

Ingenieurbüro Ganssloser, Tübingen
Institut für Kolbenmaschinen (IFKM), KIT, Karlsruhe

„KERG“

**Entwicklung und Untersuchung einer
Körperschallbasierten
Emissionsregelung
für stationär betriebene Gasmotoren**

Abschlussbericht

zum Förderprojekt AZ 34207/01+02 der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Dr.-Ing. Klaus Schmid
Dipl.-Ing. Matthias Roosz
Dipl.-Ing. Andreas Hablitzel
M. Sc. Sören Ganssloser

Ingenieurbüro Ganssloser,
Tübingen

Dr.-Ing. Sören Bernhardt
Dipl.-Ing. Christoph Wesche

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az **34207/01**
34207/02

Referat **24/0**

Fördersumme

368.363 EUR

Antragstitel **Entwicklung und Untersuchung einer körperschallbasierten Emissionsregelung für stationär betriebene Gasmotoren**

Stichworte Gasmotor, Blockheizkraftwerk BHKW

Laufzeit

36

Projektbeginn

01.11.2017

Projektende

31.10.2020

Projektphase(n)

Zwischenbericht

im April 2019

Bewilligungsempfänger Ingenieurbüro Ganssloser
Derendinger Straße 40

72072 Tübingen

Tel 07071/9769-0

Fax

Projektleitung

Dr.-Ing. Klaus Schmid

Bearbeiter

Kooperationspartner KIT – Campus Süd
Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)
Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Stationär betriebene Gasmotoren in Kraft-Wärme-Kopplung stellen aus heutiger Sicht eine wichtige Brückentechnologie in der Energiewende dar. Der Zielkonflikt zwischen einer möglichst hohen Effizienz bei möglichst wenig umweltschädlichen Emissionen stellt die Entwickler von stationären Gasmotoren vor große Herausforderungen. Eine große Bedeutung kommt insbesondere der Reduktion der Stickoxid-Emissionen zu. Bisher werden stationäre Gasmotoren zur dezentralen Energieversorgung hierfür meist im mageren Bereich betrieben (überstöchiometrisches Gemisch), wodurch das Emittieren von hohen Stickoxid-schadstoffkonzentrationen effektiv vermieden werden kann. Für eine weitergehende Reduktion der Emissionen sind zusätzliche innermotorische Maßnahmen und/oder Abgasnachbehandlungssysteme erforderlich.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In diesem Forschungsvorhaben werden innermotorische Maßnahmen zur Reduktion der Stickoxid-Emissionen entwickelt. Mithilfe des relativ kostengünstig zu gewinnenden Körperschallsignals werden Informationen über die Abgasemissionen der einzelnen Zylinder gewonnen, die mit hinreichender Genauigkeit auch zur Regelung herangezogen werden können. Zur Umsetzung werden an einem bestehenden BHKW-Motor Körperschall-Sensoren appliziert. Eine Frequenzanalyse der erfassten Sensorsignale ermittelt das Emissionsverhalten jedes einzelnen Zylinders. Die zu entwickelnden neuen Berechnungsmodelle werden in Echtzeit mit den üblichen Rechenleistungen einer Motorsteuerung lösbar sein und somit direkt in ein Regelungssystem einfließen, das die emissionsbasierte Regelung mit anderen Regelkreisen am Motor verknüpft.

Als Ergebnis des Vorhabens erwarten die Forschungspartner eine praxistaugliche Lösung, die mit bezahlbarer Sensorik künftig den emissionsgeführten Betrieb von realen Gasmotoren erlaubt, sowohl für Neuanlagen als auch im Bestand an Altanlagen. Die anwendungsorientierte Durchführung des Vorhabens erfolgt dabei an einem mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerk (BHKW) am Institut für Kolbenmaschinen in Karlsruhe.

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die Schätzung der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder eines Gasmotors aus Körperschall-Signalen möglich ist. Die ausgehend von diesen Schätzungen in der Motorregelung vorgenommene Gleichstellung der Emissionsbeiträge führt wie erwartet zu einer Reduktion der NO_x-Emissionen des untersuchten Motors.

Bei den erarbeiteten Methoden wurde Wert darauf gelegt, dass eine Anwendung außerhalb des im Projekt vorliegenden Prüfstandsumfeldes tatsächlich möglich ist. Dazu wurden die erarbeiteten Schätzmodelle auf einem Serien-Steuergerät implementiert, eine Vorgehensweise wurde definiert, wie die Modelle im Feld ohne aufwändige Messtechnik parametrisiert werden können, und die Methoden wurden erfolgreich an einem zweiten Motor-Exemplar erprobt, das sich grundlegend vom Versuchs-Motor unterscheidet. Die für eine Anwendung der Projektergebnisse erforderlichen Investitionskosten an Motoren im Feld sind überschaubar. Sind Körperschall-Sensoren am Motor bereits vorhanden, so ist im Betrieb keine zusätzliche Sensorik erforderlich, lediglich für den Einmessvorgang bedarf es einer motorglobalen NO_x-Messung. Die geringe Komplexität der Algorithmen ermöglicht die Realisierung auf Serien-Steuergeräten. Motoren müssen für die Anwendung des Verfahrens lediglich mit Steuerungen ausgerüstet sein oder nachgerüstet werden, die zylinderindividuelle Vorgaben der Zündzeitpunkte ermöglichen.

Zusätzliche Betriebskosten entstehen durch Anwendung der hier vorgestellten Methoden nicht, die Reduktion der Emissionen wird letztlich durch Software erreicht. Wird die Methode auf Motoren angewendet, die über einen SCR-Katalysator verfügen, so können die Betriebskosten bezüglich Verbrauch an wässriger Harnstoff-Lösung sogar reduziert werden, da die innermotorische Reduktion der Rohemissionen an NO_x direkt zu einer Einsparung der erforderlichen wässrigen Harnstoff-Lösung im SCR-Katalysator führt.

Das Reduktionspotenzial an durch BHKW ausgestoßenen NO_x ergibt sich aus der Anzahl der erreichbaren BHKW und ihrer Emissionen. In Deutschland sind ca. 5.000 KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung zwischen 50 kW und 2 MW installiert (Statista, 2020). Ein BHKW der Größe wie das Versuchs-BHKW am IFKM (220 kW el. Leistung) produziert beim Betrieb mit 250 mg NO_x/m³ bei 8.000 h Betrieb ca. 2.000 kg NO_x/a. Daraus könnte ein Potenzial errechnet werden – wobei die „Erreichbarkeit“ der einzelnen Anlagen mit erheblicher Unsicherheit behaftet ist, weswegen wir hier keine Hochrechnung wagen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Auf das Projekt und deren Förderung durch die DBU wurde bei vielfältigen Besuchsterminen externer Gäste in Tübingen und in Karlsruhe hingewiesen. Besonderer Höhepunkt war hier der Tag der offenen Tür des KIT auf dem Campus Ost im Jahr 2019

Die Projektergebnisse wurden etwa zur Mitte des Projektverlaufs auf der Dessauer Gasmotorenkonferenz vorgestellt (Wesche, Bernhardt, Schwarz, & Schmid, 2019). Als Resonanz darauf hat sich konkretes Interesse bei mehreren Motor- und BHKW-Herstellern ergeben. Die Versuche am oben beschriebenen Vergleichsmotor gehen beispielsweise auf diese Veröffentlichung zurück.

Zwei weitere Versuche bei einem Hersteller von BHKW-Motoren und bei einem Hersteller sehr großer Gas- und Dual-Fuel-Motoren waren für 2020 ebenfalls terminlich eingeplant, konnten aber aufgrund der Corona-Pandemie ab Frühjahr 2020 bisher nicht durchgeführt werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Abschlussberichtes ist einer der Termine für das Jahresende 2020/den Jahresanfang 2021 eingeplant. Es ist angedacht, die erfolgreiche Realisierung der in Dessau aufgezeigten Potenziale auf dem nächsten CIMAC World Congress zu veröffentlichen. Es ist davon auszugehen, dass Emissionen der Verbrennungsmotoren dort wiederum eines der Schwerpunktthemen sein werden.

Fazit

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Rohemissionen von stationär betriebenen Gasmotoren möglich ist, indem über eine Erfassung von Körperschall-Signalen und eine daraus abgeleitete indirekte Schätzung der Emissionen eine Regelung der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder erreicht wird. Die erzielten Ergebnisse konnten bereits im Rahmen des Projektes erfolgreich auf zumindest einen weiteren Motor im Feld übertragen werden.

Die erarbeiteten Methoden könnten mit dem erreichten Stand im Feld breit eingesetzt werden, die Hürden für Erstausrüstung oder Nachrüstung sind im Vergleich zu anderen Verfahren gering. Es konnte gezeigt werden, dass mit einfacher Sensorik Ergebnisse erzielt werden können, die bisher nur mit aufwändiger Zylinderdruck-Indizierung erreichbar waren.

Die durch das Projekt eröffneten Möglichkeiten können sehr gut als Ergänzung zu verschiedenen Methoden der Abgasnachbehandlung eingesetzt werden.

1. Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
1. Inhaltsverzeichnis	4
2. Abbildungsverzeichnis	5
3. Verzeichnis von Abkürzungen	6
4. Zusammenfassung	7
5. Einleitung.....	8
6. Hauptteil	10
6.1 Grundlagen.....	10
6.1.1 Versuchsaufbau	10
6.1.2 Körperschall-Sensorik	12
6.1.3 Abgasmessung.....	17
6.1.4 Motorische Untersuchungen.....	22
6.2 Datenanalyse und Entwicklung Berechnungsmodelle.....	23
6.2.1 Datenvorverarbeitung	24
6.2.2 Hauptkomponenten-Analyse	24
6.2.3 Korrelationsanalyse	25
6.2.4 NO _x vs. CoC-Schätzung	27
6.2.5 Modelle.....	30
6.2.6 Diskussion der Ergebnisse	36
6.2.7 Robustheit des Verfahrens, Übertragung der Ergebnisse auf weitere Motoren..	40
6.3 Regelung.....	44
6.3.1 Regelungsstruktur	44
6.3.2 Erprobung der Regelung am Versuchs-BHKW	45
6.4 Diskussion der Ergebnisse	47
7. Fazit	48
8. Literaturverzeichnis	50
9. Anhang: Messstellen-Liste.....	52

2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6.1: BHKW am Institut für Kolbenmaschinen des KIT	11
Abbildung 6.2: Beispielhaftes Frequenzspektrum eines Körperschallsignals	13
Abbildung 6.3: Eingesetzte Körperschall-Sensoren	14
Abbildung 6.4: Positionen der Körperschall-Sensoren am Versuchsaggregat.....	15
Abbildung 6.5: Streudiagramm Sound = f(CoC).....	16
Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der Emissionsmessung	18
Abbildung 6.7: Unterschiedliche NO _x -Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder.	20
Abbildung 6.8: Motorglobale NO _x -Emissionen, mittlere Verbrennungsschwerpunktlage und Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom eingestellten Zündzeitpunkt	20
Abbildung 6.9: Gegenläufige Nichtlineare Zusammenhänge von NO _x -Emissionen und Wirkungsgrad zum Zündzeitpunkt.	21
Abbildung 6.10: Verschiedene Möglichkeiten, zylinderindividuelle NO _x -Werte zu ermitteln.....	23
Abbildung 6.11: Korrelation zwischen Körperschalldaten und gemessenem Verbrennungsmerkmal;	26
Abbildung 6.12: Schätzung der Schwerpunktlage CoC der Verbrennung statt Schätzung der NO _x -Emissionen.	28
Abbildung 6.13: Streudiagramm der an einem einzelnen Zylinder je Arbeitsspiel ermittelten Tripel von Schwerpunktlage CoC	28
Abbildung 6.14: Häufigkeitsverteilung der gemessenen, Arbeitsspiel-individuellen NO- Emissionen	30
Abbildung 6.15: Signalweg bei der Schätzung von NO _x -Emissionen aus gemessenen Körperschall-Daten.....	31
Abbildung 6.16: Zeitliche Darstellung der Emissionsschätzung aus Körperschall mit Künstlichem Neuronalem Netz.	32
Abbildung 6.17: Verarbeitungsweg vom Körperschallsignal bis zum rekonstruierten Zylinderdruck.....	34
Abbildung 6.18: Zylinderindividuelle Rekonstruktion des Druckverlaufs	35
Abbildung 6.19: Affiner Zusammenhang zwischen tatsächlichem CoC der einzelnen Zylinder und Körperschallmerkmal.....	39
Abbildung 6.20: Streudiagramm zum Zusammenhang zwischen gemessener Schwerpunktlage („pressure CoC“) und über Körperschall geschätzter Schwerpunktlage („sound CoC“).	42
Abbildung 6.21: Zeitlicher Verlauf der Daten aus dem Streudiagramm in Abbildung 6.20.	42
Abbildung 6.22: Vergrößerte Darstellung des Schätzfehlers aus Abbildung 6.21 für die beiden betrachteten Zylinder A3 und A4.	43
Abbildung 6.23: Regelungsstruktur für eine Gleichstellung der zylinderindividuellen Emissionsbeiträge.	44
Abbildung 6.24: Messschrieb von Ein- und Ausschalten der Zylindergleichstellung am Versuchs-BHKW	45

3. Verzeichnis von Abkürzungen

- A1: Zylinder 1 des Reihenmotors, Bezugszylinder für die Berechnung des Kurbelwinkels $0..720$ °ca
- BHKW: Blockheizkraftwerk
- 44. BImSchV: Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen (44. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes)
- °ca: Grad Kurbelwinkel (crank angle)
- CoC: Center of Combustion, Schwerpunktlage der Verbrennung in einem einzelnen Arbeitsspiel
- EMD: Empirical Mode Decomposition
- est.: „estimated“, geschätzt
- IBG: Ingenieurbüro Ganssloser, Tübingen
- IFKM: Institut für Kolbenmaschinen, Karlsruhe
- KIT: Karlsruher Institut für Technologie, ehem. Universität Karlsruhe (TH)
- KNN: Künstliches Neuronales Netz
- KS: Körperschall
- KW, °KW: Kurbelwinkel, °Kurbelwinkel; $0-720$ °KW für ein Arbeitsspiel des hier betrachteten Viertaktmotors
- KWK: Kraft-Wärme-Kopplung
- Lambda-1: Stöchiometrisches Kraftstoff-Luft-Verhältnis, für die Verbrennung steht exakt so viel Sauerstoff zur Verfügung, wie zur vollständigen Verbrennung erforderlich ist
- LB: Laufbuchse
- NO_x: Stickstoffoxide, Summe aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid
- OT: Oberer Totpunkt
- PMI: Indicated mean pressure, indizierter Mitteldruck
- SCR: Selektive katalytische Reduktion
- TA-Luft: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
- ZD: Zylinderdruck
- ZK: Zylinderkopf
- Zyl: Zylinder
- ZZP: Zündzeitpunkt

4. Zusammenfassung

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter den Aktenzeichen 34207/01 und 34207/02 geförderten Vorhabens haben die Kooperationspartner

Ingenieurbüro Ganssloser (IBG)
Derendinger Straße 40, D-72072 Tübingen

und

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Rintheimer Querallee 2, D-76131 Karlsruhe

eine Methode entwickelt, wie an stationär betriebenen Gasmotoren die NO_x-Emissionen des Motors gesenkt werden können, indem ausgehend von einer Messung des Körperschalls kontinuierlich Schätzwerte für die Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder ermittelt werden und über einen geschlossenen Regelkreis die einzelnen Zylinder so angesteuert werden, dass die Emissionen des Gesamtmotors reduziert werden. Der Wirkungsgrad des Motors – und somit die CO₂-Emissionen – wird dabei nicht verschlechtert. Damit steht erstmals eine Methode zur Verfügung, bei der mit einfacher und robuster Sensorik in einer breiten Klasse von Motoren hochwertige Information über die Verbrennung in den einzelnen Zylindern gewonnen werden kann, und diese Information in einem geschlossenen Regelkreis direkt zur Reduktion der Emissionen im Betrieb genutzt wird.

Zunächst wurde ein bestehendes BHKW am IFKM des KIT in Karlsruhe mit Messtechnik so ausgerüstet, dass detaillierte Untersuchungen zum Emissionsverhalten des Gasmotors möglich waren. Über die Laufzeit des Projektes war dabei immer zu berücksichtigen, dass das BHKW neben der Funktion als Versuchs-BHKW auch seine Aufgaben in der Wärmeversorgung erfüllt. Messungen des Körperschalls an verschiedenen Positionen und über unterschiedliche Sensoren, Referenzmessungen mit Zylinderdruckindizierung, Abgasmessungen am Gesamtmotor und Abgasmessungen an den einzelnen Zylindern lieferten die Datenbasis für die Entwicklung von Schätzmodellen, über die allein aus dem gemessenen Körperschall auf die Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder geschlossen werden kann.

Es wurden sehr unterschiedliche Modellierungsansätze untersucht und miteinander verglichen. Ausschlaggebend für die Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes war dabei weniger die erzielbare Güte bei der Schätzung, sondern vielmehr die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens in Feld. In Kombination mit der Lösung der eigentlichen Regelungsaufgabe konnte dabei eine Kombination aus Schätzmodell und Einmessvorgang als Verfahren entwickelt werden, das zwar nicht direkt absolute Schätzwerte für die NO_x-Emissionen liefert, das aber ohne Zylinderdruckindizierung im Feld auf einzelne Motoren angepasst werden kann.

Die gesamte Kette der Informationsverarbeitung von der Messung des Körperschalls, über die Vorverarbeitung und die Schätzung bis hin zur zylinderindividuellen Regelung wurde am Versuchs-BHKW mit Standard-Steuerungssystemen erfolgreich umgesetzt. Das zentrale Element dieser Kette, die Schätzung zylinderindividueller Emissionsbeiträge ausgehend von Körperschall-Signalen, wurde außerdem erfolgreich auf einem weiteren Motor einer komplett anderen Leistungsklasse angewendet.

5. Einleitung

In Blockheizkraftwerken (BHKW) wird die in einem Brennstoff gespeicherte Energie in Strom und Nutzwärme umgewandelt. Diese kombinierte Nutzung von Strom und Wärme erzielt – bezogen auf die eingesetzte Primärenergie – einen Gesamtwirkungsgrad, der von keinem anderen System in der Praxis erzielt wird. BHKWs sollten daher heute und in Zukunft eine wichtige Komponente in der dezentralen Energieerzeugung sein. Als Energieumwandler im Kern eines BHKWs kommen grundsätzlich verschiedene technische Systeme in Frage, wie beispielsweise Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Brennstoffzellen. Wegen verschiedener positiver Eigenschaften stellen gasbetriebene Verbrennungsmotoren dabei heute einen großen Anteil der installierten Systeme.

Neben dem Wirkungsgrad, der sich über die CO₂-Emission auf die globale Erwärmung auswirkt, sind im Betrieb eines BHKW auch die Abgasschadstoffe zu beachten. Wirkungsgrad und Abgas-Emissionen stehen bei einem Verbrennungsmotor aber häufig im Zielkonflikt zueinander. Dies ist insbesondere bei Stickoxid-Emissionen von Bedeutung. Zur Reduktion der Stickoxid-Emissionen stehen verschiedene Verfahren der Abgasreinigung zur Verfügung, zum Beispiel die selektive katalytische Reduktion (SCR). Mit der neuesten Weiterentwicklung der Emissionsgrenzwerte durch die 44. BImSchV hat die Installation solcher Systeme zur Abgasreinigung deutlich zugenommen und wird zu einer Verringerung der Stickoxid-Emissionen führen.

Aktuell bisher nicht gelöst ist jedoch der bei Verbrennungsmotoren prinzipbedingte Effekt, dass die einzelnen Zylinder des Motors unterschiedlich stark zur Entstehung von Abgasschadstoffen beitragen. In der Praxis zeigt sich, dass häufig die einzelnen Zylinder eines Motors sehr unterschiedliche Brennverläufe aufweisen. Die Gründe hierfür können vielfältig sein, beispielsweise Geometrieunterschiede, Strömungsunterschiede, aber auch Ablagerungen. In der Folge stoßen einzelne Zylinder hohe Emissionen aus, vor allem Stickoxide. Um die Stickoxid-Emissionen für den gesamten Motor gering zu halten, werden als Reaktion darauf alle Zylinder mit schlechterem Wirkungsgrad betrieben, obwohl dies für Zylinder, die mit geringeren Stickoxid-Emissionen brennen, gar nicht nötig wäre. Mit anderen Worten: Es sind nur wenige Zylinder eines Motors für die Höhe der Gesamt-Emissionen des Motors verantwortlich. Das „Einfangen“ dieser „Abweichler“ könnte die Summenemission des Gesamtmotors erheblich reduzieren. Als Nebeneffekt ließe sich der Wirkungsgrad des Gesamtmotors deutlich steigern.

Das gilt prinzipiell unabhängig von Vorhandensein und Art einer Abgasnachbehandlung. Eine Abgas-Nachbehandlung beeinflusst zwar das grundsätzliche Niveau der Roh-Emissionen: Motoren gänzlich ohne Abgasnachbehandlung müssen deutlich niedrigere Roh-Emissionen aufweisen als beispielsweise Motoren mit nachgeschaltetem SCR-Katalysator. Auch Motoren mit Abgasnachbehandlung müssen aber mit definierten Roh-Emissionen betrieben werden. Somit werden auch in diesem Fall einzelne Zylinder mit schlechterem Wirkungsgrad betrieben als sie eigentlich betrieben werden könnten.

Für die meisten Motoren steht jedoch in der Praxis keine zylinderindividuelle Information über die tatsächlichen Stickoxid-Emissionen zur Verfügung. Höchstens für Motoren, die im Feld mit Zylinderdrucksensorik ausgestattet sind, wäre eine individuelle Schätzung der Emissionen möglich. Die Anzahl der installierten Motoren mit solcher Sensorik ist allerdings verschwindend gering, der überwiegende Teil der BHKW fährt bezüglich der Unterschiede zwischen einzelnen Zylindern nicht optimal.

Die technisch außerdem mögliche Messung der direkten Stickoxid-Emissionen über einen NO_x -Sensor ist nur für den gesamten Motor möglich. Die Messung im Abgaskrümmen jedes einzelnen Zylinders ist im zur Verfügung stehenden Bauraum üblicher Motoren nicht integrierbar. Die Installation einer solchen Messung bereitet selbst an einem Versuchsmotor erhebliche Schwierigkeiten.

Dieses Vorhaben verfolgt daher das übergeordnete Ziel, aufzuzeigen, dass die Schätzung der in einem stationären Gasmotor je Verbrennung je Zylinder erzeugten Stickoxid-Emissionen mit bewährter robuster **Körperschall-Sensorik** wirtschaftlich möglich ist, und dass die Verwendung der entsprechenden Schätzwerte in einer **emissionsbasierten Motorregelung** die Gesamt-Emissionen des Gasmotors reduziert. Die durch die Regelung entstehenden Freiheitsgrade können außerdem zu einer Wirkungsgradsteigerung der Motoren im Betrieb genutzt werden.

Neben der Herausforderung der Extraktion von Emissionsinformationen aus dem Körperschallsignal besteht die Anforderung, dass die entstehenden Regelalgorithmen echtzeitfähig sein sollen und von den in Motorsteuerungen üblichen Prozessoren beherrschbar sein müssen. Das erfordert gegebenenfalls eine Vereinfachung der theoretisch korrekten Zusammenhänge zugunsten schnellerer Rechenzeiten. Als Ziel wird in diesem Forschungsvorhaben eine zulässige Vorhersagetoleranz von 10 % angestrebt. Das entspricht mit den zum Zeitpunkt der Antragstellung gültigen TA-Luft Stickoxid-Grenzwerten von 500 mg/mn³ bzw. 250 mg/mn³ bei TA-Luft/2 einer Vorhersagefähigkeitstoleranz von ± 25 mg/mn³ bzw. $\pm 12,5$ mg/mn³ für die körperschallbasierte Emissionsbestimmung.

Als Versuchsträger dient ein bereits am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) existierendes Blockheizkraftwerk. Dieses BHKW stellt einen typischen Vertreter im mittleren bis kleinen Motorenbereich dar und soll bereits im Rahmen dieses Projektes im Dauerbetrieb als Demonstrator mit solch einer Schätzung und der entsprechenden Regelung betrieben werden. Weiterhin sollen die im Rahmen dieses Vorhabens erarbeiteten Projektergebnisse bereits zur Projektlaufzeit exemplarisch auf einen anderen Motor übertragen werden, um die Praxistauglichkeit aufzuzeigen.

Die Schätzung von Emissionen aus der Messung von Körperschall stellt dabei eine erhebliche Neuerung dar, insbesondere da im Forschungsvorhaben auf den robusten Dauerbetrieb abgezielt wird, nicht nur auf einen eingeschränkten Laborbetrieb. Die darauf aufbauende zylinderindividuelle Emissionsregelung ist ebenfalls eine wesentliche Neuerung. Zylinderindividuelle Regelungen sind bisher auf die Gleichstellung bezüglich maximalem Verbrennungsdruck, oder zylinderindividueller Leistung, oder zylinderindividueller Abgastemperatur beschränkt. Außerdem auf die reaktiven Steuerungsfunktionen bezüglich Klopfen oder Verbrennungsaussetzern. Das vorliegende Projekt hatte somit folgende Innovationen zum Ziel:

- Emissionsschätzung aus Körperschall
- Schätzung in einem breiten Betriebsbereich
- Einsatz im BHKW-Dauerbetrieb, Demonstration an einem Versuchs-BHKW
- Allgemein anwendbares Vorgehen zur Übertragung auf andere Motorbaureihen
- Kombination verschiedener zylinderindividueller Regelungen mit der emissionsbasierten Regelung

Um die genannten Ziele zu erreichen, wurde das Vorhaben inhaltlich in drei Themenbereiche aufgeteilt:

- Grundlagen
- Datenanalyse
- Regelung

Diese drei Bereiche wurden im Projektantrag in einzelne Arbeitspakete aufgegliedert, so dass sich der folgende Projektstruktur- und Zeitplan ergab. Hier genannte Zeiträume und Aufwände sind die *geplanten* Werte, wie sie im Projektantrag vorgesehen waren.

	Jahr		2017				2018				2019				2020		Pers.monate	
	Quartal		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	IBG	IFKM		
G – Grundlagen															2,8	7,5		
G1 - Literaturrecherche				■											0,6	1,3		
G2 - Festlegung und Aufbau der Messkette				■	■										0,6	1,2		
G3 - Vergleich unterschiedlicher Körperschall-Sensoren				■	■	■									0,5	0,5		
G4 - Motorische Untersuchungen				■	■	■	■								1,1	3,5		
G5 - Fortlaufende Pflege der Messkette					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	0,0	1,0		
D – Datenanalyse															4,6	12,7		
D1 - Prüfstandsdaten-Management				■	■	■									1,7	0,6		
D2 - Korrelationsanalyse Körperschallsensordaten				■	■	■	■								0,8	3,0		
D3 - Entwicklung Berechnungsmodelle					■	■	■	■							1,3	5,6		
D4 - Anwendung auf weiteren Motoren									■	■	■	■	■		0,9	3,5		
R – Regelung															3,0	9,7		
R1 - Entwurf Regelstrategie								■	■	■	■				1,5	3,6		
R2 - Regelung am Versuchs-BHKW									■	■	■				0,6	3,1		
R3 - Nachweis der Robustheit										■	■	■	■		0,8	3,0		
P – Projektbegleitende Maßnahmen															5,4	8,0		
P2 - Veröffentlichungen und Projektmanagement				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	5,4	8,0		

Dieser Schlussbericht orientiert sich an dieser grundlegenden Projektstruktur. Im nächsten Kapitel beschreibt dazu Abschnitt 6.1 zunächst die grundlegenden Arbeiten am Versuchs-BHKW und die erreichten Ergebnisse. Abschnitt 6.2 legt Arbeiten, technische Details und Ergebnisse des größten Projektteiles dar, die Analyse der Messdaten sowie die Herleitung und Beurteilung von Berechnungsmodellen. Abschnitt 6.3 baut darauf auf, beschreibt die Einbindung der Schätzergebnisse in eine körperschallbasierte Emissionsregelung und zeigt die erfolgreiche Umsetzung am Versuchs-BHKW.

6. Hauptteil

6.1 Grundlagen

6.1.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen der körperschallbasierten Emissionsschätzung im Rahmen dieser Arbeit wurden an einem seriennahen BHKW-Modul Viessmann Vitobloc EM210/313 durchgeführt (siehe Abbildung 6.1). Das BHKW stellt dabei einen typischen Vertreter im mittleren bis kleinen Motorenbereich dar.

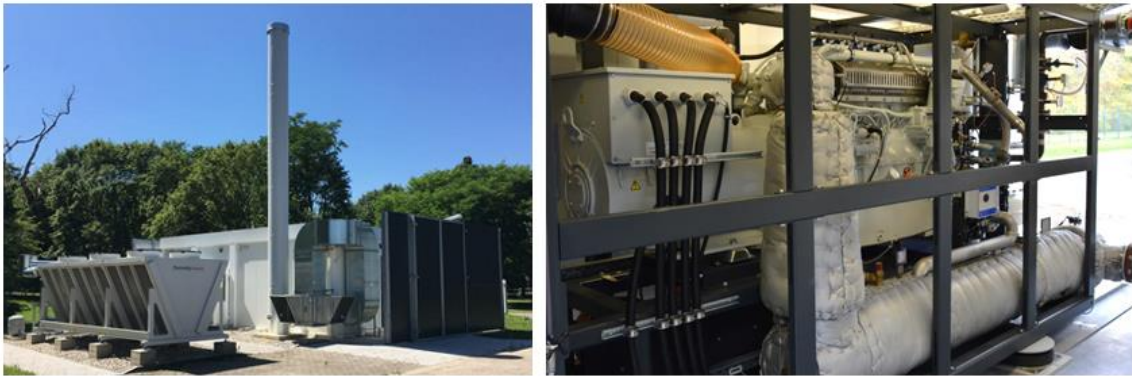


Abbildung 6.1: BHKW am Institut für Kolbenmaschinen des KIT

Der Hauptbestandteil dieses Moduls ist ein erdgasbetriebener Gasmotor MAN E2676 LE202. Hierbei handelt es sich um einen turboaufgeladenen Reihen-6-Zylinder Motor mit 220 kW mechanischer und 313 kW thermischer Leistung, für stationäre Anwendungen. Die wesentlichen technischen Daten des Versuchsaggregates sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Technische Daten des Versuchsaggregates am IFKM

Motordaten	Wert
Nenndrehzahl	1500 min ⁻¹
ISO-Standard-Leistung	220 kW
Bohrung	126 mm
Hub	166 mm
Hubraum	12,4 l
Verdichtungsverhältnis	12,0

Um während der Untersuchung ein umfangreiches Bild über die vielfältigen Betriebsgrößen zu erhalten, wurde das seriennahe BHKW-Modul mit zusätzlicher Messtechnik erweitert. Dazu zählen unter anderem diverse Druck-, Temperatur- sowie Durchflusssensorik. Die Ermittlung des Verbrennungsluftverhältnisses λ erfolgt über eine Lambda-Sonde vom Typ Bosch LSU 4.9. Die vielfältigen zusätzlichen Messsignale werden mit einer ebenfalls zusätzlich aufgebauten Messdatenerfassung aufgezeichnet, in der die Daten der BHKW-Steuerung mit den zusätzlichen Messdaten zusammengeführt werden.

Für die Beurteilung der innermotorischen Vorgänge und als Referenz für die späteren Körperschallauswertungen verfügt der Motor über eine hochdruckseitige Indizierung aller Zylinder. Die Zylinderdrücke werden dabei mit Hilfe von piezoelektrischen Sensoren vom Typ Kistler 6053CC gemessen. Die Datenaufzeichnung der Zylinderdrucksignale erfolgt über ein Seriensteuergerät AVAT E²PRECON-M.

Die Liste der Messstellen ist im Anhang aufgeführt.

6.1.2 Körperschall-Sensorik

Der Einsatz von Körperschall-Sensoren ist der zentrale Bestandteil der Projektidee in diesem Vorhaben. Hintergrund davon ist, dass zwar deutlich direktere Verfahren *technisch* zur Verfügung stehen, je Zylinder Informationen über die Verbrennung und der daraus resultierenden Emissionsbeiträge zu messen, dass diese Verfahren aber nicht *wirtschaftlich* umsetzbar sind.

Zum einen könnten Emissionen direkt gemessen werden, zum anderen könnte über eine Messung des Zylinderdruckes sehr verbrennungsnah Information erfasst und daraus auf die Emissionen geschlossen werden. Bereits im Projektantrag wurde dargelegt, dass beim praktischen Einsatz dieser scheinbar besser geeigneten Verfahren große Hürden resultieren – und zwar bezüglich Robustheit im Dauereinsatz, Anfälligkeit für Alterungserscheinungen und Verschmutzung, Kosten der Sensorik und Einbausituation am Motor.

Während der Durchführung dieses Vorhabens haben sich diese Annahmen als vollkommen richtig herausgestellt. Für dieses Forschungsvorhaben wurden als Referenzgrößen sowohl individuelle Abgaswerte je Zylinder gemessen als auch über Zylinderdrucksensoren die Verbrennungsindizierung durchgeführt. Beide Ansätze waren an der hier betrachteten Motorgröße so aufwändig in der Durchführung, dass ihr Einsatz selbst in einem Forschungsvorhaben als grenzwertig zu betrachten ist. Die zylinderindividuelle Abgasmessung erfordert einen erheblichen händischen Aufwand beim Vermessen des gesamten Motors und wurde im Forschungsvorhaben nur bei Messungen durchgeführt, bei denen es für den Erkenntnisgewinn unbedingt erforderlich war. Zylinderdruck-Sensoren liefern zwar direkt die Information über die Verbrennung in den einzelnen Zylindern. Die Messkette über Sensor und Signalkonditionierung hat jedoch im Projektverlauf immer wieder erhebliche Probleme bereitet. Außerdem sind Zylinderdruck-Sensoren für den hier betrachteten – für BHKWs typischen – MAN-Motor in Serienanwendungen praktisch nicht bezahlbar. In der hier erforderlichen Baugröße werden sie manufakturartig hergestellt. Zusätzlich ist der Zylinderkopf an der Einbaustelle des Sensors geschwächt und kann reißen. Schäden an den Sensoren und am Zylinderkopf haben den Projektfortschritt mehrfach aufgehalten, bis die defekten Teile ersetzt waren.

Dagegen hat im Projektverlauf die *Körperschall*-Signalkette keine Probleme bereitet. Geringe Kosten, robuste Sensorsignale und Langzeitstabilität haben sich im Projektverlauf bestätigt. Hier konnte sich das Projektteam auf die geplanten Untersuchungen konzentrieren. Das sind zum einen die mit dem Sensor direkt verknüpften Themen

- **Sensortyp:** Reichen die Signalbereiche typischer Körperschall-Großseriensensoren aus dem Automotive-Bereich aus, um Informationen über die Verbrennung zu gewinnen, oder sind dazu hochauflösende Sensoren erforderlich?
- **Montageposition:** Welche Auswirkung hat die Montageposition auf den Informationsgehalt der Signale bezüglich konkreter Verbrennungseigenschaften?

Zum anderen natürlich die eigentliche Aufgabenstellung im Projekt, von den Sensorsignalen auf die Emissionen der einzelnen Zylinder zu schließen. In diesem Abschnitt soll zunächst auf die Ergebnisse der mit dem Sensor selbst verbundenen Themen eingegangen werden; der Emissionsschätzung widmen sich dann die später folgenden Abschnitte dieses Berichts.

Sensortyp

Ein wichtiges Ziel dieses Projektes ist es, ein in der Praxis tatsächlich anwendbares Verfahren zu entwickeln. Dafür ist es erforderlich, dass etablierte, robuste, günstige Sensorik eingesetzt

werden kann – also letztlich Körperschall-Sensoren, die jetzt schon im BHKW-Bereich eingesetzt werden. Diese Sensoren sind nicht speziell für BHKW-Motoren angepasst, sondern entstammen viel stückzahlstärkeren Anwendungen aus dem Automotive-Bereich. Ihre technischen Eigenschaften orientieren sich daher auch an der Anwendung, für die sie eigentlich gedacht sind: Klopfkennung in Automotive-Verbrennungsmotoren. Für die hier durchgeführten Untersuchungen ist es somit erforderlich, ihre technischen Eigenschaften auf ihre Eignung zur Verbrennungsdiagnose praktisch zu überprüfen. Diese Eigenschaften sind im Wesentlichen der durch den Sensor abgedeckte Frequenzbereich und seine Sensitivität.

Die an Verbrennungsmotoren etablierten Sensoren sind bezüglich ihres Frequenzbereiches auf die Erkennung von klopfender Verbrennung ausgerichtet. Ein typisches Frequenzspektrum ist in Abbildung 6.2. dargestellt.

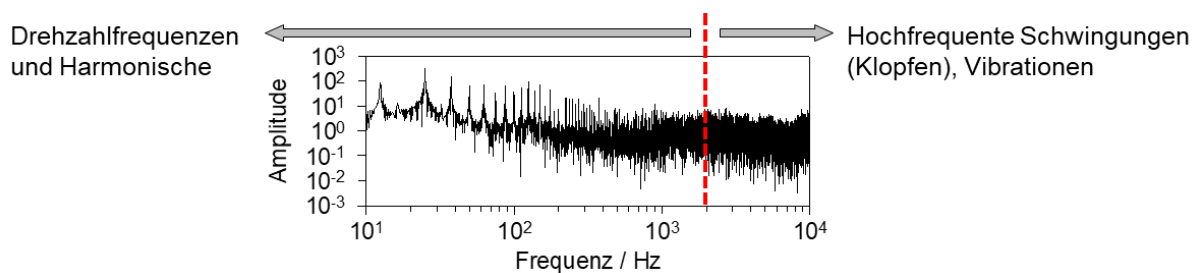


Abbildung 6.2: Beispielhaftes Frequenzspektrum eines Körperschallsignals

Die für Verbrennungsdiagnose relevanten Frequenzen hängen im Wesentlichen vom Bohrungsdurchmesser des Motors ab. Für kleine Motoren ergeben sich größere Resonanzfrequenzen, für größere Motoren entsprechend kleinere Resonanzfrequenzen. Ein auch in BHKW-Anwendungen weit verbreiteter piezoelektrischer Körperschall-Sensor ist der Sensor von Bosch (siehe Abbildung 6.3 a). Der nominelle Frequenzmessbereich dieses Sensors reicht von 3 kHz bis 25 kHz, wobei er eine Sensitivität von 25 mV/g besitzt (BOSCH, 2017). Damit deckt er nominell niedrige Frequenzbereiche nicht ab, in denen relevante Informationen über die Verbrennung enthalten sein könnten.

Für eine Bewertung, ob Seriensensoren hinsichtlich der Identifikation von Verbrennungsmerkmalen für die Emissionsschätzung geeignet sind, wurde daher vergleichend ein weiterer Sensortyp mit einem deutlich niedrigeren Frequenzbereich verwendet. Dabei kam ein piezoelektrischer Körperschall-Sensor vom Typ 4521-C der Firma Brüel & Kjær zum Einsatz (siehe Abbildung 6.3 b). Dieser Sensor besitzt einen nominellen Frequenzbereich von 1 Hz bis 9000 Hz bei gleichzeitig etwas niedrigerer Sensitivität von 10 mV/g (Brüel & Kjær, 2015). Der Frequenzmessbereich dieses Sensors entspricht damit mehr den aus der Literatur bekannten Frequenzbereichen für die Identifikation von Verbrennungsmerkmalen. Die technische Ausführung und die Kosten dieses Sensortyps zielen dabei jedoch weniger auf serienmäßige Anwendungen an Verbrennungsmotoren ab, als vielmehr auf Forschungs- und Entwicklungsaufgaben.



Abbildung 6.3: Eingesetzte Körperschall-Sensoren a) BOSCH b) Brüel & Kjær

Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen in verschiedenen Betriebspunkten des Motors, der Vergleich der von den Sensoren erfassten Frequenzspektren, und die Schätzung von Verbrennungskenngrößen aus den jeweiligen Sensorsignalen haben im Ergebnis gezeigt, dass der im BHKW-Bereich zur Klopfkennung in großer Stückzahl etablierte Bosch-Sensor die für diese Arbeit erforderlichen Signale in ausreichender Qualität liefert und ohne Einschränkung verwendet werden kann.

Montageposition der Körperschall-Sensoren

Während bei einer Zylinderdruckindizierung die Position des Sensors eindeutig vorgegeben ist (zumindest was den einzelnen Zylinder angeht), stehen beim Körperschall-Sensor hier sehr viele Freiheitsgrade zur Verfügung. Da der von einer Verbrennung in einem Zylinder angeregte Körperschall über den „Körper“ des Motors auch an weiter entfernte Stelle übertragen werden kann (Zeller, 2009), muss ein Körperschall-Sensor, der zylinderindividuelle Informationen erfassen soll, örtlich nicht zwingend an einem bestimmten Zylinder angebracht sein.

Da außerdem die Verbrennung der einzelnen Zylinder zeitlich fest definiert nacheinander stattfindet, kommen die Schallsignale auch nacheinander am Sensor an und können somit dort wieder voneinander unterschieden werden. Theoretisch ist so auch eine Erfassung von mehreren Schallquellen an einer Messposition möglich („Multi-Sense“). Im einfachsten Fall wird zwar ein Körperschall-Sensor pro Zylinder verwendet („Single-Sense“). In der Praxis ist das für kleinere und mittlere Motorengrößen jedoch oft nicht umsetzbar, da geeignete Montagepositionen am Motorblock fehlen. Eine geeignete Wahl der Körperschall-Sensorpositionen ist darüber hinaus auch wichtig, da diese einen deutlichen Einfluss auf die Signalgüte ausüben und eine Identifikation von Verbrennungsmerkmalen durch eine schlechte Signalgüte erschwert wird. Der Einfluss der Position von Körperschall-Sensoren auf die Signalgüte wurde bereits für andere Anwendungen untersucht, zum Beispiel in (Jia, 2014), (Lowe, 2013)

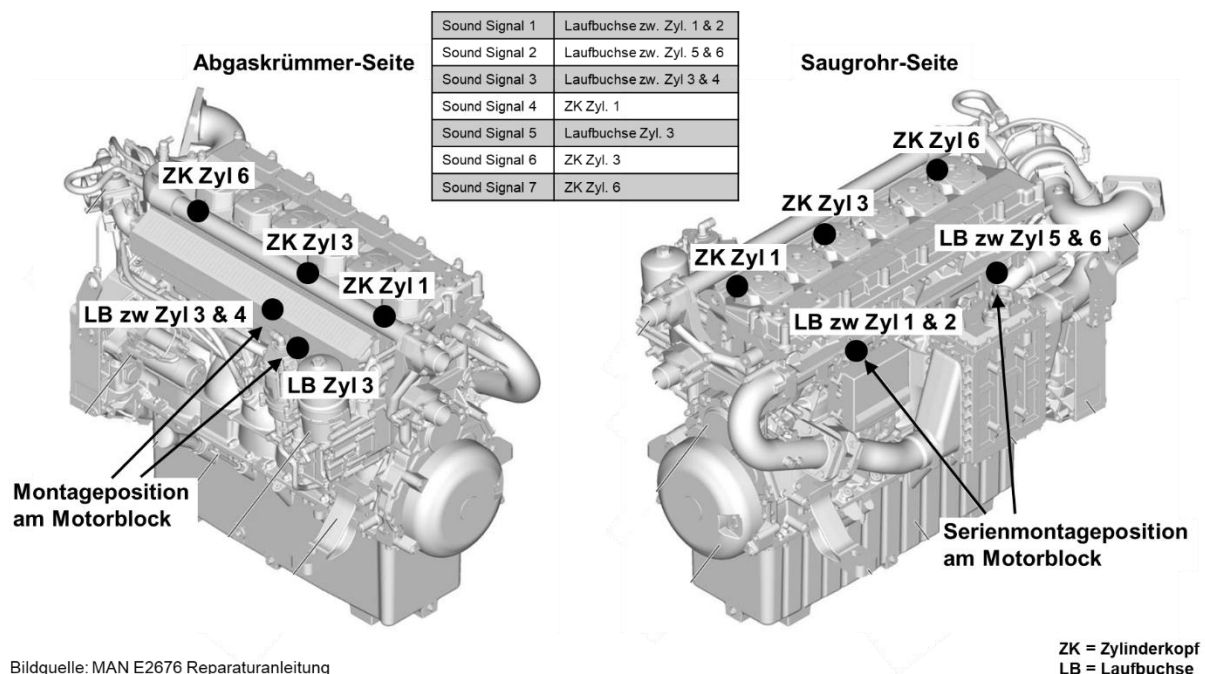
Eine wesentliche Zielsetzung dieses Vorhabens ist die Realisierung einer körperschallbasierten Emissionsregelung, die sowohl bei Neuanlagen als auch bei im Feld befindlichen Anlagen in Betracht kommt und gegebenenfalls nachgerüstet werden kann. Daher wurden zunächst die beiden Serien-Positionen des MAN-Motors verwendet. Um ein umfangreicheres Bild über das Körperschallverhalten zu bekommen und um möglicherweise eine für die Emissionsschätzung besonders geeignete Position identifizieren zu können, wurden weitere Messpositionen für die nachfolgende Untersuchung ausgewählt.

Da sich „Serien-Positionen“ von Hersteller zu Hersteller, Baureihe zu Baureihe unterscheiden – und bei manchen Motorbaureihen gar nicht vorgesehen sind, – und im Projekt ein möglichst universelles Verfahren entwickelt werden sollte, wurde außerdem über diese festen Positionen hinaus

- eine magnetische Befestigung für Körperschall-Sensoren entwickelt, mittels derer Signale an beinahe beliebigen Stellen des Motors aufgenommen werden konnten,
- eine Sensoraufnahme für Zylinderkopfschrauben entwickelt, da dieser mechanische Zugang an den meisten Motoren zur Verfügung stehen würde.

Für die im Projekt durchgeführten Messprogramme wurden sowohl die Signale der Körperschall-Sensoren als auch die Signale der Zylinderdruck-Sensoren als Referenzgröße mit 48 kHz Abtastung aufgezeichnet und dauerhaft abgespeichert – ab dem Zeitpunkt im Projektverlauf, zu dem ein Zylinderkopf mit Indizierbohrungen zur Verfügung stand. Damit steht aus einem großen Teil des Projektzeitraumes eine überaus umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, um Berechnungsmodelle für eine Emissionsschätzung entwickeln und verifizieren zu können.

Abbildung 6.4 zeigt eine schematische Darstellung der untersuchten Positionen am Versuchsmotor.



Bildquelle: MAN E2676 Reparaturanleitung

Abbildung 6.4: Positionen der Körperschall-Sensoren am Versuchsmotor

Bewertung der Körperschallsensorpositionen

Im Verlauf des Projekts wurden damit systematisch verschiedene Sensorpositionen am MAN 2676 erprobt. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf Positionen gelegt, die in der Nähe der Brennräume liegen, wo auch der Verbrennungsschall entsteht. Neben den von MAN vorgegebenen Positionen zwischen den Laufbuchsen der Zylinder 1 und 2 sowie der Zylinder 5 und 6 wurde ein weiterer Sensor an der Laufbuchse zwischen Zylinder 3 und 4 und an der Laufbuchse von Zylinder 3 angebracht. Des Weiteren wurden drei Zylinderkopfschrauben so bearbeitet, dass darauf Körperschallsensoren angebracht werden konnten. Diese Positionen sind in Abbildung 6.4 mit Sound Signal 1-7 bezeichnet.

In umfangreichen Untersuchungen über mehrere Betriebspunkte des Motors wurde für diese Positionen verglichen, wie gut die Korrelation der von den einzelnen Sensoren aufgezeichneten

ten Signale zu den aus Zylinderdruckindizierung (als Referenzgröße) berechneten Verbrennungseigenschaften ist. Ein Beispiel für eine solche Auswertung ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Für ein ausgewähltes Paar der Körperschall-Sensoren ist dort aufgezeichnet, wie die tatsächliche Schwerpunktlage der Verbrennung (CoC – Center of Combustion) aus vielen einzelnen Arbeitsspielen der sechs Zylinder sich in den Merkmalen des Körperschall-Signals wiederfindet.

Aus Abbildung 6.5 erkennt man, dass für die in diesem Beispiel gewählten beiden Sensoren (zwei Sensoren für alle sechs Zylinder, es handelt sich hier also um „Multi-Sense“) und die in diesem Beispiel gewählten Merkmale der Körperschall-Signale

- zum einen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Körperschall und Verbrennung besteht, was man an der streng monoton steigenden Form der Punktwolken erkennt,
- zum anderen dieser Zusammenhang aber unterschiedlich gut für die einzelnen Zylinder ausgeprägt ist: Je steiler die Punktwolke eines Zylinders in Abbildung 6.5 ist, desto besser lässt sich aus dem Körperschall auf die Schwerpunktlage CoC der Verbrennung schließen.

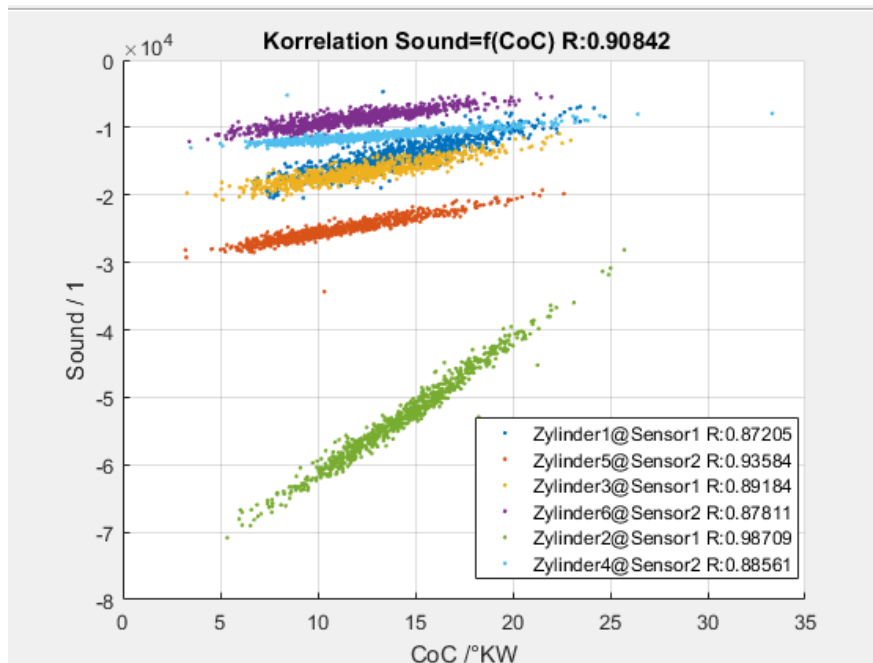


Abbildung 6.5: Streudiagramm $\text{Sound} = f(\text{CoC})$. Jeder Punkt im Streudiagramm zeigt den Zusammenhang aus einem einzelnen Arbeitsspiel in einem einzelnen Zylinder bezüglich tatsächlichem CoC und Merkmalen im Körperschall. Die einzelnen Arbeitsspiele eines Zylinders sind jeweils in einer Farbe zusammengefasst. Es gibt keine zeitliche Mittelung der Arbeitsspiele.

Mit den zur Verfügung stehenden Sensor-Positionen, den sechs Zylindern, und den im Projekt ermittelten verschiedenen Berechnungsmodellen ergibt sich eine kombinatorisch große Zahl an Möglichkeiten, wie aus dem Körperschall Verbrennungskenngrößen geschätzt werden könnten. Im Projekt wurde daher eine automatisierte Auswertung der archivierten Daten entwickelt, mit der die verschiedenen Kombinationen miteinander verglichen werden können. Das ist zum einen für die Bewertung der „besten“ Sensorpositionen erforderlich, zum anderen auch für die Ermittlung der „besten“ Modelle.

Was die *Sensorpositionen* angeht, können folgende Ergebnisse für den untersuchten Motor festgehalten werden:

- Die meisten betrachteten Sensorpositionen liefern im Körperschall-Signal Information über Verbrennungskenngrößen je Arbeitsspiel.
 - Aber: Keine der betrachteten Sensor-Positionen liefert Information über *alle* Zylinder des Motors. Bei jeder der betrachteten Sensor-Positionen gibt es einen oder mehrere Zylinder, deren Verbrennungskenngrößen nicht mit den Körperschall-Signalen korrelieren.
 - Das heißt, für diesen Motortyp müssen mindestens zwei Körperschall-Sensoren verwendet werden.
- Die vom Hersteller dieses Motors für die Klopferkennung vorgesehenen Positionen liefern ausreichend gute Signale.
- Die je Zylinder möglichen Positionen auf den Zylinderkopfschrauben liefern zwar Information in den Signalen, allerdings mit einem deutlich schwächeren Signal-Rausch-Abstand als die anderen betrachteten Positionen.
- Ein magnetisch am Motor befestigter Körperschall-Sensor liefert ebenfalls Information über die Verbrennungseigenschaften je Arbeitsspiel, allerdings mit einem erheblich reduzierten Signal-Rausch-Abstand als fest montierte Sensoren. Die magnetische Befestigung hat sich über eine lange Betriebszeit als dauerhaft erwiesen.
- Die örtliche Nähe eines Körperschall-Sensors zu einem bestimmten Zylinder bedeutet nicht unbedingt, dass die Schätzung für diesen einen Zylinder am besten sein wird. Das deckt sich mit den Erkenntnissen in (Andersson, McKelvey, & Larsson, 2014), wo ebenfalls der Einfluss der Sensorposition auf die Signalgüte bezüglich Rückschlüssen auf Verbrennungseigenschaften untersucht und festgestellt wurde, dass teilweise weiter entfernte Zylinder besser geschätzt werden können als nahe gelegene Zylinder.
- Für die Übertragung der Projektergebnisse auf andere Motoren ist eine Methode erforderlich, wie Sensor-Positionen bezüglich ihrer Signalgüte bewertet werden können. Siehe dazu Abschnitt 6.2.6.

6.1.3 Abgasmessung

Die motorglobalen Emissionen setzen sich aus den Emissionsbeiträgen der einzelnen Zylinder zusammen. Motorglobale Emissionen können mit inzwischen etablierten NO_x-Sensoren gemessen werden. Für die einzelnen Zylinder ist dies an Motoren weder vorgesehen, noch von der Zugänglichkeit her praktikabel. In diesem Forschungsvorhaben wurde der Motor daher so modifiziert, dass mit zusätzlicher Abgasmesstechnik Abgasproben an den einzelnen Zylindern entnommen und ausgewertet werden können. Abbildung 6.6 zeigt schematisch die resultierende Emissionsmessung am Versuchsmotor.

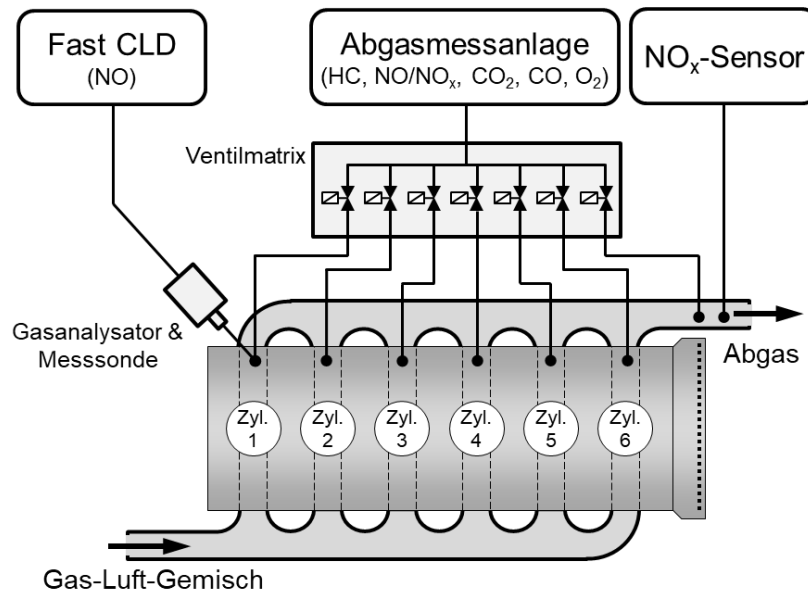


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der Emissionsmessung am Versuchsgregat mit zylinderindividueller Messung, motorglobaler Messung, und Messung über einen NO_x-Sensor.

Für die Analyse der wesentlichen Abgaskomponenten (CO, CO₂, HC, NO/NO_x und O₂) wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Abgasmessanlage sowie zur kontinuierlichen Aufzeichnung ein NO_x-Sensor der Firma Continental verwendet. Beide Abgasmessungen erfolgten dabei im Abgassammelrohr. Für die Modellerstellung zur individuellen Beeinflussung der einzelnen Zylinder bezüglich der entstehenden NO_x-Emissionen werden jedoch zusätzlich die Informationen über die individuellen Beiträge jedes einzelnen Zylinders benötigt. Dafür wurden Abgasentnahmesonden im Abgaskrümmen für jeden Zylinder vorgesehen. Mit Hilfe einer Ventilmatrix sowie einem Druckminderer bzw. Druckpulsationsdämpfer konnte die Abgasmessanlage, neben der Messung im Abgassammelrohr, auch die Emissionsbeiträge jedes einzelnen Zylinders messen.

NO_x-Sensoren konnten aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten nicht zylinderindividuell installiert werden. Auch sind NO_x-Sensoren bei den vorherrschenden Umgebungsbedingungen, also den hohen Temperaturen und Drücken bei aufgeladenen Motoren im Abgaskrümmen direkt nach den Zylindern, für eine kontinuierliche Messung nicht ausgelegt.

Hinsichtlich der Messgenauigkeit weisen NO_x-Sensoren darüber hinaus auch eine größere Fehlertoleranz auf. Laut Datenblatt des hier verwendeten NO_x-Sensors beträgt die Messunsicherheit im Messbereich von 0-500 ppm +/- 10% (Conti, 2011). Der NO_x-Analysator der Abgasmessanlage hingegen besitzt eine deutlich geringere Messunsicherheit von unter 2 % in einem Messbereich von 0-1000 ppm (ECO PHYSICS, 2010). Er eignet sich daher besser für eine genaue Ermittlung der NO_x-Emissionen sowohl im Abgassammelrohr als auch der einzelnen Zylinder.

Weiterhin ist das Langzeitverhalten der NO_x-Messung wichtig. Die garantierte Lebensdauer des NO_x-Sensors beträgt laut Hersteller 2000 Betriebsstunden. In der Praxis liegt die Lebensdauer solcher Sensoren sicher weit höher, was auch Erfahrungswerte bestätigen, jedoch ist eine Signaldrift aufgrund von Alterungserscheinungen nicht auszuschließen. Der NO_x-Analysator der Abgasmessanlage konnte anhand definierter Kalibriergase vor jeder Messung neu

justiert werden. Damit konnte über der Projektlaufzeit eine hohe Messgüte sichergestellt werden.

Neben den Unterschieden der Emissionen zwischen den Zylindern, können auch zyklische Schwankungen beim jeweils betrachteten Zylinder zu deutlich unterschiedlichen Emissionsbeiträgen führen. Die zylinderindividuelle Emissionsmessung mit Hilfe der Abgasmessanlage erfüllt jedoch nicht eine solch hohe zeitliche Auflösung, um Unterschiede zwischen einzelnen Verbrennungszyklen detektieren zu können. Um auch die zyklischen Emissionen beurteilen zu können, wurde im Rahmen dieses Projektes eine schnelle Abgasmessstechnik zur Erfassung der NO-Emissionen der Fa. Cambustion Ltd. eingesetzt (Cambustion, 2018). Dieser Fast CLD mit seinem motornahen Gasanalysatormesskopf wurde dabei an den zylinderindividuellen Entnahmesonden der Abgasmessanlage angeschlossen (dies ist in Abbildung 6.6 nur schematisch für den ersten Zylinder dargestellt). Die Umrechnung auf die NO_x-Emissionen erfolgte mittels eines experimentell für diesen Motor bestimmten NO zu NO_x-Verhältnisses, gemessen mit der Abgasmessanlage. Somit war neben einer zylinderindividuellen auch eine zyklische Betrachtung der NO_x-Emissionen möglich.

Bei den so durchgeführten Emissionsuntersuchungen sind zwei wesentliche Aspekte mit erheblicher Auswirkung auf die Emissionen zu beachten:

- Ottomotorische Zyklenschwankungen in aufeinanderfolgenden Arbeitsspielen in einem bestimmten Zylinder und
- Unterschiede zwischen einzelnen Zylindern.

Ottomotorische Zyklenschwankungen

Wie andere Verbrennungseigenschaften auch, hängen Emissionen stark von den Zyklenschwankungen bei ottomotorischen Brennverfahren ab. Bei von außen einstellbaren gleichen Ausgangsbedingungen (z.B. Druck + Temperatur + Zusammensetzung des Gas-Luft-Gemischs, Zündzeitpunkt, Zündenergie, Motortemperatur) können sich dennoch starke Unterschiede in der Verbrennung von einem Arbeitsspiel zum nächsten ergeben. Diese Zyklenschwankungen sind *nicht* Gegenstand dieses Projektes, sie müssen jedoch bei Auswertungen berücksichtigt werden. Hilfreich dabei ist, dass sich immerhin über mehrere aufeinanderfolgende Arbeitsspiele bei gleichen Ausgangsbedingungen im Mittel gleiche Verläufe ergeben.

Unterschiede zwischen einzelnen Zylindern

Auch im zeitlichen Mittel führen allerdings motorglobal gleiche Ausgangsbedingungen, wie beispielsweise ein für alle Zylinder eingestelltes Gas-Luft-Gemisch oder ein motorglobaler Zündzeitpunkt, nicht zu gleichen Verbrennungsabläufen in allen Zylindern. Diese systematischen Abweichungen der Zylinder untereinander können zum Beispiel konstruktiv bedingt sein oder aber durch veränderliche Größen hervorgerufen sein (z.B. Alterung Zündkerzen). Abbildung 6.7 zeigt anhand der zylinderindividuell gemessenen NO_x-Emissionen am Versuchsaggregat die systematischen Abweichungen der einzelnen Zylinder untereinander. Dabei sind in diesem Diagramm zwei Betriebspunkte mit unterschiedlichem absolutem NO_x-Niveau dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Betriebspunkte sind die Daten normiert dargestellt.

Bei den dargestellten Daten handelt es sich um Mittelwertmessungen über mehrere Minuten, so dass ottomotorische Zyklenschwankungen sicher keine Rolle spielen. Abbildung 6.7 zeigt deutlich die teils erhebliche Abweichung der NO_x-Emissionen einzelner Zylinder vom motorglobalen Mittelwert.

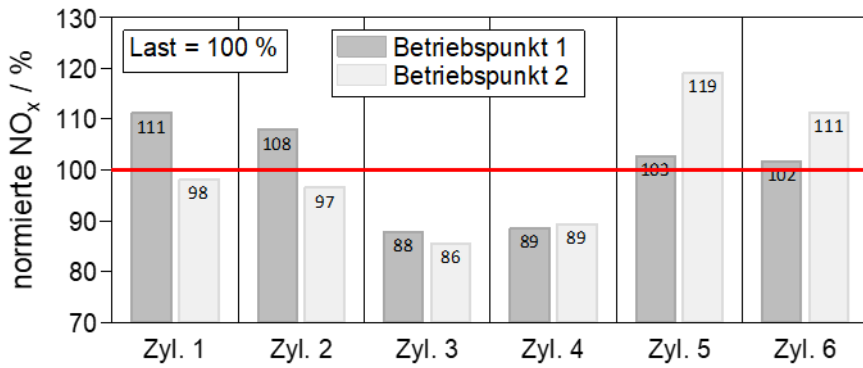


Abbildung 6.7: Unterschiedliche NO_x-Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder. Die Messungen der beiden Betriebspunkte sind normiert auf den jeweiligen motorglobalen NO_x-Messwert (=100 %). Die Messungen sind über mehrere Minuten zeitlich gemittelt.

Dieses Verhalten einzelner stark abweichender Zylinder ist ungünstig, da zugunsten des gesetzeskonformen Betriebes der Motor mit einem schlechteren Gesamtwirkungsgrad betrieben werden muss als es theoretisch möglich wäre. Verdeutlicht werden kann dies anhand Abbildung 6.8. Hier sind die die Gesamt-NO_x-Emissionen, die mittlere Verbrennungsschwerpunkt-lage und der indizierte Gesamtwirkungsgrad des Motors über einer globalen Zündzeitpunktvariation für ein konstantes Gas-Luft-Gemisch aufgetragen.

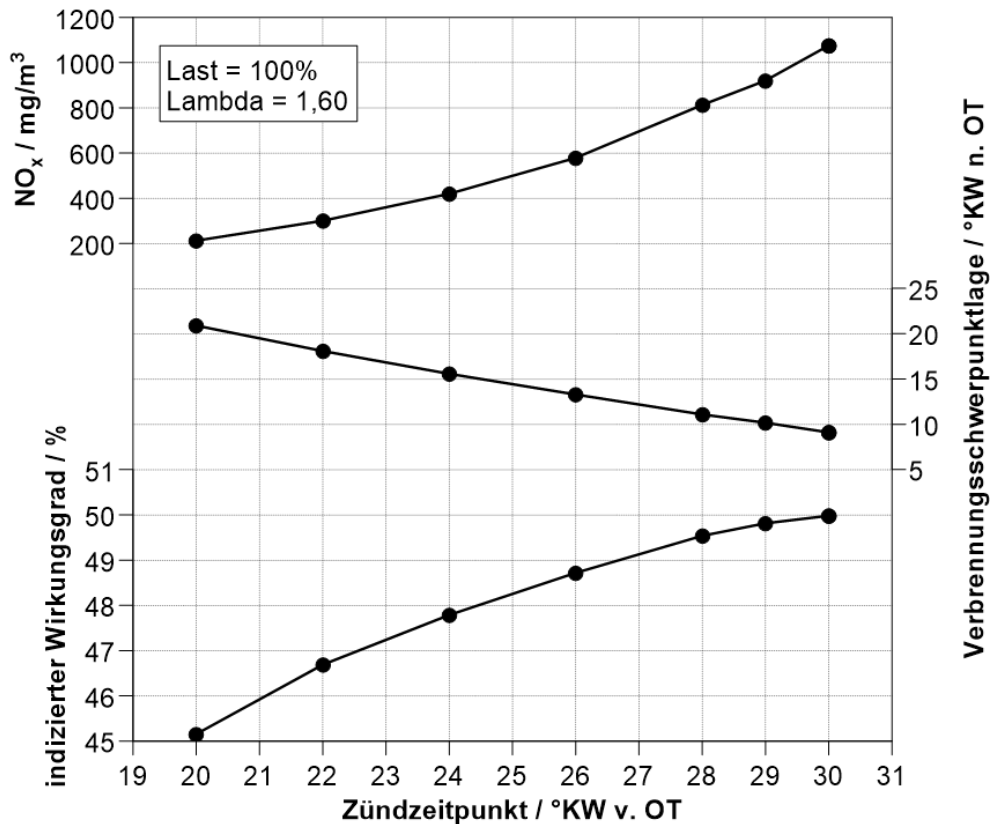


Abbildung 6.8: Motorglobale NO_x-Emissionen, mittlere Verbrennungsschwerpunktlage und Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom eingestellten Zündzeitpunkt

Folgende Punkte aus Abbildung 6.8 sind wichtig:

- Die NO_x -Emissionen hängen *nichtlinear* vom Zündzeitpunkt ab.
- Der indizierte Wirkungsgrad hängt *nichtlinear* vom Zündzeitpunkt ab.
- Die Schwerpunktlage der Verbrennung hängt (nahezu) *linear* vom Zündzeitpunkt ab.

Auf den letzten dieser drei Punkte wird später in diesem Bericht eingegangen. Er ist elementar für die Frage, wie man die in diesem Projekt erreichten Ergebnisse auf andere Motoren übertragen kann, wenn weder Referenzgrößen aus zylinderindividueller Emissionsmessung noch aus zylinderindividueller Zylinderdruckmessung vorliegen. Damit beschäftigt sich erst Abschnitt 6.2.6.

Hier soll zunächst auf die ersten beiden Punkte eingegangen werden. Beide Abhängigkeiten – NO_x -Emissionen und Wirkungsgrad – sind nichtlinear in Bezug auf den von außen vorgegebenen Zündzeitpunkt. Aber die NO_x -Emissionen hängen in einem Bereich *stark* vom Zündzeitpunkt ab, in dem der Wirkungsgrad *schwach* vom Zündzeitpunkt abhängt. Und umgekehrt. Abbildung 6.9 hebt diesen Zusammenhang für die Daten aus Abbildung 6.8 hervor.

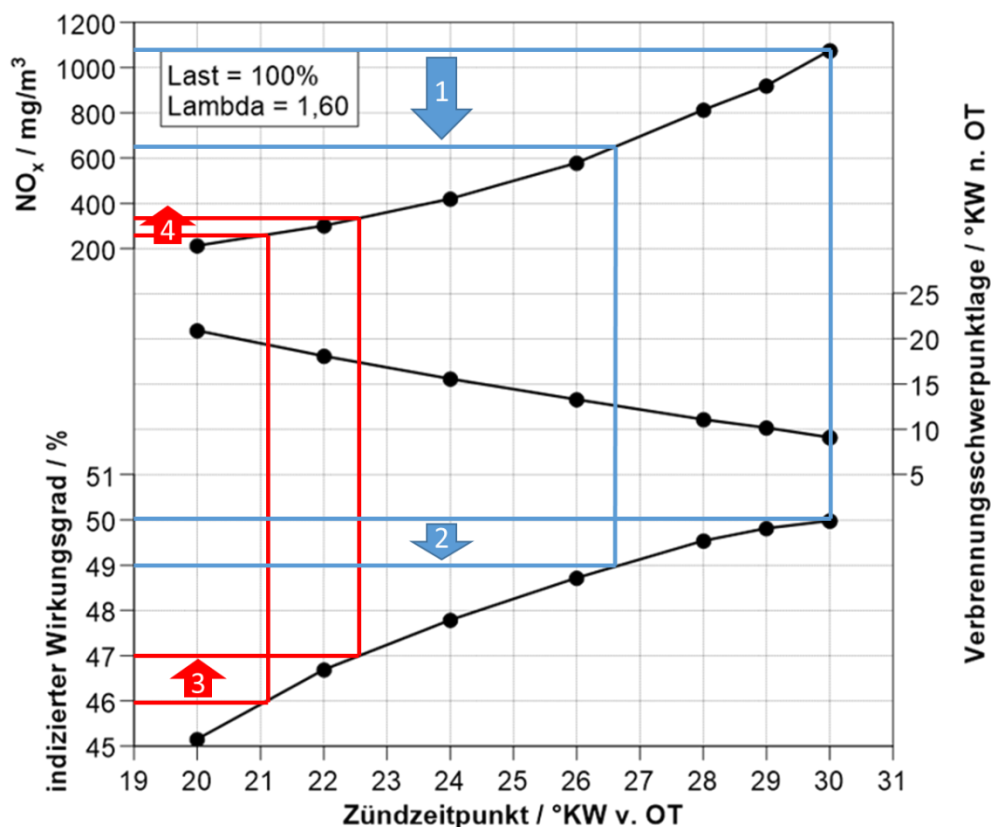


Abbildung 6.9: Gegenläufige Nichtlineare Zusammenhänge von NO_x -Emissionen und Wirkungsgrad zum Zündzeitpunkt. Gleiche Änderungen im Wirkungsgrad führen je nach Betriebspunkt zu erheblich unterschiedlichen Änderungen bei den NO_x -Emissionen.

Um NO_x um einen bestimmten Betrag zu reduzieren (blauer Pfeil 1 in Abbildung 6.9) muss eine Abnahme des Wirkungsgrades in Kauf genommen werden (blauer Pfeil 2), in diesem Beispiel 1 % Wirkungsgrad. In einem anderen Bereich der Kurve muss aber mit einer Erhöhung

des Wirkungsgrades um ebenfalls 1 % (roter Pfeil 3) nur eine wesentlich geringere Zunahme der NO_x-Emissionen in Kauf genommen werden (roter Pfeil 4).

Diese motorglobalen Zusammenhänge lassen sich auch auf die Vorgänge in jedem einzelnen Zylinder übertragen. Eine NO_x-Reduzierung bei einem höheren NO_x-Niveau ergibt nur eine moderate Wirkungsgradabnahme, wohingegen eine NO_x-Erhöhung bei niedrigem NO_x-Niveau einen höheren Wirkungsgradgewinn ergibt. Dass die unterschiedlichen NO_x-Niveaus innerhalb des Motors tatsächlich vorliegen, zeigte oben schon Abbildung 6.7. Dies macht man sich als Ergebnis dieses Projektes zunutze, indem man über einen zylinderindividuell angepassten Zündzeitpunkt die Zylinder bezüglich ihrer Emissionen gleichstellt und dabei die motorglobalen Emissionen reduzieren oder den Wirkungsgrad des Motors verbessern kann.

Gerade bei Motoren die eine zusätzliche Abgasnachbehandlung in Form eines nachgeschalteten SCR-Systems haben (Selective Catalytic Reduction), könnte über eine innermotorische Senkung der Stickoxid-Emissionen so auch eine Reduzierung der benötigten wässrigen Harnstofflösung erzielt werden. Da Motoren mit SCR-System typischerweise bei sehr hohen NO_x-Rohemissionen (also Emissionen nach Motor, vor SCR-Kat) betrieben werden, ist hier der in Abbildung 6.9 gezeigte Effekt der gegenläufigen Nichtlinearitäten besonders ausgeprägt. Der Verbrauch von wässriger Harnstofflösung für die Stickoxidsenkung in einem SCR-System liegt typisch bei ca. 5% des Kraftstoffverbrauches (van Basshuysen & Schäfer, 2015). Gemessen an den hohen Betriebsstunden stationärer Anlagen könnten über der Zeit mit Hilfe der zylinderindividuellen Emissionsregelung durchaus große Mengen an wässriger Harnstofflösung eingespart werden.

6.1.4 Motorische Untersuchungen

Die Einflussparameter auf die innermotorische Stickoxidbildung sind vielfältig. Um für die Modellerstellung und -validierung eine große Datenbasis zur Verfügung zu haben, wurden daher über der Projektlaufzeit umfangreiche Messungen durchgeführt. Dabei wurde mit Hilfe der am Motor vorhandenen Aktuatorik gezielt Einfluss auf die motorische Stickoxidbildung ausgeübt. Unter anderem wurden verschiedene Zündzeitpunktvariationen, sowohl motorglobal als auch zylinderindividuell, durchgeführt. Auch der Einfluss verschiedener Gas-Luft-Gemische (Verbrennungsluftverhältnisse) wurde bei den Messungen berücksichtigt. Diese Variationen wurden darüber hinaus auch bei verschiedenen Motorlasten durchgeführt, so wie sie bei stationären Anlagen typisch sind.

Die im Projekt geplante und beim Projektbeginn etablierte strukturierte Vorgehensweise hat sich dabei bewährt. Standardisierte Messprogramme sorgen dafür, dass die über den Projektverlauf angefallenen Daten miteinander verglichen werden können. Die Umfänge dieser Messprogramme sind erheblich, sowohl was die Datenbreite (siehe Messstellen-Liste im Anhang) als auch die zeitliche Datentiefe angeht. Zeitlich sind beispielsweise Einschwingvorgänge bezüglich Motortemperatur von großer Bedeutung, sowohl nach Start des Motors als auch nach Lastwechseln. Da bei der Verbrennung entstehende NO_x-Emissionen sehr stark von Temperaturen abhängen, ist bei Vergleichen von Auswertungen insbesondere auf vergleichbare Temperaturen rund um die Verbrennung zu achten.

Für die Projektziele sind *stationäre* Betriebszustände wichtig. In den stationär eingestellten Betriebspunkten wurden daher alle relevanten Messgrößen – darunter auch die Zylinderdrücke und Körperschallsignale – über Zeiträume von mehreren Minuten aufgezeichnet.

Die verschiedenen Messungen mit ihren jeweiligen Einstellparametern sowie der jeweiligen Motorkonfiguration wurden fortlaufend und detailliert in einer Versuchsdokumentation protokolliert. Mit Hilfe dieser Dokumentation konnten die aufgezeichneten und archivierten Daten nachverfolgbar verknüpft werden. Damit war es auch möglich, bereits früh im Projektverlauf eine weitgehende automatisierte Auswertung der umfangreichen Messdaten durchzuführen. Diese automatische Auswertung ermöglichte dann, dass begleitend zur Erarbeitung der Berechnungsmodelle die Analysen auch auf früher aufgezeichneten Daten durchgeführt werden konnten.

Im Ergebnis kann im Projekt auf einen Pool an Daten zugegriffen werden, der vielfältige Betriebspunkte und deutlich unterschiedliche Motorkonfigurationen abdeckt – obwohl die Messungen alle am selben Motor durchgeführt wurden. So liegen beispielsweise Daten zu verschiedenen Zündkerzen, Zündsystemen, Zylinderköpfen, Kolbenformen und Verdichtungsverhältnissen vor. Das reduziert zwar auf der einen Seite die Zahl direkt miteinander vergleichbarer Messkampagnen. Es sorgt aber auch für eine fundiertere Basis an Daten für ein zentrales Projektziel: die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Motoren. Da im Projektverlauf immer wieder Anpassungen an eine veränderte Motorkonfiguration erforderlich waren, wurde diese Übertragbarkeit der Ergebnisse kontinuierlich weiterentwickelt.

6.2 Datenanalyse und Entwicklung Berechnungsmodelle

Als inhaltlicher Schwerpunkt war im Projekt die Analyse der Daten und die Herleitung von Berechnungsmodellen vorgesehen, wie von gemessenen Körperschall-Daten auf die Emissionen der einzelnen Zylinder geschlossen werden kann. Bereits im Zwischenbericht zum Vorhaben (Schmid & Bernhardt, 2019) wurden grundsätzliche Berechnungswege vorgestellt, sie sind zum besseren Verständnis in Abbildung 6.10 hier noch einmal dargestellt. Auf bedeutende Weiterentwicklungen seit dem Zwischenbericht wird anschließend eingegangen.

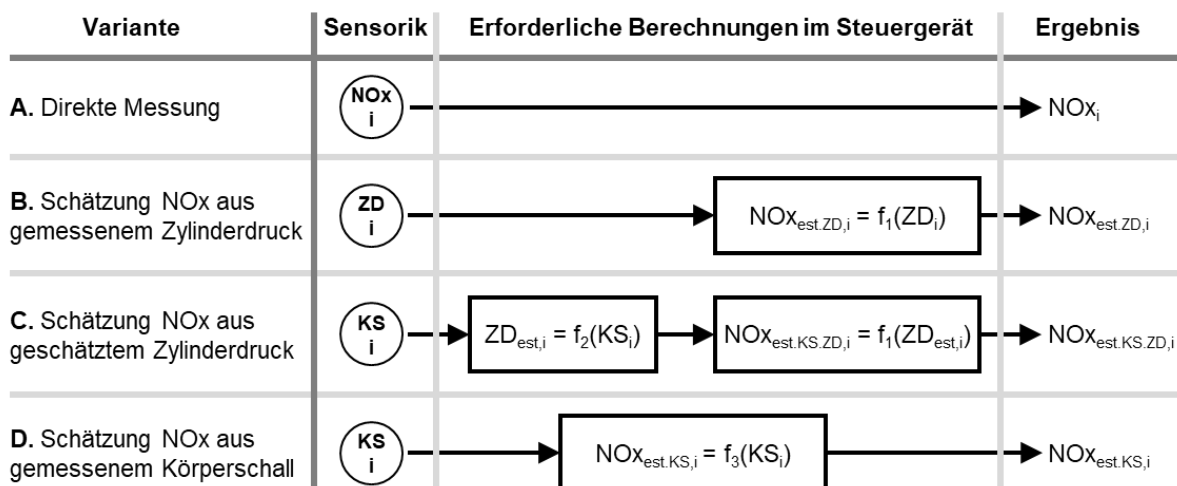


Abbildung 6.10: Verschiedene Möglichkeiten, zylinderindividuelle NO_x -Werte zu ermitteln. „ZD“ = Zylinderdruck, „KS“ = Körperschall, „est“ = geschätzt (estimated). Zu beachten: Für die Schätzung eines NO_x -Wertes aus Zylinderdruck kann dieselbe Funktion f_1 verwendet werden, unabhängig davon ob deren Eingangsgrößen gemessene (Fall B) oder geschätzte (Fall C) Zylinderdruck-Verläufe sind.

Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Pfaden A/B auf der einen Seite und C/D auf der anderen Seite ist, dass bei C/D Körperschall als Sensorik eingesetzt wird, also eine Technik, die im Feld erwiesenermaßen robust und bezahlbar ist.

Der Weg, zunächst aus gemessenen Körperschall-Signalen einen Zylinderdruck-Verlauf der erfassten Verbrennung zu schätzen (Pfad C in Abbildung 6.10), hat den Reiz, dass anschließend bekannte – und physikalisch interpretierbare – Merkmale aus Zylinderdruck-Verläufen zur Herleitung der NO_x -Emissionen herangezogen werden können. Der einstufige Pfad D dagegen bietet die Chance, ohne Fehlerfortpflanzung direkt aus gemessenen Daten zu einer Schätzgröße zu kommen, da keine Zwischengrößen vorgesehen sind. Auf Eigenschaften dieser Pfade, auf Ergebnisse sowie auf Vor- und Nachteile geht Abschnitt 6.2.5 ein. Unabhängig vom eingeschlagenen Pfad ist für den Erfolg jedoch entscheidend, ob in den Körperschall-Signalen überhaupt *Information* über die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen enthalten ist. Die Ergebnisse der entsprechenden Untersuchung sind in Abschnitt 6.2.3 dargestellt. Zuvor wird in den beiden folgenden Abschnitten einführend noch auf zwei eher technische Aspekte eingegangen, die bei der Analyse der Daten durchgeführt wurden.

6.2.1 Datenvorverarbeitung

Ein Ziel des Vorhabens ist der Einsatz der Ergebnisse in der Praxis. Daher wurden im Vorhaben bereits die Prüfstandsmessungen der Körperschall-Signale mit in der Serie etablierten Geräten durchgeführt, nicht mit Prüfstandssystemen. Daher wurden die Zylinderdruck-Signale und die Körperschall-Signale auf zwei unterschiedlichen Geräten mit jeweils 48 kHz Abtastrate aufgezeichnet. Die meisten anderen Messgrößen am Motor und BHKW (siehe Messstellenliste im Anhang) wurden mit einer Motorsteuerung mit einer Abtastrate von 10 Hz erfasst. Emissionsdaten wurden teils mit der Motorsteuerung (NO_x -Sensor), teils mit der Abgasmessanlage gemessen (siehe Abschnitt 6.1.3). Vor einer Analyse der Daten müssen die Daten der verschiedenen Erfassungssysteme miteinander synchronisiert werden. Insbesondere bei den je Arbeitsspiel erfassten Daten ist das für die weitere Auswertung wichtig. Miteinander in Bezug gesetzte Messdaten von Zylinderdruck, Körperschall und Emissionen müssen korrekt denselben Arbeitsspielen zugeordnet werden.

Zylinderdruck und Körperschall werden dabei über Messgrößen an Kurbel- und Nockenwelle synchronisiert, da diese Signale an beiden Messgeräten angeschlossen sind. Darüber ist eine eindeutige Zuordnung der Daten zu Arbeitsspielen möglich.

Bei der aufwändigen zylinderindividuellen und zyklusaufgelösten NO_x Messung erfolgt die Aufzeichnung über einen zusätzlichen Kanal am Gerät für die Zylinderdruckmessung. Die Synchronisierung geschieht somit indirekt auf gleichem Wege wie bei den Zylinderdruck- und Körperschalldaten.

Die motorglobal erfassten Daten (darunter die über NO_x -Sonde gemessenen NO_x -Emissionen) werden in den jeweiligen Erfassungsgeräten mit Millisekunden-genauem Zeitstempel versehen, so dass darüber eine automatisierte Zuordnung zu den Daten aus Zylinderdruck und Körperschall möglich wird. Totzeiten in den Erfassungsketten trägerer Signale werden durch zeitliche Korrelation der Signale ermittelt und in den automatisierten Auswertungen kompensiert. Eine an den jeweiligen Signalweg angepasste Tiefpassfilterung bereinigt die Signale von störenden Frequenzen. Zylinderdruck- und Körperschall-Daten werden schließlich in einem letzten Schritt vom Zeitbereich in den Kurbelwinkelbereich umgetastet.

6.2.2 Hauptkomponenten-Analyse

Je nach eingesetzter Modellart ist es erforderlich, einen weiteren Vorverarbeitungsschritt einzuschieben, bevor die eigentliche Auswertung der Daten beginnt. In diesem Projekt hat sich das insbesondere bei der Modellierung mit Künstlichen Neuronalen Netzen KNN als sehr effi-

zient erwiesen. Dazu werden über eine Hauptkomponenten-Analyse Merkmale in den Signalen ermittelt, die dem eigentlichen Berechnungsmodell (z.B. KNN) die Berechnungen erheblich vereinfachen. Dies hält zum einen die rechnerische Komplexität während des Trainings gering, zum anderen ermöglicht ein „kleineres“ Netz später im praktischen Einsatz die Berechnungen in Echtzeit auf weniger leistungsfähigen Prozessoren.

Da es sich bei Körperschalldaten um hochdimensionale Daten handelt, bietet es sich an, diese Dimensionalität zu verringern, indem Dimensionen, die weniger wichtige Informationen enthalten, weggelassen werden. Dabei zeichnen sich wichtige Dimensionen eines Signals dadurch aus, dass sie eine hohe Varianz aufweisen, während bei unwichtigen Dimensionen das nicht der Fall ist. Ein Verfahren mit dem dies bewerkstelligt werden kann, ist die Hauptkomponentenanalyse PCA (Wolff & Bacher, 2010). Dabei handelt es sich um ein Standardverfahren der multivariaten Statistik, das Datenvektoren auf einen Unterraum niedrigerer Dimensionalität projiziert. Die Größe des Eingabevektors in das Künstliche Neuronale Netz und damit die Komplexität der Berechnungen wird um Größenordnungen reduziert, ohne allzu großen Verlust an Informationsgehalt.

Die Hauptkomponenten-Analyse kann auch bei anderen Modellarten als KNN nutzbringend eingesetzt werden. In diesem Projekt wurden hier keine Weiterentwicklungen geleistet, es wurden existierende Standardverfahren eingesetzt. Es soll jedoch an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass ohne diesen Vorverarbeitungsschritt die eigentlichen Modellierungsschritte deutlich erschwert würden.

6.2.3 Korrelationsanalyse

Im Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben (Schmid & Bernhardt, 2019) wurde bereits gezeigt, dass motorglobale NO_x-Emissionen aus Körperschall-Signalen erfolgreich geschätzt werden können; am Versuchs-BHKW auf +/- 10 % genau. Mit dem Übergang zur Schätzung der Emissionen einzelner Zylinder gewinnt die Aufgabenstellung jedoch zusätzliche Komplexität. Es stehen dann eine ganze Reihe an Freiheitsgraden bei der Lösung der Aufgabenstellung zur Verfügung:

- Anzahl der Körperschall-Sensoren (siehe Abschnitt 6.1.2)
- Position der Körperschall-Sensoren (siehe ebenfalls Abschnitt 6.1.2)
- „Sensor-Zylinder-Paare“: Welcher Zylinder wird mit welchem Sensor am besten geschätzt? (siehe ebenfalls Abschnitt 6.1.2)
- Merkmale im Körperschall-Signal; zum Beispiel
 - Merkmale im Zeitbereich
 - Betrachteter Kurbelwinkel-Bereich
 - Signalpegel
 - Merkmale im Frequenzbereich
 - Betrachteter Frequenzbereich
 - (Frequenzgewichtete) Signalenergie

Unabhängig von der gewählten Modellform (siehe Abschnitt 6.2.5) muss gewährleistet sein, dass die Information über die Emissionen eines bestimmten Zylinders in den betrachteten

Merkmale der gemessenen Körperschall-Signale überhaupt enthalten ist. Dies muss außerdem für alle relevanten Betriebsbereiche des Motors zutreffen, da sonst im späteren Betrieb keine ausreichende Zuverlässigkeit der emissionsbasierten Regelung gewährleistet werden kann.

Um die kombinatorischen Verknüpfungen der oben genannten Freiheitsgrade überhaupt bewerten zu können, wurde im Projekt eine automatisierte Korrelationsanalyse eingerichtet, die die entsprechenden Auswertungen für die durchgeführten Messprogramme reproduzierbar durchführt. Ein kleines Beispiel einer solchen Auswertung ist in Abbildung 6.11 dargestellt.

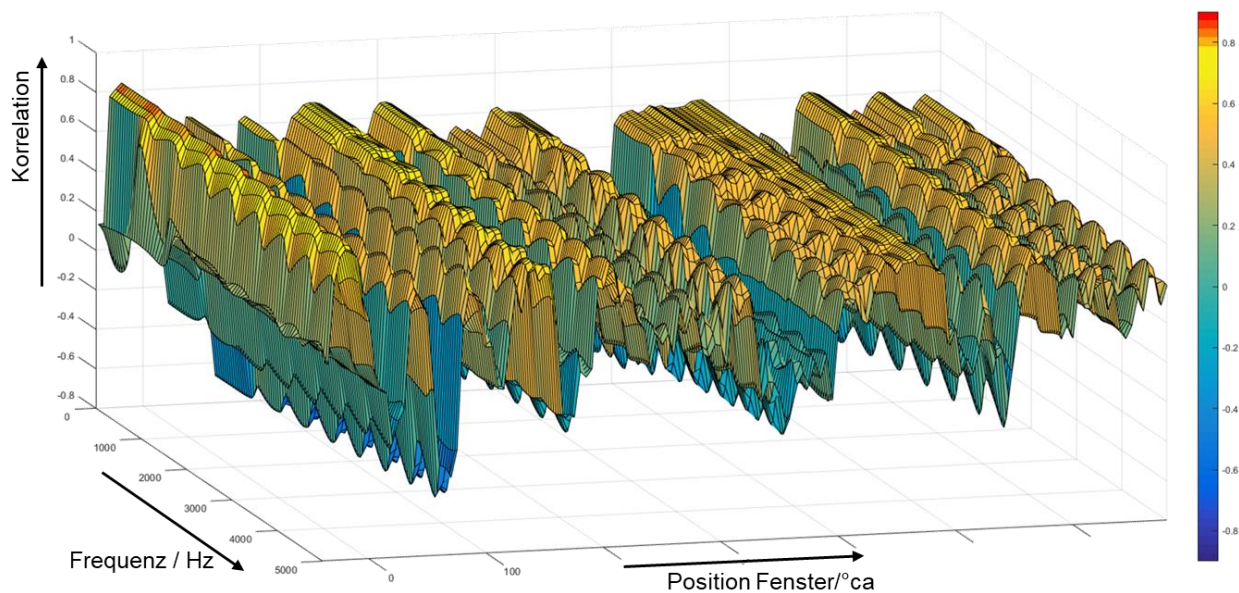


Abbildung 6.11: Korrelation zwischen Körperschalldaten und gemessenem Verbrennungsmerkmal; abhängig von der Lage eines betrachteten Fensters im Kurbelwinkelbereich, und abhängig vom betrachteten Frequenzbereich.

Um herausfinden zu können, in welchem Frequenzbereich und in welchem Kurbelwinkelbereich Informationen über die Verbrennung enthalten sind, wurde eine Korrelationsanalyse auf den verfügbaren Daten einer Messung durchgeführt. Dabei wurde in diesem Beispiel die Signalenergie aus dem von den Körperschall-Sensoren aufgezeichneten Frequenzspektrum in 50 Hz Schritten über einen Kurbelwinkelbereich von jeweils 10 °ca mit den Daten des CoC aus der Zylinderdruckmessung korreliert. Gut zu erkennen ist dabei, dass in diesem Beispiel die höchsten Korrelationen bei niedrigen Frequenzen erreicht werden, mit zunehmender Frequenz nimmt die Korrelation ab.

Ein „kleines Beispiel“ ist das deswegen, da die eigentliche Auswertung aus der Aggregation solcher Messungen mehrerer Betriebszustände besteht, und zwar für jede Kombination der oben genannten Freiheitsgrade. Über diesen Weg wurden beispielsweise die in Abschnitt 6.1.2 genannten Erkenntnisse zum Einfluss des Sensortyps, zum Einfluss der Sensorpositionen und zum Einfluss der Zuordnung Zylinder-Sensor-Paar erarbeitet. Die berechneten Korrelationswerte geben dabei gute Hinweise darauf, welche Sensorpositionen für die Schätzung welcher Zylinder gut geeignet sind.

Die Korrelation gibt allerdings weder an, *wie* aus Merkmalen des Körperschall-Signals die Emissionen konkret geschätzt werden können, noch liefert sie direkt ein Gütekriterium, anhand dessen die spätere Schätzung beurteilt werden kann.

6.2.4 NO_x vs. CoC-Schätzung

Mit den bis hierher vorgestellten Ergebnissen sollte bereits nachvollziehbar sein, dass Informationen über die bei der Verbrennung in einem Arbeitsspiel entstehenden NO_x-Emissionen aus Körperschall-Signalen gewonnen werden können. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde allerdings auch festgestellt, dass insbesondere die individuelle Abgasmessung mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Auch wenn diese Art der Messung in keinem Fall für den späteren praktischen Einsatz angedacht ist, ist sie bereits im Prüfstandsumfeld so aufwändig, dass sie die Aufnahme von Messungen für Modellentwicklung und Modellvalidierung erheblich verteuert. Es wurde daher versucht, neben den in Abbildung 6.10 dargestellten Wegen einfachere Möglichkeiten zu finden, wie ausgehend vom Körperschall eine emissionsbasierte Motorregelung entwickelt werden kann. Das Projektziel war immerhin nicht die Schätzung der Emissionen selbst, sondern die Reduktion der Emissionen durch eine zylinderindividuelle Beeinflussung derselben.

Die Lösung dafür ist ein indirekter Ansatz, wie er bei Gasmotoren ohnehin von der allgemeinen Emissionsregelung her bekannt ist: In den meisten Fällen werden nicht die Emissionen direkt geregelt (also direkt gemessen und entsprechend darauf reagiert), sondern es wird eine einfacher zugängliche Messgröße verwendet, die indirekt auch die erzeugten Emissionen einstellt. Entsprechende Verfahren sind ausführlich in (Zacharias, 2001) beschrieben. Prinzipiell funktionieren alle diese Verfahren so, dass eine indirekte Regelgröße (z.B. Abgastemperatur, Brennraumtemperatur, Saugrohrdruck) abhängig von Leistung und weiteren Betriebsgrößen des Motors auf einen bestimmten Wert geregelt wird, weil bekannt ist, dass bei reproduzierbar eingestelltem Wert der indirekten Regelgröße auch immer die gleichen Emissionen reproduzierbar entstehen.

Dieser Ansatz kann auch auf die hier vorliegende Aufgabenstellung übertragen werden, die zylinderindividuellen NO_x-Emissionen so zu beeinflussen, dass motorglobal möglichst niedrige Emissionen erzeugt werden. Die zylinderindividuellen Emissionen selbst brauchen dazu weder direkt gemessen noch geschätzt zu werden, sie müssen nur richtig *beeinflusst* werden. Als konkretes Beispiel wurde in diesem Vorhaben die Schwerpunktlage der Verbrennung ausgewählt (CoC Center of Combustion).

Wichtig dabei: Es geht hier um die Arbeit innerhalb des Forschungsvorhabens, nicht um den späteren Einsatz im Feld. Im Feld ist die Schwerpunktlage je Zylinder und Arbeitsspiel genauso wenig messbar wie die NO_x-Emissionen je Zylinder und Arbeitsspiel. Innerhalb des Forschungsvorhabens sind beide Messungen verfügbar, weil sie als Referenzgrößen für die ermittelten Modelle dienen. Der entscheidende Unterschied ist aber, dass die Schwerpunktlage am Prüfstand sehr einfach lückenlos über Zylinderdruck-Indizierung erfasst werden kann, während die fortlaufende zylinderindividuelle Abgasmessung wesentlich aufwändiger ist.

Unter der Annahme, dass es genügt, die geschätzten CoC der einzelnen Zylinder zur Regelung zu verwenden, können daher statt der in Abbildung 6.10 dargestellten Schätzungen für zylinderindividuelle NO_x auch „nur“ die zylinderindividuellen CoC geschätzt werden. Damit ergeben sich die in Abbildung 6.12 gezeigten Berechnungswege.

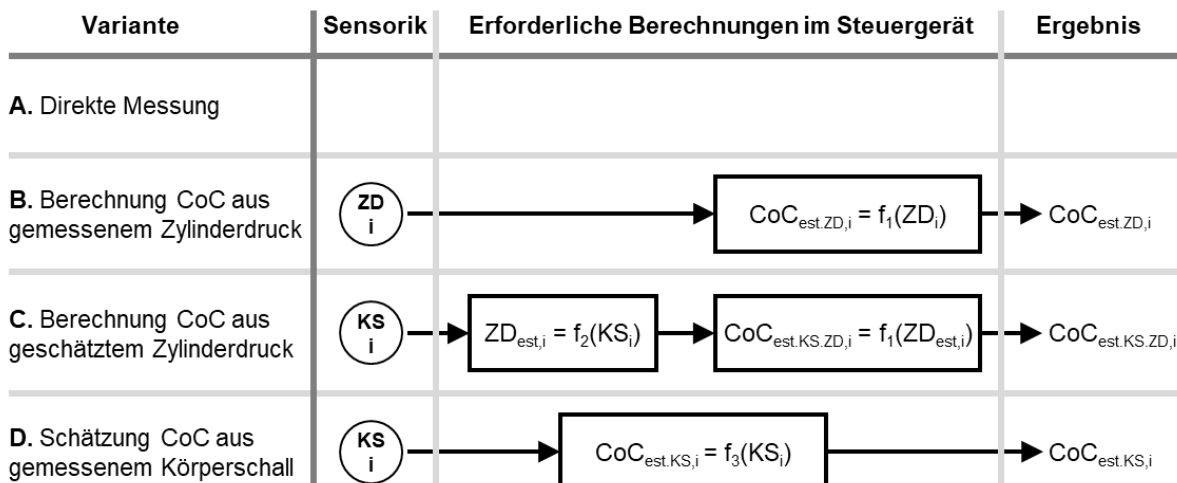


Abbildung 6.12: Schätzung der Schwerpunktlage CoC der Verbrennung statt Schätzung der NO_x -Emissionen.

Auf die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Berechnungsmodelle selbst geht Abschnitt 6.2.5 ein. Dass die indirekte Regelung auf CoC auch wirklich zum gewünschten Ergebnis führt, zeigt Abschnitt 6.3.

Im Folgenden soll vorher noch der eindeutige Zusammenhang zwischen CoC und NO_x analysiert werden. Dazu zeigt Abbildung 6.13 ein Streudiagramm für eine mehrminütige Emissionsmessung an Zylinder 1 des Motors.

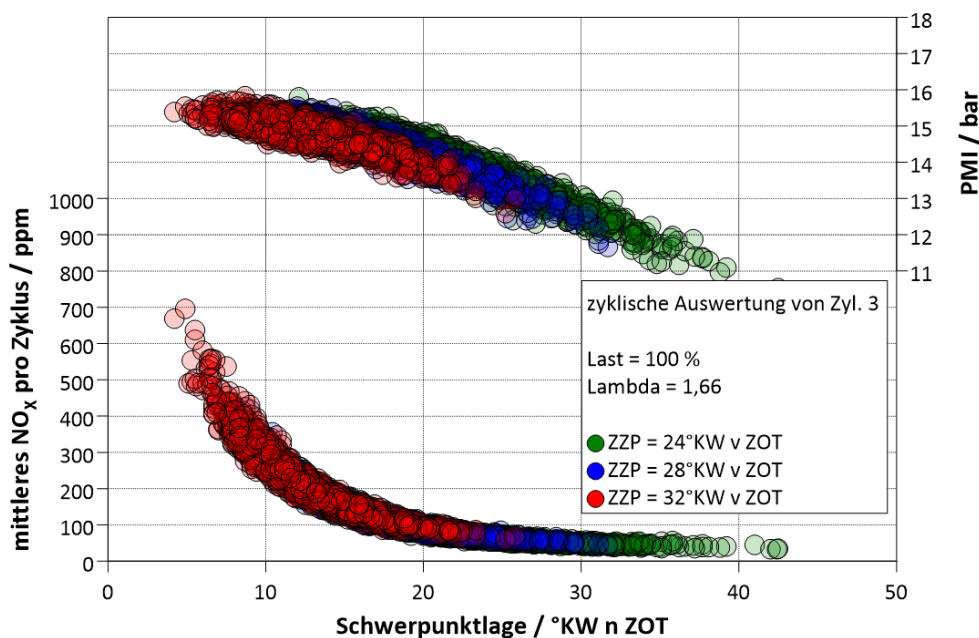


Abbildung 6.13: Streudiagramm der an einem einzelnen Zylinder je Arbeitsspiel ermittelten Tripel von Schwerpunktlage CoC (aus Zylinderdruck berechnet), NO_x -Emission (mit Fast CLD gemessen) und umgesetzter Leistung PMI (aus Zylinderdruck berechnet). Achtung: Die große „Streuung“ des Streudiagramms entsteht durch die ottomotorischen Zyklenschwankungen in festen Betriebspunkten.

Die NO_x -Emissionen wurden im Abgaskrümmer des Zylinders gemessen. Das Diagramm enthält Punktwolken zu drei Betriebspunkten, die durch unterschiedliche Zündzeitpunkte an diesem einen Zylinder gekennzeichnet sind. Jeder dieser drei Betriebspunkte ist im Diagramm durch eine Farbe gekennzeichnet. Das heißt beispielsweise: Im *festen* Betriebspunkt „ZFP = 32 °KW vor OT“ (das ist die rote Punktwolke) streut die Schwerpunktlage der Verbrennung zwischen ca. 4 °KW nach OT und 21 °KW nach OT.

Im Gegensatz zu diesen ottomotorischen Zyklenschwankungen der Verbrennung ist der Zusammenhang zwischen Schwerpunktlage und gemessenen NO_x -Emissionen sehr scharf abgegrenzt. Ist also die Schwerpunktlage bekannt, so kann die NO_x -Emissionen sehr genau aus dem Diagramm abgelesen werden.

Mit anderen Worten: Dass in einem stationären Betriebspunkt die Emissionen des Motors stark schwanken können, liegt

- nicht an einem unscharfen Zusammenhang zwischen Schwerpunktlage der Verbrennung und NO_x -Emissionen,
- sondern an einem unscharfen Zusammenhang zwischen „stationärem Betriebspunkt“ und Schwerpunktlage.

Ist die Schwerpunktlage bekannt, so ist auch die NO_x -Emission der Verbrennung so gut wie festgelegt. Der Zusammenhang zwischen CoC und NO_x ist zwar deutlich nichtlinear (siehe Abbildung 6.13); für die Aufgabenstellung, Emissionen indirekt zu regeln ist das aber von untergeordneter Bedeutung. Viel wichtiger ist, dass es einen möglichst eindeutigen Zusammenhang zwischen der indirekten Regelgröße CoC und der eigentlichen Zielgröße NO_x gibt.

Die beiden anderen Betriebspunkte in Abbildung 6.13 ändern nichts am Zusammenhang zwischen Schwerpunktlage und NO_x -Emissionen; sie verschieben lediglich den Bereich, in dem die Zyklenschwankungen liegen. Das Verbrennungsluftverhältnis und die Last wurden in allen drei Betriebspunkten konstant bei 1,66 bzw. 100% gehalten.

Die hier je Arbeitsspiel dargestellten Zusammenhänge haben wir prinzipiell schon weiter oben anhand Abbildung 6.9 angesprochen – dort allerdings anhand der motorglobalen und zeitlich stark gemittelten Größen.

Um die weitere Vorgehensweise im Projekt abzusichern, nämlich

- nicht NO_x schätzen, sondern CoC schätzen.
- CoC der einzelnen Zylinder regeln und damit indirekt die NO_x -Emissionen reduzieren

wurden durch Messungen zwei weitere Einflüsse untersucht:

1. Einfluss des Betriebspunktes (Leistung und Gemisch) auf den in Abbildung 6.13 gezeigten Zusammenhang.
→ Der Einfluss der Gemischzusammensetzung muss in den Modellen berücksichtigt werden.
2. Einfluss der einzelnen Zylinder auf den in Abbildung 6.13 gezeigten Zusammenhang.
→ Durch Messungen wurde nachgewiesen, dass der Einfluss der einzelnen Zylinder gering ist. Ist die Schwerpunktlage eines Arbeitsspiels bekannt, so können daraus die NO_x -Emissionen ermittelt werden. Die schon weiter oben in Abbildung 6.7 gezeigten Unterschiede der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylindern resultieren daraus, dass

bei gleichen von außen vorgegebenen Einstellwerten sich andere Verteilungen der tatsächlichen Schwerpunktlagen ergeben.

Aus der Darstellung als Streudiagramm in Abbildung 6.13 ist nicht ersichtlich, welche Emissionen sich im Mittel einstellen. Der Vollständigkeit halber zeigt daher Abbildung 6.14 die *Häufigkeitsverteilungen* der gemessenen NO_x -Emissionen aus der Messung von Abbildung 6.13.

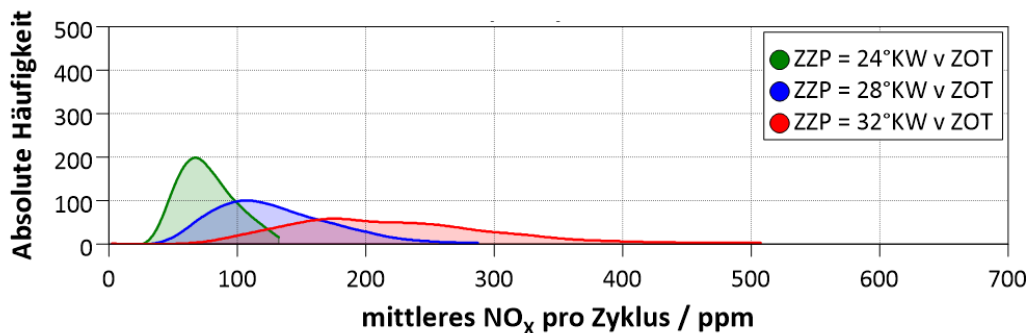


Abbildung 6.14: Häufigkeitsverteilung der gemessenen, Arbeitsspiel-individuellen NO_x -Emissionen der Daten aus Abbildung 6.13. Wichtig: innerhalb eines Betriebspunktes (= einer Farbe) handelt es sich allein um ottomotorische Zykelschwankungen, die zur Verteilung führen.

Zum einen erkennt man, dass es eine Verteilung mit einem markanten Maximum ist. Das ist für die Schätz-Aufgabe relevant. Weiterhin fällt auf, dass die Häufigkeitsverteilungen unsymmetrisch sind; für NO_x größer als das NO_x mit der maximalen Häufigkeit liegen mehr Messwerte vor als für kleinere NO_x . Und schließlich erkennt man, dass die Häufigkeitsverteilung umso breiter wird, je höher die NO_x -Emissionen sind. Die letzten beiden Punkte resultieren aus der nichtlinearen Abhängigkeit zwischen Schwerpunktlage und entstehenden NO_x -Emissionen.

6.2.5 Modelle

In den bisherigen Ausführungen wurde gezeigt, dass Information über bei der Verbrennung entstehende NO_x in Körperschall-Signalen enthalten ist, und dass als *Schätzgröße* zylinderindividuelle NO_x oder zylinderindividuelle Schwerpunktlagen genutzt werden können. Die Ermittlung der Schätzgrößen im Betrieb anhand live gemessener Daten ist Aufgabe der im Folgenden vorgestellten Modelle.

Im Forschungsvorhaben wurden drei Modellansätze untersucht und miteinander verglichen:

- Künstliche Neuronale Netze zur Schätzung von NO_x (Pfad D aus Abbildung 6.10)
- Rekonstruktion von Zylinderdruck-Verläufen, zur Berechnung von NO_x oder CoC (Pfad C aus Abbildung 6.10 und aus Abbildung 6.12)
- Linearisierte Modelle zur Schätzung von CoC (Pfad D aus Abbildung 6.12)

Künstliche Neuronale Netze zur Schätzung von NO_x

Künstliche Neuronale Netze als Abstraktion menschlicher Nervenzellen sind in der Lage komplexe Systeme mit nichtlinearem Übertragungsverhalten abzubilden (Ertel, 2016), (Kriesel,

2007). Sie sind insbesondere dann geeignet, wenn wenig oder sogar gar kein Wissen über das physikalische Verhalten eines Systems bekannt ist, da dieses Wissen während eines Trainingsprozesses „erlernt“ und durch Anpassen von Parametern im Netz dauerhaft gespeichert wird. Erforderlich sind dazu allerdings umfangreiche Messdaten, die diejenigen Betriebsbereiche abdecken, die später vom Künstlichen Neuronalen Netz bedient werden sollen.

Für die hier vorliegende Anwendung bedeutet das, dass die sogenannten Trainingsdaten sich über einen weiten Parameterraum erstrecken, das heißt verschiedene Lastpunkte, Gas/Luftgemische und Zündzeitpunkte. Außerdem müssen die Trainingsdaten in ausreichender Zahl vorhanden sein. Da zum Zeitpunkt der Implementierung in diesem Projekt noch keine Messung der zylinderindividuellen NO_x Emissionen zur Verfügung stand, wurden aus Körperschall zunächst die motorglobalen NO_x geschätzt. Um die Rechenkomplexität beherrschbar zu halten, wurde, wie bereits in Abschnitt 6.2.2 beschrieben eine Hauptkomponenten-Analyse eingesetzt, sodass sich folgender Signalweg ergibt:

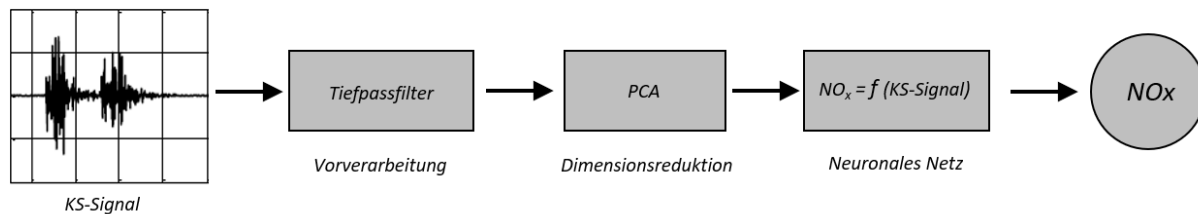


Abbildung 6.15: Signalweg bei der Schätzung von NO_x -Emissionen aus gemessenen Körperschall-Daten. PCA = Hauptkomponenten-Analyse.

Die gefilterten Körperschall-Signale werden zunächst über eine Dimensionsreduktion mittels Hauptkomponenten-Analyse vorverarbeitet. Dabei wird die Zahl der in Frage kommenden Frequenz- und Kurbelwinkelbereiche auf in diesem Fall zehn Linearkombinationen der Bereiche abgebildet. Die PCA selbst wird einmalig anhand der Messdaten durchgeführt, als Ergebnis erhält man die Hauptkomponenten der Körperschall-Signale. Zur späteren Laufzeit im Betrieb müssen die Messdaten „nur“ noch auf diese Hauptkomponenten abgebildet werden, was eine einfache statische Rechenvorschrift ist. Im Vorhaben konnte gezeigt werden, dass für bestimmte Zylinder-Sensor-Paare (siehe dazu Abschnitt 6.1.2) sich feste Hauptkomponenten in den Signalen ergeben. Die Hauptkomponenten anderer Zylinder-Sensor-Paare können jedoch anders gestaltet sein. Die Verwendung einheitlicher Hauptkomponenten für den gesamten Motor reduziert die erzielbaren Schätzgüten deutlich.

Die eigentliche Schätzung findet im Künstlichen Neuronalen Netz statt, dass die gewichteten Hauptkomponenten auf geschätzte NO_x abbildet. Die internen Parameter des Künstlichen Neuronalen Netzes werden dabei in einem iterativen Optimierungsverfahren so ermittelt, dass die geschätzten NO_x möglichst gut mit gemessenen NO_x übereinstimmen. Die Optimierung der Parameter findet offline statt, im späteren Betrieb erfolgt die Schätzung als statische Rechnung mit fest eingestellten Parametern.

Im Projektverlauf wurden verschiedene Netz-Architekturen mittels Grid Search untersucht. Im Hinblick auf die Implementierung auf einem Motorsteuergerät wurde eine möglichst einfache Netzstruktur angestrebt. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse wurden mit einem relativ einfachen Feedforward Netz mit 10 Eingangsneuronen, 20 Neuronen in einer einzigen ver-

steckten Schicht erzielt. Als Aktivierungsfunktion wurden in der Eingabe- sowie der Ausgabeschicht eine lineare Funktion verwendet, wohingegen in der versteckten Schicht die Sigmoid-Funktion als Aktivierungsfunktion implementiert wurde.

Abbildung 6.16 zeigt die NO_x -Rohemission des Motors für zwei einstündige Versuchsläufe, bei denen der Zündzeitpunkt jeweils motorglobal in fünf Stufen zwischen 24 °KW vor OT und 32 °KW vor OT verstellt wurde und für jeden dieser Zündzeitpunkte über die Gaszumischung, also das Gas-Luft-Verhältnis, verschiedene Emissionsvariationen durchgeführt wurden. Ein Versuchslauf wurde zur Erzeugung von Trainingsdaten verwendet (linke Hälfte in Abbildung 6.16), ein davon unabhängiger weiterer Versuchslauf zur Erzeugung von Testdaten (rechte Hälfte in Abbildung 6.16).

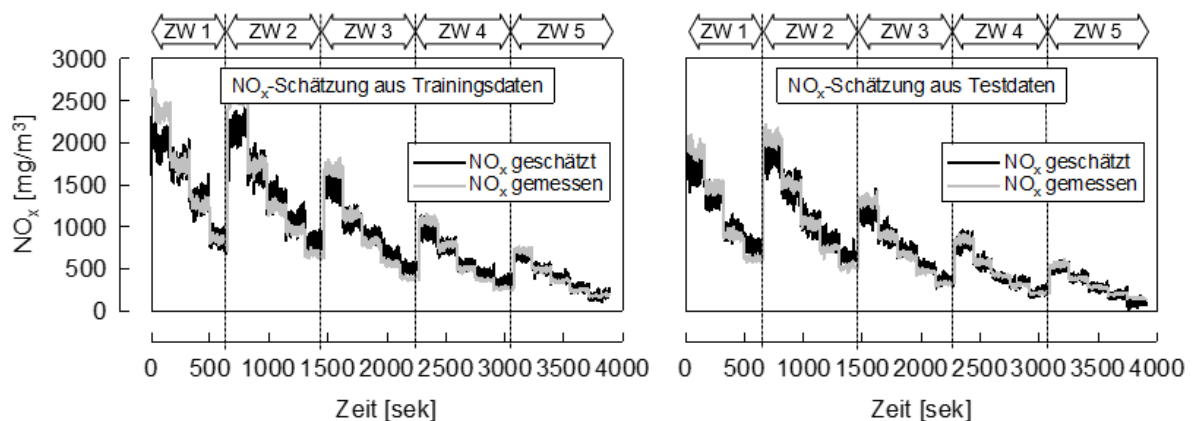


Abbildung 6.16: Zeitliche Darstellung der Emissionsschätzung aus Körperschall mit Künstlichem Neuronalem Netz. Trainingsdaten (links) und Testdaten (rechts) zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Werten (grau). Die Bereiche konstanter Zündzeitpunkte während der Messungen sind durch „ZW 1“ bis „ZW 5“ gekennzeichnet, innerhalb dieser Bereiche wurde jeweils die Gemischzusammensetzung variiert. Betriebspunkt aller hier gezeigten Messungen ist Volllast des Motors.

Zu erkennen ist, dass sich die Genauigkeit der Schätzung auf Trainings- und Testdaten kaum unterscheidet, das Netz also nicht während des Trainings auf die Trainingsdaten überangepasst wurde. Auch wird sichtbar, dass für hohe NO_x Emissionen die Schätzgüte deutlich nachlässt, im relevanten Bereich unter 500 mg/m^3 ist jedoch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen geschätzten und gemessenen Daten erkennbar.

Diese zunächst für die Schätzung motorglobaler NO_x -Emissionen erzielten Ergebnisse wurden im Projekt auch für die Schätzung zylinderindividueller NO_x -Emissionen erweitert und die dazu erforderlichen Künstlichen Neuronale Netze wurden auf dem zur Messung der Körperschall-Signale eingesetzten Motorsteuergerät implementiert. Damit konnte gezeigt werden, dass die komplette Kette von der Offline-Bearbeitung (Definition der Netzarchitektur, Training des Netzes mit Daten) bis zum Live-Betrieb (Berechnung von NO_x -Schätzgrößen auf einem typischen Steuergerät) praktisch möglich ist.

Der Weg, über Künstliche Neuronale Netze die NO_x -Emissionen zu schätzen, wurde aber darüber hinaus in der zweiten Projekthälfte nicht weiter vertieft. Das hat mehrere Gründe. Zunächst betrifft das die Schätzgröße selbst. In Abschnitt 6.2.4 wurde erläutert, warum es im

Projektverlauf günstiger – und trotzdem ausreichend – war, zylinderindividuelle CoC zu schätzen statt zylinderindividueller NO_x. Die Methode Künstliche Neuronale Netze könnte zwar ebenso auf CoC angewendet werden, dies wurde jedoch nicht erprobt.

Weiters hat sich gezeigt, dass die Schätzgrößen mit sehr hoher Güte ermittelt werden können, dass dafür aber weder einheitliche Hauptkomponenten der Körperschall-Signale gefunden werden, noch dass für verschiedene Zylinder-Sensor-Paare einheitliche Parametrierungen der Netze eingesetzt werden können. Einheitliche Hauptkomponenten und Parametrierungen können zwar gewählt werden, die erzielbaren Schätzgüten gehen dabei aber deutlich zurück.

Der ausschlaggebende Grund, Künstliche Neuronale Netze nicht weiter zu verfolgen, war schließlich ein Effekt, der bei der Arbeit mit Daten häufig zu beobachten ist: Oben wurde erwähnt, dass KNN ihre Stärken zum Beispiel dann ausspielen, wenn wenig bis gar kein physikalisches Vorwissen über die zu modellierenden Zusammenhänge vorhanden ist. Es zeigt sich aber, dass durch die Arbeit mit Künstlichen Neuronalen Netzen, durch die Beschäftigung mit der Vorverarbeitung (z.B. hier Hauptkomponenten-Analyse), mit Netzstrukturen, mit Daten, und durch die Analyse der Ursachen erzielter guter oder schlechter Schätzgüten schrittweise immer mehr physikalisches Wissen erarbeitet wird. Dieses kann für eine geeignete Strukturierung der Künstlichen Neuronalen Netze genutzt werden, es kann aber auch genutzt werden, um mit anderen Modellformen, die auf physikalisches Vorwissen angewiesen sind, leichter zum Ziel zu kommen.

Rekonstruktion von Zylinderdruck-Verläufen aus Körperschall

Wie bereits in der Einführung von Abschnitt 6.2 bei der Vorstellung möglicher Berechnungspfade beschrieben, besteht auch die Möglichkeit, NO_x-Emissionen aus Zylinderdruckdaten zu berechnen. Die Kenntnis des Zylinderdruckverlaufes bietet den Vorteil, eine Vielzahl von nützlichen Informationen über die Verbrennung und auch die Emissionsentstehung ableiten zu können. Basierend auf gemessenen Druckverläufen ist eine Berechnung von Emissionswerten mit Hilfe von physikalischen Modellen bereits möglich. Um die bereits bekannten physikalischen Modellansätze zur Emissionsschätzung auch ohne Zylinderdruck-Sensorik nutzen zu können, soll im Folgenden näher auf die Ermittlung von Zylinderdruckverläufen aus Körperschalldaten eingegangen werden.

In der Literatur finden sich bereits einige Ansätze aus Körperschalldaten Zylinderdrücke zu rekonstruieren. Die wesentliche Herausforderung besteht insbesondere bei der Ermittlung einer Übertragungsfunktion vom Körperschall zum Zylinderdruck. Das Körperschall-Signal hängt zum einen stark von mechanischen Gegebenheiten am Motor ab (El-Ghamry, Steel, Reuben, & Fog, 2005). Es ist außerdem stark durch sich ändernde Betriebsbedingungen des Motors beeinflusst, was die Bildung einer Übertragungsfunktion erschwert. Daraus resultiert im Allgemeinen eine nichtlineare Übertragungsfunktion. Bei der Betrachtung von mehreren Zylindern ergeben sich weiterhin auch noch abweichende Übertragungsverhalten für die individuellen Sensor-Zylinder-Paarungen. Das trifft sowohl für den Fall zu, wenn ein Körperschall-Sensor mehrere Zylinder erfasst (Multi-Sense), als auch bei der Erfassung der Zylinder mit je einem Körperschall-Sensor (Single-Sense). Die Identifikation einer motorglobalen Übertragungsfunktion, die alle Betriebsbereiche des Motors abdeckt, erscheint daher schwierig.

Eine Möglichkeit zur Lösung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens ist nach (Wagner, Böhme, & Förster, 2000) ein physikalischer Ansatz. Durch eine ermittelte drehzahlunabhängige Übertragungsstrecke und parametrisierte Musterkurven können dann mit Hilfe der Körperschallsignale in weiten Motorbetriebsbereichen Zylinderdruckverläufe rekonstruiert werden.

Aufbauend auf diesen Überlegungen und mit ähnlichen Ansätzen konnten auch in (Villarino Villa, 2013) gute Ergebnisse für die Rekonstruktion erzielt werden. Weiter lassen sich auch andere Methoden zur Zylinderdruckrekonstruktion heranziehen. Beispielsweise bieten sich auch hier die weiter oben schon verwendeten Künstlichen Neuronalen Netze an (Bizon, Continillo, & Mancaruso, 2011).

In diesem Vorhaben wurde zur Rekonstruktion von Zylinderdrücken die in (Matlab, R2020b) verfügbare Steiglitz-McBride-Methode zur Bestimmung von Übertragungsfunktionen näher betrachtet. Diese autoregressive Methode schätzt anhand eines linearen Filtermodells die Übertragungsfunktion von einer Eingangsgröße zu einer Ausgangsgröße. Als Eingangsgrößen dienten tiefpassgefilterte Körperschallsignale. Verwendet wurden hier nur die Signale von den beiden Serien-Positionen (Multi-Sense), siehe Abbildung 6.4. Die gemessenen Zylinderdruckverläufe der jeweiligen Zylinder wurden als Referenz Ausgangsgrößen für die Identifikation der Übertragungsfunktionen verwendet.

Erste Voruntersuchungen zeigten nur in einem sehr eingeschränkten Betriebsbereich hinreichend gut rekonstruierte Zylinderdrücke auf Basis der tiefpassgefilterten Körperschallsignale. Insbesondere Arbeitsspiele mit einer schwach ausgeprägten Verbrennung konnten durch die Rekonstruktion nicht gut abgebildet werden. Solche Verbrennungen treten aber aufgrund der ottomotorischen zyklischen Schwankungen (siehe 6.2.4) in vielen Betriebspunkten auf, oder auch bei gezielt spät gestellter Verbrennungslage. Hierbei sind die verbrennungsbedingten niederfrequenten Anteile nur schwach im Körperschallsignal ausgeprägt, wodurch bei einer Tiefpassfilterung eine Identifikation einer Übertragungsfunktion schlecht oder teilweise auch nicht möglich war.

Zur Verbesserung der Güte der Rekonstruktion wurde die Aufbereitung der Körperschallsignale durch Empirical Mode Decomposition (EMD) erweitert (Norden E. Huang, 1998). Ähnlich wie die Hauptkomponenten-Analyse dient diese Methode einer Reduktion der Komplexität. Sie erlaubt es, nichtlineare Körperschallsignale in lineare Signalanteile und ein Residuum zu zerlegen. Mit Hilfe einer Korrelationsbetrachtung mit dem Referenzzyylinderdruck konnten dann die Signalanteile des Körperschallsignals identifiziert werden, welche die verbrennungsrelevanten Informationen beinhalten. Diese Signalanteile wurden für die weitere Rekonstruktion herangezogen. Abbildung 6.17 zeigt die resultierende Signalkette.

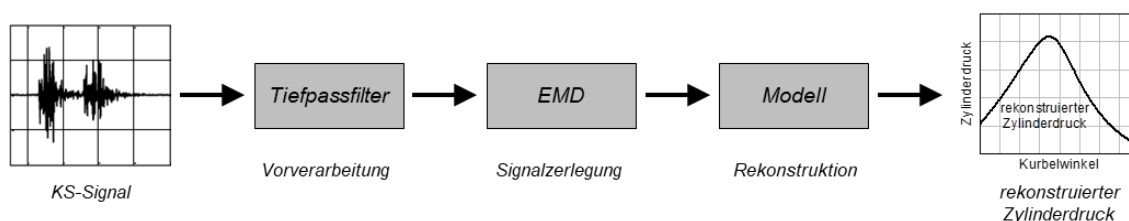


Abbildung 6.17: Verarbeitungsweg vom Körperschallsignal bis zum rekonstruierten Zylinderdruck. EMD = Empirical Mode Decomposition.

Mit Hilfe dieser Signalaufbereitung konnten nun bessere Ergebnisse für die Identifikation von Übertragungsfunktionen erzielt werden und damit vergrößerte sich auch der untersuchte Anwendungsbereich für die Zylinderdruckrekonstruktion. Damit ergeben sich für die Rekonstruktion des Zylinderdruckverlaufs aus Körperschall-Signalen sehr gute Ergebnisse. Abbildung 6.18 zeigt Beispiele für rekonstruierte Zylinderdruckverläufe im Vergleich zu den gemessenen Referenzdruckverläufen.

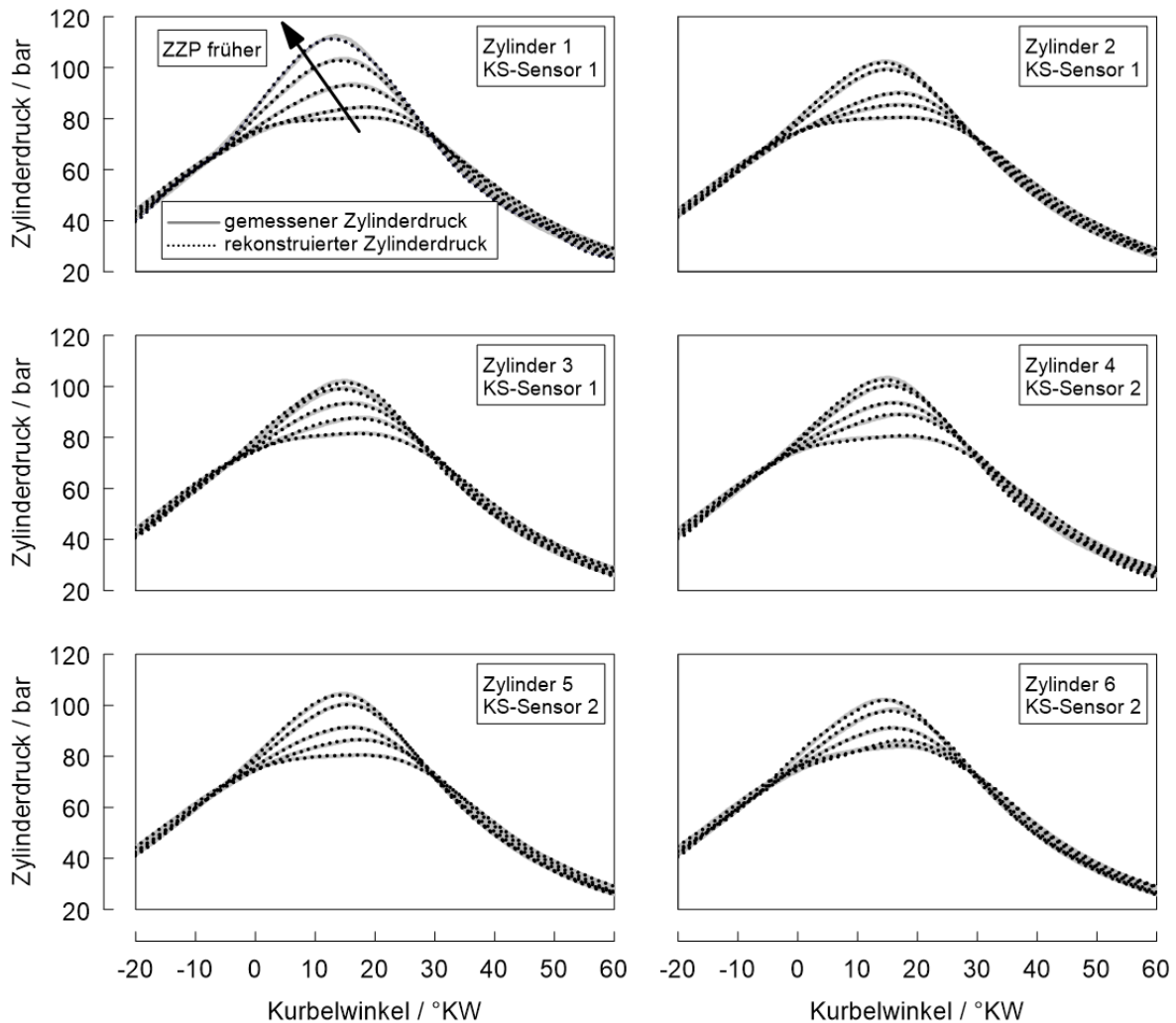


Abbildung 6.18: Zylinderindividuelle Rekonstruktion des Druckverlaufs auf Grundlage von Körperschallsignalen für eine Zündzeitpunktvariation

Die in Abbildung 6.18 dargestellten Daten basieren auf einer Zündzeitpunktvariation unter Vollast des Motors. Sowohl die Referenzdrücke als auch die rekonstruierten Zylinderdrücke sind über zehn Arbeitsspiele gemittelt dargestellt. Es zeigt sich, dass eine zylinderindividuelle Rekonstruktion der Druckverläufe mit den Serien-Körperschall-Sensoren gute Ergebnisse liefert. In diesem Beispiel wurden aus den Signalen zweier Körperschall-Sensoren an den Serien-Positionen des Motors die Druckverläufe aller sechs Zylinder geschätzt.

Basierend auf diesen Druckverläufen ist – wie in Abbildung 6.10 und Abbildung 6.12 skizziert – die weitere Berechnung der Schwerpunktlage oder auch von Emissionswerten mit Hilfe von physikalischen Modellen möglich. Das ist ein Vorteil der Zwischengröße „Zylinderdruckverlauf“ gegenüber der direkten Schätzung. Liegt eine Schätzung für den Zylinderdruckverlauf vor, können daraus direkt weitere Verbrennungskenngrößen abgeleitet werden, wie beispielsweise umgesetzte Leistung, maximaler Verbrennungsdruck, Verbrennungsdauer. Neben der hier im Vorhaben angestrebten Emissionsreduktion können damit weitere regelungstechnische Aufgaben am Motor gelöst werden. Mit der direkten Schätzung einer Kenngröße (Pfad D in Abbildung 6.10 und Abbildung 6.12) liegt dagegen eben nur *eine* Kenngröße vor, für weitere Kenngrößen müssen eigene Modelle verwendet werden.

Die Schätzgüten, die über die verschiedenen Pfade erreicht werden können, liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Es gibt keinen Pfad, der in allen betrachteten Bereichen und für alle denkbaren Zylinder-Sensor-Paare überlegen wäre. Für eine Bewertung, welches Verfahren wie gut geeignet ist, sind daher weitere Aspekte zunächst wichtiger. Vor allem geht es um den späteren Einsatz in der Praxis. Dafür ist zum einen die Implementierbarkeit auf Steuergeräten zu bewerten. Die Rekonstruktion von Zylinderdruck auf dem Steuergerät ist aufwändiger als beispielsweise die Auswertung der oben vorgestellten Künstlichen Neuronalen Netze. Bei Neuronalen Netzen ist der im Betrieb anfallende Rechenaufwand gut handhabbar. Für die Rekonstruktion von Zylinderdruckkurven aus Körperschall ist der Rechenaufwand deutlich höher. Der Rechenaufwand wird zusätzlich erhöht, da nach der Rekonstruktion des Zylinderdruckverlaufes noch die eigentliche Schätzgröße, also zylinderindividuelles CoC oder NO_x berechnet werden muss. Die Zylinderdruck-Rekonstruktion wurde im Projekt *nicht* auf einem Steuergerät implementiert.

Neben der Implementierbarkeit spielt auch der Weg zum Modell eine wesentliche Rolle. Also die Arbeiten, die bei Adaption an eine Motorbaureihe zu leisten sind. Für das hier vorgestellte Verfahren sind dazu gemessene Referenzverläufe der Zylinderdrücke erforderlich. Bei Adaption des Verfahrens auf eine Baureihe ist also mindestens ein Exemplar der Baureihe mit entsprechenden Drucksensoren auszustatten und ein Messprogramm zur Aufnahme von Referenzdaten durchzuführen. Im Prüfstandsumfeld ist das möglich, im Feld könnte es unter Umständen durch die Verwendung sogenannter Indizier-Zündkerzen durchgeführt werden.

Polynommodell zur Schätzung von CoC

In Abbildung 6.5 wurde bereits ein affiner Zusammenhang zwischen der Schwerpunktlage der Verbrennung und Merkmalen im Körperschall-Signal dargestellt. Über Invertierung dieses Zusammenhangs kann ein relativ einfaches parametrisches Modell gewonnen werden, mit dem gemessene Körperschall-Merkmale auf einen Schätzwert für die Schwerpunktlage abgebildet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Steigung der in Abbildung 6.5 gezeigten Geraden ausreichend groß ist. Das entspricht aber genau der Beurteilung, ob eine Sensorposition zur Schätzung geeignet ist oder nicht. Sensorpositionen, die nicht zu ausreichend großer Steigung der gezeigten Geraden führen, enthalten am Sensor nicht ausreichend Information über die Verbrennung im betrachteten Zylinder.

Die Vorgehensweise zur Parametrierung des Polynommodells ist prinzipiell ähnlich wie bei den oben dargestellten Künstlichen Neuronalen Netzen. Anhand von gemessenen Daten werden die Parameter des Modells so ermittelt, dass die Schätzgüte optimal wird. Dabei müssen mit den Messdaten die später im Betrieb relevanten Betriebsbereiche ausreichend gut abgedeckt werden.

6.2.6 Diskussion der Ergebnisse

Für den Nutzen der in diesem Forschungsvorhaben erreichten Ergebnisse ist vor allem relevant, dass die entwickelten Verfahren auf möglichst vielen Motoren im Feld eingesetzt werden können. Die im Abschnitt 6.3 weiter unten noch vorgestellten Ergebnisse zur *Regelung* stellen in dieser Hinsicht keine große Hürde dar. Sehr wohl aber die bisher beschriebenen Arbeiten zur Datenanalyse und der Herleitung verschiedenartiger Schätzmodelle (Abschnitt 6.2) und die dazu erforderlichen Grundlagenarbeiten (Abschnitt 6.1). Daher soll bereits an dieser Stelle diskutiert werden, wie die Ergebnisse in die Praxis übertragen werden können.

Die Projektergebnisse zeigen dazu die folgenden zentralen Aufgaben auf:

- Eine der oben vorgestellten Modellstrukturen muss ausgewählt werden.
- Für einen Motor-*Typ* müssen Positionen für Körperschall-Sensoren definiert werden, an denen Informationen über die einzelnen Verbrennungen ankommen.
- Für jedes Motor-*Exemplar* sollte das Modell anhand an diesem Motor-Exemplar gemessener Daten parametrisiert werden.

Auswahl einer Modellstruktur

Im Projekt wurde gezeigt, dass über mehrere, sehr verschiedene Modellstrukturen die Information über die Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder gewonnen werden kann und dass die einzelnen Ansätze für verschiedene Zylinder-Sensor-Paare und verschiedene Betriebsbereiche unterschiedlich gute Ergebnisse liefern. Aus den Erfahrungen im Projektverlauf heraus empfehlen wir für den praktischen Einsatz der Methode an einer bestimmten Baureihe aber *nicht*, dort unterschiedliche Modellansätze miteinander zu vergleichen. Das ist zu aufwändig – und außerdem nicht erforderlich.

Die Rekonstruktion des Zylinderdrucks aus den Körperschall-Signalen hätte zwar den Reiz, dass mit den geschätzten Druckverläufen wertvolle Information über die Verbrennung vorliegt, die weit über das Emissionsverhalten hinausgeht. Das Anpassen der Methode auf einen bestimmten Motortyp ist jedoch aufwändig und erfordert zwingend den Einsatz von Zylinderdruck-Indizierung als Referenzmessung.

Die direkte Schätzung von CoC über Künstliche Neuronale Netze ist sehr leistungsfähig, hat im Projektverlauf ausgezeichnete Schätzergebnisse geliefert, und es stehen seit einigen Jahren aus vielfältigen Anwendungen der Künstlichen Intelligenz sehr mächtige, frei verfügbare Software-Tools zur Arbeit mit Künstlichen Neuronalen Netzen zur Verfügung. Allerdings bringen Künstliche Neuronale Netze eine relativ hohe Einstiegshürde mit, was den Umgang mit den entsprechenden Werkzeugen angeht, außerdem das Verständnis für die Wirkungsweise, und Basiswissen für die Nutzung der vielen Freiheitsgrade im Feld der Künstlichen Intelligenz. Für eine breite Verwendung in der hier behandelten Aufgabenstellung – eine Methode auf verschiedenste Baureihen von Verbrennungsmotoren im Feld anzuwenden – schätzen wir diese Hürde als zu hoch ein.

Wir empfehlen daher den Einsatz eines polynomialen Modells zur direkten Schätzung von CoC. Erzielbare Schätzgüten entsprechen den mit Künstlichen Neuronalen Netzen erreichbaren, beide Verfahren stellen direkt den Bezug zwischen Daten und Schätzgröße her, die Einstiegshürden bei polynomialen Modellen sind jedoch deutlich geringer.

Wahl der Sensor-Position

Die Position der Körperschall-Sensoren hat einen entscheidenden Einfluss auf die in einer Schätzung erzielbaren Ergebnisse. In diesem Forschungsvorhaben konnten zwar nicht Untersuchungen an vielen Motoren durchgeführt werden; es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Positionen nur für Motor-*Typen* festgelegt werden müssen, nicht für einzelne Motor-*Exemplare* innerhalb des Typs. Das kann aus den umfangreichen Erfahrungen zur Klopfkennung über Körperschall abgeleitet werden. Von der Klopfkennung her ist bekannt, dass feste Sensor-Positionen eines Motortyps für alle Motoren dieses Typs gleichermaßen funktionieren. Das zeigt sich nicht nur an den einheitlichen Sensorpositionen, sondern insbesondere auch daran, dass bei der Parametrierung von Klopfkennungen selten von Exemplar zu Exemplar unterschieden wird; die Übertragung der Information aus klopfender Verbrennung über den Motorkörper hängt nicht vom Exemplar ab.

Bei den in diesem Projekt untersuchten beiden Motoren aus zwei unterschiedlichen Baureihen wurden jeweils mehrere Sensorpositionen miteinander verglichen. In beiden Fällen wurde gezeigt, dass mit den für Klopfkennung vorgesehenen Serien-Positionen des Motorherstellers ausreichend gute Informationen auch für die Emissionsschätzung übertragen werden. Eine Verallgemeinerung allein aus zwei vermessenen Motoren abzuleiten, ist zwar nicht zulässig; die Wahl der Serien-Positionen der Klopfkennung sollte aber der Start für jede Untersuchung sein. Nur wenn sich in den nachfolgenden Schritten zeigt, dass am betrachteten Motortyp keine Information über die erzeugten Emissionen am Sensor ankommt, ist die unter Umständen aufwändige Suche nach einer besseren Position sinnvoll.

Die Bewertung der Serienpositionen kann über die unten beschriebene Vorgehensweise zum Einmessen durchgeführt werden. Dazu ist keine individuelle Abgasmessung erforderlich. Auch eine Zylinderdruckindizierung ist nicht erforderlich.

Einmessen eines Motor-Exemplars

Unter Einmessen eines Motor-Exemplars wird die Ermittlung der konkreten Werte der Modellparameter verstanden, so dass für diesen Motor die Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder geschätzt werden. Dieser Schritt ist auf jeden Fall beim *ersten* Motor-Exemplar eines Motor-Typs erforderlich.

In diesem Forschungsvorhaben konnten keine zwei Exemplare des gleichen Typs untersucht werden. Bei den im Vorhaben untersuchten beiden Motoren handelt es sich um Motoren aus zwei unterschiedlichen Baureihen. Die wichtige Frage, ob das Einmessen des Modells für jedes einzelne Exemplar erforderlich ist, oder ob die Modellparameter sich nur von Typ zu Typ unterscheiden, kann daher nicht abschließend beurteilt werden. Ausgehend von der Erfahrung mit Klopfkennungen – wobei wie oben bereits erwähnt keine exemplarspezifische Parametrierung erfolgt – könnte zwar angenommen werden, dass auch bei der Emissionsschätzung aus Körperschall keine Unterscheidung zwischen Exemplaren erforderlich ist. Allerdings gehen wir anhand der in der Projektbearbeitung gemachten Erfahrungen davon aus, dass ein Einmessen je Exemplar sich im Hinblick auf die Emissionen an einem bestimmten Motor lohnen wird.

Zur Projektlaufzeit wurden – motiviert aus anderen, parallel laufenden Forschungsprojekten – immer wieder kleinere und größere mechanische Änderungen am Motor des Versuchs-BHKW vorgenommen. Damit liegen für das hier bearbeitete Vorhaben sowohl Messdaten *vor* dem jeweiligen Umbau vor, als auch Messdaten *nach* dem jeweiligen Umbau. Gezielte Untersuchungen zu einzelnen dieser Umbauten zeigen, dass die Schätzgüte merklich verbessert werden kann, wenn sich die Modellparameter für die beiden Motorkonfigurationen unterscheiden, also letztlich zwei unterschiedliche Modelle verwendet werden statt eines einheitlichen Modells. Bevor nicht Erfahrungen von mehreren Motoren gleichen Typs vorliegen, muss daher davon ausgegangen werden, dass Anpassungen je Motor erforderlich sind.

Diese Unterschiede betreffen allerdings nicht alle Modellparameter. So wurde bei den im Projekt durchgeführten Messungen festgestellt, dass die für eine Schätzung der Emissionen zu berücksichtigenden *Frequenzbereiche* des Signalspektrums an einem bestimmten Motortyp (im Projekt: Motor vor / nach Umbau) stabil sind, und dass durch eine bestimmte Art der Vorverarbeitung der Körperschall-Signale zu Körperschall-Merkmalen ein affiner Zusammenhang zwischen tatsächlichem CoC und Körperschall-Merkmal erreicht wird. Dieser ist in Abbildung 6.19 noch einmal dargestellt.

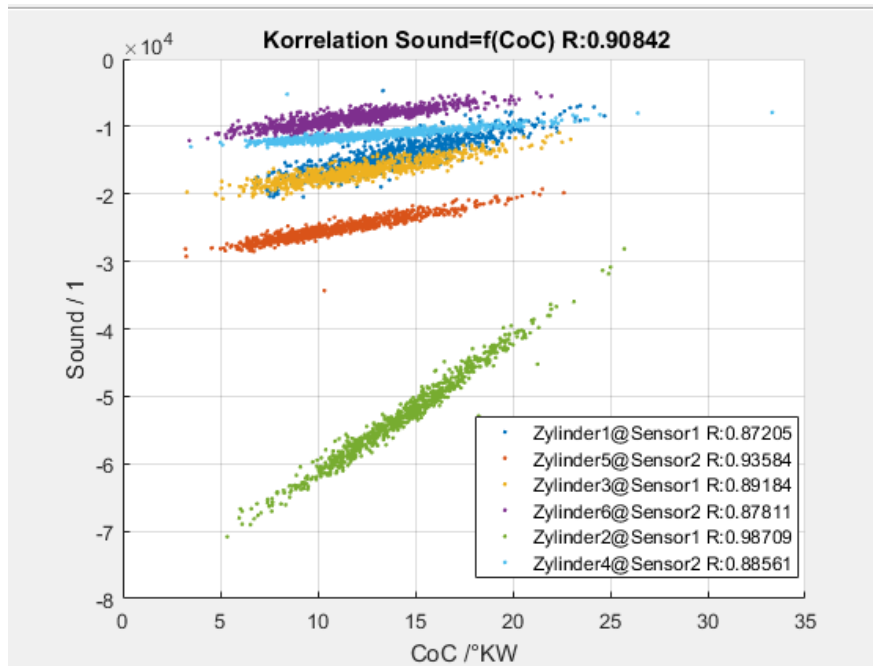


Abbildung 6.19: Affiner Zusammenhang zwischen tatsächlichem CoC der einzelnen Zylinder und Körperschallmerkmal. Das Streudiagramm zeigt Paare je Arbeitsspiel, ohne zeitliche Mittelung.

Die Parameter, die je Zylinder und je Motor-Exemplar angepasst werden müssen, betreffen nur die *Koeffizienten* dieses affinen Modells. Diese können ohne zusätzliche Messtechnik an einem Motor-Exemplar ermittelt werden. Im affinen Modell

$$\hat{c}_i(s) = a_i + b_i * s$$

ist s das gemessene Körperschall-Merkmal, a_i und b_i sind Koeffizienten je Zylinder i im parametrischen Modell. b_i kann sehr einfach ermittelt werden, indem je Zylinder der von außen vorgegebene Zündzeitpunkt um einen ausreichend großen Betrag verstellt wird und jeweils die Körperschall-Merkmale s in den beiden daraus resultierenden Betriebspunkten A und B gemessen werden. Es ergibt sich je Zylinder

$$b_i = \frac{ZZP_A - ZZP_B}{s_A - s_B}$$

Ist der Koeffizient b_i bekannt, so können für Zylinder i *Veränderungen* der Schwerpunktlage bereits geschätzt werden, der absolute Wert ist allerdings noch nicht bekannt.

Wäre eine Zylinderdruckmessung als Referenz verfügbar, so könnte damit direkt je Zylinder der noch fehlende Koeffizient a_i ermittelt werden. Da im Regelfall im Feld *keine* Zylinderdruckmessung verfügbar sein wird, behilft man sich des Zusammenhangs aus Abbildung 6.13 zwischen Schwerpunktlage und entstehenden NO_x-Emissionen – und man muss sich außerdem auf die eigentliche Aufgabenstellung des Projektes besinnen: Die Schätzung der Schwerpunktlage ist nur ein Mittel zum Zweck; es geht eigentlich um die zylinderindividuelle *Regelung* der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder. Diese sollen später so geregelt werden, dass jeder Zylinder im Motor den gleichen Emissionsbeitrag liefert. Damit kann eine geringfügige andere Schätz-Aufgabe das noch offene Problem beim Einmessen des Motors lösen.

Die Darstellung in Abbildung 6.19 beruht auf einem Zusammenhang zwischen gemessenem Körperschall-Signal s und (über Zylinderdruck) gemessener Schwerpunktlage $c_i(s)$. Hier gilt also der affine Zusammenhang

$$c_i(s) = a_i + b_i * s.$$

Die Koeffizienten a_i verschieben die jeweiligen Kurven um einen zylinderindividuellen Offset. Rein mathematisch kann man die Koeffizienten a_i aufteilen in einen Anteil, der für alle Zylinder gleich ist, a_0 , und einen zylinderindividuellen Anteil a'_i . Das ergibt

$$c_i(s) = a_0 + a'_i + b_i * s.$$

Statt nun über gemessene Körperschall-Merkmale s einen Schätzwert $\hat{c}_i(s)$ für die Schwerpunktlage zu suchen, kann man auch einen Schätzwert für die individuellen Abweichungen der Zylinder untereinander aufstellen, also

$$\hat{d}_i(s) = \hat{c}_i(s) - a_0 = a'_i + b_i * s.$$

Man begnügt sich also mit einem Schätzwert, der nur die Relation der einzelnen Zylinder untereinander abdeckt. Da im praktischen Betrieb später über eine Regelung ohnehin eine Gleichstellung der einzelnen Zylinder erreicht wird, und es wegen des konstanten Offsets a_0 unerheblich ist, ob man dazu $\hat{c}_i(s)$ oder $\hat{d}_i(s)$ gleichstellt, genügt eine Schätzung von $\hat{d}_i(s)$ – auch wenn dies keine Schätzgröße für die Schwerpunktlage selbst darstellt.

Der entscheidende Vorteil dabei ist, dass – im Gegensatz zu den Koeffizienten a_i – die Koeffizienten a'_i auch ohne Zylinderdruckmessung ausreichend genau an einem Motor ermittelt werden können. Dazu wird in einem bestimmten Betriebspunkt der Motor stationär mit den gewünschten motorglobalen NO_x -Emissionen betrieben. Nun wird für jeden einzelnen Zylinder nacheinander ermittelt, um wie viel die Zündung dieses Zylinders verfrüht werden muss, um die motorglobalen NO_x -Emissionen um einen bestimmten Beitrag zu erhöhen. Liegt im Motor eine Schiefelage der einzelnen Emissionsbeiträge wie in Abbildung 6.7 vor, so ergeben sich je Zylinder unterschiedliche dafür erforderliche Verfrühungen der Zündung. Dies sind in ausreichend guter Näherung die \hat{d}_i in diesem Betriebspunkt, woraus über

$$a'_i = \hat{d}_i - b_i * s$$

die gesuchten Koeffizienten a'_i berechnet werden können. Damit liegt nach dem Einmessen des Motors ein Schätzmodell

$$\hat{d}_i(s) = a'_i + b_i * s$$

vor, mit dem bei gemessenem Körperschall-Merkmal s eine Schätzgröße berechnet werden kann, deren Gleichstellung im Motorbetrieb dafür sorgt, dass die einzelnen Zylinder des Motors gleiche Beiträge zu den Gesamtemissionen liefern.

6.2.7 Robustheit des Verfahrens, Übertragung der Ergebnisse auf weitere Motoren

Die Schätzung der Schwerpunktlage konnte in einer Verlängerung des Projektes (DBU-AZ 34207/02) an einem weiteren Motor erprobt werden. Tabelle 6.2 zeigt die technischen Daten dieses Motors im Vergleich zum Versuchs-BHKW am IFKM.

Tabelle 6.2: Technische Daten des Versuchsmotors am IFKM und des Vergleichsmotors.

KenngroÙe	Versuchs-Motor am IFKM	Vergleichsmotor
Motorprinzip	Magermotor, Turbo-aufgeladen	Lambda-1-Motor, Saugmotor
Nenn-drehzahl	1500 min ⁻¹	1500 min ⁻¹
ISO-Standard-Leistung	220 kW	75 kW
Bohrung	126 mm	108 mm
Hub	166 mm	125 mm
Hubraum	12,4 l	6,9 l
Verdichtungsverhältnis	12,0	13,0

Dieser Vergleichsmotor ist in einem Werks-BHKW eines BHKW-Herstellers installiert. An diesem Motor wurde die im Projekt entwickelte Schätzung der Schwerpunktlage erprobt. Die Motorsteuerung des BHKW-Herstellers wurde dazu nicht verändert. Um aussagekräftige Referenzmessungen zu erfassen, wurde der Motor für dieses Projekt kurzfristig mit einem Zylinderkopf mit Indizierbohrungen ausgerüstet und es wurde ein Basismessprogramm durchgeführt, das sowohl Körperschall-Daten als auch Zylinderdruck-Daten in unterschiedlichen Betriebsbereichen erfasst.

Für das über die Projektlaufzeit am Versuchs-BHKW des IFKM ermittelte Polynommodell mit den zugehörigen Körperschall-Merkmalen wurden anhand dieser Messdaten die Parameter des affinen Modells ermittelt. Dabei kann als Ergebnis festgehalten werden, dass an diesem Motor mit einem Körperschall-Sensor je Zylinder-Paar die Schwerpunktlage der Verbrennung sehr präzise geschätzt werden kann. Für eine solche Sensor-Zylinder-Kombination werden im Folgenden die Ergebnisse dargestellt.

Für eine Validierungsmessung bei Vollast des Motors zeigt Abbildung 6.20 zunächst den Zusammenhang zwischen den aus dem gemessenen Zylinderdruck-Verlauf berechneten tatsächlichen Schwerpunktlagen und den über Körperschall geschätzten Schwerpunktlagen.

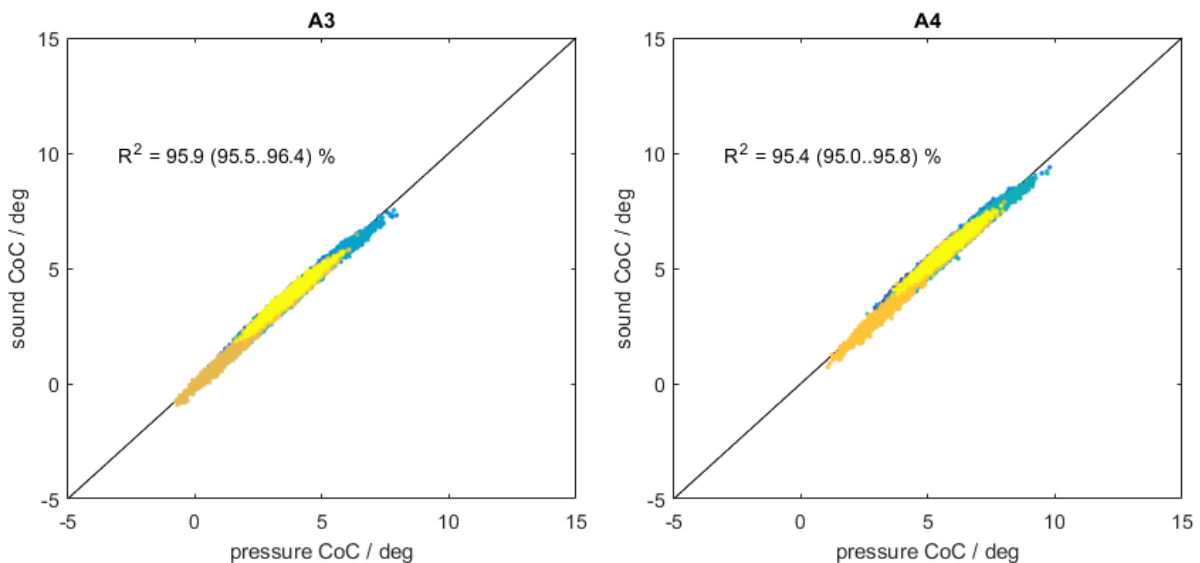


Abbildung 6.20: Streudiagramm zum Zusammenhang zwischen gemessener Schwerpunktlage („pressure CoC“) und über Körperschall geschätzter Schwerpunktlage („sound CoC“). Dargestellt sind für die beiden Zylinder 3 und 4 des Reihenmotors Arbeitsspiel-individuelle, also *nicht* zeitlich gemittelte Schätzwerte. Die Daten stammen aus einer Messung mit ca. 30.000 Arbeitsspielen je Zylinder, das sind ca. 40 Minuten Motorbetrieb. Die unterschiedlichen Farben der Punktwolken kennzeichnen unterschiedliche Betriebszustände.

Die geschätzten Werte stimmen sehr gut mit den tatsächlichen Werten überein. Abbildung 6.21 zeigt den zugehörigen zeitlichen Verlauf der entsprechenden Messung. Für diese Validierungsmessung wurden die von außen vorgegebenen Zündzeitpunkte global für den ganzen Motor und anschließend individuell für die einzelnen Zylinder variiert, um die Güte des Schätzmodells zu überprüfen.

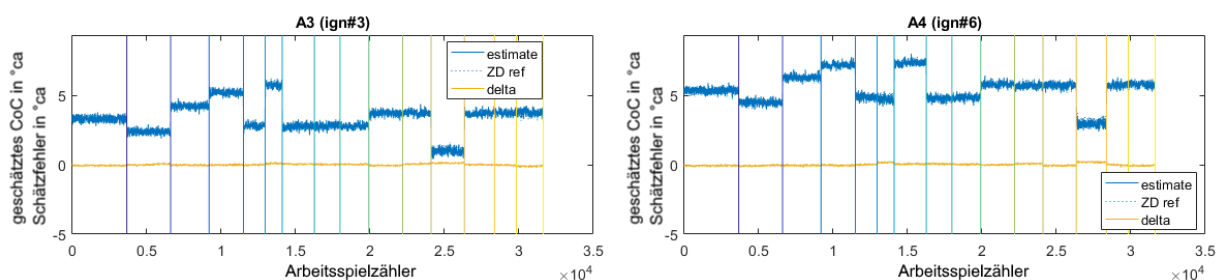


Abbildung 6.21: Zeitlicher Verlauf der Daten aus dem Streudiagramm in Abbildung 6.20. Hier sind zeitlich gemittelte Werte dargestellt (gleitendes Mittelwertfilter über 30 Arbeitsspiele), um die ottomotorischen Zyklenschwankungen auszublenden. Die senkrechten Teilstriche kennzeichnen unterschiedliche Teile des Messprogramms (Details dazu in Abbildung 6.22). Die blauen Kurven „estimate“ zeigen die Schätzwerte für Zylinder A3 (links) und A4 (rechts). Die Kurven „ZD ref“ kennzeichnen die tatsächlich gemessenen Werte – die Kurven sind in der Abbildung nicht zu erkennen, da sie sehr genau mit den geschätzten Werten übereinstimmen. Die beiden Kurven „delta“ zeigen die nahe Null liegenden Abweichungen zwischen gemessenen und geschätzten Werten.

Hier sind – im Gegensatz zu Abbildung 6.20 – *zeitlich gemittelte* Werte dargestellt, um die ottomotorischen Zyklenschwankungen auszublenden. Für die durchgeführten Veränderungen

der tatsächlichen Schwerpunktlagen über die von außen vorgegebenen Zündzeitpunkte ergibt sich praktisch eine exakte Übereinstimmung der Schätzwerte mit den gemessenen Werten. Abbildung 6.22 zeigt den schon in Abbildung 6.21 dargestellten Schätzfehler für die gleichen Daten noch einmal auf vergrößerter Skala und mit einer Nennung der betrachteten Betriebspunkte.

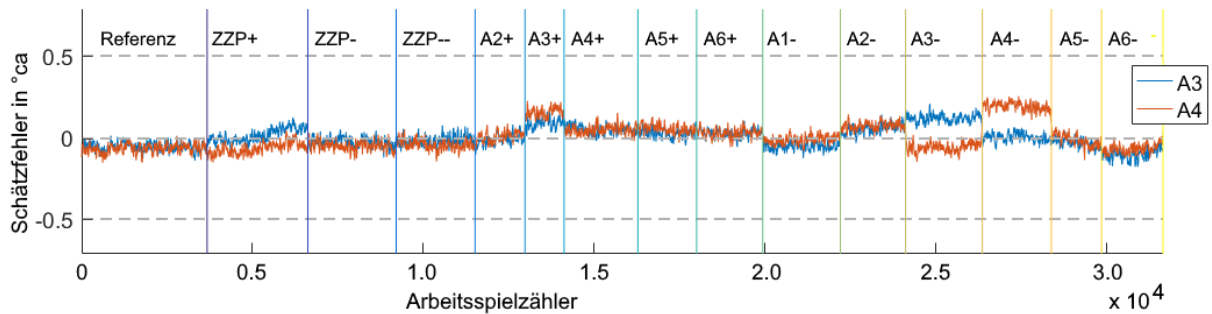


Abbildung 6.22: Vergrößerte Darstellung des Schätzfehlers aus Abbildung 6.21 für die beiden betrachteten Zylinder A3 und A4. Auch hier sind zeitlich gemittelte Werte dargestellt (gleitendes Mittelwertfilter über 30 Arbeitsspiele). Die auch in Abbildung 6.21 enthaltenen senkrechten Trennstriche kennzeichnen die unterschiedlichen betrachteten Betriebspunkte. „+“/„-“ kennzeichnen die in Abbildung 6.21 gezeigten früh/spät-Verstellungen um 1-3 °ca.

Zunächst ist hervorzuheben, dass die Schätzung aus Körperschall die tatsächliche Schwerpunktlage in dieser Validierungsmessung auf ca. +/- 0,2 °ca genau trifft. Das ist eine Genauigkeit, bei der man sich bereits fragen muss, ob die Berechnung des Referenzwertes über Zylinderdruck (und insbesondere die vorgelagerte Berechnung der Kurbelwinkelposition aus den Pickup-Signalen der Drehzahlerfassung) überhaupt eine solche absolute Genauigkeit abdeckt.

Es soll außerdem an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich hier *nicht* um den Motor des Versuchs-BHKWs in Karlsruhe handelt, an dem der überwiegende Teil des Forschungsprojektes durchgeführt wurde. Sondern es handelt sich um den zweiten Motor aus Tabelle 6.2, an dem nur an einem einzigen Tag Versuche und Messungen durchgeführt wurden.

Betrachtet man Abbildung 6.22 im Detail, so fallen die Betriebspunkte auf, in denen die geschätzten Schwerpunktlagen stärker von den gemessenen Schwerpunktlagen abweichen. In den mit „A3+“, „A3-“, „A4-“ gekennzeichneten Betriebspunkten wurde jeweils der Zündzeitpunkt des genannten Zylinders vom Referenzwert abweichend eingestellt. Dabei verändert sich auch die Genauigkeit der Schätzung des verstellten Zylinders. Bei Verstellung der Zündzeitpunkte der anderen Zylinder sind die Auswirkungen auf die Schätzungen jedoch – überwiegend – verschwindend gering. Dies ist damit zu erklären, dass das Schätzmodell auf den Referenzpunkt optimiert wurde, in dem auch die meisten Trainingsdaten vorliegen.

Der schlechteste Schätzwert in dieser Messung mit einem Schätzfehler von 0,2 °ca ergibt sich im Bereich „A4-“, in dem der Zündzeitpunkt des Zylinder A4 um 3 °ca nach spät verstellt wurde: Im Hinblick auf die Emissionsregelung ist eine solche Schätzgüte aber ausreichend, da das in etwa die Größenordnung ist, in der sich Schwerpunktlagen einzelner Zylinder bei gleichem Zündzeitpunkt unterscheiden können. Die Verstellungen, die sich über eine Gleichstellungsregelung (siehe Abschnitt 6.3.1) ergeben, werden dadurch abgedeckt.

6.3 Regelung

6.3.1 Regelungsstruktur

Mit den Schätz-Ergebnissen aus 6.2.6 stehen die Voraussetzungen für eine körperschallbasierte Emissionsregelung zur Verfügung. Die entwickelte Regelungsstruktur beruht auf der Darstellung in (Schmid, 2016) und ist in Abbildung 6.23 gezeigt.

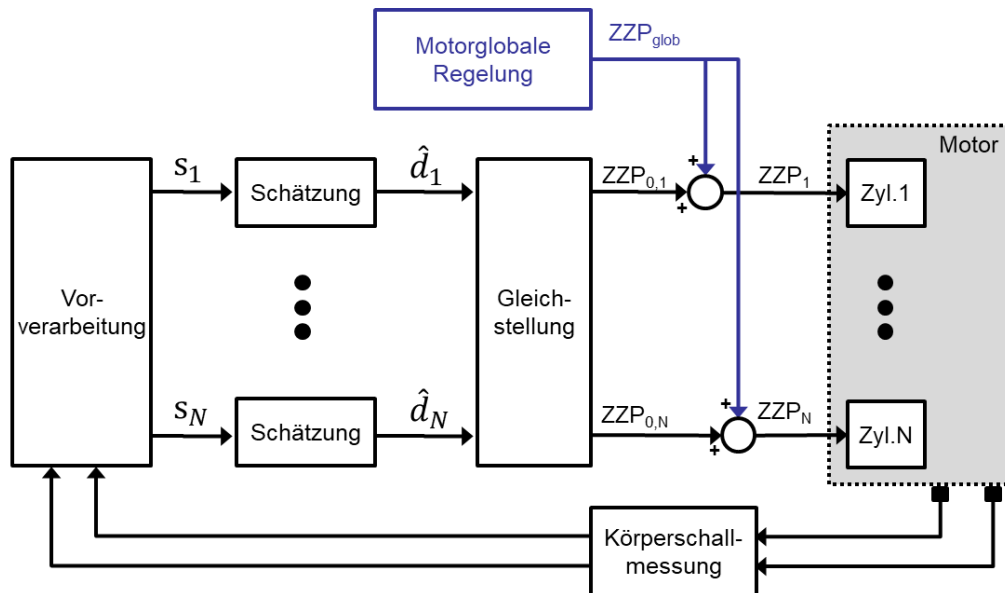


Abbildung 6.23: Regelungsstruktur für eine Gleichstellung der zylinderindividuellen Emissionsbeiträge. ZZP = Zündzeitpunkt, \hat{d}_i = Schätzwerte für die relativen Unterschiede der einzelnen Zylinder, s = aus Körperschall-Signalen berechnete Körperschall-Merkmale.

Die Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder werden über individuell geregelte Zündzeitpunkte eingestellt. Die besondere Herausforderung an der Regelungsaufgabe ist dabei das Zusammenspiel mit anderen an Gasmotoren etablierten Regelkreisen. Das sind motorglobale Regelungen (drehzahlabhängige Zündzeitpunkte, Gemischregelung, Unterstützung bei dynamischen Laständerungen) und zylinderindividuelle Regelungen (Anti-Klopf-Regelung, Reaktion auf Verbrennungsaussetzer). Der motorglobale Eingriff ist in Abbildung 6.23 skizziert, die weiteren zylinderindividuellen Eingriffe sind nicht dargestellt.

Wichtig bei der Umsetzung ist, dass alle denkbaren Kombinationen der verschiedenen Eingriffe sicher zusammen funktionieren und speziell für den Prüfstandsbetrieb Hinzu- und Wegschalten einzelner Regelungen zur Laufzeit sicher möglich ist. Da durch die Komponente „Gleichstellung“ eine weitere *Früh*-Verstellung des Zündzeitpunktes in die Steuerung aufgenommen wird, waren spezielle Vorkehrungen zu treffen, dass im Prüfstandsbetrieb aufgrund der verschiedenen *Früh*-Verstellungen keine den Motor gefährdenden Betriebszustände auftreten können. Außerdem waren Beschränkungen, die durch Verstellbereiche der verwendeten Zündanlage vorgegeben sind, in der Umsetzung entsprechend zu berücksichtigen.

Die Arbeiten innerhalb des Projekts konzentrierten sich vor allem auf die Umsetzung auf dem Steuergerät und die Erprobung an einer Simulationseinrichtung, die dazu um die Simulation der Körperschall-Merkmale erweitert wurde. In der Simulationsumgebung wurde das Zusammenspiel der einzelnen Regelungen erprobt, bevor dann die Versuche am echten Motor durchgeführt werden konnten.

6.3.2 Erprobung der Regelung am Versuchs-BHKW

Die in Abbildung 6.23 skizzierte Regelungsstruktur für die Gleichstellung wurde schließlich in der BHKW-Steuerung am Versuchs-BHKW umgesetzt. Der ursprünglich angestrebte Dauerbetrieb über einen *längeren Zeitraum* konnte im Projekt zwar nicht erreicht werden, da erst zum Projektende alle erforderlichen Bausteine erarbeitet waren: die Schätzung von Kenngrößen aus Körperschall, die Umsetzung der Schätzung im Steuergerät, die Umsetzung der Regelung im Steuergerät – und die entsprechende Verfügbarkeit des Motors.

Die grundsätzliche Funktion konnte jedoch im Realbetrieb zum Projektende hin erprobt werden und steht seither am Versuchs-BHKW für weitere Tests zur Verfügung. Abbildung 6.24 zeigt dazu Daten einer konkreten Messung am Versuchs-BHKW, mit der das erfolgreiche Zusammenspiel der einzelnen Projektschritte gezeigt werden kann: Durch Gleichstellung der einzelnen Zylinder werden die vom Motor ausgestoßenen NO_x-Emissionen gesenkt.

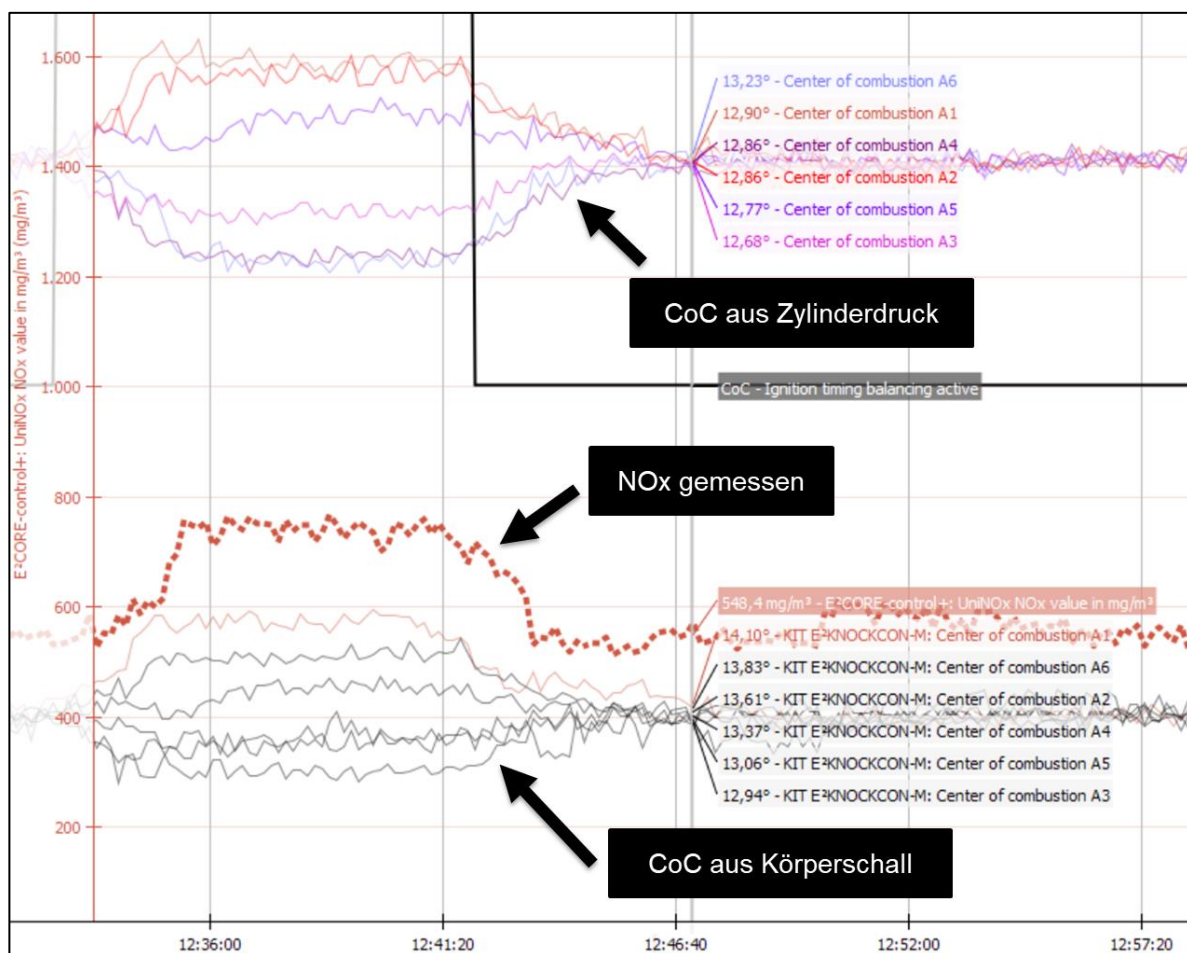


Abbildung 6.24: Messschrieb von Ein- und Ausschalten der Zylindergleichstellung am Versuchs-BHKW (Einschalten des Balancings um 12:32 Uhr, Ausschalten um 12:42 Uhr.). Die untere Kurvenschar stellt die aus Körperschall ermittelten Schätzwerte der Verbrennungslagen der sechs Zylinder dar, die obere Kurvenschar zum Vergleich die über Zylinderdruck gemessenen Schwerpunktlagen. Die punktierte Linie in der Mitte des Diagramms ist der über eine NO_x-Sonde gemessene NO_x-Wert. Alle Werte sind in der Darstellung zeitlich gemittelt, um ottomotorische Zyklen-schwankungen auszublenden.

In Abbildung 6.24 ist als ein Beispiel der Übergang vom gleichgestellten Betrieb in den nicht-gleichgestellten Betrieb und zurück dargestellt. Im Wesentlichen kommt es hier auf den Zeitpunkt 12:42 Uhr an, zu dem die Zylindergleichstellung eingeschaltet wird. Die Regelung ermittelt dann aus den unterschiedlichen Schwerpunktlagen, wie die Zündzeitpunkte der einzelnen Zylinder verstellt werden müssen, damit sich – im zeitlichen Mittel – gleiche Schwerpunktlagen in allen Zylindern ergeben. Für die Regelung ist die zeitliche Mittelung wichtig, da sonst auf otomotorische Zyklenschwankungen reagiert würde. Es ist gut zu erkennen, dass die Regelung relativ träge eingestellt ist, so dass es mehrere Minuten dauert, bis die Zylinder gleichgestellt sind. Für den praktischen Betrieb hat diese Zeit keine Relevanz, da es ja auf die Emissionsreduktion im Dauerbetrieb ankommt.

In Abbildung 6.24 sind neben den *Schätzwerten* für die Schwerpunktlage auch die aus Zylinderdruck *gemessenen* Schwerpunktlagen gezeigt. Die untere Kurvenschar in der Abbildung zeigt die Schätzwerte, die obere Kurvenschar zeigt die tatsächlichen Schwerpunktlagen. Folgende Erkenntnisse können daraus gezogen werden:

- Die Gleichstellung der Schwerpunktlagen reduziert die NO_x-Emissionen des Motors. Die punktierte Kurve in der Mitte des Messschriebes stellt dazu die gemessenen NO_x-Emissionen dar. Eine Regelung sorgt dafür, dass der Wirkungsgrad des Motors sich bei diesem Übergang nicht ändert.
- Die Schätzwerte weichen zwar absolut von den gemessenen Schwerpunktlagen ab, am in der Abbildung markierten Messpunkt um etwa 0,5 °ca. Für die *Gleichstellung* der einzelnen Zylinder untereinander ist das jedoch nicht relevant; aus der Abbildung ist gut zu erkennen, dass sowohl die geschätzten Schwerpunktlagen gleichgestellt werden als auch die tatsächlichen Schwerpunktlagen.

Bei der Messung aus Abbildung 6.24 wurden durch Gleichstellung der Schwerpunktlagen die NO_x-Emissionen von ca. 750 mg/m³ auf ca. 550 mg/m³ reduziert. Dies ist jedoch eine untypisch starke Reduktion am Versuchsmotor, die auf eine bezüglich der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder sehr ungünstige Ausgangsposition im nicht-gleichgestellten Zustand zurückzuführen ist. In den am Versuchs-BHKW am Projektende durchgeführten Versuchen mit der Regelung im geschlossenen Kreis wurden *typischerweise* die NO_x-Emissionen um ca. 5 % reduziert. So hat beim überwiegend erprobten Betriebspunkt mit 500 mg/m³ die Gleichstellung die Emissionen um ca. 25 mg/m³ reduziert.

Versuche mit der Regelung konnten im Projekt nicht an weiteren Motoren durchgeführt werden. Der konkrete Gewinn bezüglich der Emissionen, der mit den erarbeiteten Projektergebnissen an einem beliebigen Motor erzielt werden könnte, hängt sehr stark davon ab, wie unregelmäßig die einzelnen Zylinder des Motors brennen. Das hängt zum einen von konstruktiven Gegebenheiten des Motors ab, zum anderen können auch unterschiedliche Alterungseffekte über der Betriebszeit zu erheblichen Unterschieden zwischen den einzelnen Zylindern führen. Der im Projekt untersuchte Motor am Versuchs-BHKW gehört dabei sicherlich zu den „besseren“ Motoren, da an ihm parallel zu diesem Forschungsvorhaben laufend auch andere Entwicklungen zur Verbesserung der Verbrennung durchgeführt wurden, und außerdem Alterungseffekte durch die intensive, kontinuierliche Betreuung im Versuchs-BHKW kaum eine Rolle spielen.

In einer früheren Phase des Projektes hatten wir am Motor im Versuchs-BHKW – bei noch nicht so weit optimiertem Brennverfahren – in vergleichbaren Betriebspunkten durch Gleichstellung der Verbrennungsschwerpunkte eine NO_x -Reduktion von ca. 10 % erzielt. Im Ergebnis gehen wir daher davon aus, dass für typische BHKW-Motoren im Feld eher NO_x -Einsparungen in der Größenordnung von 10 % erreicht werden können. Eine fundierte Verifizierung ist aber erst nach der Anwendung an mehreren Motoren möglich, die die Autoren in den nächsten Monaten erwarten.

Statt über die Gleichstellung die NO_x -Emissionen zu reduzieren, kann der gewonnene Freiheitsgrad auch genutzt werden, um über eine Frühverstellung der Zündung einen besseren Wirkungsgrad und damit geringere CO_2 -Emissionen zu erreichen. Für den Motor am Versuchs-BHKW könnte statt einer NO_x -Reduktion um 5 bis 10 % damit der Wirkungsgrad der Verbrennung um 0,2 bis 0,4 % verbessert werden. Wie der Freiheitsgrad genutzt wird, kann je Anwendung durch Auswahl einer entsprechenden Betriebsweise individuell entschieden werden.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die Schätzung der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder eines Gasmotors aus Körperschall-Signalen möglich ist. Die ausgehend von diesen Schätzungen in der Motorregelung vorgenommene Gleichstellung der Emissionsbeiträge führt wie erwartet zu einer Reduktion der NO_x -Emissionen des untersuchten Motors.

Bei den erarbeiteten Methoden wurde Wert darauf gelegt, dass eine Anwendung außerhalb des im Projekt vorliegenden Prüfstandumfeldes tatsächlich möglich ist. Dazu wurden die erarbeiteten Schätzmodelle auf einem Serien-Steuergerät implementiert, eine Vorgehensweise wurde definiert, wie die Modelle im Feld ohne aufwändige Messtechnik parametrisiert werden können, und die Methoden wurden erfolgreich an einem zweiten Motor-Exemplar erprobt, das sich grundlegend vom Versuchs-Motor unterscheidet. Die für eine Anwendung der Projektergebnisse erforderlichen Investitionskosten an Motoren im Feld sind überschaubar. Sind Körperschall-Sensoren am Motor bereits vorhanden, so ist im Betrieb keine zusätzliche Sensorik erforderlich, lediglich für den Einmessvorgang bedarf es einer motorglobalen NO_x -Messung. Die geringe Komplexität der Algorithmen ermöglicht die Realisierung auf Serien-Steuergeräten. Motoren müssen für die Anwendung des Verfahrens lediglich mit Steuerungen ausgerüstet sein oder nachgerüstet werden, die zylinderindividuelle Vorgaben der Zündzeitpunkte ermöglichen.

Zusätzliche Betriebskosten entstehen durch Anwendung der hier vorgestellten Methoden nicht, die Reduktion der Emissionen wird letztlich durch Software erreicht. Wird die Methode auf Motoren angewendet, die über einen SCR-Katalysator verfügen, so können die Betriebskosten bezüglich Verbrauch an wässriger Harnstoff-Lösung sogar reduziert werden, da die innermotorische Reduktion der Rohemissionen an NO_x direkt zu einer Einsparung der erforderlichen wässrigen Harnstoff-Lösung im SCR-Katalysator führt.

Das Reduktionspotenzial an durch BHKW ausgestoßenen NO_x ergibt sich aus der Anzahl der erreichbaren BHKW und ihrer Emissionen. In Deutschland sind ca. 5.000 KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung zwischen 50 kW und 2 MW installiert (Statista, 2020). Ein BHKW der Größe wie das Versuchs-BHKW am IFKM (220 kW el. Leistung) produziert beim Betrieb

mit 250 mg NO_x/m³ bei 8.000 h Betrieb ca. 2.000 kg NO_x/a. Daraus könnte ein Potenzial errechnet werden – wobei die „Erreichbarkeit“ der einzelnen Anlagen mit erheblicher Unsicherheit behaftet ist, weswegen wir hier keine Hochrechnung wagen.

Die Projektergebnisse wurden etwa zur Mitte des Projektverlaufs auf der Dessauer Gasmotorenkonferenz vorgestellt (Wesche, Bernhardt, Schwarz, & Schmid, 2019). Als Resonanz darauf hat sich konkretes Interesse bei mehreren Motor- und BHKW-Herstellern ergeben. Die Versuche am oben beschriebenen Vergleichsmotor gehen beispielsweise auf diese Veröffentlichung zurück. Zwei weitere Versuche bei einem Hersteller von BHKW-Motoren und bei einem Hersteller sehr großer Gas- und Dual-Fuel-Motoren waren für 2020 ebenfalls terminlich eingeplant, konnten aber aufgrund der Corona-Pandemie ab Frühjahr 2020 bisher nicht durchgeführt werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Abschlussberichtes ist einer der Termine noch für das Jahresende 2020 / den Jahresanfang 2021 eingeplant. Es ist angedacht, die erfolgreiche Realisierung der in Dessau aufgezeigten Potenziale auf dem nächsten CIMAC World Congress zu veröffentlichen. Es ist davon auszugehen, dass Emissionen der Verbrennungsmotoren dort wiederum eines der Schwerpunktthemen sein werden.

7. Fazit

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Rohemissionen von stationär betriebenen Gasmotoren möglich ist, indem über eine Erfassung von Körperschall-Signalen und eine daraus abgeleitete indirekte Schätzung der Emissionen eine Regelung der Emissionsbeiträge der einzelnen Zylinder erreicht wird. Die erzielten Ergebnisse konnten bereits im Rahmen des Projektes erfolgreich auf zumindest einen weiteren Motor im Feld übertragen werden.

Die erarbeiteten Methoden könnten mit dem erreichten Stand im Feld breit eingesetzt werden, die Hürden für Erstausrüstung oder Nachrüstung sind im Vergleich zu anderen Verfahren gering. Es konnte gezeigt werden, dass mit einfacher Sensorik Ergebnisse erzielt werden können, die bisher nur mit aufwändiger Zylinderdruck-Indizierung erreichbar waren. Die durch das Projekt eröffneten Möglichkeiten können sehr gut als Ergänzung zu verschiedenen Methoden der Abgasnachbehandlung eingesetzt werden. Die Motorsteuerung bekommt ohne weitere Sensorik dauerhaft Informationen über die tatsächlichen Rohemissionen, eine wichtige Voraussetzung zur kontinuierlichen Einhaltung der Emissionsgrenzwerte. Größter offener Punkt bei der praktischen Umsetzung ist der Erfahrungsgewinn an verschiedenen Motoren.

Die Schätzung der Schwerpunktlage der Verbrennung je Zylinder und Arbeitsspiel aus Körperschallsignalen eröffnet über die Emissionsreduktion hinaus weitere sehr interessante Anwendungsfälle im Betrieb von BHKW. Information aus dem Kern des Verbrennungsmotors, dem Arbeitsprozess, wird über diese Schätzung gewissermaßen nach außen transportiert und kann Steuerungssystemen und Benutzern zur Verfügung gestellt werden.

Ein Beispiel dafür ist die Reaktion auf schwankende Gasqualitäten. Da sich diese Schwankungen auf die Lage der Verbrennung auswirken, kann über die hier vorgestellte Methode sehr schnell durch Regelungseingriffe reagiert werden. Das erfolgt bisher zum Teil über Sensoren zur Erfassung der Gasqualität, oder aber dadurch, dass BHKW mit großzügigem Sicherheitsabstand zum Worst Case betrieben werden – und damit im Dauerbetrieb bezüglich Wirkungsgrad und Emissionen deutlich schlechter fahren als eigentlich sinnvoll. Die hier entwickelte

Schätzung der Verbrennungslage könnte Betriebsstabilität, Wirkungsgrad und Emissionen solcher BHKW gleichermaßen erheblich verbessern.

Weiterhin kann die Information über das Langzeitverhalten der einzelnen Zylinder wertvolle Hinweise auf bevorstehende Schäden geben (Condition Monitoring) oder auch direkt genutzt werden, um Wartungen statt an festen Zeitintervallen an tatsächlichem Verschleiß auszurichten (Condition Based Maintenance). Auch dafür können mit der hier vorgestellten Methode Informationen aus Körperschall gewonnen werden, die bisher nur mit Zylinderdruck-Sensorik zugänglich sind. Da die Verbrennung von nahezu allen Subsystemen des Motors beeinflusst wird, sind die Diagnosemöglichkeiten hier sehr vielfältig. Als Beispiele seien der Zustand von Luftfilter, Zündkerzen oder Gemischbildner (Gasmischer) genannt.

Und schließlich können über die Verknüpfung mit anderen, standardmäßig jetzt schon zugänglichen Messgrößen rund um die Motoren (Drücke und Temperaturen der verschiedenen Medien) völlig neue Informationen erzeugt werden, die ebenfalls genutzt werden können zur Diagnose von Betriebsverhalten, Optimierung des Betriebes, Erleichterungen im Service.

Diese zusätzlichen Potenziale, die sich aus der Körperschallauswertung ergeben, in der praktischen Anwendung nutzbar zu machen, also die passenden Algorithmen zu definieren und deren Übertragbarkeit auf verschiedene Motoren abzusichern, bleibt nachfolgenden Forschungsvorhaben vorbehalten.

8. Literaturverzeichnis

- Andersson, I., McKelvey, T., & Larsson, M. (2014). Detection of Combustion Properties in a Diesel Engine using Block Mounted Accelerometers. *Preprints of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control*, (S. 11866-11871). Cape Town, South Africa.
- Bizon, K., Continillo, G., & Mancaruso, E. (September 2011). Reconstruction of In-Cylinder Pressure in a Diesel Engine from Vibration Signal Using a RBF Neural Network Model. *SAE Technical Papers*.
- BOSCH. (2017). Datenblatt Klopfsensor. Robert Bosch GmbH.
- Brüel & Kjær. (2015). Produktdatenblatt Piezoelektrischer Beschleunigungssensor Typ 4521-C. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S.
- Cambustion. (2018). User Manual Fas NO Measurement System. Cambustion Ltd.
- Conti. (2011). Specification Smart NOx sensor. Continental AG.
- ECO PHYSICS. (2010). Benutzerhandbuch. ECO PHYSICS GmbH.
- El-Ghamry, M., Steel, J., Reuben, R., & Fog, T. (2005). Indirect measurement of cylinder pressure from diesel engines using acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing* 19, S. 751-765.
- Ertel, W. (2016). *Grundkurs Künstliche Intelligenz*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Jia, L. (2014). *Modeling of transfer path for determination of combustion and noise metrics on Diesel engines*. Houghton, Michigan, USA: Michigan Technological University.
- Kriesel, D. (2007). *Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze*. Erhältlich auf <http://www.dkriesel.com>.
- Lowe, D. P. (2013). *Characterisation of Combustion Related Acoustic Emission Sources for Diesel Engine Condition Monitoring*. Brisbane: Queensland University of Technology.
- Matlab. (R2020b). *Matlab Help Center*. Von Steiglitz-McBride iteration stmcb: <https://de.mathworks.com/help/signal/ref/stmcb.html> abgerufen
- Norden E. Huang, Z. S.-C. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454 (1998), Nr. 1971, (S. 903-995).
- Schmid, K. (2016). Cylinder Individual Combustion Control of Gas and Dual Fuel Engines. *CIMAC World Congress*. Helsinki: CIMAC.
- Schmid, K., & Bernhardt, S. (2017). *Antrag auf Projektförderung: „KERG“: Untersuchung und Entwicklung einer Körperschallbasierten Emissionsregelung für stationär betriebene Gasmotoren*. Tübingen und Karlsruhe.

- Schmid, K., & Bernhardt, S. (2019). *Zwischenbericht zum Entwicklungsprojekt KERG*.
Tübingen und Karlsruhe: Ingenieurbüro Ganssloser und Institut für Kolbenmaschinen.
- Statista. (20. November 2020). *Bestand der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Deutschland nach Größenklasse in den Jahren 2017 bis 2019*. Von
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/468203/umfrage/anzahl-der-kwk-anlagen-in-deutschland/> abgerufen
- van Basshuysen, R., & Schäfer, F. (2015). *Handbuch Verbrennungsmotoren*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Villarino Villa, R. (2013). *Zylinderdruckrekonstruktion und Verbrennungsaussetzererkennung aus Körperschallsignalen für Ottomotoren*. Aachen: Shaker Verlag.
- Wagner, M., Böhme, J. F., & Förster, J. (2000). In-Cylinder Pressure Estimation from Structure-Borne Sound. *SAE World Congress*. Warrendale, PA, United States.
- Wesche, C., Bernhardt, S., Schwarz, T., & Schmid, K. (2019). Zylinderindividuelle Emissionsschätzung auf Basis von Körperschallsignalen am Gasmotor. *11. Dessauer Gasmotorenkonferenz, 11.-12.04.2019*. Dessau.
- Wolff, H.-G., & Bacher, J. (2010). Hauptkomponentenanalyse und explorative Faktorenanalyse. In H. B. C. Wolf, *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (S. 333-365). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Zacharias, F. (2001). *Gasmotoren*. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG.
- Zeller, P. (2009). *Handbuch Fahrzeugakustik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

9. Anhang: Messstellen-Liste

Die folgenden Messgrößen wurden während der Versuche kontinuierlich aufgezeichnet. Zylinderdruck-Signale, Körperschall-Signale und Speed/Timing wurden mit 6 kHz / 48 kHz aufgezeichnet, die übrigen Messgrößen in einer Aufzeichnungsrate von 100 ms.

Messwert	Kategorie
Exhaust temperature cylinder 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6	Cylinder
Cylinder pressure cylinder 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6	Cylinder
Exhaust measurement system NO _x value in ppm	Emission
Exhaust measurement system CO high value in %vol	Emission
Exhaust measurement system O ₂ value in %vol	Emission
Exhaust measurement system CO ₂ value in %vol	Emission
Exhaust measurement system CO low value in ppm	Emission
Exhaust measurement system HC3 value in ppm	Emission
Exhaust measurement system HC1 value in ppm	Emission
Exhaust measurement system NO value in ppm	Emission
Lambda probe	Emission
Gas volume flow	Flow
EGR mass flow	Mass flow
Air mass flow 1 / 2 / 3 / 4	Mass flow
Gas mass flow	Mass flow
Moisture air filter inlet	Moisture
Throttle position	Position
Pressure airfilter inlet	Pressure
Charge air pressure intercooler inlet	Pressure
Charge air pressure gas mixer outlet	Pressure
Pressure heating water inlet	Pressure
Pressure heating water outlet	Pressure
Crankcase pressure	Pressure
Pressure gas mixer inlet	Pressure
Pressure cooling water intercooler inlet	Pressure
Pressure cooling water intercooler outlet	Pressure
Pressure cold water intercooler inlet	Pressure
Pressure cold water intercooler outlet	Pressure
Pressure cooling water engine inlet	Pressure
Pressure cooling water engine outlet	Pressure
Pressure exhaust turbo inlet	Pressure
Pressure exhaust turbo outlet	Pressure
Pressure exhaust cat outlet	Pressure
Pressure cooling water exhaust heat exchanger outlet	Pressure
Pressure cooling water heat exchanger heating water outlet	Pressure
Pressure exhaust heat exchanger exhaust outlet	Pressure
Structure bourne sound	Sound
Crank shaft events	Speed/Timing
T/C speed	Speed/Timing
Cam shaft events	Speed/Timing

Messwert	Kategorie
Crank shaft events	Speed/Timing
Cam shaft events	Speed/Timing
Charge air temperature intercooler inlet	Temperature
Charge air temperature gas mixer outlet	Temperature
Temperature exhaust manifold outlet	Temperature
Temperature throttle valve inlet	Temperature
Temperature throttle valve outlet	Temperature
Temperature return flow local heat network	Temperature
Outdoor temperature	Temperature
Temperature natural gas mixer inlet	Temperature
Temperature cooling water intercooler inlet	Temperature
Temperature cooling water intercooler outlet	Temperature
Temperature cold water intercooler inlet	Temperature
Temperature cold water intercooler outlet	Temperature
Temperature cooling water engine inlet	Temperature
Temperature cooling water engine outlet	Temperature
Temperature exhaust turbo inlet	Temperature
Temperature cooling water exhaust heat exchanger outlet	Temperature
Temperature cooling water heat exchanger heating water outlet	Temperature
Temperature exhaust heat exchanger exhaust outlet	Temperature
Oil temperature return flow cylinder head	Temperature
Main bearing temperature between cylinder 2 & 3	Temperature
Main bearing temperature between cylinder 4 & 5	Temperature
Oil temperature after oil cooler	Temperature
Oil sump temperature	Temperature
EGR temperature after EGR cooler	Temperature
Oil temperature before oil cooler	Temperature
Oil temperature return flow ATL	Temperature
Temperature airfilter inlet	Temperature
Temperature cold junction	Temperature