

On-board Sensorik zur Erkennung der Kraftstoffzusammensetzung

Martin Unglert¹

¹ Hochschule Coburg

Abstract

In this work, a design of an on-board sensor system for fuel composition detection is presented. This sensor consists of three individual measurement devices. Each device is presented with individual application scenarios. Based on two data sets on gasoline and diesel fuels, a mathematical data evaluation is carried out using partial least squares method. This evaluation is based on near infrared spectroscopy and dielectric relaxation spectroscopy. Based on the data sets, previously unknown fuels can also be examined using signal combinations. The accuracy of the prediction is determined by comparison with measured fuels.

1. Einleitung

Die im Zusammenhang mit der zunehmenden Mobilität entstehenden Umweltbelastungen müssen verringert werden. Die Agenda der Gesetzgebung westlicher Länder sieht schon seit langem vor, Themen wie Minderung der Schadstoffemissionen, Reduzierung der CO₂-Emission und Einführung emissionsfreier Gebiete anzugehen. Politisch und medial oft propagiert sind Elektrofahrzeuge, die zunehmend Marktanteile gewinnen konnten. Die Reichweiten von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen sind aber derzeit noch begrenzt. Schätzungen zufolge wird der Anteil der reinen Elektrofahrzeuge in den nächsten Jahrzehnten nur bei ca. 5 % liegen.^[1] Mittelfristig könnten hier Plug-in Hybridfahrzeuge, eine Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, als Brückentechnologie dienen. In ihnen werden die Vorteile beider Technologien kombiniert: So kann lokal emissionsfrei gefahren und eine hohe Reichweite gewährleistet werden. Wird das Fahrprofil eines repräsentativen Europäischen Arbeitnehmers betrachtet, so zeigt sich, dass der überwiegende Anteil (ca. 80 %) aller gefahrenen Kilometer Kurzstrecken sind (<50 km)^[2]. Beispielsweise die Fahrt zur Arbeit oder für den Einkauf. Hier würde der alleinige Elektrobetrieb ausreichen. Für die restlichen 20 %, z.B. Autobahnfahrten, wird der Verbrennungsmotor unterstützend zugeschaltet. Die kurzen Fahrtzyklen im Alltag machen es möglich, den Akkumulator stationär am Stromnetz aufzuladen. Dies hat zur Folge, dass der Kraftstoff in Plug-in Hybridfahrzeugen weit kritischeren Bedingungen ausgesetzt ist als bisher. Es ist mit einer erhöhten Verweilzeit des Kraftstoffes im Tank zu rechnen, die zu Veränderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Kraftstoffes führen kann.

Ein weiterer Aspekt, der nicht nur Plug-in Hybride betrifft, sondern Verbrennungsmotoren im Allgemeinen, ist die variable Kraftstoffzusammensetzung innerhalb der Normen DIN EN 590 und DIN EN 228. Die DIN EN 590 regelt die Dieselmotorkraftstoffqualität und die DIN EN 228 die

Qualität von Ottokraftstoffen. Trotz vorgegebener Grenzwerte kann innerhalb dieser mit einer variablen Zusammensetzung gerechnet werden. So sind Unterschiede im Verzweigungsgrad der Alkane, aber auch im Aromatengehalt sehr wahrscheinlich. Oftmals sind diese Unterschiede durch die Erdöllagerstätte vorgegeben und können nur begrenzt beeinflusst werden. Außerdem werden zur Anpassung der Kältestabilität im Winter die Zusammensetzung von Dieselmotorkraftstoff optimiert. Weiterhin sind Biokraftstoffe der 1. Generation nach wie vor weltweit sehr stark vertreten. Diese werden aufgrund ihrer unterschiedlich hohen Beimischungsquoten^[3], aber auch stark schwankenden Qualitäten, zumindest aus Sicht der Automobilhersteller, als kritisch betrachtet. Diese Variabilität führt zu unterschiedlichen Cetanzahlen bzw. Octanzahlen und das Brenn- und Emissionsverhalten kann sowohl negativ als auch positiv beeinflusst werden. Um das Treibhausminderungspotential weiter auszubauen, sind außerdem synthetische Kraftstoffe, die teilweise oder ganz aus regenerativem Strom hergestellt werden können, zunehmend in der Diskussion. Synthetische Kraftstoffe wie PtL Kraftstoffe (Power-to-liquid) haben gemein, dass größtenteils aromatenfrei sind und nur in ihrer Alkanzusammensetzung variieren. Sie können fossilen Kraftstoffen beigemischt werden und damit zur CO₂-Reduktion beitragen.^[4] Unter den synthetischen Kraftstoffen sind jedoch auch Kraftstoffe zu finden, die in ihrer chemischen Struktur deutlich von fossilen Kraftstoffen abweichen. Diese sauerstoffhaltigen Kraftstoffe wie OME (Oxymethylenether) können erheblich zur Emissionsminderung beitragen.^[5] Um fossile Kraftstoffe zukünftig zu ersetzen, müssen unterschiedliche Rohstoffquellen zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe verwendet werden. Daraus resultieren Kraftstoffe, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung stark unterscheiden können. Für eine optimale Verbrennung müssen die Kraftstoffkomponenten bzw. die Kraftstoffzusammensetzung zukünftig erkannt werden, damit das Motormanagement optimal eingestellt werden kann.

2. Material und Methode

2.1 Permittivität

Die Messung der relativen Permittivität erfolgen mit einem Zylinderkondensator. Der Sensor ist mit einem Impedanzanalysator (Keysight E4990A) verbunden, der die Kapazität und den Verlustfaktor bestimmt. Alle Messungen werden bei einer Temperatur von 25 °C (± 0.1 °C) und bei einer Frequenz von 1 MHz gemessen. Die relative Permittivität ist durch den Quotient der Kapazität des Mediums $C(\omega, T)$ und der Leerkapazität $C_0(\omega, T)$ definiert, wobei ω die Frequenz der Wechselspannung und T die Temperatur ist (Gleichung 1).

$$\epsilon_r'(\omega, T) = \frac{C(\omega, T)}{C_0(\omega, T)} \quad (1)$$

Die Permittivität ist zudem eine komplexwertige Funktion, die sich aus Realteil $\epsilon_r'(\omega, T)$ und Imaginärteil $\epsilon_r''(\omega, T)$ zusammensetzt (Gleichung 2). Der Realteil (relative Permittivität) wird

durch die Polarisierungseffekte beeinflusst, wohingegen der Imaginärteil $\epsilon_r''(\omega, T)$ die dabei auftretenden Polarisations- und Leitfähigkeitsverluste wiedergibt.

$$\epsilon_r(\omega, T) = \epsilon_r'(\omega, T) - j\epsilon_r''(\omega, T) \quad (2)$$

2.2 Nahinfrarotspektroskopie

Die Nahinfrarotspektroskopie erfasst für die Auswertung der Kraftstoffzusammensetzung wichtige Informationen bei der Wellenlänge 2177 nm im Nahinfrarotspektrum. Hier werden zum Beispiel Informationen über die aromatische C-H Schwingung, die Kombinationsschwingung aus C-H und CH₂ bzw. CH₃ sowie die OH Schwingungsbande der Alkohole detektiert. Zudem erfasst sie zu einem kleinen Teil die Carbonylschwingungsbande, die ihr Maximum bei ca. 2144 nm hat. Die Nahinfrarotspektren wurden mit einem NIRS XDS Rapid Liquid Analyzer der Firma Methrom durchgeführt. Als Lichtquelle wurde ein Xds Monochromator Type XM – 1000 eingesetzt. Die Proben wurden mit 8 mm Küvetten in einem Messbereich von 400 nm bis 2400 nm bei 35 °C aufgenommen. Die Auswertung erfolgte mit der Software VISION 4.0.3.0. Nahinfrarotspektroskopie basiert auf Oberton- bzw. Kombinationsschwingungen der Molekülgrundschwingung, die zu breiten Absorptionsbanden und Überlagerungen führt. Aus diesem Grund werden die Nahinfrarotdaten mit Multivarianten Verfahren weiter interpretiert.

2.3 Partial-Least-Square Auswertung

Als multivariantes Verfahren werden die Nahinfrarotdaten mit Hilfe der Partial-Least-Square Auswertungen (PLS) interpretiert. Die PLS wird mit der Software RStudio Version 1.2.1335 durchgeführt (Pakete readxl und pls).

3. Einsatzort der on-board Sensorik

Das Projekt „BioFuelAblSens“ zur Entwicklung einer Sensorik, die für onboard Anwendungen geeignet ist, umfasst drei verschiedene Messprinzipien. Die Messprinzipien umfassen die zwei optische Analyseverfahren Nahinfrarotspektroskopie und Fluoreszenzspektroskopie, sowie die dielektrische Relaxationsspektroskopie und sind anhand zweier Sensoren (ein optischer und eine dielektrischer) implementiert. Aus den Eigenschaften der Messprinzipien ergeben sich für die einzelnen Sensoren in einer theoretischen Betrachtung spezielle Einsatzszenarien im Automobil, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Es ergeben sich drei Einsatzorte, bei denen die Integration der Sensorik realisierbar wäre: Im Kraftstofftank, im Tankstutzen und/oder in der Kraftstoffzuleitung (Abbildung 1).

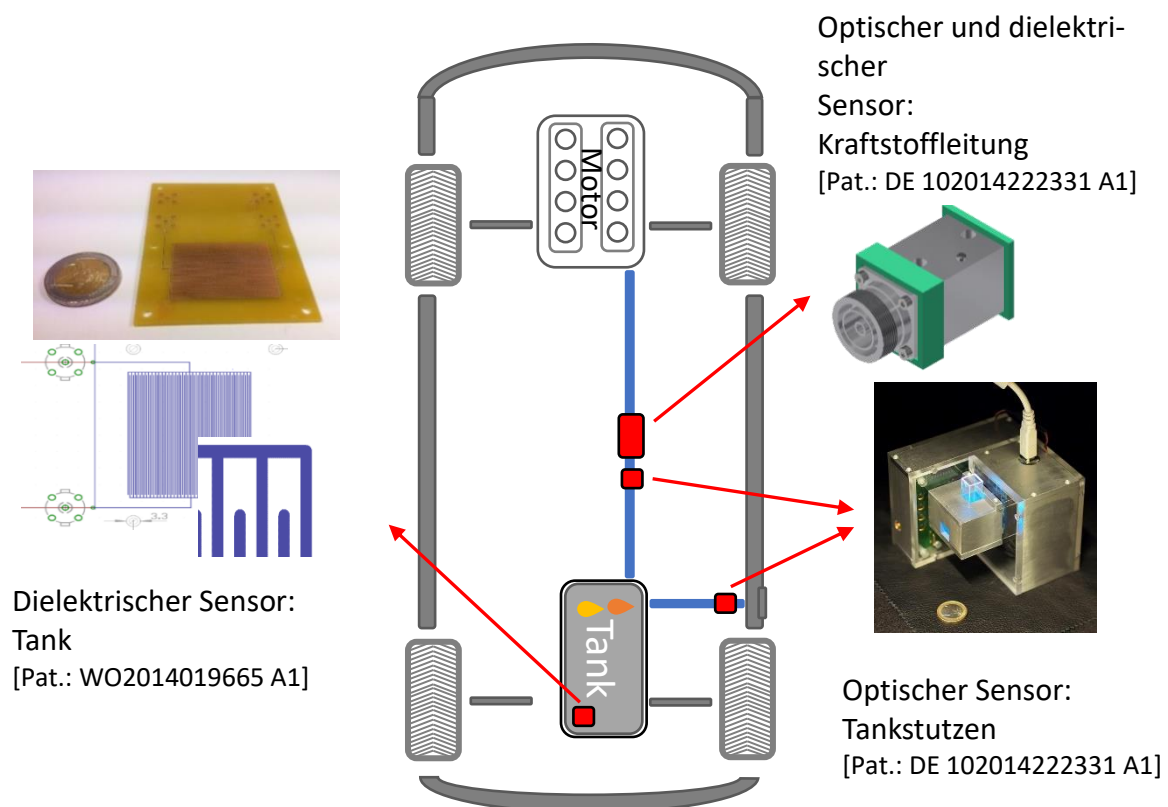


Abbildung 1: Entwurf der Einsatzmöglichkeiten der dielektrischen Sensoren und der optischen Nahinfrarotsensoren und Fluoreszenzsensoren im Automobil.

Im Kraftstofftank (Abbildung 1 unten Mitte) kann im normalen Gebrauch eines PKWs mit Ablagerungsbildung gerechnet werden. Da optische Analyseverfahren (Nahinfrarotspektroskopie und Fluoreszenzspektroskopie) ein optisches Fenster zur Einkopplung von Licht benötigen und somit anfällig gegenüber Verschmutzungen sind, ist deren Einsatz im Tank direkt, mit deutlich mehr Integrationsaufwand verbunden, da hier eine andauernde Reinigung der Ablagerungen an den optischen Fenstern erfolgen müsste. Das elektrische Feld dielektrischer Sensoren hingegen, könnte die Probenkammer unabhängig von Verschmutzungen durchdringen, was in einer geringeren Anfälligkeit der dielektrische Relaxationsspektroskopie gegenüber Verschmutzungen oder Ablagerungen resultiert. Nichtsdestotrotz wird auch hier das Messergebnis von Ablagerungen beeinflusst, es führt aber nicht zu Fehlmessungen. Für die Integration im Kraftstofftank bietet sich demnach die dielektrische Relaxationsspektroskopie basierend auf einer offenen Bauform an, wie sie der Interdigitalkondensator bietet (Abbildung 1 links). Die beiden Leiterbahnen des Kondensators sind hier in interdigitaler Anordnung ausgelegt. Durch die kontinuierliche Aufnahme des Messsignals kann mithilfe dielektrischer Relaxationsspektroskopie die Alterung des Kraftstoffs oder die Bildung von Ablagerungen im Tank überwacht werden.

Im zweiten möglichen Einsatzort Tankstutzen (Abbildung 1 rechts) könnte durch die hohe Fließgeschwindigkeit des Kraftstoffs ohne die Gefahr der Ablagerungsbildung der optische NIR Sensor verbaut werden. Die starke Bildung von Luftblasen im Kraftstoff würde bei der Verwendung von dielektrischen Sensoren zu einer erheblichen Messungenauigkeit führen, da in diesem Fall die eingetragene Luft mit gemessen würde. Durch die erhobenen Messdaten mittels NIR könnte an dieser Stelle aber nicht nur die Menge der verschiedenen Molekülklassen

und bestimmte Kraftstoffeigenschaften ermittelt werden, sondern auch vor Falschbetankung gewarnt werden.

Der dritte mögliche Einsatzort wäre die Kraftstoffzuleitung (Abbildung 1 Mitte), in der alle drei Messtechniken verbaut werden könnten. Für den Einsatz in der Kraftstoffleitung bietet sich der Einsatz eines Durchflusssensors für die dielektrische Relaxationsspektroskopie an (Abbildung 1 oben rechts). Dieses Layout hat den Vorteil, dass durch konstruktive Anpassung und durch die analytische Lösung der Leerkapazität die Messgenauigkeit gegenüber dem Interdigitalsensor um den Faktor 10 gesteigert werden kann. In Kombination mit den Messdaten der optischen Sensoren könnte an dieser Stelle die Zusammensetzung und der Alterungsgrad des Kraftstoffs bestimmt werden. Bei hoher Genauigkeit der Parameterbestimmung bietet dieses Einsatzszenario die Überwachung des Kraftstoffs unmittelbar vor der Hochdruckpumpe des Motors.

5. Bestimmung der Kraftstoffparameter

Im Folgenden wird die Bestimmung der Kraftstoffparameter aus den Messdaten von dielektrischer Relaxationsspektroskopie und Nahinfrarotspektroskopie diskutiert. Die Messdaten basieren auf der Seite der dielektrischen Relaxationsspektroskopie auf einer stationären Messung durch den Permittivitätssensor. Die Ansteuerung des Sensors erfolgte mit Labormessgeräten. Auf der Seite der Nahinfrarotspektroskopie basieren die Messdaten auf einem Nahinfrarotspektrometer NIRS XDS Rapid Liquid Analyzer der Firma Methrom.

Die Auswertung der Sensordaten ist im Folgenden in zwei Aspekte unterteilt. Zu Beginn wird mit einer zweidimensionalen Darstellung eine graphische Übersicht des Informationsgehalts aus NIR und dielektrischer Relaxationsspektroskopie gegeben. Im Anschluss wird eine Auswertung mittels PLS vorgestellt, die eine genaue Bestimmung von einzelnen definierten Kraftstoffparametern erlaubt.

Die Signalkombination aus einer Wellenlänge im NIR (2177nm) und der relativen Permittivität bei 1 MHz ist in Abbildung 2 dargestellt und soll die Möglichkeit zur Kraftstofferkennung durch zwei Messsignale veranschaulichen. Wie in Abbildung 2 zu erkennen, unterscheiden sich die Sensorsignale von ungealterten Ottokraftstoffen (Abbildung 2 blau), Dieselkraftstoffen (Abbildung 2 rot) und Mischkraftstoffen basierend auf HVO, RME und OME voneinander. Ein gemessener Kraftstoff kann im ungealterten Zustand anhand seiner Messwerte wiedererkannt werden oder mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einer Gruppe zugeordnet werden (farbige Ellipsen), was im zweiten Schritt bei der PLS Analyse weiter vertieft wird. Darüber hinaus ist die Erkennung von Mischungsverhältnissen möglich, wenn die Einzelkraftstoffe ausreichend unterschiedliche Eigenschaften haben. Im hier gezeigten Beispiel sind dabei HVO, OME und RME als Reinkraftstoffe zur Erzeugung binärer Mischungen in Schritten von 10 vol% verwendet. Die schwarzen Symbole (x) in Abbildung 2 repräsentieren die Messwerte der binären Mischungen. Hierbei ist zu erkennen, dass die Messsignale der binären Mischkraftstoffe mit nahezu äquidistanten Abständen entlang der direkten Verbindungslinien der Reinkraftstoffe im Messraum positioniert sind. Dieses Ergebnis bedeutet, dass man mit der gezeigten Messtechnikombination nicht nur Einzelkraftstoffe, sondern auch die Zusammensetzung von

Mischkraftstoffen detektieren kann. Die Voraussetzung für die Erkennung der Mischungszusammensetzung ist, dass die Messwerte der jeweiligen Einzelkraftstoffe ausreichen weit auseinander liegen. Für binäre Gemische reicht dabei theoretisch eine Unterscheidbarkeit in einem von zwei Messsignalen. Bei ternären Gemischen müssen sich die drei Grundkraftstoffe in beiden Messwerten unterscheiden, was zu einer Dreiecksfläche im Messraum führt. Eine Anwendung dieser Messtechnik kann z. B. eine Erkennung von Einzelkomponenten wie z. B. OME, RME und HVO sein und den Kunden bei kritischen Mischungsverhältnissen über bevorzugte oder notwendige Zumischungen informieren. Darüber hinaus kann vor einer Fehlbetankungen Diesel/Otto-Kraftstoff gewarnt werden.

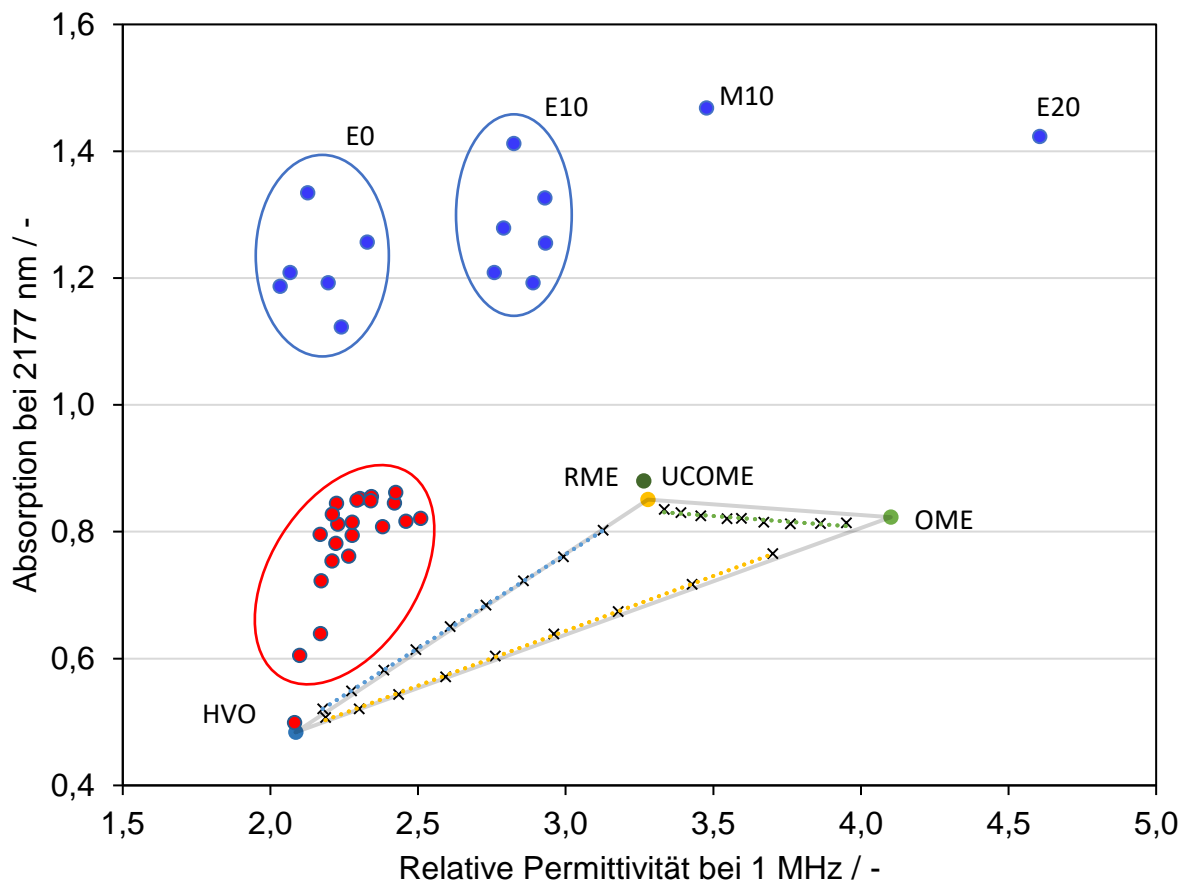


Abbildung 2: Veranschaulichung des Informationsgehalts durch Gegenüberstellung der Permittivität und der Absorption der Wellenlänge 2177 nm des Nahinfrarotspektrums.

Diese Unterscheidung von Otto- und Dieseldkraftstoffen resultiert aus deren unterschiedlichen Siedeschnitten und den daraus resultierenden unterschiedlichen Molekülen der Kraftstoffe, die zu einer deutlich unterschiedlichen Absorption bei 2177 nm führen. Die Ottokraftstoffe können durch die Unterschiede in der Permittivität von Alkanen, Aromaten und Ethanol entsprechend der Ethanolbeimischung deutlich aufgetrennt werden. Aufgrund der verschiedenen Anteile an Ethanol und Aromaten in den E0 und E10 Kraftstoffen ergeben sich Bereiche, zu denen sich die E0 und E10 Kraftstoffe zuordnen lassen. Aromaten besitzen im Vergleich zu Alkanen eine etwas höhere Permittivität, wodurch die Ausdehnung der Ellipsen zustande kommt. Dies beruht auf der Delokalisation der π -Elektronen, die eine höhere Polarisierbarkeit im elektrischen Feld aufweisen als die reinen σ -Bindungen der Alkane.^[6] Die Dieseldkraftstoffe liegen alle in einem Bereich von $\epsilon_r' = 2,0$ bis $2,5$, da der Einfluss der Permittivität von Biodiesel

deutlich geringer ist als bei Ethanol (Biodiesel $\epsilon_r' = 3,3$; Ethanol $\epsilon_r' = 22,4$). Hier führen der unterschiedliche Aromatengehalt und die Biodieselbeimischung zu einer Verteilung der gemessenen Kraftstoffe. Durch die von fossilem Kraftstoff abweichenden chemischen Eigenschaften von regenerativen bzw. synthetischen Kraftstoffen können auch diese voneinander unterschieden werden.

Für eine exakte Auswertung der Anteile von Aromaten, FAME, Ethanol und Kohlenwasserstoffen von unbekanntem Kraftstoffen, die nicht auf Wiedererkennung bereits gemessener Kraftstoffe basiert, reicht diese Betrachtung nicht aus. Für eine Erkennung von Kraftstoffen, die noch nicht in der Datenbasis hinterlegt sind, können aber Dateninterpolationsalgorithmen wie z.B. das PLS Verfahren angewendet werden. Bei der PLS können die Ergebnisse der Interpolationsalgorithmen mit Hilfe einer vergrößerten Datenbasis qualitativ verbessert werden. Um die Genauigkeit der Auswertung zu erhöhen werden im Rahmen der hier gezeigten Untersuchungen der PLS Analyse die Daten des komplett gemessenen NIR Spektrums als Eingabeparameter verwendet. Im Rahmen der PLS Auswertung werden in die Messwerte Ausgleichsgeraden gelegt (linear!) und anhand dieser Werte werden Korrelationen gesucht. Um die Güte der Korrelation zu bestimmen, wird die Auswertung mit eigenen Messdaten geprüft, bei denen für alle Kraftstoffe (auch den Testkraftstoffen) die Parameter im Vorfeld bekannt sind. Durch Abgleich der realen Parameter mit den aus der Korrelation bestimmten Parameter kann ermittelt werden, wie gut der Algorithmus mit NIR- und Permittivitätsdaten bislang unbekannte Kraftstoffe interpolieren kann.

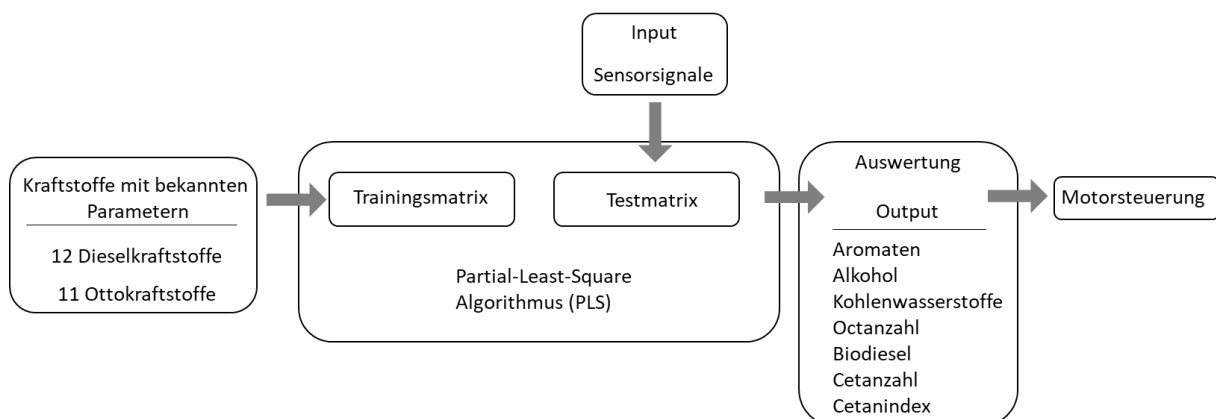


Abbildung 3: Übersicht der Partial-Least-Square Auswertung zur Bestimmung der Kraftstoffparameter.

Für diese Auswertung wird ein Datensatz von 11 Dieselkraftstoffen und 10 Ottokraftstoffen zum Anlernen des Algorithmus verwendet (Abbildung 3). Für die Dieselkraftstoffe werden FAME- und Aromatenanteil, Cetanzahl und Cetanindex als Parameter festgelegt, die die PLS von einer unbekanntem Probe vorhersagen soll. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Vorhersage wird ein weiterer Kraftstoff, von welchem diese vier Parameter bekannt sind, als Test verwendet. Die gemessenen und über die PLS berechneten Werte der vier Parameter sind in Tabelle 1 angegeben. Die Abweichungen aus berechneten und gemessenen Werten ergeben mit einem relativ kleinen Datensatz von 11 Kraftstoffen eine exakte Vorhersage des Aromatengehalts und des Cetanindex. Die Abweichungen im FAME-Anteil mit +0,9 % und die Abweichung der Cetanzahl können durch eine Vergrößerung des Datensatzes noch weiter optimiert werden. Die Unterschiede in der Genauigkeit zwischen Aromaten und FAME-Bestimmung

lassen sich auf die Intensität der für die beiden Parameter charakteristischen Schwingungsbanden zurückführen. Die Intensität der Aromatenbande liegt um ein Vielfaches höher als die der Carbonylschwingung für die FAME-Anteile. Die exakte Übereinstimmung des Cetanindex, der auf einer Berechnung entsprechend der Dichte und Siedeverlaufs beruht, zeigt, dass durch die PLS bereits mit einem kleinen Datensatz und vielen unabhängigen, hoch korrelierten und interkorrelierten Variablen eine Vorhersage der Parameter möglich ist.

Tabelle 1: Vergleich der berechneten Parameter der PLS mit den gemessenen Werten für die Dieselkraftstoffauswertung.

Kraftstoff	FAME	Aromaten	Cetanzahl	Cetanindex
Dieseldieselkraftstoff	5,3	28,2	56,9	51,3
Berechnet PLS	6,2	28,2	50,9	51,3
Δ	0,9	0,0	6,0	0,0

Für eine PLS Bestimmung der Parameter von Ottokraftstoffen werden sieben Parameter zur Vorhersage festgelegt. Dazu zählen Aromatengehalt, Ethanol- bzw. Alkoholgehalt, ETBE- und MTBE-Beimischungen sowie Octanzahl und Kohlenwasserstoffanteil. Die Ergebnisse der PLS-Berechnung und die gemessenen Parameter sind in Tabelle 2 dargestellt. Eine sehr hohe Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte liegt für den Alkoholgehalt, die Octanzahl und den Kohlenwasserstoffanteil vor. Der Aromatenanteil und die Beimischung von ETBE und MTBE können durch einen größeren Datensatz noch weiter optimiert werden. Dieser Effekt liegt zum Teil daran, dass nur vier Kraftstoffe MTBE- und zwei der getesteten Kraftstoffe ETBE-Beimischungen beinhalten.

Tabelle 2: Vergleich der berechneten Parameter der PLS mit den gemessenen Werten für die Ottokraftstoffauswertung.

Kraftstoff	Aromaten	Ethanol	Alkohol	ETBE	MTBE	Octanzahl	Kohlenwasserstoffe
Benzin	22,6	21,8	21,8	0,01	2,6	88,6	47,1
Berechnet PLS	20,1	21,2	21,2	3,3	2,2	88,3	46,9
Δ	2,5	0,6	0,6	3,3	0,4	0,3	0,2

Die Ergebnisse der PLS-Berechnung zeigen, dass mittels Nahinfrarotspektroskopie und dielektrischer Relaxationsspektroskopie Kraftstoffparameter in Abhängigkeit der Größe des Datensatzes bestimmt werden können.

5. Zusammenfassung

Für eine weitere Optimierung der Emissionen bei zukünftig wachsender Anzahl an unterschiedlichen Molekülen im Kraftstoff ist die Entwicklung einer Sensorik zur Erkennung der Kraftstoffparameter von großer Bedeutung. Die onboard-Sensorik basiert mit der Nahinfrarotspektroskopie und der dielektrischen Relaxationsspektroskopie auf zwei Messprinzipien. Die unterschiedlichen Messprinzipien bedeuten, dass durch unterschiedliche Vor- und

Nachteile mehrere Einsatzoptionen für eine Online-Überwachung des Kraftstoffs im Auto resultieren. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die Interpretation der Messdaten basierend auf Nahinfrarotspektroskopie und dielektrischer Relaxationsspektroskopie vorgestellt. Bereits aus einer Gegenüberstellung der Permittivität und einer Wellenlänge des Nahinfrarotspektrums wurde anschaulich gezeigt, dass Kraftstoffe voneinander unterschieden werden können. Für eine exakte Bestimmung von Kraftstoffparametern ist es jedoch notwendig, Strukturgleichungsmodelle einzusetzen. Mittels PLS wurden Daten aus Nahinfrarotspektroskopie und dielektrischer Relaxationsspektroskopie jeweils für Otto- und für Dieselmotorkraftstoffe verwendet, um die Parameter einer unbekannt Probe vorherzusagen. In Abhängigkeit der Intensität, der Größe des Datensatzes und der Menge an Proben im Datensatz, die einen entsprechenden Anteil aufweisen, kann die Genauigkeit der Bestimmung der Parameter voneinander abweichen. Trotz kleiner Datensätze zum Anlernen der PLS konnten alle Parameter mit gewünschter Genauigkeit bestimmt werden. In einigen Fällen konnten Parameter mit Abweichungen unter 0,1 % ermittelt werden.

6. Literatur

- [1] M. Winkler, Propulsion for 2025, Hyundai Motor Europe Technical Center GmbH, Tagungsband: Motorenkongress, Baden-Baden, 2017.
- [2] H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, I. Olschewski, Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2010.
- [3] K. Naumann, K. Oehmichen, M. Zeymer, F. Müller-Langer, M. Scheftelowitz, P. Adler, K. Meisel, M. Seiffert, DBFZ Report Nr. 11. Monitoring Biokraftstoffsektor, Leipzig, 2016.
- [4] K. Götz, S. Zickmann, B. Fey, J. Bünger, W. Stapf, Z. Fan, T. Garbe, A. Munack, J. Krahl, „Diesel R33“, Cuvillier Verlag, 2015.
- [5] H. Liu, Z. Wang, J. Wang, X. He, Y. Zheng, Q. Tang, Energy, 2015, 88, 793–800.
- [6] W. Pläßmann, D. Schulz, Handbuch Elektrotechnik – Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.