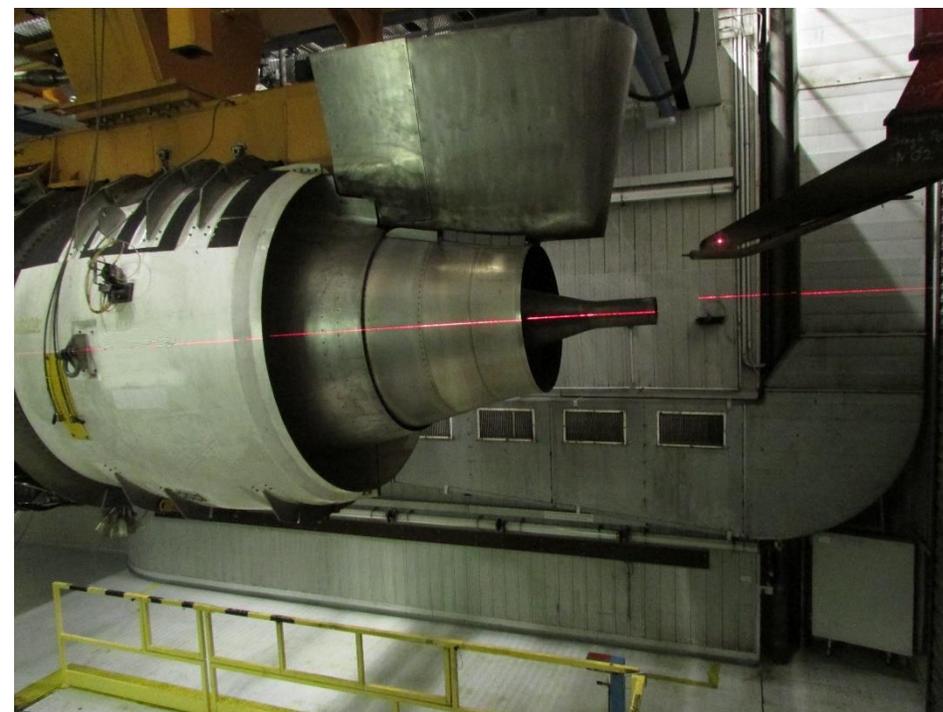


UFP-Emissionen von Flugzeugen

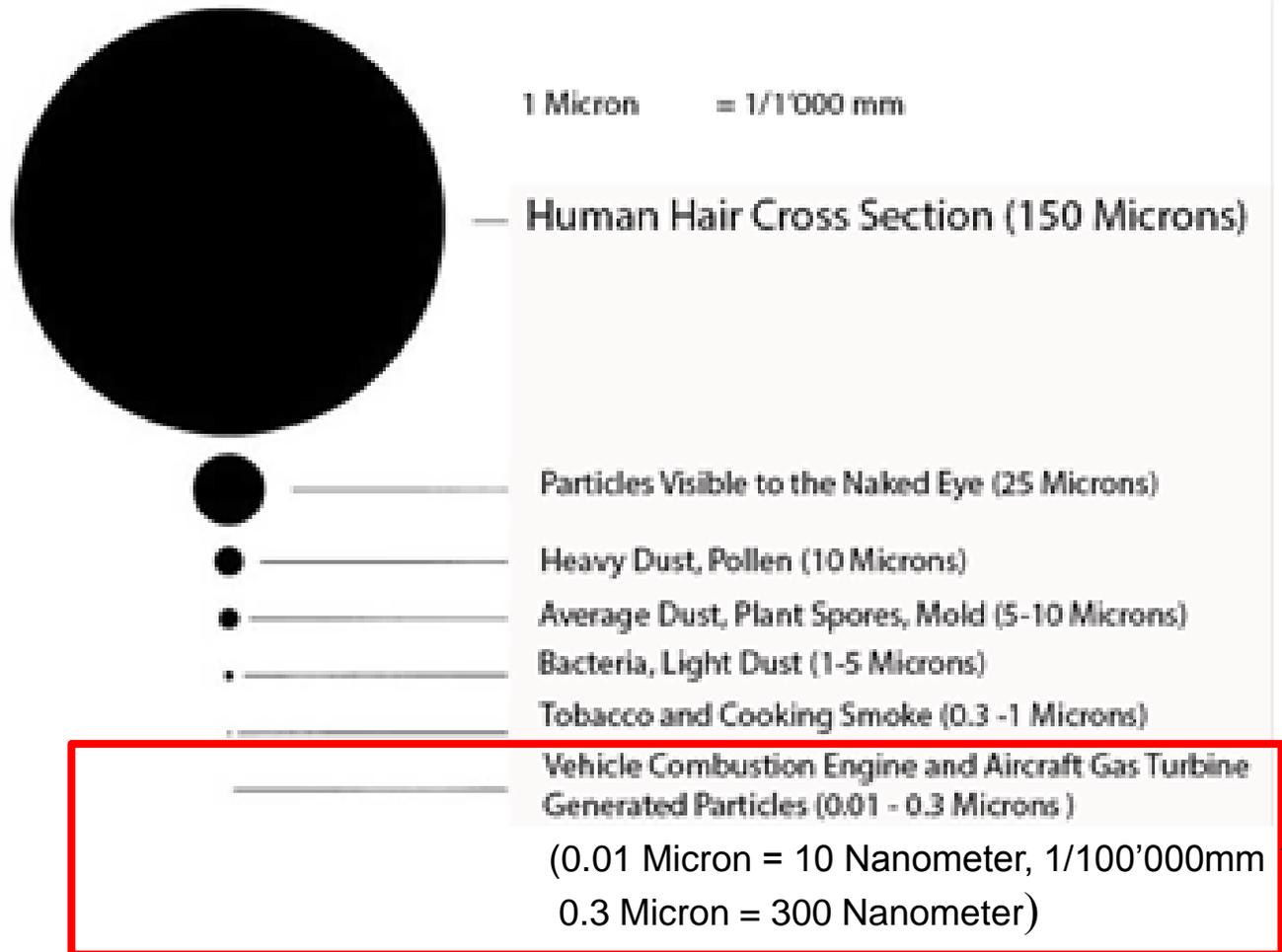
22.8.2019

Theo Rindlisbacher





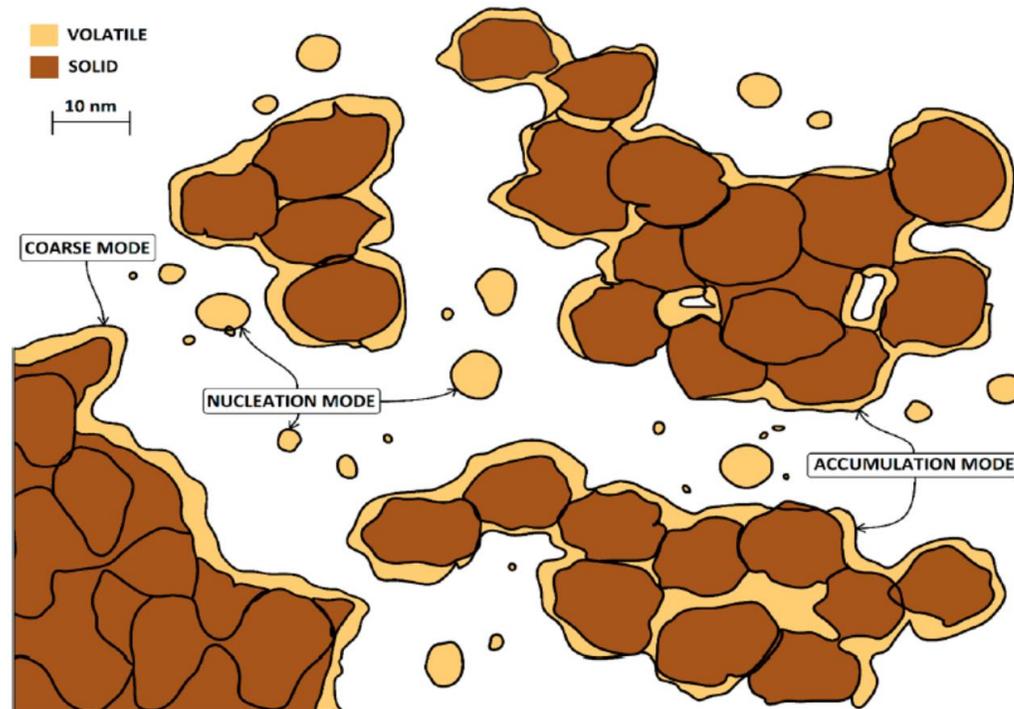
Partikelgrößen



Dieser Größenbereich ist allen Verbrennungsmotoren (und z.B. auch Ölbrennern) gemeinsam



Partikel aus Verbrennungsmotoren



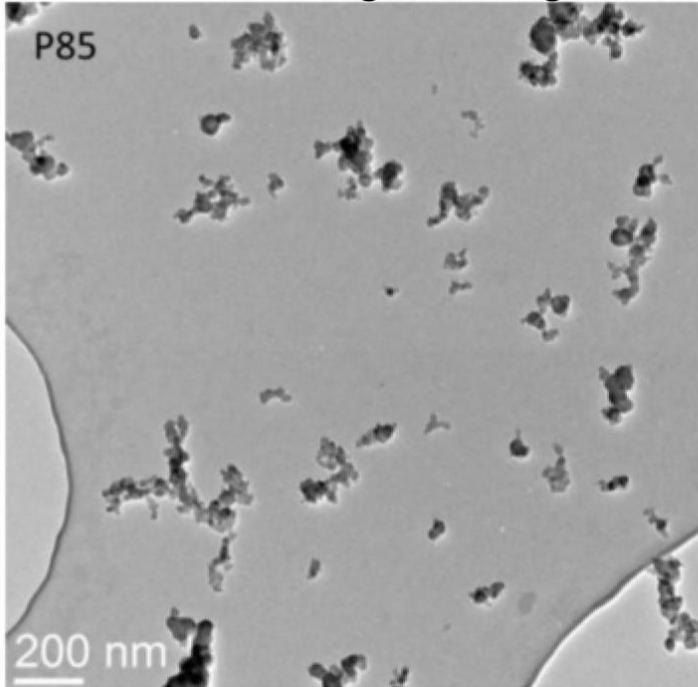
- Feste UFP (solid):
 - vorwiegend aus Kohlenstoff
 - Russ
 - Grössenbereich 10nm bis > 100nm
- Flüchtige UFP (volatile):
 - Nitrate, Sulfate,
 - organische Elemente
 - Grössenbereich 5nm bis etwa 20nm

Bild-Quelle: M. Raza, A Review of Particle Number Emissions from Gasoline Direct Injection Engines and Their Control Techniques, energies, June 2018

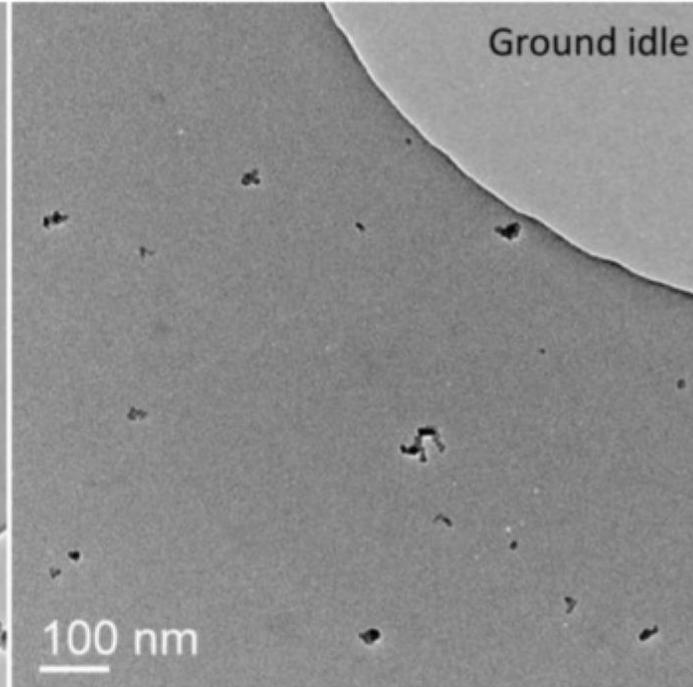


Festpartikel aus Flugzeugtriebwerken: Morphologie

Start bzw. Steigleistung



Leerlauf

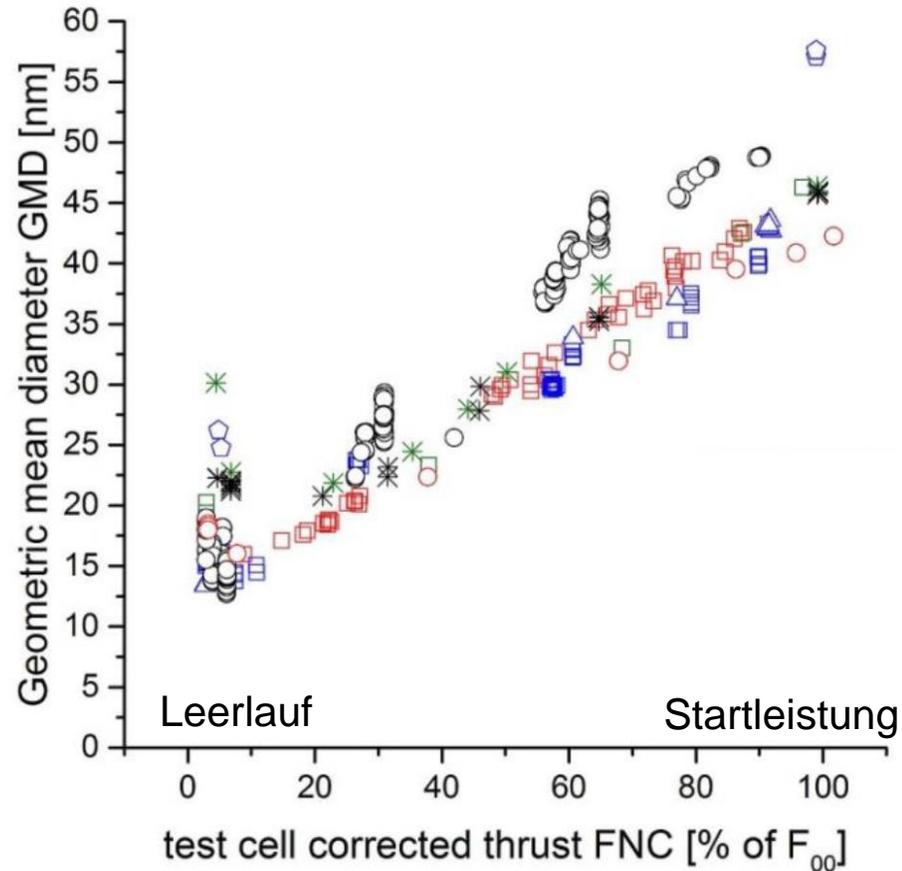


- Startleistung:
 - Partikel am grössten
 - eher kristallin
 - praktisch nur Kohlenstoff
- Leerlauf:
 - Partikel am kleinsten
 - eher amorph
 - Kohlenstoff und organische Teile

Quelle: Aircraft soot from conventional fuels and biofuels during ground idle and climb-out conditions: Electron microscopy and X-ray micro-spectroscopy. A. Liati et al, Elsevier, Environmental Pollution, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.078>



Festpartikel aus Flugzeugtriebwerken: Grössenbereich

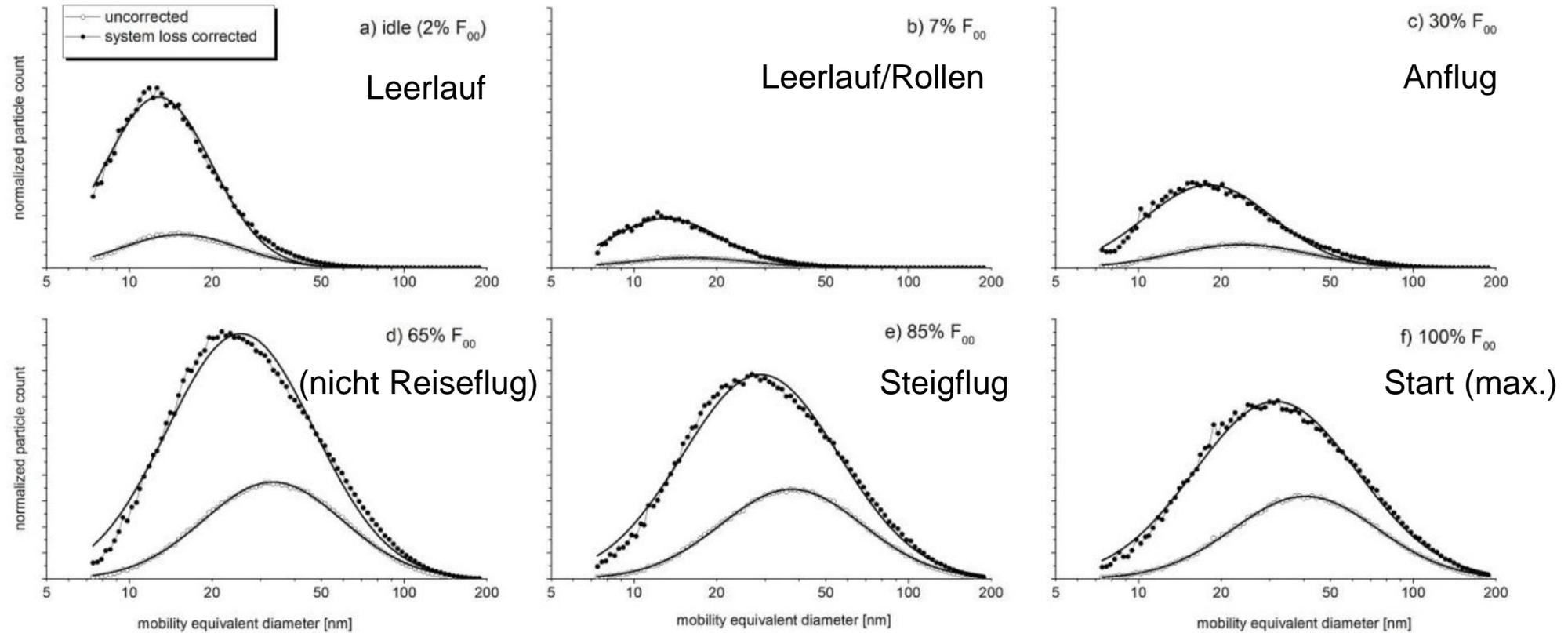


- Bei allen bekannten Triebwerken nehmen die Partikeldurchmesser von Leerlauf bis Startleistung zu.
- Die mittleren Durchmesser der Festpartikel liegen im Bereich von 10nm bis 60nm.

Quelle: Particulate Matter and Gas Phase Emission Measurement of Aircraft Engine Exhaust, Final Report 2012-2015, Empa, 2016 (BAZL)



Typische Partikelgrößenverteilungen aus Flugzeugtriebwerken am Triebwerksaustritt



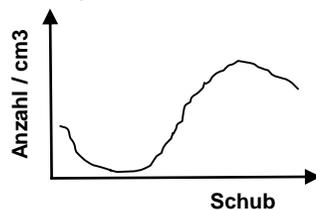
Quelle: Particulate Matter and Gas Phase Emission Measurement of Aircraft Engine Exhaust, Final Report 2012-2015, Empa, 2016 (BAZL)



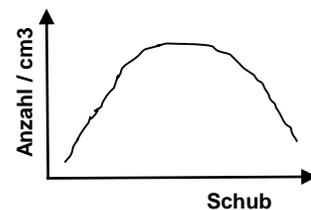
Typische Partikelkonzentrationen aus Flugzeugtriebwerken am Triebwerksaustritt

- Partikelmasse:
von 1 Mikrogramm/m³ bis einige Tausend Mikrogramm/m³ Abgas
- Partikelanzahl:
von 10⁵ bis 10⁷ Partikel/cm³ Abgas
- Die meisten der heute fliegenden Triebwerke wurden noch nicht auf tiefe UFP Emissionen optimiert und je nach Verbrennungstechnik, welche gewählt wurde, um *gasförmige* Schadstoffemissionen zu senken, ergeben sich aktuell extrem unterschiedliche Verläufe der Partikelkonzentrationen, von Leerlauf bis Startleistung:

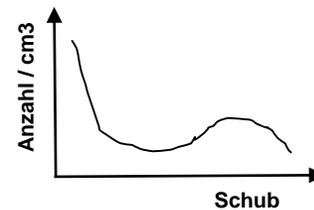
Beispiele Triebwerk 1



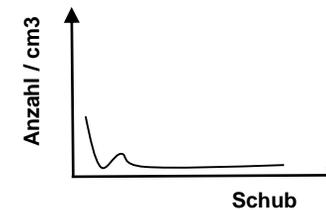
Triebwerk 2



Triebwerk 3



Triebwerk 4

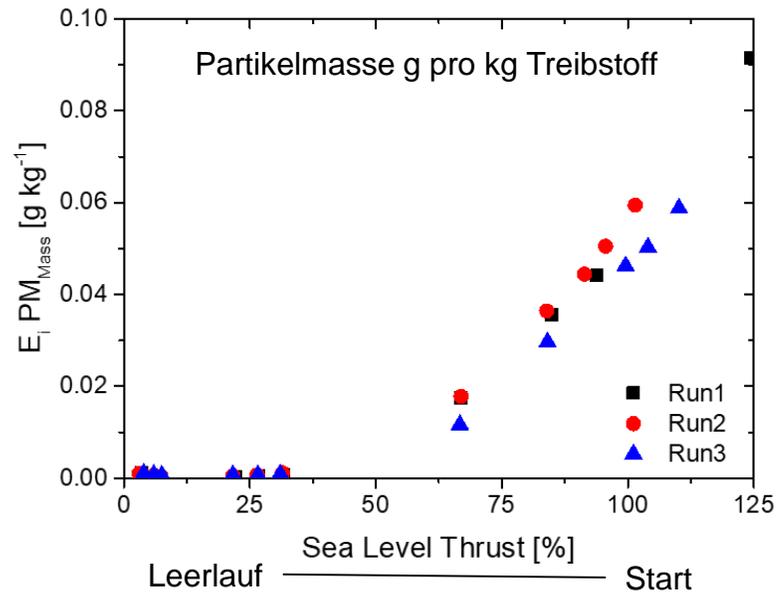




Typische Emissionsfaktoren von Flugzeugtriebwerken am Triebwerksaustritt

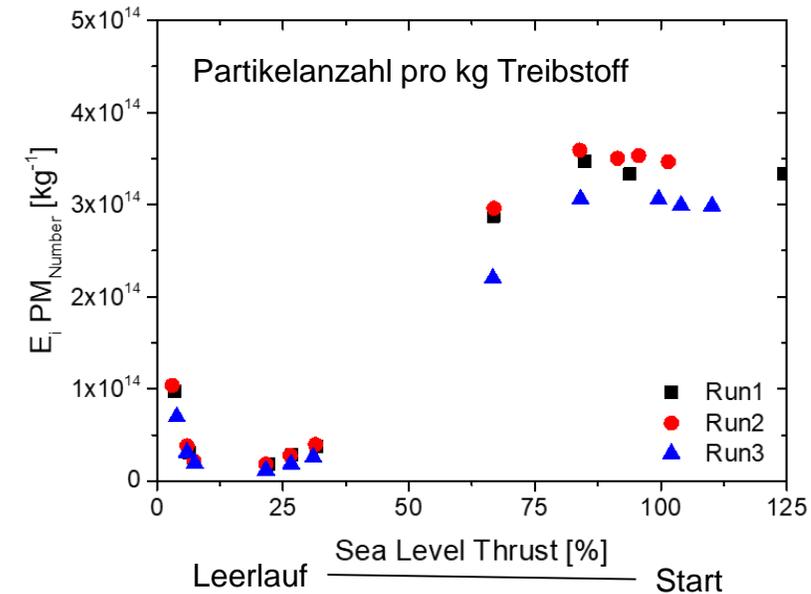
- Partikelmasse:
Von < 0.001 g bis 0.5 g / kg Treibstoff

Beispiel:



- Partikelanzahl:
von 10^{14} bis 10^{15} Partikel/ kg Treibstoff

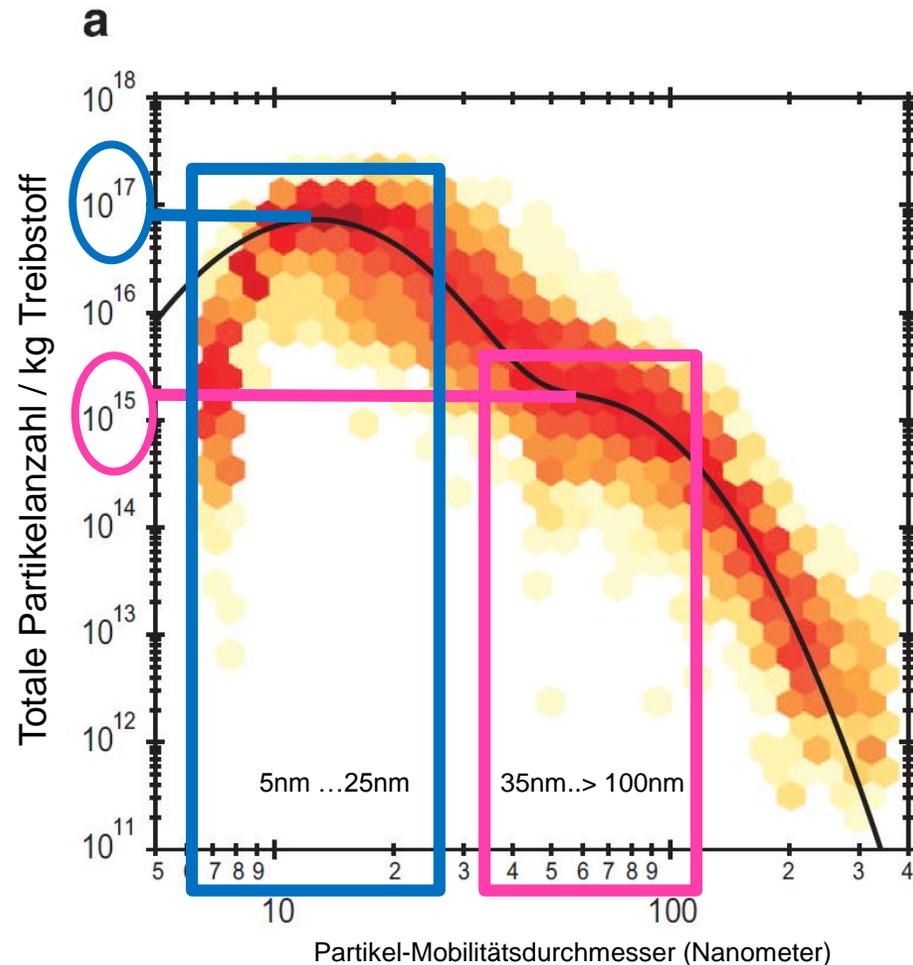
Beispiel:



Quelle: BAZL / Empa
(Bearbeitet)



Gemessene Emissionsfaktoren wenige 100m nach dem Triebwerksaustritt bei Startleistung



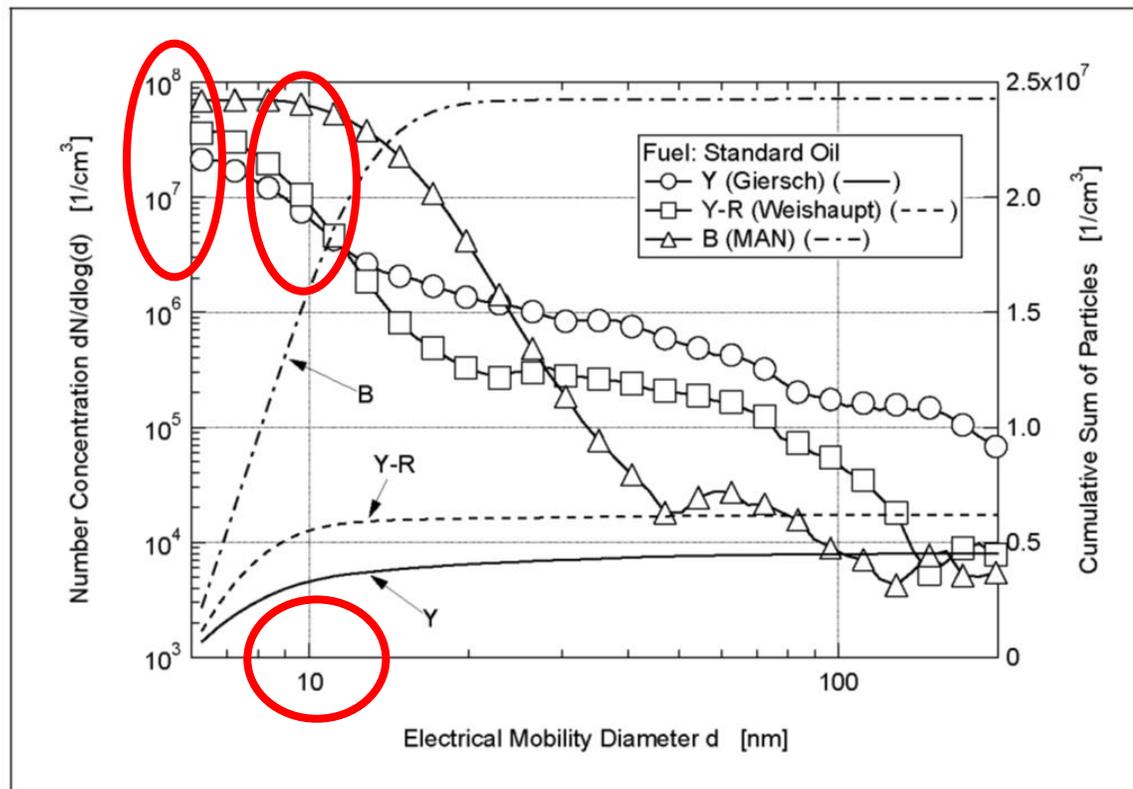
- Darstellung: Je röter die Punkte, desto mehr Abgasfahnen mit diesen Eigenschaften wurden gemessen → Schwarze Kurve «Mittel»
- UFP Russ um 50nm (wie am Triebwerksaustritt) → violett markiert
- UFP flüchtige (kondensierte) Partikel um 10nm: Diese Fraktion entsteht beim Abkühlen und steigt in der Anzahl mit der Distanz stark an, auch abhängig von der Umgebungsluft. → blau markiert
- Totale Partikelanzahlmessungen werden in einiger Distanz vom Triebwerk durch die Anzahl flüchtiger Partikel (nicht vom Russ) dominiert.

Quelle: Take-off engine particle emission indices for in-service aircraft at Los Angeles International Airport, R.H. Moore, Nature, 2017, DOI: 10.1038/sdata.2017.198 (Bearbeitet)



Quellenzuordnungen bei der Messung der totalen Anzahlkonzentration in der Umgebungsluft?

- Quellen mit ähnlichen Partikelgrößenbereichen und Konzentration an der Quelle wie Flugzeugtriebwerke: Ölheizungen

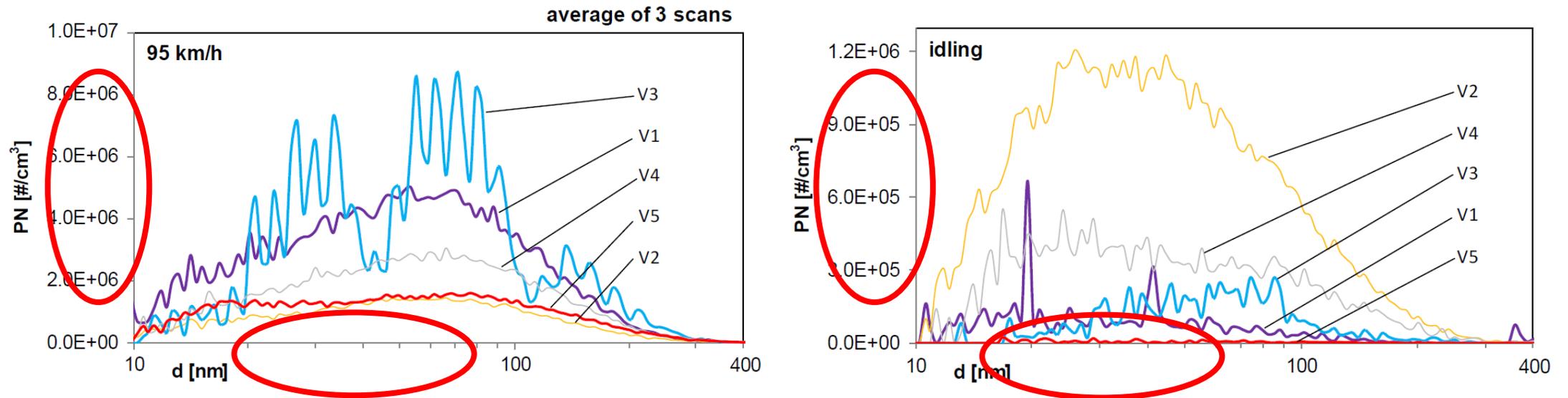


Quelle: Ultrafine particle emissions of residential oil burners: Influence of burner type, fuel, and additives. K. Przybilla et al., September 2002, Combustion Science and Technology 174(9):49-66 DOI: 10.1080/00102200290021371



Quellenzuordnungen bei der Messung der totalen Anzahlkonzentration in der Umgebungsluft?

- Quellen mit ähnlichen Partikelgrößenbereichen und Konzentration an der Quelle wie Flugzeugtriebwerke: Moderne Auto-Benzinmotoren ohne Partikelfilter



Quelle: SAE_2018-01-0363, PN-Emissions of Gasoline Cars MPI and Potentials of GPF, j. Czerwinski et al, (5 getestete Fahrzeuge V1 bis V5, bei konstanter Last, SMPS Messungen, ohne Verlustkorrektur)



Vorsorge in der Luftfahrt

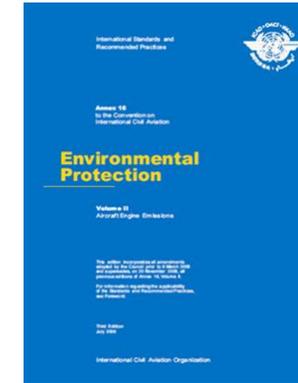
- 2008 von der Schweiz in der ICAO angestossen und ab 2011 massgeblich ermöglicht:
- 2011 – 2016: Entwicklung des Messverfahrens für die zukünftige Reduktion der Anzahl fester UFP (Russpartikel)
- 2016 – 2019: Entwicklung der ersten Grenzwerte



Schweizer
Referenzsystem
SMARTEMIS



Einführung der ersten globalen Grenzwerte für Partikelmasse und -anzahl aus Flugzeugtriebwerken



- 2019 geschafft: Der ICAO-Rat verabschiedet die neuen globalen Grenzwerte für Partikelmasse und Partikel**anzahl** aus Flugzeugtriebwerken.
- Die Grenzwerte gelangen für Neutriebwerke ab 1.1.2023 zur Anwendung.
- Diese ersten Grenzwerte liegen ca. 30% unter Werten der Triebwerke mit den aktuell höchsten Emissionen.
- Der Luftfahrtsektor ist der bisher einzige Sektor, welcher globale Grenzwerte insbesondere für die Anzahl ausgestossener ultrafeiner Partikel einführt.



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Quelle: wikiwand.com