

5 Untersuchungen zur Optimierung des Zylinderdruckverlaufs

Die Möglichkeiten zur Reduktion des Motorengeräusches durch die Optimierung des Zylinderdruckverlaufes sollen im folgenden Kapitel betrachtet werden. Unter dem Begriff Optimierung ist in diesem Zusammenhang sowohl eine Reduktion des Schalldrucksummenpegels als auch die Reduktion einzelner spektraler Schalldruckanteile zu verstehen. Diese spektralen Anteile, die das Klangbild deutlich beeinflussen, sind meist nicht pegelbestimmend. Dazu zählen vor allem Anteile des Schalldrucks bis zu 6 kHz, die dem Klangbild oft einen impulshaltigen, unangenehmen Charakter geben, der in der Literatur [55,59] als „Diesel-Nageln“ bezeichnet wird. Ziel der Optimierung ist eine Identifikation und Potentialabschätzung von Parametern, mit denen der Anteil des Motorengeräusches, der durch die Verbrennung hervorgerufen wird, reduziert werden kann. In den Untersuchungen werden dabei die Auswirkungen von Variationen des Zylinderdruckverlaufes im Luftschall und auch ausschließlich des Zylinderdruckverlaufs untersucht.

Durch die Entwicklung einer Methodik zur Beurteilung der Kraftanregung durch den Zylinderdruckverlauf kann eine gezielte Abstimmung der Verbrennung unter akustischen Gesichtspunkten mit dem Ziel einer Pegelreduktion erfolgen, ohne Nachteile im Emissionsverhalten in Kauf nehmen zu müssen. Durch eine Sensitivitätsanalyse der identifizierten Hauptparameter kann zudem das zu erwartende Potential bei Änderung des Verbrennungsablaufes abgeschätzt werden.

Zur Erzielung geringerer Schadstoffemissionen sowie zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Hochdruck-Einspritzsysteme für direkteinspritzende PKW-Dieselmotoren entwickelt. Neben dem Einspritzdruck ist dabei die Form des Einspritzverlaufs wichtig. Die zeitliche Einbringung des Kraftstoffes in den Brennraum und die folgende Gemischbildung steuern den Brennverlauf und beeinflussen damit das Emissions- und Geräuschverhalten sowie den Verbrauch, die Leistung und das Drehmoment. Aus Komfortgründen ist zur Senkung des Verbrennungsgeräusches eine Voreinspritzung zwingend erforderlich [36]. Die Verbrennung der Voreinspritzmenge führt zu einer Erwärmung des Brennraumes und verkürzt somit den Zündverzögerung der folgenden Haupteinspritzung. Durch die damit verbundenen sanfteren Temperatur- und Druckanstiege lassen sich das Verbrennungsgeräuschniveau und die NO_x-Emissionen senken [24,53]. So beträgt die Reduktion des Motorgeräusches mit Voreinspritzung bis zu 3dB(A) im Vergleich zu einem Motor ohne Voreinspritzung [19]. Zur Erfüllung von Anforderungen im Hinblick auf Emissionsverhalten und Reduzierung des Verbrennungsgeräuschanteils ergeben sich nach Krieger [36] folgende Forderungen an ein modernes Einspritzsystem für Personenwagen:

- hoher, möglichst frei wählbarer Einspritzdruck
- flexible Mengen- und Spritzbeginnregelung
- Einspritzverlaufsformung einschließlich Voreinspritzung

Zu den angegebenen Anforderungen an das System kommt noch eine hohe Genauigkeit der Einspritzmengenuteilung über die gesamte Lebensdauer und ein Motormanagement, das die Steuerung mit erforderlichen Funktionalität ermöglicht.

Zur Erfüllung des Anforderungsprofils können verschiedene Einspritzsysteme wie die elektronisch zeitgesteuerte Radialkolben-Verteilerpumpe oder das Pumpe-Düse-System eingesetzt werden. Das Common-Rail Einspritzsystem bietet jedoch neben der Variation der Einspritzbeginne und -mengen auch eine Steuermöglichkeit des Einspritzdruckes und wird im folgenden in seinem Aufbau und seiner Funktionsweise kurz erläutert.

5.1 Common-Rail Einspritzsystem

Beim Hochdruck-Speichereinspritzsystem Common-Rail (CR) erfolgt die Druckerzeugung unabhängig vom Zeitpunkt der Einspritzung. Eine Vorförderpumpe transportiert den Kraftstoff vom Tank zur Hochdruckpumpe, wo der Kraftstoff komprimiert und in den Druckspeicher (Rail) gefördert wird. Die Druckregelung zwischen 250 bar und derzeit maximal 1350 bar erfolgt entsprechend den Kennfeldparametern über einen Raildrucksensor und ein Absteuerventil. Mittels Injektoren wird der Kraftstoff über die Ansteuerung der Magnetventile mit anschließender hydraulischer Übersetzung auf die Düsennadel zeit- und mengengerecht in die Brennräume eingespritzt. Jedem Betriebspunkt des Motors ist dabei eine Einspritzmenge für Vor- und Haupteinspritzung sowie der entsprechende Druck zugeordnet. Der eingeregelte Druck steht am Injektor immer zur Verfügung. Durch Öffnen und Schließen des Magnetventils wird dieser im Steuerraum moduliert und damit die Düsennadel geöffnet und geschlossen. Das verwendete Magnetventil erlaubt Schaltzeiten kleiner 200 μ s. Diese sind erforderlich, um eine exakte Dosierung kleinster Voreinspritzmengen von 1 bis 2 mm³ je Einspritzung zu ermöglichen. In Abbildung 5.1 ist das CR-System mit Steuergerät, Hochdruckpumpe, Rail sowie den Injektoren für den untersuchten 4-Zylinder Motor dargestellt.

Die große Variabilität der Ansteuerung erlaubt dabei vielfältige Möglichkeiten den Einspritzvorgang und somit indirekt den Verbrennungsablauf zu steuern. Die Flexibilität der Ansteuerbeginne und des regelbaren Einspritzdruckes bis zu 1350 bar wird unter anderem für die Erfüllung der strengen Abgasnormen genutzt. Durch die Teilung der Einspritzung in eine Vor- und eine Haupteinspritzung wird es ermöglicht, die auftretenden Druckgradienten durch die Verbrennung gezielt zu beeinflussen und zu reduzieren. Die Möglichkeiten zur Formung des Einspritzverlaufes sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Auf die komplexen Zusammenhänge von Gemischbildung und Brennverlauf wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Einzelne Parameter, mit denen sich der Verbrennungsablauf im Hinblick einer Geräuschreduktion beeinflussen läßt, werden in den jeweiligen Kapiteln kurz erläutert.

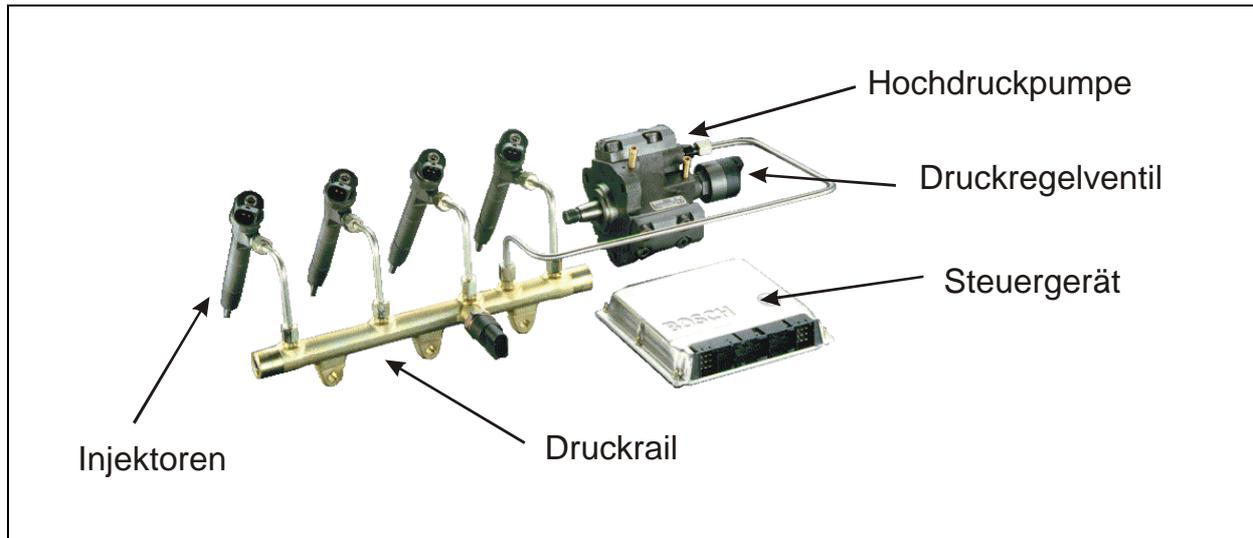


Abb. 5.1: Common-Rail Einspritzsystem [42]

Zur Beurteilung der Möglichkeiten zur Optimierung des Verbrennungsablaufes im Hinblick auf eine Verbesserung des Motorgeräusches werden anschließend verschiedene Untersuchungen vorgestellt. Dabei werden zunächst die Auswirkungen von Parametervariationen auf den vom Motor abgestrahlten Luftschall untersucht, um das Potential und den Einflußbereich von Variationen der Einspritzung zu beurteilen. Danach folgen Untersuchungen, bei denen nur der Zylinderdruckverlauf sowie das daraus resultierende Spektrum betrachtet wird.

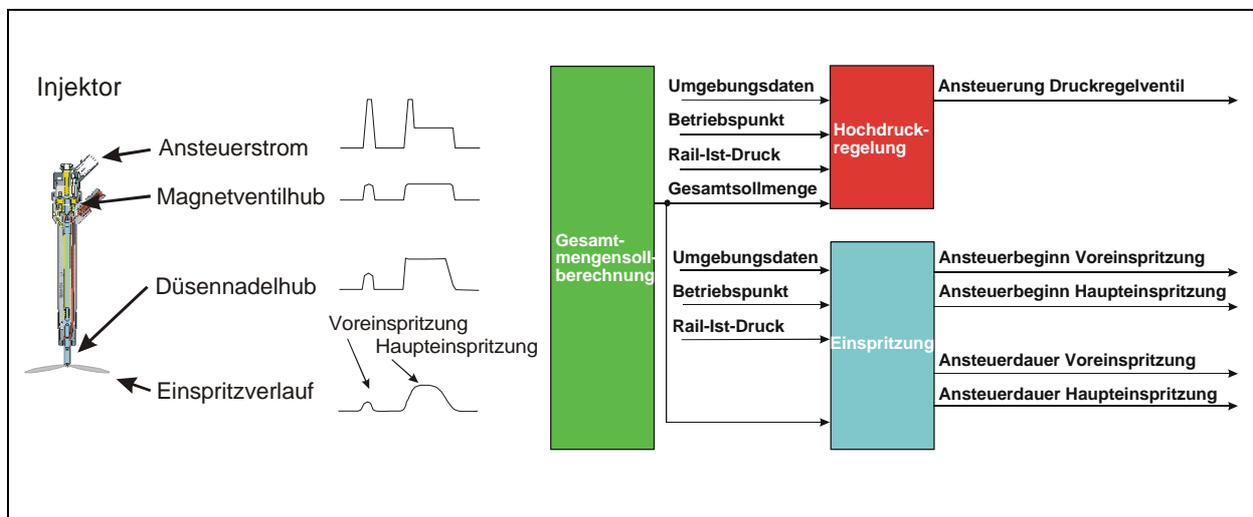


Abb. 5.2: Ansteuerung der Injektoren und Einspritzparameter [42]

5.2 Optimierung durch systematische Parametervariation

Das Potential der Voreinspritzung ist in seiner Wirkung zur Reduktion des durch den Verbrennungsprozeß hervorgerufenen Anteils des Motorgeräusches unbestritten. Zur weiteren Absenkung des Geräuschpegels und zur Verbesserung der Klangqualität müssen Möglichkeiten erarbeitet werden, den Verbrennungsprozeß gezielt zu beeinflussen und systematisch zu optimieren. Zur Abschätzung des Potentials der möglichen Geräuschreduktion werden verschiedene Einspritzparameter einzeln oder kombiniert mit anderen Parametern variiert. Ziel dieser Variation ist eine Überprüfung, in welcher Höhe der Summenpegel sowie die spektrale Zusammensetzung des Luftschalls durch den geänderten Zylinderdruckverlauf zu beeinflussen ist. Die Untersuchungen werden an einem Sechszylinder-Motor (Motor D) durchgeführt. Für die Bewertung des Motorengeräusches wird der Luftschall in 1,5 m Abstand seitlich vom Motor mit einem Kunstkopf aufgezeichnet und ausgewertet. Als Parameter werden

- Ansteuerbeginn der Haupteinspritzung
- Menge der Voreinspritzung
- Abstand zwischen Vor- und Haupteinspritzung
- Raildruck
- Abgasrückführrate (AGR)

variiert.

Die Versuche werden in einem ersten Schritt zunächst ohne Abgasrückführung durchgeführt. Der Einsatz von Abgasrückführung bzw. eine weitere Erhöhung der Rückführrate bewirkt in der Regel eine Absenkung des Geräuschpegels [12,16]. Eine Veränderung der Abgasrückführung bedarf jedoch einer genauen Analyse der Abgasemissionen, da bereits eine geringe Anhebung zu einer deutlichen Verschlechterung vor allem der Partikelemissionen führen kann. Der Einfluß der Abgasrückführung wird in Kap. 5.3.3 genauer betrachtet.

Untersucht werden Betriebspunkte, in denen das Motorengeräusch von der Verbrennung dominiert und sowohl für das Innen- als auch das Außengeräusch als störend empfunden werden. Dabei handelt es sich um den niedrigen bis mittleren Drehzahl- und Lastbereich.

Meßpunkte:

Drehzahl	$n = 2000 \text{ 1/min}; 3000 \text{ 1/min}$
Last (effektiver Mitteldruck)	$p_{me} = 2 \text{ bar}; 8 \text{ bar}$

Die Last wird bei den hier durchgeführten Untersuchungen in effektivem Mitteldruck (p_{me}) angegeben und ist proportional dem Drehmoment, das von einem Zylinder abgegeben wird. Eine Umrechnung in das abgegebene Drehmoment läßt sich mit Hilfe des Hubvolumens (V_H) und der Zylinderzahl (i) durchführen

$$M_d = \frac{p_{me} \cdot V_H \cdot i}{2p} \quad (5.1)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Definition der eingestellten Last besteht in der Angabe der eingespritzten Kraftstoffmenge pro Arbeitsspiel und Zylinder. Vorteil dieser Angabe ist, daß Kennfelder im Steuergerät meist über Drehzahl und Einspritzmenge definiert sind. Bei Variation einzelner Parameter im Kennfeld kann damit gewährleistet werden, daß sich die Parameter anderer Kennfelder nicht ändern.

Variation von Drehzahl und Last

Die Auswertung des Summenpegels der untersuchten Drehzahl- und Lastpunkte zeigt, daß in den betrachteten Betriebspunkten das Motorengeräusch durch die Verbrennung dominiert wird (Tab. 5.1). Die Differenz des Schalldruckpegels zwischen Schlepp und den beiden Teillastpunkten beträgt dabei zwischen 3,6 und 7,4 dB(A).

	Schlepp	$P_{me} = 2 \text{ bar}$	$p_{me} = 8 \text{ bar}$
2000 1/min	70,5 dB(A)	77,9 dB(A)	77,0 dB(A)
3000 1/min	77,8 dB(A)	81,4 dB(A)	82,6 dB(A)

Tabelle 5.1: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von Drehzahl und Last

Bei 3000 1/min zeigt sich zwischen Schleppbetrieb und den beiden untersuchten Lastpunkten eine geringere Differenz im Summenpegel. Das Spektrum des Luftschalls über der Frequenz (Abb. 5.3) zeigt jedoch, daß die Differenz der Pegel zwischen Schlepp und den beiden Teillastpunkten in einigen Frequenzbereich eine Differenz von bis zu 10 dB(A) aufweist. Im Frequenzbereich zwischen 0,8 kHz und 2,5 kHz treten dabei die höchsten Pegel auf.

Ausgehend von diesen Betriebspunkten werden nun Variationen der Einspritzparameter durchgeführt, die das Potential im Hinblick auf eine Reduktion des Summenpegels sowie der Pegel einzelner Frequenzbereiche aufzeigen sollen.

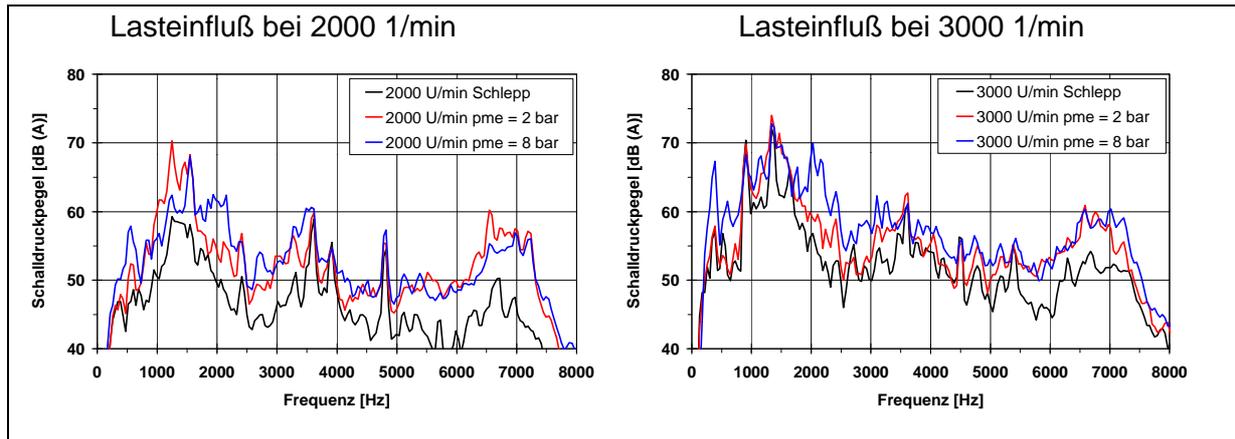


Abb. 5.3: Lasteinfluß im Luftschall bei verschiedenen Drehzahlen

Beginn der Haupteinspritzung

Als erste Variation wird der Einfluß des Beginns der Haupteinspritzung aufgezeigt, wobei der Abstand zur Voreinspritzung konstant belassen wird.

In Abhängigkeit vom Haupteinspritzbeginn zeigt sich bei geringer Last ($p_{me} = 2\text{bar}$) eine Reduktion des Summenpegels bei einer Verlagerung des Einspritzzeitpunktes nach spät (Abb. 5.4). Damit können die in der Literatur (vgl. Kap. 2.2) angegebenen Analysen bestätigt werden. Die Verlagerung des Einspritzzeitpunktes bei höheren Lasten führt jedoch nicht zu einer Reduktion des Summenpegels. Es kann gezeigt werden, daß, wie bei anderen Einspritzsystemen, auch beim Common-Rail System bei geringen Lasten die Verlagerung des Einspritzzeitpunktes nach spät zu einer Reduktion des Motorengeräusches führt. Die Pegeldifferenz beträgt bei $n=2000\text{ 1/min}$ und $p_{me}=2\text{ bar}$ bis zu 2,7 dB(A).

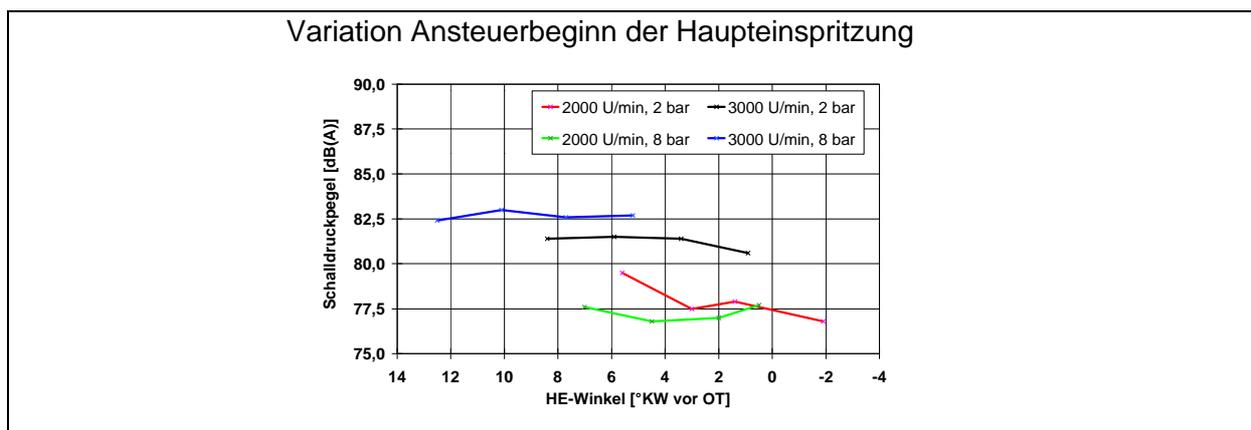


Abb. 5.4: Einfluß des Ansteuerbeginns der Haupteinspritzung auf den Schalldruckpegel

Eine Betrachtung der Pegel über der Frequenz (Abb. 5.5 und 5.6) zeigt eine Reduktion bis zu 3 dB(A) in einigen Frequenzbereichen. Diese Reduktionen wirken sich jedoch nicht so deutlich auf den

Summenpegel aus. Sie führen in den meisten Fällen jedoch zu einer Verbesserung des Klangbildes des Motorgeräusches.

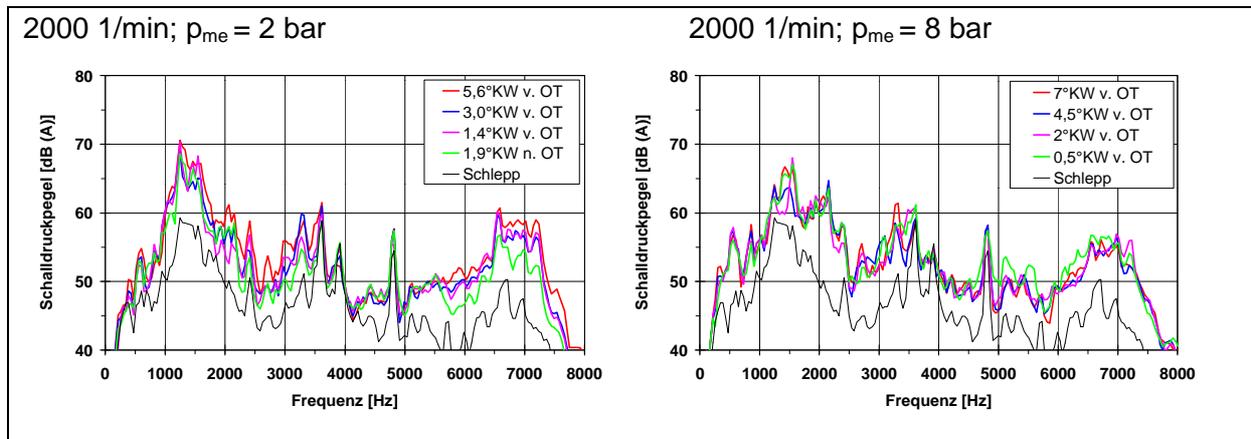


Abb. 5.5: Einfluß des Haupteinspritzbeginns auf das Schalldruckspektrum (n=2000 1/min)

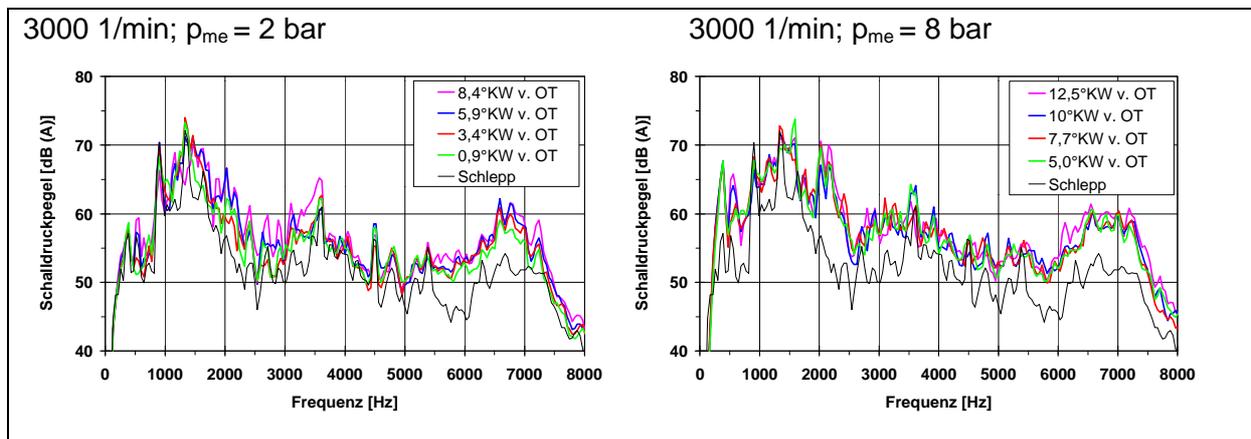


Abb. 5.6: Einfluß des Haupteinspritzbeginns auf das Schalldruckspektrum (n=3000 1/min)

Raildruck

Beim Common-Rail System besteht die Möglichkeit, den Raildruck in Abhängigkeit von Drehzahl und Last in weiten Grenzen zu variieren. Der Raildruck wird hier in einer Bandbreite von 300 bar um die Basiseinstellung variiert. Die Variation des Raildruckes (Abb. 5.7) zeigt in den vier betrachteten Betriebspunkten eine Reduktion des Summenpegels zwischen 0,5 und 3 dB(A). Im Spektrum zeigt sich dabei vor allem im Frequenzbereich oberhalb 1 kHz eine deutliche Absenkung der Pegel von bis zu 5 dB(A). Der Klang des Motors wird dabei gleichzeitig als angenehmer empfunden.

Die Möglichkeit einer Geräuschverbesserung durch die Absenkung des Raildrucks steht jedoch in Konflikt zum Emissionsverhalten. Eine Absenkung des Einspritzdrucks führt in der Regel zu einem Anstieg der Partikelemissionen und ist somit nur in Grenzen realisierbar. Zur Erfüllung zukünftiger

Emissionsgrenzwerte wird darüber hinaus sogar eine Anhebung des Raildrucks auch bei niedrigen Drehzahlen und Lasten angestrebt.

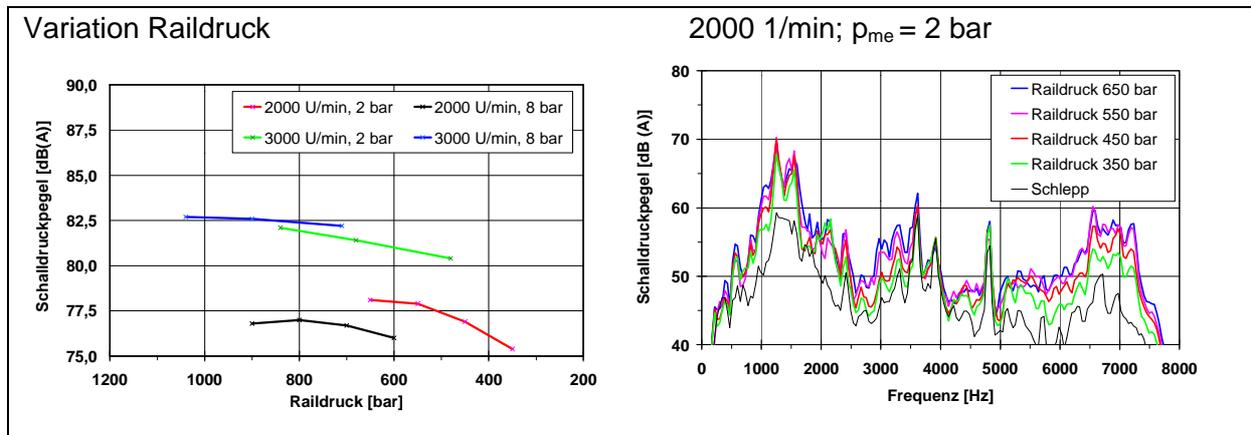


Abb. 5.7: Einfluß des Raildrucks auf den Schalldruckpegel

Kombination von Parametern

Nach der Betrachtung von Einzelparametern wird nun das Potential durch die Kombination mehrerer Parameter aufgezeigt. Dabei wird sowohl der Einspritzzeitpunkt als auch die Menge der Voreinspritzung geändert. Die durchgeführte Variation wird dabei so gewählt, daß die Partikelemissionen konstant bleiben. Durch die Kombination beider Parameter und konstant gehaltenem Raildruck kann der Summenpegel von 77,9 dB(A) (rot) auf 76,7 dB(A) (blau) bzw. 75,8 dB(A) (grün) verändert werden. Dies entspricht einer Bandbreite von 2 dB(A) für den Gesamtpegel. Im Frequenzbereich oberhalb 2 kHz beträgt die Differenz bis zu 5 dB(A). In Abb. 5.8 werden neben den Spektren auch die dazugehörigen Druckverläufe dargestellt.

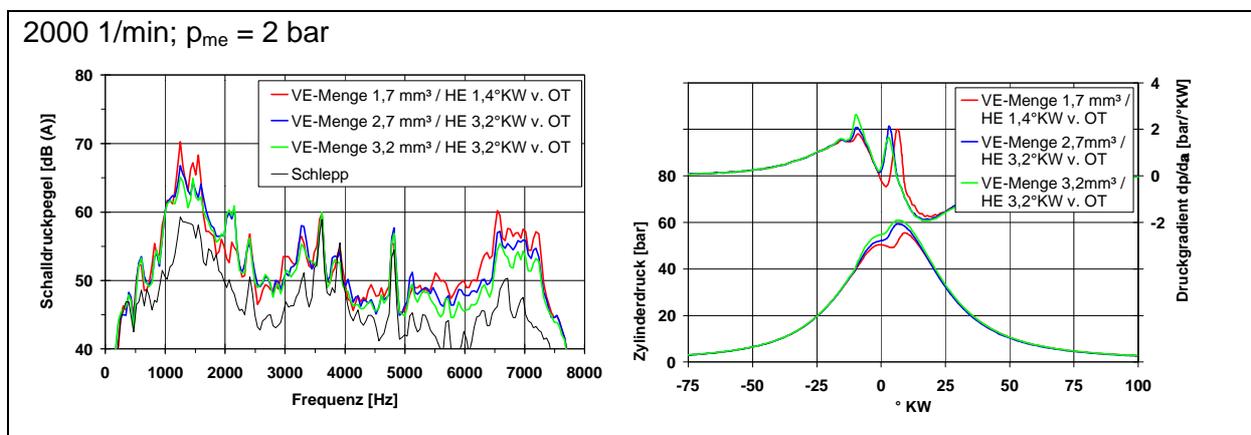


Abb. 5.8: Einfluß von Kombinationen auf den Schalldruckpegel und den Druckverlauf

Dabei wird deutlich, wie sich Änderungen der Einspritzparameter auf den Zylinderdruckverlauf auswirken. Die frühere Einspritzung sowie die Anhebung der Einspritzmenge ist an der zeitlichen Verlagerung bzw. an der Höhe und Lage der Druckgradienten zu erkennen.

Die Ergebnisse der betrachteten Parametervariationen zeigen, in welcher Höhe und in welchem Frequenzbereich sich der Pegel des Motorengeräusches beeinflussen läßt. Es lassen sich jedoch nur für die Parameter Raildruck und Lage des Einspritzzeitpunktes eindeutige Zusammenhänge aufzeigen. Dies bestätigt weitgehend die bereits in Kapitel 2.2 erwähnten und in der Literatur bekannten Ergebnisse. Durch das Aufzeigen der Abhängigkeit des Geräusches von einzelnen Parametern werden auch die Ergebnisse von Korrelationsanalysen (vgl. Kap.3.3) bestätigt. Während sich durch die Variation einzelner Parameter keine generellen Aussagen ableiten lassen, die zu einer Verbesserung des Geräuschverhaltens ohne negative Rückwirkungen auf das Emissionsverhalten führen, kann durch die Kombination verschiedener Parameter ein Kompromiß zwischen Geräusch- und Emissionsverhalten erzielt werden. Dabei ist man auf die Durchführung der Versuche auf einem Motorgeräuschprüfstand mit paralleler Messung der Abgasemissionen angewiesen. Ziel muß es sein, auf Basis von Versuchen den durch die Verbrennung hervorgerufenen Geräuschanteil unter Berücksichtigung des Emissionsverhaltens zu optimieren. Dafür ist eine weitere Analyse des durch den Verbrennungsprozeß hervorgerufenen Zylinderdruckverlauf und somit der Motoranregung erforderlich. Um eine befriedigende Lösung zur Geräuschreduktion zu erzielen, müssen Methoden entwickelt werden, die es während der Entwicklung neuer Brennverfahren erlauben, Aussagen über das durch die Verbrennung hervorgerufene Motorgeräusch treffen zu können.

5.3 Analyse von Zylinderdruckverläufen bei Variation der Einspritzung

Eine Analyse gemessener Zylinderdruckverläufe soll im folgenden näheren Aufschluß über die Möglichkeiten einer Pegelreduktion durch Modifikation des Brennverfahrens geben. Ziel ist dabei, die Zusammenhänge zwischen Zylinderdruckverlauf und dem daraus resultierenden Zylinderdruckspektrum näher zu untersuchen und zu erkennen, durch welche Parameter das Druckspektrum zu beeinflussen ist. Zunächst wird eine Methodik vorgestellt, bei der der Zylinderdruckverlauf sowie das Druckspektrum in einer dreidimensionalen Darstellung visualisiert wird. Diese Darstellung erlaubt die Untersuchung von Zusammenhängen im Pegelverlauf bei Variation von Drehzahl und Last. In einem weiteren Schritt wird diese Methode dazu verwendet, Variationen von Einspritzparametern und ihre Wirkung im Druckspektrum zu erfassen. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse werden anschließend Untersuchungen vorgestellt, in denen eine Optimierung des Emissionsverhaltens mit dem Ziel einer Geräuschreduktion durchgeführt wird.

5.3.1 Druckverläufe und Druckspektren

Zur Identifikation der Parameter des Zylinderdruckverlaufs, die Form oder Pegel des Spektrums beeinflussen, wird eine Auswertemethodik vorgestellt, mit der, ähnlich wie bei Luftschallmessungen in einem Campbell- oder Wasserfalldiagramm, der Zylinderdruckverlauf sowie die daraus resultierenden Druckspektren dreidimensional über Drehzahl oder Last dargestellt werden.

Zur Analyse wird das Drucksignal mit der Frequenzfenstermethode bewertet [1,44]. Dabei wird der Druckverlauf mit einer Fensterfunktion (z.B. Hanning) multipliziert, so daß nur die Signalanteile im Bereich der Verdichtung und Verbrennung analysiert werden. Dadurch werden Druckschwingungen ausgeblendet, die u.a. durch den Ladungswechselfvorgang hervorgerufen werden. Die Darstellung der Druckverläufe kann über der Zeit oder über eine Kurbelwinkelzuordnung erfolgen. Dadurch ist eine Analyse der Druckspektren im gesamten Frequenzbereich in Abhängigkeit der Drehzahl bzw. Last möglich. Die Abhängigkeiten der Spektren von einzelnen Parametern ist leicht erkennbar, da man eine kontinuierliche Darstellung der Daten erhält.

Die dreidimensionale Darstellung (Abb. 5.9) verdeutlicht die Grundstruktur eines Zylinderdruckspektrums. Damit wird ermöglicht, den gesamten Dynamikbereich (ca. 80 dB) zu erfassen und darzustellen. Zum anderen ist dadurch der Abfall des Zylinderdruckpegels von 40 dB/Dekade, sowie eine Abhängigkeit der sich ergebenden Struktur des Pegelverlaufs von der Drehzahl zu erkennen. Die Darstellung der Druckspektren kann dabei entweder als 3D-Oberflächenstruktur oder in farblich codierter Draufsicht erfolgen.

Last- und Drehzahlabhängigkeit von Druckspektren

Die Abhängigkeiten der Druckspektren von Drehzahl und Last beim Common-Rail Dieselmotor werden durch Untersuchungen in verschiedenen Betriebszuständen aufgezeigt.

Lastzustand	Drehzahl [1/min]
Schleppbetrieb	1000 – 4000
30 Nm	1000 – 4000
50 Nm	1000 – 4000
125 Nm	1000 – 4000
200 Nm	1000 – 4000
Vollast	1000 – 4000

Tabelle 5.2: Betriebszustände Druckspektren (Motor B)

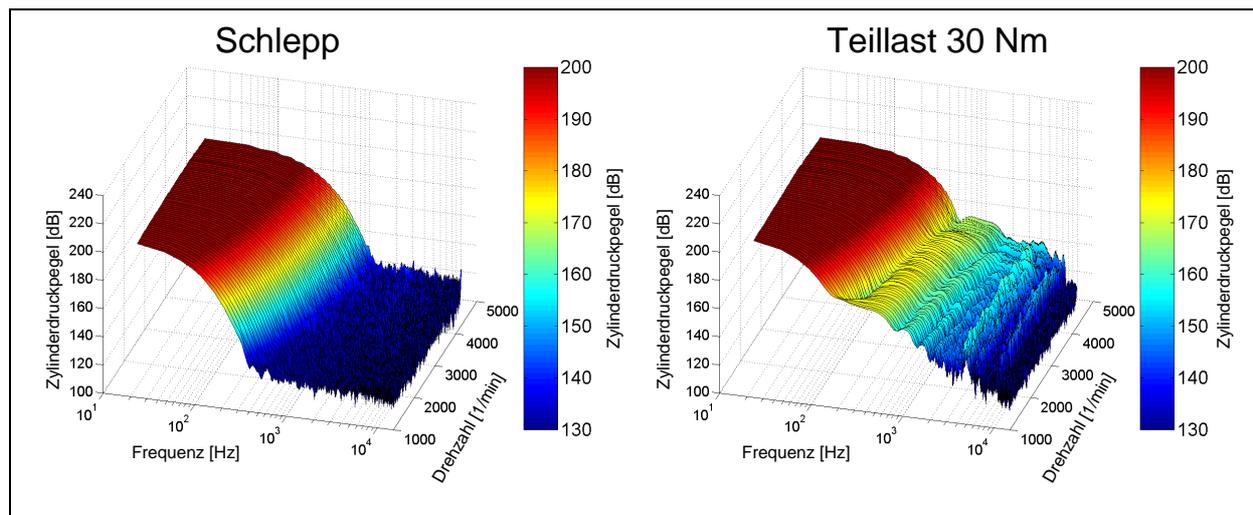


Abb. 5.9: Zylinderdruckpegel bei Schlepp und 30 Nm Teillast (10 Hz – 10 kHz)

Abb. 5.9 zeigt die Druckspektren bei Schleppbetrieb sowie bei 30 Nm Teillast. Der Pegelverlauf des Zylinderdrucks im Schleppbetrieb stellt dabei den niedrigsten zu erreichenden Pegelverlauf dar. Das Spektrum setzt sich in diesem Fall nur aus den Fourierkoeffizienten des Schleppdruckverlaufes zusammen und kann durch die ersten 14 Koeffizienten hinreichend genau beschrieben werden. Das Zylinderdruckspektrum des Teillasthochlaufes weicht mit seinem Pegelverlauf abhängig von der Drehzahl im Frequenzbereich ab 300 Hz bei 1000 1/min bzw. 800 Hz bei 4000 1/min davon ab. Auffällig ist dabei die Regelmäßigkeit der dargestellten Pegelverläufe im Teillastbetriebspunkt. In weiteren Analysen wird gezeigt, daß die regelmäßige Struktur der Zylinderdruckspektren charakteristisch für die doppelte Einspritzung beim Common-Rail System ist.

Die Analysen der Zylinderdruckverläufe in den weiteren Lastpunkte im Frequenzbereich von 800 Hz bis 10 kHz (Abb. 5.10) zeigen im wesentlichen die gleiche spektrale Zusammensetzung wie die Analyse des Zylinderdruckverlaufs im Teillastzustand mit 30 Nm. Mit zunehmender Last steigen die Pegel im Frequenzbereich oberhalb 1 kHz. Ab 200 Nm ist die Abschaltung der Voreinspritzung bei 3600 1/min an einem deutlichen Pegelanstieg oberhalb 1 kHz zu erkennen. Der Pegelverlauf mit seiner regelmäßigen Struktur der Minima und Maxima geht in einen nahezu linearen Verlauf über. Die Maxima der Zylinderdruckpegel zwischen 5 kHz und 6 kHz sind bei den durchgeführten Messungen auf Resonanzschwingungen in den Pfeifen der Glühkerzenadapter zurückzuführen. Im angegebenen Frequenzbereich treten jedoch auch Resonanzfrequenzen des Brennraums auf. Eine Trennung der beiden Effekte ist dabei nicht möglich.

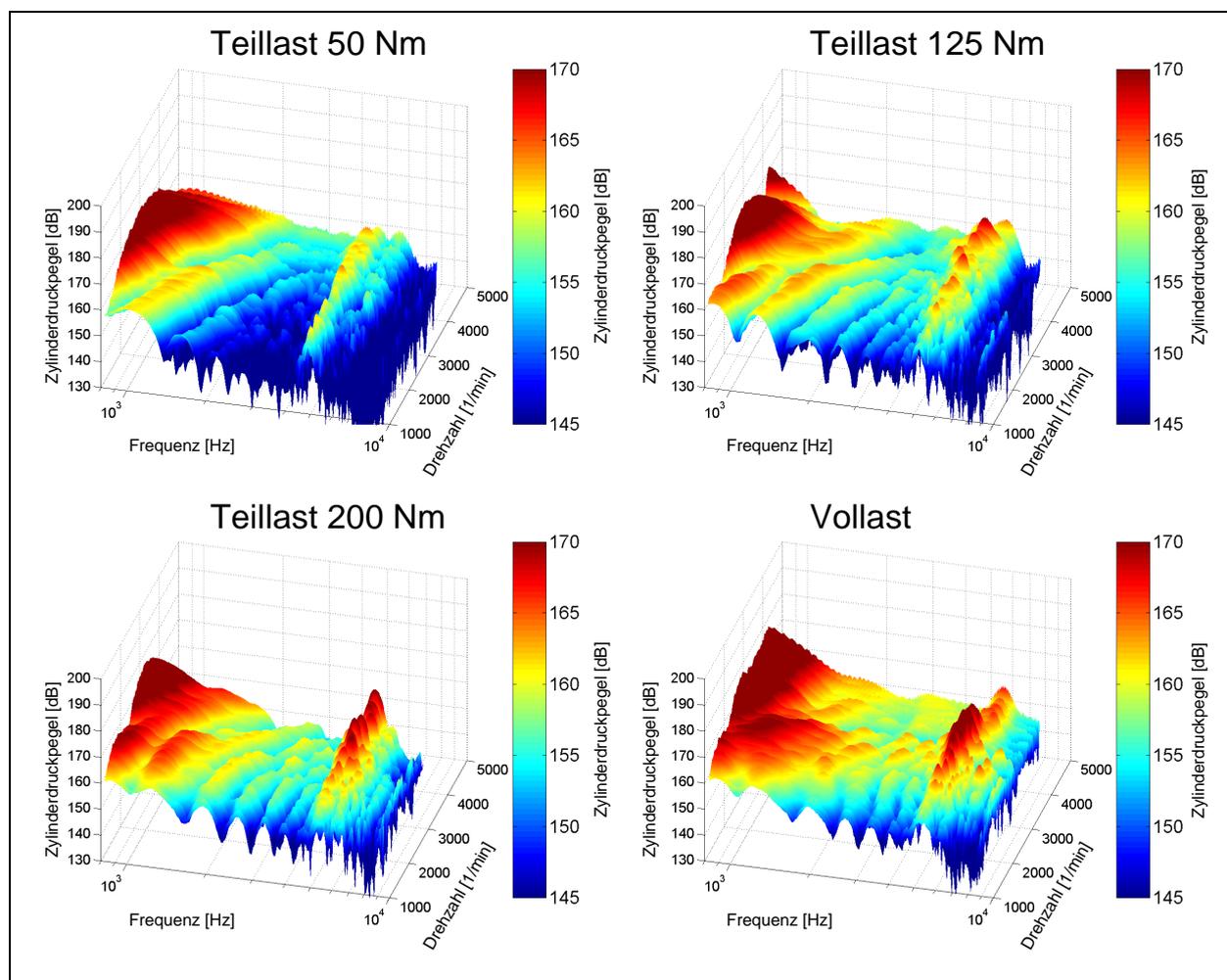


Abb. 5.10: Last- und Drehzahlabhängigkeit des Zylinderdruckpegels (800 Hz – 10 kHz)

5.3.2 Beeinflussung der Druckspektren durch Variation der Einspritzung

Zur Identifikation von Frequenzbereichen des Zylinderdruckspektrums, die durch Variation des Verbrennungsvorgangs direkt zu beeinflussen sind, werden Parametervariationen durchgeführt. Diese werden an Motor D in einem Drehzahlbereich von 500 1/min bis 2000 1/min durchgeführt. In diesem Drehzahlbereich ist der Anteil des Motorengeräusches, der durch die Verbrennung beeinflusst wird, sehr hoch. Die Last wird dabei über die Einstellung der Einspritzmenge auf 20 mm³/Hub konstant gehalten. Im Vergleich zu Kapitel 5.2, in dem die Auswirkungen von Modifikationen im Luftschall untersucht wurden, wird im folgenden der Zylinderdruck als Anregungsquelle näher betrachtet.

Die Variationen werden dabei jeweils ausgehend vom Basiszustand der aktuellen Applikation der Einspritzparameter durchgeführt. Im einzelnen werden dabei untersucht:

- Ansteuerbeginn Haupteinspritzung
- Raildruck
- Abgasrückführrate
- Menge der Voreinspritzung
- Abstand von Voreinspritzung zur Haupteinspritzung

Ansteuerbeginn Haupteinspritzung

Durch die Variation des Ansteuerbeginns der Haupteinspritzung wird im wesentlichen die Lage der Verbrennung und somit die Lage der Druckgradienten relativ zum oberen Totpunkt verschoben. Mit der Verschiebung der Einspritzung wird auch die Phase der Gemischaufbereitung zwischen Einspritzung und Selbstzündung beeinflusst. Als Variation wird der Einspritzzeitpunkt ausgehend vom Basiszustand um 6° KW nach früh und um 6° KW nach spät verlegt. Die Druckspektren (Abb. 5.11) der drei Variationen zeigen dabei wesentliche Unterschiede im Frequenzbereich oberhalb von 800 Hz. Dabei ist zu erkennen, daß sich die spektrale Zusammensetzung der Zylinderdruckpegel bei spätem Einspritzbeginn im Vergleich zu frühem Einspritzbeginn deutlich ändert. Einerseits steigen die Pegel im Frequenzbereich oberhalb 800 Hz zum Teil deutlich an, andererseits wird der Anstieg der Pegel von einer Zunahme regelmäßiger Pegeleinbrüche begleitet. Der Unterschied der Spektren wird besonders beim Vergleich zwischen frühen und späten Spritzbeginnen deutlich. Bei frühen Spritzbeginnen fällt das Spektrum gleichmäßig über der Frequenz ab. Die für späte Spritzbeginne charakteristischen Pegeleinbrüche fehlen. Das Spektrum hat im Frequenzbereich oberhalb 2 kHz und bei Drehzahlen oberhalb 1200 1/min bis zu 5 dB(A) geringere Pegel als bei späten Spritzbeginnen.

In allen drei Varianten ist zu beachten, daß sich die Spektren in 3 Drehzahlbereiche einteilen lassen; Bereich I unterhalb 900 1/min, Bereich II zwischen 900-1200 1/min und Bereich III oberhalb 1200 1/min. Der Unterschied in diesen Bereichen läßt sich auf die Einstellung des Abstandes zwischen Vor- und Haupteinspritzung zurückführen. Im Bereich I und III wird der Abstand zwischen den Einspritzungen zeitlich konstant gehalten und ist bei höheren Drehzahlen geringer als bei niedrigen. Im Bereich II wird eine Anpassung zwischen beiden Bereichen durchgeführt. Dabei wird bei der Analyse der Druckspektren deutlich, daß der Abstand zwischen Vor- und Haupteinspritzung einen entscheidenden Einfluß auf die spektrale Zusammensetzung hat.

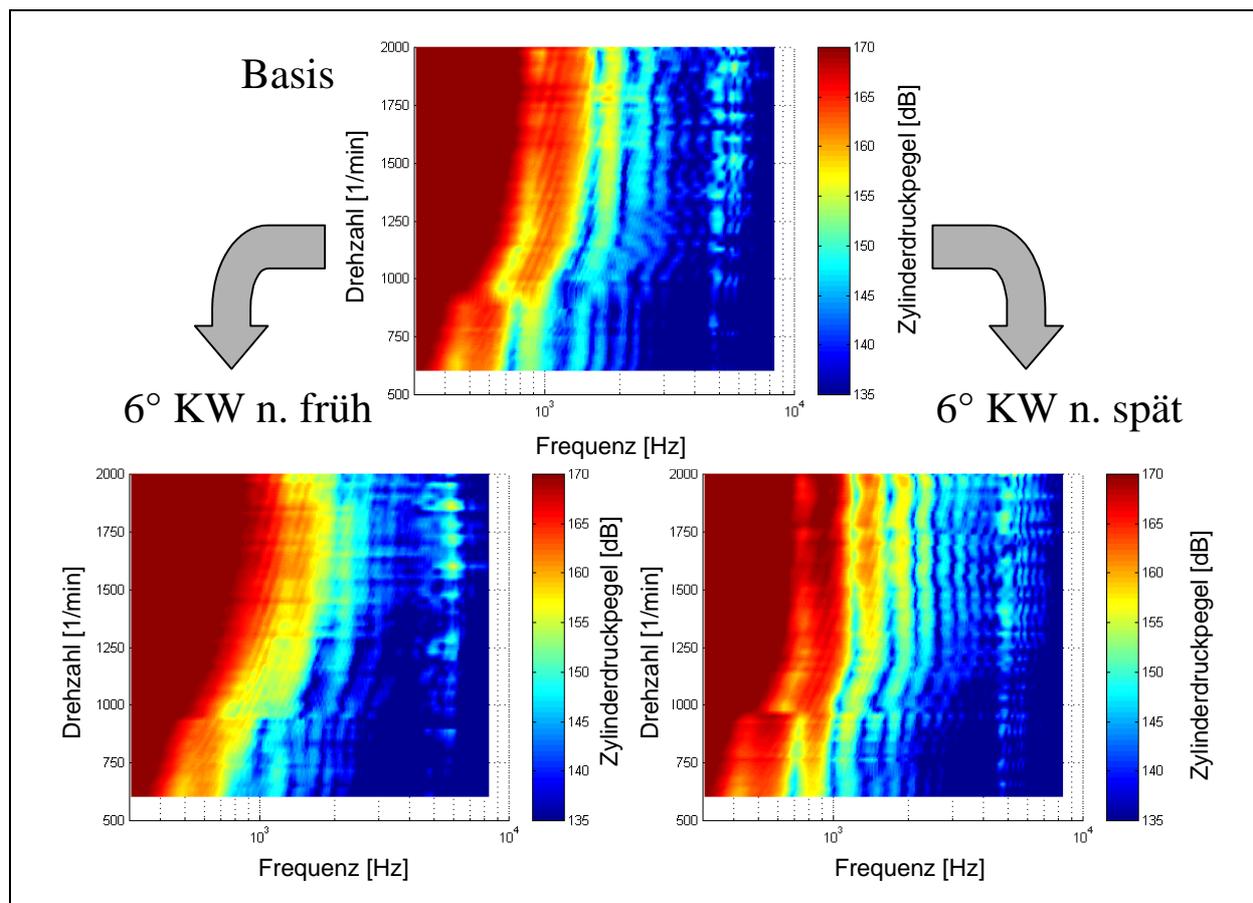


Abb. 5.11: Druckspektren bei Variation des Ansteuerbeginns der Haupteinspritzung

Die Darstellung der Druckverläufe (Abb. 5.12) zeigt den Einfluß des geänderten Ansteuerbeginns. Durch die Verlagerung der Einspritzung nach früh liegt der durch die Voreinspritzung hervorgerufene Druckgradient sehr früh und ist deutlich geringer als der Druckgradient, der durch die Verbrennung der Haupteinspritzung hervorgerufen wird. Bei späten Spritzbeginn liegen die durch die Einspritzungen hervorgerufenen Druckgradienten auf vergleichbarem Niveau und sind beide geringer als der Druckgradient der Haupteinspritzung bei frühen Spritzbeginn. Die Betrachtung der Druckverläufe im Zusammenhang mit den Druckspektren läßt den Schluß zu, daß durch die Lage und

Höhe der Druckgradienten die spektrale Zusammensetzung des Zylinderdruckspektrums in der beschriebenen Art entsteht.

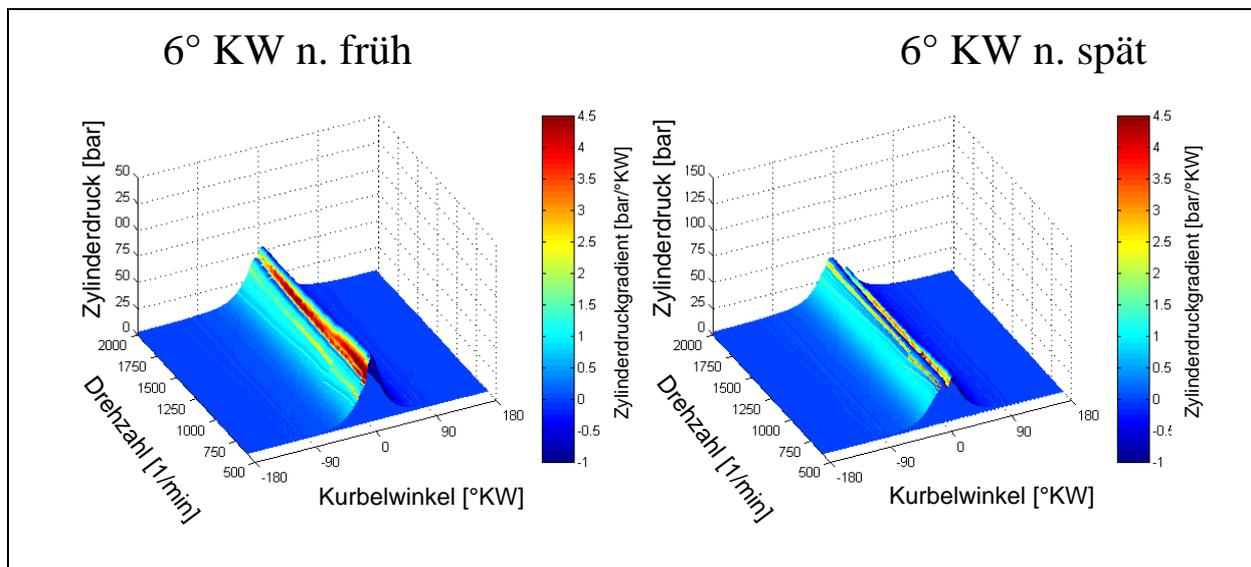


Abb. 5.12: Druckverläufe bei Variation des Ansteuerbeginns der Haupteinspritzung

Raildruck

Der Einfluß einer Anhebung bzw. Absenkung des Raildrucks um 100 bar wird in Abb. 5.13 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß sich durch die Änderung des Raildrucks das Spektrum in seinem Niveau oberhalb von 300 Hz beeinflussen läßt. Die spektrale Zusammensetzung und insbesondere die Pegelsenken werden nur in ihrem Pegelniveau beeinflusst. Die Pegeldifferenz beträgt bis zu 5 dB(A). Die Druckverläufe der drei Varianten unterscheiden sich im wesentlichen in der Höhe der Druckgradienten. Die Lage relativ zum oberen Totpunkt und der Abstand der Druckgradienten bleibt nahezu konstant. Die Anhebung der Druckgradienten ist auf eine höhere Umsetzungsrate des Gemisches bei Brennbeginn zurückzuführen. Der höhere Einspritzdruck führt zu einer verbesserten Gemischaufbereitung, so daß bei Brennbeginn eine größere zündfähige Menge zur Verfügung steht. Die Struktur der Zylinderdruckspektren bleibt weitgehend erhalten. Eine gleichmäßige Anhebung bzw. Absenkung der Druckgradienten von Vor- und Hauptverbrennung hat somit nur einen geringen Einfluß auf die Form des Pegelverlaufes über der Frequenz. Eine Absenkung der Pegel bei sonst unveränderten Parametern ist nur durch eine Verringerung des Raildrucks zu erzielen.

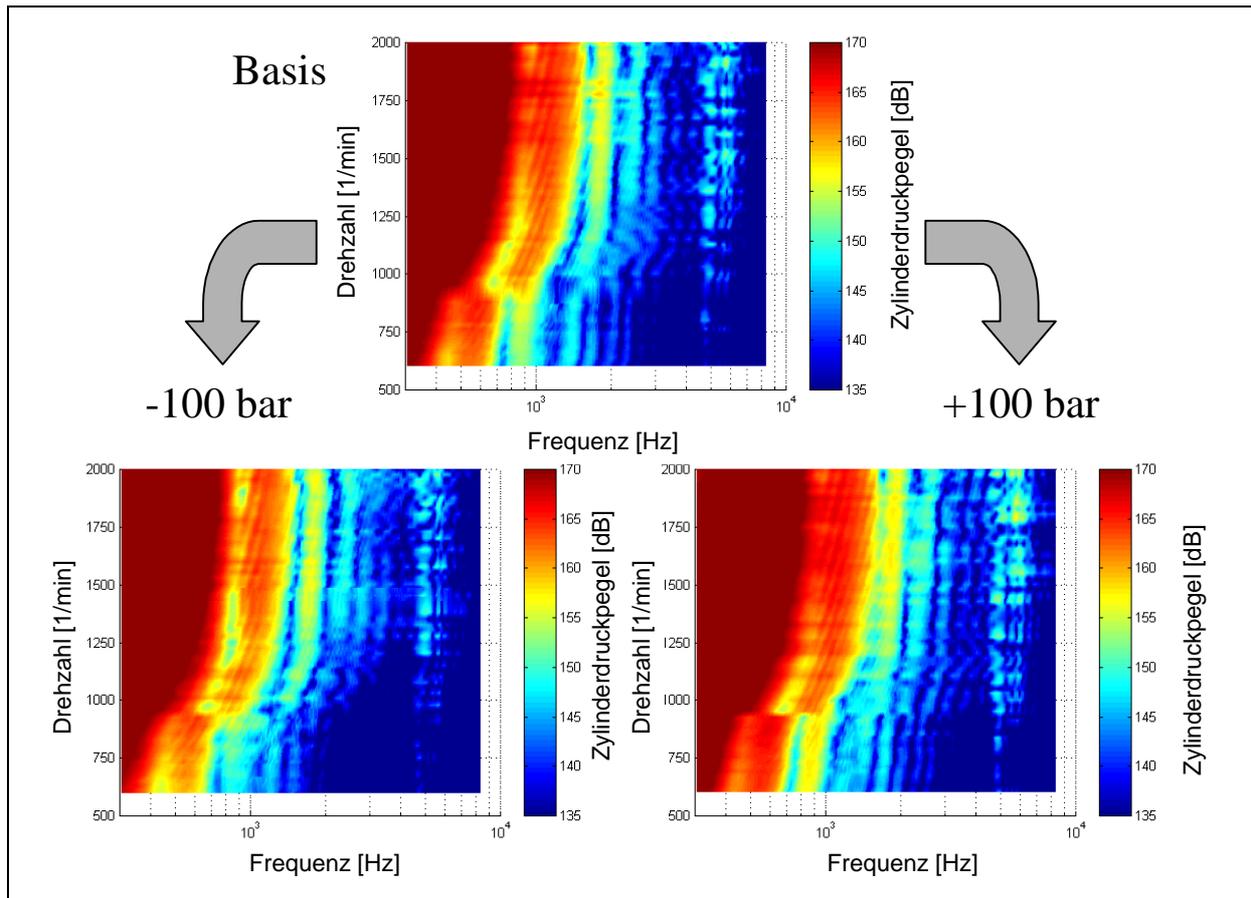


Abb. 5.13: Druckspektren bei Variation des Einspritzdruckes

Abgasrückführrate, Voreinspritzmenge, Abstand zwischen Vor- und Haupteinspritzung

Eine Erhöhung bzw. Absenkung der Abgasrückführrate führt zu vergleichbaren Ergebnissen wie eine Variation des Einspritzdruckes (vgl. Abb. 5.13). Dabei kommt es zu einer Reduktion der Zylinderdruckpegel im Frequenzbereich oberhalb 300 Hz. Die Absenkung des Zylinderdruckpegels ist auf eine Absenkung der Druckgradienten zurückzuführen und wird hervorgerufen durch eine Reduktion der Umsetzungsrate bei Brennbeginn durch das rückgeführte Abgas.

Die Anhebung der Voreinspritzmenge führt zu einem Anstieg des Druckgradienten bei der Verbrennung der Voreinspritzung. Eine Reduktion des Zylinderdruckspektrums durch Änderung der Voreinspritzmenge ist nur dann zu erzielen, wenn durch die Umsetzung der Voreinspritzmenge eine Reduktion des Druckgradienten der Haupteinspritzung erreicht wird. Eine weitere Anhebung der Voreinspritzung führt wieder zu einem Anstieg des Zylinderdruckspektrums, wenn der zunehmende Gradient der Voreinspritzung die Höhe des Gradienten der Haupteinspritzung nicht mehr beeinflusst und weiter steigt. Die Existenz von zwei ausgeprägten Druckgradienten der Verbrennung von Vor- und Haupteinspritzung führt zur Ausbildung der regelmäßigen Pegel einbrüche über der Frequenz. Die Lage der Pegel senken wird durch den zeitlichen Abstand der beiden Druckgradienten zueinander

bestimmt. Der Abstand der beiden Druckgradienten läßt sich durch den Abstand von Vor- und Haupteinspritzung sowie durch die jeweilige Zeitdauer der Gemischaufbereitung bis zur Zündung beeinflussen.

5.3.3 Abstimmung der Abgasemissionen und Auswirkung auf Zylinderdruckspektren

Eine Abstimmung der Einspritzparameter mit dem Ziel einer Verminderung der Pegel des Zylinderdruckspektrums ist eine von vielen Zielgrößen bei der Optimierung des Verbrennungsablaufes. Weitere Kriterien für die Auslegung der Verbrennung sind die Erfüllung der Abgaswerte, geringer Kraftstoffverbrauch, erzielbare Leistung und Drehmoment. Oftmals besteht zwischen der Einhaltung der Abgasemissionen und dem erzielbaren Geräuschkomfort ein Zielkonflikt. So wirkt zum Beispiel eine Absenkung des Raildruckes bzw. eine hohe Abgasrückführrate positiv auf die Pegel der Zylinderdruckspektren (vgl. Kap. 5.3.2) [16,24]. Beides führt aber in der Regel zu einem deutlichen Anstieg der Partikelemissionen und kann somit nicht das Ziel einer Abstimmung der Verbrennung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Abgasemissionen und Zylinderdruckpegel sein. Für eine Reduktion der NO_x -Emission kann aber auch eine Anhebung der Abgasrückführrate bei gleichzeitigem Anstieg der Partikelemission als Auslegung angewendet werden. Diese Komplexität der Möglichkeiten der Abstimmung zeigt, daß bei der Entwicklung eines neuen Brennverfahrens ein akzeptabler Kompromiß bezüglich aller Parameter erzielt werden muß. Um diesen Zielkonflikt näher zu untersuchen, müssen für die Entwicklung neuer Brennverfahren Kenngrößen ermittelt werden, die eine vergleichbare Bewertung des aktuellen Entwicklungsstandes erlauben. Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt wurde, spielt neben der Höhe der einzelnen Druckgradienten auch deren Lage zueinander eine Rolle zur Beeinflussung der Zylinderdruckspektren.

In diesem Kapitel sollen nun verschiedene Verbrennungsabstimmungen untersucht werden, um die Zusammenhänge zwischen Abgasemissionen und Druckspektren unter dem Aspekt der Geräuschreduktion näher zu betrachten. Für die Einhaltung zukünftiger Abgasgrenzwerte wird bei der Entwicklung neuer Brennverfahren einer Anhebung des Einspritzdruckes bei einer Verringerung des Düsenlochdurchmessers ein großes Potential zugeordnet. Beide Maßnahmen führen zu einer Verbesserung der Gemischaufbereitung bei höherer Verträglichkeit der Abgasrückführung und bieten Möglichkeiten zur Verringerung der NO_x - und Partikelemissionen. Der Zusammenhang zwischen beiden Emissionen wird als „ NO_x -Partikel-trade-off“ bezeichnet [5,12,16,42]. Alternativ kann zur qualitativen Beurteilung auch die Schwarzauchzahl nach Bosch (SZ) anstelle der Partikelemission verwendet werden. Eine Erhöhung des Dralls im Zylinder kann dabei wie die Erhöhung des Raildruckes zu einer Verschiebung der „trade-off“-Kurve in Richtung geringerer Emissionen führen. Ein hohes Drallniveau kann durch die Abschaltung eines der beiden Einlaßkanäle erzeugt werden. Der

geöffnete Kanal ist dabei als Drallkanal ausgeführt. In Abb. 5.14 wird der Zusammenhang von AGR-Rate, Einspritzdruck- und Drallanhebung als „trade-off“ schematisch dargestellt.

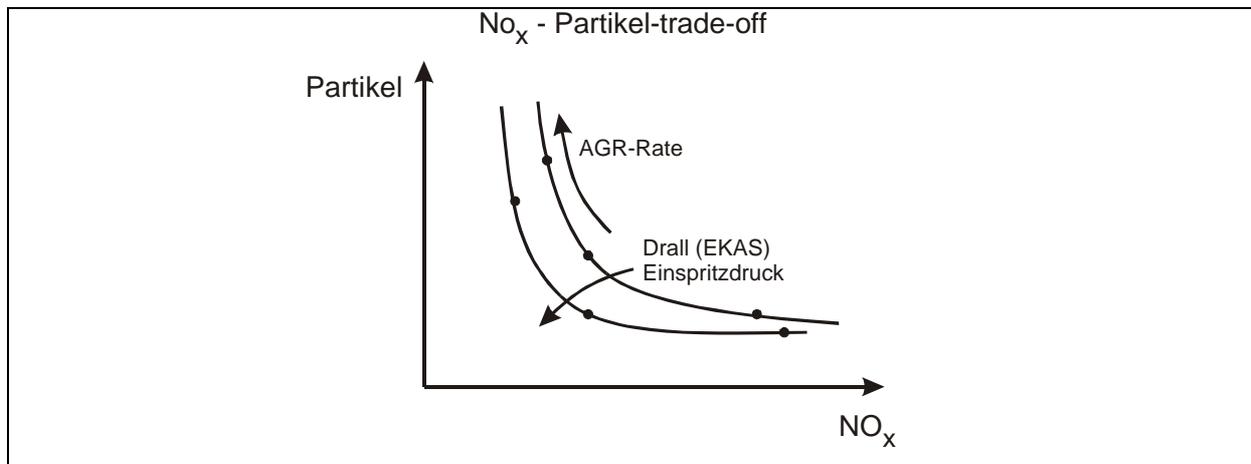


Abb. 5.14: schematische Darstellung „NO_x-Partikel-trade-off“

Die Untersuchungen gliedern sich in drei Gruppen und werden bei einer Drehzahl von 2000 1/min und einem effektiven Mitteldruck von 2 bar durchgeführt:

- Einfluß der Einlaßkanalabschaltung und Abgasrückführung
- Einfluß von Raildruck und Abgasrückführung
- Einfluß von Raildruck und Düsengeometrie

Einlaßkanalabschaltung und Abgasrückführtrate

Sowohl die Einlaßkanalabschaltung (EKAS) als auch die Erhöhung der Abgasrückführtrate dienen der Abstimmung der NO_x- und Partikelemissionen im Sinne des angesprochenen „trade-off“ Verhaltens. Die Abschaltung eines Einlaßkanals führt zu einer Erhöhung des Dralls im Brennraum und bewirkt durch die höhere Ladungsbewegung eine verbesserte Gemischaufbereitung nach erfolgter Einspritzung, so daß die Verträglichkeit der Abgasrückführung steigt. Eine Erhöhung der Abgasrückführtrate führt bei steigender Partikelemission zu einer Verbesserung der NO_x-Emission. Der Vergleich erfolgt bei geöffnetem bzw. geschlossenem Einlaßkanal. Dazu wird die Rate des rückgeführten Abgases variiert. Die sich daraus ergebenden Druckverläufe, Druckgradienten und Druckspektren sind in Abb. 5.15 dargestellt. Letztere werden über einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 10 kHz (links) sowie in einer Ausschnittsvergrößerung in einem Frequenzbereich von 300 Hz bis 10 kHz (rechts) dargestellt.

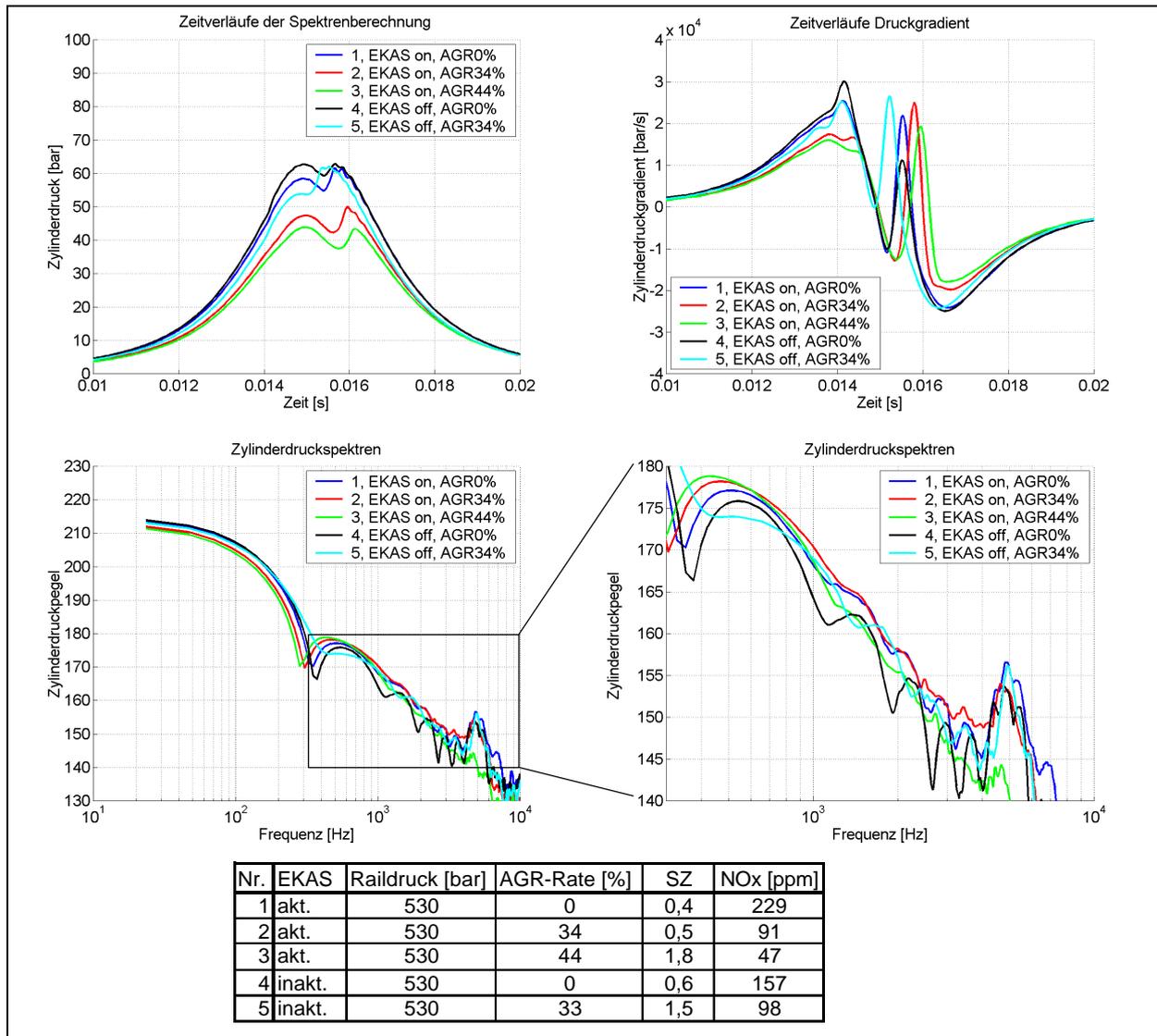


Abb. 5.15: Einfluß von EKAS und AGR (n = 2000 1/min; p_{me} = 2 bar)

Durch die Anhebung der Abgasrückführrate bei aktivierter und deaktivierter EKAS kann die Emission von NO_x bei jedoch steigender Schwarzauchmission deutlich reduziert werden. Der Einfluß beider Maßnahmen ist im Druckverlauf zu erkennen. Bei aktivierter EKAS und Abgasrückführaten von 34%, bzw. 44% wird die Umsetzung der Voreinspritzung reduziert und der Druckgradient verringert sich. Der Gradient der Haupteinspritzung bleibt auf niedrigem Niveau. Dadurch werden die charakteristischen Pegelbrüche reduziert. Die Anhebung der Abgasrückführate führt zu einer Absenkung der Druckgradienten, was in den Druckspektren durch einen größeren Abfall der Zylinderdruckpegel zu höheren Frequenzen deutlich wird. Die Absenkung der Druckgradienten wird durch die Abgasrückführung hervorgerufen. Durch sie ändert sich die spezifische Wärmekapazität und die O₂-Konzentration der Ladungsmasse. Dies führt zu einer Verzögerung des Zündbeginns sowie einer Verringerung der Brenngeschwindigkeit [5,49].

Raildruck und Abgasrückführrate

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Verträglichkeit hoher Abgasrückführaten ist die Anhebung des Einspritzdruckes, so daß die benötigte Energie zur Gemischbildung durch die Druckerhöhung ausreicht und auf eine Erhöhung des Dralls mit Hilfe der Einlaßkanalabschaltung verzichtet werden kann. Dies führt zugleich zu einer Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs [42].

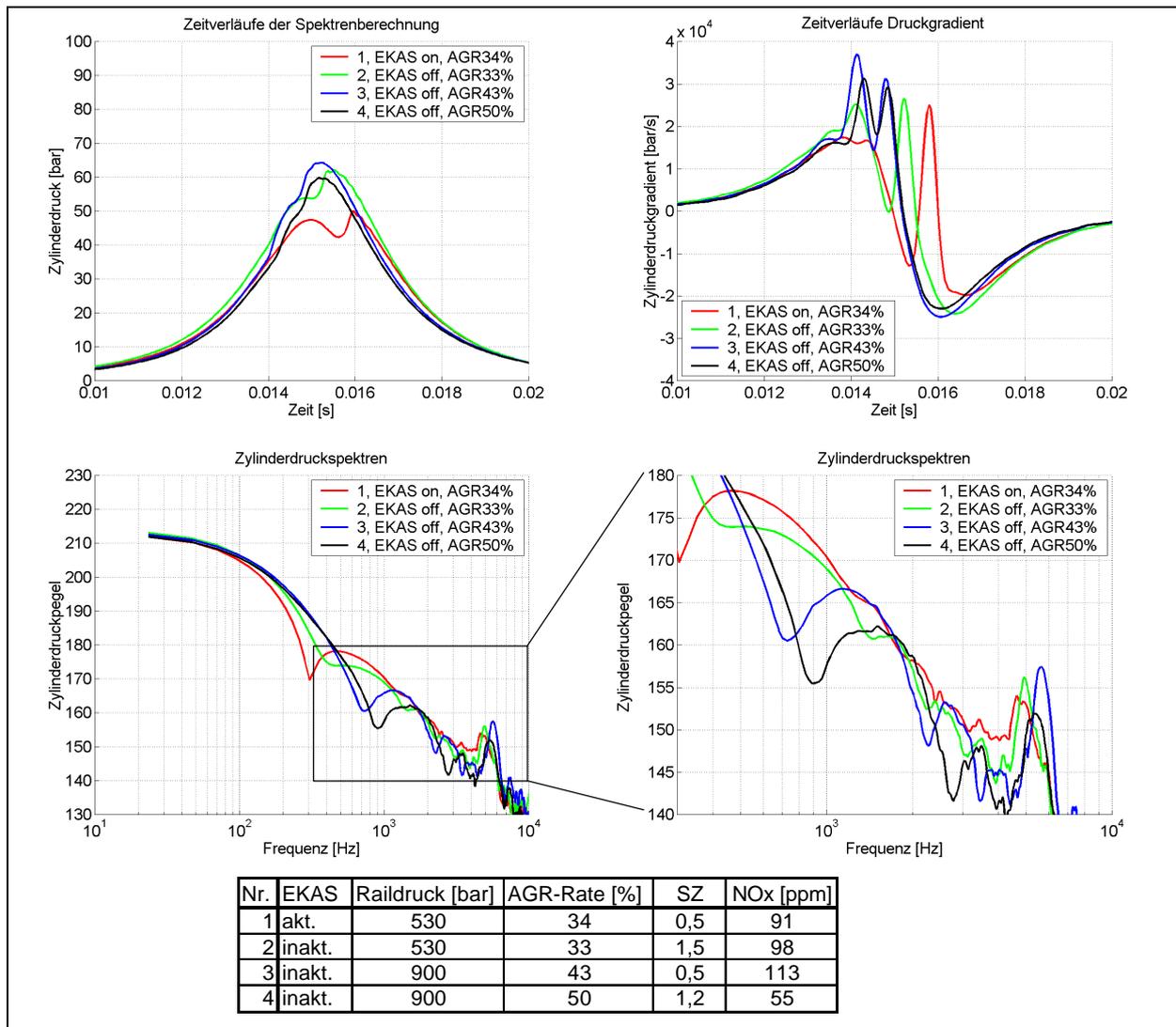


Abb. 5.16: Einfluß Raildruck und AGR (n = 2000 1/min; p_{me} = 2 bar)

Die Öffnung beider Einlaßkanäle führt zu einem deutlichen Anstieg der Schwarzauchmission bei nahezu konstanter NO_x-Emission (Abb. 5.16). Das Druckspektrum liegt im Frequenzbereich oberhalb 400 Hz mit seinen Pegelverläufen unter dem mit aktivierter Einlaßkanalabschaltung. Der Druckgradient der Haupteinspritzung ist in beiden Fällen nahezu gleich und der Gradient der Voreinspritzung wird bei geöffnetem Kanal größer. Durch die Erhöhung des Einspritzdruckes auf 900 bar bei geöffnetem Einlaßkanal steigen die Druckgradienten von Vor- und Haupteinspritzung. Im

Spektrum liegen die Einbrüche der Zylinderdruckpegel auf niedrigeren Pegelwerten als bei geringen Einspritzdrücken. Der Abstand der Druckgradienten verringert sich aufgrund der verbesserten Gemischaufbereitung und der damit verbundenen Verkürzung der Zündverzugszeit. Eine Anhebung der Abgasrückführrate auf 50% führt zu einer deutlichen Verringerung der NO_x -Emission im Vergleich zur Einspritzung mit geringem Einspritzdruck (530 bar). Die Druckgradienten beider Einspritzungen verringern sich durch die Erhöhung der Abgasrückführrate und die Zylinderdruckpegel reduzieren sich um bis zu 5 dB im Bereich von 800 Hz bis 1300 Hz. Im Vergleich zur Einstellung der Basisparameter (Kurve 1) kann im Zylinderdruckspektrum im Frequenzbereich von 500 Hz bis 1700 Hz eine Reduktion der Zylinderdruckpegel von bis zu 10 dB nachgewiesen werden. Im Frequenzbereich unterhalb 500 Hz ist ein Pegelanstieg festzustellen, der auf die Verschiebung des ersten Minimums im Pegelverlauf (300 Hz => 900 Hz) zurückzuführen ist.

Raildruck und Düsengeometrie

Als weitere Einflußparameter werden im folgenden die Möglichkeiten der Variation des Raildrucks sowie der Düsengeometrie diskutiert. Durch deren Änderung wird die Formung und Ausbildung der Einspritzstrahlen beeinflusst. Die Variation umfaßt dabei eine Verringerung des Lochdurchmessers. Der hydraulische Durchfluß (HD) beschreibt dabei die Kraftstoffmenge in cm^3 , die in einem Zeitraum von 30 Sekunden und einem Druck von 100 bar durch die Düse strömt. Um die erforderliche Menge an Kraftstoff in den Brennraum einzubringen, muß dabei der Raildruck entsprechend angepaßt werden. Die Ergebnisse dieser Variationen werden in Abb. 5.17 dargestellt. Die Analyse der Emissionswerte zeigt, daß bei konstantem Schwarzrauch die NO_x -Emission deutlich reduziert werden kann. Am Verlauf der Zylinderdruckspektren ist zu erkennen, daß durch die Anhebung des Raildrucks bei kleinem Düsenquerschnitt eine Verringerung der Zylinderdruckpegel im Frequenzbereich von 400 Hz bis 1000 Hz zu beobachten ist. Bei höheren Frequenzen kann vereinzelt ebenfalls eine Verringerung der Pegel festgestellt werden. An den Druckgradienten ist erkennbar, daß die Variation nicht zu einer Reduktion des maximal auftretenden Zylinderdruckgradienten führt. Der maximale Druckgradient wird nun durch die Voreinspritzung hervorgerufen, während der Druckgradient der Haupteinspritzung im Vergleich zu den übrigen Varianten abnimmt.

Durch die vorliegenden Variationen von Raildruck, Einlaßkanalabschaltung, Abgasrückführung und Düsengeometrie kann nachgewiesen werden, daß unter Berücksichtigung der Abgasemissionen eine Reduktion der Pegel der Zylinderdruckspektren in einigen Frequenzbereichen erzielt werden kann. Maßgeblichen Anteil an der Form der Druckspektren hat der zeitliche Verlauf des Zylinderdruckes. Durch zwei deutliche Druckgradienten der Vor- und Haupteinspritzung kann eine Reduktion der Pegel

im Zylinderdruckspektrum erzielt werden, die durch die charakteristischen periodischen Einbrüche im Spektrum erreicht werden. Durch die zeitliche Lage der Druckgradienten zueinander wird die Lage des ersten und der weiteren Minima und Maxima des Druckspektrums über der Frequenz beeinflusst. Zur Reduktion des durch die Verbrennung hervorgerufenen Anteils des Motorengeräusches sollte der Zylinderdruckverlauf und seine spektrale Zusammensetzung auf das Übertragungsverhalten der Motorstruktur abgestimmt werden. Um dies zu erreichen, müssen Parameter des Zylinderdruckverlaufes identifiziert werden, mit deren Hilfe eine Abstimmung des Pegelverlaufes des Spektrums auf die Übertragungseigenschaften der Motorstruktur möglich ist.

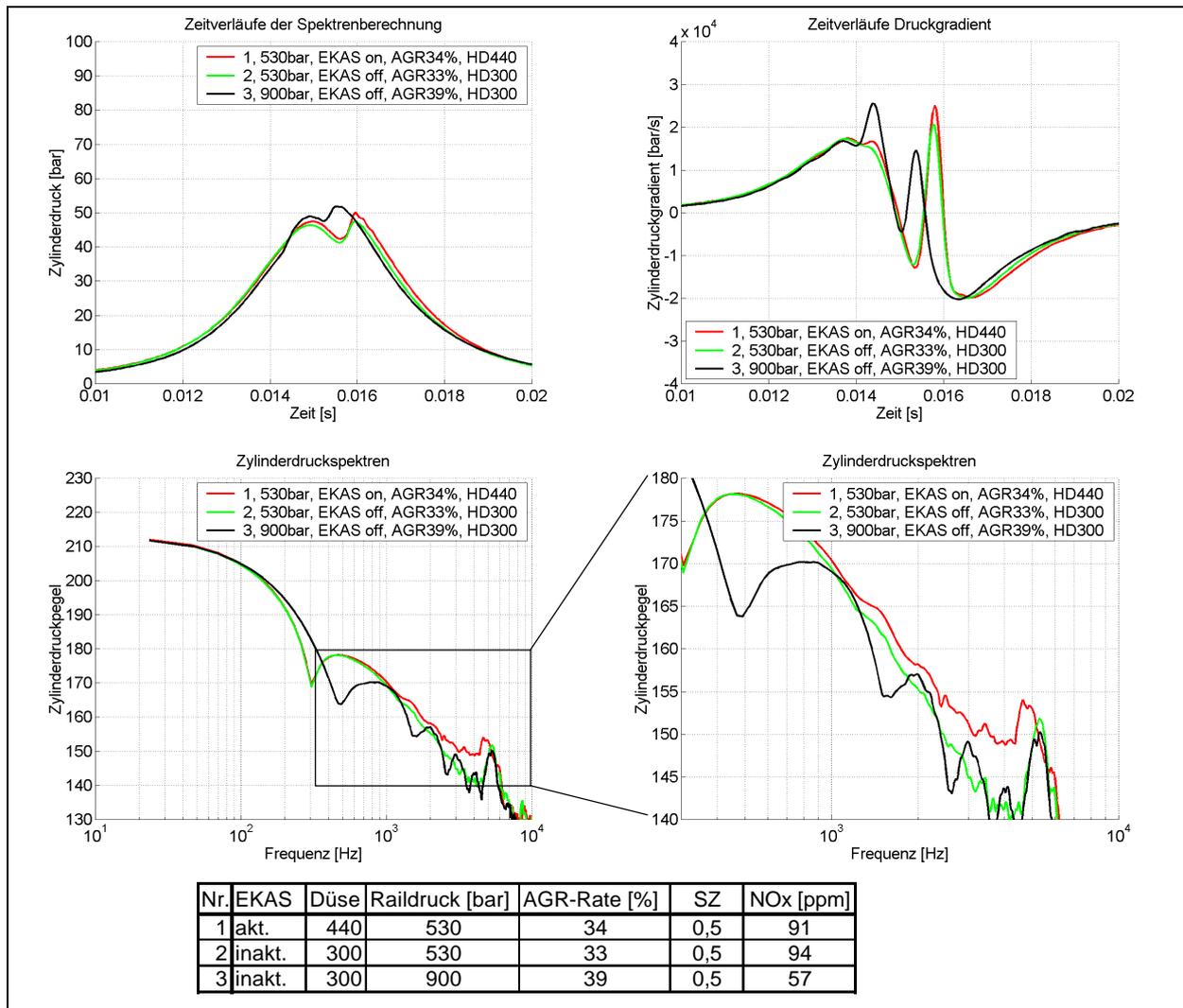


Abb. 5.17: Einfluß Raildruck und Düsengeometrie (n = 2000 1/min; p_{me} = 2 bar)

5.4 Analyse von Zylinderdruckverläufen - theoretische Betrachtung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt werden konnte, kann eine Variation verschiedener Einspritzparameter unter Berücksichtigung der Emissionswerte zu zufriedenstellenden Ergebnissen im Hinblick auf die Verringerung der Zylinderdruckpegel führen. Im folgenden werden zwei Verfahren vorgestellt, die es erlauben auf Basis weniger Parameter des Zylinderdruckverlaufes eine Vorhersage des Zylinderdruckspektrums durchzuführen:

- Analyse durch Abschätzverfahren
- Analyse durch Interpolation von Zylinderdruckverläufen

Mit Hilfe dieser Verfahren soll eine gezielte Entwicklung der Verbrennung mit dem Ziel einer Verringerung der Pegel des Zylinderdruckspektrums ermöglicht werden.

5.4.1 Analyse durch Abschätzverfahren

Das Abschätzverfahren, das in Kapitel 3 beschrieben wird, soll nun auf Zylinderdruckverläufe angewendet werden. Dadurch wird ermöglicht, akustische Kenngrößen, die aus dem Zeitverlauf des Zylinderdruckes ermittelt werden können, für eine Abschätzung des zu erwartenden Zylinderdruckpegels und somit der Anregung durch den Verbrennungsvorgang zu erhalten.

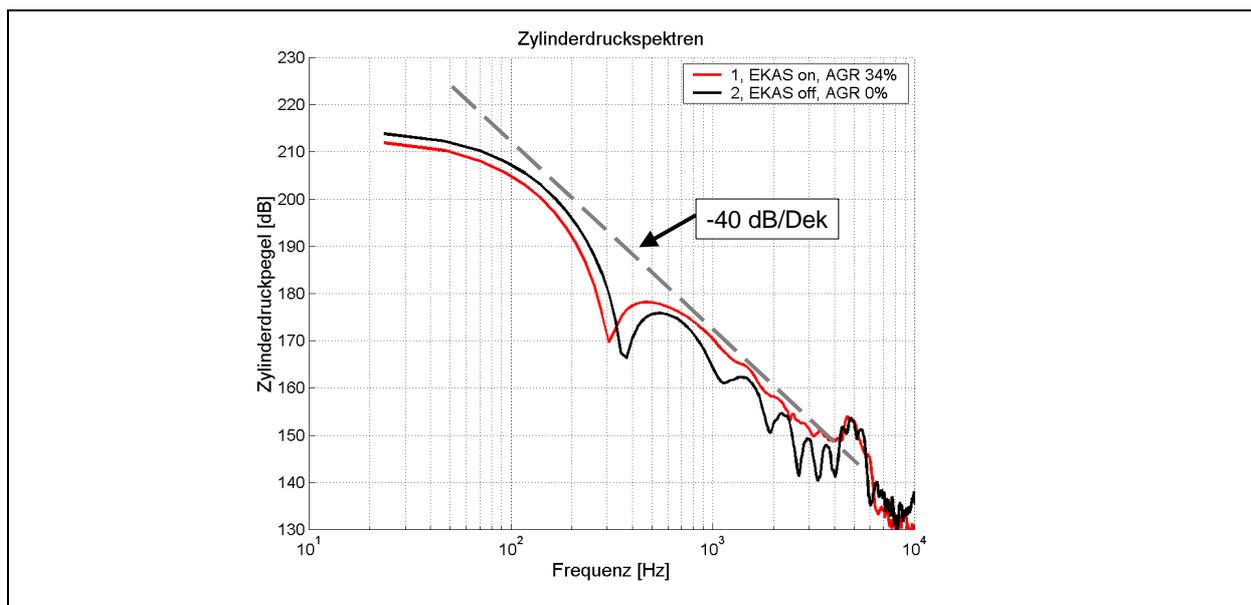


Abb. 5.18: Analyse von Zylinderdruckspektren

Die Anwendung des Abschätzverfahrens nach Föller [23] erlaubt Aussagen über die Form des zu erwartenden Anregungsspektrums. Es liefert insbesondere Aussagen über den maximal zu erreichenden Abfall des Zylinderdruckpegels über der Frequenz. Über das Abschätzverfahren kann die Einhüllende der zu erwartenden Pegel ermittelt werden. Es eignet sich somit für eine Näherung eines prinzipiellen Verlaufs des Spektrums.

Bei der Analyse der Druckspektren aus Kap. 5.3.3 kann mit Hilfe des Abschätzverfahrens festgestellt werden, daß alle analysierten Zylinderdruckverläufe einen maximalen Abfall von 40 dB/Dekade aufweisen (Abb. 5.18). Nach der Theorie des Abschätzverfahrens zeigt dies, daß das Spektrum im interessierenden Frequenzbereich von 300 Hz bis zu 4 kHz durch deren erste Ableitung bestimmt wird.

In Abb. 5.19 werden die mit Hilfe des Abschätzverfahrens ermittelten Einhüllenden an zwei ausgewählten Druckverläufen dargestellt. Dabei ist zu beobachten, daß fast das gesamte Spektrum im Frequenzbereich von 200 Hz bis 4 kHz durch die Abschätzgerade mit einem Abfall von 40 dB/Dekade bestimmt wird. Diese ergibt sich aus der Summation der Beträge der Druckgradienten. Lediglich im Bereich oberhalb von 4 kHz wird die Einhüllende von Pegelüberhöhungen, die auf Brennraumresonanzen bzw. Pfeifenschwingungen der Druckquarze zurückzuführen sind, nach oben überschritten. Ein Abfall des Spektrums von 60 dB/Dekade wird erst in einem Frequenzbereich oberhalb 8 kHz wirksam. Dies bedeutet, daß in den vorliegenden Fällen die Druckspektren ausschließlich über die Höhe der Druckgradienten zu beeinflussen sind. Für die Realisierung eines Abfalls von 60 dB/Dekade müßte die zweite Ableitung des Druckgradienten deutlich niedrigere Werte aufweisen. Dies wäre jedoch nur durch einen langsameren Verbrennungsablauf zu erreichen und kann in den betrachteten Fällen auch mit sehr hohen AGR-Raten oder einer Absenkung des Raildruckes nicht erreicht werden.

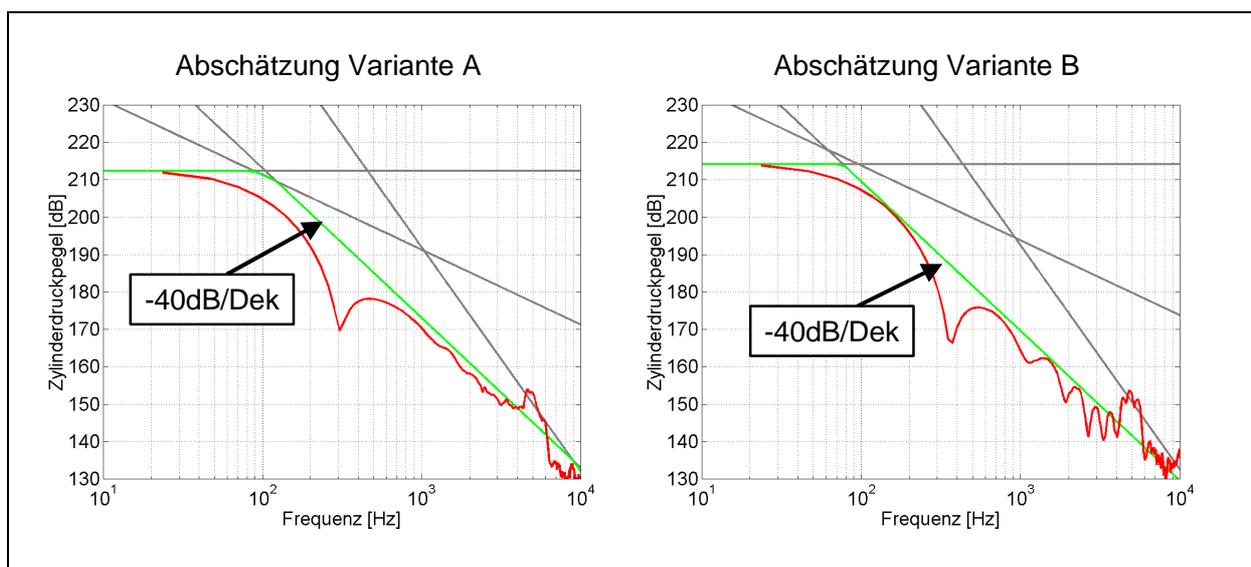


Abb. 5.19: Anwendung des Abschätzverfahrens

Zusammenfassend liefert das Verfahren eine obere Abschätzung der Spektren der Druckverläufe. Darüber hinaus kann es Hinweise liefern, wie eine prinzipielle Verbesserung mit einem Abfall des Spektrums mit 60 dB/Dekade zu erzielen ist. Die maßgebende Kenngröße für die Einhüllende der Zylinderdruckspektren ist in den untersuchten Fällen die Summe der Druckgradienten. Die Absenkung der Einhüllenden und somit eine Pegelreduktion kann nur durch niedrigere Druckgradienten erreicht werden.

Das Verfahren ist zur Vorhersage des genauen Verlaufs des Zylinderdruckspektrums nicht geeignet. Aus diesem Grund ist es für eine gezielte Optimierung nicht anwendbar. Tendenzaussagen zur Formulierung von Anforderungen an den Verlauf des Zylinderdruckes und über die anzustrebende Höhe der Druckgradienten zur Reduktion der Pegelwerte sind jedoch möglich.

5.4.2 Analyse durch Interpolation von Zylinderdruckverläufen

Zur Untersuchung und Analyse von Zylinderdruckverläufen und ihren Spektren wird ein Verfahren vorgestellt, das eine Nachbildung von Druckverläufen ermöglicht. Dieses basiert im wesentlichen auf einer Interpolation des Druckverlaufes durch Funktionen, die eine überschaubare Anzahl von Parametern besitzen, um diese für Sensitivitätsanalysen variieren zu können. Wie in Kapitel 5.4.1 gezeigt werden konnte, wird das Zylinderdruckspektrum vom Gradienten des Druckverlaufs im Frequenzbereich bis ca. 4 kHz bestimmt. Für die weitere Analyse des Zylinderdruckverlaufs muß also eine Interpolation gefunden werden, die den Verlauf der Ableitung des Druckes gemessener Druckverläufe ausreichend genau abbildet.

Grundlage der Interpolation ist die Aufteilung des Zylinderdruckverlaufes in 3 Teilbereiche:

- Anteil des Druckverlaufs durch die Kompression
- Anteil des Druckverlaufs durch Umsetzung der Voreinspritzung
- Anteil des Druckverlaufs durch Umsetzung der Haupteinspritzung

Der Anteil des Druckverlaufs durch die Kompression beinhaltet dabei den Druckverlauf, der sich ergibt, wenn keine Einspritzung erfolgt. Er ist jedoch nicht mit dem Druckverlauf gleichzusetzen, der sich im Schleppebetrieb des Motors einstellt, da sich die Zusammensetzung der Ladung (z.B. durch AGR), deren Druckniveau (Ladedruck) sowie die Temperatur im Brennraum davon unterscheidet. Auf den Kompressionsdruck, der sich mit Hilfe einer Fourierreihenentwicklung ermitteln läßt, wird der sogenannte Differenzdruck addiert. Dieser Differenzdruck wird durch Subtraktion des Kompressionsdruckes vom gemessenen Zylinderdruck gebildet. Für die Interpolation der Druckverläufe wird in einem ersten Schritt versucht, den Differenzdruck der Interpolation so genau

wie möglich dem aus der Messung ermittelten anzupassen. Der Differenzdruck wird dazu in die zwei Bereiche des Druckanteils der Verbrennung von Voreinspritzung und Haupteinspritzung aufgeteilt. Beide Anteile können über stetige Funktionen dem aus Meßdaten ermittelten Verlauf angenähert werden.

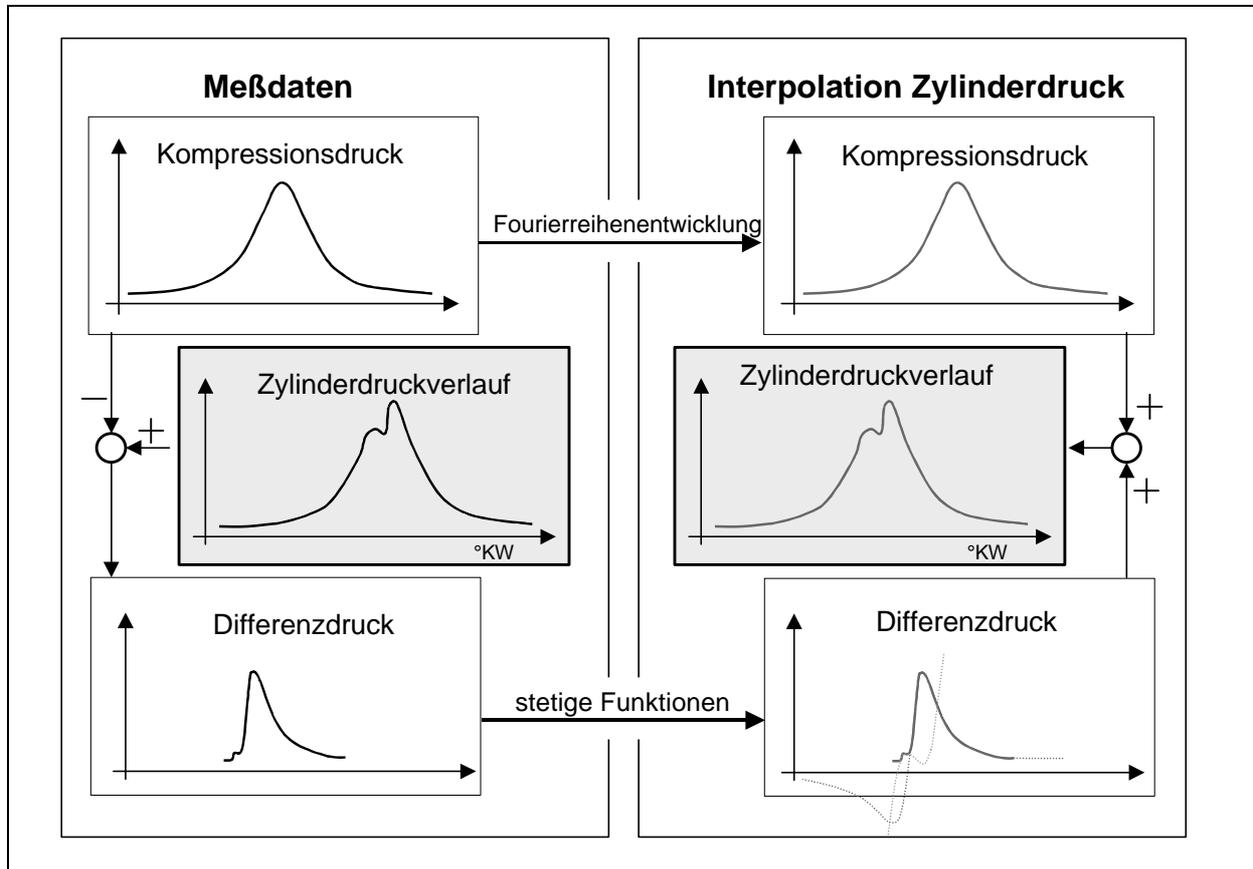


Abb. 5.20: Vorgehensweise zur Ermittlung der interpolierten Zylinderdruckverläufe

Mit Hilfe eines empirischen Vorgehens können zwei einfache Funktionsverläufe gefunden werden, die es erlauben, den Zylinderdruck hinreichend genau abzubilden. Der Bereich der Voreinspritzung wird dabei durch ein Polynom 3. Grades angenähert. Der Bereich der Haupteinspritzung kann durch das Produkt einer Exponentialfunktion mit einem linearen Term angenähert werden. Zur Vereinfachung kann dieser wiederum durch eine Reihenentwicklung ersetzt werden, die nach dem 3. Glied abgebrochen wird. Zur Anpassung der Gleichungen an die Meßdaten können nun Bedingungen formuliert werden, denen die Gleichungen genügen müssen, um eine hinreichend genaue Nachbildung des Differenzdruckverlaufes zu erreichen. Die Funktionen der Differenzdruckverläufe von Vor- und Hauptverbrennung sowie deren benötigte Parameter werden in Abb. 5.21 dargestellt.

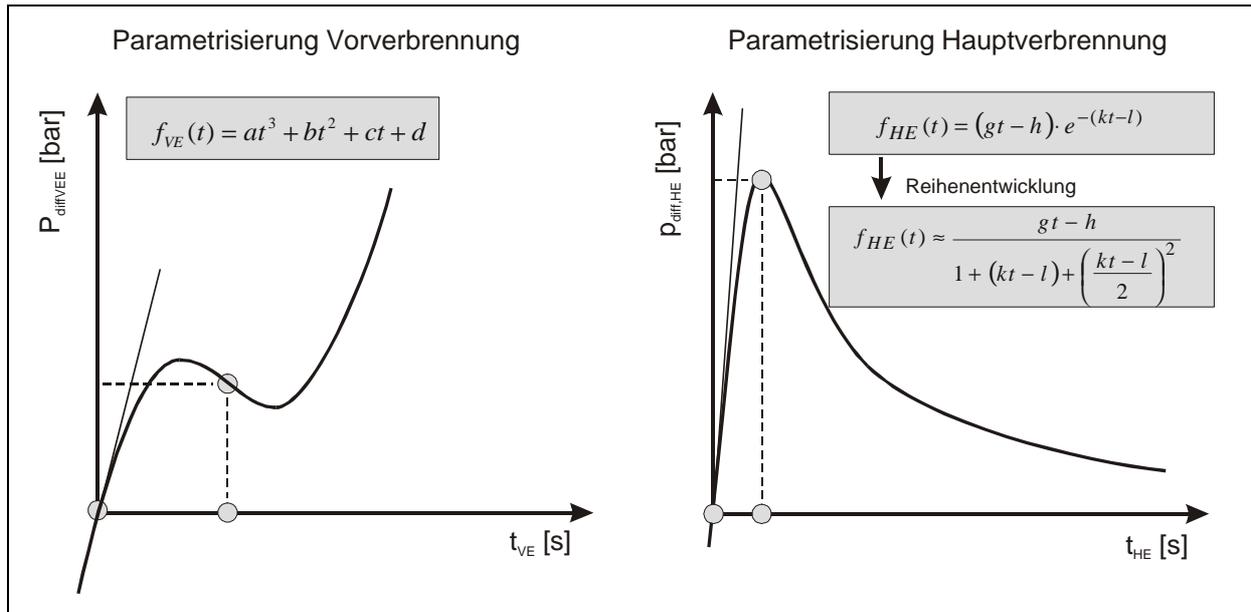


Abb. 5.21: Funktionsverläufe und Parametrisierung Vor- und Hauptverbrennung

Die Parameter des Druckverlaufes der Vorverbrennung können über folgende Randbedingungen bestimmt werden:

- Ort des Beginns der Verbrennung des voreingespritzten Kraftstoffes
- Steigung des Druckes an diesem Ort in bar pro Grad Kurbelwinkel bzw. pro Zeit
- Wert des Druckes an einem bestimmten Ort (z.B. Ende Vor- bzw. Anfang Hauptverbrennung)
- Steigung des Druckes am Übergang Ende Vor- bzw. Anfang Hauptverbrennung

Die Parameter der Hauptverbrennung können über folgende Randbedingungen bestimmt werden:

- Ort des Beginns der Verbrennung der Haupteinspritzung
- Steigung des Druckes an diesem Ort in bar pro Grad Kurbelwinkel bzw. pro Zeit
- Ort des Maximums der Funktion

Wert des Maximums

Der gesamte interpolierte Druckverlauf wird durch die Addition des Kompressionsdruckes und den Anteilen aus den Druckverläufen der Vor- bzw. Hauptverbrennung ermittelt (Abb. 5.22). Durch die nur in einem kleinen Zeitfenster verwendeten Funktionen für die Vor- und Hauptverbrennung entstehen an den Übergangsstellen Unstetigkeiten der höheren Zeitableitungen. Die gesamte Funktion ist einmal stetig ableitbar und es kann somit ein maximaler Abfall von -40 dB/Dekade im Druckspektrum abgebildet werden.

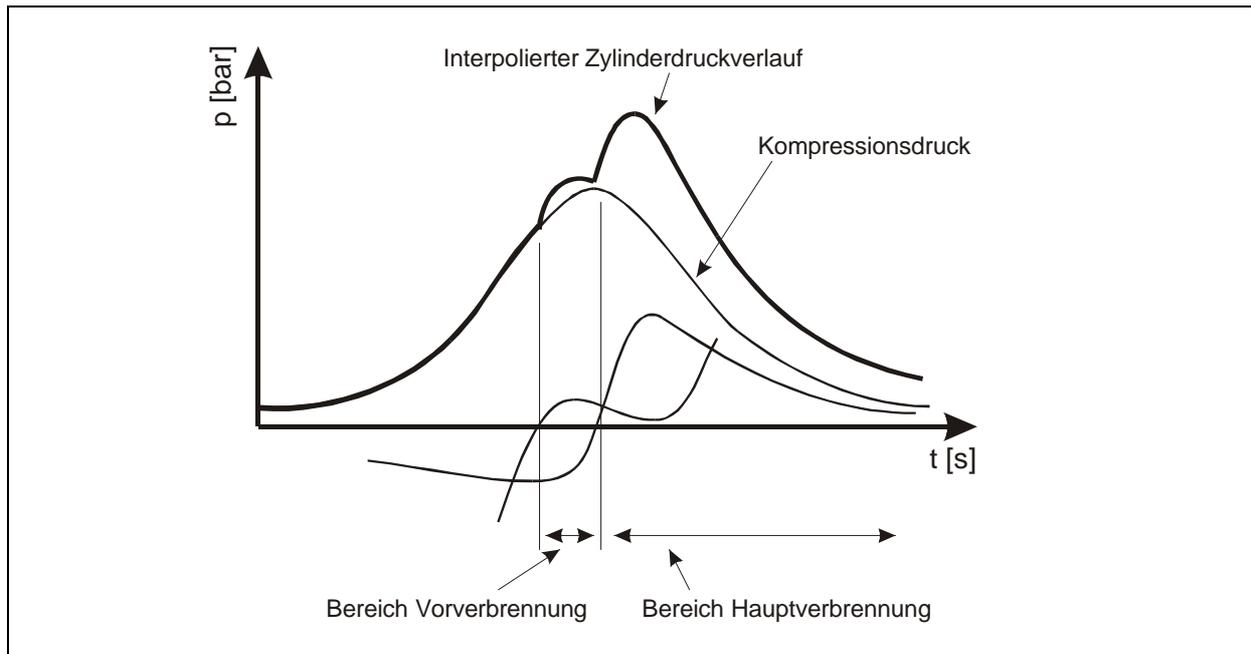


Abb. 5.22: Interpolation Zylinderdruckverlauf

Ein Abgleich zwischen gemessenem und interpoliertem Druckverlauf zeigt, daß die Existenz der Unstetigkeitsstellen für die Analyse der Verläufe und der Ermittlung der Spektren nur eine untergeordnete Rolle spielt. Ein Vergleich zwischen den indizierten Druckverläufen im Motorbetrieb und den durch die Interpolation gewonnenen zeigt eine gute Übereinstimmung (Abb. 5.23). Die Übereinstimmung ist sowohl in der Nachbildung der Zeitverläufe als auch in den sich daraus ergebenden Spektren als gut zu bezeichnen. Die Güte der Übereinstimmung hängt dabei im wesentlichen von der Identifikation der Parameter zur Modellierung des Beginns der Vorverbrennung sowie des Übergangs von Vor- zu Hauptverbrennung ab. Im einzelnen sind dies:

- Beginn der Vorverbrennung (Lage relativ zu OT)
- Steigung bei Beginn Vorverbrennung
- Beginn der Hauptverbrennung (Lage relativ zu OT)
- Steigung bei Beginn der Hauptverbrennung
- Maximal erreichter Spitzendruck

Der Abgleich wird auf Basis von Meßdaten an Motor C bei $n = 1600$ 1/min und einem Drehmoment von $M_d = 120$ Nm durchgeführt. Dies entspricht einem effektivem Mitteldruck von $p_{me} = 4$ bar. Die Darstellung der Ergebnisse in Abb. 5.23 zeigt die Druckverläufe, Druckgradienten sowie die ermittelten Zylinderdruckspektren im Frequenzbereich von 100 Hz bis 4 kHz. Die Meßdaten und die Daten der Druckverlaufsinterpolation werden zur Analyse mit einem 5 kHz Tiefpaßfilter vorverarbeitet. Dies ist bei der Analyse der Meßdaten zur Unterdrückung der Brennraumresonanzen notwendig und führt bei den interpolierten Daten zu einem stetigen Funktionsverlauf an den

Schnittpunkten der Funktionsverläufe. Bei Betrachtung des Abgleichs ist zu erkennen, daß die ermittelten Spektren der Druckverläufe nur geringe Abweichungen von zum Teil unter 1 dB zwischen Meßdaten und Simulation aufweisen. Diese können durch eine möglichst exakte Nachbildung des Verlaufes des Druckgradienten der Messung erreicht werden. Eine exakte Nachbildung des Druckverlaufes ist nicht notwendig und beeinflußt lediglich den Frequenzbereich bis 200 Hz. Ein Abgleich bei weiteren Betriebspunkten zeigt ebenfalls gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und interpolierten Daten.

Aufgrund der hohen Güte der Interpolation können nun auf Basis interpolierter Druckverläufe Parametervariationen durchgeführt und eine Abschätzung des Potentials zur Verringerung der Anregung durch den Zylinderdruckverlauf getroffen werden.

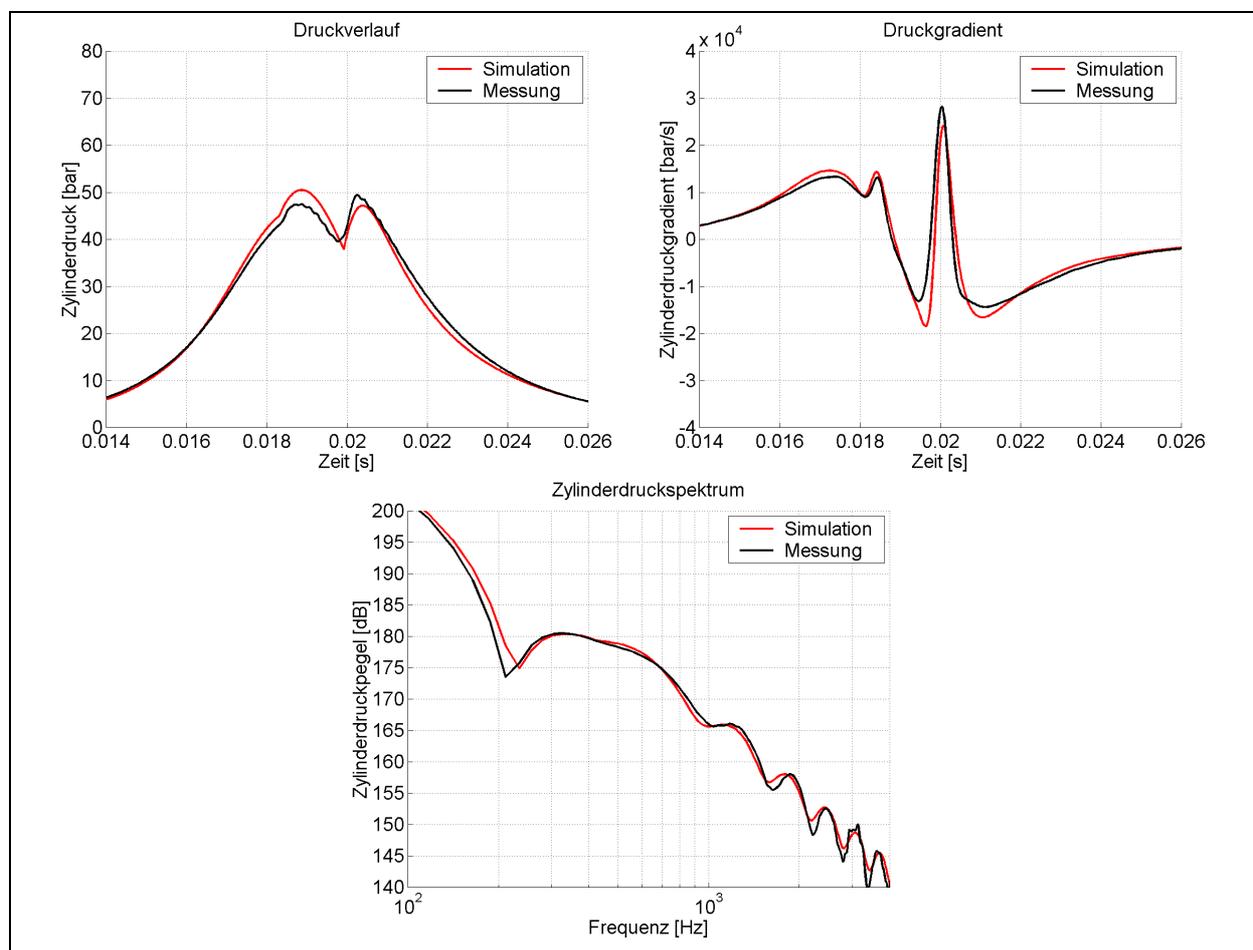


Abb. 5.23: Abgleich zwischen Messung und Interpolation von Druckverläufen

5.4.3 Untersuchungen zur Parametersensitivität

Da der Vergleich von interpolierten Druckverläufen mit Meßdaten eine hohe Übereinstimmung im Anregungsspektrum zeigt, soll nun mit Hilfe der Interpolation das Potential zur Beeinflussung des Pegelverlaufes des Anregungsspektrums durch Variation einzelner Parameter des Druckverlaufes aufgezeigt werden. Die Untersuchungen umfassen dabei eine Analyse der Struktur des Spektrums der Verbrennungsanregung sowie Betrachtungen zur Parametersensitivität einzelner Kenngrößen des Druckverlaufs. Diese basieren auf der Interpolation von Meßdaten des Achtzylinder-Dieselmotors (Motor C). Die Variationen können in anderen Betriebspunkten sowie bei den übrigen Versuchsträgern in ähnlicher Weise bestätigt werden.

Struktur des Anregungsspektrums

Die mitunter deutlich zu erkennende Struktur lokaler Minima und Maxima in dem im allgemeinen mit 40 dB/Dekade abfallenden Spektrum (siehe Abbildung 5.18) erinnert an die harmonischen Vielfachen eines periodischen Signals. Betrachtet man die Auswertungen der Spektren indizierter Druckverläufe bei Drehzahlhochläufen, so erkennt man, daß diese Minima und Maxima im Wasserfalldiagramm unabhängig von der Drehzahl (und damit von der Periode des Verbrennungszyklus) sind. Ermittelt man den zeitlichen Abstand zwischen den beiden lokalen Maxima des Druckgradienten und bildet daraus den Kehrwert, so erhält man eine Frequenz, die zusammen mit ihren Vielfachen die lokalen Überhöhungen im Anregungsspektrum wiedergibt. Der Abstand der Maxima der Druckgradienten von Vor- und Haupteinspritzung in Abbildung 5.23 beträgt 1,6 ms. Dies entspricht einer Grundfrequenz von 625 Hz. Betrachtet man nun das Spektrum, so kann festgestellt werden, daß die Maxima im Spektrum Vielfache der Grundfrequenz darstellen.

Auswahl relevanter Parametervariationen

Nachdem die Herkunft der periodischen Einbrüche in den Spektren von Zylinderdruckverläufen geklärt ist, soll anhand von ausgewählten Parametervariationen die Empfindlichkeit des Pegelverlaufes auf Änderungen des Druckverlaufes untersucht werden. Die Untersuchungen werden dabei ausgehend von einer Basiseinstellung der Einspritzparameter durchgeführt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Drehzahl- und Lastpunkte ist dabei möglich, solange sich der Druckverlauf mit Hilfe der gewählten Interpolationsfunktionen abbilden läßt. Die Parameter der Einspritzung des untersuchten Betriebspunktes werden in Tabelle 5.3 angegeben.

Drehzahl	n=1600 1/min
Last	$M_d=120 \text{ Nm}$ ($p_{me}=4 \text{ bar}$)
Einspritzmenge	18,1 mm ³ / ASP
Ansteuerbeginn Haupteinspritzung	0,4° KW n. OT
Abstand Vor- zu Haupteinspritzung	14,7°KW
Voreinspritzmenge	2,3 mm ³ / ASP
Raildruck	550 bar
Abgasrückführung	400 mg Luft / ASP

Tabelle 5.3: Applikationsdaten des untersuchten Betriebspunktes

Zur Untersuchung des Potentials werden folgende Variationen ausgewählt:

- Variation des Abstandes von Vor- zu Hauptverbrennung
- Variation des Gradienten der Vor- und Hauptverbrennung
- Variation der Verbrennungslage

Variation des Abstandes von Vor- zu Hauptverbrennung

Durch die Variation des Abstandes von Vor- zu Hauptverbrennung soll der Einfluß der Lage der Vorverbrennung auf den Verlauf des Spektrums untersucht werden. Dabei wird bei der Ermittlung der Parameterwerte vom Basisbetriebspunkt der Messungen ein Startdatensatz für die Interpolation ermittelt und mit der Messung abgeglichen. Ausgehend von dieser Interpolation werden nun einzelne Parameter des Synthesedatensatzes verändert. Zunächst wird der Abstand der Vorverbrennung zur Hauptverbrennung variiert. Der Druckverlauf der Hauptverbrennung sowie der daraus abgeleitete Druckgradient bleiben von der Variation unbeeinflußt. Dadurch kann gewährleistet werden, daß nur der Einfluß der Variation eines Parameters untersucht wird. Im realen Motorbetrieb hat eine Änderung des Abstandes der Voreinspritzung zur Haupteinspritzung meist auch einen Einfluß auf den Brennbeginn der Haupteinspritzung und somit auch auf den Gradienten. Der Abstand der Voreinspritzung relativ zur Haupteinspritzung wird im untersuchten Fall um 3° KW vergrößert bzw. um 3° und 6°KW verringert. Eine Änderung des Abstandes von 3° KW entsprechen bei 1600 1/min einer Zeitdifferenz von 0,3 ms.

Die Analyse der Variation der Lage der Vorverbrennung (Abb. 5.24) zeigt, daß sich bei der Interpolation die Druckgradienten der Hauptverbrennung nicht ändern und sich die Variation nur auf die Lage der Vorverbrennung auswirkt. Die zeitliche Differenz der Druckgradienten beträgt dabei zwischen 1,9 ms (526 Hz) und 1 ms (1000 Hz). In der Darstellung der Spektren findet man die

Vielfachen dieser Zeitdifferenz als Frequenzwerte der Maxima. Der Verlauf der Spektren mit einem Abfall von 40 dB/Dekade wird durch die Lage der Vorverbrennung nicht beeinflusst. Die Unterschiede in den Pegelverläufen der Zylinderdruckspektren ergeben sich durch die unterschiedliche Frequenzlage der Maxima. Die Pegelverläufe bewegen sich dabei in einem Band von 5 dB. Eine Reduktion der Verbrennungsanregung ist nur durch eine gezielte Auslegung des Abstandes und der daraus bedingten Lage der Maxima und Minima in einem ausgewähltem Frequenzbereich möglich.

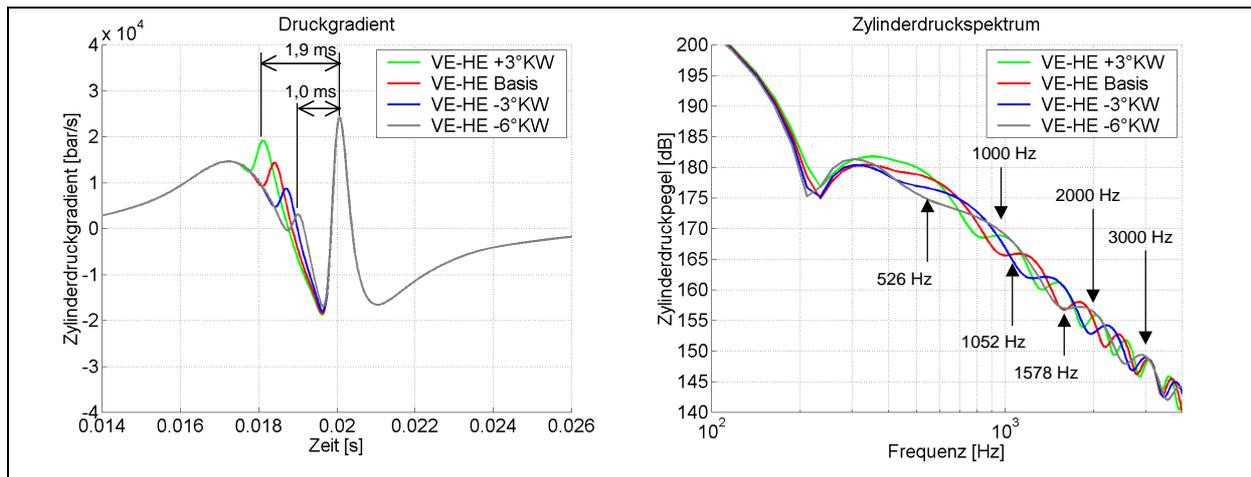


Abb. 5.24: Variation Abstand Vor- zu Hauptverbrennung

Variation des Gradienten der Vorverbrennung und der Hauptverbrennung

Als nächstes wird die Höhe der Gradienten von Vor- und Hauptverbrennung variiert, um den Einfluß dieser Größen auf das Druckspektrum aufzuzeigen. Dabei wird der Gradient der Vorverbrennung in zwei Schritten reduziert, was näherungsweise einer Verringerung der Voreinspritzmenge entspricht. Der Entfall bzw. zu geringe Mengen der Voreinspritzung führen im Motorbetrieb jedoch meist zu einem Anstieg des Gradienten der Hauptverbrennung. Dies wird in einem zweiten Schritt der Simulation verdeutlicht.

Eine Verringerung des Gradienten der Vorverbrennung (Abb. 5.25) unter Beibehaltung des Gradienten der Hauptverbrennung führt zu einer Reduktion der Maxima und Minima. Der Pegelverlauf fällt in allen drei betrachteten Fällen mit 40 dB/Dekade ab. Der Gradient der Vorverbrennung und seine Höhe beeinflussen die Höhe der auftretenden Maxima und Minima. Ein eindeutiges Potential für eine Pegelreduktion ergibt sich nicht. Es kann lediglich die Lage der lokalen Minima zur Pegelreduktion ausgenutzt werden.

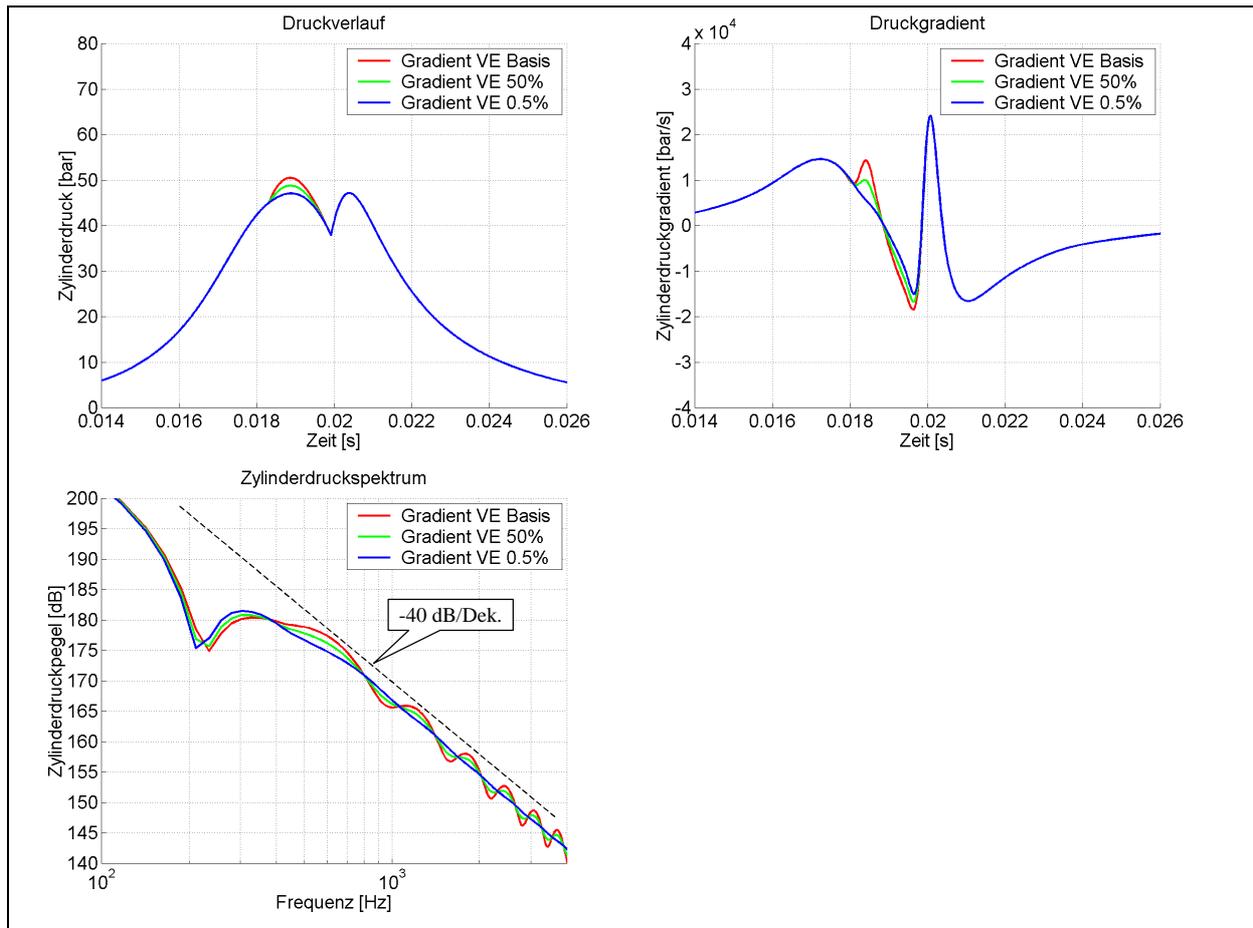


Abb. 5.25: Variation des Gradienten der Vorverbrennung

Die Reduktion des Gradienten der Vorverbrennung bei Anstieg des Gradienten der Hauptverbrennung wird in Abb. 5.26 dargestellt. Dabei wird zunächst der Gradient der Vorverbrennung reduziert und der Gradient der Hauptverbrennung in zwei Schritten erhöht (Variante B, C). Durch die Erhöhung der Druckgradienten liegt der Pegelverlauf der Varianten ab 800 Hz über dem Verlauf des Basiszustandes (Variante A). Dabei steigt die Pegeldifferenz mit zunehmender Frequenz.

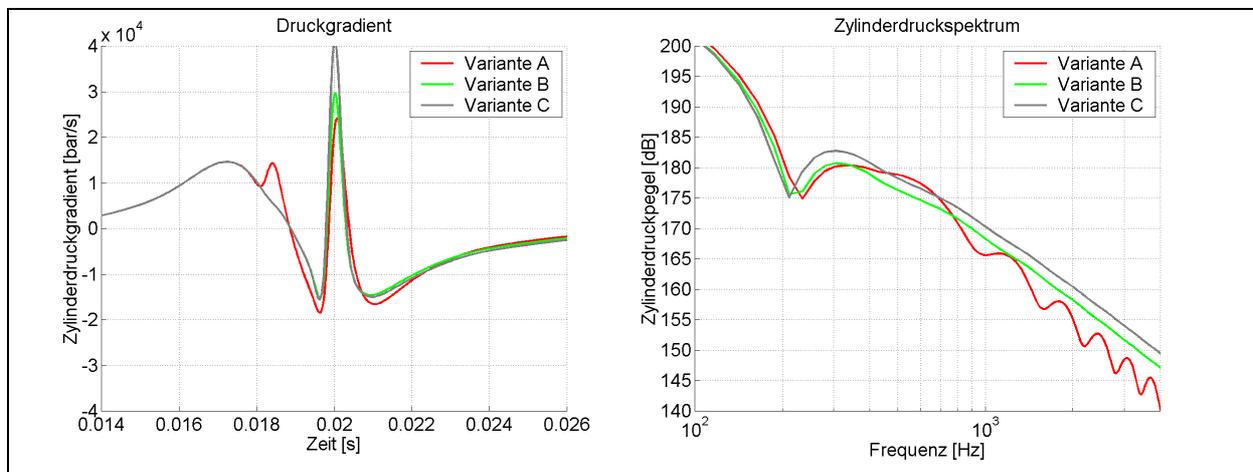


Abb. 5.26: Variation der Gradienten von Vor- und Hauptverbrennung

Variation der Verbrennungslage

Eine weitere Variation soll aufzeigen, welchen Einfluß die zeitliche Lage der beiden Verbrennungen relativ zum Verlauf des Kompressionsdrucks hat. Die Parameter zur Interpolation von Vor- und Hauptverbrennung werden dabei konstant gehalten. Der Vorteil der Betrachtung mit Hilfe der Druckverlaufsinterpolation ist, daß durch die Variation die Höhe der Gradienten bei Änderung der Verbrennungslage unbeeinflußt bleibt. Die Darstellung der Druckgradienten zeigt dies in Abb. 5.27. Die Auswertung der Zylinderdruckpegel läßt erkennen, daß durch die Änderung der Verbrennungslage im Frequenzbereich oberhalb 400 Hz kein Unterschied im Pegelverlauf festzustellen ist. Im Frequenzbereich zwischen 200 und 400 Hz treten Pegelunterschiede von bis zu 8 dB auf. Diese sind auf die Lage der Gradienten relativ zur Lage des Kompressionsdruckverlaufes zurückzuführen. Die vorliegende Variation zeigt, daß allein durch die Lage der Verbrennung unter Beibehaltung der auftretenden Druckgradienten keine Pegelreduktion zu erwarten ist. Im Motorbetrieb wird eine Variation der Lage der Einspritzungen jedoch zu einer Veränderung im Druckverlauf und den Druckspektren führen, da sich durch die Lage der Verbrennungen die Zündbedingungen der einzelnen Verbrennungen verändern.

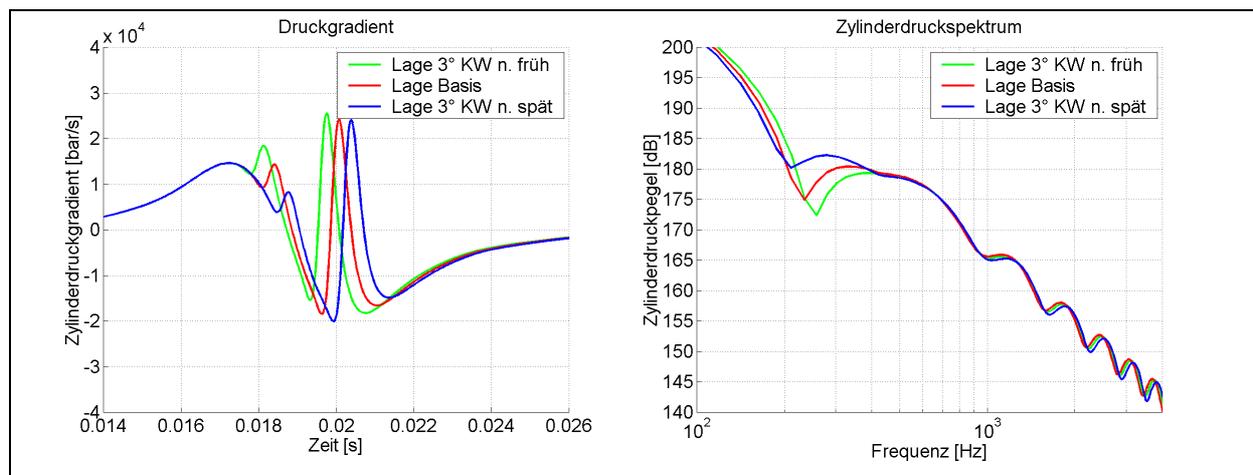


Abb. 5.27: Variation der Lage der Verbrennung

Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckverlaufsinterpolation

Die Betrachtung der Zylinderdruckpegel mit Hilfe der Interpolation von gemessenen Druckverläufen erlaubt die Betrachtung einzelner Einflußparameter zur Beurteilung ihrer Auswirkungen auf den zu erwartenden Pegelverlauf des Zylinderdruckspektrums. Auf Basis von Meßdaten können unter Verwendung von Funktionsverläufen mit einer überschaubaren Anzahl von Parametern Druckverläufe realisiert werden, die eine hohe Übereinstimmung von Messung und Simulation im Druckverlauf und im Druckspektrum zeigen. Auf Basis der gewonnenen Parametersätze können Variationen

durchgeführt und die Auswirkungen einzelner Parameter auf den Verlauf des Zylinderdruckspektrums untersucht werden. Durch diese Simulation können während der Entwicklung neuer Brennverfahren die Anforderungen an den Druckverlauf definiert bzw. im Vorfeld das Potential einer Pegelreduktion überprüft werden. Damit steht eine Untersuchungsmethodik zur Verfügung, die es ermöglicht, Auswirkungen von Modifikationen des Druckverlaufes zu simulieren. Sie bietet die Möglichkeit, Vorgaben für den Verbrennungsablauf mit dem Ziel einer Pegelreduktion zu machen.