

Möglichkeiten der motorischen Prozess-Simulation am Beispiel des Verbrennungsablaufs

Dr.-Ing. P.-W. Manz
Prof. Dr.-Ing. W. Thiemann

Kurzfassung

Es werden Inhalte und Möglichkeiten der Prozess-Simulation eines Verbrennungsmotors im Hinblick auf notwendige Randbedingungen, Eingangsdaten und mögliche Ergebnisse dargestellt. Am Beispiel der 50%-Energieumsatzlage, die häufig bei der Applikation des wirkungsgradoptimalen Zündzeitpunktes als Kriterium eingesetzt wird, soll die Anwendungsmöglichkeit der Motorprozess-Simulation gezeigt werden.

Mit Hilfe von symmetrischen Brennverläufen unterschiedlicher Brenndauer und 50%-Umsatzlage wird zunächst grundsätzlich herausgearbeitet, welches thermodynamische Motorverhalten zu erwarten ist und welche Größen einen Einfluss auf dieses Verhalten haben. In einem zweiten Schritt wird mit Hilfe eines realen Brennverlaufs gezeigt, in welchem Umfang die Zusammenhänge auch unter Realbedingungen grundsätzlich so bestätigt werden können. Durch gezielte Modifikationen des realen Brennverlaufs wird anschließend untersucht, wie sich Veränderungen des Brennverlaufs auf den Motorprozess auswirken und welche Eigenschaften im Brennverhalten anzustreben sind, um den bestmöglichen thermischen Wirkungsgrad des Motors zu erhalten.

In einer ergänzenden Betrachtung der erzielten Ergebnisse wird bewertet, in welchem Umfang sich diese theoretischen Ergebnisse mit Hilfe üblicher Motormesstechnik auch im normalen Messbetrieb nachweisen bzw. dann auch in der Applikation nutzen lassen. In einem letzten Beispiel wird der für diese Simulation modellierte Kraftstoff in seinem thermodynamischen Verhalten dem aktuellen Kraftstoff E10 angepasst. Damit wird dargestellt, in welchem Umfang der Kraftstoffverbrauch bei einem unveränderten Motor durch den höheren Sauerstoffanteil im Kraftstoff ansteigt und ob Auswirkungen auf den thermischen Wirkungsgrad des Motors zu erwarten sind.

1) Einleitung

Bei der Entwicklung moderner hocheffizienter Verbrennungsmotoren wächst der Umfang an begleitenden Randbedingungen ständig an, gleichzeitig nimmt aber auch die technische Komplexität der Aggregate ebenfalls mit jeder Neuentwicklung zu, damit eben diese Randbedingungen überhaupt erfüllt werden können. Hierbei sind die dominierenden Faktoren die stetig steigenden Anforderungen durch den Gesetzgeber, sowie der zunehmende Kosten- und Zeitdruck im Entwicklungsprozess um den Markterfordernissen Rechnung zu tragen. Es ist deshalb ein erklärtes Ziel, den Entwicklungsprozess deutlich zu beschleunigen und obendrein so zielsicher zu machen, dass die gesetzlichen Auflagen problemlos erfüllt werden. Ein Weg dorthin ist die virtuelle Produktentwicklung basierend auf diversen Berechnungsverfahren, die im Vorfeld einen Großteil der anstehenden Fragestellungen und Lösungsansätze mit Hilfe von Rechneinsatz schnell und effektiv bearbeitbar machen. Wenn es speziell

um Fragen der thermodynamischen Auslegung eines Motorkonzeptes geht, dann sind das im Wesentlichen die Motorprozessrechnung, die Ladungswechselrechnung mit Gasdynamik sowie die dreidimensionale Strömungssimulation zur Auslegung von Brennräumen oder anderen durchströmten Bauteilen. Sobald diese konzeptionelle Phase beendet ist und konkrete Bauteile als Versuchsträger bereitstehen, dann beginnt die versuchsbegleitenden Berechnung mit ähnlichen Software-Werkzeugen um auch diesen Teil der Produktentstehung so effektiv und zielsicher wie möglich zu machen.

Im folgenden soll speziell die Motorprozess-Simulation behandelt werden. Hierbei werden die Vorgänge im Zylinder berechnet, also Kompression, Verbrennung, Expansion und den Ladungswechsel bis in die jeweilige Ventilebene des Einlass- und Auslassventils /1/. Eine Auslegung des Gesamtkonzeptes ist damit also nicht möglich, aber der Vorteil solcher Rechnungen liegt üblicherweise in der recht hochwertigen Modellierung der Vorgänge im Brennraum, sowie in dem vergleichsweise geringen Aufwand bei der Bedienung der Berechnungsmodelle und den typischerweise schnellen Antwortzeiten. Es können also in recht kurzer Zeit umfangreiche Parameterstudien durchgeführt werden die sonst so nicht möglich wären. Ein weiterer Anwendungsschwerpunkt liegt in der versuchsbegleitenden Berechnung, weil damit schnell eine Ladungswechselanalyse durchgeführt werden kann wenn neben dem Zylinderdruck auch noch die Drücke im Einlass- und Auslasskanal vorliegen. In diesem Fall lassen sich iterativ Restgasanteil, Zylinderfüllung, Innenzylinder-Luftverhältnis und Brennverlauf im Rahmen einer Rechnung direkt vor Ort in einem akzeptablen Zeitraum bestimmen. Das ist immer dann sehr wichtig, wenn große Ventilüberschneidungen eine einfache Füllungs- und Restgasbestimmung unmöglich machen.

2) Motorprozess-Rechnung

Bei der Motorprozessrechnung wird, wie in der nebenstehenden Skizze (**Bild 1**) dargestellt, ausschließlich ein einzelner Zylinder mit Kurbel- und Ventiltrieb modelliert. Eine ausführliche Beschreibung eines solchen Modells ist in /2/ zu finden und ein erheblicher Umfang an Teilmodellen ist in /3/ dargestellt. Aufgrund der relativ überschaubaren Modellstruktur sind ausschließlich die Daten zur Beschreibung der vorhandenen Geometrien, sowie die Betriebspunkt Daten erforderlich. Benötigt werden die folgenden Eingabedaten:

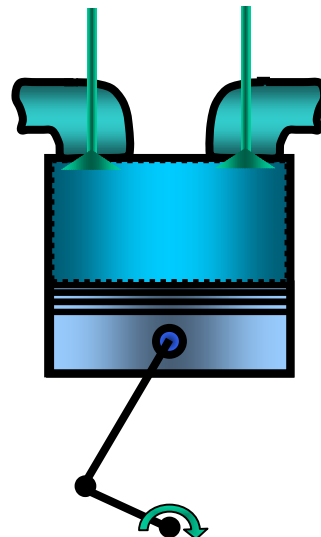


Bild 1 Modellskizze Motorprozess

Geometriebezogene Daten: Kurbeltrieb und Ventiltrieb mit Durchflussbeiwerten, Zylinderbohrung, Verdichtungsverhältnis und Brennraumwandflächen

Betriebspunkt und Kraftstoffdaten: Drehzahl, Luftverhältnis, Brennraumwandtemperatur, Brennverlauf, Druck und Temperatur im Einlass- und Auslasskanal, Einspritzverlauf, falls vorhanden AGR-Rate oder Blow By, Benzin, Diesel, usw.

Die Ergebnisse einer Motorprozessrechnung sind typischerweise die folgenden Größen:

- Druck- und Temperaturverlauf, Verbrennungstemperatur
- Massenverläufe der Komponenten Luft, Kraftstoff, Abgas
- Mischungs-Stoffwerte der Zylinderfüllung
- Indizierte Größen wie Wirkungsgrad, Kraftstoffverbrauch und Arbeit
- Leistung und Drehmoment
- Massenströme in den Kanälen
- usw.

Im Einzelfall kann es aber durchaus sein dass zusätzlich noch andere Daten als Ergebnis ausgegeben werden, das ergibt sich jeweils aus dem Bedarf des Anwenders und den Möglichkeiten die vom Programmentwickler vorgegeben werden. Diese kurze Aufstellung zeigt, dass eine Motorprozessrechnung durchaus zu einem universellen Werkzeug werden kann, mit dem sich sehr viele Aufgaben effektiv und mit guter Ergebnisqualität erledigen lassen. Die weiteren Ausführungen sollen einige mögliche Anwendungen zeigen.

3) Wirkungsgradoptimale 50% Brennverlaufslage

Im Folgenden soll eine beispielhafte Untersuchung zur wirkungsgradoptimalen Lage des 50%-Energieumsatzpunktes gezeigt werden. Dieser Umsatzpunkt wird üblicherweise als Kriterium für die Optimierung des Zündzeitpunktes (**Bild 2**) von Ottomotoren verwendet /4/, wobei eine Position von ca. 8°KW nach ZOT vorgeschlagen wird. Es ist also von grundsätzlichem Interesse, ob der wirkungsgradoptimale Verbrenungsschwerpunkt stets diesen Wert aufweist, oder ob es beachtenswerte Abweichungen gibt. Zunächst soll auf Basis der beschreibenden Gleichungen untersucht werden, welche grundlegenden Zusammenhänge es gibt und welches die dominierenden Einfluss-Parameter sind.

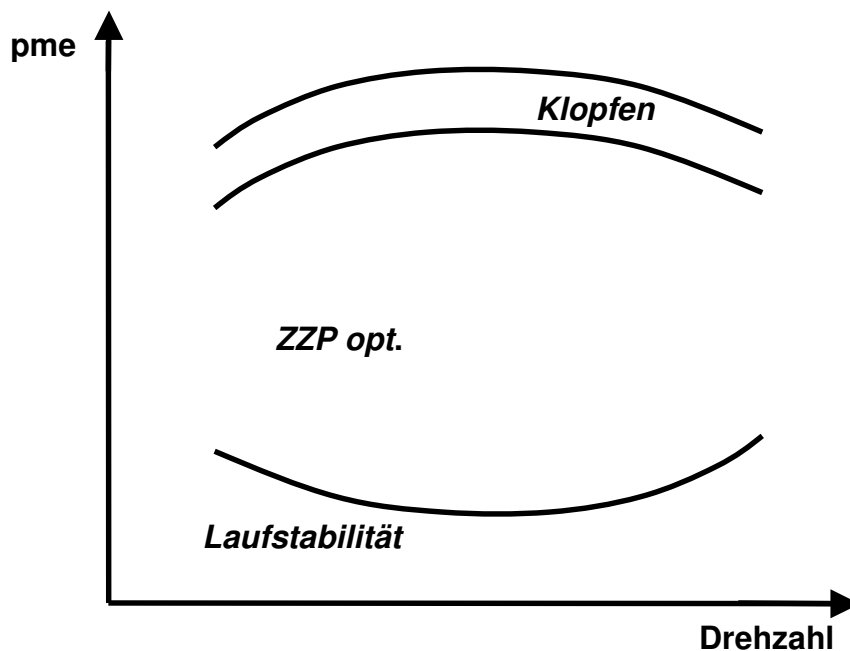


Bild 2) Prinzipdarstellung des Motorkennfeldbereichs mit optimaler Zündzeitpunktapplikation

Sowohl die Prozessrechnung als auch die thermodynamische Analyse der motorischen Verbrennung basiert auf der Differenzialgleichung der Energiebilanz für offenen Systeme. Die Gleichungen (1) und (2) stellen hierbei die speziell für die Brennverlaufsrechnung angepasste allgemeine Form dar [5]. Der gesuchte Brennverlauf ergibt sich dann mit Hilfe gemessener Daten aus der Zylinderdruckindizierung in Verbindung mit der Integration der Energiebilanz (Gl. 1 und 2) für das thermodynamische System des Brennraums. Diese Gleichungen stellen somit den Ausgangspunkt für theoretische Betrachtungen zur Beurteilung der Abhängigkeiten von Brennverlauf und Betriebsparametern dar.

$$X_v(\phi) = X_{v_o} + \int_{\phi} \frac{dX_v}{d\phi} \cdot d\phi \quad (1)$$

$$\frac{dX_v}{d\phi} = \frac{1}{Hu \cdot m_{K_o}} \left\{ F_{kt_1} - \frac{\alpha}{\omega} \cdot A \cdot (T_w - T) - (h_g - u_t + c_v \cdot T) \cdot \frac{dm}{d\phi} + m \cdot \frac{\partial u_t}{\partial \lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\phi} \right\} \quad (2)$$

mit

$$F_{kt_1} = \left(1 + \frac{c_v}{R} \right) \cdot p \cdot \frac{dV}{d\phi} + \frac{c_v}{R} \cdot \left[V \cdot \frac{dp}{d\phi} - m \cdot T \cdot \frac{dR}{d\phi} \right]$$

Für die Beschränkung auf einen Ottomotor mit stöchiometrischem Luftverhältnis und der typischen Ladungswechseleinspritzung, also Homogenbetrieb, gelten für den Hochdruckbereich die folgenden Vereinfachungen:

Die Gemischbildung ist zum Zeitpunkt des Verbrennungsbeginns beendet.

$$\frac{d\lambda}{d\phi} = 0$$

In der Hochdruckphase liegt ein geschlossenes System vor, es gibt also keine Massenströme.

$$\frac{dm}{d\phi} = 0$$

Damit ergibt sich die folgende, vereinfachte Form von Gl.2:

$$\frac{dX_v}{d\phi} = \frac{1}{Hu \cdot m_{K_o}} \left\{ F_{kt_1} - \frac{\alpha}{\omega} \cdot A \cdot (T_w - T) \right\} \quad (3)$$

In dieser Gleichung bestimmen zwei Terme den Ablauf der Verbrennung.

- Fkt_1 ist abhängig von:
Druck, Temperatur, Gasmischung, Masse, Kurbeltriebsgeometrie
- Der Wärmeverlust ist abhängig von:
Druck, Gastemperatur, mittlere Wandtemperatur, wärmeübertragende Wandfläche, Hubvolumen und Bohrungsdurchmesser, Ladungsbewegung, Motordrehzahl

Diese Aufteilung legt es nahe, den Einfluss der beiden Terme getrennt zu untersuchen, um die Wirkung auf den Brennverlauf beurteilen zu können. Deshalb werden in der nachfolgenden Darstellung sowohl der adiabate Prozessverlauf als auch Beispiele mit unterschiedlichem Wandwärmestrom diskutiert.

In allen Beispielrechnungen wird ein Zylindervolumen von $0,5 \text{ dm}^3$ gewählt, Kurbeltrieb, Steuerzeiten, Ventilhubkurven und Verlustbeiwerte sind ebenfalls unveränderte Größen. Variationsparameter der nachfolgenden Untersuchungen sind Verdichtungsverhältnis, Motordrehzahl, Brennverlaufsform und Kraftstoffqualität.

3.1) Adiabate Prozessführung im Vergleich mit der mit Wärmeverlusten

Für die ersten Untersuchungen mit unterschiedlich hohem Wandwärmestrom wird einheitlich ein synthetischer symmetrischer Brennverlauf angenommen (**Bild 3**) der sich aus einer modifizierten tanh-Funktion ableitet.

Betriebsdaten: $\varepsilon=11,0$ / $n=2000 \text{ U/min}$ / Luftverhältnis=1,0 / Benzin ROZ 95

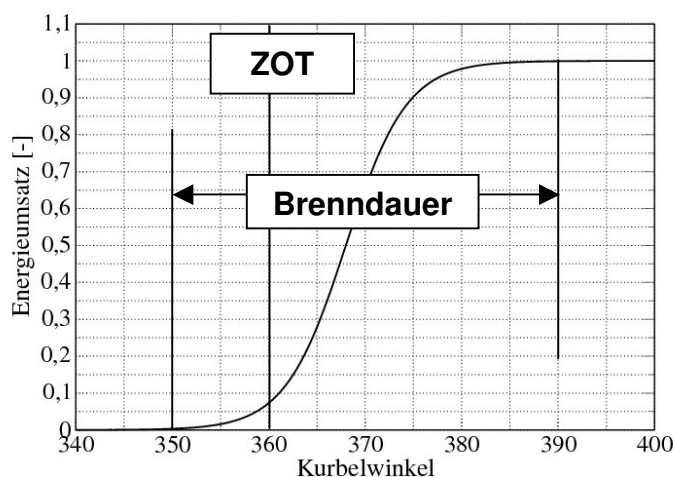


Bild 3) Ein synthetischer symmetrischer Brennverlauf mit einer Brenndauer von 40°KW ist der Basisverlauf für die Parameteruntersuchung (Referenz)

Der Vorteil einheitlicher Brennverläufe ist durch die gute Vergleichbarkeit der berechneten Ergebnisse gegeben, deshalb wird dieser Brennverlauf als Referenz ge-

wählt. Der Wärmeübergang wird grundsätzlich mit dem Wärmeübergangskoeffizienten nach Woschni gerechnet. Dieser Ansatz ist über einen sehr langen Zeitraum immer wieder geprüft und weiterentwickelt worden, so dass er der mit dem breitesten Anwendungsspektrum ist und deshalb auch hier verwendet wird.

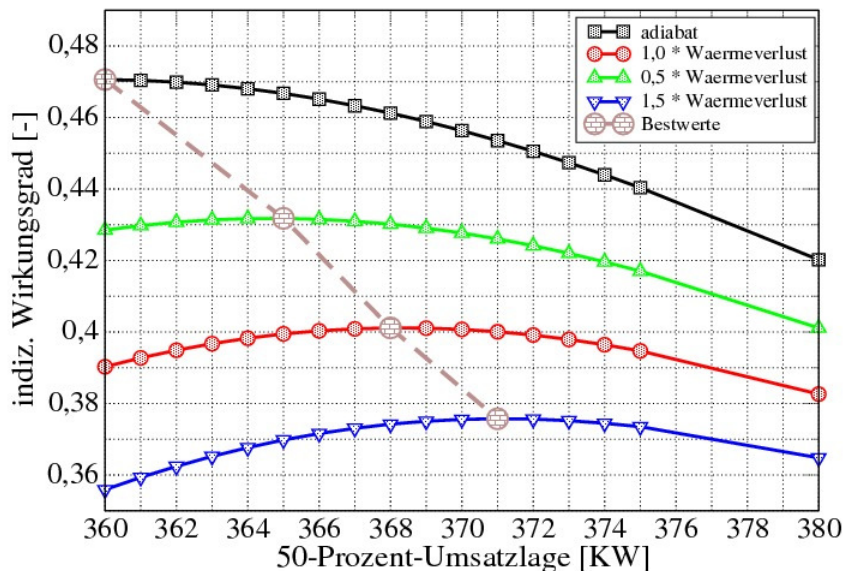


Bild 4) Vergleich eines rein adiabaten Prozessablaufs mit denen verschiedener Wandwärmeströme

Im **Bild 4** sind die Ergebnisse der rein adiabaten Prozessführung mit denen unterschiedlich hoher Wandwärmeverluste dargestellt. Hierbei wurde der nach Woschni berechnete Wandwärmestrom als 100%-Basis gewählt und dieser dann in einer erneuten Prozessrechnung um jeweils 50% nach oben und unten korrigiert. Im Fall der rein adiabaten Prozessführung liegt die wirkungsgradoptimale 50%-Umsatzlage direkt in ZOT bei 360°KW, während sich mit zunehmendem Wandwärmestrom die Bestpunkte deutlich in Richtung späterer Kurbelwinkellagen verschieben. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Wandwärmestrom offensichtlich der dominierende Parameter für die Spätverschiebung ist.

3.2) Unterschiedliche Brennverlaufsformen bei konstanter Motordrehzahl

In einem weiteren Beispiel wird der symmetrische Brennverlauf nach **Bild 3** beibehalten, allerdings wird die Brenndauer in einem sehr weiten Bereich variiert. Ebenso wird die 50%-Umsatzlage als zusätzlicher freier Parameter eingeführt, um die wirkungsgradoptimale 50%-Umsatzlage in Abhängigkeit von der Brenndauer daraus abzuleiten. Die Brennverlaufsformen und Brenndauer sind **Bild 5** zu entnehmen, ebenso ist die gewählte Art der Verschiebung des gesamten Brennverlaufs mit eingetragen.

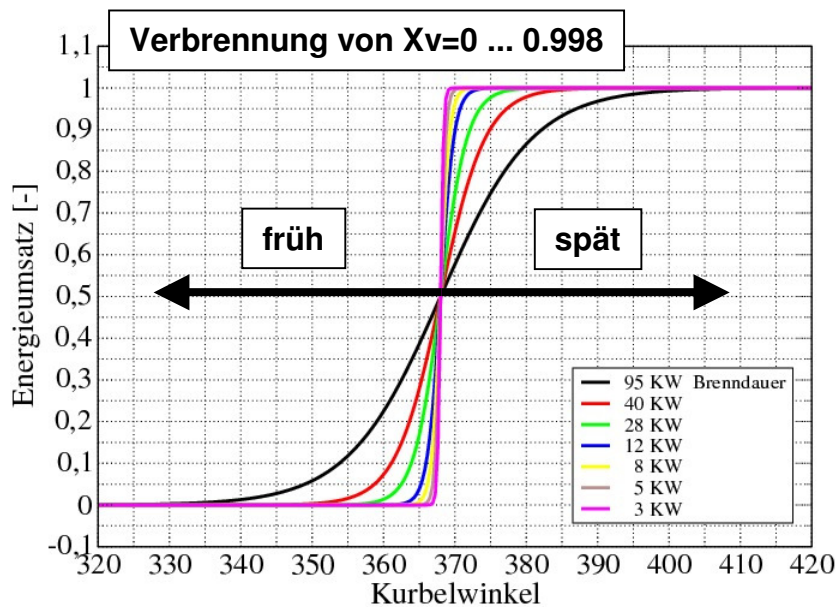


Bild 5) Synthetische, symmetrische Brennverläufe unterschiedlicher Brenndauer und einer 50%-Umsatzlage bei 368°KW

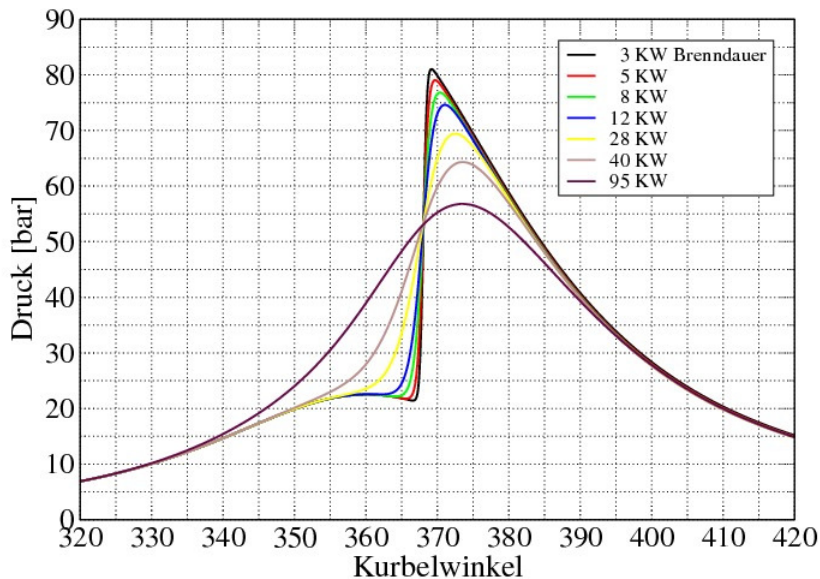


Bild 6) Der Zylinderdruckverlauf als Funktion der unterschiedlichen Brenndauer und einer 50%-Umsatzlage bei 368°KW

In **Bild 6** sind die mit diesen synthetischen Brennverläufen errechneten Zylinderdruckverläufe dargestellt. Es ist zu bemerken, dass eine abnehmende Brenndauer

zunehmend steilere Druckverläufe erzeugt. Hierbei entspricht die kürzeste Brenndauer von 3°KW nahezu dem theoretischen Fall der isochoren Verbrennung. Alle Brennverläufe in diesem Beispiel haben eine konstante 50%-Umsatzlage von 368°KW.

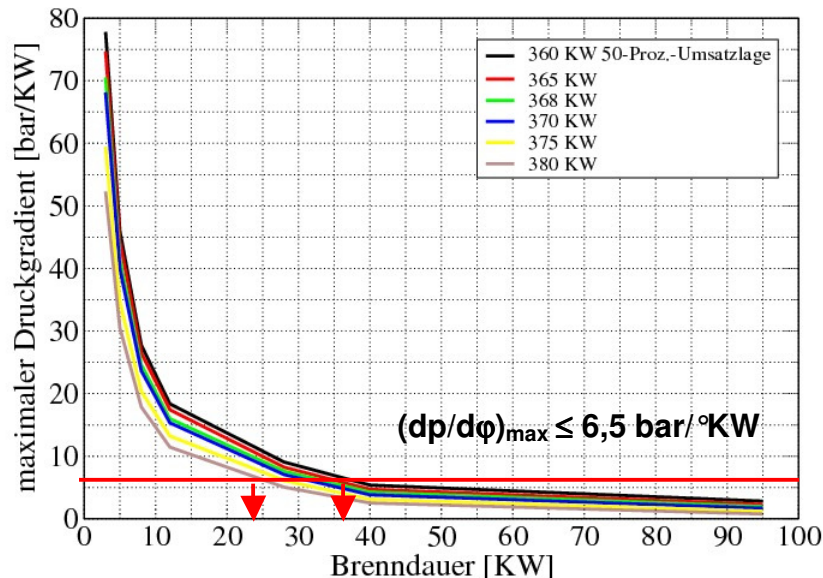


Bild 7) Die maximalen Druckgradienten aller Beispielrechnungen mit dem synthetischen, symmetrischen Brennverlauf unterschiedlicher Brenndauer und 50%-Umsatzlage

Die maximalen Druckgradienten aller gerechneten Beispiele in **Bild 7** zeigen welche Brenndauer in etwa einem realen Anwendungsfall entspricht und welche Beispiele eher dem Bereich theoretischer Grenzwertbetrachtungen zuzuordnen sind. Die in der Praxis verwendeten Grenzwerte für maximale Druckgradienten im Zylinder sollen aus akustischen Gründen einen Wert von ca. 4 bar/ °KW möglichst nicht überschreiten. Um aber die Vorteile hochaufgeladener Verbrennungsmotoren nutzen zu können wird gelegentlich für einzelne Betriebspunkte ein Wert von ca. 6,5 bar/°KW zugelassen. Noch höhere Werte sind, wie zuvor schon erwähnt, aus akustischen Gründen nicht zulässig, aber auch der Verschleiß der Lagerstellen kann unter diesen Bedingungen zum Problem werden.

Wird der Wert von 6,5 bar/°KW als Grenzwert in diesem Diagramm vermerkt dann ist zu erkennen, dass minimale Brenndauern von 25°KW bis 37°KW je nach betrachteter 50%-Umsatzlage die kürzeste Brenndauer nach unten darstellen. Noch kürzere Brenndauern haben nur noch einen rein theoretischen Charakter und dienen ausschließlich der Beurteilung der thermischen Prozesswirkungsgrade in Grenzbereichen.

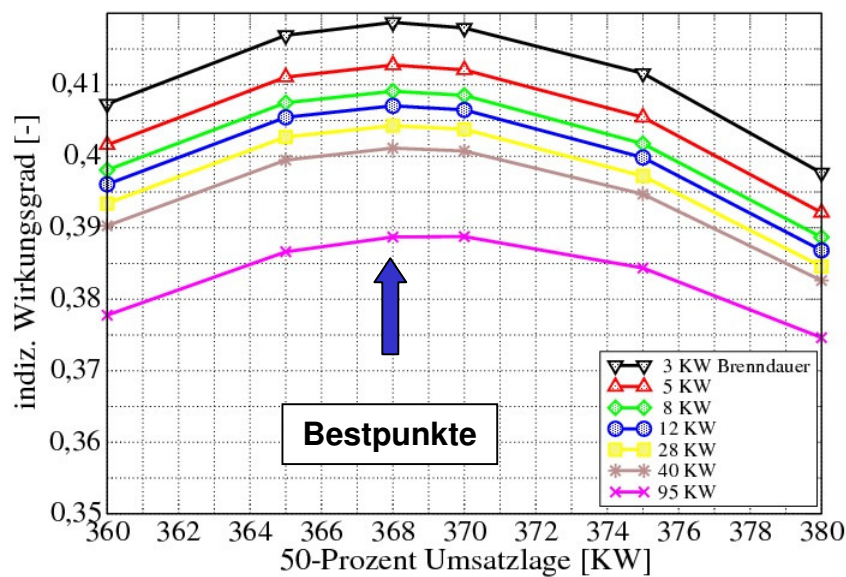


Bild 8) Die indizierten Wirkungsgrade bei unterschiedlicher Brenndauer und 50%-Umsatzlage

Die Ergebnisse der Prozessrechnungen hinsichtlich der thermischen Wirkungsgrade sind dem vorstehenden Diagramm (**Bild 8**) zu entnehmen. Es ist offensichtlich, dass abnehmende Brenndauern zu ansteigenden thermischen Wirkungsgraden führen. Das steht im Einklang mit den üblichen theoretischen Überlegungen /1/ die für den Fall der isochoren Verbrennung das Optimum ergeben. Folgerichtig führen zunehmende Brenndauern zu einer deutlich Abnahme des thermischen Wirkungsgrads.

Auffällig ist die zur jeweiligen Brenndauer gehörende Lage des Bestwertes, denn unabhängig von der Brenndauer stellt sich bei der gewählten Inkrementierung der Berechnungspunkte der Optimalwert immer bei 368°KW ein. Der einzige Unterschied besteht in der Ausprägung des Maximums, je länger die Brenndauer desto flacher wird das Maximum.

3.3) Der Einfluss unterschiedlicher Motordrehzahlen

Für die weiterführenden Untersuchungen werden die geometrischen Daten des Motors beibehalten, lediglich die Motordrehzahl wird als freier Parameter definiert. Es wird wieder der synthetische, symmetrische Referenzbrennverlauf aus **Bild 3** verwendet.

Betriebsdaten: $\varepsilon=11,0$ / Luftverhältnis=1,0 / Benzin ROZ 95

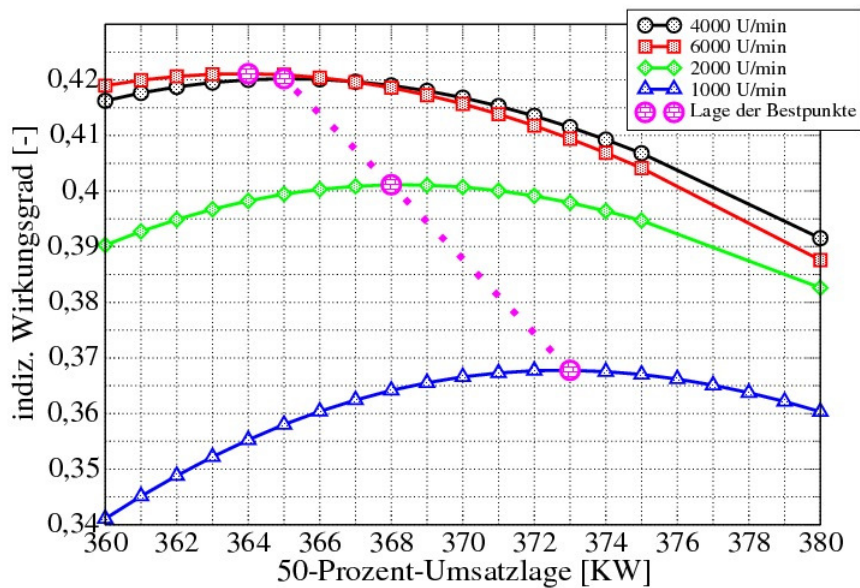


Bild 9) Der Einfluss der Motordrehzahl auf die Optimallage des 50%-Umsatzpunktes

Der Einfluss einer Drehzahländerung bewirkt eine Änderung des Wandwärmestromes, wie es aus der vorstehenden Gleichung /3/ zu entnehmen ist. Dementsprechend verschiebt sich mit zunehmender Motordrehzahl der wirkungsgradoptimale 50%-Umsatzpunkt in Richtung ZOT (**Bild 9**), somit nähert sich der Arbeitsprozess stärker an die adiabate Prozessführung an. Folgerichtig bedeutet eine geringere Motordrehzahl eine Verschiebung in Richtung spät, also weiter weg von ZOT. Als Ergebnis dieser Variationsrechnungen kann festgehalten werden, dass die Optimallage von 368°KW lediglich für eine Motordrehzahl von 2000 U/min nachgewiesen werden kann.

3.4) Der Einfluss unterschiedlicher Verdichtungsverhältnisse

Im folgenden Beispiel wird das Verdichtungsverhältnis in drei Stufen variiert, als Brennverlauf wird wieder der Referenzverlauf aus **Bild 3** gewählt.

Betriebsdaten: $n=2000$ U/min / Luftverhältnis=1,0 / Benzin ROZ 95

Um die Wirkung eines veränderten Verdichtungsverhältnisses auf die optimale 50%-Umsatzlage verständlich zu machen ist es zunächst notwendig die Veränderungen im Wandwärmestrom zu betrachten, denn aus den vorstehenden Ergebnissen folgt der erhebliche Einfluss der Wärmeverluste. Da Druck und Temperatur mit dem Verdichtungsverhältnis ansteigen und damit auch die Wärmeverluste, ist zu erwarten

dass sich der Maximalwert bei dem höchsten Verdichtungsverhältnis einstellt. Das entspricht auch dem in **Bild 10** dargestellten Ergebnis.

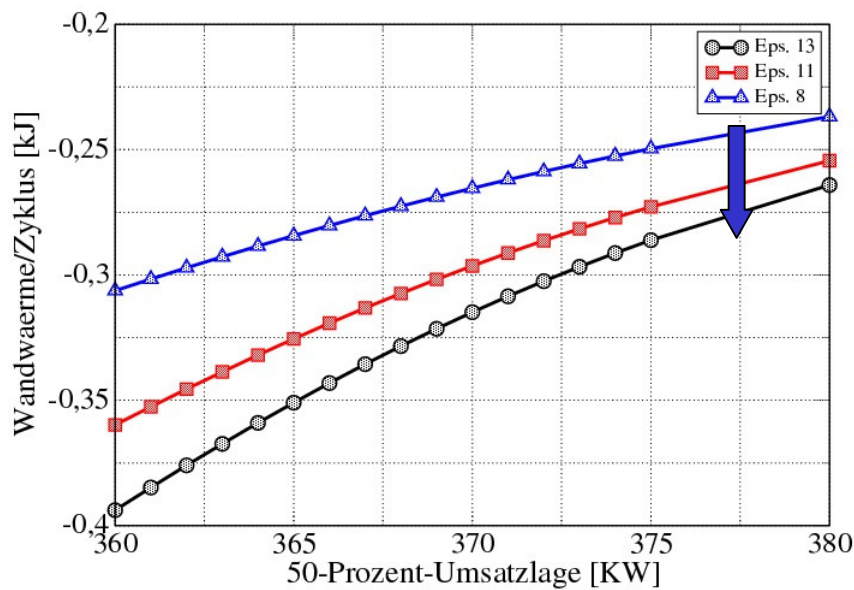


Bild 10) Der Wandwärmestrom unter dem Einfluss des Verdichtungsverhältnisses

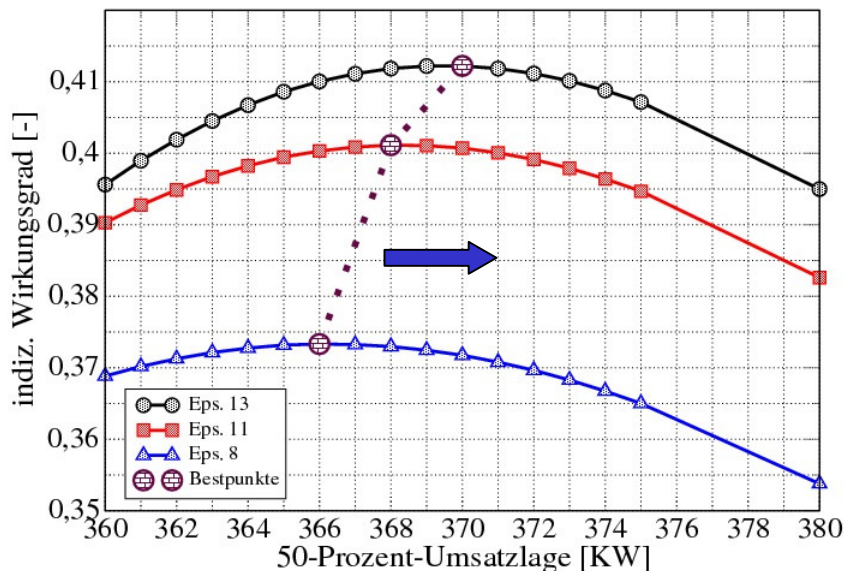


Bild 11) Der Einfluss des Verdichtungsverhältnisses auf die wirkungsgradoptimale 50%-Umsatzlage

Bedingt durch das anfängliche Ergebnis, dass ansteigende Wandwärmeströme die optimale 50%-Umsatzlage nach spät verschieben, ist bei diesem Beispiel ein ver-

gleichbares Ergebnis zu erwarten. Mit steigendem Verdichtungsverhältnis muss sich demzufolge die optimale 50%-Umsatzlage vom ZOT entfernen und das ergibt auch das in **Bild 11** dargestellte Ergebnis.

3.5) Eine vergleichende Untersuchung mit einem realen Brennverlauf

Im letzten Beispiel dieser Parameteruntersuchung wird der Referenzbrennverlauf durch einen realen Brennverlauf ersetzt. Dieser Brennverlauf wird hierfür in einem Bereich von -9°KW bis $+11^\circ\text{KW}$ parallel verschoben, um die optimale 50%-Umsatzlage zu bestimmen (**Bild 12**). Weiterhin wurde das Beispiel mit dem realen Brennverlauf um eine Variation des Luftliefergrades erweitert.

Betriebsdaten: $\varepsilon=11,0$ / $n=2000$ U/min / Luftverhältnis=1,0 / Benzin ROZ 95

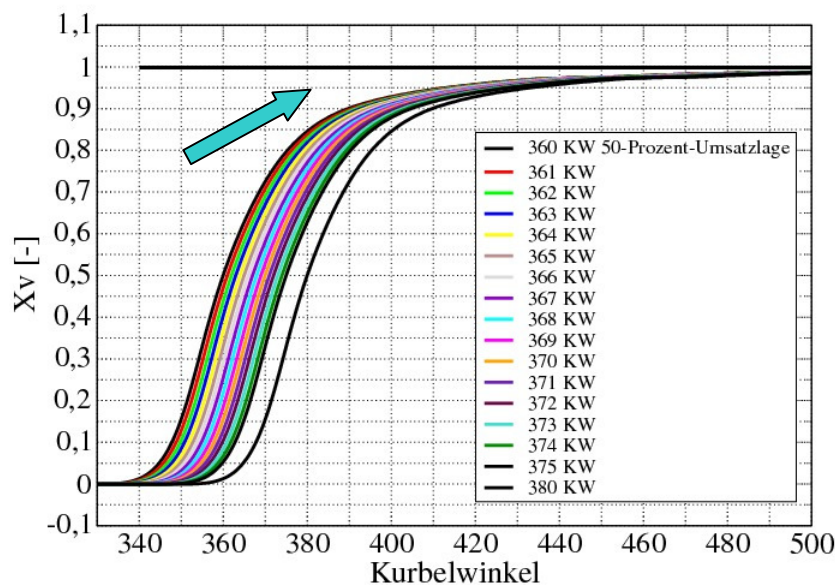


Bild 12) Ein realer Brennverlauf mit einer Original Position der 50%-Umsatzlage bei 369°KW , sowie die vorgesehene Variationsbreite

Im Vergleich zum Referenzbrennverlauf zeigt dieser Verlauf keine Symmetrie und an der Stelle mit der Markierung durch den Pfeil ist ein langsames Ausbrennverhalten sehr deutlich zu erkennen. So etwas kann aufgrund von unvollständiger Gemischbildung passieren oder aber durch Flame Quenching bedingt durch langsames einfrieren der Reaktionen aufgrund einer Temperaturabsenkung, entweder durch eine weit in die Expansion ragende Verbrennung oder aber durch Wandkontakt der Flammenfront.

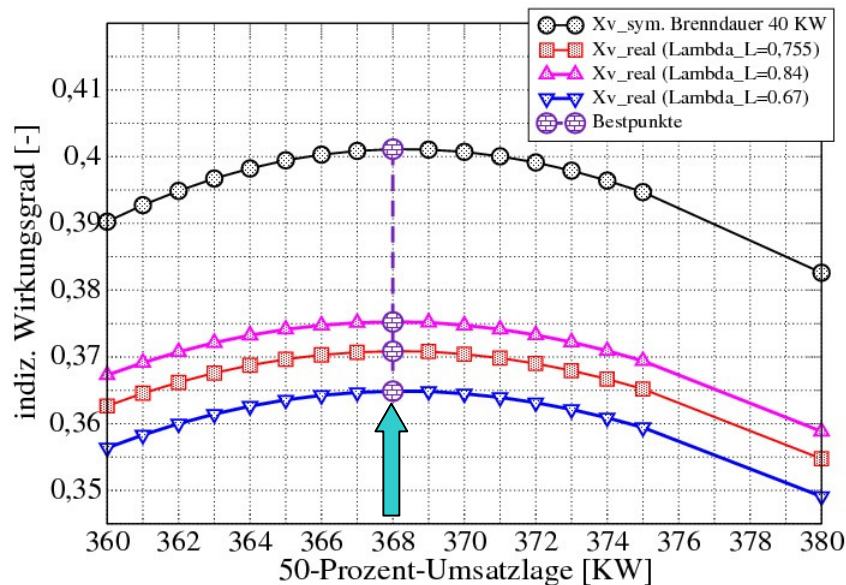


Bild 13) Vergleich der Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Brennverläufen und einer Variation des Luftliefergrades

Das Ergebnis dieser Wirkungsgradbetrachtung ist in **Bild 13** dokumentiert. Offensichtlich ist die Form des Brennverlaufs weitgehend bedeutungslos für die optimale 50%-Umsatzlage; unabhängig vom gewählten Brennverlauf, aber auch vom Luftliefergrad, stellt sich stets der Wert von 368 °KW ein.

Werden alle Ergebnisse in ihrer Wirkung zusammengefasst, dann ergeben sich die folgenden Aussagen:

- 1) Die dominierende Größe ist der Wandwärmeverlust, ein Anstieg verschiebt die optimale 50%-Umsatzlage, ausgehend vom ZOT, zu einer späteren Kurbelwinkelposition. Mit steigender Motordrehzahl nähert sich der Prozess an die adiabate Prozessführung an. Das ist insofern nachvollziehbar, als mit steigender Motordrehzahl der Zeitraum für die Wandwärmeverluste immer kleiner wird.
- 2) Änderungen der Brennverlaufsform zeigen in weiten Variationsbereichen keinen Einfluss auf die optimale 50%-Umsatzlage.
- 3) Mit dem Verdichtungsverhältnis nehmen die Wandwärmeverluste zu, daher ergibt sich für einen Anstieg des Verdichtungsverhältnisses eine Verschiebung der Optimallage in Richtung spät. Es handelt sich also um einen impliziten Einfluss der Wandwärmeverluste.
- 4) Im betrachteten Bereich einer Füllungsänderung zeigt sich ebenfalls keine Abhängigkeit der optimalen 50%-Umsatzlage.

4) Bewertung des messtechnischen Erkennbarkeit der theoretischen Ergebnisse

Die bisher vorgestellten Ergebnisse sind weitgehend theoretischer Natur, deshalb soll an dieser Stelle diskutiert werden, in welchem Umfang sich die dargestellten Abhängigkeiten auch im Rahmen von Messungen nachweisen lassen. Die Betrachtung ist deshalb von erheblicher Bedeutung, weil diese Zusammenhänge bei der Applikation von Motorsteuerungen für die Kennfeldoptimierung eingesetzt werden. Zu dem Zweck werden zwei Messgrößen und deren minimale Streubreiten, bedingt durch unvermeidbare Messfehler einzelner Messketten, betrachtet. Eine Größe ist der spezifische Kraftstoffverbrauch, der an jedem Motorprüfstand gemessen wird und die andere Größe ist die indizierte Hochdruckarbeit die sich bei vorhandener Zylinderdruckindizierung direkt aus den Messdaten berechnen lässt. Da hier nur Rechnungen vorliegen, werden statt eines gemessenen Kraftstoffverbrauchs die gerechneten indizierten Werte genommen und das angenommene minimale Streuband darauf angewendet. Dieses Verfahren ist zulässig, wenn um die Bestimmung des möglichen Vertrauensbereichs geht.

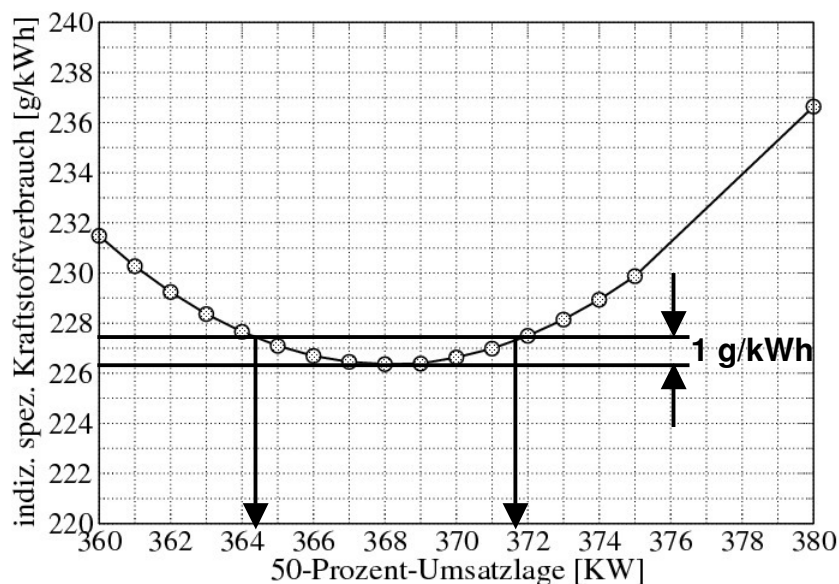


Bild 14) Der indizierte Kraftstoffverbrauch gerechnet mit dem realen Brennverlauf

In **Bild 14** ist der Verlauf des indizierten Kraftstoffverbrauchs bei der zuvor schon diskutierten Lagevariation des realen Brennverlaufs dargestellt. Markiert ist ein minimaler Streubereich der sich bei Verwendung einer hochgenauen Kraftstoffmessung ergeben würde. Unterschiede innerhalb dieses Streubereichs, die sich in der gleichen Größenordnung bewegen, sind messtechnisch nicht mehr zuverlässig auflösbar.

Diese Betrachtung zeigt, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch zwar die richtigen Tendenzen liefert, nicht aber die exakten Werte, sondern immer nur den richtigen Bereich eingrenzen kann.

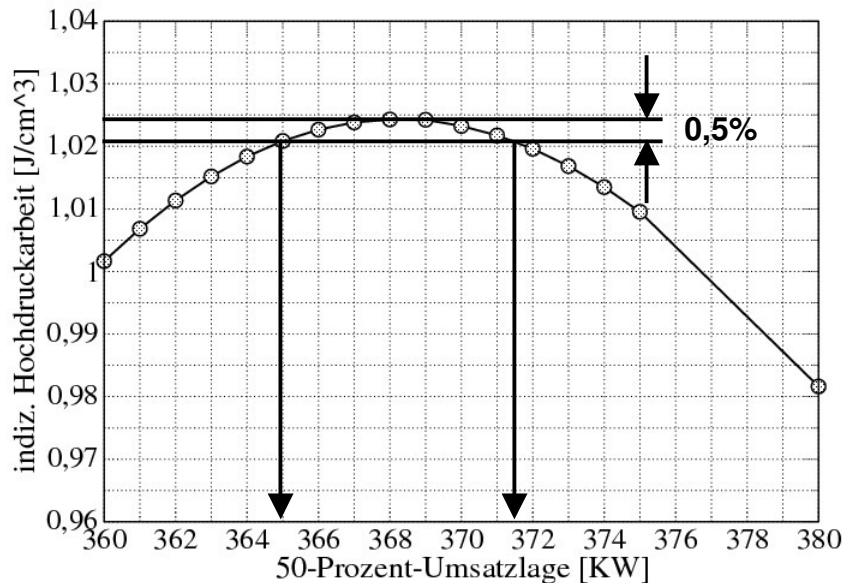


Bild 15) Die indizierte Hochdruckarbeit gerechnet mit dem realen Brennverlauf

Dem selben Beispiel wurden die Ergebnisse der indizierten Hochdruckarbeit entnommen. Da die Größen aus der Zylinderdruckindizierung für jeden Zyklus sehr schnell zur Verfügung stehen, sollte diese Größe grundsätzlich besser geeignet sein als der über viele Zyklen gemittelte Kraftstoffverbrauch. Für diesen Fall wird eine Streubreite von 0,5% des Maximalwertes angenommen, die bedingt durch unvermeidbares Digitalisierungsrauschen, Signalstörungen und Thermoschock zwangsläufig entsteht. Diese Streubreite ist in **Bild 15** eingetragen und zeigt ein ähnliches Ergebnis. Auch hier ist das Maximum so flach, dass zwar der richtige Bereich wiedergegeben wird, nicht aber der exakte Wert.

In einem nächsten Schritt soll diskutiert werden in welchem Umfang ein Brennverlauf in seiner Form vollständig erhalten bleibt, wenn die Lage der Verbrennung verschoben wird. Von Verständnis her sollte eine nach spät verschobene Verbrennung aufgrund von geringerem Druck- und Temperaturniveau weniger Wärmeverluste haben, gleichzeitig liegt eine stärkere Tendenz zu unvollständiger Verbrennung vor. Eine Verschiebung nach früh bringt deutlich weniger Probleme mit sich, wenn nicht gerade aufgrund von Schichtladung die Gemischbildung nicht abgeschlossen ist. Hier macht sich dann nur, wie in der theoretischen Betrachtung, die ungünstige Lage des Druckverlaufs bemerkbar und die zum Ende der Verbrennung schneller absinkende Temperatur mit eventuell möglichen Flame Quenching Effekten.

In **Bild 16** ist ein Beispiel einer Variation des Zündzeitpunktes bei ansonsten völlig konstanten Betriebsparametern dargestellt /5/. Aufgrund der großen Variationsbreite von 31 °KW lässt sich die Tendenz gut ablesen. Im Vergleich mit der markierten Optimallage ändern sich die Brennverläufe in der frühen Position nur geringfügig, während in den späten Positionen die verlängerte Brenndauer deutlicher bemerkbar wird.

Diesen Ergebnissen ist zu entnehmen, dass in der messtechnischen Realität die Änderungen im Brennverlauf leicht unterstützend wirken und den Effekt etwas deutlicher hervorheben als sich das aus der theoretischen Betrachtung ergibt.

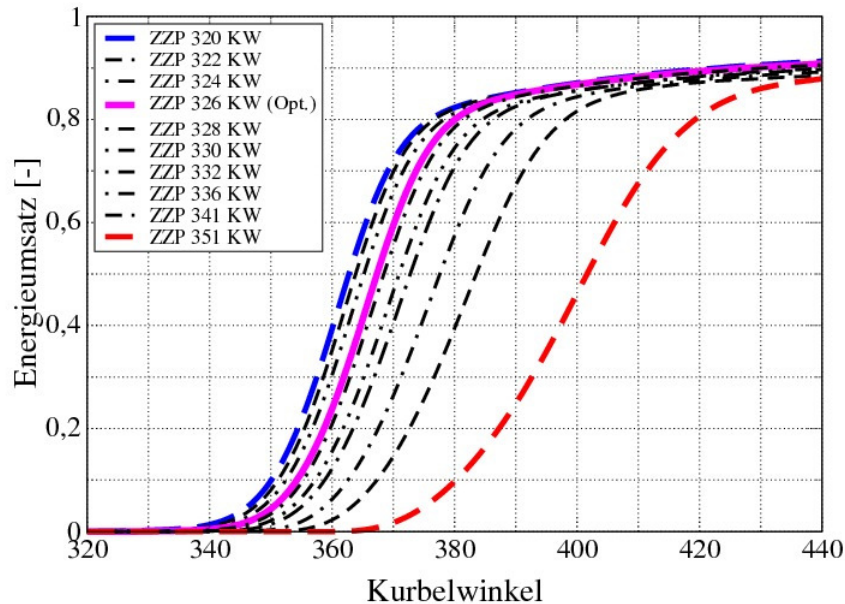


Bild 16) Ein Beispiel für eine Variation des ZZP bei sonst völlig konstanten Betriebsbedingungen /5/

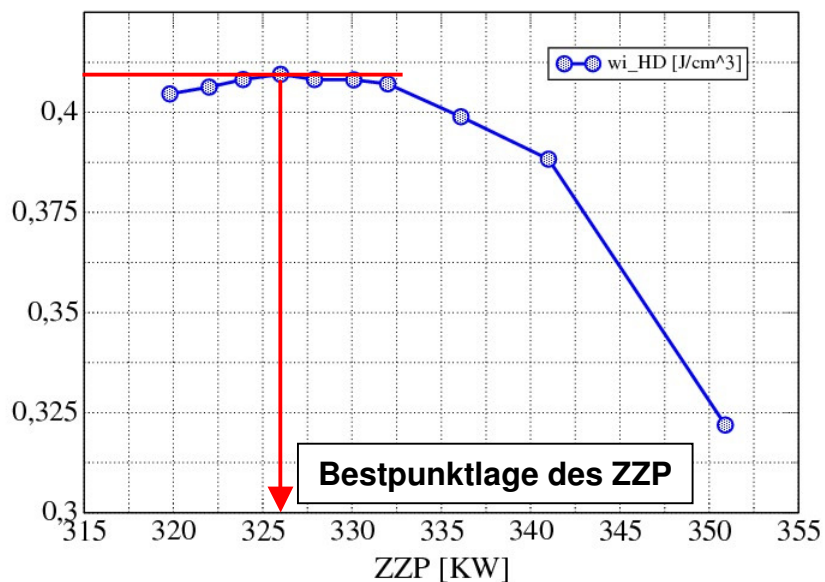


Bild 17) Ein Beispiel für die indizierte Hochdruckarbeit bei einer Variation des ZZP bei sonst völlig konstanten Betriebsbedingungen /5/

In **Bild 17** ist die indizierte Hochdruckarbeit für diese ZZP-Variation aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass das Maximum nach wie vor sehr flach ist, aber die Veränderungen des Brennverlaufs, resultierend aus den Abweichungen von der Optimallage, unterstützen den Erkennungsprozess und grenzen den möglichen Streubereich, unter der Randbedingung einer statistisch relevanten Anzahl an Einzelmessungen, merklich ein. Insgesamt zeigen aber sowohl die theoretischen Überlegungen, als auch die gemessenen Werte, dass kleine Ungenauigkeiten nur äußerst geringe Verbrauchsnachteile mit sich bringen.

5) Modifizierter „realer“ Brennverlauf und Übertragung auf E10-Kraftstoff

In einem weiteren Beispiel zur Anwendung der Motorprozessrechnung wird der reale Brennverlauf aus **Bild 12** in seiner Form modifiziert, um die Wirkung unterschiedlicher Brenndauern und -verläufe in ihrer Auswirkung auf den thermischen Wirkungsgrad und den spezifischen indizierten Kraftstoffverbrauch zu untersuchen. Zusätzlich werden auch noch zwei unterschiedliche Kraftstoffe verwendet und zwar sauerstofffreies Benzin und der aktuelle Kraftstoff E10.

Betriebsdaten: $\varepsilon=11,0$ / $n=2000$ U/min / Luftverhältnis=1,0

Kraftstoff:

	ROZ95 (O ₂ -frei)	E10 (wasserfrei)	
Lo:	14.441	14.165	[kg/kg]
Hu:	42885.9	42086.5	[kJ/kg]
MK:	96.159	91.150	[kg/kmol]
ξ_C :	0.869282	0.851700	[kg/kg]
ξ_H :	0.130718	0.130747	[kg/kg]
ξ_O :	0.000000	0.017553	[kg/kg]

(entspricht DIN EN 228)

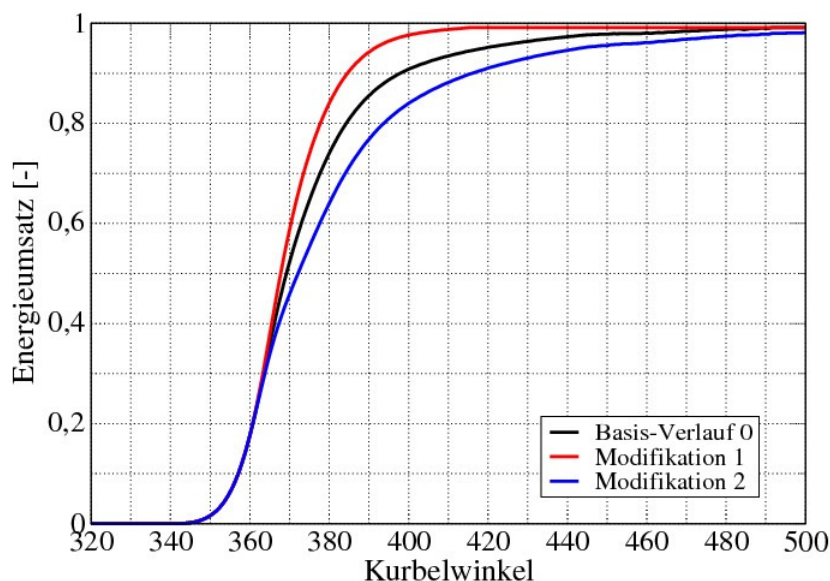


Bild 18) Der realer Brennverlauf mit zwei Modifikationen

Die beiden Modifikationen des realen Brennverlaufs (**Bild 18**) unterscheiden sich in Form und Brenndauer. Damit wird insbesondere die Wirkung eines verzögerten oder beschleunigten Brennverhaltens zum Ende der Verbrennung auf Wirkungsgrad und Kraftstoffverbrauch dokumentiert. Der Einfluss auf den Druckverlauf im pV-Diagramm ist in **Bild 19** zu sehen. Eine höhere Brenngeschwindigkeit führt nicht nur zu einem erhöhten Spitzendruck, sondern auch zu einer fülligeren Hochdruckschleife so dass die indizierte Hochdruckarbeit und der Wirkungsgrad ansteigen. Eine langsamere Verbrennung hat demzufolge die gegenteilige Wirkung.

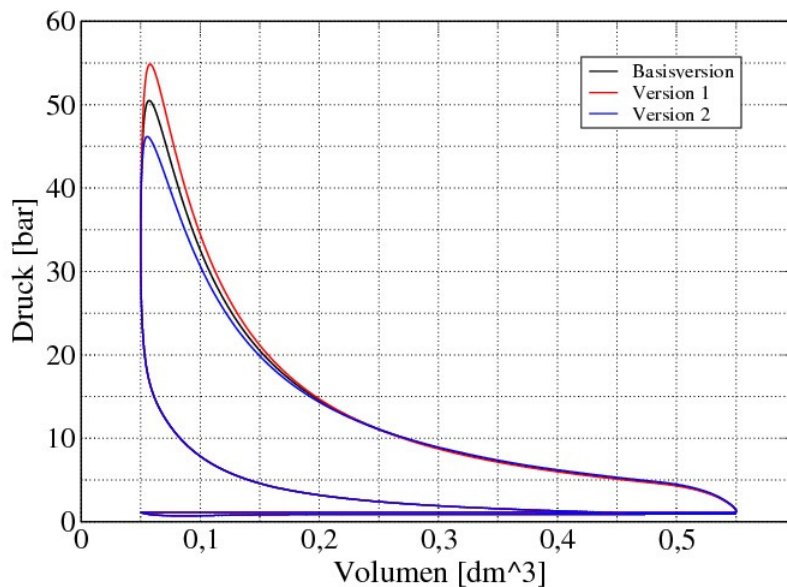


Bild 19) Die Wirkung unterschiedlicher Brennverläufe im pV-Diagramm

In **Bild 20** sind die indizierten Wirkungsgrade für alle drei Brennverläufe dargestellt. Wie schon aus dem pV-Diagramm zu sehen war, wird der höchste Wirkungsgrad mit der Modifikation 1 erreicht, also mit der höchsten Brenngeschwindigkeit. Der Vergleich der indizierten Wirkungsgrade zeigt für die beiden Kraftstoffe marginal höhere Werte im Bereich der Strichstärke für den Kraftstoff E10. Das ergibt sich aufgrund der größeren Masse Kraftstoff und der veränderten kalorischen Stoffwerte von E10.

Für den spezifischen indizierten Kraftstoffverbrauch ergeben sich analoge Ergebnisse, der geringste Verbrauch ergibt sich für die Modifikation 1 (**Bild 21**) und der höchste für Modifikation 2 mit der geringsten Brenngeschwindigkeit. Der Unterschied im Kraftstoffverbrauch aufgrund der unterschiedlichen Kraftstoffzusammensetzung ergibt sich zu 3,5 g/kWh in dem hier gewählten Fall, dass sind bezogen auf den indizierten Kraftstoffverbrauch weniger als 2%. Wird bei einem solchen Vergleich allerdings von der bisher gültigen Kraftstoffmischung E5 ausgegangen, dann bewegt sich der Mehrverbrauch lediglich bei unter 1%.

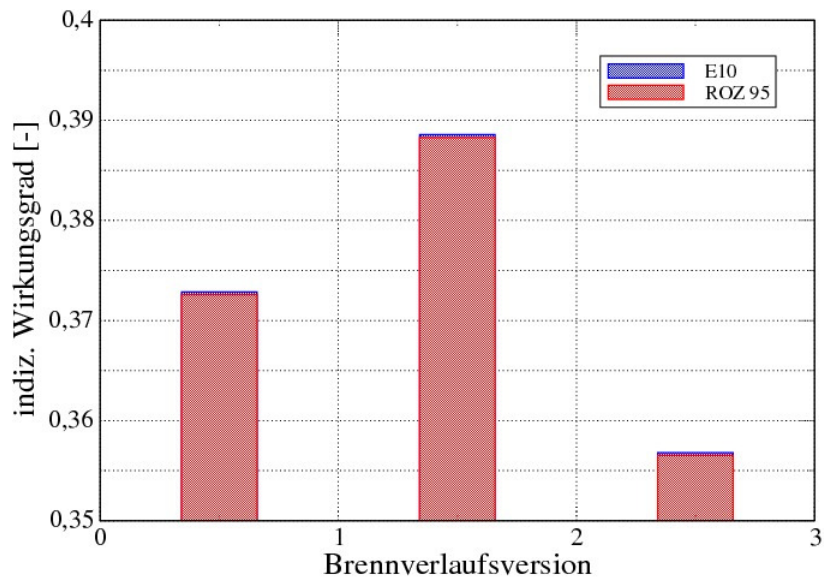


Bild 20) Die Wirkung unterschiedlicher Brennverläufe auf den Wirkungsgrad

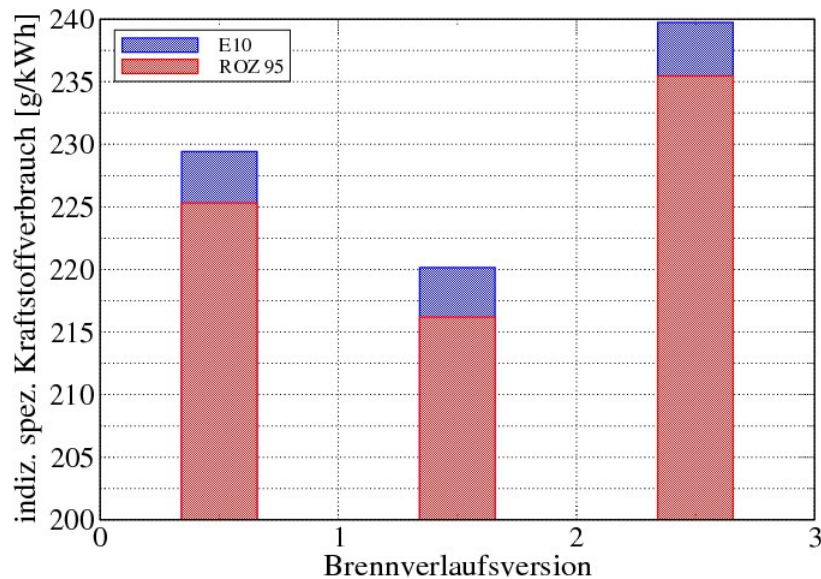


Bild 21) Die Wirkung unterschiedlicher Brennverläufe auf den Kraftstoffverbrauch

6) Zusammenfassung

Mit Hilfe der Motorprozessrechnung wurde gezeigt dass die wirkungsgradoptimale 50%-Umsatzlage keine betriebspunktunabhängige Konstante ist, eine Bestätigung

für dieses Resultat ist auch in /6/ zu finden. Die wesentlichen Einflussgrößen sind Wandwärmeverlust, Motordrehzahl und Verdichtungsverhältnis. Die wirkungsgrad-optimale 50%-Umsatzlage scheint dagegen von der Brennverlaufsform weitgehend unabhängig zu sein, ebenso ergibt sich für die Füllungsabhängigkeit im betrachteten Bereich kein nachweisbarer Einfluss.

Der Vergleich unterschiedlicher Brennverlaufsformen führt zu den Ergebnis, dass sich die besten thermische Wirkungsgrade bei möglichst kurzer Brenndauer, maximal zulässigen Druckgradienten und einem frühen Ende der Verbrennung einstellen.

Der Vergleich von einen sauerstofffreien Benzin mit dem aktuellen Kraftstoff E10 ergibt bei gleichen Betriebsbedingungen einen Mehrverbrauch von ca. 3,5 g/kWh aufgrund seines Sauerstoffgehaltes, das sind bezogen auf den indizierten Kraftstoffverbrauch deutlich unter 2%. Wird der messbar höhere effektive spezifische Kraftstoffverbrauch herangezogen, dann ist das noch erheblich weniger. Wird der seit geraumer Zeit vorgeschriebene Kraftstoff E5 als Vergleichsbasis gewählt, dann halbiert sich dieser Mehrverbrauch auf unter 1%. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich der viel diskutierte Mehrverbrauch eigentlich nur unter Laborbedingungen nachweisen lässt.

Die hier vorgestellten Beispiele haben gezeigt, dass die Motorprozessrechnung durchaus ein effektives Hilfsmittel zur Beantwortung sehr grundlegender, aber auch unmittelbar entwicklungsspezifischer Fragen sein kann.

7) Literatur

- 1) Pischinger, R. Kraßnig, G. Taucar, G. Sams, Th.
Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine
Springer-Verlag Wien New York 1989
- 2) M. Grill
Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren
Dissertation Universität Stuttgart 2006
- 3) Merker, Schwarz, Stiesch, Otto
Verbrennungsmotoren
Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung
2. Auflage
Teubner Verlag 2004
- 4) M. Bargende
Schwerpunktkriterium und automatische Klingelerkennung
56.Auflage MTZ 10/1995 S.632 ff
- 5) P.-W. Manz
Indiziertechne an Verbrennungsmotoren
Vorlesung
www.ivb.tu-bs.de/seiten/lv/laV_modul.htm

8) Formelzeichen und Indizes

A	[m ²]	wärmeübertragende Fläche im Brennraum
c _v	[kJ/kg °K]	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
Hu	[kJ/kg]	unterer Heizwert des Kraftstoffes
h _g	[kJ/kg]	Enthalpie der Massenströme über die Brennraumgrenzen
m	[kg]	Gesamtmasse im Brennraum
m _{Ko}	[kg]	Masse Kraftstoff
MK	[kg/kmol]	mittlere Kraftstoff-Molmasse
Lo	[kg/kg]	stöchiometrischer Luftbedarf
OT	[°KW]	oberer Totpunkt
p	[bar]	Druck im Brennraum
R	[kJ/kg °K]	Gaskonstante der Gasmischung im Brennraum
T	[K]	Gastemperatur im Brennraum
T _w	[K]	Brennraumwandtemperatur
u _t	[kJ/kg]	innere Energie der Gasmischung im Brennraum
V	[m ³]	Brennraumvolumen
Xv	[kg/kg]	Energieumsatz definiert als Massenbruch verbrannter Kraftstoff
wi	[J/cm ³]	indizierte Arbeit
ZOT	[°KW]	Zünd-OT
ZZP	[°KW]	Zündzeitpunkt
α	[W/m ² °K]	Wärmeübergangskoeffizient
ξ	[kg/kg]	Massenteil
φ	[rad]	Kurbelwinkel
λ	[-]	Luftverhältnis
ω	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
C		Kohlenstoff
H		Wasserstoff
HD		Hochdruck
O		Sauerstoff