

1 Einleitung – Problemstellung und Motivation

Die gesteigerte gesellschaftliche und mediale Fokussierung auf das Thema Emissionen im Mobilitätsbereich - insbesondere im Zusammenhang mit Verbrennungsmotoren - zeigt, dass die Sensibilität diesbezüglich deutlich zunimmt. Der rein verbrennungsmotorische Antrieb muss sich zukünftig gegen weitere Konzepte wie hybride, rein batterieelektrische oder Brennstoffzellen-elektrische Antriebe behaupten [1]. Parallel schränken die Gesetzgeber weltweit die Abgasemissionen, wie Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Partikelmasse und Partikelanzahl weiter ein und erweitern den Prüfbereich [2]. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Abgasschadstoffemissionen wurden in verschiedenen Studien nachgewiesen [3, 4]. In Bezug auf den Ottomotor haben sich die Partikelanzahlemissionen als besonders kritisch herausgestellt [5]. Abbildung 1.1 zeigt die Eindringtiefe unterschiedlicher Partikelgrößen in die Atemwege. Feinstaub (PM_{10}) kann bis zum Kehlkopf beziehungsweise bis zur Luftröhre eingeatmet werden. Lungengängiger Feinstaub ($PM_{2,5}$) erreicht die Bronchiolen in der Lunge, Partikel $< 1 \mu m$ gelangen bis in die Lungenbläschen oder zum Teil in die Blutbahn. Eine Feinstaubexposition kann je nach Dauer zu Atemwegserkrankungen wie Bronchitis führen oder Asthma verstärken. Zusätzlich kann eine erhöhte Belastung des Herz-Kreislaufsystems auftreten, was zu erhöhtem Herzinfarktrisiko führen kann. Außerdem können sich an Rußpartikel polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) anlagern, die toxische Wirkung haben und Krebs verursachen können [6 bis 14].

Seit September 2017 werden die Emissionen zusätzlich auf der Straße unter realen Fahrbedingungen [15, 16] ermittelt, nicht wie bisher ausschließlich im Profil des „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) auf dem Rollenprüfstand. Weiterhin wurde der neue Zyklus „Worldwide harmonized Light-Duty Test Cycle“ (WLTC) eingeführt, der den NEFZ weitestgehend ersetzt. Der WLTC besitzt nicht mehr die ausgeprägte synthetische Charakteristik eines NEFZ mit relativ geringen Gradienten bezüglich Last und Drehzahl. Die Fahrprofile unter Realfahrtbedingungen (Real Driving Emissions, RDE) weisen eine gesteigerte Dynamik auf, da diese im Vergleich zum NEFZ und WLTC nochmals bezüglich Last- und Drehzahlgradienten verschärft sind [17, 18]. Blei et al. [19] beobachteten durch eine gesteigerte Fahrdynamik im WLTC einen signifikanten Einfluss auf das Emissionsniveau sowie einen starken Anstieg der Partikelanzahlemission. Zinola et al. [20] und Heinz et al. [21] identifizieren ebenso starke Beschleunigungen als Quelle für hohe Partikelemissionen. Beim Vergleich des NEFZ mit einem RDE-Zyklus wurde festgestellt, dass mit der Fahrdynamik der Partikelanzahlausstoß ansteigt [19]. In den von Blei et al. [19] untersuchten Zyklen liegt zwischen NEFZ und RDE-Zyklus ein Faktor 3 in der Partikelanzahlemission. Hierdurch entstehen für die

1 Einleitung – Problemstellung und Motivation

Motorenentwickler neue Herausforderungen, da die Einhaltung der Emissionsvorgaben unter allen möglicherweise vorkommenden dynamischen Randbedingungen gewährleistet werden muss.

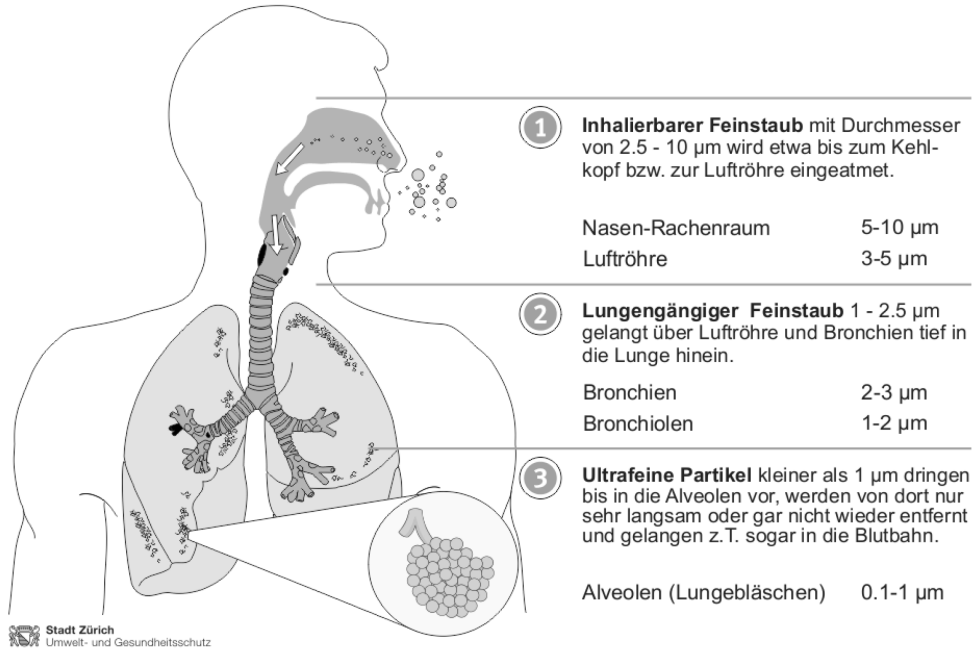


Abbildung 1.1: Eindringtiefe unterschiedlicher Partikel in den menschlichen Organismus [11]

Die europäische Kommission hat in ihrem Arbeitsprogramm Horizon 2020 die weitere Reduktion der Partikelemissionen aufgegriffen und über Förderprogramme die Entwicklung von RDE-fähiger Partikelmesstechnik sowie für Nanopartikel bis zu 10 nm angestoßen, im Unterschied zur bisherigen Limitierung der Partikelanzahl, die eine untere Grenze von 23 nm vorsieht [22 bis 27]. Durch Optimierungsmaßnahmen am Brennverfahren wurden bereits bei der Umstellung von Euro 5- auf Euro 6-Konzepte die Partikelemissionen deutlich reduziert [28]. Grundlegend entstehen an den Gemischbildungskomponenten Probleme durch unterschiedliche Systemträgheiten. Der mit hohen Drücken arbeitende Kraftstoffpfad kann eine hohe Dynamik abbilden, jedoch zeigt sich gerade bei Downsizing-Motoren mit Turbo-Aufladung eine höhere Trägheit der Luftbeimessung. Ziel der Auslegung und Bedatung der Gemischbildungskomponenten bei Ottomotoren ist es, den stöchiometrischen Motorbetrieb auch unter hochdynamischen Betriebspunktwechseln sicherzustellen [29, 30]. Beispielsweise wurden von Tan et al. Untersuchungen bei Lastsprüngen von 5 % auf 15 % Last bei 1500 min^{-1} durchgeführt, wobei der Lambda-regler kein stöchiometrisches Gemisch im transienten Betrieb halten konnte [31]. Transiente Phasen und deren applikative Bedatung, wie Einspritzzeiten

und Ladungsbewegung, haben nach Bertsch einen großen Einfluss auf die Partikelemissionen [32]. Das gesteigerte Dynamikprofil im WLTC und unter RDE-Randbedingungen erfordert somit weitere Arbeit an der Systemabstimmung. Etliche Automobilhersteller haben zusätzlich Partikelfilter als Abgasnachbehandlungssystem bereits im Serienproduktionsprozess etabliert oder planen deren flächendeckende Einführung für einen Großteil der ottomotorischen Antriebe [33 bis 35]. Generell zeigen die Untersuchungen von Giechaskiel et al. [36], dass Fahrzeuge mit Partikelfilter die gesetzlichen Vorgaben einhalten können. Die Filtrationsraten der Ottopartikelfilter (OPF) weisen je nach Laufzeit relativ hohe Abscheidegrade von bis zu 99 % auf [37]. Es ergibt sich jedoch ein Zielkonflikt - insbesondere bei neuen Bauteilen - aus Filtrationsrate (im neuen Zustand) und Abgasgegendruck [38 bis 40]. Eine Steigerung des Abgasgegendrucks ist aufgrund des daraus folgenden Kraftstoffverbrauchsanstiegs unter dem seit 2022 geltenden Ziel von 95 g CO₂/km für die Neuwagenflotte nicht erwünscht [41]. Hieraus lässt sich die Anforderung einer maximal möglichen Reduzierung der Partikelanzahl-Rohemissionen ableiten [42, 43].

Bisherige Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte legen in Bezug auf Partikelemissionen hauptsächlich den Fokus auf Gemischbildungsmaßnahmen, wie die Anpassung der Einspritzdrücke, der Einspritzstrategie oder der Optimierung der Injektoren [32, 44 bis 47]. Einflüsse und Zusammenhänge zwischen Partikel- und Ölemissionen werden in einigen Arbeiten bei Dieselmotoren in Bezug auf die Partikelmasse untersucht und nachgewiesen. Zu Ottomotoren und dem Einfluss des Motoröls auf die Partikelanzahlmissionen gibt es in bisherigen Untersuchungen erste Vermutungen und Hinweise [44, 48 bis 50]. Mechanische Komponenten, wie Kurbelgehäuseentlüftung und das System „Kolben-Kolbenringe-Zylinderlaufbahn“ können somit einen weiteren Stellhebel zur Emissionsminderung darstellen. Untersuchungen an einem Motor mit Wasserstoffbetrieb zeigen teilweise hohe Partikelemissionen, die auf das Motoröl zurückzuführen sind [51]. Während des Entwicklungsprozesses und der Systemoptimierung stellt sich die Frage, welche Bauteile oder Maßnahmen am ehesten zu einer Emissionsreduzierung führen. Unter dem Zeit- und Kostendruck heutiger Entwicklungen im Automobilsektor sind Laboranalysen von beladenen Filtern zur Identifikation von Bestandteilen der Partikel nicht für einen optimalen Entwicklungsablauf geeignet, da hier insbesondere keine zeitliche Zuordnung über die Beladungshöhe erfolgen kann, sondern nur eine integrale Betrachtung über den Beladungszeitraum. Wie zuvor beschrieben sind hochdynamische Betriebsweisen bezüglich Gemischbildung [29, 30, 52], aber auch der Abdichtwirkung der Kolbengruppe bei Schub-Last-Wechseln in dynamischen Zyklen kritisch [52, 53]. Zur Systemoptimierung braucht der Entwickler einen Indikator, um festzustellen, ob

eher ein mechanisches Problem vorliegt oder ein Problem rein aus der Gemischbildung beziehungsweise eine Wechselwirkung von Öl und Kraftstoff am Motor in gewissen Betriebszuständen oder Betriebszustandswechseln. Die Fragestellung der ölunduzierten Partikelemissionen gilt als ein wichtiges noch zu lösendes Problem auf dem Weg zur weiteren Emissionsreduzierung des Verbrennungsmotors [51].

In der vorliegenden Arbeit sollen die Zusammenhänge von Öl- und Partikelemissionen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung untersucht werden. Ziel ist es, eine Auswerte- und Versuchsmethodik zu finden, um die Haupteinflussparameter für die Partikelanzahlemissionen zu ermitteln und geeignete Optimierungsmaßnahmen am mechanischen System und den Gemischbildungsparametern abzuleiten. Durch die Betrachtung der Rohemissionen nach Turbolader und vor Katalysator soll eine Ursachenfindung ermöglicht werden, ohne dass diese durch Einflüsse aus der Abgasnachbehandlung wie zum Beispiel durch den Partikelfilter verfälscht werden. Hierbei soll eine messtechnische Kombination zur Analyse insbesondere von dynamischen Vorgängen im Hinblick auf die RDE-Herausforderungen bei der Motorenentwicklung erprobt und validiert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Grundlagen zu Partikelemissionen

2.1.1 Charakterisierung und Beschaffenheit von Partikeln

Die gesetzlich limitierte Abgasemission von Partikeln leitet sich aus den beschriebenen Gesundheitsbeeinträchtigungen ab, wobei sich das Abgas als Aerosol und somit als ein „Gemisch aus Partikeln und dem suspendierenden Medium Luft“ [54] in der Atmosphäre ausbreitet und vom Menschen eingeatmet werden kann. Der Gesetzgeber definiert Partikel als „Abgasbestandteile, die bei einer Temperatur von maximal 325 K (52 °C) aus dem unverdünnten Abgas auf Filtern“ [27] abgeschieden werden. Die Partikelanzahl wird als die „Gesamtzahl der Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 23 nm im verdünnten Abgas“ [27] charakterisiert, wobei flüchtige Bestandteile entfernt werden.

Der Sammelbegriff „Partikel“ umfasst jedoch je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Definitionen. Allgemein kann eine Differenzierung von Partikeln nach Morphologie, Größe, chemischer Zusammensetzung, Aggregatzustand, Beschaffenheit, Messverfahren oder auch deren Wirkung erfolgen. Im Folgenden werden die in Bezug auf die verbrennungsmotorischen Partikel verwendeten Definitionen und Klassifizierungen erläutert.

2.1.1.1 Partikelgröße

Ein Partikel liegt häufig nicht in sphärischer Form vor, wodurch die Angabe eines Durchmessers zur Bestimmung der Partikelgröße je nach Definition oder Messprinzip unterschiedlich erfolgt. Beim Äquivalentdurchmesser D_p entspricht das Volumen des amorphen Partikels dem Durchmesser einer Kugel mit dem gleichen Volumen [54]. Im Bereich der Partikelmesstechnik zur Charakterisierung der Partikelgröße sind unter anderem der elektrische Mobilitätsdurchmesser und der optische Durchmesser relevant. Der elektrische Mobilitätsdurchmesser entspricht dem Durchmesser eines sphärischen Partikels mit der gleichen elektrischen Mobilität. Bei optischen Messtechniken wird durch die Interaktion des Partikels mit Licht ein optischer Durchmesser durch Vergleich mit Referenzpartikeln bestimmt, die zur Kalibrierung verwendet werden [55].

Die in Abbildung 2.1 dargestellte Partikelgrößenverteilung ist nach Kittelson [56] und Willeke et al. [57] klassifiziert. Grobe Partikel (PM_{10}) liegen im Durchmesserbereich

$2,5 < D_p < 10 \mu\text{m}$, alle Partikel mit $D_p < 2,5 \mu\text{m}$ werden als feine Partikel ($\text{PM}_{2,5}$) bezeichnet. Partikel mit $D_p < 0,1 \mu\text{m}$ sind ultrafeine Partikel und mit $D_p < 0,05 \mu\text{m}$ Nanopartikel. Für die verbrennungsmotorische Partikelemission sind insbesondere der Nukleationsmodus mit Äquivalenzdurchmesser $D_p < 0,05 \mu\text{m}$ und der Akkumulationsmodus mit $0,05 < D_p < 1 \mu\text{m}$ von Interesse [58 bis 60].

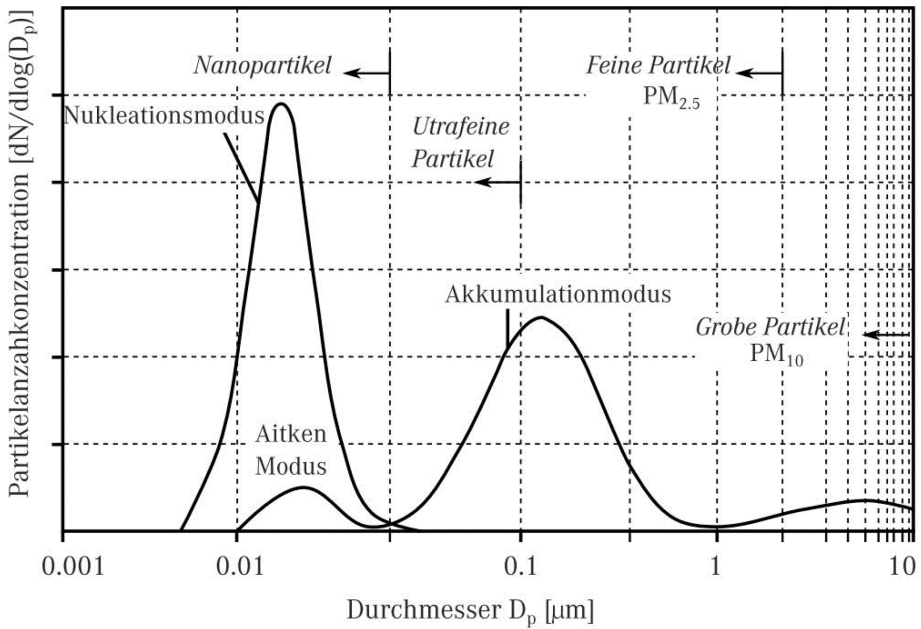


Abbildung 2.1: Typische Partikelgrößenverteilung aus dem Abgas von Verbrennungsmotoren [61]

2.1.1.2 Zusammensetzung von Partikeln

Die verbrennungsmotorischen Partikel können Bestandteile von unverbranntem Öl und Kraftstoff, reinem Kohlenstoff, Sulfaten, Wasser und Asche enthalten [56]. Generell können nach Merkisz et al. [62] und Sargenti et al. [63] die Partikel in lösliche organische Anteile (soluble organic fraction – SOF), in flüchtige organische Anteile (volatile organic fraction – VOF) und in nicht-lösliche organische Bestandteile (insoluble organic fraction – INSOL) eingeteilt werden. Abbildung 2.2 zeigt die Klassifizierung der motorischen Partikel nach deren physikalischem Trennverhalten in Laboranalysen.

Eastwood [64] unterteilt die volatilen oder löslichen Anteile in Sulphate, Nitrate und organische Anteile. Die nicht-löslichen, nicht-volatilen Komponenten werden in kohlenstoffhaltige Anteile beziehungsweise Ruß und Asche unterteilt, wozu auch der metallische Abrieb gezählt wird. Die prozentualen Anteile und Morphologie der verschiedenen

Komponenten variieren je nach Brennverfahren, Motor, Betriebsstoff, Betriebspunkt und Betriebsrandbedingungen [65 bis 69].

Nukleationspartikel entstehen bei Verdünnung und Abkühlung des Abgases aus volatilen Vorläufern von organischen Verbindungen, wie Kraftstoff- und Ölbestandteilen oder Schwefelkomponenten. Weitere Bestandteile von Nukleationspartikeln können elementarer, fester Kohlenstoff oder metallische Anteile sein. Die Akkumulationspartikel bestehen aus kohlenstoffhaltigen Agglomeraten und weiterem angelagerten Material [56].

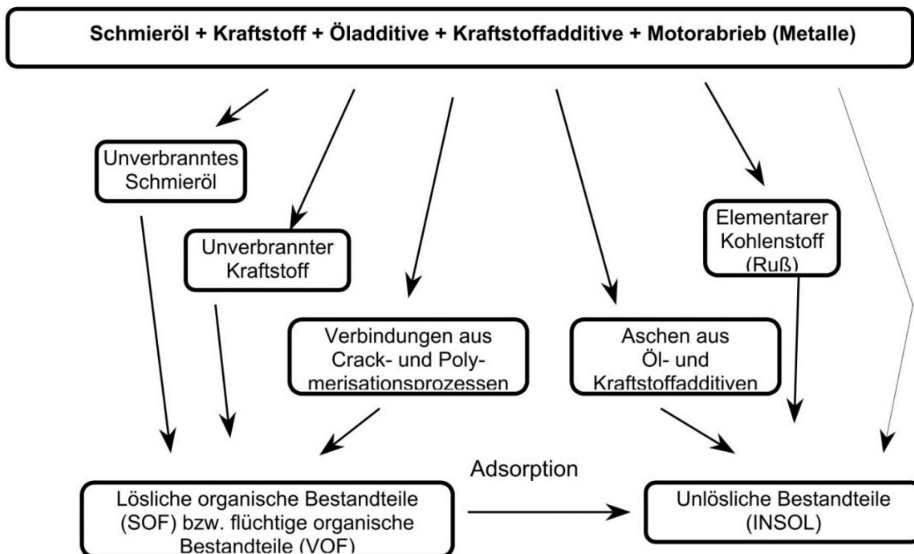


Abbildung 2.2: Klassifizierung von Partikeln nach deren physikalischem Verhalten [63]

2.1.2 Rußbildung

Nach Dageförde [44] werden derzeit unterschiedliche Rußbildungshypothesen - wie die Elementarkohlenstoffhypothese und die Polyzyklenhypothese - angewendet, wobei nach aktuellem Forschungsstand kein ganzheitliches Erklärungsmodell zur Rußbildung vorliegt.

In Abbildung 2.3 sind die einzelnen Phasen der Rußbildung nach Bockhorn [70] und Mayer [71] dargestellt. Bei der Umsetzung des Brennstoffs (Pyrolyse) kommt es zur Bildung von Benzolringen, die weiterwachsen und molekulare Rußvorläufer in Form von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen bilden. Die Nukleation (Partikelbildung aus gasförmigen Reaktanden) dieser Rußkeime führt zur Bildung von Rußprimärpartikeln, die durch Oberflächenwachstum und Koagulationsprozesse zu größeren

2 Stand der Technik

Partikeln werden und agglomerieren, wodurch die Partikelanzahl sinkt und die Partikelmasse steigt.

Ein während der unterschiedlichen Phasen parallellaufender Prozess ist die Oxidation. Durch die Nachoxidation im Brennraum unter den Randbedingungen aus hinreichend hoher Temperatur und vorhandenem molekularem Sauerstoff oder Hydroxylradikalen (OH-Radikalen) wird eine signifikante Reduktion der Partikel erreicht [72]. Nach Merker et al. [73] gelangt nur circa 1 bis 10 % der maximal im Brennraum gebildeten Rußmenge in den Abgastrakt.

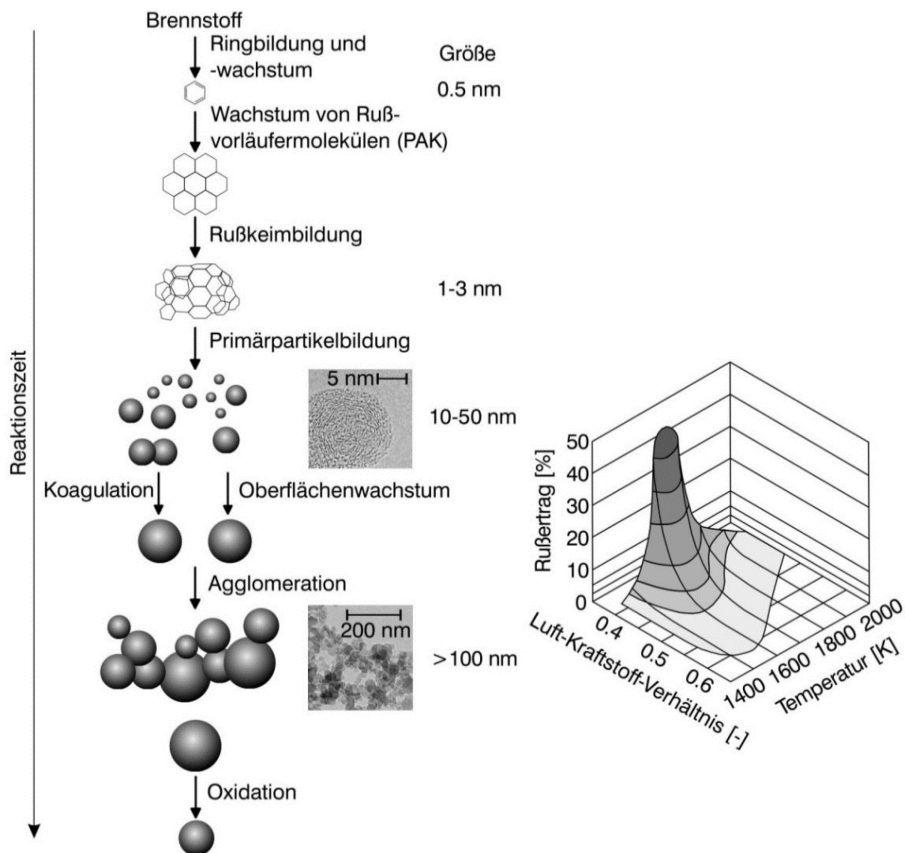


Abbildung 2.3: Phasen der Rußentstehung nach Bockhorn [70] und Mayer [71], Abbildung aus [44]

Der Rußertrag ist abhängig von den im Brennraum vorliegenden Randbedingungen. Im Temperaturbereich zwischen 1600 und 1800 K mit fettem Gemisch bei einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis um 0,4 ergibt sich der höchste Rußertrag. Bei einer diffusionskontrollierten Verbrennung im Zylinder liegen lokal sehr unterschiedliche Luft-Kraftstoff-

Verhältnisse und Temperaturen vor, die durch eine inhomogene Gemischbildung, wie Kraftstoffanreicherung an der Zylinderwand, am Injektor oder durch Herausdiffundieren von Kraftstoff aus dem Feuersteg zu erhöhter Rußbildung führen können [45, 74, 75].

2.1.3 Partikeldynamik und Transformation

Die Partikel unterliegen von ihrem Entstehungsort lokal im Brennraum über den Abgastrakt bis zum Auspuff sowie folgend der Freisetzung in die Atmosphäre (und ebenso während der Messung) unterschiedlichen physikalischen und chemischen Prozessen. Nach Kittelson et al. [76] erfolgt eine Einteilung der Prozesse in Partikel-zu-Partikel-Prozesse und die Umwandlung gasförmiger Stoffe in Partikel.

2.1.3.1 Partikel-zu-Partikel-Prozesse

Partikelverluste im Abgassystem und durch die Partikelprobenahme werden durch folgende Partikel-zu-Partikel-Prozesse hervorgerufen:

- Thermophorese
- Diffusionsverluste
- Koagulation
- Massenträgheitseffekte
- Elektrostatische Abscheidung
- Chemische Reaktionen

Bei der Thermophorese werden durch einen Temperaturgradienten Partikelbewegungen aufgrund eines molekularen Impulsaustauschs zwischen den Gasmolekülen hervorgerufen. Im Bereich der höheren Temperatur herrscht eine größere Molekularbewegung und somit ein höherer Impuls vor als in kälteren Bereichen, wodurch sich ein Partikel in Richtung der kälteren Bereiche bewegt. Bei kleineren, hochmobilen Partikeln wirken sich die thermophoretischen Kräfte stärker aus. Hierdurch kommt es insbesondere im Abgassystem und den Probenahmeleitungen bei zu geringen Temperaturen zu Partikelablagerungen, die sich unvorhersehbar wieder lösen und die Partikelmessung beeinflussen können [76 bis 78].

Diffusionsverluste entstehen durch Konzentrationsunterschiede, die von den Partikeln ausgeglichen werden und in die dünne Grenzschicht mit hohen Stoffübergangskoeffizienten an den Wänden diffundieren. Dieser Effekt ist ebenso wie die Thermophorese bei kleinen Partikeln stärker ausgeprägt [76].

Als Koagulation bezeichnet man die Kollision von Partikeln, bei der die Gesamtmasse der Partikel erhalten bleibt, aber die Partikelanzahl reduziert wird, wodurch sich folglich auch die Partikelgrößenverteilung ändert [61]. In Bezug auf die Partikelprobenahme zeigt sich eine Abhängigkeit des Verdünnungsverhältnisses, da bei höheren Verdünnungsraten eine geringere Kollisionswahrscheinlichkeit zwischen den Partikeln vorliegt [76].

Durch die Massenträgheit können die Partikel dem Abgasstrom zum Beispiel bei einer Abgasführung in engen Rädern oder abrupten Durchmesseränderungen (Blenden) nicht folgen. Hierbei können Partikelablagerungen im Abgasstrang entstehen, die sich zu unbestimmten Zeitpunkten unter anderem durch Erschütterungen oder Gasstöße lösen können. Weiterhin kann insbesondere bei größeren Partikeln die Massenträgheit zu Falschmessungen durch eine nicht vorhandene isokinetische Probenahme führen [76]. Bei Entnahme eines Teilstroms aus dem Abgas liegt eine isokinetische Probenahme vor, wenn die Entnahmegeschwindigkeit der Abgasgeschwindigkeit entspricht.

Die elektrostatische Abscheidung von Partikeln kann in elektrisch aufladbaren Probenahmeleitungen vorkommen. Da Abgaspartikel aus der Verbrennung größtenteils (bis zu 85 %) elektrostatisch geladen sind, werden diese in Probenahmeleitungen durch das elektrische Feld und die daraus resultierende Kraft abgelenkt. Die elektrische Mobilität geladener Partikel nimmt mit größeren Partikeln zu, wodurch die elektrostatischen Verluste bei diesen Partikeln am größten sind [76, 77].

Photochemische Reaktionen der Partikel in der Atmosphäre sind für die Partikelmessung am Verbrennungsmotor nicht relevant und werden daher nicht weiter betrachtet.

2.1.3.2 Umwandlung gasförmiger Stoffe zu Partikeln

Die Umwandlung gasförmiger Stoffe, insbesondere von flüchtigen, organischen Bestandteilen (SOF) erfolgt nach Kittelson et al. [76] durch Adsorption an bereits bestehenden Partikeln oder durch Keimbildung (Nukleation).

Für Kondensationsvorgänge muss eine gewisse Übersättigung vorliegen. Adsorptionsprozesse können hingegen schon ohne eine Übersättigung auftreten. Die Adsorptions- und Kondensationsprozesse sind abhängig von den Sättigungsverhältnissen der verschiedenen organischen Spezies, der zur Adsorption verfügbaren Oberfläche der Partikel, der Adsorptionsenergie und der verfügbaren Zeit für die Adsorption.

Die Adsorption von löslichen, organischen Bestandteilen erhöht die Größe und Masse der Partikel, wobei gleichzeitig die gasförmige Kohlenwasserstoffkonzentration