

VERSAMMLUNGSBERICHTE

Deutsche Akademie für Luftfahrtforschung.

Tagung im Haus der Flieger, Berlin, 10. und 11. Mai 1939.

Physikalische und chemische Vorgänge bei der Verbrennung im Motor.

Dr. H. Bütetisch, Leuna: „Über die chemische Konstitution der Kraft- und Schmierstoffe.“

Eine rohe Abgrenzung der Gruppen Otto-, Dieselmotortreibstoff und Schmieröl ist nach der Kohlenstoffzahl ihrer Moleküle möglich. Die Benzine liegen etwa im Bereich bis C_{12} , bis C_{20} erstreckt sich das Gebiet der Dieselmotortreibstoffe, darüber liegen die Schmieröle.

Die nach der Motormethode erhaltenen Oktanzahlen der n-Paraffine nehmen mit zunehmendem Molekulargewicht schnell ab (C_8H_{18} : 07 = 125, $C_{10}H_{22}$: 07 = —28). Im Flugbenzin sind die Anfangsglieder wegen ihrer Dampfdruckeinstellung nicht zulässig. Die Oktanzahlen der i-Paraffine werden durch Siedepunkt und Molekulargewicht kaum verändert. Je enger und symmetrischer aber die C-Atome im Molekül beieinanderliegen, um so größer ist die Oktanzahl, wobei offenbar der Einfluß der Symmetrie überwiegt.

Die Oktanwerte der Olefine liegen bis C_7 , über denen der entsprechenden n-Paraffine, um bei den höheren schnell abzusinken. Die Klopfintensität der Olefine mit verzweigten Ketten ist höher als bei den geradkettigen. Bei erhöhten Temperaturen zeigen sie erheblichen Klopfwertschwund. Naphthene sind weniger erforscht, für Flugbenzin eignen sich nur die niedrigstendenden.

Aromaten sind nach dem Klopfverhalten die wertvollsten Kohlenwasserstoffe. Molekülgröße und Siedepunkt sind von untergeordnetem Einfluß auf ihre Kompressionsfestigkeit. Allerdings zeigen sie bei erhöhter Temperatur und höheren Drehzahlen erheblichen Klopfwertschwund, der sich durch Zugabe von Bleitetraäthyl ausgleichen läßt.

Der Oktanzahlerhöhung durch Zugesen von Alkoholen stehen die Nachteile eines niedrigeren Heizwertes, einer gewissen Wasserempfindlichkeit und der Dampfblasenbildung gegenüber, während Äther als Zusatz zu Peroxydbildung führen.

Die Wirkung des Tetraäthylbleies ist konstitutionsabhängig. Paraffine, Naphthene und Aromaten mit geraden, gesättigten Seitenketten sind am empfindlichsten. Wenig beeinflußt werden Aromaten mit kurzen Seitenketten, während ungesättigte Naphthene negatives Verhalten zeigen.

Von Dieselmotortreibstoffen wird hohe Zündwilligkeit gefordert, die bei kettenförmigen Molekülen im Gegensatz zu cyclischen besonders gut ausgeprägt ist, die Naphthene nehmen auch hier eine Mittelstellung ein. Die Zerfallsneigung nimmt zunächst mit wachsendem Molekulargewicht zu, um dann infolge schlechterer Verdampfbarkeit mehr und mehr zurückzugehen. Die nach der Fischer-Synthese erhaltenen Paraffine mit Cetenzen von über 100 eignen sich zur Vermischung mit Kohlenwasserstoffen von unbefriedigendem Zündvermögen, hierbei ist allerdings die Abscheidung von Asphalten usw. durch weitgehende Raffination unerlässlich.

Noch verwickelter als bei Kraftstoffen ist die Erforschung der Schmierstoffkonstitution. Schmieröl darf in der Kälte nicht zu zähflüssig und muß bei Kolben- und Zylindertemperaturen noch genügend zähflüssig sein, um sicheren Kaltstart, günstigen Ölverbrauch und gutes Abdichten des Verbrennungsraumes gegen das Kurbelgehäuse zu gewährleisten und andererseits Koksablagern und Verölen des Verbrennungsraumes, Eindringen von Kraftstoffresten in das Kurbelgehäuse und somit starke Ölalterung zu verhindern. Ein vom technischen Prüfstand in Oppau entwickeltes Verfahren zeigt die Beziehungen zwischen dem Viscositäts-Temperaturverhalten und der Haftfestigkeit, die mit steigender Zähigkeit zunimmt und vom Viscositätsindex bzw. der Polhöhe abhängt.

Öle mit hohem Viscositätsindex haben großes Molekulargewicht, hohe Siedelage und niedriges spez. Gewicht, letzteres ist durch hohen Wasserstoffgehalt bedingt, der wiederum im Hinblick auf Wärmeabfuhr günstig hohe Werte für die spez. Wärme ergibt. CH_3 -Gruppen beeinflussen das Viscositäts-Temperaturverhalten ebenso ungünstig wie Verzweigung der

C-Kette in kugelförmiger Raumanordnung. Zunehmende Cyclisierung erhöht die Viscosität und verschlechtert das Viscositäts-Temperaturverhalten.

Natürliche Schmieröle sind im Gegensatz zu den synthetischen nicht rein paraffinischer Struktur, weshalb die Raffinationsverfahren nur auf eine Anreicherung der paraffinischen Anteile hinzielen können. Die lenkbare Synthese indes führt zu Erzeugnissen, deren Eigenschaften den jeweiligen Anwendungsgebieten auf das beste angepaßt werden können.

Auch die Viscositäts-Druckabhängigkeit ist eine Funktion des chemischen Aufbaues, durch Zusatz hochpolymerer Kohlenwasserstoffe (Oppanol B 15 der I. G.) läßt sie sich verringern.

Hochmolekulare Säuren, Ester, Phosphor-, Chlor- und Schwefelverbindungen bilden, den Ölen zugesetzt, im Gebiet der Grenzschmierung hoch filmfeste Schmierkörper, die die Gefahr der Durchbrechung des Schmierpolsters verringern. Schmieröle dürfen nicht zu Korrosionen, zu Asphalt-, Schlamm- und Koksablagern führen und müssen gegen Sauerstoffeinwirkung möglichst beständig sein, was durch Zugabe von Schmieröl-Oxydationsinhibitoren, wie aromatische Kohlenwasserstoffe, unterstützt werden kann.

Dr. M. Pier, Ludwigshafen: „Anforderungen der Verbrennungsmotoren an die Treibstoffe und Wege zu ihrer Verwirklichung in Deutschland.“

Nach einem historischen Überblick über die Anforderungen an Kraftstoffe geht Vortr. auf die erforderlichen Qualitätsmerkmale der Kraftstoffe für neuzeitliche Ottomotoren ein. Eine gleichmäßige Gesamt-Siedekurve ergibt eine gute Gemischbildung und eine saubere Verbrennung. Die Anwesenheit von leicht flüchtigen Anteilen bewirkt ein leichtes Anspringen, jedoch muß ein Zuviel dieser Körper wegen der Gefahr der Dampfblasenbildung vermieden werden. Die Abwesenheit zu hoch siedender Teile ist erforderlich wegen der sonst erfolgenden Schmierölverdünnung. Weitere Qualitätsmerkmale sind Freiheit von Harzablagern und korrosiven Verbindungen, hoher Heizwert und schließlich als wichtigste Eigenschaft das Klopfverhalten.

Die Klopferscheinung kann im Extremfall zu Leistungsabfall und Motorschäden führen. Voraussetzung für die Ausbildung spontaner Oxydationsvorgänge ist die Entstehung aktiver Teilchen bei hohen Temperaturen, sie ist von der konstitutionsbedingten, thermischen Beständigkeit der Brennstoffmoleküle abhängig, ebenso ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Verbrennungsraum. Bei den i-Paraffinen wird diese spontane Oxydationsreaktion an den Verzweigungsketten abgebrochen.

Die feinverteilten Zersetzungsprodukte der anorganischen Antiklopfmittel wirken im reaktionskinetischen Sinne als Wand, an der die Reaktionsfolgen der spontanen Vorgänge abgebrochen werden. Die Bleiempfindlichkeit ist bei den i-Paraffinen am größten und nimmt in der Reihenfolge Naphthene, Olefine und Aromaten ab. Schwefel und seine Verbindungen setzen die Wirkung des Bleitetraäthyls beträchtlich herab. Die Klopfintensität der einzelnen Körperklassen ist temperaturabhängig; nur die i-Paraffine büßen nichts ein. Mit zunehmendem Siedepunkt bleiben nur i-Paraffine und Aromaten angenähert unverändert. So sollen die Anteile an geradkettigen Paraffinen, hochsiedenden Naphthenen sowie Olefinen zugunsten der verzweigten Paraffine und Aromaten zurücktreten.

Das durch Zündverzögerung bedingte Dieselmotorklopfen erfordert einen zündwilligen Kraftstoff. Die Zündfreudigkeit wächst mit steigendem Molekulargewicht, bis sie einmal durch schlechtere Verdampfbarkeit gehemmt wird. Zündzusatzstoffe (Isoamylnitrit) sind wegen der Herabsetzung des Flammpunktes und der Wirkungslosigkeit beim Kaltstart nicht üblich.

Ein Dieselmotortreibstoff mit hohem Paraffinanteil (mit Ausnahme der Hochmolekularen wegen ihres schlechten Kälteverhaltens) ist erwünscht. Naphthene sind noch befriedigend zündwillig. Der Reinheitsgrad ist im Hinblick auf Verkoksung und Korrosionserscheinungen von Bedeutung, schließlich hat der Kraftstoff gutes Fließvermögen, gute Filtrierbarkeit, Satzfreiheit und eine gewisse Schmierfähigkeit aufzuweisen.

Zur deutschen Kraftstoffversorgung übergehend bespricht Vortr. das fast gleichzeitige Entstehen der Hoch- und Niederdrucksynthese. Nach Beschreibung der Hochdrucksynthese wird gezeigt, daß Benzin der Mittelölhydrierung je nach dem Charakter der Ausgangsstoffe mehr oder weniger aromatisch

sein kann. Durch Wahl geeigneter Katalysatoren und Arbeitsbedingungen läßt sich auch bei gleichem Rohstoff die Zusammensetzung des Endproduktes weitgehend beeinflussen. Bei beiden Synthesen fallen gasförmige Kohlenwasserstoffe an, die als Flüssiggas oder Ausgangsstoff der Polymerisation Verwendung finden.

Als Diesellochstoffe kommen neben den deutschen Erdöl-erzeugnissen bevorzugt die Produkte der Niederdruckhydrierung in Frage, die sich wegen ihrer ausgezeichneten Zündfreudigkeit zur Vermischung mit wasserstoffarmen Teerölen eignen. Die aus der Braunkohlenschwelung und Sumpfphase erhaltenen Öle sind im Gegensatz zu den entsprechenden Steinkohlenprodukten gerade noch im schnellaufenden Dieselmotor verwendbar. Die bei allen Mittellölen mögliche Aufhydrierung zu Dieselöl wendet man bei Braunkohlenteeren vorteilhaft wegen ihres schon vorhandenen, hohen Wasserstoffgehaltes an.

Als klopfester Ottokraftstoff dient das Benzol, soweit seine durch den Koksabsatz bedingte Menge ausreicht. Ein weiterer einheimischer Kraftstoff ist Äthylalkohol. Da die Mengen an inländischem Benzin, Benzol und Alkohol begrenzt sind, müssen zur Bedarfsdeckung die Syntheseverfahren herangezogen werden, die allen Anforderungen gerecht werdende Kraftstoffe erzeugen.

Prof. A. C. Egerton, Imp. Coll. of Science and Technology, London: „Das Klopfen und die Kohlenwasserstoffverbrennung.“

Vortr. berichtet über Zwischenprodukte bei der Oxydation der Kohlenwasserstoffe. Motorenversuche zeigen, daß Aldehyde nicht in genügend ausreichenden Mengen auftreten, um ein Klopfen verursachen zu können, wohl aber die Peroxyde. Das Klopfen wird als plötzliche Zersetzungsoxydation einer Anzahl von Zentren erklärt, von denen jedes eine Reaktionskette einleitet, was andererseits durch Zugabe von Antiklopfmitteln verhütet wird.

Nach einer Besprechung von Arbeiten über die Zündung kalter Flammen im Gebiet tieferer Temperaturen berichtet Vortr., daß das Klopfen stark durch Zusatz von Peroxyden und nicht durch Aldehyde beeinflusst wird. Die Peroxyde bestimmen das Zündverhalten von Kohlenwasserstoffen im Zündgebiet tieferer Temperaturen. Eine Anhäufung von Peroxyden führt zur Bildung kalter Flammen, welche dann zünden, ohne unbedingt immer die Zündung des gesamten Kohlenwasserstoffgemisches, aus dem sie gebildet wurden, nach sich ziehen zu müssen.

Es wird gezeigt, daß das Klopfen mit dem Zündvorgang eng verbunden ist, und daß dieser für den Fall des niedrigeren Zündgebietes bei Kohlenwasserstoffen mit der Peroxydbildung zusammenhängt.

Prof. Ing. G. Natta, T. H. Mailand: „Neue Verfahren zur synthetischen Herstellung spezieller Treibstoffe für die Luftfahrt.“

Kraftstoffe mit hohen Oktanwerten werden gewonnen durch Wärmebehandlung von Kohlenwasserstoffen zwecks Cyclisierung oder Kettenverzweigung, durch hydrierende Spaltung, durch Zugabe von metallorganischen Verbindungen, durch Polymerisation von Spalt- und anderen Gasen, durch Synthese und schließlich durch Mischen von Spalt- oder Hydrierbenzin mit hochklopfenden Teerdestillaten. Da das Kaltverhalten der Aromaten unbefriedigend ist, wird Flugbenzin der Oktanzahl 100 vorzugsweise auf dem Wege der Polymerisation gewonnen. Isooktan allein ist ungeeignet, da gute Benzine eine Siedekurve aufweisen müssen. Daher werden dem i-Oktan leichte Polymerbenzine und i-Penten beigegeben, worauf man durch Zugabe von Antiklopfmitteln wieder auf Oktanwert 100 gelangen kann.

Isobutylen und Isobutan sind die wichtigsten Ausgangsstoffe zur Herstellung von Benzin mit Oktanzahl 100. Bei verschiedensten Polymerisationsverfahren werden Katalysatoren wie Schwefelsäure, Phosphorsäure, wasserfreie Chloride und schließlich Oxyde allein oder zusammen mit gasförmigem Chlorwasserstoff angewendet. Ihre Wirksamkeit und Regenerierfähigkeit wird durchgesprochen. Am besten eignet sich der aus Tonerde und Chlorwasserstoff bestehende Katalysator.

Da das bisher aus technischen Anlagen anfallende i-Butylen als Ausgangsstoff für die i-Oktanerzeugung nicht ausreicht, muß eine neue Quelle in den Syntheseverfahren gesucht werden.

Durch Anwendung alkalischer, zinkoxydhaltiger Katalysatoren sind bei der Hochdrucksynthese erhebliche Mengen i-Butylalkohol erhältlich. Dieser steht nach katalytischer Entwässerung der i-Oktanerzeugung nach den aufgeführten Verfahren zur Verfügung. Die Hochdruckhydrierung ist im Hinblick auf das Verhältnis der Heizwerte des gewonnenen Kraftstoffes und des angewendeten Gases günstiger als die Niederdrucksynthese. Die bei ersterer gleichzeitig anfallenden Alkohole können vorteilhaft dem Autokraftstoff zugesetzt werden.

Es steht somit ein neuer Weg für die Herstellung großer Mengen hochwertiger Kraftstoffe aus armen Brennstoffen, besonders durch Vergasen der Braunkohle, offen.

Begrenzte Mengen an klopfesten Kraftstoffen sind durch Hydrierung des Furfurols aus landwirtschaftlichen Abfällen und durch Polymerisation der leichten Kohlenwasserstoffe der Kautschuksynthese erhältlich.

Prof. Dr. A. Eucken, Göttingen: „Grundsätzliches über den Zerfallsmechanismus einfacher Kohlenwasserstoffe.“

Für den Ablauf einer Zerfallsreaktion bieten sich folgende Möglichkeiten: Entweder führt der Zerfall unmittelbar oder erst über labile Zwischenstufen zu den Endprodukten. Primär entstehende Radikale können direkt zu stabilen Molekeln führen, aber auch sekundär miteinander oder mit dem Ausgangsstoff in der sog. Austauschreaktion reagieren. Bei letzterer werden neue Radikale und stabile Molekeln gebildet. Das neue Radikal zerfällt bald zu einem stabilen Molekül und dem ursprünglichen Radikal, das wieder mit dem Ausgangsstoff reagiert und so fort, bis die Radikale in einer neuen Reaktion durch Vereinigung miteinander vernichtet werden.

Der Zerfall auf den verschiedenen möglichen Reaktionswegen geht vorzugsweise auf dem mit den relativ kleinsten Hemmungen vorstatten. Neben dem Vorhandensein der für die Umsetzung nötigen Aktivierungsenergie ist der sterische Faktor von Bedeutung, der = 1 wird, wenn alle Zusammenstöße erfolgreich sind.

Der Bruttoablauf einer Zerfallsreaktion ist durch Druckmessung zu verfolgen. Eine sorgfältige Analyse der Reaktionsprodukte bei verschiedener Reaktionstiefe entscheidet, welche Stoffe primär und welche sekundär gebildet werden. Von besonderem Wert ist der Nachweis von Radikalen und Atomen. Ein weiteres Hilfsmittel zur Klärung eines Reaktionsmechanismus bietet die Untersuchung von Bestrahlungseinflüssen auf das Reaktionsgemisch. Endlich kann nach Ansicht des Vortr. der Zerfall von Kohlenwasserstoffen, bei denen ein Teil des Wasserstoffs durch schweren Wasserstoff ersetzt ist, wertvolle Aufschlüsse geben. Vortr. beschließt seine Ausführungen mit eingehender Besprechung der Zerfallsreaktionen von Methan, Äthan, Cyclohexen und Cyclohexan.

Prof. Dr. W. Jost, Leipzig: „Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Verbrennung im Motor“¹⁾.

Das Klopfen ist auf ein momentanes Abreagieren des Ladungsrestes im Verbrennungsraum zurückzuführen, das Gasschwingungen, verstärkten Wärmeübergang auf die Wandungen und damit vermehrte thermische Beanspruchung des Motors bedingt. Nicht nur die „Wärmeexplosion“, die auftritt, wenn die Wärmeproduktion größer wird als die Abgabe an die Umgebung, sondern auch Kettenreaktion mit Kettenverzweigung führen zur Selbstentzündung. Diese hängt davon ab, ob der Vorgang der Verzweigung, d. h. die Neubildung aktiver Zentren, den des Kettenabbruchs überwiegt oder nicht. Da auch mit steigendem Druck der Kettenabbruch gefördert wird, erhält man ein „inselartiges Explosionsgebiet“, an das sich bei noch höheren Drucken das Gebiet der reinen Wärmeexplosion anschließt.

In einem Versuchszyylinder werden durch Fallgewicht Gasgemische variierbar komprimiert. Am unteren Ende des Zylinders können verschieden geformte Reaktionsgefäße angesetzt werden, gedrungene mit geringer Wärmeableitung für Selbstzündung, langgestreckte, zylindrische Gefäße für Fremdzündung und Klopfen. Die Flammenfront wurde durch Sichtfenster photographisch registriert. Vortr. zeigt mit der Apparatur gewonnene typische Aufnahmen, die eine Erhöhung der Flammengeschwindigkeit von 2 Größenordnungen gegenüber

¹⁾ Vgl. hierzu Jost, „Verbrennungsvorgänge in Gasen“, diese Ztschr. 51, 687 [1938], sowie v. Philippovich, „Der Verbrennungsvorgang im Explosionsmotor“, ebenda 49, 625 [1936].

der Geschwindigkeit bei normaler Verbrennung der Größenordnung 5 m/s zeigen. Außerdem ist die bei klopfender Verbrennung immer in dem verbrannten Gas zurücklaufende Stoßwelle zu erkennen. Die Zündverzugsabhängigkeit von der Temperatur wird an Benzol, i-Oktan und n-Heptan gemessen. Aus der beobachteten Temperaturabhängigkeit der Selbstzündung läßt sich das Klopfen vorausberechnen, sofern man die Flammenbewegung kennt. Diese Angaben können aus Flammenphotographien kurz unter der Klopfgrenze entnommen werden.

Die große Oxydierbarkeit der an sich reaktionsträgen Paraffine beim Klopfen beruht auf Kettenabbruch. Im Gegensatz dazu hat das olefinische Einzelmolekül große Reaktionsfähigkeit, dafür besitzen die kettenbrechenden Reaktionen große Wahrscheinlichkeit, da kettenfortführende Verbindungen mit den Doppelbindungen der Ausgangsmoleküle abreagieren. Antiklopfmittel wirken um so weniger, je mehr Ketten schon ohne ihren Zusatz abgebrochen werden. Setzt man einem wenig klopfesten Kraftstoff einen klopfesteren zu, so wird dessen Wirkung einerseits in einer Verdünnung des wenig klopfesten, andererseits u. U. auch in einer Beeinflussung von dessen Verbrennungsablauf bestehen. Den ersten Einfluß müßte man nach der Mischungsregel berechnen können, der zweite kann eine Verbesserung oder Verschlechterung des resultierenden Klopfverhaltens bedingen.

Vortr. geht dann zur Klärung des Mechanismus der Flammenfortpflanzung auf normale Brenngeschwindigkeit und Flammengeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Zündgrenzenveränderung ein. Die großen Verbrennungsgeschwindigkeiten im Motor kommen durch Mitwirkung von Gasströmen und Wirbelung zustande, die man durch Formgebung des Verbrennungsraumes künstlich erhöhen kann. Den Abschluß des Vortrags bildet eine eingehende Betrachtung der normalen Flammenausbreitung.

Dr. B. Lewis u. Dr. G. von Elbe, U. S. Bureau of Mines, Pittsburgh: „*Beitrag zum Reaktionsmechanismus der Kohlenwasserstoffoxydation durch die experimentelle Bestätigung der Reaktion $\text{HCO} + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{HO}_2$* “.

Durch die Bestätigung dieser Reaktion gelangt man eindeutig zum Kettenschema der Methanoxydation, das alle kinetischen und chemischen Tatsachen richtig wiedergibt. Die Sicherung dieses Schemas stärkt aber auch das Vertrauen in ähnliche Schemata für die höheren Kohlenwasserstoffe. Das gilt besonders auch für die Bildung der Alkylperoxydradikale, die für die Klopf Eigenschaften der Paraffine wichtig sind. Damit scheint der Oxydationsmechanismus dieser Körperklasse auf eine sichere Tatsachengrundlage gestellt zu sein.

Prof. Dr. G. B. Bonino, Bologna: „*Raman-Spektren und Klopfestigkeit einiger Paraffine*“¹⁾.

Vortr. versucht dem Problem des Zerfalls von Kohlenwasserstoffen unter Zuhilfenahme der Raman-Spektren der Kohlenwasserstoffe näherzukommen und über die charakteristischen Spektren einen Zusammenhang zwischen Molekülstruktur und Klopfestigkeit zu finden. Die zu Beginn der Untersuchungen vorliegenden Arbeiten über Raman-Spektren von Kohlenwasserstoffen bezogen sich nur auf solche mit niederem oder höherem Molekulargewicht, aber normaler Kette und konnten daher wenig Anhaltspunkte geben. Es wurden deshalb 15 reine, synthetische Paraffine mit normaler und verzweigter Kette (Heptane und Oktane) untersucht. Als Erregelinie diente die Hg-Linie 435,8, wobei sich linienarme und übersichtliche Spektren ergaben.

Im Gebiet der Valenz- und Deformationsschwingungen zwischen 250 und 550 cm^{-1} und 600 und 1000 cm^{-1} lassen sich charakteristische Verschiedenheiten zwischen normalen und verzweigten Ketten finden, die einen parallelen Verlauf mit der Klopfestigkeit dieser Kohlenwasserstoffe zeigen. Es wird eine einfache Beziehung zwischen der Verschiebung der Schwerpunkte der mittleren Raman-Linienintensität und der Klopfestigkeit festgestellt, die eine quantitative Beurteilung der Kohlenwasserstoffe ermöglicht.

In seiner Schlußbetrachtung weist Vortr. auf die Vorteile (geringe Substanzmenge) und Mängel (subjektive Fehler beim

qualitativen Abschätzen) des Verfahrens hin und gibt Anregungen zu weiteren Arbeiten, deren Ergebnisse eine bessere Deutung der Intensitätsverhältnisse der Raman-Linien, die mit der Klopfestigkeit der Kohlenwasserstoffe zusammenhängen, ermöglichen.

J. J. Broeze, N. V. de Bataafsche Petroleum Mij. Delft, Holland, in Zusammenarbeit mit H. v. Driel u. L. A. Peletier: „*Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor*“.

Im Streit der Hypothesen bringen manche Forscher das Klopfen mit dem Auftreten von Detonationswellen in Verbindung — ihre Ausbildung kann bei Anwesenheit von Bleitetraäthyl nicht verhindert werden —, während andere das Klopfen auf eine Selbstzündung der Endgase zurückführen. Bei der direkten Beobachtung der Verbrennung ergeben sich Bilder, die teils auf Selbstzündung, teils auf Detonationswellen hindeuten. Die meisten Aufnahmen klopfender Verbrennungen zeigen einen oder mehrere Flammenkerne im Endgas. Die Geschwindigkeiten der Sekundärflammenfronten sind meist etwas größer als die der primären, doch durchweg unter Schallgeschwindigkeit. Die erwähnten Bilder von Detonationswellen lassen sich auf Simultanverbrennung zurückführen, bei der das Endgas zur gleichen Zeit verbrennt. Die Flammenbilder bieten keine Beweismöglichkeit für die Anwesenheit von Detonationswellen. Ebenso zeigen Ionisationsoscillogramme, daß die Detonationswellen im Rohr und die Klopfverbrennung im Motor grundsätzlich zu unterscheiden sind.

Die Beobachtungen des Klopfvorganges mittels Druckmesser sind erst seit der Verwendung elektrischer Instrumente mit Kathodenstrahlröhren zuverlässig geworden, wenn der Kanal zwischen Brenn- und Indicatorraum zur Vermeidung eines örtlichen, kurzandauernden Überdrucks (Kanaleffekt) kurz gehalten wird. Vortr. hat bei allen Klopfdruckmessungen niemals im Motor ein ausgesprochenes Detonationswellendiagramm erhalten können, sondern stets Diagramme, die auf eine schnelle Endverbrennung hindeuten. Die Tatsache, daß die Zündung im Dieselmotor in wenigen Kernen anfängt, kann als indirekte Unterstützung der „Kernselbstentzündungs“-Hypothese gewertet werden.

Vor dem Augenblick der Selbstzündung hat die Oxydation in der Nähe derjenigen Stellen, an denen die Selbstzündung auftritt, schon meßbare Geschwindigkeit. Die maximale Neigung zur Selbstzündung bei einer Gemischstärke von 1,5—1,8 rückt durch sekundäre Einflüsse von Temperatur und Druck nach ärmeren Gemischen. Als Folge der Selbstzündung kann eine sehr große Gesamtverbrennungsgeschwindigkeit entstehen mit Druckunterschieden im Verbrennungsraum, was wiederum zu Schwingungen verschiedener Motorenteile und der Gasmasse führt. Ein größerer Motor zeigt stärkere Schwingungen als ein kleinerer, da ein großer Verbrennungsraum schon bei geringerem Unterschied der primären und der Gesamtverbrennungsgeschwindigkeit in Schwingungen versetzt wird als der kleinere. Vortr. hat in einem Automobil- und einem Flugmotor die genannten Schwingungen durchgemessen, deren Lage sich als unabhängig von der Lage der Zündkerze und der Detonationsstelle erwies, während ihre Intensität von der Zündkerzenanordnung abhängig war. Die Folgen des Klopfens beruhen auf thermischen und mechanischen Ursachen und bewirken Leistungsverminderung.

Prof. Dr.-Ing. E. Schmidt, Inst. für Motorenforschung der Luftfahrtforschungsanstalt H. Göring, Braunschweig: „*Über das Klopfen und die damit verbundene Verminderung des Wirkungsgrades von Otto-Motoren*“.

Die Ursache des Klopfens sieht Vortr. darin, daß ein unverbrannter Rest durch Kompression auf Selbstzündungstemperatur kommt, und sich augenblicklich entzündet. Im Verbrennungsraum befinden sich jetzt Gebiete zweier verschiedener Drücke, deren Ausgleich zu den Klopfeschwingungen führt.

Bei Versuchen in einem Rohr werden den Enden der darin befindlichen Luftsäule durch einen hin und her gehenden Kolben Sinusschwingungen aufgezwungen, die innerhalb der Luftsäule in Schwingungen mit sehr steilen Wellenfronten übergehen. Diese müssen bei der Verbrennung, wenn die Flammengeschwindigkeit der Schallgeschwindigkeit nahe kommt, noch wesentlich höher werden. Die Klopfeschwingung besteht aus hin und her laufenden Druckwellen mit steiler Front und großen unstetigen Drucksprüngen, die an den Wänden des Ver-

¹⁾ Vgl. a. Goubeau, „Verwendung des Raman-Effektes zur Analyse organischer Gemische“, diese Ztschr. 51, 11 [1938], bzw. „von Treibstoffen“, ebenda 52, 541 [1939].

brennungsraumes immer wieder reflektiert werden. Diese Stoßwellen verursachen das Klopfgeräusch, dessen Klangfarbe wieder von der Motorbauart abhängt. Die Stoßwellen bedingen einen Wärmeverlust und das damit verbundene Absinken des Wirkungsgrades bei klopfendem Motor.

Dr.-Ing. habil. F. A. F. Schmidt, Inst. f. motor. Arbeitsverfahren u. Thermodynamik der DVL, Berlin: „*Gegenseitige Beeinflussung von Gemischbildung und Zündungsvorgang im Verbrennungsmotor.*“

Gute Gemischbildung im Zylinder ist erst gegen Ende der Verbrennung erwünscht, andernfalls kommen zu große Mengen gleichzeitig zur Umsetzung, wobei im Otto- wie im Dieselmotor Klopferscheinungen auftreten.

Der Zündung gehen Verdampfungs- und Anheizvorgänge voraus. Neben den hierdurch bedingten Temperatureinflüssen auf die Reaktionsgeschwindigkeit tritt durch die kinetische Energie der Flüssigkeit im Kraftstoffstrahl eine Luftbewegung auf. Ein weiterer, grundlegender Einfluß ist durch die Luftüberschusszahl der Zündstelle gegeben, der im Luftmangelgebiet in der Nähe des theoretischen Mischungsverhältnisses am größten ist.

Eine von der DVL entwickelte Versuchseinrichtung gestattet die Untersuchung des makroskopischen und mikroskopischen Aufbaues des Kraftstoffstrahls unter möglicher Annäherung an die motorischen Betriebsbedingungen. Photographische Aufnahmen von Kraftstoffstrahlen geben Aufschluß über Tropfengeschwindigkeit, Wirbelung, Ausbildung des Strahls an verschiedenen Stellen, Auflösungsgrade in verschiedener Entfernung von der Düse, Verlauf der Verdampfung, Verfolgung eines Tropfens im Hinblick auf seinen abnehmenden Durchmesser und Abhängigkeit der Strahllänge von der Flüchtigkeit und Zerstäubungsfähigkeit des verwendeten Kraftstoffes. Neben Einspritzungen in Luft von 1 at wurden auch Einspritzungen in eine Bombe (30–50 at, 500–800°) vorgenommen. Zur Betrachtung des Einspritzvorganges ohne Zündung wurde Stickstoff verwendet. Die mittleren Tropfengeschwindigkeiten und -durchmesser an verschiedenen Stellen des Strahls wurden errechnet oder abgeschätzt und durch Aufnahmen kontrolliert. Es läßt sich feststellen, daß beim Einsetzen der Zündung ein wesentlicher Teil des Kraftstoffes verdampft ist.

Für den Klopfvorgang im Otto- und Dieselmotor ist die mittlere Reaktionsgeschwindigkeit des Kraftstoffes mit dem Sauerstoff der Luft maßgebend. Zur Überprüfung der gemeinsamen Gesetzmäßigkeiten sind umfangreiche Auswertungen von Klopfuntersuchungen vorgenommen worden. Für die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von Druck und Temperatur sind diese Größen während des letzten Teils des Verdichtungsstages maßgebend; die Temperatur wird durch den Gemischbildungsvorgang beim Otto- und Diesel-Verfahren beeinflusst, u. zw. verschieden. Die für die dieselmotorische Zündung günstigste Gemischzusammensetzung wird an vielen Stellen des Strahls auftreten, weshalb der Zündverzögerung hier vom Mischungsverhältnis (bezogen auf die gesamte Kraftstoff-Luft-Menge) unabhängig ist. Beim Ottomotor ist die Gemischzusammensetzung des Verbrennungsraumes nur wenig unterschiedlich und daher von großem Einfluß auf die Klopfneigung. Durch geeignete Gemischschichtung ist eine Verminderung der Klopfneigung dadurch möglich, daß im Bereich des Zylinders ungünstige Zündverhältnisse geschaffen werden. In ähnlicher Weise wird bekanntlich durch Anbringung der Kerze in der Nähe heißer Teile vermieden, daß der zuletzt verbrennende Gemischanteil besonders heiß ist. Die Veränderung des Exponenten n der polytropen Verdichtung durch Ladelufttemperaturen wird nachgewiesen.

Zum Schluß faßt Vortr. zusammen: Die Tropfgeschwindigkeit im Strahl ist außerordentlich verschieden, ihre Größe und Geschwindigkeit an den verschiedenen Stellen des Strahls beweisen eine wesentliche Teilverdampfung zu Beginn des Zündungsvorganges. Die Einzeluntersuchung der Verdampfung und die Messungen des Zündverzuges und Klopfvorganges geben die Einflüsse der thermischen Vorgänge bei der Zündung im Motor wieder. Der rechnerische Vergleich aus Zündverzugs-messungen gewonnener Ergebnisse mit motorisch gemessenen Werten von Klopfvorgängen zeigt, daß sich aus den Eigenschaften eines Kraftstoffes, die im Zündverzögerung zum Ausdruck kommen, auch Schlüsse auf das Klopfverhalten ableiten lassen.

Prof. Dr.-Ing. A. Nägel, Maschinenlaboratorium der T.H. Dresden: „*Neuere Versuche über die Entstehung und den Ablauf der dieselmotorischen Verbrennung*“^{a)}.

Der Motorenforscher sieht die physikalischen Vorgänge bei der Zündung im Dieselmotor als kurz an und führt den Zündverzögerung in der Hauptsache auf chemische Ursachen zurück, während der physikalische Chemiker im Hinblick auf die Ablaufgeschwindigkeit von Reaktionen physikalischen Ursachen den Hauptanteil des Zündverzuges zuschreibt.

Zeitlupenaufnahmen zeigen, daß beim Zündzeitpunkt noch ein kompakter, wenig zerteilter Kern des eingespritzten Kraftstoffes vorliegt, es ist daher schwierig, die hier herrschende mittlere Tropfengröße anzugeben. Bei Einspritzung in eine Bombe (Luft von 32 ata, 380°) lassen sich Schlüsse über die Verdampfung von Dieselmotorkraftstoff ziehen. Bis zum Einsetzen der Zündung hat noch keine wesentliche Verbrennung stattgefunden. Bei Erhöhung der Lufttemperatur nimmt der Zündverzögerung ab und die Verdampfungsgeschwindigkeit zu, sie wächst aber nicht in dem Maße, wie der Zündverzögerung kleiner wird. Vor der Zündung tritt nur am Strahlrand eine Verdampfung ein. Bei Erhöhung der Einspritzmenge und -geschwindigkeit ist im Zündzeitpunkt weniger verdampft, die Verbrennung ist dann mit einer starken Aufweitung des Strahls verbunden, die bereits erkenntlich wird, bevor eine Flamme zu sehen ist.

Die Zündung setzt immer am Strahlmantel in Düsenhöhe, meist in mehreren Zündkernen gleichzeitig, niemals an der Strahlspitze ein. Die Flamme breitet sich jetzt mit einer Geschwindigkeit von über 50 m/s aus.

Bei Einspritzung des Kraftstoffes in eine Bombe ist die kurz vor der Zündung vorhandene Lufttemperatur leichter und genauer als im Motor zu ermitteln. Die Zusammenstellung der Meßwerte ergibt eine stärkere Temperatur- als Druckabhängigkeit des Zündverzuges, je kleiner er wird, um so größer wird die Verbrennungsdauer. Der Hauptteil des Kraftstoffes ist schon wenige tausendstel Sekunden nach Einspritzbeendigung verbrannt, während sich die vollständige Verbrennung des Restes ziemlich lange hinzieht. Die vom Vortr. gezeigten Zeitlupenaufnahmen lassen erkennen, daß sich die größte Verbrennungsgeschwindigkeit nicht mit der stärksten Flammenbildung deckt.

Prof. Dr.-Ing. K. Neumann, Inst. für Verbrennungskraftmaschinen u. techn. Wärmelehre, T.H. Hannover: „*Fort-schritte in der Erkenntnis dieselmotorischer Verbrennung*“^{a)}.

Um hohe spezifische Leistung zu erhalten, liegen die Drehzahlen und somit die Verbrennungsgeschwindigkeit im Fahrzeug- und Flugmotor hoch. Für die Auslösung des Verbrennungsvorganges ist der Luftzustand am Ende des Verdichtungsstages noch von Bedeutung. Während bei über 30 at Druck die Lufttemperatur nur noch mäßig ansteigt, nehmen Luftdichte und Sauerstoffkonzentration stark zu, wodurch Wärmeübertragung und Reaktionsgeschwindigkeit besser werden. Zur guten Ausnutzung der Ladeluft des Brennraumes muß der eingespritzte Kraftstoff gut verteilt werden. Je enger Tröpfchen größt- und kleinstmöglichen Durchmessers beieinanderliegen, um so gleichmäßiger ist die Zerstäubung.

Nach Einspritzung und Verdampfung des Kraftstoffes bilden sich aktivierte Molekeln und Gruppen aus, die beim Zusammenstoß mit Sauerstoff den Reaktionsbeginn einleiten oder die beim Zusammenstoß frei werdende Energie auf das ursprüngliche Reaktionsgemisch übertragen, um es zu erhöhtem Umsatz anzuregen (Kettenreaktion). Eine Verkürzung des Zündverzuges erfordert eine genügende Dampfbildung, die vom Einspritzgesetz und der Verdampfungsgeschwindigkeit an der Tropfenoberfläche abhängt. Der Zündverzögerung wird mit guter Zerstäubung (infolge genügend hohen Einspritzdruckes und rascher Dampfbildung) sowie bei hoher Verdichtung und genügend hoher Zylinderlufttemperatur kleiner. Die Leistung eines schnellaufenden Dieselmotors ist von der Verbrennungsgeschwindigkeit abhängig. Von der chemischen Seite aus lassen sich die Verbrennungsgeschwindigkeiten heraufsetzen, allerdings nicht ohne Maßnahmen, die den Aufbau der Maschinen verwickelter machen.

Zur Deutung der dieselmotorischen Verbrennung werden thermische, spektroskopische und kinetische Beobachtungen benutzt. Bei frei brennender Gasölflamme erfolgt in Düsenhöhe der Umsatz über CH -, C_2 - und OH -Radikale; bald geht dann

^{a)} Vgl. hierzu Neumann, „Verbrennung in der Dieselmachine“ diese Ztschr. 50, 225 [1937].

aber das Bandenspektrum in ein kontinuierliches über. In der Flamme zeigt sich dementsprechend der beherrschende Einfluß der Wassergasreaktion. Im Gegensatz hierzu zeigt das Spektrum der Verbrennung in laufender Maschine nur —C—C-Banden und die OH-Banden. Im Dieselmotor wie in freier Flamme erfolgt die Verbrennung stets über Radikale. Die Untersuchung der Zünd- und Verbrennungsverhältnisse wurde erfolgreich durch Messungen an einer periodisch arbeitenden Verbrennungskammer mit unveränderlichem Verbrennungsraum durchgeführt.

Die spektralphotometrisch und stroboskopisch ausgeführten Messungen an Dieselmotorenflammen zeigen, daß örtlich viel höhere Verbrennungstemperaturen auftreten als die aus der Gasgleichung berechneten mittleren Temperaturen der Ladung. Maschinenversuche ergaben endlich, daß die örtliche Flammentemperatur von der Luftüberschußzahl des Makrogemisches unabhängig ist. Eingehende Betrachtungen führen zu dem Schluß, daß für den Anfang der Verbrennung, für den ein Mikrogemisch mit hoher Sauerstoffkonzentration vorhanden ist, die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion, für die später einsetzende Haupt- und Nachverbrennung dagegen die physikalischen Vorgänge der Gemischbildung und Diffusion die ablaufenden Vorgänge beherrschen.

Dr.-Ing. W. Lindner, MAN, Augsburg: „Die Beurteilung der Kraftstoffe nach ihren Zünd- und Brenneigenschaften.“

Eine der Verdichtungszündung verwandte Erscheinung ist das Klopfen des Ottomotors. Durch das Fortschreiten der Flammenfront wird hier der Gemischrest verdichtet und infolge der damit verbundenen Temperaturerhöhung zur Selbstzündung mit steilem Druckanstieg gebracht. Die Verfahren zur Beurteilung von Dieselmotorkraftstoffen lassen sich grundsätzlich auch auf Ottokraftstoffe anwenden. Durch Ermittlung der Klopfgrenzen von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen erhält man im Hesselmannmotor eine eindeutige Zuordnung von Oktan- und Cetanzahlen der nach üblichen Prüfverfahren untersuchten Kraftstoffe.

Zur Bestimmung des Zündverzuges werden Druckmeß-, Ionisations- und optische Verfahren beschrieben. Die Messung der Klopfstärke geschieht immer noch mit dem Sprungstab-indicator. Es wurde schon versucht, die mittlere Zylinder-temperatur, bei der sich das Klopfen einstellt, als Maß für die Klopfstärke heranzuziehen. Der Abfall der Expansionslinie ist im Temperatur- und Druckverlauf bei klopfender Maschine steiler, was auf erhöhten Wärmeübergang auf die Wandungen hinweist. Die Flammenfrontumrisse sind bei nichtklopfender Verbrennung scharf. Ihre starke Auflösung beim Klopfen ist auf erhöhte Turbulenz der Gasmasse zurückzuführen, die einen erhöhten Wärmeübergang und damit gesteigerte Wandungstemperaturen bedingt. Die Ermittlung der mittleren Wandungstemperatur eignet sich für die Beurteilung der Klopfneigung von Kraftstoffen nicht, da verschiedenartige Kraftstoffe bereits bei nicht klopfender Maschine zu stark unterschiedliche Zylindertemperaturen liefern. Erfolgreicher dürfte die Bestimmung der Druck-Steigerungsgeschwindigkeit sein.

Nach einer Beschreibung und Kritik der üblichen, motorischen Prüfverfahren der Klopfestigkeit geht Vortr. auf die Messung des Zündverzuges über. Im Gegensatz zu den Oktanwerten befolgen Cetanzahlen der Gemische aus beliebigen Kraftstoffen ein additives Gesetz, da Dieselmotorkraftstoffe nicht die starke und verschiedenartige Temperaturempfindlichkeit der Ottokraftstoffe besitzen. Aus dem nicht linearen Verlauf der Zündverzugs-Cetanzahl-Kurven ergibt sich, daß die Cetanzahl keinen anschaulichen Maßstab darstellt, indem bei kleinen Werten die gleiche Steigerung, gemessen in den Cetanzahl-einheiten, für den Betrieb des Motors von sehr viel größerer Bedeutung ist als bei hohen Werten. Bei dem geringen Vorteil einer Cetanzahlsteigerung über 70 erscheint es zweckmäßig, die Kraftstoffe der Fischer-Synthese zur Verbesserung schwer zündender Kraftstoffe durch Zumischung zu verwenden, weil dadurch infolge der Gültigkeit des additiven Gesetzes ein viel größerer Gewinn hinsichtlich der Steigerung des Zündverzuges im niedrigen Cetanzahlbereich erzielt wird.

Nach einer Schilderung der Arbeitsbedingungen des Prüfmotors ergibt die Kritik der Meßgenauigkeit (die durch unvermeidliche Änderung der Gemischauflbereitung beeinträchtigt wird), daß in absehbarer Zeit weder in Deutschland noch in den Vereinigten Staaten mit einer Normung eines

bestimmten Verfahrens zur Prüfung der Dieselmotorkraftstoffe gerechnet werden kann.

Die mittleren Verdichtungstemperaturen der Ladung liegen um so niedriger, je früher eingespritzt wird, somit wächst der Zündverzug mit der Früheinspritzung. Vortr. nimmt seine Kraftstoffuntersuchungen in Abhängigkeit von der Belastung und damit dem Wärmezustand des Motors vor, die zu einer unterschiedlichen Zündverzugs-Temperaturabhängigkeit entsprechend der chemischen Beschaffenheit der Kraftstoffe führen. Den Zusammenhang zwischen Brenngeschwindigkeit und der chemischen Kraftstoffbeschaffenheit abzuleiten, ist wegen der im Dieselmotor sich zahlreich überlagernden Verhältnisse kaum möglich.

Eigene Bombenversuche zeigen die Zündverzugsabhängigkeit eines verbleiten Benzins und eines handelsüblichen Dieselmotorkraftstoffes von der Temperatur und dem Druck der Ladeluft. Für Otto- ergibt sich im Gegensatz zu Dieselmotorkraftstoffen eine erhebliche Zündverzögerung durch Senkung der Wandungstemperaturen. Der Vergleich von Zündverzugs-Temperaturkurven einiger α -Methyl-Cetan-Gemische mit Dieselmotorkraftstoffen zeigt, daß im Bereiche niedriger Temperaturen (also hoher Zündverzugs) für das Gasöl höhere Cetanzahlen gemessen werden müssen. Hiermit stimmen die nach dem Anlaß- oder Aussetzerverfahren ermittelten höheren Cetan- oder Cetanzahlen überein, da dabei im Bereiche großer Zündverzugs gearbeitet wird. Der nächstliegende Weg, die Beurteilung des motorischen Verhaltens von Kraftstoffen auf der physikalischen und chemischen Beschaffenheit und damit auf den entsprechenden analytischen Methoden aufzubauen, läßt bei den außerordentlichen Schwierigkeiten, die der chemischen Trennung der zahlreichen Kraftstoffinhaltsstoffe entgegenstehen, vorläufig keinen Erfolg für die Entwicklung eines zuverlässigen Prüfverfahrens erwarten.

Dr.-Ing. F. Neugebauer, Forschungsanstalt Prof. Junkers G. m. b. H., München-Allach: „Die Wünsche des Motorenbauers an den Treibstoff.“

Neben den Eigenschaften eines Kraftstoffes, die sein Zündverhalten bestimmen, ist noch eine Reihe anderer von Bedeutung. Um Brandgefahr zu verringern, sollten wenig flüchtige Teile anwesend sein, die überdies das Ladegewicht infolge zu früher Verdampfung herabsetzen. Allerdings muß das Luft-Kraftstoff-Gemisch auch angewärmt werden, damit alle Zylinder das gleiche Mischungsverhältnis erhalten. Hohe Flüchtigkeit des Kraftstoffes wirkt sich im Hinblick auf die Schmierölverdünnung günstig aus, so daß sie bei warmer Maschine unter diesen Umständen bald auf das gewöhnliche Maß absinkt. Nachteilig und gefährlich ist das Aufdampfen leichtflüchtiger Brennstoffe in den unter Unterdruck stehenden Teilen des Kraftstoffversorgungssystems, im Zusammenhang hiermit ist die Dampf-Volumen-Kurve von größerem Interesse als die Dampfdruckkurve.

Die Zähflüssigkeit soll nicht zu groß sein, um leichte Kraftstoffförderung zu unterstützen. Die unteren kg-Heiz- und l-Heizwerte müssen genügend hoch liegen. Bei tiefen Temperaturen dürfen keine Entmischungserscheinungen und Ausscheiden fester Bestandteile auftreten. Beim Lagern muß der Oktanwert konstant bleiben. Kraftstoff und Verbrennungsprodukte sollen weder Anlaß zu Korrosionen geben noch giftig oder geruchsbelästigend wirken. Leichte Filterbarkeit ermöglicht die Entfernung unvermeidlicher fester Fremdstoffe.

Beim gemischverdichtenden Motor wünscht sich der Motorbauer einen Kraftstoff mit recht großem Zündverzug, da sonst Klopfen auftritt, bemüht sich aber auch seinerseits, die Ladung möglichst kalt zu halten und durch Gestaltung des Verbrennungsraumes sowie Anordnung der Zündkerzen einen möglichst kurzen Weg der Flammenfront vorzusehen. Der Schiebemotor entspricht weitgehend diesen Richtlinien.

Die Erhöhung der Klopfestigkeit bietet steigende Überlademöglichkeit, damit wachsende Litterleistung und Steigerungsmöglichkeit des Verdichtungsverhältnisses mit verbundenem Absinken des Kraftstoffverbrauchs.

Beim Dieselmotorenverfahren ist hingegen ein geringer Zündverzug erwünscht. Man hofft nach erfolgter Voreinspritzung den Hauptteil eines weniger zündwilligen Kraftstoffes ruhig abbrennen zu können. Bewährt hat sich die Steuerung der Einspritzung. Besonders hohe Ansprüche an die Zündwilligkeit stellt der Dieselmotor beim Höhenflug.