

## Messtechnische Beurteilung von Kabinenluftfiltern

---

Bert Ilgen  
fiatec Filter & Aerosol Technologie GmbH  
Am Gries 1, 95336 Mainleus

### 1. Historischer Abriss

Die Entwicklung des Kabinenluftfilters, auch als Innenraumfilter bezeichnet, setzte im Jahre 1987 mit dem letzten von Saab eigenständig entwickelten Automodell ein, dem Saab 9000. Dieser verfügte optional über einen Partikelfilter für die Aufreinigung der in die Fahrgastzelle angesaugten Aussenluft. Damit war der Gedanke geboren, neben Motorluft und Treibstoff auch die Luft für den Fahrgastraum zu filtern.

Die Idee war der Tatsache geschuldet, dass ein zunehmendes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein und die Frage nach schadstoffärmerer Luft die Entwickler in den Zentren der Automobilindustrie erfasst hatte. Diesem Trend folgten dann Volkswagen, Mercedes Benz und andere, wobei die Mercedes S-Klasse mit ihrer Modellreihe R129 die erste serienmäßig ausgestattete Modellreihe war. Die Konzepte beinhalteten zunächst die Vorstellung, dem allergieauslösenden Polleneintrag eine Barriere entgegenzusetzen, immerhin ein Problem für ca. 2 Millionen Menschen allein in Deutschland. Zu diesem Zeitpunkt war die Vorstellung neben Partikeln auch Gerüche und gasförmige Schadstoffe durch diese Filterelemente zu eliminieren, bereits geboren, erreichte aber bei weitem noch nicht die Marktrelevanz wie die nur auf die Abscheidung der Partikelphase ausgelegten Filterelemente. Als Adsorber kamen, und das fast ausschliesslich, Blockstrukturen zum Einsatz. Deren Hauptabnehmer waren Hersteller der Ober- und Luxusklasse. Insbesondere Mercedes-Benz hatte diesbezüglich eine Vorreiterrolle inne.

Dieser Markt sollte sich erst mit einer Verzögerung von mehreren Jahren zu einem Massenartikelmarkt entwickeln. Der Durchbruch erfolgte Mitte der 90-er Jahre nach der flächendeckenden Einführung der Hybridvliese und damit einer kostengünstigen Alternative zu den Blockstrukturen. Damit wurde der Zugang zu den Herstellern geschaffen, deren Kerngeschäft Automobile der Mittel- und Kompaktklasse sind. Entsprechend rasant entwickelte sich dieser Markt, da nunmehr Stückzahlen in der Grössenordnung von Millionen Stück pro Jahr gefragt waren.

Mittlerweile sind diese Filter ein Massenartikel. Für nahezu jedes Modell des deutschen und europäischen Marktes sind Filter am Markt erhältlich. Bei bestimmten Automarken und -typen gehören sie zur Serienausstattung. Der Markt für Kombifilter ist weiterhin ein Wachstumsmarkt in Europa. In Nordamerika und Asien ist er derzeit

als unterentwickelt anzusehen, was im Wesentlichen durch das geringer ausgeprägte Umwelt- und Gesundheitsbewußtsein und ein problematisches Marketing erklärt werden kann.

Dem sich entwickelnden Bedarf der Automobilindustrie stellten sich die Filterhersteller. Auch Quereinsteiger, die frühzeitig den sich bildenden Markt erkannten, waren aktiv. Die Folge war eine Vielfalt von Produkten und eine ebenso grosse Vielfalt von Bewertungsmethoden der Filtrationsqualität, angefangen von klassischen gravimetrischen Verfahren, spektralen Messverfahren, Lichttransmission, Fotoemission bis hin zu dem sich in zunehmenden Maße etablierenden optischen Partikelzählverfahren. Damit sahen sich die Abnehmer dieser Produkte, die Automobilindustrie sowie der Ersatzteilhandel, mit dem Problem der Vergleichbarkeit des vorgelegten Datenmaterials konfrontiert.

Es lag zwingend nahe, eine Vereinheitlichung der Bewertungskriterien herbeizuführen. Dieses Bestreben führte letztendlich 1991 im Auftrag des DIN zur Einberufung eines nationalen Normungsausschusses im Fachausschuss für Kraftfahrzeugtechnik (FAKRA) unter dem Dach des Verbandes der Deutschen Automobil-industrie VDA, indem alle namhaften deutschen Automobil- und Filterhersteller vertreten waren. Ziel der Normung war es, vergleichbare Prüfungen an Filtern gleicher Form und Grösse bei gleicher Einbaulage festzulegen.

In der ersten Normungsphase konzentrierte sich die Betrachtung auf die praktikable und kostengünstige Bewertung der Partikelabscheidung. Damit verbunden waren folgende Punkte zu klären:

- Bewertungsgrößen für die Partikelabscheidung einschliesslich des zu vermessenden Partikelgrößenbereiches und der Messtechnik
- detaillierter Testaufbau einschliesslich Probenahme
- Prüfstaub

Für die Beurteilung der Abscheideleistung wurde neben der aus der Motorluftfilterprüfung bekannten und zu diesem Zeitpunkt im Bereich der Filterprüfung noch sehr gebräuchlichen Methodik der Gravimetrie auch die fraktionelle Bewertung diskutiert. Letztendlich entschied man sich für dieses Verfahren, da der qualitative Unterschied bezogen auf die Partikelgrößenklasse besser dargestellt werden kann. Der Informationsgehalt für den Entwickler und Nutzer ist deutlich höher.

Der Partikelgrößenbereich wurde als Kompromiss zwischen der atmosphärischen Staubverteilung sowie bekannten Pollengrößen und der verfügbaren Messtechnik auf 0,5 – 15 µm aerodynamisch festgelegt.

Darüber hinaus sollte die Staubaufnahme bzw. -abgabe als Synonym für das Lebensdauerverhalten des zu prüfenden Filterelementes ermittelt werden. Im Gegensatz zu bisherigen Vorgehensweisen entschied man sich für die ausschliessliche Ermittlung der Staubspeicherkapazität als gravimetrische Massenzunahme des Prüflings während der Staubbeladung. Als Abbruchkriterium wurde eine zu verein-barende Druckabfallerhöhung (Zunahme des Druckabfalls) definiert, im allgemeinen 200 Pa.

Der Testaufbau umfasst eine Prüfkammer mit einem Querschnitt 600 mm x 300 mm. In dieser Prüfkammer waren sowohl Staubaufgabe, das zu prüfende Filterelement als auch die an- und abströmseitige Probenahme zu integrieren. Der Ansatz bestand darin, die Prüfanlage vertikal in Laboren und Produktionsräumen aufstellen zu können. Die vertikale Anordnung wurde von Anfang an favorisiert, um die bei horizontaler Bauweise häufig zu beobachtende und die Interpretation der Filterabscheideleistung erschwerende Sedimentation auszuschliessen. Eine schematische Darstellung der Prüfkammer ist in Bild 1 zu sehen.

Damit verbanden sich die Lösung folgender Fragen:

- Wie muss die Staubaufgabe erfolgen, damit eine Staubverteilung mit nahezu gleicher Konzentration und Partikelgrössenverteilung über dem gesamten Querschnitt der Prüfkammer erfolgen kann?
- Wie ist eine repräsentative Probenahme durchzuführen?

Diese Fragen waren nur in Verbindung mit der Auswahl des Prüfstaubes zu lösen. In Anlehnung an die Prüfung von Motorluftfiltern und aufgrund der weltweiten Verfügbarkeit und Akzeptanz wurde auf Stäube nach SAE J726 [1] (SAE-Stäube) orientiert, welche damals bereits weltweit in der DIN ISO 5011 - Luftfilter für Verbrennungsmotoren und Kompressoren normiert waren. Aufgrund der höheren Partikelanzahlkonzentration im Bereich  $> 5 \mu\text{m}$  und der damit verbesserten Messstatistik in diesem Partikelgrössenbereich wurde die Klassifikation „grob“ gewählt, bekannt auch unter der umgangssprachlichen Bezeichnung „SAE grob“.

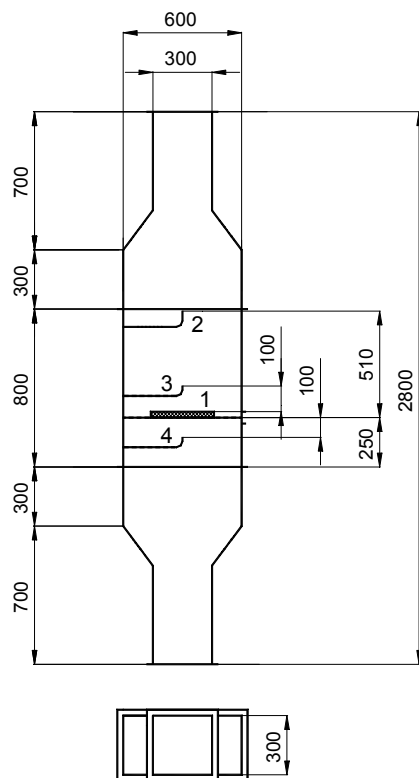


Bild 1:  
 Schematische Darstellung der  
 Prüfkammer nach DIN 71460  
 einschliesslich Dimensionierung

- 1 Filterelement
- 2 Staubaufgabe
- 3 Probenahme anströmseitig
- 4 Probenahme abströmseitig

Nach Abschluss der ersten Normungsphase Anfang 1993 wurde die Bewertung der Abscheideleistung gegenüber Gerüchen und Schadgasen betrachtet. Zu diesem Zeitpunkt wurden entsprechend gestaltete Filterelemente bereits in einigen Fahrzeugen eingesetzt.

Der Prüfstands Aufbau wurde aus dem Teil 1 – Prüfverfahren für Partikelfiltration übernommen. Folgende Festlegungen mussten getroffen werden:

- Prüfgase, die als Substitute für eine grosse Anzahl von in die Atmosphäre emittierte Substanzen geeignet waren und mit denen die Filterelemente primär konfrontiert werden
- Konzentrationen, mit denen die Filterelemente zu beaufschlagen waren
- Toleranzen für Temperatur und relative Luftfeuchte, die für die Reproduzierbarkeit derartiger Untersuchungen eine grosse Bedeutung besitzen.

Als Prüfgase konnte man sich auf die Kohlenwasserstoffe n-Butan ( $C_4H_{10}$ ) und Toluol ( $C_7H_8$ ) sowie auf die säurebildenden Gase Schwefeldioxid ( $SO_2$ ) und Stickstoffdioxid ( $NO_2$ ) verständigen. Damit sollte ein breites Anforderungsprofil an die zum Einsatz kommenden Adsorberfilter gestellt werden. Physiologische Überlegungen spielten eine untergeordnete Rolle.

Die Festlegung der Prüfkonzentrationen von 80 ppm für die Kohlenwasserstoffe und 30 ppm für  $SO_2$  und  $NO_2$  wurden als Kompromis zwischen den bekannten Umweltkonzentrationen und der aus Zeit- und Kostengründen im Vorfeld definierten Forderung nach Einsatz von online-Messverfahren definiert. Ausschlaggebend waren die zu diesem Zeitpunkt kommerziell verfügbare Messtechnik, die zu einem vertretbaren Kostenaufwand erworben werden konnte.

Für Adsorptionsvorgänge ist hinreichend bekannt, dass die Lage des Adsorptionsgleichgewichtes starke Abhängigkeiten von den thermodynamischen Parametern Temperatur, Feuchte und Druck zeigt. Insbesondere die Änderung des Wasserdampfgehaltes kann zu erheblichen Problemen bei der Reproduktion und Interpretation von Messdaten führen. Deshalb mussten die Forderungen hinsichtlich der zulässigen Toleranzen gegenüber dem Teil 1 der Norm erheblich verschärft werden. Um den technischen Aufwand und damit die Kosten gering zu halten, verständigte man sich auf einen Temperaturbereich von  $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  sowie  $50\% \pm 3\%$  für die relative Feuchte, wohlwissend dass die damit zugelassenen Toleranzen hinsichtlich einer hohen Reproduzierbarkeit nicht genügen.

Im Ergebnis des Normungsvorhabens entstand somit die DIN 71460 - Luftfilter für Kraftfahrzeuginnenraum (Entwurf). Damit waren verfahrenstechnische Grundlagen geschaffen, die als Vorlage für nachfolgende nationale und internationale Normungen sowie bei der Erstellung von konzerneigenen Spezifikationen diente.

## **2. Gegenwärtiger Stand der nationalen und internationalen Normung**

Die nationale Normungsarbeit wurde mit der Überleitung in die ISO-Norm 11 155 [2] nahezu eingestellt. Damit war allerdings eine Stagnation in der fachlichen Arbeit verbunden. Den internationalen Harmonisierungsbestrebungen der beteiligten Unternehmen wurde aber der Vorzug gegeben. Damit sollte auch der zu diesem Zeitpunkt erhebliche Vorsprung im internationalen Wettbewerb gesichert werden. Der Stand der Filterentwicklung und Normung war in Deutschland dem internationalen Entwicklungsstand anfänglich weit voraus. Insbesondere in den USA und Japan begann zu diesem Zeitpunkt erst die fachliche Auseinandersetzung mit diesem Thema.

Bei der internationalen Normung konnte mittlerweile in wesentlichen Sachfragen Übereinstimmung erzielt werden. Der 1. Teil des Normungswerkes, welches in Analogie zur DIN 71460 die Prüfung der Partikelabscheidung beschreibt, ist nun fertiggestellt. Allerdings wurden die ursprünglichen Zeitpläne für die Verabschiedung des zunächst zweiteiligen Normungswerkes erheblich überschritten. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, die in Anlehnung an andere Filtrationsstandards die Einführung einer Klassifikation zum Ziel haben. Das Meinungsbild dazu ist sehr differenziert. Soweit eine vereinheitlichte Position gefunden werden kann, sollen diese in einem Teil 3 festgehalten werden.

Parallel dazu wurden die zur Anwendung kommenden Prüfstäube in der ISO 12103 [3] normativ beschrieben. Der Teil 1 beschreibt dabei die bisher als „SAE“-Stäube bekannten mineralischen Prüfstäube.

Über einen längeren Zeitraum wurde schwerpunktmäßig über die Neutralisierung des Prüfaerosols und dessen messtechnischer Bewertung, die zu verwendeten Prüfstäube und die forderbaren und technisch realisierbaren Toleranzen der Parameter Temperatur und Relativefeuchte diskutiert. Die Frage der Neutralisierung wurde aus fachlicher Sicht nicht eindeutig geklärt und liefert weiterhin keine nachvollziehbare Festlegung. Die Festlegung von zwei Prüfaerosolen für die Bewertung der Partikelabscheidung, Kaliumchlorid (KCl) und A2 nach ISO 12103 (ehemals SAE fein) erschwert infolge deren unterschiedlicher Ladungszustände und der Probleme bei der Definition der Neutralisierung die Vergleichbarkeit von Messdaten.

Sowohl für die Partikelabscheidung als auch für die Adsorption wurden in den vergangenen Jahren internationale Rundversuche durchgeführt. Die Ergebnisse für die Adsorptionsversuche ergaben eine recht gute Übereinstimmung zwischen den beteiligten Laboratorien. Auf Basis dieser Versuche wurden allgemeine Bewertungskriterien für die Ermittlung der Sofortdurchbrüche festgeschrieben. Als Prüfschubstanzen wurden in Anlehnung an DIN 71460 (Entwurf) die Gase n-Butan und

Toluol mit jeweils 80 ppm Rohgaskonzentration und 30 ppm Schwefeldioxid festgelegt. Optional sind eine Reihe weiterer Substanzen zulässig, deren Anwendung zwischen

Kunden und Lieferanten zu vereinbaren sind. Ebenfalls in Analogie zur DIN 71460 wurden die Prüftemperatur zu  $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ , die relative Feuchte zu  $50\% \pm 2\%$  festgelegt. Die Bedingung für die Relativefeuchte wurde dabei etwas verschärft, da mittlerweile eine derartige Regelgenauigkeit erreicht werden kann und diese wie bereits erwähnt die Reproduzierbarkeit verbessert. Die Filterelemente sind vor Beginn der Prüfung 15 Minuten unter Prüfbedingungen zu konditionieren.

Der Rundversuch zur Partikelabscheidung ergab gravierende Abweichungen zwischen den Laboratorien. Die Diskussion über die Ursachen wurde nicht abgeschlossen. Im wesentlichen sind diese aber im elektrischen Ladungszustand der Prüfaerosole und in der verwendeten Partikelmesstechnik zu suchen. Trotzdem entschloss man sich dazu, die Normung abzuschliessen. Geplant ist eine grundlegende Überarbeitung im Rahmen der im 5-Jahresrythmus durchzuführenden Revision.

Inwieweit die ISO 11155 die Akzeptanz der DIN 71460 erreichen wird, bleibt fraglich. Viele OEM-Spezifikationen bauen auf der DIN-Normung auf. Dabei ist weiterhin eine grosse Vielfalt zu beobachten. Eine Änderung dieser Situation ist derzeit nicht erkennbar und wird auch zunehmend unwahrscheinlicher, da sich diese Standards über mehrere Jahre etablieren konnten.

### **3. Abgrenzung der Kabinenluftfilter zu anderen Filteranwendungen und -gestaltungen**

Für die messtechnische Beurteilung sind Anwendung und Gestaltung eines Filters von entscheidender Bedeutung. Zum besseren Verständnis soll deshalb in diesem Kapitel eine Abgrenzung dargestellt werden, um die Spezifika des Kabinenluftfilters aufzuzeigen.

Wie grenzt sich dieses Produkt gegen andere vergleichbare Produkte ab?

- Abgrenzung bezogen auf die Anwendung
- Abgrenzung bezogen auf die Gestaltung/Form
- Abgrenzung bezogen auf den physikalisch-chemischen Adsorptionvorgang

#### **3.1 Abgrenzung bezogen auf die Anwendung**

Der Kfz-Innenraumfilter ist infolge seiner Einbau- und Anwendungssituation sehr unterschiedlichen Einsatzbedingungen ausgesetzt. Maßgeblich sind dabei die stark variierenden äußeren und inneren Bedingungen in der Gasphase.

Zu den äußeren Bedingungen zählen dabei die stark schwankenden thermodynamischen Parameter Lufttemperatur, -feuchte und -druck sowie die von der jeweiligen Region und dem konkreten Fahrort abhängige stark wechselnde Schadgaszusammensetzung und deren um mehrere Größenordnungen veränderliche Konzentration in der angesaugten Aussenluft, die jeweilige Fahrgeschwindigkeit und die durch den Fahrbetrieb auftretenden Erschütterungen. Zu den inneren Bedingungen gehören der Luftdurchsatz (Gebläsestufe), Temperaturschwankungen im Motorraum und eventuell auftretende Eigenemissionen durch Ausstattung und Fahrzeuginsassen (z.B. Zigarettenrauch im Umluftbetrieb). Bei der Anwendung im Kfz ergeben sich bedingt durch die verfügbaren Baufreiheiten und Komfortkriterien und nicht zuletzt durch die besondere Gestaltung des Filtermediums Erfordernisse, die zu spezifischen Auslegungen geführt haben und sich damit deutlich von anderen Anwendungen in der Industrie und in der Gebäudeklimatisierung abheben.

### **3.2 Abgrenzung bezogen auf die Gestaltung**

Die Anströmgeschwindigkeiten bezogen auf die verbaute Medienfläche sind vergleichbar mit anderen Filteranwendungen aus der Luftreinhaltung. Die verbauten Medienflächen sind dem äquivalent und liegen im Mittel bei ca. 0,4 - 0,5 m<sup>2</sup>.

Neben den ausschliesslich für die Partikelfiltration konzipierten Filtern haben sich weitere Bauformen am Markt etabliert, deren Anwendung auf die Abscheidung gasförmiger Luftbestandteile ausgerichtet ist. Dafür haben sich verschiedene Begriffe eingebürgert. Je nach Ausführung und Hersteller werden sie als Kombi-, Hybrid- oder Geruchsfilter vermarktet, wobei der Geruchsfilter ein rein adsorptiv wirkender Abscheider ist.

Die Kombi- bzw. Hybridfilter sind eine Synthese aus Partikel- und Adsorberfilter und stellen damit eine völlig neue technische Entwicklung dar. Sie bestehen aus mehreren Lagen, wobei die Oberen im allgemeinen partikelabscheidende Vliese sind (Umkehrungen dieser Anordnung sind nicht ausgeschlossen). Darunter befindet sich dann auf einem Trägervlies das Adsorbens (Aktivkohle). Die Gesamtstärke des Filtermediums beträgt dabei nur wenige Millimeter. Derartige Medien haben bisher flächendeckend nur im Automobilbereich Anwendung gefunden.

Die rein adsorptiv wirkenden Geruchsfilter bestehen aus mehreren, einige Millimeter dicken Lagen eines Polyurethanschaumes, der mit Aktivkohlepartikeln versetzt ist. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „Blockstrukturen“. Diese Filter fanden und finden aber nur in speziellen Fahrzeugen der Ober- und Luxusklasse Anwendung. Der Marktanteil kann als gering und rückläufig eingeschätzt werden.

Gelegentlich werden Sonderbauformen vorgestellt, die aber fast immer Entwicklungsmuster darstellen. Auf diese Bauformen soll nicht weiter eingegangen werden.

Kfz-Innenraumfilter weisen bedingt durch das Anwendungsgebiet eine gestalterische Vielfalt der Formen auf, wie sie von keinem anderen Anwendungsgebiet bekannt sind. Damit ergeben sich spezielle Probleme bei der Entwicklung, Prüfung und der Qualitätssicherung.

### 3.3 Abgrenzung bezogen auf den physikalisch-chemischen Adsorptionsprozess

Die physikalischen und chemischen Prozesse eines Kfz-Innenraumfilters, die während des Adsorptionsprozesses ablaufen, unterscheiden sich nicht von denen anderer Anwendungen. Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings darin, dass für nahezu alle Substanzen keine Massenübergangszone vorhanden ist, was fast ausnahmslos zu einem sofortigen Durchbruch des jeweiligen Gases führt.

Die Massenübergangszone beschreibt dabei das Konzentrationsgefälle bestimmter Komponenten innerhalb des Adsorbers. Erreicht die Massenübergangszone das Ende der Adsorbenschicht, tritt Durchbruch auf. Bei industriellen Anwendungen wird dieser Fall im allgemeinen ausgeschlossen bzw. zu diesem Zeitpunkt der Adsorber ausgetauscht oder regeneriert. Bei der Anwendung im Kfz ist dieser Vorgang infolge der geringen Schichthöhe meist nicht zu vermeiden. Damit ergaben und ergeben sich neue spezifische Betrachtungsweisen und Bewertungskriterien.

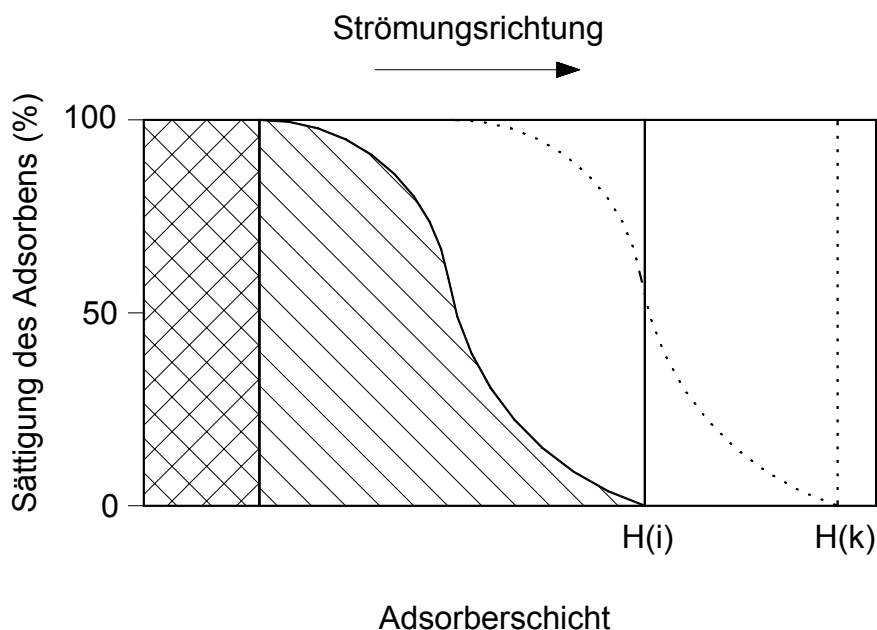


Bild 2: Schematischer Verlauf der Konzentrationsverteilung in einer Adsorbenschicht der Höhe  $H$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t(i)$  und deren Verschiebung bis zum Zeitpunkt  $t(k)$

Für die Anwendung in Kfz-Innenraumfiltern sind alle in der industriellen Anwendung bekannten und verfügbaren Adsorbentien verwendbar, allerdings werden derzeit bedingt durch die Kostensituation nur Aktivkohlen eingesetzt. Diese sind eventuell imprägniert, katalytisch aktiviert bzw. mit Beimischungen versehen.

## **4. Messtechnische Beurteilung von Partikel- und Adsorberfiltern**

### **4.1 Partikelabscheidung**

Für die Bewertung von Kabinenluftfiltern kommen heute ausschliesslich fraktionierende Messverfahren zur Anwendung, die in der Lage sind, ein Partikelspektrum kontinuierlich grössenbezogen zu vermessen. Dabei wird der Partikelgrössenbereich in eine technisch festgelegte Anzahl von „Kanälen“ aufgeteilt. Je mehr Kanäle ein Messgerät besitzt, desto auflösender ist das Messergebnis. Aus diesen Kanälen werden dann durch Zusammenfassung „Fraktionen“ gebildet. Ein Messgerät kann maximal nur so viele Fraktionen darstellen wie es Kanäle besitzt.

Nach Abschluss der Messung erhält man eine mehr oder weniger aufgelöste Partikelgrössenverteilung. Aus dem Vergleich der Grössenverteilungen vor und nach dem Filter erhält man dann dessen Effizienz, den sogenannten Fraktionsabscheidegrad.

In Abhängigkeit von der physikalischen Messgrösse werden die für die Filterprüfung verwendeten Messgeräte in Streulichtpartikelzähler, aerodynamische Partikelzähler und Mobilitätsspektrometer (DMA) unterschieden. Zu diesen Geräten sind in den letzten Jahren und Jahrzehnten zahlreiche Publikationen erschienen. Deshalb soll an dieser Stelle nur eine kurze Darstellung des Messprinzips erfolgen.

#### *Streulichtpartikelzähler*

Streulichtpartikelzähler messen das an einem Partikel, wie der Name bereits sagt, gestreute Licht, dessen Intensität ein Maß für die Partikelgrösse ist. Technisch wurden die aus der Theorie (Mie-Theorie) bekannten Zusammenhänge in verschiedenen Messgeräten umgesetzt, deren Anwendung von dem zu detektierenden Partikelgrössenbereich und der Partikelkonzentration abhängen. Darin besteht ein erhebliches Anwendungsrisiko. Die Auswahl eines für den Anwendungsfall ungeeigneten Partikelzählers kann zu erheblichen Fehlern in der Beurteilung der Filtereffizienz führen.

Streulichtzähler haben insbesondere wegen ihrer günstigeren Anschaffungskosten die weiteste Verbreitung gefunden. Der verfügbare Messbereich überdeckt den für die Beurteilung der Filtrationswirkung relevanten Grössenbereich und liegt je nach Hersteller zwischen 0,1 – 20 µm. Anwendungsprobleme treten insbesondere auf bei sehr dunklen (Russ), transparenten sowie stark von der Sphärität abweichenden Partikeln. Hersteller dieser Messgeräte sind z.B. Palas GmbH, Topas GmbH und Particle Technology, Inc.

#### *Aerodynamische Partikelzähler*

Aerodynamische Partikelzähler bewerten das Trägheitsverhalten der Partikel. Dazu werden diese in einer Düse impulsartig beschleunigt. Die dabei dem Partikel aufgeprägte Geschwindigkeit ist von seiner Masse abhängig. Der Zusammenhang zwischen der Partikelgeschwindigkeit und der Partikelgrösse ist über das Stoke'sche

Gesetz beschrieben. Die Partikelgrössenmessung erfolgt als Bestimmung des Zeitintervalls für den Durchgang eines Partikels durch zwei Lichtschranken.

Der verfügbare Messbereich überdeckt den für die Beurteilung der Filtrationswirkung relevanten Grössenbereich und liegt je nach Hersteller zwischen 0,2 bis zu 200  $\mu\text{m}$ . Eine Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften ergibt sich lediglich für stark unspährische Partikel. Ein Beispiel für Geräte dieses Messprinzips ist der Aerodynamic Particle Sizer (APS) der Firma TSI Deutschland GmbH. Bild 3 zeigt eine Fraktionsabscheidegradkurve, die im Partikelgrössenbereich 0,7 – 15  $\mu\text{m}$  (aerodynamischer Durchmesser) mit Hilfe eines APS 3300 bestimmt wurde. Als Prüfstaub fand A2-Staub nach ISO 12103 (früher SAE fein) Verwendung.

#### *Mobilitätsspektrometer (DMA – Differential Mobility Analyzer)*

Mobilitätsspektrometer bewerten die Eigenbewegung von Partikeln in einem elektrischen Feld. Dazu wird das Aerosol an einer radioaktiven bipolaren Strahlungsquelle vorbeigeleitet und neutralisiert. Damit wird ein bipolare in der Summe neutrale Ladungsverteilung erzeugt. Anschliessend wird dieses Aerosol durch ein elektrisches Feld geleitet. Bei einer vorgegebenen Feldstärke werden alle Partikel bis zu einer bestimmten Grösse abgeschieden. Grössere Partikel verlassen den Abscheider (Electrostatical Classifier). Aus der Zuordnung von Spannung und Aerosolkonzentration kann auf die Aerosolverteilung geschlossen werden. Die Aerosolkonzentration wird über einen Kondensationskernzähler (CNC) ermittelt. Hierbei wird das Aerosol durch einen alkoholgesättigten Luftstrom geleitet, wodurch die Partikel definiert anwachsen. Anschliessend wird deren Konzentration mittels fotometrischer Messung bestimmt.

Der Messbereich liegt zwischen 0,005 und 1  $\mu\text{m}$ . Laut Herstellerangaben sind auch Partikelgrössen von 2 – 3  $\mu\text{m}$  noch detektierbar. Auf Grund des Messbereiches wird dieses Verfahren für die Bestimmung der Filterwirkung im Bereich submikroner Partikel eingesetzt.

Systeme, die in der Lage sind, die anliegende Spannung kontinuierlich zu verändern, werden als dynamische DMA bezeichnet. Ein Beispiel dafür ist der Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) der Firma TSI Deutschland GmbH. Die im Bild 3 dargestellte Fraktionsabscheidegradkurve im Partikelgrössenbereich 0,05 - 0,4  $\mu\text{m}$  (Mobilitätsdurchmesser) wurde mittels SMPS und Natriumchlorid-Aerosol bestimmt.

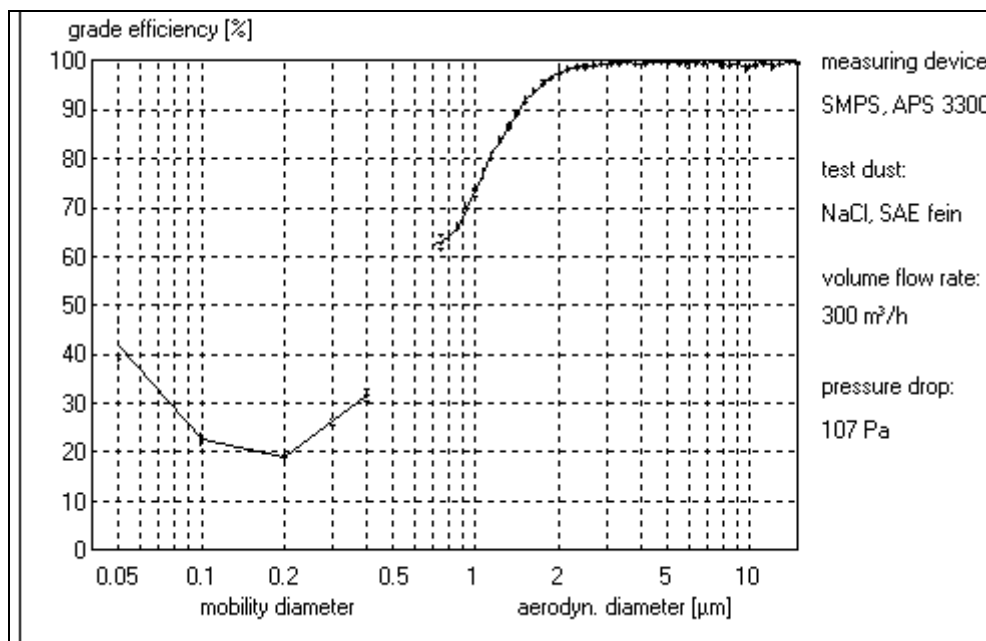


Bild 3: Fraktionsabscheidegradkurven die mit Hilfe eines SMPS und NaCl-Prüfstaub sowie eines APS 3300 mit Prüfstaub A2 (früher SAE fein) bestimmt wurden

Die mit den dargestellten Messverfahren gewonnenen Fraktionsabscheidegradkurven sind direkt nicht miteinander vergleichbar, aber über mathematische Formeln verknüpfbar. Für eine erste Näherung sind diese relativ einfach. Dabei wird als Bezugsgröße der geometrische Äquivalentdurchmesser definiert. Mobilitätsdurchmesser und optischer Durchmesser werden diesem gleichgesetzt. Der geometrische Äquivalentdurchmesser ist über die Wurzel aus der Partikelstoffdichte mit dem aerodynamischen Partikeldurchmesser verbunden und kann nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$d_g = d_{ae} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_p}} \quad (1)$$

Es bedeuten:

$d_g$	geometrischer Äquivalentdurchmesser in µm
$d_{ae}$	aerodynamischer Partikeldurchmesser in µm
$\rho_p$	Partikelstoffdichte in g/cm <sup>3</sup>

## 4.2 Adsorber

Das prinzipielle Ziel aller für Kabinenluftfilter zur Anwendung kommender Messprozeduren ist eine vergleichende Bewertung geometrisch ähnlicher Filterelemente. Dazu bedient man sich aus Zeit- und Kostengründen primär kontinuierlich arbeitender on-line-Messverfahren. Nachfolgend sollen die wesentlichen Messverfahren zur Bewertung von Adsorberfiltern und deren Anwendung mit ihrem Wirkprinzip kurz vorgestellt werden.

Alle Verfahren arbeiten nach dem Vergleichsprinzip. Die unbekannte Konzentration der zu messenden Substanz wird mit einer Kalibrierten verglichen. Die Signalausgänge sind linearisiert. Bei Messbereichsumschaltungen sind eventuell neue Kalibrierungen erforderlich. Die Anwendungen sind stark abhängig von den jeweilig einzustellenden bzw. zu erwartenden Konzentrationen.

### *Flammenionisationsdetektion*

Wirkprinzip:

An eine reine Wasserstoffflamme wird ein elektrisches Feld angelegt. Werden dieser Flamme über das Messgas organische Verbindungen zugeführt, entsteht ein messbarer Ionenstrom. Das Messsignal ist proportional zur Anzahl der zugeführten und nicht voroxidierten Kohlenstoffatome. Voroxidierte Kohlenstoffatome werden nur teilweise erfasst.

Anwendung:

Verwendet wird dieses Messprinzip für die Detektion von nahezu allen gasförmigen Kohlenwasserstoffen.

### *UV-Absorption (UV: Strahlung im ultravioletten Wellenbereich)*

Wirkprinzip:

Es wird UV - Licht einer bestimmten Wellenlänge erzeugt. Dieses Licht wird von den zu detektierenden Molekülen absorbiert. Die Intensitätsreduktion ist ein Maß für die Konzentration der Prüfsubstanz. Die Auswertung erfolgt über das Lambert-Beer'sche Gesetz. Die Detektion ist temperatur- und druckabhängig. Moderne Geräte messen diese Parameter intern und korrigieren den Messwert.

Anwendung:

Verwendet wird dieses Messprinzip z.B. für die Detektion von Ozon (O<sub>3</sub>).

### *UV-Fluoreszenz*

**Wirkprinzip:**

Wenn Moleküle mit Licht einer bestimmten Wellenlänge im ultravioletten Bereich bestrahlt werden, absorbieren sie diese zunächst. Innerhalb von Nanosekunden strahlen diese Moleküle ihrerseits Licht einer längeren Wellenlänge ab. Dieses ist substanzspezifisch und kann über geeignete Photodetektoren erfasst werden.

**Anwendung:**

Verwendet wird dieses Messprinzip z.B. für die Detektion von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>).

### *Chemilumineszenz*

**Wirkprinzip:**

Bei der Chemilumineszenz werden durch eine exothermen Reaktion von chemischen Verbindungen Lichtwellen ausgesendet. Über geeignete Photodetektoren können die Strahlungsintensitäten gemessen werden.

**Anwendung:**

Verwendet wird dieses Messprinzip z.B. für die Detektion von Stickoxiden, insbesondere für Stickstoffmonoxid (NO) bei der Reaktion mit Ozon (O<sub>3</sub>). Andere Stickoxide wie z.B. Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) werden vorab katalytisch zu Stickstoffmonoxid umgewandelt.

### *Elektrochemische Verfahren*

**Wirkprinzip:**

Bei elektrochemisch wirkenden Sensoren wird der Sachverhalt genutzt, dass bei der Adsorption chemischer Verbindungen an analytspezifischen Festkörperoberflächen eine konzentrationsabhängige Veränderung der Oberflächenleitfähigkeit auftritt. Über die Anlegung eines elektrisches Feldes entsteht ein Stromfluss. Dieser wird entsprechend verstärkt und detektiert.

**Anwendung:**

In den letzten Jahren ist es gelungen, für einige einfach strukturierte Gase, wie z.B. Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Sensoren zu entwickeln, deren Ansprechzeit vergleichbar mit denen anderer Messverfahren ist. Sie stellen eine kostengünstige Alternative dar.

### *Infrarotspektroskopie (IR)*

#### Wirkprinzip:

Das Prinzip der Infrarotspektroskopie beruht auf dem physikalischen Effekt des Plank'schen Wirkungsquantums. Moleküle schwingen mit bestimmten charakteristischen Schwingungen, die für die Bindungen im Molekül und damit für das Molekül selber charakteristisch sind. Diese Frequenzen liegen im infraroten Wellenlängenbereich. Bestrahlt man das Molekül mit Infrarotlicht, so absorbiert es die Wellenlängen, die den Molekülschwingungen entsprechen. Die Absorption wird detektiert und ist ein Maß für die Konzentration.

#### Anwendung:

Dieses Messverfahren hat in der Analytik eine weite Verbreitung gefunden. Das Ansprechverhalten ist aber stark zeitverzögert, so dass es heute nur noch bedingt für Messaufgaben in der Kabinenluftfiltration Anwendung findet.

### *Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie (FTIR-Spektroskopie)*

#### Wirkprinzip:

Beim FTIR handelt es sich um eine spezielle Methode der Infrarotspektroskopie mit einem verbessertem Auflösungsvermögen. Durch spezielle Techniken wird ein sogenanntes Interferogramm erstellt. Dieses ist die Summe aller Spektrallinien der Strahlungsabsorption einer Probe nach Wellenlänge und Intensität. Mit Hilfe der mathematischen Methode der Fourier-Transformation wird ein substanzspezifisches und konzentrationsabhängiges Messsignal von allen in der Probe enthaltenen gasförmigen Substanzen erzeugt.

#### Anwendung:

Diese Verfahren wird verwendet für die Multikomponentenanalyse, stellt aber derzeit ein noch recht kostenintensives Messverfahren dar.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Kalibrierung der Messgeräte. Viele Messverfahren sind stark druckabhängig, zum einen gegenüber Schwankungen des Atmosphärendruckes und zum anderen bezüglich des an der Probenahmestelle vorhandenen statischen Druckes. Da sich Kalibrierpunkte mit veränderlichen Druck (Unter-, Überdruck) verschieben können, ist es erforderlich, Messgeräte unter den Druckbedingungen des späteren Einsatzes zu kalibrieren.

Desweiteren hängt die Genauigkeit der Kalibrierung von der Qualität der gelieferten Kalibriergasgemische ab, meist Genauigkeiten von einigen %. Nicht selten „altern“ diese Gemische. Ihre Konzentration verringert sich.

Weiterhin müssen Querempfindlichkeiten berücksichtigt werden. So stellt es einen erheblicher Unterschied dar, ob Kalibriergase mit Stickstoff oder synthetischer Luft gemischt werden.

Als Prüfgase kommen die in der DIN 71460-2 sowie ISO TS 11155-2 genannten Gase n-Butan, Toluol und Schwefeldioxid zum Einsatz. Das ursprünglich in der DIN vorgeschriebene Stickstoffdioxid wurde als verbindliches Prüfgas wieder aus dem Standard genommen. Eine nach unserer Auffassung falsche Entscheidung. Desweiteren sind andere Gase entsprechend Vereinbarung zugelassen. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Werkstandards mit speziellen Forderungen bezüglich Prüfgasen und deren Konzentrationen. Die Auswahl der Prüfgase erfolgt im allgemeinen aus Gründen der Praktikabilität mit dem Anspruch, „Leitkomponenten“ für Gruppen chemischer Verbindungen zu finden. Dabei wurden und werden aber auch die Toxizität/Kanzerogenität, deren Verfügbarkeit sowie erforderliche Kosten für Dosierung und Beschaffung berücksichtigt. Maßgeblich war die Analyse des Autoabgases bzw. der Emissionen „rund“ um das Kraftfahrzeug.

Die heute üblichen und normativ vorgeschriebenen Prüfgaskonzentrationen stehen immer wieder in der Kritik. Diese Konzentrationen liegen deutlich über den Umweltkonzentrationen und richten sich im Wesentlichen an folgenden Fakten aus:

- Messfähigkeit
- Dosierbarkeit
- Versuchsdauer
- Kosten pro Versuch

Um die Versuchsdauer und Kosten zu optimieren, wurden in den Standards sogenannte Abbruchkriterien vorgeschrieben. Durchgesetzt haben sich Forderungen, die Untersuchungen bei 95% Durchbruch bzw. 5% Effizienz abubrechen. Die Festlegung anderer Abbruchkriterien kann sinnvoll sein, insbesondere bei Substanzen, die über Chemisorption gebunden werden. Hierbei können erhebliche Messzeiten von >10 Stunden bis zum Erreichen des 95% - Abbruchkriteriums auftreten.

Bild 4 zeigt einen exemplarischen Kurvenverlauf für eine dynamische Adsorption mit anschließender Desorption.

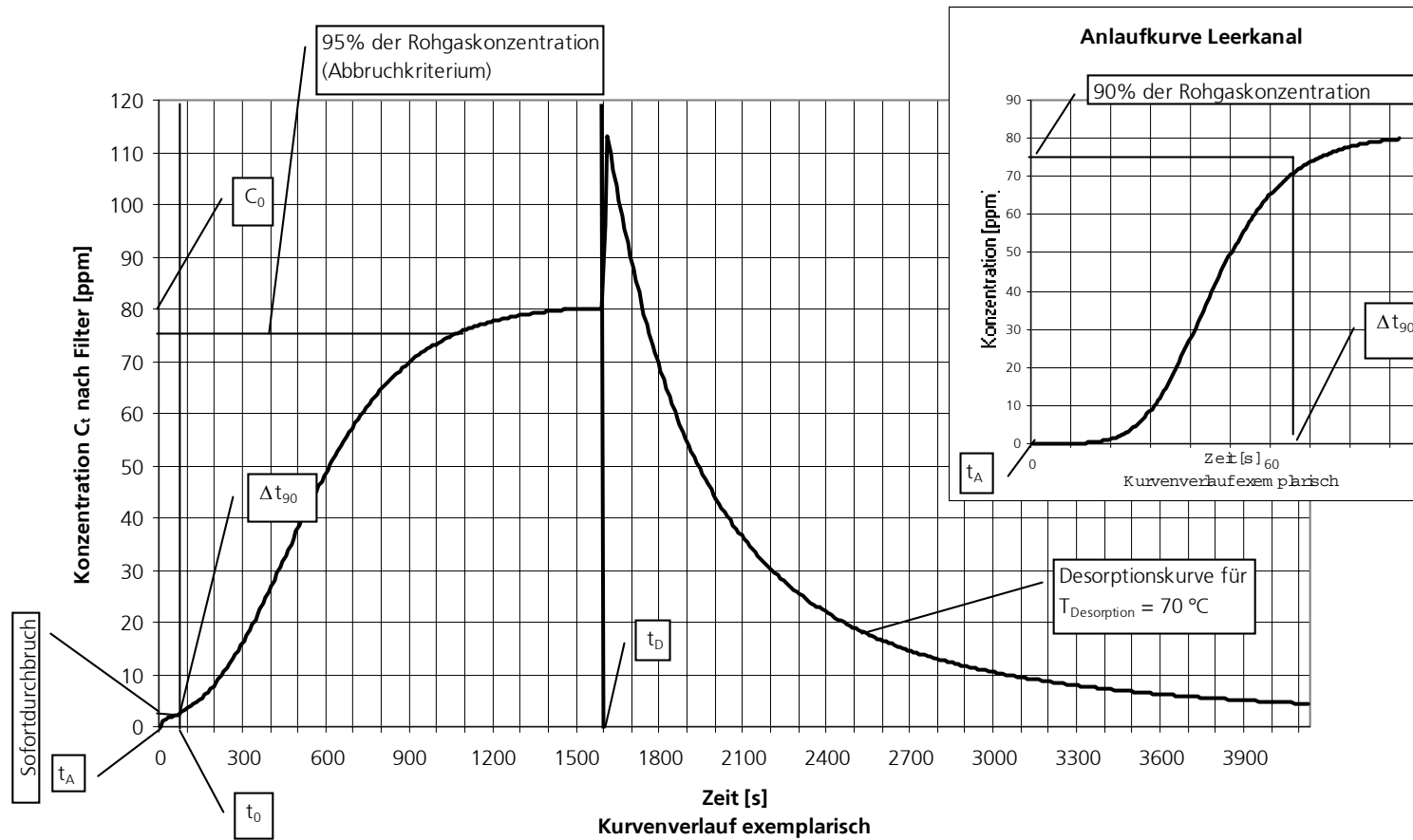


Bild 4: Exemplarischer Kurvenverlauf für eine dynamische Adsorption mit anschließender Desorption

## **5. Tendenzen und Sonderprüfungen**

Abschließend sollen einige Tendenzen und Sonderprüfungen aufgezeigt werden, die aus heutiger Sicht in den nächsten Jahren von wissenschaftlichen und technischen Interesse sein werden bzw. können. Ziel ist es, die labortechnischen Prüfungen in zunehmendem Masse den praktischen Einsatzbedingungen anzupassen, um exaktere Aussagen über das reale Verhalten der eingesetzten Filterelemente zu erhalten.

### **5.1 Prüfung der Partikelabscheidung**

Bezüglich der Weiterentwicklung im Bereich der Prüfung der partikulären Abscheidung sind derzeit nur wenige Trends auszumachen, deren zukünftige Bedeutung insbesondere in der Wechselwirkung mit anderen „Filternormen“ zu sehen sind.

Eine besondere Frage, die zum Teil bereits umgesetzt wurde und in einigen Werkstandards bereits enthalten ist, betrifft die Erweiterung des Messbereiches insbesondere in den submikronen Bereich, d.h. für Partikelgrößen kleiner  $0,5 \mu\text{m}$  bis in einen Bereich von  $100 \text{ nm}$  und kleiner. Hintergrund sind die besonders durch die Einführung der neuen Abgasnormen stark angestiegenen Partikelanzahlkonzentrationen von Dieselmotoremissionen in diesem Bereich, deren Einfluss auf die Standzeit der Kabinenluftfilter noch ungeklärt ist.

Ein derzeit sehr intensiv diskutiertes Thema ist das der Neutralisierung des Prüf-aerosols. Dort existieren seit Jahren unterschiedliche Ansätze. Mittlerweile setzt sich das Verfahren der Luftionisation mittels Koronaentladung durch. Problematisch ist nach wie vor die Bewertung des „Neutralisierungsgrades“. Hier gibt es zwar seit Jahren ein von der Fraunhofer-Gesellschaft entwickeltes Messgerät, welches aber bis zum heutigen Tage nicht kommerzialisiert wurde. Dieser Umstand erschwert den Einsatz im Rahmen der Normen.

Einen weiteren Punkt stellen Überlegungen zu möglichen Vorkonditionierungs- und Alterungsstrategien dar, die die Einbausituation im Kraftfahrzeug und die auf den Filter einwirkenden starken Schwankungen der thermodynamischen Parameter simulieren sollen. Damit verbinden sich auch Forderungen hinsichtlich geeigneter Werkstoffe.

Die derzeit in den Normen vorgeschriebenen Prüfaerosole sind Idealsubstanzen mit „Realitätsferne“. Bisherigen Bestrebungen, das „Umweltaerosol“ zu simulieren, wurden infolge der damit verbundenen Kosten insbesondere für Generatoren und dem Arbeitsaufwand bisher nicht akzeptiert und als zu akademisch abgetan. Aber gerade hier liegt ein Schlüssel für Prüfungen mit mehr Praxisrelevanz. Die besondere Schwierigkeit liegt im Gegensatz zu rein industriellen Anwendungen in der Vielfalt der auf den Filter einwirkenden „Aerosole“. Je nach Einsatzort oder Fahrtziel werden die

Filterelemente innerhalb kürzester Zeit mit unterschiedlichsten Aerosolen konfrontiert. Eine Verallgemeinerung erscheint bisher als extrem schwierige Aufgabe.

## 5.2 Prüfung der Adsorptionsleistung

Hauptaugenmerk ist auch hier die Übertragbarkeit der labortechnisch ermittelten Daten in die Praxis. Mit der technischen Weiterentwicklung ergeben sich auch hier neue Möglichkeiten, die normativen Festlegungen zu relativieren.

Eine besonders nachhaltig diskutierte Frage ist die der Prüfsubstanzen und ihrer „Zeigerfunktion“ (Repräsentanz für bestimmte Gruppen chemischer Verbindungen). Die heutige, in der ISO als Konsens festgelegte Verwendung der Verbindungen n-Butan, Toluol und Schwefeldioxid, wird immer wieder in Frage gestellt. Diese Substanzen sind heute mit Ausnahme des Toluols nur aus Gründen der Handhabbarkeit und des vorhandenen Datenmaterials zu rechtfertigen. Eine Praxisrelevanz kann für n-Butan kategorisch verneint werden. Die Konzentration von Schwefeldioxid in der Atmosphäre ist seit einigen Jahren stark rückläufig mit kontinuierlichem Trend und wird von anderen Substanzen, wie den Stickoxiden, in der physiologischen Bedeutung mittlerweile deutlich überholt.

Weiterhin sind die derzeit vorgeschriebenen Rohgaskonzentrationen langfristig nicht sinnvoll. Vergleichende Untersuchungen mit niedrigeren Konzentrationen zeigen gegebenenfalls ein verändertes Bewertungsbild. Der praktische Einsatzfall wird dabei nur bedingt berücksichtigt. Über Alternativen wird diskutiert, wie zum Beispiel Aldehyde, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und das leider in der DIN 71460 nicht mehr obligate Stickstoffdioxid.

Eine besondere Fragestellung verbindet sich mit dem Einsatz von Mischgasen, also parallelen Mehrkomponentenmessungen. Sinnvolle Kombinationen und Mischungsverhältnisse sind zu finden. Damit verbinden sich Fragen nach Querempfindlichkeiten der Messgeräte bzw. die Notwendigkeit des Einsatzes von Multikomponenten - Messverfahren, wie zum Beispiel FTIR.

Eine bisher unterrepräsentierte Prüfung ist die Desorption bei verschiedenen thermodynamischen Zuständen. Unter dem derzeit dominanten Gesichtspunkt des Einsatzes von Geruchsfiltern als Komfortprodukt spielt die Desorption eine besondere Rolle. Gerade von der Desorption hängt die Dauer der Verwendbarkeit des Filterelementes im starken Maße ab.

Ein weiterer Punkt ist der Einsatz neuer Materialien, d.h. die bessere Veredelung bisheriger Aktivkohlen, eine breitbandigere Ausrüstung gegenüber bestimmten Substanzgruppen, aber auch der Einsatz anderer Adsorbentien.

Der Anspruch einer vergleichenden Untersuchung sollte langfristig durch den Bezug auf die realen Einsatzbedingungen ersetzt werden. Wechselwirkungen zwischen Staubbeaufschlagung und Adsorption/Desorption sind dabei von besonderem Interesse.

Die Ableitung allgemeiner Bewertungskriterien bzw. die Einführung von Leistungsklassen sind im Interesse der Transparenz gegenüber dem Endverbraucher und der damit verbundenen besseren Akzeptanz erforderlich. Allerdings stellt sich die dafür notwendige Normung als sehr problematisch dar. Insbesondere in den internationalen Gremien herrschen themenbezogen noch grosse Meinungsunterschiede.

All diesen Trends steht der seit Jahren anhaltende Preisverfall für diese Produktgruppe entgegen. Der Kabinenluftfilter hat mittlerweile einen Ausrüstungsgrad von über 90% in Europa erreicht und ist zu einem echten Massenprodukt geworden. Es ist aber aus unserer Sicht zwingend geboten, diese zunächst erfreuliche Marktentwicklung nicht in einer technologischen Sackgasse enden zu lassen und Marktanteile nur über den Preis zu verteilen.

Eine völlig neue Qualität in der Betrachtung könnte erzielt werden, wenn es gelänge, den Kabinenluftfilter weg von einem Komfortelement hin zu einem physiologisch relevanten Bauelement im Kfz werden zu lassen, ein Erfordernis in Anbetracht immer grösser werdender Verkehrsdichten.

## **6. Literatur**

- [1] SAE J726 Specification: Air Cleaner Test Code
- [2] ISO 11155: Road Vehicles – Air Filter for Passenger Compartments
- [3] ISO 12103-1: Road vehicles – Test Dust for Filter Evaluation  
Part 1: Aizona Test Dust
- [4] DIN 71460 E: Luftfilter für Kraftfahrzeuginnenraum