

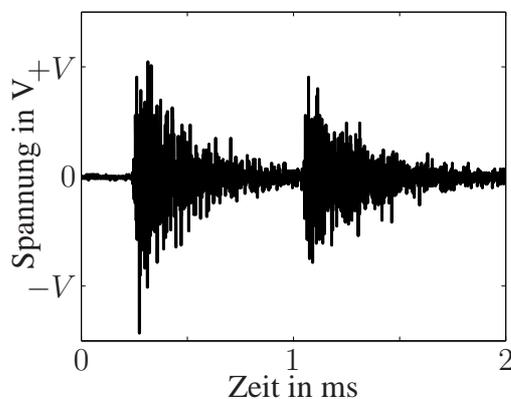
# Detektion charakteristischer Ereignisse bei der Benzin-Direkteinspritzung

K. Christ, A. Dagdan und U. Kiencke

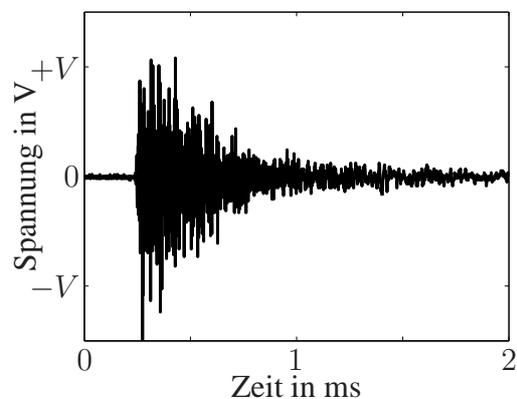
Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
76187 Karlsruhe, E-Mail: christ@kit.edu

## Kurzfassung

Der Beitrag beschäftigt sich mit dem Vorgang der Kraftstoffeinspritzung bei Verbrennungsmotoren mit Benzin-Direkteinspritzung. Die Genauigkeit der eingespritzten Kraftstoffmenge spielt eine entscheidende Rolle in Bezug auf Abgasverhalten und Kraftstoffverbrauch und soll daher im Fokus der Arbeit stehen. Zur Optimierung der Benzin-Direkteinspritzung ist eine Kalibrierung der Einspritzventile bezüglich der Kraftstoffmenge notwendig. Die tatsächlich eingespritzte Kraftstoffmenge kann nicht direkt bestimmt werden, steht aber in direktem Zusammenhang mit der Öffnungsdauer des Einspritzventils. Die Autoren möchten daher die Öffnungsdauer aus den Körperschallwellen schätzen, die während des Einspritzvorgangs auftreten. Die Zeitpunkte des Öffnens sowie des Schließens der Injektordüse sind aus diesen Körperschallwellen zu detektieren.



(a) Lange Zeitdauer zwischen den Schlägen



(b) Kurze Zeitdauer zwischen den Schlägen

**Bild 1:** Körperschallsignale von zwei aufeinander folgenden mechanischen Schlägen

# 1 Einleitung

Es gibt Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau, bei denen die Zeitdauer zwischen zwei mechanischen Schlägen möglichst präzise bestimmt werden soll. Die Maschinenstruktur wird durch mechanische Schläge angeregt und in Schwingung versetzt. Es kommt zur Ausbreitung von Körperschall. Mit Hilfe eines Körperschallsensors kann die Oberflächenschwingung der Struktur aufgezeichnet und ausgewertet werden. In Bild 1 sind zwei Beispiele für eine solche Körperschallmessung dargestellt. Möchte man die Zeitdauer zwischen zwei Schlägen bestimmen, so ist die Aufgabe trivial, falls die Dämpfung der Struktur ausreichend hoch oder die Zeitdauer dazwischen ausreichend lange ist, siehe Bild 1(a). Ist dies wie in Bild 1(b) nicht der Fall, so ist der zweite mechanische Schlag nicht ohne weiteres im Körperschallsignal erkennbar.

Als Anwendung der beschriebenen Problemstellung wird der Vorgang der Benzin-Direkteinspritzung (BDE) betrachtet. Während der Kraftstoffeinspritzung kommt es vor allem beim Öffnen und Schließen des Injektors zur Schallausbreitung. Von besonderem Interesse ist die wahre Öffnungsdauer des Injektors, anhand derer eine Aussage über die wahre eingespritzte Kraftstoffmenge getroffen werden kann. Auf Grundlage einer Schätzung ist eine Kalibrierung des Injektors möglich, wodurch die Genauigkeit der eingespritzten Kraftstoffmenge erhöht werden kann. Durch eine präzisere Kraftstoffeinspritzung ist eine Verbesserung des Abgasverhaltens und des Verbrauchs zu erwarten.

Zur Körperschallmessung während des Einspritzvorgangs wird in diesem Artikel ausschließlich das Klopfensorsignal verwendet. Klopfensoren sind standardmäßig auf BDE-Motoren verbaut und dienen zur Überwachung des Verbrennungsprozesses sowie der Detektion von Fehlzündungen. Ein zusätzlicher Aufwand an Hardware ist somit nicht erforderlich. Alle Messdaten in diesem Dokument wurden an einem BDE-Prüfstand aufgezeichnet, bei dem ein moderner Magnetspulen-Injektor auf einem Motorblock eines Volkswagen 1.4L TSI Aggregats verbaut ist.

Der Artikel gliedert sich wie folgt: Zunächst werden in Abschnitt 2 einige Grundlagen zur Benzin-Direkteinspritzung präsentiert und die Idee einer Ka-

librierung für Magnetspulen-Injektoren vorgestellt. In Abschnitt 3 wird daraufhin ein Modell des Klopfensorsignals aufgestellt, das die Grundlage für einen Algorithmus zur Schätzung der wahren Öffnungsdauer bildet. Der entwickelte Algorithmus wird ausführlich in Abschnitt 4 hergeleitet. Die damit erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 5 diskutiert. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung und einem Fazit.

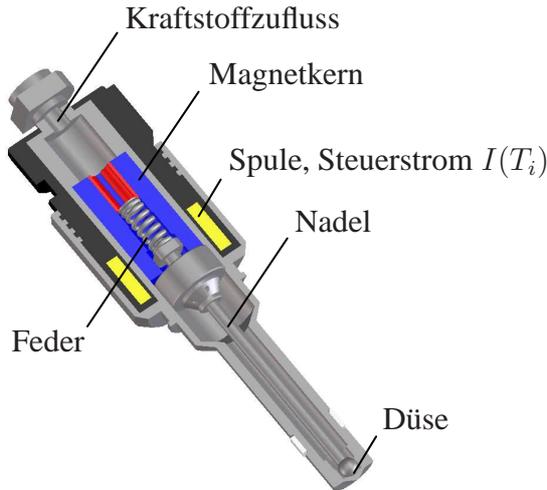
## 2 Benzin-Direkteinspritzung

In diesem Beitrag wird die Benzin-Direkteinspritzung mit Magnetspulen-Injektoren [1] näher betrachtet. Es geht ausschließlich um die Kraftstoffeinspritzung, die in diesem Abschnitt kurz erklärt werden soll. Auf die Notwendigkeit einer Injektorkalibrierung wird ebenfalls in diesem Abschnitt eingegangen. Ausführliche Informationen zur Benzin-Direkteinspritzung finden sich in [2].

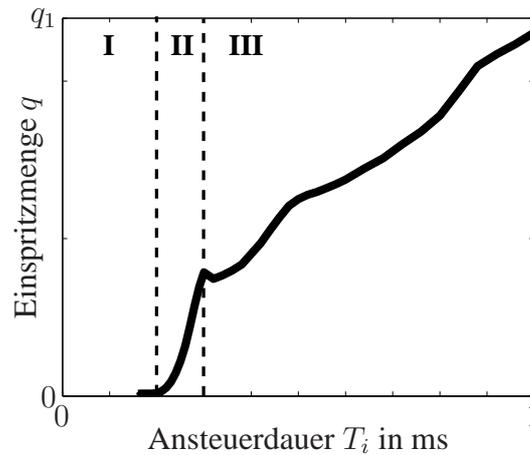
### 2.1 Kraftstoffeinspritzung

Bei der Benzin-Direkteinspritzung wird der Kraftstoff mit Drücken von bis zu  $p = 200$  bar in die Common-Rail gepumpt und von dort aus direkt über Injektoren in den Brennraum gesprüht. In heutigen BDE-Motoren werden im Automobilbereich überwiegend Magnetspulen-Injektoren verwendet. Diese zeichnen sich durch geringe Herstellungskosten und eine relativ einfache Ansteuerung aus. Bild 2(a) zeigt den Magnetspulen-Injektor im Schnitt. Im Wesentlichen besteht dieser aus einer Injektornadel, die von einer Feder auf die Injektordüse gepresst wird und im Falle eines angelegten Steuerstroms  $I(T_i)$  von einem Elektromagneten gehoben wird. In Bild 2(b) ist die Injektorkennlinie dargestellt. Diese gibt den Zusammenhang zwischen der Ansteuerdauer  $T_i$  und der wahren eingespritzten Kraftstoffmenge  $q_{\text{ist}}$  wieder. Die Ansteuerdauer  $T_i$  ist dabei die Zeitdauer, mit der der Injektor bestromt wird. Die Injektorkennlinie unterteilt sich in drei Bereiche in Abhängigkeit von  $T_i$ :

- Bereich I: Es findet keine Einspritzung statt.
- Bereich II: Im so genannten Teilhub-Bereich wird die Injektornadel gehoben. Es findet eine Einspritzung statt. Der Anker schlägt jedoch nicht am Magnetkern an, da die Ansteuerdauer  $T_i$  nicht ausreichend lange ist.



(a) Magnetspulen-Injektor im Schnitt



(b) Injektorkennlinie

**Bild 2:** Magnetspulen-Injektor

- Bereich III: Im so genannten Vollhub-Bereich schlägt der Anker am Magnetkern an und wird von diesem so lange angezogen, bis der Steuerstrom  $I(T_i)$  wieder Null wird.

## 2.2 Injektorkalibrierung

Der Zusammenhang aus Bild 2(b) ist im Allgemeinen nicht exakt bekannt. Fertigungsbedingt verhält sich jeder einzelne Injektor leicht unterschiedlich, so dass es zu Abweichungen in der Injektorkennlinie kommen kann. Auch verändern sich die Eigenschaften des Injektors über die gesamte Lebensdauer. Aus diesen Gründen ist eine Injektorkalibrierung im Motorbetrieb zur Minimierung der Abweichung

$$\Delta q = |q_{\text{ist}} - q_{\text{soll}}| \longrightarrow \min \quad (1)$$

erwünscht [3]. Die wahre eingespritzte Kraftstoffmenge  $q_{\text{ist}}$  kann nicht direkt bestimmt werden. Diese hängt im Wesentlichen ab vom Kraftstoffdruck  $p$  in der Common-Rail, dem Düsenquerschnitt  $A$  und der wahren Öffnungsdauer  $T_{\text{offen}}$ :

$$q_{\text{ist}} = f(p, A, T_{\text{offen}}).$$

Wird angenommen, dass  $p$  und  $A$  annähernd konstant sind, so stellt  $T_{\text{offen}}$  die hauptsächliche Einflussgröße dar. Anhand einer Schätzung  $\hat{T}_{\text{offen}}$  kann daher eine Aussage über  $\hat{q}_{\text{ist}}$  getroffen werden.

### 3 Modellierung des Körperschallsignals

Zur Schätzung der wahren Öffnungsdauer  $T_{\text{offen}} = t_{\text{EE}} - t_{\text{EB}}$  müssen die Auftrittszeitpunkte  $t_{\text{EB}}$  und  $t_{\text{EE}}$  des Einspritzbeginns und des Einspritzendes bestimmt werden. Die Grundlage der Schätzung bildet in dieser Arbeit das Klopf-sensorsignal, das während der Kraftstoffeinspritzung aufgezeichnet wird. Dabei wird eine Nebeneinspritzung zu einem Zeitpunkt gewählt, zu dem kein stören-des Parallelereignis auf dem Motor aktiv ist. Der wesentliche Anteil der Signal-energie gehört dadurch zum Einspritzvorgang. Das gemessene Klopfsensor-signal ist eine Superposition aus Schwingungen zu den verschiedenen Teiler-eignissen, d. h. dem Einspritzbeginn (**EB**), dem Anschlag des Ankers am Ma-gnetkern (**AM**) und dem Einspritzende (**EE**).

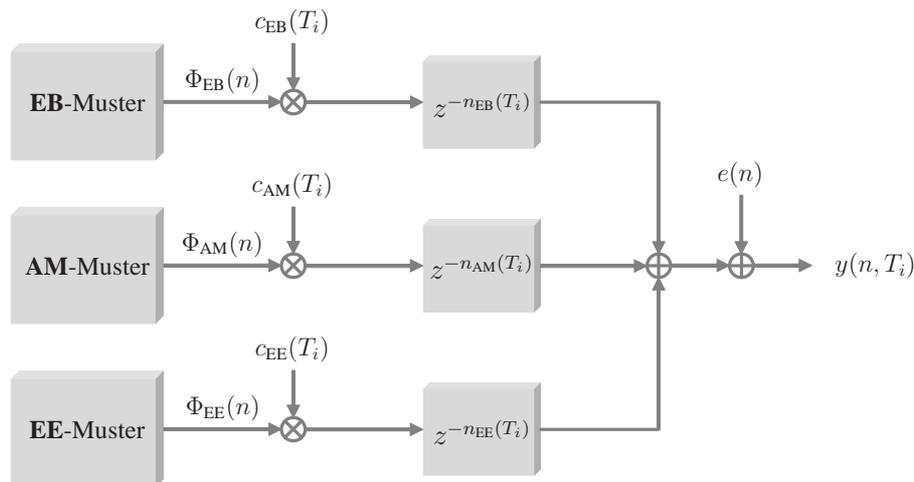
In diesem Abschnitt wird zunächst ein allgemeines Signalmodell abgeleitet, das die Grundlage der Detektion von  $t_{\text{EB}}$  und  $t_{\text{EE}}$  bildet. Im Anschluss daran wird die Extraktion der zur Detektion notwendigen Musterfunktionen behandelt und das Signalmodell entsprechend angepasst.

Da im Folgenden zeitdiskrete Messsignale verwendet werden, werden die Si-gnale und deren Verschiebungen in der zeitdiskreten Form dargestellt.

#### 3.1 Allgemeines Signalmodell

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass das Klopfensorsignal während des Einspritzvorgangs aus einer Superposition der Schwingungsfor-men der drei Teilereignisse **EB**, **AM** und **EE** besteht und zudem von ei-nem Rauschprozess  $e(n)$  überlagert ist. Dies ist in Bild 3 dargestellt. Jeder Schwingungsform wird eine Musterfunktion  $\Phi(n)$  zugeordnet, die mit einem Verstärkungsfaktor  $c(T_i, p)$  multipliziert und um  $n(T_i, p)$  Abtastwerte verscho-ben wird. Die einzelnen  $\Phi(n)$  sind dabei abhängig von der jeweiligen Über-tragungsstrecke von Injektor zu Sensor. In allen Betrachtungen wird der Kraft-stoffdruck  $p$  als konstant angenommen. Damit erhält man das Messsignal  $y(n)$  für das allgemeine Signalmodell:

$$y(n, T_i) = c_{\text{EB}}(T_i) \cdot \Phi_{\text{EB}}(n - n_{\text{EB}}(T_i)) + c_{\text{AM}}(T_i) \cdot \Phi_{\text{AM}}(n - n_{\text{AM}}(T_i)) \\ + c_{\text{EE}}(T_i) \cdot \Phi_{\text{EE}}(n - n_{\text{EE}}(T_i)) + e(n). \quad (2)$$

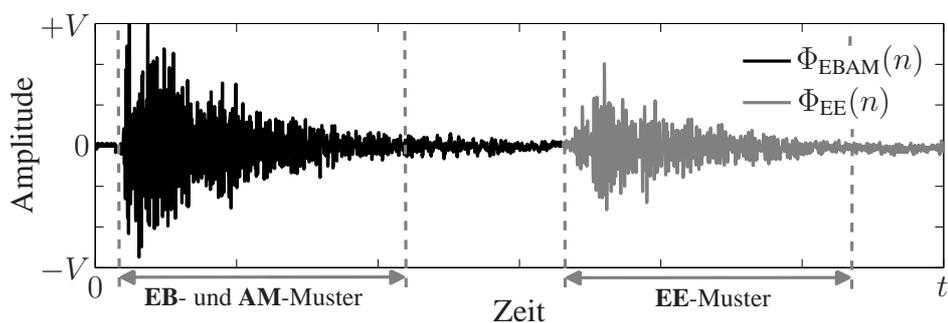


**Bild 3:** Synthese des Körperschallsignals mit zeitverschobenen Musterfunktionen

Ausgiebige Versuche zeigten, dass die Verläufe  $\Phi(n)$  der einzelnen Teilschwingungen für alle  $T_i$  nahezu identisch und somit reproduzierbar sind. Lediglich die Verstärkungsfaktoren  $c(T_i)$  sowie die Verschiebungen  $n(T_i)$  sind von der Ansteuerdauer  $T_i$  abhängig, was zur Übersichtlichkeit nicht weiter angegeben werden soll.

### 3.2 Extraktion der Musterfunktionen

In diesem Abschnitt sollen die in Gl. (2) verwendeten Musterfunktionen  $\Phi_{EB}(n)$ ,  $\Phi_{AM}(n)$  und  $\Phi_{EE}(n)$  extrahiert werden. Dazu wird ein Klopfensorsignal zu einer möglichst langen Ansteuerdauer  $T_i$  im Vollhub-Bereich aufgezeichnet, wie in Bild 4 zu sehen. Dadurch lassen sich die Körperschallwellen



**Bild 4:** Klopfensorsignal bei langer Ansteuerdauer  $T_i$

zum Einspritzende vollständig von denen des Einspritzbeginns und des Anschlags am Magnetkern trennen. Die Körperschallwellen des **EB** und des **AM** überlagern sich jedoch. Würde man den Injektor mit einem kürzeren  $T_i$  im

Teilhub-Bereich ansteuern, so würde kein Anschlag am Magnetkern auftreten. Die Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und -ende wäre jedoch ebenfalls zu kurz, um die Körperschallwellen trennen zu können. Daher ist es nicht möglich  $\Phi_{\text{EB}}(n)$  und  $\Phi_{\text{AM}}(n)$  separat zu erfassen.

Dieses Problem kann man im Vollhub-Bereich umgehen, indem man für die Ereignisse **EB** und **AM** eine gemeinsame Musterfunktion  $\Phi_{\text{EBAM}}(n)$  generiert, wie in Bild 4 dargestellt:

$$y(n) = c_{\text{EBAM}} \cdot \Phi_{\text{EBAM}}(n - n_{\text{EB}}) + c_{\text{EE}} \cdot \Phi_{\text{EE}}(n - n_{\text{EE}}) + e(n). \quad (3)$$

Für die Bestimmung der wahren Öffnungsdauer  $T_{\text{offen}}$  müssen  $n_{\text{EB}}$  und  $n_{\text{EE}}$  detektiert werden:

$$T_{\text{offen}} = \frac{n_{\text{EE}} - n_{\text{EB}}}{f_A}, \quad (4)$$

wobei  $f_A$  die Abtastfrequenz ist. Die Faktoren  $c_{\text{EBAM}}$  und  $c_{\text{EE}}$  müssen nicht geschätzt werden. Deshalb kann das Signalmodell aus Gl. (3) weiter vereinfacht werden:

$$y(n) = \Phi_{\text{EBAM}}(n - n_{\text{EB}}) + \Phi_{\text{EE}}(n - n_{\text{EE}}) + e(n). \quad (5)$$

Im Teilhub-Bereich sind die Voraussetzungen nicht erfüllt. Daher muss, wie später gezeigt wird, eine Erweiterung durchgeführt werden.

## 4 Schätzung der wahren Öffnungsdauer des Injektors

Die Schätzung  $\hat{T}_{\text{offen}}$  wird durch Vergleich des gemessenen Körperschallsignals  $y(n)$  mit dem nach Gl. (5) synthetisierten Körperschallsignal  $\hat{y}(n)$  durchgeführt. Als Ähnlichkeitsmaß wird die Kreuzkorrelationsfunktion  $r_{y\hat{y}}(k)$  verwendet:

$$r_{y\hat{y}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \cdot \hat{y}(n - k) \xrightarrow{k} \max. \quad (6)$$

Im Folgenden wird der Algorithmus auf Grundlage dieses Gütemaßes zunächst für den Vollhub-Bereich präsentiert. Danach wird eine Erweiterung vorgestellt, mit der  $\hat{T}_{\text{offen}}$  im Teilhub-Bereich geschätzt werden kann.

## 4.1 Vollhub-Bereich

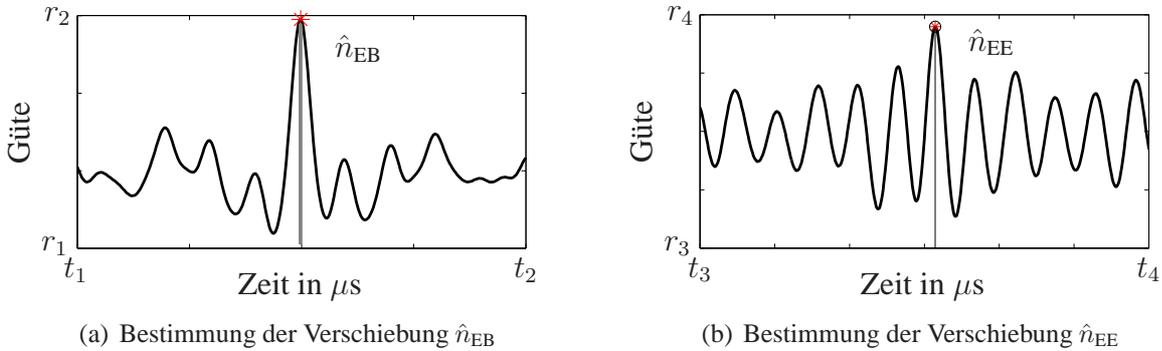
Im Vollhub-Bereich ist das Signalmodell aus Gl. (5) ohne Einschränkungen zur Bestimmung der Verschiebungen  $\hat{n}_{EB}$  und  $\hat{n}_{EE}$  einsetzbar. Die Verschiebungen sind unabhängig voneinander und können daher getrennt bestimmt werden. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt des Algorithmus der Einspritzbeginn detektiert, d. h. die Verschiebung  $\hat{n}_{EB}$  der Musterfunktion  $\Phi_{EBAM}(n)$  ermittelt. Im zweiten Schritt wird dann das Einspritzende  $\hat{n}_{EE}$  geschätzt.

### 4.1.1 Detektion des Einspritzbeginns

Zur Bestimmung der Verschiebung  $\hat{n}_{EB}$  wird die Kreuzkorrelationsfunktion

$$r_{y\Phi_{EBAM}}(k) \xrightarrow{k=\hat{n}_{EB}} \max \quad (7)$$

der Musterfunktion  $\Phi_{EBAM}(n)$  und des gemessenen Klopfensorsignals  $y(n)$  maximiert. Die Schätzung  $\hat{n}_{EB}$  entspricht der Verschiebung  $k$ , bei der das globale Maximum von  $r_{y\Phi_{EBAM}}(k)$  liegt, wie es an einem Beispiel in Bild 5(a) zu sehen ist.



**Bild 5:** Verlauf der Kreuzkorrelationsfunktion

### 4.1.2 Detektion des Einspritzendes

Zur Detektion des Einspritzendes wird die Kreuzkorrelationsfunktion zwischen dem gemessenen Klopfensorsignal  $y(n)$  und dem nach Gl. (5) synthetisierten Klopfensorsignal

$$\hat{y}(n - k) = \Phi_{EBAM}(n - \hat{n}_{EB}) + \Phi_{EE}(n - k) \quad (8)$$

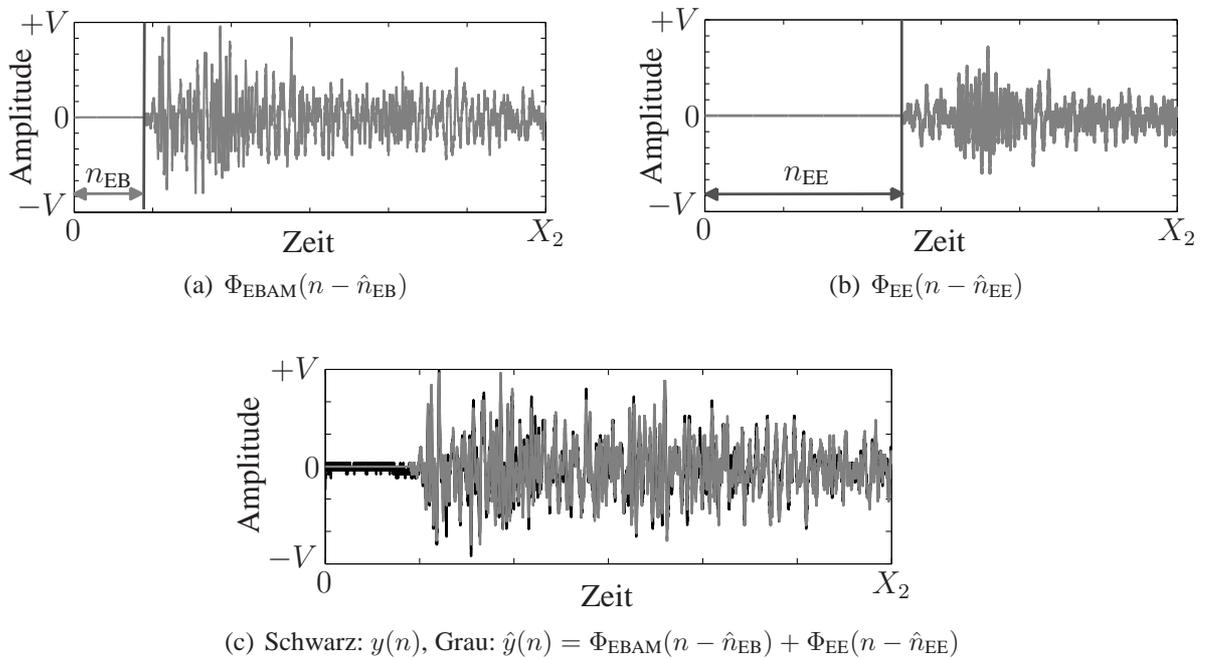
ausgewertet. Dabei wird nur die Musterfunktion  $\Phi_{EE}(n)$  verschoben. Die Verschiebung für die Musterfunktion  $\Phi_{EBAM}(n)$  entspricht  $\hat{n}_{EB}$ . Das Gütemaß lautet

daher

$$r_{y\hat{y}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \cdot \hat{y}(n-k) \xrightarrow{k=\hat{n}_{EE}} \max. \quad (9)$$

Der Verlauf des Gütemaßes in Abhängigkeit der Verschiebung  $k$  zeigt Bild 5(b). In [4] wurde gezeigt, dass zum Einspritzende bestimmte Frequenzen angeregt werden, die auch im Klopfensorsignal deutlich zu erkennen sind. Diese Frequenzen sind ebenso in der Oszillation des Gütemaßes in Bild 5(b) enthalten. Im folgenden Abschnitt wird darauf näher eingegangen.

Einen Überblick über die verschobenen Musterfunktionen  $\Phi_{EBAM}(n - \hat{n}_{EB})$ ,  $\Phi_{EE}(n - \hat{n}_{EE})$  und das synthetisierte Messsignal  $\hat{y}(n)$  ist in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Verlauf der Musterfunktionen

## 4.2 Teilhub-Bereich

Bei einer Kraftstoffeinspritzung im Teilhub-Bereich sind die Voraussetzungen für die Verwendung des Signalmodells aus Gl. (5) zur Detektion des Einspritzendes nicht erfüllt. Eine direkte Anpassung des Signalmodells an den Teilhub-Bereich ist nicht möglich, da die Musterfunktion  $\Phi_{EB}(n)$  nicht separat bestimmbar ist.

Wie bereits im letzten Abschnitt erwähnt, werden durch das Einspritzende bestimmte Frequenzen angeregt, die deutlich im Gütemaß zu erkennen sind. Dies

liegt daran, dass die Körperschallsignale nach dem Einspritzende entsprechend den dominanten Frequenzen nachschwingen. Wird das gemessene Klopfensorsignal  $y(n)$  mit dem verschobenen synthetisierten Signal  $\hat{y}(n - k)$  korreliert, so ergeben sich Nebenmaxima entsprechend der Periodendauer der dominanten Schwingungen. Dies führt dazu, dass die optimale Auswahl der Verschiebung  $n_{EE}$  nicht unbedingt auf das globale Maximum der Kreuzkorrelationsfolge  $r_{y\hat{y}}(k)$  fällt, sondern auf ein Nebenmaximum fallen kann. Das bedeutet, dass es zu Ausreißern bei der Detektion des Einspritzendes kommen kann. Um diese Ausreißer zu behandeln wird eine Kandidatenmenge  $\underline{M}(T_i)$  aus den  $m$  größten Nebenmaxima generiert, wobei  $m \in \mathbb{N}^+$ .

Die Kennlinie des Magnetspulen-Injektors aus Bild 2(b) weist keine Sprünge sondern einen durchweg stetigen Verlauf auf. Auf einem Intervall  $\Delta T_i = p \cdot dT_i$  sei die Kennlinie und somit auch der Verlauf von  $n_{EE}(T_i)$  annähernd linear, wobei  $p \in \mathbb{N}^+$ . Auf Grundlage bereits geschätzter Stützstellen  $\hat{n}_{EE}(T_i + dT_i)$ ,  $\hat{n}_{EE}(T_i + 2 \cdot dT_i)$ ,  $\dots$ ,  $\hat{n}_{EE}(T_i + p \cdot dT_i)$  kann somit eine Prädiktion  $\tilde{n}_{EE}(T_i)$  durchgeführt werden. Anhand der Prädiktion  $\tilde{n}_{EE}(T_i)$  wird aus der Kandidatenmenge  $\underline{M}(T_i)$  der entsprechende Schätzwert  $\hat{n}_{EE}(T_i)$  gewählt. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist die Zuverlässigkeit der zugrunde liegenden Schätzungen.

Die auf dem Intervall  $\Delta T_i$  verlaufende Regressionsgerade wird durch die Geradengleichung

$$n_{EE}(T_i) = a_1 \cdot T_i + a_0 \quad (10)$$

beschrieben. Zur Schätzung der Parameter  $a_1$  und  $a_0$  wird ein Least-Squares-Schätzer verwendet:

$$\hat{\underline{a}} = [\underline{\Psi}^T \cdot \underline{\Psi}]^{-1} \cdot \underline{\Psi}^T \cdot \underline{x} \quad (11)$$

mit

$$\underline{x} = [\hat{n}_{EE}(T_i + dT_i) \quad \hat{n}_{EE}(T_i + 2 \cdot dT_i) \quad \dots \quad \hat{n}_{EE}(T_i + p \cdot dT_i)]^T \quad (12)$$

und

$$\underline{\Psi} = \begin{bmatrix} T_i + dT_i & 1 \\ T_i + 2 \cdot dT_i & 1 \\ \vdots & \vdots \\ T_i + p \cdot dT_i & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{a} = [a_1 \quad a_0]^T. \quad (13)$$

Dies führt auf die Prädiktion

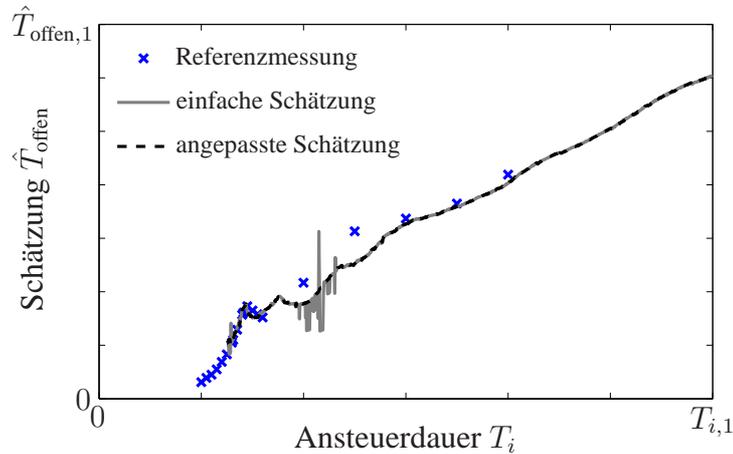
$$\tilde{n}_{EE}(T_i) = [T_i \quad 1] \cdot \hat{a}. \quad (14)$$

Der optimale Kandidat aus der Menge  $\underline{M}(T_i)$  minimiert die Abweichung

$$|\underline{M}(T_i) - \tilde{n}_{EE}(T_i)| \longrightarrow \min \quad (15)$$

und stellt damit den Schätzwert  $\hat{n}_{EE}(T_i)$  dar.

## 5 Messungen und Ergebnisse



**Bild 7:** Schätzung  $\hat{T}_{\text{offen}}$  der wahren Öffnungsdauer  $T_{\text{offen}}$  in Abhängigkeit von  $T_i$

Das Diagramm in Bild 7 zeigt das Ergebnis der Schätzung. In grau dargestellt ist die einfache Schätzung  $\hat{T}_{\text{offen}}$  nach Abschnitt 4.1. Die erweiterte Schätzung, wie in Abschnitt 4.2 diskutiert, ist in schwarz eingezeichnet. Als Referenz wurde bei einem Industriepartner mit Hilfe eines Laservibrometers die wahre Öffnungsdauer  $T_{\text{offen}}$  des Injektors für ausgewählte Ansteuerdauern  $T_i$  gemessen. Da die Einbaubedingungen des Injektors an beiden Prüfständen unterschiedlich waren, können leichte Abweichungen auftreten. Die Referenzmessungen sind im Diagramm mit 'x' gekennzeichnet.

Im Vollhub-Bereich sind die Voraussetzungen für die Verwendung des Signalmodells aus Gl. (5) erfüllt. Daher sind die Schätzergebnisse im oberen Vollhub-Bereich überzeugend. Im unteren Bereich des Vollhubs und im Teilhub-Bereich versagt die einfache Schätzung. Im unteren Bereich des Vollhubs wird das

Klopfsensorsignal von abklingenden Körperschallwellen des Ankeranschlags dominiert, welche das Einspritzende stark überlagern. Es kommt daher in diesen Bereichen zu Ausreißern, welche durch die vorgestellte erweiterte Methode behandelt werden können. Durch diese wird der Teilhub-Bereich sehr gut erfasst. Lediglich im unteren Bereich des Vollhubs liegt eine leichte Abweichung der Schätzung von den Messpunkten vor.

## 6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Algorithmus, basierend auf der Korrelationsmesstechnik, entwickelt, der die Zeitdauer zwischen zwei mechanischen Schlägen exakt bestimmt. Als Anwendung wurde der Vorgang der Benzin-Direkteinspritzung behandelt. Das Verfahren dient zur Schätzung der wahren Öffnungsdauer eines Magnetspulen-Injektors, wodurch eine Kalibrierung der Benzin-Direkteinspritzung realisierbar wird. Durch den standardmäßig verbauten Klopfsensor wird der emittierte Körperschall während des Einspritzvorgangs aufgezeichnet. Auf Basis eines in dieser Arbeit aufgestellten Signalmodells wird aus dem Klopfsensorsignal eine Schätzung der wahren Öffnungsdauer durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit Referenzmessungen verglichen. Auch für kleinste Einspritzmengen, d. h. sehr kurze Öffnungsdauern des Injektors, liefert der Algorithmus sehr gute Ergebnisse.

## Literatur

- [1] E. Achleitner, A. Koch, J. Maier und A. Marinai, “Magnetspulen-Injektoren für die Benzin-Direkteinspritzung”, *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* **67**(5), S. 332–339, 2006.
- [2] H. Bauer, *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, Vieweg + Teubner Verlag, 2003.
- [3] M. Hehle, M. Willmann, J. Remele, T. Ziegler und G. Schmidt, “In-Situ-Kalibration - Hochpräzise Kraftstoffeinspritzung für Off-Highway-Motoren”, *ATZ offhighway* **04**, S. 36–48, 2008.
- [4] K. Christ, M. Michelsburg, K. Back, A. Eidam und U. Kiencke, “Möglichkeiten zur Injektorkalibrierung mit Hilfe von Klopfsensoren bei der Benzin-Direkteinspritzung”, in *Sensoren und Messsysteme 2010, 15. ITG/GMA-Fachtagung*, S. 374–379, VDE Verlag, 2010.