

Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik  
der Hochschule Karlsruhe

Abschlussbericht

## Portable HC-Tracker

Entwicklung eines flammenlosen Verfahrens zur  
mobilen Kohlenwasserstoffmessung in  
Fahrzeugabgasen

Gefördert unter dem Az: 35617-01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Prof. Dr.-Ing Maurice Kettner  
Naqib Salim  
Gion Heugel

Karlsruhe, den 22.06.2023



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis .....	II
Abkürzungsverzeichnis .....	V
Formelzeichenverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Zusammenfassung.....	1
2 Einleitung .....	2
2.1 Zielsetzung und Stand der Technik.....	2
2.2 Konzeptioneller Hintergrund des Projektes .....	4
2.3 Arbeitspakete und –planung.....	5
3 Vorhabensdurchführung und -ergebnisse.....	6
3.1 Arbeitsprinzip Portable HC-Tracker .....	6
3.2 Inbetriebnahme und Untersuchung des bestehenden Prototyps.....	11
3.3 Konzeptfindung des neuen Prototyps.....	14
3.4 Ionenstrommesstechnik.....	19
3.5 Prüfstands Aufbau .....	21
3.5.1 Prüfstandssoftware und Messdatenschnittstelle .....	22
3.5.2 Entwicklung einer Heizkammer .....	24
3.6 Experimentelle Untersuchung des entwickelten Prototyps .....	27
3.6.1 Inbetriebnahme des entwickelten Prototyps.....	27
3.6.2 Untersuchung Einfluss der Elektrodenspannung auf den Ionenstrom .....	29
3.6.3 Ionenstromuntersuchung mit zwei Glühkerzen.....	31
3.6.4 Nicht-stationäres Verhalten des Portable HC-Trackers .....	33
3.7 Reale Abgasmessungen mit dem Portable HC-Tracker.....	39
3.8 Simulation der Reaktionskinetik im HC-Tracker.....	41
Fazit.....	48
Literaturverzeichnis.....	50
Anhang .....	A1
A1 Funktionsweise eines Flammenionisationsdetektors (FID) .....	A1
A2 Funktionsweise eines Fourier-Transformation Infrarot-Messgerätes (FTIR) .....	A3
A3 Funktionsweise eines nichtdispersiven Infrarot-Messgerätes (NDIR).....	A4
A4 Vorhabenszeitplan.....	A5
A5 Messstellenauflistung .....	A6

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchschnittliche Emission zwei hybrid PKWs unter realen Fahrbedingungen; (a) Kohlenmonoxid (CO), (b) Gesamtkohlenwasserstoff (THC) und (c) Stickoxid (NO <sub>x</sub> ) [1].	2
Abbildung 2: Absorbiertes Spektrum ausgewählter Moleküle bei bestimmten Wellenlängen [5].	3
Abbildung 3: Grundlegendes Sensorkonzept und 3D-CFD-Simulation zur Untersuchung der Wärmeübertragung.	5
Abbildung 4: Arbeitsprinzip und Aufbau des (bestehenden) Prototyps (P1).	8
Abbildung 5: Ionisationsgrad eines Wasserstoffatoms als Funktion der Temperatur.	10
Abbildung 6: Ionisierungsgrad eines Propan-Moleküls als Funktion der Temperatur bei höheren Teilchendichten.	10
Abbildung 7: Schematischer Prüfstands Aufbau zum Beginn des Vorhabens.	12
Abbildung 8: Bestehende Spannungsversorgungs- (links) und Ionenstrommesseinheit (rechts).	13
Abbildung 9: Ionenstrommessung des bestehenden Sensors mit 1000 ppm Propan (Rest Stickstoff) bei unterschiedlichen Glühkerzenwiderständen und Spannungen.	14
Abbildung 10: Temperaturmessung mittels Pyrometer (links); Temperaturen der Glühkerze und der Elektrode (rechts).	15
Abbildung 11: Temperaturverlauf in CFD-Simulation (links); elektrische Feldstärke in bestehender Messkammer (rechts).	16
Abbildung 12: Übersicht der vier Konzepte der Messkammer; beginnend links oben im Uhrzeigersinn: Typ 1, Typ 2, Typ 3 und Typ 4.	17
Abbildung 13: Durchschnittliche Messgastemperatur im kritischen Bereich der Messkammervarianten bei unterschiedlich eingesetzten Glühkerzen.	18
Abbildung 14: Explosionsdarstellung des neu entwickelten Laborprototyps (P2).	19
Abbildung 15: Schaltplan der neuentwickelten Ionenstrommesstechnik.	20
Abbildung 16: Aufbau der Ionenstrommesstechnik.	20
Abbildung 17: Ergebnis des Validierungsversuchs bei unterschiedlichen Messwiderständen.	21
Abbildung 18: Schematische Übersicht der Messdatenschnittstelle.	23
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Starttemperaturen ( $T_{Start}$ ) und Temperaturen nach 10 Minuten ( $T_{10}$ ) in °C einzelner Teile der Glühkerze [10].	24
Abbildung 20: Anbringung des Heizbands um den HC-Tracker (links); Aufbau des Heizbands (rechts).	25
Abbildung 21: CAD-Entwurf der Heizkammer (Lüfter und Isolierung nicht abgebildet).	26
Abbildung 22: Isolierte Heizkammer mit HC-Tracker [26].	26
Abbildung 23: Gemessener Ionenstrom der Prototypen P1 und P2.	28

---

Abbildung 24: Gemessener Ionenstrom bei unterschiedlich eingestellten Elektrodenspannungen und Propankonzentrationen. ....	30
Abbildung 25: Standbilder aus Videoaufnahme; links: vor der Funkenbildung; rechts: aufgehellte Messkammer aufgrund der Funkenbildung. ....	30
Abbildung 26: Gasentladungskennlinie nach [27, 28]. ....	31
Abbildung 27: Temperaturmessstellen in der Messkammer. ....	32
Abbildung 28: links: Ionenstromaufstellung bei unterschiedlicher Glühkerzenkonfiguration; rechts: Einfluss der Temperatur auf den Ionenstrom (eingekreiste Punkte bezeichnen Messpunkte, bei denen nur die Keramikglühkerze eingesetzt war). ....	33
Abbildung 29: Ionenstromsignale bei unterschiedlichen Propankonzentrationen ....	34
Abbildung 30: Ablagerung an der Spitze der Metallglühkerze. ....	34
Abbildung 31: Elektrodenkonzept mit Halbschalen (Typ 3-3) analog zum FID-Prinzip (Anordnung siehe Abbildung A1 im Anhang) [24]. ....	35
Abbildung 32: Erste Inbetriebnahme der Konfiguration Typ 3-3 (Halbschalenelektrode) und Vergleich mit Typ 3-2 (Spitzelektrode); links: Ionenstrom, rechts: Temperaturvergleich am Messkammeraustritt bei unterschiedlichen Propan-Konzentrationen. ....	36
Abbildung 33: Wiederholungsversuche mit Konfiguration Typ 3-3; links: Ionenstrom, rechts: Temperatur am Messkammeraustritt. ....	36
Abbildung 34: Versuchsergebnisse ohne Volumenstrom [30]; HZ: Heizkammer, MGK: Metallglühkerze, KGK: Keramikglühkerze, BGK: beide Glühkerzen, IS: Ionenstrom. ....	37
Abbildung 35: Widerstand der Keramikglühkerze bei Versuchen ohne Volumenstrom, analog zur Abbildung 34 [30]. ....	37
Abbildung 36: Widerstand der Metallglühkerze bei Versuchen ohne Volumenstrom, analog zur Abbildung 34 [30]. ....	38
Abbildung 37: Versuchsreihe mit Druckluft [30]; rot markierter Bereich bezeichnet Druckluftzufuhr. ....	38
Abbildung 38: Schematische Darstellung der Abgasstrecke Portable HC-Tracker. ....	39
Abbildung 39: Propan-Konzentration (dargestellt als Äquivalent des Gesamtkohlenwasserstoffs) im Abgas gemessen mit ABB MultiFID AO2020. ....	40
Abbildung 40: Ergebnisse Abgastest; oben links: Ionenstrom, oben rechts: Glühkerzenleistung, unten links: Temperatur Messkammeraustritt. ....	41
Abbildung 41: Menge der Reaktionsprodukte über die Zeit (oben), Flussdiagramm der Reaktionen (unten), bei 1050 K Gastemperatur und 0,5 s Simulationszeit. ....	43
Abbildung 42: Menge der Reaktionsprodukte über die Zeit, bei Erhitzung von Propan, Startbedingung sind 4000 ppm bzw. 0,0027 Mol Propan, Simulationszeit von 0,5 s. (a) bei 1000 K Gastemperatur, (b) bei 1100 K Gastemperatur und (c) bei 1200 K Gastemperatur. ....	45
Abbildung 43: Menge zehn meistvorkommenden Reaktionsprodukte über die Zeit (oben), Menge der Reaktionsprodukte die nach [34] als Ionen vorkommen, bei 0,01 Mol Sauerstoff, 0,986 Mol Stickstoff, 1050 K Gastemperatur. ....	47

Abbildung 44: Flussdiagramm der chemischen Hauptreaktionen, bei 0,004 Mol Propan, 0,01 Mol Sauerstoff, 0,986 Mol Stickstoff, 1050 K Gastemperatur. ....	48
---	----

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
AP	Arbeitspaket
C	Kohlenstoff
$C_xH_y$	Kohlenwasserstoffe mit x-facher Anzahl an Kohlenstoffatome und y-facher Anzahl an Wasserstoffatome
CFD	Computational Fluid Dynamics
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier Transformation Infrarot Analyse
GK	Glühkerze (KGK – Keramikglühkerze, MGK – Metallglühkerze)
H	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoff
N	Stickstoff
NDIR	Nicht-dispersive Infrarot Analyse
O	Sauerstoff
P1/2	Prototyp 1 oder 2
PEMS	Portable Emission Measurement System
PKW	Personenkraftwagen
ppm	Parts per million
RDE	Real Driving Emission
RMG	Reaction Mechanism Generator

## Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$I_{\text{Ion}}$	A	Ionenstrom
$s_{\text{elektrode}}$	mm	Effektive Ionenstromsensor-Elektrodenlänge
$v$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
$t_{\text{Teilchen im Sensor}}$	s	Zeit, die ein Teilchen benötigt, um durch den effektiven Sensorbereich zu strömen
T	°C / K	Temperatur
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom
$R_{\text{GK}}$		Glühkerzenwiderstand
$\dot{V}$	$\text{m}^3_{\text{n}}/\text{h}$ / $\text{l}_{\text{n}}/\text{h}$	Volumenstrom in Normkubikmeter/Normkubikliter pro Stunde
$V_{\text{E}}$	V	Elektrodenspannung
$V_{\text{GK}}$	V	Glühkerzenspannung
$\lambda$	-	Luft-Kraftstoffverhältnis Lambda
CA50	°KW n. OT.	Verbrennungsschwerpunktlage

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung Messung zur Inbetriebnahme des bestehenden Prototyps.....	13
Tabelle 2: Randbedingungen CFD-Simulation der konzipierten Messkammer. ....	18
Tabelle 3: Validierung der Temperaturen in der Messkammer .....	29
Tabelle 4: Eingestellte Parameter zur Untersuchung des Einflusses der Elektroden <span>­</span> spannung auf den Ionenstrom. ....	29
Tabelle 5: Eingestellte Parameter zur Untersuchung der Glühkerzenkonfiguration. ....	32
Tabelle 6: Eingestellte Parameter zur Untersuchung der Gaskonzentrationen. ....	33



## 1 Zusammenfassung

Die Forderung eines nachhaltigen Individualverkehrs ist ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung technologisch fortschrittlicher Antriebstechnologien in der Automobilindustrie. Um den Konflikt zwischen Wirkungsgradsteigerung und erhöhter Schadstoffemission zu lösen, wurden einige Lösungsansätze, wie z. B. Hybridantriebe, Start-Stopp-Systeme und etc., implementiert. Ferner wurden Gesetze eingeführt, mit denen die Emissionsmessung stärker in den Fokus gerückt ist. So wurde beispielsweise mit der Einführung der Euro 6d-Temp-Richtlinie die Messung der Schadstoffemission unter realen Fahrbedingungen (Real Driving Emissions – RDE) für alle Neuzulassungen ab September 2019 verpflichtend. Solche RDE-Messungen erfolgen mit Hilfe einer PEMS-Messtechnik (Portable Emission Measurement System), mit der allerdings keine mobile Kohlenwasserstoffmessung durchgeführt wird. Aktuell erfolgt die Erfassung des HC-Ausstoßes nur an Rollenprüfständen unter Laborbedingungen und ist bei der mobilen Messung gesetzlich nicht vorgeschrieben. Der Grund liegt u. a. darin, dass die etablierte Messtechnik mittels Flammenionisationsdetektor (FID), welcher eine Wasserstoffflamme verwendet, nur bedingt für die Verwendung in fahrenden Fahrzeugen geeignet ist. Um diese Lücke zu schließen, ist es beabsichtigt, ein echtzeitfähiges Kohlenwasserstoffsensorenprinzip zu entwickeln, welches für die dynamische Messung auf Straßen geeignet ist.

Im Rahmen eines bereits abgeschlossenen Forschungsprojektes wurde ein Sensorprinzip entwickelt und untersucht, mit dem die Ionisierung eines HC-haltigen Gases durch die Nutzung einer elektrisch beheizbaren Glühkerze nachgewiesen werden konnte. Das Prinzip, welches auf der chemischen- und temperaturabhängigen Leitfähigkeit eines Gases basiert, ermöglicht eine wasserstofffreie, und somit sichere Erfassung von HC-haltigen Abgasen. Jedoch sind weitere Schritte notwendig, um das Entwicklungspotential zu bestimmen.

In nachstehenden Kapiteln wird über das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az.: 35617-01) geförderte Vorhaben berichtet, bei dem es um die Weiterentwicklung des Sensorprinzips geht. Unter anderem wurde mit der Methode des digitalen Zwillings experimentelle Untersuchungen sowie begleitende CFD-Simulationen durchgeführt, um die Bedingungen für den Ionisationsvorgang im Laborprototyp zu untersuchen. Basierend auf diesen Untersuchungen konnte der Sensorinnenraum modifiziert werden, um die Ionisationsbedingungen zu verbessern. Zudem wurde die Ionenstrommesstechnik derart weiterentwickelt, dass die Messgenauigkeit bei kleinen HC-Konzentrationen erhöht werden konnte. Mit Unterstützung des Industriepartners AIP GmbH & Co. KG wurde zudem der gesamte Prüfstandsaufbau messtechnisch optimiert, damit die Messungen von relevanten Kenndaten gewährleistet und die Vorgehensweise der Untersuchungen optimal gelingen.

Mit dem neuen Laborprototyp ist es gelungen, Untersuchungen mit Probegasen unterschiedlicher Propan-Konzentrationen (100, 1000 und 4000 ppm) sowie mit realem Abgas durchzuführen. Aus den Versuchen ist jedoch ersichtlich, dass das angewandte Ionisationsprinzip ein noch nicht ausreichend reproduzierbares Messsignal erzeugt.

## 2 Einleitung

### 2.1 Zielsetzung und Stand der Technik

Das Ziel zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Automobil- und Motorenhersteller weltweit ist es, die Umweltbelastung zu verringern. Zur Verbesserung der Luftqualität hat die Europäische Union einen Standard zur Messung von Emissionen unter realen Fahrbedingungen entwickelt, die „Real Driving Emissions“ (RDE), welche die Euro 6d-Temp-Gesetzgebung ergänzt. Für das Testverfahren kommt die Portable Abgasmesstechnik (PEMS) zum Einsatz. Mit der PEMS-Technik ist es möglich, Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) sowie Partikel (PN) im Abgas zu messen. Trotz ihrer ökotoxikologischen Wirkung, wird die Messung der Kohlenwasserstoffe unter realen Bedingungen noch nicht vorgeschrieben. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe, die u.a. Bestandteile wie z. B. Benzol enthalten können, welche krebserregend sein können, kommen im Abgas vor und können über die Atemluft aufgenommen werden. Zudem stellen diese Schadstoffe Ursachen des Smogs in Städten dar.

Trotz und auch wegen fortschrittlicher CO<sub>2</sub>-reduzierender Maßnahmen wie Hybrid-Antrieben und Start-Stopp-Systemen, wird der Ausstoß von Kohlenwasserstoffen nicht vollständig unterdrückt. Diese Systeme können sogar zu häufigerem Auskühlen des Katalysators führen, was für die Oxidation unverbrannter Kohlenwasserstoffe ungünstig ist. Untersuchungen, wie von [1], haben bestätigt, dass trotz der Reduktion von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), der Ausstoß von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe hybrider PKWs unter bestimmten Bedingungen abhängig vom Gemischverhältnis und aufgrund unterschiedlicher Light-Off-Temperaturen sogar erhöht ist (siehe Abbildung 1).

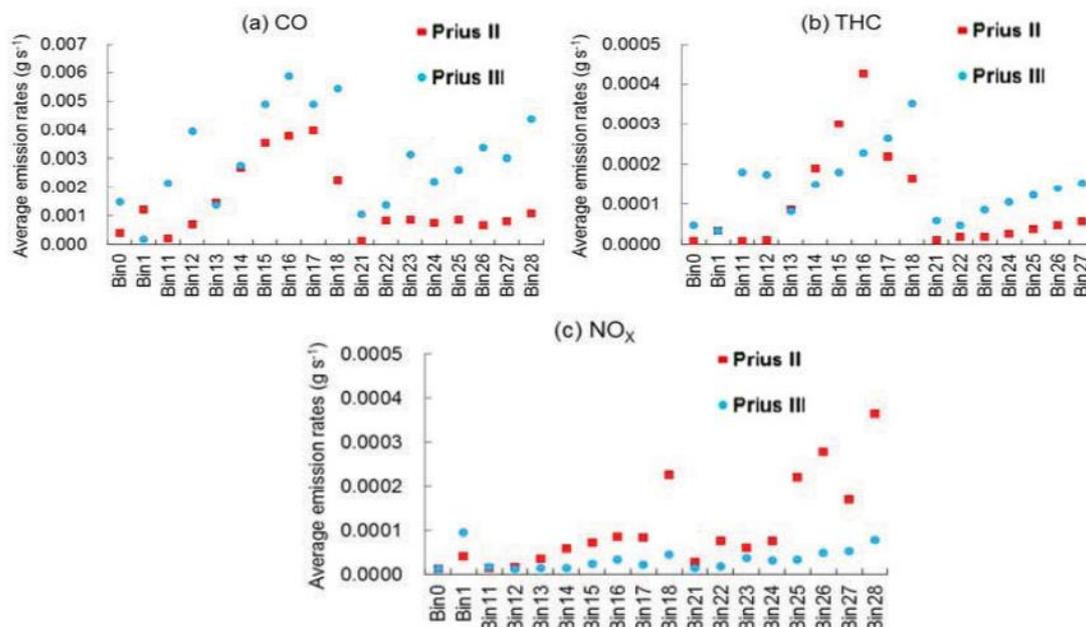


Abbildung 1: Durchschnittliche Emission zwei hybrid PKWs unter realen Fahrbedingungen; (a) Kohlenmonoxid (CO), (b) Gesamtkohlenwasserstoff (THC) und (c) Stickoxid (NO<sub>x</sub>) [1].

Für die aktuell gültige Abgasgesetzgebung erfolgt die Erfassung von Kohlenwasserstoffen im Abgas nur auf Rollenprüfständen unter Laborbedingungen. Der Grund dafür ist, dass die konventionelle Messtechnik zur Bestimmung vom HC-Gehalt im Abgas ohne großen Aufwand kein sicheres Verfahren für die Messung in fahrenden Fahrzeugen darstellt. Der Flammenionisationsdetektor (FID) arbeitet nämlich mit einer Wasserstoffflamme, was eine mobile Wasserstoffversorgung erfordern würde (eine detaillierte Funktionsweise des FIDs kann dem Anhang A1 entnommen werden). Dies ist im Straßenverkehr nicht ohne weiteres möglich [2]. Alternative Verfahren zur Erfassung von HC im Abgas könnte auch mittels dem Fourier Transformation Infrarot-Verfahren erfolgen, welches mit dem Prinzip der absorbierten Wellenlänge eines Mediums im Infrarotbereich arbeitet. Eine detaillierte Erklärung dieses optoelektrischen Verfahrens kann ebenfalls dem Anhang A2 entnommen werden. Ein Vorteil des FTIR gegenüber dem FID-Verfahren ist, dass mit dem FTIR-Verfahren die Konzentration unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe selektiv bestimmt werden kann. Ein einfacher FID hingegen kann nur eine Aussage über die Gesamtkohlenwasserstoffe treffen. Zudem benötigt das FTIR-Verfahren keine Wasserstoffversorgung. Trotzdem ist dieses Verfahren für die mobile Anwendung nicht ausreichend robust. Unter anderem ist das FTIR aufgrund seiner zeitaufwändigen Betriebsweise nicht für Echtzeitmessungen geeignet [3]. Studien haben auch gezeigt, dass die Verwendung von FTIR bei der Erfassung von Kohlenwasserstoffen im Vergleich zur FID-Technik eine größere Abweichung aufweist [3]. Eine weitere Möglichkeit für die Messung von Kohlenwasserstoffen stellt das nicht-dispersive Infrarot-Verfahren (NDIR) dar. Das NDIR funktioniert ähnlich wie das FTIR-Verfahren, indem die zu analysierende Gasmoleküle eine bestimmte Wellenlänge einer IR-Lichtquelle absorbiert. Der Unterschied besteht darin, dass der IR-Lichtstrahl beim NDIR gefiltert ist und somit nur ausgewählte Gasmoleküle nachweisen kann (siehe Abbildung 2 sowie Anhang A3) [4].

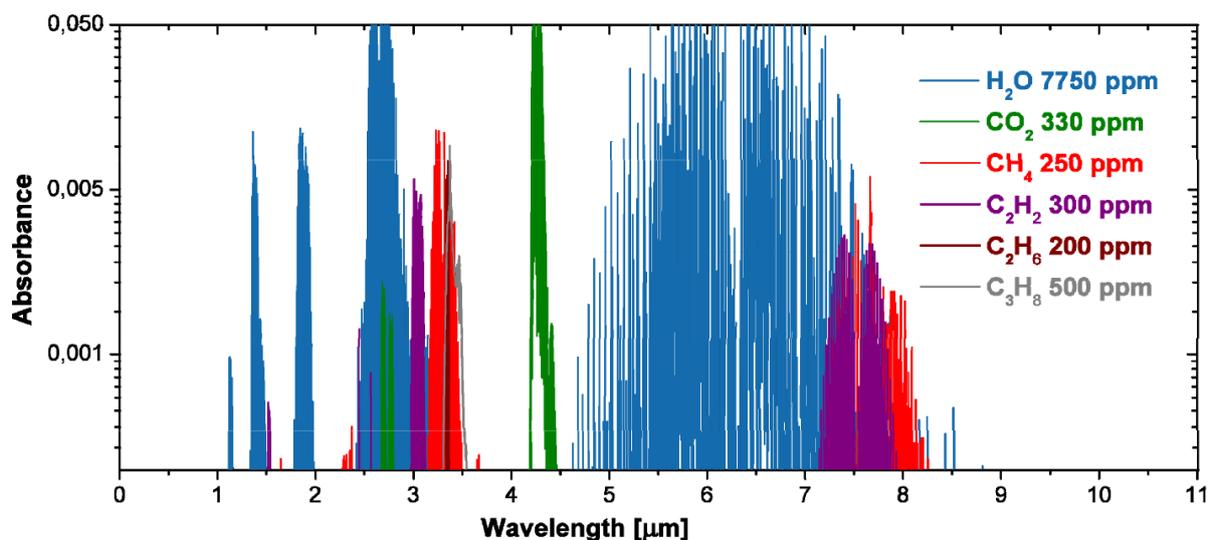


Abbildung 2: Absorbiertes Spektrum ausgewählter Moleküle bei bestimmten Wellenlängen [5].

Nachteile des NDIR-Verfahrens besteht unter anderem darin, dass es einen geringen Messbereich aufweist [4]. Darüber hinaus ist der NDIR je nach angewandtem Filter hinsichtlich seiner nachweisbaren Gasmolekülen begrenzt [5].

Es wird davon ausgegangen, dass neue Richtlinien in der Zukunft eingeführt werden, um den Ausstoß von Kohlenwasserstoffen auch bei realen Messungen auf der Straße zu reglementieren

[6,7]. Es besteht daher eine Lücke, was die Entwicklung einer „tragbaren“ und echtzeitfähigen Messtechnik erfordert. Die Entwicklung des Portable HC-Trackers soll diese Lücke bei der Messtechnik für zukünftiger RDE-Tests langfristig schließen.

## 2.2 Konzeptioneller Hintergrund des Projektes

Im Laufe eines abgeschlossenen Projektes wurde an der Hochschule Karlsruhe ein Konzept zur Erfassung von Kohlenwasserstoffen entwickelt und dessen Funktionalität grundsätzlich bewiesen. Bei dem neuartigen Ansatz wird auf die Wasserstoffflamme, wie es vom FID bekannt ist, verzichtet und stattdessen eine elektrisch beheizbare Glühkerze eingesetzt. Das Konzept beruht auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit gasförmiger Ionen, die durch Ionisation bei ausreichend hoher Temperatur freigesetzt werden [8,9]. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes in der Messkammer, bewegen sich diese Ionen, die als elektrischer Strom mit Hilfe einer geeigneten Ionenstrommesstechnik gemessen werden können. Die eingesetzte Keramikglühkerze stellt in diesem Konzept zwei Funktionen dar: als Heizelement für die temperaturbedingte Ionisierung und als Masseelektrode für die Ionenstrommessung. Die Betriebstemperatur der Glühkerze kann aufgrund des temperaturabhängigen elektrischen Widerstands auf eine Solltemperatur geregelt werden [10].

In einem vorangegangenen Projekt ist es bereits mit einem ersten Versuchssensor gelungen, die Abhängigkeit des Messsignals von Probegasen (Propan unterschiedlicher Konzentrationen in Stickstoff) zu untersuchen [11]. Allerdings musste die Glühkerze aufgrund zu geringer Wärmeübertragung auf das Probegas an ihrer Betriebsgrenze betrieben werden. Begleitende numerische Strömungssimulationen (3D-CFD) wurden zudem nach der digitalen Zwillings-Methode durchgeführt, um den Einfluss von Sensorgeometrie, Strömungsgeschwindigkeit und Verweilzeit auf die Wärmeübertragung zu untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass der Ionisierungsprozess mit einer Steigerung der Wärmeübertragung zwischen Glühkerzenoberfläche und dem Probegas durch eine Weiterentwicklung der Messkammer und der Strömungsbedingungen verbessert werden könnte. In Abbildung 3 wird dargestellt, dass das Gas unmittelbar an der Oberfläche der Glühkerze eine Temperatur von ca. 1100 °C erreicht. Damit der Ionisationsvorgang, welcher genauer in Kapitel 3.1 beschrieben wird, bei besseren Bedingungen stattfinden kann, soll die gesamte Gastemperatur in der Messkammer möglichst erhöht werden.

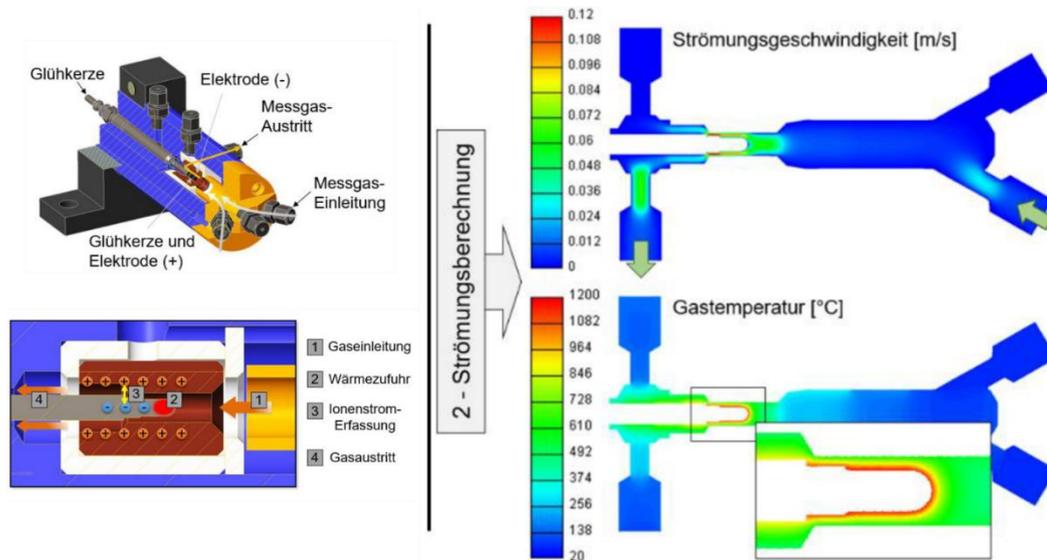


Abbildung 3: Grundlegendes Sensorkonzept und 3D-CFD-Simulation zur Untersuchung der Wärmeübertragung.

Im Vorfeld des Vorhabens steht neben einer umfassenden Literaturrecherche der Fokus zur Verbesserung der Ionisierungsbedingungen. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Ionisierbarkeit unterschiedlicher Probengase und Gemische sowie die Anpassungen für Untersuchung des Sensorverhaltens bei Verwendungen mit Motorabgasen durchgeführt und analysiert. Im Folgenden Kapitel werden die einzelnen Arbeitspakete prägnant beschrieben und im Kapitel 3 deren Ergebnisse.

## 2.3 Arbeitspakete und –planung

In diesem Kapitel werden die Arbeitspakete des Vorhabens zusammengefasst. Der zugehörige Vorhabenszeitplan kann dem Anhang A4 entnommen werden.

### AP1 Recherche

Das AP1 soll die Richtung und die Prioritäten der Untersuchungen bei den darauffolgenden Arbeitspaketen bestimmen. Wissenschaftliche und technische Arbeiten sowie rechtliche Anforderungen, wie Normen und Kalibrierverfahren [13, 19], sollen betrachtet werden und somit eine Basis für das Projekt darstellen.

### AP2 Verbesserung der Ionisierung

Zur Verbesserung der Ionisierung und im Rahmen der durchgeführten Recherche sollen mögliche Verbesserungsoptionen des Sensorkonzeptes untersucht und implementiert werden. Hierzu soll der im abgeschlossenen Projekt entwickelte Sensor in Betrieb genommen und dessen Betriebsgrenze untersucht werden. Darauf folgend wird eine Anforderungsanalyse abgeleitet, mit der mögliche Konfigurationen zur verbesserten Ionisierung identifiziert werden können. Mittels der digitalen Zwillinge-Methode können sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, um die Auswahl einer bestgeeigneten Variante zu ermöglichen. Hierzu soll unter anderem die Messkammergeometrie, die Gasführung sowie die Ionenstrommesstechnik als auch die Glühkerzentemperaturregelung zur Anhebung der Messspannung untersucht werden.

### AP3 Ionisierbarkeit und Querempfindlichkeiten

Durch die unterschiedlichen atomaren Bindungen bzw. Ionisierungsenergie verschiedener HC-Moleküle werden betragsmäßig unterschiedliche Messsignale erwartet, welche mit Response-Faktoren dargestellt werden. Dementsprechend werden verschiedene Probengase für die experimentellen Untersuchungen des Prototyps betrachtet und analysiert. Zudem wird die Sauerstoffsensitivität des HC-Trackers untersucht. Wie es bei dem FID-Verfahren bekannt ist, beeinflusst im Probengas vorhandener Sauerstoff die Messungen [12]. Es gilt hier daher zu untersuchen, inwiefern Oxidationseffekte die Messungen des HC-Trackers beeinflusst.

### AP4 Untersuchungen mit realen Abgasen

Um das Prinzip des HC-Trackers zu validieren, werden Messungen mit realen Abgasen durchgeführt. Hierbei werden Untersuchungen sowohl bei trockenen als auch bei feuchten Bedingungen durchgeführt, wie es bei den Richtlinien vorgeschrieben sind [13]. Dabei muss die Kondensatbildung im Sensor verhindert werden.

## 3 Vorhabensdurchführung und -ergebnisse

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten sowie deren Ergebnisse analog zur Vorhabensbeschreibung detailliert beschrieben.

### 3.1 Arbeitsprinzip Portable HC-Tracker

Ein zum FID ähnliches Arbeitsprinzip wird entwickelt und implementiert. Die Funktionsweise eines FIDs basiert auf der Reaktion bzw. Verbrennung HC-haltiger Gase in einer Wasserstoffflamme. Hierbei zersetzen sich die atomaren Bindungen der Kohlenwasserstoffmoleküle und reagieren mit Sauerstoffatomen O, die sich in der zugeführten Luft befinden [14]:



Dieser Prozess wird auch chemische Ionisation benannt [8]. Die ionisierten Moleküle werden in einem elektrischen Feld erfasst und der erzeugte elektrische Strom ist proportional zum Kohlenstoffgehalt des Gases [12,14]. Die benötigte Aktivierungsenergie (Energie, die für die Zersetzung notwendig ist) wird von der Wasserstoffflamme bereitgestellt [14].

Basierend auf dem Prinzip der Wärmezufuhr für die Zersetzung von Gasmolekülen, wurde das Portable HC-Tracker konzipiert. Im Vergleich zum FID entstehen gasförmige Ionen im Portable HC-Tracker durch die temperaturabhängige Ionisation. Dieser Ionisationsvorgang beschreibt die Zersetzung von Gasmolekülen in Ionen bei ausreichender Temperatur und Druck [15-18]. Vereinfacht kann der Vorgang wie folgt beschrieben werden:



Der Ionisationsgrad bzw. die Tendenz des Gases zu ionisieren kann durch die Saha-Langmuir-Gleichung beschrieben werden [17,18]:

$$\frac{n_{i+1} \cdot n_i}{n_i} = \frac{2}{\lambda^3} \cdot \frac{g_{i+1}}{g_i} \cdot \exp \left[ -\frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)}{k_B \cdot T} \right], \quad (\text{Gl. 3})$$

mit:

- $n_i$  – Teilchendichte des Gases bei  $i$ -tem Grad,
- $g_i$  – Zustandssumme des Iones der  $i$ -ten Stufe,
- $\lambda$  – thermische Wellenlänge eines Elektrons,
- $\epsilon_i$  – Ionisierungsenergie benötigt, um ein Elektron zu entfernen, um ein Ion der  $i$ -ten Stufen zu erzeugen,
- $k_B$  – Boltzmann-Konstante und
- $T$  – absolute Temperatur des Gases.

Gl. 3 wurde von Saha und Langmuir sowie anderen Wissenschaftlern aus Untersuchungen der Sternatmosphäre zusammengefasst und angewendet [15]. Zusammen mit Gl. 4 und 5 sowie weiteren Annahmen, welche die elektrische Feldstärke sowie die Elektronmobilität beschreiben, kann der erzeugte Ionenstrom mit Gl. 6 beschrieben werden [15-18]:

$$E = \frac{F}{Q}, \quad (\text{Gl. 4})$$

$$\mu = \frac{v_d}{E}, \quad (\text{Gl. 5})$$

$$I = \frac{U}{d} e^2 \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda^{\frac{3}{2}}}{n_{tot}} \cdot \frac{g_{i+1}}{g_i} \exp \left[ -\frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)}{k_B \cdot T} \right] \cdot (\pi r^2) \dots} \cdot \left( \frac{1}{\sigma m_e \cdot \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}} \right) \cdot \frac{1}{\varphi_s} \quad (\text{Gl. 6})$$

Aus Gleichung 6 kann zusammengefasst werden, dass der erzeugte Ionenstrom bei diesem Ionisationsvorgang von einigen Parametern abhängig ist. Mit der Annahme, dass die Parameter aus der Teilchenphysik, wie  $n_i$ ,  $g_i$  und  $\epsilon_i$ , konstant sind, hängt der Ionenstrom,  $I$  von der absoluten Temperatur,  $T$  sowie das elektrische Feld  $E$  bzw.  $U/d$ .

Aus diesen zusammengefassten Gleichungen entstand das Arbeitsprinzip des Portable HC-Trackers. Anstatt einer Wasserstoffflamme, wird die benötigte Wärmeenergie von einer elektrisch regelbaren Glühkerze bereitgestellt. Das zugeführte Gas wird von der heißen Oberfläche der Glühkerze erwärmt, wodurch Ionen freigesetzt werden. Durch die Anordnung der Elektroden (mit der Glühkerze als negativer Elektrode) sowie den Einsatz einer Ionenstrommesstechnik kann der entstehende elektrische Strom verstärkt und erfasst werden (siehe Abbildung 4).

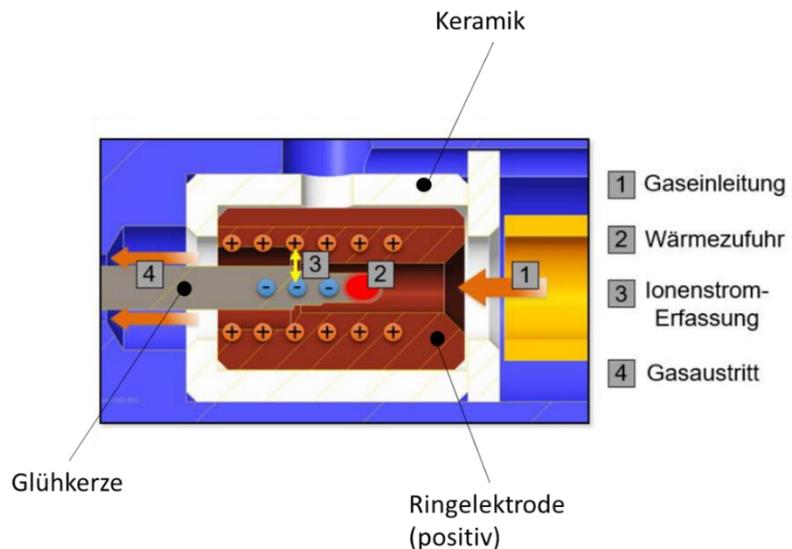


Abbildung 4: Arbeitsprinzip und Aufbau des (bestehenden) Prototyps (P1).

Trotz der ursprünglichen Hypothese, dass die Saha-Gleichung das Prinzip des Portable HC-Trackers beschreibt, wurde die Theorie genauer betrachtet, um diese verstehen zu können. Die Saha-Langmuir-Gleichung, welche in Gl. 3 beschrieben wird, lässt sich auch wie folgt darstellen [16-18]:

$$\frac{N_{j+1}}{N_j} = \frac{2 * Z_{j+1}}{n_e Z_j} \left( \frac{2 * \pi * m_e * T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} * e^{\frac{X_j}{k * T}} \quad (\text{Gl. 7}),$$

mit:

- $N_j$ : Zustandssumme,
- $X_j$ : Ionisierungsgrad.

Mit der Ladungserhaltungsgleichung gilt:

$$n_e = \frac{N_{j+1}}{N_j + N_{j+1}} * n * Ne \quad (\text{Gl. 8}),$$

mit:

- $N_e$ : Anzahl Elektronen pro Teilchen,
- $n_e$ : Teilchendichte (1 bei Wasserstoffatom).

Da die Saha-Langmuir-Gleichung ursprünglich für den Ionisationsvorgang im Weltall (genauer auf der Sonnenoberfläche), werden die Gleichungen 7 und 8 anhand des Beispiels eines Wasserstoffatoms weiter betrachtet.

Mit folgender Gleichung

$$N = N_I + N_{II} \quad (\text{Gl. 9}),$$

gilt

$$\frac{N_{II}^2}{N_I} = \frac{2 * Z_{j+1}}{n_e Z_j * N_e} \left( \frac{2 * \pi * m_e * T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} * e^{\frac{X_j}{k * T}} \quad (\text{Gl. 10}).$$

Für ein Wasserstoffatom H gilt zudem  $Z_1 = 2$  sowie  $Z_2 = 1$  [32]:

$$\frac{x^2}{1 - x} = \frac{1}{n_e * N_e} \left( \frac{2 * \pi * m_e * T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} * e^{\frac{X_j}{k * T}} \quad (\text{Gl. 11}),$$

Mit der Gl. 11 wurde eine rechnerische Simulation mit Hilfe eines Python-Programmes durchgeführt, um den Ionisierungsgrad eines Wasserstoffatoms mit der Teilchendichte von  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  als Funktion der Temperatur zu erhalten, welche der Abbildung 5 entnommen werden kann. Folgende Werte wurden dabei eingesetzt [38]:

- $n_e = 1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ,
- $N_e = 1$ ,
- $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,
- $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ,
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ,
- $x = 0,81$ .

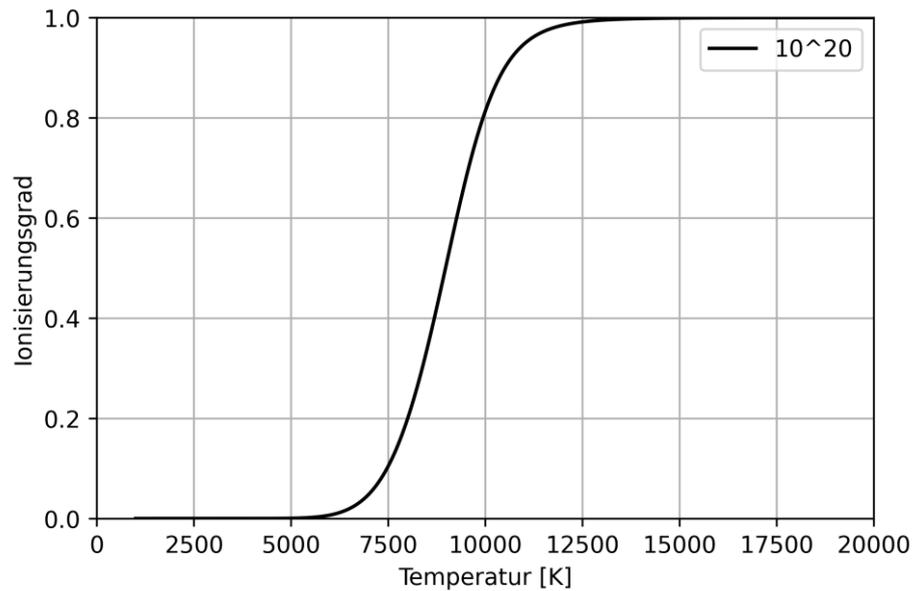


Abbildung 5: Ionisationsgrad eines Wasserstoffatoms als Funktion der Temperatur.

Aus der Simulation, dessen Ergebnis mit dem von [32] vergleichbar ist, ist es ersichtlich, dass ein Wasserstoffatom, welches ein Elektron in seinem Grundzustand besitzt, eine Temperatur von ca. 4700 °C benötigt, um durch thermische Ionisation sich zu ionisieren.

Der Simulation zur Folge wurde eine weitere Simulation durchgeführt, um den Ionisationsgrad von Propan bei höheren Teilchendichten ( $N_{e, \text{Propan}} = 20$  [33]) zu untersuchen. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Simulation dargestellt.

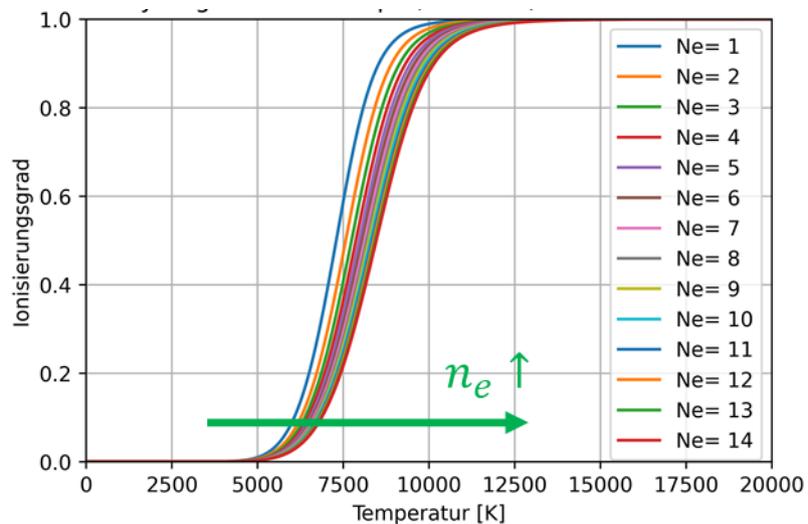


Abbildung 6: Ionisationsgrad eines Propan-Moleküls als Funktion der Temperatur bei höheren Teilchendichten.

Aus der Simulation und der tiefgehenden Recherche können interpretiert werden, dass höhere Teilchendichte höhere Temperaturen benötigen, damit die Moleküle anfangen können, sich zu ionisieren. Deutlich erkennbar ist auch, dass sogar Propan eine Temperatur von ca. 4700 °C benötigt, um den Ionisationsvorgang durch thermische Ionisation beginnen zu können. Die Glühkerze erreicht jedoch nur eine Spitztemperatur von ca. 1100 °C (siehe Kapitel 0). Daraus lässt sich schließen, dass das von den Glühkerzen erzeugte Temperaturniveau in der Messkammer des HC-Trackers deutlich unter dem für die besagte thermische Ionisierung erforderlichen Niveau liegt. Es wurden jedoch Ionenströme sowohl mit dem bestehenden als auch mit dem neu entwickelten Prototyp gemessen, wie in folgenden Kapiteln diskutiert werden, weshalb es davon ausgegangen werden kann, dass die Ionisierung durch den ebenfalls temperaturabhängigen chemischen Ionisationsvorgang stattfindet. Wie auch aus anderen Anwendungen mit Ionenstrommessungen wie beispielsweise zur Brennerüberwachung bzw. Flammendetektion [39], die ebenfalls bei deutlich geringeren Temperaturen als bei der rein thermischen Ionisierung stattfinden.

### **3.2 Inbetriebnahme und Untersuchung des bestehenden Prototyps**

Zur besseren Planung der Weiterentwicklungsschritte des Portable HC-Trackers sowie die Untersuchung des Ionisationsvorgangs wurde im Vorfeld der bestehende Prototyp in Betrieb genommen. Zudem dient dieser Arbeitsschritt zur Validierung der gewonnenen Ergebnisse im vorherigen Projekt [11].

Abbildung 7 stellt eine Übersicht des Prüfstandsbaus zum Beginn des Vorhabens dar. Der Portable HC-Tracker wird an einem mobilen Tischprüfstand angebracht, an dem auch die Probegasflaschen befestigt sind. Für die Zuführung des Probegases in den HC-Tracker wurde ein Kugelhahn verwendet, welches einen genauen Volumenstrom nicht gewährleisten konnte. Zudem wurde die Regelung der Glühkerze über einen Prüfstandsrechner mittels einem Echtzeitmesssystem ADwin gesteuert. Für sämtliche Messdaten, wie z. B. der Ionenstrom, wurde ein Hochauflösung-Messdatenaufnehmer der Firma Dewetron GmbH eingesetzt. Der Steuerungsrechner und der Messdatenaufnehmer waren daher zum Beginn des Vorhabens voneinander getrennt.

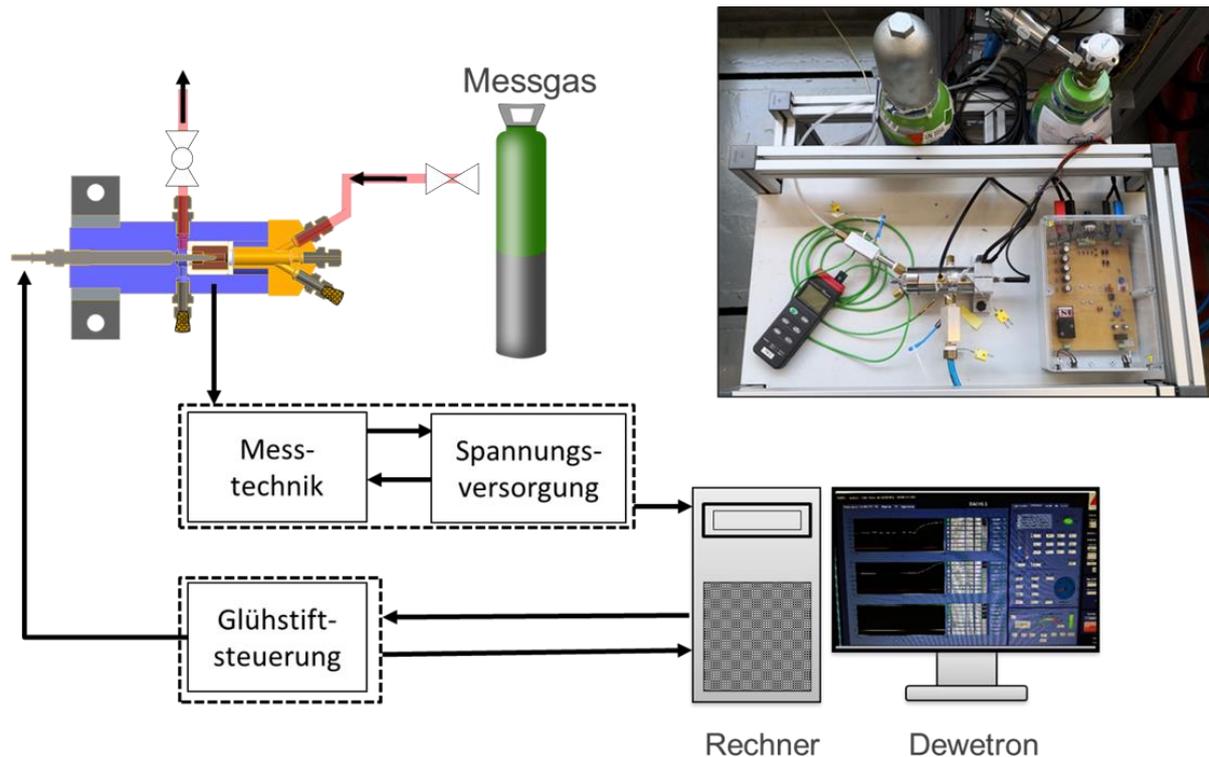


Abbildung 7: Schematischer Prüfaufbau zum Beginn des Vorhabens.

Im Rahmen des vergangenen Projektes wurde zudem eine Ionenstrommesstechnik entwickelt, welche aus zwei separaten Einheiten besteht: der Spannungsversorgungs- sowie der Ionenstrommesseinheit (siehe Abbildung 8). Die Spannungsversorgungseinheit wird mit einer 12 V Gleichspannungsquelle versorgt, die über einen DC/DC-Wandler in eine (Elektroden-) Spannung zwischen 90 – 120 V transformiert wird [22].

Die Ionenstrommesseinheit besteht aus mehreren Operationsverstärkern, Potentiometern und Messwiderständen. Bei einem Stromfluss fallen unterschiedliche Spannungen an diesen Widerständen ab, welche dann gemessen werden können. Mit den eingesetzten Widerständen können Spannungsausgaben am Transientenrekorder in Höhe von eins bis 1000  $\mu\text{A/V}$  in Abhängigkeit des Ionenstroms ausgegeben werden. Zusätzlich wurden Zenerdioden eingebaut, um die Sicherheit der Ionenstrommesstechnik zu gewährleisten [22].

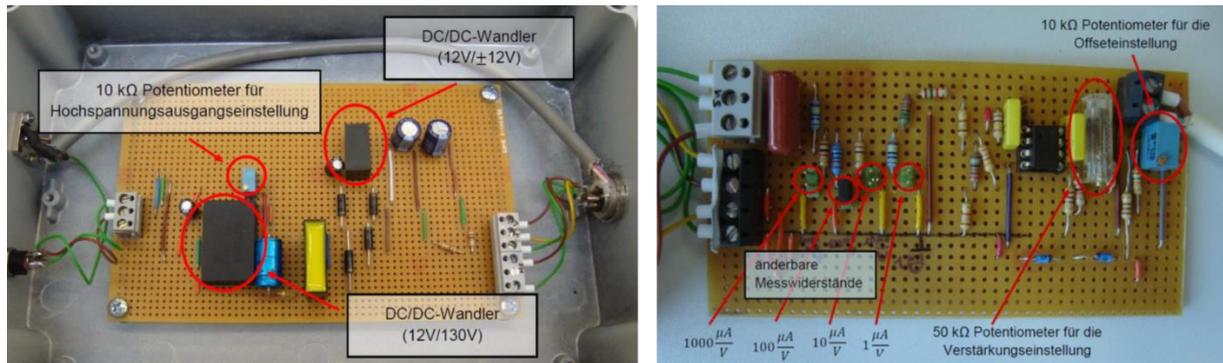


Abbildung 8: Bestehende Spannungsversorgungs- (links) und Ionenstrommesseinheit (rechts).

Bei der Inbetriebnahme des Laborprototyps P1 wurde die Keramikglühkerze des Herstellers Beru BorgWarner Typs CGP 5.4 V zur Erwärmung des Gases eingesetzt. Das Probegas, welches aus 1000 ppm Propan in Stickstoff besteht, wurde mit einem Vordruck von 1 bar sowie einem Volumenstrom von 10 l/h in die Messkammer des Trackers zugeführt. Die Messdatenerfassung, wie z. B. Ionenstrom  $I_{\text{Ion}}$ , Glühkerzenspannung  $V_{\text{GK}}$ , sowie Glühkerzenwiderstand  $R_{\text{GK}}$  erfolgte über einer analogen Schnittstelle, welche mit Hilfe eines Dewetron Messerfassungssystems in Form einer Excel-Datei abgespeichert werden kann (siehe auch Abbildung 7). Bei dieser Versuchsreihe wurde der Widerstand der Glühkerze alle 60 Sekunden um  $0,05 \Omega$  erhöht. Der Widerstand verändert sich proportional zur Oberflächentemperatur. Eine Zusammenfassung der Versuchsparameter kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Zusammenfassung Messung zur Inbetriebnahme des bestehenden Prototyps

Parameter	Wert	Anmerkung
Probegas	1000 ppm Propan in Stickstoff	
Glühkerzenwiderstand	0,5 – 0,8 $\Omega$	Schrittweise um 0,05 $\Omega$ erhöht
Glühkerzenspannung	-	ergibt sich aus Widerstandsregelung
Gasdruck	1 bar	
Volumenstrom	10 l/h	

Eine graphische Darstellung der Versuchsergebnisse kann der Abbildung 9 entnommen werden. Aus diesem Versuch ist es ersichtlich, dass der bestehende Prototyp den Ionisationsvorgang, welcher durch den gemessenen Ionenstrom dargestellt wird, von Propan hervorrufen konnte. Der Ionisationsvorgang findet erst ab einem Glühkerzenwiderstand von ca.  $0,80 \Omega$  statt. Bei diesem Widerstand wird die Glühkerze bereits mit einer Spannung von ca. 9,0 V betrieben, welche die vom Hersteller vorgegebene Betriebsgrenze von 5,4 V deutlich übersteigt. Dies beeinträchtigt die Lebensdauer der Glühkerze wesentlich.

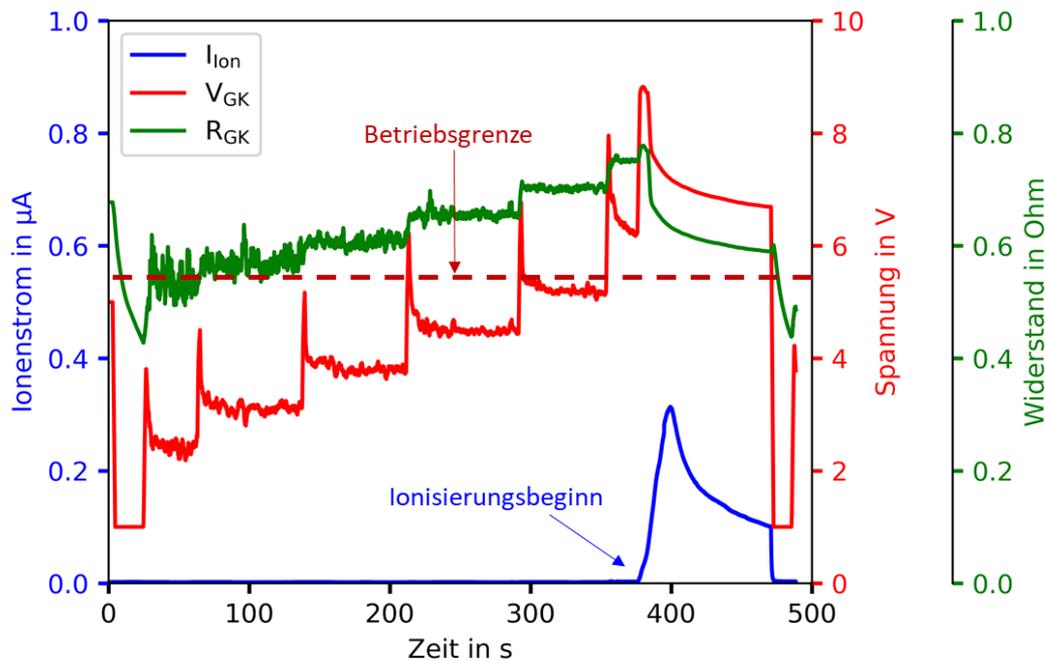


Abbildung 9: Ionenstrommessung des bestehenden Sensors mit 1000 ppm Propan (Rest Stickstoff) bei unterschiedlichen Glühkerzenwiderständen und Spannungen.

Durch begleitende CFD-Simulationen, so wie im Kapitel 2.2 beschrieben worden ist, ist die Wärmeübertragung in der Messkammer des bestehenden Prototyps nicht optimal, um das zugeführte Gas ausreichend aufzuwärmen. Diese Simulationen, welche mit der Randbedingung durchgeführt worden ist, dass die Keramikglühkerze nur bei einer maximalen Spannung von ca. 5,4 V betrieben wird, ergänzt und bestätigt die experimentelle Untersuchung in diesem Kapitel. Bei dieser Spannung wurde eine Spitzentemperatur von ca. 1100 °C mit Hilfe einer optischen Messtechnik aufgenommen. Dadurch, dass die Messung der Spitzentemperatur aufgrund von Dichtigkeitsgründen während des Betriebs nicht möglich ist, wird davon ausgegangen, dass die Temperatur der Glühkerzenspitze bei 9,0 V deutlich höher ist, als die bei einer Spannung von 5,4 V. Zusammenfassend kann es beschlossen werden, dass bei der Weiterentwicklung des Sensors Fokus auf die erhöhte Gastemperatur in der Messkammer gelegt werden sollte, ohne dass die Betriebsgrenze der Glühkerze überschritten wird.

### 3.3 Konzeptfindung des neuen Prototyps

Um das Sensorkonzept weiterzuentwickeln, wurden verschiedene notwendige Schritte im Laufe des Vorhabens durchgeführt. Unter anderem wurde die Messkammer anhand von numerischen Berechnungen sowie experimentellen Untersuchungen neugestaltet, um die Wärmeübertragung und somit die Ionisationsbedingungen (siehe Kapitel 3.1) zu erhöhen. Des Weiteren wurden die Ionenstrommesstechnik sowie der gesamte Prüfstands Aufbau mit Unterstützung des Projektpartners AIP GmbH & Co. KG im Hinblick auf die spätere Verwendung in der Norm DIN EN ISO 8178 [19] sowie in den Richtlinien der Europäischen Kommission [40] ausgelegt. Merkmale sind unter anderem wie folgt:

- Messung der Gastemperatur,
- Messung des Volumen-/Massenstroms,
- beheizte Gasführung.

An erster Stelle wurden grundlegende konstruktive sowie numerische Untersuchungen der Messkammer durchgeführt, um neue Konzepte der Messkammer gestalten zu können. In weitergehenden CFD-Untersuchungen wurde der Temperaturverlauf des bestehenden Prototyps experimentell mit Hilfe eines Pyrometers aufgenommen (siehe Abbildung 10).

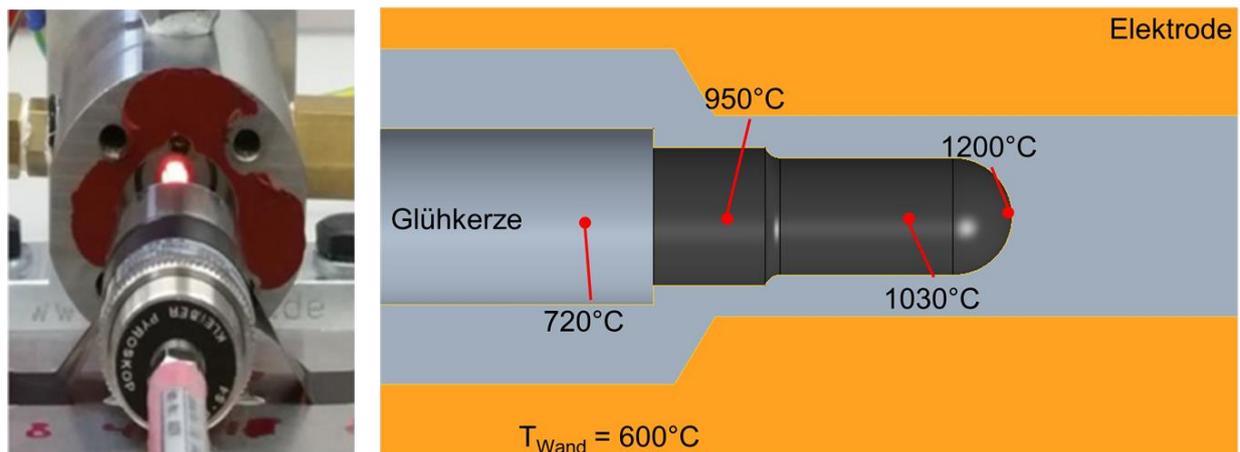


Abbildung 10: Temperaturmessung mittels Pyrometer (links); Temperaturen der Glühkerze und der Elektrode (rechts).

Des Weiteren wurde nach einer Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit der eingesetzten Glühkerze festgestellt, dass die Oberfläche an der Spitze der Keramikglühkerze aufgrund einer Beschichtung nicht elektrisch leitend ist. Diese Tatsache wurde vom Hersteller Beru BorgWarner bestätigt. Stattdessen ist ein kälterer metallischer Abschnitt der Glühkerze leitend, welches weiter bestätigt hat, dass die angenommene Ionisation nicht im ursprünglich angedachten Bereich stattfindet. Mit dieser Kenntnis wurde eine vorläufige CFD- sowie eine elektromagnetische Simulation mit der Software FEMM [20] durchgeführt. Daraus ergab sich, dass der Ionisationsvorgang bei einem Volumenstrom von 10 l/h sowie einer Elektrodenspannung von 120 V in einem Bereich der Messkammer stattfindet, in dem eine räumlich gemittelte Gastemperatur von nur  $670^{\circ}\text{C}$  (Oberflächentemperatur an der Spitze der Glühkerze:  $1100^{\circ}\text{C}$ ) sowie eine Feldstärke von  $63\text{ kV/m}$  herrscht (siehe Abbildung 11). Mit den Ergebnissen dieser vorläufigen numerischen Untersuchung konnten die Messungen des bestehenden Prototyps begründet werden, weshalb der Ionisationsvorgang erst über der Betriebsgrenze der Glühkerze (sprich bei höheren Temperaturen) stattfinden konnte (siehe Kapitel 3.1).

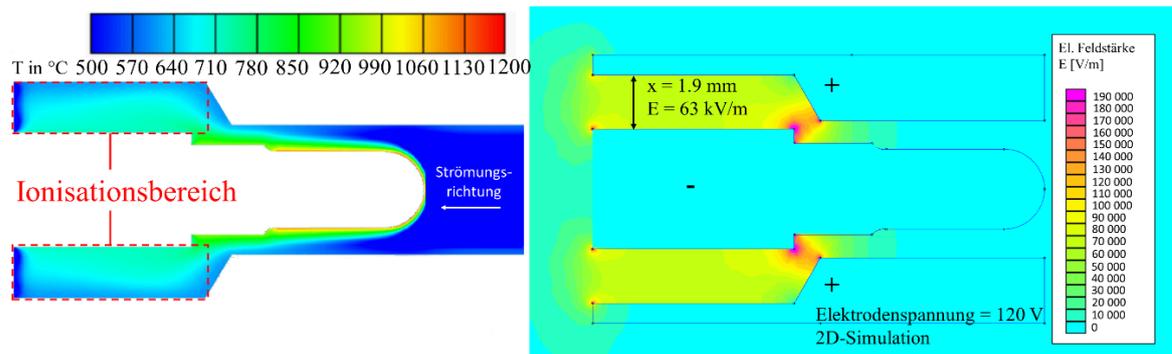


Abbildung 11: Temperaturverlauf in CFD-Simulation (links); elektrische Feldstärke in bestehender Messkammer (rechts).

Daraus können folgende Hauptziele zur Verbesserung der Ionisationsbedingungen abgeleitet werden:

- Erhöhung der Gastemperatur im Messkammervolumen,
- Erhöhung der elektrischen Feldstärke,
- Platzierung des elektrischen Felds im Bereich hoher Gastemperatur.

Diese Ziele lassen sich durch konstruktive Maßnahmen an der Messkammer erreichen. Nach einer Ideenfindungsphase wurden drei weitere Formen der Messkammer konzipiert, bei denen es auch möglich ist, weitere Parameter unter anderem den Elektrodenabstand,  $x$  (siehe Abbildung 11), zu variieren.

Abbildung 12 bietet einen Überblick der entwickelten Konzepte. Typ 1 stellt die ursprüngliche Messkammer dar. Durch Recherche in der Ideenfindungsphase wurde beschlossen, dass eine andere Glühkerze eingesetzt werden kann. Die Metallglühkerze (MGK) des Typs GN unterscheidet sich von der Keramikglühkerze (KGK), indem sie keine keramische Spitze besitzt. Dadurch ist die Spitze elektrisch leitend, welches bedeuten würde, dass der erzeugte Ionenstrom im Bereich der heißen Glühstiftspitze gemessen werden kann. Nachteil der Metallglühkerze ist jedoch, dass diese sich nur bis zu einer maximalen Temperatur von  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  (statt  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei der Keramikglühkerze) erhitzen lässt.

Typ 2 der Messkammer nutzt den Einsatz einer zusätzlichen Elektrode aus. Hierzu wäre eine Stabelektrode als Glühkerzenersatz aus Stahl eingesetzt. Zudem wäre es auch möglich, zwei Glühkerzen gleichzeitig einzusetzen, um die Wärmeübertragung zu verbessern, bspw. eine Keramik- und eine Metallglühkerze zu kombinieren.

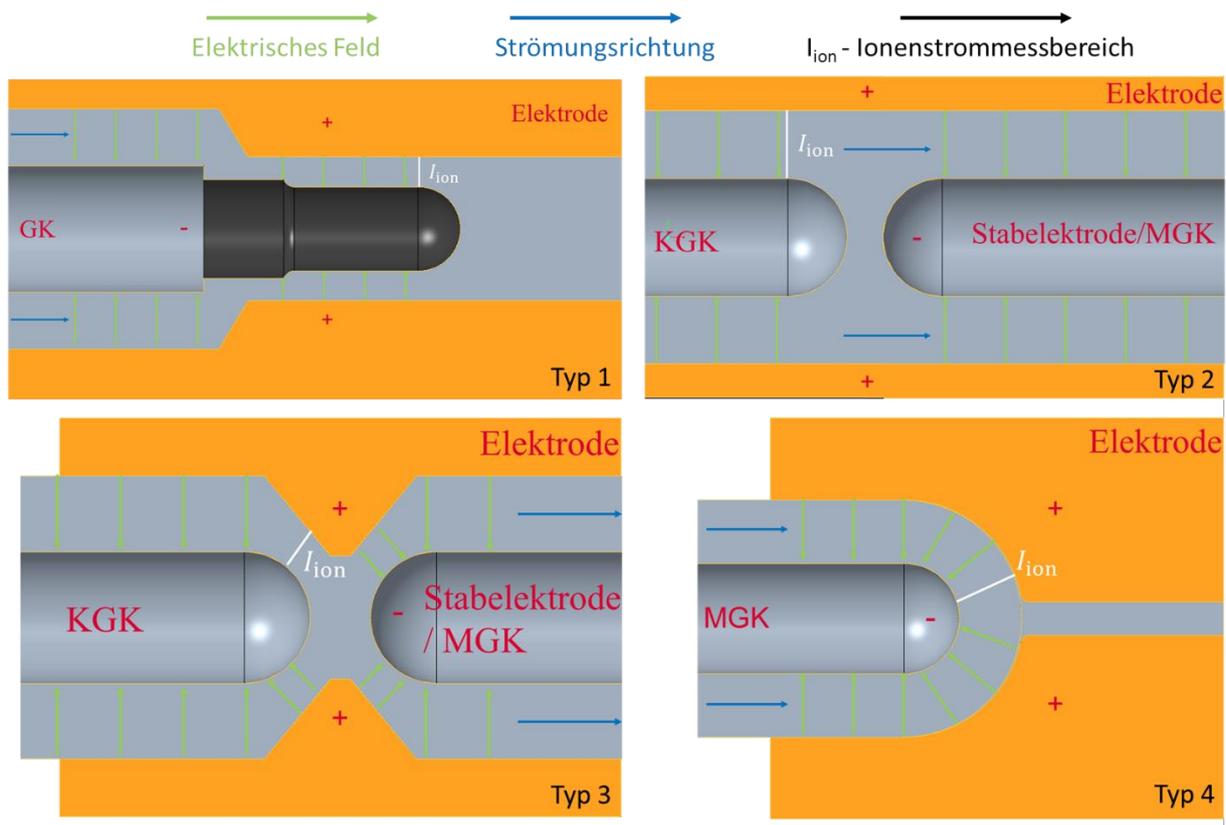


Abbildung 12: Übersicht der vier Konzepte der Messkammer; beginnend links oben im Uhrzeigersinn: Typ 1, Typ 2, Typ 3 und Typ 4.

Typ 3 der Weiterentwicklung baut sich auf die Idee des Typ 2 auf. Hierzu wurde eine Art Verengung zwischen den Spitzen der Elektroden bzw. Glühkerzen konstruiert, um die Wärmeübertragung an das vorbeiströmende Gas zu verbessern. Des Weiteren führt diese Verengung zu einem kleineren Elektrodenabstand, welcher die elektrische Feldstärke an der heißesten Stelle erhöht. Bei der letzten entwickelten Variante (Typ 4) wird nur die Metallglühkerze eingesetzt. Hierzu wurde die Form der Ringelektrode an die Form der Metallglühkerze angepasst, welche sowohl die Wärmeübertragung als auch die elektrische Feldstärke verstärkt.

Mit diesen Konzepten wurden numerische Untersuchungen mit Hilfe von der Software AVL Fire durchgeführt, um einen Vergleich bzgl. der Probengastemperatur im Ionenstrommessbereich darstellen zu können. Eine Zusammenfassung der eingestellten Randbedingungen kann der Tabelle 2 entnommen werden. Die Bedingungen des Volumenstroms sowie die des Druckes sind Werte, die gemeinsam mit dem Projektpartner AIP GmbH & Co. KG definiert wurden. Diese Werte wurden ausgewählt, da diese auch bei der PEMS-Messtechnik, mit der der Portable HC-Tracker potenziell integriert werden sollte, eingestellt werden.

Tabelle 2: Randbedingungen CFD-Simulation der konzipierten Messkammer.

Randbedingung	Wert	Einheit
Volumenstrom	3	l/h
Druck	101325	Pa
Temperatur	(siehe Abb. 8)	°C
Elektrodenabstand	1,90	mm
Turbulenzmodell	k-zeta-f	-
Wandfunktion	no slip wall	-

Aus den durchgeführten CFD-Simulationen konnte festgestellt werden, dass die entwickelte Variante „Typ 3“ mit dem Einsatz von beiden Keramik- und Metallglühkerzen die höchste Temperaturerhöhung verglichen zum bestehenden Prototyp aufweist (siehe Abbildung 13). Diese Temperaturdifferenz von 105 K ist auf die zusätzlich eingesetzte Metallglühkerze sowie auf den verengten Strömungsbereich zurückzuführen.

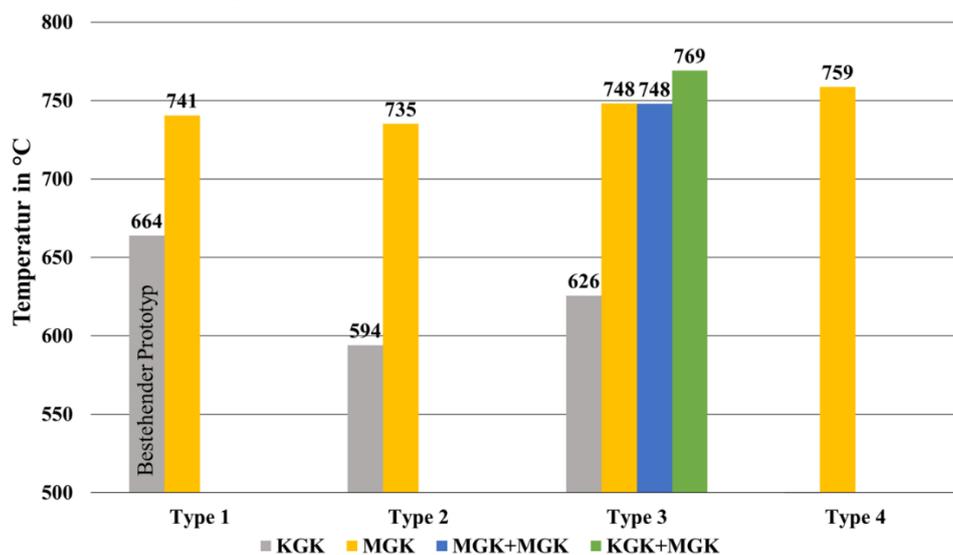


Abbildung 13: Durchschnittliche Messgastemperatur im kritischen Bereich der Messkammervarianten bei unterschiedlich eingesetzten Glühkerzen.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der Portable HC-Tracker um die Konzepte der neuen Messkammervarianten, so wie in Abbildung 12 dargestellt, neu konstruiert. Hierzu wurde der Fokus auf die Modularität des Trackers gelegt, um möglichst viele konzipierte Varianten experimentell untersuchen zu können (siehe Abbildung 14). Des Weiteren wurden weitere Änderungen vorgenommen, um bspw. zusätzliche Thermoelemente zur Temperaturmessungen anbringen zu können.

Die Fertigung des neuen Laborprototyps wurde in der Werkstatt der Hochschule durchgeführt und konnte im April 2021 (9. Projektmonat) in Betrieb genommen werden. Die Inbetriebnahme sowie weitere experimentelle Untersuchungen werden im Kapitel 3.6 tiefgehend diskutiert. Das

Konzept des Messverfahrens sowie die Entwicklung des neuen Prototyps wurden im 2021 auf dem 21. Internationalen Stuttgarter Symposium veröffentlicht und präsentiert [21].

### 3.4 Ionenstrommesstechnik

Um die Ionisationsbedingungen zu erhöhen, ist es unter anderem auch notwendig, das elektri-

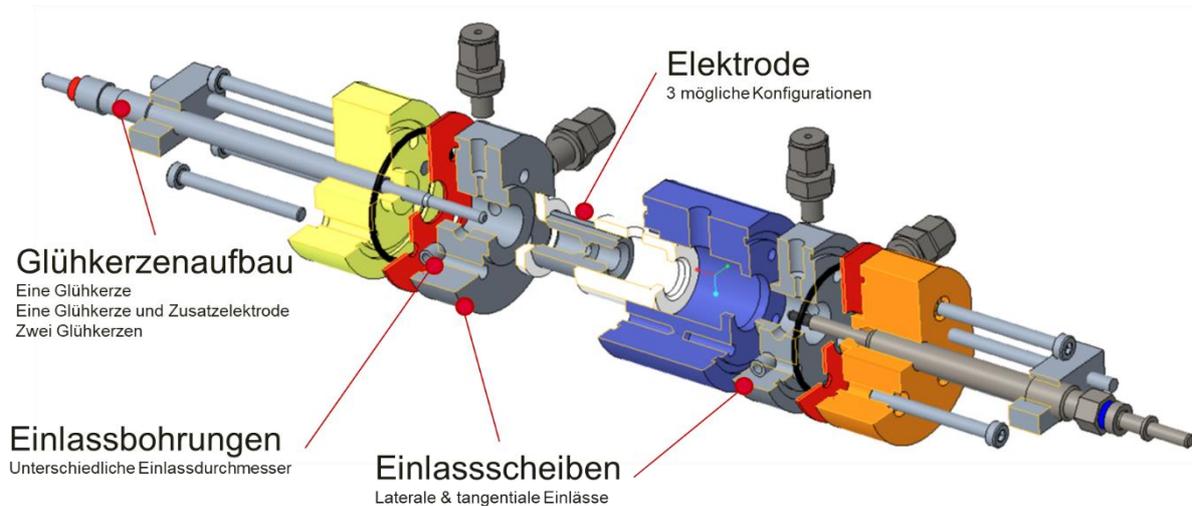


Abbildung 14: Explosionsdarstellung des neu entwickelten Laborprototyps (P2).

sche Feld in der Messkammer zu verstärken (siehe Gl. 6). Dies kann durch eine höhere eingestellte Elektrodenspannung ermöglicht werden, welche mit Hilfe einer angepassten Ionenstrommesstechnik eingestellt werden kann. Zudem verarbeitet und verstärkt die Ionenstrommesstechnik das Messsignal, welches an den Messrechner weitergeleitet wird.

Im berichteten Vorhaben ist es im Vorfeld notwendig, den Bereich der einstellbaren Elektrodenspannung zu erhöhen. Somit wurde eine Ionenstrommesstechnik weiterentwickelt (vgl. ursprüngliche Messtechnik im Kapitel 0), bei der zusätzliche Bauteile eingebaut wurden. Unter anderem wurde ein DC/DC-Wandler eingebaut, welcher einen Elektrodenspannungsbereich zwischen null bis einem kV ermöglicht. Des Weiteren ist es möglich, höhere Messwiderstände einzubauen, um eine Messauflösung höher als  $100 \mu\text{A/V}$  einzustellen.

Zusätzlich wurden vorgeschaltete Widerstände sowie weitere Zenerdioden eingebaut, welche die Bauteile sowie die Messtechnik im Gesamten vor einem potentiellen Kurzschluss schützen sollten. Zur Vereinfachung der gesamten Messtechnik wurden beide Spannungsversorgungs- und Ionenstrommesseinheit in einem Modul angebracht. Ein Schaltplan sowie eine reale Übersicht der Messtechnik können den Abbildungen 15 und 16 entnommen werden.

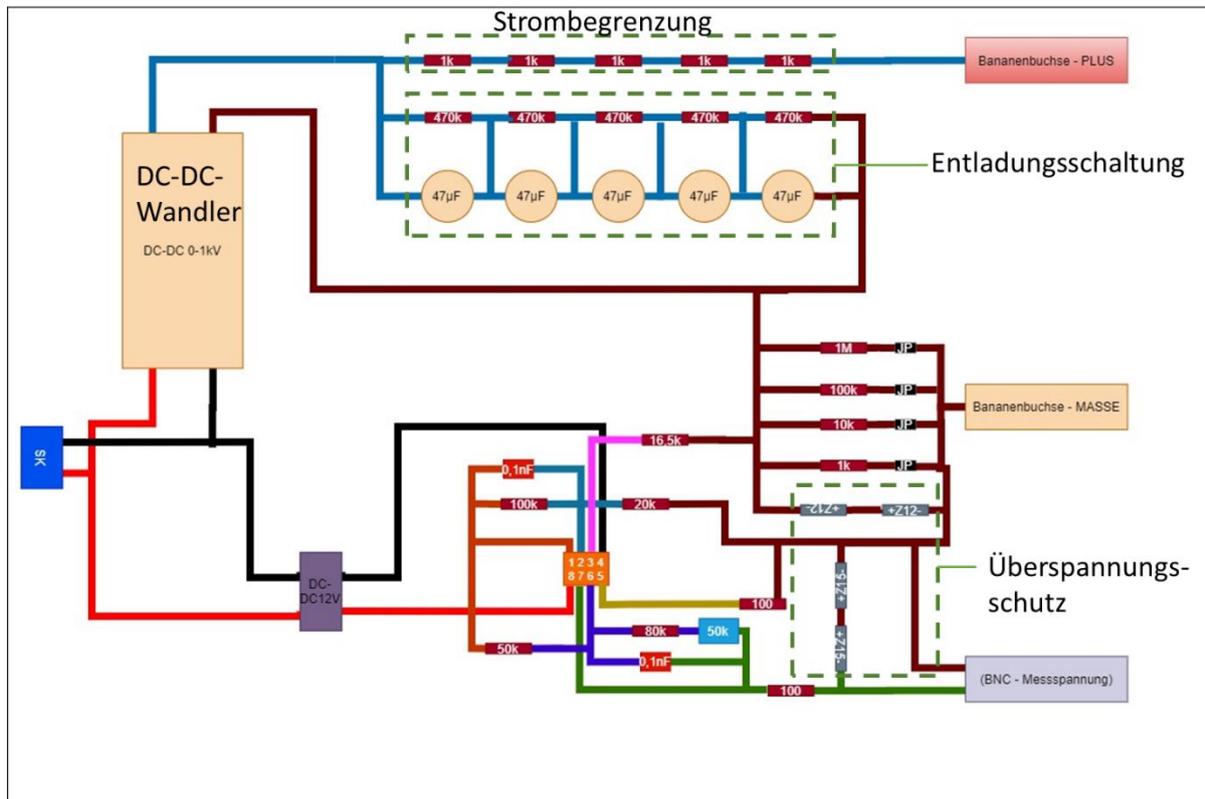


Abbildung 15: Schaltplan der neuentwickelten Ionenstrommesstechnik.

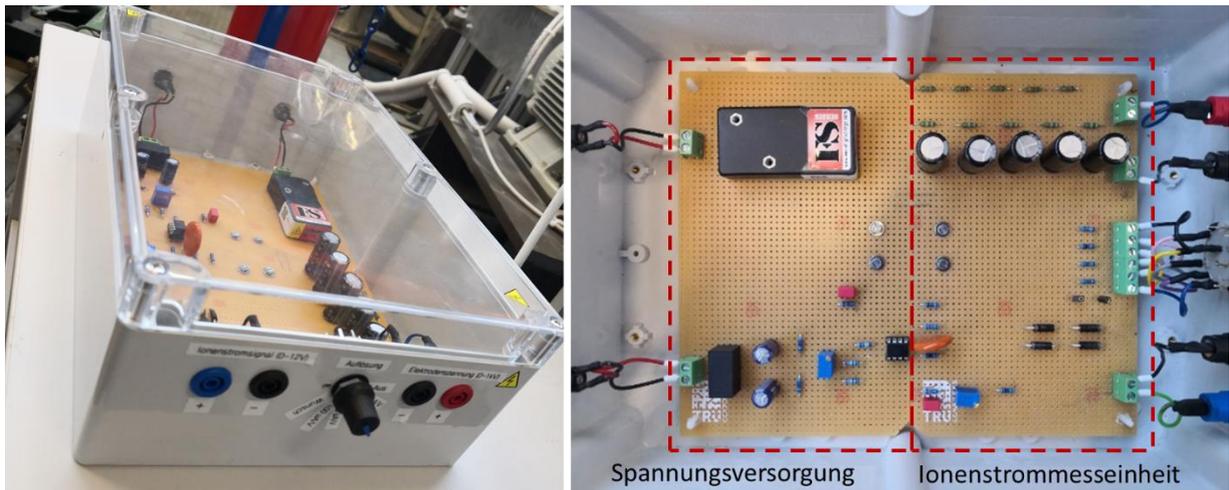


Abbildung 16: Aufbau der Ionenstrommesstechnik.

Um die überarbeitete Messtechnik bzgl. ihrer Funktionalität zu validieren, wurde eine Versuchsreihe mit eingebauten Widerständen durchgeführt. Die Widerstände (1 M $\Omega$  in Reihe geschaltet) sollen den Spannungsabfall bei einem gemessenen Ionenstrom darstellen. Abbildung 17 zeigt, dass die gemessene Messspannung und der daraus resultierende Ionenstrom um einen

Faktor von 10 korreliert. Somit konnte die Neuentwicklung validiert und für den Einsatz der Ionenstrommessungen mit Gasen eingesetzt werden.

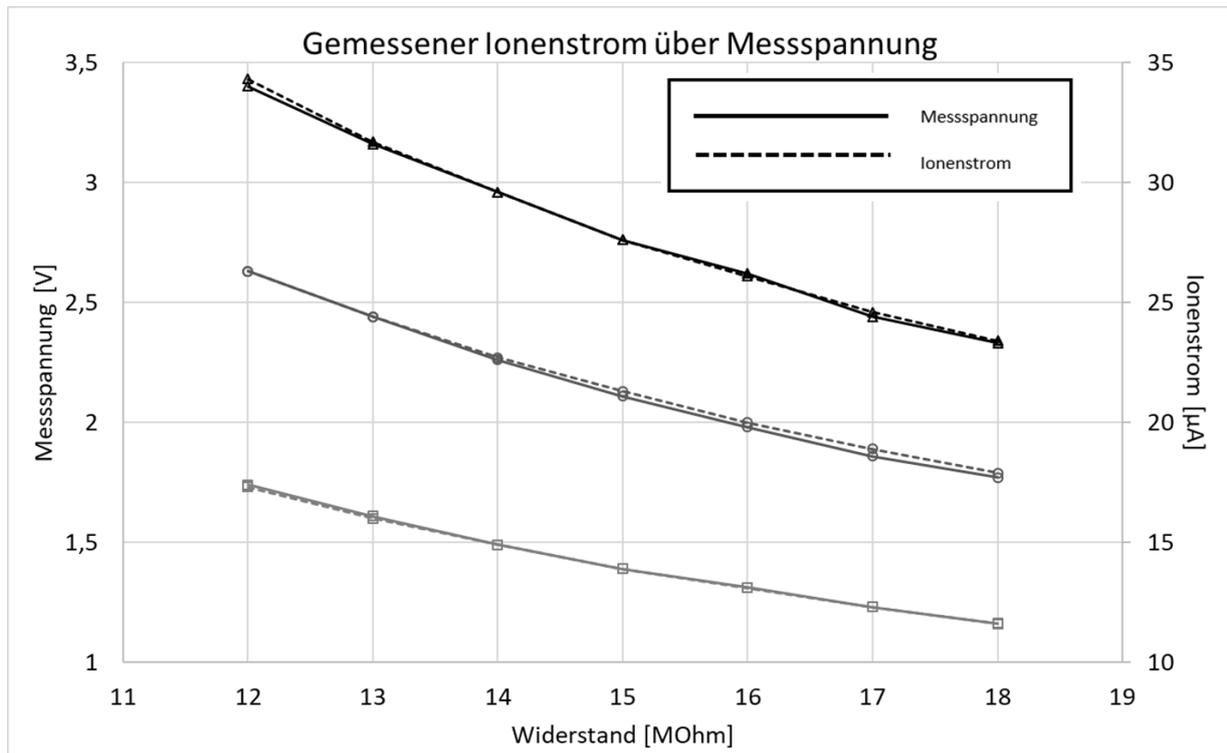


Abbildung 17: Ergebnis des Validierungsversuchs bei unterschiedlichen Messwiderständen.

### 3.5 Prüfstandsaufbau

Neben der Ionenstrommesstechnik wurde auch der Gesamtprüfstandsaufbau des Portable HC-Trackers überarbeitet, um ergänzende Messtechnik aufzunehmen. Dieser Schritt dient auch dazu, den Prüfstand sowie die Schnittstellen möglichst zu vereinfachen ohne über mehrere S, damit unter anderem die Datenübertragung schneller geschieht.

Nach einer Beurteilung des bestehenden Prüfstands wurden folgende Schritte als notwendig eingestuft, um den gesamten Aufbau des HC-Trackers möglichst an die Normanforderungen nach [19] sowie an die Richtlinien nach [40] anzupassen und um möglichst alle relevanten Messdaten aufzunehmen:

- Anbringung eines Durchflussmessers/-reglers für die (Ab-)Gasmessung,
- Integration des Messrechners mit dem Steuerrechner,
- Anbringung von zusätzlichen Thermoelementen zur Temperatureaufnahme,
- Entwicklung einer einheitlichen Prüfstandssoftware,
- Entwicklung einer Heizkammer zur Gewährleistung der Umgebungstemperatur sowie der Temperatur im Gaspfad.

### 3.5.1 Prüfstandssoftware und Messdatenschnittstelle

Zur Vereinfachung der Messdatenschnittstelle wurde die Steuerung sowie die Messdatenaufnahme des Prüfstands in eine Software integriert. Zum Beginn des Vorhabens geschahen diese getrennt über zwei Systeme: den Steuerungsrechner sowie das Dewetron-System (siehe Kapitel 0). Die Integration beider Systeme erlaubt das synchrone Abtasten der Regelparameter sowie der Messdaten, welche für den reibungslosen Betrieb des Portable HC-Trackers wesentlich ist. Dafür wird die grafische Programmierumgebung LabVIEW von National Instruments verwendet.

Für die Übertragung der Messdaten wird ein Echtzeitmesssystem des Typs ADwin Gold II der Firma Jäger GmbH eingesetzt. Dieses System ermöglicht die gleichzeitige Aufnahme der Messdaten, unter anderem Temperaturen, Ionenstrom und Druck, sowie die Regelung der Glühkerze sowie des Volumenstromreglers. Sämtliche Thermoelemente des Typs K wurden hinzugefügt, um vollständigkeithalber relevante Temperaturen des HC-Trackers und Umgebung aufzunehmen. Als Schnittstelle zum Prüfstandsrechner und –software wird hierfür ein Datenlogger des Typs TC-08 vom Hersteller PicoLog eingesetzt und mit dem Prüfstandsrechner über eine USB-Schnittstelle verbunden. Abbildung 18 bietet eine Übersicht der gesamten Mess- und Regelschnittstelle. Eine Auflistung aller Messgrößen und Regelparameter kann dem Anhang A4 entnommen werden.

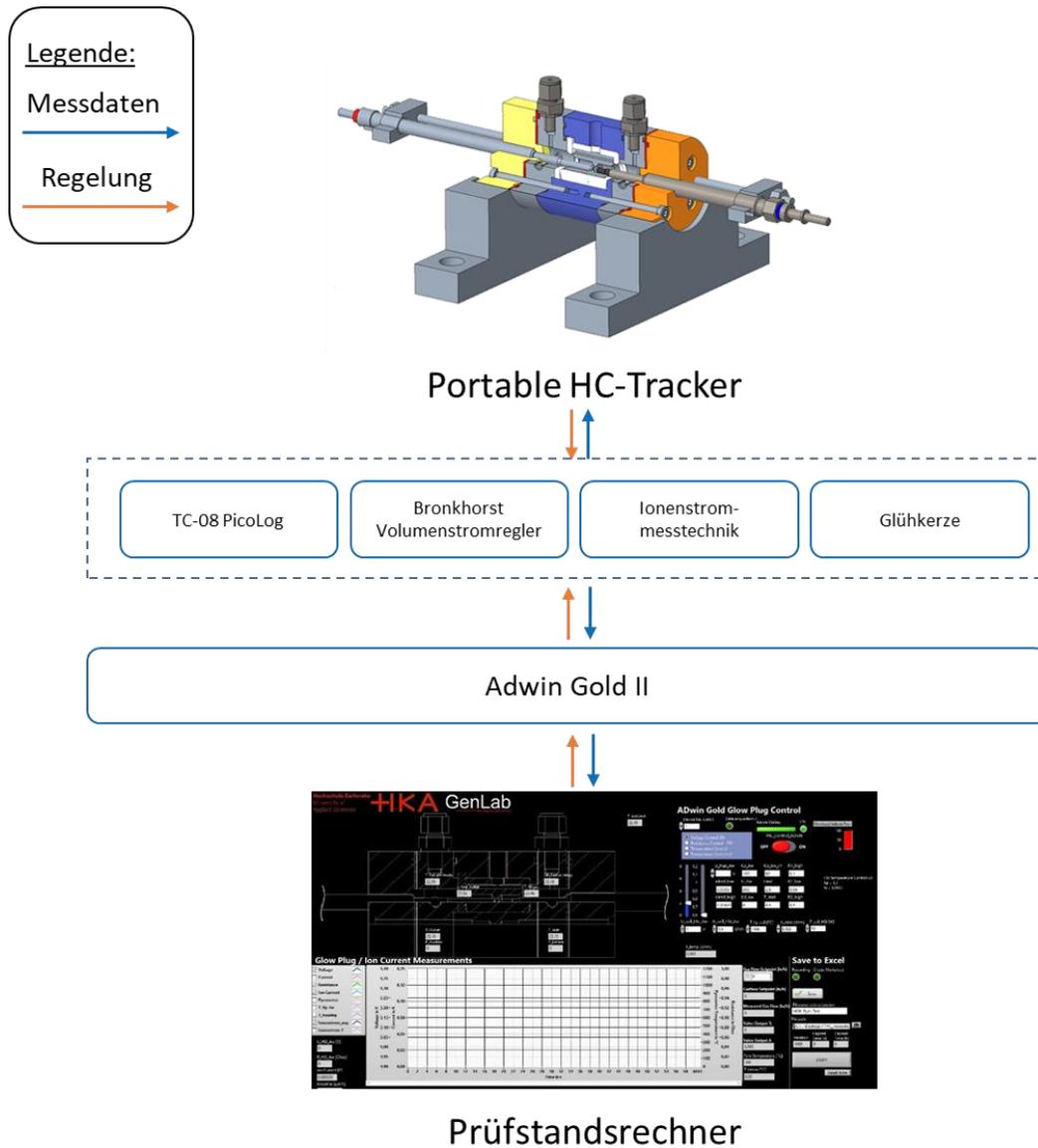


Abbildung 18: Schematische Übersicht der Messdatenschnittstelle.

Für die Regelung sowie die Messung des Gasvolumenstroms wird am Prüfstand ein digitaler Durchflussregler Typ F-201CV-2K0-MGD-GG-V der Firma Bronkhorst Instruments eingesetzt. Dieser Regler ermöglicht einen Regelbereich von 0 bis 100 l<sub>n</sub>/h (Normliter). Er wurde auf das Gas Stickstoff kalibriert, erlaubt jedoch die Regelung und Messung vom Propan. Die ModBus-Schnittstelle des Reglers erfolgt über einen USB-Anschluss, dessen digitale Adresse mit Hilfe von LabView an das ADwin-System übertragen wird. Somit können alle Messdaten synchronisiert über das echtzeitfähige ADwin-System auf der Prüfstandssoftware angezeigt und geregelt werden.

### 3.5.2 Entwicklung einer Heizkammer

Bei einer Versuchsreihe zur Untersuchung des Glühkerzentemperaturverlaufs wurde festgestellt, dass die Spitzentemperatur der Glühkerze sich mit der Zeit ändert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Einzelteile der Glühkerze sich mit einem positiven Temperaturkoeffizienten verhalten. Das bedeutet, dass der ohmsche Widerstand der Einzelteile mit steigender Temperatur größer wird. Dadurch, dass der Gesamtwiderstand der Glühkerze konstant geregelt wird („Resistance Control“) und die Temperatur mancher Komponente der Glühkerze mit der Zeit steigt, wird der Widerstand anderer Teile reduziert und somit auch die Temperatur (siehe Abbildung 19).

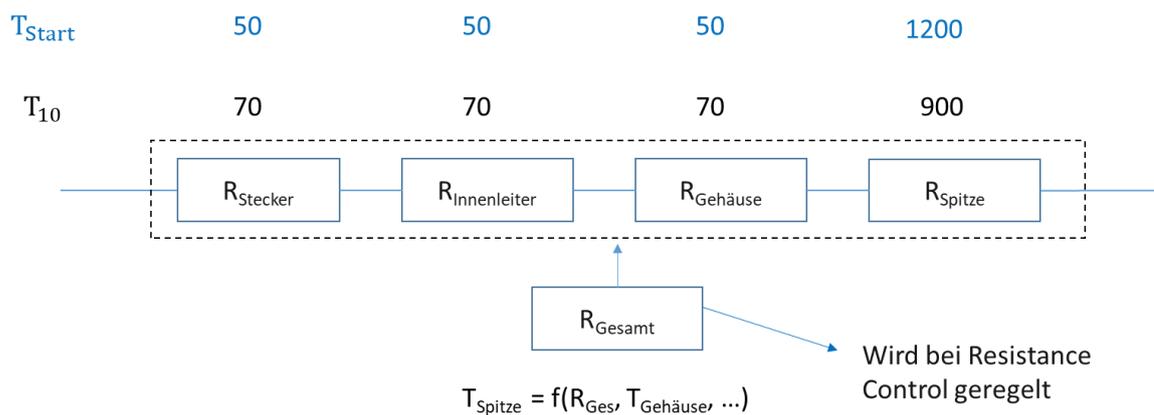


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Starttemperaturen ( $T_{\text{Start}}$ ) und Temperaturen nach 10 Minuten ( $T_{10}$ ) in °C einzelner Teile der Glühkerze [10].

Zudem wurde durch die gleiche Versuchsreihe festgestellt, dass die Aufwärmphase des HC-Trackers aufgrund mangelnder Isolierung eine lange Zeit (ca. drei Stunden) benötigt, wodurch sich eine lange Vorbereitungszeit vor der Nutzung ergibt. Um diese Defizite zu verringern und stabile Messungen durch die Gewährleistung einer konstanten Umgebungstemperatur zu ermöglichen, wird daher ein zusätzliches Heizaggregat verwendet, um den Aufheizvorgang zu beschleunigen.

Hierfür wurde ursprünglich ein Heizband Typ HSTD-/010 sowie einen Regler Typ HT63 des Herstellers Hillesheim angewendet. Das Heizband wird um das Gehäuse des HC-Trackers gewickelt und ermöglicht somit eine Wärmezufuhr um die Messkammer (siehe Abbildung 20). Als Temperaturfühler wird ein an dem Heizband angekoppelter Temperaturfühler des Typs Pt-100 eingesetzt. Dafür wurde eine Bohrung im Gehäuse des HC-Trackers erzeugt, in die der Temperaturfühler eingesteckt wird.

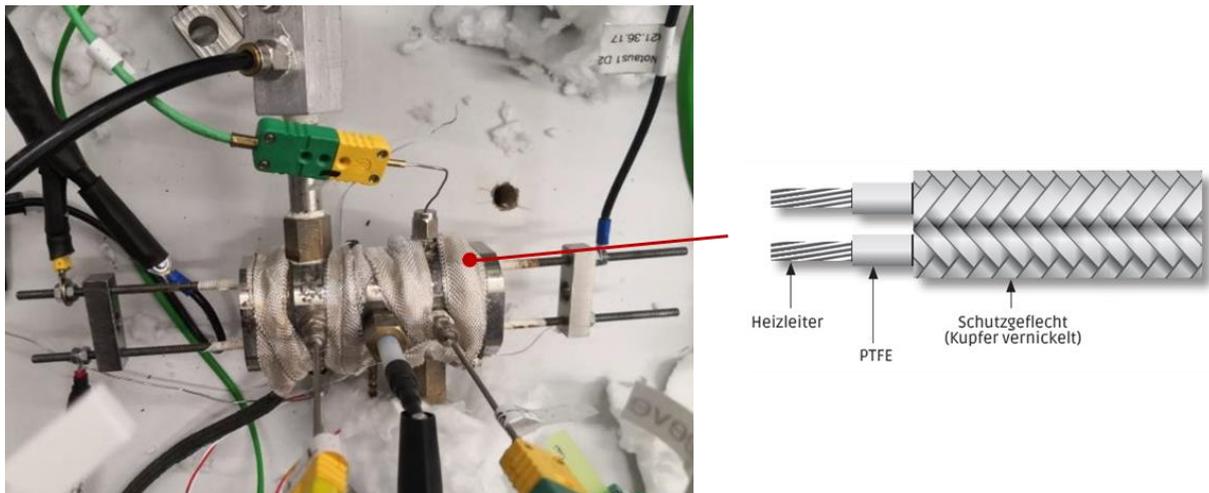


Abbildung 20: Anbringung des Heizbands um den HC-Tracker (links); Aufbau des Heizbands (rechts).

Der Einsatz des Heizbands ermöglichte zwar das Vorheizen des HC-Trackers innerhalb einer Stunde, jedoch wurden weitere Umstände bei dem Betrieb mit dem Heizband entdeckt. Unter anderem war es notwendig, eine zusätzliche Dämmung um den Tracker samt Heizband anzubringen, welche für den Dauerbetrieb ungeeignet war, da die Dämmung händisch angebracht werden musste. Bei jeder neuen Applikation der Dämmung könnte es zu Messabweichungen führen. Zudem bewirkt das Heizband eine unregelmäßige Erwärmung des HC-Trackers. Auch die Temperatur des gesamten HC-Trackers konnte schwierig ermittelt werden, da der Temperaturfühler effektiv nur die Bohrungstemperatur misst, in der der Fühler angebracht wird.

Um diese Probleme zu lösen, wurde nachträglich entschieden, eine Heizkammer um den HC-Tracker zu konzipieren und zu entwickeln [26]. Das Konzept der Heizkammer ist vergleichbar mit dem Aufbau bei bekannten FID-Geräten [23-25]. Es befindet sich ein Heizelement, welches an der Decke der Heizkammer angebracht wird. Für eine optimale Wärmeverteilung wird zusätzlich ein Lüfter angebracht. Der HC-Tracker samt Gasleitungen wird dadurch gleichmäßig erwärmt (siehe Abbildung 19). An den Innenwänden der Heizkammer werden zusätzlich Dämmmaterial aus Glasfaserwolle und Aluminiumfolie geklebt, damit die Wärmeverluste an die Umgebung minimiert werden können. Zudem wurden alle temperaturempfindlichen Leitungen, wie z.B. elektrische Verbindungen mit Isolierung und Dämmmaterial umwickelt, um Schäden zu minimieren (siehe Abbildung 22).

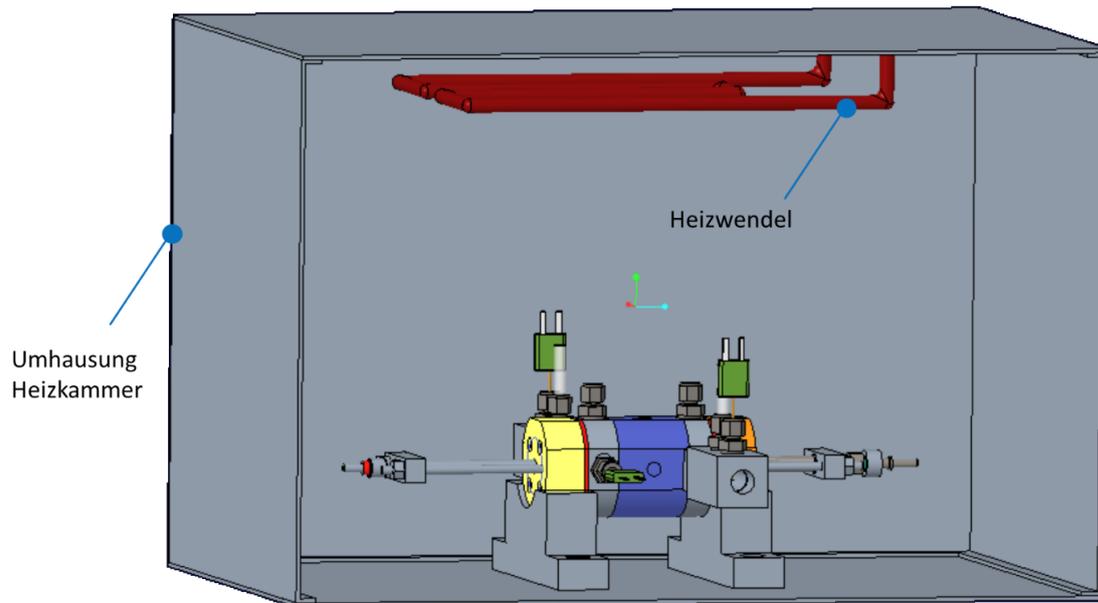


Abbildung 21: CAD-Entwurf der Heizkammer (Lüfter und Isolierung nicht abgebildet).

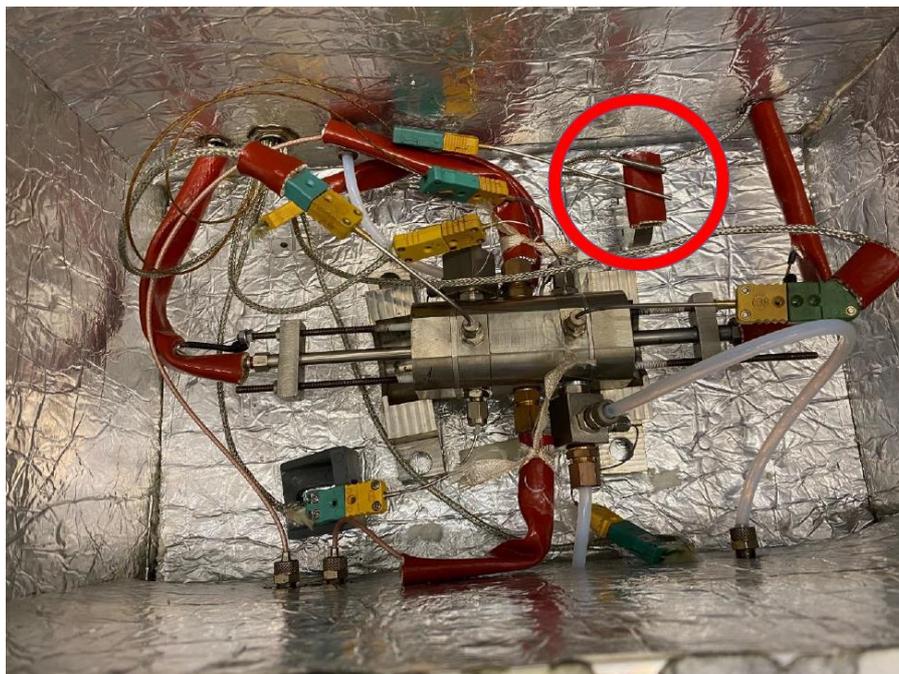


Abbildung 22: Isolierte Heizkammer mit HC-Tracker [26].

Für den Betrieb und die Regelung der Heizkammer wurde der kompakte Regler HT63, der für ursprünglich das Heizband eingesetzt wurde, wiederverwendet. Dazu wurden die elektrischen Verbindungen der Heizwendel angepasst und mit der Platine des Reglers verbunden. Mit Hilfe

von in der Messkammer angebrachten Thermoelementen Typ K, welche über den PicoLog TC-08 mit dem Prüfstandsrechner verbunden sind, könnte die Temperatur in der Messkammer echtzeit überwacht werden. Durch die Entwicklung der Heizkammer konnten Verbesserungen gegenüber der Verwendung des Heizbandes erzielt werden. So wurde die Aufheizphase des HC-Trackers von ca. drei Stunden auf eine Stunde reduziert. Des Weiteren konnte die eingestellte Temperatur in der Heizkammer durchaus konstant und uniform gehalten werden, welche für den stationären Betrieb des HC-Trackers wesentlich ist [26].

### **3.6 Experimentelle Untersuchung des entwickelten Prototyps**

Nach der abgeschlossenen Fertigung des neukonzipierten Prototyps im 9. Projektmonat (April 2021) konnte der neue Prototyp in Betrieb genommen und die Arbeitspakete 3 und 4 bearbeitet werden. In den folgenden Kapiteln werden die durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse diskutiert.

#### **3.6.1 Inbetriebnahme des entwickelten Prototyps**

Zur Validierung der durchgeführten numerischen Simulationen (Kapitel 3.3) sowie zur Gegenüberstellung des entwickelten Prototyps (P2) mit dem bestehenden Prototyp (P1) wurden erste Versuche durchgeführt und analysiert.

Um den neuen Prototyp mit P1 vergleichen zu können, wurden die gleichen Randbedingungen, wie in Tabelle 1 aufgelistet, eingestellt. Es wurde die Variation Typ 3 des Prototyp P2 mit einer Keramikglühkerze sowie einer Stabelektrode eingesetzt (siehe Abbildung 12), da diese laut der numerischen Untersuchungen das beste Verbesserungspotenzial gegenüber P1 aufweist. Hierzu wurde die Heizkammer nicht eingesetzt, da diese bei der Inbetriebnahme des Prototyps P1 noch nicht zur Verfügung stand.

Abbildung 23 stellt beide Prototypen hinsichtlich des gemessenen Ionenstroms gegenüber. Aus der ersten Messung konnte validiert werden, dass die konzipierte Messkammer des Prototyps P2 eine wesentliche Verbesserung im Vergleich zum P1 aufweist. Es wurde bereits bei einem eingestellten Widerstand,  $R_{GK}$  von 0,80 Ohm (entsprechend Glühkerzenspannung,  $V_{GK}$  von 4,9 V) einen Ionenstrom gemessen. Verglichen zum P1, bei dem der Ionenstrom erst ab einer  $V_{GK} = 6,5$  V messbar ist, würde dies bedeuten, dass die Funktionalität des HC-Trackers die Lebensdauer der Glühkerze nicht beeinträchtigen würde. Hier ist anzumerken, dass der gemessene Ionenstrom beim P1 deutlich höher ist, als der beim P2, da die Spitztemperatur der Glühkerze bei der eingestellten Spannung deutlich höher ist. Aufgrund von fehlenden Messstellen des P1, die ursprünglich nicht vorgesehen waren, konnte kein Temperaturvergleich zwischen den beiden Prototypen zur Validierung durchgeführt werden.

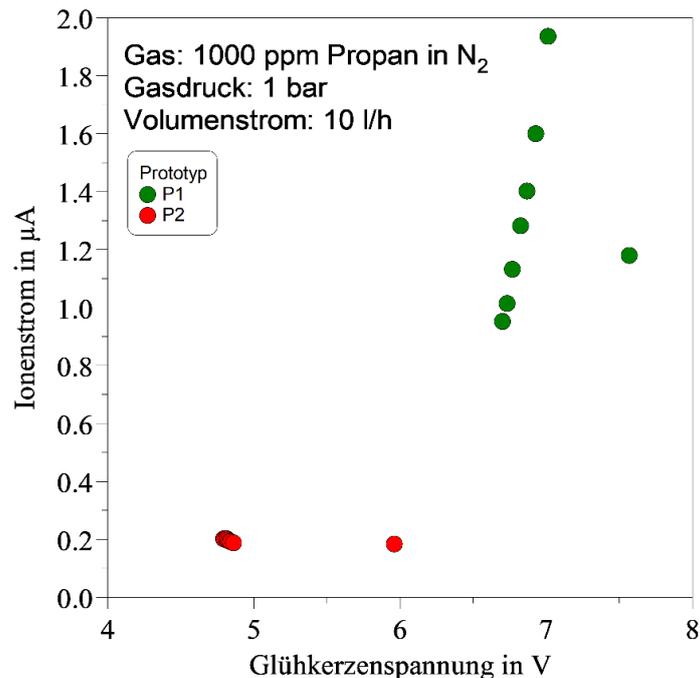


Abbildung 23: Gemessener Ionenstrom der Prototypen P1 und P2.

Zur Validierung der durchgeführten Simulationen im Kapitel 0 wurde die Temperatur an einigen Messstellen in der Messkammer des HC-Trackers (P2) durchgehend überwacht und mit den Durchschnittswerten aus der numerischen Untersuchung verglichen. Tabelle 3 listet einige Temperaturen zum Vergleich auf. Hier ist es ersichtlich, dass die berechneten und die gemessenen Temperaturen sich nähern. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die berechnete Temperatur, wie in Abbildung 9 dargestellt, der tatsächlichen Temperatur im kritischen Bereich (Bereich, in dem der Ionenstrom gemessen wird) nahekommt. Hierzu soll angemerkt werden, dass die Anbringung eines Thermoelements zur Temperaturmessung an dieser Stelle nicht möglich ist, da das Bauteil das elektrische Feld stören würde, welche die Ionenstrommessung verfälschen könnte. Diese Validierung bestätigt, dass das Ziel zur Erhöhung der Messkammertemperatur zur besseren Ionisationsbedingungen erreicht worden ist.

Aufgrund des Zeitaufwands, der mit dem Betreiben des HC-Trackers verbunden ist, und zur genaueren Untersuchung des HC-Trackers wurden weitere Versuche, welche in folgenden Kapiteln diskutiert werden, nur mit dem Prototyp P2 des Typs 3 (Spitzelektrode mit Stabelektrode) durchgeführt.

Tabelle 3: Validierung der Temperaturen in der Messkammer

	CFD-Simulation	Experimentelle Untersuchung
Gasttemperatur an der GK-Hülse, $T_{GP, gas}$ (Messkammereintritt)	342 °C	360 °C
Einlasstemperatur, $T_{Inlet}$	138 °C	141 °C
Gasttemperatur an der Stabelektroden-Hülse, $T_{Rod, outlet}$ (Messkammeraustritt)	155 °C	168 °C

### 3.6.2 Untersuchung Einfluss der Elektrodenspannung auf den Ionenstrom

Um die Theorie des HC-Tracker-Konzeptes genauer zu untersuchen, welche besagt, dass der gemessene Ionenstrom unter anderem von der elektrischen Feldstärke bzw. der angelegten Elektrodenspannung abhängig ist (siehe Kapitel 3.1), wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen unterschiedliche Elektrodenspannungen eingestellt worden ist.

Für diese Versuchsreihen wurde Propan (1000 sowie 4000 ppm) in Stickstoff mit einem Durchfluss von 10 l/h verwendet. Es wurde die Konfiguration mit einer Keramikglühkerze (KGK) und einer Stabelektrode in der Messkammer eingesetzt. Die KGK wurde mit einem Widerstand betrieben, so dass die Betriebsspannung bei 5,30 V liegt, damit eine maximale Temperatur in der Messkammer herrscht, ohne über der Grenzspannung der KGK zu kommen. Die folgende Tabelle fasst die Einstellungen dieser Versuchsreihe zusammen.

Tabelle 4: Eingestellte Parameter zur Untersuchung des Einflusses der Elektrodenspannung auf den Ionenstrom.

Parameter	Wert	Einheit
Probegas - Propan in Stickstoff	1000, 4000	ppm
Gasdurchfluss	10	l/h
Glühkerzenspannung $V_{GK}$	5,30	V
Elektrodenspannung	150, 250, 500	V
Messkammerkonfiguration	Typ 3-1 (Spitzelektrode mit Stabelektrode)	-

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in der Abbildung 24 dargestellt. Aus den Versuchen wurde es ersichtlich und bestätigt, dass die Elektrodenspannung den gemessenen Ionenstrom beeinflusst; mit steigender Elektrodenspannung steigt der gemessene Ionenstrom. Es ergab sich einen guten Zusammenhang zwischen der angelegten Elektrodenspannung und dem

gemessenen Ionenstrom mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,96$  bei 4000 ppm Propan bzw.  $R^2 = 0,97$  bei 1000 ppm Propan, welcher die Linearität der abgeleiteten Saha-Gleichung (siehe Gl. 6) bestätigt. Wie in **Abbildung 24** auch zu sehen ist, weist die Versuchsreihe bei einer angelegten Elektrodenspannung von 500 V einen großen Abweichungsbereich im Vergleich zu den anderen eingestellten Spannungen auf. Hierfür wurde der Versuch bei gleichen Bedingungen wiederholt, um mögliche Fehlerquellen auszuschließen. Es konnte festgestellt werden, dass während der Messung sich Funken gebildet haben, welche drastische Erhöhungen des gemessenen Ionenstroms verursacht haben (siehe **Abbildung 25**).

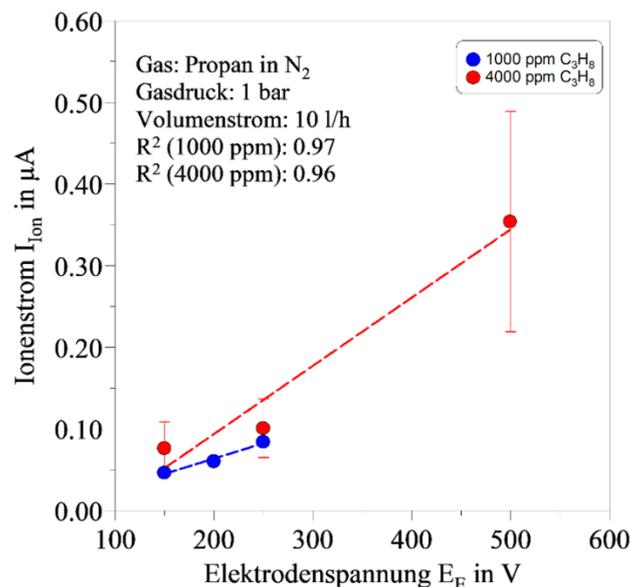


Abbildung 24: Gemessener Ionenstrom bei unterschiedlich eingestellten Elektrodenspannungen und Propankonzentrationen.



Abbildung 25: Standbilder aus Videoaufnahme; links: vor der Funkenbildung; rechts: aufgehellte Messkammer aufgrund der Funkenbildung.

Die Funkenbildung ist auf die starke angelegte Elektrodenspannung und auf den kleinen Abstand zwischen der Kathode und der Anode (1,9 mm) zurückzuführen, welche laut dem Paschens-Gesetz dazu führt, dass eine bestimmte Durchbruchspannung überschritten wird und

somit ein Funke bzw. eine Entladung entsteht (siehe Abbildung 26) [27]. Um diese Funkenbildung und daher eine Verfälschung des gemessenen Ionenstroms bei weiteren Versuchen zu vermeiden, wurden nachfolgende Versuche mit einer maximalen Elektrodenspannung von 250 V durchgeführt.

In Abbildung 24 ist auch deutlich zu sehen, dass der HC-Tracker Propan unterschiedliche Konzentrationen messen und unterscheiden kann. Jedoch ist aufgefallen, dass der Ionenstrom bei 1000 ppm Propan trotz Korrektur von messtechnischen Offsetwerten sehr gering ist. Diese Untersuchungen werden in weiteren Kapiteln diskutiert.

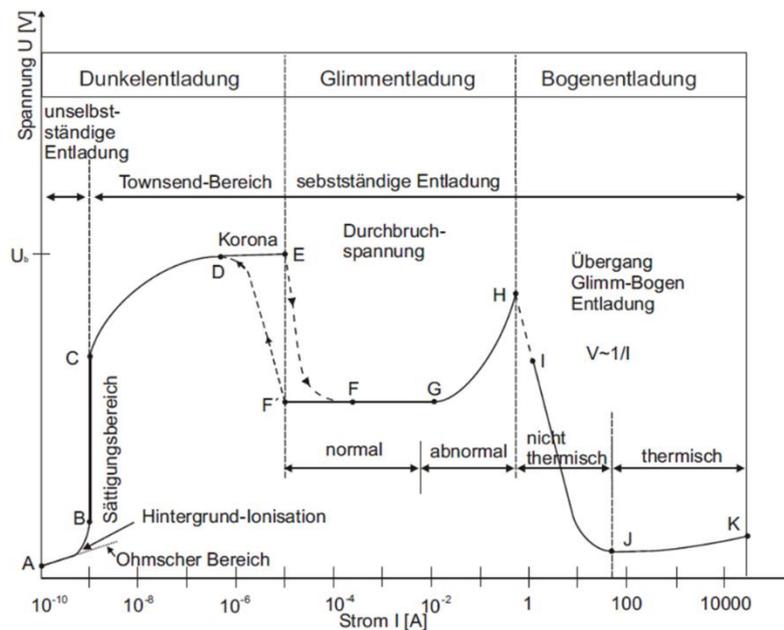


Abbildung 26: Gasentladungskennlinie nach [27, 28].

### 3.6.3 Ionenstromuntersuchung mit zwei Glühkerzen

Wie in Kapitel 0 diskutiert worden ist, besteht durch die Modularität des HC-Trackers die Möglichkeit, zwei Glühkerzen gleichzeitig einzusetzen. Der Einsatz von einer Keramikglühkerze und einer Metallglühkerze gleichzeitig sorgte für eine höhere Gastemperatur im kritischen Messbereich des HC-Trackers (siehe Abbildung 13), welche für den Ionisationsvorgang vorteilhaft erwarten lässt. Eine weitere Versuchsreihe wurde mit dieser Konfiguration durchgeführt und ein Vergleich zu der Konfiguration mit der Stabelektrode dargestellt.

Tabelle 5 stellt die Randbedingungen der Versuchsreihe dar. Die eingesetzte Metallglühkerze wurde mit Widerstandswerten betrieben, so dass die Betriebsgrenze von 4,30 V nicht überschritten wird. Das Variieren von  $V_{MGK}$  dient dazu, unterschiedliche Temperaturen in der Messkammer einzustellen und den Einfluss auf den gemessenen Ionenstrom zu untersuchen. Zur

Untersuchung der Temperaturwerte wird die Messstelle am Elektrodenaustritt  $T_{\text{Rod,Outlet}}$  überwacht und aufgenommen (siehe Abbildung 27).

Tabelle 5: Eingestellte Parameter zur Untersuchung der Glühkerzenkonfiguration.

Parameter	Wert	Einheit
Probengas - Propan in Stickstoff	1000, 4000	ppm
Gasdurchfluss	10	l/h
Glühkerzenspannung $V_{\text{KGK}}$	5,30	V
Glühkerzenspannung $V_{\text{MGK}}$	3,00, 3,50, 4,00	V
Elektrodenspannung	250	V
Messkammerkonfiguration	Typ 3-2 (Spitzelektrode mit zwei Glühkerzen)	-

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in der Abbildung 28 dargestellt. Aus der Versuchsreihe ist ersichtlich, dass der gleichzeitige Einsatz von beiden Glühkerzen einen höheren Ionenstrom bewirkt, wie es aus der numerischen Untersuchung zu erwarten war. Der höhere Ionenstrom ist auf die höhere eingestellte Temperatur (durch die Spannungs- bzw. Widerstandsvariation der Glühkerze) im kritischen Ionenmessbereich in der Messkammer, welche durch die Abbildung 28 rechts deutlich dargestellt wird. Der Einsatz der Metallglühkerze verursacht eine Temperaturerhöhung am Messkammeraustritt von ca. 100 K im Vergleich zum Einsatz von der Keramikglühkerze. Aus dieser Versuchsreihe konnte ebenfalls bestätigt werden, dass der entwickelte Laborprototyp P2 den Ionenstrom verschiedener Propan-Konzentrationen unterscheiden kann. Durch die Versuchsreihe konnte zudem eine Korrelation zwischen dem Ionenstrom und der Temperatur festgestellt werden, welche einen linearen Zusammenhang beschreibt ( $R^2 = 0,96$  bei 1000 ppm Propan sowie  $R^2 = 0,78$  bei 4000 ppm Propan). Es kann daher die Aussage getroffen werden, dass die Annahme sowie das gesetzte Ziel, dass eine Temperaturerhöhung in der Messkammer zur besseren Ionsationsbedingungen führt, bestätigt werden kann.

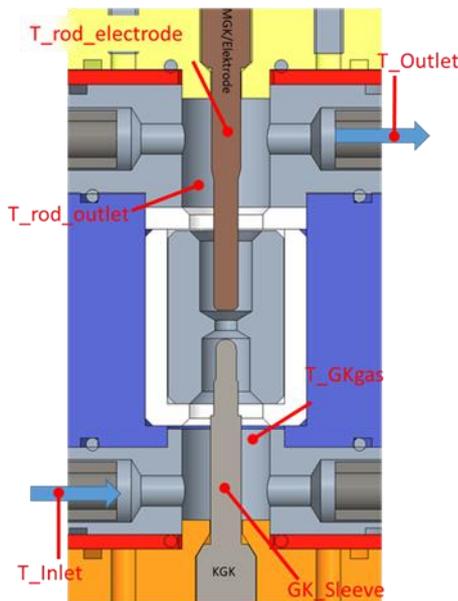


Abbildung 27: Temperaturmessstellen in der Messkammer.

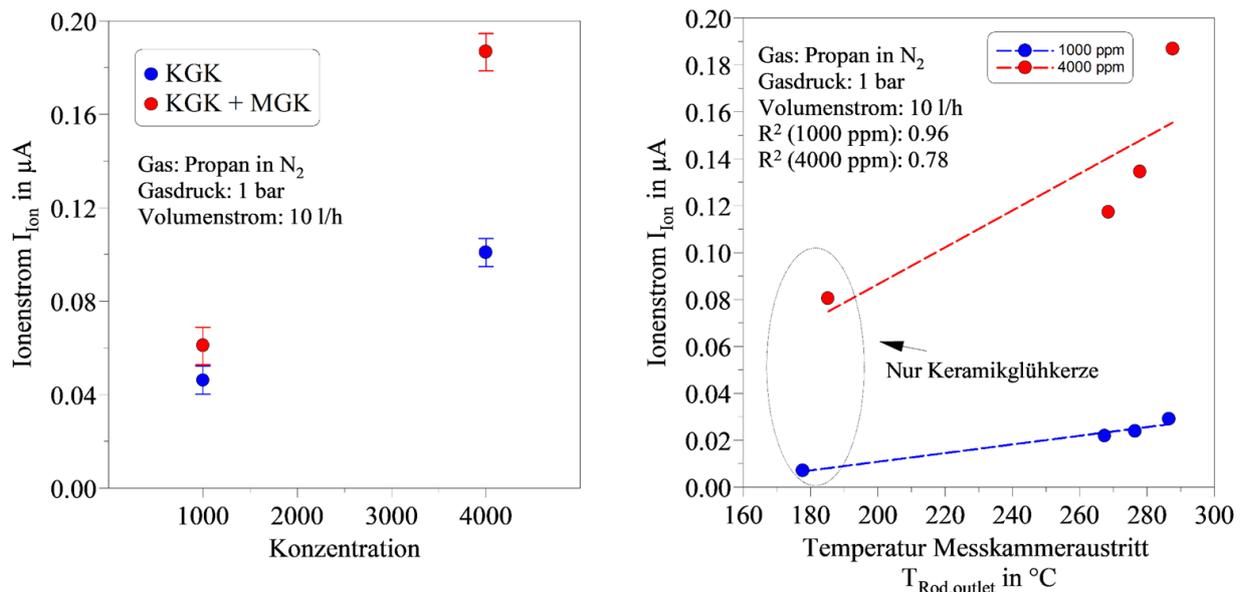


Abbildung 28: links: Ionenstromaufstellung bei unterschiedlicher Glühkerzenkonfiguration; rechts: Einfluss der Temperatur auf den Ionenstrom (eingekreiste Punkte bezeichnen Messpunkte, bei denen nur die Keramikglühkerze eingesetzt war).

### 3.6.4 Nicht-stationäres Verhalten des Portable HC-Trackers

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse aus den Versuchen in vorherigen Kapiteln, ist es durch weitere Untersuchungen ersichtlich, dass das Konzept des Portable HC-Trackers nicht ausreichend erforscht ist, dass ein zeitnaher Einsatz erfolgen kann. In diesem Unterkapitel werden dazu einige Ergebnisse und Maßnahmen diskutiert.

In einer Versuchsreihe wurde die Konfiguration Typ 3-2 des HC-Trackers verwendet, um einen Vergleich zu dem Versuch im Kapitel 3.6.3 zu etablieren. Dafür wurde das Probengas Propan in den Konzentrationen 100, 1000 und 4000 ppm (Rest Stickstoff) verwendet. Der Widerstand der Glühkerzen wurden jeweils so geregelt, dass die Spannungen bei 5,30 V ( $V_{\text{KGK}}$ ) sowie 4,00 V ( $V_{\text{MGK}}$ ) eingestellt werden (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Eingestellte Parameter zur Untersuchung der Gaskonzentrationen.

Parameter	Wert	Einheit
Probengas - Propan in Stickstoff	100, 1000, 4000	ppm
Gasdurchfluss	10	l/h
Glühkerzenspannung $V_{\text{KGK}}$	5,30	V
Glühkerzenspannung $V_{\text{MGK}}$	4,00	V
Elektroden <span>spannung</span>	250	V
Messkammerkonfiguration	Typ 3-2 (Spitzelektrode mit zwei Glühkerzen)	-

Aus dieser Versuchsreihe wurde ersichtlich, dass ein unvorhersehbares Problem bei dem Betrieb des HC-Trackers vorgekommen ist (siehe Abbildung 29). Bei dieser Versuchsreihe wurde ein höheres Ionenstromsignal bei einer Gaskonzentration von 100 ppm Propan in Stickstoff gemessen als bei 1000 ppm Propan. Zudem ist zu sehen, dass bei der Untersuchung mit 4000 ppm Propan die Abweichung des Messsignals und der Durchschnittwert des Signals von denen aus der Versuchsreihe in Kapitel 3.6.3 (siehe Abbildung 28) sich unterscheiden.

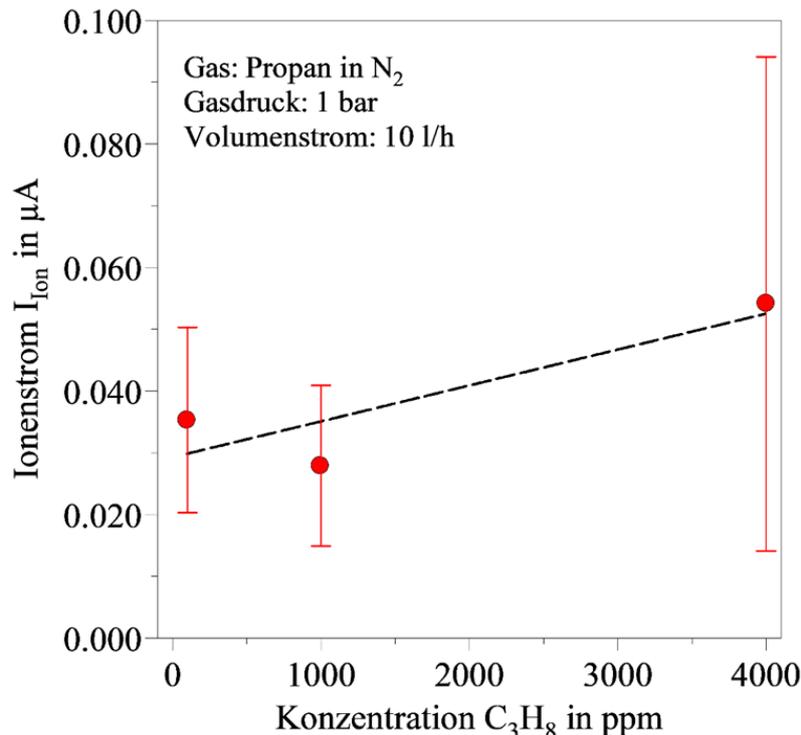


Abbildung 29: Ionenstromsignale bei unterschiedlichen Propankonzentrationen (100, 1000 und 4000 ppm).

Nach dem Ausbau des HC-Trackers konnte eine mögliche Ursache entdeckt werden. Auf der

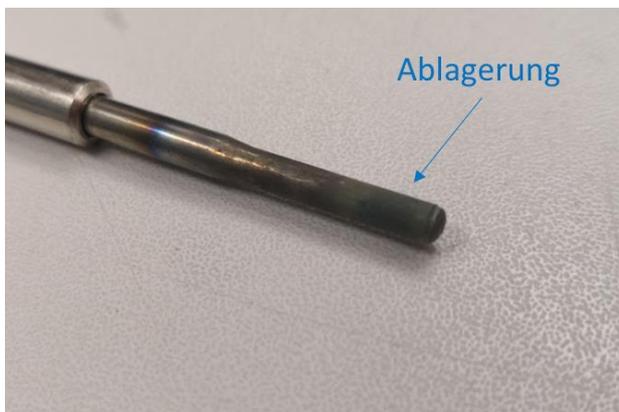


Abbildung 30: Ablagerung an der Spitze der Metallglühkerze.

Spitze der Metallglühkerze hat sich eine Ablagerungsschicht gebildet (siehe Abbildung 30), die mutmaßlich das Messsignal beeinflusst, da die Metallglühkerze in diesem Fall die Masselektrode darstellt. Weitere Wiederholungsversuche (dargestellt durch weitere Versuche in nachfolgenden Kapiteln) mit neuen Glühkerzen haben diese Aussage bestätigt.

Um dieses Problem langfristig zu vermeiden, wurde ein weiteres Elektrodenkonzept entwickelt, bei dem die Metallglühkerze

nicht als Masselektrode fungiert. Bei diesem Konzept (Typ 3-3) wird eine zweiteilige Elektrode in die Messkammer eingesetzt, bei der eine Hälfte die Kathode (negativ) und die andere Hälfte die Anode (positiv) darstellt (siehe Abbildung 31). Diese Variante soll den Vorteil bringen, dass beide Glühkerzen als Elektroden abgegrenzt sind. Bei tendenziellen Problemen, wie mit der beschriebenen Beschichtung, würde dies keinen Einfluss auf die Ionenstrommessung haben. Zudem wird durch dieses Konzept ein homogeneres elektrisches Feld um die heißere Keramikglühkerze gebildet, welche für die Erfassung des Ionenstroms vorteilhafter wäre.

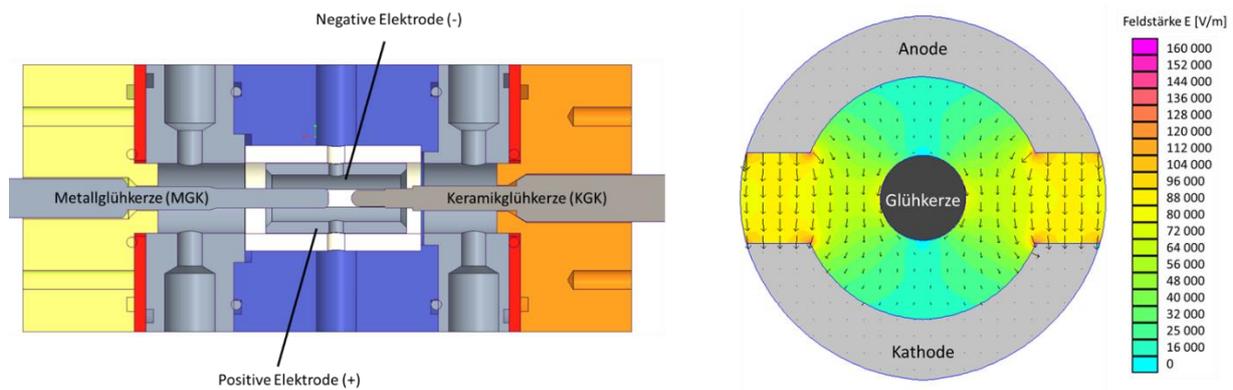


Abbildung 31: Elektrodenkonzept mit Halbschalen (Typ 3-3) analog zum FID-Prinzip (Anordnung siehe Abbildung A1 im Anhang) [24].

Die Inbetriebnahme des Konzeptes hat Verbesserungen im Vergleich zu der Konfiguration Typ 3 dargestellt (siehe Abbildung 32). Es konnten höhere Ionenstromsignale bei 1000 und 4000 ppm Propan bei relativ gleichen Messkammertemperaturen und ansonsten gleichen Einstellungen gemessen werden. Trotz der initialen Verbesserung des Konzeptes, wurde es durch weitere Versuche mit der Konfiguration Typ 3-3 ersichtlich, dass das Portable HC-Tracker ein nicht-stationäres Verhalten aufwies.

Bei weiteren Versuchen mit der Konfiguration konnte keine Reproduzierbarkeit der vergangenen Messungen hergestellt werden. Teilweise wurden auch unwahrscheinliche Werte gemessen, trotz gleichen Randbedingungen (siehe Abbildung 33). Es wurde beispielsweise Ionenstromsignale bei 1000 ppm Propan gemessen, die höher sind als die mit 4000 ppm Propan. Zudem ist erkennbar, dass betragsmäßig die Messsignale sich von denen der Inbetriebnahme (Abbildung 32) unterscheiden. Genauere Analyse der Messdaten haben ergeben, dass der Ionenstrom teilweise mit der Leistung der Keramikglühkerze korreliert. Trotz der gleichbleibenden Temperatur (welche eine Funktion der Glühkerzenparameter ist), beeinflusste die Leistung der Keramikglühkerze den gemessenen Ionenstrom. Um diesen Effekt genauer zu betrachten, wurde eine Untersuchung der Glühkerzenbetriebsparameter als Einflussgrößen durchgeführt [30].

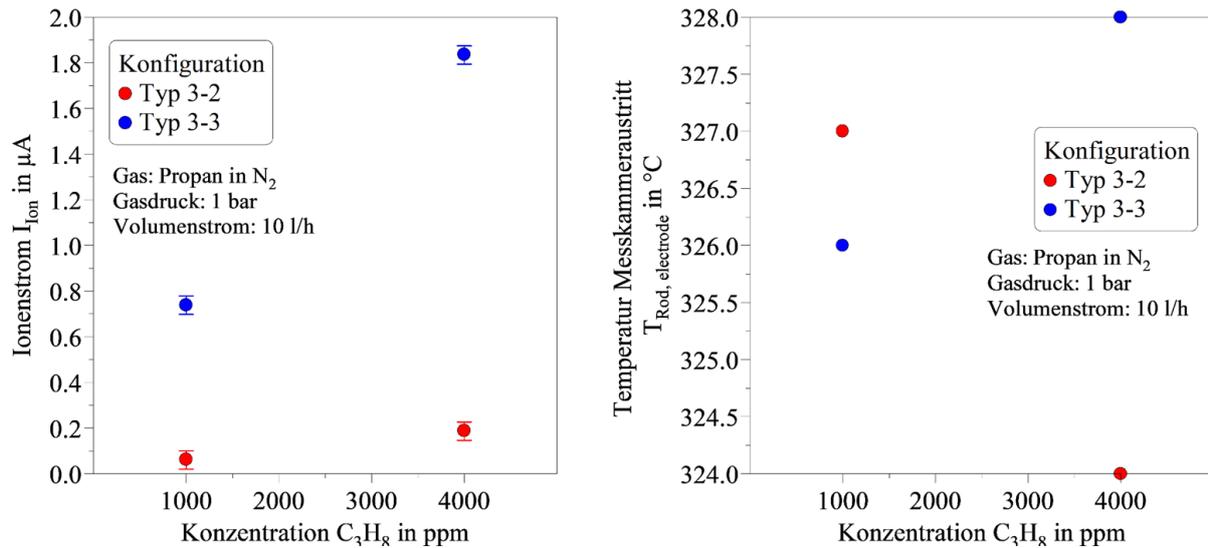


Abbildung 32: Erste Inbetriebnahme der Konfiguration Typ 3-3 (Halbschalenelektrode) und Vergleich mit Typ 3-2 (Spitzelektrode); links: Ionenstrom, rechts: Temperaturvergleich am Messkammeraustritt bei unterschiedlichen Propan-Konzentrationen.

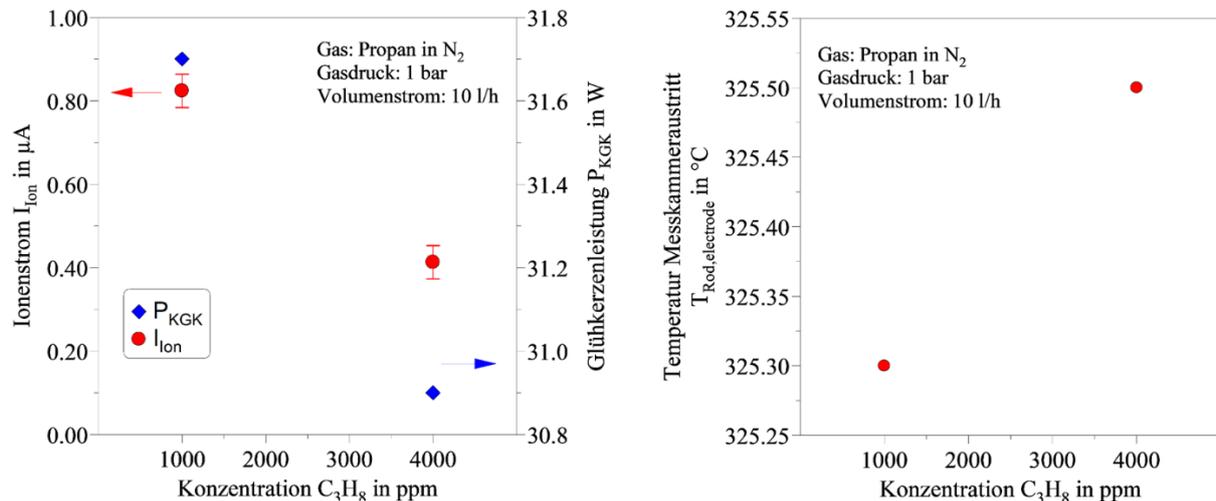


Abbildung 33: Wiederholungsversuche mit Konfiguration Typ 3-3; links: Ionenstrom, rechts: Temperatur am Messkammeraustritt.

Aus der Untersuchung konnte unter anderem festgestellt werden, dass es Störsignale aus unbekanntem Grund bei dem Betrieb des HC-Trackers vorkommen (siehe Abbildung 34). Es wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der kein Gas durch den HC-Tracker zugeführt wurde, das heißt es befand sich darin nur Umgebungsluft. Es wurde nur der Wärmeeintrag durch das Anschalten von der Heizkammer, der Metall- sowie der Keramikglühkerze variiert. Durch diese Versuchsreihe wurde festgestellt, dass eine Störquelle vorhanden ist, die zu einer Schwingung des Ionenstroms trotz schwingungsfreier Glühkerzenparameter (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36) führt. Zudem ist dieser Effekt willkürlich, so dass der Fehler nicht

reproduziert werden konnte. Untersuchungen der Ionenstrommesstechnik sowie weitere Messapparate haben direkte Ursache bzw. Einflussgröße für diese Störung ergeben.

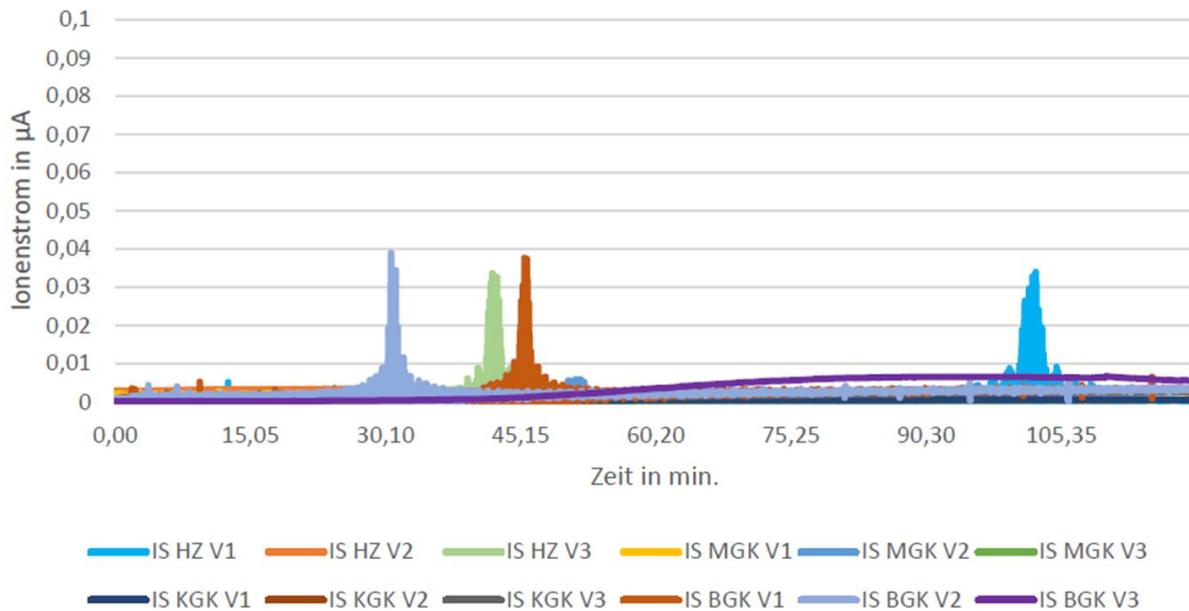


Abbildung 34: Versuchsergebnisse ohne Volumenstrom [30]; HZ: Heizkammer, MGK: Metallglühkerze, KGK: Keramikglühkerze, BGK: beide Glühkerzen, IS: Ionenstrom.

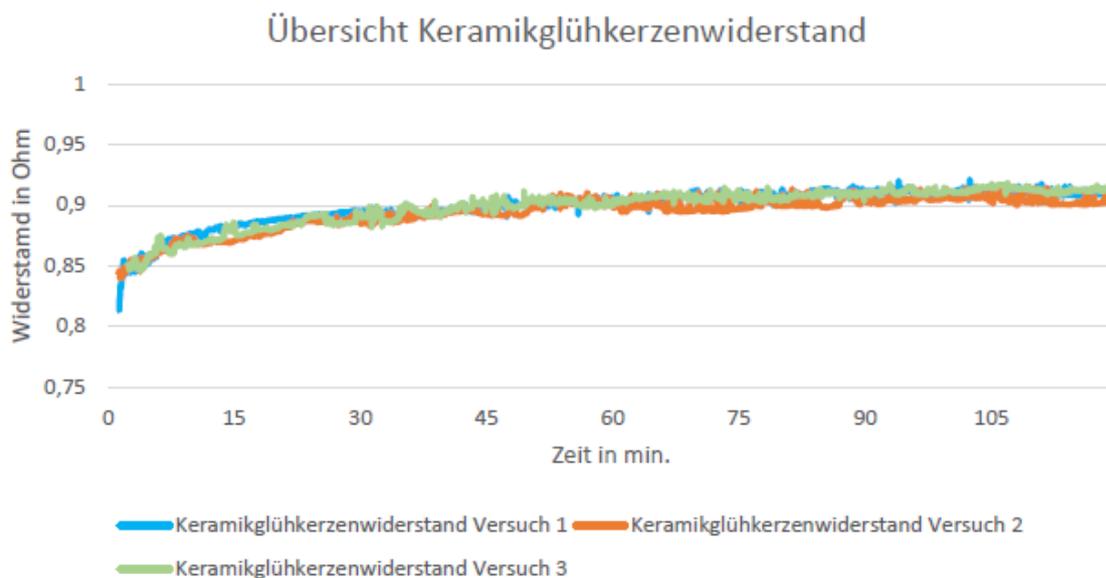


Abbildung 35: Widerstand der Keramikglühkerze bei Versuchen ohne Volumenstrom, analog zur Abbildung 34 [30].

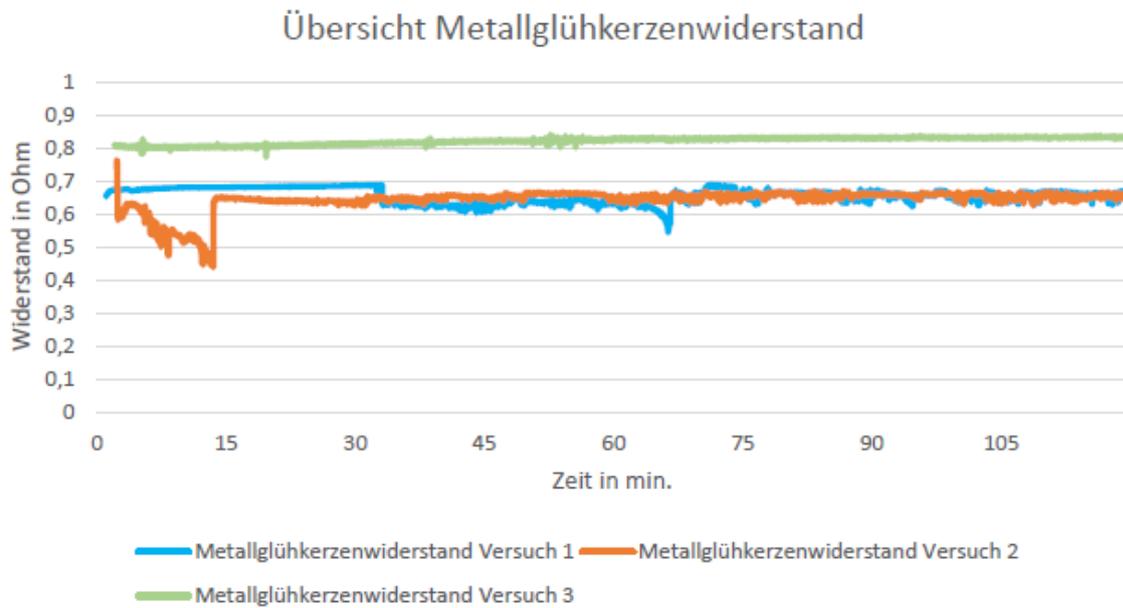


Abbildung 36: Widerstand der Metallglühkerze bei Versuchen ohne Volumenstrom, analog zur Abbildung 34 [30].

Eine weitere Versuchsreihe wurde durchgeführt, bei der nur Druckluft durch den HC-Tracker durchströmt wurde. Bei zwei von drei Versuchen sinkt der gemessene Ionenstrom sobald die Druckluft zugeführt wird, welcher auf die Temperatursenkung des Gases zurückzuführen ist. Bei einem Versuch (V1) wurde jedoch kein Ionenstrom gemessen (siehe Abbildung 37). Ebenfalls hier konnte keine Ursache für dieses Ereignis gefunden werden.

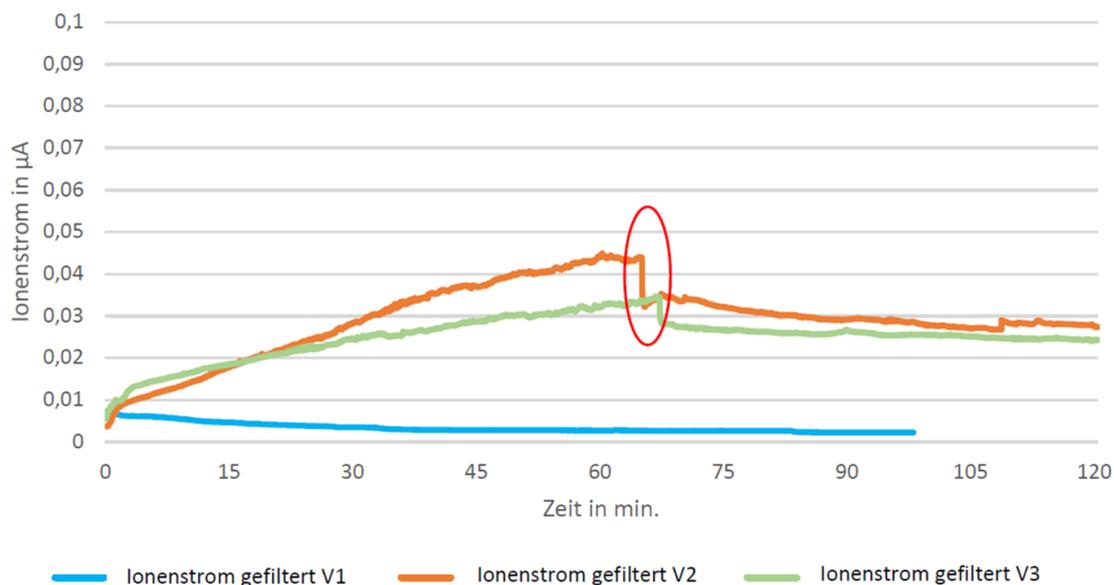


Abbildung 37: Versuchsreihe mit Druckluft [30]; rot markierter Bereich bezeichnet Druckluftzufuhr.

Weitere Versuche aus der Arbeit, die hier nicht detailliert diskutiert werden, haben verdeutlicht, dass das Betriebsverhalten des HC-Trackers instationär und nicht reproduzierbar ist [30]. Trotz

diesen Ergebnissen und denen der vergangenen Versuchsreihen, wurde im Rahmen des Vorhabens Untersuchungen mit motorischem Abgas durchgeführt, um den Einsatz des Portable HC-Trackers bei realen Motormessungen zu untersuchen.

### 3.7 Reale Abgasmessungen mit dem Portable HC-Tracker

Für diese Versuchsreihe wurde ein mit Benzin betriebener Einzylinder-Motor verwendet. Zudem wurde eine geeignete Abgasstrecke konzipiert, um das Motorabgas in den Portable HC-Tracker zuzuführen (siehe Abbildung 38). Diese Strecke besteht unter anderem aus Edelstahlleitungen und Ventile der Firma Swagelok. Zwischen der Abgasleitung des Motors und dem Portable HC-Tracker wird zudem ein beheizter Abgasschlauch Typ H 800 der Firma Hillesheim eingesetzt, der das Kondensieren des im Abgas enthaltenen Wassers vermeidet. Dies entspricht auch den Normen der Abgasmessung nach [19]. Das Abgas wird aus der Motorleitung durch eine Saugpumpe abgesaugt. Der benötigte Durchfluss, welcher an die PEMS-Messtechnik des Projektpartners angepasst wird, wird durch die Nutzung eines Ventils, das einen gewissen Gegendruck stellt, gewährleistet.

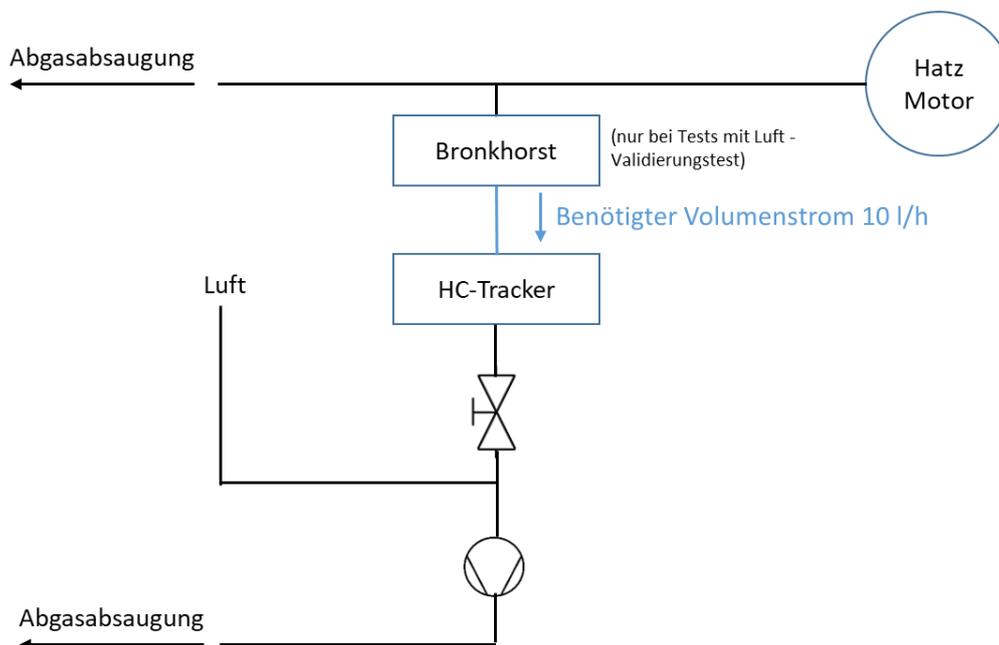


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Abgasstrecke Portable HC-Tracker.

Bei der Versuchsreihe wurden beide Glühkerzen verwendet. Die Widerstände beider Glühkerzen wurden so geregelt, so dass  $V_{KGK} = 5,30 \text{ V}$  und  $V_{MGK} = 4,00 \text{ V}$  betragen. Die Heizkammer sowie der Heizschlauch wurden auf eine Temperatur von  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  geregelt, um Kondensation in den Leitungen zu vermeiden.

Zum Beginn der Versuchsreihe wurde der Motor in seiner Warmlaufphase gebracht, damit die Motorkennwerte (z. B. Öltemperatur und zyklische Schwankungen) sich stabilisieren. Während dieser Warmlaufphase wurde der HC-Tracker samt Heizkammer auf eine Heizkammertemperatur von 200 °C aufgewärmt. Für die erste Messung wurde ein Lambda-Wert (Luft-Kraftstoff-Verhältnis – gemessen durch eine Lambdasonde LSU4.9 der Firma Bosch, Auswerteeinheit der Firma Etas) von  $\lambda = 0,96$  am Motor sowie eine Verbrennungsschwerpunktlage von CA50 = 12 ° KW n. OT. und ein indizierter mittlerer Druck bei IMEP = 3 bar für einen stabilen Verbrennungsvorgang eingestellt. Bei weiteren Messpunkten wurde nur der Lambda-Wert auf  $\lambda = 1,06$  bzw.  $\lambda = 1,17$  variiert.

Abbildung 40 stellt einige Messwerte der Versuchsreihe dar. Die Ergebnisse des Ionenstroms zeigen, dass der Ionenstrom nicht mit  $\lambda$  korreliert. Aus der Theorie sowie aus der Praxis der Motorenverbrennung ist bekannt, dass je höher der  $\lambda$ -Wert, desto geringer der Anteil an unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas sich aufgrund der vollständigeren Verbrennung befindet [31] (siehe Abbildung 39). Die Versuchsreihe mit dem Portable HC-Tracker zeigt, dass der Ionenstrom bei  $\lambda = 1,06$  geringer als  $\lambda = 0,96$  ausfällt. Auch der Ionenstrom bei  $\lambda = 1,16$  fällt höher als der bei  $\lambda = 0,96$ , was theoretisch nicht möglich ist. Weitere Betrachtungen anderer Messdaten (relativ konstante Temperaturen und Glühkerzenleistungen) haben keine sinnvolle Korrelation nachgewiesen, so dass hier nochmal bestätigt werden kann, dass eine unbekannte Fehlerquelle im HC-Tracker auftritt. Nach der Vermutung, dass in der Messkammer die Glühkerzen oxidiert wären, wurde der HC-Tracer auseinander gebaut. Jedoch konnte keine Beschichtung oder Ablagerung sowohl auf den Glühkerzen als auch an den Halbschalen-Elektroden erkannt werden.

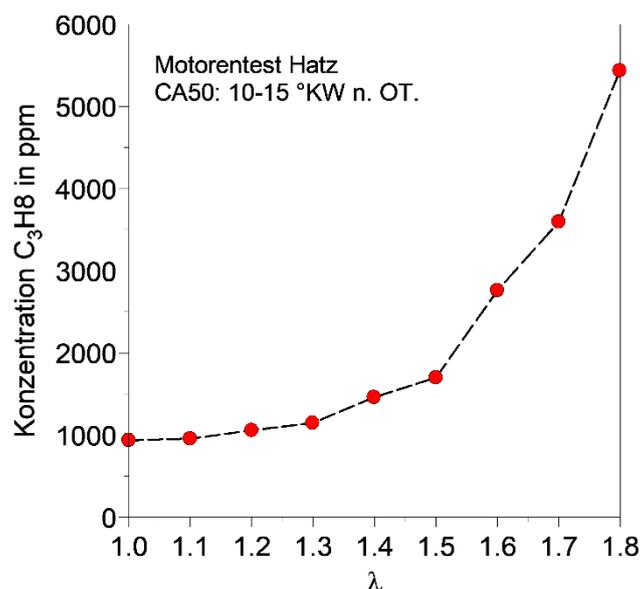


Abbildung 39: Propan-Konzentration (dargestellt als Äquivalent des Gesamtkohlenwasserstoffs) im Abgas gemessen mit ABB MultiFID AO2020.

Aufgrund des unbekanntenen Problems und des nahenden Projektendes wurden weitere Untersuchungen des Grundkonzepts durchgeführt, um den Ionisierungsprozess besser zu verstehen, da vermutet wird, dass dies das zugrundeliegende Problem ist.

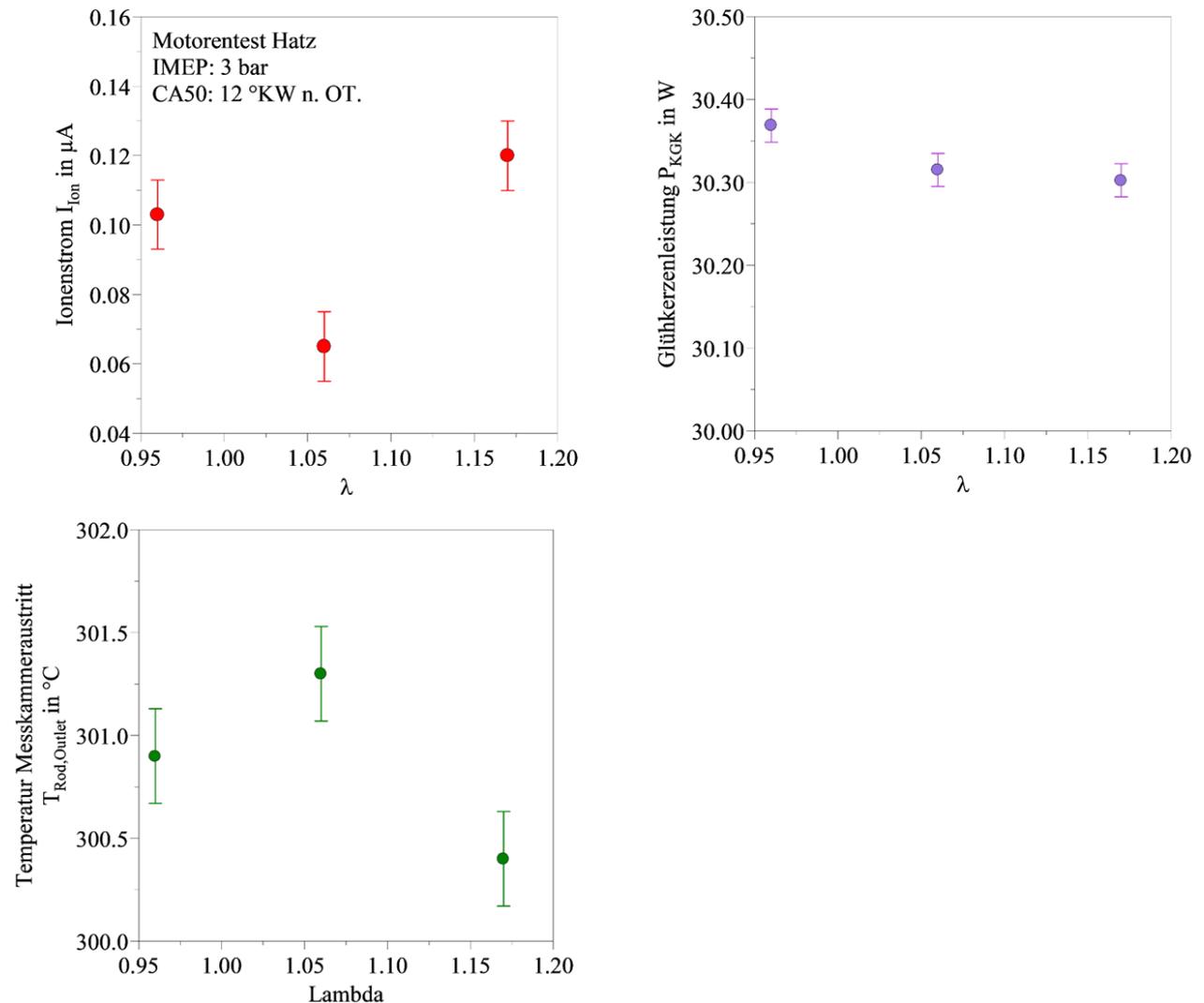


Abbildung 40: Ergebnisse Abgastest; oben links: Ionenstrom, oben rechts: Glühkerzenleistung, unten links: Temperatur Messkammeraustritt.

### 3.8 Simulation der Reaktionskinetik im HC-Tracker

Mit ergänzenden Untersuchungen der Reaktionskinetik soll genauer untersucht und verstanden werden, von welchen Einflussgrößen Ionisierung im HC-Trackers abhängt. Das Ziel der Simulation ist zu erfahren, welche Zwischenprodukte und Endprodukte bei der Erhitzung des Gases entstehen.

Die Simulation der chemischen Reaktionen in dem HC-Sensor wird mithilfe des von der MIT und Northeastern University entwickelten Reaction Mechanism Generator (RMG)

durchgeführt [41]. Dieser besteht aus dem allgemeinen Verständnis, wie Moleküle miteinander reagieren und bildet diese in Modellen ab.

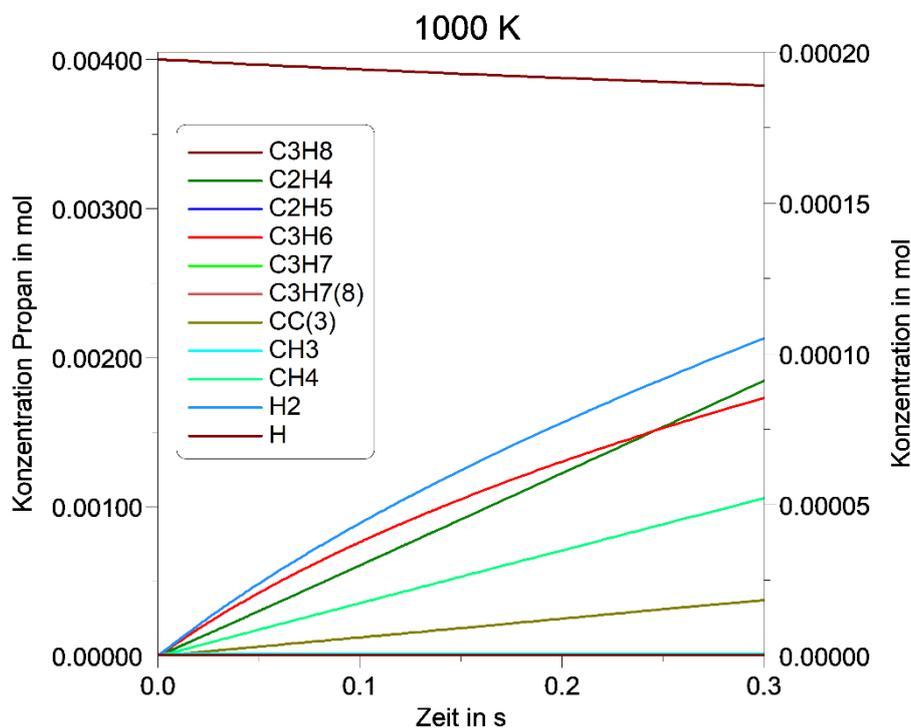
Anhand der vorangegangenen Untersuchungen lassen sich die Randbedingungen der Simulation ableiten (siehe Kapitel 0). Die mittlere Temperatur des Gases in der Ionenstrommesskammer beträgt ca. 769 °C bzw. ~1042 K. Die Gaszusammensetzung besteht aus 0,004 Mol Propan (entspricht 4000ppm), der Rest ist Stickstoff. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Sensor ist bei einem Volumenstrom von 3 l/h bei 0,275 m/s. Die Messkammer hat eine Länge  $s_{\text{elektrode}}$  von 20,65 mm. Hieraus kann die Verweilzeit der Moleküle in dem Sensor  $t_{\text{Teilchen im Sensor}}$  bestimmt werden.

$$t_{\text{Teilchen im Sensor}} = \frac{s_{\text{elektrode}}}{v} = \frac{20,65 \text{ m}}{0,275 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,075 \text{ s} \quad (\text{Gl. 12}).$$

In der ersten Untersuchung werden diese Randbedingungen umgesetzt und die Reaktionen simuliert. In Abbildung 41 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Anhand der Menge der Reaktionsprodukte ist erkennbar, dass nach 0,1 s in etwa 7 % des Propans zersetzt wird (Abbildung 41, oben). Hauptsächlich entstehen als Endprodukte die Moleküle C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>. Ausgehend von Propan entstehen die ersten Zwischenprodukte: C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, H, CH<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>7</sub> (vgl. Abbildung 41, unten). Diese Zwischenprodukte besitzen alle ein freies Elektron, sie sind also Radikale. Dies bedeutet aber nicht, dass diese ionisiert sind. Die Ionisation beschreibt ein Ladungsunterschied [9]. Bei C<sub>3</sub>H<sub>7</sub> ist das freie Elektron sowohl am mittleren Kohlenstoffatom als auch an einem Kohlenstoffatom am Ende auffindbar. Die Simulation zeigt, dass bei ca. 777 °C Gastemperatur, chemische Reaktionen stattfinden und sich das Propan zerlegt. Es könnte also potenziell eine chemische Ionisation in dem entwickelten HC-Sensor stattfinden, die temperaturabhängig, jedoch nicht als thermische Ionisation zu definieren ist (siehe auch Kapitel 3.1) [35].



Um die Temperatureuswirkung zu untersuchen wird die Gastemperatur variiert. Abbildung 41 zeigt die Reaktion von Propan bei 1000 K, 1100 K und 1200 K Gastemperatur bei einer Verweilzeit von 0,3 s. Es ist sehr deutlich erkennbar, dass bei 1000 K die Reaktion sehr langsam abläuft. Bei einer Temperatur von 1100 K sind die Reaktionen bereits deutlich schneller. Nach 0,3 Sekunden sind 52 % des Propans in andere Moleküle umgewandelt. Ist die Temperatur des Gases bei 1200 K sind, nach Ablauf von 0,2 Sekunden, 99,9 % des Propans zerlegt. Außerdem ist bereits nach ca. 0,07 s bereits 90 % des Propans umgewandelt. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Umsetzung des Propans beschleunigt werden kann, wenn die Temperatur des Gases um weitere 158 K erhöht wird. Es könnte dann innerhalb der Zeit in der das Gas durch die Messkammer strömt 90 % des Propans in andere Moleküle zerlegt werden. Ein weiterer Ansatz könnte sein, die Verweilzeit der Teilchen in dem Sensor zu erhöhen und so mehr Reaktionsprodukte zu erhalten. Eine längere Verweilzeit hat, im Vergleich zur Temperatur, einen deutlich geringeren Effekt auf die Umwandlungsrate.



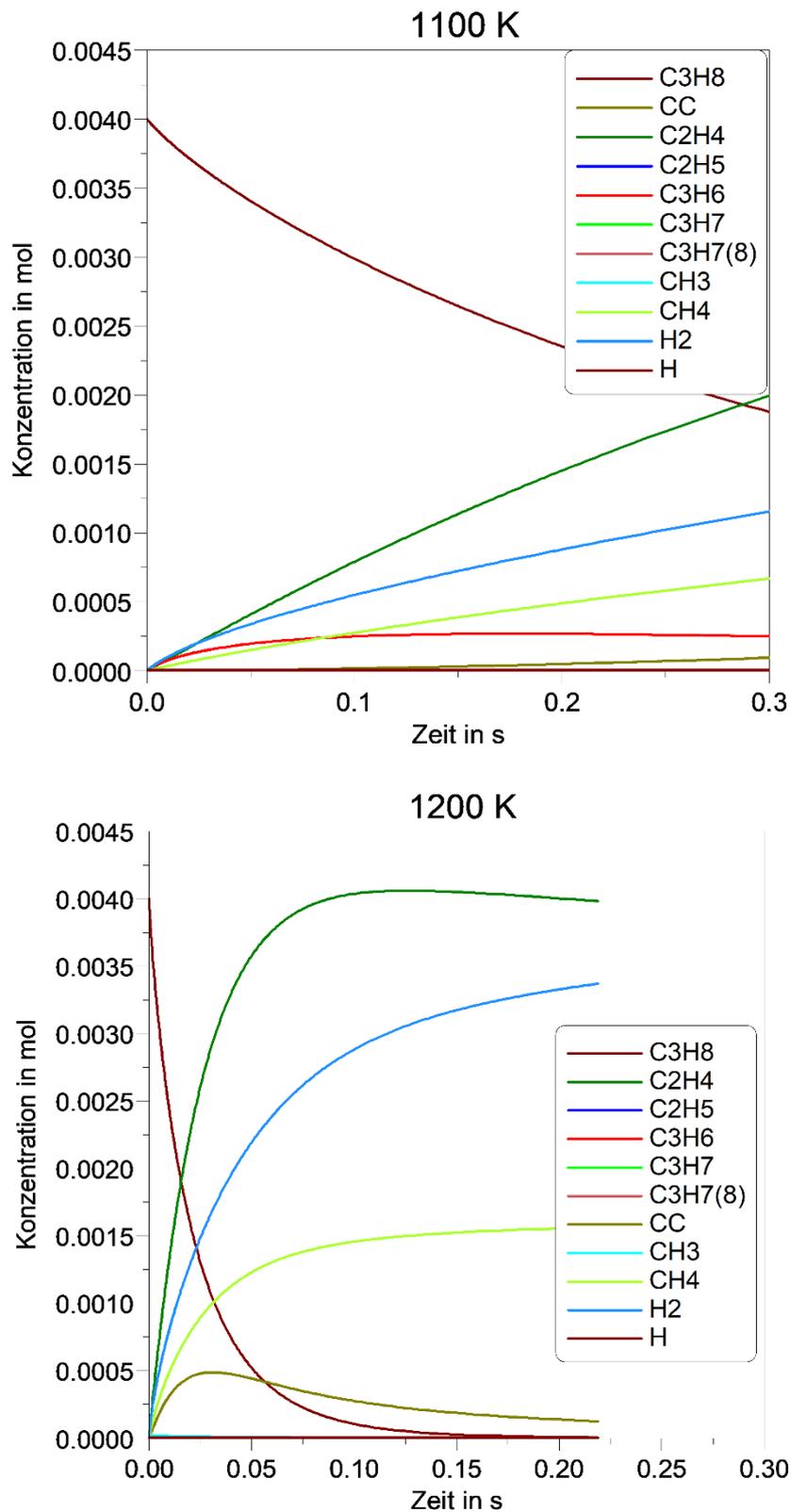


Abbildung 42: Menge der Reaktionsprodukte über die Zeit, bei Erhitzung von Propan, Startbedingung sind 4000 ppm bzw. 0,0027 Mol Propan, Simulationszeit von 0,5 s. (a) bei 1000 K Gastemperatur, (b) bei 1100 K Gastemperatur und (c) bei 1200 K Gastemperatur.

Die bisherigen Untersuchungen sind ohne Sauerstoff durchgeführt. Im realen Betrieb kann das Messgas abhängig vom Luftverhältnis ein Sauerstoffanteil im Prüfgas (z. B. Abgas oder Umgebungsluft) aufweisen. Durch die Oxidation entstehen weitere Zwischen- und Endprodukte. In der Simulation wird die Gaszusammensetzung zu 0,004 Mol Propan, 0,01 Mol Sauerstoff und 0,986 Mol Stickstoff geändert. Somit befindet sich 1 % Sauerstoff im Prüfgas. In Abbildung 44 ist das Flussdiagramm der nacheinander ablaufenden Reaktionen, ausgehend von Sauerstoff und Propan dargestellt. Stickstoff nimmt wie erwartet an keiner Reaktion teil. Bekannte Moleküle die bei einer Verbrennung als Ionen vorkommen sind:  $\text{CHO}^+$  und  $\text{CHO}_2^+$  [34]. Bei der simulierten Oxidation sind nach 0,075 s Simulationszeit ca.  $1,85 \times 10^{-8}$  mol (0,0185 ppm)  $\text{CHO}$  und  $1,05 \times 10^{-17}$  mol ( $1,05 \times 10^{-11}$  ppm)  $\text{CHO}_2$  in der Messkammer. Diese müsste die Ionenstrommesstechnik messen, wurden jedoch während des durchgeführten Vorhabens aus zeitlichen Gründen nicht untersucht.

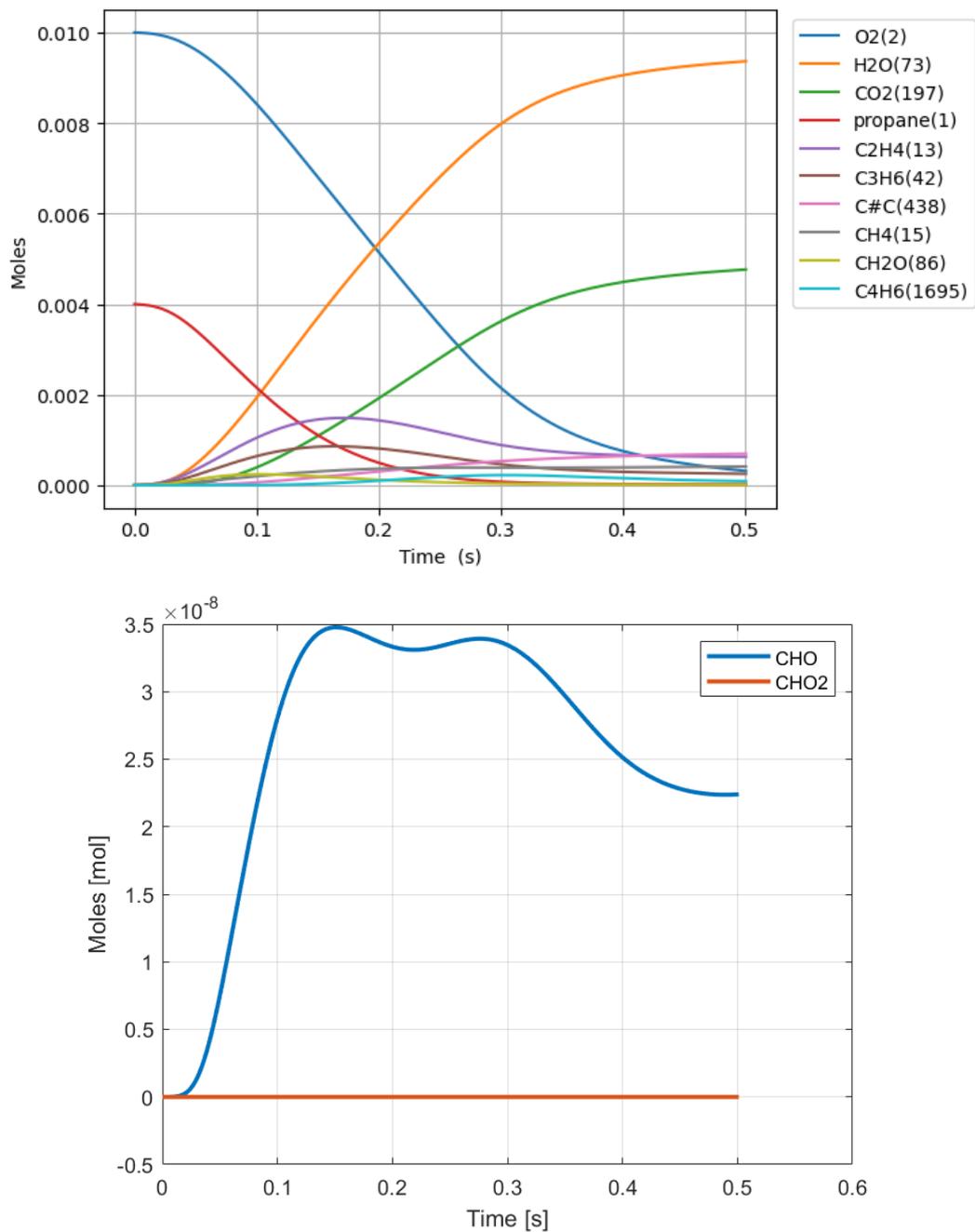


Abbildung 43: Menge zehn meistvorkommenden Reaktionsprodukte über die Zeit (oben), Menge der Reaktionsprodukte die nach [34] als Ionen vorkommen, bei 0,01 Mol Sauerstoff, 0,986 Mol Stickstoff, 1050 K Gastemperatur.

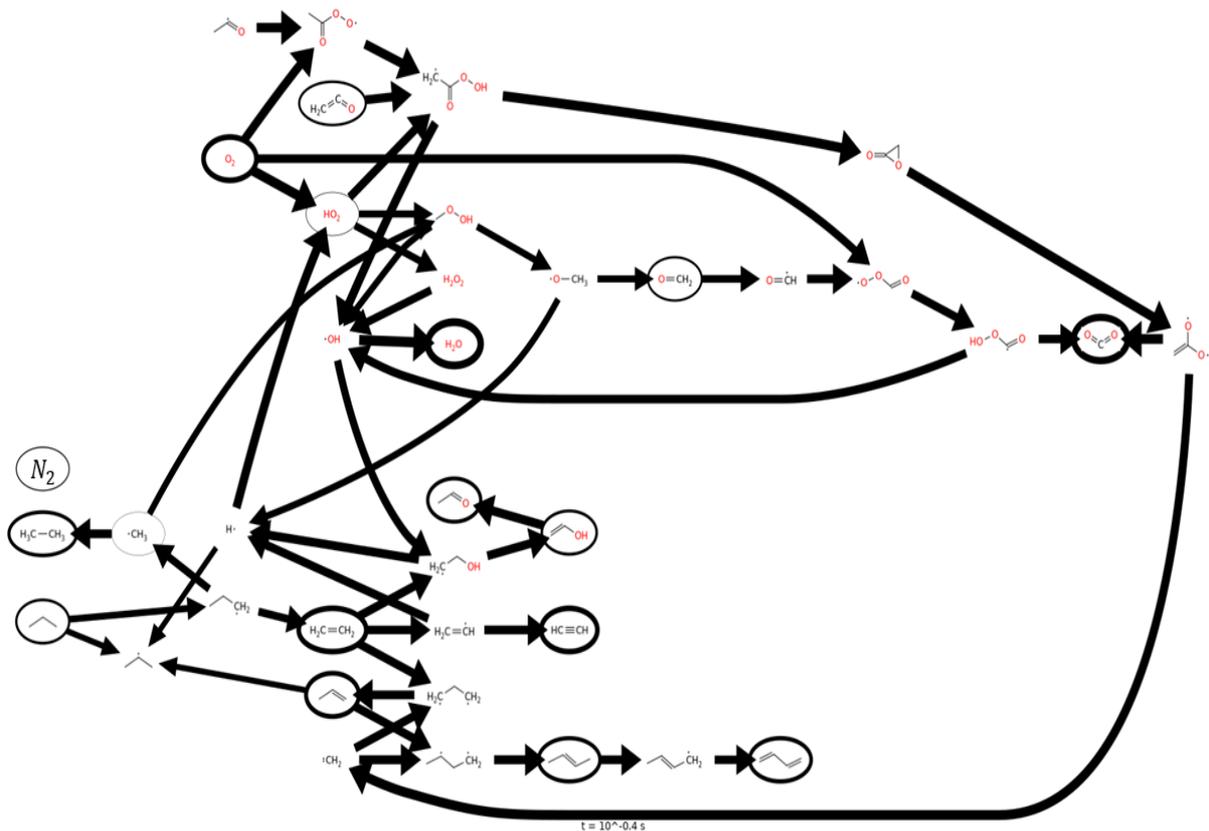


Abbildung 44: Flussdiagramm der chemischen Hauptreaktionen, bei 0,004 Mol Propan, 0,01 Mol Sauerstoff, 0,986 Mol Stickstoff, 1050 K Gastemperatur.

## Fazit

Das Vorhaben Portable HC-Tracker beabsichtigte die Untersuchung eines neuartigen Kohlenwasserstoffsensorenprinzips. Ein Laborprototyp aus einem abgeschlossenen Projekt sollte weiterentwickelt und untersucht sowie hinsichtlich seiner Eignung für eine echtzeitfähige motorische Abgasmessung bewertet werden.

Im Rahmen des berichteten Vorhabens sollen zunächst unter anderem der Ionisationsvorgang durch die Verbesserung der Gasführung sowie der Ionisierungsspannung intensiviert werden. Durch begleitende numerische Untersuchungen ist es gelungen, bessere Ionisationsbedingungen durch eine höhere räumlich gemittelte Temperatur in der Messkammer zu ermöglichen. Des Weiteren wurde die vorhandene Ionenstrommesstechnik weiterentwickelt, so dass eine höhere Elektrodenspannung (bis zur Grenze des elektrischen Durchschlags) und somit ein stärkeres elektrisches Feld in der Messkammer herrscht.

Darauffolgend wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen mit dem entwickelten Konzept mit Probegasen durchgeführt. Erste Untersuchungen mit dem Portable HC-Tracker haben

gezeigt, dass das überarbeitete Konzept eine Verbesserung zum vorhandenen Prototyp aufweist. Der neue Prototyp (P2) ist fähig, Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Konzentrationen zu unterscheiden. Jedoch weitere Versuche haben nachgewiesen, dass der Prototyp eine Signaldrift aufweist. Wiederholungsversuche haben gezeigt, dass die gemessenen Ionenströme bei gleichen Bedingungen nicht reproduzierbar und teilweise nicht plausibel sind. Auch die Versuche mit realem Abgas haben bestätigt, dass das Konzept in der hier untersuchten Form noch nicht ausreichend robust ist.

Den Untersuchungen zur Folge wurde eine eingehende Recherche des grundlegenden Ionisationsvorgangs unternommen, welche gezeigt haben, dass der thermische Ionisationsvorgang nicht stattfinden könne. Thermische Ionisation, wie sie mit der Saha-Langmuir-Gleichung beschrieben werden kann, findet bei einem Wasserstoffatom (einfaches Atom mit einem Elektron) erst ab einer Temperatur von ca. 4700 °C statt. Verglichen mit der Temperatur in der Messkammer (ca. 770 °C), soll thermische Ionisation nicht stattfinden. Um die bei den experimentellen Untersuchungen gemessenen Ionenströme begründen zu können, wurde die Reaktionskinetik unter den Messkammerbedingungen untersucht. Diese haben gezeigt, dass eine temperaturabhängige chemische Ionisation stattfindet. Der numerischen Untersuchung nach sind die Ionisationsbedingungen im HC-Tracker noch unzureichend, die Aufheizung des Messgases durch den Glühstift an der Schwelle zur Ionisierung liegt. Dies begründet aber nicht vollständig, weshalb die Messungen nicht reproduzierbar sind.

Es lässt sich daraus schließen, dass eine grundlegende Forschung zu den Ionisationsvorgängen maßgebend ist, um ein besseres Verständnis über den physikalischen Vorgang zu erhalten. Derzeit ist das Konzept des Portable HC-Trackers noch nicht ausgereift genug, um eine Serienentwicklung anzustreben.

Nach den neulich veröffentlichten Vorschlägen der Europäischen Kommission zu den Euro-7-Richtlinien [42] werden aktuell noch keine Vorschriften zu den Messungen von Kohlenwasserstoffen unter realen Fahrtbedingungen auf Straßen vorgeschrieben.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Xiaomeng, W. et al.:** *On-road measurement of gaseous emissions and fuel consumption for two hybrid electric vehicles in Macao. Atmos. Poll. Res. 65 (September 2015).* <https://doi.org/10.5094/APR.2015.095>
- [2] Stellungnahme zur Sachverständigenanhörung des 5. Untersuchungsausschusses der 18. Wahlperiode, 2016. [https://www.bundestag.de/resource/blob/438810/c839e62d8bd179d5f02a80b51dd0afb5/sv\\_1\\_beidl-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/438810/c839e62d8bd179d5f02a80b51dd0afb5/sv_1_beidl-data.pdf)
- [3] **Giechaskiel, B., Clairotte, M.:** *Fourier Transformation Infrared (FTIR) Spectroscopy for Measurements of Vehicle Exhaust Emissions: A Review, Journal of Applied Sciences, 2021, 11, 7419.* <https://doi.org/10.3390/app11167416>
- [4] **Prokopiuk, A.:** *Optoelectronics sensors for hydrocarbon based on NDIR technique, Proceedings 12th Integrated Optics – Sensors, Sensing Structures and Methods Conference, 2017.* <https://doi.org/10.1117/12.2282779>
- [5] HITRAN Datenbank: *High-resolution transmission molecular absorption database.* [Online]: <https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
- [6] **Samaras, Z. et al.:** *Additional Technical Issues for Euro 7 (LDV). In Proceedings of the AGVES Webinar, Brussels, Belgium, 27 April 2021.*
- [7] **Suarez-Bertoa, R. et al.:** *Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions. Atmosphere 2020, 11, 204.*
- [8] **Gross, J.:** *Mass Spectrometry, A Textbook, 3rd Edition, Heidelberg, Springer Vieweg, 2017.* DOI: 10.1007/978-3-319-54398-7
- [9] **Meschede, D.:** *Gerthsen Physik, 25. Auflage, Bonn, Springer Spektrum, 2015.* DOI 10.1007/978-3-662-45977-5
- [10] **Scholl, F.:** *Study of Premixed Combustion Induced by Controlled Hot Surface Ignition in Stationary Gas Engines, Doctoral Dissertation, University of Valladolid, 2017.*
- [11] **Judith, J. et al.:** *Abschlussbericht Ion-HCS, Entwicklung eines ionenstrombasierten, echtzeitfähigen Miniatur-HC-Sensors, 2018.*
- [12] **Förster, J. et al.:** *An autonomous flame ionization detector for emission monitoring, Journal of Sensors and Sensor Systems, 2019.* <https://doi.org/10.5194/jsss-8-67-2019>
- [13] Verordnung (EU) 2017/1151 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6).
- [14] **Holm, T.:** *Aspects of the mechanism of the flame ionization detector, Journal of Chromatography, 1999.*

- [15] **Noyes, A., Wilson, H.:** *The Thermal Ionization of Gaseous Elements at High Temperatures: A Confirmation of the Saha Theory*, American Astronomical Society, 1923.
- [16] **Dresser, M. J.:** *The Saha-Langmuir Equation and its Application*, *Journal of Applied Physics* 39, 1968. <https://doi.org/10.1063/1.1655755>
- [17] **Saha, M. N.:** *Ionization in the solar chromosphere*, *Philosophical Magazine Series* 6, 1920. <https://doi.org/10.1080/14786441008636148>
- [18] **Saha, M. N.:** *On a physical theory of stellar spectra*, *Proc. R. Soc. Lond.* A99135–153, 1921. <https://doi.org/10.1098/rspa.1921.0029>
- [19] DIN EN ISO 8178-4:1996: Hubkolben-Verbrennungsmotoren Abgasmessung (ISO 8178:1996)
- [20] **Meeker, D.:** Finite Element Method Magnetics (FEMM).
- [21] **Salim, N. et al.:** *Portable HC-Tracker: Development of a Flameless Method for Mobile Hydrocarbon Measurement in Vehicle Exhaust*, *Journal 21. International Stuttgarter Symposium, 2021*. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-33521-2\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-658-33521-2_29)
- [22] **Kessler, D. et al.:** *Entwicklung und Konstruktion eines Ionenstrommessgerätes mit Versuchsdurchführung und Auswertung an einem Gasmotor*, Projektarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2014.
- [23] **Testa GmbH:** FID 123 – Analysator zur Messung von Gesamt-Kohlenwasserstoffen.
- [24] **J.U.M. Engineering GmbH:** Gesamt Kohlenwasserstoff Analysator – Beheizter FID VE 7.
- [25] **FMI Fachverband Mineralwollindustrie e.V.:** Ohne Isolierung geht es nicht: Mineralwolle im Backofen [Online] <https://www.der-daemmstoff.de/mineralwolle-im-backofen/> zugegriffen am 04.12.2021.
- [26] **Heeg, R.:** *Konzeptionierung und Entwicklung einer thermisch isolierenden Messkammer für einen Kohlenwasserstoffsensoren*, Bachelorarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2022.
- [27] **Paschen, F.:** *Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz*, *Annalen der Physik*, vol. 273, no. 5, pp. 69 – 96, 1889. doi:10.1002/andp.18892730505
- [28] **Reece R. J.:** *Industrial Plasma Engineering Volume 1: Principles*. IoP (Institute of Physics Publishing) Bristol and Philadelphia, Department of Electrical and Computer Engineering University of Tennessee, Knoxville, 1995. 2, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 50.
- [29] **Küchler, A.:** *Hochspannungstechnik*, Springer, Schweinfurt, 2009. 9, 11, 14, 16, 17, 19, 20.
- [30] **Müller, M. A.:** *Entwicklung und Durchführung von Versuchsreihen zur Analyse der Querempfindlichkeit eines Kohlenwasserstoffsensors*, Bachelorarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2023.

- 
- [31] **Merker et al.:** *Verbrennungsmotoren: Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*, 3. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [32] University of Wisconsin-Madison: Ionization of Hydrogen, Revision 1.2.
- [33] National Institute of Standards and Technology Chemistry Webbook: Propane. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74986&Mask=20#Ion-Energetics> [online] Zugriff am 10.09.2022.
- [34] **Wilstermann H.:** *Wechselspannungszündung mit integrierter Ionenstrommessung als Sensor für die Verbrennungs- und Motorregelung*, VDI Verlag Düsseldorf, 1999.
- [35] Ersatec GmbH: Das FID-Prinzip, 2022. <https://ersatec.com/de/das-fid-prinzip/>
- [36] Jasco Inc.: FTIR-Spectroscopy – Fundamental Theory and Applications, 2022. [online] <https://jascoinc.com/learning-center/theory/spectroscopy/fundamentals-ftir-spectroscopy/>
- [37] GHM Messtechnik GmbH: Kompakter CO2 Monitor mit Alarm.
- [38] National Institute of Standards and Technology Chemistry Webbook: Hydrogen. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=1333-74-0> [online] Zugriff am 01.12.2022.
- [39] **Kettner, M.:** *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Optimierung der Entflammung von mageren Gemischen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung*, Dissertation, Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen, Band 1, Logos Verlag, 2006.
- [40] **Valverde, M. V. & Bonnel P.:** *On-road testing with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) - Guidance note for light-duty vehicles, EUR 29029 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-77345-7, doi:10.2760/08294, JRC109812.*
- [41] **Massachusetts Institute of Technology & Northeastern University:** Reaction Mechanism Generator (RMG). <https://rmg.mit.edu/> [online] Zugriff am: 20.11.2022.
- [42] **European Commission:** Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No. 595/2009.

## Anhang

### A1 Funktionsweise eines Flammenionisationsdetektors (FID)

In der aktuellen europäischen Gesetzgebung wird der Kohlenwasserstoffgehalt in Fahrzeugabgasen (vorwiegend auch für Blockheizkraftwerke) mit Hilfe von dem Flammenionisationsdetektor (FID) ermittelt.

Eine vereinfachte Funktionsweise und genereller Aufbau eines FIDs kann der **Abbildung** entnommen werden. Ein Probengas wird durch den FID in die Messkammer zugeführt. Im Inneren wird eine Knallgasflamme (Verbren-

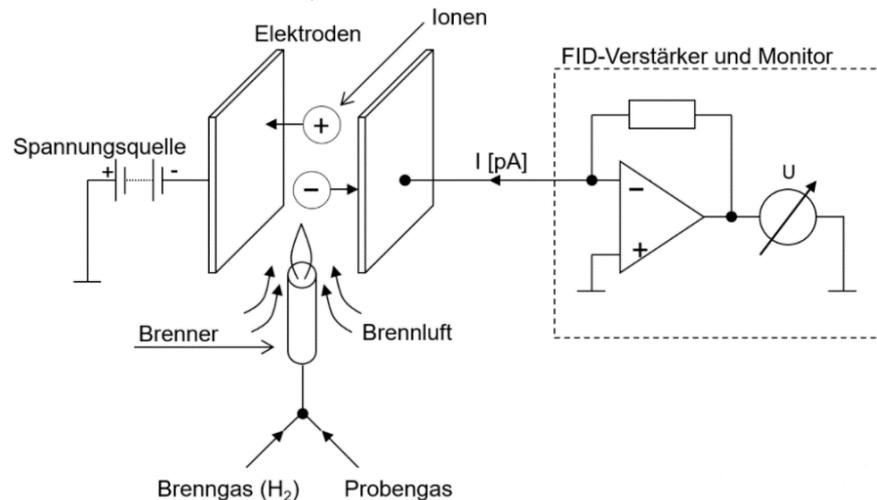


Abbildung A1: Aufbau eines FIDs [35]

nung von Wasserstoff und Sauerstoff) gezündet, mit der das Probengas verbrannt wird. Durch die Erwärmung und den Oxidationsprozess (Kombination von chemischer und thermischer Ionisation) in der Messkammer entstehen Ionen, welche aufgrund der freien Bewegung im elektrischen Feld in der Messkammer einen Strom erzeugen können. Durch einen Signalverstärker wird dieser Strom verstärkt und schließlich mit dem HC-Gehalt des Probengases korreliert.

Trotz der robusten Eigenschaft des FIDs bringt dieses Verfahren auch Risiken mit sich. Beispielsweise ist es für die dynamische Messung von Kohlenwasserstoffen

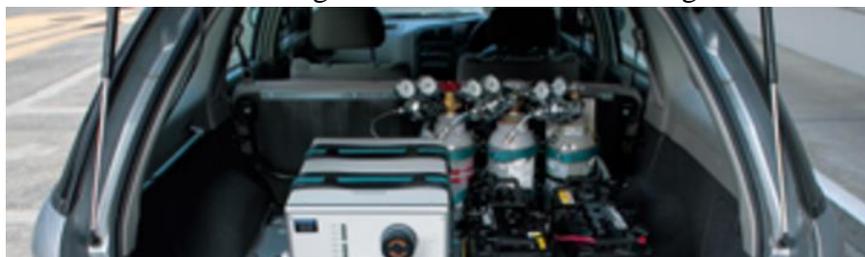


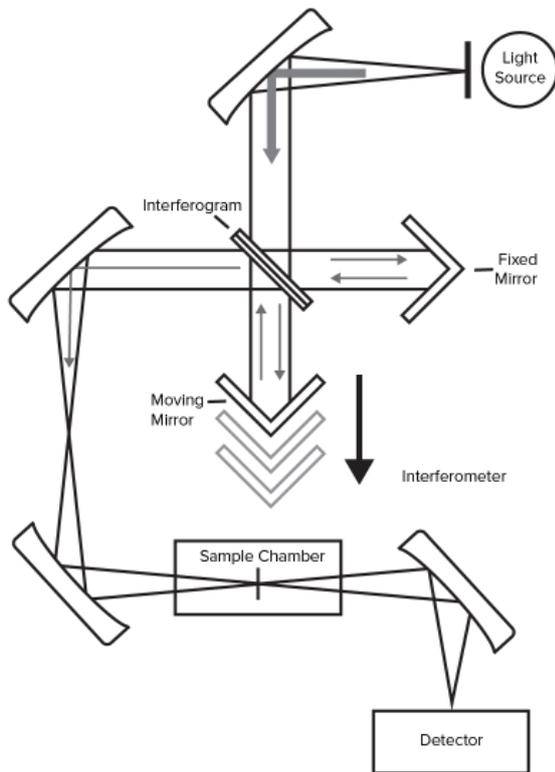
Abbildung A2: Das weltweit erste On-Board-Emissionssystem von Horiba Ltd. (Mitführen von Gasflaschen notwendig) [36]



unter realen Fahrtbedingungen ungeeignet, da das Mitführen von Wasserstoff in Hochdruckflaschen ein hohes Sicherheitsrisiko ist. Es wurden einige Untersuchungen mit portablen Emissionsmesssystemen für die Analyse von Kohlenwasserstoffen durchgeführt, welche sich aber nicht durchgesetzt haben (siehe **Abbildung A2**).

## A2 Funktionsweise eines Fourier-Transformation Infrarot-Messgerätes (FTIR)

Ein anderes Messprinzip, das häufiger bei Blockheizkraftwerken angewendet wird, ist das Fourier-Transformation-Infrarot-Messverfahren oder kurz FTIR. Das FTIR wird in diesem Fall häufiger verwendet, da bei der Abgasüberwachung von BHKWs die Konzentration von Methangasen von größerem Interesse ist, dessen



Messung mit dem FTIR geeigneter ist.

Ein FTIR besteht hauptsächlich aus einer IR-Lichtquelle, einem Interferometer und einem Detektor (siehe **Abbildung**). Der Lichtstrahl aus der Quelle wird halbiert, wobei eine Hälfte einem festen Spiegel und die andere Hälfte einem beweglichen Spiegel gerichtet wird. Beide Strahlen werden wieder kombiniert, welches zur Lichtwellenüberlagerung führt. Schließlich wird der kombinierte Lichtstrahl auf das Probegas gerichtet, bei dem ein Teil der Wellenlänge absorbiert wird. Der resultierende Lichtstrahl wird von einem Detektor aufgenommen und in ein messbares Signal umge-

wandelt.

Das FTIR-Verfahren bietet als Vorteil die

Möglichkeit mehrere Gaskomponenten gleichzeitig zu messen. Zudem ist das FTIR ein zerstörungsfreies Verfahren, d.h. das Gas wird nicht in anderen Molekülen umgewandelt. Dieses Verfahren hat trotzdem den Nachteil, dass die Fourier-Transformation eine hohe Rechenleistung benötigt, was zu längeren Messpunkten führt. Zudem werden unterschiedliche Lichtquellen benötigt, um die Empfindlichkeit des Sensors zu erhöhen. Außerdem sind FTIR-Messtechniken im Vergleich zu anderen Messverfahren relativ störanfällig. Feuchte oder kontaminierte (Partikel) Gase können dazu führen, dass die IR-Lichtquelle oder sonstige empfindliche Teile beschädigt werden.

Abbildung A3: Aufbau eines FTIR-Spektrometers [35].

### A3 Funktionsweise eines nichtdispersiven Infrarot-Messgerätes (NDIR)

Analog zu dem FTIR-Verfahren wird ein ähnliches Verfahren für die Messung von Kohlenwasserstoffen verwendet, nämlich das nicht-dispersive Infrarot-Messverfahren (NDIR). Der grundlegende Aufbau eines Sensors, der nach diesem Messprinzip arbeitet, kann der Abbildung A4 entnommen werden.

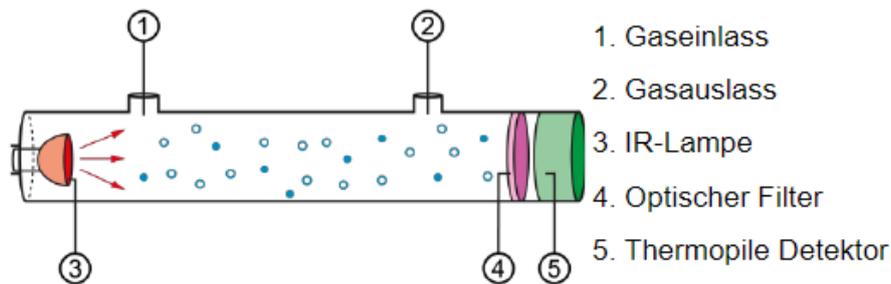


Abbildung A4: Aufbau eines NDIR-Sensors [36].

Bei diesem Prinzip wird eine IR-Lichtquelle so fokussiert, so dass ein optischer Strahl entsteht, der die in der Messkammer vorhandenen Gase durchdringt. Dabei wird eine bestimmte Länge des IR-Lichts von den Gasmolekülen absorbiert. Ein optischer Filter wird eingesetzt, um die restlichen Wellenlängen zu absorbieren, wobei nur ein vorbestimmtes Gas detektiert wird. Im Vergleich zu dem FTIR werden daher NDIR-Sensoren nur für den Nachweis bestimmter Gase eingesetzt [36].

### A4 Vorhabenszeitplan

Portable HC-Tracker		2020					2021											
		8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>AP1 - Vorarbeiten</b>																		
AP1.1	Recherche (Grundlagen + Anwendung)																	
<b>AP2 - Verbesserung der Ionisierung</b>																		
AP2.1	Optimierung der Messkammergeometrie																	
AP2.2	Optimierung der Gasführung																	
AP2.3	Konstruktion und Untersuchungen zur Messspannung																	
<b>AP3 - Ionisierbarkeit und Querempfindlichkeiten</b>																		
AP3.1	Ionisierbarkeit verschiedener Kohlenwasserstoffe																	
AP3.2	Untersuchungen zur Sauerstoff-Querempfindlichkeiten																	
<b>AP4 - Untersuchungen mit realen Motorabgasen</b>																		
AP4.1	Untersuchungen bei trockenen Bedingungen																	
AP4.2	Untersuchungen bei feuchten Bedingungen																	
AP4.3	Einsatzbarkeitsbewertung und Optimierungspotential																	
<b>AP5 - Dokumentation und Veröffentlichung</b>																		
AP5.1	Dokumentation und Veröffentlichung																	

Legende		Angepasster Zeitraum der Arbeitspakete
		
		

Abbildung A 1: Vorhabenszeitplan Teil 1

Portable HC-Tracker		2022												2023			Durchführend
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
<b>AP1 - Vorarbeiten</b>																	
AP1.1	Recherche (Grundlagen + Anwendung)																
<b>AP2 - Verbesserung der Ionisierung</b>																	
AP2.1	Optimierung der Messkammergeometrie																
AP2.2	Optimierung der Gasführung																
AP2.3	Konstruktion und Untersuchungen zur Messspannung																
<b>AP3 - Ionisierbarkeit und Querempfindlichkeiten</b>																	
AP3.1	Ionisierbarkeit verschiedener Kohlenwasserstoffe																
AP3.2	Untersuchungen zur Sauerstoff-Querempfindlichkeiten																
<b>AP4 - Untersuchungen mit realen Motorabgasen</b>																	
AP4.1	Untersuchungen bei trockenen Bedingungen																
AP4.2	Untersuchungen bei feuchten Bedingungen																
AP4.3	Einsatzbarkeitsbewertung und Optimierungspotential																
<b>AP5 - Dokumentation und Veröffentlichung</b>																	
AP5.1	Dokumentation und Veröffentlichung																

Legende		*Ursprüngliches Projektende
		Verzögerte Arbeitspakete

Abbildung A 2: Vorhabenszeitplan Teil 2

## A5 Messstellenauflistung

Bezeichnung	Erklärung	Einheit
Electrode Voltage	Elektroden <span>spannung</span>	V
Gas Flow Set	Eingestellter Regeldurchfluss	l/h
Valve Output	Ventil <span>öffnung</span>	%
Measured Gas Flow	Gemessener Durchfluss	l/h
Glow Plug Voltage	Spannung Keramikglühkerze	V
Glow Plug Current	Strom Keramikglühkerze	A
Glow Plug Resistance	Widerstand Keramikglühkerze	Ohm
Glow Plug Power	Leistung Keramikglühkerze	W
Ion Current in V	Ionenstromsignal	V
Ion Current in $\mu$ A	Ionenstrom	A
Ion Current Amplifier	Verstärkung Ionenstromsignal	$\mu$ A/V
Ion current filtered	Ionenstrom gefiltert	A
$T_{GK, Gas}$	Temperatur am Messkammereintritt	$^{\circ}$ C
$T_{GK, Sleeve}$	Temperatur an der Glühkerzenhülse (Keramikglühkerze)	$^{\circ}$ C
$T_{Inlet}$	Einlasstemperatur (Gas)	$^{\circ}$ C
$T_{Rod, outlet}$	Temperatur am Messkammeraustritt	$^{\circ}$ C
$T_{Rod, electrode}$	Temperatur an der Glühkerzenhülse (Metallglühkerze)	$^{\circ}$ C
$T_{Outlet}$	Auslasstemperatur	$^{\circ}$ C
$T_{Heizkammer}$	Heizkammertemperatur	$^{\circ}$ C
$T_{Sensor}$	Temperatur Sensorgehäuse	$^{\circ}$ C
$p_{Einlass}$	Einlassdruck	bar
$p_{Auslass}$	Auslassdruck	bar
$p_{Umgebung}$	Umgebungsdruck	bar
Metal Glow Plug Voltage	Spannung Metallglühkerze	V
Metal Glow Plug Current	Strom Metallglühkerze	A
Metal Glow Plug Resistance	Widerstand Metallglühkerze	Ohm
Metal Glow Plug Power	Leistung Metallglühkerze	W

