



1 Einleitung und Aufgabenstellung

„Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und diese Kohle-Teer-Produkte von heute.“

Rudolf Diesel, Patentschrift 1912

Dieses Zitat, das von Rudolf Diesel vor fast genau 100 Jahre verfasst wurde und seine visionäre Sichtweise zur Lösung technischer aber auch sozialer Probleme verdeutlicht, ist in der heutigen Diskussion über moderne Antriebskonzepte mit alternativen Energieträgern von hoher aktueller Bedeutung. Die Forderung nach klimaschonenden, effizienten und emissionsarmen Verbrennungsmotoren wird vor allem vor dem Hintergrund stark wachsender Wirtschaftsmärkte aus dem asiatischen und indischen Raum und der zunehmenden Verknappung fossiler Energieträger immer wichtiger.

Im Hinblick auf eine hohe Effizienz nimmt der Dieselmotor gegenüber dem Ottomotor eine Vorreiterstellung ein. Wirkungsgrade von mehr als 40 Prozent führen zu einem breiten Einsatzbereich dieses Motoraggregates weit über den mobilen Sektor hinaus. Hinsichtlich hoher Leistungsdichten bei kleinen Motorabmessungen, Geräuschminimierung sowie Gewichtsreduktion hat der Dieselmotor in den letzten zwei Jahrzehnten Fortschritte erzielt, so dass heute auch im Premiumbereich von Personenkraftwagen dieses Aggregat verstärkt eingesetzt wird. Dies führte in jüngerer Vergangenheit unter anderem zu einer starken Zunahme an Diesel-Pkws auf dem deutschen und europäischen Markt, obwohl eine höhere Besteuerung, steigende Kraftstoff- sowie höhere Anschaffungskosten des Aggregates diesem Trend eigentlich entgegenwirken müssten.

Unterschiedliche technische Verbesserungen am Dieselmotor haben zu diesen Entwicklungen geführt. Der Übergang von Kammer- auf Dieselmotoren mit Direkteinspritzung hat vor allem die Effizienz des Motors erhöht. Mit der Abgasturboaufladung konnten das Drehmoment, die Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. Vor allem im Bereich der innermotorischen Maßnahmen und hier insbesondere der Gemischbildung eines Dieselmotors mit Direkteinspritzung wurden weitere Fortschritte erzielt. Durch Einführung der Common-Rail Einspritztechnik konnte die Zahl an Freiheitsgraden hinsichtlich der Gestaltung des Einspritzvorgangs erhöht werden, um damit die Emissionen, die Laufruhe und den Verbrauch weiter zu verbessern. Die Anwendung von rückgeführtem Abgas im Brennraum (AGR) trug zur Reduzierung der Stickoxidemissionen bei. Mit dem Einsatz von außermotorischen Maßnahmen, wie z.B. Partikelfilter, Oxidationskatalysator und DeNO_x-Systeme, konnten zwar Partikel- und Stickoxidemissionen reduziert werden, jedoch mussten Einbuße in der Effizienz des Motoraggregates und Mehrkosten in Kauf genommen werden.

Vor dem Hintergrund zukünftiger europäischer, amerikanischer und japanischer Emissionsrichtlinien müssen diese Maßnahmen weiter verbessert werden. Vor allem zur Reduzierung der Ruß- und Stickoxidemissionen bei gleichzeitig neutralem bzw. reduziertem Kraftstoffverbrauch sind weitere Maßnahmen erforderlich. Großes Entwicklungspotenzial bietet hier der Einspritzdruck, mit dem die Gemischbildung und damit auch die Verbrennung und Emissionsentstehung stark beeinflusst wird. Durch die Erhöhung des Einspritzdruckes



und der damit verbundenen Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Einspritzdüse wird die Größe der Kraftstofftropfen reduziert und die Turbulenz im Spray erhöht. Durch diese stärkere Zerstäubung des Kraftstoffes kann mehr Luft durch das Spray aufgenommen und die stark heterogene Verteilung von Luft und Kraftstoff, die aufgrund der inneren Gemischbildung und der damit verbundenen kurzen Gemischbildungszeiten im Brennraum herrscht, reduziert werden. Eine Verbesserung der Gleichverteilung von Luft und Kraftstoff bedeutet eine optimierte Umsetzung des Kraftstoffes in mechanische Energie und damit eine Effizienzsteigerung des Verbrennungsprozesses. Darüber hinaus kann durch die Reduzierung von Bereichen mit einer heterogenen Verteilung von Luft und Kraftstoff die Entstehung von Rußemissionen reduziert werden. Mit der Leistungssteigerung durch den höheren Einspritzdruck erhöhen sich die Spitzentemperaturen während der Verbrennung und führen zu erhöhten Stickoxidemissionen. Mit Hilfe der Rückführung von Abgas in den Verbrennungsprozess (Abgasrückführung, AGR), d.h. über die Reduzierung des Sauerstoffanteils im Frischgas, können die Verbrennungstemperaturen und damit die Stickoxidemissionen abgesenkt werden. Somit ergibt sich aus der Erhöhung des Einspritzdruckes sowie der AGR-Rate eine effektive Maßnahme zur weiteren Emissionsreduzierung des Dieselmotors bei reduziertem Kraftstoffverbrauch.

Um der zunehmenden Verknappung fossiler Rohstoffe begegnen zu können, wird der Einsatz alternativer Kraftstoffe im automobilen Bereich zunehmend angestrebt. Die Bandbreite dieser Kraftstoffe reicht von Biokraftstoffen der ersten Generation, wie z.B. Pflanzenöl oder auch Raps-Methyl-Ester über synthetische Kraftstoffe auf fossiler Basis (Gas to Liquid- und Coal to Liquid) bzw. Biobasis (Biomass to Liquid) bis hin zu Kraftstoffen die z.B. aus Algen produziert werden.

Die Kombination aus einer Optimierung der Gemischbildung über die Erhöhung des Einspritzdruckes und des Einsatzes von alternativen Kraftstoffen bietet somit ein effektives Mittel, der Forderung nach klimaschonenden, effizienten und emissionsarmen Antriebsaggregaten entscheidend nachzukommen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden das Gemischbildungsverhalten sowie die Verbrennung von alternativen Kraftstoffen, die mit einem extrem hohen Einspritzdruck eingespritzt werden, untersucht. Ergebnisse zu solchen Höchstdruckuntersuchungen sind vor allem für konventionelle Kraftstoffe und im Nfz-Bereich bekannt. Alternative Kraftstoffen, die mit einem Einspritzdruck von mehr als $p_{\text{Einspr}}=2000$ bar eingespritzt werden, sind bisher kaum analysiert worden.

In dieser Arbeit soll daher das Potenzial der Emissions- und CO₂-Reduzierung von höchstdruckeingespritzten, alternativen Kraftstoffen an einem Einzylinder-Forschungsmotor für Diesel-Pkw gezeigt werden. Dazu wurde an unterschiedlichen Betriebspunkten der Einfluss des hohen Einspritzdruckes auf Diesel- sowie drei weiteren alternativen Kraftstoffen untersucht. Neben den Motoruntersuchungen wurde auch das Spraybild in einer Hochdruckkammer in Abhängigkeit von Einspritzdruck und Kraftstoffart analysiert. Hier wurden mittels der Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen Aussagen über makroskopische Spraygrößen, wie z.B. der Penetration und dem Sprayvolumen getroffen. Untersuchungen zu mikroskopischen Sprayparametern, wie z.B. dem Tropfendurchmesser und der –geschwindigkeit wurden mittels der Phasor-Doppler-Anemometrie (PDA)



durchgeführt. Schließlich soll in dieser Arbeit das hydraulische Einspritzverhalten des Höchstdruckinjektors anhand Einspritzraten-, -mengen- sowie Nadelhub- und Düsenraumdruckuntersuchungen beschrieben werden. Die Erkenntnisse aus diesen hydraulischen sowie Druckkammeruntersuchungen helfen dabei entscheidend, die Gemischbildung der alternativen Kraftstoffe bei Variation des Einspritzdruckes zu charakterisieren.

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse wurden im Teilprojekt „Extreme Hochdruckeinspritzung alternativer Kraftstoffe für Dieselmotoren“ des Verbundprojektes Competence in MObility (COMO) an der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU) erarbeitet. Der als Initiative der ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten der OVGU gegründete Forschungsschwerpunkt „Automotive“ besteht aus 13 Instituten, die insgesamt 4 Fakultäten angehören und die automobilen Kompetenz an der OVGU bündeln und stärken sollen. Der Schwerpunkt dieser Forschungsprojekte, die sich in die Projektbereiche „Energiewandlung und Antriebssysteme“, „Sicherheit und Komfort“ sowie „Virtual Engineering“ aufteilen, liegt auf dem Gebiet der Antriebstechnik, dem Fahrkomfort und Sicherheit bis hin zu effektiven Produktentwicklungen von automotiven Systemen.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

Wie **Abbildung 2.1** zeigt, hängt das motorische Verhalten, in Bezug auf Leistung, Verbrauch, Emissionen und schließlich Geräusch von unterschiedlichen Faktoren ab.

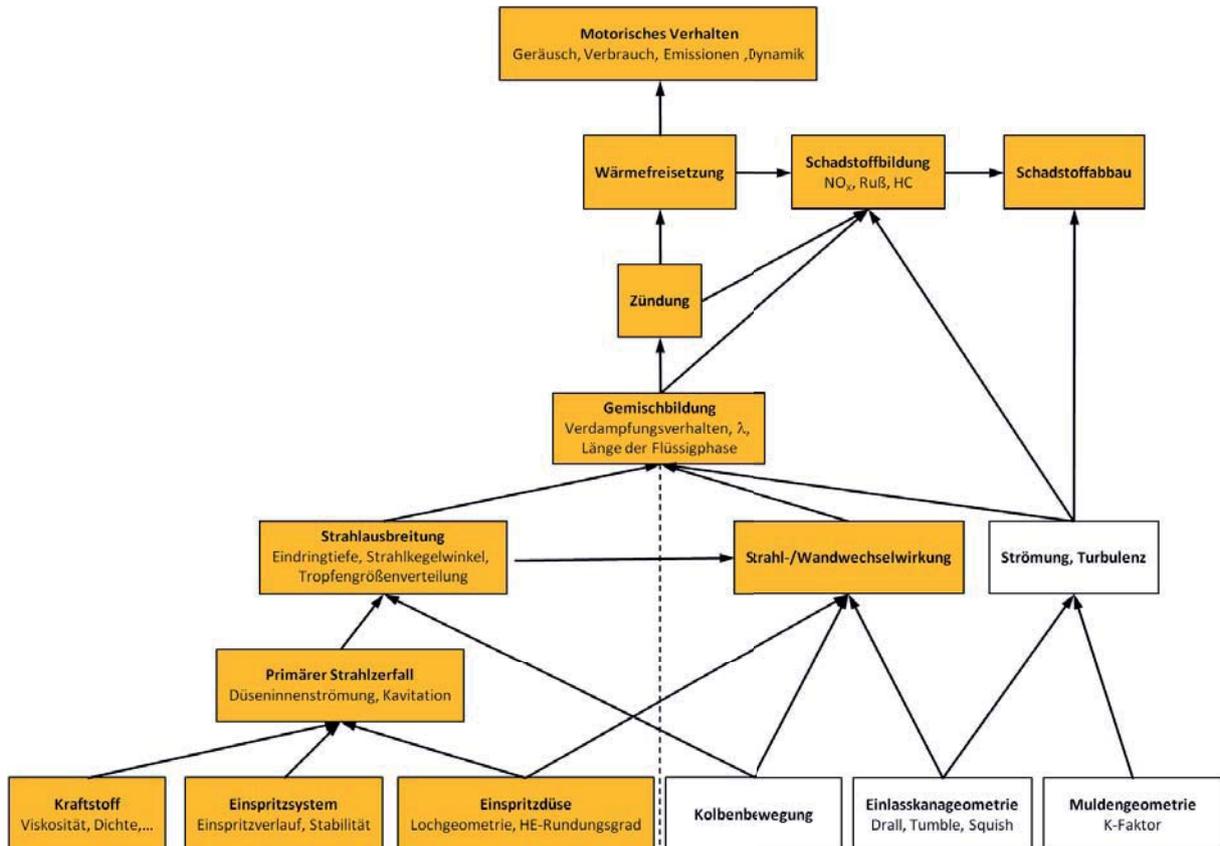


Abbildung 2.1: Phasen der dieselmotorischen Gemischbildung, Zündung und Verbrennung; mit Markierung (orange) der für diese Arbeit relevanten Phasen, nach [Tsc11]

Während die linke Hälfte die Beeinflussung der Art, Einbringung und Aufbereitung des Kraftstoffes beschreibt, werden im rechten Teil vor allem die Einflüsse auf die Luftbewegung dargestellt. Beide Bereiche münden in der Gemischbildung und gehen über die Zündung in die Verbrennung über. Im Verlauf dieses Kapitels sollen die einzelnen Einflüsse der dieselmotorischen Gemischbildung, Verbrennung und Emissionsbildung ausführlich diskutiert werden. Dabei wird zu **Abbildung 2.1** eine leicht abgeänderte Struktur verwendet: Die Strahlausbreitung sowie die Interaktion von Luft und Kraftstoff mit dem Kolben werden unter dem Begriff Gemischbildung zusammengefasst. Daneben wird, vor allem bei den einzelnen Einspritzkomponenten, auch der derzeitige Stand der Technik dargestellt.

Der Einfluss des Einspritzdruckes unter dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen auf den motorischen Betrieb eines Dieselmotors stellt den Schwerpunkt der Untersuchungen in dieser Arbeit dar. Aus diesem Grund soll, sofern möglich, der Einfluss eines hohen Einspritzdruckes bzw. variierender Kraftstoffkennwerte auf die hier diskutierten Teilaspekte der Gemischbildung, Verbrennung und Emissionsbildung dargestellt werden.



2.1 Kraftstoffaufbereitung und -einbringung

Der von Rudolf Diesel 1897 konstruierte Versuchsmotor mit Selbstzündung funktionierte noch mit einer indirekten Form der Kraftstoffeinbringung in den Brennraum. Obwohl die Direkteinspritzung in Diesels Patentschrift angestrebt wurde, siehe [Mel78], konnte mit den damaligen technischen Mitteln nur mit Hilfe einer Druckluftanlage der Kraftstoff „eingespritzt“ werden, [Mol07]. Es sollten noch etwa 90 Jahre Entwicklungsgeschichte folgen, bis die Direkteinspritzung (Direct Injection, DI) im Pkw-Bereich Serienreife erreichte. Bis dahin wurde der Kraftstoff in Pkw-Dieselmotoren indirekt (Indirect Injection, IDI) über Kammern in den Brennraum eingespritzt. Dabei wird bei den IDI-Verfahren für Pkw-Dieselmotoren zwischen dem Vor- und dem Wirbelkammerbrennverfahren unterschieden, siehe **Abbildung 2.2**.

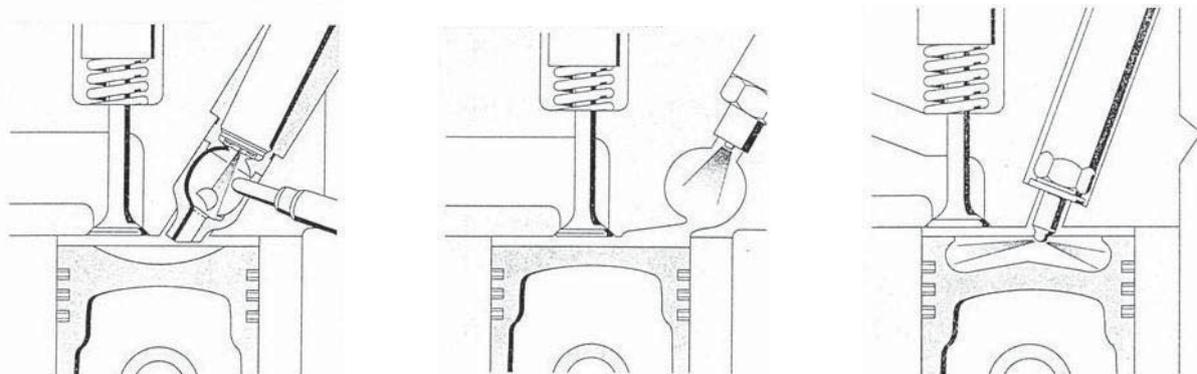


Abbildung 2.2: Vorkammer-, Wirbelkammer- und Direkteinspritzverfahren, [Tsc11]

Der Kraftstoff wird beim Vorkammerverfahren in eine heiße Vorkammer eingebracht. Über eine Drosselzapfendüse wird der Kraftstoff mit relativ niedrigem Druck (200 – 300 bar) eingespritzt. Um die Zerstäubung des Kraftstoffes zu verstärken, ist in der Kammermitte eine Prallfläche angeordnet, über die der Kraftstoffstrahl zerteilt wird und sich intensiv mit der umgebenden Luft vermischt. Die dabei einsetzende Vorverbrennung treibt das unverbrannte Kraftstoff-Luft-Gemisch über Bohrungen in der Vorkammer in den Hauptbrennraum, wo sich die eigentliche Verbrennung mit der Energieabgabe an den Kolben fortsetzt.

Beim Wirbelkammerverfahren wird die verdichtete Luft durch den Schusskanal in die kugelförmige Wirbelkammer gepresst. Aufgrund der tangentialen Mündung des Kanals wird die Luft in starke Rotation versetzt und der Kraftstoff eingespritzt. Dabei durchdringt der Kraftstoffstrahl den Wirbel senkrecht zu seiner Achse. Dieses Kraftstoff-Luft-Gemisch wird durch die beginnende Verbrennung wieder durch den Schusskanal in den Brennraum gedrückt und vermischt sich dort mit der vorhandenen Verbrennungsluft.

Hauptnachteil der Kammermotoren und Grund für den heute nahezu vollständigen Einsatz von Motoren mit Direkteinspritzung im Pkw-Bereich ist der um 20 % höhere Kraftstoffverbrauch. Aufgrund der größeren Brennraumoberfläche der Kammermotoren geht sehr viel Wärme über die zusätzliche Brennkammer in Form der Vor- bzw. Wirbelkammer verloren und kann dabei nicht in mechanische Energie umgesetzt werden. Der Nachteil der Motoren mit Direkteinspritzung beschränkt sich vor allem auf die begrenzte Maximaldrehzahl. Da die Gemischbildung im Brennraum stattfindet, steht für die vollständige



Vermischung von Kraftstoff und Luft nur ein Zeitfenster von wenigen Millisekunden zur Verfügung. Hierbei ergeben sich vor allem Nachteile für die Verbrennung und die Emissionsbildung. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Verbrennungsgeräusche der DI-Motoren. Schließlich ist aufgrund der hohen Zylinderdrücke während der Einspritzung ein aufwendiges Einspritzsystem mit einem hohen Einspritzdruckniveau im Vergleich zu den Kammervorfahren notwendig.

Aufgrund der zunehmenden Verschärfung der Emissionsrichtlinien und des hohen Bedarfs an kraftstoffsparenden und somit CO₂-armen Fahrzeugen, sind Pkw-Dieselmotoren im europäischen Raum inzwischen komplett als DI-Motoren ausgeführt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher nur noch das Direkteinspritzsystem betrachtet.

2.1.1 Einspritzsysteme für Dieselmotoren mit Direkteinspritzung

Die Aufgaben der Dieseleinspritzsysteme lassen sich in vier Grundfunktionen einteilen, [Mol07]:

- Kraftstoff fördern (Niederdruckteil),
- Hochdruck erzeugen,
- Kraftstoff zumessen und
- Kraftstoff aufbereiten.

Im Niederdruckteil wird über Pumpen bei einem niedrigen Druck der Kraftstoff aus dem Tank über Filterelemente zum Hochdruckteil gefördert. Daran anschließend folgt die Hochdruckerzeugung und weitere Förderung zur Zumesstelle bzw. in einen Speicher im Hochdruckteil. Da in diesem Bereich systembedingt die größten Verluste hinsichtlich Leckage und Rücklaufmengen existieren, arbeitet die Hochdruckpumpe mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad. Die Zumessung des Kraftstoffes hinsichtlich der exakten Menge und dem Zeitpunkt beeinflusst entscheidend die spätere Verbrennung und stellt damit eine bedeutende Teilfunktion des Einspritzsystems dar. Die zeitlich genaue und mengenmäßig präzise Dosierung des Kraftstoffes in Abhängigkeit von Drehzahl und Last des Motors steht dabei im Vordergrund. Als letzte Grundfunktion lässt sich die Aufbereitung des Kraftstoffes in der Einspritzdüse definieren. Ein verfolgungswürdiges Ziel ist hierbei vor allem eine möglichst hohe Zerstäubung des Kraftstoffes in Form eines Sprays.

Die Entwicklung der Einspritzsysteme für Dieselmotoren mit Direkteinspritzung ist stark geprägt durch den Entwicklungsfortschritt der Elektronik im Motorenbau. Während anfangs die Regelung und Steuerung der eingespritzten Menge und des Zeitpunktes noch rein mechanisch ausgeführt wurden und daher mit Einschränkungen hinsichtlich der einzustellenden Parameter verbunden war, werden diese Motorbetriebsparameter bei aktuellen Einspritzsystemen rein elektronisch geregelt. Weitere Entwicklungsschritte haben den Grad der freien Parametrierbarkeit von Ansteuerdauer und -zeitpunkt sowie Anzahl der Einspritzungen während eines Arbeitszyklus stetig verbessert und damit den Dieselmotor im Hinblick auf einen hohen Wirkungsgrad und Reduzierung der Emissionen bzw. Geräusche weiter verbessert. Erwähnenswerte Systeme, neben dem in dieser Arbeit verwendeten Einspritzsystem Common-Rail, sind hierbei die Reihpumpe, Verteilereinspritzpumpe, das Pumpe-Düse-Einheit-System (PDE) sowie das Pumpe-Leitung-Düse-System (PLD).



Detailliert und ausführlich beschrieben werden diese Systeme in [Mol07]. Im Folgenden soll daher nur das in dieser Arbeit verwendete Common-Rail Einspritzsystem vorgestellt werden.

Common-Rail-System

Wie die deutsche Übersetzung dieses Einspritzsystems schon zeigt, handelt es sich beim Common-Rail System (CR-System) um ein Speichereinspritzsystem, bei denen die Einspritzventile (auch Injektoren genannt) an einer gemeinsamen (engl. Übersetzung: „common“) Verteilerleiste (engl. Übersetzung: „Rail“), dem Hochdruckspeicher, angeschlossen sind und dieser über eine Hochdruckpumpe mit verdichtetem Kraftstoff versorgt wird.

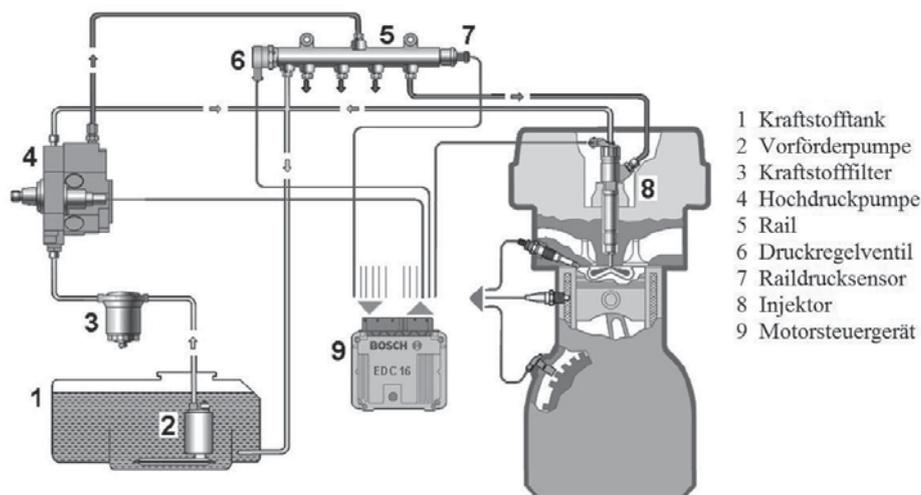


Abbildung 2.3: Aufbau eines Common-Rail (CR) Einspritzsystems, nach [Mol07]

Der Aufbau des Systems gliedert sich analog zur **Abbildung 2.3** wie folgt: Über kurze Leitungen sind die Injektoren mit dem Rail verbunden, um die Verluste zwischen Rail und Einspritzventil gering zu halten. Die Hochdruckpumpe fördert unabhängig vom Betriebspunkt des Motors den Kraftstoff über eine Hochdruckleitung in das Rail und ist in der Regel als Radialkolbenpumpe ausgeführt. Bei Nfz-Anwendungen kommen Reihen- bzw. Einzelsteckpumpen zum Einsatz, siehe [Mol07]. Über ein Druckregelventil wird der überschüssig verdichtete Kraftstoff aus dem Rail abgesteuert und bei niedrigem Kraftstoffdruck wieder in den Tank zurückgefördert. Ein Drucksensor erfasst dabei mit einer hohen Abtastfrequenz den Druck im Rail. Um den Wirkungsgrad des Gesamtsystems möglichst hoch zu halten, befindet sich in aktuellen Systemen in der Hochdruckpumpe eine Zumesseinheit, die bei niedrigen Einspritzmengen weniger verdichteten Kraftstoff zum Rail fördert, womit der abzusteuernde Kraftstoffanteil im Rail sinkt. Auch diese Zumesseinheit kann als Druckregelung verwendet werden. Die Düse ist im Gegensatz zu den anderen Systemen hubgesteuert und wird über ein servo-hydraulisches System, siehe **Abbildung 2.4**, im Inneren des Injektors geöffnet bzw. geschlossen.

Im geschlossenen Zustand der Düsennadel wirkt hochverdichteter Kraftstoff aus dem Rail mit dem gleichen Druck im Ventilsteuerraum 6 und im Kammervolumen 9. Da die Querschnittsfläche des Steuerkolbens im Ventilsteuerraum größer ist als die resultierende Kreisringfläche aus der Differenz der Düsenschulterfläche und der Ringfläche am Dichtsitz



der Nadelspitze, kommt es zu einer resultierenden Kraft, mit der die Düsennadel in ihren Sitz gedrückt wird.

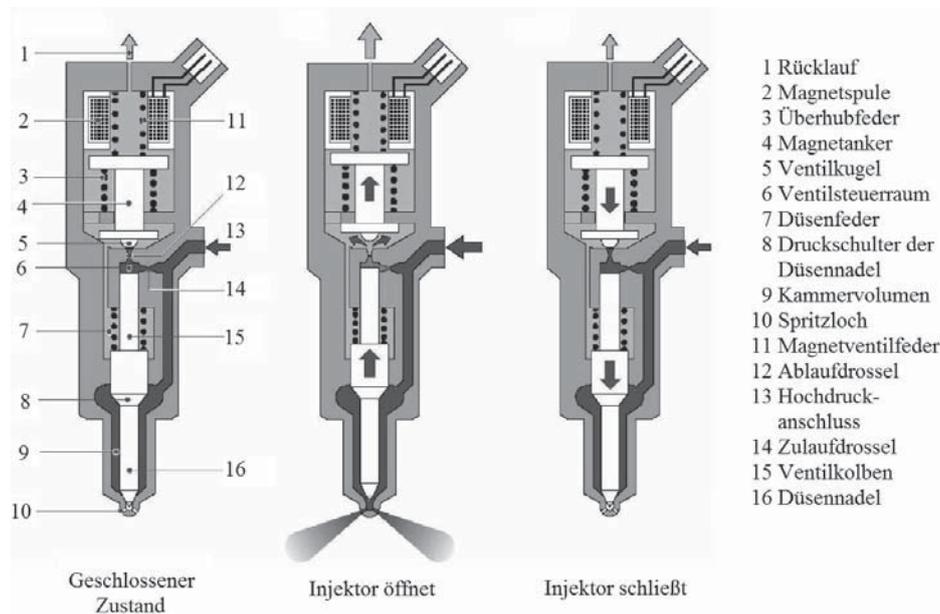


Abbildung 2.4: Funktionsprinzip eines CR-Injektors, nach [Mol07]

Durch Ansteuern des Magnetventils entgegen der Magnetventilfederkraft hebt der Magnetanker mit seiner Ventilkugel aus dem Sitz ab, wodurch sich der Hochdruck im Ventilsteuerraum abbaut und der Kraftstoff über die Ablaufdrossel in den Rücklauf zum Tank geleitet wird. Aufgrund der dämpfend wirkenden Zulaufdrossel baut sich der Druck im Ventilsteuerraum schneller ab als im Kammervolumen, was sich in einer höheren Kraft an der Druckschulter gegenüber der Kraft an der Stirnfläche des Steuerkolbens äußert. Aufgrund dieses Kräfteungleichgewichtes wird die Düsennadel entgegen der Düsenfederkraft aus ihrem Sitz gehoben und Kraftstoff wird in den Brennraum mit nahezu Raildruck eingespritzt. Bei geöffnetem Magnetventil wirkt aufgrund der Zulaufdrossel ständig eine größere Kraft auf die Düsenschulter als auf die Stirnseite des Steuerkolbens. Dabei bestimmt der Durchflussunterschied zwischen Zu- und Ablaufdrossel die Nadelhubgeschwindigkeit und der resultierende Kraftstoffstrom wirkt als Polster für den Steuerkolben, sobald dieser seine höchste Position erreicht hat (hydraulischer Anschlag).

Wird das Magnetventil nicht mehr angesteuert, bewegt sich der Magnetanker aufgrund der wirkenden Federkraft in Richtung Steuerkolben und über die Ventilkugel wird die Ablaufdrossel verschlossen. Der Druck baut sich im Ventilsteuerraum auf und bewirkt zusätzlich zur Düsenfederkraft, dass sich die Nadel schließt. Der Kraftstoffstrom über die Zulaufdrossel beeinflusst maßgeblich die Schließgeschwindigkeit der Nadel. Sobald die Düsennadel den Sitz erreicht, ist die Einspritzung abgeschlossen.

Der Weg über dieses Servokonzept wird beim CR-Injektor gewählt, da die hohen Kräfte über das Magnetventil alleine nicht zur Verfügung gestellt werden können. Nachteilig sind dabei die Steuer- und Leckagemengen, die zum Schalten des Ventils benötigt werden und den Wirkungsgrad des Gesamtsystems reduzieren, sowie das träge dynamische Verhalten.



Neben dem Magnetventil kann auch über ein Piezoaktor der Einspritzvorgang realisiert werden. Die Funktion des Piezo-CR Systems ähnelt dem des magnetventilgesteuerten Systems und soll daher nicht näher erläutert werden. Das Piezosystem wurde eingeführt, um die Dynamik des Injektors zu verbessern. So lassen sich sehr kurze Zeiten zwischen den Einspritzvorgängen realisieren und damit die Anzahl an Einspritzungen pro Arbeitsspiel weiter erhöhen. Darüber hinaus bietet das Piezosystem die Möglichkeit, direkt die Düsennadel zu betätigen und damit neben der elektrischen auch die hydraulische Verzugszeit zwischen Ansteuerung und Öffnung der Nadel weiter zu reduzieren. Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten für die Piezokeramik. Über das Motorsteuergerät wird das Magnet- bzw. Piezoventil angesteuert und die Nadel bewegt und damit die Düse geöffnet.

Das CR-System ist das heute uneingeschränkt eingesetzte Einspritzsystem für moderne Pkw-Motoren. Aber auch im mittelschnell- und langsamlaufenden Nfz- und Großmotorensegment, siehe [Poe10] und [Har10], greift man verstärkt auf das Einspritzkonzept mit einem Hochdruckspeicher zurück. Das charakteristische Merkmal und gleichzeitig einer der größten Vorteile gegenüber den schon vorgestellten Einspritzsystemen ist die Trennung des Hochdruckaufbaus von der Einspritzung. Da die Bereitstellung des Hochdruckes theoretisch unabhängig von der Kurbelwellenposition und vom Betriebspunkt des Motors ist, steht im gesamten Kennfeldbereich des Motors ein hoher Einspritzdruck bzw. eine hohe -menge zur Verfügung (siehe auch weiter unten). Damit ergeben sich gegenüber den Systemen ohne Hochdruckspeicher eine höhere Flexibilität im Hinblick auf Größe, Beginn und Häufigkeit der Einspritzung während eines Arbeitsspieles sowie der Formung des Einspritzverlaufs. Gerade diese Eigenschaften trugen in den letzten Jahren maßgeblich zur innermotorischen Reduzierung der Emissionen und des Verbrennungsgeräusches sowie zur Steigerung der Leistung moderner Dieselmotoren bei.

2.1.2 Beurteilung der Einspritzsysteme

Zur Beurteilung der Einspritzsysteme wurde eine Bewertungsmatrix entwickelt, die in **Tabelle 2.1** dargestellt ist. Die unterschiedlichen Einspritzsysteme wurden dabei anhand verschiedener Bewertungskriterien miteinander verglichen.

Dabei wird deutlich, dass vor allem das Common-Rail Einspritzsystem die hier definierten Kriterien am besten erfüllt. Die druckgesteuerten Systeme weisen im Hinblick auf eine freie und von der Motorlast und -drehzahl unabhängigen Parametrierung der Einspritzung Nachteile auf, die auch eine Ratenverlaufsformung erschweren. Von Vorteil bei der Reihen- und Verteilereinspritzpumpe ist die geringe Komplexität und der geringe motorseitige Aufwand, der vor allem bei den PDE-Systemen sehr hoch ist.

Grundsätzlich eignet sich jedes der in **Tabelle 2.1** vorgestellten Systeme für den Einsatz mit alternativen Kraftstoffen. In [Bra03], [Bra06], [Pat06], [Kit05] und [Hen05] wurden Untersuchungen mit veresterten Pflanzenölen (Biodiesel), synthetischen Kraftstoffen auf fossiler bzw. regenerativer Basis sowie Mischkraftstoffe aus konventionellem Diesel und Bioethanol über einen längeren Zeitraum mit einigen, der hier vorgestellten Systeme durchgeführt. Nennenswerte Schäden durch diese Kraftstoffe konnten dabei nicht festgestellt werden. Doch gilt es hierbei zu beachten, dass vor allem für den reinen Pflanzenöl- bzw. Biodieselbetrieb derzeit kein Einspritzsystem freigegeben ist.



Tabelle 2.1: Bewertungsmatrix Einspritzsysteme

	Reiheneinspritzpumpe	Verteilereinspritzpumpe		Pumpe-Düse-Einheit-System	Pumpe-Leitung-Düse System	Common-Rail, indirekte Nadelsteuerung		Common-Rail direkte Nadelsteuerung	Common-Rail intern druckübersetzt
		Axial	Radial			Magnetventil	Piezventil		
Erreichen eines Einspritzdrucks > 2000 bar	--	-	0	++	+	+	+	+	++
Unabhängigkeit Einspritzdruck von Motordrehzahl	-	-	0	0	0	+	+	+	+
Freie Gestaltung Spritzbeginn und Spritzdauer	-	0	0	0	0	++	++	++	++
Möglichkeit der Ratenverlaufsformung	-	-	-	0	0	+	+	++	+
Kleinstmengenfähigkeit	0	0	0	+	0	+	++	++	+
Einsatz alternativer Dieselmotoren	++	+	+	+	++	+	+	+	+
Komplexität des Systems	+	+	0	0	+	0	0	0	-
Motorseitiger Aufwand	+	+	+	-	0	++	++	++	+
Systemkosten	0	0	0	-	0	+	-	0	-
Entwicklungspotenzial	--	-	-	0	-	+	+	+	+

++ = Kriterium wird sehr gut erfüllt/hoch -- = Kriterium wird gar nicht erfüllt/niedrig

Wie in **Abbildung 2.5** gezeigt, weisen die konventionellen, nockenbetriebenen Systeme einen begrenzten maximalen Einspritzdruck auf. Aufgrund der Einstellung der Weiterentwicklung durch die Hersteller dieser Systeme, werden maximale Einspritzdrücke bis 2200 bar beim PDE- und aufgrund der Leitung zwischen Pumpe und Düse beim PLD-System von 1800 bar erzielt. Die radiale Verteilereinspritzpumpe konnte mit dem Modell der VP44 einen maximalen Einspritzdruck von düsenseitig knapp 2000 bar in Pkw-Anwendungen erzielen, während bei der axialen Variante Systeme mit einem maximalen Druck bis 1.550 bar entwickelt wurden, [Mol07]. Die Reiheneinspritzpumpe wird derzeit im Nutzfahrzeugbereich mit einem maximalen Einspritzdruck von 1300 bar eingesetzt.

Wie die **Abbildung 2.5** zeigt, ist der Entwicklungsfortschritt des CR-Systems im Hinblick auf den Einspritzdruck aufgrund der genannten Vorteile am weitesten fortgeschritten. Vor allem im Nfz-Bereich, siehe [NN01], sind beim Common-Rail System derzeit Einspritzdrücke bei Seriensystemen bis zu 2400 bar möglich. Der Einspritzsystemlieferant Denso Corporation strebt bis 2015 an, ein Einspritzsystem auf den Markt zu bringen, das im Pkw eingesetzt einen maximalen Einspritzdruck von 3000 bar ermöglicht, [Shi11].

Ausschließlich das CR-System wurde in der Forschung für Untersuchungen im Höchstdruckbereich mit Einspritzdrücken größer als 2500 bar eingesetzt. Dabei wurden neben reinen Gemischbildungsuntersuchungen bis zu einem Einspritzdruck von 3500 bar, siehe [Jeo05], [Lee05], [Nis07] und [Wan10], auch motorische Untersuchungen mit dem CR-System mit bis zu 3000 bar für Nfz-Anwendungen durchgeführt, siehe hierzu [Mar06], [See06], [Fis09] und [Wlo09].