

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am
15/05/2012

Projekttitlel:

Partikelminimierung – Wege zur Reduktion der Partikel-
emissionen von Ottomotoren mit Direkteinspritzung

Projektnummer:

825623

Neue Energien 2020 - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	3. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	01/03/2010
Projektende	29/02/2012
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	24 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Prof. B. Geringer, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, TU Wien
AnsprechpartnerIn	Prof. B. Geringer
Postadresse	Technische Universität Wien Institut E-315 Getreidemarkt 9 1060 Wien
Telefon	Tel.: +43 1 58801 31500
Fax	Fax: +43 1 58801 31598
E-mail	info@ifa.tuwien.ac.at
Website	www.ifa.tuwien.ac.at

AutorInnen:
DI Ch. Denk

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	3
2	Einleitung	4
3	Inhaltliche Darstellung	5
3.1	Basisvermessung- Bestimmung aller relevanten Daten im gesamten Motorkennfeld	6
3.2	Messung der Partikelemissionen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)	8
3.3	Reduktion der Partikelemissionen beim Kaltstart durch alternative Einspritzstrategien.....	9
3.4	Variation der Parameter in ausgewählten Lastpunkten (diese sollen den Fahrzyklus repräsentieren) untersucht	10
3.5	Untersuchung der Partikelanzahlemissionen bei der schrittweisen Anteilerhöhung von Biobenzin (ETBE, Ethanol).....	11
3.6	Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfilters	13
3.7	Hybridisierung	14
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	17
5	Ausblick und Empfehlungen	19
6	Literaturverzeichnis.....	20

2 Einleitung

Politik, Wissenschaft und Gesellschaft betreiben große Anstrengungen, der anhaltenden Klimaveränderung durch die Eindämmung der anthropogenen Klimagase entgegenzuwirken. Gerade der Verkehrssektor steht hier oft im Mittelpunkt des Interesses und muss sich schon heute großen Herausforderungen stellen. Die weltweit immer strenger werdenden Abgasgesetzgebungen zur Regulierung der Schadstoffemissionen von PKW und Nutzfahrzeugen begleitet mit der Vorgabe, die klimarelevanten Emissionen wie Kohlendioxid zu reduzieren, stellen in der Entwicklung von Fahrzeugmotoren einen Zielkonflikt dar, der nur mit neuester Technologie gelöst werden kann.

Das im Jahr 2015 in Kraft tretende EU-Emissionsgesetz schreibt einen Flottenmittelwert für CO₂ von 120 g/km für 100% der PKWs und leichten Nutzfahrzeuge vor. Um dieses Ziel zu erreichen, ist neben der Optimierung des Gesamtsystems Fahrzeug (Fahrzeuggewicht, Fahrwiderstände) eine Verbesserung des Motorwirkungsgrades essentiell [1].

Ottomotoren mit Benzin-Direkteinspritzung (DISI) stellen in Verbindung mit Aufladung und variabler Ventilsteuerung als hocheffiziente Antriebsaggregate ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung und damit Ressourcenschonung dar.

Motorischer Schichtbetrieb mit strahlgeführtem Brennverfahren wird in diesem Zusammenhang aufgrund der sehr hohen Effizienzpotenziale zwar als sehr vielversprechend angesehen, ist aber zugleich auch der komplexeste Ansatz, welcher überdies nur in großvolumigen Motoren sein volles Einsparpotenzial ausspielen kann.

Eine Herausforderung beim Einsatz der Direkteinspritzung ist es die systembedingt auftretende Partikelemission gering zu halten. Schwerpunkt des Projektes ist es daher, die Einflussgrößen auf die Partikelbildung zu untersuchen und geeignete Strategien zur Absenkung derer zu entwickeln.

Dies ist besonders im Hinblick auf die 2014 in Kraft tretende EURO 6-Abgasnorm, die eine Limitierung der Partikelanzahl im Abgas direkteinspritzender Ottomotoren vorsieht, von enormem Interesse. Potenzialgrenzwertabschätzungen der Vorteile des direkteinspritzenden Ottomotors machen klar, dass dieser Aufwand gerechtfertigt ist, um dieses Motorenkonzept als umweltverträglicheres Antriebssystem zu forcieren.

3 Inhaltliche Darstellung

Die Untersuchungen wurden auf einem Stationärprüfstand durchgeführt. Dazu kam ein Versuchsträger vom Typ N18B16 der BMW AG zum Einsatz. Es handelt sich dabei um einen aufgeladenen Ottomotor mit Direkteinspritzungstechnologie, welcher ausschließlich homogen betrieben wurde.

Als Applikationssteuergerät für den Versuchsmotor kam nicht die original verbaute Bosch ECU (Engine Control Unit) zum Einsatz, sondern ein Applikationssteuergerät der Firma AVL. Erst der Einsatz dieser Steuereinheit ermöglichte die Verwirklichung der durchgeführten Untersuchungen. Im Auslieferungszustand war eine entsprechende Basisbedatung für den Prüfstandsmotor der BMW AG vorprogrammiert.

Schema des Aufbaus

Die Einbindung der Verbrennungskraftmaschine in den Motorenprüfstand ist schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt.

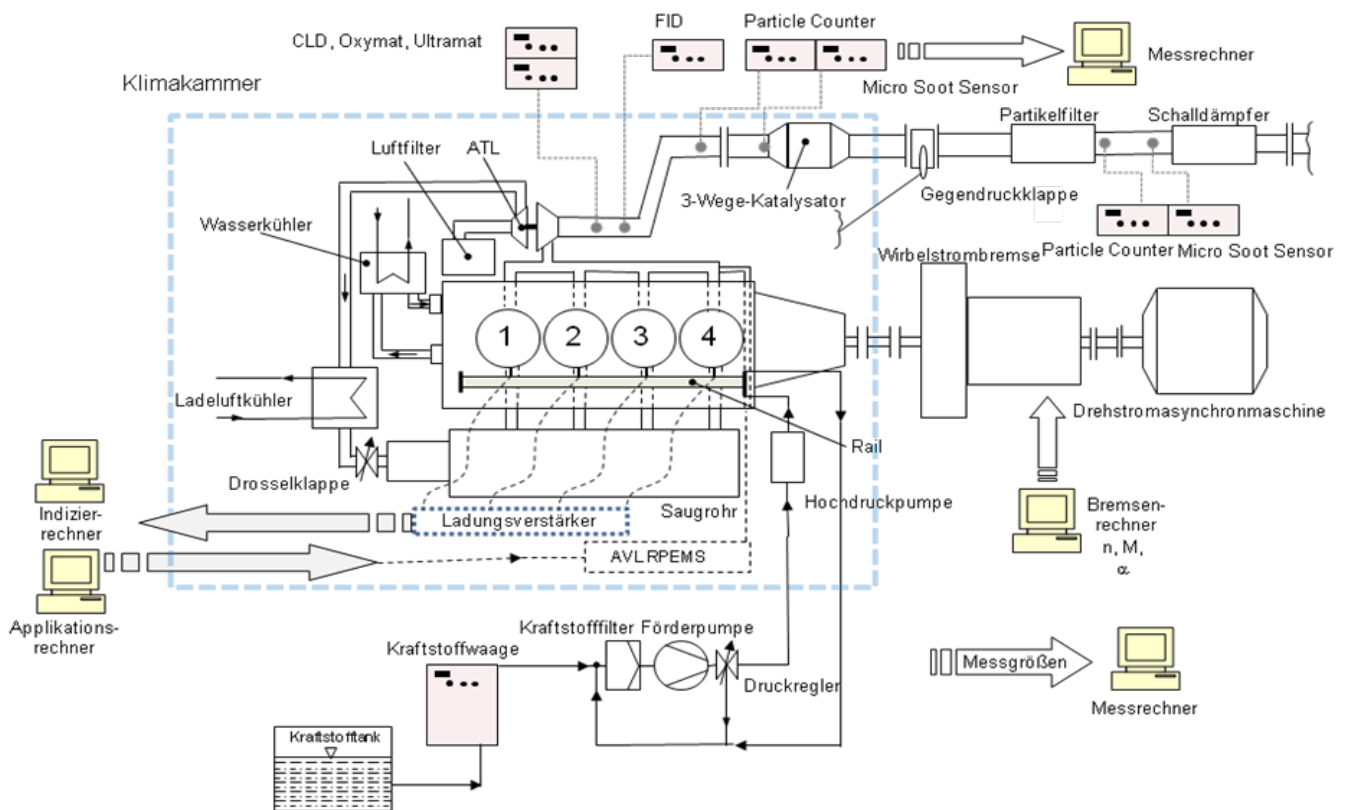


Abbildung 3-1 Schema des stationären Motorprüfstandes

Das Projekt umfasste unter anderem Messungen des Drehzahlhochlaufes, der Kohlenwasserstoffemissionen, sowie der Partikelanzahl beim Durchfahren des „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ).

Die Vorgabe von Parametertabellen in der Bremsensteuerung ermöglichte ein automatisiertes Nachfahren dieses Fahrzyklus am Motorprüfstand. Die Entnahme des Abgases erfolgte aus dem Rohabgas direkt am Konus vor dem Dreiwege-Katalysator.

Die Messung der Partikelanzahl sowie der Partikelmasse konnte wahlweise nach dem Turbolader oder am Ende des Abgasstranges erfolgen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen, nach einer Basisvermessung des Motors, die Auswirkungen der Variation unterschiedlicher motorischer Parameter auf die innermotorische Partikelbildung, um die Bedatung des eingesetzten Steuergeräts zu optimieren, mit dem Ziel die Partikelemission im NEFZ zu reduzieren.

Anschließend wurde der NEFZ auf dem Stationärprüfstand simuliert, um das Partikelreduktionspotenzial der Kennfeldoptimierung im Vergleich zur Basisbedatung bewerten zu können.

Ergänzend wurde eine Analyse hinsichtlich der Substitution biogener Kraftstoffanteile zu konventionellem Ottokraftstoff durchgeführt. Dabei wurde der Ethanolanteil des Kraftstoffs variiert und dessen Potenzial hinsichtlich Partikelminimierung in stationären Betriebspunkten und im NEFZ untersucht.

Eine umfangreiche Potentialabschätzung zum Thema „Einsatz eines Partikelfilters“ ergab neuer Erkenntnisse bezüglich Beladung, Regeneration und damit in Zusammenhang stehenden reaktionskinetischen Mechanismen.

Abschließend wurde das Potential unterschiedliche Hybridisierungsstrategien zur Minimierung der Partikelemissionen untersucht und bewertet.

3.1 Basisvermessung- Bestimmung aller relevanten Daten im gesamten Motorkennfeld

Um die kritischen Bereiche des Motorenkennfeldes hinsichtlich Partikelbildung herauszufiltern und die Auswirkungen der Einflussparameter beurteilen zu können, war eine Basisvermessung des Prüfmotors mit der Standardbedatung des Applikationssteuergerätes erforderlich. Zur Verwirklichung dieser Basisvermessung wurde ein für den Neuen Europäischen Fahrzyklus repräsentatives Gebiet des Kennfeldes untersucht. Eine wesentliche Voraussetzung für eine geringe Partikelkonzentration im Rohabgas ist eine möglichst homogene Zylinderladung.

Im unteren Drehzahlbereich ist mit einem Anstieg der Schadstoffteilchen zu rechnen, da das niedrige Ladungsbewegungsniveau sich nachteilig auf die Homogenisierung im Brennraum auswirkt.

In Folge der verkürzten Zeitspanne zwischen Einspritzende und Zündzeitpunkt im oberen Drehzahlbereich wird eine unzureichende Homogenisierung vermutet, wodurch auch in diesem Gebiet erhöhte Partikelkonzentrationen zu erwarten sind.

Der Sauerstoffmangel ($0,85 < \lambda < 1$) im unterstöchiometrischen Gebiet lässt ebenfalls einen Anstieg der Schadstoffteilchen im Abgas erwarten. Der Verlauf des Partikelanzahl-Kennfeldes, der in Abbildung 3-2 zu sehen ist, korreliert hinsichtlich des Trends mit der Erwartungshaltung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Schadstoffteilchen in den beschriebenen Betriebsbereichen steigt, wobei der Anstieg im unteren Drehzahlbereich wesentlich deutlicher ausgeprägter ist.

Diese Tatsache lässt sich auf zwei Auslöser zurückzuführen:

Einerseits begünstigt das deutlich höhere Temperaturniveau im oberen Drehzahlbereich das Phänomen der Nachoxidation, wodurch die Partikelkonzentration abnimmt.

Andererseits hat die geringe Ladungsbewegung bei diesem Versuchsträger einen größeren Einfluss als die verkürzte Gemischbildungszeit auf den Gütegrad der Homogenisierung.

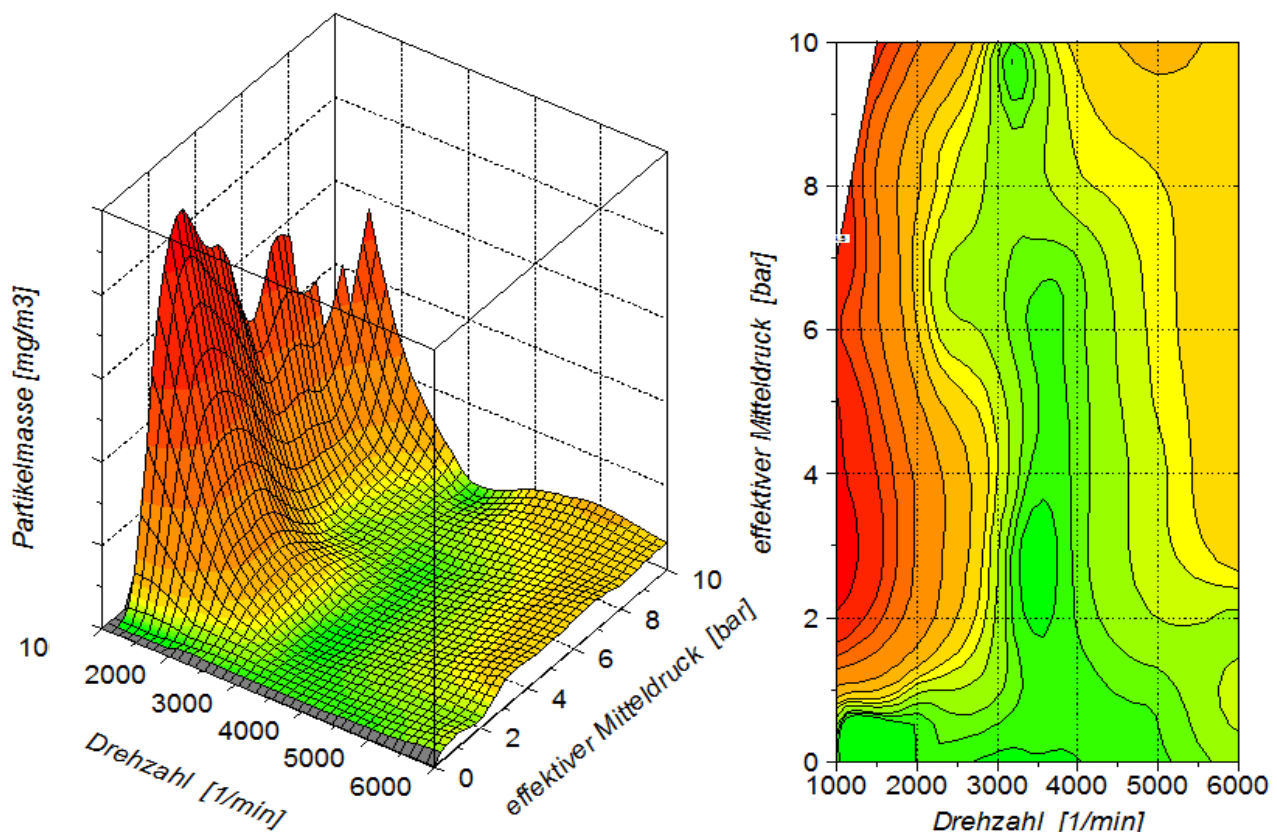


Abbildung 3-2: Kennfeld der Partikelanzahl im zertifizierungsrelevanten Bereich

3.2 Messung der Partikelemissionen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)

Da die gesetzlichen Grenzwerte der Schadstoffemissionen für den Neuen Europäischen Fahrzyklus vorgeschrieben sind, musste der NEFZ auf dem Motorprüfstand appliziert werden, bevor die Versuchsreihen mit Basisbedatung und anschließender Kennfeldoptimierung durchgeführt werden konnten.

Ergebnisse des NEFZ mit Basisbedatung

Der Europäische Fahrzyklus wurde mit der Basisbedatung wie Abbildung 3-3 zeigt, zweimal abgefahren um die Reproduzierbarkeit der gewonnenen Daten beurteilen zu können.

Partikelanzahl mit Basisbedatung

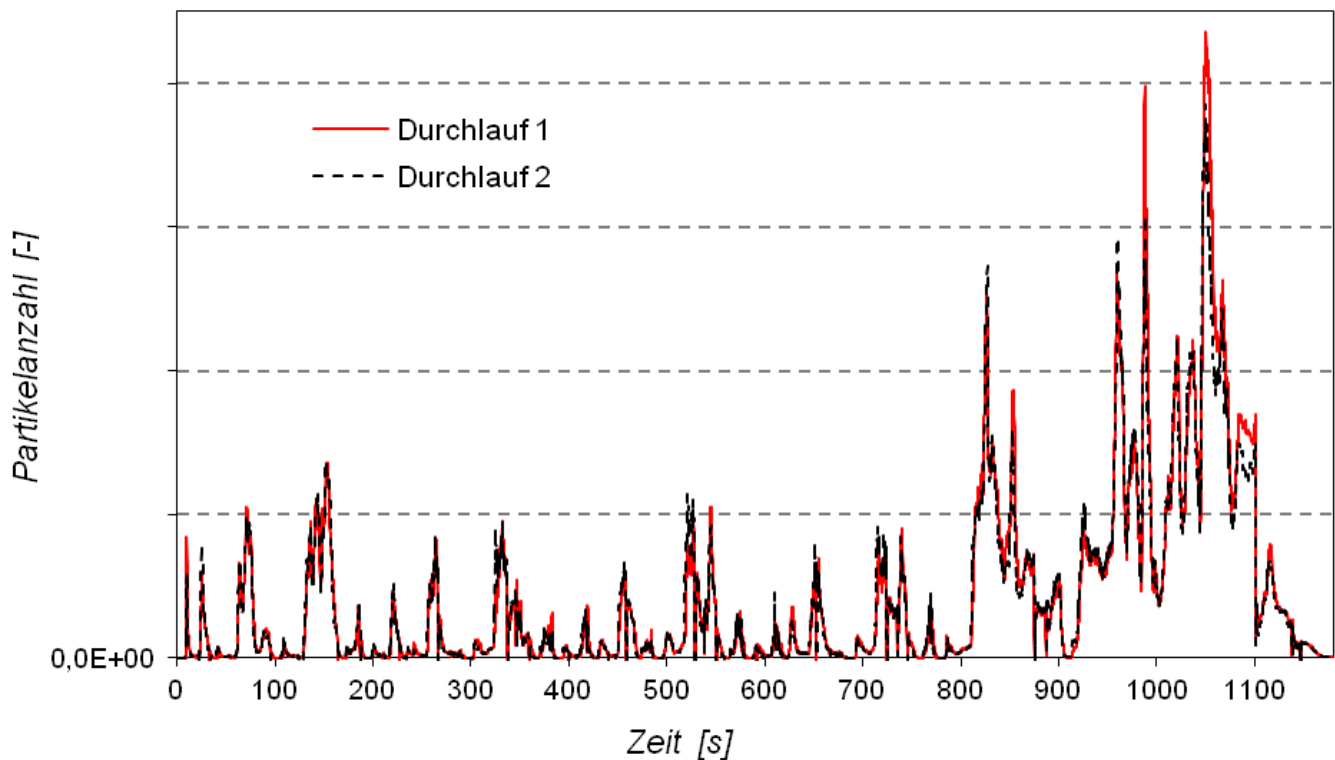


Abbildung 3-3: Partikelanzahl über der Zeit (NEFZ mit Basisbedatung)

Als wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchungen zeigen sich sehr hohe Partikelkonzentrationen bei Beschleunigungen aus niederen Drehzahlregionen mit hoher Momentenanforderung. Als Zielführend ergibt sich also im ersten Schritt eine Optimierung der Steuergerätsapplikation in eben diesen Bereichen.

3.3 Reduktion der Partikelemissionen beim Kaltstart durch alternative Einspritzstrategien

Die zwei Hauptursachen, die sich negativ auf die Partikelanzahl auswirken, sind einerseits die stark unterschiedlichen Gemischzusammensetzungen mit deutlich unterstöchiometrischen Gebieten und andererseits die Präsenz von unverbranntem Kraftstoff, welcher mit der Flamme wechselwirken kann.

Neben den Rußbildungsgrenzen sind der Gütegrad der Homogenisierung und das Temperaturniveau die wichtigsten Einflussparameter auf die Partikelemission.

Deshalb sind die Brennraumgestaltung, die Luftzahl, die AGR-Rate, der Zündzeitpunkt und das Einspritzsystem maßgeblich an der Konzentration der festen Schadstoffe im Abgas eines direkteinspritzenden Ottomotors beteiligt. Das Einspritzsystem bietet die größte Variationsvielfalt, da neben dem Raildruck und dem Einspritztiming auch der Typ des Injektors und die Geometrie des Einspritzstrahls wesentliche Einflussfaktoren darstellen. Diese Parameter gilt es für den jeweiligen Motor zu optimieren, um die Partikel im Abgas minimieren zu können.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen konzentrierten sich die Untersuchungen auf die optimale Verteilung von bis zu vier Einspritzungen pro Arbeitsspiel.

Dadurch konnten jede Einzeleinspritzungen optimal auf die im Brennraum verfügbare Verdichtungswärme abgestimmt werden und so ein möglichst vollständiges Verdampfen des Kraftstoffes erreicht werden. Generell muss vermieden werden, dass flüssiger Kraftstoff die Brennraumwände erreicht und zu einer Wandbenetzung führt, da dieser in späterer Folge nicht mehr abgedampft werden kann.

Dies ist auch bei Anpassung des Kraftstoffdruckes zu beachten, da eine Erhöhung desselben eine Erhöhung der Penetrationstiefe des Einspritzstrahles bedingt und damit die Gefahr der Wandbenetzung erhöht wird.

Die Einspritzparameter

- Anzahl der Einspritzungen
- Lage der Einspritzungen (SOI)
- Dauer der Einspritzungen (Gewichtung)

wurden in umfangreichen Variationen hinsichtlich deren Auswirkung auf Partikelanzahl, der Kohlenwasserstoffkonzentration im Rohabgas sowie auf den Drehzahlhochlauf ausgewertet und beurteilt. Beim Einsatz einer 4-fach Einspritzstrategie konnte die Partikelanzahl um über 1/3 gesenkt werden.

Die erlangten Ergebnisse zeigt [Abbildung 3-4](#).

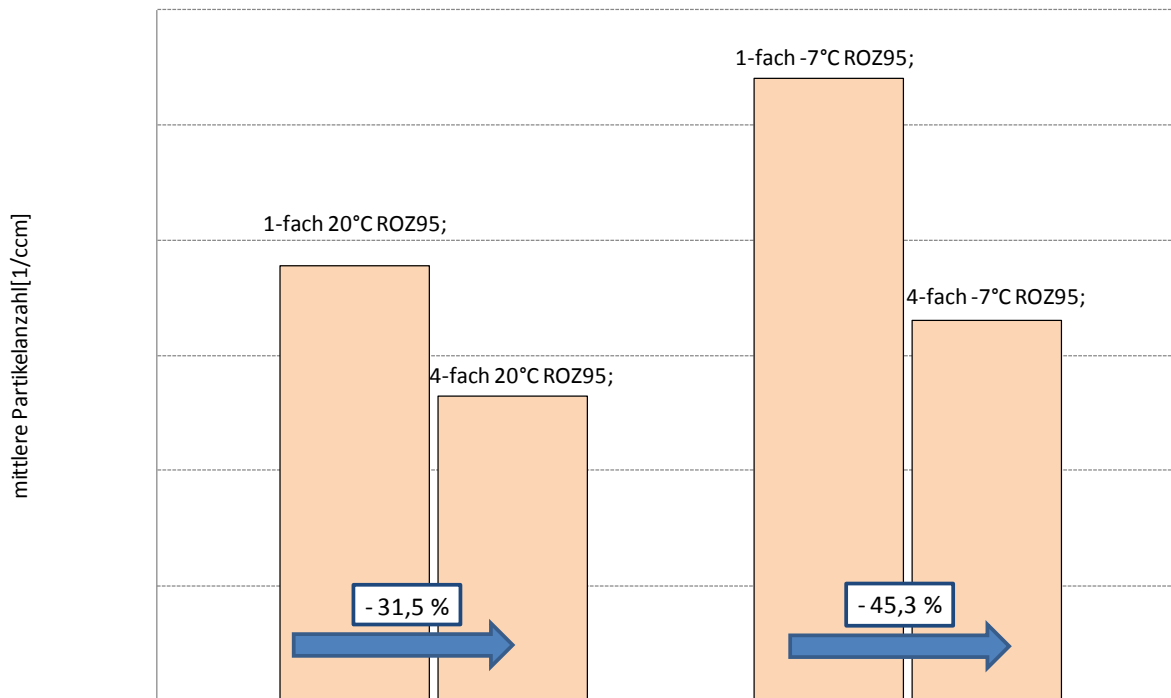


Abbildung 3-4: mittlere Partikelanzahl im Rohabgas im NEFZ für unterschiedliche Einspritzstrategien und Starttemperaturen

3.4 Variation der Parameter in ausgewählten Lastpunkten (diese sollen den Fahrzyklus repräsentieren)

Die Ergebnisse der Parametervariationen dienen als Basis zur Optimierung der Bedienung des Applikationssteuergeräts, um auf diese Weise die Partikelemissionen im NEFZ zu reduzieren. Aus diesem Grund wurden drei für den Fahrzyklus repräsentative stationäre Betriebspunkte als Ansatz für diese Messungen gewählt.

Es wurden dabei folgende Parameter variiert:

- Kühlwassertemperatur
- Zündwinkel
- Einspritzbeginn
- Luftzahl
- Raildruck
- Stellung einlassseitiger Phasensteller

Variation der Kühlwassertemperatur: Eine Anhebung der Kühlmitteltemperatur hat eine Verringerung der Partikelkonzentration zur Folge. Ausschlaggebend hierfür ist die bessere Kraftstoffverdampfung, welche sich positiv auf die Homogenisierung der Zylinderladung auswirkt. Des Weiteren steigt auch die Endgastemperatur geringfügig, wodurch die Nachoxidation begünstigt wird.

Variation des Zündwinkels: Ein späteres Zünden bewirkt zum einen eine deutliche Verbesserung der Nachoxidation wegen der höheren Abgasendtemperaturen. Die Partikelkonzentration nimmt demzufolge ab je später gezündet wird bis der Motor die Laufgrenzen erreicht. Zum anderen verlängert sich die Zeitspanne, die zur Homogenisierung zur Verfügung steht.

Variation des Einspritzbeginns: Die verfrühte Injektion des Kraftstoffes in den Saughub bewirkt einen steigenden Grad der Kolbenbenetzung. Je später der Einspritzbeginn gesetzt wird, desto kürzer ist die Zeitspanne zur Homogenisierung. Beide Phänomene bewirken einen Anstieg der Partikelkonzentration. Resultat ist ein Minimum des Verlaufs der Partikelkonzentration, dessen Lage abhängig vom Betriebspunkt ist.

Variation der Luftzahl: Ein niedriges globales Lambda führt zu Diffusionsverbrennungen und bewirkt eine schlechtere Homogenisierung der Zylinderladung. Des Weiteren hat der unterstöchiometrische Betrieb eine Verringerung der Prozesstemperaturen zur Folge, was sich neben dem herrschenden Sauerstoffmangel negativ auf die Nachoxidation und damit auch negativ auf die Partikelkonzentration im Abgas auswirkt. Das Anheben des Lambdawerts auf über $\lambda=1$ wäre eine durchaus effektive Maßnahme, um die Partikelanzahl im Abgas reduzieren zu können, jedoch würde der Sauerstoffüberschuss bewirken, dass der Drei-Wege-Katalysator nicht mehr in der Lage wäre, die NO_x-Emissionen ausreichend zu konvertieren.

Variation des Raildrucks: Die Anhebung des Raildrucks bewirkt auf Grund der kürzeren Einspritzdauer und der geringeren Tröpfchengrößen eine Reduktion der Partikelkonzentration. Gegen eine zu hohe Anhebung des Raildrucks sprechen der höhere Energieaufwand sowie die steigende Eindringtiefe des Kraftstoffstrahls. Eine zu große Penetration kann zu einer Benetzung der Brennraumwand führen mit negativen Auswirkungen auf die Partikelkonzentration.

3.5 Untersuchung der Partikelanzahlemissionen bei der schrittweisen Anteilerhöhung von Biobenzin (Ethanol)

Die Richtlinie 2009/30/EG des europäischen Parlamentes und des Rates zeigt, dass in Zukunft ein erhöhter biogener Anteil im Kraftstoff forciert wird [3]. Unter diesem Gesichtspunkt wurden umfangreiche Abschätzungen zum Einsatz biogener Kraftstoffsubstitute durchgeführt.

Auswirkung in stationären Betriebspunkten

Die durch die Variation des Ethanolanteils erhaltenen Datenpunkte im Diagramm stellen Relativwerte dar, wodurch man das Partikelkonzentrations-Reduktionspotenzial der jeweiligen Variation im Bezug zum Basiskraftstoff Super 95 erhält.

Alkohole sind Kohlenwasserstoffverbindungen, die im Molekül eine OH-Gruppe (Hydroxylgruppe) anstelle eines Wasserstoffatoms besitzen [4].

Die Folge ist eine bessere Homogenisierung der Zylinderladung, da der Kraftstoff selbst bereits Sauerstoff enthält. Daher ist mit zunehmendem Ethanolgehalt eine Verringerung der Partikelkonzentration zu erwarten.

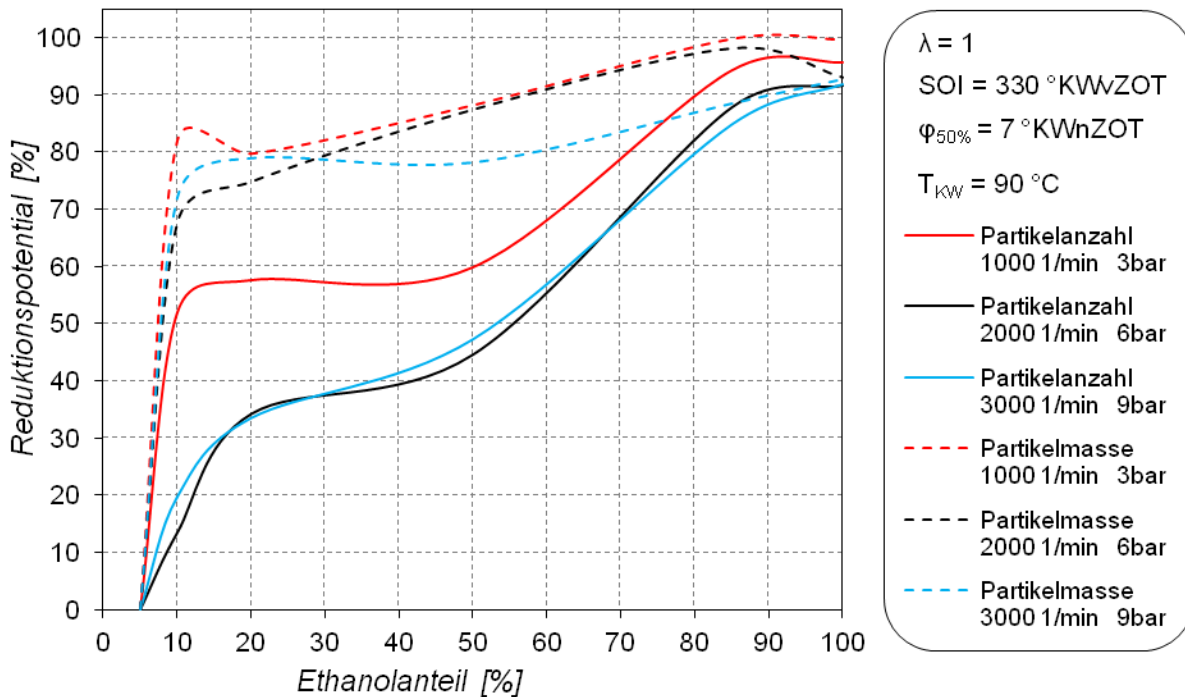


Abbildung 3-5: Partikelreduktionspotenzial von Masse und Anzahl über dem Ethanolanteil im Kraftstoff

Die in Abbildung 3-5 grafisch dargestellten Messergebnisse zeigen, dass das Partikelreduktionspotenzial mit zunehmendem Ethanolanteil steigt. In Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass bei einem Alkoholgehalt von etwa 90% die Partikelkonzentration um bis zu 95% reduziert werden kann. Auffällig sind in diesem Zusammenhang die steilen Anstiege, die auf ein enormes Potenzial bereits bei geringerer Substitution von Ethanol hinweisen.

3.6 Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfilters

In einem ersten Schritt wurde das mögliche Reduktionspotential eines Partikelfilters bezüglich der Partikelanzahl für unterschiedliche stationäre Betriebspunkte ermittelt. Abbildung 3-6 stellt diese Untersuchungen dar.

Es ergibt sich daraus ein vom Betriebspunkt abhängiger Abscheidegrad der Partikelanzahl von etwa 90%

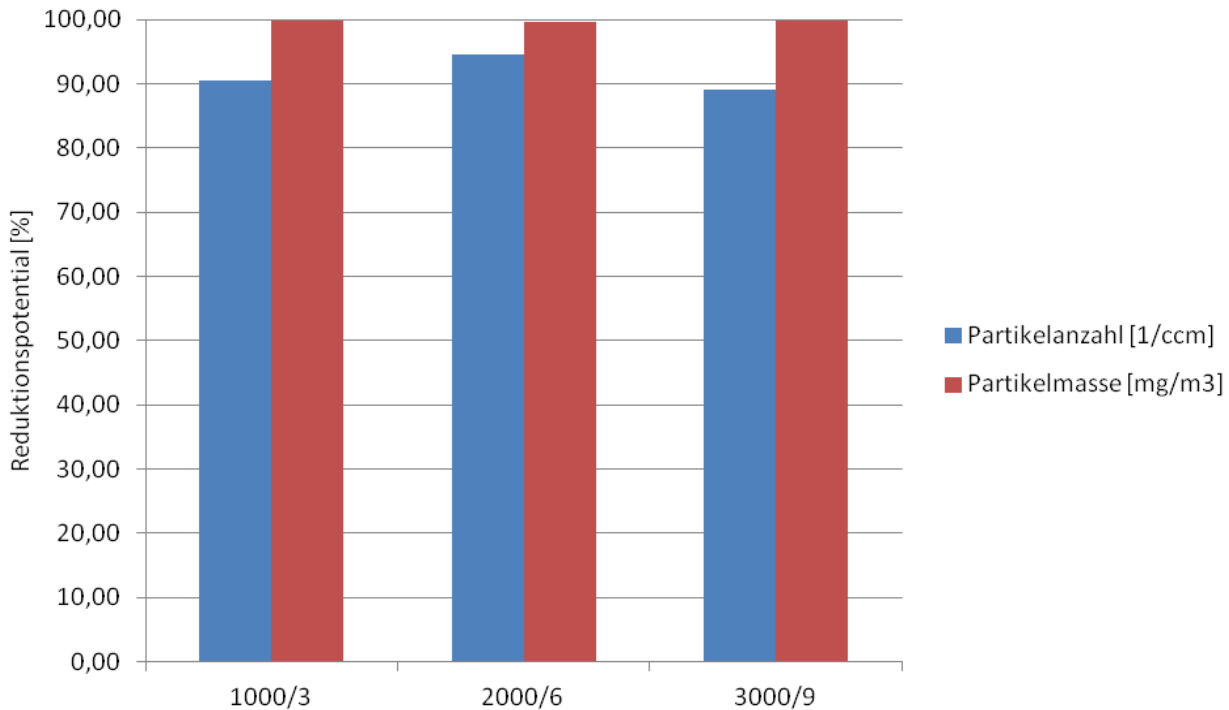


Abbildung 3-6: Reduktion der Partikelanzahl und Partikelmasse durch Einsatz eines Partikelfilters für unterschiedliche stationäre Betriebspunkte

Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf instationäre Betriebsbedingungen zeigt der Vergleich der Partikelanzahl zweier durchfahrener NEFZ mit und ohne Partikelfilter laut Abbildung 3-7. Der kumulierte Abscheidegrad über den Zyklus beträgt hierbei etwa 94%.

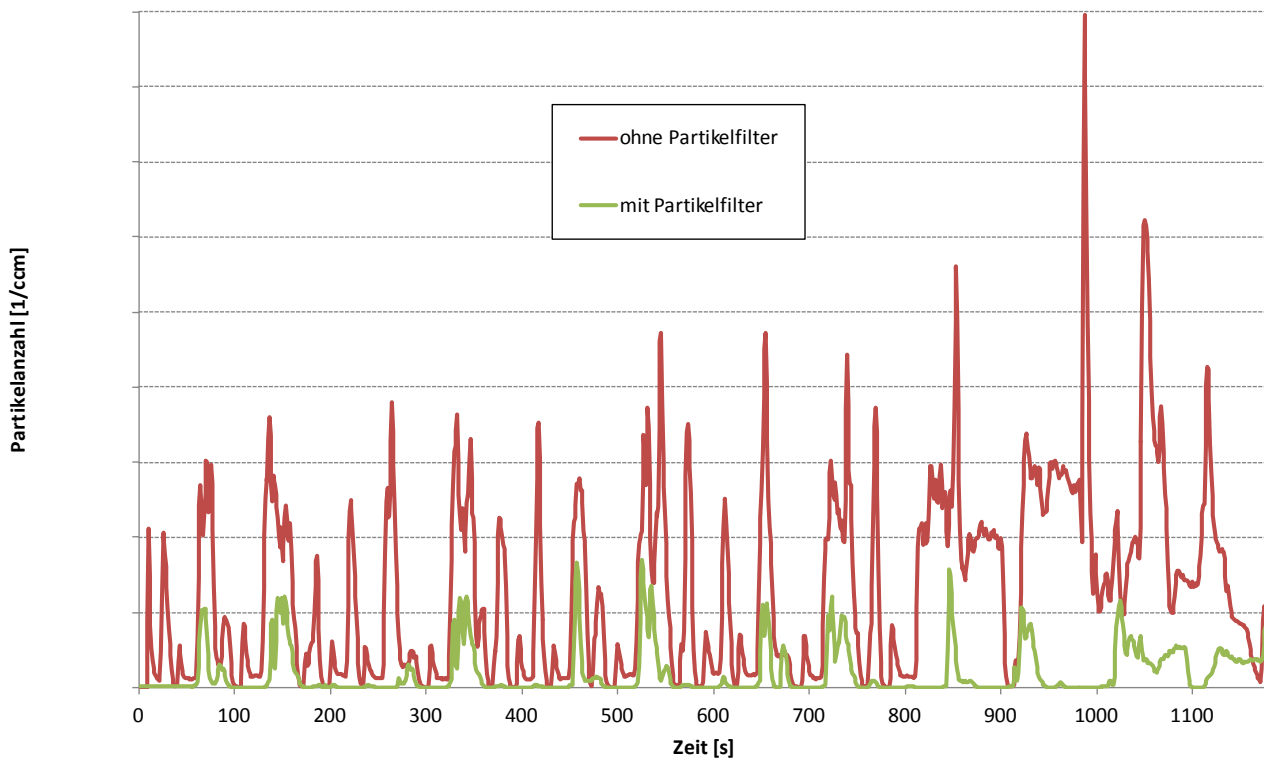


Abbildung 3-7: Vergleich der Partikelanzahl im Rohabgas mit bzw. ohne Partikelfilter

3.7 Hybridisierung

Im Rahmen einer ersten Potentialabschätzung wurde hier die durch Phlegmatisierung erreichbare Reduktion des Partikelausstoßes bewertet.

Ziel hierbei ist es, den erhöhten Partikelausstoß, der vor allem im Bereich niedriger Drehzahlen und hoher Momente auftritt, zu reduzieren. Dabei wird der vom Fahrer gewünschte Momentengradient des Verbrennungsmotors durch einen zugeschalteten Elektromotor abgeflacht. Die aufgewendete elektrische Arbeit muss innerhalb des Fahrzyklus wieder zurückgewonnen werden, wobei der Leistungsverlust durch Generator, Batterie und Umrichter in die Untersuchungen mit einbezogen wird.

Hierzu wurden mehrere Varianten von Hybridisierungsstrategien unterschiedliche Varianten für den NEFZ appliziert, um eine erste Abschätzung zu erreichen.

Dabei werden „kritische Punkte“, also Zeitpunkte bei denen die Partikelanzahl besonders hoch ist, dies sind insbesondere die Bereiche der Beschleunigung aus niedrigen Drehzahlbereichen, aus einer vorhergegangenen Messung ausgewählt und bearbeitet.

Die Vorgangsweise war dabei wie folgt:

Die Steigung des Moments in einem „kritische Punkt“ wird reduziert und die aufgewandte elektrische Arbeit möglichst bald, bei wieder abfallendem Moment laut NEFZ, zurückgewonnen.

In Variante 1 wird die Steigung des Moments in einem kritischen Punkt reduziert und die aufgewandte elektrische Arbeit möglichst bald, bei wieder abfallendem Moment zurückgewonnen.

In Variante 2 wird die Energie erst im letzten Teil des NEFZ, also im Bereich der hohen Drehzahlen wieder Rückgewonnen. Dabei ist darauf zu achten das das Moment, das vom Generator aufgenommen werden muss, nicht zu groß wird.

In diesen ersten relativ trivialen Anpassungen ergibt sich bereits ein Reduktionspotential der Partikelanzahl über den Gesamtzyklus von bis zu 45% unter Annahme einer elektrischen Leistung von maximal 15KW.

Eine weitere Systemvereinfachung stellt eine Limitierung der elektrischen Leistung von 4 KW dar, verbunden mit den Vorteilen einer Gewichtsersparnis sowie einer kleineren Baugröße.

Abbildung 3-8 zeigt die auf Basis dieser Überlegungen gewonnenen Ergebnisse.

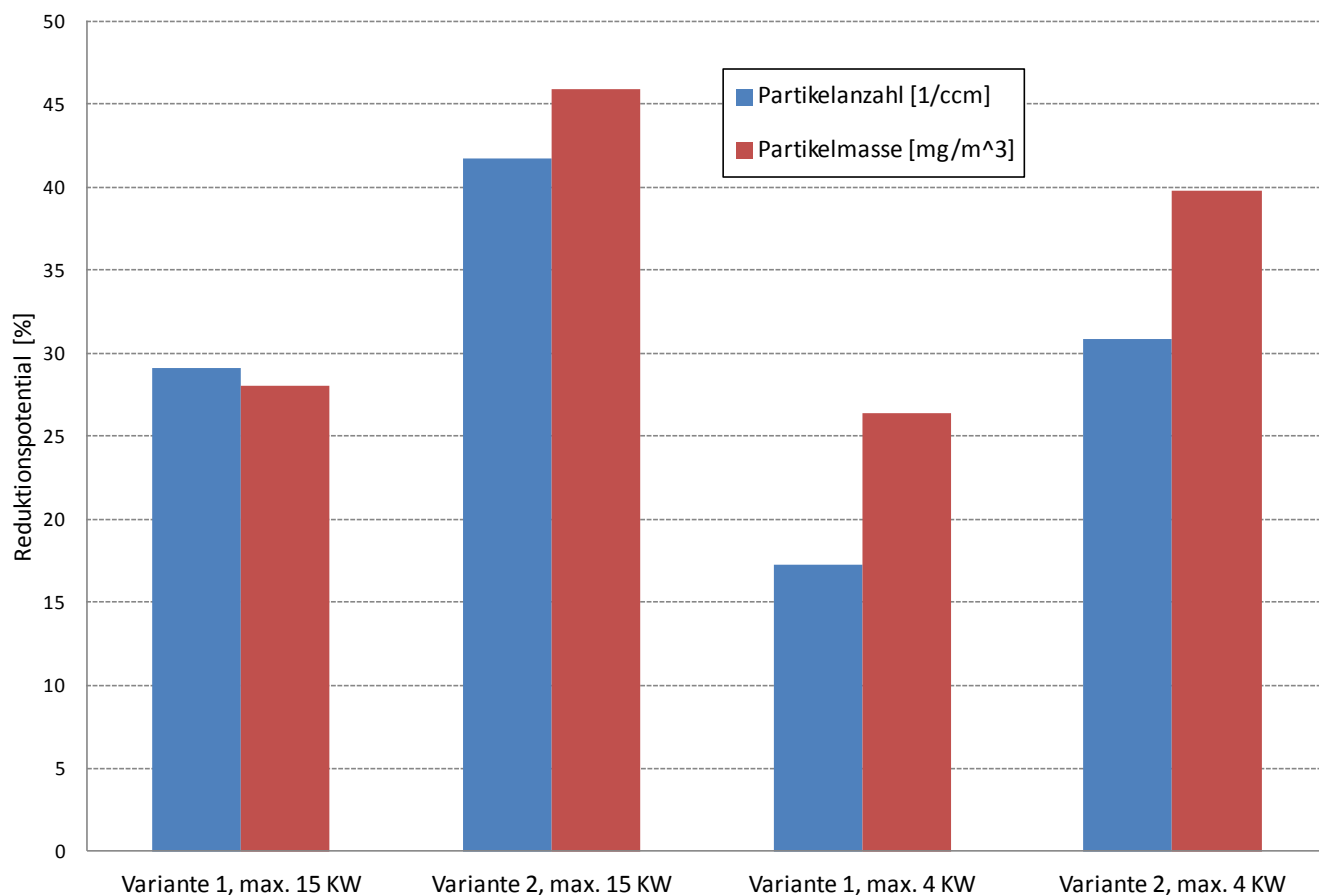


Abbildung 3-8: Reduktion der Partikelemissionen für unterschiedliche Hybridisierungsstrategien im NEFZ

Als sinnvollste Lösung ergibt sich unter Einbeziehung sämtlicher Randbedingungen hierbei Variante 1 mit einer Limitierung der elektrischen Leistung bei 4 KW und einer Reduktion der Partikelanzahl im Rohabgas von etwa 18%.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Kennfeldvermessung mit Basisbedatung des Steuergerätes hinsichtlich Partikelkonzentration hat die folgenden drei kritischen Bereiche gezeigt:

Bereich niedriger Drehzahlen: Die ausschlaggebenden Faktoren für die erhöhte Partikelkonzentration sind das zu geringe Ladungsbewegungsniveau, welches eine negative Auswirkung auf die Homogenisierung der Zylinderladung und eine zunehmende Brenndauer zur Folge hat.

Bereich hoher Drehzahlen: Das Zeitfenster zwischen Einspritzende und Zündzeitpunkt ist hier am kleinsten, weshalb keine ausreichende Homogenisierung des Luft-Kraftstoffgemisches stattfindet und die Brenndauer trotz der turbulenten Ladungsbewegungen im Brennraum steigt.

Bereich der Kraftstoffanreicherung: Im Gebiet hoher Drehzahlen und hoher effektiver Mitteldrücke wird der Motor zum Bauteilschutz unterstöchiometrisch betrieben. Infolge der hohen benötigten Verdampfungsenthalpie sinkt das Temperaturniveau, was sich negativ auf die Nachoxidation auswirkt. Des Weiteren führt die höhere Anzahl an Kondensationskeimen sowie der Sauerstoffmangel im Abgas zu einer erhöhten Partikelkonzentration.

Die Variation der Einflussparameter, welche als Grundlage zur Optimierung des Steuergeräts für den NEFZ dienen sollte, wurde jeweils in drei für den Fahrzyklus repräsentativen stationären Betriebspunkten durchgeführt.

Variation der Kühlwassertemperatur: Eine Anhebung der Kühlmitteltemperatur hat eine Verringerung der Partikelkonzentration zur Folge.

Variation des Zündwinkels: Ein späteres Zünden bewirkt zum einen eine deutliche Verbesserung der Nachoxidation wegen der höheren Abgasendtemperaturen und zum anderen verlängert sich die Zeitspanne, die zur Homogenisierung zur Verfügung steht.

Variation des Einspritzbeginns: Die verfrühte Injektion des Kraftstoffes in den Saughub bewirkt einen steigenden Grad der Kolbenbenetzung. Je später der Einspritzbeginn gesetzt wird, desto kürzer ist die Zeitspanne zur Homogenisierung. Beide Phänomene bewirken einen Anstieg der Partikelkonzentration. Resultat ist ein Minimum des Verlaufs der Partikelkonzentration dessen Lage abhängig vom Betriebspunkt ist.

Variation der Luftzahl: Ein niedriges globales Lambda führt zu Diffusionsverbrennungen und bewirkt eine schlechtere Homogenisierung der Zylinderladung.

Variation des Raildrucks: Die Anhebung des Raildrucks bewirkt auf Grund der kürzeren Einspritzdauer und der geringeren Tröpfchengrößen eine Reduktion der Partikelkonzentration.

Variation des einlassseitigen Phasenstellers: Bei Vorverlegung des Öffnungswinkels der Einlassventile ist eine Minderung der Partikelkonzentration zu beobachten.

Die Versuchsreihen des NEFZ mit Kennfeldoptimierung des Applikationssteuergeräts ergaben ein Reduktionspotenzial der Partikelkonzentration um etwa 60%. Mit diesen Ergebnissen als Ausgangsbasis, ist davon auszugehen, dass die Grenzen der EURO 6 durch weitere Optimierung der Bedatung des Applikationssteuergerätes erreicht werden können.

Anschließend wurde eine Potenzialanalyse hinsichtlich der Substitution biogener Kraftstoffanteile durchgeführt, welche ergab, dass mit steigendem Ethanolanteil, abhängig vom Betriebspunkt die Anzahl der festen Schadstoffteilchen um bis zu 95% reduziert werden kann. Neben den ungünstigen Kaltstarteigenschaften und dem entstehenden Versorgungsproblem der dazu benötigten Alkoholmengen, wären jedoch Modifikationen der mit Kraftstoff in Kontakt tretenden Bauteile notwendig.

Die Untersuchungen haben deutlich gezeigt, dass noch sehr viel Entwicklungspotenzial in direkteinspritzenden aufgeladenen Ottomotoren steckt. Die Parametervariation hat zwar zu einer drastischen Minderung der Partikelkonzentration von etwa einer Zehnerpotenz geführt, jedoch wären voraussichtlich noch weitere Maßnahmen (Variation der Einspritztaktzahl, Variation der Ladelufttemperatur, usw.) notwendig, um die zukünftigen Abgasnormen erfüllen zu können. Den größten Einflussfaktor stellt hierbei der Injektor dar.

Die Möglichkeit der Senkung der Partikelemissionen des Ottomotors mit Direkteinspritzung mit einem Dieselpartikelfilter auf ein Minimum konnte deutlich gezeigt werden. Die Verwendung des Partikelfilters ist jedoch sofern möglich zu vermeiden, da der Einsatz mit erhöhten Kosten und einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs, infolge der Regenerationsphasen, verbunden ist. Das Resultat wäre ein Anstieg der CO₂-Emissionen worin sich der Zielkonflikt zwischen dem in Kraft getreten EU-Emissionsgesetz (Limitierung der CO₂-Emissionen) und der zukünftigen EURO 6 (Limitierung der Partikelkonzentration) spiegelt.

Hybridisierung stellt insbesondere für schwere Fahrzeuge und die damit verbundenen die Partikelbildung begünstigende Randbedingungen - hohe Momentenanforderung bei geringen Drehzahlen - einen wirkungsvollen Ansatz zur Reduktion der Partikelemissionen dar.

5 Ausblick und Empfehlungen

Das gegenständliche Projekt hat eindrucksvoll bewiesen, dass noch sehr viel Entwicklungspotenzial in direkteinspritzenden aufgeladenen Ottomotoren steckt. Die Parametervariation hat zwar zu einer drastischen Minderung der Partikelkonzentration von etwa einer Zehnerpotenz geführt, jedoch wären voraussichtlich noch weitere Maßnahmen (Mehrfacheinspritzung, Variation der Ladelufttemperatur, usw.) notwendig, um die zukünftigen verschärften Abgasnormen erfüllen zu können. Der wesentlichste Einflussfaktor ist der Injektor selbst, da die meisten Parameter auf diesen zurückzuführen sind oder von diesem abhängen.

Besonders im Bereich der die Partikelbildung beeinflussenden Randbedingungen wie Injektorcharakteristik, Langzeitverhalten (Injektorverkokung), Einfluss der Motorölspezifikation bestehen noch zahlreiche vielversprechende Ansätze zur Optimierung des Verbrennungsprozesses des direkteinspritzenden Ottomotors hinsichtlich der Reduktion der Partikelemissionen und schlussendlich erheblicher Forschungsbedarf.

Am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik wird in diesem Zusammenhang ein weiteres Forschungsprojekt mit dem Titel "Effizienzsteigerung direkteinspritzender Ottomotoren durch Einsatz alternativer Kraftstoffe und abgestimmter Motoröle" durchgeführt.

6 Literaturverzeichnis

[1] Amtsblatt der Europäischen Union: VERORDNUNG zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen 443/2009

[2] : Downsizing bei Verbrennungsmotoren Springer-Verlag GmbH 2005 3540238832

[3] : Ottomotor mit Direkteinspritzung, Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial Wiesbaden VIEWEG Verlag 2008

[4] : Beeinflussung der Partikelemission eines Dieselmotors durch das Schmieröl Dissertation Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen TU Aachen 1986