

1 Einleitung und Zielsetzung

Der mittlerweile auf eine über 100-jährige Geschichte zurückblickende Verbrennungsmotor hat sich im Laufe des vergangenen Jahrhunderts zu der dominierenden Antriebsform des Individualverkehrs entwickelt. Als Antrieb für Personenkraftwagen haben sich Otto- und Dieselmotoren gleichermaßen durchgesetzt. Vor dem Horizont endlicher fossiler Ressourcen und der in den letzten Jahren gesellschaftlich intensiv geführten Diskussion über die Auswirkung von CO₂ als klimaschädigendes Gas, steht die Forderung nach sinkenden Verbrauchswerten bei gleichbleibender oder sogar gesteigerter Motorleistung. Diese Forderung wird durch die zunehmende Marktdurchdringung alternativer Antriebskonzepte verstärkt. In Abbildung 1.1 ist für die Jahre 2006 bis 2010 der Zuwachs an in Deutschland zugelassenen Fahrzeugen in Abhängigkeit des Antriebskonzepts dargestellt.

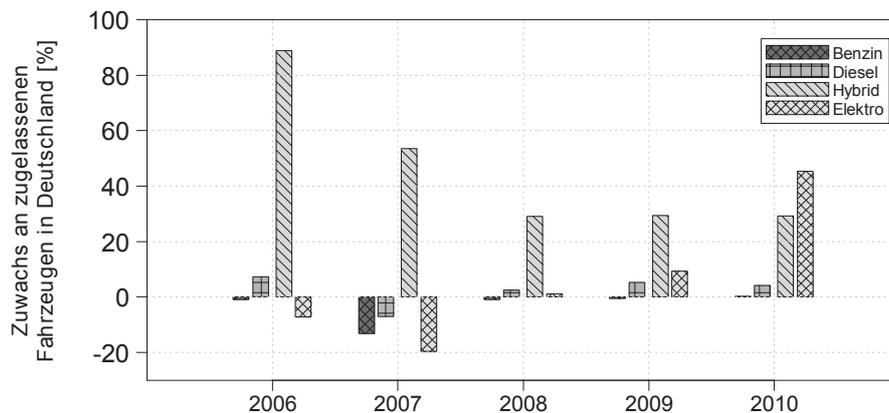


Abbildung 1.1: Zuwachs an in Deutschland zugelassenen Fahrzeugen von 2006 bis 2010 aufgetragen nach Antriebskonzepten¹

Während die Zulassungszahlen von konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben stagnieren bzw. rückläufig sind, verzeichnen Fahrzeuge mit hybridisiertem oder vollelektrischem Antrieb in jüngster Zeit zweistellige Zuwachsraten.

Durch die nach wie vor globale Verbreitung des verbrennungsmotorischen Antriebs in Fahrzeugen für den Personen- und Güterverkehr stellen die Schadstoffemissionen dieser Motoren vor allem in urbanen Ballungsräumen ein ernstzunehmendes

¹Quelle: Zulassungsstatistik des Kraftfahrtbundesamtes 2006 - 2010

1 Einleitung und Zielsetzung

Problem dar. Aus diesem Grund wird die bestehende Gesetzgebung zur Luftreinhaltung und der zu erfüllenden Abgasgrenzwerte ständig verschärft. Die Veränderung der legislativen Randbedingungen führt zu einer stetigen Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren. Im Falle des Ottomotors war im Zuge dieser Evolution die Einführung der Direkteinspritzung ein entscheidender Schritt, mit dem eine weitere Absenkung des Verbrauchs und der Emissionen ermöglicht wurde [95].

Neben den bislang limitierten Emissionskomponenten Kohlenmonoxid, Stickoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Partikelmasse wird mit den zukünftig geltenden Emissionsgrenzwerten für direkteinspritzende Ottomotoren ebenfalls ein Grenzwert für die emittierte Partikelanzahl eingeführt. Letzterer stellt eine entscheidende technologische sowie applikative Herausforderung für die Motorenentwickler dar.

Der Schlüssel zur Erfüllung dieser neuen Herausforderung ist die konsequente Weiterentwicklung des Brennverfahrens. Abbildung 1.2 zeigt die Einzelbestandteile auf, durch die das Brennverfahren eines Ottomotors definiert wird.

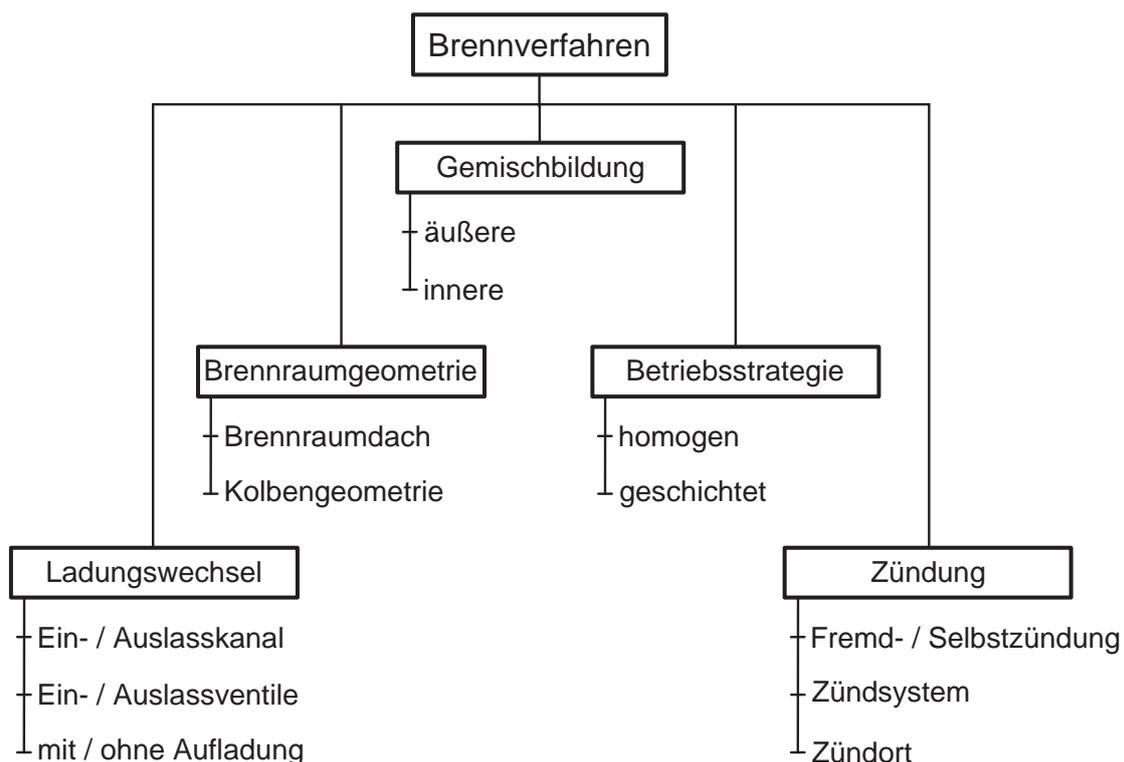


Abbildung 1.2: Übersicht über das Brennverfahren definierende Bausteine

Neben konstruktiven Faktoren wie zum Beispiel der Auslegung des Ladungswechsels über den Steuertrieb, die Nockenwellen und die Ein- und Auslasskanalgeometrie nimmt die Gemischbildung nicht nur in Abbildung 1.2 einen zentralen Platz bei der Optimierung des Brennverfahrens ein. Sie lässt sich primär in eine äußere und eine innere Gemischbildung unterteilen.

In zahlreichen Untersuchungen zur Partikelemission moderner Ottomotoren wiesen Fahrzeuge mit Saugrohreinspritzung (SRE) hinsichtlich der emittierten Partikelanzahl zum Teil um mehrere Größenordnungen niedrigere Werte auf als homogen oder geschichtet betriebene Motoren mit Benzindirekteinspritzung (BDE) [16, 17, 27, 38, 59, 72, 81]. Hinsichtlich dieser Ergebnisse stellt sich die Frage, ob und mit welchen Mitteln direkteinspritzende Ottomotoren in der Lage sind, die zukünftigen Anforderungen zu erfüllen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Gemischbildung und Verbrennung an einem turboaufgeladenen V8-Ottomotor im Hinblick auf die Erreichung der zukünftigen Emissionsgrenzwerte zu untersuchen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Um das Potential der Optimierungsschritte bewerten und die Ursachen der Unterschiede in den Partikelemissionen zwischen der äußeren und inneren Gemischbildung quantifizieren zu können, wurde der Versuchsträger sowohl mit einem Einspritzsystem zur Direkteinspritzung als auch zur Saugrohreinspritzung ausgestattet.

In Kapitel 2 werden daher sowohl die Grundlagen der äußeren als auch der inneren Gemischbildung erläutert. Im darauffolgenden Kapitel werden die Hintergründe der ottomotorischen Schadstoffemissionen mit dem gezielten Fokus auf die zukünftig reglementierten Partikelemissionen vorgestellt. In Kapitel 3 werden die Grundlagen der nulldimensionalen thermodynamischen Analyse, einem wichtigen Werkzeug bei der Beurteilung, dem Vergleich und der Optimierung von Brennverfahren, aufgezeigt. Anschließend erfolgt die Vorstellung des Versuchsaggregats in Kapitel 5, sowie die Vorstellung der erzielten Ergebnisse in Kapitel 6. Letztere sind in den Vergleich der äußeren und inneren Gemischbildung in Abschnitt 6.1, und die anschließende separate Optimierung beider Einspritzsysteme in Abschnitt 6.2 unterteilt. In Teilabschnitt 6.2.3 werden die Synergien des kombinierten Betriebs der Saugrohr- und Direkteinspritzung aufgezeigt und abschließend mit dem monovalenten Betrieb der Einspritzsysteme verglichen. In Kapitel 7 werden abschließend die gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick über zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.



2 Grundlagen der Gemischbildung im Ottomotor

Die wesentliche Aufgabe der Gemischbildung ist die Sicherstellung eines brennbaren Luft-Kraftstoff-Gemischs innerhalb des gesamten Betriebsbereichs. Je nach umgesetztem Brennverfahren weist die ottomotorische Gemischbildung bestimmte Eigenheiten auf. In der vorliegenden Arbeit wurde sowohl die innere als auch die äußere Gemischbildung untersucht. Die Gemeinsamkeiten sowie die Unterschiede zwischen der äußeren Gemischbildung unter Einsatz der Saugrohreinspritzung (SRE) und der inneren Gemischbildung durch Benzindirekteinspritzung (BDE) werden im Folgenden erläutert.

Die Gemischbildung von Ottomotoren lässt sich in vier Einzelvorgänge unterteilen [57]:

- Gemischdosierung
- Gemischaufbereitung
- Gemischtransport
- Gemischverteilung

Die grundlegenden Vorgänge der Gemischdosierung und der Gemischaufbereitung sind weitestgehend unabhängig vom Kraftstoffeinbringungsort. Sie werden daher für die äußere und die innere Gemischbildung gemeinsam vorgestellt. Der Gemischtransport und die Gemischverteilung unterscheiden sich zwischen der Saugrohreinspritzung und der Direkteinspritzung stark. Zum Einen aufgrund des unterschiedlichen Gemischbildungsorts und des dort herrschenden Zustands, zum Anderen aufgrund der unterschiedlichen Freiheitsgrade im Hinblick auf die zeitliche Zumesung. Aus diesem Grund wird der Gemischtransport und die Gemischverteilung im Zusammenhang mit den Gemischbildungsspezifika der Einspritzarten in den Abschnitten 2.3 und 2.4 gesondert betrachtet. Im folgenden Abschnitt wird die Gemischdosierung durch moderne Einspritzventile, die an sie gestellten Anforderungen und deren Kenngrößen vorgestellt.

2.1 Gemischdosierung

Die Gemischdosierung beschreibt die Zumessung von Luft und Kraftstoff in einem gewünschten Verhältnis. Das optimale Luft-Kraftstoff-Verhältnis läge vor, wenn der Motor die ihm abverlangte Leistung bei minimalem Verbrauch und bei gleichmäßigem und aussetzerfreien Betrieb liefern würde. In der Realität weicht das gewünschte Luft-Kraftstoff-Verhältnis jedoch mehr oder weniger von dem beschriebenen, optimalen Verhältnis ab, da es neben minimalem Verbrauch noch weitere Forderungen zu erfüllen gilt [40]. Diese können maximale Leistung, Einhaltung der vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte, Anreicherung im Start und während des transienten Motorbetriebs sowie der Schutz von Bauteilen sein. Ebenso erlauben die Gemischbildner in Abhängigkeit ihrer Ausführung nicht jede beliebige Zumessung.

In modernen Ottomotoren kommen, sowohl bei der Einspritzung in das Saugrohr, als auch bei der Direkteinspritzung in den Zylinder, ausschließlich Gemischbildner zum Einsatz, die sich der Druckzerstäubung bedienen [25]. Dabei hat sich bei der Saugrohreinspritzung aufgrund der stetig steigenden Anforderungen an die Schadstoffemissionen die Ausstattung eines jeden Zylinders mit einem eigenen Einspritzventil (Injektor) durchgesetzt. Für die Benzindirekteinspritzung stellt ein separates Einspritzventil für jeden Zylinder eine notwendige Grundvoraussetzung dar. Die Betätigung der Einspritzventile im Saugrohr erfolgt heute ausnahmslos elektromagnetisch. Im Falle der Einspritzventile für die Benzindirekteinspritzung kommen neben der in der vorliegenden Arbeit untersuchten elektromagnetischen Aktuatoren zudem piezoelektrisch betätigte Einspritzventile für moderne strahlgeführte Schichtbrennverfahren mit hohen Anforderungen an die Zumessgenauigkeit zum Einsatz [78, 83].

In Abbildung 2.1 ist sowohl das Schnittbild eines Hochdruckeinspritzventils (HDEV) für die Benzindirekteinspritzung als auch eines Einspritzventils (EV) für die Saugrohreinspritzung dargestellt. Die Illustration verdeutlicht den ähnlichen Aufbau und die identische Arbeitsweise beider Einspritzventile. Die elektrische Ansteuerung erzeugt ein magnetisches Feld in der Spule und damit eine axiale Kraft auf den Anker, welcher wiederum die Düsennadel öffnet. Die öffnende Nadel gibt den Durchfluss von Kraftstoff durch den Ventilsitz und die Düsenbohrung(en) frei.

Die Grundanforderungen, denen ein Saugrohr-Einspritzventil genügen muss, lassen sich in Anlehnung an [97] in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Genaue Kraftstoffzumessung
- Schneller Öffnungs- und Schließvorgang

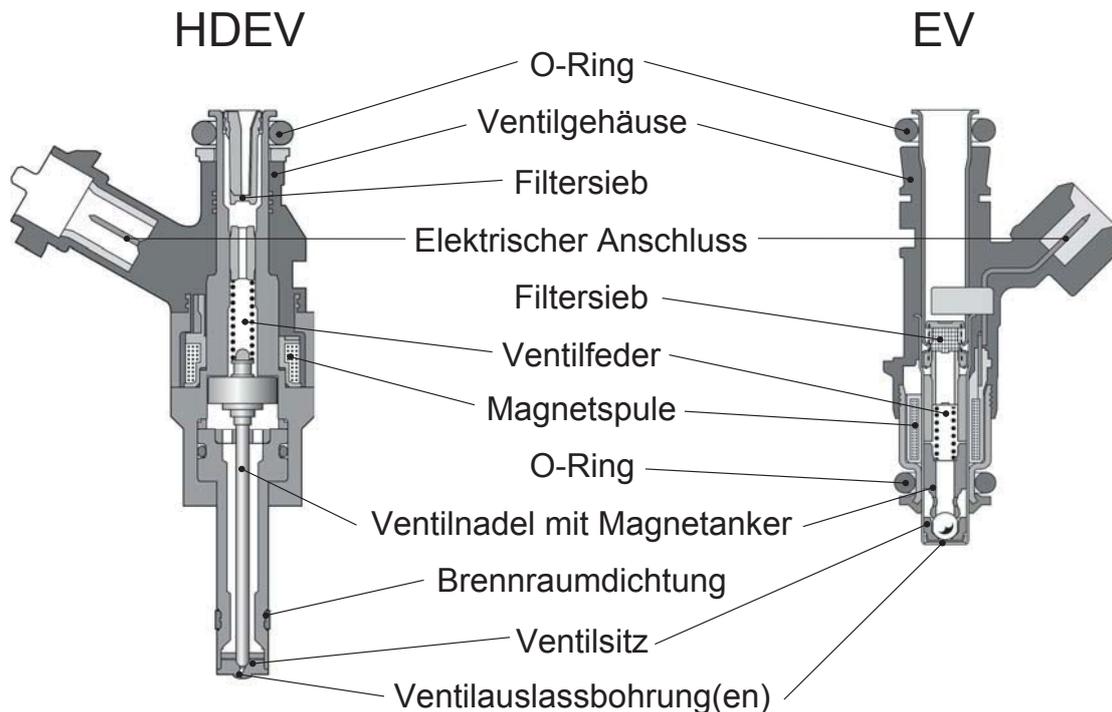


Abbildung 2.1: Schematische Schnittdarstellung eines Hochdruckeinspritzventils (HDEV) [76] und eines Einspritzventils (EV) zur Saugrohreinspritzung [75]

- Geringe zyklische Schwankung der eingespritzten Menge und der Sprayqualität („Shot-to-Shot“-Streuung)
- Geeignete Sprayauslegung für die jeweilige Anwendung, z.B. räumliche Strahlausrichtung und Zerstäubungsgüte
- Großer dynamischer Betriebsbereich
- Gute Linearität bei kleinem dynamischen Durchfluss
- Gute Resistenz gegen Ablagerungen (Verkokung)
- Vermeidung von Nadelprellen beim Schließen

Diese Anforderungen gelten ebenfalls für Hochdruckeinspritzventile. Zusätzlich kommen jedoch nach [98] noch einige anwendungsspezifische Forderungen für den Einsatz im Brennraum hinzu:

- Weiter verbesserte Zerstäubung
- Erweiterter Dynamikbereich
- Resistenz gegen hohe Temperaturen
- Anwendung bei höheren Drücken (Sowohl Einspritz- als auch Brennraumdruck)

Die Beschreibung der Eigenschaften eines Einspritzventils, sowohl zur Saugrohr- und zur Direkteinspritzung, kann über spezielle Kenngrößen geschehen. Diese Kenngrößen machen es möglich das Einspritzventil auf seine Eignung für den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen, eine Auslegung vorzunehmen oder Einspritzventile verschiedener Typen oder Hersteller miteinander zu vergleichen.

Eine der wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung eines Einspritzventils ist der stationäre Durchfluss Q_{stat} bei einem gegebenen Differenzdruck Δp . Der stationäre Durchfluss eines Saugrohreinspritzventils ergibt sich aus der maximal benötigten Einspritzmenge im Nennleistungspunkt und einer theoretisch maximal zulässigen Ansteuerdauer von 720 °KW. Im realen Motorbetrieb sollte eine solch lange Einspritzzeit aus Emissionsgründen vermieden werden. Ein Richtwert für die maximal zulässige Ansteuerdauer lässt sich mit etwa 500 °KW angeben [25]. Bei Hochdruckeinspritzventilen muss die Kraftstoffmenge in einem kürzeren Zeitfenster zugemessen werden. Dies wird zum Einen durch höhere Einspritzdrücke und zum Anderen durch einen höheren stationären Durchfluss realisiert. In erster Näherung steht bei einem homogenen Brennverfahren für die Einspritzung der Zeitbereich der Ansaugphase mit etwa 180 °KW zur Verfügung. Auch hier sollte der Injektor nicht auf dieses maximal mögliche Zeitfenster ausgelegt werden, da in diesem Fall sämtliche Freiheiten in der Wahl des Einspritzzeitpunkts verloren wären.

Um die Durchflusseigenschaften eines Injektors zu beschreiben, reicht die Angabe des stationären Durchflusses alleine nicht aus. Unterschiede zwischen verschiedenen Injektortypen gleichen Durchflusses ergeben sich im Wesentlichen durch den individuellen Aufbau des Injektors und den damit verbundenen elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Hierdurch wird speziell das Öffnungs- und Schließverhalten des Injektors beeinflusst und damit die minimal realisierbare Einspritzmenge bei kurzen Ansteuerimpulsen. Elektrische Unterschiede ergeben sich durch die Ausführung und Dimensionierung der magnetischen Spule zum Öffnen der Düsennadel. Die mechanischen Unterschiede ergeben sich durch die Ausführung der Düsennadel und des Ankers selbst, der Feder zum Schließen des Injektors und des sich daraus ergebenden Feder-Masse-Systems (vgl. Abbildung 2.1).

In Abbildung 2.2 ist der Öffnungs- und Schließvorgang der Düsennadel eines Saugrohreinspritzventils über der Zeit dargestellt. Nach Anliegen des Ansteuerimpulses von 12 V beginnt sich, resultierend aus der notwendigen elektrischen Magnetisierung der Injektorspule, die Düsennadel erst nach einer gewissen Verzugszeit aus dem Ventilsitz zu heben. Die Masse der Nadel bewirkt anschließend eine mechanisch bedingte Verzugszeit. Bei Erreichen des maximalen Ventilhubes ist der Öffnungsvorgang abgeschlossen. Nach dem Ende des Ansteuerimpulses tritt durch den Abbau des Magnetfelds in der Injektorspule und der mechanischen Trägheit des Feder-Masse-Systems erneut ein Verzug auf, bis die Düsennadel wieder vollständig geschlossen ist. Die Ansteuerung von Hochdruckeinspritzventilen verläuft

prinzipiell ähnlich wie bei der Saugrohreinspritzung. Der Ansteuerimpuls wird jedoch durch die gesteigerten Anforderungen an ein schnelles Öffnen und Schließen bei hohen Drücken von einer speziellen Endstufe im Motorsteuergerät moduliert. Die Ansteuerung erfolgt auf einem höheren Spannungsniveau (z.B. 60 V) und es werden individuell auf das Einspritzventil zugeschnittene Stromprofile erzeugt [76]. Aufgrund der Verzögerung beim Aufbau des Magnetfelds in der Spule gibt es bei der Saugrohreinspritzung und der Benzindirekteinspritzung Ansteuerkonzepte, die mit Hilfe einer Vormagnetisierung der Spule diese Verzögerung zu minimieren versuchen [84, 76].

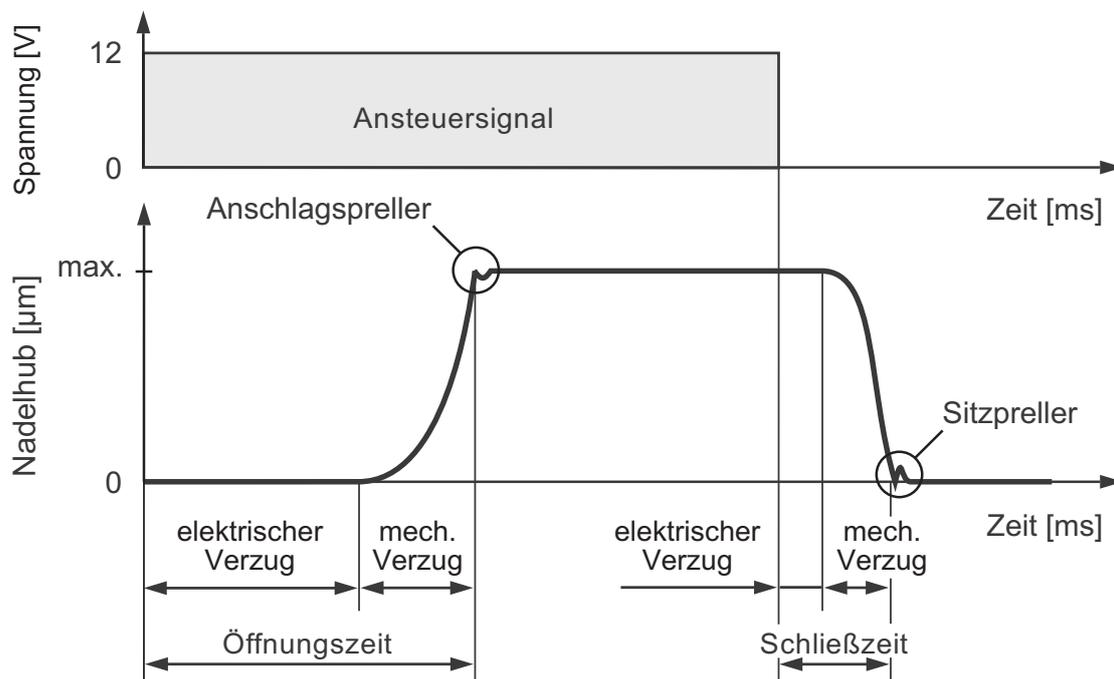


Abbildung 2.2: Öffnungs- und Schließcharakteristik eines Saugrohreinspritzventils in Anlehnung an [25]

Die Charakterisierung der dynamischen Durchflusseigenschaften eines Injektors erfolgt über eine Durchflusskennlinie. Bei vorgegebenem Differenzdruck und einer konstanten Ansteuerfrequenz f_a wird die Ansteuerdauer $t_{i,e}$ ² des Injektors schrittweise bis zum Erreichen der sich aus der Ansteuerfrequenz ergebenden Periodendauer T erhöht und der resultierende dynamische Durchfluss Q_{dyn} des Injektors gemessen. Dieses Vorgehen wird durch die beiden folgenden Abbildungen für ein Saugrohreinspritzventil beschrieben. Die Vorgehensweise bei Hochdruckeinspritzventilen ist ähnlich.

²Um die Eindeutigkeit zu wahren, wird die Ansteuerdauer des Hochdruckeinspritzventils mit t_i und die Ansteuerdauer des Saugrohreinspritzventils mit t_e bezeichnet

2 Grundlagen der Gemischbildung im Ottomotor

In Abbildung 2.3 ist die Erhöhung der Ansteuerdauer schematisch für eine Ansteuerfrequenz von 100 Hz und drei diskrete Einspritzzeiten t_e dargestellt.

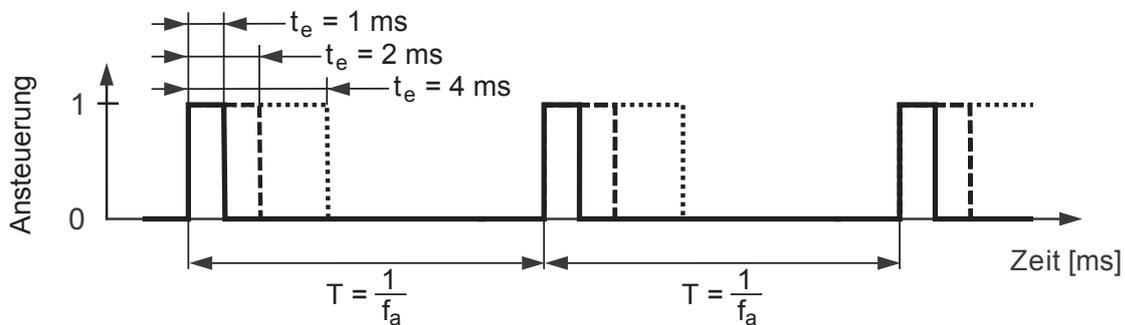


Abbildung 2.3: Sukzessive Erhöhung der Ansteuerdauer eines Einspritzventils für die Ermittlung einer Durchflusskennlinie

Abbildung 2.4 zeigt die sich aus der Variation der Ansteuerdauer ergebende Durchflusskennlinie. Ergänzend ist eine, nach dem Vorgehen aus [84] bestimmte und durch die gemessene Durchflusskurve gelegte Regressionsgerade abgebildet. Diese Gerade stellt den idealen Zusammenhang zwischen der Ansteuerdauer und dem dynamischen Durchfluss dar. Speziell an den Enden der Durchflusskurve wird deutlich, dass das reale Injektorverhalten von der idealisierten Vorstellung eines linearen Zusammenhangs zwischen Ansteuerdauer und dem resultierenden Durchfluss abweicht. Dieses Verhalten wird durch die zuvor beschriebene endliche Öffnungs- und Schließzeit der Injektoren hervorgerufen. In einem weiten Bereich zeigt der Injektor ein lineares Verhalten (LFR - Linear Flow Range). Begrenzt wird der Betriebsbereich des Injektors durch die minimale (LFR_{\min}) und maximale (LFR_{\max}) Einspritzmenge. Berechnet werden beide Größen in der Regel durch die Definition einer maximal zulässigen Abweichung von der Regressionsgeraden. Im unteren Teil der Abbildung 2.4 ist die Abweichung zwischen dem gemessenen Durchflussverlauf und der Regressionsgeraden dargestellt. Als maximal zulässige Abweichung wurde nach [84] die Schwelle von 5 % festgelegt. Durch die Schnittpunkte der Differenzkurve und der festgelegten Schwelle werden die Grenzen des linearen Durchflussbereichs (LFR) berechnet. Ein weiteres Kriterium kann die maximal zulässige Abweichung zwischen dem Verhalten einer Schar von Einzelinjektoren sein, um Streuungen im Produktionsprozess des Injektors zu berücksichtigen.

Wird der Injektor kürzer als $t_{e_{\min}}$ angesteuert, so öffnet er nicht oder nur teilweise. Bei nicht vollständiger Öffnung der Düsenadel wird der Injektor im ballistischen Bereich betrieben. In diesem Bereich weist der Injektordurchfluss einen nichtlinearen Zusammenhang von der Ansteuerdauer und damit eine erhöhte Schwankung der eingespritzten Kraftstoffmenge von Zyklus zu Zyklus („Shot-to-Shot“-Streuung) auf.