

Möglichkeiten zur Injektorkalibrierung mit Hilfe von Klopfensensoren bei der Benzin-Direkteinspritzung

Injector Calibration with Knock Sensors for Gasoline Direct Injection

Konrad Christ, Matthias Michelsburg, Kristine Back, Alexander Eidam und Uwe Kiencke, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, christ@kit.edu

Kurzfassung

Dieser Artikel beschäftigt sich mit der Kraftstoffeinspritzung bei Benzin-Direkteinspritzsystemen. Um die Dosierung der Einspritzmenge zu optimieren muss der Injektor während des Motorlaufs kalibriert werden. Zur Kalibrierung muss dem Motorsteuergerät eine Rückmeldung über die tatsächliche Einspritzdauer vorliegen. Die Autoren untersuchen die Möglichkeit zur Schätzung der tatsächlichen Einspritzdauer aus den während eines Einspritzvorgangs emittierten Körperschallwellen. Um einen zusätzlichen Aufwand an Sensorik zu vermeiden soll der auf dem Motorblock standardmäßig verbaute Klopfsensor als Körperschallaufnehmer verwendet werden. Dazu werden in dieser Arbeit Untersuchungen bezüglich der Körperschallausbreitung durchgeführt. Nach einer Analyse des Einspritzvorgangs sowie der Übertragungsstrecke des Körperschalls von Injektor zu Klopfsensor wird eine einfache Filteroperation vorgeschlagen, mit der das Klopfensorsignal verarbeitet werden soll, um eine Schätzung der tatsächlichen Einspritzdauer zu ermöglichen.

Abstract

This article is about the fuel injection process of gasoline direct injection systems. The objective is the improvement of the precision of the fuel metering. Hence, the fuel injector needs to be calibrated. For calibration, the engine's electronic control unit must have the information about the actual duration of injection. The authors investigate the possibility of estimating the actual duration of injection on basis of the emitted structure borne sound during the injection process. In order to avoid additional hardware, the standard knock sensor on the engine block shall be used as transducer. For that, the emission of structure borne sound during the injection process is examined in this paper. After analyzing the injection process and the transmission path from injector to knock sensor, a simple filter is proposed for pre-processing the knock sensor signals. The processed signals then build the basis for estimating the actual injection duration.

1 Einleitung und Motivation

Strenge Abgasnormen und hohe Ansprüche an den Kraftstoffverbrauch von Verbrennungsmotoren zwingen Autohersteller und Zulieferer zur Entwicklung von umweltfreundlicheren Technologien. Diese Anforderungen sind direkt mit der Optimierung des Verbrennungsprozesses verbunden. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei das vor der Verbrennung dem Brennraum zugeführte Kraftstoff/Luft-Verhältnis.

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit der Kraftstoffeinspritzung bei Verbrennungsmotoren mit Benzin-Direkteinspritzung (BDE). Betrachtet wird die Dosierung der eingespritzten Kraftstoffmenge eines Magnetventils (Injektor). Zur Optimierung des Verbrennungsprozesses muss die Genauigkeit der Einspritzdauer, welche in direktem Bezug zur eingespritzten Kraftstoffmenge steht, erhöht werden. Es wird daher nach einer Möglichkeit gesucht die tatsächliche Einspritzdauer eines Magnetventils zu ermitteln, bzw. zu schätzen.

Das Magnetventil wird vom Motorsteuergerät über eine Endstufe mit dem Strom $I(T_i)$ angesteuert. Die angeforderte Einspritzdauer ist $T_i = T_{i,soll}$. Es handelt sich hierbei um eine reine Steuerung, wie im oberen Teil von **Bild 1** zu sehen ist. Das bedeutet, dass das Motorsteuergerät keine

Rückmeldung über die tatsächliche Einspritzdauer $T_{i,ist}$ erhält. Somit ist keine Kalibrierung möglich.

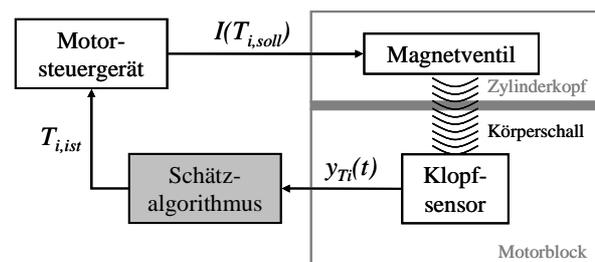


Bild 1: Injektorkalibrierung mit Klopfsensor

Während des Einspritzvorgangs treten im Inneren des Magnetventils Schläge und Vibrationen auf, die über das Ventilgehäuse auf den Zylinderkopf, auf dem es montiert ist, übertragen werden. Diese Schläge propagieren in Form von Körperschallwellen durch den Zylinderkopf und die Zylinderkopfdichtung auf den Motorblock. Im Falle von Diesellaggregaten wurde bereits gezeigt, dass eine Kalibrierung mit Hilfe von zusätzlicher Sensorik in unmittelbarer Nähe des Ventils möglich ist [1].

Im vorliegenden Bericht verwenden die Autoren zur Schätzung von $T_{i,ist}$ das Körperschallsignal $y_{Ti}(t)$ der stan-

dardmäßig auf dem Motorblock verbauten Klopfensoren. Klopfensoren sind piezoelektrische Körperschallaufnehmer, die zur Überwachung des Verbrennungsprozesses serienmäßig auf BDE Motoren verbaut sind. Ein zusätzlicher Aufwand an Sensorik, sowie entsprechende Änderungen am Zylinderkopf würden durch diesen Ansatz vermieden werden. Zur Auswertung werden die Klopfensensorsignale während des Einspritzvorgangs ausgelesen und verarbeitet. Dabei wird die Einspritzung in einem Zeitschlitz durchgeführt, während dessen kein anderes Ereignis aktive Schläge auf dem Motor verursacht.

Alle in diesem Artikel verwendeten Messungen wurden an einem 4-Zylinder Motor mit Benzin-Direkteinspritzung von Volkswagen (1,4L TSI) durchgeführt. Zu Versuchszwecken lief der Motor nicht in Verbrennung, es wurde lediglich eingespritzt. Der Aufbau des betrachteten Magnetventils und der Einspritzvorgang werden in **Abschnitt 2** vorgestellt. Die Ausbreitung des Körperschalls während der Einspritzung sowie eine Identifikation der Übertragungstrecke werden in **Abschnitt 3** diskutiert. Körperschallmessungen und daraus abgeleitete Ergebnisse finden sich in **Abschnitt 4**. Eine Zusammenfassung schließt den Artikel.

2 Magnetventil und Einspritzvorgang

In diesem Abschnitt wird zunächst auf den Aufbau des Magnetventils eingegangen und danach der Einspritzvorgang genauer untersucht.

2.1 Aufbau des Magnetventils

Der Aufbau des betrachteten Magnetventils ist in **Bild 2** zu sehen und entspricht dem in [2]. Das Ventil besteht im Wesentlichen aus einer Nadel, die durch einen Elektromagneten angehoben wird. Ist der Steuerstrom $I(T_i)=0$, so

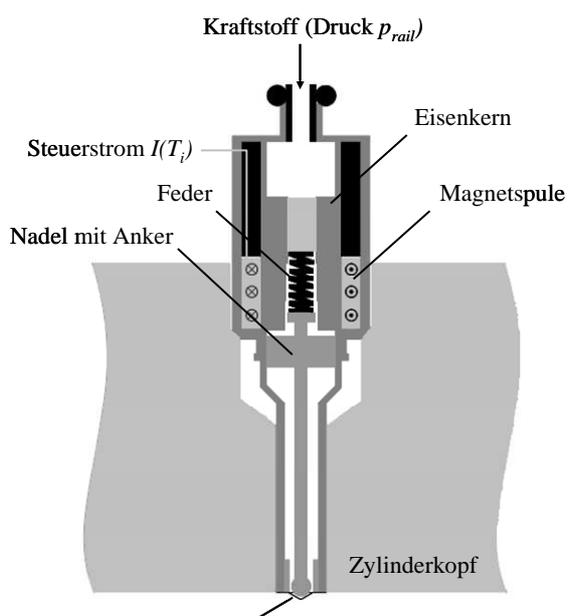


Bild 2: Magnetventil (Injektor)

wird die Nadel auf die Ventildüse gepresst, das Ventil schließt. Im Falle von $I(T_i)>0$ bildet sich ein Magnetfeld über den Eisenkern aus, das den Anker samt Nadel hebt. Der charakteristische Steuerstrom $I(T_i)$ hängt dabei direkt mit der angeforderten Einspritzdauer T_i zusammen. Das untersuchte Magnetventil ist von aktuellem Stand und kommt in modernen BDE Motoren zum Einsatz.

Die tatsächlich eingespritzte Kraftstoffmenge q und die angeforderte Einspritzdauer T_i hängen nichtlinear voneinander ab. Der Zusammenhang ist in **Bild 3** dargestellt. Der nichtlineare Verlauf der Kennlinie wird durch das Anschlagen des Ankers am Eisenkern begründet. Für eine angeforderte Einspritzdauer $T_i < T_{i,voll}$ tritt ein solches Anschlagen nicht auf.

Außerdem unterliegt das Magnetventil fertigungsbedingt Streuungen in der Genauigkeit der eingespritzten Kraftstoffmenge. Um die Genauigkeit zu erhöhen, sollte daher jeder Injektor individuell kalibriert werden.

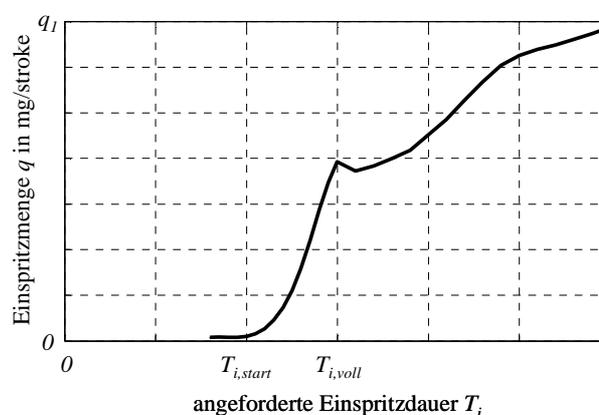


Bild 3: Zusammenhang zwischen Einspritzdauer und Einspritzmenge

2.2 Einspritzvorgang

Der Einspritzvorgang wird anhand einer Nadelhubmessung in **Bild 4** genauer erläutert. Dargestellt ist der gemessene Hub der Injektornadel über der Zeit t für den Fall eines Teilhubs ($T_{i,start} < T_i < T_{i,voll}$). Zum Zeitpunkt $t=0$ wird der Steuerstrom eingeschaltet (**BDB**). Nach einer gewissen Zeitdauer beginnt sich die Injektornadel zu heben. Dieses Ereignis entspricht dem Beginn der Injektion (**BDI**). Sobald der Steuerstrom zurückgesetzt wird, baut sich das Magnetfeld ab und die Nadel wird von der Feder auf die Ventildüse gepresst. Die Einspritzung ist zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen (**EDI**). Die tatsächliche Einspritzdauer ergibt sich daher aus

$$T_{i,ist} = t_{EDI} - t_{BDI}$$

Wie in **Bild 4** zu erkennen ist, regt das **EDI** charakteristische Frequenzen an. Auf die Analyse der auftretenden Frequenzen wird später näher eingegangen.

Im Inneren des Magnetventils treten sowohl zum **BDI**, als auch zum **EDI** Schläge auf, die über das Ventilgehäuse direkt auf den Zylinderkopf übertragen werden, wo das Ventil fest verbaut ist. Diese Schläge breiten sich in Form von

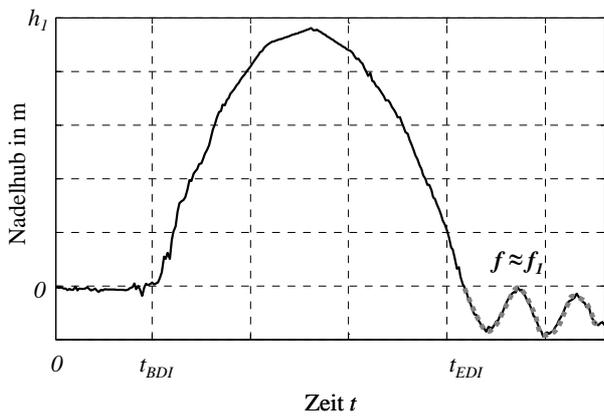


Bild 4: Messung des Nadelhubes für den Teilhub-Bereich ($T_{i,start} < T_i < T_{i,voll}$)

Körperschallwellen auf der ganzen Motorstruktur aus. In **Bild 5** sind zwei Körperschallmessungen zu sehen, bei denen der Körperschallsensor in unmittelbarer Nähe des Ventils befestigt war. Im Falle von Einspritzdauern $T_i >> T_{i,voll}$ sind die Körperschallwellen des BDI und des EDI getrennt zu erkennen, siehe Bild 5 oben. In diesem Fall kann $T_{i,ist}$ aus der Körperschallmessung direkt ermittelt werden. Bei geringeren Einspritzdauern laufen die Wellenpakete ineinander und überlagern sich, siehe Bild 5 unten. Eine Bestimmung von $T_{i,ist}$ ist hierbei nicht ohne weiteres möglich.

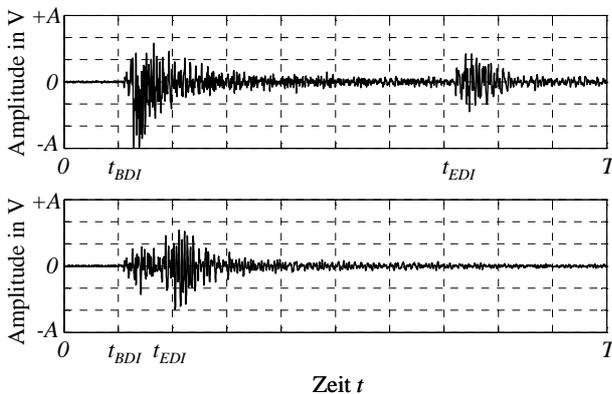


Bild 5: Messung des Körperschalls in unmittelbarer Nähe des Magnetventils: Oben Vollhub ($T_i >> T_{i,voll}$), unten Teilhub ($T_{i,start} < T_i < T_{i,voll}$)

3 Körperschallausbreitung

Um die tatsächliche Einspritzdauer $T_{i,ist}$ unter Verwendung der auf dem Motorblock verbauten Klopfensoren zu schätzen, ist eine entsprechende Vorfilterung des Klopfensorsignals zweckmäßig. Dazu ist eine Identifikation der Übertragungsstrecke des Körperschalls von Magnetventil zu Klopfensensor notwendig. Um eine Aussage über die Verwendbarkeit des Klopfensors zu machen, muss das Sensorsignal während des Einspritzvorgangs genauer untersucht werden.

3.1 Identifikation der Übertragungsstrecke

Bei der Übertragung des Körperschalls vom Einspritzventil zum Klopfensensor sind vor allem die Schalllaufzeit sowie die Dämpfung in Abhängigkeit der Frequenz von Interesse. Diese Größen können experimentell ermittelt werden. Dazu wird ein Schwingerreger an der Position des Ventils am Zylinderkopf angekoppelt und mit einer Sinusschwingung konstanter Amplitude angeregt. Die Frequenz wird in diskreten Schritten Δf erhöht bis der Zulässigkeitsbereich des Klopfensors ($f < F$) abgedeckt ist. Somit liegt für jede einzelne Frequenz $f = n \cdot \Delta f$ eine Messung von Ein- und Ausgangssignal vor, woraus sich der Frequenzgang $G(n \cdot \Delta f)$ bestimmen lässt. Die Berechnung des Amplitudengangs und des Phasengangs erfolgte hierbei mit Hilfe der orthogonalen Korrelation [3]. Den so ermittelten Amplitudengang zeigt **Bild 6**. Deutlich zu erkennen sind zwei Resonanzfrequenzen. Aus dem Phasengang $\psi(f)$ lässt sich die Körperschalllaufzeit τ_g in Abhängigkeit der Frequenz f bestimmen [6]:

$$\tau_g(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} \psi(f).$$

Die mittlere Körperschalllaufzeit ist hierbei für alle Frequenzen ungefähr

$$\tau_g \approx 100 \mu s.$$

In Festkörpern breiten sich sowohl longitudinale als auch transversale Wellenformen aus. Nach [4] tragen vor allem Oberflächenwellen den Großteil der Körperschallenergie. Diese Wellenform wird vom Klopfensensor, welcher auf der Motoroberfläche festgeschraubt ist, hauptsächlich erfasst. Für Oberflächenwellen gilt in Stahl eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit von $v_{Stahl} \approx 3250$ m/s [5]. Bei einer Ausbreitungsstrecke von $s_{KS} \approx 30$ cm lässt sich das gemessene Ergebnis der Körperschalllaufzeit τ_g approximativ bestätigen. Es kann daher ausgeschlossen werden, dass longitudinale Körperschallwellen maßgeblich vom Klopfensensor erfasst werden, da deren Schallgeschwindigkeit bei ungefähr $v_{l,Stahl} \approx 5900$ m/s liegt [5] und laut [4] einen weitaus geringeren Energieanteil haben.

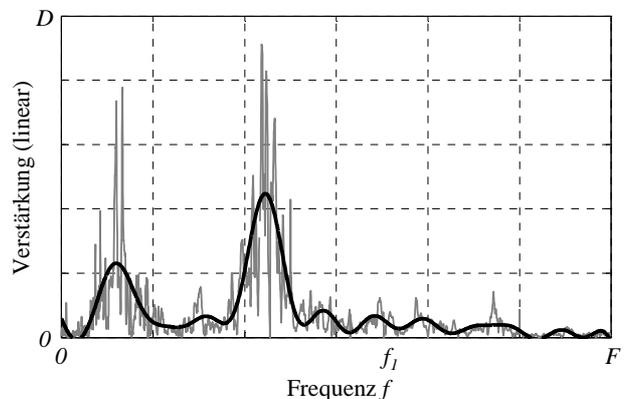


Bild 6: Experimentell bestimmter Amplitudengang

3.2 Analyse des Klopfensorsignals

In diesem Abschnitt werden die auftretenden Frequenzen im Klopfensorsignal analysiert und ihren Ursachen entsprechend zugeordnet. Zur Auswertung werden Zeit-Frequenz-Darstellungen verwendet, wie sie in [6] und [7] zu finden sind. Auf die mathematische Herleitung dieses Verfahrens wird hier verzichtet.

Bild 7 zeigt ein Klopfensorsignal während eines Einspritzvorgangs mit $T_i < T_{i,voll}$. Im oberen Teil der Abbildung ist das ungefilterte Zeitsignal im Zeitfenster der Länge T nach dem *BDB* zu sehen, im unteren Teil ist die Born-Jordan Verteilung des Signals abgebildet, wobei die Signalenergie in der Zeit-Frequenz-Ebene in Grauwerten dargestellt ist.

Es ist zu erkennen, dass das Ereignis des *BDI* mit einer weitaus geringeren Signalenergie verbunden ist als das des *EDI*. Das *EDI* hingegen ist von Körperschallwellen zuvor auftretender Ereignisse überlagert. Dies erschwert die Detektion erheblich.

Wie im unteren Teil der Abbildung zu sehen, regt das *EDI* hauptsächlich Frequenzen im Bereich $f=f_1$ an. Diese Frequenz entspricht der Schwingung, die in Bild 4 nach dem *EDI* deutlich zu sehen ist. Daher ist diese Frequenz der Nadelbewegung des Magnetventils zuzuordnen, da die Übertragungsstrecke in diesem Frequenzbereich keine wesentlichen Resonanzen aufweist, wie in Bild 6 zu erkennen ist. Im Nachhallen ($t > t_{EDI}$) treten jedoch Frequenzen im Bereich der Resonanzfrequenzen der Übertragungsstrecke auf.

Es sind zudem Frequenzen $f > F$ außerhalb des Zulässigkeitsbereichs des Klopfensors zu sehen. Bei diesen Frequenzen handelt es sich um Sensorresonanzen, die vor der Signalverarbeitung durch eine Tiefpassfilterung zu entfernen sind.

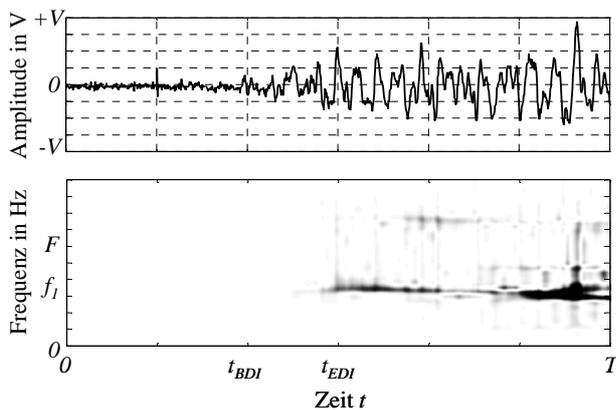


Bild 7: Ungefiltertes Klopfensorsignal im Zeitbereich und in der Zeit-Frequenz-Ebene für $T_{i,start} < T_i < T_{i,voll}$

4 Messungen und Ergebnisse

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass das *EDI* im Klopfensorsignal Frequenzen um $f=f_1$ anregt. In diesem Abschnitt soll nun das Klopfensorsignal für verschiedene T_i untersucht werden. Dabei interessiert, ob die Ereignisse

BDI und *EDI* im Sensorsignal erkennbar sind, d.h. detektiert werden können. Nur wenn dies der Fall ist, kann die tatsächliche Einspritzdauer $T_{i,ist}$ geschätzt und eine Injektorkalibrierung mit Hilfe des Klopfensors durchgeführt werden.

Die Detektion des *BDI* ist simpel, so lange kein störendes Ereignis zum selben Zeitpunkt aktiv ist [8]. Wie im oberen Teil von Bild 7 zu sehen, kann der Zeitpunkt t_{BDI} durch einen Schwellwert über die Signalenergie detektiert werden. Die eigentliche Herausforderung bei der Schätzung von $T_{i,ist}$ stellt daher die Detektion des *EDI* dar.

Bevor die Messsignale besprochen werden, wird eine Referenzmessung präsentiert, anhand derer die Ergebnisse bewertet werden.

4.1 Referenzmessung

Um zu wissen, zu welchen Zeitpunkten das Ventil öffnet und schließt, wurden Nadelhubkurven, wie in Bild 4 gezeigt, aufgezeichnet. Anhand der Nadelhubkurve liegen nun neben den Öffnungs- und Schließzeitpunkten t_{BDI} und t_{EDI} auch die tatsächliche Einspritzdauer $T_{i,ist}$ in Abhängigkeit der angeforderten Einspritzdauer $T_i = T_{i,soll}$ vor. Die Referenzmessungen wurden für verschiedene T_i durchgeführt und in einem gemeinsamen Diagramm eingezeichnet, siehe **Bild 8**. Die horizontale Achse entspricht der Zeit t nach dem *BDB*. Die Zeitpunkte t_{BDI} und t_{EDI} wurden dabei um die Körperschalllaufzeit τ_g in Zeitrichtung verschoben, um die Referenzmessungen besser mit den Ergebnissen aus den Klopfensormessungen weiter unten vergleichen zu können. In vertikaler Richtung sind aufsteigend die angeforderten Einspritzdauern $T_i = T_{i,soll}$ aufgetragen.

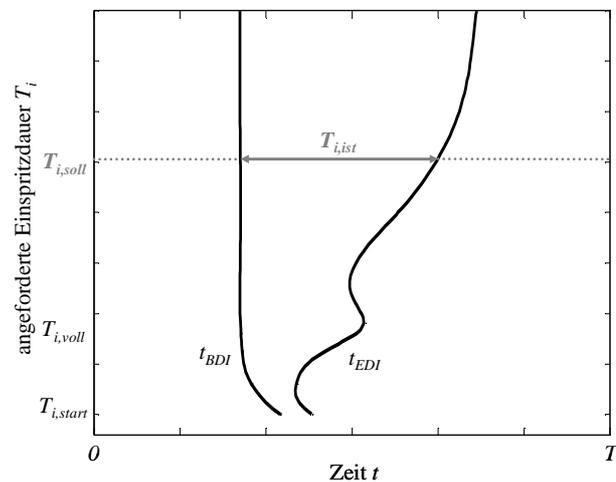


Bild 8: Zeitpunkte des *BDI* und des *EDI* aus gemessenen Nadelhubkurven

4.2 Ungefiltertes Klopfensorsignal

Das gemessene Klopfensorsignal enthält Wellenpakete, die zu den einzelnen Ereignissen, wie dem Öffnen und dem Schließen der Injektordüse, gehören. Um diese Wellenpakete zuzuordnen zu können, werden mehrere Klopfen-

sorsignale mit unterschiedlichem T_i gemeinsam aufgezeichnet.

Bild 9 zeigt die ungefilterten Klopfensorsignale für verschiedene T_i . Die horizontale Richtung stellt wie in Bild 8 die Zeitachse dar. In vertikaler Richtung sind ebenfalls aufsteigend die angeforderten Einspritzdauern $T_i = T_{i,soll}$ aufgetragen. Die Grauwerte entsprechen den Amplituden des Klopfensorsignals.

Man erkennt zusammenhängende Strukturen, die den Linien für t_{BDI} und t_{EDI} in Bild 8 gleichen. Zudem ist für $T_i > T_{i,voll}$ ein weiteres Wellenpaket mit relativ hoher Signalenergie zu erkennen. Dabei handelt es sich um das Anschlagen der Injektornadel am Eisenkern. Die hohe Signalenergie der abklingenden Wellen dieses Ereignisses macht es unmöglich, ohne weitere Verarbeitung t_{EDI} zu detektieren. Für $T_i < T_{i,voll}$ hingegen wird das *EDI* lediglich von den vorangehenden Körperschallwellen des *BDI* überlagert.

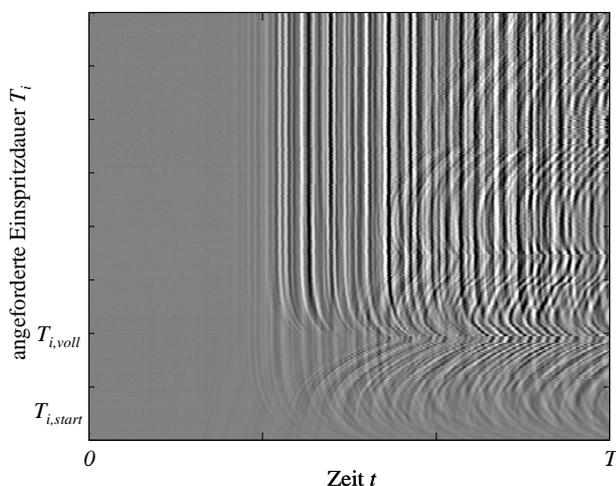


Bild 9: Ungefilterte Klopfensorsignale für verschiedene T_i

4.3 Gefiltertes Klopfensorsignal

Von besonderem Interesse ist der Betrieb des Magnetventils im Teilhub ($T_{i,start} < T_i < T_{i,voll}$). In diesem Bereich ist der relative Fehler

$$F_i = \frac{T_{i,soll} - T_{i,ist}}{T_{i,soll}}$$

nicht zu vernachlässigen. Daher ist in diesem Arbeitsbereich eine Injektorkalibrierung unbedingt notwendig. Wie bereits in Bild 9 gezeigt, überlagern sich im Teilhub die Körperschallwellen des *BDI* und die des *EDI*. Bei der Analyse des Klopfensorsignals in Abschnitt 3.2 wurde festgestellt, dass das *EDI* Frequenzen im Bereich $f=f_j$ anregt. Daher wird das Klopfensorsignal mit einem Bandpass vorgefiltert. Beachtet werden muss hierbei, dass die Signalverschiebung aufgrund der Faltung mit der Impulsantwort des Bandpasses ausgeglichen wird, da t_{EDI} zeitlich exakt detektiert werden soll.

Bild 10 zeigt das Ergebnis der gefilterten Klopfensorsignale im Teilhubbereich. Der Verlauf der Wellenfronten des *EDI* ist deutlich zu erkennen. Dies bedeutet, dass im Teilhubbereich eine Detektion von t_{EDI} sehr gut möglich ist. Wie in [8] beschrieben, kann t_{BDI} über die Signalenergie im Zeitbereich detektiert werden. Somit liegt eine Schätzung von $T_{i,ist}$ vor, welche zur Kalibrierung des Magnetventils verwendet werden kann.

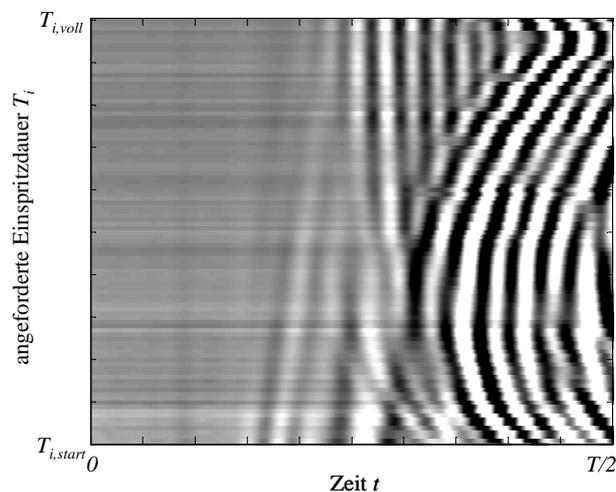


Bild 10: Gefilterte Klopfensorsignale im Teilhubbereich ($T_{i,start} < T_i < T_{i,voll}$)

5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde die Möglichkeit der Injektorkalibrierung mit Hilfe des Klopfensors untersucht. Dazu wurde zunächst die Ausbreitung des Körperschalls auf der Motorstruktur genauer betrachtet. Es wurde eine Frequenzanalyse des Klopfensorsignals mittels Zeit-Frequenz-Verfahren durchgeführt. Durch den Vergleich mit Nadelhubmessungen stellte sich heraus, dass das Ende der Injektion mit gewissen Frequenzen im Zusammenhang steht. Diese Frequenzen sind deutlich im Klopfensorsignal zu erkennen.

Um eine Kalibrierung des Magnetventils mit Hilfe des Klopfensors durchführen zu können, muss eine Schätzung der tatsächlichen Einspritzdauer vorliegen. Zur Schätzung wird sowohl die Detektion des Zeitpunkts des Beginns der Injektion sowie des Endes der Injektion benötigt. Der Beginn der Injektion kann aus der zeitlichen Energiedichte des Klopfensorsignals gewonnen werden. Zur Bestimmung des Zeitpunktes des Endes der Injektion wird das Klopfensorsignal mit einem Bandpass gefiltert.

Zur Kalibrierung des Magnetventils im Motorlauf werden die Klopfensorsignale in einem Zeitfenster definierter Länge aufgezeichnet, während dessen kein anderes Ereignis auf dem Motorblock aktiv ist. Da die Fensterlänge im Bereich von wenigen Millisekunden liegt, ist ein Einsatz im Verbrennungsmotor möglich. Es muss lediglich ein Zeitschlitz dieser Dauer gefunden werden, in dem eine Messung durchgeführt werden kann. Der Einsatz im Fahr-

zeug wurde bisher noch nicht getestet und steht daher noch aus.

6 Nomenklatur

Folgende Abkürzungen und Formelzeichen wurden verwendet:

<i>BDB</i>	Beginn der Bestromung
<i>BDI</i>	Beginn der Injektion
<i>EDI</i>	Ende der Injektion
t_{BDB}	Zeitpunkt des <i>BDB</i>
t_{BDI}	Zeitpunkt des <i>BDI</i>
t_{EDI}	Zeitpunkt des <i>EDI</i>
T_i	Einspritzdauer
$T_{i,soll}$	Angeforderte Einspritzdauer
$T_{i,ist}$	Tatsächliche Einspritzdauer
$T_{i,start}$	Angeforderte Einspritzdauer, ab der eine Einspritzung stattfindet
$T_{i,voll}$	Angeforderte Einspritzdauer, ab der sich die Nadel bis zum Anschlag hebt (Vollhub)

7 Literatur

- [1] Hehle et al.: In-Situ-Kalibration – Hochpräzise Kraftstoffeinspritzung für Off-Highway-Motoren. ATZoff-highway, Ausgabe 2008-04
- [2] Robert Bosch GmbH: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Vieweg, 2007
- [3] Isermann, Rolf: Identifikation dynamischer Systeme. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 1988
- [4] Kollman et al.: Praktische Maschinenakustik. 1. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2005
- [5] Krautkrämer et al.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 1986
- [6] Kiencke et al.: Signalverarbeitung. 1. Aufl., Oldenbourg Verlag, München, 2008
- [7] Boashash, Boualem: Time-Frequency Signal Analysis and Processing. Elsevier, New York, 2003
- [8] Christ et al.: Structure borne noise analysis for estimating fuel injection durations. 2nd IFAC International Conference on Intelligent Control Systems and Signal Processing, Istanbul, 2009