

Akustische Analyse und Optimierung von mechatronischen Kraftstoffeinspritzsystemen

Christian Mühlbauer¹, Hans-Peter Rabl¹, Hermann Rottengruber²

¹ Labor Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung, 93053 Regensburg,
E-Mail: christian.muehlbauer@oth-regensburg.de

² Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen, 39106 Magdeburg,
E-Mail: hermann.rottengruber@ovgu.de

Einleitung

Die kontinuierlich strenger werdende Abgasgesetzgebung und der politische und gesellschaftliche Ruf nach ressourcenschonenden Fahrzeugen zwingt die Automobilindustrie innovative hochpräzise und komplexe mechatronische Regel- und Steuersysteme für den Fahrzeugantrieb zu entwickeln. Eines dieser komplexen mechatronischen Systeme am Fahrzeugantrieb ist die Benzindirekteinspritzung (BDE), dargestellt in Abbildung 1, die zunehmend die Saugrohreinspritzung auch im Massensegment ablöst. [1]

Durch die BDE können in Verbindung mit Abgasturboaufladung und variabler Nockenwellenverstellung Kraftstoffverbräuche bei gleichzeitiger Erhöhung von Motordrehmoment und Leistung reduziert werden. Freiheiten bezüglich der Einspritzstrategien, wie z.B. Kraftstoffdruck, Anzahl und Lage der Einspritzungen, erlauben eine Reduktion der Rohemissionen und verkürzen insbesondere die emissionskritische Motorwarmlaufphase. [2]

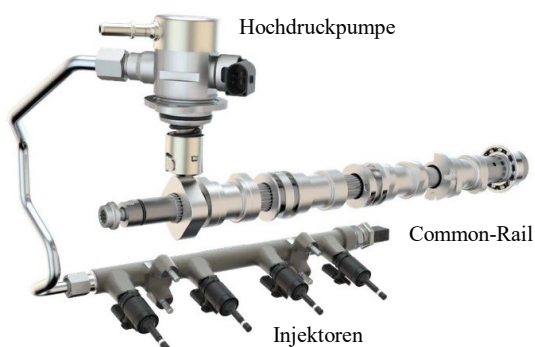


Abbildung 1: Wesentliche Systemkomponenten einer Benzindirekteinspritzung [3]

Methodik

Zur direkten und isolierten akustischen Analyse des Einspritzsystems wurde ein NVH-Systemprüfstand entwickelt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um einen geschleppten, unbefeuerten Teilmotorprüfstand. Der Antrieb der Hochdruckpumpe (HPP) erfolgt dabei über eine Asynchronmaschine, die in eine Schallschutzkapsel integriert wurde (siehe Abbildung 2).

Die elektrische Ansteuerung und Regelung des Einspritzsystems erfolgt über ein spezielles Entwicklungssteuergerät, das hardwareseitig auf einem Serienmotorsteuergerät basiert. Zur akustischen Analyse der

Injektoren, wird die Hochdruckpumpe gegenphasig zu den Injektoren angesteuert. Somit besteht die Möglichkeit das Luftschallsignal, welches in einem reflexionsarmen Halbraum mit einem ½“ Freifeld-Messmikrofon in 1 m Entfernung erfasst wurde, zeitlich zu separieren und eine isolierte Geräusch-Analyse der mechatronischen Einspritzsystem-Komponenten durchzuführen.

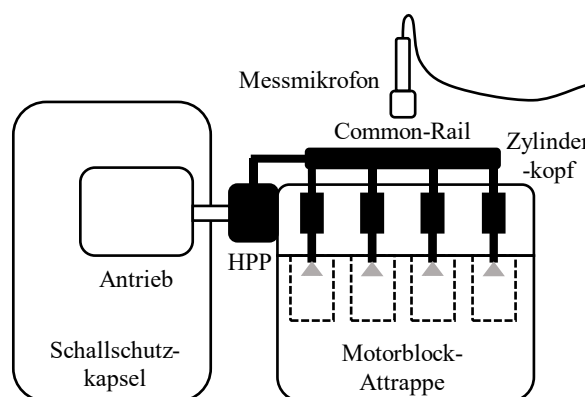


Abbildung 2: Schema NVH-Einspritzsystemprüfstand

Das Störgeräusch des Einspritzsystems wird insbesondere bei Motor-Leerlauf und im untersten Drehzahl- und Lastbereich als störend wahrgenommen, da die Maskierung durch andere Geräuschquellen, wie Verbrennung, Fahrtwind und Reifen, gering ist [1]. Aus diesem Grund wurde das elektrische Ansteuerprofil der Injektoren an einem Motorprüfstand mit baugleichen Einspritzsystem, Zylinderkopf, etc. bei Motor-Leerlauf gemessen und auf den NVH-Systemprüfstand übertragen.

Automobilhersteller entwickeln selbst keine Einspritzsysteme, sondern beziehen diese durch Automobilzulieferer. Treten bei einer ungünstigen Kombination aus Motor/Fahrzeug und Einspritzsystem nicht zufriedenstellende NVH-Phänomene auf, haben die Automobilhersteller in der Regel geringe Möglichkeiten das akustische Verhalten durch konstruktive Änderungen zu beeinflussen. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Möglichkeiten zur NVH-Optimierung mithilfe der elektrischen Ansteuerstrategie diskutiert. Eine Änderung der Ansteuerstrategie kann einen erheblichen Einfluss auf die Funktion und Robustheit des Einspritzsystems haben. Deshalb werden neben den akustischen Auswirkungen auch die Auswirkungen bezüglich der Hauptfunktionen untersucht.

Schallquellen am Kraftstoffinjektor

Insbesondere die immer höher werdenden Einspritzdrücke und die schnelleren Schaltzeiten führen zu einem höheren

Energieeintrag in das System. Dadurch verändert sich das akustische Verhalten des Einspritzsystems. Zusammen mit den sinkenden Geräuschemissionspegeln, werden moderne Einspritzsysteme deshalb auch unter Berücksichtigung des akustischen Verhaltens entwickelt.

Im weiteren Verlauf wird ausschließlich die Akustik von Magnetspulen-Injektoren diskutiert. Das wahrgenommene Injektor-Geräusch ist auf das Öffnen und Schließen des Injektors zurückzuführen. Hervorgerufen durch die schnellen Schaltzeiten dieses Aktuators, wird das Ventilmadel/Anker-Paket großen Beschleunigungen ausgesetzt. Das Abbremsen von Ventilmadel und Anker bei Erreichen des Anschlags bei Öffnen und Schließen resultiert in einer strukturellen Anregung. Durch die hohe Energiedichte, sowohl lokal als auch zeitlich, wird ein impulsartiges und hochfrequentes Geräusch hervorgerufen, das besonders im Leerlauf des Motors wahrnehmbar ist. Abbildung 3 zeigt die grundlegenden Schallquellen am Injektor. Durch verschiedene technologische Maßnahmen der Hersteller von Einspritzsystemen, wie z.B. der Entkopplung von Anker und Nadel oder sogenannte Leerhub-Konzepte, sind einzelne Schallentstehungsmechanismen unter Umständen neu zu betrachten [4].

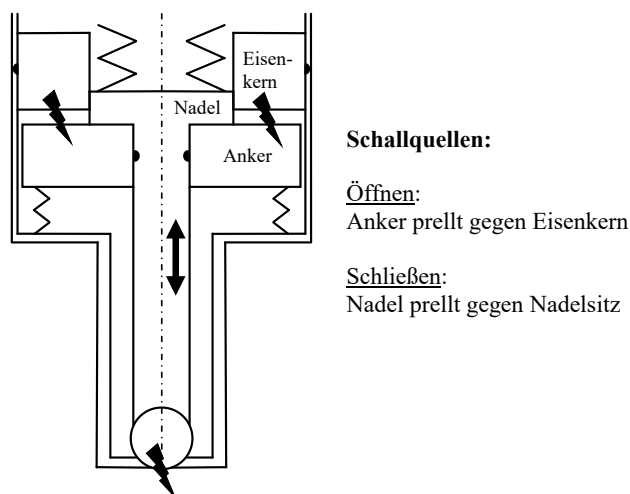


Abbildung 3: Grundlegende Schallquellen am Magnetspulen-Injektor

Das Tickern ist insbesondere bei Ottomotoren als kritisch einzustufen, da im Gegensatz zum Dieselmotor das Verbrennungsgeräusch einen relativ niedrigen Schalldruckpegel aufweist [5]. Ein weiteres Problem ist das Abnehmen des mittleren Motorengeräusches mit steigender Frequenz. Dadurch wird der höherfrequente Anteil des Tickerns deutlicher wahrgenommen, auch wenn im Vergleich zum restlichen Motorgeräusch ein niedrigerer Schalldruckpegel vorliegt. [6]

Abbildung 4 zeigt den Verlauf des Ansteuerstroms eines Injektors (unten) und eine Wavelet-Analyse des daraus resultierenden Mikrofon-Signals (oben). Die Wavelet-Analyse zeigt mit einem zeitlichen Verzug zum elektrischen Ansteuerbeginn von etwa 4 ms eine hochfrequente und impulsartige Schallemission mit einem Frequenzschwerpunkt von ca. 15 kHz. Der zeitliche Verzug ist neben der Luftschalllaufzeit auf den hydraulischen Öffnungsverzögerung zurückzuführen.

und die Körperschalllaufzeit zurückzuführen. Analog zur elektrischen Ansteuerdauer von 3 ms ist in der Wavelet-Analyse nach 3 ms eine weitere ausgeprägte impulsartige und hochfrequente Schallemission erkennbar. Diese beiden lokalen Schalldruck-Maxima sind zum einen durch das Öffnungs-Prellen (Anker – Eisenkern) und zum anderen durch das Schließ-Prellen (Ventilmadel – Dichtsitz) des Injektors hervorgerufen. Das Schließ-Prellen zeigt bei dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Injektor einen etwas größeren akustischen Einfluss als das Öffnungs-Prellen.

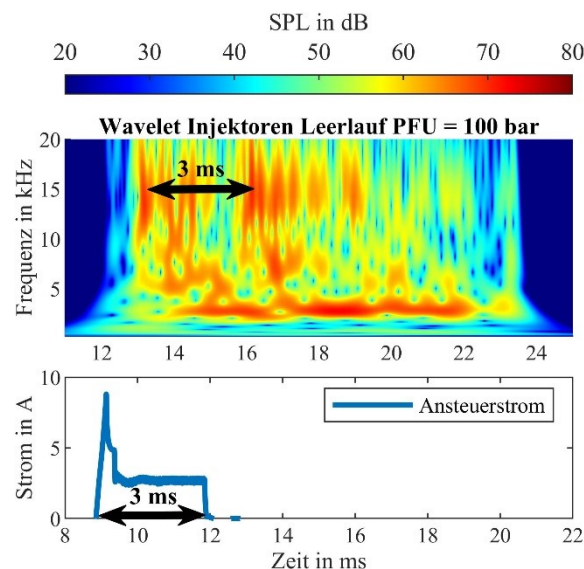


Abbildung 4: Wavelet-Analyse eines Einspritzvorgangs mit 100 bar Kraftstoffdruck

Reduzierung des Ansteuerstroms

Zur Optimierung des akustischen Verhaltens von Injektoren kann das Öffnungs-Prellen reduziert werden. Die resultierende Kraft F_{res} mit der das Ventilmadel/Anker-Paket gegen den Eisenkern gedrückt wird, berechnet sich nach Gleichung (1) wie folgt:

$$F_{res} = F_{mag} - F_{spring} - F_{fluid} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

mit

F_{res} = Resultierende Öffnungskraft

F_{mag} = Magnetische Kraft

F_{spring} = Kraft der Rückstellfeder

F_{fluid} = Fluidkraft

Da die Kraft der Rückstellfeder von außen nicht beeinflusst werden kann und die Fluidkraft vom gewünschten Einspritzdruck abhängt, wird zur Reduktion der resultierenden Kraft die magnetische Kraft reduziert. Gleichung (2) zeigt die Berechnung der magnetischen Kraft als Funktion der Spaltbreite zwischen Anker und Eisenkern und des Ansteuerstroms mit der vereinfachten Annahme stationärer Bedingungen [7]:

$$F_{mag}(x_{gap}, I) = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx_{gap}} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

mit

x_{gap} = Spaltbreite zwischen Anker und Eisenkern

I = Elektrischer Ansteuerstrom

L = Elektrische Induktivität

Abbildung 5 zeigt zur akustischen Optimierung oben die schrittweise Reduzierung des Ansteuerstroms und unten die Auswirkungen auf den Einspritzratenverlauf. Je weiter der Ansteuerstrom reduziert wird, desto größer wird der hydraulische Öffnungsverzug zwischen elektrischen Ansteuerbeginn und Einspritzbeginn.

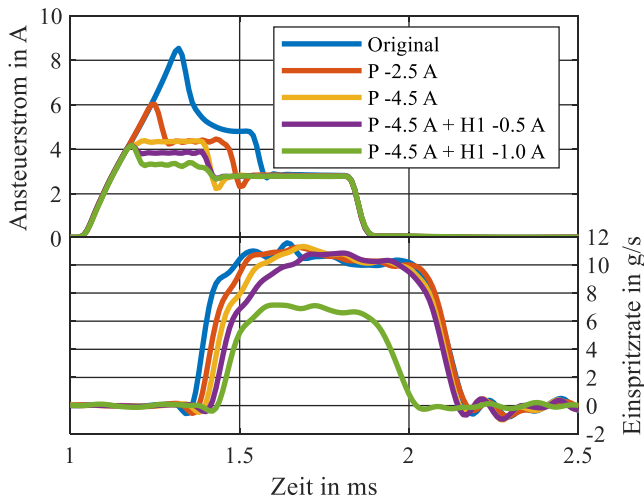


Abbildung 5: Oben: Schrittweise Reduzierung des Ansteuerstroms zur Reduzierung des Öffnungs-Prellens; Unten: Auswirkungen auf den Einspritzratenverlauf

Des Weiteren wird mit Reduzierung des Ansteuerstroms der Gradient der Einspritzrate flacher, was auf eine Reduzierung der Öffnungsgeschwindigkeit des Ventils/Anker-Pakets hinweist. Bei der grünen Kurve mit einer Reduzierung des Peaks um 4.5 A und der Hold1-Phase um 1.0 A wurde der Ansteuerstrom soweit reduziert, dass der Injektor nicht mehr vollständig öffnet. Dieser sogenannte ballistische Teilhub-Betrieb wirkt sich insbesondere auf die Shot-to-Shot-Streuung, in Tabelle 1 als Standardabweichung dargestellt, zwischen den einzelnen Einspritzungen negativ aus. Zwar reduziert sich auch der Mittelwert der eingespritzten Kraftstoffmasse, dieser Effekt kann aber über eine Verlängerung der elektrischen Ansteuerdauer korrigiert werden.

Tabelle 1: Mittelwert und Standardabweichung der eingespritzten Kraftstoffmasse über 100 Einspritzungen

Ansteuerprofil	Mittelwert	Standardabweichung
Original	7.188 mg	0.067 mg
P -2.5 A	6.950 mg	0.068 mg
P -4.5 A	6.502 mg	0.075 mg
P -4.5 A + H1 -0.5 A	6.067 mg	0.070 mg
P -4.5 A + H1 -1.0 A	3.179 mg	0.249 mg

Da das Ansteuerprofil mit einer Reduzierung des Peaks um 4.5 A und der Hold1-Phase um 0.5 A noch zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich Öffnungsdynamik und Shot-to-Shot-Streuung zeigt, wurde dieses Ansteuerprofil für eine akustische Optimierung ausgewählt. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich des Terzspektrums von

originalen und stromreduzierten Ansteuerprofil. Dabei kann bereits ab einer Terz-Mittenfrequenz ≥ 1.6 kHz der Terzpegel um bis zu 7 dB reduziert werden. Auffällig erscheinen hingegen die beiden Terzpegel mit den Terz-Mittenfrequenzen 2.5 und 3.15 kHz. Diese zeigen eine deutliche Pegel-Überhöhung gegenüber dem originalen Ansteuerprofil.

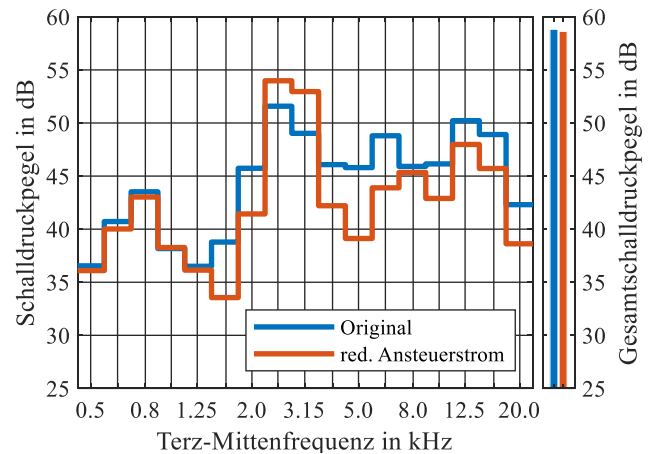


Abbildung 6: Vergleich Terzspektrum mit originalen und stromreduzierten Ansteuerprofil

Um die Ursache für diese Pegel-Überhöhungen nachvollziehen zu können, wurde zusätzlich eine Wavelet-Analyse durchgeführt (siehe Abbildung 7). Dabei ist ersichtlich, dass mit dem hochfrequenten Schließ-Prellen ein weiteres ausgeprägtes Geräuschphänomen der oben genannten kritischen Frequenzbereiche entsteht.

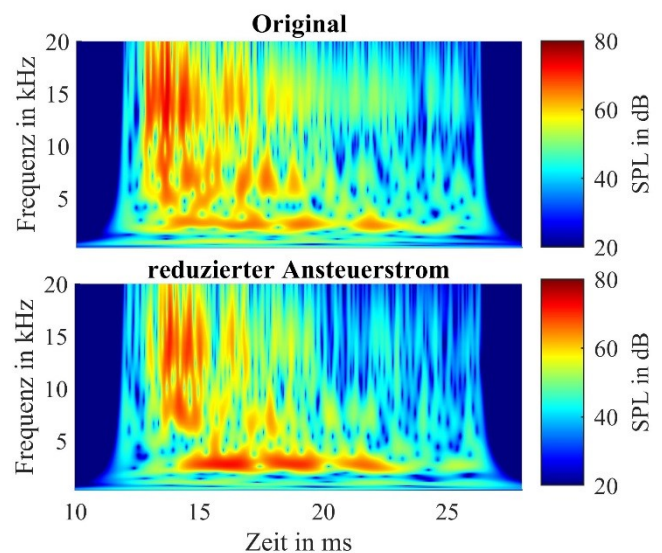


Abbildung 7: Vergleich Wavelet-Analyse mit originalen und stromreduzierten Ansteuerprofil

Bei Betrachtung des Einspritzratenverlaufs beider Ansteuerprofile in Abbildung 8 ist trotz gleich langer Ansteuerdauer ein früheres Einspritzende bei dem stromreduzierten Ansteuerprofil erkennbar. Weiterhin ist eine größere Schwankungs-Amplitude nach Einspritzende vorhanden, was auf ein erhöhtes Schließ-Prellen der Ventils/Anker-Pakets gegen ihren Dichtsitz schließen lässt. Dieser Effekt ist vermutlich auf die reduzierte Restmagnetisierung, hervorgerufen durch den geringeren Ansteuerstrom, beim Schließvorgang zurückzuführen. Das erhöht nach

Gleichung (1) die resultierende Rückstellkraft durch die Rückstellfeder und den Kraftstoffdruck.

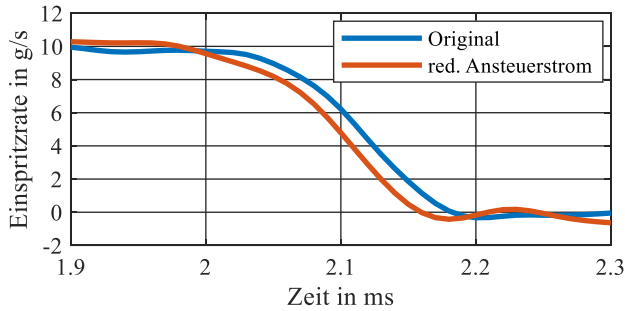


Abbildung 8: Vergleich Einspritzrate mit originalen und stromreduzierten Ansteuerprofilen

Softlanding

Zur Kompensation des Schließ-Prellens, wird nach dem Ende der elektrischen Ansteuerung ein zusätzlicher Bremsstrom appliziert (siehe Abbildung 9 oben). Dieser erhöht die magnetische Kraft beim Schließvorgang und reduziert somit die resultierende Kraft, mit der die Ventalnadel in ihren Dichtsitz zurückgedrückt wird. Die Wahl der korrekten Separationszeit und Ansteuerzeit des Bremspulses wurde am NVH- und Einspritzraten-Prüfstand experimentell ermittelt. Werden die genannten Parameter falsch gewählt, kann die Einspritzung maßgeblich vertrimmt werden. Alternativ werden bei falscher Parametrierung keine akustischen Vorteile erreicht.

Das obere Diagramm in Abbildung 9 weist anhand des flacheren Einspritzratenverlaufs beim Schließvorgang auf die reduzierte Schließdynamik der Ventalnadel durch Softlanding hin. Außerdem konnte die Schwankungsamplitude der Einspritzrate bei Einspritzende reduziert werden.

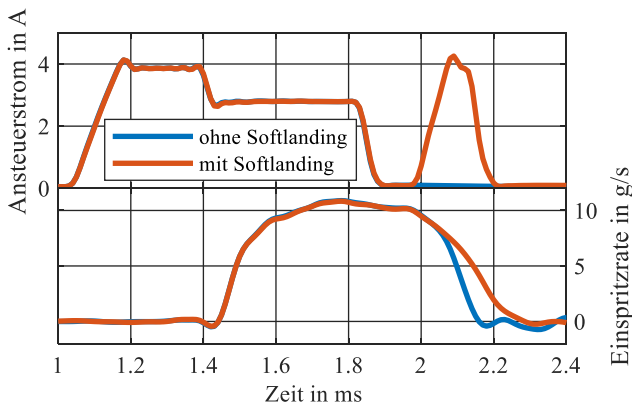


Abbildung 9: Vergleich Ansteuerstrom (oben) und Einspritzrate (unten) mit stromreduzierten Ansteuerprofil mit und ohne Softlanding

Nachteilig wirkt sich die Maßnahme allerdings in einer Erhöhung der Shot-to-Shot-Streuung der eingespritzten Kraftstoffmasse aus. So erhöht sich die Standardabweichung mit Softlanding mit 0.2146 mg erheblich gegenüber den Wert von 0.070 mg ohne Softlanding.

In Abbildung 10 wird die Maßnahme akustisch betrachtet. Dabei kann der Terzpegel ab einer Terz-Mittelfrequenz ≥ 1.6 kHz durchgehend um bis zu 9 dB gegenüber dem

originalen Ansteuerprofil reduziert werden. Der Gesamtschalldruckpegel wurde dabei um ca. 4.5 dB reduziert.

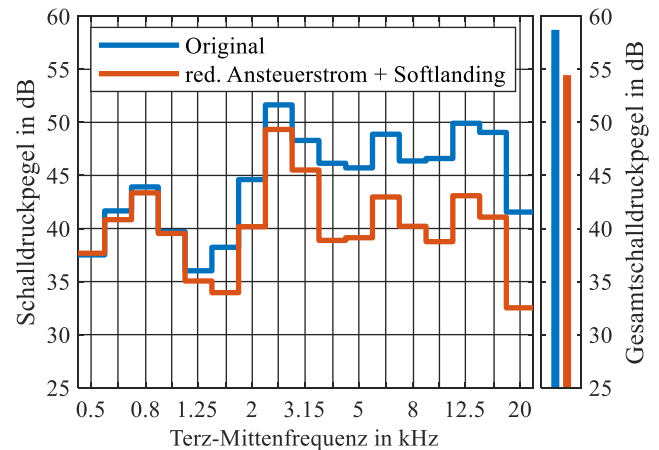


Abbildung 10: Vergleich Terzspektrum mit originalen und stromreduzierten Ansteuerprofil mit Softlanding

Schlussfolgerung und Ausblick

Eine NVH-Optimierungsmaßnahme als Kombination aus reduzierten Ansteuerstrom und Softlanding zeigt zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der Geräuschreduktion. Allerdings erhöht sich durch das Softlanding die Shot-to-Shot-Streuung. Hierzu sind weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit notwendig, z.B. durch Verbesserung der prüfstandseitigen Triggerung. Des Weiteren müssen die Maßnahmen psychoakustisch analysiert und im Motorbetrieb (Maskierungseffekte, Emissionen) untersucht werden.

Literatur

- [1] Braun, C. W. et al.: Acoustic Noise Assessment of Gasoline Direct Injection Fuel Injectors Using Taguchi Methods, SAE Technical Paper 2011-01-1216, 2011.
- [2] Merker, G. P.; Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [3] Eichler, F. et al.: Der neue EA211 TSI@evo von Volkswagen, 37. Internationales Wiener Motorensymposium, 2016.
- [4] Frenzel, H et al.: Direkteinspritzsysteme für Ottomotoren zur Erfüllung der Real Driving Emission, 10. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung, 2016.
- [5] Atzler, M.: Bewertungsmodelle für impulsartige Störgeräusche von Verbrennungsmotoren, Dissertation, Aachen, 2011.
- [6] Zeng, P.; Solferino, V.; Stickler, M.: Direct Injection Design Principles for Noise Vibration Harshness, SAE Technical Paper 2017-01-1052, 2017.
- [7] AVL BOOST Hydsim Userguide, 2013.