

1 Einleitung

Das aktuelle Stadtbild zeigt den hohen Stellenwert des Automobils in unserer Gesellschaft. Um trotz der Herausforderungen des Klimawandels und der Ressourcenknappheit die individuelle Mobilität aufrecht zu erhalten, sollten neben den modernen Antriebstechnologien noch weitere Einflussfaktoren auf die bestehenden Technologien untersucht werden. Die Verschärfung der Emissionsgesetzgebung ist eine dieser Änderungen, auf die eingegangen werden muss. Eine dieser Verschärfungen der Emissionsgesetzgebung gab es 2014 mit Euro 6, bei der für Neufahrzeuge mit direkteinspritzendem Ottomotor ein Grenzwert für die Partikelanzahl festgelegt wurde.

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Die Motivation zu den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen liegt in der Betrachtung von zwei ausgewählten Kraftstoffkomponenten in verschiedenen prozentualen Anteilen im Kraftstoff auf die Emissionen. Der Einfluss einzelner Kraftstoffkomponenten auf die Abgaskomponenten wurde schon für den Benzinmotor untersucht (Hochhauser, 2009), jedoch größtenteils die Partikelemissionen betreffend (Kim et al., 2013). Neben den Partikelemissionen sind die an diesen angelagerten PAK interessant, da sie eine gesundheitsschädliche Wirkung besitzen (Benbrahim-Tallaa et al., 2012).

Die daraus resultierende Fragestellung ist, ob die partikel-reduzierenden Kraftstoffkomponenten diesen Einfluss auch auf die PAK haben und wie sich dieser Einfluss je nach Kraftstoffkomponente unterscheidet. Neben diesem Ansatz wurden die PAK-Emissionen zusätzlich bezüglich ihrer Verteilung in der Partikulär- und Kondensatphase untersucht, um mögliche Unterschiede in diesen Phasen aufzuzeigen.

Diese Untersuchungen wurden zur ersten Analyse der beiden ausgewählten Kraftstoffkomponenten an einem Pkw-Motor durchgeführt und nachfolgend bei zwei unterschiedlichen Fahrzyklen an einem Pkw-Fahrzeug.

Aus den Analysen der Messungen sollen Aussagen über den Einfluss der ausgewählten Kraftstoffkomponenten auf die Partikel- und PAK-Emissionen getroffen werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Nach dieser Einleitung wird im 2. Kapitel ein Überblick zu den Hintergründen und Grundlagen des direkteinspritzenden Ottomotors, der europäischen Emissionsgesetzgebung sowie den Emissionen des direkteinspritzenden Ottomotors vermittelt. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die PAK und die Partikelemissionen gelegt. In einem kurzen Abschnitt wird dabei auch auf die gesundheitlichen Auswirkungen dieser Stoffe eingegangen. Nachfolgend werden im 3. Kapitel die verwendeten Materialien und Methoden erläutert. Dabei werden die Versuchsträger, Prüfstände, Messtechniken, Kraftstoffe und die angewandte Probenahme und PAK-Aufbereitung beleuchtet. Anschließend folgt im 4. Kapitel die Darstellung und Diskussion der durchgeführten Motorversuche, bei denen die Partikelanzahl- und PAK-Emissionen bei dem jeweils verwendeten Kraftstoff aufgezeigt werden. Im darauffolgenden 5. Kapitel werden die Partikel- und PAK-Emissionen bei den Fahrzeugversuchen und dem jeweiligen Kraftstoff nach Fahrzyklus unterteilt untersucht und diskutiert. Zum Schluss wird eine Zusammenfassung mit Ausblick aufgeführt.

2 Hintergründe und Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird ein Blick auf den direkteinspritzenden Ottomotor, seinem verwendeten Kraftstoff und dessen Eigenschaften geworfen. Nachfolgend kommt ein kurzer Abriss zur europäischen Emissionsgesetzgebung, um ein Verständnis für die rechtlichen Anforderungen zu schaffen. Anschließend wird genauer auf die ottomotorische Verbrennung und die sich bildenden Emissionen mit ihrem Entstehungsvorgang eingegangen.

2.1 Grundlagen zum direkteinspritzenden Ottomotor

Der direkteinspritzende Ottomotor hat in den letzten Jahren an großer Relevanz gewonnen, da er ein „großes Einsparpotenzial bei[m] Kraftstoffverbrauch und [den] Emissionen“ (Dyckmans, 2016) aufweist. Grundlegend wandelt ein Motor die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie in einem Verbrennungsprozess in thermische Energie um, um sie anschließend in einem Wärmeprozess in mechanische Energie zu wandeln.

Beim direkteinspritzenden Ottomotor handelt es sich um ein „Brennverfahren mit innerer Gemischbildung [...] [dessen Kraftstoff] direkt in den Brennraum eingespritzt wird“ (Dyckmans, 2016). Dies kann durch zwei unterschiedliche Betriebsarten, den Homogen- und den Schichtladungsbetrieb, realisiert werden. Beim Homogenbetrieb wird in den Ansaugvorgang, wenn sich die Kolben abwärts bewegen, eingespritzt und so bis zur Zündung ein homogenes Luftverhältnis $\lambda = 1$ ermöglicht. Beim Schichtladungsbetrieb hingegen wird kurz vor der Zündung bei der Aufwärtsbewegung des Kolbens eingespritzt.

In dem für meine Untersuchungen verwendeten Motor wird die homogene Betriebsstrategie mit einer zusätzlichen Aufladung verwendet, welche größtenteils eingesetzt

wird, da „es heute immer noch nicht [gelingt], einen sicheren Schichtladungsbetrieb im Teillastbetrieb darzustellen“ (Basshuysen, 2019).

Zum Zeitpunkt der Zündung soll ein zündfähiges, brennbares Gemisch im Bereich der Zündkerze vorliegen. Dieses Gemisch muss eine „rasche Kraftstoffverdampfung und Homogenisierung“ (Dyckmans, 2016) ermöglichen, welche über den zugeführten Luftmassenstrom, die Einspritzung und den Einspritzzeitpunkt realisiert werden können. Liegt dieses Gemisch vor, kann es zur Entflammung mit einer „instationärer[en] Flammenfortpflanzung in das unverbrannte Gas“ (Basshuysen, 2019) kommen. Diese Fremdzündung wird durch die Gemischzusammensetzung und deren Transporteigenschaften beeinflusst, wobei die Zündwilligkeit und die Diffusion und Wärmeleitung des Gemischs von Bedeutung sind. Diese Eigenschaften hängen vom verwendeten Kraftstoff, der eingespritzt wird, ab, auf den im Folgenden genauer eingegangen wird.

Kraftstoff

Zu den im Automobilbereich am häufigsten zum Antrieb genutzten Kraftstoffen zählen die flüssigen, fossilen Brennstoffe. Diese sind ein „Gemisch [...] aus mehreren hundert verschiedenen Kohlenwasserstoffen unterschiedlicher Gruppen ($C_xH_y[O_z]$)“ (Merker und Schwarz, 2009). Diese Gruppen besitzen „deutlich unterschiedliche [...] Molekülgrößen und -strukturen [und] folglich auch stark unterschiedliche Eigenschaften“ (Merker und Schwarz, 2009).

Je nach dem beeinflussen die verschiedenen Kohlenwasserstoffe „aufgrund ihrer Zusammensetzung und ihres Aufbaus die physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften des Kraftstoffes“ (Eichlseder et al., 2008). Nachfolgend werden auf die Art der Bindung und die Anordnung der wichtigsten Kohlenwasserstoffgruppen eingegangen, sowie die sauerstoffhaltigen Gruppen, die in meiner Arbeit besonders betrachtet werden. Nach diesen Gruppierungen werden die untersuchten Kraftstoffe aufgrund

ihrer jeweils unterschiedlichen Einflüsse auf den Kraftstoff analysiert und beschrieben (siehe Kapitel 3.3.1 Kraftstoffe).

Alkane (früher Paraffine) sind „kettenförmig aufgebaute Moleküle“ (Eichlseder et al., 2008), die entweder unverzweigt geradkettig (n-Alkane) oder verzweigt (Iso-Alkane) sind. Alkane besitzen eine einfache Bindung zwischen den Kohlenstoffen, weswegen sie auch als gesättigte Kohlenwasserstoffverbindungen bezeichnet werden, während Alkene (früher Olefine) eine oder mehrere Doppelbindungen besitzen und zu den ungesättigten Kohlenwasserstoffverbindungen zählen. Bei diesen wird ebenso zwischen unverzweigten (n-Alkene) und verzweigten (Iso-Alkenen) Verbindungen unterschieden. Wenn eine Dreifachbindung zwischen den Kohlenstoffen vorliegt, wird die Verbindung als Alkine bezeichnet, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Die Eigenschaften dieser als aliphatische Kohlenwasserstoffe bezeichneten Gruppe sind von ihren intermolekularen Kräften abhängig, die „mit der Kettenlänge ansteigen [...] [und zu einer] Zunahme der Siedetemperatur, Viskosität etc. mit der Kettenlänge“ (Merker und Schwarz, 2009) führen.

Ringförmig aufgebaute Verbindungen, die mit Einfachbindungen untereinander verbunden sind, werden als Zyklo-Alkane (früher Naphthene) bzw. alizyklische Kohlenwasserstoffe bezeichnet und sind „in ihren Eigenschaften den Alkanen sehr ähnlich“ (Merker und Schwarz, 2009), wobei sie „prinzipiell ungesättigt sind“ (Joos, 2007). Als aromatischer Kohlenwasserstoff wird ein Molekül bezeichnet, das ebenfalls ringförmig aufgebaut ist, jedoch eine „hybride Bindung ohne festen Ort innerhalb der sechs Atome“ (Joos, 2007) aufweist, die entweder als Doppelbindungen oder als eine „delokalisierte Ladungswolke in der Mitte des Moleküls“ (Merker und Schwarz, 2009) vorliegen. Der Grundbaustein dieser aromatischen Kohlenwasserstoffe ist der Benzolring, der „aus 6 Kohlenstoffatomen mit 3 Doppelbindungen besteht“ (Eichlseder et al., 2008). Benzolringe können sich zu polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen

(PAK) kombinieren, auf die in Kapitel 2.3.1 intensiver eingegangen wird (Joos, 2007). Die Aromaten besitzen eine kompakte Molekülstruktur, durch welche sie thermisch sehr stabil sind und eine hohe Zündtemperatur besitzen (Eichlseder et al., 2008). Aufgrund dieser thermisch hohen Beständigkeit sind sie maßgeblich an der Entstehung von Rußpartikeln beteiligt (Eichlseder et al., 2008), (Merker und Schwarz, 2009), welche in Kapitel 2.3.2 beleuchtet wird.

Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe haben eine kettenförmige Verbindung mit einer funktionellen Gruppe. Ethanol zählt dabei mit seiner Hydroxy-Gruppe (-OH) zu den Alkoholen und besitzt eine geringe Zündneigung und eine große Verdampfungswärme (Eichlseder et al., 2008). Die OH-Gruppe des Ethanols sorgt für die polaren Eigenschaften des Moleküls und dafür, dass Ethanol hygroskopisch ist (Dyckmans, 2016). Die verschiedenen Komponenten verleihen dem Kraftstoff seine individuellen Eigenschaften, die sich je nach Zusammensetzung unterscheiden. Die für die Verbrennung wohl wichtigste Eigenschaft ist das Verdampfen des Kraftstoffs. Dieses wird vom Siedeverlauf und dem Dampfdruck charakterisiert. Für meine Untersuchungen ist der Einfluss des zusätzlich beigefügten Ethanols interessant, weswegen der aktuell verwendete Ottokraftstoff, Ethanol und die Mischungen dieser beiden nachfolgend betrachtet werden.

Jede Einzelkomponente des Kraftstoffes besitzt eine eigenen Siedetemperatur, bei der der Kraftstoff von der flüssigen in die gasförmige Phase übergeht, während das Gemisch aufgrund seiner vielen Einzelkomponenten einen Siedeverlauf besitzt (Eichlseder et al., 2008). Die jeweiligen Siedetemperaturen der im Ottokraftstoff relevanten Kohlenstoffmoleküle sind in Abbildung 1 zu sehen, sowie die von relevanten Alkoholen.