

Numerische Simulation zur Regelung der Selbstzündung in CAI Motoren

Numerical simulation on the control of auto-ignition in CAI engines

Dr.-Ing. Robert **Schießl**, Dipl.-Ing. Alexander **Schubert**, Prof. Dr.rer.nat. Ulrich **Maas**
Institut für Technische Thermodynamik Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe

Zusammenfassung

Es wird durch numerische Studien untersucht, in welchem Ausmaß Temperaturfluktuationen in homogenen, mageren Kraftstoff-Luft Mischungen zur Regelung der Zündung und Verbrennung in Motoren mit Selbstzündung eingesetzt werden können. Die instationäre zeitliche Entwicklung der Zylinderladung wird hierbei durch ein statistisches Ensemble unabhängiger, homogener Reaktoren unter Verwendung detaillierter Reaktionskinetik modelliert. Mit diesem Modell wird der Einfluss des Temperaturmittelwertes und der Standardabweichung auf den Umsatzschwerpunkt und den Brennverlauf in motortypischen Bereichen studiert. Es zeigt sich, dass durch recht geringe Änderungen von Mittelwert und Standardabweichung der Zündbeginn und die Wärmefreisetzungsdauer in weiten Bereichen geregelt werden können.

Summary

Numerical studies are used to investigate the feasibility of spatial temperature fluctuations for governing the ignition and combustion in self-ignition engines with homogeneous, lean mixtures. The instationary temporal development of the cylinder load is modelled by a statistical ensemble of independent, homogeneous reactors that react according to a detailed chemical reaction mechanism. This model is used to study the influence of temperature mean and standard deviation on ignition and combustion. It is shown that according to the model, by small changes of temperature mean and standard deviation, ignition timing and combustion duration can be governed efficiently.

1 Einführung

Der Betrieb von Ottomotoren mit teilweise oder vollständig vorgemischten Ladungen durch kontrollierte Selbstzündung anstelle der konventionellen Funkenzündung stellt

eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduzierung der Teillastverbrauchswerte bei gleichzeitig niedrigen Stickoxidemissionen dar. Die Selbstzündung bildet folgerichtig die Grundlage vieler zukunftsweisender Motorenkonzepte, wie etwa für die ATAC (Active Thermo-Atmosphere Combustion) [1], HCCI-(Homogeneous Charge Compression Ignition) Motoren [2], und für CAI (Controlled Auto Ignition) Motoren [3].

Eines der größten Probleme bei der Entwicklung dieser Motoren ist die genaue Regelung des Selbstzündungsbeginns und des Brennverlaufs in teilweise oder vollständig vorgemischten Zylinderladungen. Es werden motorische Stellgrößen benötigt, die gut kontrollierbar sind und in hinreichend starkem Ausmaß die Selbstzündung und den Brennverlauf beeinflussen, so dass sie zur Regelung der Selbstzündung und der sich anschließenden Verbrennung herangezogen werden können. Diese Regelung soll auch unter den vielen im praktischen Einsatz auftretenden motorischen Bedingungen realisierbar sein.

Einen extrem starken Einfluss auf das Selbstzündungsverhalten hat die Ladungstemperatur [4, 5]. In den letzten Jahren haben experimentelle und numerische Untersuchungen außerdem gezeigt, dass räumliche Fluktuationen der Gemischtemperatur signifikanten Einfluss auf das Selbstzündungs- und Brennverhalten haben können, selbst wenn die Fluktuationsamplituden gering (im Bereich um 10K - 20K) sind [4]. Dieser starke Einfluss ist eine direkte Folge der stark temperaturabhängigen Geschwindigkeiten der der Zündung und Verbrennung zugrundeliegenden chemischen Elementarreaktionen und somit ein reaktionskinetischer Effekt. Wenn also die Frage beantwortet werden soll, bis zu welchem Grad sich Selbstzündung und Brennverlauf eines Motors prinzipiell über Temperaturfluktuationen regeln lassen, liegt es auf der Hand, Betrachtungen der chemischen Reaktionen während der Verdichtung und Selbstzündung anzustellen.

In realen Motoren werden neben den chemischen Reaktionen noch weitere, physikalische Prozesse stattfinden, wie etwa Transportprozesse (Diffusion, Wärmeleitung, auftreten von Druckwellen im Brennraum). Diese wechselwirken wiederum mit chemischen Reaktionen, so dass das gesamte Verhalten sehr kompliziert zu beschreiben und zu überschauen wird. Es scheint daher geboten, die Analyse mit einem Modell zu beginnen, das die für die Selbstzündung wesentlichen chemischen Prozesse genau abbildet, zur Vereinfachung wurden physikalische Einflüsse zunächst vernachlässigt. Es lässt sich außerdem abschätzen, dass zumindest für hinreichend magere ($\lambda \geq 2$) Ladungen mit örtlich homogener Luftzahl für motortypische Bedingungen Transportprozesse gegenüber chemischen Reaktionen für die Zündung und den Brennverlauf von zweitrangiger Bedeutung sind [1].

Diese Arbeit stellt eine auf chemischer Reaktionskinetik basierende, grundlegende Studie zur Regelung des Brennverlaufs in Motoren mit Kompressionszündung dar. Anhand numerischer Studien mit einem statistischen Ensemble homogener chemischer Reaktoren soll gezeigt werden, welche Möglichkeiten Temperaturfluktuationen zur Regelung der Selbstzündung unter mageren Betriebsbedingungen bieten. Dieses Modell ermöglicht eine grundlegende Abschätzung des Steuerungs- und Regelungspotenzials und eine Beurteilung der Einflüsse von Temperaturfluktuationen auf wich-

tige motorische Kenngrößen. Basierend auf dem numerischen Modell werden mögliche Regelszenarien vorgestellt und mögliche Limitierungen diskutiert.

2 Modellierung

2.1 Homogener Reaktor

Die einfachste Art, einen Motorzyklus unter detaillierter Berücksichtigung der chemischen Reaktionen im Brennraum zu beschreiben, stellt die Modellierung der Zylinderladung als einen *homogenen Reaktor* dar. Dies ist ein bezüglich aller seiner Eigenschaften (Temperatur T , Druck p , Konzentrationen der chemischen Spezies im Brennraum c_i , wobei der Index i über alle im Brennraum auftretenden Spezies läuft) räumlich vollkommen homogenes System, das sich, ausgehend von einem vorgegebenen Anfangszustand $(T_0, p_0, c_{i,0})$ und gewissen vorgegebenen Zwangsbedingungen, zeitlich durch den Einfluss chemischer Reaktionen entwickelt. Bei der Beschreibung eines Zyklus in einem Hubkolbenmotor tritt als zeitliche Zwangsbedingung die Volumenänderung durch die Kolbenbewegung auf; diese kann bei bekannter Geometrie des Kurbelmechanismus und dem Totvolumen einfach berechnet werden.

Durch Betrachtung dieser Zwangsbedingung, der Erhaltungsgleichungen für die innere Energie, für die Konzentrationen der einzelnen chemischen Spezies sowie des idealen Gasgesetzes erhält man das folgende differentiell-algebraische Gleichungssystem, das eine homogene, ruhende Zylinderladung während eines Motorzyklus vollständig beschreibt:

$$dV(t)/dt = (dV/dt)_{\text{ext.}}$$

$$dU(t)/dt = -pdV/dt + dQ/dt$$

$$p = RT \sum c_i \quad (\text{Gl. 1})$$

$$dc_i/dt = \omega_{\text{chem.}} - c_i/V dV/dt + dc_{i,\text{loss}}/dt.$$

Dabei bedeuten t die Zeit, $V(t)$ das instantane Zylindervolumen, $(dV/dt)_{\text{ext.}}$ die dem System durch die Kolbenbewegung aufgezwungene zeitliche Änderung des Volumens, dQ/dt , $dc_{i,\text{loss}}/dt$ den Wärme- bzw. Stoffverlust des Systems (z.B. durch Wandwärmeverluste oder Blow-By), U die innere Energie der Gasmischung, p den Druck, w_i und c_i den Massenbruch und die Konzentration der i -ten Spezies, und ω_{chem} den chemischen Quellterm (auf molarer Basis). $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol K})$ ist die universelle Gaskonstante. Zur Ermittlung des chemischen Quellterms ω_{chem} wurde ein detaillierter iso-Oktan Reaktionsmechanismus verwendet, der sowohl für den Hoch- als auch Tieftemperaturbereich ($T < 1000 \text{ K}$) gültig ist [6].

Die Lösung dieses Gleichungssystems, unter Vorgabe der Anfangsbedingungen für T_0 , p_0 , und c_0 , und der Volumenkurve $(dV/dt)_{\text{ext}}$ wurde mit dem Computer-Code LI-MEX (Löser für differentiell-algebraische Gleichungssysteme, [7]) durchgeführt. Die

Lösung stellt die zeitliche Entwicklung der Zylinderladung bezüglich Druck, Temperatur und chemischer Zusammensetzung dar. Insbesondere liefert die Lösung den Selbstzündungszeitpunkt und den Brennverlauf.

Die zur Berechnung verwendeten Motorparameter beziehen sich auf einen 4-Takt-Einzylinder-Versuchsmotor. Die wichtigsten Motordaten finden sich in Tabelle 1. Als Kraftstoff diente iso-Oktan, der zu Simulationsbeginn als vollständig verdampft angenommen wurde.

Motor	1-Zylinder Vier-Takt Motor
Hubraum	652 cm ⁻³
Bohrung	100 mm
Hub	83 mm
Verdichtungsverhältnis	12.0
Drehzahl	1000 min ⁻¹

Tabelle 1: Spezifikation des Motors
engine specification

2.2 Statistisches Reaktorensemble

Zur Modellierung räumlicher Temperaturfluktuationen in der Zylinderladung wird ein Ensemble aus n homogenen Reaktoren gebildet, ähnlich dem Ansatz in [8, 9]. Jeder Reaktor (Vertreter) eines Ensembles weist dabei dieselben Anfangsbedingungen (bei UT) bezüglich der chemischen Zusammensetzung (Konzentrationen $c_{i,0}$) und dem Druck (p_0) auf, jedoch haben die einzelnen Reaktoren verschiedene Anfangstemperaturen T_0 . Die Verteilung n der verschiedenen Anfangstemperaturen der Reaktoren wird dabei so gewählt, dass sie einen gewissen, vorgegebenen Ensemble-Mittelwert $T_{0,m}$ und eine gewisse vorgegebene Standardabweichung besitzt. Die Initialisierung der Reaktoren erfolgt beim unteren Totpunkt (UT), mit $p_0 = 1$ bar. Um Abgasrückhaltung zu simulieren, wurden die Spezieskonzentrationen c_i bei UT so eingestellt, dass sie eine 50%/50%(vol./vol.)-Mischung aus iso-Oktan und Luft (mit vorgegebener Luftzahl λ) und dem entsprechenden Reaktionsprodukt im chemischen Gleichgewicht (für $T=800$ K) repräsentieren. Die Zahl der Reaktoren im Ensemble wurde zu $n=100$ gesetzt. Ein Ensemble ist in dieser Arbeit demnach durch seine Luftzahl, seine mittlere Temperatur $T_{0,m}$ und seine Standardabweichung $\sigma(T_0)$ charakterisiert. Der Druck p_0 wird nicht variiert.

Durch Lösen der Gleichungen (1) wird für jeden einzelnen Reaktor des Ensembles der zeitliche Verlauf von Temperatur, Druck und Spezieskonzentrationen erhalten. Aus der Gesamtheit der Einzellösungen werden die Zeitverläufe der Ensemble-Mittelwerte für die Temperatur, den Druck und die Spezies berechnet. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 1 anhand des Druckes gezeigt.

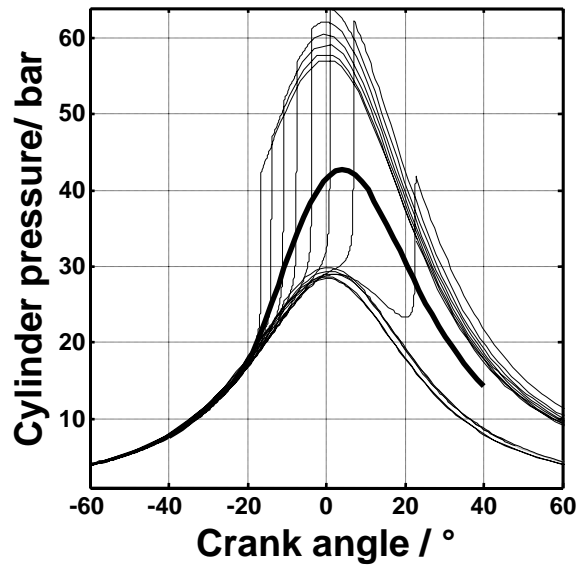


Abb. 1 Druckkurven einzelner Reaktoren (dünne schwarze Kurven) eines Ensembles und des Ensemble-Mittelwertes (dicke schwarze Kurve)

Pressure traces of single reactors (thin black lines) and the ensemble mean pressure trace (thick black line).

Verschiedene Ensembles wurden studiert, mit $\lambda=1.5 - 2.5$, $T_{0,m} = 350K - 500K$ und $\sigma(T_0) = 10K - 50K$. Durch eine Analyse des Verhaltens dieser Ensembles konnten die relativen Einflüsse der „Stellgrößen“ $T_{0,m}$ und $\sigma(T_0)$ auf den Schwerpunkt des Kraftstoffverbrauches und auf die Brenndauer (Zünd- und Brennverlauf) untersucht werden. Zur Charakterisierung des Schwerpunktes des Kraftstoffverbrauches wurde der Zeitpunkt τ_{50} , zu dem 50% der Kraftstoffmasse durch chemische Reaktionen verbraucht sind, herangezogen. Zur Charakterisierung des Brennverlaufs wird die Zeitspanne τ_{bd} , definiert als die Zeitdauer zwischen 10% und 90% Kraftstoffverbrauch, benutzt.

Formal kann die Stärke des Einflusses von $T_{0,m}$ und $\sigma(T_0)$ auf τ_{50} und τ_{bd} durch die partiellen Ableitungen (Sensitivitäten) $\partial\tau_{50}/\partial T_{0,m}$, $\partial\tau_{50}/\partial\sigma(T_0)$, $\partial\tau_{bd}/\partial T_{0,m}$, $\partial\tau_{bd}/\partial\sigma(T_0)$ ausgedrückt werden. Zum direkten Vergleich verschiedener Sensitivitäten bieten sich die normierten (relativen) Sensitivitäten $T_{0,m}/\tau_{50} \cdot \partial\tau_{50}/\partial T_{0,m}$, $\sigma(T_0)/\tau_{50} \cdot \partial\tau_{50}/\partial\sigma(T_0)$, $T_{0,m}/\tau_{bd} \cdot \partial\tau_{bd}/\partial T_{0,m}$, sowie $\sigma(T_0)/\tau_{bd} \cdot \partial\tau_{bd}/\partial\sigma(T_0)$ an.

3 Ergebnisse

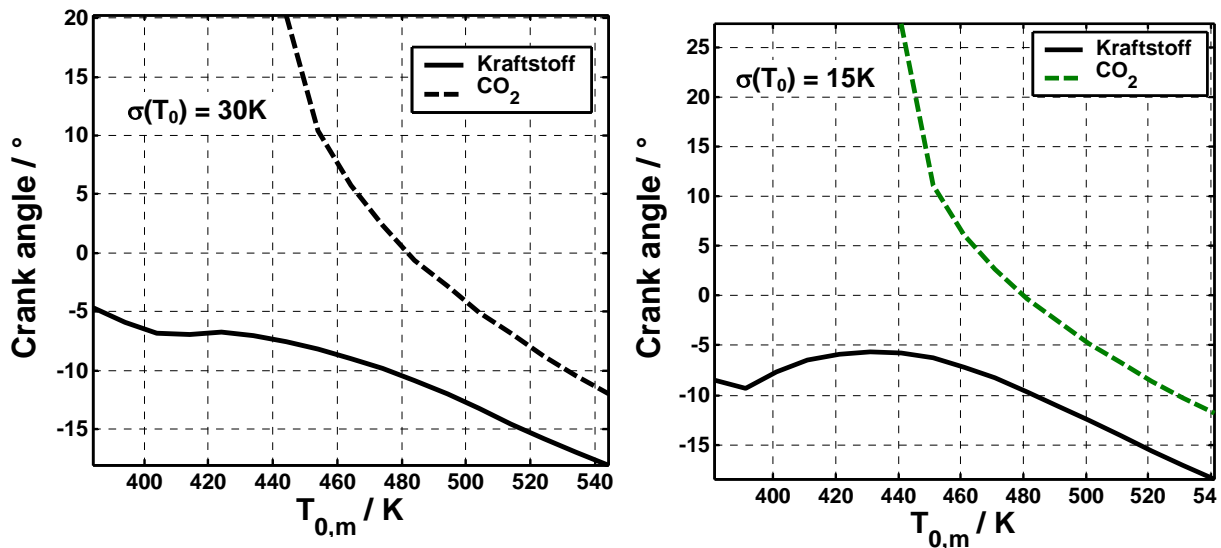


Abb. 2 Kurbelwinkel bei 50% Kraftstoff-Massenumsatz (durchgezogene Linie) und bei 50% CO₂-Bildung (bezogen auf den Massenbruch im chemischen Gleichgewicht) in Abhängigkeit von $T_{0,m}$ für $\sigma(T_0) = 30K$ und $\sigma(T_0) = 15K$.

Traces showing 50% fuel mass conversion (solid line) and 50% CO₂-formation (relative to the mass fraction in the chemical equilibrium) as a function of $T_{0,m}$, for $\sigma(T_0) = 30K$ and $\sigma(T_0) = 15K$.

Bei der Studie der Sensitivität des Umsatzschwerpunktes und der Umsatzdauer bezüglich $T_{0,m}$ und $\sigma(T_0)$ ist es wesentlich, wie die Punkte τ_{50} und τ_{bd} genau definiert werden. Abbildung 2 zeigt als Beispiel den Kurbelwinkel bei 50%-igem Kraftstoffumsatz (massenbezogen), sowie bei 50% Bildung von CO₂ (massenbezogen, relativ zum chemischen Gleichgewicht) als Funktion der Ensemble-Mitteltemperatur $T_{0,m}$ für Ensembles mit $\lambda=2$, und $\sigma(T_0) = 30K$ und $\sigma(T_0) = 15K$. Es ist offensichtlich, dass Umsatzschwerpunkte basierend auf diesen Größen sich stark unterscheiden. Die Bildung von CO₂ erhöht die Temperatur stark (und trägt somit wesentlich zur sogenannten „Wärmefreisetzung“ bei); der Abbau von Kraftstoff hingegen zeigt sehr empfindlich das Einsetzen chemischer Reaktionen an. Im Folgenden werden beide Größen betrachtet.

3.1 Umsatzschwerpunkt und Umsatzdauer einzelner Reaktoren

Um die Bedeutung der chemischen Kinetik für den Umsatzschwerpunkt und die Umsatzdauer zu verdeutlichen, ist es vorteilhaft, zunächst das Verhalten einzelner Reaktoren zu studieren.

Durch Variation der Ladungstemperatur lässt sich der Umsatzschwerpunkt τ_{50} und die Umsatzdauer τ_{bd} homogener magerer Gemische beeinflussen. In Abbildung 3

sind die 50 %-Massenumsatzpunkte (hier dargestellt durch Kurbelwinkel bei einer Drehzahl von 1000/min, wobei 0° dem oberen Totpunkt entspricht) des Kraftstoffs bei variiert Ladungstemperatur (repräsentiert durch die Temperatur T_{UT} beim unteren Totpunkt (UT) dargestellt (durchgezogene Linie).

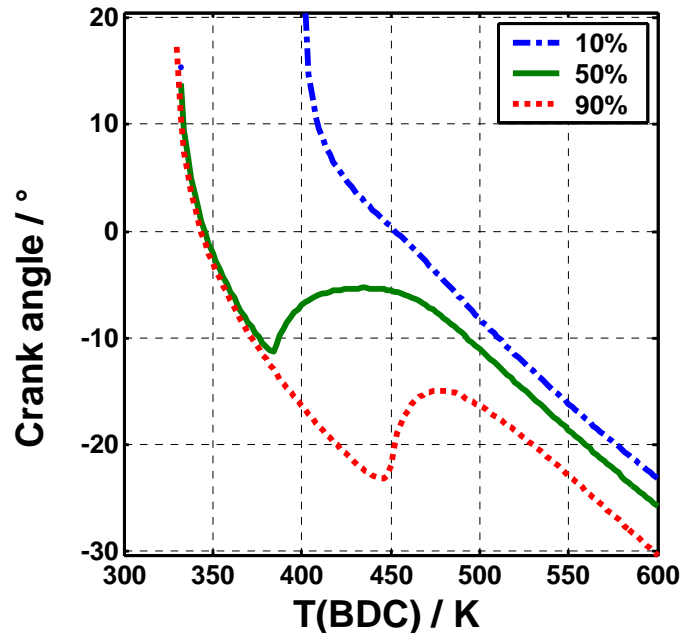


Abb. 3 Kurbelwinkel bei 10-, 50- und 90- prozentigem relativem Kraftstoff-Massenbruch (bezogen auf die Masse bei UT) einzelner homogener Reaktoren als Funktion der Anfangstemperatur T_{UT} für $\lambda=1.5$

Traces showing 10%, 50% and 90% fuel mass (relative to the maximum fuel mass at BTC) of single homogeneous reactors as a function of the initial temperature T_{UT} at BDC, for an equivalence ratio $\Phi = 0.67$.

Wie ersichtlich ist, nimmt τ_{50} mit ansteigender Ladungstemperatur zunächst ab und verschiebt sich bei höheren Temperaturen vor den oberen Totpunkt. Im Bereich um $T_{UT} = 370\text{K} - 450\text{K}$ bewirkt eine Temperaturzunahme keine Abnahme von τ_{50} mehr; dies ist eine Folge des negativen Temperaturkoeffizienten bei der Abhängigkeit der Zündverzugszeit von der Temperatur (NTC-Bereich). Innerhalb eines gewissen Temperaturfensters (ca. 410K - 460K) ist die Sensitivität $\partial\tau_{50}/\partial T_{UT}$ also fast gleich null, und τ_{50} ist annähernd konstant gleich 5° v. OT. Dies bedeutet, dass die Anfangstemperatur stark geregelt werden muss (eine Änderung um bis zu 50K ist erforderlich), um das System aus dem Bereich $\tau_{50} \approx 5^\circ$ v. OT herauszubringen (siehe Diagramm in Abbildung 3).

Die Anfangstemperatur hat auch einen signifikanten Einfluss auf die Brenndauer τ_{bd} . Dies ist aus den Kurven für 10% und 90% relative verbleibende Kraftstoffmasse in Abbildung 3 ersichtlich. Im NTC-Bereich hat τ_{bd} Werte um $20^\circ - 30^\circ$ KW; τ_{bd} nimmt mit fallender Anfangstemperatur stark zu, bis unter $T_{UT} = 400\text{K}$ infolge unvollständiger

ger Verbrennung kein vollständiger Kraftstoffverbrauch mehr stattfindet (der 90%-Punkt wird nicht mehr erreicht). Für sehr hohe Anfangstemperaturen ($T_{UT} > 500\text{K}$) ist τ_{bd} annähernd konstant gleich 7°KW (d.h. $\partial\tau_{bd}/\partial T_{UT}$ ist annähernd gleich 0). In diesem Bereich kann also für homogene Reaktoren τ_{bd} praktisch nicht über die Anfangstemperatur geregelt werden.

Weitere Untersuchungen berücksichtigten auch den Einfluss von Wandwärmeverlusten, so verschieben sich im wesentlichen nur die Kurvenscharen nach rechts zu höheren Anfangstemperaturen. Da sich das qualitative Verhalten durch Wärmeverluste allerdings nicht ändert, werden die Wandwärmeverluste in unseren Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Die Ladungszusammensetzung (Luftzahl) dagegen hat kaum merklichen Einfluss auf τ_{50} und τ_{bd} , wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist. Hier werden die Resultate der oben für $\lambda=1.5$ beschriebenen Studie für $\lambda=2$ und $\lambda=2.5$ gezeigt. Eine Regelung der Zündung über die Luftzahl dürfte wegen deren geringen Einfluss auf den Kraftstoffumsatz im Vergleich zu einer Regelung über Temperaturmittelwert oder -standardabweichung, nur schwer zu realisieren sein (siehe auch [5]). Zudem hat eine Änderung der Luftzahl als unerwünschten Nebeneffekt auch eine unmittelbare Auswirkung auf die Leistung des Motors.

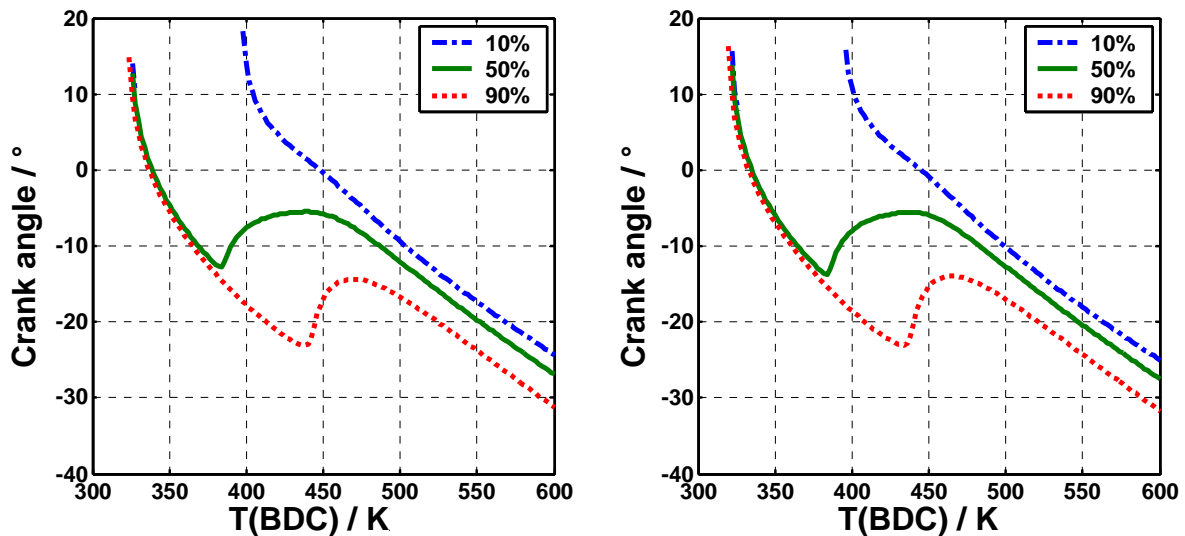


Abb. 4 Kurbelwinkel bei 10%, 50% und 90% relativer Kraftstoffmasse für $\lambda=2$ (links) und $\lambda=2.5$ (rechts).

Crank angles for 10%, 50% and 90% relative fuel mass of single homogeneous reactors as a function of the initial temperature T_{UT} at BDC, for equivalence ratio $\Phi = 0.5$ (left) and $\Phi=0.4$ (right).

3.2 Einfluss des Ensemblemittelwertes

Wie in Abbildung 5 anhand simulierter Zylinderdruckkurven (ensemblegemittelte Druckkurven) zu sehen ist, hat der Ensemblemittelwert $T_{0,m}$ einen signifikanten Einfluss auf das Brennverhalten. Eine Steigerung von $T_{0,m}$ um 40K kann das System von Nichtzündung zu Zündung mit Druckmaximum nahe OT führen.

Daneben hat, wie der Vergleich des linken und rechten Diagramms in Abbildung 5 zeigt, auch die Standardabweichung $\sigma(T_0)$ merklichen Einfluss auf den Zylinderdruckverlauf. Besonders stark ist dieser Einfluss (also die Sensitivität $\partial p/\partial\sigma(T_0)$) bei $T \approx 418\text{K}$ zu sehen.

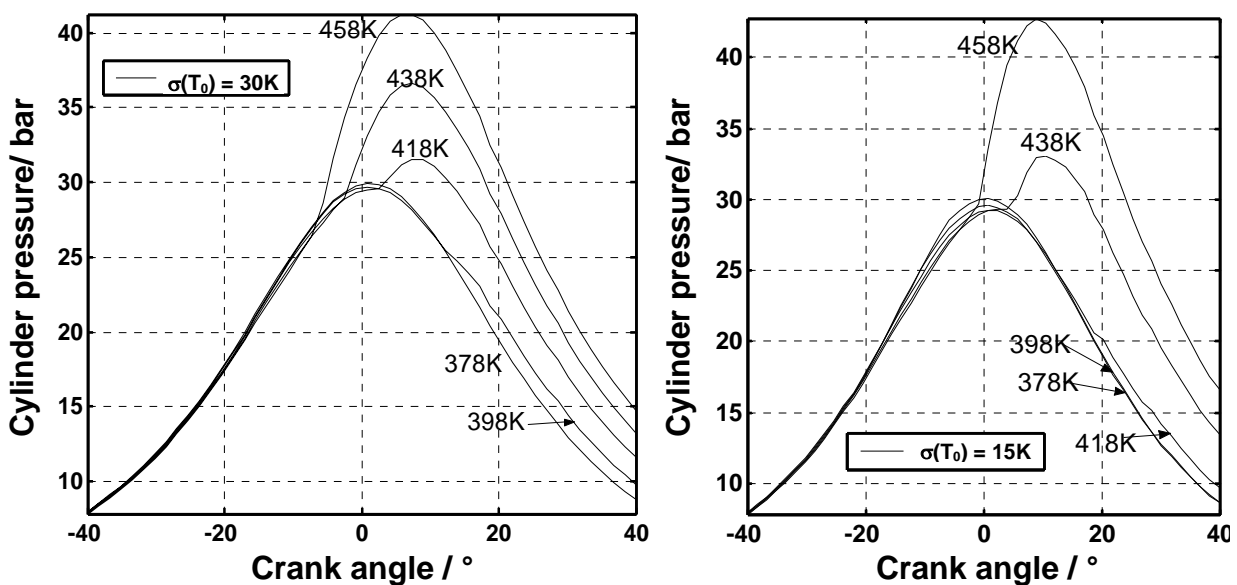


Abb. 5 Ensemblemittelter Druck für die angezeigten Temperaturmittelwerte $T_{0,m}$ und eine Temperaturstandardabweichung von $\sigma(T_0) = 30\text{K}$ (links) und $\sigma(T_0) = 15\text{K}$ (rechts).

Ensemble-averaged pressure traces for the indicated mean temperatures at BDC $T_{0,m}$ and a standard deviation of temperatures of $\sigma(T_0) = 30\text{K}$ (left) and $\sigma(T_0) = 15\text{K}$ (right).

Diese Sensitivität ist nicht in gleicher Weise in den ensemblemittelten Kraftstoffmassenbruchkurven sichtbar (Abbildung 6), wohl aber im ensemblemittelten Verlauf des Massenbruches des Verbrennungsproduktes CO_2 . Die zum Abbau des Kraftstoffes führenden chemischen Reaktionen sind im hier betrachteten Bereich und bei dem betrachteten chemischen Mechanismus offenbar nicht so stark an den Ensemble-Temperaturmittelwert und an die Ensemble-Standardabweichung gekoppelt wie jene Reaktionen, die zur Drucksteigerung führen.

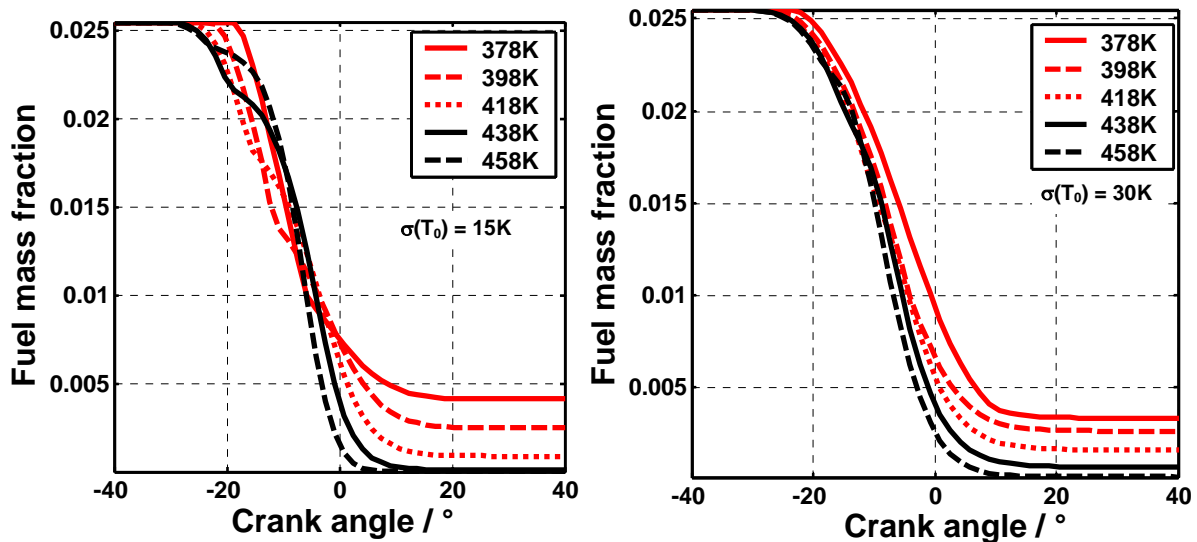


Abb. 6 Ensemblegemittelter Verlauf des Kraftstoff-Massenbruches für die angezeigten Temperaturmittelwerte $T_{0,m}$ und eine Temperaturstandardabweichung von $\sigma(T_0) = 15K$ (links) und $\sigma(T_0) = 30K$ (rechts).

Ensemble-averaged fuel mass fraction traces for the indicated mean temperatures at BTDC, $T_{0,m}$ and a standard deviation of temperatures of $\sigma(T_0) = 30K$ (right) and $\sigma(T_0) = 15K$ (left).

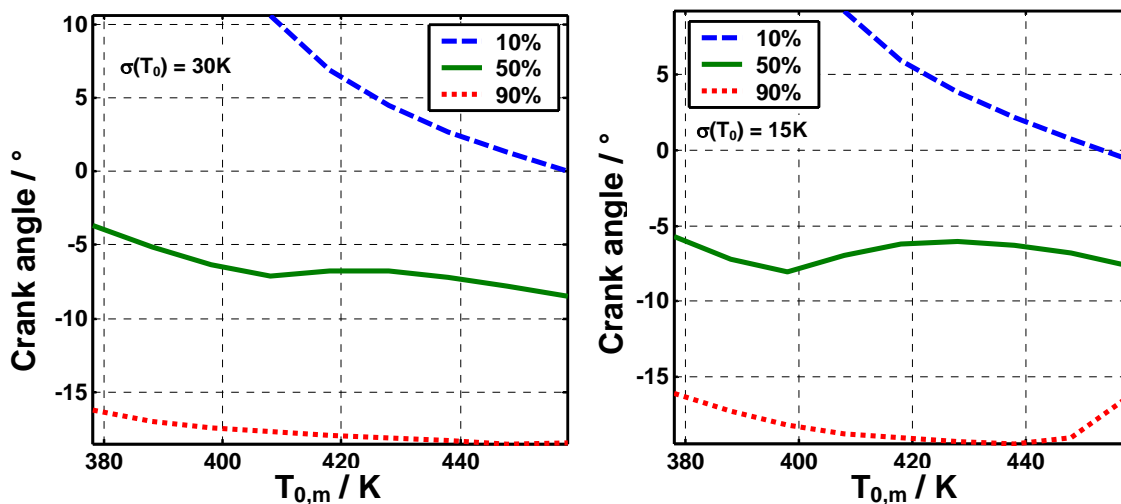


Abb. 7 Abhängigkeit des relativen verbleibenden Kraftstoffmassenbruches (10%, 50% und 90% des Ausgangsmassenbruches) von dem Temperaturmittelwert $T_{0,m}$. Links für $\sigma(T_0) = 30K$, rechts für $\sigma(T_0) = 15K$. Luftzahl $\lambda=2$.

Dependence of the relative fuel mass fraction (10%, 50% and 90% of the initial mass fraction, respectively) traces on the indicated ensemble mean temperatures at BDC $T_{0,m}$ and a standard deviation of $\sigma(T_0) = 30K$ (right) and $\sigma(T_0) = 15K$ (left). Equivalence ratio $\Phi=0.5$.

3.3 Einfluss der Fluktuationsamplituden

Das statistische Ensemble von Reaktoren stellt vor allem deswegen eine wesentliche Erweiterung gegenüber dem Modell eines einzelnen homogenen Reaktors dar, weil es das Studium des Einflusses von Fluktuationen auf den Verlauf der Verbrennung erlaubt.

In Abbildung 8 ist der Kurbelwinkel bei 10%, 50% und 90% relativem CO₂-Massenbruch (im Vergleich zum chemischen Gleichgewicht) als Funktion der Ensemble-Standardabweichung $\sigma(T_0)$ bei UT aufgetragen. Wie zu beobachten ist, hat die Standardabweichung der Temperatur innerhalb eines Ensembles einen großen Einfluss auf τ_{bd} (sichtbar als Differenz zwischen 10% und 90% relativem CO₂-Massenbruch), die Sensitivität $\partial\tau_{bd}/\partial\sigma(T_0)$ ist also hier stark positiv. Weit weniger stark ausgeprägt, aber klar vorhanden, ist der Einfluss von $\sigma(T_0)$ auf τ_{50} . Die Sensitivität $\partial\tau_{50}/\partial\sigma(T_0)$ ist also nicht gleich 0.

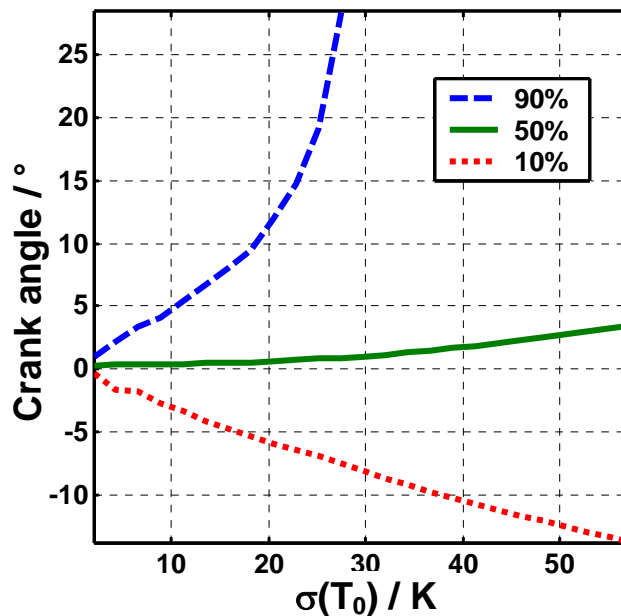


Abb. 8 Kurbelwinkel bei 10%, 50% und 90% relativem CO₂-Massenbruch (im Vergleich zum Gleichgewicht) als Funktion der Ensemble-Standardabweichung $\sigma(T_0)$ bei UT. $T_{0,m} = 478\text{K}$, Luftzahl $\lambda=2$.

Crank angle at 10%, 50% and 90% relative (compared to chemical equilibrium) CO₂ mass fraction as a function of the ensemble initial temperature standard deviation, $\sigma(T_0)$. Ensemble mean temperature $T_{0,m} = 478\text{ K}$, equivalence ratio $\Phi=0.5$.

3.4 Diskussion und Ausblick

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf voneinander unabhängige chemische Reaktoren. In realen Motoren werden sich Wechselwirkungen zwischen den Reaktoren ergeben. Unser Modell behandelt nur magere Bedingungen mit homogener Luftzahl. Im Falle nicht sehr magerer Mischungen kann die Wechselwirkung zwischen Reaktoren signifikant werden, etwa durch die Erwärmung von nicht zündenden Reaktoren durch die thermische Ausdehnung bereits gezündeter Reaktoren, oder einfach durch Wärmeleitung. Es kann auch nicht immer davon ausgegangen werden, dass die Luftzahl in einem Motor annähernd örtlich homogen ist (etwa in Motoren mit Direkteinspritzung). Weiterhin stellt sich die Frage, ob und ggf. wie stark die Leistung des Motors von Temperaturmittelwert und -standardabweichung abhängt. All diese Punkte weisen auf Möglichkeiten zur Erweiterung und Verfeinerung des Modells hin.

Dennoch kann erwartet werden, dass das hier vorgestellte Modell zumindest die richtigen Trends und die Größenordnung der Sensitivitäten realistisch wiedergibt und daher ein Werkzeug für die Entwicklung von HCCI- oder CAI-Motoren darstellt.

Der Temperaturmittelwert kann als sehr wirkungsvolles Mittel zur Einstellung eines gewissen Umsatzschwerpunktes herangezogen werden. Durch Änderungen des Temperaturmittelwertes bei UT um einige 10K lässt sich praktisch der gesamte in der Praxis relevante Bereich von Umsatzschwerpunkten darstellen. Jedoch ist durch den Mittelwert alleine das Zünd- und Brennverhalten bei weitem nicht vollständig festgelegt. Zudem hat die Fluktuation (Temperaturstandardabweichung) einen wesentlichen Einfluss auf den Schwerpunkt. Bei Kraftstoffen mit ausgeprägtem NTC-Bereich kann in gewissen Temperaturdomänen eine gesonderte Regelungsstrategie erforderlich sein. Auch die Umsatzdauer ändert sich mit dem Temperaturmittelwert. Die Standardabweichung der Temperatur hat sehr starken Einfluss auf die Umsatzdauer und auch, jedoch weit schwächer, auf den Umsatzschwerpunkt. Die Sensitivitäten $\partial\tau_{50}/\partial T_{0,m}$, $\partial\tau_{50}/\partial\sigma(T_0)$, $\partial\tau_{bd}/\partial T_{0,m}$ und $\partial\tau_{bd}/\partial\sigma(T_0)$ hängen nur sehr schwach von der Luftzahl ab. Dieser Umstand dürfte die Entwicklung von auf Temperaturfluktuationen basierenden Regelungsstrategien wesentlich erleichtern.

4 Formelzeichen und Indizes

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
p	bar	Druck
T	K	absolute Temperatur
T_{UT}, T_{BDC}	K	Temperatur eines Reaktors bei UT
$T_{0,m}$	K	Temperatur eines Ensembles bei UT
$\sigma(T_0)$	K	Standardabweichung der Anfangstemperaturen
τ_{50}	°KW	Umsatzschwerpunkt
τ_{bd}	°KW	Umsatzdauer

5 Literatur

- [1] Onishi, S.; Hong Jo, S.; Shoda, K.; Do Jo, P.; Kato, S.
Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process
for Internal Combustion Engines
SAE Technical Paper No. 790501, 1979
- [2] Najt, P.; Foster, D.E.
Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion
SAE Technical Paper No. 830464, 1983
- [3] Lavy, J.; Dabadie, J.-C.; Angelberger, C.; Duret, P.; Willand, J.; Juretzka, A.;
Schäflein, J.; Ma, T.; Lendresse, Y.; Sartre, A.; Schulz, C.; Krämer, H.; Zhao, H.
Innovative ultra-low NO_x controlled auto-ignition combustion process for gaso-
line engines: the 4-SPACE project
SAE Technical Paper No. 2000-01-1837, 2000
- [4] Schießl, R.; Maas, U.
Analysis of endgas temperature fluctuations in an SI engine by Laser-Induced
Fluorescence
Combustion and Flame 133, pp. 19-27, 2003
- [5] Noda, T.; Foster, D.E.
A numerical study to control combustion duration of hydrogen-fueled HCCI by
using multi-zone chemical kinetics simulation
SAE Technical Paper No. 2001-01-0250, 2001
- [6] Golovitchev, V.
<http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/MECH.html>, 2004
- [7] Deuffhard, P.; Nowak, U.
Extrapolation integrators for quasilinear implicit ODEs.
In: P. Deuffhard, B. Engquist (eds.): Large scale scientific
computing, Birkhaeuser, Prog. Sci. Comp. 7, pp. 37-50 (1987)
- [8] Bhave, A.; Balthasar, M.; Kraft, M.; Mauss, F.
Analysis of a natural gas fuelled homogeneous charge compression ignition en-
gine with exhaust gas recirculation using a stochastic reactor model
The International Journal of Engine Research 5 No. 1, 93-104, 2004
- [9] Schießl, R.; Maiwald, O.; König, K.; Maas, U.
Laserdiagnostische Untersuchung und detaillierte numerische Modellierung der
Zündung in einem HCCI Motor,
Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik
Baden-Baden, 2004