

# Einfluss der Kurbelwellentorsion auf die Zylinderdruckdiagnostik

## Abstract

Motoren mit langen oder nachgiebigen Kurbelwellen erfordern bei der Zylinderdruckdiagnostik besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich einer Bewertung der kurbelwinkelabhängigen Ergebnisse. Auf die zur Identifikation und Verifizierung verwendeten Mess- und Analysemethoden wird in diesem Beitrag näher eingegangen.

Basis für jede Indizierung ist die hochpräzise und synchrone Erfassung des Zylindervolumens und des Zylinderdruckes. Da derzeit kein einfaches Messverfahren zur direkten Messung des Zylindervolumens zur Verfügung steht, wird die Kurbelwellenposition üblicherweise über einen Drehwinkelgeber erfasst. Unter Zuhilfenahme der kinematischen Grundgleichung der Hubkolbenmaschine wird das Zylindervolumen errechnet. Da bei diesem Verfahren die Kurbelwellentorsion nicht berücksichtigt werden kann, ergeben sich zwangsläufig Fehler bei den berechneten Indizierkennwerten.

Messungen der Kurbelwellentorsion mittels beidseitig an der Kurbelwelle angebrachter Winkelsensorik haben ergeben, dass der Torsionswinkel bei Großmotoren einen signifikanten Betrag annehmen kann. Eine experimentelle Verifizierung der Kurbelwellen-Simulation ist bei dieser Methodik nur an diesen zwei Referenzpositionen möglich. Durch den Einsatz einer neuartigen optischen Messtechnik im Brennraum ist es gelungen, den Ladungswechsel-OT im gefeuerten Betrieb an allen Zylindern in ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Dadurch wird es möglich, die Simulation zu verifizieren und die Indizierkennwerte anhand der angepassten Kurbelwinkelwerte zylinderindividuell zu korrigieren. Durch den Vergleich der Basisindizierung und der korrigierten Indizierwerte wird der zu erwartende Fehler bei dieser Motorenkategorie aufgezeigt.

## Autoren

**Jürg Stadler**

**Mirko Ciecinski**

Kistler Instrumente AG

**Herbert Schaumberger**

**Reinhard Steiner**

GE Jenbacher

**Prof. Dr. Andreas Wimmer**

**Dr. Thomas Jauk**

Large Engines Competence Center (LEC),  
Graz University of Technology

## Inhalt

1. Einleitung und Motivation	2
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung	3
3. Messergebnisse	6
4. Validierung der Simulation des Kurbeltriebs	7
5. Ermittlung der Indizierkennwerte	8
6. Ergebnisse	9
7. Zusammenfassung	11

## 1. Einleitung und Motivation

2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

# 1. Einleitung und Motivation

Die immer höheren Ansprüche an die thermodynamische Analyse im Rahmen des motorischen Entwicklungsprozesses erfordern neben hochgenauen Messdaten aus der Zylinderdruckindizierung in erster Linie die genaue Kenntnis des korrespondierenden Zylindervolumens im gefeuerten Betrieb.

Voraussetzung für eine präzise Berechnung des Zylindervolumens ist eine entsprechend genaue messtechnische Erfassung des Kurbelwinkels. Die Bedeutung einer Kurbelwinkelabweichung in der thermodynamischen Analyse ist in Bild 1 dargestellt. Das linke Diagramm zeigt den grundsätzlichen Einfluss eines Kurbelwinkelfehlers auf die Energiebilanz eines Großgasmotors, im rechten Bild dargestellt ist der Einfluss eines Kurbelwinkelfehlers auf den indizierten Mitteldruck (IMEP).

Eine zu frühe Lage des OT, welche eine Rechtsverschiebung des Zylinderdruckverlaufs bedeutet, bewirkt bei aufwärtsgehenden Kolben einen zu niedrigen Druck, bei abwärtsgehenden Kolben einen zu hohen Druck. Eine scheinbar längere Nachverbrennungsphase und ein erhöhter Energieumsatz sind die Folge. Bei zurückversetzter OT-Lage kehren sich die Verhältnisse um. Die Auswirkungen von Winkelverschiebungen zeigen sich auch beim indizierten Mitteldruck (IMEP), welcher größer wird, wenn der OT zu früh liegt und umgekehrt. Einhergehend erhält man damit größere bzw. kleinere Reibmitteldrücke. Definiert man als maximal zulässige Abweichungen einen Wert von  $\pm 0,1$  bar für den IMEP bzw.  $\pm 1\%$  für die Energiebilanz, so kann eine Genauigkeitsanforderung für die OT-Zuordnung von  $\pm 0,1^\circ$  KW abgeleitet werden.

Bekannte Methoden zur OT-Bestimmung stützen sich auf Berechnungen sowie Messungen entweder bei stillstehendem Motor (statische OT-Bestimmung) oder im geschleppten Motorbetrieb (OT-Bestimmung über thermodynamischen Verlustwinkel oder mittels kapazitivem Sensor), beispielsweise beschrieben in [1, 2]. Einzige die Methode der thermodynamischen Einpassung kann auch

im gefeuerten Motorbetrieb angewandt werden. Sie basiert auf einer Berechnung des Druckverlaufs in der Phase ohne Verbrennung und setzt die genaue Kenntnis der Ladungsmasse sowie des Wärmeübergangs und der Leckage voraus. Im Schlepptrieb kann dabei der gesamte Hochdruckteil verwendet werden, im gefeuerten Betrieb maximal der Bereich Einlassschluss bis Brennbeginn.

Neben der häufig nicht vorhandenen Ladungswechselsimulation, welche Voraussetzung für die Berechnung der zylinderspezifischen Ladungsmasse ist, führen bei dieser Methode insbesondere die Annahmen bezüglich des Wärmeübergangs zu Unsicherheiten. Zudem verursachen extreme Steuerzeiten, wie beim Millerverfahren mit sehr spätem Einlassschluss, Probleme bei der OT-Bestimmung im gefeuerten Motorbetrieb, da der zur Verfügung stehende Einpassbereich sehr klein wird. Grundsätzlich ist mit allen angeführten Methoden eine OT-Bestimmung im gefeuerten Betrieb nur bedingt bis gar nicht möglich.

Der mechanisch ideale Motor berücksichtigt weder Fertigungstoleranzen noch Verformungen durch thermische oder mechanische Last. Bei realen Motoren, besonders bei Großmotoren, können sich im gefeuerten Motorbetrieb aufgrund der großen Abmessungen und bewegten Massen beachtliche Abweichungen vom Idealfall in der Kinematik des Kurbeltriebs ergeben. Die OT-Werte einzelner Zylinder können dabei im Bereich mehrerer Grad Kurbelwinkel vom Bezugspunkt abweichen. Zusätzlich entspricht auch der Kolbenweg nicht mehr dem Ideal, da die Kurbelwellentorsion über dem Kurbelwinkel veränderlich auftritt. Daraus resultiert eine geänderte Volumenfunktion. Will man derartige Einflüsse berücksichtigen und in die Zylinderdruckdiagnostik einfließen lassen, gilt es neue Methoden anzuwenden, die in der Lage sind, das reale Verhalten des Kurbeltriebs unter Last messtechnisch zu erfassen beziehungsweise durch abgesicherte Simulationsergebnisse Aussagen zu treffen.

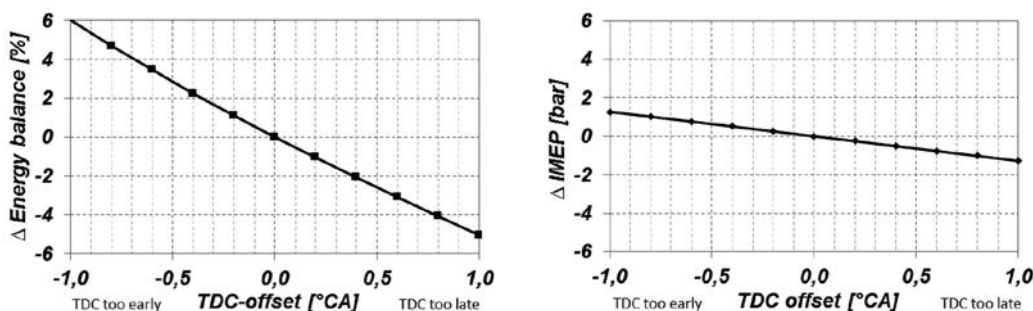


Bild 1: Einfluss des Kurbelwinkelfehlers auf Energiebilanz und IMEP

1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

## 2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung

Um die Auswirkungen lastbedingter Einflüsse auf den Kurbeltrieb in der thermodynamischen Analyse berücksichtigen zu können, wurde nachfolgend beschriebene Methodik entwickelt und an einem Großgasmotors angewandt. Der gewählte Ansatz nutzt detaillierte Simulationsergebnisse der Kurbelwellentorsion, die mithilfe unterschiedlicher Messmethoden validiert werden, als zusätzliche Eingabedaten in der Motorprozessrechnung.

Als Ausgangspunkt diente eine Kurbeltriebsimulation, mit der die lastabhängige Torsion an den einzelnen Kurbelzapfen über dem Kurbelwinkel berechnet wurde. Zur Absicherung der Berechnungsergebnisse wurden diese mit zwei unterschiedlichen Messmethoden validiert. Einerseits wurden Messungen zur Ermittlung der Gesamtverdrehung der Kurbelwelle an deren Enden durchgeführt. Andererseits wurde ein optisches Messsystem eingesetzt, das in der Lage war, an allen Zylindern im gefeuerten Betrieb den Ladungswechsel-OT zu bestimmen, womit eine Validierung der berechneten zylinderselektiven Torsionskurven zumindest an je einem Punkt gegeben war. Abschließend erfolgte eine Implementierung der Ergebnisse des realen Kurbelwellenverhaltens in die Motorprozessrechnung.

### 2.1 Simulation Kurbeltrieb

Die verfügbare Rechenleistung ermöglicht heute eine ausgedehnte Mehrkörpersimulation des Kurbeltriebs [3]. Primärziele dieser Simulationen sind u.a.: Festigkeitsbetrachtungen, Ermittlung der Resonanzfrequenzen, Auslegung des Drehschwingungs-

Dämpfers und NVH (Noise, Vibration and Harshness). Heutige Berechnungstools bieten die Möglichkeit zur Berechnung der Torsion einzelner Kurbelzapfen, z. B. [4]. Diese Information kann beispielsweise verwendet werden, um den Zündzeitpunkt eines Motors zylinderabhängig zu definieren.

Der Kurbeltrieb wird durch die einzelnen Komponenten wie Kurbelwelle, Pleuel, Kolben, Schwungrad und Drehschwingungs-Dämpfer beschrieben. Das zentrale Bauteil Kurbelwelle wird in eine hinreichende Anzahl einzelner Massen, die durch Federn und Dämpfer gekoppelt sind, zerlegt. Die Pleuelstange wird in einen rotierenden und in einen oszillierenden Teil aufgespalten. Im Drehschwingungsmodell wird der rotierende Pleuelanteil zur entsprechenden Kurbelwellenmasse hinzugefügt und der oszillierende Pleuelanteil gemeinsam mit den anderen, translatorisch bewegten Massen (Kolben, Kolbenbolzen etc.) zu einer oszillierenden Masse (pro Zylinder) zusammengefasst. Die oszillierenden Massen können mit der Näherung von Frahm zu den rotierenden addiert werden. Die Belastung bzw. Erregung des Systems erfolgt durch die Zylinderdrücke und Massenkräfte der oszillierenden Massen.

Der Kurbeltrieb wird durch Gaskräfte und Massenkräfte zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die Bewegung dieser Schwingketten wird durch ein Differentialgleichungssystem beschrieben. Somit kann der Torsionswinkel einer Berechnungsposition in Relation zu einem Bezugspunkt dargestellt werden. Diese Funktion wird nun genutzt, um die Torsion der einzelnen Kurbelzapfen bezogen auf einen Bezugspunkt (z. B. Drehwinkelgeber) zu ermitteln (Bild 2).

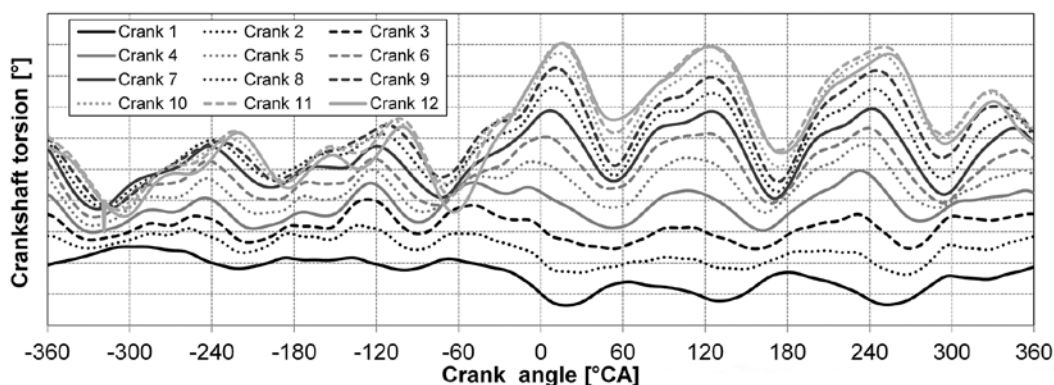


Bild 2: Torsionswinkel einzelner Kurbelzapfen relativ zu einem Bezugspunkt

1. Einleitung und Motivation
- 2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung**
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

## 2.2 Versuchsaufbau und eingesetzte Messtechnik

Die in diesem Beitrag gezeigten Untersuchungen wurden an einem 24-Zylinder-Großgasmotors (Einzelzylindervolumen größer 3 Liter) von GE Jenbacher durchgeführt. Der Messplan umfasste Betriebspunkte im gesamten Lastbereich des Versuchsträgers bei einer Nenn Drehzahl von  $1.500 \text{ min}^{-1}$ .

Entsprechend der vorgängig skizzierten Methodik galt es, die relative Torsion am Schwungrad bezogen auf das freie Wellenende messtechnisch zu ermitteln, um damit die Berechnungsergebnisse der Mehrkörpersimulation validieren zu können. Dazu wurde im Bereich des freien Wellenendes (am starr mit der Kurbelwelle verbundenen Teil des Drehschwingungsdämpfers) ein optischer Drehwinkelgeber eingesetzt. Am anderen Ende der

Kurbelwelle (im Bereich des Schwungrads) wurde der bestehende Zahnkranz mit entsprechendem Pick-up-Sensor genutzt, um die relative Verdrehung der Kurbelwelle über die gesamte Länge zu erfassen (Methodik beschrieben in [5]). Die Referenz der Messung bildete das mit  $0,1^\circ$  Kurbelwinkel aufgelöste Signal des Drehwinkelgebers, über das die Torsionswinkel der einzelnen Flanken des Zahnkranzes bestimmt wurden (Bild 3). Damit lagen kurbelwinkelbasierte Daten der relativen Torsion über die gesamte Länge der Kurbelwelle vor.

Um auch zylinderselektive Messdaten zu erhalten, wurde ein optisches Messsystem basierend auf Lichtleiter-Messtechnik eingesetzt, welches die Erfassung des Ladungswechsel-OT (LWOT) im gesamten Betriebsbereich ermöglichte [6]. Mit diesem Messsystem wurde in direkter Abfolge das Messprogramm an jedem der 24 Zylinder vermessen.

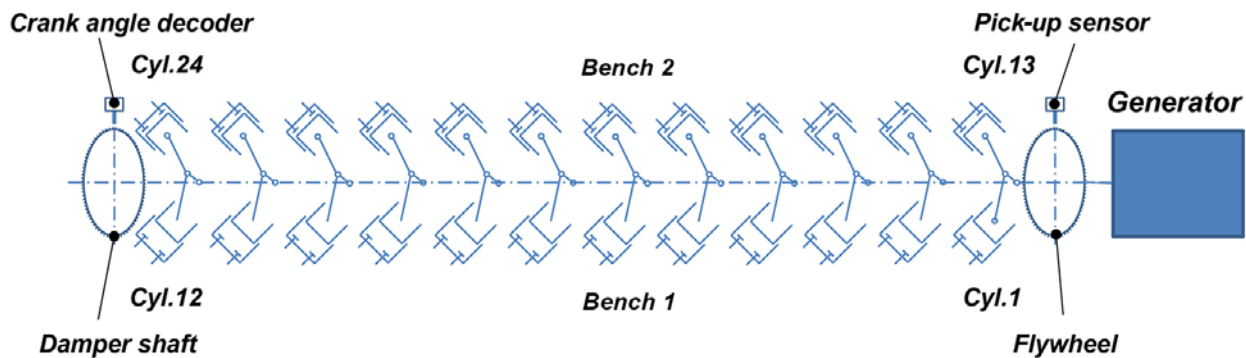


Bild 3: Schematischer Messaufbau zur Detektion der Gesamttorsion

1. Einleitung und Motivation
- 2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung**
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

Das System bringt durch einen optischen Zugang Laserlicht in den Brennraum ein und detektiert das an der Kolbenoberfläche reflektierte Licht (Bild 4). Die gemessene Intensität des reflektierten Lichts ist ein Maß für die Kolbenposition. Dies ermöglicht qualitative Aussagen zum Kolbenweg über dem Kurbelwinkel und damit die Bestimmung des oberen Totpunkts über das Höhenlinien-Schnitt-Verfahren [7]. Eine entsprechend robuste Gestaltung ermöglicht den uneingeschränkten Betrieb des Messsystems auch im gefeuerten Betrieb. Für die Messungen wurde der optische OT-Sensor nahezu brennraumbündig in den Zylinderköpfen des Versuchsträgers appliziert. Je nach Voraussetzungen, die am Versuchsträger gegeben sind, kann der LWOT mit guter Genauigkeit ( $\pm 0,2^\circ$  KW) sowie zum Teil auch der Zünd-OT (ZOT) im gefeuerten Motorbetrieb bestimmt werden. Kriterien für die Bestimmung des gefeuerten ZOT sind einerseits die konstruktiven Gegebenheiten (Abstand Sensor-Kolben im OT, Winkelausrichtung auf die Oberfläche des Kolbens etc.) sowie die Flammenausbreitung im "Sichtbereich" des Sensors (Flammentyp, Intensität etc.). An dem vermessenen Großgasmotors war die abgesicherte OT-Bestimmung unter Last nur im LWOT möglich.

derköpfen des Versuchsträgers appliziert. Je nach Voraussetzungen, die am Versuchsträger gegeben sind, kann der LWOT mit guter Genauigkeit ( $\pm 0,2^\circ$  KW) sowie zum Teil auch der Zünd-OT (ZOT) im gefeuerten Motorbetrieb bestimmt werden. Kriterien für die Bestimmung des gefeuerten ZOT sind einerseits die konstruktiven Gegebenheiten (Abstand Sensor-Kolben im OT, Winkelausrichtung auf die Oberfläche des Kolbens etc.) sowie die Flammenausbreitung im "Sichtbereich" des Sensors (Flammentyp, Intensität etc.). An dem vermessenen Großgasmotors war die abgesicherte OT-Bestimmung unter Last nur im LWOT möglich.

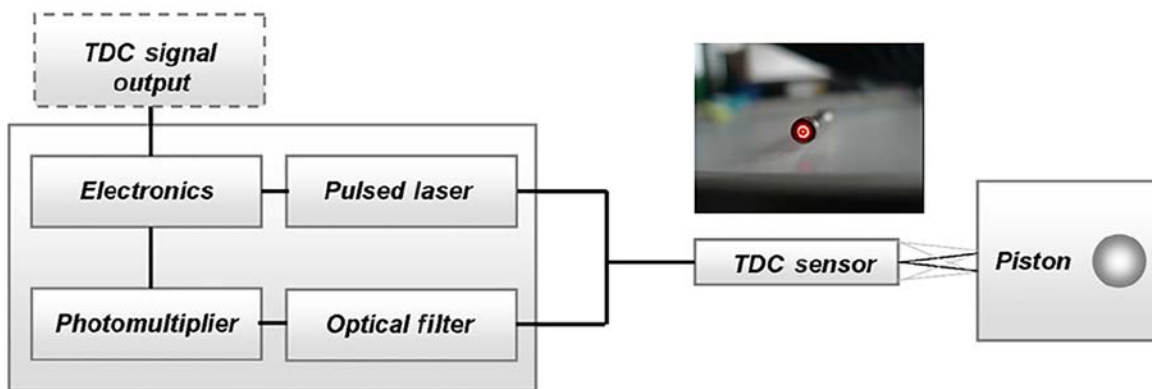


Bild 4: Prinzipieller Aufbau des optischen Mess-Systems inkl. frontaler Abbildung des Sensors

1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
- 3. Messergebnisse**
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

## 3. Messergebnisse

Das Versuchsprogramm beinhaltete jeweils unterschiedliche Lastpunkte bei  $1.500 \text{ min}^{-1}$ , wobei sämtliche Messpunkte insgesamt 24 Mal angefahren wurden, da die optischen OT-Messungen mit nur einem Sensor an allen Zylindern sequentiell durchgeführt wurden.

### 3.1 Gesamttorsion der Kurbelwelle

Im Rahmen der Vermessung der relativen Torsion am Schwungrad- bezogen auf das freie Wellenende, an dem der Drehwinkelgeber positioniert war- ergaben sich die in Bild 5 für Leerlauf bzw. Volllast dargestellten Kurvenverläufe. Daraus wird ersichtlich, dass unter Volllast über die gesamte Kurbelwellenlänge Torsionsmaxima von über  $1,5^\circ$  Kurbelwinkel auftreten. Mit sinkender Last nimmt die Amplitude der Torsionsschwingung ab. Beobachtet man das Vorzeichen der relativen Torsion, wird ersichtlich, dass die Schwungradseite größtenteils dem freien Ende nacheilt. Zusätzlich zeigt Bild 5 das Simulationsergebnis der Gesamtverdrehung der Kurbelwelle bei Volllast, welches sowohl in der absoluten Größenordnung der Torsion als auch im zeitlichen Verlauf über dem Kurbelwinkel eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messung aufweist.

### 3.2 Messergebnisse LWOT

Um die Darstellung der mit dem optischen OT-Sensor gemessenen Werte des LWOT übersichtlicher zu gestalten, werden in Bild 6 entsprechend der Motorbauart als V-Motor Bank 1 (Zyl. 1-12) und Bank 2 (Zyl. 13-24) getrennt dargestellt. Nachdem der Drehwinkelgeber (Bezugsbasis) am freien Kurbelwellenende in unmittelbarer Nähe des Kurbelzapfens von Zylinder 12 und Zylinder 24 verbaut war, tritt an diesen Zylindern erwar-

tungsgemäß kein durch Torsion hervorgerufener OT-Versatz auf. Je weiter man sich jedoch vom freien Ende entfernt, desto größer wird der gemessene LWOT-Versatz. Es ist zu beobachten, dass die messtechnisch bestimmten Torsionswinkel in Richtung der dem Schwungrad nahen Zylinder progressiv ansteigen. Dieses Verhalten ist auf beiden Banken deutlich sichtbar, wobei die absoluten Torsionswinkel an Bank 1 generell etwas höher ausfallen als an Bank 2. Die Gründe dafür sind strukturbedingt und ergeben sich aus den Massenverhältnissen im Kurbeltrieb und der Zündfolge. Auch die Abnahme des OT-Versatzes bei sinkender Last ist eindeutig aus den Messdaten ersichtlich.

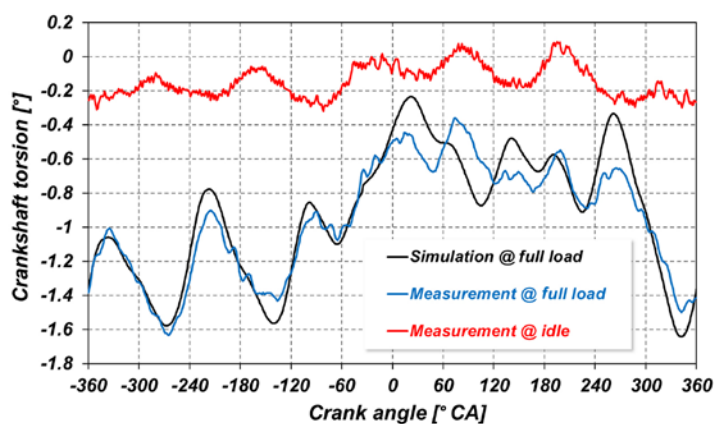


Bild 5: Gemessene und berechnete Kurbelwellentorsion schwungradseitig, bezogen auf das freie Wellenende bei  $1.500 \text{ min}^{-1}$

1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
- 4. Validierung Simulation Kurbeltrieb**
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

## 4. Validierung der Simulation des Kurbeltriebs

Eine Gegenüberstellung von gemessener und berechneter Torsion über die gesamte Kurbelwellenlänge wurde in Bild 5 bereits gezeigt. Zusätzlich wurden die in Bild 6 dargestellten Messergebnisse des optischen OT-Sensors zur Validierung der berechneten Kurbelwellentorsion herangezogen. In Bild 7 ist dieser Vergleich

für den Volllastpunkt dargestellt. Auch hier konnte die Simulation die Messung mit einer sehr guten Genauigkeit von kleiner  $\pm 0,2^\circ$  KW an allen 24 Zylindern wiedergeben.

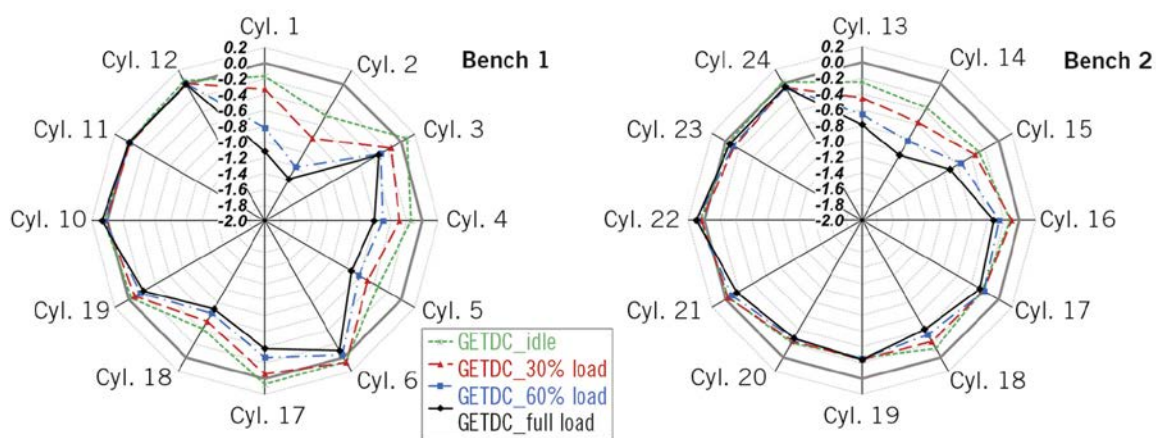


Bild 6: Relative Winkelposition des LWOT bei unterschiedlicher Last, bezogen auf das freie Wellenende bei  $1.500 \text{ min}^{-1}$ , Messsystem OT-Optisch

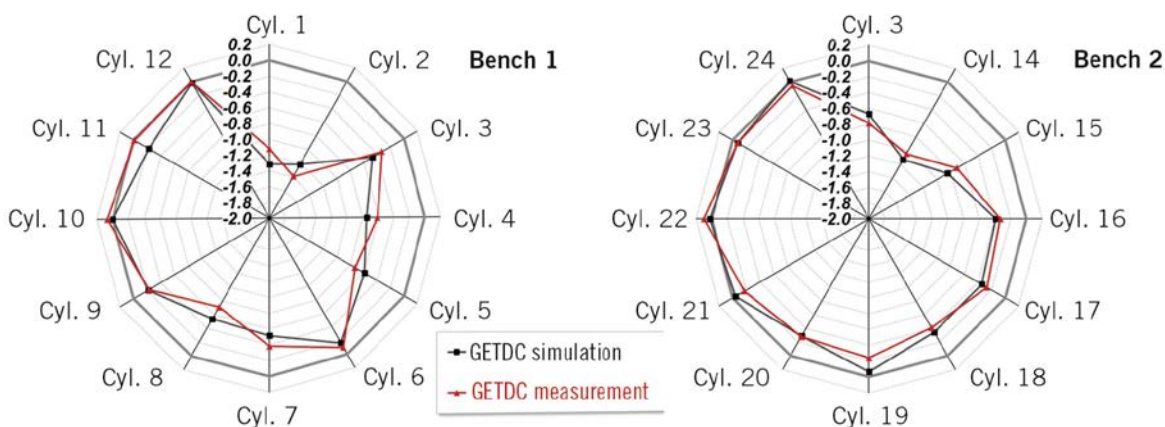


Bild 7: Vergleich der ermittelten Torsionswinkel im LWOT, bezogen auf das freie Wellenende bei  $1.500 \text{ min}^{-1}$  Volllast; Simulation vs. Messsystem OT-Optisch

1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
- 5. Ermittlung Indizierkennwerte**
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

## 5. Ermittlung der Indizierkennwerte

Um die Auswirkungen einer Berücksichtigung der Kurbelwellentorsion in der Zylinderdruckdiagnostik darstellen zu können, musste vorab die am LEC der TU Graz entwickelte und für die vorliegenden Analysen eingesetzte Software LEC-CORA (Nulldimensionales Motorprozesssimulations- und Analysetool) modifiziert bzw. erweitert werden. Es wurde eine Möglichkeit geschaffen, die über dem Kurbelwinkel veränderlichen Torsionskurven zylinderindividuell als  $\Delta\varphi_{(\varphi)}$  der Kurbelwinkelbasis zu überlagern. Als Resultat ergab sich daraus eine geänderte Volumenfunktion, welche für die nachfolgende Motorprozessanalyse verwendet wurde.

Im Rahmen des nachfolgenden Ergebnisvergleichs wurden drei unterschiedliche Methoden untersucht:

### Methode 1: Basis (baseline)

Motorprozessanalyse mit den gemessenen Rohindizierdaten anhand der am Prüfstand durchgeführten zylinderspezifischen OT-Bestimmung über den thermodynamischen Verlustwinkel. Da der Vollmotor nicht schleppend betrieben werden konnte, wurden die für das Verfahren notwendigen Schleppdruckverläufe in einem Auslaufversuch ermittelt. Der berücksichtigte Drehzahlbereich bewegte sich zwischen Nenndrehzahl und einem Wert von 80 % der Nenndrehzahl.

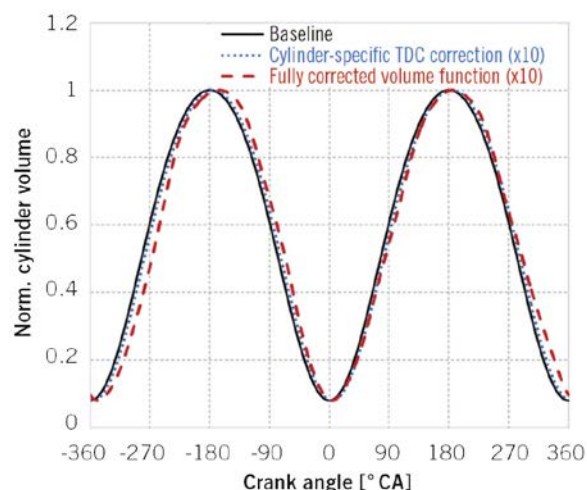
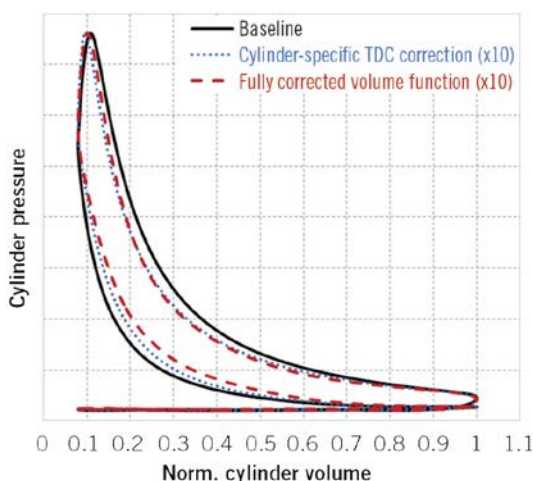


Bild 8: Resultierende Volumenfunktionen "baseline", "fully corrected volume function" und "cylinder specific TDC correction"

### Methode 2: Vollständige Korrektur der Volumenfunktion (fully corrected volume function)

Für diese Variante wurden die verifizierten Torsionskurven aus der MKS-Simulation verwendet. Dabei wurde in der Motorprozessanalyse die Torsion an den einzelnen Zylindern wie oben beschrieben als  $\Delta\varphi_{(\varphi)}$  berücksichtigt.

### Methode 3: Zylinderspezifische OT-Korrektur (cylinder specific TDC correction)

Aufgrund des hohen Aufwands für Methode 2 wurde eine Variante untersucht, welche die messtechnische Bestimmung des zylinderspezifischen ZOT repräsentiert. Dazu wurden den simulierten Torsionskurven der einzelnen Zylinder im ZOT die entsprechenden Werte entnommen und als OT-Versatz in der Motorprozessanalyse berücksichtigt.

Die aus den drei unterschiedlichen Verfahren resultierenden Volumenfunktionen sind in Bild 8 ersichtlich, wobei die Varianten "fully corrected volume function" und "cylinder specific TDC correction" zehnfach überzeichnet dargestellt sind.



1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
- 6. Ergebnisse**
7. Zusammenfassung

## 6. Ergebnisse

Zur Beurteilung der Qualität der Zylinderdruckdiagnostik auf Basis der untersuchten Varianten werden nachstehend die Einflüsse auf den indizierten Mitteldruck sowie die Energiebilanz dargestellt.

### 6.1 Einfluss der Kurbelwellentorsion auf IMEP

Eine erste Interpretation des untenstehenden Vergleichs (Bild 9) ist, dass die Schwankungsbreite der ermittelten indizierten Mitteldrücke bei Verwendung der Rohmessdaten (Baseline) vergleichsweise groß ist. Ein Faktor, der sich auf diese Schwankungsbreite auswirkt, ist sicherlich die Vorgabe der Ladungsmasse für die einzelnen Zylinder. Da am Prüfstand nur die Gesamtmasse gemessen werden kann, wurden die Massen zu gleichen Teilen auf die Zylinder aufgeteilt. Diese nicht der Realität entsprechende Annahme wurde bei sämtlichen analysierten Varianten gleich getroffen.

Wird die Volumenfunktion nach Methode 2 korrigiert (fully corrected volume function), ergibt sich eine deutlich homogenere Verteilung der zylinderspezifischen Mitteldrücke. Dies gilt auch für Methode 3 unter Verwendung des berechneten Torsionsfehlers bei ZOT (cylinder specific TDC correction). Dies legt den Schluss nahe, dass zumindest bei diesem Versuchsträger mit dieser Methode ein gutes Ergebnis erreicht werden kann. Ganz rechts im Diagramm ist das Zylindermittel für die drei Varianten dargestellt. Hier ergeben sich zwischen der Variante Baseline und den nahezu identischen Ergebnissen der beiden anderen Varianten Abweichungen in einer nicht vernachlässigbaren Größenordnung von 1 bis 2 %. Umgelegt auf den Reibmitteldruck führt diese Abweichung zu einem Fehler im Bereich von 25 bis 30 %.

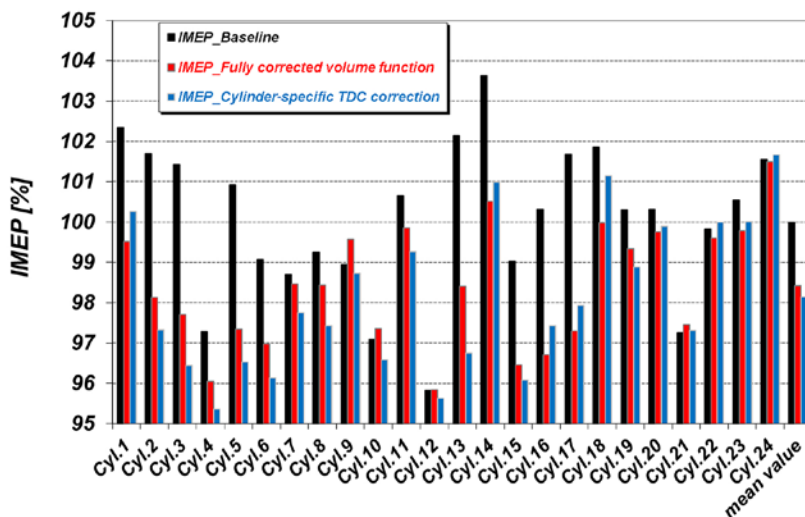


Bild 9: Berechneter IMEP unter Berücksichtigung unterschiedlich korrigierter Volumenfunktionen bei 1.500 min<sup>-1</sup> Vollast

1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
- 6. Ergebnisse**
7. Zusammenfassung

## 6.2 Einfluss der Kurbelwellentorsion auf die Energiebilanz

Beim Vergleich der ermittelten Energiebilanzen (Bild 10) ist erkennbar, dass auch in dieser Auswertung die korrigierten Varianten eine deutliche Verbesserung im gemittelten Wert (Cyl. mean value) aufweisen. Das Ergebnis einer nahezu geschlossenen Energiebilanz ist vielversprechend. Betrachtet man die Einzelergebnisse der Varianten "fully corrected volume

function" und "cylinder specific TDC correction", zeigt sich ein bankspezifisch unterschiedliches Verhalten. Die Energiebilanzen auf Bank 1 ergeben für die Variante "cylinder specific TDC correction" durchgehend niedrigere Prozentsätze als für "fully corrected volume function", wohingegen sich dieses Bild an Bank 2 umkehrt. Über den gesamten Motor gesehen tritt bei der Variante "fully corrected volume function" die kleinste Schwankungsbreite der Ergebnisse auf.

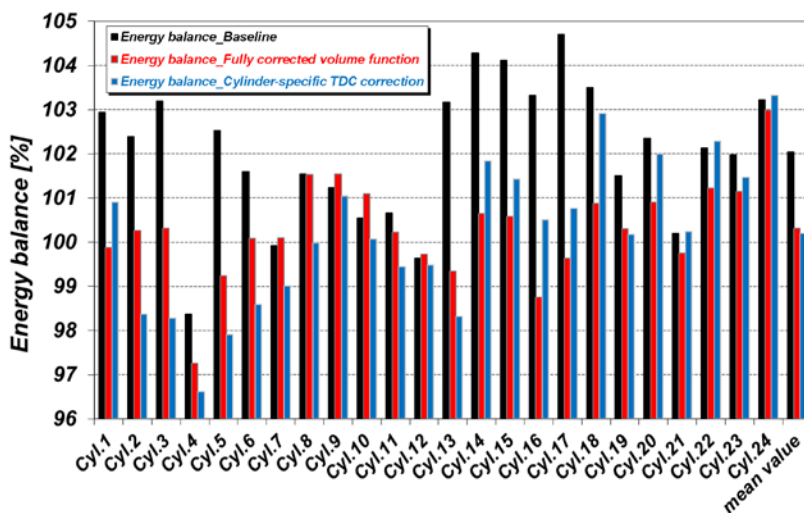


Bild 10: Zylinderindividuelle Energiebilanz unter Berücksichtigung unterschiedlich korrigierter Volumenfunktionen bei 1.500 min<sup>-1</sup>, Volllast

1. Einleitung und Motivation
2. Entwickelte Methodik zur Integration der Kurbelwellentorsion in die Motorprozessrechnung
3. Messergebnisse
4. Validierung Simulation Kurbeltrieb
5. Ermittlung Indizierkennwerte
6. Ergebnisse
7. Zusammenfassung

## 7. Zusammenfassung

In diesem Beitrag konnte dargestellt werden, dass die Kurbelwellentorsion in der Zylinderdruckdiagnostik von Großmotoren relevant ist und in die Analyse miteinbezogen werden kann. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Betriebspunktabhängigkeit (Last und Drehzahl) der Kurbelwellentorsion.

Basis für die Berücksichtigung der Kurbelwellentorsion in der Zylinderdruckdiagnostik bildet die simulierte, kurbelwinkelabhängige Torsion der einzelnen Kurbelzapfen. Eine Validierung der Torsionswinkel kann durch die Messung der Gesamttorsion der Kurbelwelle zwischen Schwungrad und freiem Wellenende ermittelt werden. Mit der Möglichkeit der optischen Erfassung der Kolbenposition im Ladungswechsel bei gefeuertem Betrieb kann der zylinderspezifische Torsionswinkel messtechnisch erfasst werden.

Liegen validierte Ergebnisse für die zylinderspezifische Kurbelwellentorsion vor, kann eine korrigierte Volumenfunktion für die Zylinderdruckdiagnostik errechnet werden. Dabei wird in der Maximalausprägung die Volumenfunktion kurbelwinkelabhängig

für jeden einzelnen Zylinder berechnet und in der nachfolgenden Motorprozessrechnung verwendet.

Falls die zylinderindividuelle Torsion bei ZOT ermittelt werden kann, ist eine vereinfachte Korrekturmethode anwendbar. Somit kann der Torsionswinkel direkt im Indiziersystem definiert und bereits während der Messung korrigiert werden.

Eine dritte Möglichkeit bietet die thermodynamische OT-Einpassung in der Motorprozessrechnung. Diese erfordert eine sehr gut abgestimmte Ladungswechselsimulation zur Bestimmung der benötigten Ladungsmasse an den einzelnen Zylindern.

Werden die Torsionseffekte nicht für jeden Betriebspunkt berücksichtigt, so können – wie im untersuchten Fall – Abweichungen in der Größenordnung von ca. 30 % im Reibmitteldruck sowie ca. 2 % in der Energiebilanz festgestellt werden.

### Literatur

- [1] Davis R., Patterson G.:  
Cylinder pressure data quality checks and procedures to maximize data accuracy  
SAE Paper 2006-01-1346
- [2] Tazerout M., LeCorre O., Rousseau S.:  
TDC determination in IC engines based on thermodynamic analysis of the temperature-entropy diagram, SAE Paper 1999-01-1489
- [3] Piraner I., Pflueger C., Bouthier O.:  
Cummins crankshaft and bearing analysis process, North American MDI User Conference, 2002
- [4] AVL Product description Excite Power Unit, Dynamics and acoustics of power units and drivelines, 2013
- [5] Ciecinski M., Dolt R.:  
Combustion analysis of a 2-cylinder engine using a 60-2 crank speed sensor, 10th International Symposium on Combustion Diagnostics, 2012
- [6] Jauk T., Wimmer A.:  
Neues Mess-System zur Bestimmung des oberen Totpunktes in Verbrennungsmotoren,  
12. Tagung "Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors", 2009
- [7] Fushoeller H., Bargende M.:  
Verfahren zur OT Bestimmung,  
14. Kistler Indizierexperten Forum, 2008