Der Einfluss von Messfehlern auf die Bewertung von motorischen Betriebspunkten

Prof. Dr.–Ing. Peter–Wolfgang Manz

Einige Faktoren und Unterschiede

Wesentliche Kostenfaktoren des Schiffsbetriebs:

- zunehmend strengeren Vorschriften zur Emissionsreduzierung
- der Brennstoffverbrauch bzw. die Brennstoffkosten des Motors

Ist der Einsatz von Lösungs- bzw. Entwicklungsansätzen der Automobilindustrie in der Seeschifffahrt denkbar ?

Zielrichtung:

- Effizienterer Betrieb der Schiffsmotoren
- gesetzeskonforme Schadstoffemissionen (ev. Zukunftspotenzial?)

Unterschiede zwischen Automobil- und Schiffsmotoren-Industrie ?

Anzahl gebauter Motoren in einer Serie:

- Automobilantrieb > 1.000.000 (teilweise wesentlich mehr pro Jahr)
- Schiffsantrieb < 100 (Mittelschnellläufer ca. 5-10 MW)

Der Entwicklungskostenanteil pro Motor ist deutlich geringer, dadurch ergibt sich ein deutlich höheres Investitionspotenzial !

In der Automobilindustrie vorhandene Entwicklungswerkzeuge und Methoden

Entwicklungswerkzeuge:

3D Berechnungs- und Konstruktionsverfahren

- CAD (Konstruktion)
- CFD (Strömungsberechnung)
- FEM (Strukturmechanik)
- Optimierungsverfahren in Verbindung mit den 3D-Verfahren

1D-Prozessrechnung (vom Luftfiltereintritt bis zum Endrohraustritt)

- Gesamtmotor/Fahrzeug-Simulation
- Entwicklung oder Applikation von Motorsteuerungen
- Komponentendarstellung
- Randbedingungen für CFD-Rechnungen

Thermodynamische Analysewerkzeuge (Versuchsbegleitend)

- Heizverlaufsrechnung
- Thermodynamische Prozess Analyse des Hochdruckprozesses
- Motorprozessrechnung

Thermodynamische Messverfahren

- Betriebsdaten (Luft, Kraftstoff, Drehzahl, usw.)
- Drücke (teilweise hochaufgelöst)
- Temperaturen
- Abgaskomponenten usw.

In der Automobilindustrie vorhandene Entwicklungswerkzeuge und Methoden

Optische Messverfahren:

- Kalte Strömung im Einlasskanal / Brennraum
- Visualisierung der Einspritzung / Gemischbildung im Brennraum
- Visualisierung der Verbrennung
  (Flammenfront, räumliche Verteilung von Schadstoffen, usw.)
  - Fenster im Brennraum
  - Endoskopie
- Optische Sensoren (z.B. einzelne Abgaskomponenten)
  usw.

Unterschiede Entwicklung und Betrieb:

- nur im Entwicklungsprozess nutzbare Methoden dienen ausschließlich dem Motorenhersteller
- die Nutzungsdauer eines Schiffmotors ist sehr lang > 10 Jahre (max. Ersatzteilverfügbarkeit PKW)
- es gibt hochqualifiziertes Betriebspersonal
- Ziel sind Einsparungen bei den Betriebskosten für den Motor

Welche Methoden kommen in Frage und wie präzise muss die Messtechnik sein?

In der Automobilindustrie vorhandene Entwicklungswerkzeuge und Methoden

Entwicklungswerkzeuge:

3D Berechnungs- und Konstruktionsverfahren

- CAD (Konstruktion)
- CFD (Strömungsberechnung)
- FEM (Strukturmechanik)
- Optimierungsverfahren in Verbindung mit den 3D-Verfahren

1D-Prozessrechnung (vom Luftfiltereintritt bis zum Endrohraustritt)

- Gesamtmotor/fahrzeug-Simulation
- Entwicklung oder Applikation von Motorsteuerungen
- Komponentendarstellung
- Randbedingungen für CFD-Rechnungen

Thermodynamische Analysewerkzeuge (Versuchsbegleitend)

- Heizverlaufsrechnung
- Thermodynamische Prozess Analyse des Hochdruckprozesses
- Motorprozessrechnung

Thermodynamische Messverfahren

- Betriebsdaten (Luft, Kraftstoff, Drehzahl, usw.)
- Drücke (teilweise hochaufgelöst)
- Temperaturen
- Abgaskomponenten

Die optimale und stabile Verbrennung, der Schlüssel zu geringen Kraftstoffverbräuchen und verträglichen Emissionen

© Rollce Royce Powersystems

Das pV-Diagramm zur Darstellung des realen Arbeitsprozesses eines 4-Taktmotors

Prozessarbeit

$$w_i = \frac{1}{V_H} \cdot \int_{V_0°KW}^{V_720°KW} p \cdot dV$$

Einfach und sehr schnell zu berechnen („echtzeitfähig“)

Prinzipdarstellung des Brennverlaufs mit den charakteristischen Größen

Bedeutung der charakteristischen Größen des Energieumsatzes

➢ **Brennbeginn**	Kraftstoff-Spritzbeginn
➢ **1%-Umsatzlage – Einspritzzeitpkt.**	Entflammungsphase Charakterisiert Gemischbildungsqualität und Entflammungsbedingungen
➢ **50%-Umsatzlage**	Pos. des optimalen Wirkungsgrades η_i
➢ **90%-Umsatzlage**	Ende der „normalen“ Verbrennung
➢ **90% -1%-Umsatzlage**	Brenndauer
➢ **>90%-Umsatzlage**	erhebl. Temp.-Senkung durch Wandberührung und Expansion „einfrieren“ der Reaktionen
➢ η_U	Ungenutzte Kraftstoffenergie=$m_K(1- \eta_U)$

Der Zylinderdruck in einem gesamten Arbeitsspiel des Arbeitsprozesses eines 4-Taktmotors

Motor**P**rozess**R**echnung (MPR)

Thermodynamische **P**rozess **A**nalyse (TPA) / Heizverlaufsrechnung

Die Möglichkeiten einer thermodynamischen Analyse des Arbeitsprozesses eines 4-Taktmotors

- **Heizverlaufsrechnung** : **einige Geometriedaten, $p_{Zyl}(\phi)$**
  „echtzeitfähig“
  Lösungsqualität $\Rightarrow$ brauchbare Näherung

- **TPA** : **Geometriedaten,Betriebspunktdaten, $p_{Zyl}(\phi)$,**
  unterer Heizwert, Luftbedarf, Kraftstoffmasse
  Anfangsbedingungen erforderlich !
  Luftliefergrad, Restgasanteil
  nicht echtzeitfähig
  Lösungsqualität $\Rightarrow$ ziemlich genau

- **3-Druck-MPR** : **Geometriedaten,Betriebspunktdaten,**
  $p_{Zyl}(\phi)$, $p_{Einlass}(\phi)$, $p_{Auslass}(\phi)$,$T_{einlass}$,$T_{Auslass}$
  unterer Heizwert, Luftbedarf, Kraftstoffmasse
  nicht echtzeitfähig
  Lösungsqualität $\Rightarrow$ sehr genau

Der Messaufbau für die versuchsgestützte MotorProzessRechnung
3-Druckmethode zur thermodynamischen Analyse

Mess-Stellen:

- Druck im Zylinder (hochaufgelöst)
- Druck im Einlass (hochaufgelöst)
- Temperatur im Einlass (langsam)
- Druck im Auslass (hochaufgelöst)
- Temperatur im Auslass (langsam)

Mit Hilfe der Drücke und Temperaturen im Einlass / Auslass wird auch der Ladungswechsel des Motors berechnet

Die Ventilerhebungsverläufe bzw. der Ladungswechsel eines typischen, mittelschnell laufenden 4-Takt Schiffsmotors

Die Ventilerhebungskurven

Die Einlass - und Auslass - Massenströme

- **Aufgrund der relativ großen Ventilüberschneidung reicht eine Luftdurchsatzmessung <u>nicht</u> aus um die korrekte Zylinderfüllung zu bestimmen**
- **Eine messwertgestützte Motorprozesssimulation ist erforderlich!**
- **Der Restgasanteil läßt sich nur mit einer messwertgestützte Motorprozesssimulation bestimmen**

Einfluss der Brennverlaufsform auf den indizierten Wirkungsgrad des Motors - Simulationsvoraussetzungen

Konvergenzlinie bei vollständiger Verbrennung bei 0,999

Verbrennung von Xv=0 ... 0.998

Modifikationen des Referenzbrennverlaufs

Parametervariation zur Bewertung optimaler Verbrennungsabläufe

<u>Bezugsniveau die verwendete Energiebilanz</u>:

Zugef. Energie = Kraftstoffmasse x unterer Heizwert

Einfluss der Brennverlaufsform auf den maximal zulässigen Druckgradienten des Motors

Optimale 50% Umsatzlage

Variation der 50% Umsatzlage

Der maximale Druckgradient bei unterschiedlicher Brenndauer ergibt sich aufgrund der:

- **Maximalen Belastung der Kurbelwellenlagerung (Dauerfestigkeit / Verschleiss)**
- **Maximale Geräuschentwicklung des Motors**

Damit ergibt sich eine zulässige minimale Brenndauer ohne Berücksichtigung der Stickoxid-Emissionen.

Einfluss der Brennverlaufsform auf den indizierten Wirkungsgrad des Motors

Einzelzylinderhubraum = 0,5l Verdichtungsverh. = 10,0

Je kürzer die Brenndauer desto höher der indizierte Wirkungsgrad

Bei einer realistischen Brenndauer von 40°KW ergibt sich ein indizierter Wirkungsgrad von ca. 40%.

Einfluss von Messfehlern bei der Beurteilung der optimalen 50%-Umsatzlage

Bestwert bei 368°KW

Die Annahme eines minimalen Messfehlers von 1g / kWh führt schon zu einer Ergebnis-Streubreite von ca. 7°KW

Ein minimaler Messfehler von 0,5% der indizierten Arbeit führt zu einer Ergebnis-Streubreite von ca. 7,5°KW

Einzelzylinderhubraum = 0,5l Verdichtungsverh. = 10,0

Einfluss von Messfehlern bei der Beurteilung der optimalen 50%-Umsatzlage

V_H	= 0,5	89,0 [l/Zyl.]
Verd.-Verh.	= 10,0	15,5 [-]
H_U	= 42,8 (Benzin)	43,9 [MJ/kg] (MDO/MGO)
b_i	= 215	167 [g/kWh]
Zul. Fehler	< 0,5%	< 0,6%

Einfluss von Messfehlern der Kurbelwinkelgeometrie und der Brennstoffdaten

Einfluss eines Fehlers im unteren Heizwert (H_U) +/-3 MJ / kg

Einfluss eines Kurbelwinkelfehlers um +/- 1°KW

Auswirkung eines Stoffwert- bzw. auch eines Brennstoffmassenfehlers

Geometriefehler im Messaufbau, gut erkenn- und korrigierbar

<u>Bezugsniveau der Energiebilanz</u>:

Zugef. Energie = Kraftstoffmasse x unterer Heizwert

Ergebnisqualität einer 3-Druck-MotorProzessRechnung „Idealbedingungen“

		Abweichung
Durchflussbeiwerte von Einlass- und Auslasskanal	:	0 %
Druck und Temperatur im Einlasskanal	:	0 %
Druck und Temperatur im Auslasskanal	:	0 %
Motordrehzahl	:	0 %
Zylinderdruck	:	0 %
Kraftstoffmasse	:	0%

Ergebnisqualität einer 3-Druck-Motorprozessrechnung „Idealbedingungen“

Vergleich einer Ref.-Rechnung mit der 3-Druck-Analyse:

- **Luftverhältnis der Referenzrechnung** **1.0**
- **Luftverhältnis der thermodyn. Analyse** **0.994 (-0,6%)**

- **Luftmasse aus der Referenzrechnung** **0.456 g**
- **Luftmasse der thermodyn. Analyse** **0.453 g**

- **Verhältnis der Luftmassen** **0.994 (-0,6%)**

Ergebnisqualität einer 3-Druck-Motorprozessrechnung „Realbedingungen“

Modifikation auf Basis der vom Hersteller vorgegebenen Toleranzwerte der Mess-Sensoren:

	Abweichung
Durchflussbeiwerte von Einlass- und Auslasskanal	0 %
Einlasskanal (Dichte angehoben)	
Druck	+20mbar
Temperatur	-2,5°C
Auslasskanal (Dichte abgesenkt)	
Druck	-50mbar
Temperatur	+5°C
Motordrehzahl	0 %
Zylinderdruck	0 %
Kraftstoffmasse	0%

Ergebnisqualität einer 3-Druck-Motorprozessrechnung „Realbedingungen“

Vergleich einer Ref.-Rechnung mit der 3-Druck-Analyse:

- **Luftverhältnis der Referenzrechnung** **1.0**
- **Luftverhältnis der thermodyn. Analyse** **1.087 (+8,7%)**
- **Luftmasse aus der Referenzrechnung** **0.456 g**
- **Luftmasse der thermodyn. Analyse** **0.496 g**
- **Verhältnis der Luftmassen** **1.087 (+8,7%)**

Das Ergebnis ist noch akzeptabel, aber deutlich ungenauer obwohl hier nur die herstellerbedingten Toleranzen betrachtet wurden

Ergebnisse unterschiedlicher thermodynamischer Verfahren zur Auswertung einer Messung mit 300 nachfolgenden Zyklen

- **Heizverlaufsrechnung**
- **Thermodynamische Prozess Analyse**
  (inklusive Anfangsbedingungen)
- **Versuchsgestützte Motorprozessrechnung**

Ergebnis der 3-Druckauswertung eines mittleren Zyklus aus einer Messung mit 300 nachfolgenden Zyklen

Kontrolle der Motorprozessrechnung

Beschaffung notwendiger Anfangsbedingungen für die Thermodynamische Prozess Analyse

Ergebnis der Thermodynamischen Prozess Analyse aller 300 nachfolgenden Zyklen

Schwankungen des indizierten Wirkungsgrades und des Umsetzungsgrades aller Einzelzyklen
Annahme:
Masse Luft = konst. für alle nachfolgenden Zyklen
Restgasanteil = konst. für alle nachfolgenden Zyklen

Statistik aller nachfolgenden Druckverläufe

Ergebnis der Thermodynamischen Prozess Analyse aller 300 nachfolgenden Zyklen

365° - 380°KW

Aufgrund konstanter Vorgaben von Luftmasse und Restgasanteil unterliegt η_U erheblichen Schwankungen

Ergebnisse einer versuchsgestützten 3-Druck-MPR
Messergebnisse von 300 nachfolgende Arbeitsspielen

Vergleich der zyklusindividuellen indizierten Wirkungsgrade und der Umsetzungsgrade berechnet mit TDA und 3-Druck-MPR

- **Die direkte Berechnung zyklusindividueller Werte verbessert das Ergebnis deutlich**
- **Das grundsätzliche Niveau der Ergebnisse bleibt erhalten**
- **Der Rechenaufwand steigt erheblich an**
- **Eine zyklusindividuelle Kraftstoffmasse könnte das Ergebnis noch einmal etwas verbessern (Der Messaufwand wäre beträchtlich)**

Ergebnisse einer versuchsgestützten 3-Druck-MPR Messergebnisse von 300 nachfolgende Arbeitsspielen

- Die 50%-Umsatzlage liegt bei der 3-Druck-MPR im gleichen Bereich wie bei der TDA
- Der Umsetzungsgrad η_U zeigt nur noch minimale Schwankungen (realistisch)

Heizverlaufsauswertung der Messergebnisse von 300 nachfolgenden Arbeitsspielen

Vergleich zweier charakteristischer Energieumsatzlagen berechnet aus einem identischen Messdatensatz

Anwendungsmöglichkeiten thermodynamischer Ansätze zur Bewertung des Betriebsverhaltens von Schiffsmotoren

<u>Beispiele für Einsatzzwecke</u>:

- **Monitoring der Motorbetriebspunkte**
  Überwachung der Verbrennungsstabilität
  ggf. Archivierung der Motorbetriebspunkte
  z.B. für angepasste Wartungsintervalle

- **Betriebs- bzw. Einstellparameter**
  Eingriff in Einspritzung (Brennverlaufsformung)
  Lage der Einspritzung
  Anzahl der Einspritzungen

usw.

Insbesondere bei Dual-Fuel-Motoren können solche Möglichkeiten eine besondere Bedeutung bekommen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !