

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss biogener Kraftstoffe auf die Partikelemissionen bei der ottomotorischen Verbrennung

Isabel Frenzel¹, Dimosthenis Trimis², Hartmut Krause¹

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg, Deutschland, Tel. +49 3731 393013, isabel.frenzel@iwtt.tu-freiberg.de, www.gwa.tu-freiberg.de

² Karlsruhe Institute of Technology, Engler-Bunte-Institut, Bereich Verbrennungstechnik, Engler-Bunte-Ring 1, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung: Die gesetzlichen Vorgaben zum Partikelaustritt von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor wurden mit der Einführung von Grenzwerten für die Partikelanzahl weiter verschärft. Außerdem nimmt die Bedeutung von Biokraftstoffen immer weiter zu, wobei diese jedoch andere Rußbildungseigenschaften als die klassischen Kraftstoffe aufweisen. Aus diesem Grund ist ein grundlegendes Verständnis für die zugrunde liegenden chemischen Effekte der Rußbildung in Verbrennungsprozessen zwingend erforderlich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird deshalb der Einfluss der biogenen Kraftstoffe Ethanol und Butanol auf den Rußbildungsprozess in einfachen vorgemischten Isooktan-Modellflammen untersucht. Unter Verwendung eines Scanning Mobility Particle Sizers werden in den Flammen Rußpartikelgrößenverteilungen unter wohldefinierten Bedingungen gemessen und miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beimischung von Ethanol und Butanol zur Verminderung der Rußbildung führt. Der Rußbildungsprozess findet verzögert statt, wodurch Partikeldurchmesser und Rußmenge in den untersuchten Flammen abnehmen.

Keywords: biogene Kraftstoffe, Isooktan, Modellflamme, Partikelemissionen, Rußbildung

1 Einleitung

Mit der EURO 6 Norm wurde 2014 erstmals zusätzlich zur Partikelmasse auch die zulässige Rußpartikelanzahl von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor limitiert. In Abbildung 1 ist der Rußpartikelaustritt für verschiedene Motortechnologien und die aktuellen Grenzwerte der EURO 6 Norm für Ottomotoren im Überblick dargestellt. Es wird deutlich, dass die Motoren mit Benzindirekteinspritzung (BDE) teilweise außerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte liegen. Somit besteht weiterhin die Notwendigkeit an der Verbesserung und der Entwicklung neuer Methoden zur Reduktion des Rußausstoßes zu arbeiten. Aus diesem Grund ist es dringend erforderlich die grundlegenden Prozesse der Rußpartikelbildung und die Einflussparameter im Detail zu verstehen. Aus der Abbildung geht außerdem hervor, dass die Partikelemissionen von Dieselmotoren durch die Verwendung von Partikelfiltern so stark minimiert werden können, dass die Grenzwerte der EURO Norm eingehalten werden können. Die starke Bildung von Rußpartikeln bei der dieselmotorischen Verbrennung ist schon lange bekannt, sodass sekundäre Maßnahmen zur

Senkung der Emissionen Stand der Technik sind. Bei Ottomotoren ist dies nicht der Fall und aufgrund der Grenzwerte der EURO 6 Norm findet erst jetzt ein Sinneswandel statt.

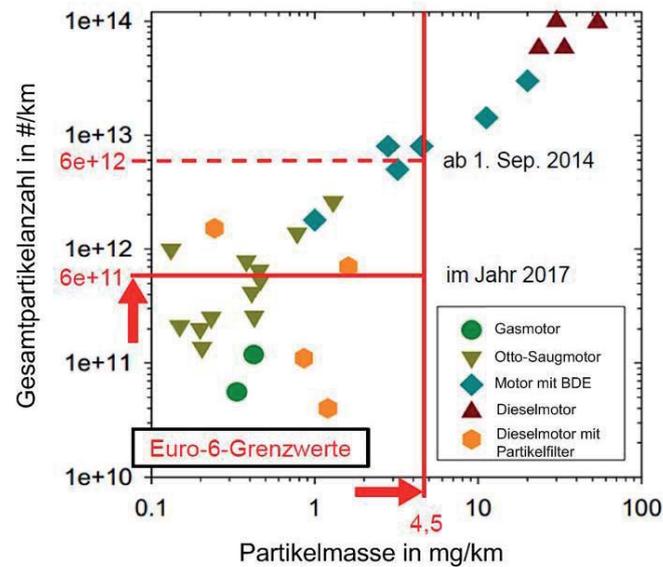


Abbildung 1: Partikelaustritt verschiedener Motortechnologien (angelehnt an [1]) und EURO 6 Abgasnormgrenzwerte für Ottomotoren [2]

Zusätzlich zu den verschärften Grenzwerten für Partikelemissionen für Kraftfahrzeuge werden vermehrt biogene Kraftstoffe eingesetzt um die fossilen Kraftstoffe zu ersetzen und, da sie als CO₂ neutral gelten, die CO₂-Emissionen zu vermindern. Aktuell beträgt der Grenzwert 130 g CO₂/km. Die Europäische Union hat jedoch einen Wert von 95 g CO₂/km als Ausstoßziel für Neuwagen bis 2020 festgelegt [2]. Außerdem sollen bis 2020 mindestens 10% der notwendigen Energie im Transportsektor durch erneuerbare Energieträger abgedeckt werden [3]. Bioethanol wird bereits weltweit zum konventionellen Kraftstoff beigemischt. Über 90% der globalen Produktion von Biokraftstoffen konzentriert sich in den USA, Brasilien und Europa [4]. Die Bioethanolproduktion in Brasilien findet ausschließlich auf Basis von Zuckerrohr statt und gehört zu den wichtigsten Industriezweigen. Brasilien war über Jahrzehnte der größte Bioethanolproduzent der Welt und wurde erst 2006 von den USA, welche vorwiegend Mais als Biomasse nutzen, als Weltmarktführer abgelöst [5]. Die Produktion von Bioethanol in Europa beruht auf Weizen, Gerste, Roggen und Zuckerrüben. In Deutschland werden zum größten Teil Futtergetreide und Industrierüben als Grundstoffe verwendet. Mit der Richtlinie 2003/30/EG vom 8. Mai 2003 wurde in Europa die Grundlage für Bioethanol als „Kraftstoff der Zukunft“ gelegt [6]. Seitdem wird üblichen Kraftstoffen 5% Ethanol beigemischt. Dieser Kraftstoff ist für jedes Auto ohne weitere Umrüstungen zu verwenden und bedarf keiner weiteren Kennzeichnung [7]. Besonders kontrovers wurde in Deutschland der 2010 eingeführte Kraftstoff E10 diskutiert. Global hat vor allem E85 eine enorme Bedeutung erlangt, wobei die Ottomotoren technisch an den Betrieb mit beliebigen Benzin/Ethanol-Mischungen angepasst werden müssen. In Schweden, Brasilien und den USA sind die so genannten Flex-Fuel-Vehicles (FFV) weit verbreitet und alltagstauglich. Auch in Deutschland ist E85 inzwischen an mehreren hundert freien Tankstellen erhältlich und FFVs sind verfügbar [8].

Darüber hinaus erlangen neben Ethanol besonders Biokraftstoffe der zweiten Generation, wie z. B. Butanol, an Bedeutung, da für die Herstellung Biomasse aus Lignocellulose oder

Pflanzenresten eingesetzt werden kann und somit keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie besteht. [9]

Der Stand der Forschung zur Beimischung von biogenen Kraftstoffen, wie Ethanol oder Butanol, zum konventionellen Ottokraftstoff in Bezug auf die Rußpartikelbildung zeigt widersprüchliche Ergebnisse auf. Es existieren sowohl Studien, welche eine Reduktion des Rußausstoßes bei Zumischung von Ethanol nachweisen [10, 11] als auch Studien, in denen eine Erhöhung der Partikelemissionen festgestellt wurde [12, 13]. In [14] wurde detailliert untersucht, welchen Einfluss die biogenen Kraftstoffe Ethanol und Butanol auf die Partikelbildung im Ottomotor haben und wie sich die verschiedenen Betriebsbedingungen des Motors, z. B. beim Kaltstart, darauf auswirken.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es ein grundsätzliches Verständnis für den Einfluss von Ethanol und Butanol auf die Rußpartikelbildung zu entwickeln. In diesem Kontext wurden Flammenstruktur und Rußbildungsprozess bei der Anwendung flüssiger Brennstoffe mit biogenem Anteil in unterschiedlichen volumetrischen Zusammensetzungen in laminaren vorgemischten Modellflammen eines Flachflammenbrenners grundlegend charakterisiert. Der Schwerpunkt lag darin experimentelle Daten ohne den Einfluss von komplexen Wechselwirkungen hervorgerufen durch den motorischen Betrieb zu generieren. Die Ergebnisse leisten somit einen wertvollen Beitrag für das grundlegende Verständnis zur Entkopplung chemischer und physikalischer Effekte bei der motorischen Verbrennung.

2 Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen wurde ein McKenna-Brenner genutzt, mit welchem der Partikelbildungsprozess bei unterstöchiometrischer Verbrennung in eindimensionalen, stationären, atmosphärischen, laminaren, vorgemischten Flammen isoliert betrachtet werden konnte. Es wurde ein Versuchsstand genutzt, in welchem der Flachflammenbrenner gemeinsam mit der entsprechenden Medienbereitstellung, -konditionierung, weiterer notwendiger Peripherie und den Messtechniken mit den entsprechenden Probenahmesystemen integriert war. Abbildung 2 zeigt das Fließbild des Versuchsstandes.

Herzstück war ein kommerziellen McKenna-Brenner der Firma Holthuis & Associates [15], welcher eine poröse, gesinterte, wassergekühlte Bronzeplatte (Durchmesser 60 mm) besitzt. Im Flachflammenbrenner kann durch Nutzung einer inerten Mantelströmung (Stickstoff) der Verbrennungsprozess bei unterstöchiometrischen Bedingungen (Äquivalenzverhältnis $\phi > 1$) isoliert betrachtet werden, da kein zusätzlicher Sauerstoff aus der Umgebung zu einer unerwünschten Oxidation beiträgt. Um die teilweise instabilen unterstöchiometrischen Flammen zu stabilisieren, wurde eine Platte aus Edelstahl 50 mm über der Brennerplatte angebracht. Die Flachflammengeometrie ist für Grundlagenuntersuchungen bestens geeignet, da im zentralen Bereich des Flachflammenbrenners von einer nahezu eindimensionalen Flamme ausgegangen werden kann.

Die experimentellen Studien umfassten neben der Messung von Flammentemperaturen mittels Thermoelement die Untersuchung des Rußes mittels Scanning Mobility Particle Sizers (SMPS). Rußpartikelgrößenverteilungen wurden in verschiedenen Höhen der Modellflammen (engl. height above the burner HAB) in-situ gemessen. Zu diesem Zweck

wurde der Brenner auf einem Traversensystem installiert, wodurch eine vertikale und horizontale Verschiebung des Brenners möglich war.

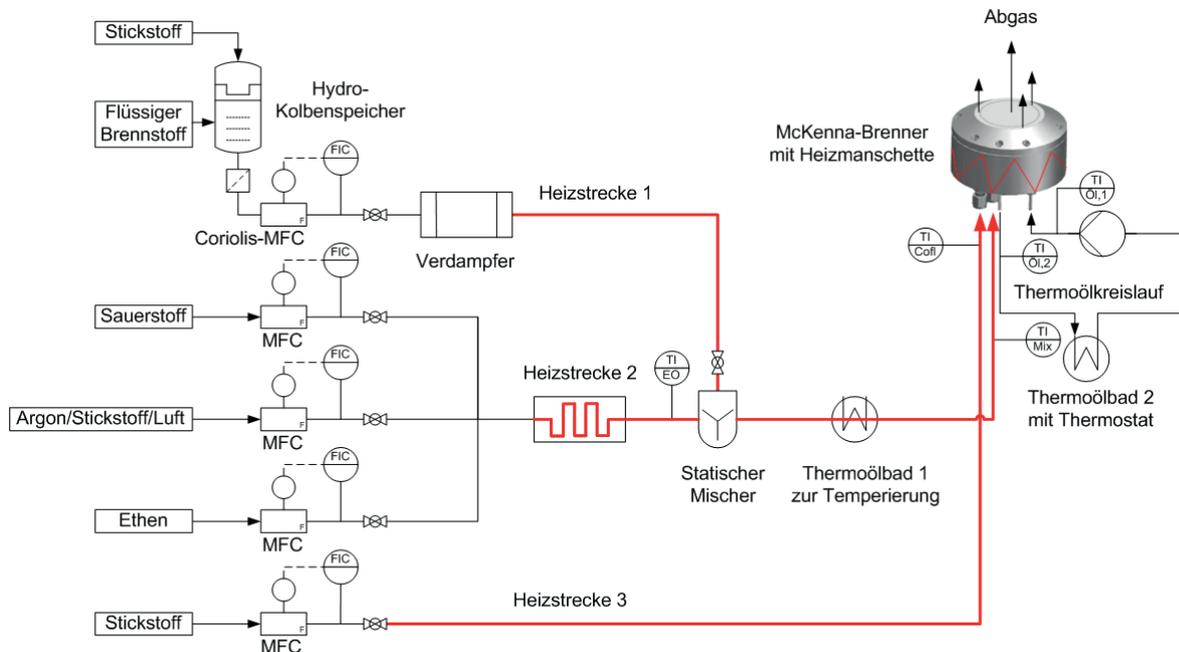


Abbildung 2: Fließbild des Versuchsstandes für den Betrieb mit gasförmigen und flüssigen Brennstoffen

In den Versuchsstand wurden thermische Masedurchflussregler zur Dosierung der Gase und für die flüssigen Brennstoffe Coriolis-Masedurchflussregler integriert. Die flüssigen Brennstoffe wurden in einem Direktverdampfer vollständig verdampft. Um die Kondensation des Brennstoffdampfes vor der Mischung mit dem Oxidator zu vermeiden, wurde die Transportstrecke mittels eines Heizschlauches auf 423 K beheizt. Der dampfförmige Brennstoff wurde in einem speziell entworfenen, beheizten, statischen Mischer mit dem vorgewärmten Oxidatorstrom (483 K) gemischt. Anschließend wurde das Brennstoff/Oxidator-Gemisch durch das Passieren eines Thermostats auf die gewünschte Vorwärmtemperatur gebracht und danach direkt dem Flachflammenbrenner zugeführt. Um die Kondensation des Brennstoffes im Brenner zu verhindern, wurde dieser einerseits von außen durch eine Heizmanschette beheizt und andererseits wurde die inerte Mantelströmung ebenfalls vor dem Eintritt in den Brenner über eine beheizte Rohrleitung auf 353 K vorgewärmt.

Zur Messung der Rußpartikelgrößenverteilungen in den Modellflammen wurde ein kommerzielles SMPS-System (TSI Modell 3936) verwendet. Es besteht aus einem Elektrostatischen Klassifizierer mit Differentiellem Mobilitätsanalysator und einem Kondensationspartikelzähler. Es vermisst Aerosole mit Partikelanzahlkonzentrationen von bis zu 10^7 \#/cm^3 und besitzt einen definierten Messbereich für den Partikeldurchmesser von 2 nm bis 66 nm. Der kleinste verlässlich detektierbare Partikeldurchmesser mit einer Zähleffizienz größer 50% beträgt allerdings 4 nm. Die Partikelgrößenverteilungen werden mit einer Auflösungsgenauigkeit von bis zu 64 Kanälen über eine spezielle Software ausgegeben.

Aus dem vom SMPS ausgegebenen Mobilitätsdurchmesser kann der reale (physikalische) Durchmesser auf Basis der Nanopartikel-Transport-Theorie von Li et al. [16, 17] ermittelt werden.

Für die Messung von Rußpartikelgrößenverteilungen mittels SMPS ist eine Entnahme der rußbeladenen Gasprobe aus der Flamme notwendig. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Probenahmesonde die Flammenstruktur möglichst wenig beeinflusst und unerwünschte Prozesse, wie Partikelkoagulation, Thermophorese, Partikeldiffusion an Rohrwänden etc., verhindert bzw. minimiert werden, um die Partikelverluste im Entnahme- und Transportsystem zu verringern und somit repräsentative Messungen durchführen zu können. Dafür ist eine unmittelbare, schnelle und sehr starke Verdünnung des rußbeladenen Probengases mit einem inerten Gas, üblicherweise Stickstoff bei Raumtemperatur, mit einem Verdünnungsverhältnis $> 10^4$ notwendig [18, 19, 20]. Durch die starke und schnelle Abkühlung des heißen Gases werden einerseits die chemischen Reaktionen gequench und durch die starke Verdünnung Partikelverluste minimiert. Andererseits werden somit Partikelkonzentrationen $< 10^7 \text{ \#/cm}^3$ im verdünnten Probengas erreicht, was der maximal detektierbaren Partikelkonzentration des verwendeten Messgerätes entspricht. Das realisierte System ist in Abbildung 3 in einem Fließbild schematisch dargestellt.

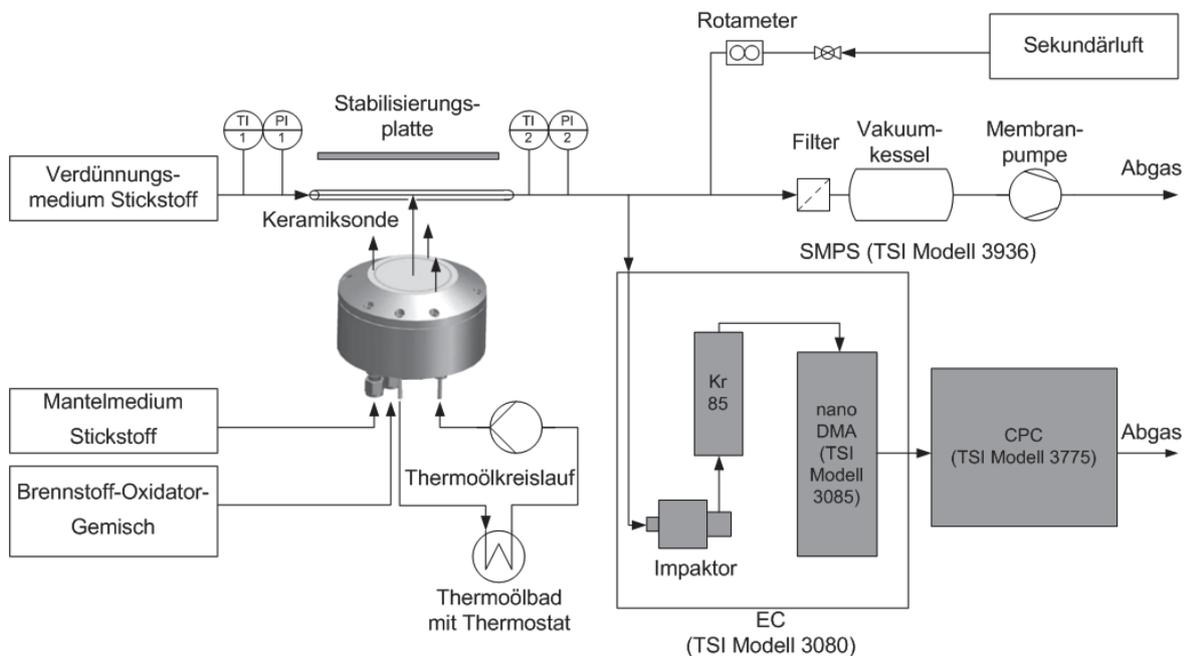


Abbildung 3: Fließbild des verwendeten Probenahme- und Aufbereitungssystems für die Rußmessung (weitestgehend basierend auf [18])

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde ein Verdünnungsverhältnis von ca. $2 \cdot 10^4$ mit einem Fehler von weniger als $\pm 27\%$ genutzt, wodurch Partikelkoagulation im Probengas verhindert werden konnte.

Ziel der Untersuchungen in dieser Arbeit war es, Aussagen bezüglich der Rußbildung bei der Verbrennung biogener flüssiger Brennstoffe wie Ethanol und Butanol bzw. deren Einfluss als Beimischkomponente bei der Verbrennung herkömmlicher Brennstoffe wie Benzin zu erhalten. Da die Zusammensetzung von Benzin lokalen und zeitlichen Schwankungen unterlegen ist, wird oftmals auf den Primärbestandteil Isooktan zurückgegriffen, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Am Beispiel von E20 bedeutet das, dass es sich um eine Mischung aus 20-Vol. % flüssigem Ethanol und 80 Vol.-% flüssigem Isooktan handelt. Das entspricht einer Zusammensetzung von 41,7 Mol-% (22,4 Ma.-%) Ethanol zu 58,3 Mol-% (77,6 Ma.-%) Isooktan unter Standardbedingungen.

Die ersten Untersuchungen zur Rußbildung bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen wurden in reinen Isooktan-, Ethanol- und n-Butanol-Flammen durchgeführt. Anschließend wurden Gemische aus Isooktan und Ethanol, bzw. Isooktan und n-Butanol ausgewählt. Da vor allem das Isomer n-Butanol, welches eine unverzweigte Struktur aufweist, aktuell für den Einsatz in der motorischen Verbrennung besonders interessant ist, wurde es für die Experimente ausgewählt. Bei den Untersuchungen wurden jeweils das Brennstoff/Oxidatorverhältnis ($\phi = 2,3$), die Kaltgasgeschwindigkeit ($v_0 = 5 \text{ cm/s}$ bei 1 bar und 273 K, bezogen auf einen leeren Zylinder mit dem gleichen Durchmesser), die Oxidatorzusammensetzung (29 Vol.-% O_2 und 71 Vol.-% Ar) und die Vorwärmtemperatur des Brennstoff/Oxidator-Gemisches ($T_{\text{Vorwärm}} = 353 \text{ K}$) konstant gehalten. Nur die Zusammensetzung des Brennstoffgemisches wurde geändert. Die Eigenschaften der untersuchten Isooktan/Ethanol-Flammen und Isooktan/n-Butanol-Flammen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Da zusätzlich zu den experimentellen auch numerische Untersuchungen gemacht wurden, welche allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit sind, wurde als Inertgaskomponente im Oxidator Argon statt Stickstoff verwendet um die komplette Stickoxid-Chemie im Reaktionsmechanismus nicht berücksichtigen zu müssen.

Tabelle 1: Flammenbedingungen

Brennstoff	ϕ	Anteil im unverbrannten Gasgemisch x_i				
		C_8H_{18}	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	O_2	Ar
Referenzflamme						
E0/B0	2,3	0,0507	-	-	0,2753	0,6740
Isooktan/Ethanol-Flammen						
E20	2,3	0,0422	0,0303	-	0,2690	0,6585
E40	2,3	0,0331	0,0632	-	0,2621	0,6417
E65	2,3	0,0204	0,1086	-	0,2526	0,6184
E85	2,3	0,0092	0,1490	-	0,2441	0,5977
E100	2,3	-	0,1819	-	0,2373	0,5808
Isooktan/n-Butanol-Flammen						
B20	2,3	0,0414	-	0,0182	0,2727	0,6677
B40	2,3	0,0318	-	0,0373	0,2700	0,6610
B100	2,3	-	-	0,1000	0,2610	0,6390

3 Ergebnisse und Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Rußbildung in den vorgemischten, unterstöchiometrischen Isooktan/Ethanol- und Isooktan/n-Butanol-Flammen dargestellt. Dabei wird zuerst auf den Einfluss der Ethanol-Beimischung eingegangen und anschließend werden die Ergebnisse für die Isooktan/Ethanol- und die Isooktan/n-Butanol-Flammen zusammenfassend verglichen.

3.1 Einfluss der Ethanolbeimischung

In Abbildung 4 sind Fotos von den untersuchten Isooktan/Ethanol-Flammen bei konstantem Äquivalenzverhältnis zu sehen. Schon allein anhand der Intensität des Rußleuchtens kann geschlussfolgert werden, dass die Beimischung von Ethanol zum Referenzbrennstoff Isooktan zur Verminderung der Rußbildung führt.

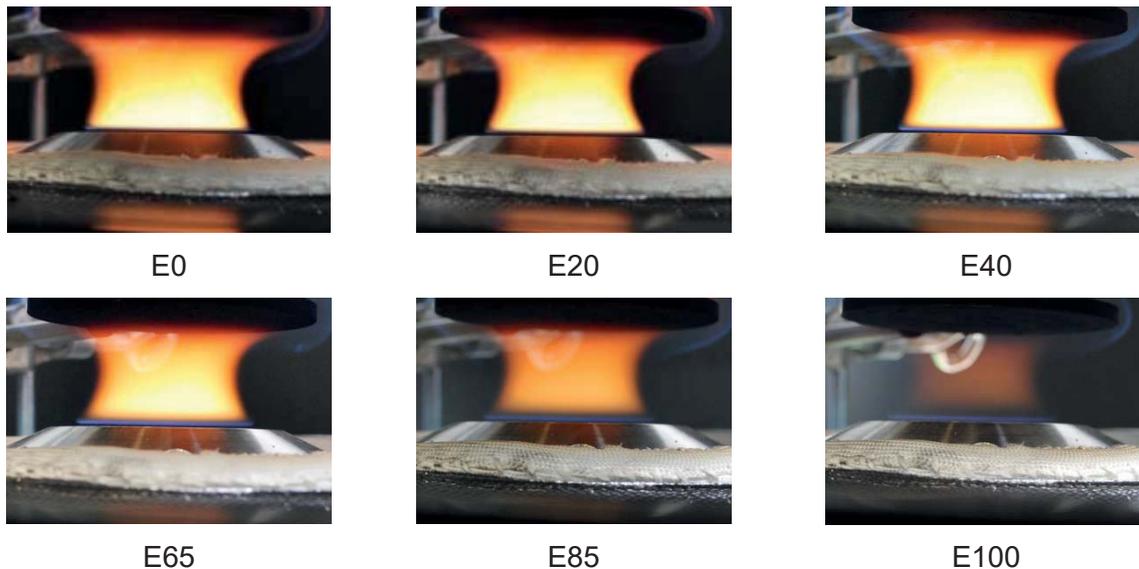


Abbildung 4: Fotos von Isooktan/Ethanol-Flammen bei konstantem Äquivalenzverhältnis $\phi = 2,3$ für verschiedene Ethanolbeimischungen

In Abbildung 5 sind die Partikelgrößenverteilungen des Rußes, welcher aus den untersuchten Isooktan/Ethanol-Flammen in drei verschiedenen Flammenhöhen $HAB = 6 / 8 / 12$ mm über der Brennerplatte entnommen wurde, dargestellt.

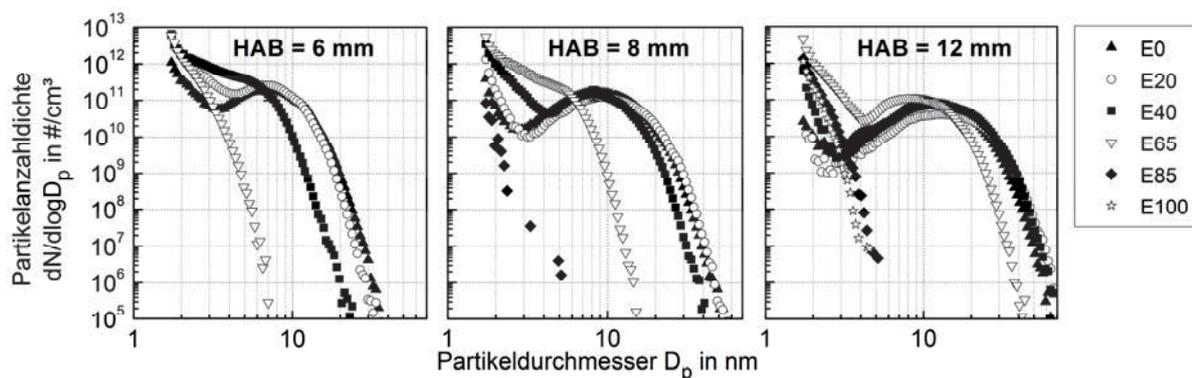


Abbildung 5: Rußpartikelgrößenverteilungen in Isooktan/Ethanol-Flammen mit $\phi = 2,3$

Es wird deutlich, dass die Rußpartikelgrößenverteilungen mit zunehmendem Ethanolanteil im Brennstoff hin zu kleineren Partikeldurchmessern verschoben werden und bei einer ausreichend hohen Beimischung von Ethanol aus bimodalen unimodale Verteilungen werden. Die Ethanolbeimischung führt zur Verlangsamung des Rußbildungsprozesses und höhere Verweilzeiten sind für die Partikelnukleation notwendig. Bei der Flammenhöhe $HAB = 12$ mm sind die Verteilungen für E0, E20 und E40 sehr ähnlich, es kann also kein eindeutiger Einfluss von geringen Ethanolbeimischungen auf die Rußbildung beobachtet werden. Der mittlere Partikeldurchmesser des Koagulationsmodus ist für E0 und E40 mit einem Wert von 11,5 nm gleich, für E20 ergibt sich sogar ein größerer mittlerer Partikeldurchmesser von 12,7 nm. Bei einer Beimischung von 65 Vol.-% Ethanol sinkt der mittlere Partikeldurchmesser des zweiten Modus der bimodalen Verteilung auf 8,6 nm.

3.2 Vergleich der Ethanol- und der Butanol-Beimischung

In Abbildung 6 sind die Partikelgrößenverteilungen des Rußes, welcher aus den untersuchten Isooktan/Ethanol-Flammen (linkes Diagramm) und den Isooktan/n-Butanol-Flammen (rechtes Diagramm) in einer Höhe von 8 mm über der Brennerplatte entnommen wurde, vergleichend dargestellt. In einer Flammenhöhe von 8 mm konnten in der reinen Ethanol-Flamme (E100) noch keine Rußpartikel reproduzierbar gemessen werden, sodass dafür im Diagramm keine Verteilung abgebildet ist. Wie bereits für die Ethanol-Beimischung beschrieben, verschieben sich auch bei der n-Butanol-Beimischung die Rußpartikelgrößenverteilungen hin zu kleinen Partikeldurchmessern je mehr n-Butanol zugegeben wird. Die Verteilungen für nB0 bis nB40 weisen den typischen bimodalen Charakter auf, wohingegen in der reinen n-Butanol-Flamme nur Partikel mit einem Durchmesser bis ca. 4 nm detektierbar sind (unimodale Verteilung). Signifikant ist, dass der erste Teil der Partikelgrößenverteilungen bis zu einem Partikeldurchmesser von ca. 7 nm für alle untersuchten Isooktan/n-Butanol-Flammen sehr ähnlich ist. Bei den Flammen mit Ethanol im Brennstoffgemisch sind hingegen deutliche Unterschiede beispielsweise im Verlauf der Verteilungen für E20 und E40 in diesem Bereich erkennbar.

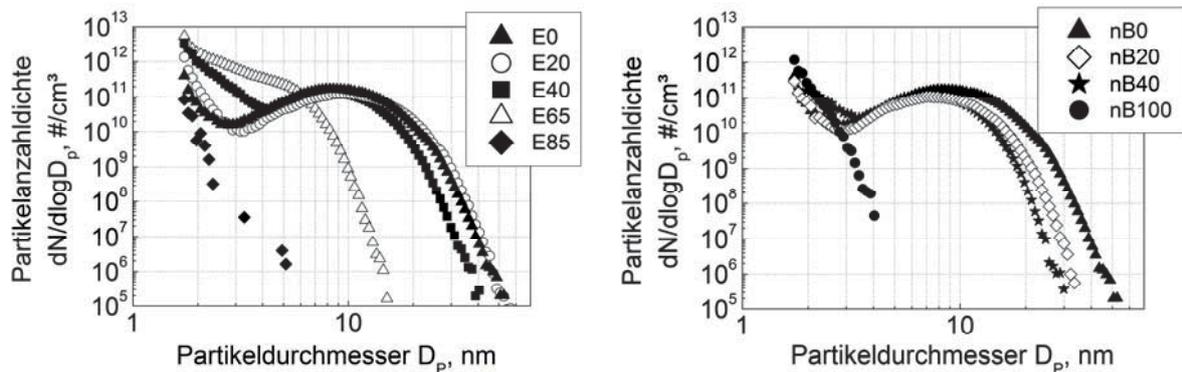


Abbildung 6: Rußpartikelgrößenverteilungen in Isooktan/Ethanol-Flammen (links) und Isooktan/n-Butanol-Flammen (rechts) in einer Flammenhöhe von 8 mm

Um die Unterschiede des Einflusses von Ethanol und n-Butanol auf die Rußpartikelbildung in der Isooktan-Referenzflamme noch näher zu analysieren, werden im Folgenden die Rußvolumenbrüche in den Flammen in den vier verschiedenen Flammenhöhen $HAB = 5 \text{ mm} / 6 \text{ mm} / 8 \text{ mm} / 10 \text{ mm}$ zusammenfassend dargestellt (siehe Abbildung 7). Die Rußvolumenbrüche werden aus den gemessenen Rußpartikelgrößenverteilungen berechnet. Die Werte für die reine Isooktan-Flamme (Referenzflamme) sind in den Diagrammen blau markiert.

Es ist zu erkennen, dass eine Minimierung des gebildeten Rußes auftritt, wenn ein Alkanol zum Brennstoff Isooktan hinzugefügt wird. Dabei ist die Reduktion stärker ausgeprägt je mehr Ethanol bzw. n-Butanol im Brennstoff enthalten ist. Der Trend für die Isooktan/Ethanol-Flammen zeigt, dass sich der Rußvolumenbruch bis zum E40 nur in den geringen Flammenhöhen verringert. Für eine Flammenhöhe von $HAB = 10 \text{ mm}$ liegen die Unterschiede in den gemessenen Rußvolumenbrüchen für E0, E20 und E40 innerhalb des Bereichs der Messgenauigkeiten. Für die Brennstoffe E65, E85 und E100 ist die Reduktion im Vergleich zur reinen Isooktan-Flamme allerdings für alle Flammenhöhen signifikant. Es ist bekannt, dass die finale Rußmenge in stark rußenden Flammen, wie der untersuchten Isooktan-Flamme, vor allem durch Oberflächenreaktionen an bereits gebildeten Partikeln

bestimmt wird. Die Ethanolbeimischung wirkt sich allerdings vor allem auf die Partikelneubildung aus. Somit ist der Effekt der Rußreduktion in stark rußenden Flammen mit geringen Ethanolanteilen im Brennstoff weniger effektiv. In schwach rußenden Flammen wie der E85-Flamme hingegen ist dieser Effekt stärker ausgeprägt, weil der Prozess der Partikelneubildung die finale Rußmenge kontrolliert.

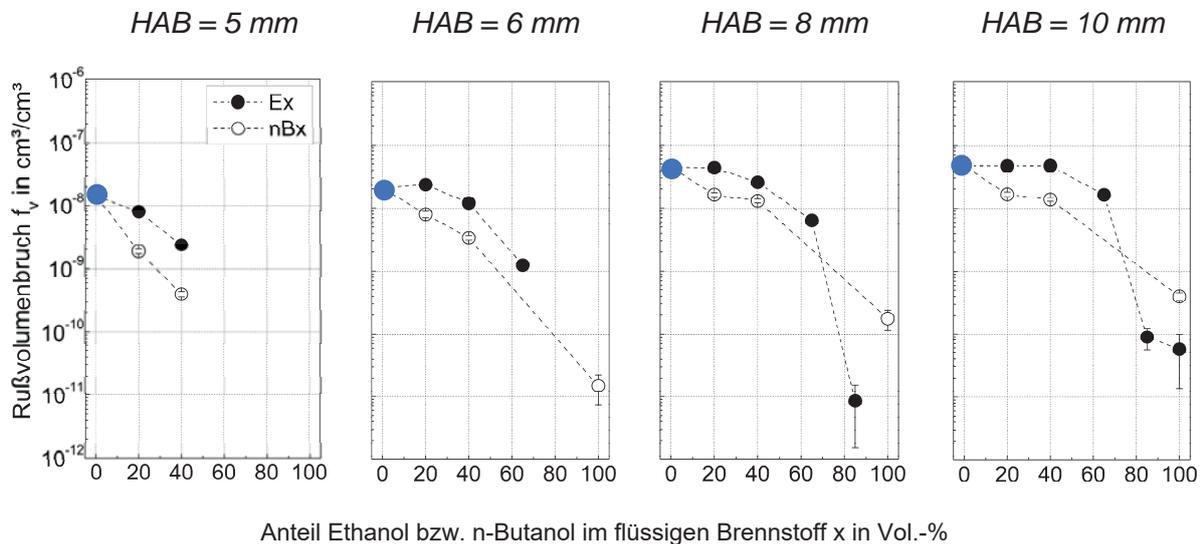


Abbildung 7: Vergleich der Rußvolumenbrüche in Isooktan/Ethanol- und Isooktan/n-Butanol-Flammen mit $\phi = 2,3$ in Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil der beigemischten Komponente im flüssigen Brennstoff (blau markiert: Isooktan-Referenzflamme)

Bei der Beimischung von n-Butanol zur Referenzflamme hingegen findet die Senkung des Rußvolumenbruchs auch für geringe Anteile des Alkanols im flüssigen Brennstoff für alle Flammenhöhen statt. Der Vergleich des Einflusses von Ethanol und n-Butanol auf die Rußbildung in der Isooktan-Flamme zeigt, dass dieser für geringe Anteile der beigemischten Komponente (E20, E40 und E65) schwächer für die Isooktan/Ethanol-Flammen ausgebildet ist. Für die höheren Anteile (E85) und die reine Ethanol-Flamme (E100) kann beobachtet werden, dass die Senkung des Rußvolumenbruchs in den Flammen mit Ethanol stärker ist als in denen mit Butanol-Beimischung. Für eine Flammenhöhe von 10 mm beträgt der gemessene Rußvolumenbruch in der reinen Ethanol-Flamme nur noch 0,12% und in der reinen n-Butanol-Flamme 0,85% des Wertes der reinen Isooktan-Flamme.

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass die Reduktion der Rußbildung desto signifikanter ausgeprägt ist je größer der Anteil an Biokraftstoff im Brennstoffgemisch ist. Es werden keine, bzw. viel weniger große Partikel gebildet, die Anzahl der sehr kleinen Partikel bleibt aber nahezu unverändert. Die oxygenierten Brennstoffe Ethanol und Butanol haben somit zwar einen positiven Einfluss auf die Rußmenge, allerdings haben die sehr kleinen Rußpartikel im Vergleich zu den großen einen stärkeren Einfluss auf die menschliche Gesundheit. Daraus folgt, dass die Beimischung hoher Anteile der biogenen Kraftstoffe zum konventionellen Ottokraftstoff zu neuen Herausforderungen speziell in Bezug auf die Rußbildung während des Verbrennungsprozesses führen könnte.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), vertreten durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), für die Finanzierung dieser Arbeit im Rahmen des Projektes: „Bildung von Rußpartikeln und katalytische Filterregeneration bei der motorischen Nutzung von Ottokraftstoffen aus Biomasse“ (Nachwuchsgruppe „BiOtto“, FKZ: 22040811).

6 Referenzen

- [1] M.M. Maricq: How are emissions of nuclei mode particles affected by new PM control technologies and fuels?, Ford Motor Company, Health Effects Institute Annual Conference (2009).
- [2] Europäische Kommission: Verordnung (EG) Nr. 459/2012 (2012).
- [3] European Commission: Directive 2009/28/EC (2009).
- [4] W. Coyle: The Future of Biofuels: A Global Perspective, Feature, Amber Waves (2007).
- [5] Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V.: Bioethanol – mehr als ein Biokraftstoff (2014).
- [6] Europäische Union: Richtlinie 2003/30/EG (2003).
- [7] S. Brysch: Biogene Kraftstoffe in Deutschland – Biodiesel, Bioethanol, Pflanzenöl und Biomass-to-Liquid im Vergleich, Hamburg: Diplomica Verlag (2008).
- [8] N. Schmitz, J. Henke, G. Klepper: Biokraftstoffe: Eine vergleichende Analyse, Gülzow (2009).
- [9] A. Demirbas: Applied Energy 86 (2009), S. S108-S117.
- [10] J. Lee, R. Patel, A. Schonborn, N. Ladommatos: Energy Fuel 23 (2009), S. 4363-4369.
- [11] J.M.E. Storey, T.L. Barone, J.F. Thomas, S.P. Huff: SAE Technical Paper 2012-01-0437 (2012).
- [12] L. Chen, R. Stone: Energy Fuel 25 (2011), S. 1254-1259.
- [13] R. Daniel, H. Xu, C. Wang, D. Richardson, S. Shuai: Applied Energy 105 (2013), S. 252-261.
- [14] M. Storch: Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik, Herausgeber: M. Wensing, S. Will, Shaker Verlag, Aachen, Band 1/2017.
- [15] The McKenna Flat Flame Burner, Holthuis & Associates, P.O. Box 1531, Sebastopol, CA 95473.
- [16] Z. Li, H. Wang: Physical Review E 68 (2003), 061206.
- [17] Z. Li, H. Wang: Physical Review Letters 95 (2005), 014502.
- [18] B. Zhao, Z. Yang, J. Wang, M.V. Johnston, H. Wang: Aerosol Science Technology 37 (2003) S. 611-620.
- [19] B. Öktem, M.P. Tolocka, B. Zhao, H. Wang, M.V. Johnston: Combustion and Flame 142 (2005), S. 364-373.
- [20] M. Maricq, S.J. Harris, J.J. Sente: Combustion and Flame 132 (2003), S. 328 – 342.
- [21] M. Salamanca, M. Sirignano, A. d’Anna: Energy Fuels 26 (2012), S. 6144–6152.