

---

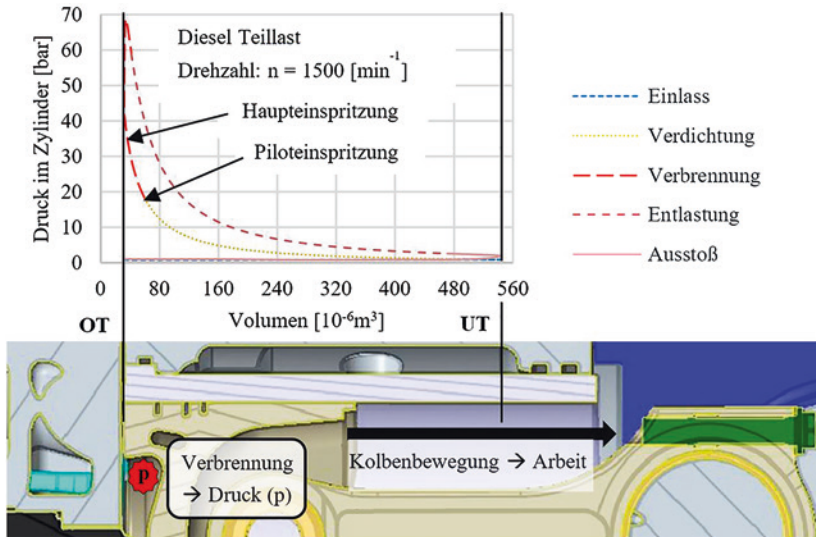
## 2.1 Prozessablauf

Kolbenmotoren nutzen den Sauerstoff aus der in den Brennraum eingeleiteten Luft, um die chemische Energie des ebenfalls zugeführten Kraftstoffs in Wärme umzusetzen, die anschließend, aufgrund der damit verbundenen Druckerhöhung, mittels Kolben in Arbeit umgewandelt wird.

Der Verbrennungsprozess im Brennraum eines Dieselmotors findet größtenteils gleichzeitig mit weiteren damit verbundenen Vorgängen statt: die Einspritzung des Kraftstoffs, der Zerfall des Einspritzstrahls in kleinen Tropfen, die Tropfenverdampfung, die Vermischung der Kraftstoffdampfanteile mit der sich im Brennraum befindenden Luft, die Selbstzündung des Luft-Kraftstoffgemisches, die Schadstoffbildung und die Wärmeübertragung zwischen Luft, Kraftstoff und Brennraumwänden (vgl. Abb. 2.1).

Die Prozessabschnitte gestalten sich wie folgt (Mollenhauer und Tschöke 2010; Merker und Teichmann 2014; van Basshuysen und Schäfer 2015; Heywood 1988):

- nach dem Einlass wird die Luft zunächst – entsprechend dem Verdichtungsverhältnis ( $\epsilon = 14\text{--}22$ ) – stark komprimiert um den für die Kraftstoffselbstzündung erforderliche Druck- und Temperaturwerte zu erreichen;
- vor Ende der Verdichtung, wird der Kraftstoff direkt in den Brennraum, in mindestens zwei Phasen eingespritzt (wie in dem Beispiel im Bild 2.1, als Piloteinspritzung und Haupteinspritzung);



**Abb. 2.1** Ablauf der Prozesse in einem Dieselmotor. (Eigene Darstellung)

- nach einem zeitlichen Verzug, bedingt durch die Zerstäubung und Verdampfung des Kraftstoffs, der Gemischbildung mit Luft und der Wärmeübertragung von der Luft zu dem Kraftstoff, erfolgt die Verbrennung, die durch drei Phasen charakterisiert ist (Merker und Teichmann 2014):
  - initiale vorgemischte Verbrennung. Die initiale Entflammung erfolgt bei Luft-Kraftstoff-Verhältnissen von  $\lambda \approx 0,6 \dots 1$  und erfordert geeignete Temperatur- und Druckbedingungen. Bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung wird der Kraftstoff allgemein in der Nähe des oberen Totpunktes eingespritzt, wenn die komprimierte Luft die entsprechenden Werte für Temperatur und Druck bereits erreicht hat.
  - mischungskontrollierte Verbrennung oder Diffusionsverbrennung, wobei die Wärmefreisetzung durch turbulente Vorgänge kontrolliert wird.
  - reaktionskinetisch kontrollierte Verbrennung wobei die Temperatur wegen der Expansion sinkt, wodurch auch die Häufigkeit der chemischen Reaktionen abnimmt.

- infolge der Direkteinspritzung des Kraftstoffs und der kurzen Dauer die der Gemischbildung zur Verfügung steht, entsteht im Brennraum eine zeitlich und räumlich starke Inhomogenität in Bezug auf:
  - Verteilung der Konzentration des Kraftstoffs in der Luft
  - Druck- und Temperaturverteilung
  - Verteilung des bereits verbrannten Gemisches.

|                        |                                     |   |
|------------------------|-------------------------------------|---|
| $\lambda \approx 0$    | Im Kern des Diesel-Einspritzstrahls | } Beispiele zur Inhomogenität des Verbrennungsprozesses |
| $0 < \lambda < \infty$ |                                     |   |
| $\lambda = \infty$     | In Zonen reiner Luft                |   |

Durch unverbrannte, flüssige Kraftstofftropfen, durch lokal zu hoch oder niedrige Luft-/Kraftstoffverhältnisse sowie durch lokale Extremtemperaturen während der Verbrennung entstehen dabei auch Schadstoffe:

- $\text{NO}_x$  (60–90 % NO – Stickstoffmonoxid und geringe Mengen von  $\text{NO}_2$  – Stickstoffdioxid) in Zonen mit Temperaturen über 2200 K und Luftüberschuss;
- Ruß und CO – Kohlenmonoxid – resultieren bei lokal geringeren Temperaturen, selbst bei ausreichendem Luftverhältnis, weil die weitere Oxidation von Kohlenwasserstoffe einfriert. Diese Reaktionen erfolgen häufig an „kalten“ Brennraumwänden;
- HC – Kohlenwasserstoffe – entstehen bei magerem Gemisch ( $\lambda > 1$ ) am äußerem Flammenrand, wenn die lokale Verbrennungstemperatur relativ gering wird. Einerseits bleibt der Kraftstoff dabei zum Teil unverbrannt, andererseits ist dadurch die exotherme Reaktion gehemmt, wodurch die Verbrennungstemperatur und damit wiederum die  $\text{NO}_x$ -Emission senken.

## 2.2 Direkteinspritzung

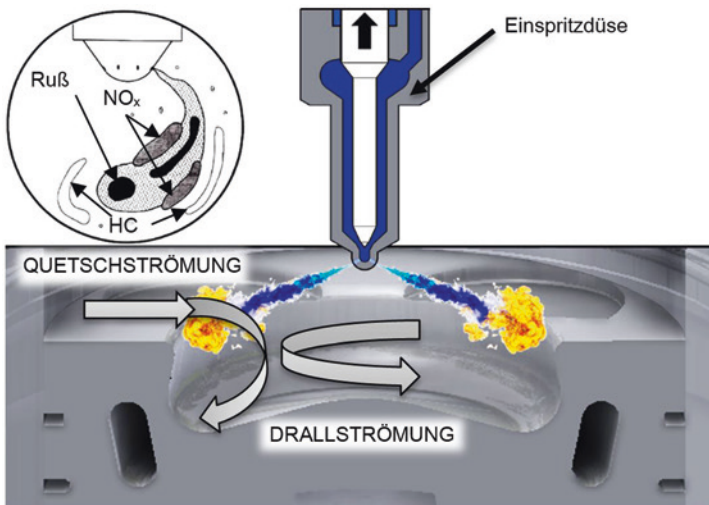
Die Dauer, die der Kraftstoffeinspritzung, Zerstäubung, Verdampfung und Vermischung mit der Luft zur Verfügung steht, ist sehr kurz. Beispielsweise, bei einer Drehzahl von  $6000 \text{ min}^{-1}$ , die bei Automobil-Dieselmotoren vorkommt, entsprechen  $36^\circ\text{KW}$  einer Millisekunde.

Demzufolge sind die Anforderungen an das Einspritzsystem besonders komplex: sehr feine Zerstäubung der eingespritzten Kraftstoffstrahlen zwecks rascher Verdampfung und Verteilung auf die Luft; Anpassung der Anzahl der Kraftstoffstrahlen und ihrer Winkel an die Brennraumgeometrie, um in einem möglichst

breiten Last/Drehzahlbereich optimale Gemischbildungsverhältnisse zu schaffen (vgl. Abb. 2.2). Dadurch sollen insbesondere hohe Kraftstoffkonzentrationen (zur Vermeidung von HC-Emissionen) und hohe lokale Verbrennungstemperaturen (zur Vermeidung von  $\text{NO}_x$ -Emissionen) vermieden werden.

Eine besonders wirksame komplementäre Maßnahme zur Schaffung solcher Verhältnisse ist die Einspritzung in mehreren Sequenzen pro Zyklus – 1 bis 5 mg, mit Abweichungen unter 0,5 mg, trotz der extrem kurzen Dauer für die Einspritzung der gesamten Einspritzmenge pro Zyklus. Die Anzahl der einzelnen Einspritzungen, der zeitliche Abstand dazwischen und die Menge pro Einspritzung sind wesentliche Elemente einer solchen Modulation des Einspritzvorgangs.

Die Geometrie der Durchflusskanäle der Einspritzdüse und der Verlauf von deren Öffnung beeinflussen maßgeblich nicht nur den Einspritzverlauf, sondern auch die Zerstäubung, Verdampfung und Verteilung des Kraftstoffs im Brennraum. Der aus einer Düsenbohrung austretende Einspritzstrahl erfährt zunächst einen Primär-Zerfall, charakterisiert durch flüssigen Mantel, Ligamente und Oberflächenwellen. Dieser Primär-Zerfall ist hauptsächlich vom Verhältnis der Zähigkeitskräften im Strahl zu der Oberflächenspannung der Tropfen und von der Turbulenz der Strömung abhängig.



**Abb. 2.2** Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffbildung bei Direkteinspritzung – schematisch. (Eigene Darstellung)

Die Bildung von Kraftstoff-Dampfblasen (Kavitation) in den Durchflusskanälen führt währenddessen zur Verengung des effektiven Durchflussquerschnittes, aber auch zur Senkung der Strömungsreibung. Dem primären folgt ein sekundärer Tropfenzerfall, der von den aerodynamischen Kräften zwischen Kraftstoff und Luft verursacht wird und mehrere Formen haben kann – von Schwingungs-, Blasen-, Keulen- und Scheibenzerfall bis hin zum katastrophalen Zerfall. Maßgebend sind dabei die Massenträgheit der Tropfen und ein weiteres Mal die Oberflächenspannung (Stan 2017; Stan 2015a; Baumgarten 2006).

Bei der in dieser Studie betrachteten Piloteinspritzung von Diesekraftstoff und Haupteinspritzung von Ethanol werden solche Eigenschaften beider Kraftstoffe wie Oberflächenspannung, Zähigkeit und Massenträgheit derer Tropfen entscheidend für die Schaffung einer kontrollierten Selbstzündung.

---

## 2.3 Gemischbildung

Die Bildung des Kraftstoff-/Luft-Gemisches ist innerhalb der modernen Dieselfverfahren insbesondere auf die Energie und auf die Führung des Kraftstoffes aufgebaut. In früheren Verfahren spielte die Energie und die Führung der Luftströmung in den Brennraum ebenfalls eine wichtige Rolle, als der Kraftstoffdruck viel geringer und seine Drehzahlabhängigkeit sehr stark waren (Baumgarten 2006; Stan 2002; Mollenhauer und Tschöke 2010).

Eine kontrollierte Swirl- oder Tumble-Bewegung der Luftströmung im Brennraum ist dennoch, nach wie vor, vorteilhaft für die Gemischbildung, jedoch weniger bedeutsam als der Beitrag der Kraftstoffströmung selbst.

---

## 2.4 Verbrennung

Die Entflammung des Gemisches aufgrund der Temperatur der komprimierten Luft bedingt einen Luftüberschuss über die stöchiometrisch bedingte Luftmasse hinaus. Das entsprechende Luft-/Kraftstoffverhältnis liegt üblicherweise zwischen 1,1 und 7 (van Basshuysen und Schäfer 2015).

Die Selbstzündung ist von Kettenreaktionen bestimmt. Die Verbrennung im Dieselfverfahren erfolgt, wie bereits erwähnt in drei Phasen: vorgemischte, mischungskontrollierte und reaktionskinetisch kontrollierte Verbrennung (Merker und Teichmann 2014).



<http://www.springer.com/978-3-658-19380-5>

Ethanoleinspritzung mit Selbstzündung im  
Dieselverfahren

Methode zur Senkung der NO<sub>x</sub>-Emission

Burnete, N.V.

2017, XI, 31 S. 12 Abb., 1 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-19380-5