = A_1 \cdot \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) + A_{13} \cdot \alpha_1 \cdot (T_3 - T_1) \quad (6.43)$$

entsteht umgeformt:

$$V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot \dot{T}_1 + (A_1 \cdot \alpha_1 + A_{13} \cdot \alpha_i) \cdot T_1 - A_1 \cdot \alpha_1 \cdot T_2 - A_{13} \cdot \alpha_i \cdot T_3 = 0. \quad (6.44)$$

▪ Kappe

Mit

$$V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = A_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_U - T_2) - A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - A_1 \cdot \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1) \quad (6.45)$$

entsteht umgeformt:

$$V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2 \cdot \dot{T}_2 - A_1 \cdot \alpha_1 \cdot T_1 + (A_2 \cdot \alpha_2 + A_{23} \cdot \alpha_3 + A_1 \cdot \alpha_1) \cdot T_2 - A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot T_3 = A_2 \cdot \alpha_2 \cdot T_U. \quad (6.46)$$

▪ Rückleiter

Mit

$$V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = A_3 \cdot \alpha_3 \cdot (T_U - T_3) - A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot (T_2 - T_3) - A_{13} \cdot \alpha_i \cdot (T_3 - T_1) \quad (6.47)$$

entsteht umgeformt:

$$V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3 \cdot \dot{T}_3 - A_{13} \cdot \alpha_i \cdot T_1 + A_{23} \cdot \alpha_3 \cdot T_2 + (A_3 \cdot \alpha_3 - A_{23} \cdot \alpha_3 + A_{13} \cdot \alpha_i) \cdot T_3 = A_3 \cdot \alpha_3 \cdot T_U. \quad (6.48)$$

Dabei stehen die Kontaktstellen – analog zum Modell 4-ter Ordnung – für die Umrechnung mit folgenden Annahmen fest:

- **Isolator:** eine zylindrische Wand mit der Länge L und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_i(T)$.
- **Grenzschicht zwischen der Kappe und dem Hinleiter (A_{12} oder A_{21}):** eine dünne Scheibe mit der Dicke d_{12} und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{12}(T)$. Für die Wärmeleitfähigkeit gilt:
 $\lambda_{12}(T) = \frac{1}{2} \cdot [\lambda_1(T) + \lambda_2(T)].$

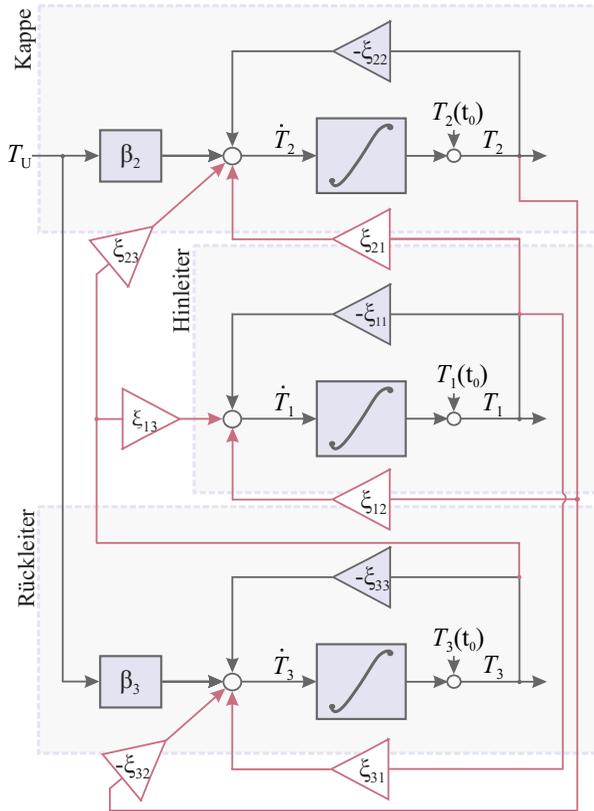


Abbildung 6.38 Vereinfachter Signalfussplan für die Wärmebewegungen in der KGG.

- Grenzschicht zwischen der Kappe und dem Rückleiter (A_{32} oder A_{23}):** eine dünne Scheibe mit der Dicke d_{23} und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{23}(T)$. Für die Wärmeleitfähigkeit gilt:

$$\lambda_{23}(T) = \frac{1}{2} \cdot [\lambda_2(T) + \lambda_3(T)].$$

Der Übersicht halber werden die Koeffizienten der Gleichungen (6.44), (6.46) und (6.48) zusammengefasst. Damit ergeben sich die Gleichungen

$$\dot{T}_1 = -\xi_{11} \cdot T_1 + \xi_{12} \cdot T_2 + \xi_{13} \cdot T_3, \quad (6.49)$$

$$\dot{T}_2 = +\xi_{21} \cdot T_1 - \xi_{22} \cdot T_2 + \xi_{23} \cdot T_3 + \beta_2 \cdot T_U \quad (6.50)$$

sowie

$$\dot{T}_3 = +\xi_{31} \cdot T_1 - \xi_{32} \cdot T_2 - \xi_{33} \cdot T_3 + \beta_3 \cdot T_U \quad (6.51)$$

mit den Koeffizienten

$$\xi_{11} = \frac{A_1 \cdot \alpha_1 + A_{13} \cdot \alpha_i}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = \frac{A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}} + \frac{2 \cdot \pi L \lambda_i}{\ln(\frac{r_i}{r_1})}}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1},$$

$$\xi_{12} = \frac{A_1 \cdot \alpha_1}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = \frac{A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}}}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1},$$

$$\xi_{13} = \frac{A_{13} \cdot \alpha_i}{V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1} = \frac{2 \cdot \pi L \lambda_i}{\ln(\frac{r_i}{r_1}) \cdot V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1}, \quad (6.52)$$

$$\xi_{21} = \frac{A_1 \cdot \alpha_1}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} = \frac{A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}}}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2},$$

$$\xi_{22} = \frac{A_2 \cdot \alpha_2 + A_{23} \cdot \alpha_3 + A_1 \cdot \alpha_1}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} = \frac{A_2 \cdot \alpha_2 + A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}} + A_1 \cdot \frac{\lambda_{12}}{d_{12}}}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2},$$

$$\xi_{23} = \frac{A_{23} \cdot \alpha_3}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} = \frac{A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}}}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}, \quad (6.53)$$

$$\xi_{31} = \frac{A_{13} \cdot \alpha_i}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3} = \frac{\frac{2 \cdot \pi L \lambda_i}{\ln(\frac{r_i}{r_1})}}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3},$$

$$\xi_{32} = \frac{A_{23} \cdot \alpha_3}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3} = \frac{A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}}}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3},$$

$$\xi_{33} = \frac{A_3 \cdot \alpha_3 - A_{23} \cdot \alpha_3 + A_{13} \cdot \alpha_i}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3} = \frac{A_3 \cdot \alpha_3 - A_{23} \cdot \frac{\lambda_{23}}{d_{23}} + \frac{2 \cdot \pi L \lambda_i}{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3},$$

$$\beta_2 = \frac{A_2 \cdot \alpha_2}{V_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2} \quad \text{und} \quad (6.54)$$

$$\beta_3 = \frac{A_3 \cdot \alpha_3}{V_3 \cdot \rho_3 \cdot C_3},$$

wobei α_i den Isolator-Wärmeübergangskoeffizienten, α_2 den Wärmeübergangskoeffizienten vom Gas in die Kappe und α_3 den Wärmeübergangskoeffizienten vom Gas in den Rückleiter beschreibt.

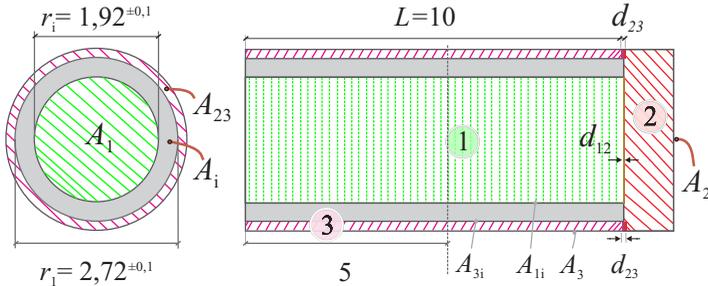


Abbildung 6.39 Ersatzbild der Kerze für eine Zustandsraumdarstellung. Maßeinheit: mm.

In einem Betriebspunkt liefern die obigen Koeffizienten mit den temperaturabhängigen Größen $\alpha_j = \alpha_j(T_j)$, $\rho_j = \rho_j(T_j)$ und $C_j = C_j(T_j)$ mit $j = 1, 2, 3$ eine vereinfachte lineare Betrachtung des Keramikglühkerzenmodells:

$$\dot{\underline{x}} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} \\ \xi_{21} & -\xi_{22} & \xi_{23} \\ \xi_{31} & -\xi_{32} & -\xi_{33} \end{pmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underline{x} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}}_{\underline{b}} \cdot T_U. \quad (6.55)$$

Der Signalflussplan dieser Interaktionen ist in Abbildung 6.38 zu sehen. Ausgehend von diesen Beziehungen lässt sich die Zustandsraumdarstellung mit

Hilfe von $\dot{x}_j = \dot{T}_j$ und $x_j = T_j$, $j = 1, 2, 3$ wie in Gleichung (6.55) wiedergeben.

Mit der Annahme, dass der temperaturabhängige Anteil am spezifischen KGK-Widerstand im Bereich von 0 bis 2000 °C linear ist, und die Eingangsgröße T_U keinen direkten Einfluss auf die Ausgangsgröße ausübt, d. h. \underline{d} gleich null ist, kann die Ausgangsgleichung $\underline{y} = R_{\text{KGK}}$ wie in (6.56) erstellt werden. Es gilt:

$$\underline{y} = \underbrace{\begin{pmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix}}_{\underline{c}^T} \cdot \underline{x} + \underline{d} \cdot T_U = \underbrace{\begin{pmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix}}_{\underline{c}^T} \cdot \underline{x}, \quad (6.56)$$

wobei m_j mit $j = 1, 2, 3$ die Steigung der linearen Abhängigkeit $R_j(T_j)$ bedeutet. Der Kaltwiderstand $R_{\text{KGK}}(t_0)$ muss der Gleichung hinzuaddiert werden. Durch die Lösung im Bildbereich der Laplace-Transformation kann die Aufstellung der Übertragungsfunktion mit Hilfe der Beziehung $G(s) = \underline{c}^T \cdot (s \cdot \underline{I} - \underline{A})^{-1} \underline{b}$ erfolgen. Die Übertragungsfunktion ergibt sich:

$$G(s) = \frac{b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0}{s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (6.57)$$

mit den Koeffizienten

$$\begin{aligned} b_2 &= \beta_2 m_2 + \beta_3 m_3, \\ b_1 &= \xi_{11} \beta_2 m_2 + \xi_{12} \beta_2 m_1 + \xi_{11} \beta_3 m_3 + \xi_{13} \beta_3 m_1 + \xi_{22} \beta_3 m_3 \\ &\quad + \xi_{23} \beta_3 m_2 - \xi_{32} \beta_2 m_3 + \xi_{33} \beta_2 m_2, \\ b_0 &= \xi_{11} \xi_{22} \beta_3 m_3 + \xi_{11} \xi_{23} \beta_3 m_2 - \xi_{12} \xi_{21} \beta_3 m_3 + \xi_{12} \xi_{23} \beta_3 m_1, \\ &\quad + \xi_{13} \xi_{21} \beta_3 m_2 + \xi_{13} \xi_{22} \beta_3 m_1 - \xi_{11} \xi_{32} \beta_2 m_3 + \xi_{11} \xi_{33} \beta_2 m_2 \\ &\quad + \xi_{12} \xi_{31} \beta_2 m_3 + \xi_{12} \xi_{33} \beta_2 m_1 - \xi_{13} \xi_{31} \beta_2 m_2 - \xi_{13} \xi_{32} \beta_2 m_1, \\ a_2 &= \xi_{11} + \xi_{22} + \xi_{33}, \\ a_1 &= \xi_{11} \xi_{22} - \xi_{12} \xi_{21} + \xi_{11} \xi_{33} - \xi_{13} \xi_{31} + \xi_{22} \xi_{33} \xi_{23} \xi_{32} \quad \text{und} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \xi_{11} \xi_{22} \xi_{33} + \xi_{11} \xi_{23} \xi_{32} - \xi_{12} \xi_{21} \xi_{33} - \xi_{12} \xi_{23} \xi_{31} \\ &\quad + \xi_{13} \xi_{21} \xi_{32} - \xi_{13} \xi_{22} \xi_{31}. \end{aligned}$$

Da die Messdaten zeitdiskret mit einem Abtastintervall T_A aufgezeichnet wurden, wird diese zeitkontinuierliche Übertragungsfunktion bilinear $s = \frac{2}{T_A} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ in die z-Ebene (zeitdiskreter Bereich) transformiert. Die zeitdiskrete Übertragungsgleichung ist demnach

$$G(z^{-1}) = \frac{b_{z0} + b_{z1} \cdot z^{-1} + b_{z2} \cdot z^{-2} + b_{z3} \cdot z^{-3}}{a_{z0} + a_{z1} \cdot z^{-1} + a_{z2} \cdot z^{-2} + a_{z3} \cdot z^{-3}}, \quad (6.58)$$

wobei diese Koeffizienten $b_{z(j)}$, $a_{z(j)}$, $j = 0, 1, 2, 3$ letztendlich von den Koeffizienten aus (6.57) und T_A abhängen.

Mit Hilfe der Abbildungen 3.7(a), 3.7(b), 3.8(a) und 3.8(b) lassen sie die temperaturabhängigen Werte der relevanten Materialeigenschaften und anhand der Abbildungen 3.11 sowie 6.39 die Geometriedaten des Glühstiftes ableiten. Für die Berechnung werden die Parameter $\alpha(T)$, $\rho(T)$, $c(T)$ sowie $\lambda(T)$ bei $T = 800$ K abgelesen. Die fehlenden Größen sind der Tabelle 6.4 zu entnehmen.

Tabelle 6.4 Parameter für die zeitdiskrete Übertragungsfunktion.

Parameter	Wert	Einheit
α_2	3	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
α_3	3	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
d_{12}	0,1	mm
d_{23}	0,1	mm

Im Falle einer Betrachtung des Stroms muss die Zustandsraumdarstellung (6.55) durch die auf das Volumen bezogene Leistung, also Wärmeentstehung, erweitert werden. Die Wärmeentstehung bzw. Leistungsdichte ist dementsprechend

$$W_T = \rho_{el_i}(T) \cdot I^2, \quad (6.59)$$

wobei ρ_{el_i} den spezifischen elektrischen Widerstand und I den fließenden Strom wiedergibt. Da die spezifischen elektrischen Widerstände dieser Halbleitermischung sehr klein sind, lässt sich der Stromeinfluss für die Werte 1 oder 1,5 A vernachlässigen.

Als Nächstes wird das Ergebnis des erstellten Kerzenmodells, wie in Gleichung 6.58 zu sehen ist, mit den Messdaten verglichen. Die Messdaten stammen von einem Abgasrohrprüfstand eines Verbrennungsmotors, siehe die schematische Darstellung eines Abgasrohrprüfstandes in Abbildung 6.40. Die Ke-

ramikglühkerze ragt in den Gaskanal, ähnlich wie im Brennraum, nur mit der Kappe hinein. Die Spannung U_{KGK} wird dabei mit dem Anregungsstrom von 1 A aufgezeichnet, um den temperaturabhängigen Widerstand der Keramikglühkerze $R_{\text{KGK}}(T) = U_{\text{KGK}}(T)/I$, d. h. die Ausgangsgröße, zu ermitteln. Dabei wird die Temperatur T , also die Eingangsgröße, durch Regelung der Einspritzmenge, der Frischluftzufuhr usw. erreicht und lässt sich anhand der Werte von Sensoren vor- und nach der Kerze überprüfen (siehe Abbildung 6.40). Die Luftgeschwindigkeit im Abgasrohr liegt für die Messung bei 24 m/s. Das Simulationsergebnis ist in Abbildung 6.41 illustriert.

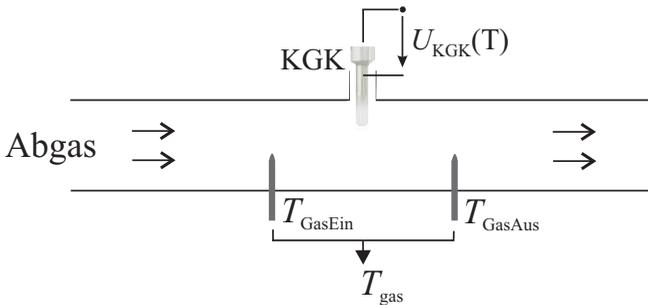


Abbildung 6.40 Messungen im Abgasrohrprüfstand oder Heizgasprüfstand eines Verbrennungsmotors.

Sowohl der berechneten Übertragungsfunktion als auch der Keramikglühkerze steht der gleiche Temperaturverlauf als Eingangsgröße zur Verfügung. Aufgrund der in Kapitel 3 beschriebenen Kerzenstreuung muss der Kaltwiderstand der jeweiligen Kerze bei der Ermittlung von $R_{\text{KGK}}(T)$ herangezogen werden. Es ist in Abbildung 6.41 deutlich zu sehen, dass die Trägheit der Kerze sich an Unstetigkeitsstellen (Widerstandskurven) bemerken lässt. Trotz der Kerzenträgheit lag die Standardabweichung bei 7,5 m Ω , was wiederum im Niederfrequenzbereich ein gutes Ergebnis darstellt. Für eine bestimmte Keramikglühkerze kann der Korrekturfaktor in die anderen Koeffizienten hineinfließen, sodass die Übertragungsfunktion lediglich durch den Einsatz des RLS-Parameterschätzverfahrens einfach ermittelt werden kann.

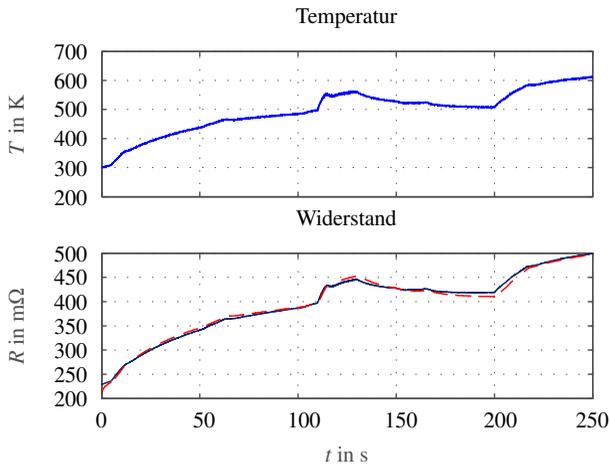


Abbildung 6.41 Simulationsergebnis (—: gemessen, —: simuliert).

6.3.2.1 Prinzip des RLS-Verfahrens

Das rekursive Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate (RLS, siehe [48]) schätzt die Koeffizienten des Modells (6.58) mit Hilfe der aktuellen Beobachtung (Messwert). Das heißt, im Gegensatz zum LS¹¹-Verfahren, welches basierend auf einer Anzahl der Beobachtungen die Koeffizienten schätzt, werden hierbei die geschätzten Koeffizienten mit jeder neuen Beobachtung korrigiert [48]:

$$\text{Neue Schätzung} = \text{Alte Schätzung} + \text{Korrekturfaktor} \cdot \left(\text{Neue Beobachtung} - \text{Prädiktion mit alter Schätzung} \right)$$

In der Form der Differenzgleichung lässt sich der Parametervektor Θ anhand dieser Methode folgendermaßen schätzen. Die Umformung der Übertragungsfunktion (6.58) mit der Annahme $a_{z0} = 1$ ist

$$Y(z^{-1})(1 + a_{z1} \cdot z^{-1} + a_{z2} \cdot z^{-2} + a_{z3} \cdot z^{-3}) =$$

¹¹ Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate

$$U(z^{-1})(b_{z0} \cdot z^0 + b_{z1} \cdot z^{-1} + b_{z2} \cdot z^{-2} + b_{z3} \cdot z^{-3}). \quad (6.60)$$

Für die Differenzgleichung ergibt

$$y(n) + a_{z1} \cdot y(n-1) + a_{z2} \cdot y(n-2) + a_{z3} \cdot y(n-3) - b_{z0} \cdot u(n) - b_{z1} \cdot u(n-1) - b_{z2} \cdot u(n-2) - b_{z3} \cdot u(n-3) = 0 \quad (6.61)$$

umgeformt

$$y_n = \underbrace{\begin{bmatrix} -y_{n-1} & -y_{n-2} & -y_{n-3} & u_n & u_{n-1} & u_{n-2} & u_{n-3} \end{bmatrix}}_{s_n^T} \cdot \Theta, \text{ wobei } a_{z0} = 1 \text{ ist.}$$

Der Parametervektor Θ ist demnach gegeben durch:

$$\Theta = \begin{bmatrix} a_{z1} \\ a_{z2} \\ a_{z3} \\ b_{z0} \\ b_{z1} \\ b_{z2} \\ b_{z3} \end{bmatrix}. \quad (6.62)$$

Mit Hinzunahme des Messwertes für den aktuellen Abtastzeitpunkt n wird der Datenvektor s_n^T in jedem Schritt aktualisiert. Der Parametervektor $\hat{\Theta}_n$ (Schätzwert) lässt sich mit Hilfe der Kovarianzmatrix der Schätzung P_{n-1} , des Schätzwertes $\hat{\Theta}_{n-1}$ und dem Gewichtungsvektor k_n wie folgt ermitteln:

$$k_n = \frac{P_{n-1} \cdot s_n}{(1 + s_n^T \cdot P_{n-1} \cdot s_n)}, \quad (6.63)$$

$$P_n = P_{n-1} - k_n \cdot s_n^T \cdot P_{n-1}, \quad (6.64)$$

$$\hat{\Theta}_n = \hat{\Theta}_{n-1} + k_n \cdot [y_n - s_n^T \cdot \hat{\Theta}_{n-1}]. \quad (6.65)$$

Damit der Schätzalgorithmus auf die äußerst kleinen Änderungen nicht empfindlich reagiert, wird die Gleichung 6.64 mit einem Vergessensfaktor ν (üblicher Wertebereich $[0,95 \dots 0,995]$) dividiert.

$$P_n = \frac{1}{\nu} (P_{n-1} - k_n \cdot s_n^T \cdot P_{n-1}) \quad (6.66)$$

Dabei ist das quadratische Gütemaß für eine optimale Schätzung zu minimieren:

$$\sum_{n=0}^N (y_n - s_n^T \hat{\Theta})^2 \rightarrow \min. \quad (6.67)$$

Mit den am Abgasrohrprüfstand aufgezeichneten Ein- und Ausgangsgrößen, d. h. Temperatur und Widerstand, lassen sich die Koeffizienten der Übertragungsfunktion in Gleichung (6.58) nun rechnerisch ermittelt.

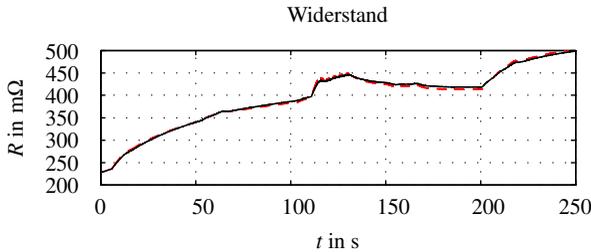


Abbildung 6.42 Simulationsergebnis (—: gemessen, —: geschätzt).

Dabei findet die Koeffizientenermittlung mit Hilfe der RLS-Methode (Vergessensfaktor $\nu = 0,98$, Abtastzeit $T_A = 0,001$ s, Messdaten T und R_{KGK} aus dem Heißgasprüfstand) in den ersten 5 s statt. Danach wird die Ausgangsgröße anhand der vordefinierten Eingangsgröße T , wie in Abbildung 6.41 zu sehen ist, und der identifizierten Übertragungsfunktion $G(z^{-1})$ ermittelt. Wie aus Abbildung 6.42 (Simulationsbeispiel) ersichtlich, hat dieser Ermittlungsweg dazu geführt, dass die Schätzung im Niederfrequenzbereich gute Ergebnisse liefert und die Standardabweichung $\sigma \approx 5 \text{ m}\Omega$ im Vergleich der direkten Berechnung (Abbildung 6.41) etwas kleiner geworden ist.

Basierend auf dieser Grundlage wird das inverse KGK-Modell, wie in Abbildung 6.33 dargestellt, im Kleinsignalebereich identifiziert, was anschließend die dynamische Brennraumtemperatur T_U schätzen lassen soll.

Dies bedeutet, dass dem Widerstand als Eingangsgröße und der Temperatur als Ausgangsgröße neue Rollen zugewiesen werden. Ausgehend von einem linearen KGK-System ist die Stabilität der Inversen nur dann gegeben, wenn die Nullstellen von $G(s)$, siehe Gleichung (6.57), in der linken Halbebene der komplexen Ebene (minimalphasiges System) liegen. Da die Nullstellen der

berechneten sowie geschätzten Übertragungsfunktion negative Werte (Abbildung 6.43) aufweisen, kann $G^{-1}(s)$ durch kausale Inversion – Vertauschen von Zähler und Nenner – gebildet werden, siehe Gleichung (6.68) und (6.69).

Die kontinuierliche Gleichung mit den berechneten Koeffizienten:

$$G(s) = \frac{0,714 \cdot s^2 + 0,4904 \cdot s + 4,246 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 2,2824 \cdot s^2 + 0,5867 \cdot s + 4,23 \cdot 10^{-9}} \quad (6.68)$$

und die inverse Übertragungsfunktion

$$G^{-1}(s) = \frac{2,2824 \cdot s^2 + 0,5867 \cdot s + 4,23 \cdot 10^{-9}}{s^3 + 0,714 \cdot s^2 + 0,4904 \cdot s + 4,246 \cdot 10^{-5}} \quad (6.69)$$

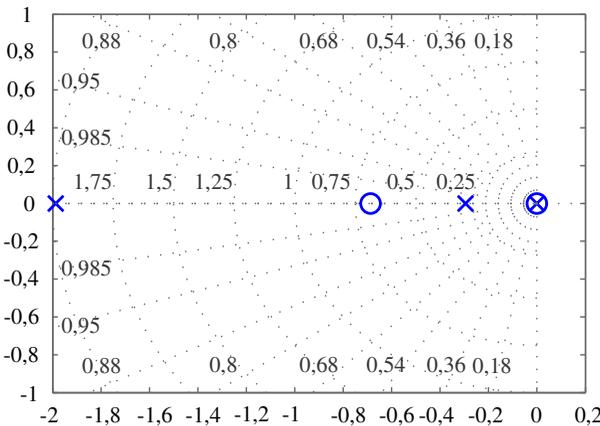


Abbildung 6.43 Pol-Nullstellen-Diagramm von $G(s)$. Polstellen: $s_{\infty,1} \approx -1,9872$, $s_{\infty,2} \approx -0,29522$ sowie $s_{\infty,3} \approx -0,7213 \cdot 10^{-8}$ und Nullstellen: $s_{0,1} \approx -0,687$ sowie $s_{0,2} \approx -0,8658 \cdot 10^{-4}$

Bei einer Betrachtung in der z -Ebene müssen dagegen die Nullstellen im Einheitskreis liegen, was in diesem Falle ebenfalls gewährleistet ist.

Die hergeleitete inverse Übertragungsfunktion $G^{-1}(s)$ wird in erster Linie mit den Messdaten des Abgasrohrs zur Probe gestellt. In Abbildung 6.44 ist

das Resümee der Simulation mit T (Ausgangsgröße) und R (Eingangsgröße) verdeutlicht. Die gemessenen und simulierten Temperaturverläufe stimmen mit einer Standardabweichung von 8 K im Großen und Ganzen gut überein. An Unstetigkeitsstellen lassen sich Abweichungen von bis zu 20 K konstatieren.

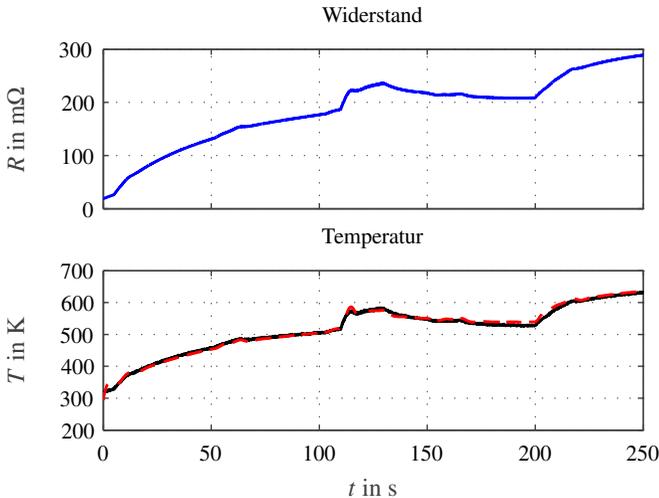


Abbildung 6.44 Simulationsergebnis (—: gemessen, - - -: simuliert).

Als Nächstes werden die Daten der Fahrzeugmessung, welche bei vorherigen Kapiteln ebenfalls genutzt wurden, herangezogen. Aufgezeichnet wurden die Sensorsignale dabei mit zwei KGKn, einem Thermoelement sowie einem Drucksensor bei dem 4-Zylindermotor N47 synchron. In Abbildung 6.45 ist das Prinzip der Messung aufgeführt. Die hierbei eingesetzten Keramikglühkerzen sind die Kappenkerzen, welche einen höheren Widerstand im Kappenbereich besitzen und im Hinblick der Sensorik untersucht werden. Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, unterscheiden sie sich aufgrund der herstellungsbedingten Streuung. Das Thermoelement ist ein Keramik-Schutzrohr-Thermoelement, das aus der hochwertigen und hitzebeständigen technischen Keramikmischung (identisch wie die Keramikmischung der Glühkerze) besteht. Aus dem Grund eignet es sich zum Einsatz in Brennräumen. Im vierten Zylinder wurde gleichzeitig eine Drucksensor-Glühkerze (bekannt als PSG-Sensor) eingesetzt. Sie misst mit einem integrierten Sensor den Druck.

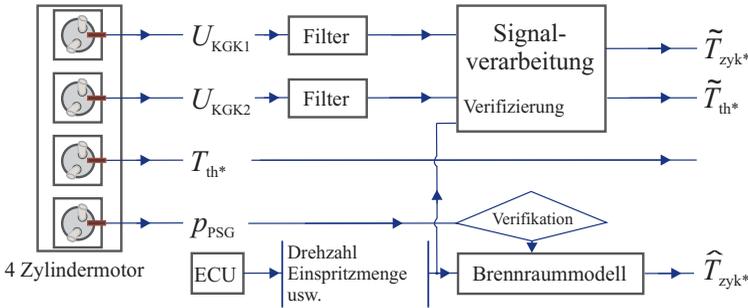


Abbildung 6.45 Prinzip der Messdatenaufzeichnung und deren Verwendung. Filter-Block: nur für analoge Filterung.

Abbildung 6.46 illustriert das Simulationsergebnis zur Ermittlung des Widerstandes mit $G(s)$. Der Kaltwiderstand der KGK beträgt hierbei 243 m Ω . Vor allem im Anfangsbereich ist eine kleine Abweichung aufgrund des trägen Einschwingens zu erkennen. Abgesehen von dieser Verzögerung $\tau \approx 5$ s liefert das KGK-Modell ein gutes Ergebnis. Die Standardabweichung zwischen dem gemessenen und simulierten Widerstand lag bei diesem Datensatz unter 8 m Ω .

Darauffolgend wird auch die Simulation der Temperatur T_{th} mit $G^{-1}(s)$ vorgenommen, siehe Abbildung 6.47. Ein Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Kurven. Die Abweichung wird nach kurzem Einschwingvorgang in extrem engen Toleranzen, d. h. maximale Abweichung unter 7 K, gehalten.

Die in diesem Unterkapitel behandelten linearen Übertragungsfunktionen besitzen Vor- und Nachteile. Der wesentliche Vorteil ist der begrenzte Rechenaufwand, solange die Kovarianzmatrix positiv definit bleibt. Diese und weitere Vorteile, wie etwa die Übersichtlichkeit, reichen für das Kleinsignalverhalten nicht aus. Das identifizierte oder berechnete lineare Modell gibt zwar das Grundverhalten ausreichend gut wieder, jedoch nichtlineare sowie statische Verzerrungen am Temperatur- und Widerstandssignal nicht.

Nichtsdestotrotz führt das vereinfachte KGK-Modell dritter Ordnung schließlich beim Ermitteln der langsamen Temperaturänderungen zu guten Er-

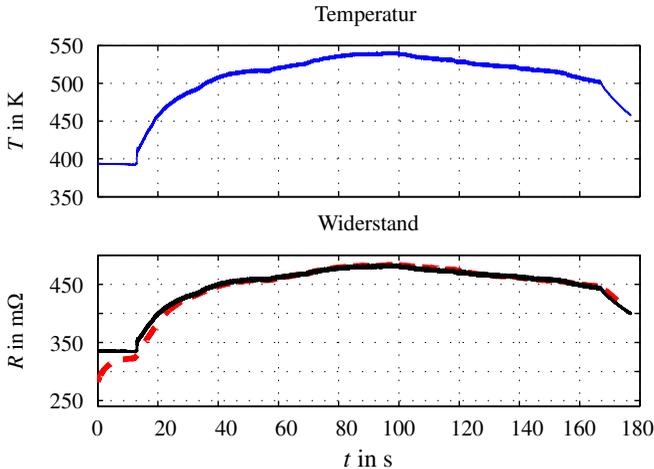


Abbildung 6.46 Simulationsergebnis (—: gemessen, - - -: simuliert). Eingangsgröße: Temperatur, Ausgangsgröße: Kerzenwiderstand.

gebnissen. Das heißt, die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Daten liegt wie angefordert über 90 %. Es kann beispielsweise für die modellbasierte Regelung der Kerzen als Heizelement (Aktor) eingesetzt werden.

6.3.3 Erweiterte Systembetrachtung mit Nichtlinearitäten

Da das nichtlineare thermische Verhalten der Keramikglühkerze durch eine lineare Darstellung nicht ausreichend modelliert werden und eine Invertierung des linearen Modells keine optimale Lösung für die Temperaturbestimmung im Kleinsignalverhalten (Hochfrequenzbereich) ermöglichen kann, wird das Modell im nächsten Schritt erweitert.

Im Folgenden wird erklärt, welche Frequenzen hierbei als Hochfrequenzbereich bezeichnet werden: Die Drehzahl eines konventionellen Dieselmotors liegt bekanntlich zwischen 800 und 6000 min^{-1} . Für die Periodendauer eines Zyklus ergeben sich dementsprechend die Werte von $0,15$ bis $0,02 \text{ s}$, was wiederum Frequenzen von $6,67$ bis 50 Hz bedeutet. Ein 4-Takt-Zyklus besitzt insgesamt 720° Kurbel(wellen)winkel. Eine Betrachtung der dynamischen Temperaturänderung im Brennraum, wie in Abbildung 2.2 ersichtlich, in jedem

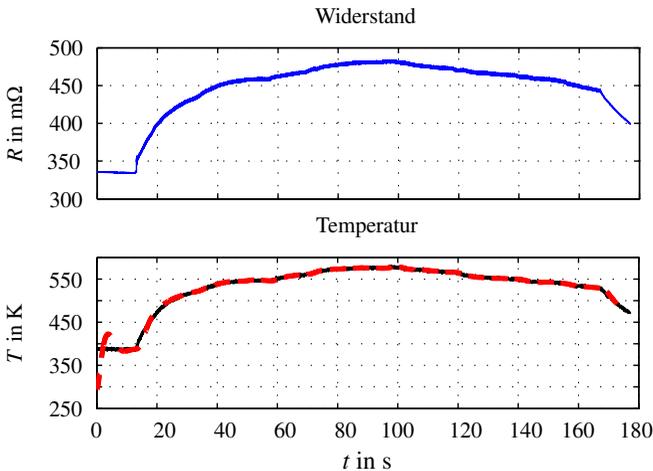


Abbildung 6.47 Simulationsergebnis (—: gemessen, —: simuliert).

Kurbelwinkel heißt, dass die Temperaturänderung pro 0,21 ms (4,8 kHz) im Leerlauf und pro 0,028 ms (36 kHz) bei der maximalen Drehzahl liegen muss. Diese hochfrequente Temperaturänderung im Brennraum verursacht ein Kleinsignalverhalten der Keramikglühkerze. Das heißt, der Kerzenwiderstand wird sich mit kleinen Abständen zu dem Arbeitspunkt des Motorbetriebspunktes ändern. Solch kleinen Änderungen des Kerzenwiderstandes sollen zur Bestimmung der Brennraumtemperatur eingesetzt werden.

Diese präzise Bestimmung der Brennraumtemperatur erfordert eine nichtlineare Betrachtung des Übertragungsverhaltens zwischen der Temperatur und dem Kerzenwiderstand (oder der Spannung, aufgrund des Ohm'schen Gesetzes), was dem thermischen Verhalten der KGK entsprechen soll. Mittels des Hammerstein-Wiener-Verfahrens [21] wird das Verhalten identifiziert. Im Folgenden werden daher zuerst einige Grundlagen zum Wiener-Hammerstein-Modell kurz erläutert.

6.3.3.1 Hammerstein-Wiener-Modell

Das Hammerstein-Wiener-Modell kann in zwei Teilen betrachtet werden: Hammerstein-Modell sowie Wiener-Modell.

Definition: Ein Hammerstein-Modell besteht aus einem linearen dynamischen Modell, dessen Eingangsgröße aus einer nichtlinearen statischen Abbildung der Modelleingangsgröße gebildet wird [37]. Zur Identifikation von nichtlinearen Eingrößen- sowie Mehrgrößensystemen lässt sich diese Modellform einsetzen.

Definition: Das Wiener-Modell ist ebenfalls blockorientiert, bei dem der nichtlineare Teil hinter dem linearen Streckenteil agiert. Beide Modellformen sind in Abbildung 6.48 dargestellt.

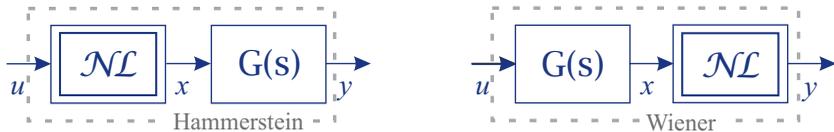


Abbildung 6.48 Hammerstein-Modell und Wiener-Modell.

Die Kombination beider Modellformen ermöglicht Hammerstein-Wiener-Modelle (Strecke: NL, L, NL), Wiener-Hammerstein-Modelle (Strecke: L, NL, L) sowie diverse Mischansätze. Um das fehlende Wissen über die Strecke möglichst gut abzudecken, ist der Einsatz aller nichtlinearen Funktionen bei der Identifikation denkbar. Polynomfunktionen sowie Waveletnetzwerke werden unter anderem oft eingesetzt.

Die hochfrequenten Änderungen des KGK-Widerstandes in Abhängigkeit der thermodynamischen Bedingungen im Brennraum sind in Abbildung 6.49 zu beobachten. In Abschnitt 6.2 lässt sich anhand der Winkelgeschwindigkeitsberechnung der Antriebswelle dieses Phänomen, also die Widerstandsänderung pro Arbeitsspiel¹², deutlicher erkennen. Gleichzeitig ist es bekannt, dass die Thermoelemente (Typ-R) für solche hochfrequenten thermischen Änderungen nicht geeignet sind. Sie können lediglich in der Nähe des Arbeitspunktes von thermischen Änderungen im Brennraum angesteuert werden, was ein näherungsweise lineares Verhalten, wie in Abbildung 6.47 dargestellt, zur Folge hat. Dementsprechend kann das Temperatursignal des Thermoelementes zur Ermittlung der Brennraumtemperaturverläufe während eines Arbeitsspiels nicht als Hilfsgröße dienen.

¹² Ein thermodynamischer Kreisprozessumlauf wird auch als ein Arbeitsspiel genannt.

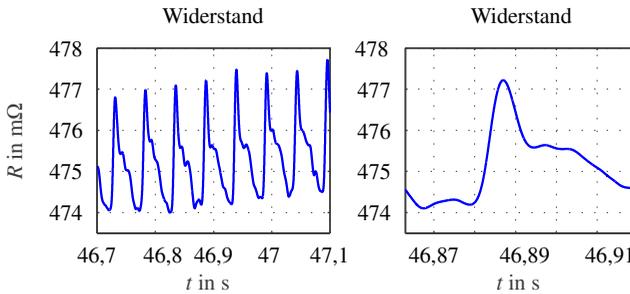


Abbildung 6.49 Teilbereiche des gemessenen Widerstandssignals, welches in Abbildung 6.47 zu sehen ist.

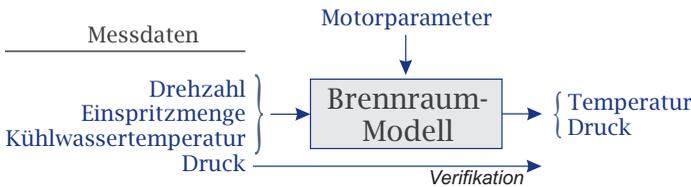


Abbildung 6.50 Bestimmung der Temperatur \widehat{T}_{zyk} . Verifikation mit dem Druck \widehat{p}_{PSG} .

Der zeitliche Verlauf der Brennraumtemperatur während jedes Arbeitsspiels lässt sich anhand des Brennraummodells, welches im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist, simulieren. Für die Berechnung wurden sowohl die motorspezifischen Parameter als auch die zeitgleich zur Messung aufgezeichneten Größen Drehzahl und Einspritzmenge herangezogen. Anschließend dient das mit dem PSG-Sensor gemessene Drucksignal p_{PSG} zur Verifikation dieser Simulationsergebnisse. Auf die Einzelheiten des Modells wird hierbei nicht eingegangen.

Im Folgenden wird aus den gewonnenen Datensätzen mittels des Brennraummodells (siehe Abbildung 6.50) die Temperatur \widehat{T}_{zyk} und der Druck \widehat{p}_{PSG} eines Zyklus simuliert. Die Messdaten Drehzahl, Einspritzmenge und Kühlwassertemperatur $\underline{x} = [n, inj, T_{Cool}]$ dienen dabei als Eingangsgröße. Außer den Geometriedaten beinhalten dabei die motorspezifischen Parameter auch Kennfelder wie etwa AGR-Rate¹³ [10] oder Verbrennungsluftverhältnis. Diese beiden Kennfelder wurden ebenfalls während der Messung kontinuierlich erfasst.

¹³ Abgasrückführungsrate

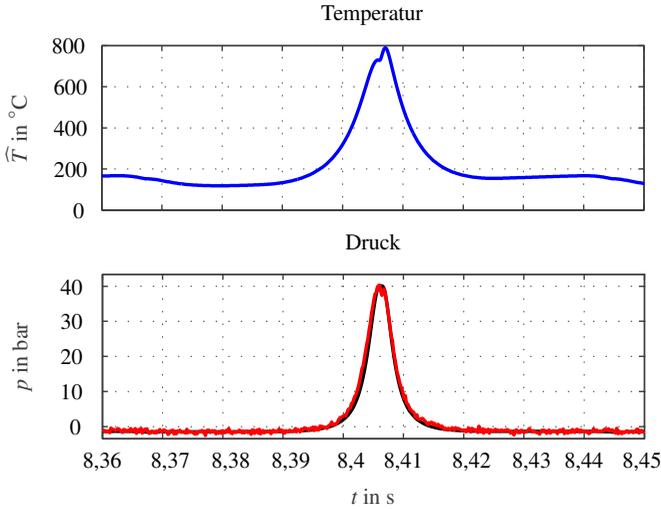


Abbildung 6.51 Simulation der Temperatur (—) sowie des Drucks (—: simuliert, —: gemessen). Drehzahl $n = 1546 \text{ min}^{-1}$, Einspritzmenge $inj = 4,46 \text{ mg/Hub}$, Kühlwassertemperatur $T_{\text{Cool}} = 85^\circ \text{C}$.

Wie aus Abbildung 6.51 ersichtlich, wurde die Temperatur \hat{T} für einen Zyklus berechnet. In der Abbildungsbeschreibung stehen auch weitere Einstellungen für diese zyklische Berechnung. Da der Drucksensor im Zylinder 3 eingebaut und die Temperaturberechnung für den ersten Zylinder durchgeführt wurde, muss die Druckkurve entsprechend der Motor-Zündzeitfolge „BMW-N47 (E81)“ 1-4-3-2 zeitlich angepasst werden. Mit der Annahme, dass die vier Druckextrema bei 90° , 270° , 450° und 630° liegen, muss mit den Eingangsgrößen (vgl. Abbildung 6.51) eine Verzögerung von $0,0388 \text{ s}$ mitberücksichtigt werden. Somit lässt sich ein gutes Simulationsergebnis für diesen Motorbetriebspunkt beobachten.

Aus der Abbildung 6.52 wird ersichtlich, dass die KGK-Spannung der Temperatur im Kleinsignalbereich nachfolgt, da die Glühkerzentemperatur (als Zustandsgröße von KGK) mit einer zeitlichen Verzögerung dem Brennraumtemperaturverlauf wegen der bereits erwähnten Keramikeigenschaften hinterher geht. Die Spannung wurde dabei mit dem Hochpassfilter in Abbildung 6.11 gefiltert.

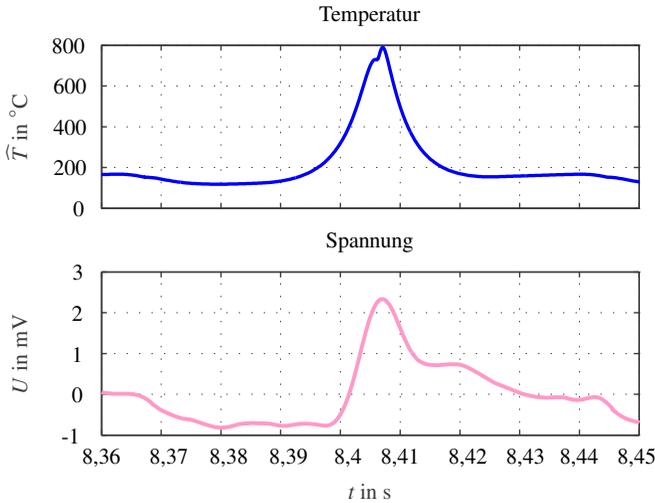


Abbildung 6.52 Simulation der Temperatur mit den gemessenen Größen Drehzahl $n = 1546 \text{ min}^{-1}$, Einspritzmenge $inj = 4,46 \text{ mg/Hub}$ und Kühlwassertemperatur $T_{\text{Cool}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$. Die gemessene KGK-Spannung im selben Zyklus.

Der in Abbildung 6.52 betrachtete Zusammenhang ermöglicht die Schätzung der Koeffizienten der Übertragungsfunktion (Abbildung 6.52; Spannung U als Eingangsgröße, Temperatur \hat{T} als Ausgangsgröße) anhand des RLS-Verfahrens. Das erzielte Modell für den Zyklus (Abbildung 6.52) ist demzufolge

$$G(z^{-1}) = \frac{5207,30 \cdot z^{-1} - 1339,092 \cdot z^{-2} - 3860,097 \cdot z^{-3}}{1 - 1,3918 \cdot z^{-1} - 0,17869 \cdot z^{-2} + 0,5706 \cdot z^{-3}}. \quad (6.70)$$

In Abbildung 6.53 ist das Ergebnis grafisch illustriert. Wie erwartet, unterscheiden sich die Temperaturkurven; dessen ungeachtet liefert das Schätzergebnis ein gutes Ergebnis. Der Grund dafür ist, dass der Schätzfehler vor allem bei höheren Temperaturwerten kleiner wird.

Die Temperaturberechnung mit dem Brennraummodell wurde anhand des gemessenen Drucks überprüft. Dies bedeutet, der berechnete Druck wurde mit dem gemessenen Druck verglichen. Da das geschätzte Modell nicht nur in ei-

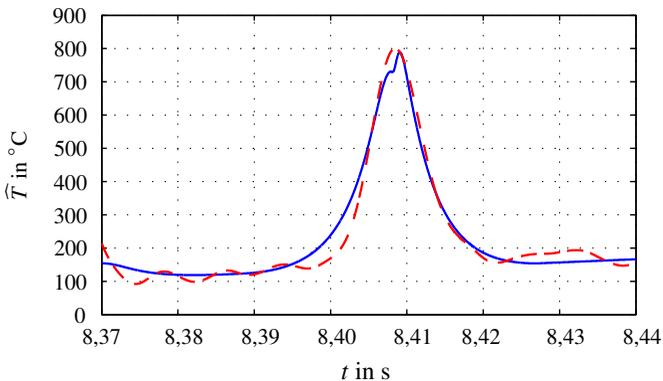


Abbildung 6.53 Schätzung der Zyklus-Temperatur (—: berechnet, - - -: geschätzt mit einem linearen Modell 3. Ordnung).

nem bestimmten Zyklus, sondern auch bei mehreren funktionieren muss, muss die Übertragungsfunktion ausreichend gut sein.

Angewendet auf mehrere Zyklen lässt sich im nächsten Schritt erkennen, dass das System robust bleibt, wie in den Abbildungen 6.54 und 6.55 zu erkennen ist. In vielen Bereichen ist allerdings die Abweichung zu groß. Die Standardabweichung des Ausgangssignals lag bei 45,12 K (relativ betrachtet: 18,7 %). Außerdem gibt es Zyklen, welche größere Schätzfehler (bis zu 300 K) aufweisen. Folglich ist die KGK-Spannung als einzige Eingangsgröße insufficient, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten.

Als Nächstes wird das lineare Modell für eine bessere Bestimmung der dynamischen Brennraumtemperatur erweitert, um die Schätzung zu verbessern. Dies kann dadurch stattfinden, dass das System einerseits mit den fortlaufend erfassten Größen wie etwa der Drehzahl (oder Kurbelwinkel) und/oder der Einspritzmenge unterstützt wird. Andererseits machen die Schätzergebnisse das nichtlineare Verhalten der KGK deutlich. Das heißt, die Adaption von Nichtlinearitäten ist obligatorisch, um die Korrektur der Schätzung zu ermöglichen.

Angelehnt an das Hammerstein-Wiener-Verfahren (Abb. 6.56) soll die Analyse der Erweiterungsmöglichkeiten erfolgen. So wie die Ermittlung des Gesamtumfangs des Modells, also die Modellordnung, sind auch die Modellstrukturen (Hammerstein-Modell?, Wiener-Modell?, Mischmodelle?, Eingangsgrö-

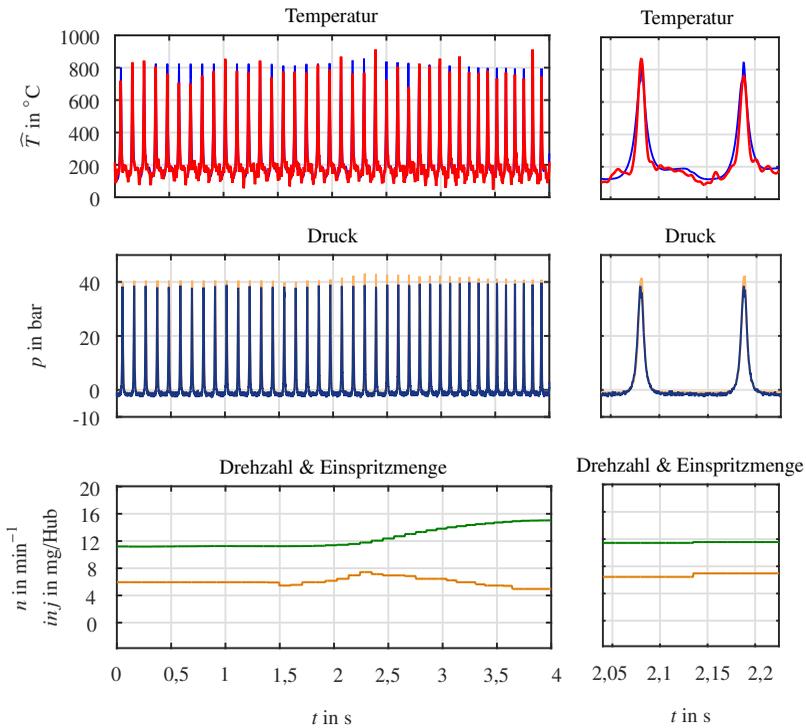


Abbildung 6.54 Schätzung der Temperatur von Zyklen. Temperatur: —: berechnet, —: geschätzt. Druck: —: gemessen, —: berechnet. —: Drehzahl, —: Einspritzmenge. Rechts: Vergrößerter Ausschnitt von zwei Zyklen.

Ben mit Parallel- oder Serienbetrieb?) zu bestimmen. Mit dem gewählten / angepassten Modell wird die Schätzung durchgeführt. Diese Prozesse müssen in der Praxis nicht aufeinander folgend geschehen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird erst einmal ein nichtlineares Modell am Eingang des linearen Modells – somit ein Hammersteinmodell – adaptiert. Obwohl, wie bereits angedeutet, der Einsatz aller nichtlinearen Funktionen bei der Identifikation des Verhaltens der KGK denkbar ist, werden hinsichtlich der wärme-kapazitiven Wirkung von Glühkerzen folgende Funktionen eingesetzt:

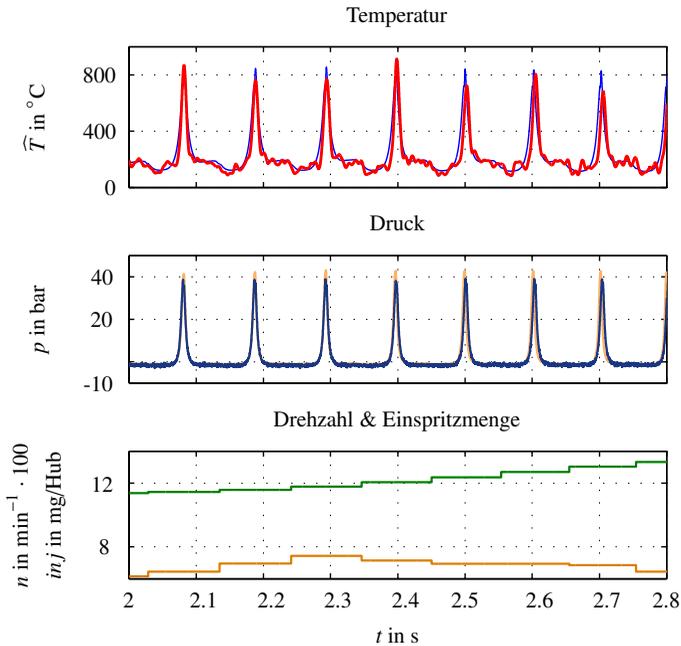


Abbildung 6.55 Schätzung der Temperatur von Zyklen (vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 6.54). Temperatur: —: berechnet, —: geschätzt. Druck: —: gemessen, —: berechnet. —: Drehzahl, —: Einspritzmenge.

- Sigmoid-Funktion: Diese Funktion wird durch die Gleichung

$$\text{sig}(t) = \frac{1}{e^{-t} + 1} \quad (6.71)$$

beschrieben.

- Polynom n-ter Ordnung:

$$f(t) = c(1) \cdot t^n + c(2) \cdot t^{n-1} + \dots + c(n) \cdot t + c(n+1) \quad (6.72)$$

mit $n = 1, 2, \dots$.

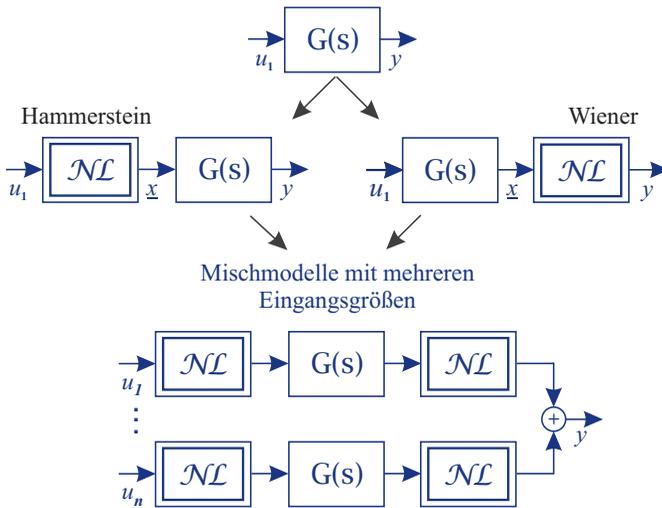


Abbildung 6.56 Erweiterung des bestehenden linearen Modells. u_1 : Spannung, $u_{2...n}$: weitere Eingangsgrößen, \underline{x} : Zustandsgrößen und y : Temperatur.

- Stückweise lineare Funktion: Dabei sind die Knickpunkte (Anfangs- und Endpunkte der Steigungen)

$$[t_1, t_2, \dots, t_n; y_1, y_2, \dots, y_n] \tag{6.73}$$

zur Beschreibung dieser Funktion ausreichend.

Ein weiterer Grund für die Wahl dieser Funktionen ist deren standardmäßiger Einsatz in der Regelungstechnik. Neben der Ordnung des linearen Gliedes $n = 3$ wird als Nächstes die Ordnung des nichtlinearen Gliedes sowie die Parameter mit einem Datensatz identifiziert. Die statische Nichtlinearität wird dabei mit der Ordnung m beschrieben. Da die Nichtlinearität einerseits durch endliche Ordnung approximierbar sei (Annahme) und andererseits eine Überparametrisierung vermieden werden soll, wird die optimale Ordnung bestimmt. Somit werden die Basisfunktionen beschränkt.

Die **Levenberg-Marquardt-Methode** [76], eine Kombination der Verfahren Gauß-Newton sowie Gradienten, wird als Optimierungsverfahren eingesetzt,

dessen Funktionsprinzip im Folgenden anhand dieses Identifikationsverfahrens ebenfalls vorgestellt wird.

Identifikationsablauf:

Das Modell ist durch die Sigmoidnetzwerk-Funktion gegeben:

$$f(u(t)) = (u(t) - r) \cdot \lambda_s + \alpha_{s_1} \cdot g((u(t) - r) \cdot \beta_{s_1} + \gamma_{s_1}) + \dots + \alpha_{s_m} \cdot g((u(t) - r) \cdot \beta_{s_m} + \gamma_{s_m}) + \kappa_s \quad (6.74)$$

mit

$$y(t) = f(\Psi, u(t)), \quad (6.75)$$

wobei u die Spannung, $g(\cdot)$ die Sigmoid-Funktion (6.71), m die Ordnung der Nichtlinearität, r den Mittelwert des Regressionsvektors und λ_s , α_s , β_s , γ_s sowie κ die Koeffizienten (gesuchte Parameter) der Gleichung darstellen.

Für die implizite Darstellung gilt:

$$y(t) - f(\Psi, u(t)) = F(\Psi^k) = 0, \quad (6.76)$$

wobei $y(t)$ die Antwort des Systems auf das Eingangssignal $u(t)$, Ψ die gesuchten Parameter und k den Iterationsschritt bedeutet.

Für den Fall, dass die Modellordnung $m = 1$ sei, lässt sich die explizite Darstellung (6.74) in die implizite Beschreibung überführen:

$$y(t) - \left[(u(t) - r) \cdot \lambda_s + \alpha_{s_1} \cdot g((u(t) - r) \cdot \beta_{s_1} + \gamma_{s_1}) + \kappa_s \right] = 0. \quad (6.77)$$

Durch das Einsetzen der Sigmoid-Funktion (6.71) gilt:

$$F(\Psi^k) = y(t) - \left[(u(t) - r) \cdot \lambda_s + \frac{\alpha_{s_1}}{e^{-((u(t)-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1})} + 1} \right] + \kappa_s = 0. \quad (6.78)$$

Die Jacobi-Matrix, die die ersten partiellen Ableitungen der differenzierbaren Funktion $F(\Psi^k)$ enthält, wird als Nächstes ermittelt. Dabei lässt sich die Ableitung der Sigmoid-Funktion mit Hilfe der Quotientenregel

$$f'(x) = f(x) \cdot (1 - f(x)) \quad (6.79)$$

ausrechnen. Die Jacobimatrix ergibt sich zu

$$F^0(\Psi^k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \lambda_s} & \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \alpha_s} & \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \beta_s} & \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \gamma_s} & \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \kappa_s} \\ \frac{\partial F(\Psi^{k+1})}{\partial \lambda_s} & \frac{\partial F(\Psi^{k+1})}{\partial \alpha_s} & \frac{\partial F(\Psi^{k+1})}{\partial \beta_s} & \frac{\partial F(\Psi^{k+1})}{\partial \gamma_s} & \frac{\partial F(\Psi^{k+1})}{\partial \kappa_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}. \quad (6.80)$$

Durch Einsetzen der Messwerte $y(t_k)$, $u(t_k)$ ($k=1, \dots, N$) können die Jacobimatrix sowie $F(\Psi^k)$ berechnet werden. Da die Identifikation numerisch durchgeführt wird, reicht es, in jedem Iterationsschritt eine Zeile zu berechnen. Für die k -te Zeile, also die Ableitungen nach gesuchten Parametern (1. Zeile von (6.80), $F_j^0(\Psi^k)$) gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \lambda_s} &= -(u_j - r), \quad \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \alpha_s} = \frac{1}{e^{-(u_j-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1}} + 1}, \\ \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \beta_s} &= \frac{\alpha_{s_1} \cdot (u_j - r) \cdot e^{(u_j-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1}}}{(e^{(u_j-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1}} + 1)^2}, \\ \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \gamma_s} &= \frac{\alpha_{s_1} \cdot e^{(u_j-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1}}}{(e^{(u_j-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1}} + 1)^2} \quad \text{und} \quad \frac{\partial F(\Psi^k)}{\partial \kappa_s} = 1. \end{aligned} \quad (6.81)$$

Als nächstes wird in jedem Schritt mit Hilfe von $F_j^0(\Psi^k)$ sowie $F_j(\Psi^k, x_j, y_j)$ das lineare Ausgleichsproblem berechnet:

$$\left\| \begin{pmatrix} F^0(\Psi^k) \\ \mu \cdot I \end{pmatrix} \cdot s^k + \begin{pmatrix} F(\Psi^k) \\ 0 \end{pmatrix} \right\|_2 \rightarrow \min, \quad (6.82)$$

wobei μ den Dämpfungsparameter und s^k die aktuelle Lösung darstellt. Mit der Gleichung

$$\sigma_\mu = \frac{\|F(\Psi^k)\|_2^2 - \|F(\Psi^k + s^k)\|_2^2}{\|F(\Psi^k)\|_2^2 - \|F(\Psi^k) + F^0(\Psi^k) \cdot s^k\|_2^2} \quad (6.83)$$

wird die Qualität der Berechnung von s^k bewertet. Solange dieser Wert in einem definierten Bereich liegt, wird die Lösung s^k akzeptiert. Das heißt, über den definierten Grenzwert ρ_1 (mehrere Bereiche für die Beurteilung sind mög-

lich) lässt sich die Entscheidung treffen. Im Falle der erneuten Berechnung von s^k wird der Dämpfungsparameter μ entsprechend angepasst oder für den nächsten Schritt beibehalten. Die geschätzten Parameter $\Psi^k = \Psi^{k-1} + s^k$ stehen am Ende der maximalen Iterationszahl fest.

Basierend auf diesem Grundprinzip lassen sich die Parameter eines Systems mittels Messdaten iterativ schätzen. Wie in Abbildung 6.57 illustriert, bildet dies den Kern der Identifikation von Modellparametern für die Temperaturschätzung. Inwiefern die geschätzten Parameter den optimalen Modellparametern entsprechen, kann im weiteren Schritt durch die Validierung beurteilt werden. Ziel ist es, den Ausgangsfehler $\varepsilon(t)$ zu minimieren.

Bei nicht akzeptablen Ergebnissen sind weitere Anpassungsschleifen zu realisieren. Wenn die Anpassung des nichtlinearen Glieds nicht zum optimal möglichen Ergebnis führt, sind die Schritte wie bei der erneuten Bestimmung des linearen Glieds einschließlich deren Folgen sowie eine Optimierung der Trainingsdaten möglich. Das Gesamtkonzept ist in Abbildung 6.57 dargestellt.

Einerseits ist das entstehende Modell ein Blackbox-Modell, da eine experimentelle Analyse anhand der Messdaten durchgeführt wird. Andererseits ermöglichen die thermischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit gewisse Annahmen über Prozessstruktur, welche zu einem Gray-Box-Modell¹⁴ führen und dazu dienen, ein realitätsnahes Verhalten mit den klassischen Ansätzen Hammerstein- und Wiener-Modell zu verwirklichen. Eine physikalisch motivierte Prozessbeschreibung, also ein White-Box-Modell¹⁵ im Hochfrequenzbereich, wird dagegen nicht präsentiert.

6.3.4 Diskussion der Messdaten

Wie in Abbildung 6.57 dargestellt, lässt sich die Schätzung der Brennraumtemperatur mit verschiedenen Ansätzen realisieren.

Wie bereits in Abbildungen 6.47 und 6.49 verdeutlicht, bildet das berechnete Modell sowohl die niederfrequenten als auch die hochfrequenten Temperaturänderungen in der Umgebung nach. Ist die gemessene ungefilterte KGK-Spannung (Widerstand) die Eingangsgröße, dann muss das Modellausgangs-

¹⁴ Grey-Box-Modelle kombinieren teilweise bestehende theoretische Streckenbeschreibungen mit Messdaten.

¹⁵ White-Box-Modelle beinhalten eine möglichst genaue theoretische Funktionsbeschreibung der Strecke.

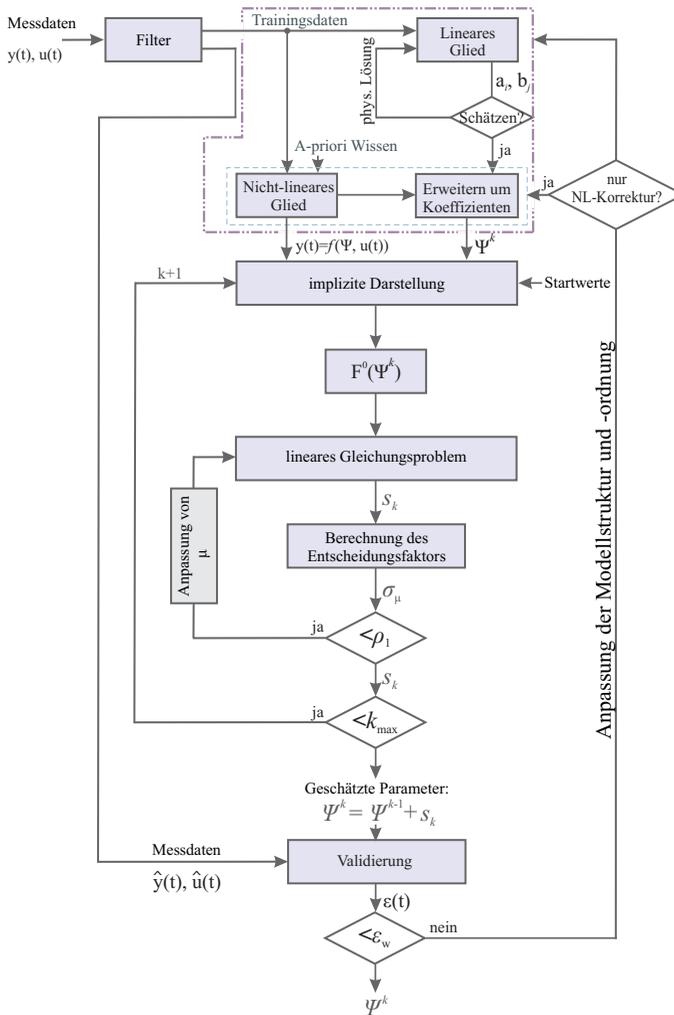


Abbildung 6.57 Ablaufdiagramm der Parameterschätzung mittels Levenberg-Marquardt-Verfahren. NL: Nicht-lineares Glied, a_j und b_j : Koeffizienten der linearen Übertragungsfunktion, μ : Korrekturfaktor, σ_μ : Entscheidungsfaktor, ρ_1 : Grenzwert für die Akzeptanz des Entscheidungsfaktors, k_{max} : Maximale Iterationszahl, $\varepsilon(t)$: Ausgangsfehler.

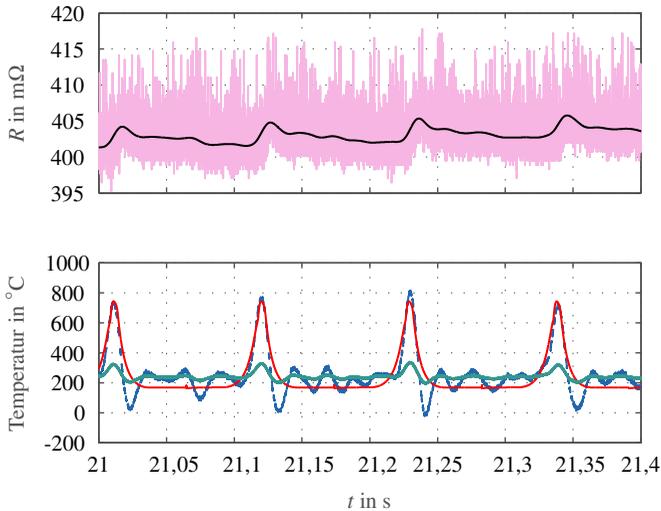


Abbildung 6.58 Temperaturbestimmung mittels linearem Modell (Teilbereich von Abbildung 6.47). —: gefilterter Widerstand $R_{\text{gefiltert}}(t)$, —: gemessener Widerstand $R_{\text{mess}}(t)$, —: Temperatur $T(t)$, —: berechnete Temperatur $\hat{T}(t)$, —: Ausgangsgröße des Hochpassfilters $y_{\text{HF}}(t)$.

gnal mit einem Hochpassfilter gefiltert werden. Über eine Folgefunktion lässt sich anschließend die Brennraumtemperatur ermittelt.

Ein berechnetes Beispiel ist in Abbildung 6.58 illustriert. Hierbei wurde die Ausgangsgröße des Hochpassfilters $y_{\text{HF}}(t)$ mit 6 faktorisiert, um den Verlauf von $y_{\text{HF}}(t)$ an den Temperaturverlauf $T(t)$ — anzunähern und die Ähnlichkeit beider Kurven zu vergleichen. Es ist deutlich zu sehen, dass ohne zusätzliche Verarbeitung des Sensorsignals die Berechnung nur für bestimmte Zyklen eine nicht ausreichend annähernde Übereinstimmung der Verläufe ($T(t)$ und $\hat{T}(t)$) liefert.

Als nächstes wird das Messsignal $R(t)$ zuerst von seinen niederfrequenten Anteilen befreit, danach wird es als Eingangsgröße dem Modell eingegeben. Wie in Abbildung 6.59 ersichtlich, liefert das Modell ohne Weiteres keine Brennraumtemperatur. Dies war aufgrund der Trägheit der Keramikglühkerze in beiden Fällen zu erwarten.

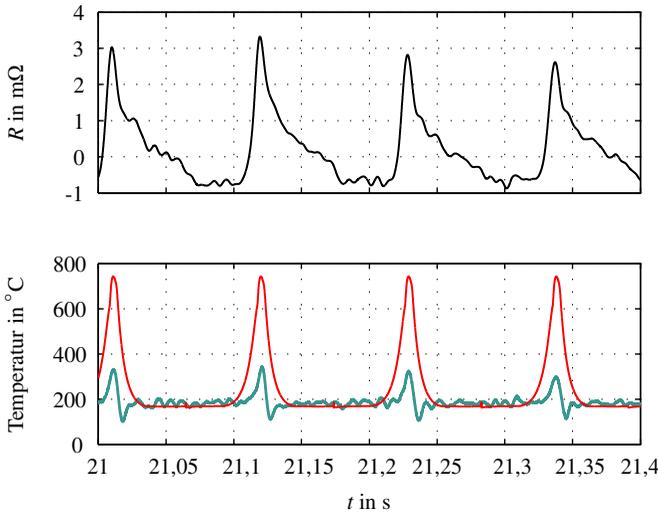


Abbildung 6.59 Temperaturbestimmung mittels linearem Modell. Widerstand ($R_{\text{gefiltert}}(t)$ in Abbildung 6.58 wurde von dem geleitenden Mittelwert befreit). —: gefilterter Widerstand $R_{\text{HF}}(t)$, —: Temperatur $T(t)$, —: Ausgangsgröße des linearen Modells $y_L(t)$.

Die Ausgangsgrößen $y_{\text{HF}}(t)$ sowie $y_L(t)$ beider Reihen lassen andererseits etwas anderes erkennen. Die Größe $y_{\text{HF}}(t)$ oder $y_L(t)$ kann beispielsweise mit einer sinc-Funktion (6.84) grob angenähert werden.

$$\delta(x) = \frac{K}{\pi \cdot [x - x_s]} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot [x - x_s]}{\ell}\right) + \text{Offset}, \quad (6.84)$$

wobei K den Faktor und x_s den Zeitpunkt des Temperaturpeaks darstellt. Dies wiederum konvergiert für $\lim_{\ell \rightarrow 0}$ gegen die Dirac-Funktion.

Anstelle der Dirac-Distributionen werden die Widerstandsverläufe – wie es bis jetzt der Fall war – im Folgenden zur Ermittlung der Brennraumtemperaturverläufe mittels Nichtlinearitäten genutzt. Dabei wird das lineare Modell durch nichtlineare Glieder erweitert. Unter Zugrundelegung von Abbildung 6.48 sowie Glg. (6.71) zur Beschreibung der statischen Nichtlinearität lässt sich mittels Levenberg-Marquardt-Verfahren (Abbildung 6.57) das Sensormodell identifizieren. Dafür wird im Folgenden das erstellte Modell Schritt für Schritt erweitert und diskutiert.

(1) **Das berechnete lineare Modell** (6.68) kann ohne weiteres kein brauchbares Ergebnis liefern, da es für das Verhalten der Kerze im niederfrequenten Frequenzbereich und in einem bestimmten Arbeitspunkt geeignet ist. Für den hochfrequenten Bereich sind ein Hochpassfilter und eine Optimierung zusätzlich notwendig.

(2) **Das geschätzte Modell** (6.70) liefert für die Temperaturschätzung keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da das lineare Modell – wie bereits erwähnt – aufgrund des Kerzenverhaltens und der vereinfachten Betrachtung träge ist. Mit Hilfe des Least-Square-Schätzers (Abtastzeit der Ein- und Ausgangsgrößen: $t_A = 1 \cdot 10^{-5}$) lassen sich die Koeffizienten (über den verschiedenen Motorbetriebspunkten eruierten Koeffizienten)

$$[b_0; b_1; b_2; b_3] = [0; 1,4096 \cdot 10^3; -2,6597 \cdot 10^3; 1,2501 \cdot 10^3] \text{ und}$$

$$[a_0; a_1; a_2; a_3] = [1; -1,4449; -0,0596; 0,5045]$$

ermitteln. Die Übereinstimmung zwischen dem ermittelten Modell (Zähler- und Nennerordnung 3) sowie der Realität liegt bei 60,1 % (FIT¹⁶: Fitnesswert). Als weiterer Wert zum Vergleich der gemessenen mit den geschätzten Temperaturverläufen wird die Abweichung der Temperaturspitzen pro Zyklus herangezogen. Bei mehreren Zyklen ermöglichen somit die Standardabweichung von Temperaturpeaks σ_{Peak} und der Fitnesswert eine Aussage über die Qualität der Schätzung.

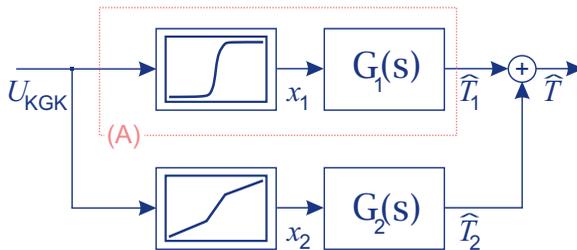


Abbildung 6.60 Identifikation des KGK-Sensormodells mit Hilfe der Hammerstein-Struktur (diese Parallelschaltung wird als Uryson-Modell bezeichnet). x_1 und x_2 : Zustandsgrößen des geschätzten Modells. \hat{T} : Geschätzte Temperatur.

¹⁶ Normalized root mean square error

(3) Das geschätzte Hammersteinmodell, welches eine Erweiterung des linearen Modells (6.70) in erster Linie mit einem Hammersteinblock darstellt, bietet sich als nächstes zum Ermitteln des Sensorverhaltens an. Als nichtlineares Glied wurde die Sigmoid-Funktion (6.74) 6-ter Ordnung eingesetzt, siehe Bereich (A) in Abbildung 6.60. Anstatt die Koeffizienten a_i, b_j des linearen dynamischen Übertragungsgliedes einfach vom letzten Modell zu übernehmen, werden sie hierbei ebenfalls geschätzt.

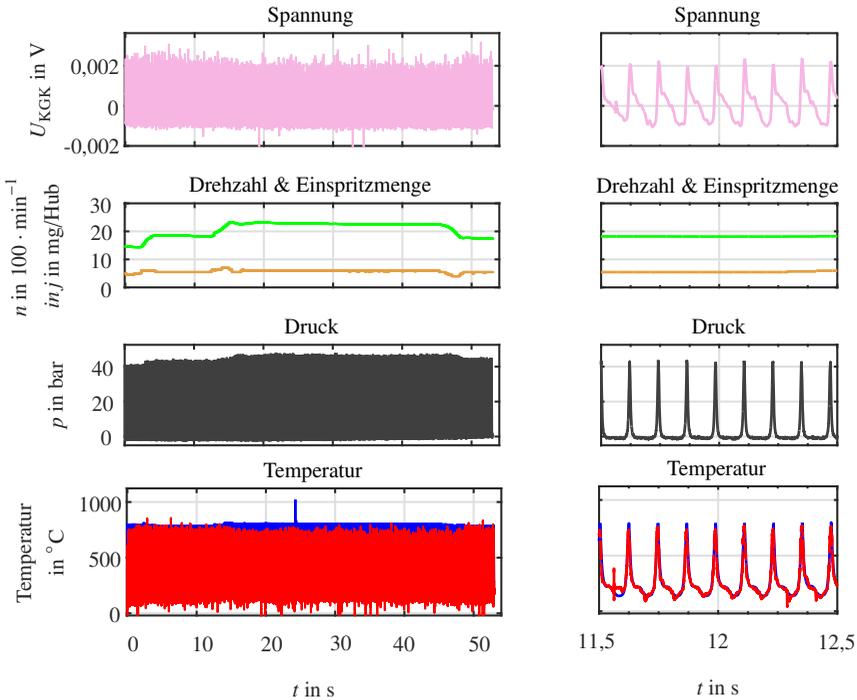


Abbildung 6.61 Temperaturbestimmung mittels Modell (3). —: Drehzahl $n(t)$, —: Einspritzmenge $inj(t)$, —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\hat{T}_1(t)$.

Dabei gibt es folgende Betrachtung an der Modellstruktur: Die Modellordnung der statischen Nichtlinearität m sei 1, und des linearen dynamischen Glieds n sei 3. Für das lineare Glied gilt:

$$\widehat{T}_1(n) = -a_{11} \cdot \widehat{T}_1(n-1) - a_{12} \cdot \widehat{T}_1(n-2) - a_{13} \cdot \widehat{T}_1(n-3) + b_{10} \cdot x_1(n) + b_{11} \cdot x_1(n-1) + b_{12} \cdot x_1(n-2) + b_{13} \cdot x_1(n-3), \quad (6.85)$$

wobei a_0 gleich 1 ist. Die Zustandsgröße x_1 , die eine Zwischengröße darstellt und in der Realität keinerlei Bedeutung hat, lässt sich aus der Spannung U_{KGK} , wie bereits in Gleichung (6.77) gezeigt, ermitteln:

$$x_1(n) = -(U_{\text{KGK}}(n) - r) \cdot \lambda_{s_1} + \frac{\alpha_{s_1}}{e^{-((U_{\text{KGK}}(n)-r)\beta_{s_1} + \gamma_{s_1})} + 1} + \kappa.$$

Da eine inverse Funktion der statischen Nichtlinearität für die Bestimmung von x_1 nicht erforderlich ist, können somit der statische und dynamische Teil sowohl „getrennt“ als auch „zusammen“ identifiziert werden. Die sich somit ergebenden 32 Parameter

$\Psi = [\alpha_{s_m}, \beta_{s_m}, \lambda_{s_m}, \kappa, \gamma_{s_m}, a_{1i}, b_{1j}]$ für $m=1, \dots, 6$, $i=1, 2, 3$ und $j=0, 1, 2, 3, 4$ werden unter Verzicht auf die Separierung mit der Abtastzeit t_A von $15 \cdot 10^{-5}$ s identifiziert.

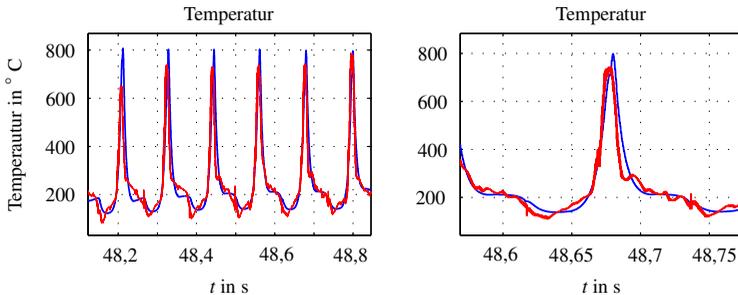


Abbildung 6.62 Temperaturbestimmung mittels Modell (3). Zwei Teilbereiche von Abbildung 6.61. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\widehat{T}_1(t)$.

Die Messdaten sind für die Identifikation der Parameter in zwei Gruppen eingeteilt. Ein Datensatz, welcher möglichst viele Motorbetriebspunkte abdeckt,

ist als Trainingsdatensatz VD10¹⁷, #06¹⁸ gewählt. Eine andere Überlegung wäre, den Trainingsdatensatz aus allen Messungen ideal zusammenzusetzen. Dies wird allerdings Einfachheit halber an der Stelle nicht vorgenommen.

Die Modellstruktur wird nicht für das Rauschen am Ausgang mit einem Filterterm erweitert, da die Ein- und Ausgangsgrößen – wie bereits erwähnt – im Vorfeld gefiltert werden und deswegen mit einem unkorrelierten Rauschen belastet sind.

Nachdem die Parameter Ψ identifiziert wurden, wird das Modell mit einem anderen Datensatz VD10b, welcher mit einer anderen Kerze #07 erfasst wurde, verifiziert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.61 illustriert. In der vergrößerten Darstellung 6.62 sind weitere Details zu sehen.

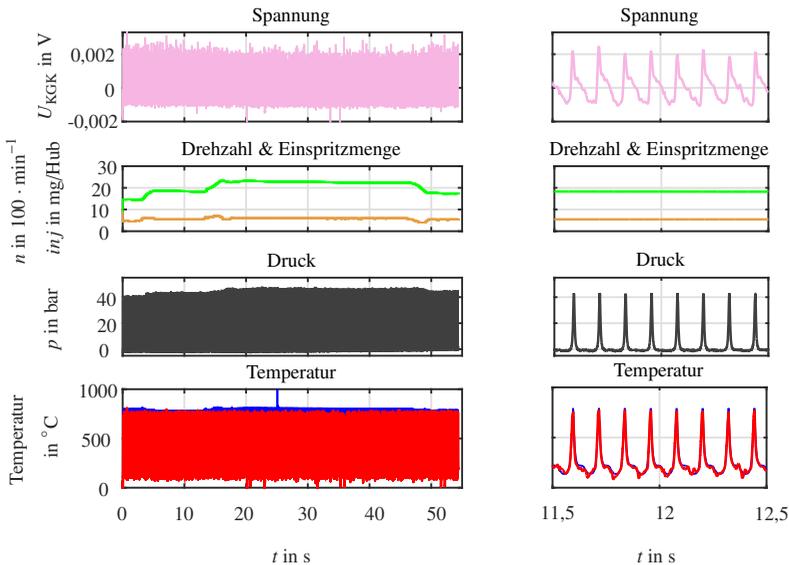


Abbildung 6.63 Temperaturbestimmung mittels Modell (4). —: Drehzahl $n(t)$, —: Einspritzmenge $inj(t)$, —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\hat{T}_1(t)$.

Im Vergleich zu den linearen Modellen liefert die Modellstruktur (3) bessere Ergebnisse (FIT= 67,8 %). Vor allem konnten die Spitzenwertabweichungen

¹⁷ Datensatznummer

¹⁸ Keramikglühkerzennummer

($\sigma_{\text{Peak}} = 99,2 \text{ K}$) reduziert werden. Die Kurbenwellen-Abweichung liegt bei $\sigma_{\text{KW}} = 9,22^\circ \text{KW}$. Trotz dieser Verbesserung sind deutlich höhere Abweichungen in hohen Drehzahlbereichen ($\sigma_{\text{Peak}} = 150,2 \text{ K}$) vorhanden als im linearen Modell, obwohl die trainierten Daten möglichst viele Bereiche abdeckten. Ein weiterer Aspekt, der zu berücksichtigen ist, ist, dass die Anzahl der Parameter von 6 auf 32 signifikant gestiegen ist.

(4) Die erweiterte Modellstruktur für eine Eingangsgröße (Kerzenspannung): Als nächstes wird das letzte Modell mit einer Parallelschaltung (NL: Stückweise lineare Funktion 3-ter Ordnung und L: Modell 3-ter Ordnung) erweitert, wie in Abbildung 6.60 dargestellt.

Für die Erweiterung gilt:

$$\widehat{T}(n) = \widehat{T}_1(n) + \widehat{T}_2(n),$$

wobei $\widehat{T}_2(n)$ sich entsprechend der $\widehat{T}_1(n)$ -Formel (6.85) berechnen lässt. Hierzu wird $x_2(n)$ über die stückweise lineare Funktion mit den drei Knickpunkten ($U_{(j)}, x_{(j)}$), $j = 1, 2, 3$ bestimmt. Diese Erweiterung heißt, dass die Anzahl der Parameter von 32 auf 45 steigt.

Für die Identifikation werden identische Datensätze wie im vorigen Schritt verwendet, damit der direkte Vergleich möglich ist. Abbildung 6.63 sowie 6.64 zeigen das Ergebnis.

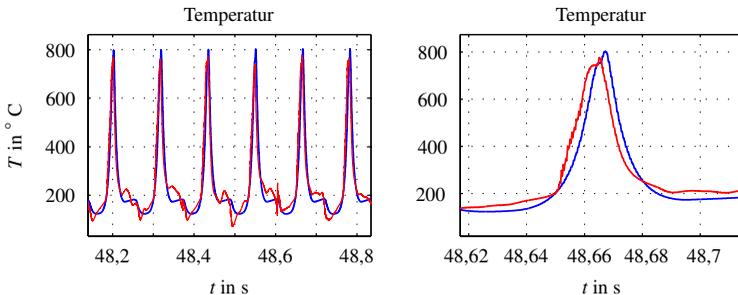


Abbildung 6.64 Temperaturbestimmung mittels Modell (4). Zwei Teilbereiche von Abbildung 6.63. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\widehat{T}_1(t)$.

Diese Erweiterung bringt eine bessere Übereinstimmung zwischen dem ermittelten KKG-Sensormodell sowie der Realität mit sich: $\text{FIT} = 73,45 \%$, $\sigma_{\text{Peak}} = 78 \text{ K}$. In der Kurbenwellen-Abweichung $\sigma_{\text{KW}} = 8,35^\circ \text{KW}$ und der zeitlichen Standardabweichung der Temperaturspitzen $\sigma_t = 0,0012 \text{ s}$ zeichnen sich jedoch keine signifikanten Änderungen ab. Allerdings ist im Vergleich

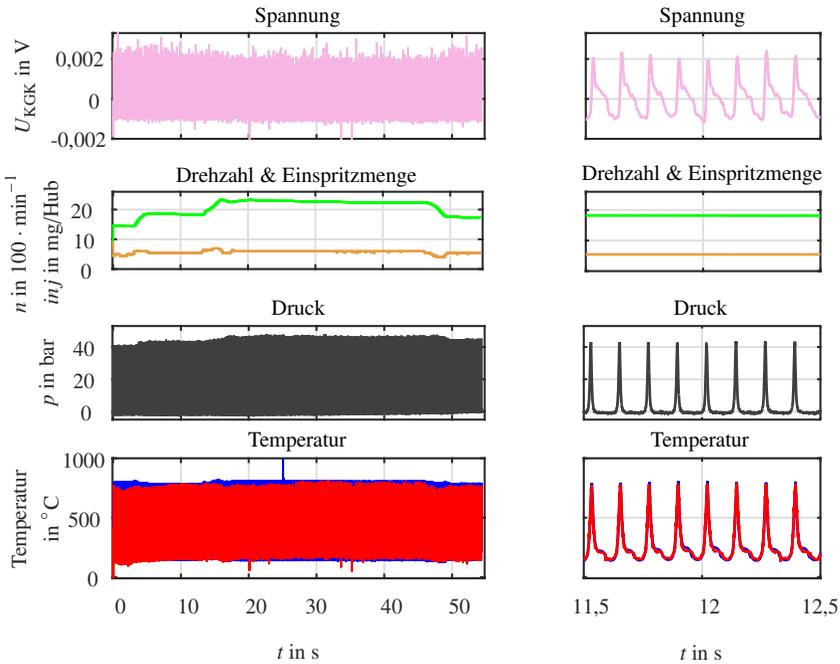


Abbildung 6.65 Temperaturbestimmung mittels Modell (5). —: Drehzahl $n(t)$, —: Einspritzmenge $inj(t)$, —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\hat{T}_1(t)$.

zu den vorigen Modellen eine Verbesserung in allen Drehzahlbereichen zu erkennen. Vor allem im Leerlaufbereich zeigt der Temperaturverlauf eine äußerst gute Übereinstimmung (über 90 %) mit der Solltemperatur.

(5) Die erweiterte Modellstruktur für mehrere Eingangsgrößen: Von nun an sind die Größen Drehzahl und Einspritzmenge, welche vom Motorsteuerggerät zur Verfügung gestellt werden, als Eingangsgrößen in die Schätzung integriert. Diese Erweiterung soll dazu dienen, die Temperaturänderungen in allen Motorbetriebspunkten besser zu ermitteln. Wie in Abbildung 6.67 ersichtlich, werden die Einflüsse beider Größen auf die Temperatur über die Hammerstein-Modelle realisiert, welche aus statischen, stückweise linearen Funktionen (3-ter Ordnung) und aus dynamischen Übertragungsfunktionen 3-ter Ordnung bestehen. Die geschätzte Temperatur der Erweiterung ist somit:

$$\hat{T}(n) = y_1(n) + y_2(n) + y_3(n) + y_4(n), \tag{6.86}$$

wobei die Ausgangsgrößen der Parallelschaltung $y_k(n)$, $k=1,\dots,4$ keinen realen Temperaturwerte entsprechen müssen. Gegenüber den ersten drei Modellstrukturen steigt dementsprechend die Anzahl der zu bestimmenden Parameter auf 71, da die Knickpunkte der statischen Glieder sowie die Koeffizienten der dynamischen Übertragungsglieder hinzukommen.

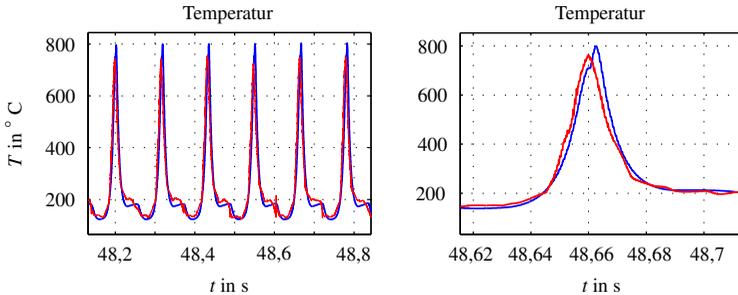


Abbildung 6.66 Temperaturbestimmung mittels Modell (5). Zwei Teilbereiche von Abbildung 6.65. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\widehat{T}_1(t)$.

In Abbildung 6.65 ist eine Verbesserung der Schätzung zunächst nicht offensichtlich. Der vergrößerte Ausschnitt in Abbildung 6.66 lässt jedoch eine Tendenz in Richtung der Optimierung erkennen, da eine bessere Übereinstimmung zwischen den Kurven evoziert wird. Obwohl die zeitliche Verschiebung bei dem ausgewählten Zyklus identisch aussieht, ist sie dennoch kleiner geworden (Kurbelwellenwinkel: $\sigma_{KW} = 6,35^\circ KW$, Zeit: $\sigma_t = 0,0008$ s). Der Übereinstimmungswert liegt bei 80,7 %. Die Standardabweichung der Spitzenwerte wird dabei schmaler und sinkt von $\sigma_{Peak} = 78$ K auf 62,2 K.

(6) Die optimierte Modellstruktur für mehrere Größen: Wie in allen Schätzergebnissen obiger Modellstrukturen zu sehen ist, bleiben die Spitzenabweichungen von \widehat{T} bestehen. Das heißt, im Spitzenbereich muss an der Temperatur eine Korrektur erfolgen, welche durch ein statisches Wiener-Glied durchgeführt werden kann.

In Abbildung 6.68 ist die Erweiterung dargestellt. Hierbei kommt als nicht-lineares Wiener-Glied die Polynomfunktion, die von dem Kurbelwellenwinkel abhängt, zum Einsatz. In diesem Falle gilt:

$$\widehat{T}(n) = \begin{cases} \widehat{T}_H(n), & \varphi_1 \leq \varphi_{KW} \leq \varphi_2 \\ \widehat{T}_H(n) \cdot (\alpha_1 \cdot \varphi_{KW}^2 + \alpha_2 \cdot \varphi_{KW} + \alpha_3), & \text{sonst,} \end{cases} \quad (6.87)$$

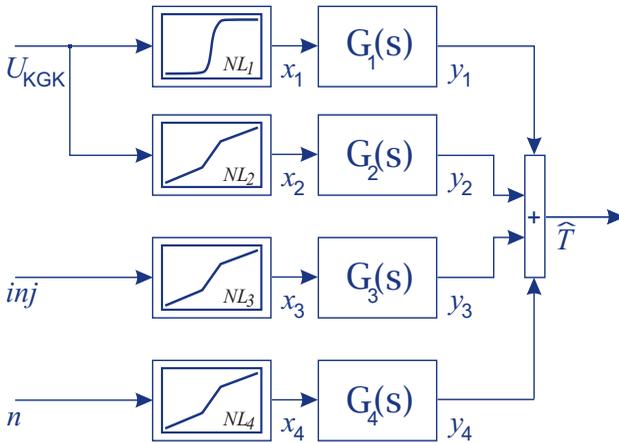


Abbildung 6.67 Identifikation des KGG-Sensormodells mit Hilfe der Hammerstein-Struktur. x_1 , x_2 , x_3 und x_4 : Zustandsgrößen des geschätzten Modells. \widehat{T} : Geschätzte Temperatur.

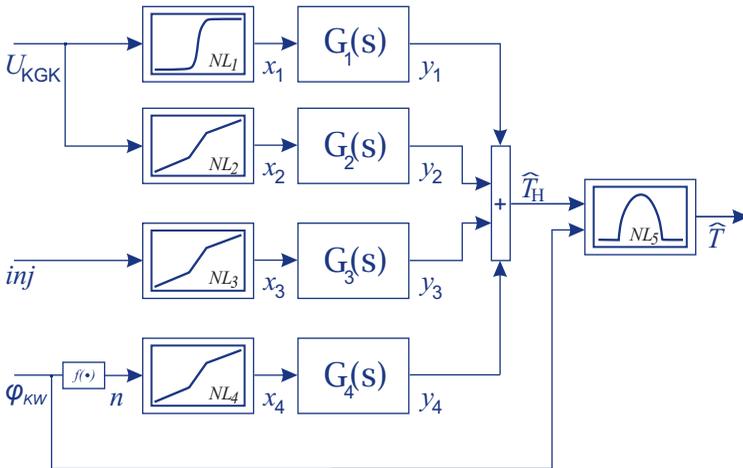


Abbildung 6.68 Identifikation des KGG-Sensormodells mit Hilfe der Hammerstein-Wiener-Struktur. x_1 , x_2 , x_3 und x_4 : Zustandsgrößen des geschätzten Modells. \widehat{T} : Geschätzte Temperatur, \widehat{T}_H : Geschätzte Temperatur vom Hammerstein-Modell.

wobei $\widehat{T}_H(n)$ der Gleichung (6.86) entspricht. Dies bedeutet, dass die zu identifizierenden Parameter Ψ um drei weitere Koeffizienten α_1, α_2 sowie α_3 extendieren.

Mit den identischen Messdaten – wie bereits verwendet– kommt das Resultat in Abbildung 6.69 zustande.

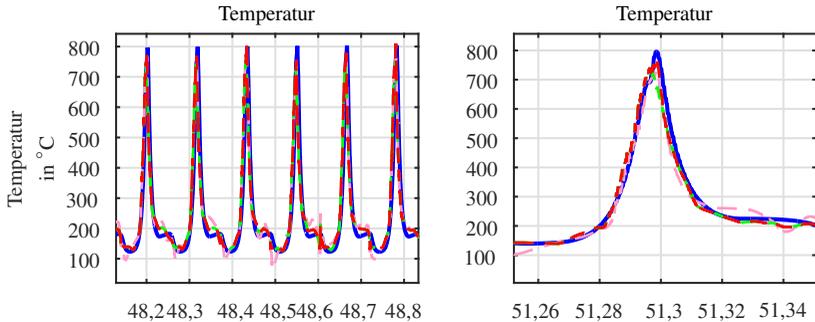


Abbildung 6.69 Vergleich der Temperaturbestimmung. —: Solltemperatur $T(t)$, Isttemperaturen $\widehat{T}_1(t)$: —: Modell (4), —: Modell (5), —: Modell (6).

Tabelle 6.5 Vergleich der ermittelten Modelle. N_Ψ : Anzahl der zu bestimmenden Parameter; Abweichung der Spitzentemperaturwerte: Mittelwert $MW_{\widehat{T}}$ sowie Standardabweichung $\sigma_{\widehat{T}}$, FIT: Prozentuale Angabe der Annäherung.

Modell	N_Ψ	Validierungsfehler		FIT
		Spitzenwerte/K		
		$MW_{\widehat{T}}$	$\sigma_{\widehat{T}}$	
(2)	6	76	166	60,1 %
(3)	25	70	99,2	67,8 %
(4)	44	60	78	73,45 %
(5)	71	43	62,2	80,7 %
(6)	74	22	37,5	88,3 %

Im Vergleich zu den Modellen (4) und (5) liefert das Modell (6) bessere Ergebnisse bezüglich der Schätzgenauigkeit. Zwischen den Modellen (5) und (6) ist der Unterschied im Spitzenbereich deutlich. Durch die Erweiterung geht die Standardabweichung der Spitzentemperaturen von $\sigma_{\text{Peak}} = 62,2$ K auf 37,5 K. Mit 88,3 % stimmt die Soll- und die Isttemperatur überein.

Tabelle 6.6 Vergleich der eingesetzten Keramikglühkerzen. Abweichung der Spitztemperaturwerte: Mittelwert $MW_{\hat{T}}$ sowie Standardabweichung $\sigma_{\hat{T}}$, FIT: Prozentuale Angabe der Annäherung

Kerze	R_{Kalt} in m Ω	Validierungsfehler		FIT
		$MW_{\hat{T}}$	$\sigma_{\hat{T}}$	
#03	251	31,3	27,3	84,51 %
#06	231	18,1	30,2	89,94 %
#07	244	22	37,5	88,30 %
#10	244	22	37,5	88,30 %
#008	195	23,6	29,03	83,71 %
#394	211	28	31,24	84,03 %

In Tabelle 6.5 werden zum Vergleich die Ergebnisse der Modelle zusammengetragen. Dabei wurden die Identifikation und Temperatursimulationen mit der Abtastzeit t_A von $1,5 \cdot 10^{-4}$ s und mit den 86 Iterationsschritten, welche nahezu als optimal angenommen werden können, vorgenommen. Gegenüber der linearen Betrachtung weist das letzte Hammerstein-Wiener-Modell (6) bei diesen Messdaten ein beachtliches Fitting-Resultat von 88,3 % auf. Des Weiteren lassen sich die Abweichungen im Zeit- und Wertebereich (betrachtet am Spitzenwert pro Zyklus) minimieren.

Die nächste Tabelle 6.6 stellt die Keramikglühkerzen #03, #06, #07, #10, #008 sowie #394 gegenüber. Eingesetzt wird das letzte Modell mit den identischen Einstellungen. Dabei sind die Serienkerzen #008 und #394 aus den unterschiedlichen Produktionschargen.

Es wird hierbei bestätigt, dass die Schätzmethode – Abbildung 6.57 – mit Annahmen über Modellstruktur (Hammerstein-Wiener-Modelle) bei allen eingesetzten Kerzen ähnliche Modellgüte liefert.

Da die Einspritzmenge (siehe Abbildung 6.61, 6.63 und 6.65) sich bei den Messdaten kaum ändert, ist eine allgemeine Aussage über die Qualität dieser Modelle schwer zu treffen. Dies zeigt schließlich, dass alle Motorbetriebspunkte (z. B. hohe Last), das heißt gewisse fahrdynamischen Zustände, damit nicht gedeckt sind. Nur eine minimale Last < 50 Nm lässt sich aus diesen Messdaten erkennen. Für den Leerlaufbereich liegt die Genauigkeit im Großen und Ganzen über 85 %.

Aus diesen Gründen kommen die Messdaten von einem anderen Fahrzeug zum Einsatz, welche einen größeren Bereich abdecken. Das heißt,

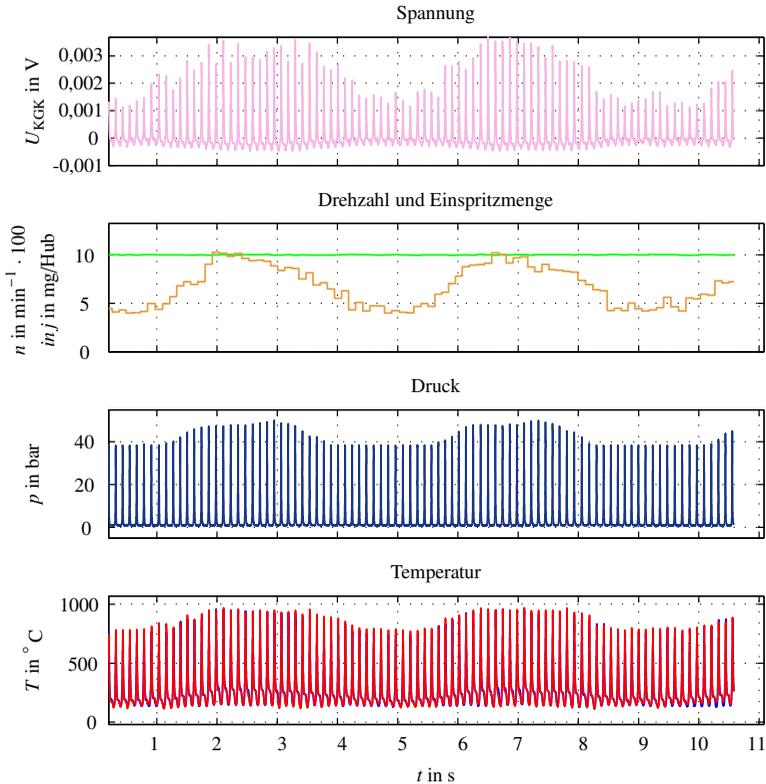


Abbildung 6.70 Temperaturbestimmung mit den Daten vom Fahrzeug 2. Drehmoment ist 50 Nm. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\widehat{T}_1(t)$ von Modell (6).

der untersuchte Motorbetriebsbereich wird relativ zu dem ersten Motor größer. Leider kam bei der Messung nur eine Keramikglühkerze zum Einsatz und es wurden sehr wenige Messkurven aufgenommen.

Eingesetzt wird als Basis das letzte Modell (6), wobei es aufgrund der mehr gewordenen Motorbetriebspunkte an dem nichtlinearen statischen Wienerglied mit der stückweise definierten Funktion 3-ter Ordnung (3 Stützstellen: u_i und f_i , $i = 1, 2, 3$) erweitert wird. Demzufolge gilt für $\widehat{T}_H(n)$ der Gleichung (6.87):

$$\widehat{T}_{H_{in}}(n) = (y_1(n) + y_2(n) + y_3(n) + y_4(n)),$$

$$\widehat{T}_H(n) = \begin{cases} \widehat{T}_{H_{in}}(n) + f_1, & \widehat{T}_{H_{in}}(n) < u_1 \\ \frac{f_2 - f_1}{u_2 - u_1} \cdot (\widehat{T}_{H_{in}}(n) - u_1) + f_1, & u_1 \leq \widehat{T}_{H_{in}}(n) < u_2 \\ \frac{f_3 - f_2}{u_3 - u_2} \cdot (\widehat{T}_{H_{in}}(n) - u_2) + f_2, & u_2 \leq \widehat{T}_{H_{in}}(n) < u_3 \\ (\widehat{T}_{H_{in}}(n) - u_3) + f_3, & \widehat{T}_{H_{in}}(n) \geq u_3. \end{cases} \quad (6.88)$$

Demzufolge steigt die Anzahl der zu identifizierenden Parameter Ψ von 74 auf 80. Diese Änderung ist allerdings überschaubar und dadurch wird der Rechenaufwand kaum zunehmen. Abbildung 6.70 illustriert das Verifikationsresultat für 50 Nm Drehmoment (z. B. Klimaanlage und weitere Last). Durch den Einsatz der gemessenen Sensorspannung U_{KKG} (im obigen Teilbild), welche eine dynamische Änderung in Abhängigkeit der Einspritzmenge – konstante Drehzahl – aufweist, liefert das Modell für die Schätzung der durch diese Last verursachten Temperatur eine Kongruenz von 87,2 %. Die Standardabweichung $\sigma_{\hat{T}}$ der Spitzenwerte ($T_{Peak}(t)$ und $\widehat{T}_{Peak}(t)$) weist einen Wert von 36 K auf.

Beim Erhöhen des Drehmoments von 50 Nm auf 100 Nm entstehen folgende Werte: FIT= 81,2 %, $\sigma_{\hat{T}} = 45$ K, $\sigma_t = 0,00073$ s und $\sigma_{KW} = 4,70$ °KW. Das Ergebnis ist in den Abbildungen 6.72, 6.73 sowie 6.74 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Genauigkeit der Temperaturschätzung mit steigender Drehzahl abnimmt. Bei hohen Drehzahlen sollte die Messdatenaufzeichnung mit angepasster Abtastfrequenz durchgeführt werden, was allerdings nicht realisiert werden konnte. Mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten war die Anpassung der Abtastfrequenz nicht ohne Weiteres möglich.

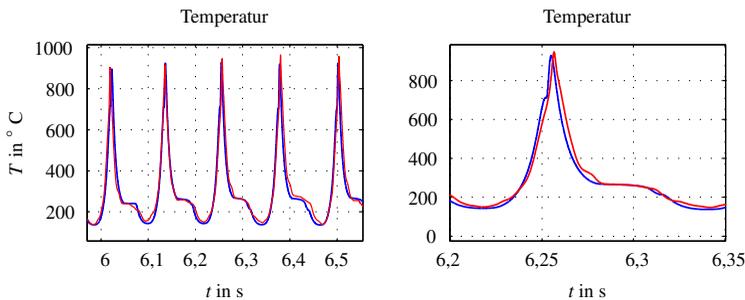


Abbildung 6.71 Temperaturbestimmung mittels Modell (6). Zwei Teilbereiche von Abbildung 6.70. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\widehat{T}_1(t)$ von Modell (6).

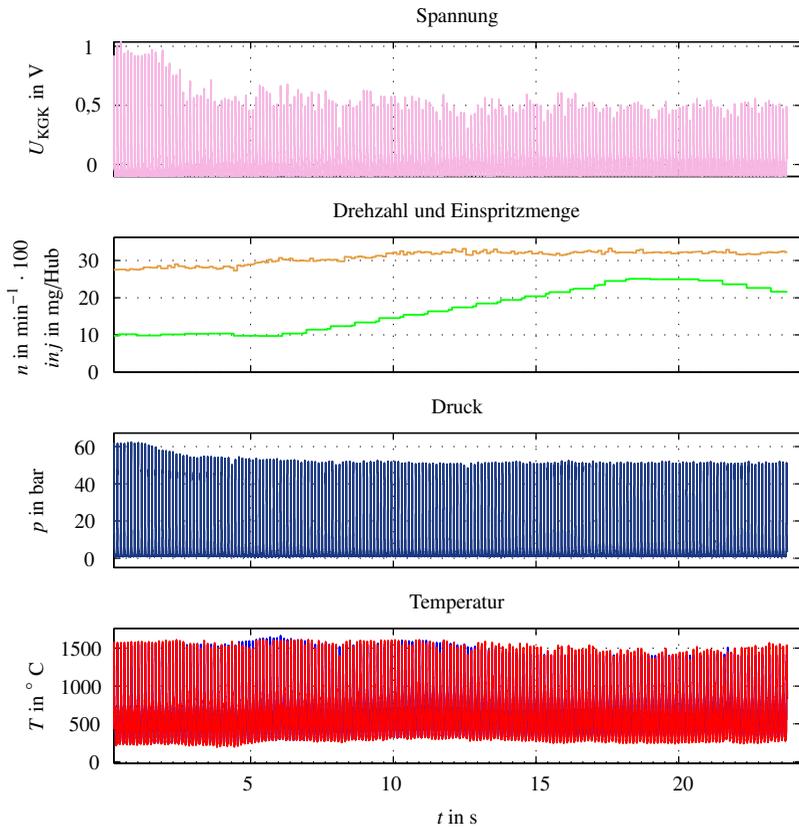


Abbildung 6.72 Temperaturbestimmung mit den Daten vom Fahrzeug 2. Drehmoment ist 100 Nm. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\hat{T}_1(t)$ von Modell (6).

6.3.5 Fazit

In diesem Kapitel wurden lineare und nichtlineare Methoden zur Ermittlung der Brennraumtemperatur untersucht. Angefangen mit der Herleitung eines linearen dynamischen Modells lies sich der Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Kerzenwiderstand untersuchen. Da das Modell nicht das Aktuatorverhalten der Keramikglühkerze, sondern das Sensorverhalten widerspiegeln soll, wurde das hergeleitete Modell 3. Ordnung invertiert. Dieses Modell liefert

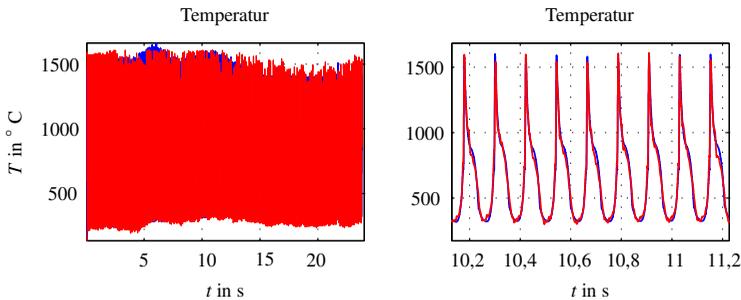


Abbildung 6.73 Temperaturbestimmung mit den Daten vom Fahrzeug 2. Drehmoment ist 100 Nm. Zwei Teilbereiche von Abbildung 6.72. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\hat{T}_1(t)$ von Modell (6).

Tabelle 6.7 Vergleich der Verifikationsergebnisse in Abhängigkeit des Drehmoments (Fahrzeug 2). Abweichung der Spitzentemperaturwerte: Mittelwert $MW_{\hat{T}}$ sowie Standardabweichung $\sigma_{\hat{T}}$, FIT: Prozentuale Angabe der Annäherung.

Drehmoment	Validierungsfehler		FIT
	Spitzenwerte/K		
	$MW_{\hat{T}}$	$\sigma_{\hat{T}}$	
LL	31,3	27,3	84,51 %
50 Nm	18,1	30,2	89,94 %
100 Nm	18,1	30,2	89,94 %
200 Nm	28	31,24	84,03 %

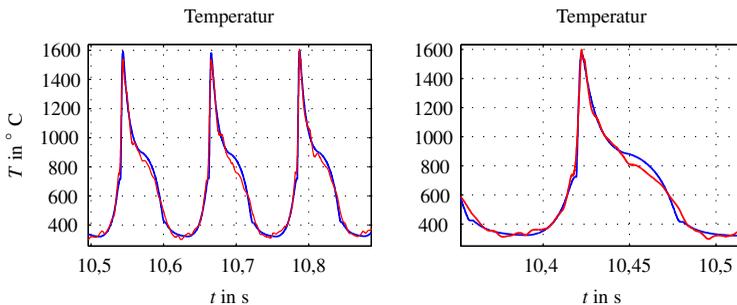


Abbildung 6.74 Temperaturbestimmung mit den Daten vom Fahrzeug 2. Drehmoment ist 100 Nm. Zwei Teilbereiche von Abbildung 6.72. —: Solltemperatur $T(t)$, —: Isttemperatur $\hat{T}_1(t)$ von Modell (6).

für die Bestimmung der langsamen Temperaturänderungen (Niederfrequenzbereich) gute Ergebnisse. Im hochfrequenten Bereich, d. h. bei den sich schnell ändernden Temperaturen, bringt es unzureichende Ergebnisse. Dementsprechend wurde der Frage nach der nichtlinearen Erweiterung des dynamisch-linearen Modells anschließend nachgegangen. Das bekannte Konzept Hammerstein-Wiener-Modelle ermöglicht die Schätzung von Brennraumtemperaturen mit der hierbei eingesetzten Methode, welche auf dem Levenberg-Marquardt-Verfahren basiert.

Obwohl die Messdaten zum Teil mit schlechter Signalqualität aufgezeichnet sind, konnte in diesem Kapitel illustriert werden, dass die Herangehensweise zur Schätzung der Brennraumtemperatur über die Glühkerzenspannung (Sensorspannung) möglich ist. Durch die Hinzunahme weiterer Größen wie etwa der Drehzahl oder der Einspritzmenge, welche im Fahrzeug zur Verfügung stehen, konnten die geschätzten Temperaturverläufe verbessert werden. Mit steigender Drehzahl war allerdings eine Verschlechterung der Schätzergebnisse zu beobachten. Die unterschiedlichen Kerzen lieferten ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse. Womöglich sind die beschilderten Kerzenstreuungen dafür hauptsächlich verantwortlich.

Ergebnisse mit den Messdaten zeigen, dass die vorgestellte Methode in der Lage ist, die Brennraumtemperatur – zumindest in den untersuchten Motorbetriebspunkten – mit einer Kongruenz von etwa 80 – 90 % zu ermitteln. Diese unkonventionelle Methode kann einerseits durch die Optimierung des Kerzenverhaltens hinsichtlich der Kerzenantwort auf die Temperaturänderung und andererseits anhand der Mangelbeseitigung beim Messdatenaufzeichnen verbessert werden.

6.4 Methode zur Schätzung des Brennraumdrucks

Der Druck ist für viele Motorprozesse die Größe, welche den Verbrennungsprozess verlässlich beurteilen lässt. Aufgaben wie Verbrennungsoptimierung, Verbrennungssteuerung oder Verbrennungsregelung können durch Hinzunahme des Drucksignals als Messgröße wesentlich besser absolviert werden. Ein weiterer Punkt, der die Relevanz des Drucks beim Dieselmotor hervorhebt, ist die Verbrennung mit Gleichdruck. Vorteile wie etwa die Ortsunabhängigkeit sowie die homogene Verteilung des Drucks im Brennraum bilden das Fundament zur verlässlichen Druckermittlung. Da die Wichtigkeit des Drucks im Kapitel „Stand der Technik“ bereits dargestellt wurde, wird hier darauf verzichtet.

Im Gegensatz zur Temperatur erfordert das Schätzen der Druckverläufe keine Vorbereitung der Trainingsdaten, da das während der Messung mitaufgezeichnete Drucksignal für die Identifikations-Aufgabe zur Verfügung gestellt werden kann.

Zum Schätzen des starken und dynamischen Verbrennungs-Drucks, welcher ein Produkt des Energieumwandlungsprozesses ist, wird die Temperaturänderung im Brennraum als Zustandsgröße betrachtet. Wieso sich das Temperatursignal für diese Schätzaufgabe anbietet, lässt sich in folgenden Zeilen verdeutlichen.

Ausgegangen vom idealen Gasgesetz¹⁹ ist der Zusammenhang beider Größen:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T, \quad (6.89)$$

wobei p den Druck, V das Zylindervolumen, n die Stoffmenge, R die universelle Gaskonstante und T die Temperatur beschreiben. Dieses Gesetz behält allerdings nur bei Druck-Werten, die kleiner als 5 bis 6 bar sind, seine Gültigkeit. Sobald die Grenze überschritten wird oder bei Phasenübergängen (flüssig, gasförmig) verliert (6.89) seine Gültigkeit. Für die Anpassung dieser Abhängigkeit wird deshalb ein Schritt weiter gegangen. Bei der Prozessrechnung werden allgemein verschiedene Herangehensweisen praktiziert. Entweder muss

¹⁹ Unter idealen Gasen versteht man in den Naturwissenschaften ein spezielles Modellsystem von realen Gasen, bei dem man annimmt, dass die Atome oder Moleküle kein Eigenvolumen besitzen und keine Wechselwirkungen untereinander zeigen [112].

der Realgasfaktor in die Berechnung für diverse Temperatur- und Druckwerte einbezogen werden, oder die allgemeinen Gasgleichungen wie die (Soave-) Redlich-Kwong-Zustandsgleichung, die Virialgleichungen oder die Van-der-Waals-Gleichung müssen zum Einsatz kommen [60]. Betrachtet wird beispielsweise die Van-der-Waals-Gleichung:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - a \cdot \left(\frac{n}{V}\right)^2. \quad (6.90)$$

Die Van-der-Waals-Gleichung aufgelöst nach der Temperaturvariable T ergibt:

$$T = p \cdot \left(\frac{V - n \cdot b}{n \cdot R}\right) + a \cdot \left(\frac{V - n \cdot b}{n \cdot R}\right) \cdot \left(\frac{n}{V}\right)^2, \quad (6.91)$$

wobei a und b die Korrekturfaktoren sind. Diese reale Gas-Betrachtung mit intermolekularem Wechselwirkungspotential zwischen den Teilchen macht es auch deutlich [60], dass der Druck mithilfe von T geschätzt werden kann. Demzufolge kann die Wirkungsweise in Abbildung 6.31 mit p wie in Abbildung 6.75 verdeutlicht werden.

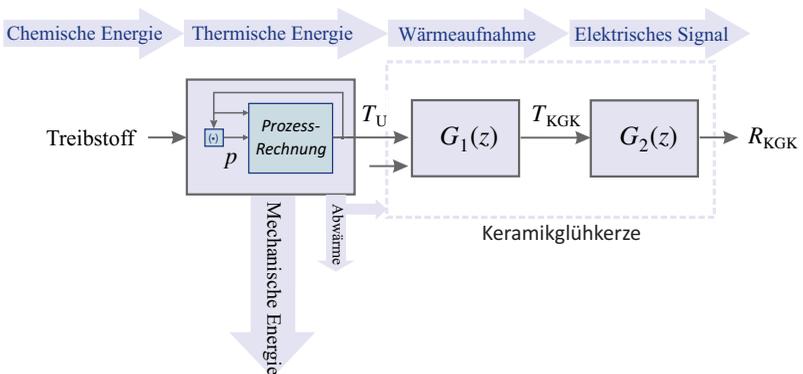


Abbildung 6.75 Vereinfachte Wirkungsweise relevanter Größen für die Schätzung des Drucks. p : Brennraumdruck, T_U : Brennraumtemperatur, T_{KGK} : Kerzentemperatur und R_{KGK} : Kerzenwiderstand, (-): Berechnung mit Gasgleichung.

Diese verhältnismäßig einfache Darstellung der Wirkungsweise kann für die Druckschätzung folgendermaßen interpretiert werden:

- Eine korrekte thermodynamische Betrachtung zur Bestimmung von T (auch p) erfordert bei Verbrennungsmotoren Korrekturglieder, unabhängig von idealen oder realen Gasgleichungen. Dabei sind Wandwärmübergang, Wärmestrahlungen, Ladungswechsel, Brennverläufe und Strömungen Teile der Prozessrechnung.
- Die während des 4-Takt-Arbeitsprozesses (Umsetzung des Treibstoffes in mechanische Energie) entstehenden Größen Druck und Temperatur hängen voneinander ab.
- Eine Druckänderung hat immer eine Temperaturänderung zur Folge.
- Es wird angenommen, dass die Temperaturverläufe in unmittelbarer Nähe der KGK-Kappe im Brennraum proportional zu den mittleren Brennraum-Temperaturverläufen sind.
- Die Kerzentemperatur ändert sich hauptsächlich durch die Brennraumtemperatur. Andere Ursachen werden als Störgrößen behandelt.
- Die elektrische Größe R_{KGK} ist in Abhängigkeit von der Temperatur physikalisch bestimmbar.

Eine analytische Bestimmung des Drucks p aus der elektrischen Größe R_{KGK} ist komplex (6.75). Der erste Grund dafür ist die komplexe Prozessrechnung, die für den thermodynamischen Prozess im Brennraum erforderlich ist. Als zweiter Grund kann die Trägheit der Keramikglühkerze gesehen werden, da eine analytische Modellierung komplexe Gleichungen liefern wird. Mögliche Zustandsgrößen als Hilfsgrößen T_U und T_{KGK} sind dabei nicht messbar, siehe Abbildung 6.76.

Aus den obigen Punkten / Annahmen ist zu erkennen, dass der Brennraumdruck ungeachtet von den genaueren thermischen Abhängigkeiten über den Temperatureinfluss auf die Kerze zu schätzen ist. Der wesentliche Vorteil dieser Vorgehensweise ist die einfache Erstellung von Trainingsdaten, da der Brennraumdruck homogen ist und an jedem Motorprüfstand automatisch für jeden Motorbetriebszustand (Motorbetriebspunkt) mit aufgezeichnet wird. Die Druckverläufe können außerdem mit vielen bereits bestehenden Modellen aufgrund der Homogenität genau und einfach simuliert werden.

Neben dem bekannten Kerzenverhalten im hochfrequenten Bereich (Kleinsignalverhalten) erfordert der nichtlineare thermodynamische Prozess eine nicht-lineare Betrachtung der Identifikationsaufgabe.

6.4.1 (Nichtlineare) Modellierung

Die modellierungstechnische und experimentelle (Prozess-)Analyse der Keramikglühkerze als Drucksensor beruht auf die Anwendung des A-priori-Wissens über die Keramikglühkerze als Temperatursensor aus dem vorigen Kapitel sowie auf die definierten Signalfolgen. Diese Definition erfordert, wie bereits erwähnt, die bestehende Interdependenz zwischen der Brennraumtemperatur und den Brennraumdruck, siehe Abbildung 6.75, auf eine einfache Annahme zu reduzieren: Der verbrennungsbedingte Druck verursacht eine Temperaturänderung im Brennraum, welche folglich den Widerstand der KGK beeinflusst. Somit ist dieser Prozess die Strecke (6.76), welche die Brennraumprozessrechnung sowie das Kerzenverhalten beinhaltet.

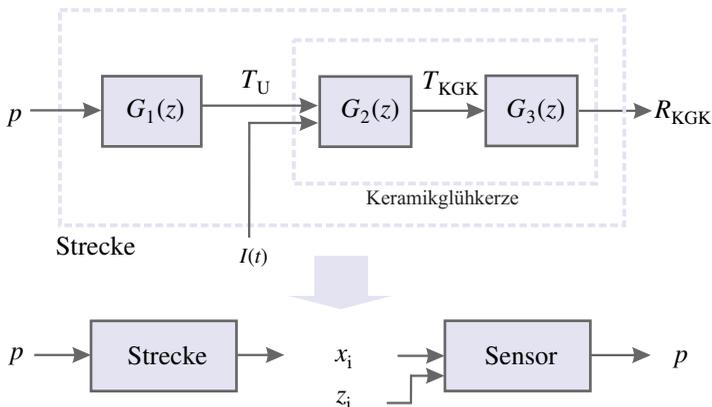


Abbildung 6.76 Vereinfachte Darstellung der Strecke mit der Eingangsgröße p und Ausgangsgröße R_{KGK} . Inverse Betrachtung der Strecke führt zum Sensormodell. x_i : Ausgangsgrößen der Strecke sowie Eingangsgrößen des Sensors, wobei der Kerzenwiderstand R_{KGK} auch dazu gehört. z_i : Weitere Eingangsgrößen des Sensormodells. Für $I_{KGK} = 1A$ gilt: $R_{KGK} \propto U_{KGK}$.

Die zuvor auf Basis der Hammerstein-Wiener-Modelle erzeugte Temperaturschätzlogik wird hierbei herangezogen. Ziel ist es, weder die Zwischengrößen T_U , T_{KGK} sowie ihre Interaktionen noch eine Information über tatsächliche thermodynamische Prozessrechnung im Brennraum ermitteln zu müssen, sondern die Modellstruktur und deren Parameter aus den Ein- und Ausgangsgrößen der Strecke experimentell zu konstatieren. Der Grund dafür ist, dass die Herleitung eines inversen Streckenmodells wegen der betriebspunktabhängigen komplexen Brennprozessrechnung – u. a. Schätzung der Randbedingungen, Schät-

zung oder Berechnung des Ladungswechsels – sowie exakten Kerzenbetrachtung für diese Aufgabe einen hohen Rechenaufwand in Anspruch nehmen wird, ohne dabei eine genaue Invertierung zu liefern. Somit ist der Druck für eine sensortechnische Betrachtung die Schätzgröße und der Kerzenwiderstand eine der Eingangsgrößen des Sensormodells. Die messdatenabhängige Bestimmung des inversen Prozessverhaltens erfolgt iterativ mit der Levenberg-Marquardt-Methode, welche in Abbildung 6.57 dargestellt wurde.

Abgesehen von den neuen Ein- und Ausgangsgrößen (Messdaten) ist die Herangehensweise die gleiche wie in Abschnitt 6.3. Für die Bestimmung des Brennraumdrucks ist demzufolge die Methode wie folgt zu verstehen:

1. Ein- und Ausgangsgrößen werden definiert. Dementsprechend stehen die Anzahl der Eingangsgrößen ebenfalls fest.
2. Filterung der Rohsignale, so dass möglichst wenig Rausch- und Störsignale im Signal enthalten sind. Dies bedeutet: Das Nutzsignal unterliegt keinen nutzlosen stochastischen und deterministischen Komponenten.
3. Modellstruktur festlegen.
4. Anzahl der Iterationsschritte vorgeben.
5. Nichtlineare Funktionen sowie deren Ordnungen festlegen.
6. Ordnung der dynamischen Glieder vorgeben.
7. Parameter der Levenberg-Marquardt-Methode einstellen.
8. Modellparameter entsprechend der Methode in Abbildung 6.57 identifizieren
9. Verifizierung des Modells.
10. Auswertung der Ergebnisse.
11. Solange das Ergebnis nicht ausreichend gut ist:
 - a) Schritte 4 bis 7 einzelnen anpassen
 - b) Schritte 4 bis 10 wiederholen.

Als Nächstes wird die Ermittlungs-Möglichkeit des Brennraumdruckverlaufs nur mittels der KGK-Spannung (Widerstand) untersucht. Es wird angenommen, dass die Beziehung zwischen p und U_{KGK} sich mathematisch formulieren lässt. Obwohl das Volumen V sich mit der Bewegung des Kolbens ändert und wegen des komplexen Verbrennungsvorganges die Berechnung, wie bereits erwähnt, nicht so einfach durchzuführen ist. Das Sensormodell sei dabei die inverse Betrachtung der Strecke in Abbildung 6.76 und die Ein-/Ausgangsbeziehung zwischen p und T gilt:

$$p(k) = \frac{n \cdot R \cdot T_U(k)}{V - n \cdot b} - a \cdot \left(\frac{n}{V}\right)^2. \quad (6.92)$$

Für die Temperatur ergibt sich

$$T_U(z^{-1}) = p(z^{-1}) \cdot \left(\frac{V - n \cdot b}{n \cdot R}\right) + a \cdot \left(\frac{V - n \cdot b}{n \cdot R}\right) \cdot \left(\frac{n}{V}\right)^2, \quad (6.93)$$

wobei $U_{\text{KGK}}(k)$ von $T_U(k)$ – wie zuvor für die niederfrequenten Temperatureinflüsse hergeleitet – (Gleichung 6.58) abhängen soll:

$$U_{\text{KGK}}(z^{-1}) = \frac{b_{z0} + b_{z1} \cdot z^{-1} + b_{z2} \cdot z^{-2} + b_{z3} \cdot z^{-3}}{a_{z0} + a_{z1} \cdot z^{-1} + a_{z2} \cdot z^{-2} + a_{z3} \cdot z^{-3}} \cdot T_U(z^{-1}). \quad (6.94)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Temperaturen $T_{\text{KGK}(j)}(z^{-1})$, $j = 1, 2, 3$ von 3 Halbleiterbereichen als Zustandsgrößen nach (6.76) für die Bestimmung betrachtet werden.

Durch das Einsetzen der Gleichung 6.93 in 6.94 lässt sich eine Beziehung zwischen $U_{\text{KGK}}(z^{-1})$ und $p(z^{-1})$ aufstellen. Trotz der Annahmen bezüglich der Vereinfachung liefern die obigen Gleichungen einerseits eine Möglichkeit zur mathematischen Beschreibung der Strecke. Andererseits ist es aus Abschnitt 6.3 bekannt, dass es mit der Gleichung (6.94) nicht möglich ist, mit konstanten Koeffizienten die hochfrequenten Temperatureinflüsse ausreichend gut wiederzugeben, da sie aus den temperaturabhängigen Parametern (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeübergangskoeffizient) der Teilbereiche ermittelt werden müssen. Störend wirkt sich dessen ungeachtet der niederfrequente Temperatureinfluss aus, da er bei der Druckermittlung nicht nützlich ist.

Für eine physikalische Berechnung kann die Teilstrecke Motorprozessrechnung (Abbildung 6.75) mit Gleichung (6.93) nicht ausreichend gut wiedergegeben werden. Dies erfordert eine Betrachtung dieses Prozesses mit zusätzlichen

Gleichungen und Parametern, was die anschließende Invertierung dieses Systems, also die mathematische Prozessrechnungsbeschreibung, erschwert.

Durch die Anwendung der bekannten Hammerstein-Wiener-Struktur, die aus Messdaten das inverse Verhalten der Strecke mit linearen und nichtlinearen Teilen abfängt, lässt sich die Motorprozessrechnung mit deutlich weniger Parametern und einfacheren Gleichungen berechnen. Das heißt, zum Nachbilden des statischen Verhaltens werden die nichtlinearen Sigmoid-Funktionen, stückweise linearen Funktionen sowie Polynome n-ter Ordnung eingesetzt (Schritt 5). Andere Gleichungen sind ebenso möglich, werden jedoch aufgrund des Zeitaufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht analysiert.

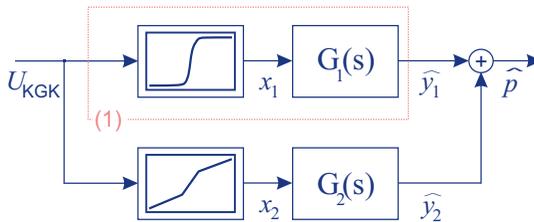


Abbildung 6.77 Identifikation des Druck-Sensormodells mithilfe der Hammerstein-Struktur (diese Parallelschaltung wird als Uryson-Modell bezeichnet). x_1, x_2 : Zustandsgrößen des geschätzten Modells. \hat{p} : Geschätzter Druck, \hat{p}_H : Geschätzte Druck vom Hammerstein-Modell.

Mit der Hammerstein-Struktur (Abbildung 6.77, rot gekennzeichnete Teilstrecke) wird die erste Schätzung durchgeführt. Einzige Eingangsgröße ist die Kerzenspannung U_{KGK} und die Ausgangsgröße ist der Druck $\hat{y}_1 = \hat{p}_H$. Die angewendete Spannung ist das gefilterte Signal, welches von den stochastischen und deterministischen niederfrequenten Signalanteilen/ Komponenten weitestgehend befreit wurde. Dadurch unterliegt das Nutzsinal keiner Drift und Störung. Die Ordnung des linearen Glieds sei $n = 3$:

$$\hat{y}_1(n) = -a_{11} \cdot \hat{y}_1(n - 1) - a_{12} \cdot \hat{y}_1(n - 2) - a_{13} \cdot \hat{y}_1(n - 3) + b_{10} \cdot x_1(n) + b_{11} \cdot x_1(n - 1) + b_{12} \cdot x_1(n - 2) + b_{13} \cdot x_1(n - 3), \tag{6.95}$$

wobei a_{10} gleich 1 gesetzt ist. Die Zustandsgröße x_1 , die eine fiktive Zwischengröße darstellt und in der Realität keinerlei Bedeutung hat, lässt sich aus der Spannung U_{KGK} mit der Sigmoid-Funktion bestimmen (Modellordnung 5):

$$x_1(n) = -(U_{\text{KGK}}(n) - r) \cdot \lambda_s + \sum_{m=0}^4 \frac{\alpha_{s_m}}{e^{-(U_{\text{KGK}}(n)-r)\beta_{s_m} + \gamma_{s_m}} + 1} + \kappa. \quad (6.96)$$

Die sich somit ergebenden 24 Parameter

$$\Psi = [\alpha_{s_m}, \beta_{s_m}, \lambda_{s_m}, \kappa, \gamma_{s_m}, a_{1i}, b_{1j}]$$

für $m = 0, \dots, 4$, $i = 1, 2, 3$ und $j = 0, 1, 2, 3$ werden unter Verzicht auf die Separierung mit der Abtastzeit $t_A = 15 \cdot 10^{-5}$ s identifiziert. Nach der Parameteridentifikation erfolgt die Auswertung des Schätzergebnisses unter Zuhilfenahme der Verifikationsdaten.

Als Fehlermaß gilt wie bei der Temperaturberechnung der *Normalisierte quadratische Mittelwertfehler*. Die Übereinstimmung zwischen dem gemessenen $p(t)$ und ermitteltem Druck $\hat{p}(t)$ liegt demzufolge bei 73,27 %. Die Ordnungen $n = 3$ und $m = 5$ sowie die Iterationsanzahl von 86 wurden während der Schätzung so gewählt, dass die Abweichung der Druckspitzen sowie das Fehlermaß minimiert werden konnten. Es gilt daher für die Optimierung der Modelleinstellgrößen, die bestmögliche Kombination zu eruieren.

Abbildungen 6.78 und 6.79 illustrieren das Ergebnis. Dabei ist die Ähnlichkeit zwischen der Spannung und dem Druck deutlich erkennbar. Abgesehen von dem Motorstartbereich, wo überdurchschnittliche Abweichungen zu diagnostizieren sind, liefert die Schätzung vor allem in niedrigeren Drehzahlbereichen gute Ergebnisse. Bei hohen Drehzahlen mit kürzeren Arbeitszyklen liegen die geschätzten Druckspitzen über dem Mittelwert. In Abbildung 6.79 lässt sich die Abweichung in einem kleinen Bereich beobachten. Die Standardabweichung der Spitzendrücke lag bei 3,7253 bar (MW: -0,004 bar).

Durch die Erweiterung dieser Hammersteinstruktur auf das Uryson-Modell (vgl. Abbildung 6.77) gelingt dem Schätzer, die Übereinstimmung zwischen der Strecke und dem Modell von 73,27 % auf 78,41 % zu verbessern. Dabei kommt als nichtlineares Glied die stückweise lineare Funktion sechsten Grades in der Parallelschaltung zum Einsatz. Die Standardabweichung der Spitzendrücke lässt sich dadurch ebenfalls reduzieren ($\sigma = 3,04294$ bar, $\mu = -0,176$ bar).

Basierend auf der Signalflusslogik in Abbildung 6.68 sieht die erweiterte Struktur der Druckschätzung wie in Abbildung 6.80 aus. Vor allem die Ein-

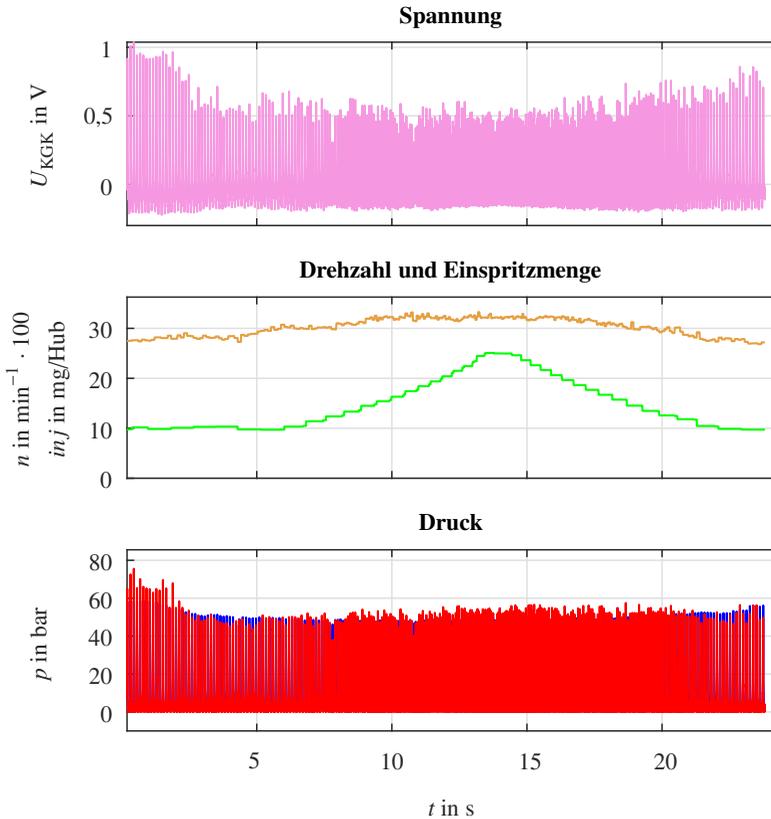


Abbildung 6.78 Druckbestimmung mit den Daten vom Fahrzeug 2. Drehmoment ist 100 Nm. —: Drehzahl $n(t)$, —: Einspritzmenge $inj(t)$, —: Soll-Druck $p(t)$, —: Ist-Druck $\hat{p}_1(t)$.

flüsse in unterschiedlichen Motorbetriebspunkten werden dabei möglichst abgedeckt.

Da die wahren Zustandsgrößen T_U und T_{KGK} der Strecke sowie des Modells x_1, x_2, x_3 und x_4 nicht eruiert werden müssen, lässt sich die Identifikation von Parametern anhand der Messdaten – Gray-Box-Betrachtung – ermitteln. Abbildung 6.80 illustriert die eingesetzte Struktur des Sensormodells, welche die Gleichungen (6.71), (6.73) (Sigmoid-Funktion, stückweise lineare Funkti-

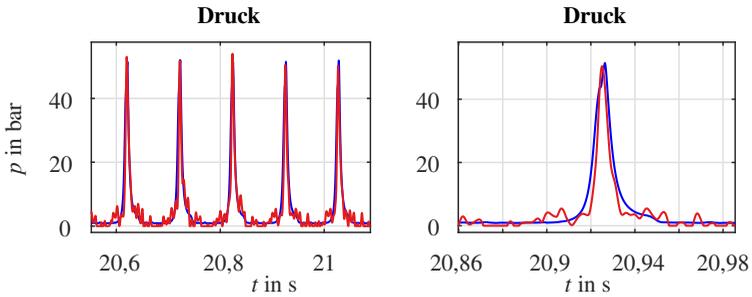


Abbildung 6.79 Zwei Teilbereiche der Abbildung 6.78, die eine Druckschätzung mittels der KGG-Spannung zeigen, wobei das Drehmoment 100 Nm beträgt. —: Soll-Druck $p(t)$, —: Ist-Druck $\widehat{p}_1(t)$.

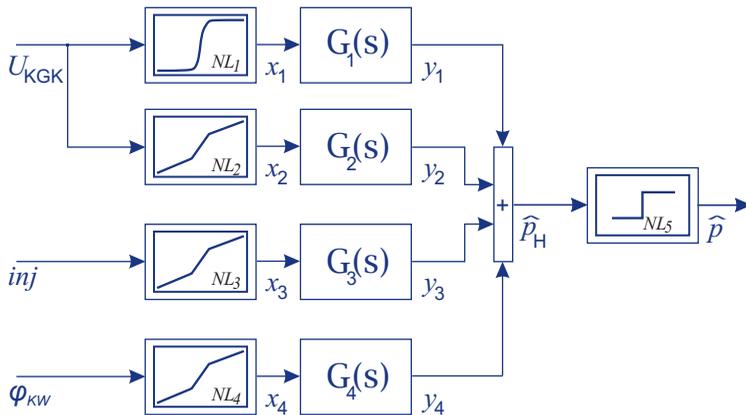


Abbildung 6.80 Identifikation des Druck-Sensormodells mithilfe der Hammerstein-Wiener-Struktur. x_1, x_2, x_3 und x_4 : Zustandsgrößen des geschätzten Modells. \hat{p} : Geschätzter Druck, \hat{p}_H : Geschätzter Druck vom Hammerstein-Modell.

on) zur Beschreibung des statischen Systemverhaltens einsetzt. Mathematisch lässt dies folgendermaßen erklären: Für den geschätzten Druck ergibt sich

$$\widehat{p}_H(n) = y_1(n) + y_2(n) + y_3(n) + y_4(n)$$

beziehungsweise

$$\widehat{P}_H(z) = G_1(z) \cdot X_1(z) + G_2(z) \cdot X_2(z) + G_3(z) \cdot X_3(z) + G_4(z) \cdot X_4(z),$$

wobei ohne die Zustandsgrößen gilt:

$$\widehat{P}_H(z) = G_1(z) \cdot NL_1(U_{\text{K GK}}(z)) + G_2(z) \cdot NL_2(U_{\text{K GK}}(z)) \\ + G_3(z) \cdot NL_3(\text{inj}(z)) + G_4(z) \cdot NL_4(\varphi_{\text{K W}}(z)).$$

Für die Nichtlinearitäten gilt:

$$NL_1 = -(U_{\text{K GK}}(z) - r) \cdot \lambda_s + \sum_{m=0}^5 \frac{\alpha_{s_m}}{e^{-((U_{\text{K GK}}(z)-r) \cdot \beta_{s_m} + \gamma_{s_m})} + 1} + \kappa),$$

$$NL_2 = \begin{cases} U_{\text{K GK}}(z) + f_{21}, & U_{\text{K GK}}(z) < u_{21}, \\ \frac{f_{22}-f_{21}}{u_{22}-u_{21}} \cdot (U_{\text{K GK}}(z) - u_{21}) + f_{21}, & u_{21} \leq U_{\text{K GK}}(z) < u_{22}, \\ \frac{f_{23}-f_{22}}{u_{23}-u_{22}} \cdot (U_{\text{K GK}}(z) - u_{22}) + f_{22}, & u_{22} \leq U_{\text{K GK}}(z) < u_{23}, \\ \frac{f_{24}-f_{23}}{u_{24}-u_{23}} \cdot (U_{\text{K GK}}(z) - u_{23}) + f_{23}, & u_{23} \leq U_{\text{K GK}}(z) < u_{24}, \\ \frac{f_{25}-f_{24}}{u_{25}-u_{24}} \cdot (U_{\text{K GK}}(z) - u_{24}) + f_{24}, & u_{24} \leq U_{\text{K GK}}(z) < u_{25}, \\ (U_{\text{K GK}}(z) - u_{25}) + f_{25}, & U_{\text{K GK}}(z) \geq u_{25}, \end{cases}$$

$$NL_3 = \begin{cases} \text{inj}(z) + f_{31}, & \text{inj}(z) < u_{31}, \\ \frac{f_{32}-f_{31}}{u_{32}-u_{31}} \cdot (\text{inj}(z) - u_{31}) + f_{31}, & u_{31} \leq \text{inj}(z) < u_{32}, \\ \frac{f_{33}-f_{32}}{u_{33}-u_{32}} \cdot (\text{inj}(z) - u_{32}) + f_{32}, & u_{32} \leq \text{inj}(z) < u_{33}, \\ \frac{f_{34}-f_{33}}{u_{34}-u_{33}} \cdot (\text{inj}(z) - u_{33}) + f_{33}, & u_{33} \leq \text{inj}(z) < u_{34}, \\ (\text{inj}(z) - u_{34}) + f_{34}, & \text{inj}(z) \geq u_{34}, \end{cases}$$

$$NL_4 = \begin{cases} \varphi_{\text{K W}}(z) + f_{41}, & \varphi_{\text{K W}}(z) < u_{41}, \\ \frac{f_{42}-f_{41}}{u_{42}-u_{41}} \cdot (\varphi_{\text{K W}}(z) - u_{41}) + f_{41}, & u_{41} \leq \varphi_{\text{K W}}(z) < u_{42}, \\ \frac{f_{43}-f_{42}}{u_{43}-u_{42}} \cdot (\varphi_{\text{K W}}(z) - u_{42}) + f_{42}, & u_{42} \leq \varphi_{\text{K W}}(z) < u_{43}, \\ \frac{f_{44}-f_{43}}{u_{44}-u_{43}} \cdot (\varphi_{\text{K W}}(z) -) + f_{43}, & u_{43} \leq \varphi_{\text{K W}}(z) < u_{44}, \\ (\varphi_{\text{K W}}(z) - u_{44}) + f_{44}, & \varphi_{\text{K W}}(z) \geq u_{44}. \end{cases} \quad (6.97)$$

Im letzten Schritt wird mit NL_5 sichergestellt, dass der geschätzte Druck \hat{p} keine negativen Werte annimmt.

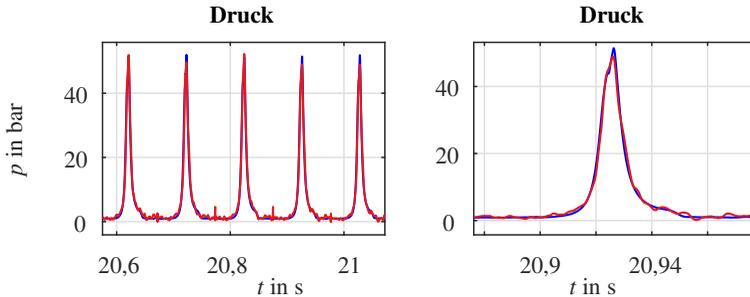


Abbildung 6.81 Ein Bereich der Schätzung, der eine Druckschätzung mittels der KKG-Spannung zeigt, wobei das Drehmoment 150 Nm beträgt.

—: Solldruck $p(t)$, —: Istdruck $\hat{p}_1(t)$.

Abbildung 6.81 stellt das Schätzergebnis in einem kleinen Bereich dar. Zum Testen des identifizierten Modells wurden andere Datensätze gebraucht. Dabei verringert sich die Standardabweichung der Spitzendrücke von $\sigma = 3,04$ bar auf 1,9378 bar. Dies und die weiteren affirmativen Beurteilungswerte wie etwa die Übereinstimmung (FIT) von 89,69 % oder die mittlere zeitliche Abweichung von 0,59 ms ($\varphi = 3,72$ KW) verdanken sich dem optimierten Modell mit 82 Parametern. Die Iterationsanzahl stieg hierbei von 86 auf 126 an und die Abtastzeit blieb unverändert.

Die Messdaten des zweiten Fahrzeuges werden zur Verifizierung der Druckschätz-Ergebnisse eingesetzt, die in vorherigen Kapitel ebenfalls verwendet wurden. Bei beiden Fahrzeugen ist das Drucksignal gleichläufig mit dem Spannungssignal und korreliert. Der Unterschied macht sich allerdings in der einhüllenden Amplitudenfunktion (Spitzendrücke pro Zyklus) des Drucksignals deutlich. Sie deutet bei den zur Verfügung stehenden Messdaten des zweiten Fahrzeuges zu einer entgegengesetzten Tendenz hin. Bei dieser Gegenläufigkeit liegen die minimalen Druckhochpunkte in den Zyklen mit größeren Spannungsspitzen (kleine Änderungen in der Nähe der Arbeitspunkte).

Nichtsdestotrotz präsentieren diese Messdaten mit dem Modell in Abbildung 6.80 Folgendes: Der erste Versuch findet mit reduzierter Ordnung statt. Dabei wird NL_2 auf die Ordnung 5; NL_3 und NL_4 werden auf die Ordnung 2 verringert. Die linearen Blöcke sowie die restlichen nichtlinearen Blöcke bleiben

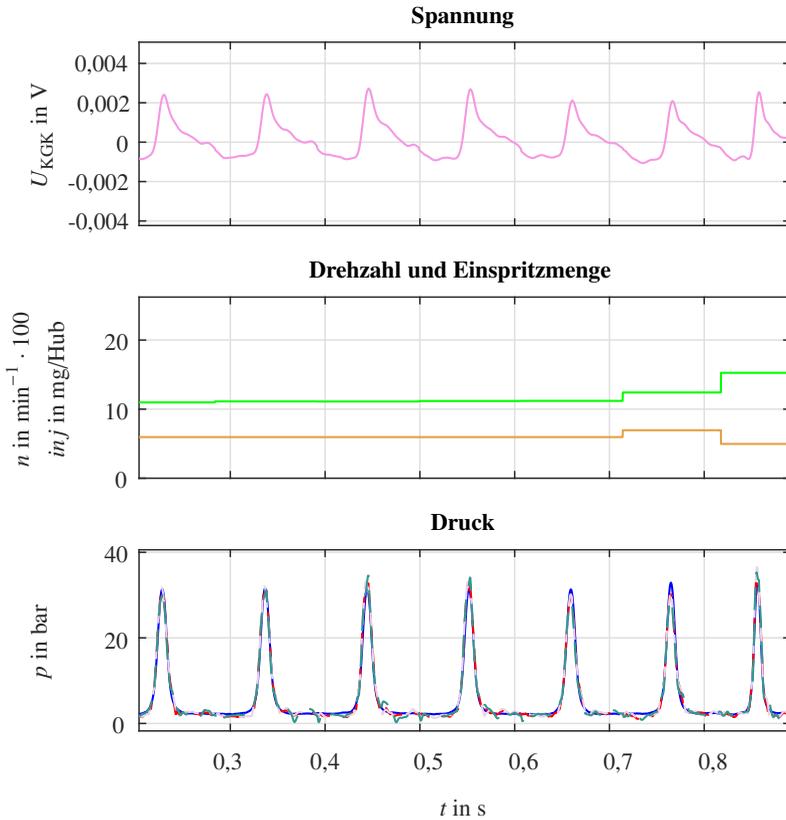


Abbildung 6.82 Ein Bereich der Schätzung, der eine Druckschätzung im unteren Drehzahlbereich mittels der KGK-Spannung zeigt, wobei das Drehmoment 50 Nm beträgt. —: Drehzahl $n(t)$, —: Einspritzmenge $inj(t)$, —: Solldruck $p(t)$, Istdrücke $\hat{p}_1(t)$: - -: Modell M1, —: Modell M2, —: Modell M3.

unverändert. Es ergibt sich ein Modell M3²⁰ mit 68 Parametern. Zuerst wurden mittels der ausgesuchten Trainingsdaten die Parameter für das 2. Fahrzeug nochmals bestimmt. Die Abtastzeit liegt dabei bei 0,15 ms und entspricht der Abtastzeit der Schätzung mit dem ersten Fahrzeug. Eine gute Übereinstim-

²⁰ Entsprechend der Nummerierung in Abbildungen

mung zwischen dem gemessenen und ermittelten Druck kann mit 84,99 % gewährleistet werden. Die Standardabweichung der Spitzendrücke lässt sich mit den neuen Daten vom Fahrzeug 2 kaum reduzieren: $\sigma = 1,92335$ bar und $\mu = 1,7369$ bar.

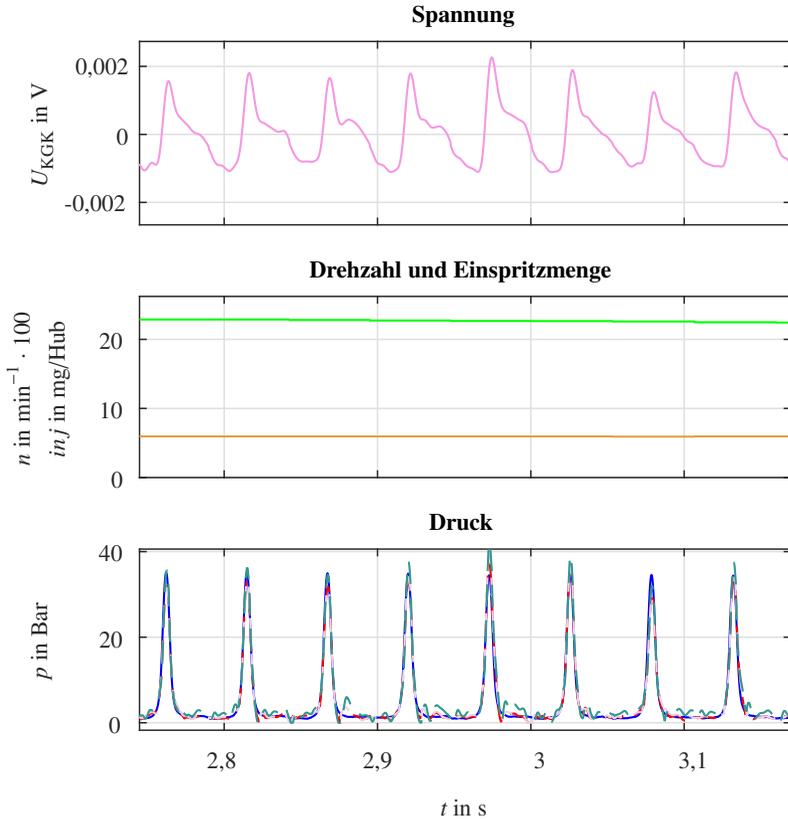


Abbildung 6.83 Ein Bereich der Schätzung, der eine Druckschätzung im oberen Drehzahlbereich mittels der KKG-Spannung zeigt, wobei das Drehmoment 50 Nm beträgt. —: Drehzahl $n(t)$, —: Einspritzmenge $inj(t)$, —: Solldruck $p(t)$, Istdrücke $\hat{p}_1(t)$: —: Modell M1, —: Modell M2, —: Modell M3.

Beim zweiten Versuch wird die Schätzung mit der angepassten Abtastzeit von 0,1 ms noch einmal wiederholt. Dieses Modell M2 liefert eine 86,66 %ige Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und ermittelten Druck. Dabei

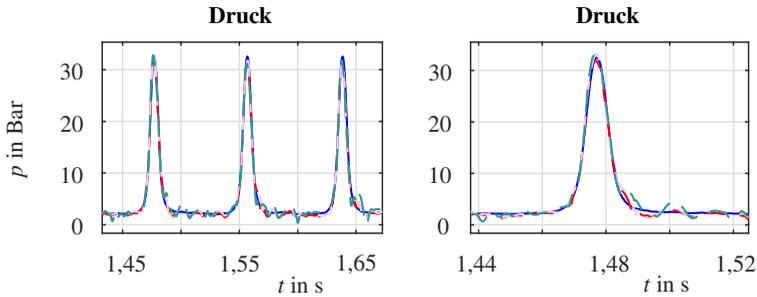


Abbildung 6.84 Druckschätzung mittels der KGK-Spannung. $n(t)=1550 \text{ min}^{-1}$, $inj(t)=5 \text{ mg/Hub}$. —: Solldruck $p(t)$, Istdrücke $\hat{p}_1(t)$: —: Modell M1, —: Modell M2, —: Modell M3.

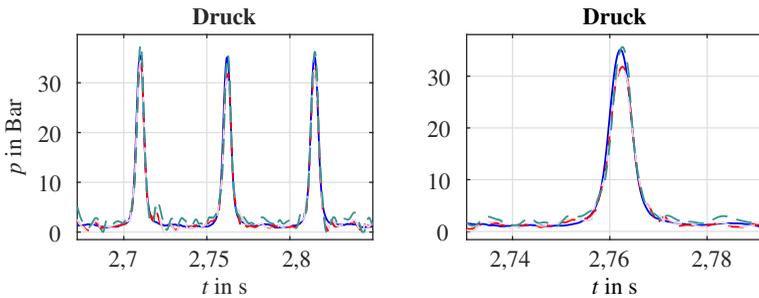


Abbildung 6.85 Druckschätzung mittels der KGK-Spannung. $n(t)=2280 \text{ min}^{-1}$, $inj(t)=8 \text{ mg/Hub}$. —: Solldruck $p(t)$, Istdrücke $\hat{p}_1(t)$: —: Modell M1, —: Modell M2, —: Modell M3.

liegt die Standardabweichung der Spitzendrücke bei $\sigma = 2,04 \text{ bar}$ und der Mittelwert bei $\mu = 2,2 \text{ bar}$.

Im letzten Schritt wird ein Modell M1, welches die Gewichtung der Spannung über die nichtlinearen Sigmoid-Funktion signifikant – die NL_2 -Ordnung von 5 auf 11 – erhöht, herangezogen. Die nichtlinearen Blöcke NL_3 und NL_4 weisen dabei jeweils eine Ordnung von 3, was in vorherigen Modellen 2 war, auf. Mit einer Abtastzeit von 0,1 ms wird ein aus 92 Parametern bestehendes Modell, das eine 87,46 %-ige Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und Referenzdruck liefert, identifiziert. Die Standardabweichung der Spitzendrücke ist $\sigma = 1,47 \text{ bar}$ und der Mittelwert $\mu = 1,9292 \text{ bar}$.

In den Abbildungen 6.82 und 6.84 sind die Ergebnisse der Simulationen im unteren Drehzahlbereich $n < 1600 \text{ min}^{-1}$ dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die geschätzten Modelle M1, M2 sowie M3 den Referenzdruck gut wiedergeben. Im unteren Wertebereich $p < 6 \text{ bar}$ liefern die Schätzmodelle etwas größere Abweichungen (Einschwingen). Das Modell mit mehr Parametern kann in dem Bereich die Störungen in den Messsignalen besser abfangen.

Die Abbildungen 6.83 und 6.85 illustrieren dagegen die erzielten Resultate in oberen Drehzahlbereich $n > 2000 \text{ min}^{-1}$. Beurteilend kann gesagt werden, dass die Modelle, abgesehen von den etwas größer gewordenen Abweichungen der Spitzendrücke, ähnlich gute Ergebnisse liefern. In Abbildung 6.85 ist als Beispiel ein Zyklus zu sehen, wo das komplexere Modell (1) den Spitzendruck nicht ausreichend gut nachbildet.

Tabelle 6.8 Vergleich der ermittelten Modelle. N_ψ : Anzahl der zu bestimmenden Parameter; Abweichung der Spitzentemperaturwerte: Mittelwert $MW_{\bar{p}}$ sowie Standardabweichung $\sigma_{\bar{p}}$ in bar und %, FIT: Prozentuale Angabe der Annäherung.

Modell	N_ψ	Validierungsfehler			FIT
		Spitzenwerte/bar			
		$MW_{\bar{p}}$	$\sigma_{\bar{p}}$	$\sigma_{\bar{p}}$ in %	%
Hammerstein-Modell	24	-0,004	3,73	5,15	73,27
Uryson-Modell	42	0,176	3,043	4,23	78,41
Hammerstein-Wiener-Modell	82	0,18	1,938	3,80	89,69
		2. Fahrzeug mit dem Hammerstein-Wiener-Modell			
M1	92	1,93	1,47	2,33	87,47
M2	68	2,40	2,04	2,62	86,66
M3	68	1,74	1,92	2,51	84,99

In Tabelle 6.8 sind die vorgestellten Ergebnisse noch einmal gegenübergestellt. Mit einer Eingangsgröße (Hammerstein-Modell oder Ulmann-Modell) ist der Druck nicht ausreichend gut nachbildbar. Sobald die von ECU zur Verfügung gestellten Größen Einspritzmenge, Kurbelwellenwinkel und/oder Drehzahl in die Schätzung hineingezogen wurden, gelingt dem Schätzer, für beide Fahrzeuge bessere Resultate zu erzielen. Das Fahrzeug 2 wurde im Gegensatz zu 1 lediglich im kleinen Lastbereich (weniger Dynamik) betrieben. Mit der Reduzierung der Abtastzeit bei den Modellen M1 und M2 von 1,5 ms auf 1 ms konnte die Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und geschätzten

Druck etwas verbessert werden. Die Erhöhung der Parameteranzahl sowie die Variation der Iterationszahl brachte keine signifikante Verbesserung der Ergebnisse.

6.4.2 Fazit

Dieses Unterkapitel ist das Kondensat der Analyse von Keramikglühkerzen für einen möglichen Einsatz als Drucksensor. Für die Aufgabe wird eine Strecke mit dem Brennraumdruck als Eingangsgröße und dem Kerzenwiderstand als Ausgangsgröße angenommen. Die Betrachtung der Brennraumtemperatur als Zustandsgröße ist dabei unausweichlich. Die inverse Betrachtung dieser Strecke führt zum Sensormodell, wobei weitere Sensor-Eingangsgrößen wie etwa die Drehzahl der Schätzung dienen. Aus den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die Keramikglühkerze bei verschiedenen Aufgaben sehr wohl als Drucksensor agieren kann. Angelehnt an die bestehenden Messdaten konnten Modelle bestimmt werden, welche die Brennraumdruckverläufe aufgrund der thermischen Einflüsse auf den Kerzenwiderstand schätzen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die geschätzten Druckverläufe mit den gemessenen Druckverläufen für die untersuchten Motorbetriebsbereiche sehr gut übereinstimmen (85 % – 90 %).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der immer besser werdenden Technologie erweitert sich auch der Horizont der Automobilhersteller sowie Kunden. Am Anfang dieses Jahrhunderts brach demzufolge eine neue und innovative Ära der Automobilentwicklung an. Nicht nur die Integration neuer Technologien, sondern auch die Optimierung sowie bestmögliche Nutzung der bestehenden Bauelemente standen im Vordergrund. Diese Gedanken führten dazu, dass diese wissenschaftliche Arbeit sich der Untersuchung der in Dieselfahrzeugen mittlerweile standardmäßig eingebauten Keramikglühkerzen für eine anderweitige Nutzung widmete.

Die Keramikglühkerze wird bei Dieselfahrzeugen als Starthilfe eingesetzt. Dieses Aktuatorsystem liefert für alle Motorbetriebspunkte entweder gesteuert oder geregelt die notwendige Hitze an der Kerzenspitze (Kappe), die sich im Brennraum befindet. Dadurch entstehen angenehme Motoranläufe sowie optimierte Verbrennungen bezüglich der Leistung und Schadstoffemission. In vielen Fällen kommt die Keramikglühkerze nur für eine bestimmte Zeit nach dem Motorstart als Aktuator zum Einsatz (~ 2-3min). Danach liefert die Keramikglühkerze als Aktuator kaum Nutzen mehr.

Ausgehend von dieser Feststellung werden die Kerzen für weitere Aufgaben analysiert. In dieser Arbeit wurde die Nutzung der Keramikglühkerze als Sensor diskutiert. Der Grundgedanke basiert hierbei auf ihrer thermisch-elektrischen Wirkung. Dies ist so zu verstehen, dass die Temperaturänderungen in unmittelbarer Umgebung mittels KGK-Temperatur-Änderung „wahrgenommen“ wird, was sich anschließend am Kerzenwiderstand bemerkbar macht. Mithilfe des Anregungssignals „Strom“ lässt sich der temperaturabhängige Kerzenwiderstand über die Spannung aufzeichnen. Die Temperaturänderungen können wiederum verwendet werden, um auf verschiedene relevante Einflussgrößen, wie z. B. Druck oder Temperatur Rückschlüsse zu ziehen.

In der ersten Phase dieser Arbeit entstanden die Messdaten von zwei Fahrzeugen, welche im weiteren Verlauf zur Analyse des dynamischen und statischen Kerzenverhaltens verwendet wurden. Diese Sensorsignalanalyse führte zu einem Erkenntnisgewinn über die Interaktionen der gemessenen Signale: Der Kerzenwiderstandsverlauf hängt unter anderem von der Umgebungstem-

peratur ab. Mit Hilfe der Differenzgleichungen lassen sich die Abhängigkeiten der Signale beschreiben. Im hochfrequenten Bereich wird dagegen das Kerzen-Verhalten in der unmittelbaren Umgebung des statischen Arbeitspunktes deutlich. Das heißt, der niederfrequente Widerstandsverlauf weist entsprechend der hochfrequenten Temperaturänderung um den Arbeitspunkt kleine Änderungen auf. Abgesehen von der Bestimmung der mittleren Umgebungstemperatur übermitteln die niederfrequenten Temperatureinflüsse keine für diese Arbeit relevanten Informationen; folglich wurden diese sowie die unerwünschten hochfrequenten Signalanteile mittels eines Bandpassfilters weitestgehend unterdrückt.

Diese Erkenntnisse ließen sich im nächsten Schritt durch die Finite-Differenzen-Methode affirmieren. Das zuvor entstandene FDM-Modell wurde während dieser Arbeit optimiert, so dass die Kerzen-Analyse hinsichtlich der Sensorik durchgeführt werden konnte. Dabei zeigte sich, dass eine genaue Kerzenmodellierung für hochfrequente Änderungen mit Betrachtung der Interaktionen zwischen den drei leitenden Halbleiterbereichen sowie einem Halbleiterisolator im Kappenbereich einen hohen Rechenaufwand erfordert.

Um die Zusammenhänge der Signale Kerzenwiderstand, Temperatur, Kerzentemperatur sowie weiterer Größen vereinfacht zu verdeutlichen, wurde folglich das dynamische Kerzenverhalten in Zustandsraumdarstellung dargestellt. Daraus folgte die Invertierung des hergeleiteten SISO-Modells 3. Ordnung (Eingangsgröße: Umgebungstemperatur, Ausgangsgröße: Kerzenwiderstand) als Sensormodell. Dies konnte erfolgen, da das Übertragungssystem stabil und minimalphasig ist. Diese Übertragungsfunktion liefert für die niederfrequenten Temperatureinflüsse (langsame Änderungen) sehr gute Ergebnisse.

Unabhängig voneinander ließen sich vier verschiedene Einsatzmöglichkeiten für die Keramikglühkerze als Sensor präsentieren. Alle vorgestellten Verfahren basieren dabei auf der thermisch-elektrischen Wirkung, also auf der Temperaturabhängigkeit des Kerzenwiderstandes. Die Ermittlung der Einspritzzeitpunkte und -dauern sowie die Drehzahlbestimmung erfordern kein komplexes Sensormodell, welches komplett oder zum Teil das thermische Verhalten der Kerze wiedergibt. Die Schätzung der Brennraumtemperatur und des Brennraumdrucks sind dagegen auf ein Sensormodell mit mehreren zu bestimmenden Parametern angewiesen.

Der Ansatz, der zur Ermittlung der Drehzahl vorgestellt wurde, bedient sich der Widerstandsänderung der Kerze in Abhängigkeit der Brennraumtemperatur, welche die Kurbelwellen-Änderungen im Kleinsignalverhalten als Information mit sich trägt. Das gemessene Signal (Kerzenwiderstand) wird lediglich

Bandpass gefiltert, sodass die hochfrequenten Temperatur-Änderungen pro Arbeitsspiel – zwei Kurbelwellenumdrehungen – übrig bleiben. Anschließend ermöglichen die Nulldurchgänge des Signals die Drehzahlermittlung. Verglichen mit den Messdaten von einem konventionellen Drehzahlgeber ($< 1\%$) liegt die Ungenauigkeit bei circa $0,41\%$.

Die Schätzung der Einspritzzeitpunkte und -dauern sieht vor, die während des Einspritzprozesses zustande kommenden Änderungen am Widerstandssignal zu nutzen. Die Differentiation des gefilterten Signales bildet dabei den Kern des ersten Algorithmus, sodass sie auf einfachstem Wege die Signaländerungen eruiert. Die Erkennungsraten des Detektionsalgorithmus von $> 90\%$ sind für die analysierten Daten von einem Fahrzeug vielversprechend. Im Vergleich zu diesem Verfahren detektiert die Methode Change-Point die abrupten Wechselstellen im Signal, die im Suchfenster die Einspritzzeitpunkte wiedergeben. Es lässt sich konstatieren, dass dieses Verfahren eine gute Erkennungsrate ($> 81\%$) ermöglicht.

Im Gegensatz zu den ersten beiden Verfahren gelingt die Schätzung der Brennraum-Temperatur über eine Modellstruktur, welche aus linearen und nichtlinearen Teilblöcken besteht. Die Darstellungsform „Hammerstein-Wiener-Modelle“ wurde gewählt, da die Schätzung durch das hergeleitete lineare Modell 3. Ordnung für diese Aufgabe keine zufriedenstellende Güte liefert. Speziell für die Problemstellung kam der Levenberg-Marquardt-Algorithmus zum Einsatz, um die Parameter der vorgegebenen Modellstruktur anhand der Messdaten zu ermitteln. Die nichtlinearen Modellblöcke bestehen dabei aus Sigmoid und Polynomfunktionen sowie stückweise linearen Funktionen. Abgesehen von der Kerzenspannung sind Drehzahl und Einspritzmenge die weiteren Eingangsgrößen. Aus einer systematischen Suche wurde eine bestmögliche Modellstruktur mit 74 Parametern identifiziert. Mit der Methode stimmt der Verlauf der geschätzten Brennraum-Temperatur mit dem Sollwert zu mehr als 84% überein.

Zu guter Letzt wurde eine Methode vorgeschlagen, mit der durch die Verwendung des Sensormodells der Brennraumdruck geschätzt werden kann. Basierend auf der Hammerstein-Wiener-Modellstruktur kommt der Levenberg-Marquardt-Algorithmus zur Identifikation der Parameter des Modelles zum Einsatz. Die allgemeine Vorgehensweise entsprach der Methode zur Temperaturschätzung; die Modellstruktur weicht allerdings davon etwas ab und wird erwartungsgemäß den Druck als Ausgangsgröße aufweisen. Die Brennraumtemperatur wird in diesem Fall als Zustandsgröße definiert, da der Druck ebenfalls auf das thermisch-elektrische Kerzenverhalten einwirkt. Unabhängig von

den betrachteten Fahrzeugen ließ sich eine Modellgüte größer als 75 % erzielen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die experimentell aus Messdaten hergeleiteten Modelle die mögliche Nutzung der Keramikglühkerze als Sensor bestätigen. Die erzielten Genauigkeiten reichen für die Nutzung der Keramikglühkerze als Sensor für einige Aufgaben aus. Im Vergleich zu bestehenden Systemen wird hier nochmal hervorgehoben, dass die vorgestellten Konzepte keine Hardwareänderung vorsehen und auf einfachen Wege die Bestimmung der Größen Brennraumtemperatur, Brennraumdruck, Einspritzzeitpunkte sowie Drehzahl darstellen. Die Eignung der Keramikglühkerze als Sensor auf Basis von Motorsteuergeräten wurde allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Ausblick

Der Erkenntnisgewinn „KGK als Sensor einsetzbar“ lässt allerdings einige Fragen offen. Um eine Aussage über das thermisch-elektrische Verhalten zu machen, reichen die bestehenden Messdaten aus. Für die Verhaltensanalyse der Kerze als Sensor in allen Motorbetriebspunkten müssen neue Messdaten zur Verfügung stehen. Dadurch können unter anderem die Kerzenmodelle verbessert werden.

Des Weiteren liegt der Gedanke nahe, die experimentell bestimmten Modelle zu Bestimmung der Temperatur sowie des Drucks bezüglich der Optimierung zu untersuchen. Dabei war der betrachtete Stichprobenumfang limitiert. Zudem kann untersucht werden, ob weitere Vorgehensweisen sowie Algorithmen zur Modellierung des Sensorverhaltens prävalent sind. Die physikalische Bestimmung beider Größen anhand des Sensorsignals kann beispielsweise vorangetrieben werden. Damit lassen sich eventuell bessere Ergebnisse erzielen.

Ein weiteres Thema ist die Kerzenstreuung, welche sich bei dem Kaltwiderstand bemerkbar macht. Zur Charakterisierung der Keramikglühkerzen müssen neue Algorithmen entwickelt werden, um die Kerzen vor dem Einsatz mit diesen Modellen zu initialisieren. Eine Möglichkeit wäre die Methode der Parameterschätzung für die Kerzeninitialisierung.

Kerzenbedingte Mängel können durch die Optimierung des Keramikglühkerzen-Aufbaus behoben werden. Die Entwicklung geht bei BorgWarner zunehmend in Richtung robuster hochohmiger Keramikglühkerzen, die sich durch Software besser regeln lassen. Dies könnte die Schätzung der hierbei erwähnten Größen (signifikant höhere Modellgüte) erleichtern. Zudem müssen die temperaturabhängigen Materialeigenschaften von verwendeten Keramiken noch einmal bestimmt werden.

Die Ermittlung der Einspritzstellen und -dauern in höheren Drehzahlbereichen muss untersucht werden, da hierfür keine brauchbaren Messdaten aus dem Bereich zur Verfügung standen.

Die hier beschriebenen Verfahren müssen praktisch erprobt werden. Hieraus lässt sich konkreter Optimierungsbedarf der Verfahren besser erkennen.

Literaturverzeichnis

- [1] **U. Aljancic, D. Resnik, D. Vrtacnik, M. Mozek und S. Amon.** *Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor.* In: *The 11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference 1* (2002), S. 36–40.
- [2] **M. Allgaier, L. Frassek, O. Goeb, J. Hasenkamp, H. Houben, H. Watzdorf und H. Zell.** *Verfahren zum Herstellen eines keramischen Glühstiftes für eine Glühkerze.* DE10353972B4. 2005.
- [3] **M. Allgaier, M. Eberhardt, B. Graf, J. Hammer, J. Hasenkamp, H. Houben und J. Weissenbacher.** *Keramischer Glühstift und Glühkerze.* DE10 2009 015 536 B4. 2009.
- [4] **M. Allgaier, R. Hain, M. Haussner und H. Müller.** *A ceramic glow plug.* US8513570B2. 2010.
- [5] *Analyse und Simulation des Systems Brennraum.* In: *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Der Fahrzeugantrieb.* Springer, 2009.
- [6] **F. Bach.** *Modellbasierte Verbrennungsregelung und Emissionspotential eines homogenen Tieftemperatur-Zweistoffbrennverfahrens in einem Mehrzylindermotor.* Report. KIT, Institut für Kolbenmaschinen, 2014.
- [7] **D. Backofen.** *Höchstdruckeinspritzung alternativer Dieselmotoren.* Cuvillier Verlag. 1. Edition (20. November 2015), 2015.
- [8] **T. Badawy, N. Rai, J. Singh, W. Bryzik und N. Henein.** *Effect of design and operating parameters on the ion current in a single-cylinder diesel engine.* In: *International Journal of Engine Research* (April 2011).
- [9] **H. Bauer.** *Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 23. Auflage.* Vieweg Verlag, 1999.
- [10] **H. (Chefredaktion) Bauer.** *Kraftfahrzeugtechnisches Handbuch.* Hrsg. von **Robert Bosch GmbH.** Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2002.

- [11] **S. Beck.** *Beschreibung des Zündverzugs von dieselähnlichen Kraftstoffen im HCCI-Betrieb.* Report. Universität Stuttgart, 2012.
- [12] **A. Beil, M. Blanc und O. Toedter.** *Internal combustion engine for vehicles, in particular a diesel engine.* US20070203636. 2007.
- [13] **K. Ben Yahia und V. Heike.** *Verfahren zur Detektion einer Leckage.* Dt. Pat. DE102009026848A1 16.12.2010. 2010.
- [14] **T. Berg, O. Thiele, S. Seefeldt und R. Vanhaelst.** *Bestimmung der innermotorischen Gemischbildung durch optisches Indizieren.* In: *MTZ, Springer Vieweg* (Juni 2013).
- [15] *BERU AG, All about glow plugs, Technical Information 04, No.:5100 006 002.*
- [16] **H. Beyer, J. Bonitz, R. Entenmann, S. Förster, R. Knab und W. Künzel.** *Verfahren zur Erkennung des Arbeitstaktes eines Zylinders einer Brennkraftmaschine.* Dt. Pat. EP0262166B1 (European Patent Office). 1986.
- [17] **M. Blanc und A. Bleil.** *Method for operating a heating element in a motor vehicle by pulse width modulation.* US8269145B2. 2010.
- [18] **M. Blanc, S. Geiger, H. Houben, T. Hovestadt und O. Toedter.** *Second generation ISS diesel cold start technology with pre-heated intake air.* In: *MTZ worldwide* 67 (2006), S. 10–13.
- [19] **A. Bleil und M. Eberhardt.** *Verfahren zum Regeln der Temperatur von Glühkerzen.* Dt. Pat. DE10 2018 108 427 B3 2019.07.25. 2018.
- [20] **A. Bleil, M. Eberhardt, R. Müller, C. Rinkert, D. Wollin und M. Pados.** *Verfahren zum Erkennen eines Glühkerzenwechsels.* Dt. Pat. DE10 2013 108 628 A1 2015.02.12. 2015.
- [21] **C. Bohn und H. Unbehauen.** *Identifikation dynamischer Systeme - Methoden zur experimentellen Modellbildung aus Messdaten.* Springer Vieweg, 2016.
- [22] **Bosch AG.** *Ottomotor-Management.* 1998, S. 197–198.
- [23] *Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 28. Auflage.* Springer, 2014.
- [24] **G. Brokmann, H. Übensee und G. Gerlach.** *Thermisches Verhalten von piezoresistiven Drucksensoren – Charakterisierung und Modellierung.* In: *16. -GMA-ITG-Fachtagung-Sensoren-und-Messsysteme* (2012).

- [25] **R. Busch, J. Hammer, R. Schmidt, H. Schneider und P. Eckert.** *Einspritzsysteme*. In: *ATZ/MTZ-Fachbuch* (2014), S. 331–405.
- [26] **L. Chen und M. Mehregany.** *A silicon carbide capacitive pressure sensor for in-cylinder pressure measurement*. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 145 (2008), S. 2–8.
- [27] **F. Cruz-Peragón und F. J. Jiménez-Espadafor.** *Design and Optimization of Neural Networks To Estimate the Chamber Pressure in Internal Combustion Engines by an Indirect Method*. In: *Energy & Fuels* 21.5 (2007), S. 2627–2636.
- [28] **W. Demtröder.** *Laserspektroskopie: Grundlagen und Techniken*. Springer, 2000.
- [29] **M. Eberhardt.** *Verfahren zum Betreiben einer keramischen Glühkerze*. Dt. Pat. DE10 2012 101 999 B4 2016.01.28. 2016.
- [30] **W. Eifler, E. Schlücker, U. Spicher und W. Gotthard.** *Küttner Kolbenmaschinen: Kolbenpumpen, Kolbenverdichter, Brennkraftmaschinen*. Vieweg + Teubner Wiesbaden, 7. Auflage, 2009.
- [31] **M. Endler.** *Schlanke Glühkerzen für Dieselmotoren mit Direkteinspritzung*. In: *MTZ Motortech Z* 98 2 (1998), S. 98–99.
- [32] **Elamin, F., F. Gu und A. Ball.** *Diesel Engine Injector Faults Detection Using Acoustic Emissions Technique*. In: *Modern Applied Science* 4 (2010).
- [33] **T. Fuchs.** *Mobilität SiC-Tech: Siliciumcarbid-Technologie für robuste Sensoren unter rauen Umgebungsbedingungen*. 2013.
- [34] *Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten induktiver Sensoren (Induktivgeber)*. <http://www.kfztech.de/kfztechnik/elo/sensoren/induktivgeber.htm>.
- [35] **H. Glasmachers.** *Elektronische Verfahren zur Optimierung der Dosierungsgenauigkeit von Kfz-Einspritzventilen*. Diss. Ruhr-Universität Bochum, 2009.
- [36] **M. Grzegorz.** *Abgleich und Verfeinerung eines Glühkerzen-Modells in Matlab / Simulink*. Diplomarbeit. TU Crauthal, 2007.
- [37] **R. Haber und L. Keviczky.** *Nonlinear System Identification - Input-Output Modeling Approach*. Kluwer Academic Publishers, 1999.

- [38] **J. Hammer, M. Eberhardt, J. Hasenkamp, S. Knoll, M. Schittkowski und M. Allgaier.** *Glow plug and method for producing a glow pencil.* US9074574B2. 2011.
- [39] **R. Hanf und K. Markus.** *Verfahren zur Motorsteuerung eines Dieselmotors und Motorsteuersystem.* DE10 2007 009 105 B4. 2007.
- [40] **M. Haußner und M. Allgeier.** *Heizstab für eine Glühkerze sowie Verfahren zur Herstellung eines Heizstabs und Glühkerze.* Dt. Pat. DE10 2018 108 427 B3 2019.07.25. 2019.
- [41] **S. Heinzelmann.** *Vorrichtung und Verfahren zur Erkennung von Fehlfunktionen bei Verbrennungsanomalien.* Dt. Pat. DE102008013199A1. 2009.
- [42] **N. A. Henein, T. Badawy, R. Nilesh und B. Walter.** *Ion Current, Combustion and Emission Characteristics in an Automotive Common Rail Diesel Engine.* In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 134.4 (2012), S. 042801–042801.
- [43] **A. Hoffmann, B. Marx und W. Vogt.** *Mathematik für Ingenieure 1 und 2.* Pearson Studium, 2006.
- [44] **G. Hohenberg.** *Experimentelle Erfassung der Wandwärme von Kolbenmotoren.* TU Graz, 1980.
- [45] **H. Houben.** *Zukünftige Diesel – Kaltstartsysteme.* In: *Dresdner Motorenkollequium 12. und 13. Mai 2005* (2005).
- [46] **H. Houben, A. Marto, F. Pechhold, M. Hausner und M. Borgers.** *Pressure sensor glow plug for diesel engines.* English. In: *MTZ worldwide* 65.11 (2004), S. 8–10.
- [47] **Y. Huang.** *In-cylinder Ion Sensing Opportunities.* In: *Designing Electronic Powertrain Controls Symposium* (2004).
- [48] **R. Isermann.** *Mechatronische Systeme: Grundlagen.* Springer Verlag, 2007.
- [49] **R. Isermann.** *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe.* Springer Verlag, 2010.
- [50] **A. Kakuho, M. Nagamine, Y. Amenomori und T. et al. Urushi-hara.** *In-Cylinder Temperature Distribution Measurement and Its Application to HCCI Combustion.* In: *SAE Technical Paper 2006-01-1202* (2006).

- [51] **C. Kern, M. Ledermann, P. Saltikov und S. Schott.** *Glühstiftkerze mit integriertem Brennraumdrucksensor.* Dt. Pat. DE102004063750A1. 2008.
- [52] **M. Kernwein und O. Toedter.** *Verfahren zum Ansteuern einer Gruppe von Glühkerzen in einem Dieselmotor.* DE10 2006 010 083 B4. 2006.
- [53] **M. Kernwein, O. Toedter und A. Bleil.** *Method for controlling a group of glow plugs for a diesel engine.* WO2007033825A1. 2006.
- [54] **U. Kiencke, M. Schwarz und T. Weickert.** *Signalverarbeitung: Zeit-Frequenz-Analyse und Schätzverfahren.* Oldenbourg, 2008.
- [55] **R. Killick, P. Fearnhead und I.A. Eckley.** *Optimal detection of changepoints with a linear computational cost.* Oldenbourg, 2008.
- [56] **S. Klein.** *Bestimmung der Materialeigenschaften an 3 Keramikproben.* Report Nr. 22-07. Report. RWTH, Lehrstuhl für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau, 2007.
- [57] **C. Konrad.** *Kalibrierung von Magnet-Injektoren für Benzin-Direkteinspritzsysteme mittels Körperschall.* Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- [58] **R. Konrad.** *Dieselmotor-Management im Überblick.* Vieweg + Teubner, 2010.
- [59] **U. Konzelmann und T. Lenzing.** *Faseroptischer Drucksensoren.* Dt. Pat. DE10225934B4. 2010.
- [60] **D. Labuhn und Romberg O.** *Keine Panik vor Thermodynamik!* SpringerVieweg, 2012.
- [61] **Joseph B. Lambert, S. Gronert, Herbert F. Shurvell und D. A. Lightner.** *Spektroskopie.* Pearson, 2012.
- [62] **B. Last, H. Houben, M. Rottner und I. Stotz.** *Einfluss moderner Dieselmotorkaltstarthilfen auf den dieselmotorischen Kaltstart, Warmlauf und Emissionen.* In: 8. Internationales Stuttgarter Symposium (2008).
- [63] **M. Lavielle.** *Detection of change points in a time series.* In: *Statistics in Action with R* (2017).

- [64] **Y. Li, Z. Liu, D. Xu, Y. Hu, N. Zheng, C. Ma und J. Qi.** *Development of Magnetolectric Speed Sensor for Engine with High Environment Adaptability.* In: *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1744, 2020 International Conference on Mechanical Automation and Computer Engineering (MACE 2020) 28-30 October 2020, Xi'an, ShaanXi, China* (2020).
- [65] **H. Lin und K. Ding.** *A new method for measuring engine rotational speed based on the vibration and discrete spectrum correction technique.* In: 2013.
- [66] **B. Lindl.** *Vergleich des Kaltstartverhaltens eines Dieselmotors mit Stahl- und mit Keramikglühkerzen.* In: *MTZ 59 Motortechnische Zeitschrift* (1998), S. 156–161.
- [67] **G. Malaczynski, G. Roth und D. Johnson.** *Ion-Sense-Based Real-Time Combustion Sensing for Closed Loop Engine Control.* In: *SAE International* (2013).
- [68] **R. Marek und K. Nitsche.** *Praxis der Wärmeübertragung.* 2012.
- [69] **A. Marneros.** *Warum Ödipus keinen Ödipus-Komplex und Adonis keinen Schönheitswahn hatte – Psychoanalyse und griechische Mythologie – eine Beziehungserklärung.* Springer Verlag, 2018.
- [70] **G. Marzahn.** *Verfahren zur Regelung einer Einspritzmenge eines Injektors einer Brennkraftmaschine.* DE Patent 102,007,008,201. 2008.
- [71] **S. Matsumoto, K. Date, T. Taguchi und O. Herrmann.** *Der Neue Diesel-Magnetventil-Injektor von Denso.* In: *MTZ- Motortechnische Zeitschrift* (2013).
- [72] **G. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch und F. Otto.** *Verbrennungsmotoren: Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung.* B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [73] **R. Mock und H. Meixner.** *A miniaturized high-temperature pressure sensor for the combustion chamber of a spark ignition engine.* In: *Sensors and Actuators A: Physical* 25.1-3 (1990). Proceedings of Euro-sensors {IV} held jointly with Sensoren Technologie und Anwendung, S. 103–106.
- [74] **K. Mollenhauer.** *Handbuch: Dieselmotoren.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.

- [75] **K. Mollenhauer und H. Tschöke.** *Handbuch Dieselmotoren.* Springer, Berlin Heidelberg New York, 3. Auflage, 2007.
- [76] **J. J. Moré.** *The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory.* In G. A. Watson (ed.): *Numerical Analysis.* Dundee, 1977.
- [77] **H. Mueller, N. Piffer, B. Raschke und M. Wogrin.** *Die Wärmeleitungsgleichung: Projekt aus Partielle Differentialgleichungeng.* Report. Universität Würzburg, 2004.
- [78] **R. Müller.** *Spektroskopische Erfassung der Gastemperatur im Brennraum von Ottomotoren.* Diss. Georg-August-Universität Göttingen, 2009.
- [79] **T. Ohrnberger.** *Einspritzdüsenauslegungen und Brennraumgeometrien für ein direktinspritzendes 2-Ventil-Dieselmotorenverfahren.* Diss. Technische Universität München, 2009.
- [80] **H. Öing.** *Entwicklung eines neuen dieselmotorischen Injektorkonzeptes für zukünftige Emissionsgrenzwerte.* Diss. Universität Hannover, 2000.
- [81] **R. Pittermann.** *Spektroskopische Untersuchung der Verbrennung in Diesel- und Gasmotoren.* In: *MTZ, Springer Vieweg* (August 2008).
- [82] **F. Puente León.** *Messtechnik: Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker.* Springer Vieweg, 2015.
- [83] **F. Ramsperger.** *Detektion und Kompensation der Auswirkungen nicht-normgerechter Kraftstoffe auf den Betrieb von Pkw-Dieselmotoren.* In: 2012.
- [84] **K. Reif.** *Bosch: Moderne Diesel-Einspritzsysteme, Common-Rail und Einzelzylindersysteme.* Springer Vieweg, 2010.
- [85] **K. Reif.** *Bosch: Sensoren im Fahrzeug, 2. Auflage.* Springer Vieweg, 2012.
- [86] **M. Sackmann, B. Last, M. Rottner, H. Houben und O. Toedter.** *Verfahren zum Regeln einer Glühkerze.* Dt. Pat. DE10 2010 011 044 B4 2012.12.27. 2012.
- [87] **E. Schiessle.** *Industrie-Sensorik. Sensortechnik und Messwertaufnahme.* Vogel Buchverlag, 2016.
- [88] **S. Schmittinger und R. Moritz.** *Start- und Zündhilfesysteme für Dieselmotoren.* Springer Vieweg, 2017, S. 757–769.

- [89] **G. Schüttler.** *Einfluss der Glühsteuerungsparameter auf den dieselmotorischen Kaltstart, Warmlauf und Emissionen.* Diplomarbeit. Fachhochschule Bingen, 2007.
- [90] **G. Spanner.** *Lernpaket Sensortechnik.* Poing: Franzis, 2009.
- [91] **R. Suteekarn.** *Robust Observer Design for the Thermal-Electrical Behavior of a Glow Plug in a Combustion Engine.* Master Thesis. RWTH Aachen University, 2008.
- [92] **R. Suteekarn, M. Sackmann, V. Brichzin und C. Guehmann.** *Development of Physical-Empirical Cascade Model of Ceramic Glow Plug Surface Temperature in a Combustion Chamber.* In: (2012).
- [93] **R. Suteekarn, M. Sackmann, B. Last und C. Guehmann.** *High-Precision, Robust Cascade Model For Closed-Loop Control Of Ceramic Glow Plug Surface Temperature In A Diesel Engine.* In: 2012, S. 229–235.
- [94] **A. Theobald.** *Aktorik & Sensorik (HTW Saarland).* 2007.
- [95] **F. Thuselt.** *Physik der Halbleiterbauelemente.* SpringerVerlag, 2. Auflage, 2011.
- [96] **U. Todsén.** *Verbrennungsmotor.* Carl Hanser Verlag München, 2012.
- [97] **O. Toedter, M. Rottner und J. Stöckle.** *Einfluss der Glühtemperatur auf Abgaswerte und Kraftstoffverbrauch von Dieselmotoren.* In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* (2011), S. 894–899.
- [98] **O. Toedter und U. Stephan.** *Verfahren zum Betreiben einer Glühkerze.* Dt. Pat. DE10 2009 032 959 B4 2012.04.05. 2012.
- [99] **O. Toedter, B. Last, M. Rottner und J. Stöckle.** *Influence of glow temperature on emissions and fuel consumption.* In: *11th Stuttgart International Symposium* (2011), S. 477–493.
- [100] **G. Uhl.** *Ionenstrommessglühkerze und Verfahren und Schaltung zu ihrer Ansteuerung.* Dt. Pat. 0001072790 (BorgWarner AG Ludwigsburg, DE). 2004.
- [101] **R. van Basshuysen und F. Schäfer.** *Handbuch Verbrennungsmotoren.* Hrsg. von **Lektorat: Thomas Zipsner / Elisabeth Lange.** Vieweg & Sohn Verlag /GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2005, 2005 (3. Auflage).

- [102] **A. Velji, O. Toedter, U. Wagner, H. Kubach, S. Bernhardt und J. Pfeil.** *Vorlesung: Technische Grundlagen des Verbrennungsmotors, WS2019/2020.* Institut für Kolbenmaschinen (KIT), 2020.
- [103] **Verband der Keramischen Industrie e.V.** *Brevier Technische Keramik.* Fahner Druck GmbH, Lauf, 2003.
- [104] *Verringerung der CO₂-Emissionen von neuen Personenkraftwagen und von neuen leichten Nutzfahrzeugen.* Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019.
- [105] **B. Vogner.** *Der Piezoelektrische Effekt.* Diss. Universität Bayreuth, WS 09/10.
- [106] **B. Weigand, J. Köhler und J. Wolfersdorf.** *Thermodynamik kompakt.* Springer-Verlag, 2008.
- [107] **C. Wilhelmsson, A. Vressner, P. Tunestål und B. et al. Johansson.** *Combustion Chamber Wall Temperature Measurement and Modeling During Transient HCCI Operation.* In: *SAE Technical Paper 2005-01-3731 1* (2005).
- [108] **A. Wimmer.** *Skript: Thermodynamik des Verbrennungsmotors, Ausgabe: SS2018.* TU Graz, 2018.
- [109] **M. Wlodarczyk.** *Fiber Optics-Based Cylinder Pressure Sensors for Advanced Engine Controls.* In: *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 12 (2005), S. 1–2.
- [110] **G. Woschni.** *Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren.* In: *MTZ 31-1970 (12) 1* (1970).
- [111] **S. Xiang, L. Xu und Z. Wei-gong.** *The new Measurement Algorithm of the Engine Speed Base on the Basic Frequency of Vibration Signal.* In: *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE).* 2010.
- [112] **S. Zeeck, S. Grond und A. Zeeck.** *Chemie für Mediziner.* Urban Fischer-Verlag, 10. Auflage, 2020.
- [113] **L. Zhengbai.** *Optical Methods for the Measurement of the Temperature and Concentration Distribution in Combustion Chambers.* In: *SAE Technical 1* (1993).

Eigene Veröffentlichungen

- [114] **I. Demirdelen.** *Verfahren zur Regelung der Temperatur einer Glühkerze.* DE 10 2009 024 138 B4. 2012.
- [115] **I. Demirdelen und F. Puente León.** *Determination of engine speed by using the ceramic glow plug as a sensor element.* In: *MTZ - Worldwide* (Ausgabe 2, 2015), S. 38–43.
- [116] **I. Demirdelen und F. Puente León.** *Drehzahlermittlung mithilfe der Keramikglühkerze als Sensorelement.* In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* (Ausgabe 2, 2015), S. 62–67.
- [117] **I. Demirdelen, P. Wochner und F. Puente León.** *Detektion der Einspritzzeitpunkte und -dauern eines direkteinspritzenden Dieselmotors mit Hilfe der Keramikglühkerze.* In: *Shaker Verlag 1* (Aachen, 2013), S. 39–50.
- [118] **I. Demirdelen, G. Senyüz, F. Neumann, T. Akoum und F. Puente León.** *Methoden zur Klassifikation keramischer Glühkerzen.* In: *Shaker Verlag 1* (Aachen, 2012), In Robert Schmitt editor, XXVI. Messtechnisches Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik e.V. (AHMT), Pages 167–181.

Betreute studentische Arbeiten

- [119] **T. Akoum.** *Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung der Endwerttemperatur einer Keramikglühkerze.* In: *Bachelorarbeit* (2012).
- [120] **S.-A. Athanassiadis.** *Anpassung eines Motormodells an den instationären Motorbetrieb.* In: *Diplomarbeit* (2014).
- [121] **B. Glomb.** *Anpassung und Optimierung eines bestehenden Glühkerzenmodells.* In: *Diplomarbeit* (2012).
- [122] **S. Lutz.** *Erweiterung eines bestehenden Brennraummodells zur Berücksichtigung des Einspritzzeitpunktes in Abhängigkeit des Kurbelwellenwinkels.* In: *Bachelorarbeit* (2014).
- [123] **A. Maslowski.** *Schätzung der Brennraumtemperatur mithilfe des vereinfachten Glühkerzenmodells.* In: *Bachelorarbeit* (2012).
- [124] **F. Neumann.** *Klassifikation keramischer Glühkerzen mit Hilfe von Bayes.* In: *Bachelorarbeit* (2012).

- [125] **S. Pfirmann.** *Modellierung des Brennraums eines direkteinspritzenden Dieselmotors.* In: *Bachelorarbeit* (2011).
- [126] **D. Reinhardt.** *Erstellung eines vereinfachten Modells für keramische Glühkerzen.* In: *Diplomarbeit* (2013).
- [127] **A. Seel.** *Erstellung eines Glühkerzenmodells anhand von Messdaten.* In: *Bachelorarbeit* (2012).
- [128] **G. Senyüz.** *Support Vector Machine zur Klassifikation keramischer Glühkerzen.* In: *Studienarbeit* (2012).
- [129] **P. Wochner.** *Detektion der Einspritzzeitpunkte und -dauern mit Hilfe der Keramikglühkerze.* In: *Bachelorarbeit* (2013).
- [130] **R. T. Yanik.** *Modellierung des Brennraums eines direkteinspritzenden Dieselmotors.* In: *Diplomarbeit* (2012).

Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik (ISSN 2190-6629)

- Band 1 Pérez Grassi, Ana
Variable illumination and invariant features for detecting and classifying varnish defects.
ISBN 978-3-86644-537-6
- Band 2 Christ, Konrad
Kalibrierung von Magnet-Injektoren für Benzin-Direkteinspritzsysteme mittels Körperschall.
ISBN 978-3-86644-718-9
- Band 3 Sandmair, Andreas
Konzepte zur Trennung von Sprachsignalen in unterbestimmten Szenarien.
ISBN 978-3-86644-744-8
- Band 4 Bauer, Michael
Vergleich von Mehrträger-Übertragungsverfahren und Entwurfskriterien für neuartige Powerline-Kommunikationssysteme zur Realisierung von Smart Grids.
ISBN 978-3-86644-779-0
- Band 5 Kruse, Marco
Mehrobjekt-Zustandsschätzung mit verteilten Sensorträgern am Beispiel der Umfeldwahrnehmung im Straßenverkehr.
ISBN 978-3-86644-982-4
- Band 6 Dudeck, Sven
Kamerabasierte In-situ-Überwachung gepulster Laserschweißprozesse.
ISBN 978-3-7315-0019-3
- Band 7 Liu, Wenqing
Emulation of Narrowband Powerline Data Transmission Channels and Evaluation of PLC Systems.
ISBN 978-3-7315-0071-1

- Band 8 Otto, Carola
Fusion of Data from Heterogeneous Sensors with Distributed Fields of View and Situation Evaluation for Advanced Driver Assistance Systems.
ISBN 978-3-7315-0073-5
- Band 9 Wang, Limeng
Image Analysis and Evaluation of Cylinder Bore Surfaces in Micrographs.
ISBN 978-3-7315-0239-5
- Band 10 Michelsburg, Matthias
Materialklassifikation in optischen Inspektionssystemen mithilfe hyperspektraler Daten.
ISBN 978-3-7315-0273-9
- Band 11 Pallauf, Johannes
Objektsensitive Verfolgung und Klassifikation von Fußgängern mit verteilten Multi-Sensor-Trägern.
ISBN 978-3-7315-0529-7
- Band 12 Sigle, Martin
Robuste Schmalband-Powerline-Kommunikation für Niederspannungsverteilternetze.
ISBN 978-3-7315-0539-6
- Band 13 Opalko, Oliver
Powerline-Kommunikation für Batteriemangement-Systeme in Elektro- und Hybridfahrzeugen.
ISBN 978-3-7315-0647-8
- Band 14 Han, Bin
Characterization and Emulation of Low-Voltage Power Line Channels for Narrowband and Broadband Communication.
ISBN 978-3-7315-0654-6
- Band 15 Alonso, Damián Ezequiel
Wireless Data Transmission for the Battery Management System of Electric and Hybrid Vehicles.
ISBN 978-3-7315-0670-6

- Band 16 Hernández Mesa, Pilar
Design and analysis of a content-based image retrieval system.
ISBN 978-3-7315-0692-8
- Band 17 Suchanek, André
Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge.
ISBN 978-3-7315-0773-4
- Band 18 Bauer, Sebastian
Hyperspectral Image Unmixing Incorporating Adjacency Information.
ISBN 978-3-7315-0788-8
- Band 19 Vater, Sebastian
Monokulare Blickrichtungsschätzung zur berührungslosen Mensch-Maschine-Interaktion.
ISBN 978-3-7315-0789-5
- Band 20 Back, Kristine
Erkennung menschlicher Aktivitäten durch Erfassung und Analyse von Bewegungstrajektorien.
ISBN 978-3-7315-0909-7
- Band 21 Nürnberg, Thomas
Entwurf von Computational-Imaging-Systemen am Beispiel der monokularen Tiefenschätzung.
ISBN 978-3-7315-0941-7
- Band 22 Kaiser, Cornelius
Adaptive Modulationsverfahren für die schmalbandige Powerline-Kommunikation in Niederspannungsnetzen.
ISBN 978-3-7315-1010-9
- Band 23 Struckmeier, Frederick
Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen – Auflagemessung und Schachtelung
ISBN 978-3-7315-1127-4
- Band 24 Tatzel, Leonie Felica
Verbesserungen beim Laserschneiden mit Methoden des maschinellen Lernens
ISBN 978-3-7315-1128-1

- Band 25 Wetzel, Johannes
**Probabilistic Models and Inference for Multi-View People
Detection in Overlapping Depth Images**
ISBN 978-3-7315-1177-9
- Band 26 Mitschke, Norbert
**Konvolutionäre neuronale Netze in der industriellen
Bildverarbeitung und Robotik**
ISBN 978-3-7315-1197-7
- Band 27 Schambach, Maximilian
**Reconstruction from Spatio-Spectrally Coded
Multispectral Light Fields**
ISBN 978-3-7315-1210-3
- Band 28 Bächle, Matthias
**Model-based Filtering of Interfering Signals
in Ultrasonic Time Delay Estimations**
ISBN 978-3-7315-1252-3
- Band 29 Demirdelen, Ismet
Nutzung der keramischen Glühkerze als Sensorelement
ISBN 978-3-7315-1265-3

ISSN 2190-6629
ISBN 978-3-7315-1265-3

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

