

Forschungsbereich Motorentchnik des  
Instituts für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik der Hochschule Karlsruhe

## **Entwicklung und Untersuchung eines Oberflächenzündsystems für homogenbetriebene Gasmotoren**

### **HSI – Hot Surface Ignition**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ 30120 - 24/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner & Fino Scholl, M.Sc.  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Und

Dr.-Ing. Joachim Eggers  
Ingenieurbüro IDISIV

Dr.-Ing. Markus Klaissle  
SenerTec Kraft-Wärme-  
Energiesysteme GmbH

März 2015

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30120</b>	Referat	Fördersumme	<b>123.958,84 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>HSI – Hot Surface Ignition Entwicklung und Untersuchung eines Oberflächenzündsystems für homogenbetriebene Gasmotoren</b>			
<b>Stichworte</b>	Oberflächenzündung, Magermotor, Gasmotor, HSI			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>24 Monate</b>	<b>20.06.2012</b>	<b>20.12.2014</b>	<b>1</b>	
Zwischenberichte	<b>2</b>			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe		Tel	0721/925-1845
			Fax	0721/925-1915
			Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner	
<b>Kooperationspartner</b>	SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH 97424 Schweinfurt Idisiv - Ingenieurbüro Joachim Eggers 76133 Karlsruhe Universidad de Valladolid (UVa) 47011 Valladolid, Spanien		Bearbeiter Fino Scholl, M.Sc.	

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Für funkengezündete Magermotoren, den am häufigsten anzutreffenden BHKW-Antrieb, stellt vor allem das Erreichen geringer NO<sub>x</sub>-Emissionen eine große Herausforderung dar. Dies beruht auf der Tatsache, dass sich motorischer Wirkungsgrad und NO<sub>x</sub>-Emissionen in einem Zielkonflikt gegenüber stehen und bestimmte Grenzwerte nur mit Wirkungsgradeinbußen eingehalten werden können. Eine weitere Problematik stellt der Zündkerzenverschleiß und die damit verbundenen Wartungs- und Stillstandskosten dar. Eine Möglichkeit, die Probleme der Funkenzündung zu reduzieren, wird in der Oberflächenzündung gesehen. Aus Voruntersuchungen ging hervor, dass Oberflächenzündung in Form einer handelsüblichen Glühkerze eine Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Wirkungsgrad und NO<sub>x</sub>-Emissionen grundsätzlich ermöglicht. Das verwendete Entflammungssystem zeichnete sich durch einen einfachen und kostengünstigen Aufbau aus, allerdings war der Betriebsbereich hinsichtlich Lage der Verbrennung und Luftverhältnis sehr eingeschränkt und hohe Heizleistungen der Glühkerze für einen stabilen Motorbetrieb erforderlich.

Das Projektziel dieses Vorhabens besteht in der Entwicklung eines geregelten Oberflächenzündsystems für Klein-Blockheizkraftwerke, das sich durch eine geringe Leistungsaufnahme auszeichnet und einen Motorbetrieb bei hohem Wirkungsgrad sowie geringen Emissionen ermöglicht. Hierzu soll die Entflammung am Glühstift mittels Verbrennungssimulation und Motorversuchen unter Verwendung von Lichtwellenleitermesstechnik untersucht und die Auswirkung verschiedener Parameter auf die Oberflächentemperatur bestimmt werden. Um im Stationärbetrieb trotz variierender Betriebsbedingungen (Umgebungsdruck und –temperatur, Gaszusammensetzung, etc.) einen stabilen Motorbetrieb zu ermöglichen, soll ein Algorithmus entwickelt werden, der ein Regeln der Verbrennungsschwerpunktlage durch Auswertung der Motorvibrationen in Echtzeit erlaubt.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Ein wichtiger Teil der am IKKU durchgeführten Arbeiten befasste sich mit der Analyse des Entflammungsvorgangs bei Oberflächenzündung. Hierzu wurde ein Simulationsmodell des Prüfträgers aufgebaut und Verbrennungssimulationen durchgeführt. Des Weiteren wurde der Motor mit optischer Messtechnik ausgestattet, um Verbrennungsstrahlung über den Zyklus aufzuzeichnen. Die Auswirkung der Parameter Glühstiftgeometrie und –material auf die Stationärtemperatur des Glühstifts wurde mittels FE-Analyse

simuliert und anschließend im Motorbetrieb unter Verwendung einer externen Zündquelle bei unterschiedlichen Luftverhältnissen und Schwerpunktlagen validiert. Die gewonnenen Erkenntnisse erlaubten die Entwicklung verschiedener Entflammungselemente, die anschließend im Motor erprobt wurden.

Mit der Zielsetzung, den Betriebsbereich der HSI (Hot Surface Ignition) zu erweitern, wurden Reglerversuche unter Verwendung einer keramischen Glühkerze durchgeführt und das System nachfolgend optimiert. Die Auswirkung von Luftverhältnis und Ansaugdruck auf den HSI-Betrieb wurde durch Versuche mit einer speziell hierfür entwickelten Aufladeeinheit mit Kompressor durchgeführt.

Im Betrieb mit konventioneller Funkenzündung wurden in Zusammenarbeit mit Idisiv zwei unterschiedliche Positionen zur Körperschallmessung untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung zur Verbrennungsdiagnostik ausgewertet.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Aus der Auswertung der Verbrennungssimulation und den Versuchen mit optischer Messtechnik geht hervor, dass es bei hohen Glühkerzentemperaturen zu Vorentflammungen am Glühstift kommen kann. Aufgrund der geometrischen Ausführung des Entflammungselements kommt es allerdings nicht zu einer frühzeitigen sondern zu einer verschleppten Hauptverbrennung. Grund hierfür ist hauptsächlich strömungstechnischer Natur. Für einen stabilen Motorbetrieb bei geringen Heizleistungen sind Betriebsbereiche ohne Vorentflammung anzustreben.

Die neu entwickelten Ausführungen ermöglichten keinen stabilen Motorbetrieb, weshalb weitere Versuche unter Verwendung einer keramischen Glühkerze durchgeführt wurden.

Im Zuge der Reglerversuche stellte sich heraus, dass nur durch Widerstandsregelung ein stabiler Motorbetriebs in weiten Bereichen möglich ist. Dabei kommt der Wahl der Reglerparameter und der Reglerfrequenz – insbesondere bei frühen und späten Schwerpunktlagen sowie niedrigen Luftverhältnissen - große Bedeutung zu. Die Versuche mit Motoraufladung zeigten, dass die erforderliche Heizleistung mit steigendem Ladedruck, früheren Schwerpunktlagen und Anfettung sinkt, was auf die höhere Wärmefreisetzung aus der Verbrennung zurückzuführen ist.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Ergebnisse der in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen wurden auf verschiedenen Fachtagungen vorgestellt. Diese sind u. a.:

Eggers, J.; Scholl, F.; Kettner, M.; Klaisle, M.: Körperschallbasierte Verbrennungsdiagnose an einem Einzylinder-Gasmotor, 9. Dessauer Gasmotorenkonferenz, Dessau, April 2015 (noch nicht veröffentlicht).

Scholl, F.; Neher, D. et al.: Experiments on Ignition and Combustion Induced by Controlled Hot Surface Ignition in Stationary Engines Running with natural Gas, IAV 2. Internationale Tagung Zündsysteme für Ottomotoren, Berlin, November 2014.

Scholl, F.; Neher, D. et al.: Untersuchungen zu Entflammungszeitpunkt und Flammenausbreitung bei kontrollierter Oberflächenzündung in Stationärgasmotoren, Advanced Simulation Technologies Conference, Augsburg, Oktober 2014.

### **Fazit**

Die durchgeführten Untersuchungen ermöglichten, die Entflammung an heißen Oberflächen tiefgehend zu untersuchen. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse und Ansätze, um das HSI-System weiter zu optimieren. Bei der Schirmvariante gilt es dabei vor allem eine Vorentflammung im Schirm zu vermeiden. Bei Vorkammer-HSI gilt es ebenfalls, die Entflammung zu verzögern, sodass die Verbrennung erst nahe dem oberen Totpunkt eingeleitet wird. Dazu muss der Glühstift während des Ladungswechsels und dem größten Teil der Kompressionsphase durch Restgas vom Frischgemisch abgeschirmt werden. Aus Kosten- und Haltbarkeitsgründen ist die Verwendung einer massenproduzierten keramischen Glühkerze anzustreben.

Die Optimierung des HSI-Reglers erlaubt eine deutliche Ausweitung des Betriebsbereichs sowohl hinsichtlich einstellbarer Verbrennungsschwerpunktlagen als auch Luftverhältnisse. Um den HSI-Betrieb, insbesondere bei frühen Verbrennungsschwerpunktlagen, weiter zu stabilisieren und den Betriebsbereich weiter zu vergrößern, erscheint die Verwendung einer hochfrequent regelbaren Spannungsversorgung künftig sinnvoll.

Die entwickelten Algorithmen zur Auswertung des Motorkörperschalls ermöglichen eine verlässliche Schätzung der Verbrennungsschwerpunktlage im Motorbetrieb. Ein Einsatz in Kombination mit der konventionellen Funkenzündung als Werkzeug für die Verbrennungsdiagnostik ist ebenfalls denkbar.

---

## Inhaltsverzeichnis

Abbilungsverzeichnis .....	V
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis .....	VIII
Zusammenfassung .....	1
1 Einleitung.....	2
2 Vorbereitung des Versuchsträgers .....	5
2.1 Lichtletermesstechnik.....	6
2.2 Körperschallmesstechnik .....	6
2.3 Kompressoraufladeeinheit.....	7
2.4 M8-Zündkerze .....	8
2.5 Anpassen des HSI-Grundkörpers.....	8
3 Thermische Simulation und motorische Validierung.....	9
3.1 Auswirkung des Glühstiftmaterials auf die Stationärtemperatur .....	10
3.2 Auswirkung der Glühstiftgeometrie auf die Stationärtemperatur .....	15
4 CFD-Verbrennungssimulation .....	16
4.1 Simulation der Schirmvariante .....	17
4.2 Simulation der Vorkammervariante .....	20
4.3 Auslegung und Fertigung der beheizten Entflammungselemente (AHSI) ..	20
5 Motorversuche.....	22
5.1 Analyse des Betriebsverhaltens bei aktiv beheiztem Glühstift (AHSI).....	22
5.2 Analyse der Entflammung und Verbrennung mittels optischer Messtechnik (KGK-HSI).....	23
5.3 Optimierung der HSI-Regelung (KGK-HSI).....	27
5.4 Auswirkung von Motorlast und Luftverhältnis auf die Parameter der Oberflächenzündung (KGK-HSI).....	30
5.5 Körperschalluntersuchungen.....	35
6 Bewertung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Zielsetzung des Vorhabens	40
7 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	41
8 Erfolge und geplante Publikationen.....	42
Fazit.....	42
Literaturverzeichnis .....	44
Anhang .....	46

## Abbilungsverzeichnis

Abbildung 1: Angestrebte CO <sub>2</sub> -Reduzierung der Bundesregierung bis 2050 (links) (nach: Deutsche Umwelthilfe, 12/2009) und Emissionsentlastung durch Erdgas-BHKW nach [ASUE] (rechts).....	2
Abbildung 2: Prognose der installierten Mikro-KWK-Anlagen (bis 15kWel) bis 2020 in Deutschland (Quelle: trend:research).....	3
Abbildung 3: Angestrebte Verbesserung des Zielkonflikts zwischen Wirkungsgrad und NO <sub>x</sub> -Emissionen durch eine verbesserte Entflammung.....	4
Abbildung 4: Verbrennungsbeginn über Glühkerzentemperatur bei verschiedenen Luftverhältnissen, S10-Variante mit keramischer Glühkerze [10].....	5
Abbildung 5: Prüfträger SenerTec Dachs 5.5 G.....	5
Abbildung 6: Lichtleitermesstechnik im Entflammungselement (i1) und im externen Adapter (e2-e5)...	6
Abbildung 7: Positionen der Körperschallsensoren am Prüfträger. Position 1 ist eine neu geschaffene Sensorposition, die den Körperschall brennraumnah abgreift. Position 2 entspricht der Sensormontage aus Voruntersuchungen (brennraumfern, aber einfach installierbar).....	7
Abbildung 8: Aufladeeinheit mit Roots-Gebläse, Bypass und Ladeluftkühler.....	8
Abbildung 9: M8-Zündkerze für Stationärtemperaturversuche.....	8
Abbildung 10: Schirm- und Vorkammervarianten als Basis für den Aufbau der Simulationsnetze und der Durchführung von Motorversuchen zur Bestimmung der Glühstiftstationärtemperatur (1 und 2), modifizierte Schirmvariante mit keramischer Glühkerze (3), modifizierte Vorkammerzündkerze (3). ....	9
Abbildung 11: Glühstift-Grundkörper und Rechennetze (links), untersuchte Varianten (D1/D2/D3) (rechts).....	11
Abbildung 12: Simulierte Temperaturverläufe im eingeschwungenen Zustand für unterschiedliche Glühstift-Materialien bei Variante 5,0/5,0/0,0 (Referenzbetriebspunkt $p_{mi} = 6,3$ , $n = 2450$ 1/min, $X_{50\%} \approx 17$ °KW n.OT, $\lambda \approx 1,5$ ).....	12
Abbildung 13: Schirmvariante als PHSI-Ausführung mit Thermoelement zur Messung der Glühstifttemperatur.....	13
Abbildung 14: Gemessene Stationärtemperaturen an der Glühstiftspitze im Motorbetrieb: Inconel 601 (links) und Nickel 99.2 LC (rechts), Variante 5,0/5,0/0,0, $n = 2450$ 1/min.....	13
Abbildung 15: Stationärtemperatur des Glühstifts bei passiver Schirmvariante (links) und passiver Vorkammervariante (rechts) über Verbrennungsluftverhältnis und Zündzeitpunkt; Werkstoff: Inconel 601.....	14
Abbildung 16: Davonlaufende passive Glühzündung über 59 Zyklen ( $t \approx 3$ s) mit anschließender Abmagerung, Vorkammer-PHSI T4x1.....	14
Abbildung 17: Definition der Wärmeübertragungsflächen A1 und A2 (links), Glühstifttemperatur THS und A1/A2-Verhältnis für unterschiedliche Geometrievarianten (rechts).....	15
Abbildung 18: Stationärtemperatur des Glühstifts über der Verbrennungsschwerpunktlage für unterschiedliche PHSI-Varianten im Motorbetrieb (links), schematische Darstellung des Bereichs möglicher Wandwärmeverluste (rechts).....	16

---

Abbildung 19: Rechenintervalle und zugehörige Rechennetze .....	16
Abbildung 20: Randbedingungen der CFD-Verbrennungssimulation .....	17
Abbildung 21: Beginn der chemischen Reaktionen im Schirmvolumen (links) und Kraftstoffmassenumsatzpunkte über der Glühstifttemperatur .....	18
Abbildung 22: Gemittelte Reaktionsfortschrittsvariable im Schirmvolumen über den Kurbelwinkel (unten), ausgewählte Farbplots der lokalen Reaktionsfortschrittsvariable, $T_{HS} = 800/1200 \text{ °C}$ .....	19
Abbildung 23: Simulierter Verlauf der Kraftstoffmasse (links) und der OH-Konzentration im Schirm (mitte) sowie der OH-Konzentration im Hauptbrennraum (rechts).....	19
Abbildung 24: Simulierter Kraftstoffmassenumsatz im Hauptbrennraum über Kurbelwinkel bei Vorkammer-HSI [12].....	20
Abbildung 25: Grundsätzlicher Aufbau der Vorkammer-AHSI (mit elektrischer Beheizung) .....	21
Abbildung 26: Herstellung des beheizbaren Glühstifts .....	21
Abbildung 27: Übergang zwischen Funken- und Glühzündung bei $\lambda \approx 1,38$ und anschließender Abmagerung unter Verwendung der aktiv beheizten Vorkammer-HSI (AHSI) .....	23
Abbildung 28: Vermessung des Temperatur-Widerstands-Verhaltens der Glühkerze .....	24
Abbildung 29: Adapter mit Lichtwellenleiter-Zugängen im ausgebauten (links) und eingebauten (rechts) Zustand .....	24
Abbildung 30: Verbrennungsschwerpunktlage über Glühkerzenwiderstand (links) und aufgezeichnete Strahlung im Schirmvolumen (rechts), gemittelt über 200 Zyklen für $\lambda = 1,76$ .....	25
Abbildung 31: Detektierte Strahlung durch optischen Zugang i1 über den Kurbelwinkel bei $R = 0,88 \Omega$ (oben) und $R = 0,92 \Omega$ (unten) für Zyklen mit frühester, mittlerer und spätesten Verbrennungsschwerpunktlage (CA50), Ensemble aus 200 Motorzyklen.....	27
Abbildung 32: HSI-Betrieb bei Spannungsregelung (links) und Widerstandsregelung (rechts), $\lambda = 1,82$ .....	28
Abbildung 33: HSI-Betrieb bei Stromregelung (links) und Leistungsregelung (rechts), $\lambda = 1,82$ .....	28
Abbildung 34: HSI-Widerstand (links) und HSI-Leistung (rechts) über der Zeit im Stationärbetrieb bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren $K_p$ , $\lambda = 1,81$ .....	29
Abbildung 35: HSI-Widerstand (links) und HSI-Leistung (rechts) über der Zeit im Stationärbetrieb bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren $K_i$ , $\lambda = 1,81$ .....	29
Abbildung 36: Verbrennungsschwerpunktlage CA50, HSI-Leistung und COV bezogen auf die indizierte Hochdruckleistung $IMEP_g$ über HSI-Widerstand bei verschiedenen Ladedrücken $p_{M_{ixt}}$ , $\lambda = 1,80$ .....	32
Abbildung 37: Verbrennungsschwerpunktlage CA50, HSI-Leistung und COV bezogen auf die indizierte Hochdruckleistung $IMEP_g$ über HSI-Widerstand bei verschiedenen Luftverhältnissen bei $p_{M_{ixt}} = 800 \text{ mbar}$ (links) und $p_{M_{ixt}} = 1000 \text{ mbar}$ (rechts) .....	33
Abbildung 38: ISFCg-NOx-Zielkonflikt aller Betriebspunkte unter $NO_x = 2000 \text{ mg/m}_N^3$ (bezogen auf 5% $O_2$ ) .....	34
Abbildung 39: Übersicht der betrachteten Strecke der Signalübertragung vom Zylinderinnendruck bis zur digitalen Verarbeitung und Analyse des erfassten Körperschalls .....	35

---

Abbildung 40: Modell der Signalübertragung vom Zylinderinnendruck bis zum Eingang der AD-Umsetzung vom erfassten Körperschall.....	36
Abbildung 41: Überblicks-Blockschaltbild der digitalen Verarbeitung und Analyse vom erfassten Körperschall.....	36
Abbildung 42: Aufbereitete Körperschallsignale der Betriebspunkte bei Luftverhältnis $\lambda = 1,40$ und $\lambda = 1,65$ . Die oberste Abbildung zeigt die Zylinderdrucksignale (Referenz). Die mittlere und die untere Abbildung zeigen die aufbereiteten Körperschallsignale von Sensor 1 (brennraumnah) sowie Sensor 2 (am Motorblock vorne) [13].....	38
Abbildung 43: Schätzung der Verbrennungsschwerpunktlage via Körperschall vom Sensor 1 (brennraumnah; linkes Bild) sowie vom Sensor 2 (am Motorblock vorne; rechtes Bild) für Luftverhältnis $\lambda = 1,40$ und $\lambda = 1,65$ [13].....	39
Abbildung 44: Zeitliche Darstellung der Verbrennungsschwerpunktlage für eine Betriebsdauer von ca. 3 h. Die mit „calibration“ gekennzeichneten Datenabschnitte wurden für die Festlegung der Parameter der Körperschallauswertung genutzt. Die untere Darstellung zeigt die Unterschiede zwischen Zylinderdruck- und Körperschall-basierter Verbrennungsschwerpunktlage [13]. .....	40

## Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
HsKA	Hochschule Karlsruhe
IKKU	Institut für Kälte, Klima- und Umwelttechnik
HSI	Hot Surface Ignition
CA	Crank Angle, s. KW
CAX	x%-Kraftstoffmassenumsatzpunkt
R	Widerstand
P <sub>el</sub>	Elektrische Leistung
BHKW	Blockheizkraftwerk
KGK	Keramische Glühkerze
FEA	Finite Elemente Analyse
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Computer Aided Design
ECFM-3z	Extended Coherent Flame Model - 3 Zones
X50%	Verbrennungsschwerpunktlage
V <sub>VK</sub>	Vorkammervolumen
V <sub>K</sub>	Kompressionsvolumen
$\lambda$	Verbrennungsluftverhältnis
p <sub>mi</sub>	Indizierter Mitteldruck
SOC	Start of Combustion
n	Motordrehzahl
KW	Kurbelwinkel
AHSI	Aktive Hot Surface Ignition (elektrisch beheizt)
PHSI	Passive Hot Surface Ignition (unbeheizt)
OT	Oberer Totpunkt
UT	Unterer Totpunkt
R <sub>HSI</sub>	HSI-Widerstand
P <sub>HSI</sub>	Elektrische HSI-Leistung
U <sub>HSI</sub>	HSI-Spannung
I <sub>HSI</sub>	HSI-Strom
IMEP <sub>g</sub>	Gross Indicated Mean Effective Pressure – Indizierter Mitteldruck (Hochdruckphase)
ISFC <sub>g</sub>	Indicated Specific Fuel Consumption – Spezifischer Kraftstoffverbrauch bezogen auf die indizierte Hochdruckleistung
MFB	Mass Fraction Burnt – Anteil verbrannter Kraftstoff

---

## Zusammenfassung

Im Rahmen des am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der Hochschule Karlsruhe durchgeführten Vorhabens wurde ein Oberflächenzündsystem für kleine gasbetriebene Blockheizkraftwerke entwickelt und untersucht. Langfristiges Ziel dieser Alternative zur Funkenzündung ist die Reduktion der Anlagen-Wartungskosten sowie eine Verbesserung des Wirkungsgrad-Stickoxidemissionen-Zielkonflikts.

Zunächst wurde die Auswirkung von Glühstiftmaterial und –geometrie in Finite-Elemente-Analysen und Motorversuchen auf die Stationärtemperatur der heißen Oberfläche bestimmt. Es zeigte sich, dass zum Erreichen hoher Temperaturen, die zur Zündung des Gemischs erforderlich sind, der Glühstift eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit sowie einen geringen Wärleitungsquerschnitt in Richtung Motorblock aufweisen sollte. Ein in einer Vorkammer angebrachter Glühstift erreicht zudem deutlich höhere Temperaturen als ein direkt in den Hauptbrennraum ragender. Auf den Versuchsergebnissen aufbauend, wurden zwei Varianten mit aktiv beheiztem Glühstift abgeleitet und motorisch untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass bei der Vorkammervariante die Verbrennung viel zu früh während der Kompression beginnt, bei der erprobten Schirmvariante hingegen keine Gemischentflammung möglich ist. Weitere Untersuchungen wurden daraufhin unter Verwendung einer keramischen Glühkerze durchgeführt. Durch optimierte Parameter des Glühstifttemperaturreglers konnte der stabile Betriebsbereich der HSI im Vergleich zu Voruntersuchungen deutlich ausgeweitet werden. Dies ermöglicht das Einstellen stabiler Betriebspunkte unter Einhaltung zukünftiger NO<sub>x</sub>-Grenzwerte bei guten Motorwirkungsgraden. Aus den Versuchen ging zudem hervor, dass durch Regleroptimierung, Anfettung, frühere Verbrennungsschwerpunktlagen sowie steigende Mitteldrücke die erforderliche Heizleistung reduziert werden kann.

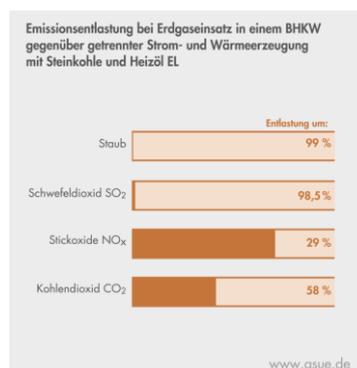
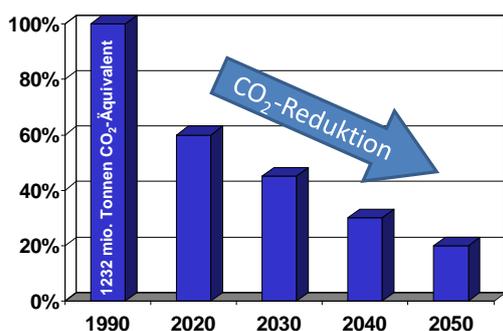
Zur Regelung der Entflammungssystems wurde ein Algorithmus entwickelt, der anhand des aufgezeichneten Motorkörperschalls ein Ableiten der Verbrennungsschwerpunktlage in Echtzeit ermöglicht.

Die Kombination aus 3D-Verbrennungssimulation und Lichtwellenleiterversuchen erlaubte die Analyse der Entflammung sowie der nachfolgenden Flammenausbreitung und liefert dadurch weitere Verbesserungsansätze für die Zukunft.

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 30120 - 24/0 gefördert und in Kooperation mit den Firmen SenerTec und Idisiv bearbeitet.

# 1 Einleitung

Im Rahmen des in 2012 novellierten Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz erfolgte die Zielsetzung, den Stromanteil aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen bis zum Jahr 2020 auf 25 % zu erhöhen. Dies beruht auf den Absichten der Bundesregierung, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß in den kommenden Jahren drastisch zu senken (s. Abbildung 1, links). Blockheizkraftwerke (BHKW) erlauben aufgrund der gleichzeitigen dezentralen Nutzung von Strom und Abwärme, den Primärenergieverbrauch durch Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % zu senken und infolgedessen den CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutlich zu verringern. Abbildung 1 (rechts) zeigt die Emissionsentlastung durch den Einsatz eines Erdgas-BHKW im Vergleich zur getrennten Strom- und Wärmeerzeugung mittels Steinkohle und Heizöl EL (Extra Leicht). Die CO<sub>2</sub>-Belastung kann dabei um ca. 58 % reduziert werden.

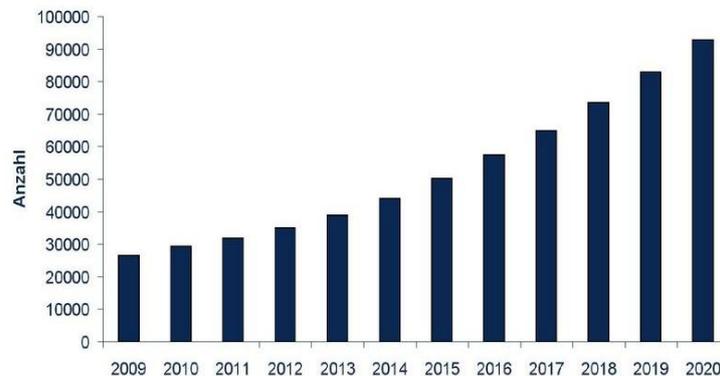


**Abbildung 1: Angestrebte CO<sub>2</sub>-Reduzierung der Bundesregierung bis 2050 (links) (nach: Deutsche Umwelthilfe, 12/2009) und Emissionsentlastung durch Erdgas-BHKW nach [ASUE] (rechts)**

Ein weiterer Grund für den wachsenden BHKW-Markt stellen Altbauten mit hohem Heizbedarf dar. Laut einer Studie des Instituts für Wirtschaftsforschung Halle (IWH) werden die Sanierungspotentiale zur Reduktion des Energieverbrauchs bei Altbauten oft überschätzt und sind unter Umständen aufgrund aufwändiger und denkmalgeschützter Fassaden nicht durchführbar. Die Nutzung der Abwärme eines stromerzeugenden BHKW bietet in vielen Fällen die Möglichkeit, den Gesamtenergieverbrauch im Vergleich zu einer Kombination aus Dämmung und Brennwertkessel zu senken.

Abbildung 2 zeigt den Trend der Anzahl an Installationen sogenannter Mikro- bzw. Mini-BHKW bis zu einer Leistung von 15 kW<sub>el</sub> bis 2020. Der starke Zuwachs in diesem Segment ist vor allem auf die verhältnismäßig hohe Förderung durch den Bund in Form von einmaligen Investitionszuschüssen [1], einem KWK-Zuschuss für jede produzierte Kilowattstunde Strom und erlassene Energiesteuern [7] zurückzuführen.

Anlaufende BHKW-Contracting-Projekte wie „Miniversum“ von Enversum und SenerTec [4] bestätigen den Trend.



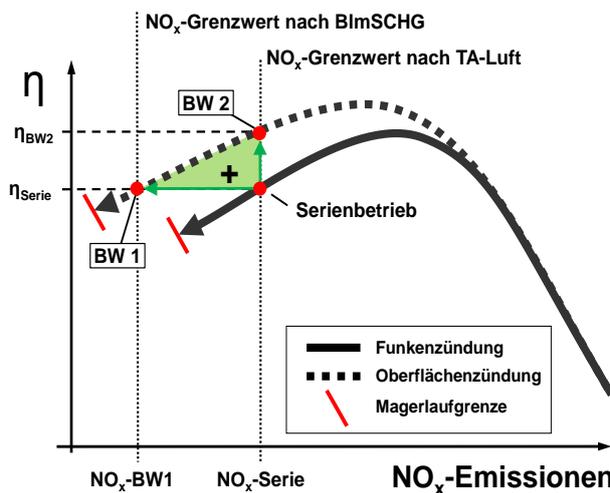
**Abbildung 2: Prognose der installierten Mikro-KWK-Anlagen (bis 15kWel) bis 2020 in Deutschland (Quelle: trend:research)**

BHKW werden größtenteils durch Gasmotoren bei Luftüberschuss angetrieben, da diese vergleichsweise hohe Wirkungsgrade ermöglichen und dadurch die Wirtschaftlichkeit der Anlage steigern. Während die Erfüllung von CO- und HC-Grenzwerten verhältnismäßig unproblematisch ist, da die Rohemissionen durch einen Oxidationskatalysator reduziert werden können, stellt die Einhaltung von NO<sub>x</sub>-Grenzwerten eine große Herausforderung dar. Dies beruht auf der Tatsache, dass sich Wirkungsgrad und NO<sub>x</sub>-Emissionen in einem Zielkonflikt gegenüber stehen und die Grenzwerte nur mit Wirkungsgradeinbußen eingehalten werden können. Mikro-KWK-Anlagen unterliegen derzeit keinen Emissionsgrenzwerten, allerdings ist in Zukunft jedoch mit immer schärferen Emissionsgesetzgebungen zu rechnen. So wird z.B. ab 2018 in der gesamten EU ein neuer Grenzwert für Stickoxid-Emissionen bei Klein-BHKW Anlagen (bis 50 kWel) eingeführt [5]. Für KWK-Anlagen mit innerer Verbrennung und gasförmigem Brennstoff gilt dann ein NO<sub>x</sub>-Grenzwert von 240 mg/kWh Brennstoffeinsatz als Brennwert, was in etwa ½TA-Luft bzw. 250 mg/m<sup>3</sup> (5% O<sub>2</sub>) entspricht. Das Klein-BHKW des Herstellers SenerTec kann diesen Grenzwert zwar durch Abmagerung zu erreichen, allerdings nur unter deutlichem Leistungs- und Wirkungsgradverlust.

Die Oberflächenzündung ermöglicht den Zielkonflikt durch eine beschleunigte und stabilere Entflammung im Vergleich zu Funkenzündung grundsätzlich zu verbessern (s. Abbildung 3). Dabei kann der Wirkungsgrad entweder bei Einhaltung des neuen NO<sub>x</sub>-Grenzwerts beibehalten (Betriebsweise 1 – BW 1) oder bei gleichbleibenden NO<sub>x</sub>-Emissionen gesteigert werden (Betriebsweise 2 – BW 2).

Das Projektziel besteht in der Entwicklung eines geregelten Oberflächenzündsystems für Klein-Blockheizkraftwerke, das sich durch eine geringe Leistungsaufnahme

auszeichnet und einen Motorbetrieb bei hohem Wirkungsgrad sowie geringen Emissionen ermöglicht. Die Oberflächenzündung soll durch Ausweiten der Magerlaufgrenze im Vergleich zur Vorkammerfunkenzündung die Einhaltung zukünftiger Emissionsgesetzgebungen bei höheren Motorwirkungsgraden ermöglichen.



**Abbildung 3: Angestrebte Verbesserung des Zielkonflikts zwischen Wirkungsgrad und  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch eine verbesserte Entflammung**

Im Rahmen des Vorhabens soll die Untersuchung grundsätzlicher Einflussparameter wie Glühstiftmaterial und -geometrie auf die Verharrungs- bzw. Stationärtemperatur des Glühstifts im Betrieb erfolgen. Auf den Ergebnissen aufbauend soll ein Glühstift entwickelt werden, der einen Betrieb mit Oberflächenzündung bei möglichst geringer elektrischer Zuheizung ermöglicht. Das Zündsystem wird für den homogenen Magerbetrieb von Gasmotoren entwickelt und steuert den Entflammungszeitpunkt bzw. die Verbrennungsschwerpunktlage über die Temperatur einer heißen Oberfläche. Die Lage der Verbrennung, die maßgeblich für Wirkungsgrad und Emissionen verantwortlich ist, soll über die Auswertung der Motorschwingungen in Echtzeit bestimmt werden und somit als Regelgröße dienen.

Zudem soll die im Zuge der in [11] veröffentlichten Voruntersuchungen unter Verwendung der Schirmvariante mit keramischer Glühkerze aufgetretenen Verbrennungsanomalie der Oberflächenzündung analysiert werden. In [11] wurde die Glühkerzentemperatur bei unterschiedlichen Luftverhältnissen schrittweise variiert und der Einfluss auf den Verbrennungsbeginn untersucht. Die Kennlinie zur Berechnung der Glühstifttemperatur wurde dabei bei Umgebungsbedingungen über eine nahezu exakt lineare Korrelation zwischen Glühkerzenwiderstand und Temperatur der Glühkerzenspitze mittels Thermoelement bestimmt. Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass sich der HSI-Betrieb bei konstantem Luftverhältnis in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilen lässt. Entsprechend dem Arrhenius-Ansatz führt in Bereich 1 (section 1) eine Steigerung der Glühstifttemperatur zu einem verfrühten Verbrennungsbeginn (CA5). Ab einer bestimmten Temperatur führt ein weiteres Erhöhen jedoch zu gegensätzlichem Verhalten mit verschlepptem Verbrennungsbeginn (section 2). Mittels Verbrennungssimulation und Motorversuchen unter Zuhilfenahme optischer Messtechnik soll der Entflammungsvorgang an heißen Oberflächen untersucht werden,

um die Gründe für das beschriebene anomale Entflammungsverhalten zu finden und Ansätze zur Optimierung des HSI-Systems auszuarbeiten.

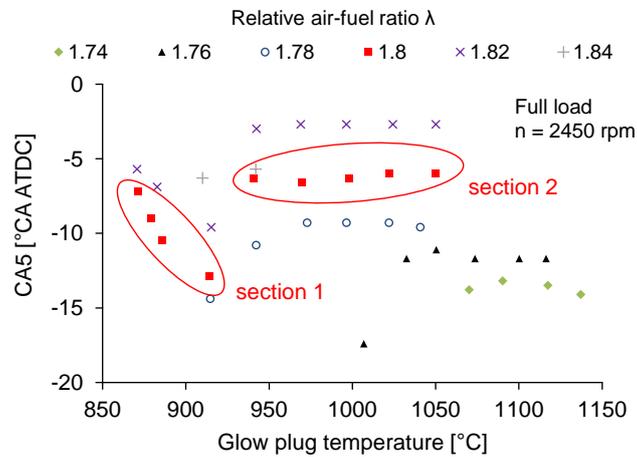
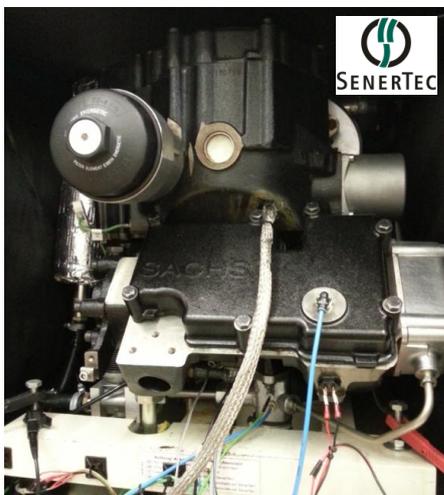


Abbildung 4: Verbrennungsbeginn über Glühkerzentemperatur bei verschiedenen Luftverhältnissen, S10-Variante mit keramischer Glühkerze [11].

## 2 Vorbereitung des Versuchsträgers

Als Versuchsträger kommt an der Hochschule Karlsruhe (HsKA) ein Einzylinder-BHKW des Typs „Dachs“ des Kooperationspartners SenerTec zum Einsatz. Das Luft-Erdgas-Gemisch wird in Serie durch eine Vorkammerkerze der Fa. Multitorch gezündet und der Motor durch Anpassen der Kraftstoffdosierung auf eine konstante elektrische Leistung von 5,5 kW geregelt. Die Drehzahl liegt dabei, bedingt durch die Anbindung am Stromnetz, bei 2450 1/min.



<b>Nennleistung</b>	5.5 kW
<b>Kraftstoff</b>	Erdgas
<b>Nenndrehzahl</b>	2450 1/min
<b>Verdichtungsverh. (geom.)</b>	13.2:1
<b>Bohrung/Hub</b>	90/91 mm
<b>Hubraum</b>	578 cm <sup>3</sup>
<b>Ventile</b>	2
<b>Zündung</b>	Vorkammerzündkerze

Abbildung 5: Prüfträger SenerTec Dachs 5.5 G

## 2.1 Lichtleitermesstechnik

Der Motorblock wurde fertigungstechnisch bearbeitet, um diesen mit optischen Zugängen zum Brennraum auszustatten. Zur Aufnahme des externen Lichtwellenleiter-Adapters, in den das Entflammungselement eingeschraubt wird, musste das Serien-Zündkerzengewinde aufgebohrt werden. Über dessen Umfang verteilt wurden 6 optische Zugänge (e1-e6) angebracht und erlauben somit die Auswertung der Verbrennungsstrahlung im Hauptbrennraum. Für den Fall, dass keine Verbrennungsstrahlung aufgezeichnet werden soll, ist es möglich, den Adapter durch einen Dummy ohne optische Fenster zu ersetzen. Zwei Lichtwellenleiter (i1 und i2) wurden um die heiße Oberfläche angebracht und ermöglichen dadurch das Aufzeichnen der Strahlung im Schirm des Entflammungselements (S. Abbildung 6). Die Zugänge i2, e1 und e6 zeichneten sich durch ein reduziertes Übertragungsverhalten aus und blieben deshalb in der Auswertung unberücksichtigt. Der Einsatz der Lichtleitermesstechnik hat den Zweck, sowohl den genauen Entflammungszeitpunkt als auch den Entflammungsort zu bestimmen. Das Signal der Lichtleiter wird durch Photomultiplier in ein elektrisches Signal umgewandelt und kurbelwellensynchron aufgezeichnet.

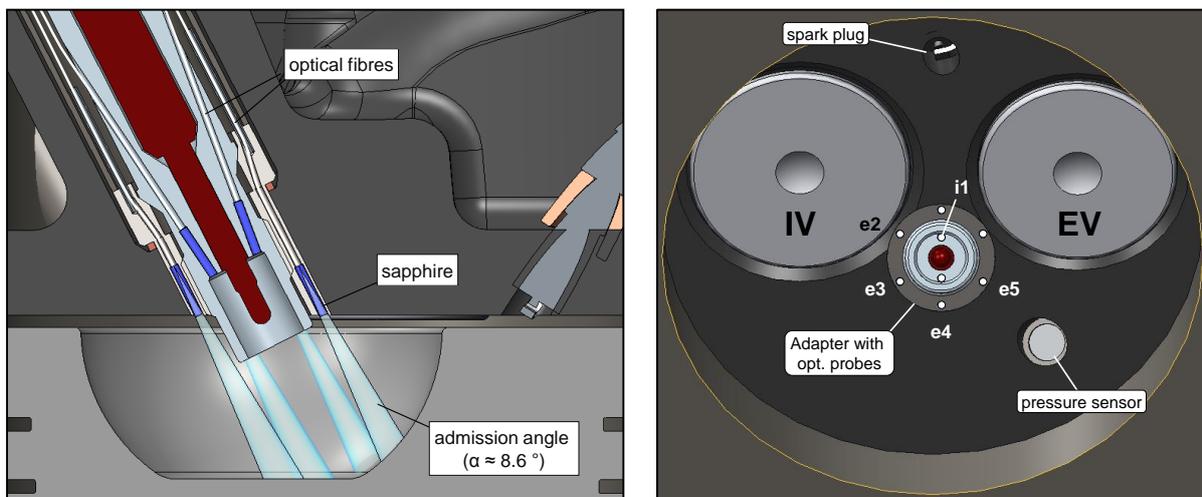


Abbildung 6: Lichtleitermesstechnik im Entflammungselement (i1) und im externen Adapter (e2-e5)

## 2.2 Körperschallmesstechnik

Zum Aufzeichnen der Motorschwingungen wurden Körperschallaufnehmer an zwei unterschiedlichen Positionen des Motorblocks angebracht. Es handelt sich dabei um kostengünstige und robuste Serienkomponenten aus dem Kraftfahrzeugbereich. Das Ziel der Auswertung des Motorkörperschalls ist die Analyse der Verbrennung, wie es sonst nur direkt über die Erfassung des Zylinderinnendrucks möglich ist. Wichtige Größen, die für die Regelung des Oberflächenzündsystems von Bedeutung sind

(z.B. die Verbrennungsschwerpunktlage), sollen durch Auswertung des Körperschalls in Echtzeit bestimmt werden können. Das Aufzeichnen der Körperschallsignale erfolgt mit einer Bandbreite größer 20kHz synchron zur Erfassung des Kurbelwinkels sowie dem Zylinderinnendruck.

In Voruntersuchungen wurde mit Signalen einer besonders einfach zu erreichenden Sensorposition im vorderen, äußeren Bereich des Motorblocks bereits eine Korrelation zwischen Verbrennung und Körperschall aufgezeigt (s. Abbildung 7, rechts). Dadurch motiviert wurde eine alternative Sensorposition gesucht, die für die Zielsetzung der Verbrennungsanalyse mittels Körperschall noch besser geeignet sein sollte. Eine solche, brennraumnahe Sensorposition wurde oberhalb der seitlichen Zylinderwand gefunden (s. Abbildung 7, links). Da die Zylinderwand gegenüber der Außenfläche des Motorblocks durch Kühlwasserräume getrennt ist, ist für die gewählte Sensorposition ein Adapterstutzen nötig, der auf der einen Seite an der äußeren Zylinderwand anstößt und an der anderen Seite die Montage des Klopfensors erlaubt.

Position 1



Position 2

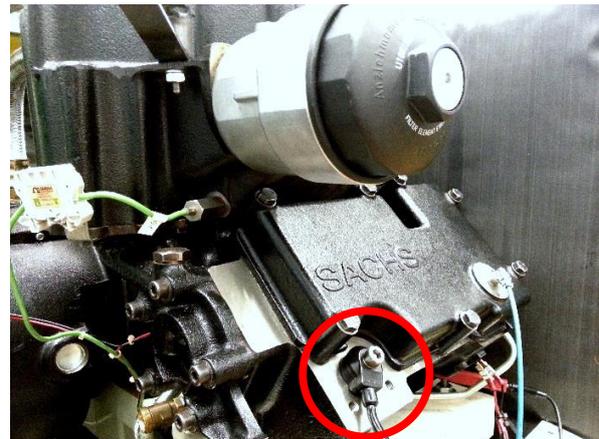


Abbildung 7: Positionen der Körperschallsensoren am Prüfträger. Position 1 ist eine neu geschaffene Sensorposition, die den Körperschall brennraumnah abgreift. Position 2 entspricht der Sensormontage aus Voruntersuchungen (brennraumfern, aber einfach installierbar).

### 2.3 Kompressoraufladeeinheit

Zur Untersuchung der Oberflächenzündung bei unterschiedlichen Mitteldrücken und konstantem Luftverhältnis wurde eine Aufladeeinheit konzipiert, gefertigt und aufgebaut (s. Abbildung 8). Das Aggregat, bestehend aus Kompressor, E-Maschine, Frequenzumrichter, Ladeluftkühler und Kondensatabscheider, ermöglicht das Einstellen des Saugrohrdrucks des Motorprüfstands im Bereich 800-1200 mbar (absolut) durch Regelung der Laderdrehzahl sowie durch Drosselung mittels Bypass-Ventil. Durch einen Ladeluftkühler kann bei Bedarf die Gemischtemperatur konditioniert werden.



Abbildung 8: Aufladeeinheit mit Roots-Gebläse, Bypass und Ladeluftkühler

## 2.4 M8-Zündkerze

Zur Analyse der Stationärtemperatur verschiedener Glühstiftmaterialien und Geometrien muss die Zündung des Gemischs an anderer Stelle erfolgen. Da das HSI-System anstelle der Serienzündkerze eingebaut wird, bedarf es einer weiteren Zündquelle im Brennraum, um die Verbrennung aufrecht zu erhalten. Hierfür wurde ein bereits bestehender Brennraumzugang durch den Kühlwassermantel verwendet und eine eigens hierfür entwickelte M8-Zündkerze verbaut (s. Abbildung 9).

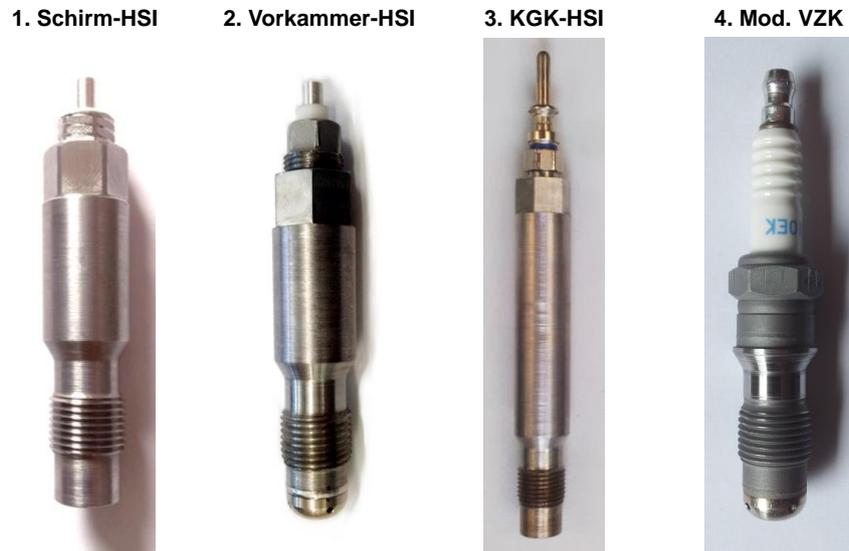


Abbildung 9: M8-Zündkerze für Stationärtemperaturversuche

## 2.5 Anpassen des HSI-Grundkörpers

Unter Berücksichtigung von Herstellbarkeit und Einbausituation im Motor wurde eine HSI-Variante mit Schirm sowie diverse Vorkammervarianten konstruiert, die als konstruktive Vorlage für die Simulation dienen, und anschließend auch zur Durchführung von Versuchen am Prüfträger gefertigt werden können (s. Abbildung 10, 1 und 2). Die konstruktive Ausführung ist dabei an die der Vorarbeiten angelehnt [10][13]. Grundlegende Unterschiede sind ein Kegeldichtsitz anstelle eines Dichtrings und die Möglichkeit, unterschiedliche Glühstiftausführungen im gleichen Adapter zu montieren. Die Notwendigkeit eines Kegeldichtsitzes leitet sich aus der erforderlichen fertigungstechnischen Bearbeitung des Prüfträgers zur Durchführung optischer Versuche

ab. Die Schirmvariante mit keramischer Glühkerze (3) sowie die Serien-Vorkammerzündkerze (4) wurden ebenfalls fertigungstechnisch bearbeitet.



**Abbildung 10: Schirm- und Vorkammervarianten als Basis für den Aufbau der Simulationsnetze und der Durchführung von Motorversuchen zur Bestimmung der Glühstiftstationärtemperatur (1 und 2), modifizierte Schirmvariante mit keramischer Glühkerze (3), modifizierte Vorkammerzündkerze (4).**

### 3 Thermische Simulation und motorische Validierung

Bei der Entwicklung der HSI wird angestrebt, die elektrische Heizleistung des Zündsystems möglichst gering zu halten. Da es sich bei Oberflächenzündung um einen lokalen thermischen Vorgang handelt, ist die Temperatur des Glühstifts maßgeblich für Entflammungszeitpunkt und -stabilität verantwortlich. Die Stationärtemperatur des beheizten Glühstifts ist im Motorbetrieb abhängig von dessen elektrischer Heizleistung, den Verlusten durch Wärmeleitung in Richtung Motorblock, den Verlusten durch Strahlung sowie vom konvektiven Wärmeübergang zwischen Gemisch und Glühstift. Zur Reduktion der Heizleistung müssen daher zum einen die Wärmeverluste durch Wärmeleitung und Konvektion minimiert, und zum anderen die Wärmeaufnahme durch Konvektion während der Verbrennung maximiert werden. Die Wärmeübertragungsvorgänge hängen im konkreten Fall stark von der Geometrie des Glühstifts aber auch vom verwendeten Material ab. Deren Einfluss auf die Oberflächentemperatur wurde durch Finite-Elemente-Analysen unter Verwendung von Abaqus 6.13 untersucht [6].

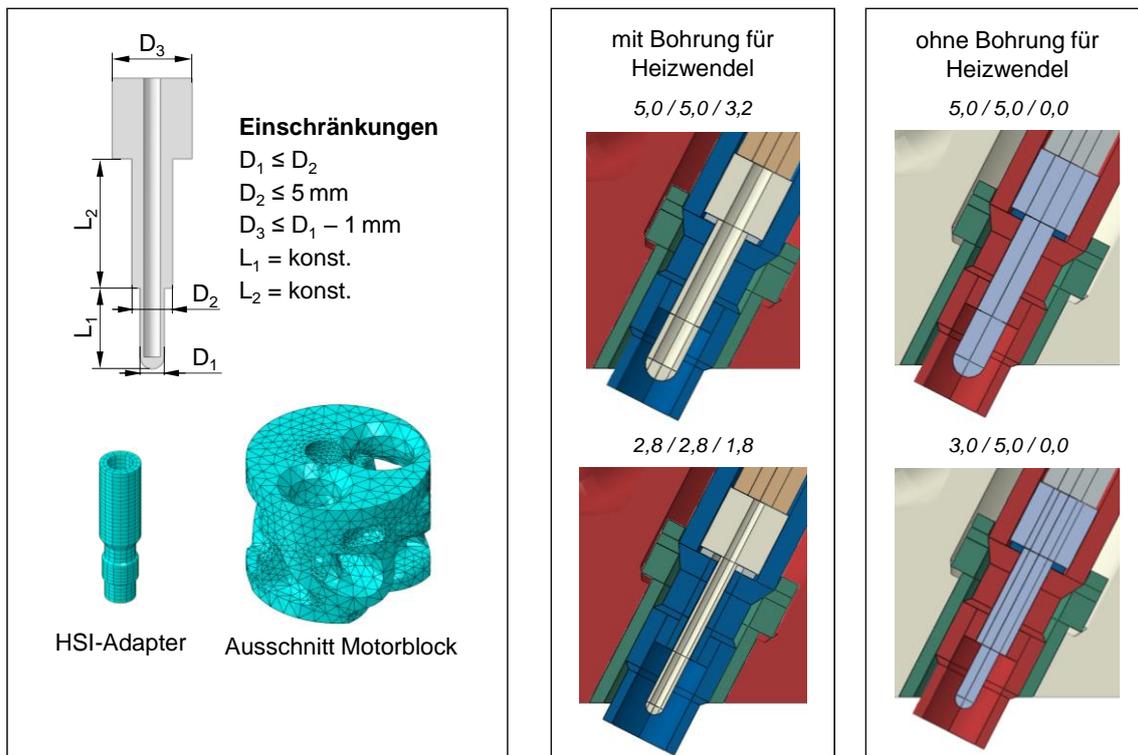
### 3.1 Auswirkung des Glühstiftmaterials auf die Stationärtemperatur

Als grundsätzlich geeignete Materialien für den Einsatz im Motor bei Temperaturen bis 1.300 °C und oxidierender Umgebung wurden vier unterschiedliche Materialien ausgewählt (s. Tabelle 1).

**Tabelle 1: Untersuchte Materialien im Rahmen der FE-Analyse**

Material	Typ / Bezeichnung	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK] (20 °C)	Wärmekapazität $c$ [J/kgK] (20 °C)
Aluminiumoxid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , gesintert, >99.5% Reinheit, >98% Dichte	33,0	755,0
Inconel 601	W.Nr. 2.4851, 58% Ni / 21% Cr	11,2	448,0
Nickel LC 99.2	W.Nr. 2.4068, LC, Reinheit 99,2%	79,0	465,0
Zirkoniumdioxid	ZrO <sub>2</sub> 3Y-TZP, Yttrium-stabilisiert	2,93	470,4

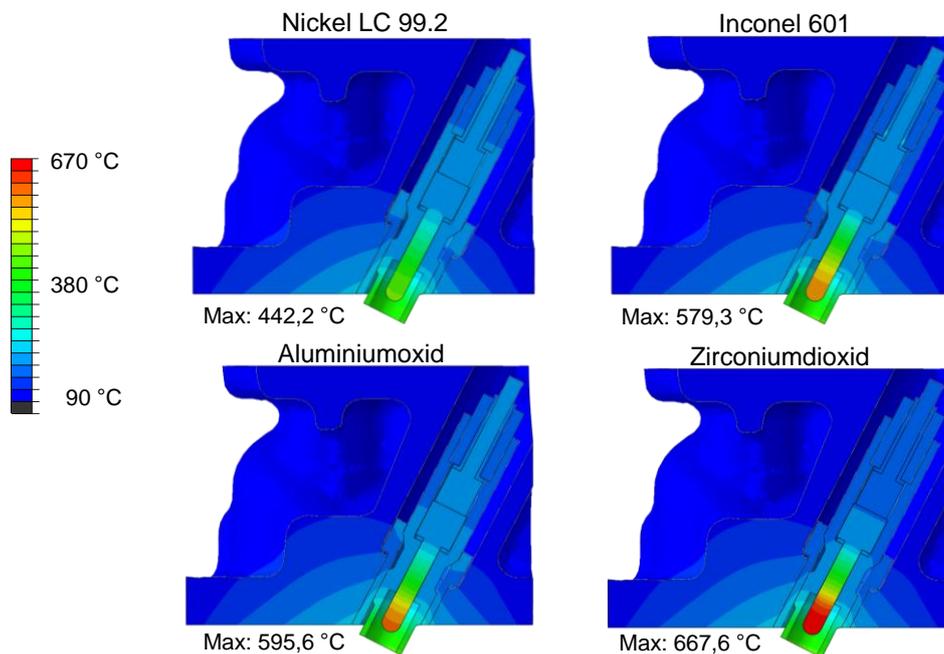
Ausgehend vom in Abbildung 11 (links) dargestellten Grundkörper des Glühstifts wurden 4 verschiedene Varianten abgeleitet. Die Einschränkungen (Constraints) leiten sich von den geometrischen Vorgaben durch den äußeren HSI-Adapter sowie der fertigungstechnischen Machbarkeit zur Herstellung der Prototypen ab. Jeweils zwei passive Varianten ohne Zentralbohrung (PHSI) und zwei aktive Varianten mit einer Zentralbohrung zur Aufnahme einer Heizwendel (AHSI) wurden simuliert (s. Abbildung 11, rechts). Bei Simulation der AHSI-Varianten bleibt die Heizwendel jedoch unberücksichtigt und die inneren Flächen werden als adiabat angenommen.



**Abbildung 11: Glühstift-Grundkörper und Rechenetze (links), untersuchte Varianten (D1/D2/D3) (rechts)**

Da sich Strömungs- und Temperaturbedingungen im Zylinder über den Zyklus periodisch ändern, wurden Motorblock und Entflammungselement Verläufe für die Gemischtemperatur und den Wandwärmeübergangskoeffizienten, berechnet über ein 1-Zonen-Modell anhand des Serienbetriebspunkts des Motors, zugewiesen. Die Temperaturabhängigkeit von Werkstoffparametern wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität wurde der Literatur entnommen und bei der Simulation berücksichtigt.

Abbildung 12 zeigt stellvertretend anhand der PHSI-Variante 5,0/5,0/0,0 den Einfluss des Materials auf die Stationärtemperatur des Glühstifts. Zwar sind unter Verwendung von Zirkoniumdioxid höchste Temperaturen zu erreichen, jedoch führen die Temperaturschwankungen über den Motorzyklus sowie die Aufheizung bei Motorstart zu unzulässigen thermischen Eigenspannungen (Abkühl- bzw. Aufheizgeschwindigkeit  $> 5\text{K/min}$ ). Aluminiumoxid wäre grundsätzlich einsetzbar, liegt jedoch auf vergleichbarem Temperaturniveau wie Inconel und ist deutlich schwerer zu verarbeiten. Die Temperatur des Nickel-Glühstifts liegt aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit deutlich unter der aller anderen Materialien.



**Abbildung 12: Simulierte Temperaturverläufe im eingeschwungenen Zustand für unterschiedliche Glühstift-Materialien bei Variante 5,0/5,0/0,0 (Referenzbetriebspunkt  $p_{mi} = 6,3$ ,  $n = 2450$  1/min, X50%  $\approx 17$  °KW n.OT,  $\lambda \approx 1,5$ )**

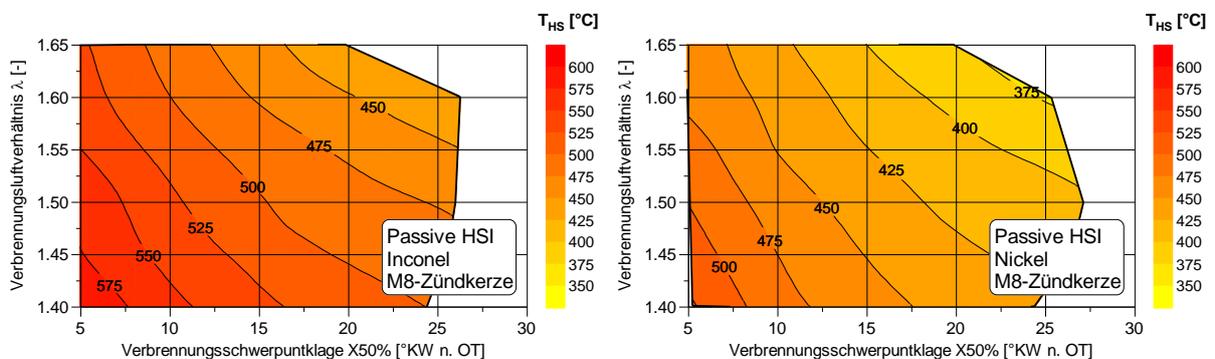
Die Berechnungen zeigen, dass sich die Wärmeleitfähigkeit des Glühstiftmaterials offenbar stark, die Wärmekapazität hingegen nicht oder nur geringfügig auf die Stationärtemperatur auswirkt. Die Wärmekapazität übt jedoch Einfluss auf die Temperaturschwankung des Glühstifts über den Motorzyklus aus. Mit steigender Wärmekapazität werden die Schwankungen reduziert, wodurch sich zyklische Verbrennungsschwankungen im realen Motorbetrieb, die sich u.a. durch schwankende Verbrennungstemperaturen äußern, voraussichtlich geringer auf die Oberflächentemperatur auswirken und einen stabileren Betrieb ermöglichen.

Zur Validierung der Simulation erfolgte die Auswahl der Werkstoffe Inconel und Nickel. Das Entflammungselement wurde anstatt der Serienzündkerze im Motorblock im Adapter-Dummy montiert und die Zündung des Gemischs durch die zusätzlich im Brennraum angebrachte M8-Zündkerze (vgl. Kapitel 2.4) eingeleitet. Das Erfassen der Glühstifttemperatur erfolgte durch ein zentrisch im Inneren des Glühstifts angebrachtes 0,5mm-Thermoelement, mit einem Abstand zur Glühstiftspitze von  $< 1$  mm (s. Abbildung 13).



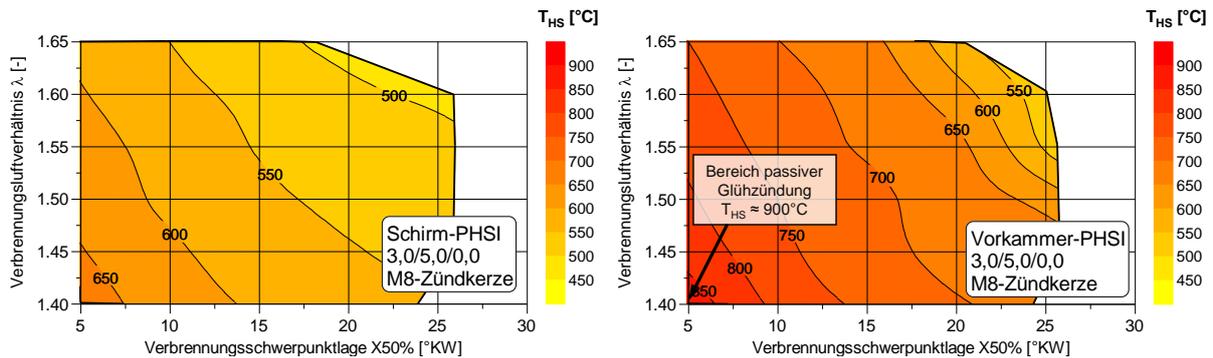
**Abbildung 13: Schirmvariante als PHSI-Ausführung mit Thermoelement zur Messung der Glühstifttemperatur**

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis diverser Zündhaken bei Luftverhältnissen von 1,40 bis 1,65. Das Luftverhältnis wurde mittels Breitbandlambdasonde berechnet. Die Versuche bestätigen die Ergebnisse der Simulation qualitativ. Zwar fällt der Temperaturunterschied zwischen beiden Varianten nicht ganz so hoch aus, die durchgehend höhere Temperatur bei Inconel (ca. +75 °C) geht dennoch deutlich hervor.



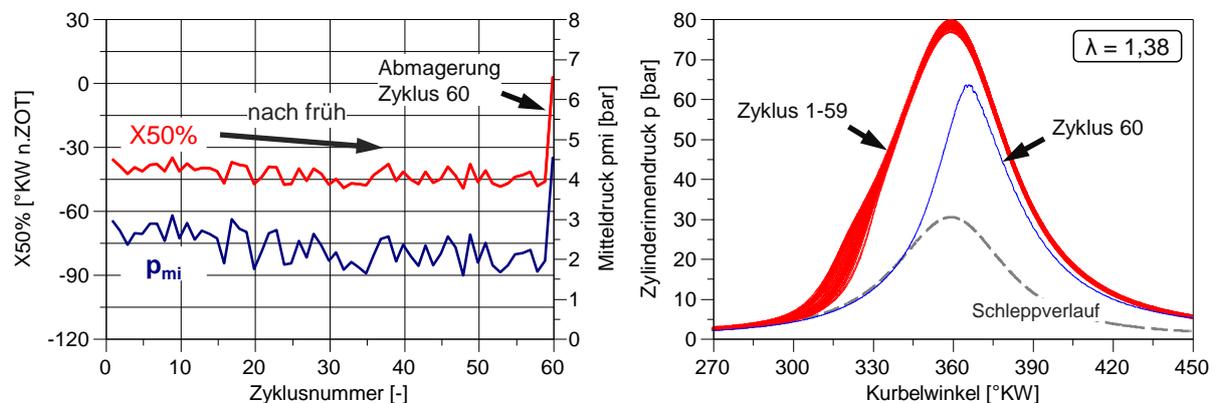
**Abbildung 14: Gemessene Stationärtemperaturen an der Glühstiftspitze im Motorbetrieb: Inconel 601 (links) und Nickel 99.2 LC (rechts), Variante 5,0/5,0/0,0, n = 2450 1/min**

Neben der Wahl des Werkstoffs ist die Temperatur der Oberfläche stark von den Strömungsbedingungen sowie der Gemischtemperatur im Bereich des Glühstifts abhängig. Im Fall der Vorkammervariante ist der Glühstift in weiten Bereichen des Zyklus heißem Restgas ausgesetzt, was im Vergleich zur Schirmvariante zu reduzierten konvektiven Wärmeverlusten führt. Unter Verwendung der Glühstiftvariante 3,0/5,0/0,0 in einer T4x1-Vorkammer (4 tangentielle und 1 zentrale Überströmbohrung) wurde bei einem Vorkammer-Kompressionsvolumen-Verhältnis von 2 % der in Abbildung 15, links, dargestellte motorische Zusammenhang zwischen Schwerpunktlage, Luftverhältnis und Stationärtemperatur bestimmt. Der Temperaturunterschied zur Schirmvariante wird insbesondere bei frühen Schwerpunktlagen deutlich, wo er rund 200 °C beträgt.



**Abbildung 15: Stationärtemperatur des Glühstifts bei passiver Schirmvariante (links) und passiver Vorkammervariante (rechts) über Verbrennungsluftverhältnis und Zündzeitpunkt; Werkstoff: Inconel 601.**

Im Bereich früher Schwerpunktlagen um 5 °KW n. OT und Luftverhältnissen unter  $\lambda = 1,40$  ist ein graduelles Aufheizen des Glühstifts festzustellen. Bei Erreichen einer Temperatur von ca. 900 °C wird die Zündung des Gemischs nicht mehr durch die Zündkerze sondern durch den Glühstift hervorgerufen. Abbildung 16 zeigt Verbrennungsschwerpunktlage und Mitteldruck kurz nach Beginn der passiven Glühzündung bis zu einer sprunghaften Abmagerung von  $\lambda = 1,38$  auf  $\lambda = 1,50$ . Der Motorbetrieb zeichnet sich durch extrem frühe Schwerpunktlagen (< 45 °KW v. OT) und eine teils klopfende Verbrennung aus. Die Zündung des Gemischs erfolgt deutlich zu früh während der Kompression und wirkt dieser entgegen, sodass Mitteldruck und Motorleistung rapide abfallen. Bei Abmagerung ist es möglich den Beginn der Verbrennung zu verzögern und kurzfristig Schwerpunktlagen um den oberen Totpunkt einzustellen. Der Glühstift kühlt sich dabei jedoch so stark ab, dass die Verbrennung nach und nach verschleppt wird und sich schlussendlich Zündaussetzer ereignen. Ein stabiler Betrieb der passiven Glühzündung ist somit aufgrund der frühzeitigen Gemischentflammung nicht möglich.



**Abbildung 16: Davonlaufende passive Glühzündung über 59 Zyklen ( $t \approx 3$  s) mit anschließender Abmagerung, Vorkammer-PHSI T4x1.**

### 3.2 Auswirkung der Glühstiftgeometrie auf die Stationärtemperatur

Mittels FEA wurde die Auswirkung geometrischer Parameter auf die Stationärtemperatur des Glühstifts bestimmt. Aus Abbildung 17 gehen die berechneten Stationärtemperaturen von Inconel 601 der in Abbildung 11 dargestellten Varianten hervor. Es ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperatur stark positiv mit dem Verhältnis der Flächen A1 und A2 korreliert. A1 stellt dabei die den Bereich der Glühstift-Mantelfläche dar, der in den Brennraum hineinragt und dem Gemisch während der 4 Takte des Motorzyklus' ausgesetzt ist. Über A1 wird Wärme aus der Verbrennung aufgenommen, allerdings auch während des Ladungswechsels an das Gemisch abgegeben. A2 entspricht dem Glühstiftquerschnitt, über den Wärmeleitung in Richtung Motorblock erfolgt. Um hohe Temperaturen ohne elektrische Beheizung zu erreichen, sollte die heiße Oberfläche daher mit möglichst großer Mantelfläche aber kleinem Querschnitt ausgeführt werden.

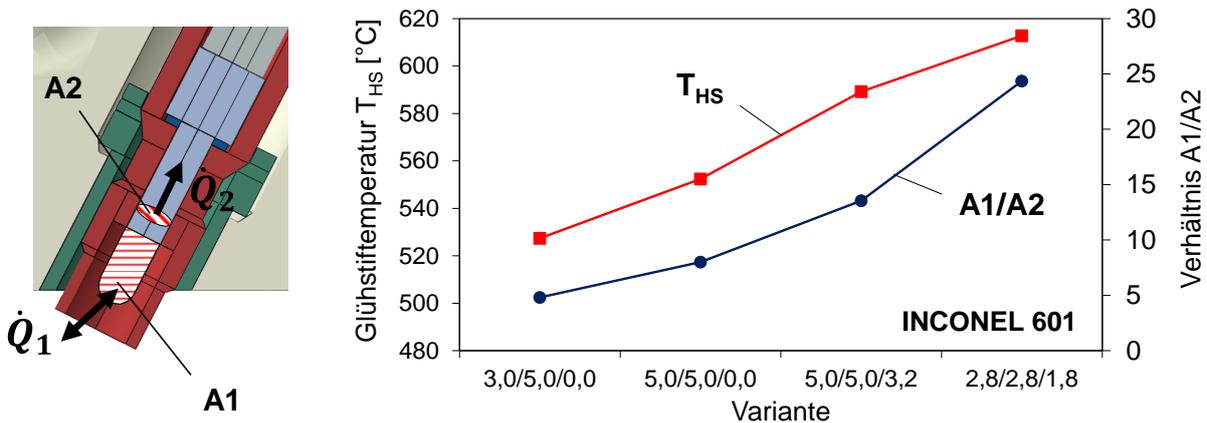


Abbildung 17: Definition der Wärmeübertragungsflächen A1 und A2 (links), Glühstifttemperatur  $T_{HS}$  und A1/A2-Verhältnis für unterschiedliche Geometrievarianten (rechts)

Im Motorbetrieb erfolgte ein Vergleich zweier PHSI-Varianten mit unterschiedlichem A1/A2-Verhältnis. Entgegen der Simulationsergebnisse weist Variante 3,0/5,0/0,0 trotz eines niedrigeren A1/A2-Verhältnis unabhängig vom Material höhere Stationärtemperaturen auf (s. Abbildung 18, links). Ein höherer Wärmeverlust durch Wärmeleitung zwischen Glühstift und HSI-Adapter im Bereich der Bohrung (s. Abbildung 18, rechts) infolge von Wärmeausdehnung und direktem Kontakt beider Bauteile wurde als mögliche Erklärung in Betracht gezogen. Um diesen möglichen Einfluss zu eliminieren, wurde Variante 5,0/5,0/0,0 aus Nickel von 5,0 mm auf einen Außendurchmesser von 4,6 mm abgedreht. Der stichprobenartige Vergleich beider Varianten bei  $\lambda = 1,40$  liefert keinen merklichen Temperaturunterschied, wodurch Wandwärmeverluste über den Bohrungsmantel, zumindest aus Hauptursache, für die niedrigere Stationärtemperatur von Variante 5,0/5,0/0,0 ausgeschlossen werden können. Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind unterschiedlichen Strömungsbedingungen um die heiße

Oberfläche, die im Rahmen der Simulation nicht berücksichtigt werden konnten, für Abweichungen verantwortlich. Insbesondere die erhöhte Kraftstoffmasse im Schirm bei kleinerem Glühstift könnte aufgrund der höheren freigesetzten Wärme und Wärmekapazität des Gemischs zu einer stärkeren Aufheizung des Glühstifts führen.

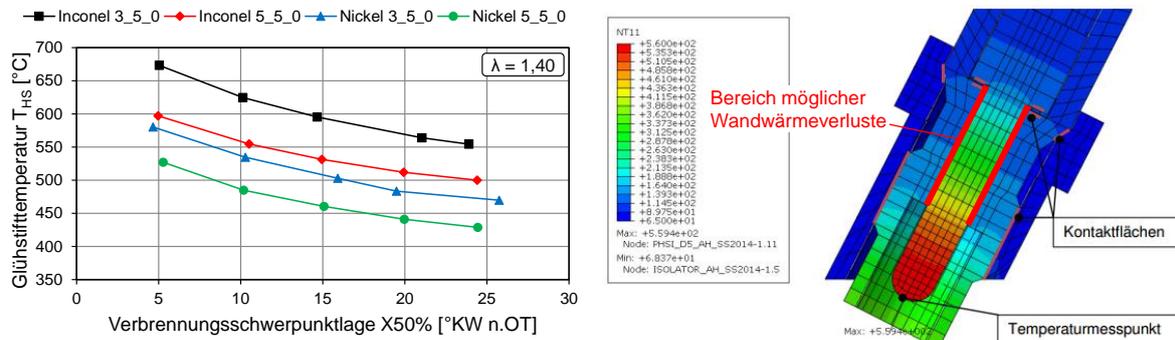


Abbildung 18: Stationärtemperatur des Glühstifts über der Verbrennungsschwerpunktlage für unterschiedliche PHSI-Varianten im Motorbetrieb (links), schematische Darstellung des Bereichs möglicher Wandwärmeverluste (rechts).

## 4 CFD-Verbrennungssimulation

Dreidimensional aufgelöste Verbrennungssimulationen werden im Rahmen des Vorhabens als Werkzeug verwendet, um die Wechselwirkungen zwischen heißer Oberfläche und Gemisch im Hinblick auf Gemischentflammung und Flammenausbreitung zu analysieren und dadurch Rückschlüsse auf den Motorbetrieb ziehen zu können. Anhand von CAD-Daten des Prüfträgers wurden detailgetreue Rechenetze für alle Ventilstellungskombinationen über einen Motorzyklus in AVL Fire erstellt, siehe Abbildung 19. Einlass- und Abgasdruck wurden anhand eines abgestimmten 1D-Modells in AVL Boost [8][9] simuliert und über den Kurbelwinkel als Randbedingung zugewiesen. Durch Vorgabe der Ventilhubkurven sowie geometrischer Parameter des Motors werden Ventil- und Kolbenbewegung durch bewegte Rechengitter nachgebildet.

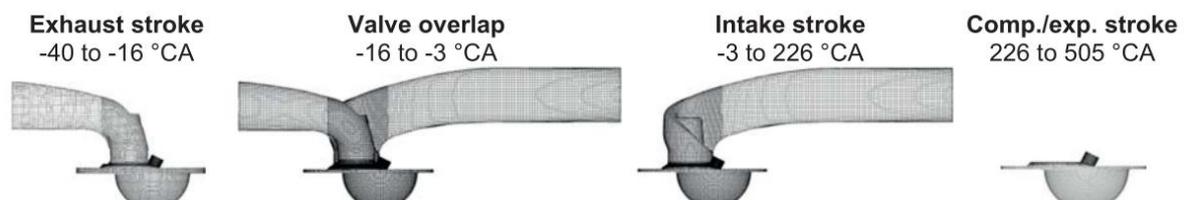


Abbildung 19: Rechenintervalle und zugehörige Rechenetze

In Abbildung 20 sind Randbedingungen der durchgeführten Simulationen aufgelistet. Berechnet wurde zunächst die Schirm-HSI bei unterschiedlichen Glühstifttemperaturen. Auf den Ergebnissen aufbauend wurden zwei Varianten der Vorkammer-HSI mit einem Vorkammer-Kompressionsvolumen-Verhältnis ( $V_{VK}/V_K$ ) von 1 und 2 % durchgeführt. Entflammung und Verbrennung wurde unter Verwendung des ECFM-3z-Verbrennungsmodells (Extended Coherent Flame Model - 3 Zones) simuliert. Zündverzugszeiten und laminare Flammenfrontgeschwindigkeiten basieren auf anhand von Gri-Mech 3.0 berechneten tabellierten Werten für Methan. Für eine detaillierte Beschreibung des Simulationsmodells sei auf [12] verwiesen.

Verbrennungsmodell:	ECFM-3z
Kraftstoff:	CH <sub>4</sub>
Luftverhältnis:	1,54
Drehzahl:	2450 1/min
Glühstiftvariante:	5,0/5,0/0,0
HSI-Ausführung:	Schirm (S10)/Vorkammer (T4x1)
Glühstifttemperatur:	variabel
Anzahl an Rechenzellen:	120.000 - 800.000
Rechendauer (12-Kern):	ca. 3-4 Tage

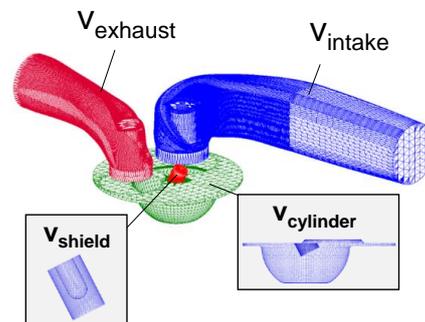
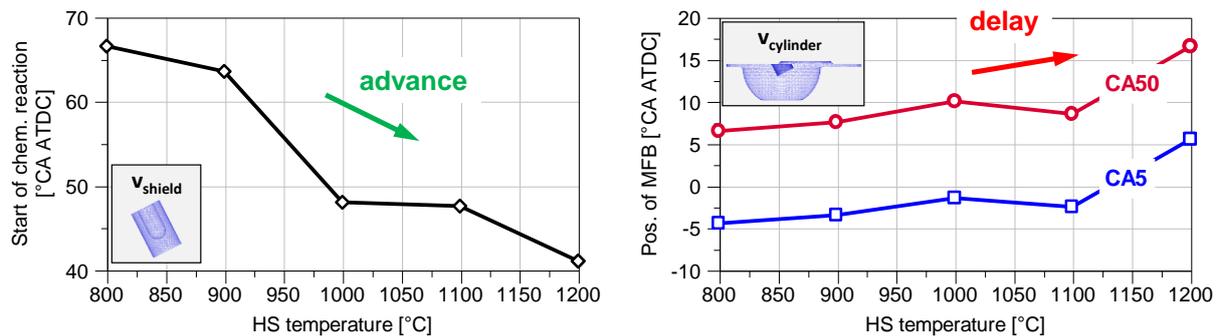


Abbildung 20: Randbedingungen der CFD-Verbrennungssimulation

#### 4.1 Simulation der Schirmvariante

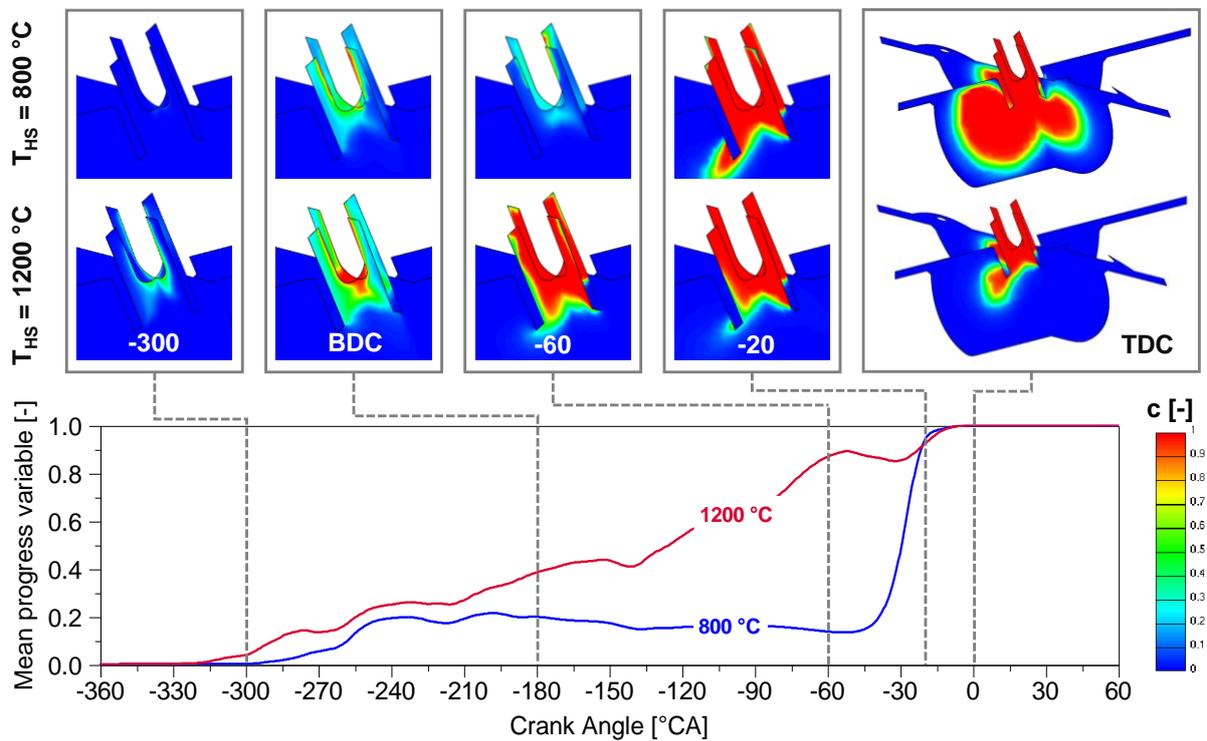
Abbildung 21 (links) zeigt den Beginn chemischer Reaktionen ( $\tilde{c} > 0.01$ ) im Schirmvolumen ( $V_{shield}$ ) über der Oberflächentemperatur im Bereich 800 – 1200 °C. Die Reaktionsfortschrittsvariable  $\tilde{c}$  ist dabei eine durch das Verbrennungsmodell berechnete Größe und beschreibt im Wesentlichen den Kraftstoffmassenumsatz in einer Rechenzelle oder Volumen. Bei einer Oberflächentemperatur von 700 °C war keine Gemischentflammung möglich, daher ist der Verlauf nicht dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich, wie erwartet, der Beginn chemischer Reaktionen mit steigender Oberflächentemperatur nach früh verschiebt. Bei Analyse der Hauptverbrennung in Abbildung 21, rechts, stellt sich hingegen ein gegensätzliches Verhalten dar: Je höher die Temperatur desto später sind Verbrennungsbeginn (CA5) und Verbrennungsschwerpunktlage (CA50) im Hauptbrennraum ( $V_{cylinder}$ ). Dieser ungewöhnliche Zusammenhang deckt sich mit den Beobachtungen aus [11], wo steigende Glühstifttemperaturen in Bereich 2 zu einer verschleppten Verbrennung führten.



**Abbildung 21: Beginn der chemischen Reaktionen im Schirmvolumen (links) und Kraftstoffmassenumsatzpunkte über der Glühstifttemperatur**

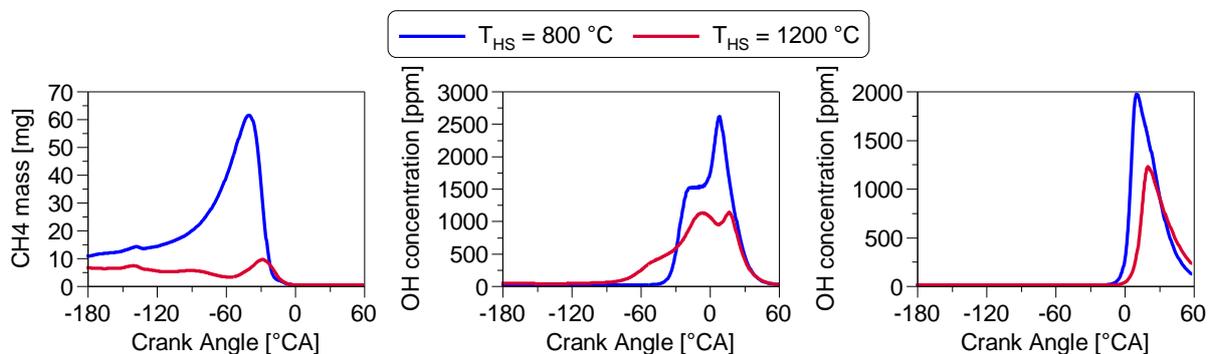
Der Grund für diesen Zusammenhang lässt sich anhand beider Extremwertvariationen 800 und 1200 °C erläutern. Abbildung 22 zeigt den Verlauf der gemittelten Reaktionsfortschrittsvariable im Schirmvolumen für beide Temperaturen (unten) sowie lokal aufgelöste Farbplots der Variable zu ausgewählten Zeitschritten im Schirm um den Glühstift bzw. im Hauptbrennraum beim oberen Totpunkt (oben). In der Darstellung im oberen Totpunkt (TDC) ist deutlich die sich ausbreitende Flammenfront zu erkennen.

Bei 1200 °C weist die Simulation während des Ladungswechsels und der Kompressionsphase einen deutlich höheren Reaktionsfortschritt auf. Bei 60 °KW v. OT ist der Kraftstoff im Schirm nahezu vollständig umgesetzt. Bei 800 °C nimmt die Reaktionsfortschrittsvariable im Laufe der Kompression hingegen ab und erreicht bei ca. 45 °KW v. OT ein lokales Minimum. In Abbildung 23, links, wird deutlich, dass sich bei 800 °C Kraftstoff während dem Kompressionstakt im Schirmvolumen ansammeln kann. Bei 1200 °C wird das in den Schirm einströmende Gemisch frühzeitig kontinuierlich umgesetzt, wodurch sich kurz vor OT fast ausschließlich Restgas in der Nähe des Glühstifts befindet. Anhand der berechneten OH-Konzentration im Schirm (Abbildung 23, mitte) und im Hauptbrennraum (Abbildung 23, rechts), die als qualitatives Maß für die freigesetzte Wärme zu deuten sind, geht der frühe Verbrennungsbeginn im Schirm und die darauf folgende verschleppte und langsamere Hauptverbrennung bei 1200 °C hervor.



**Abbildung 22: Gemittelte Reaktionsfortschrittsvariable im Schirmvolumen über den Kurbelwinkel (unten), ausgewählte Farbplots der lokalen Reaktionsfortschrittsvariable,  $T_{HS} = 800/1200\text{ °C}$  (oben).**

Nach einer vergleichsweise langen Zündverzugszeit bei  $800\text{ °C}$  entflammt sich eine weitaus größere Masse an unverbranntem Gemisch kurz vor OT schlagartig und führt zu einer sich in den Hauptbrennraum ausbreitenden Flammenfront. Bei  $1200\text{ °C}$  wird der Glühstift durch Restgas vom unverbrannten Gemisch des Hauptbrennraums abgeschirmt und die Einleitung der Hauptverbrennung erfolgt ausschließlich durch Wärmeleitung in der Gasphase.



**Abbildung 23: Simulierter Verlauf der Kraftstoffmasse (links) und der OH-Konzentration im Schirm (mitte) sowie der OH-Konzentration im Hauptbrennraum (rechts).**

## 4.2 Simulation der Vorkammervariante

Wie aus Abbildung 24 ersichtlich, wird die Verbrennung bei einem  $V_{VK}/V_K$ -Verhältnis von 1 % unabhängig von der Glühstifttemperatur nur sehr spät eingeleitet. Dies führt zu einem Kraftstoffmassenumsatz zum Ende der Simulation von lediglich 10-30 %. Ähnlich zur Schirmvariante ist dieses Phänomen auf eine vorzeitige Gemischentflammung innerhalb der Vorkammer während des Ladungswechsels und zum Beginn der Kompression zurückzuführen. Aufgrund der Druckdifferenz zwischen Hauptbrennraum und Vorkammer strömt während der Kompressionsphase Frischgemisch zwar nach, dieses trifft allerdings sofort über die zentral angebrachte Überströmbohrung auf die heiße Oberfläche auf und wird sofort umgesetzt. Die Simulation der Variante mit  $V_{VK}/V_K = 2 \%$ , in welcher sich der Glühstift in größerer Entfernung zu den Überströmbohrungen befindet, kommt es während des Ladungswechsels kaum zu Vorreaktionen. Erst kurz vor dem oberen Totpunkt bildet sich am Glühstift eine Flamme aus, welche die Vorkammer über die Überstrombohrungen als Fackelstrahlen verlässt und die Hauptverbrennung einleitet. Die Verbrennungsschwerpunktlage liegt dabei etwas zu früh bei ca.  $4^\circ$  KW v. OT. Bei Vorkammer-HSI sollte die Vorkammer daher möglichst lange und ohne Zentralbohrung ausgeführt werden, um eine frühzeitige Interaktion zwischen Glühstift und Frischgemisch zu vermeiden. Durch eine möglichst lange Abschirmung durch Restgas könnte eine frühzeitige Gemischentflammung innerhalb der Vorkammer vermieden und günstige Schwerpunktlagen nach OT eingestellt werden.

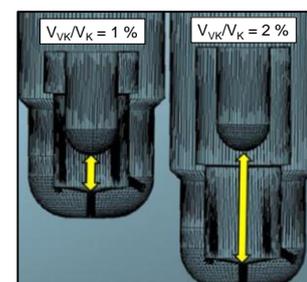
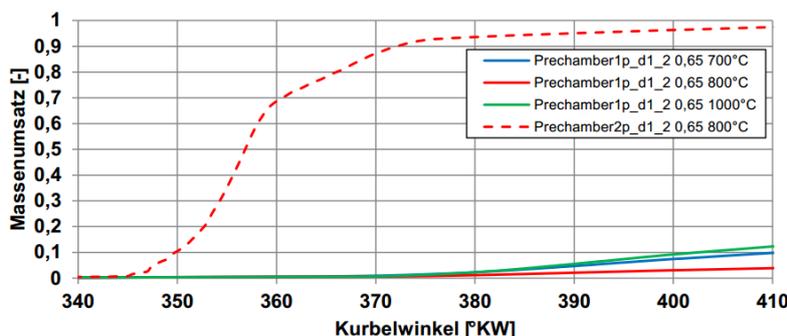
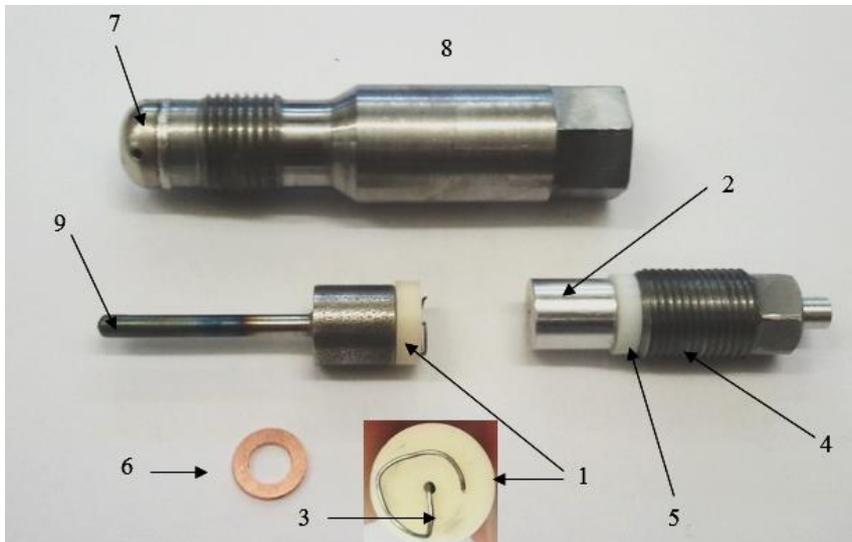


Abbildung 24: Simulierter Kraftstoffmassenumsatz im Hauptbrennraum über Kurbelwinkel bei Vorkammer-HSI [2]

## 4.3 Auslegung und Fertigung der beheizten Entflammungselemente (AHSI)

Aufgrund der Ergebnisse aus der FE-Analyse und den Stationärtemperaturversuchen wurde für Motorversuche mit aktiv beheiztem Glühstift (AHSI) Variante 2,8/2,8/1,8 gefertigt. Diese zeichnet sich durch einen kleinen Glühstiftdurchmesser und ein für das Erreichen hoher Stationärtemperaturen günstiges A1/A2-Verhältnis auf. Der Auf-

bau des Entflammungselements ist in Abbildung 25 am Beispiel der Vorkammervariante dargestellt.

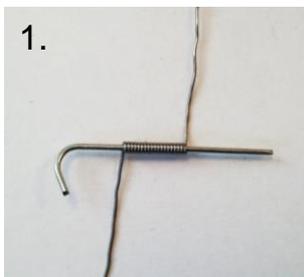


- 1: Insulating washer
- 2: Electrode (V+)
- 3: Heating coil (V+)
- 4: Screw fixation
- 5: Bushing
- 6: Gasket
- 7: Prechamber
- 8: HSI Adapter
- 9: Hot surface

**Abbildung 25: Grundsätzlicher Aufbau der Vorkammer-AHSI (mit elektrischer Beheizung)**

In Abbildung 26 sind die wesentlichen Schritte zur Herstellung des Glühstifts dargestellt. Kanthal AF mit einem Drahtdurchmesser von 0,4 mm wurde als Heizwendelmaterial in Endloswicklungen von Fa. Carl Haas bezogen. Der Außendurchmesser der Heizwendel beträgt 1,6 mm, wodurch sich zur Glühstiftbohrung beidseitig ein Spalt von 0,1 mm ergibt. Um einen Kurzschluss zwischen Glühstift und Heizwendel zu vermeiden, hat sich bewährt, die Heizwendel in einem Ofen bei 1100 °C zur Bildung einer isolierenden Oxidschicht zu konditionieren. Anschließend wird die entsprechend geformte Heizwendel in die Glühstiftbohrung eingefügt und am unteren Ende punktuell laserverschweißt. Zur Verbesserung der Wärmeleitung zwischen Heizleiter und Glühstift werden die Zwischenräume mit Magnesiumoxid-Pulver ausgefüllt.

Manual lengthening of heating coil



Preconditioning in oven for 7.5 h @ 1100 °C



Coil testing after laser welding



**Abbildung 26: Herstellung des beheizbaren Glühstifts**

Bei Wahl der Heizwendellänge gilt es diverse Faktoren zu beachten. Je länger die Heizwendel bzw. je größer die Anzahl an Wicklungen, desto höher ist der Widerstand

und damit auch Spannungseinstellbereich unter Einhaltung der maximal zulässigen Stromaufnahme. Dies führt zu einem größeren beheizten Bereich, zum anderen aber auch zu einer höheren Heizleistung im Betrieb. Hohe Ströme ergeben sich bei kurzen Heizwendeln dagegen bereits bei geringen angelegten Spannungen und die Wärmeentwicklung ist auf einen kleineren Bereich begrenzt. Im Rahmen des Vorhabens wurden bei einer Einragtiefe des Glühstifts in den Brennraum von 10 mm zwei unterschiedliche Heizwendellängen gefertigt: 4 und 8 mm.

## 5 Motorversuche

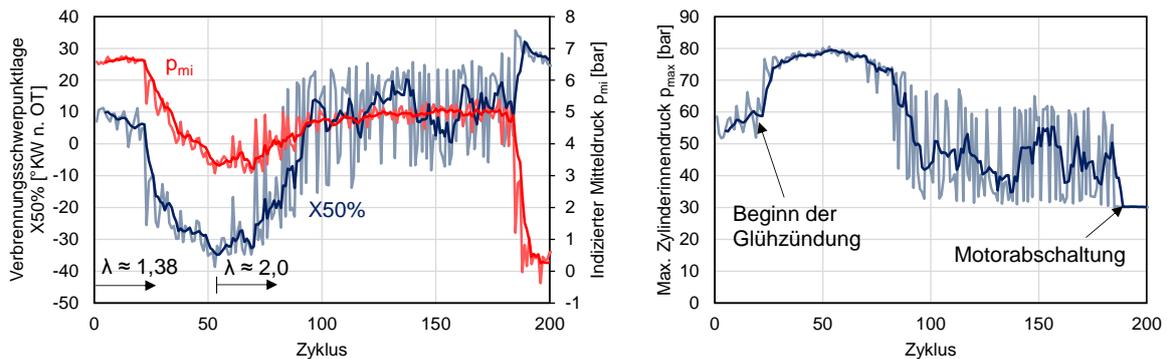
### 5.1 Analyse des Betriebsverhaltens bei aktiv beheiztem Glühstift (AHSI)

Bei der Schirmvariante erreicht der Glühstift Glühtemperatur unter Umgebungsbedingungen. Sobald dieser allerdings im Motor eingeschraubt wird, steigen die Wärmeleitungsverluste und es ist nicht möglich die Temperatur zu halten. Es war deshalb nicht möglich, den Motor unter Verwendung der Schirm-HSI zu betreiben. Bei der Vorkammervariante zeichnete sich das gleiche Verhalten ab, unter Zuhilfenahme der M8-Zündkerze konnte die Glühstifttemperatur im Betrieb allerdings bis zum Erreichen der Zündtemperatur erhöht werden. Analog zur passiven Glühzündung stellten sich jedoch auch hier viel zu frühe Schwerpunktlagen ein. Dabei war es nicht möglich, den Entflammungsbeginn durch Variation der Heizleistung zu regeln. Trotz der PTC-Charakteristik von Kanthal AF war es zudem im Betrieb aufgrund der kurzen Wendellänge, und dadurch nur geringer Widerstandsänderung, mit der gegebenen Messtechnik nicht möglich, Rückschlüsse auf die Glühstifttemperatur zu ziehen.

Abbildung 27 zeigt den Übergang von Funken- auf Glühzündung bei einem Luftverhältnis von  $\lambda \approx 1,38$ . Die Heizwendel weist eine Länge von 4 mm auf und wird im Betrieb mit 4,4 A bei Heizleistung des Glühstifts von ca. 23 W bestromt. Um eine Schädigung des Motors aufgrund der sehr frühen Schwerpunktlagen und der klopfenden Verbrennung zu vermeiden, wurde ab Zyklus 55 auf  $\lambda \approx 2,0$  abgemagert. Bei diesem Luftverhältnis findet eine Kombination aus Funken- und Glühzündung statt, was sich in einem sehr instabilen Betrieb mit Schwerpunktlagenschwankungen im Bereich -10 bis 25 °KW n. OT äußert. Bei Ausschalten der Funkenzündung kommt es schließlich zu Verbrennungsaussetzern und schlussendlich zur Motorabschaltung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die erprobte Ausführung der Vorkammer-HSI keinen stabilen Motorbetrieb bei Verbrennungsschwerpunktlagen um den oberen Totpunkt ermöglicht. Durch konstruktive Maßnahmen könnte dieser Problematik zukünftig allerdings entgegengewirkt werden. Aufgrund der nicht zufriedenstel-

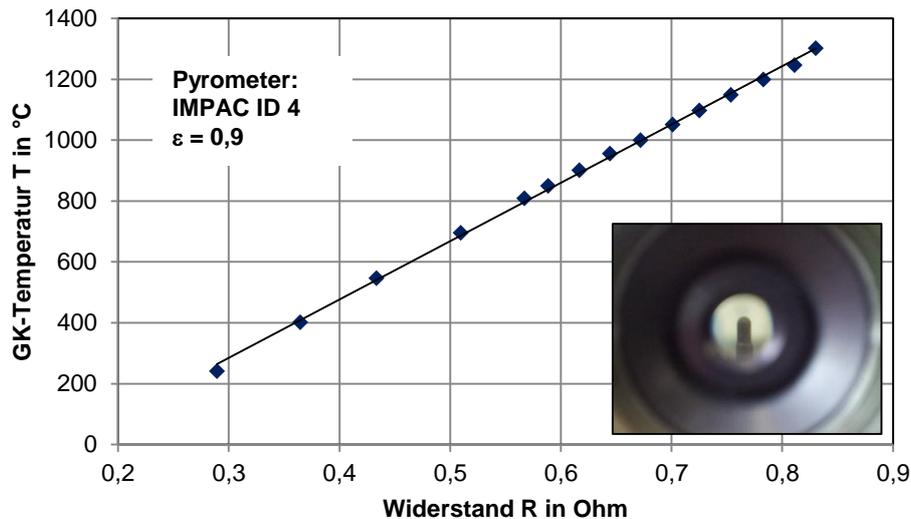
lenden Betriebsweise der AHSI-Varianten wurde der Fokus des Vorhabens auf die Analyse der bereits im Zuge der Vorarbeiten eingesetzten Schirm-HSI unter Verwendung einer Keramikglühkerze (KGK-HSI) gelegt. Diese eignet sich vor allem aufgrund ihres temperaturabhängigen Widerstands, der auch bei Umgebungsbedingungen einstellbaren hohen Temperaturen sowie deren Haltbarkeit.



**Abbildung 27: Übergang zwischen Funken- und Glühzündung bei  $\lambda \approx 1,38$  und anschließender Abmagerung unter Verwendung der aktiv beheizten Vorkammer-HSI (AHSI)**

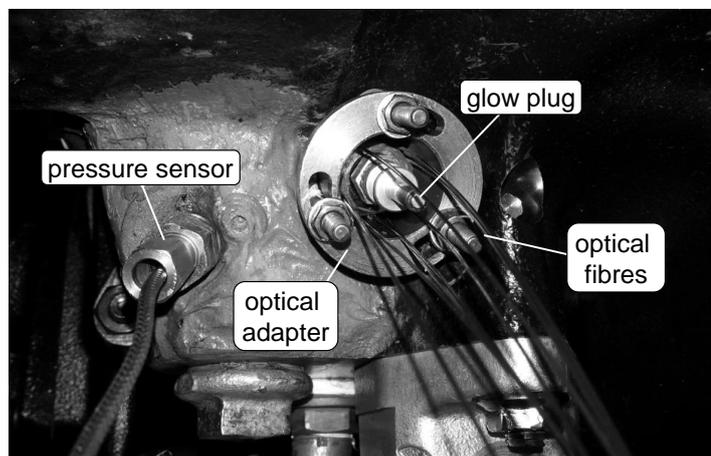
## 5.2 Analyse der Entflammung und Verbrennung mittels optischer Messtechnik (KGK-HSI)

Vor dem Hintergrund, den Glühkerzenwiderstand im Motorbetrieb zur Berechnung der Glühkerzentemperatur zu verwenden, wurde das Widerstands-Temperatur-Verhalten der Glühkerze mittels Pyrometer vermessen. Bei Umgebungsbedingungen ergibt sich eine nahezu lineare Korrelation beider Größen, die das Ableiten einer Regressionsgeraden ermöglicht. Wird dieser Zusammenhang jedoch im Motorbetrieb zur Temperaturbestimmung angewandt, werden bei Widerständen  $> 1,0 \Omega$  unrealistisch hohe Werte berechnet. Dies liegt an den Zu- und Rückleitern der Glühkerze, die sich im Motorblock stärker aufheizen und analog zur Glühstiftspitze bei Temperaturänderung ihren Widerstand ändern (PTC-Charakteristik). Es ist im Betrieb somit nicht möglich quantitative Aussagen über die Glühkerzentemperatur zu treffen. Nichtsdestotrotz liefert der Glühkerzenwiderstand eine qualitative Aussage über die Glühkerzentemperatur und ermöglicht dadurch den Vergleich unterschiedlicher Messpunkte.



**Abbildung 28: Vermessung des Temperatur-Widerstands-Verhaltens der Glühkerze**

Zur Analyse der in [11] beobachteten Verbrennungsnomalie bei Betrieb mit der Schirmvariante der HSI wurde ein Adapter mit mehreren optischen Zugängen zum Brennraum gefertigt und am Prüfträger installiert. Der Adapter ist in Abbildung 29 im ausgebauten (links) und im eingebauten Zustand im Motorblock (rechts) dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Messaufbaus ist [12] zu entnehmen.

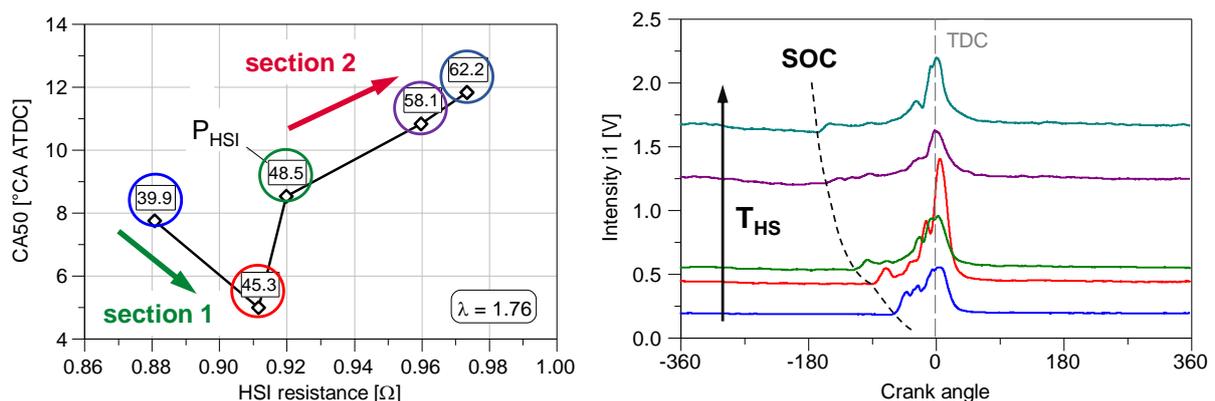


**Abbildung 29: Adapter mit Lichtwellenleiter-Zugängen im ausgebauten (links) und eingebauten (rechts) Zustand**

Die Kombination aus inneren und äußeren Lichtwellenleiter ermöglicht ein Bestimmen des Entflammungsorts im Betrieb durch Aufzeichnen der Verbrennungsstrahlung im Schirm und im Hauptbrennraum. Aufgrund des zeitlichen Versatzes im Anstieg der detektierten Strahlung zwischen inneren und äußeren Lichtwellenleitern konnte eindeutig geklärt werden, dass die Verbrennung durch den Glühstift im Schirm eingeleitet wird und eine Gemischentflammung außerhalb, z.B. durch hot

spots, ausgeschlossen werden kann. Die nachfolgende Analyse des Entflammungsvorgangs erfolgt daher anhand der Verbrennungsstrahlung, die durch die innere optische Sonde i1 detektiert wurde.

In Abbildung 30, links, ist der Glühkerzenwiderstand zweier Glühkerzenspannungsvariationen bei unterschiedlichen Luftverhältnissen dargestellt. Das Umsetzen einer Widerstandsregelung war zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich. Bei  $\lambda = 1,76$  sind zwei unterschiedliche Betriebsbereiche zu erkennen. Im Bereich  $R = 0,88 - 0,91 \Omega$  (section 1) verfrüht sich die Verbrennungsschwerpunktlage mit steigendem Widerstand bzw. Glühkerzentemperatur. Ab  $R = 0,91 \Omega$  (section 2) führt ein weiteres Erhöhen der Glühkerzentemperatur hingegen zu einer Verschiebung der Schwerpunktlage. Abbildung 30, rechts, zeigt die jeweils durch den optischen Zugang aufgezeichnete Strahlung über den Kurbelwinkel. Die unterschiedliche Strahlungsintensität während Ladungswechsel, Anfang der Kompression und Ausschiebephase ist nicht auf Vorreaktionen oder Verbrennungsvorgänge zurückzuführen sondern ist eine Folge der mit der Temperatur steigenden Eigenstrahlung der Glühkerze. Trotz dieser Grundstrahlung kann die aus der Verbrennung stammende Strahlung detektiert werden und jedem Messpunkt ein Entflammungsbeginn (SOC) zugeordnet werden. Es wird deutlich, dass sich die Entflammung mit steigender Glühkerzentemperatur nach früh verschiebt. Bei Maximaltemperatur beginnt die Verbrennung bereits kurz nach dem unteren Totpunkt. Gleichzeitig fällt der Intensitätsanstieg während der Kompressionsphase geringer aus, was auf eine geringere Radikalbildung bzw. Wärmefreisetzung schließen lässt.



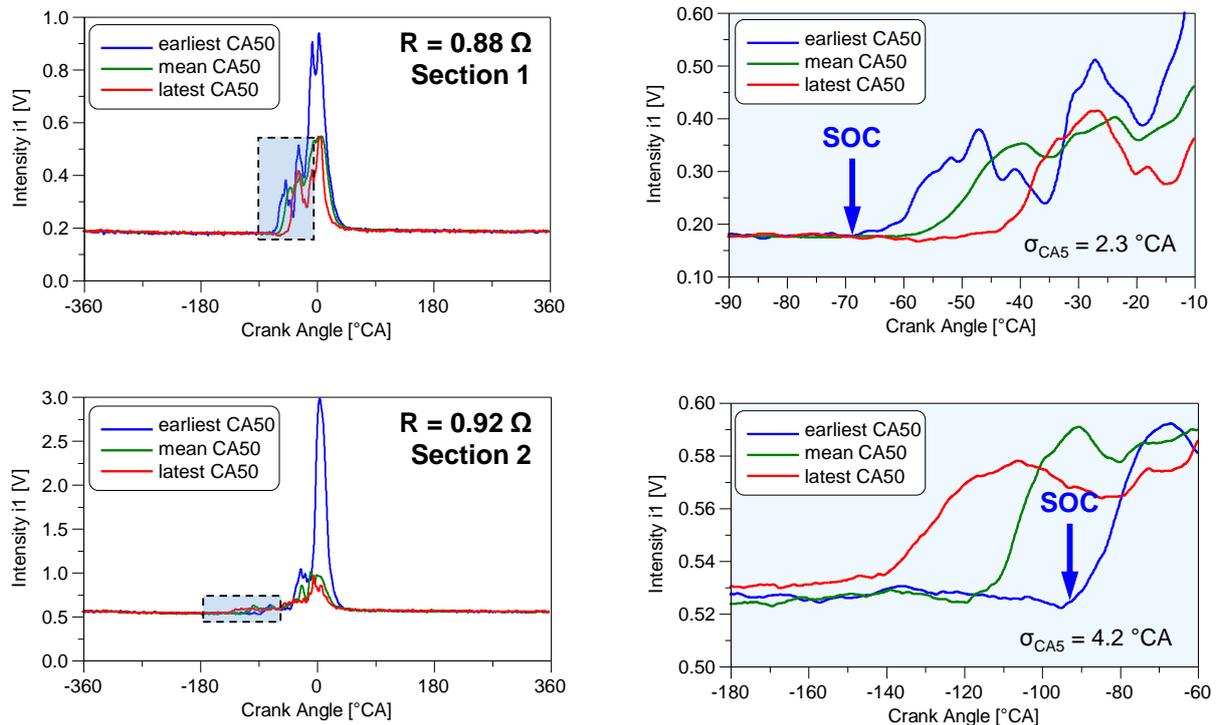
**Abbildung 30: Verbrennungsschwerpunktlage über Glühkerzenwiderstand (links) und aufgezeichnete Strahlung im Schirmvolumen (rechts), gemittelt über 200 Zyklen für  $\lambda = 1,76$**

Die Versuche belegen, dass die Abhängigkeit zwischen Entflammungsbeginn und Glühkerzentemperatur durchgehend dem Arrhenius-Ansatz folgt. Die Existenz zweier unterschiedlicher Betriebsbereiche im Hinblick auf den Ablauf der Hauptverbrennung bzw. der Lage des 50%-Massenumsatzpunkts muss daher auf die geometrische Ausführung des Entflammungselements und die dadurch bedingten Strömungsbe-

dingungen zurückzuführen sein. Die Unterschiede in Entflammung und Verbrennung in beiden HSI-Betriebsbereichen sind in Abbildung 31 anhand der Betriebspunkte  $R = 0,88 \Omega$  (section 1) und  $R = 0,92 \Omega$  (section 2) bei nahezu identischer mittlerer Schwerpunktlage von ca.  $8^\circ \text{KW}$  n. OT ersichtlich. Aus 200 aufgezeichneten Motorzyklen ist die Strahlung bei den Zyklen mit frühster, mittlerer und spätester Verbrennungsschwerpunktlage (CA50) über den Kurbelwinkel dargestellt. Bei  $R = 0,88 \Omega$  ergibt sich eine positive Korrelation zwischen Entflammungsbeginn (SOC) und Schwerpunktlage: je früher die Entflammung im Schirm, desto früher erfolgt die Hauptverbrennung. Ferner steigt die Verbrennungsstrahlung um den oberen Totpunkt aufgrund der früheren Schwerpunktlage merklich an. Bei  $R = 0,92 \Omega$  kehrt sich der Sachverhalt dagegen um und es kommt bei früher Entflammung im Schirm zu einer verschleppten Hauptverbrennung.

Beim Vergleich beider Betriebspunkte fällt auf, dass sich die Entflammung bei niedrigerer Glühstifttemperatur im Bereich  $70 - 40^\circ \text{KW}$  v. OT ereignet, bei einem Anstieg der aufgezeichneten Strahlung um ca.  $0,2 \text{ V}$ . Bei hoher Temperatur entflammt das Gemisch bereits bei  $140 - 90^\circ \text{KW}$  v. OT, bewirkt jedoch aufgrund der geringeren Kraftstoffmasse im Schirm nur einen Strahlungsanstieg von ca.  $0,06 \text{ V}$ . Aufgrund der kontinuierlichen langsamen Verbrennung des nachströmenden Gemischs bleibt das Strahlungsniveau im weiteren Verlauf der Kompression nahezu konstant. Die der Kolbenbewegungsrichtung folgende Ladungsbewegung vermeidet dabei das Ausbreiten der Flamme in Richtung Hauptbrennraum.

Die Lichtwellenleiter-Versuche belegen somit die in Kapitel 4.1 vorgestellten Ergebnisse der CFD-Simulation. Zusammenfassend lässt sich die Verbrennungsanomalie durch eine frühzeitige Entflammung des Gemischs im Schirmvolumen zu Beginn der Kompressionsphase bei niedrigen Zylinderdrücken und Gemischtemperaturen erklären. Bei Erreichen des OT ist der Glühstift umgeben von Restgas und nicht von Frischgemisch, das sich schlagartig entflammen und eine schnelle und frühe Hauptverbrennung einleiten könnte.



**Abbildung 31:** Detektierte Strahlung durch optischen Zugang i1 über den Kurbelwinkel bei  $R = 0,88 \Omega$  (oben) und  $R = 0,92 \Omega$  (unten) für Zyklen mit frühester, mittlerer und spätester Verbrennungsschwerpunkt (CA50), Ensemble aus 200 Motorzyklen.

### 5.3 Optimierung der HSI-Regelung (KGK-HSI)

Da es sich bei der Oberflächenzündung um einen thermischen Vorgang handelt, ist die Glühstifttemperatur von besonderer Bedeutung. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Glühstifttemperatur und Glühkerzenwiderstand wurde im Zuge der Vorversuche eine Widerstandsregelung implementiert. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden weitere denkbare Regelgrößen, Glühkerzenspannung, -strom und -leistung, in Betracht gezogen und ausgewertet. Bei der zur Bestromung der Glühkerze verwendeten Spannungsquelle handelt es sich um ein digital über Modbus/TCP-IP ansteuerbares Labornetzgerät. Bei Leistungs- und Widerstandsregelung wurde die Stellgröße des Netzteils mittels parametrisierbarem PI-Regler und einer Abtastfrequenz von 20 Hz berechnet. Bei Spannungs- und Stromregelung erfolgte die Regelung durch Sollwertvorgabe direkt an das Netzteil (Spannungs-/Strombegrenzung).

Die Ergebnisse unterschiedlicher Reglertypen sind Abbildung 32 und Abbildung 33 zu entnehmen. Bei Spannungsregelung (Abbildung 32, links) ist das Einstellen bestimmter stabiler Betriebspunkte möglich. Frühe oder späte Verbrennungsschwerpunkt (CA50) führen allerdings zu einer nach früh bzw. spät weglaufenden Glühzündung und schränken somit den HSI-Betriebsbereich ein. Der in Abbildung 32, rechts,

dargestellte Betriebspunkt der Widerstandsregelung zeichnet sich durch suboptimale Reglerparameter aus, die zu einem leicht schwankenden aber dennoch stabilen Motorbetrieb führen.

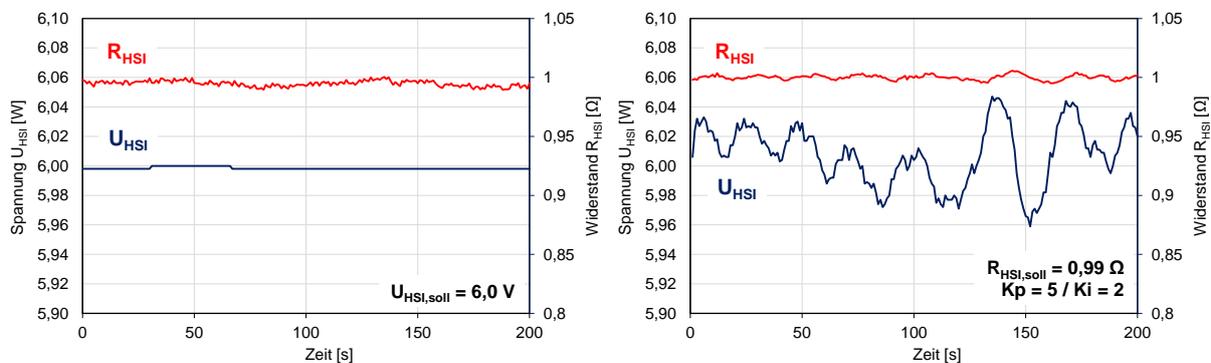


Abbildung 32: HSI-Betrieb bei Spannungsregelung (links) und Widerstandsregelung (rechts),  $\lambda = 1,82$

In Abbildung 33, links, ist der Übergang von Widerstands- auf Stromregelung dargestellt. Bei konstantem Strom kommt es im Betrieb zu einer graduellen Abkühlung des Glühstifts – erkennbar am abfallenden Widerstand – die zu einer verschleppten Schwerpunktlage und schließlich zu Zündaussetzern führt. Bei Leistungsregelung (Abbildung 33, rechts) verhält es sich analog: Der PI-Regler ist in der Lage die Leistung für ca. 30 s konstant zu halten. Zeitgleich fällt jedoch der Glühkerzenwiderstand kontinuierlich ab, sodass sich bei ca. 33 s Zündaussetzer eignen und die Heizleistung aufgrund des verstärkt fallenden Widerstands ebenfalls abfällt. Daraus folgt, dass ein stabiler HSI-Betrieb nur durch Spannungs- oder Widerstandsregelung zu erreichen ist, wobei sich die Widerstandsregelung aufgrund größerer Betriebsbereiche als zielführend erwiesen hat.

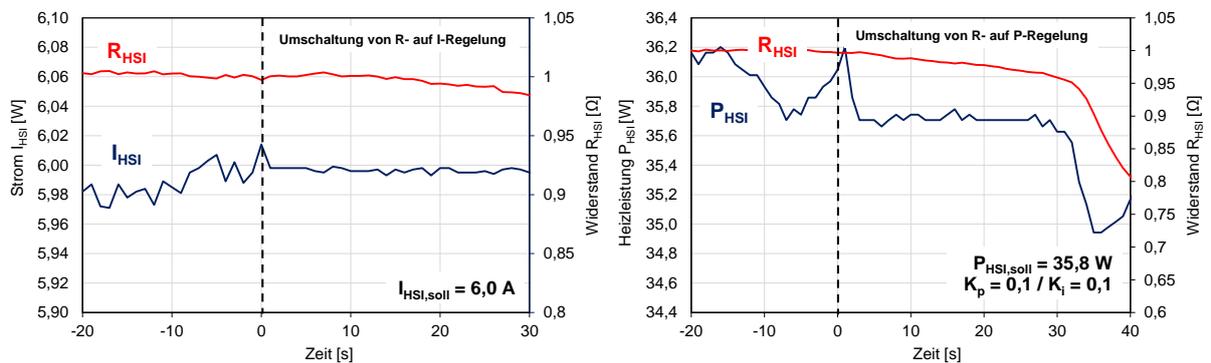
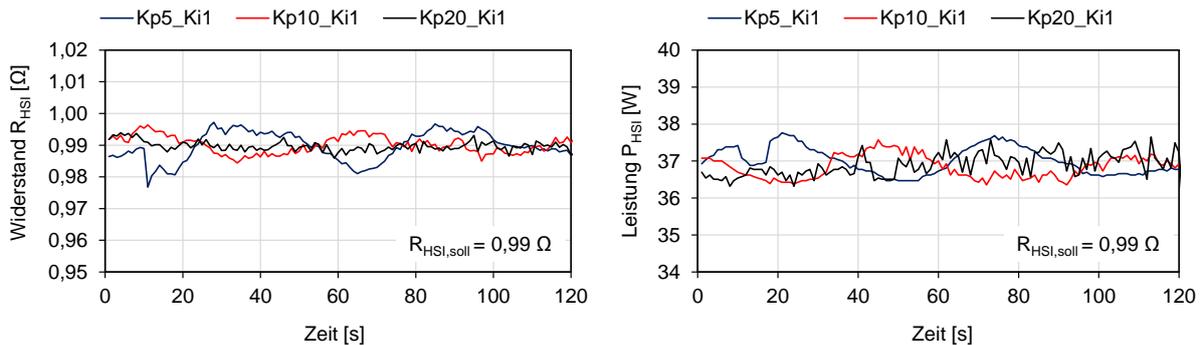


Abbildung 33: HSI-Betrieb bei Stromregelung (links) und Leistungsregelung (rechts),  $\lambda = 1,82$

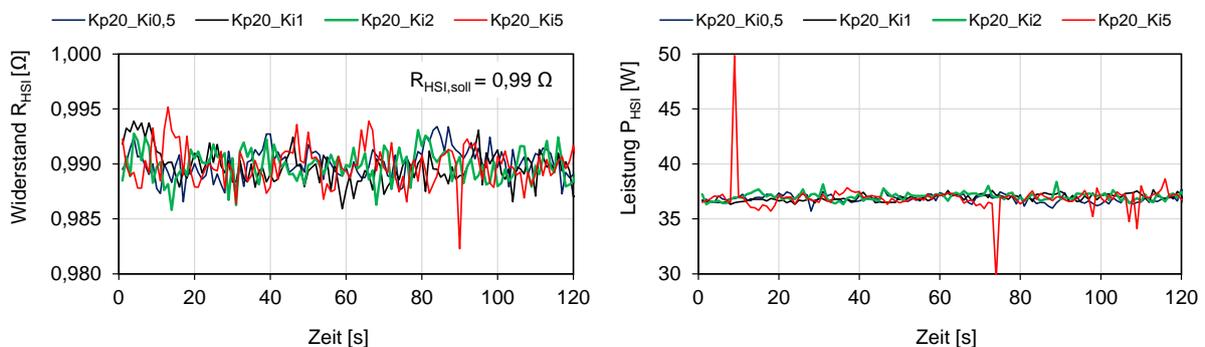
Nachfolgend sind ausgewählte Ergebnisse der PI-Regler-Optimierung unter Verwendung des Widerstandsreglers exemplarisch dargestellt. Aufgrund der größtenteils unbekannt und stochastischen Störeinflüsse wurden die Reglerparameter empi-

risch bestimmt. In Abbildung 34 wird die Auswirkung unterschiedlicher Verstärkungsfaktoren  $K_p$  des Proportional-Anteils deutlich: Bei  $K_p = 5$  und  $K_p = 10$  schwankt der Widerstand periodisch ca.  $0,02$  bzw.  $0,01 \Omega$  um den eingestellten Sollwert. Ein Erhöhen des Verstärkungsfaktors auf  $K_p = 20$  erlaubt ein schnelleres Ausregeln auftretender Störungen und einen Betrieb bei einer zufriedenstellenden maximalen Abweichung von  $e = 0,003 \Omega$ .



**Abbildung 34: HSI-Widerstand (links) und HSI-Leistung (rechts) über der Zeit im Stationärbetrieb bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren  $K_p$ ,  $\lambda = 1,81$**

Der Verstärkungsfaktor des Integral-Anteils  $K_i$  spielt bei stabilen Betriebspunkten eine eher untergeordnete Rolle. Bei zu großer Dimensionierung wirken sich kleine Abweichungen zur Sollgröße allerdings sehr stark auf die Stellgröße aus und können dadurch zu Instabilitäten führen. Problematisch sind zudem Diskretisierungsfehler, die sich im Zuge der AD-Wandlung ergeben und eine falsche Berechnung der Ist-Größe mit sich ziehen. In Abbildung 35 ist ein Beispiel eines zu hoch gewählten  $K_i$ -Faktors dargestellt. Der Betrieb bei  $K_i = 5$  zeichnet sich durch eine tendenziell höhere Abweichung sowie durch vereinzelte Peaks im Widerstand aus, die sich auch in der Leistung widerspiegeln. Für die nachfolgend in Kapitel 5.4 diskutierten Versuche wurde die Kombination  $K_p/K_i = 20/1$  gewählt, da mit dieser Einstellung beste Ergebnisse bei Betriebspunkten an der Stabilitätsgrenze zu erzielen waren.



**Abbildung 35: HSI-Widerstand (links) und HSI-Leistung (rechts) über der Zeit im Stationärbetrieb bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren  $K_i$ ,  $\lambda = 1,81$**

#### 5.4 Auswirkung von Motorlast und Luftverhältnis auf die Parameter der Oberflächenzündung (KGK-HSI)

Unter Verwendung der in Abbildung 8 gezeigten Aufladeeinheit wurden Ansaugdruckvariationen bei verschiedenen Luftverhältnissen durchgeführt. Geregelt wurde dabei auf den Druck im Ansaugstutzen  $p_{\text{Mixt}}$ . Analog zur Zündzeitpunktvariation bei Funkenzündung wurde im HSI-Betrieb der Glühkerzenwiderstand schrittweise angepasst. Die implementierte Widerstandsregelung ermöglichte eine deutliche Ausweitung des HSI-Betriebsbereichs im Vergleich zu den Voruntersuchungen sowohl hinsichtlich Luftverhältnis als auch Schwerpunktlage.

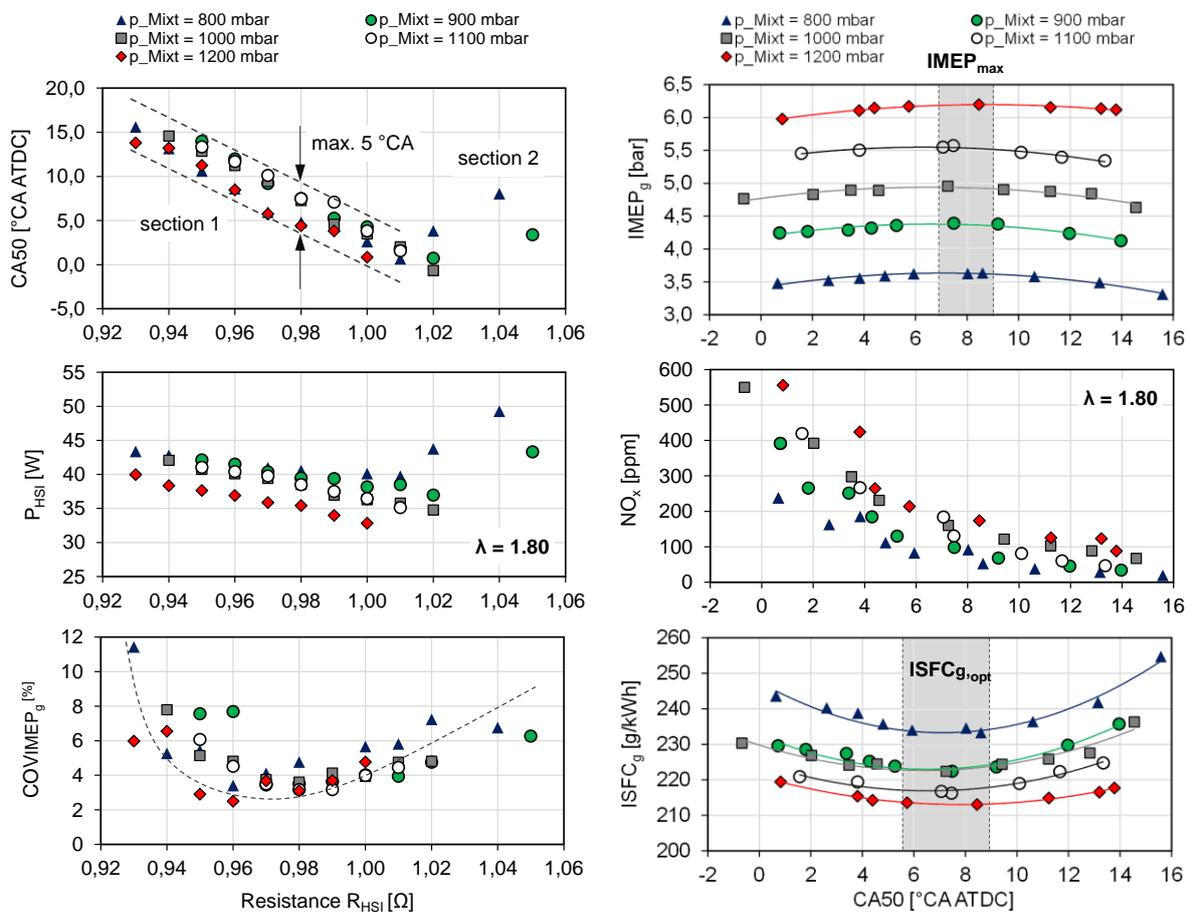
##### Einfluss des Ansaugdrucks

Abbildung 36 zeigt Widerstandsvariationen bei  $p_{\text{Mixt}} = 800 - 1200$  mbar und einem konstanten Luftverhältnis von  $\lambda = 1,80$ . Der Verlauf der Verbrennungsschwerpunktlage CA50 verdeutlicht, dass kein direkter Zusammenhang zwischen Ladedruck und Schwerpunktlage besteht. Vielmehr lassen sich bei konstantem Widerstand unabhängig vom Ladedruck Schwerpunktlagen in einem Band von 5 °KW einstellen. Während bei Aufladung der HSI-Betrieb nur in Bereich 1 (section 1) erfolgt, findet bei Drosselung und hohen HSI-Widerständen ein Übergang in den anomalen Betriebsbereich (section 2) mit vorzeitiger Gemischentflammung statt. Die zur Aufrechterhaltung der Verbrennung erforderliche Heizleistung sinkt trotz steigendem Widerstand bzw. Glühstifttemperatur. Dies liegt an den früheren Verbrennungslagen, die in erster Linie zu höheren Verbrennungstemperaturen führen. Dies führt zu einem Anstieg des Wärmestroms von Gemisch zu Glühstift, wodurch der Regler in der Lage ist, die elektrische Beheizung zu reduzieren. Mit steigendem Ansaug- bzw. Mitteldruck kann die Heizleistung ebenfalls reduziert werden. Begründet ist dies in den im Verhältnis zur durch die Verbrennung freigesetzten Wärmeenergie reduzierten Wandwärmeverlusten. Zusammenfassend führen also sowohl steigende Mitteldrücke als auch frühere Schwerpunktlagen zu höheren Verbrennungstemperaturen und erlauben eine Reduktion der HSI-Heizleistung.

Um den Einfluss des Aufladesystems auf die Verbrennung im Zuge der Auswertung zu minimieren, wird nachfolgend nur die Hochdruckphase der Verbrennung betrachtet. Die Kovarianz COV des Hochdruckanteils des Mitteldrucks ( $\text{IMEP}_g$ ) weist unabhängig vom Ladedruck ein Minimum im mittleren Widerstandsbereich bei Schwerpunktlagen von ca. 5 - 10 °KW n. OT auf. Bei früheren Schwerpunktlagen sinkt die erforderliche Heizleistung, der Anteil der Wärmeaufnahme aus der Verbrennung an der Gesamtenergiebilanz des Glühstifts steigt an und zyklische Verbrennungsschwankungen wirken sich stärker auf die Glühstifttemperatur aus. Um dennoch ei-

nen stabilen Motorbetrieb aufrecht zu erhalten, muss das HSI-System aufgrund der geringen thermischen Trägheit des Glühstifts sehr schnell auf die schwankende Wärmefreisetzung reagieren. Es zeigte sich jedoch, dass die Lese- und Schreibfrequenz des verwendeten Netzteils, die für gewöhnlich bei 20 Hz liegt, in unregelmäßigen Abständen kurzzeitig auf bis zu 2 Hz abfallen kann. Dies könnte unter Umständen zu Instabilitäten bei der Regelung führen und wirkt sich besonders bei frühen und späten Schwerpunktlagen an der HSI-Stabilitätsgrenze aus. Des Weiteren konnte nicht geklärt werden, ob das Netzteil in der Lage ist bei hohen Aktualisierungsraten ausreichend schnell auf neue Sollwerte für Strom oder Spannung zu reagieren.

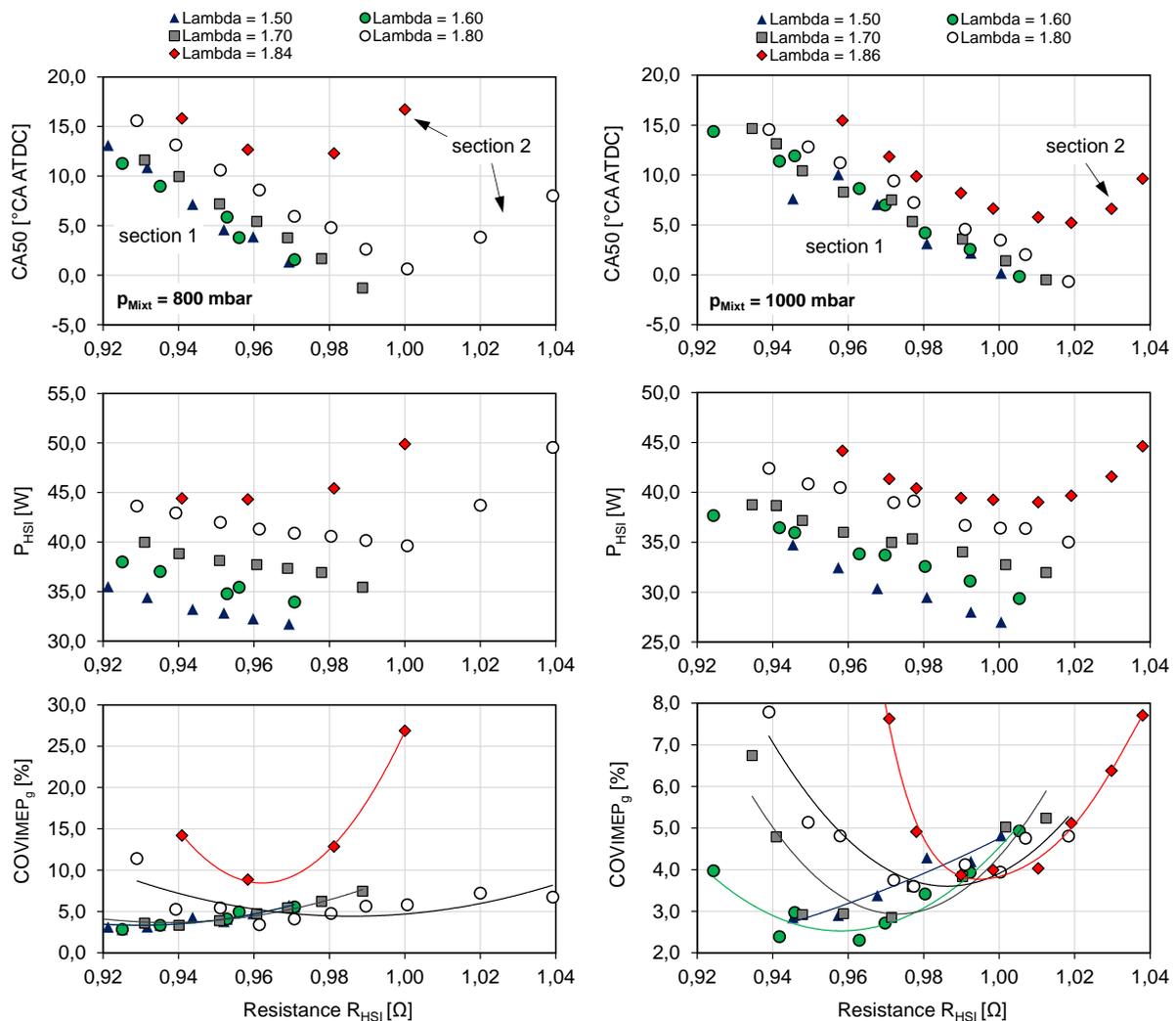
Abbildung 36, rechts, zeigt IMEP<sub>g</sub>, NO<sub>x</sub>-Emissionen und indizierten Kraftstoffverbrauch über der Schwerpunktlage. Maximale Mitteldrücke werden im Bereich 7 - 9 °KW n. OT erreicht. Der NO<sub>x</sub>-Ausstoß korreliert mit der Verbrennungslage und sinkt bei Drosselung aufgrund der höheren Wandwärmeverluste sowie Restgasanteile, die zu niedrigeren Verbrennungsspitzen Temperaturen führen. Aufgrund der heißeren Verbrennung verbessert sich der Kraftstoffverbrauch mit steigenden Ladedrücken.



**Abbildung 36: Verbrennungsschwerpunktlage CA50, HSI-Leistung und COV bezogen auf die indizierte Hochdruckleistung IMEP<sub>g</sub> über HSI-Widerstand bei verschiedenen Ladedrücken  $p_{\text{Mixt}}$ ,  $\lambda = 1,80$**

### **Auswirkung des Luftverhältnisses**

In Abbildung 37 sind die Ergebnisse von Luftverhältnisvariationen für  $p_{\text{Mixt}} = 800/1000$  mbar dargestellt. Das Auftreten einer frühzeitigen Entflammung (section 2) erfolgt nur bei sehr hohen Luftverhältnissen und verschiebt sich zu höheren  $\lambda$  mit steigendem Ansaugdruck. Bei konstantem HSI-Widerstand führt Abmagerung zu einer Verschleppung der Schwerpunktlage CA50 sowie zu einem Anstieg der erforderlichen Heizleistung. Eine systematische Auswirkung des Luftverhältnisses auf die zyklischen Verbrennungsschwankungen ist bei 1000 mbar zu erkennen. Abgesehen von  $\lambda = 1,50$  führt Abmagerung zu einem Anstieg der Schwankungen im Mitteldruck sowie zu einer Verlagerung des Stabilitätsoptimums zu höheren HSI-Widerständen bzw. Glühstifttemperaturen. Bei  $p_{\text{Mixt}} = 800$  liegt die Verbrennungsstabilität im Bereich  $\lambda = 1,50 - 1,70$  auf ähnlichem Niveau. Darüber hinaus, insbesondere bei  $\lambda = 1,84$ , ist die Verbrennung sehr instabil mit Werten für  $\text{COV}_{\text{IMEPg}} > 5\%$ .



**Abbildung 37: Verbrennungsschwerpunktlage CA50, HSI-Leistung und COV bezogen auf die indizierte Hochdruckleistung IMEP<sub>g</sub> über HSI-Widerstand bei verschiedenen Luftverhältnissen bei  $p_{\text{Mixt}} = 800 \text{ mbar}$  (links) und  $p_{\text{Mixt}} = 1000 \text{ mbar}$  (rechts)**

Die Ergebnisse der Ansaugdruck- und Luftverhältnisvariationen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei konstantem Luftverhältnis und HSI-Widerstand ist die Schwerpunkt Lage trotz unterschiedlicher Ansaugdrücke nahezu konstant.
- Die erforderliche Heizleistung ist abhängig von Luftverhältnis, Ansaugdruck und Verbrennungsschwerpunkt Lage. Dabei gilt grundsätzlich: je heißer die Verbrennung, desto geringer die elektrische Heizleistung.
- Der HSI-Betrieb wird in zwei Richtungen begrenzt: Bei zu späten Schwerpunkt Lagen führen die steigenden Verbrennungsschwankungen zu einem instabilen Reglerverhalten und schlussendlich zu einer zu starken Abkühlung des Glühstifts. Bei zu frühen Schwerpunkt Lagen steigt die Wärmeaufnahme aus der Verbrennung, sodass die Regelmöglichkeit der Glühstifttemperatur mittels Bestromung

eingeschränkt wird. Verbrennungsschwankungen wirken sich dadurch stärker auf die HSI-Temperatur aus und können durch die Reglerstellgröße nur schwer ausgeglichen werden.

- Mit steigendem Ladedruck verschiebt sich der stabile Betriebsbereich aufgrund der höheren Wärmeaufnahme durch den Glühstift hin zu höheren Luftverhältnissen. Bei 1200 mbar können Luftverhältnisse unter 1,70 nur vereinzelt und von stabilen mageren Betriebspunkten ausgehend eingestellt werden.
- Mit steigendem Ladedruck verschiebt sich der zulässige Betriebsbereich zur Einhaltung eines bestimmten  $\text{NO}_x$ -Grenzwerts (s. Abbildung 38 am Beispiel von  $\frac{1}{2}$  TA-Luft) in Richtung höherer Luftverhältnisse.
- Ein Betrieb in Bereich 2 (section 2) mit vorzeitiger Gemischentflammung und verschleppter Hauptverbrennung ereignet sich nur bei hohen Luftverhältnissen und geringen Ansaugdrücken.
- Durch weitere Regloptimierung ist mit einer Auswertung der Betriebsbereiche sowohl hin zu späteren Schwerpunktlagen als auch zu fetteren Gemischen zu rechnen.

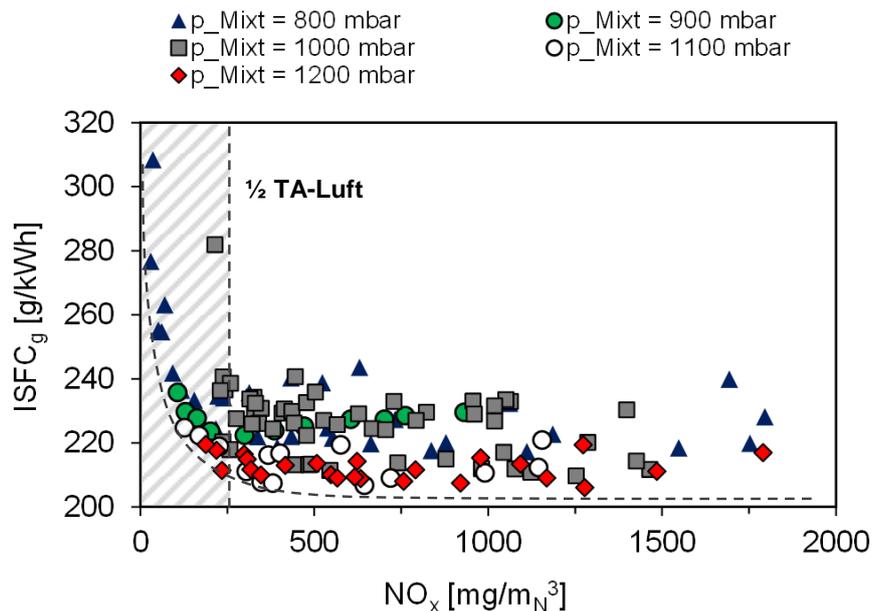
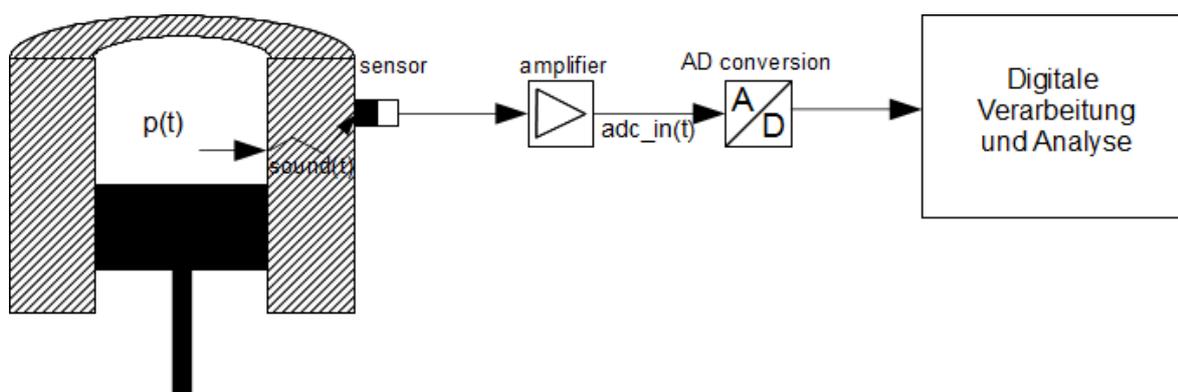


Abbildung 38: ISFC<sub>g</sub>-NO<sub>x</sub>-Zielkonflikt aller Betriebspunkte unter NO<sub>x</sub> = 2000 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (bezogen auf 5% O<sub>2</sub>)

## 5.5 Körperschalluntersuchungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll untersucht werden, ob eine Regelung der Verbrennung durch Auswertung des Motorkörperschalls im Betrieb möglich ist. In besonderem Fokus steht dabei die Regelung der Verbrennungsschwerpunktlage, da diese in der Regel eine gute Korrelation zum Zünd- bzw. Entflammungszeitpunkt aufweist. Damit wäre es bei Betrieb mit Oberflächenzündung möglich, auf veränderliche Randbedingungen wie Ansaugdruck und –temperatur sowie Erdgaszusammensetzung zu reagieren, ohne die gewünschte Verbrennungslage und das damit verbundene Wirkungsgrad-Emissions-Verhalten zu verlieren.

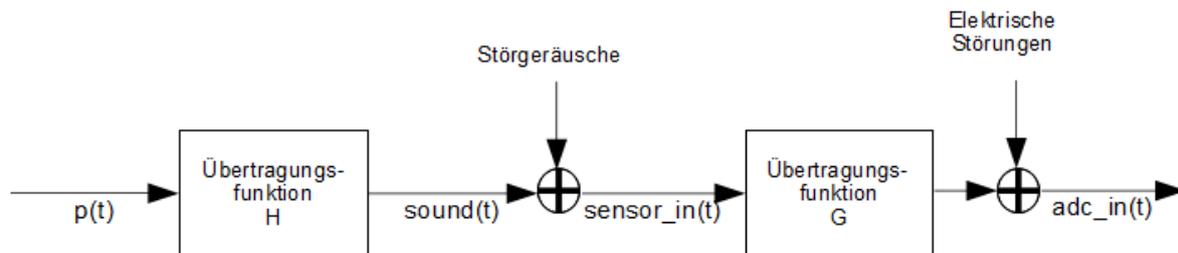
Ein Berechnen der Schwerpunktlage aus dem Zylinderdrucksignal kommt aufgrund der angestrebten Projektziele (kostengünstiges, wartungsarmes Zünd-/Brennverfahren) nicht in Frage. Da sich die schnellen Änderungen des Zylinderinnendrucks im Verlaufe der Verbrennung jedoch auch im Körperschall des Motorblocks abbilden, können mithilfe des erfassten Körperschallsignals prinzipiell ähnliche Regelungskonzepte umgesetzt werden, wie bei der hier im Serienbetrieb nicht möglichen Zylinderinnendruckfassung. Allerdings enthält das Körperschallsignal neben der Information über den Zylinderinnendruck auch starke, überlagerte Störungen, sodass der Signalaufbereitung eine besondere Bedeutung zukommt. Zudem stellt die temperaturabhängige Schallausbreitung im Motorblock bei transienten Motorbetrieb ein Risiko bei der körperschallbasierten Verbrennungsregelung dar. Abbildung 39 zeigt die betrachtete Strecke der Signalübertragung vom Brennraum bis hin zur digitalen Auswertung.



**Abbildung 39: Übersicht der betrachteten Strecke der Signalübertragung vom Zylinderinnendruck bis zur digitalen Verarbeitung und Analyse des erfassten Körperschalls.**

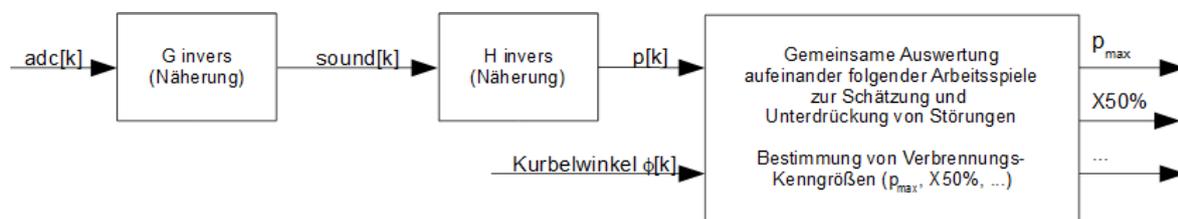
Das zugrunde gelegte Modell des Signalflusses vom Zylinderinnendruck bis zur AD-Wandlung des erfassten Körperschallsignals ist in Abbildung 40 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Übertragungsfunktionen nicht zwingend klassische lineare zeitinvariante Systeme darstellen müssen, auch wenn dies für die spätere Konkreti-

sierung und Nutzung des Modells oft eine sinnvolle Vereinfachung darstellen kann. Zudem können die modellierten Störgeräusche und elektrischen Störungen von stochastischer und/oder deterministischer Struktur sein. Die konkrete Ausprägung der Störungsarten bestimmt die Details der späteren digitalen Aufbereitung des erfassten Körperschallsignals.



**Abbildung 40: Modell der Signalübertragung vom Zylinderinnendruck bis zum Eingang der AD-Umsetzung vom erfassten Körperschall**

Ein wesentlicher Teil der digitalen Verarbeitung und Analyse besteht aus der Invertierung der gezeigten Signalbeeinflussung vom Zylinderinnendruck bis zum erfassten Körperschall – bzw. einer möglichst guten Annäherung an die Invertierung dieser Signalübertragungsstrecke. Wie in Abbildung 41 gezeigt, kann das durch Invertierung der Übertragungsfunktionen H und G geschätzte Zylinderinnendrucksignal noch durch eine gemeinsame Auswertung mehrerer aufeinander folgender Arbeitsspiele von stochastischen und deterministischen Störungen befreit werden bevor die angestrebten Verbrennungskenngrößen wie maximaler Zylinderinnendruck ( $p_{max}$ ) oder Verbrennungsschwerpunktlage (X50%) bestimmt werden können. Die Anzahl der zu betrachtenden aufeinanderfolgenden Arbeitsspiele hängt dabei im Wesentlichen von der Stärke und Ausprägung der involvierten Störungen ab. Nachfolgend werden einheitlich Auswertungen basierend auf 50 Arbeitsspielen gezeigt, wobei auch nur 10 Arbeitsspiele sinnvolle Ergebnisse liefern – jedoch mit größeren Streuungen.



**Abbildung 41: Überblicks-Blockschaltbild der digitalen Verarbeitung und Analyse vom erfassten Körperschall**

Die nachfolgend betrachteten Messungen wurden den der HsKA in Kooperation mit IDISIV durchgeführt und basieren auf einer systematischen Messreihe mit der synchronen Erfassung von Zylinderdruck und Körperschall bei Betriebspunkten mit Verbrennungsschwerpunktlagen von X50% = 5°/10°/15°/20° KW n. OT sowie Luftverhältnissen von  $\lambda = 1,40/1,45/1,50/1,55/1,60/1,65$ .

Dabei wurde das Standard-Brennverfahren mit Vorkammerfunkenzündung genutzt, da zum Zeitpunkt der Messreihe eine vergleichbar breite Betrachtung der Betriebspunkte mittels kontrollierter Oberflächenzündung noch nicht möglich war. Die Nutzung der klassischen Funkenzündung ist dabei für die hier diskutierte Untersuchung akzeptabel, da vorwiegend der Abgleich von Verbrennungsanalyse mittels Zylinderdruck mit der mittels Körperschall relevant ist und sich die durch Oberflächenzündung eingeleitete Verbrennung nicht grundlegend unterscheidet.

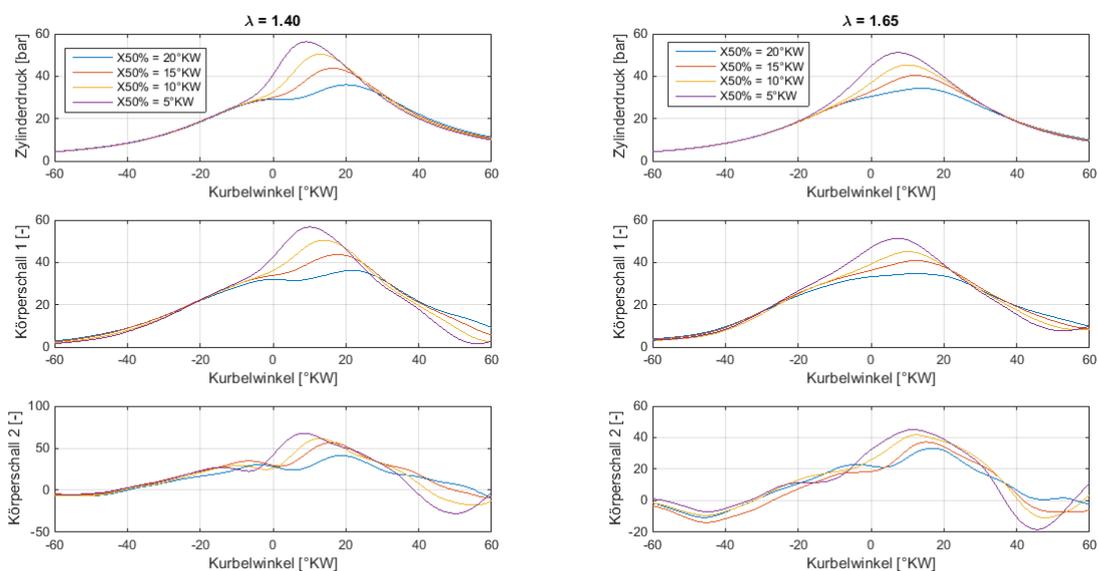
Die systematische Variation von Luftverhältnis und Verbrennungsschwerpunktlage wurde durch Einstellen des gewünschten Betriebspunktes für mindestens 3 Minuten mithilfe der im Prüfstand integrierten Regelungstechnik durchgeführt. Dabei wurde die Verbrennungsschwerpunktlage durch Zündzeitpunktanpassung variiert.

Wie beschrieben, soll aus den Körperschallsignalen das eigentliche Zylinderdrucksignal möglichst gut rekonstruiert werden. Gelingt dies, kann mit den Standardverfahren der Druckverlaufsanalyse fortgefahren werden, um Kenngrößen der Verbrennung zu bestimmen. Bei suboptimalen Zylinderdruckrekonstruktionen kann die eigentliche Bestimmung von Kenngrößen der Verbrennung durch entsprechend angepasste Algorithmen erfolgen.

Das Bestimmen der invertierten Übertragungsfunktion der elektrischen Teilstrecke  $H$  ist verhältnismäßig einfach durch explizite Messungen durchzuführen. Schwieriger gestaltet sich die Invertierung der Übertragungsfunktion  $G$  vom Zylinderinnendruck zum Körperschall am Ort des Sensors. Die Nutzung von Standardverfahren zur Systemidentifikation ist dabei nicht direkt möglich, da sich dem erfassten Körperschallsignal nicht nur unkorrelierte Störungen überlagern, sondern auch deterministische – und zum Teil auch betriebspunktabhängige – Störsignale auftreten. Zudem ist es notwendig eine robust invertierbare Übertragungsfunktion vom Zylinderdruck zum Körperschall zu finden, was nicht für alle möglichen Übertragungsfunktionen erreichbar ist. Es ist davon auszugehen, dass es zur Bestimmung von  $G$  keine einheitlich optimale Methode gibt. Für die hier verfügbaren Daten wurden gute Ergebnisse mit der Schätzung eines AR-Filtermodells für die Übertragungsfunktion „ $G$  invers“ erzielt. Für die Schätzung der Filterkoeffizienten wurden mehrere Standardverfahren überprüft, wobei letztendlich die von Matlab® zur Verfügung gestellte Methode nach Steiglitz-McBride genutzt wurde. Eingangssignale für die Schätzung der Filterkoeffizienten sind die Körperschallsignale und Zylinderdrucksignale von einem stationären Betriebspunkt nach geeigneter Tiefpassfilterung und Mittelung von Arbeitsspielen. Insgesamt besteht die nun genutzte Körperschallsignalaufbereitung aus einem Tiefpassfilter zur Unterdrückung hochfrequenter Signalanteile (hier pauschal als Stör-

gen behandelt) und der Filterung mit „G invers“. Anschließend wird durch gemeinsame Betrachtung mehrerer aufeinanderfolgender Arbeitsspiele eine weitere Reduktion von Störungen erreicht. Dabei wird von quasistationärem Motorbetrieb im Bereich der betrachteten Arbeitsspiele ausgegangen.

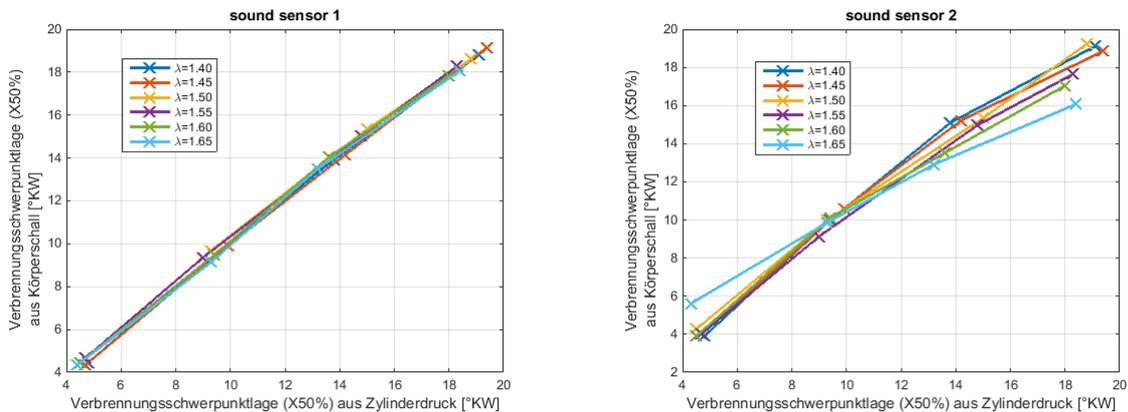
In Abbildung 42 sind Beispiele für aufbereitete Körperschallsignale für den Betrieb bei einem Luftverhältnis von  $\lambda = 1,40$  und  $\lambda = 1,65$  für beide Sensorpositionen (s. Abbildung 7) dargestellt. Die Referenzsignale des Zylinderdrucks sind dabei durch Mittelung über alle Arbeitsspiele gewonnen worden, für die beim Körperschall eine gemeinsame Betrachtung zur Störunterdrückung erfolgt ist. Es ist offensichtlich, dass sich die aufbereiteten Körperschallsignale vom Zylinderdruck vor allem im Bereich niedriger Druckwerte merklich unterscheiden. Allerdings sind insbesondere für die Körperschallsignale von Sensor 1 (brennraumnaher Sensor) die wesentliche Tendenz der Signalform und deren Veränderung mit geänderter Verbrennungsschwerpunktlage sehr gut zur Zylinderdruckreferenz vergleichbar. Dies ist die Basis für die erfolgreiche Auswertung von Verbrennungskenngrößen aus dem Körperschall von Sensor 1. Die Aufbereitung des Körperschalls von Sensor 2 ist hingegen deutlich schlechter, was jedoch bei der ungünstigen Sensorposition mit relativ großer Distanz zum Brennraum nicht gänzlich unerwartet kommt. Dennoch ist auch bei dieser Sensorposition eine grobe Bestimmung der Verbrennungskenngrößen möglich.



**Abbildung 42: Aufbereitete Körperschallsignale der Betriebspunkte bei Luftverhältnis  $\lambda = 1,40$  und  $\lambda = 1,65$ . Die oberste Abbildung zeigt die Zylinderdrucksignale (Referenz). Die mittlere und die untere Abbildung zeigen die aufbereiteten Körperschallsignale von Sensor 1 (brennraumnah) sowie Sensor 2 (am Motorblock vorne) [3].**

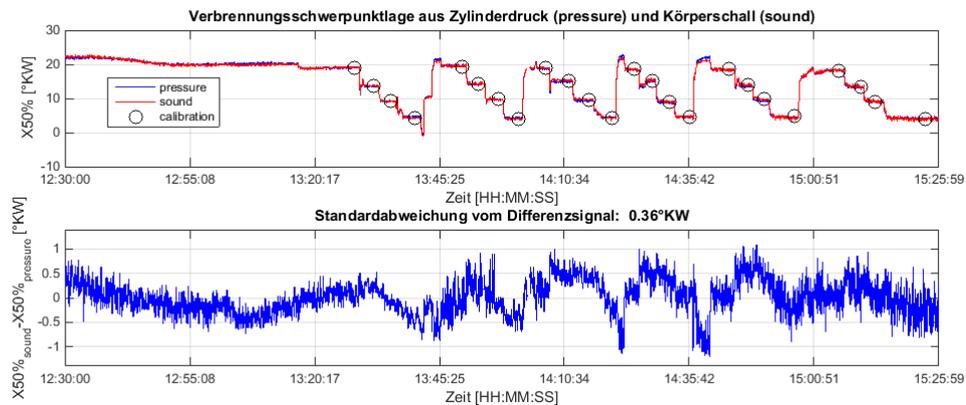
In Abbildung 43 werden die erzielten Schätzwerte der Schwerpunktlage für beide Sensorpositionen dargestellt. Für Sensorposition 1 ergibt sich eine sehr gute Korrela-

tion zwischen der aus dem Drucksignal berechneten und der aus dem Körperschall abgeleiteten Schwerpunktlage. Insgesamt liegt das Streuband der Kurbelwinkellagen hier bei ca.  $\pm 0,5$  °KW. Bemerkenswert ist zudem, dass auch die Schätzwerte von Sensorposition 2 systematisch sind, auch wenn die Streuung der Ergebnisse größer als bei den Ergebnissen von Sensorposition 1 ist und zudem ein systematischer Fehler (nicht-lineare Abbildung) zu erkennen ist.



**Abbildung 43: Schätzung der Verbrennungsschwerpunktlage via Körperschall vom Sensor 1 (brennraumnah; linkes Bild) sowie vom Sensor 2 (am Motorblock vorne; rechtes Bild) für Luftverhältnis  $\lambda = 1,40$  und  $\lambda = 1,65$  [3].**

Zur weiteren Verdeutlichung der Qualität der Verbrennungsschwerpunktlagenschätzung mittels Sensor 1 wird in Abbildung 44 der Zeitverlauf der Schwerpunktlage für die Berechnung via Zylinderdruck und via Körperschall für einen kontinuierlichen Motorbetrieb von knapp 3 Stunden dargestellt. Der gezeigte Zeitbereich umfasst die Warmlaufphase des Motors sowie die aus stationären Betriebspunkten bestehende Messreihe. Die Differenz von Zylinderdruck- und Körperschallauswertung zeigt, dass über den gesamten Zeitbereich, d.h. inklusive transienter Betriebszustände, eine maximale Abweichung von ca.  $\pm 1$  °KW auftritt. Die Standardabweichung des Schätzfehlers über den gesamten Zeitraum liegt bei 0,36 °KW. All diese Ergebnisse wurden bei einer Kenngrößenberechnung aus 50 aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen erzielt. Reduziert man die Anzahl der gemeinsam ausgewerteten Arbeitsspiele zu 10, so ergibt sich eine für viele Aufgaben immer noch akzeptable Standardabweichung von ca. 0,8 °KW.



**Abbildung 44:** Zeitliche Darstellung der Verbrennungsschwerpunktlage für eine Betriebsdauer von ca. 3 h. Die mit „calibration“ gekennzeichneten Datenabschnitte wurden für die Festlegung der Parameter der Körperschallauswertung genutzt. Die untere Darstellung zeigt die Unterschiede zwischen Zylinderdruck- und Körperschall-basierter Verbrennungsschwerpunktlage [3].

## 6 Bewertung der Ergebnisse

### 6.1 Bewertung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Zielsetzung des Vorhabens

Mithilfe der FE-Analyse und den motorischen Untersuchungen konnte die Auswirkung von Material und Glühstiftgeometrie auf die Verharrungstemperatur des Glühstifts geklärt werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Prototyp mit integrierter Heizwendel entwickelt, der sowohl in Vorkammer- als auch Schirmadaptern eingesetzt werden kann. In Versuchen zeigten sich jedoch eine geringe Haltbarkeit der Heizwendel sowie eine nicht kontrollierbare frühzeitige Verbrennung bei der Vorkammervariante. Des Weiteren konnten im Betrieb aufgrund der marginalen Widerstandsänderung der Heizwendel keine Rückschlüsse auf die Glühstifttemperatur gezogen werden. Der Glühstift wurde daraufhin durch eine haltbare keramische Glühkerze ersetzt und der Fokus des Vorhabens auf die Klärung der Verbrennungsanomalie, der Optimierung der HSI-Regelung sowie der Untersuchung des HSI-Systems bei unterschiedlichen Mitteldrücken durch Ansaugluftdrosselung und Aufladung gelegt. Auf die Durchführung von Kennfeldvariationen mit variabler Drehzahl beim Kooperationspartner in Spanien wurde daraufhin verzichtet.

Die Kombination aus 3D-Verbrennungssimulation und motorischen Versuchen mit optischer Messtechnik erlaubte eine Klärung der bei der Schirmvariante der HSI auftretenden Verbrennungsanomalie und liefert richtungsweisende Ansätze für eine weitere Optimierung der HSI-Geometrie.

Im Vergleich zu den Voruntersuchungen erlaubte die Implementierung eines PI-Widerstands-Reglers mit optimierten Reglerparametern eine deutliche Ausweitung des HSI-Betriebsbereichs hinsichtlich Schwerpunktlage und Luftverhältnis. Die Leistungsaufnahme der Glühkerze konnte dadurch von 60-80 W auf teils unter 30 W reduziert werden, wodurch das Projektziel „Reduktion der elektrischen Heizleistung“ erreicht wurde.

Im Zuge der Körperschalluntersuchungen konnte ein Algorithmus entwickelt werden, der auf robuste Art und Weise eine Schätzung der Verbrennungsschwerpunktlage im Motorbetrieb ermöglicht. Ein Schließen der Regelschleife war im Rahmen der Projektdauer allerdings aus Zeitgründen nicht mehr möglich.

Vergleichsversuchsreihen mit Benzin als Kraftstoff konnten nicht durchgeführt werden, da die erhöhten Abgastemperaturen zur Beschädigung des Prüfträgers, insbesondere des Oxidationskatalysators und Abgaswärmetauschers, führten.

## **6.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse**

Das entwickelte HSI-Zündsystem erlaubt ein stabiles Entflammen besonders magerer Gemische und ermöglicht dadurch das Einhalten künftiger  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte bei gutem indiziertem Motorwirkungsgrad. Auch ein Einsatz zur Entflammung von sonst eher zündunwilligen Kraftstoffen wie Bio- oder Deponiegasen ist in Zukunft denkbar. Durch weitere Regleroptimierung kann zudem die Betriebsstabilitätsgrenze weiter zu fetteren Gemischen verlagert werden, wodurch auch bei Oberflächenzündung die Serienleistung des BHKW gehalten werden kann. Die deutlich beschleunigte Verbrennung erlaubt dabei ein Erhöhen des elektrischen Wirkungsgrads der Anlage.

Die entwickelte Körperschallregelung zeichnet sich durch kostengünstige Komponenten aus, die auf bereits serienmäßig eingesetzte Sensoren aufbauen können. Die Auswertung des Körperschallsignals könnte durch die Serien-Reglereinheit des Blockheizkraftwerks übernommen werden. Die Kombination aus einfachem Aufbau des HSI-Entflammungselement sowie der kostengünstigen Sensorik ermöglichen grundsätzlich eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Klein-BHKW.

Es war im Rahmen des Vorhabens möglich, die Heizleistung und allgemein die erforderliche Glühstifttemperatur deutlich zu senken. Dies wirkt sich zum einen positiv auf den Eigenenergieverbrauch des Zündsystems, und damit auf den Gesamtwir-

kungsgrad der Anlage, und zum anderen auf die Lebensdauer des Entflammungssystems aus. Die Durchführung von Dauerläufen mit optimierten Reglerparametern wird in naher Zukunft angestrebt.

## 7 Erfolgte und geplante Publikationen

Scholl, F.; Kettner, M.; Neher, D; Melgar, A.; Klaissle, M.: The Effects of Engine Load and Air-Fuel Ratio on Controlled Hot Surface Ignition operating with Natural Gas, SAE Small Engine Technology Conference, Osaka, November 2015 (*Abstract angenommen*).

Eggers, J.; Scholl, F.; Kettner, M.; Klaissle, M.: Körperschallbasierte Verbrennungsdiagnose an einem Einzylinder-Gasmotor, 9. Dessauer Gasmotorenkonferenz, Dessau, April 2015 (*noch nicht veröffentlicht*).

Scholl, F.; Neher, D; Burkard, D.; Kettner, M.; Melgar, A.; Klaissle, M.: Experiments on Ignition and Combustion Induced by Controlled Hot Surface Ignition in Stationary Engines Running with natural Gas, IAV 2. Internationale Tagung Zündsysteme für Ottomotoren, Berlin, November 2014.

Scholl, F.; Neher, D; Burkard, D.; Kettner, M.; Klaissle, M.: Untersuchungen zu Entflammungszeitpunkt und Flammenausbreitung bei kontrollierter Oberflächenzündung in Stationärgasmotoren, Advanced Simulation Technologies Conference, Augsburg, Oktober 2014.

## Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen ermöglichten, die Entflammung an heißen Oberflächen tiefgehend zu untersuchen. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse und Ansätze, um das HSI-System weiter zu optimieren. Bei der Schirmvariante gilt es dabei vor allem eine Vorentflammung im Schirm zu vermeiden und ausschließlich einen Betrieb in Bereich 1 (ohne Verbrennungsanomalie) anzustreben. Bei Vorkammer-HSI gilt es ebenfalls, die Entflammung zu verzögern, sodass die Verbrennung erst nahe dem oberen Totpunkt eingeleitet wird. Dazu muss der Glühstift während des Ladungswechsels und dem größten Teil der Kompressionsphase durch Restgas vom Frischgemisch abgeschirmt werden. Aus Kosten- und Haltbarkeitsgründen ist die Verwendung einer massenproduzierten keramischen Glühkerze anzustreben.

---

Um den HSI-Betrieb, insbesondere bei frühen Verbrennungsschwerpunktlagen, weiter zu stabilisieren und den Betriebsbereich weiter zu vergrößern, erscheint die Verwendung einer hochfrequent regelbaren Spannungsversorgung sinnvoll.

Die entwickelten Algorithmen zur Auswertung des Motorkörperschalls ermöglichen eine verlässliche Schätzung der Verbrennungsschwerpunktlage im Betrieb. Ein Schließen der Regelschleife in Kombination mit dem HSI-Zündsystem wird in naher Zukunft angestrebt. Ein Einsatz in Kombination mit der konventionellen Funkenzündung als Werkzeug für die Verbrennungsdiagnostik ist ebenfalls denkbar.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Zuschuss für Mini-KWK-Anlagen, URL:  
[http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/mini\\_kwk\\_anlagen/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/index.html)
- [2] Burkard, Daniel: Vergleich der Verbrennung bei Funken- und Oberflächenzündung in ungeteilten und geteilten Brennräumen, Masterthesis, Hochschule Karlsruhe, 2014.
- [3] Eggers, Joachim; Scholl, Fino; Kettner, Maurice; Klaissle, Markus: Körperschallbasierte Verbrennungsdiagnose an einem Einzylinder-Gasmotor, 9. Dessauer Gasmotorenkonferenz, Dessau, April 2015 (*noch nicht veröffentlicht*).
- [4] Enversum, EnVersum GmbH (Hrsg.) URL:  
<http://www.enversum.de/WasisteinMiniversum.html>
- [5] Europäische Kommission: Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten, Verordnung (EU) Nr. 813/2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG vom 02.08.2013
- [6] Hunou, Antoine: Thermische Simulation eines innovativen Oberflächenzündsystems für gasbetriebene Ottomotoren mittels Abaqus, Bachelorthesis, Hochschule Karlsruhe, 2014.
- [7] KWKG - Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung, 2012
- [8] Neher, Denis; Kettner, Maurice; Scholl, Fino; Klaissle, Markus, Schwarz, Danny, Giménez Olavarría, Blanca: *Numerical Investigations of Overexpanded Cycle and Exhaust Gas Recirculation for a Naturally Aspirated Lean Burn Engine*, SAE Technical Paper, SAE 2013-32-9081, 2013.
- [9] Neher, Denis; Kettner, Maurice; Scholl, Fino; Klaissle, Markus; Schwarz, Danny: *Numerische Untersuchungen eines alternativen Brennverfahrens für gemischansaugende stationär betriebene Erdgasmotoren*, 1. International Engine Processes Conference, IAV, Berlin, 2013.
- [10] Neher, Denis; Scholl, Fino; Scherf, Helmut; Kettner, Maurice; Hügel, Philipp; Kubach, Heiko; Spicher, Ulrich; Klaissle, Markus; Zilch Rudi; Kuhnert, Dieter: Entflammung von mageren homogenen Gemischen an heißen Oberflächen, 7. Dessauer Gasmotoren-Konferenz, Dessau, 2011.
- [11] Neher, Denis; Scholl, Fino; Teschendorff, Victor; Kettner, Maurice; Hügél, Philipp, Kubach, Heiko; Klaissle, Markus, Giménez Olavarría, Blanca: *Controlled Hot Surface Ignition in Stationary Petrol and Natural Gas Operation*, SAE Technical Paper, 2012-32-0006, 2012.
- [12] Scholl, F.; Neher, D; Burkard, D.; Kettner, M.; Melgar, A.; Klaissle, M.: Experiments on Ignition and Combustion Induced by Controlled Hot Surface

- Ignition in Stationary Engines Running with natural Gas, IAV 2. Internationale Tagung Zündsysteme für Ottomotoren, Berlin, 2014.
- [13] Scholl, Fino; Neher, Denis; Kettner, Maurice; Hügel, Philipp; Kubach, Heiko; Klaisle, Markus.: Development and analysis of a controlled hot surface ignition system for lean burn engines, ASME 2012 International Combustion Engine Division Spring Technical Conference, ICES2012-81059, 2012.

## **Anhang**