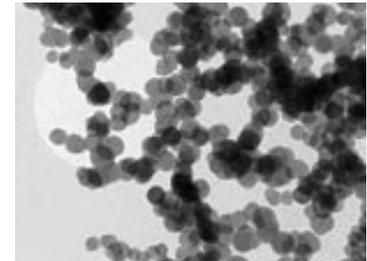


Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss biogener Kraftstoffe auf die Partikelemissionen bei der ottomotorischen Verbrennung



[www.spiegel.de, 2013]

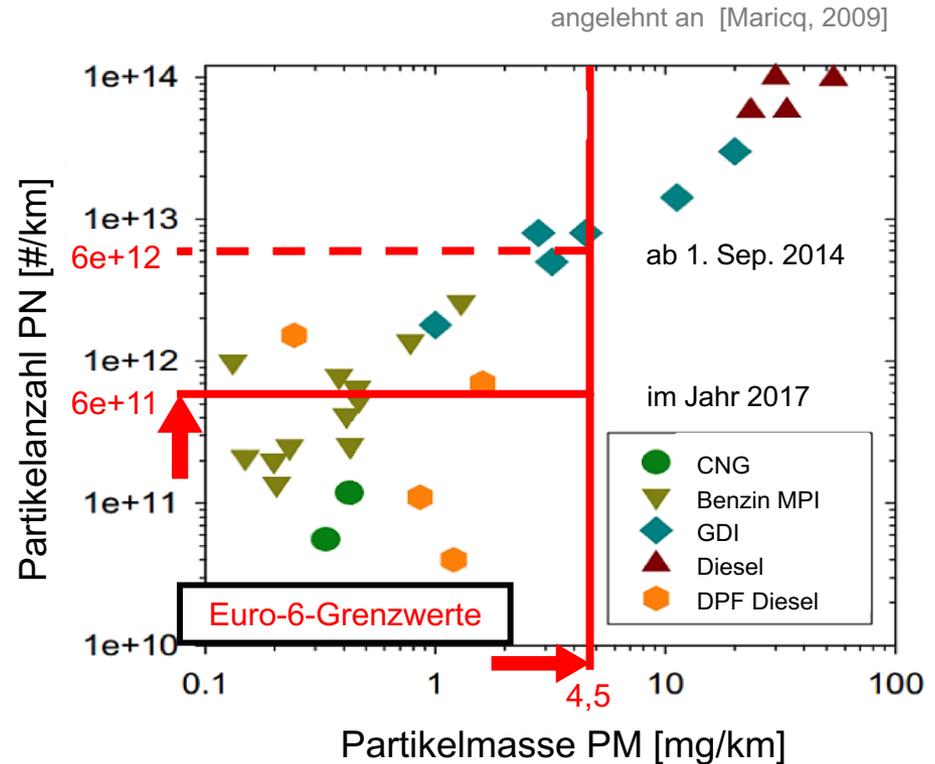


[www.iws.fraunhofer.de, 2015]

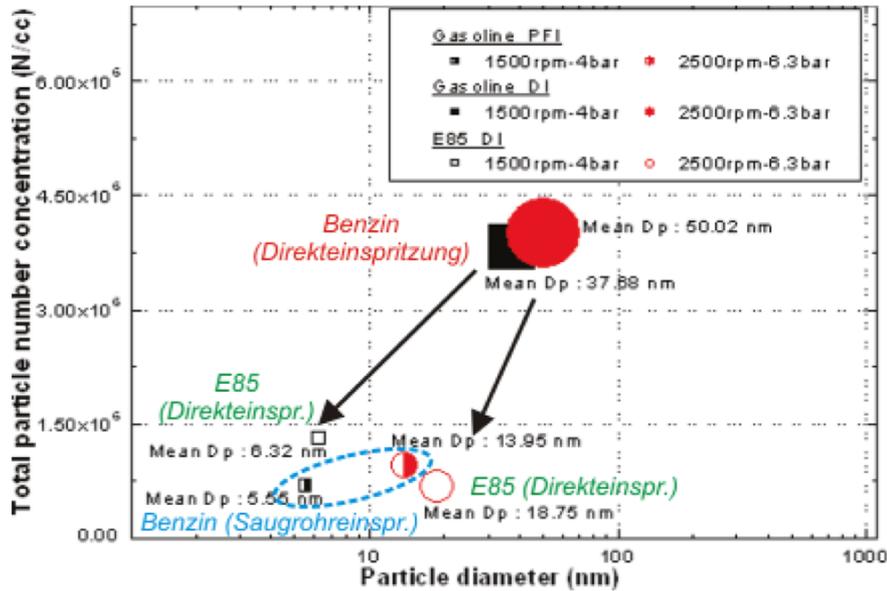
Dipl.-Ing. Isabel Frenzel, TU Bergakademie Freiberg/Deutschland

15. Symposium Energieinnovation EnInnov2018, Graz/Österreich,
14.-16.02.2018

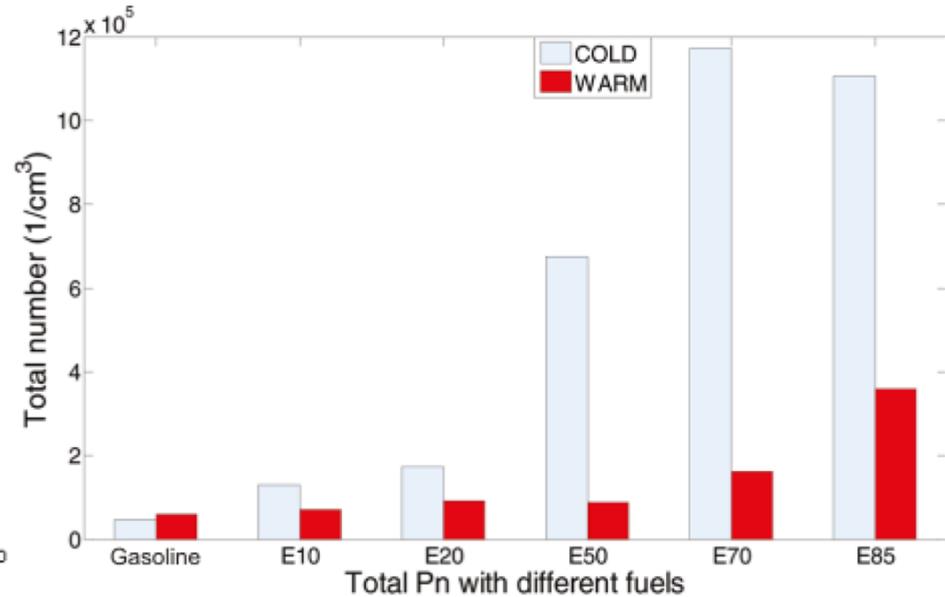
- EU Erneuerbare-Energien-Richtlinie:
bis 2020 Anteil des Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energien im Verkehrssektor 10% um CO₂-Ausstoß zu reduzieren
- EURO 6 Norm: Einschränkung von Partikelemissionen für Fahrzeuge mit Ottomotor:
Partikelmasse UND Partikelanzahl
- Auswirkungen der Beimischung von Biokraftstoffen auf die Rußbildung noch weitestgehend unverstanden



Partikelausstoß verschiedener Motortechnologien und EURO 6 Abgasnormgrenzwerte für Ottomotoren



[Lee, 2009]



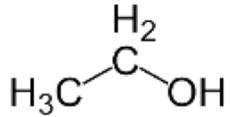
[Chen, 2011]

Im Abgastrakt eines Ottomotors (mit Direkteinspritzung) gemessene Partikelanzahl für E85 und Benzin (links) und für ansteigende Ethanolkonzentrationen (rechts)

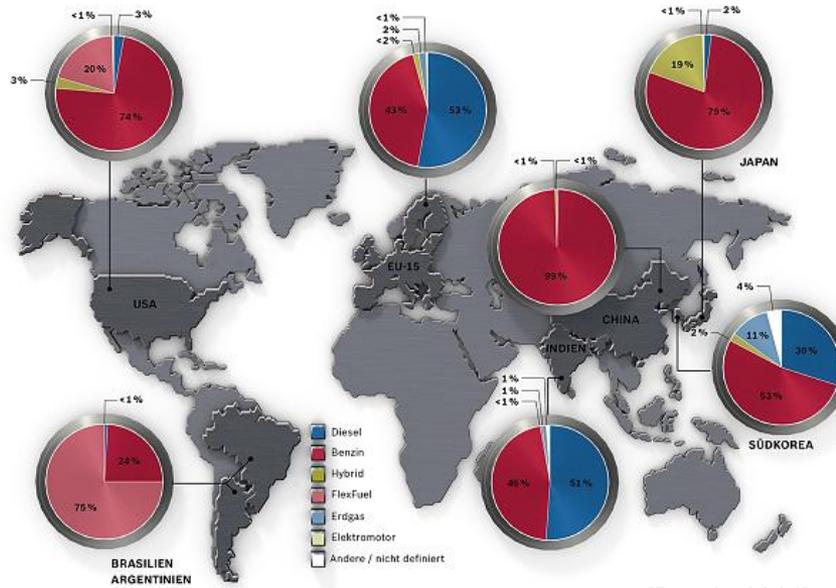
- Widerspruch: Senkung bzw. Erhöhung der Partikelemissionen bei Ethanolzumischung
- Rußquellen sind unklar, Verständnissgewinn durch Einsatz von Messtechnik und Simulation

BIOGENE KRAFTSTOFFE

ETHANOL



- Flüssiger, farbloser Alkohol
- Biokraftstoff der 1. Generation (Herstellung aus Pflanzenteilen, z. B. Korn, Zuckerrüben)



[Bosch, 2014]

Weltkarte der Antriebsarten für Kraftfahrzeuge

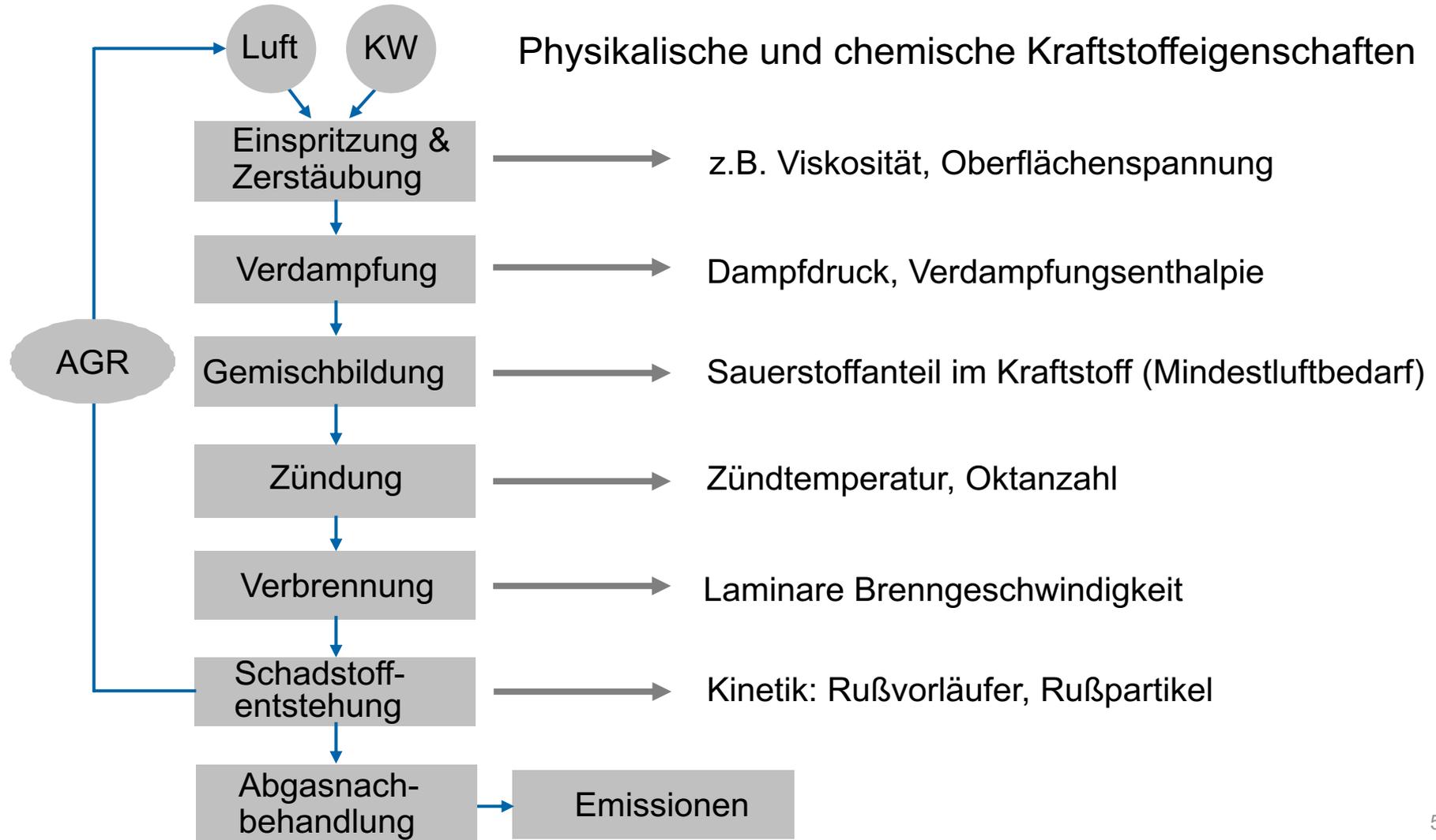
BUTANOL

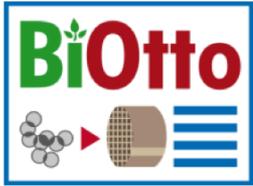


- Flüssiger, farbloser Alkohol
- Biokraftstoff der 2. Generation (biotechnische Herstellung aus Lignocellulose, z. B. Holz, Stroh)
- Besitzt 4 Isomere
- Vorteile im Vergleich zu Ethanol: 25% höheren Energieinhalt, weniger korrosiv, geringerer Dampfdruck, höherer Flammpunkt

- 90% der globalen Produktion von Biokraftstoffen konzentriert sich in USA, Brasilien und Europa
- Flex-Fuel-Vehicles (E85) in Schweden, Brasilien und USA weit verbreitet
- Deutschland: E5, E10, teilweise E85 verfügbar

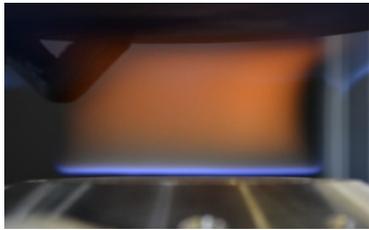
Motorische Wirkkette – komplexe Kraftstoffeinflüsse



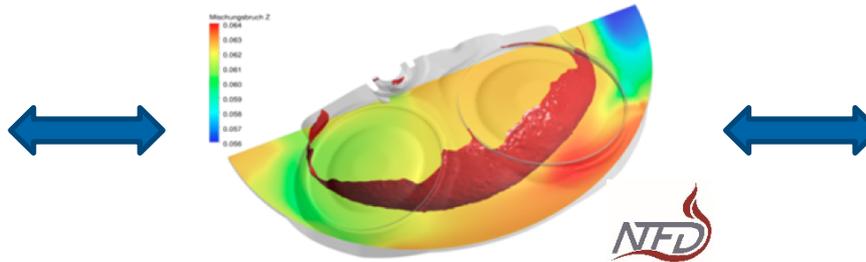


„Bildung von Rußpartikeln und katalytische Filterregeneration bei der motorischen Nutzung von Ottokraftstoffen aus Biomasse“

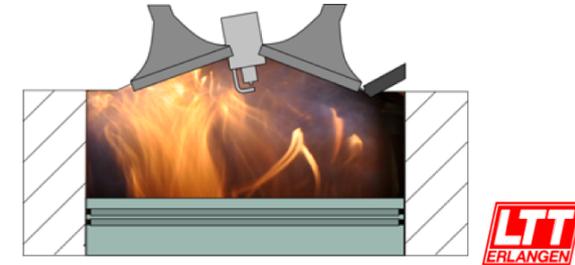
Untersuchungen an Laborflammen



Simulation der Partikelbildung



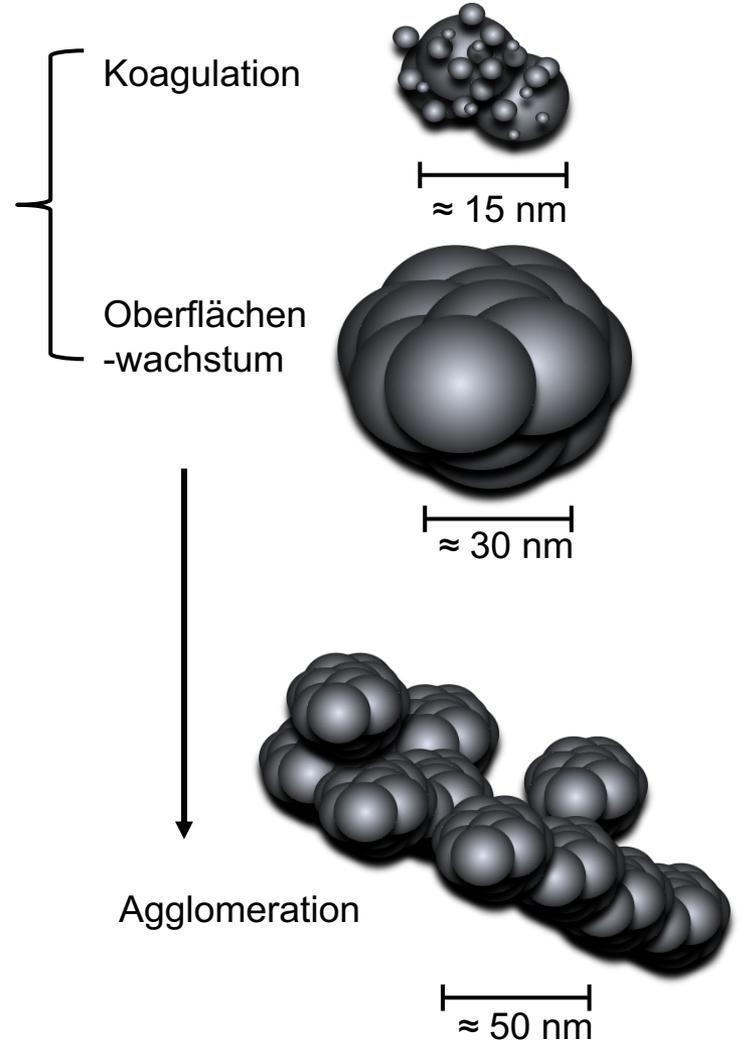
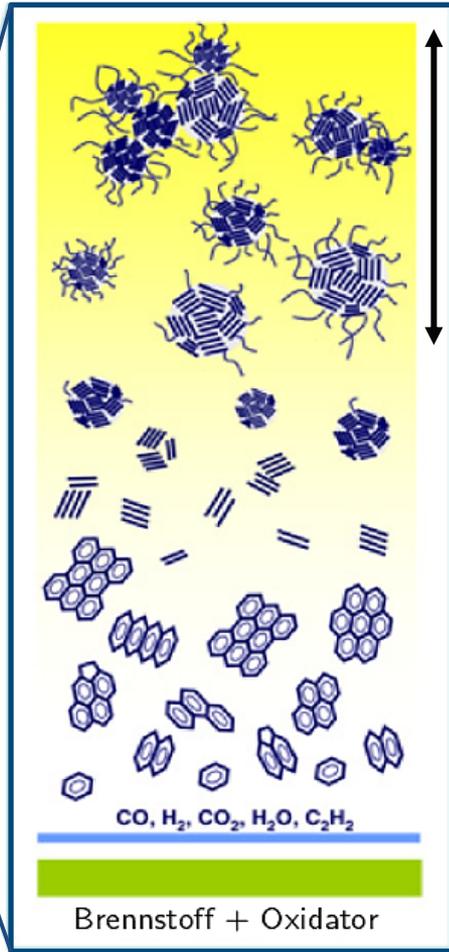
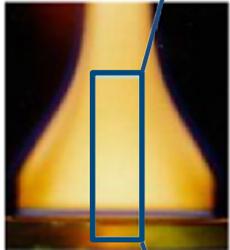
Untersuchungen am Transparentmotor



Katalytische Filterregeneration



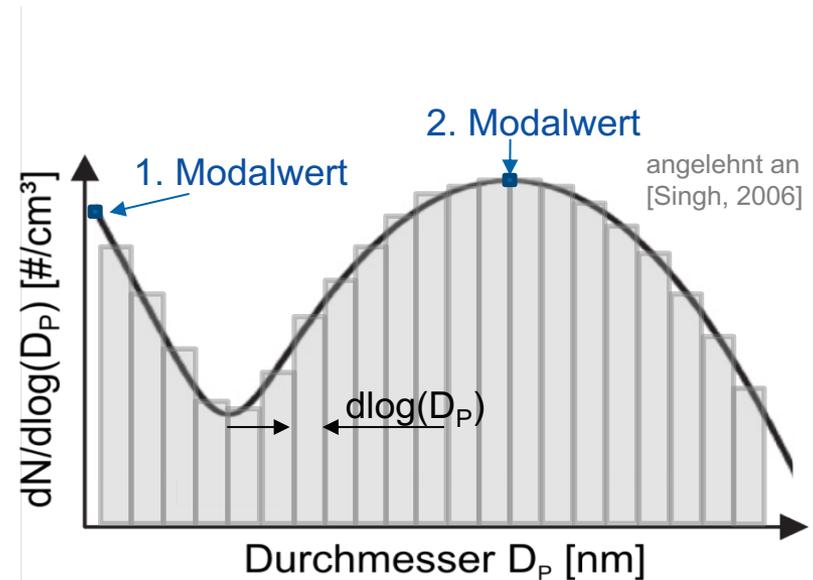
Rußbildungsmechanismus



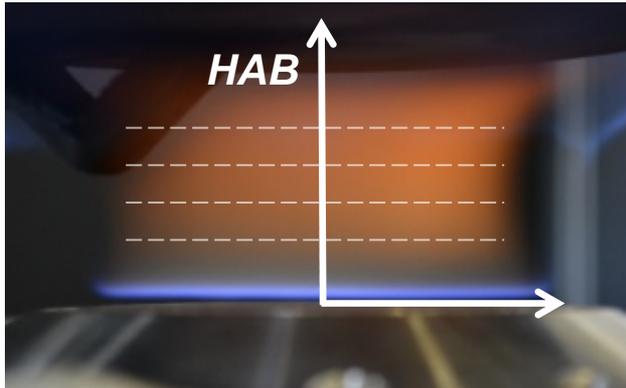
angelehnt an [Wang, 2011]

Rußpartikelgrößenverteilung

- Partikelanzahldichte dN über jeweiligem mittleren Partikeldurchmesser D_p , normiert mit der Säulenbreite $d\log(D_p)$
- Fläche unter der Kurve
 - Gesamtanzahldichte N
- Verhältnis aus Gesamtrußvolumen zu Aerosolvolumen
 - Rußvolumenbruch f_v
- 1. Teil Potenzfunktion: Keimbildungsmodalwert
- 2. Teil logarithmische Normalverteilung: Koagulationsmodalwert
- Messung mit Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) (Messbereich: 2 nm – 65 nm; 10^7 \#/cm^3)



VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

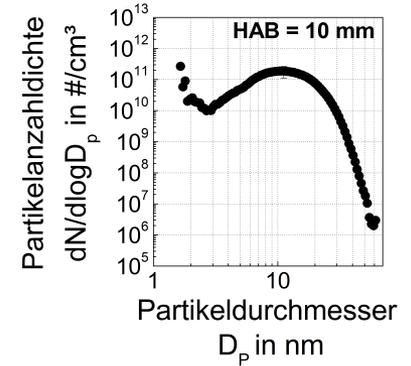


*HAB = Height above the burner –
Flammenhöhe = Maß für die Verweilzeit*

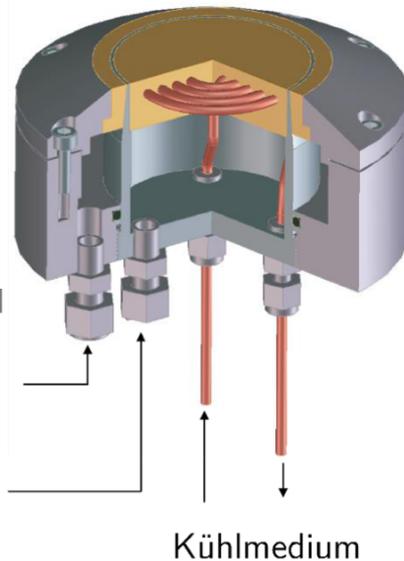
1. Entnahme der Aerosolprobe mittels speziellem Probenahme- und Aufbereitungssystem (Verdünnung, Abkühlung)



2. Messung der Rußpartikelgrößenverteilungen mittels SMPS

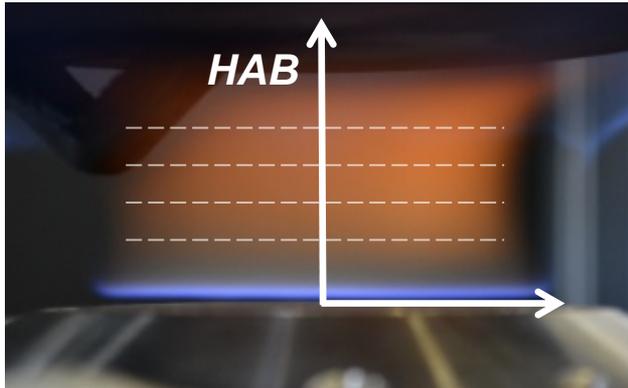


Rußpartikelgrößenverteilung



Verwendeter Flachflammenbrenner

VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

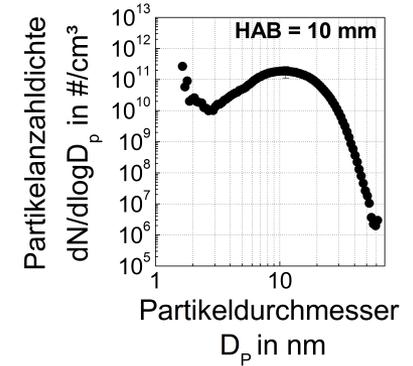


*HAB = Height above the burner –
Flammenhöhe = Maß für die Verweilzeit*

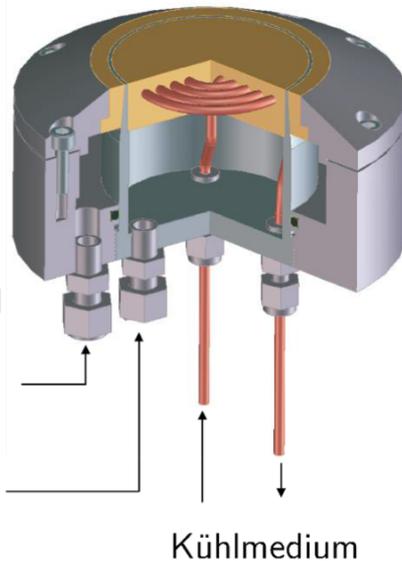
1. Entnahme der Aerosolprobe mittels speziellem Probenahme- und Aufbereitungssystem (Verdünnung, Abkühlung)



2. Messung der Rußpartikelgrößenverteilungen mittels SMPS



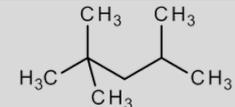
Rußpartikelgrößenverteilung



Verwendeter Flachflammenbrenner

➤ Isooktan-Referenzflamme E0/nB0

- Äquivalenzverhältnis: $\phi = 2,3$
- Kaltgasgeschwindigkeit bei 1 bar und 273 K: $v_0 = 5 \text{ cm/s}$
- Vorwärmtemperatur Gemisch: $T_{\text{BS/Oxidator}} = 353 \text{ K}$
- Oxidatorzusammensetzung: 29% O_2 / 71% Ar



➤ **Einfluss von Ethanol:** Isooktan/Ethanol-Flammen mit verschiedenen Ethanolanteilen E20, E40, E65, E85 bis zur reinen Ethanol-Flamme E100

➤ **Einfluss von n-Butanol:** Isooktan/n-Butanol-Flammen mit verschiedenen n-Butanolanteilen nB20, nB40 bis zur reinen Butanol-Flamme nB100

Einfluss von Ethanol auf die Flammenfärbung



E0



E20



E40



E65



E85

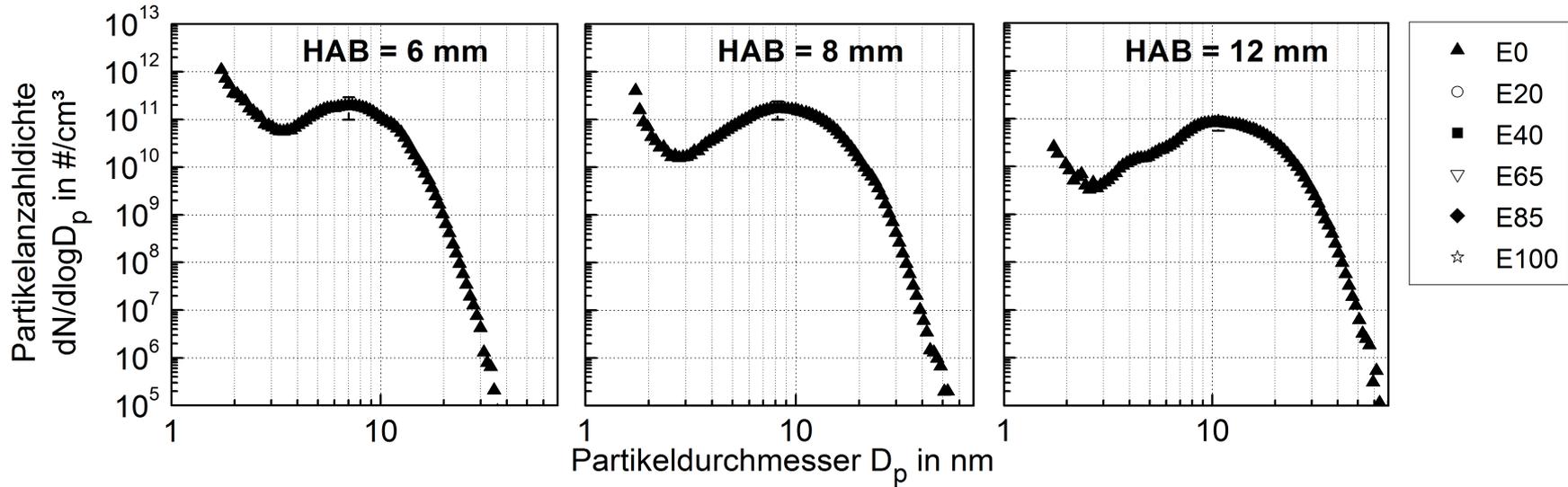


E100

*Fotos von Isooktan/Ethanol-Flammen für verschiedene Ethanolbeimischungen
($\phi = 2,3$, $v_o = 5 \text{ cm/s}$, $T_{BS/Oxidator} = 353 \text{ K}$, 29% O_2 / 71% Ar)*

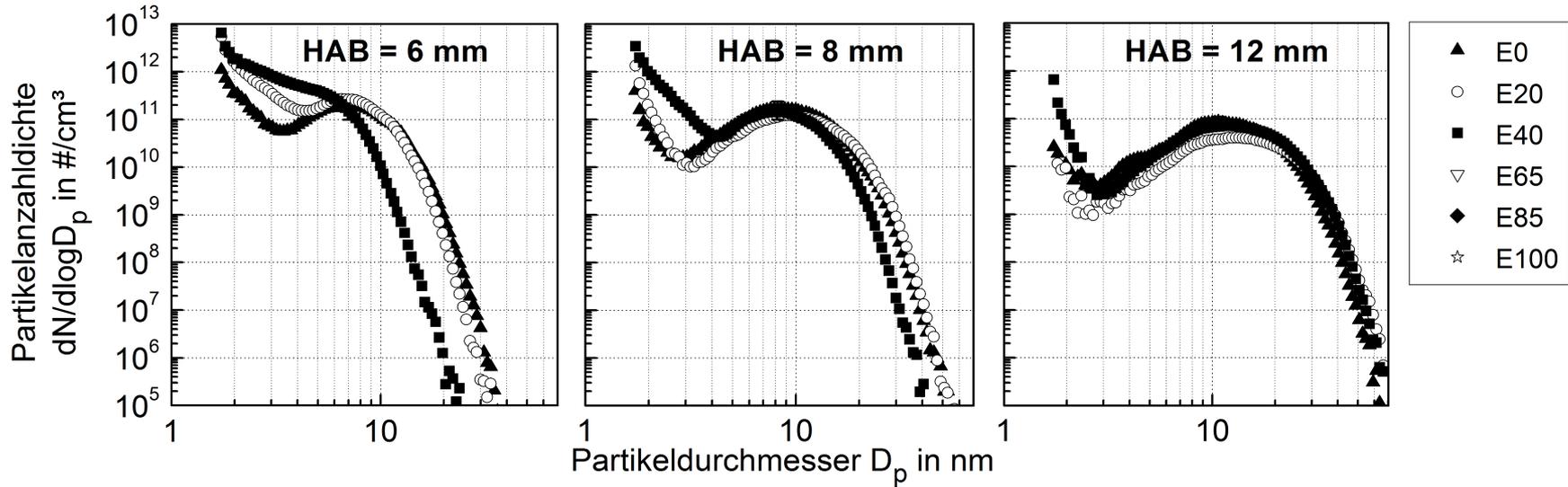
- Anhand der Intensität des Rußleuchtens kann geschlussfolgert werden, dass die Beimischung von Ethanol zum Referenzbrennstoff Isooktan zur Verminderung der Rußbildung führt.

Einfluss von Ethanol auf die Rußpartikelgrößenverteilung



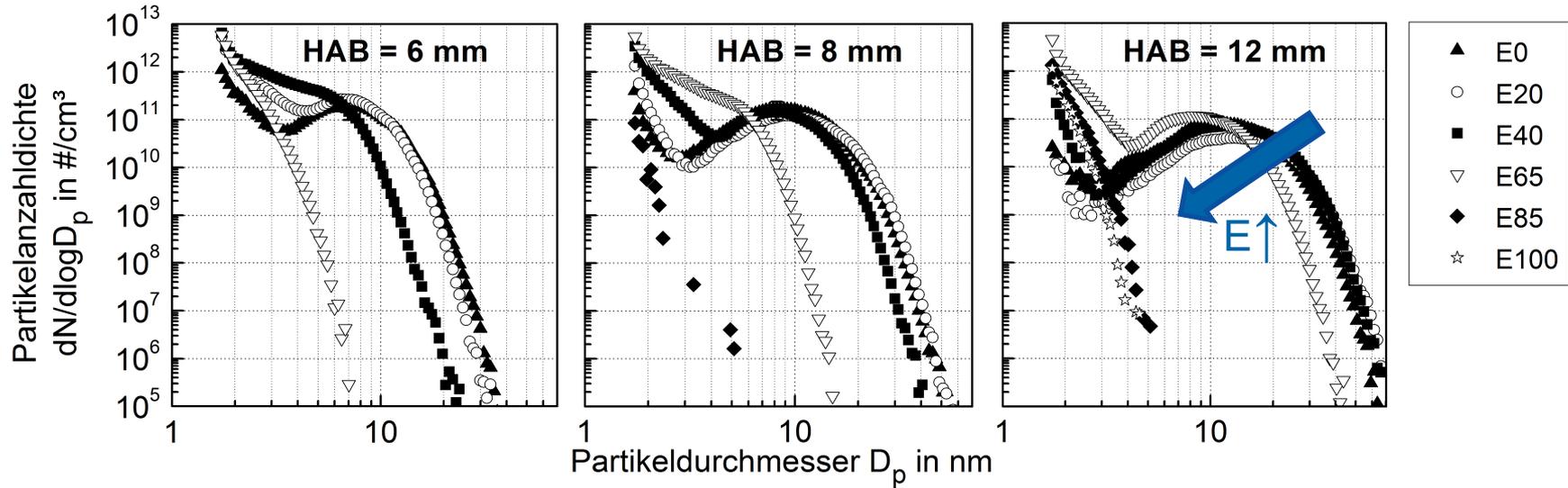
Rußpartikelgrößenverteilungen in Isooktan/Ethanol-Flammen ($\phi = 2,3$, $v_o = 5$ cm/s,
 $T_{BS/Oxidator} = 353$ K, 29% O_2 / 71% Ar)

Einfluss von Ethanol auf die Rußpartikelgrößenverteilung



Rußpartikelgrößenverteilungen in Isooktan/Ethanol-Flammen ($\phi = 2,3$, $v_o = 5$ cm/s,
 $T_{BS/Oxidator} = 353$ K, 29% O_2 / 71% Ar)

Einfluss von Ethanol auf die Rußpartikelgrößenverteilung

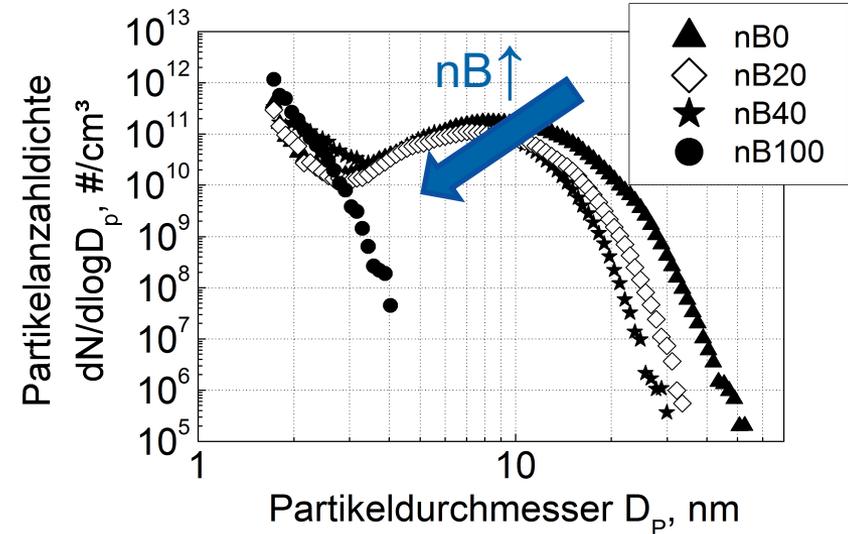
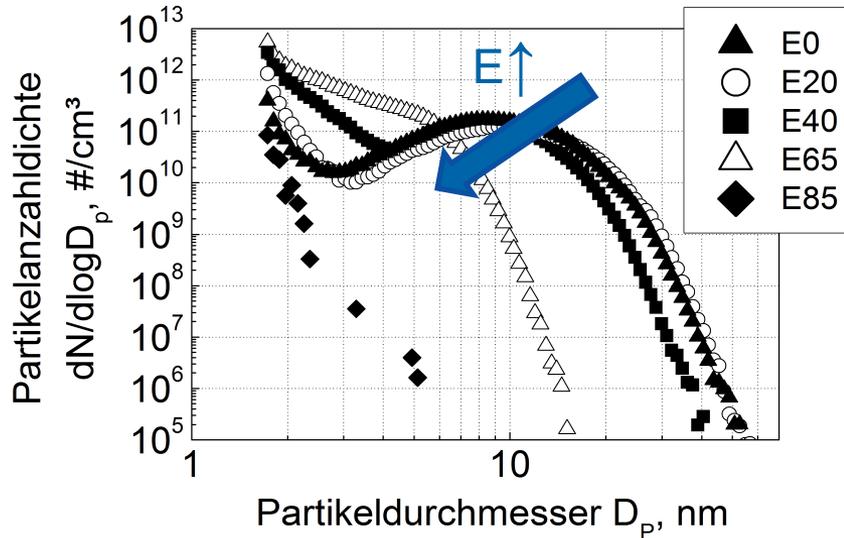


Rußpartikelgrößenverteilungen in Isooktan/Ethanol-Flammen ($\phi = 2,3$, $v_o = 5 \text{ cm/s}$,
 $T_{BS/Oxidator} = 353 \text{ K}$, 29% O_2 / 71% Ar)

- zunehmender Ethanolanteil im Brennstoff führt zu:
 - Partikeldurchmesser und Rußmenge ↓ (sehr kleine Partikel gewinnen an Bedeutung); bimodale → unimodale Verteilungen
 - Verzögerung des Rußbildungsprozesses
- ABER: nur für kleine Flammhöhen (geringe Verweilzeiten), bzw. für Ethanolanteile im Brennstoff > 40 Vol.-%

ERGEBNISSE

Vergleich des Einflusses von Ethanol und n-Butanol auf die Rußpartikelgrößenverteilung

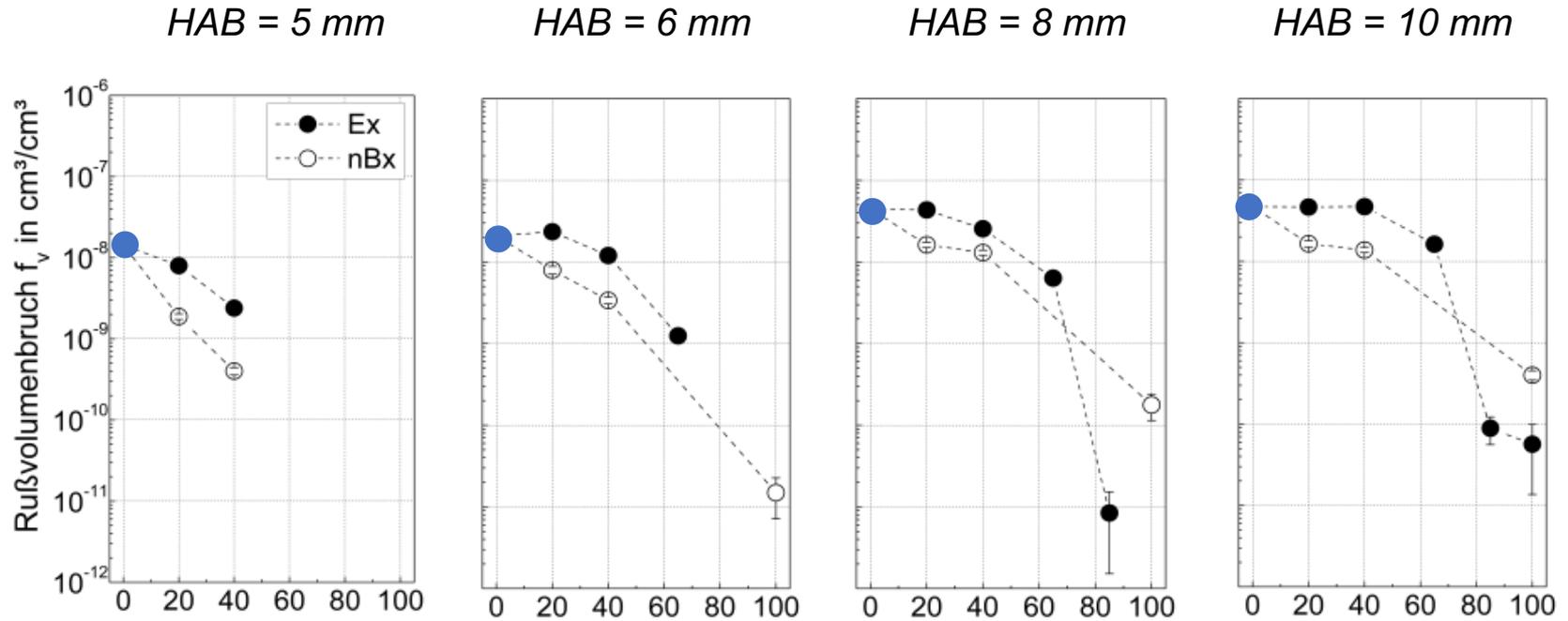


Rußpartikelgrößenverteilungen in Isooktan/Ethanol-Flammen (links) und Isooktan/n-Butanol-Flammen (rechts) in einer Flammhöhe von 8 mm ($\phi = 2,3$, $v_o = 5$ cm/s, $T_{BS/Oxidator} = 353$ K, 29% O_2 / 71% Ar)

- Gleicher qualitativer Einfluss von Ethanol und n-Butanol auf die Rußpartikelgrößenverteilungen in der Isooktan-Referenzflamme.

ERGEBNISSE

Vergleich des Einflusses von Ethanol und n-Butanol auf den Rußvolumenbruch

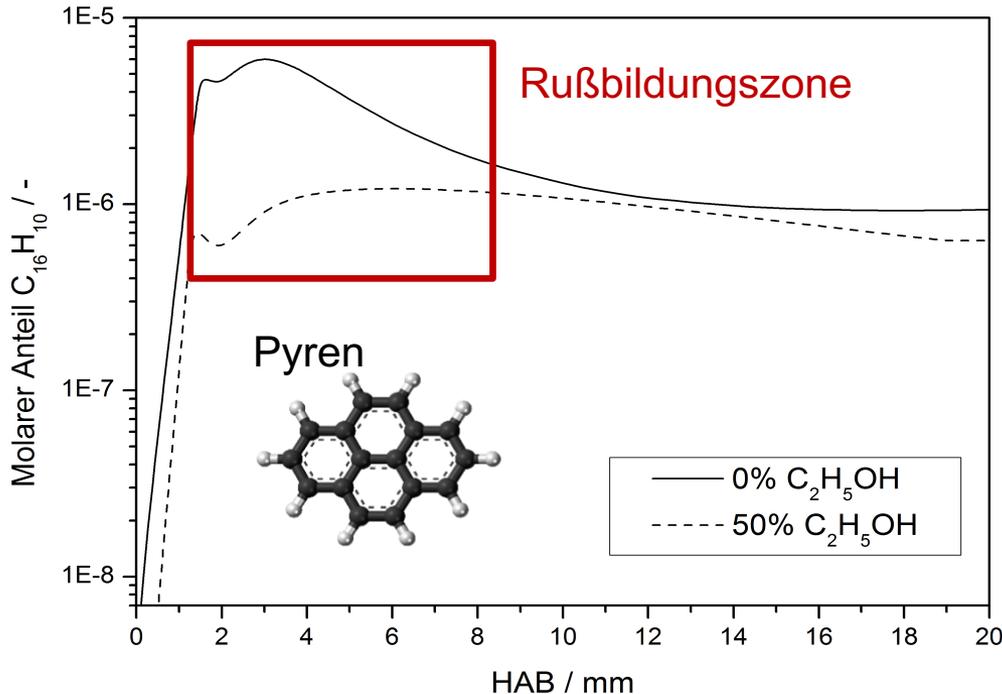


Anteil Ethanol bzw. n-Butanol im flüssigen Brennstoff x in Vol.-%

Vergleich der Rußvolumenbrüche in Isooktan/Ethanol- und Isooktan/n-Butanol-Flammen in Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil der beigemischten Komponente im flüssigen Brennstoff (blau markiert: Isooktan-Referenzflamme; $\phi = 2,3$, $v_o = 5 \text{ cm/s}$,

$$T_{BS/Oxidator} = 353 \text{ K}, 29\% \text{ O}_2 / 71\% \text{ Ar}$$

Begründung zum Einfluss von Ethanol auf die Rußbildung

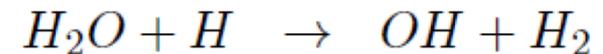
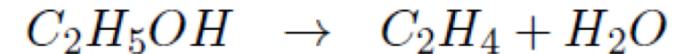


- Reduzierung der rußbildenden Prozesse
- Ethanol wirkt unter chemischen Gesichtspunkten rußbildungshemmend („chemischer Effekt“)

➤ Abnahme der Konzentration an Rußvorläufern wie C_3H_3 (Propargyl), C_2H_2 (Acetylen), C_6H_6 (Benzol) und $C_{16}H_{10}$ (Pyren) in der Rußbildungszone bei Zugabe von Ethanol zum Brennstoff

➤ dafür mehr Aldehyde

➤ Pyrolyse von Ethanol bildet

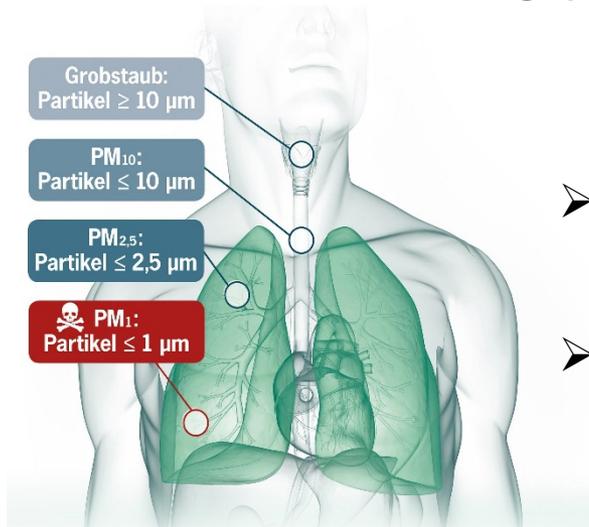


→ Bindung des H-Radikals und somit weniger Ringwachstum (Aromaten)

- Ausreichend hohe Beimischung von Ethanol und n-Butanol zu kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen vermindert die Rußbildung in Flammen maßgeblich:
 - Partikeldurchmesser verringern sich, sodass sehr kleine Partikel an Bedeutung gewinnen,
 - Anzahl der sehr kleinen Partikel bleibt nahezu unverändert,
 - Rußvolumenbrüche werden herabgesetzt,
 - Partikelbildungsprozess wird verzögert/gehemmt.



[www.t-online.de, 2018]



[www.baulinks.de, 2018]

- Oxygenierte Brennstoffe haben positiven Einfluss auf Rußmenge.
- Kleine Rußpartikel haben aber im Vergleich zu den großen stärkeren Einfluss auf die menschliche Gesundheit.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit.**

Dipl.-Ing. Isabel Frenzel

**TU Bergakademie Freiberg
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik
Gustav-Zeuner-Str. 7
09599 Freiberg**

Isabel.Frenzel@iwtt.tu-freiberg.de



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).