



Stefan Richtfeld, BSc

Entwicklung und Konstruktion einer Prüfstands-Vorrichtung zur Messung der Partikelemission von Bremsanlagen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

DI Severin Stadler

Institut für Fahrzeugtechnik

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte mich bei meinem Betreuer bei AVL List, Dr. Alexander Bergmann, bedanken, der die Realisierung der Arbeit ermöglichte. Des Weiteren möchte ich mich auch herzlich bei meinen Kollegen im Büro für ihre Unterstützung bedanken.

Weiterer Dank gilt DI Severin Stadler, der mich seitens der TU Graz betreut hat.

Besonders bedanken möchte ich mich hiermit auch bei meinen Eltern, die mich vor und während des Studiums unterstützt haben.

Zusammenfassung

Durch das Bevölkerungswachstum in den Ballungsräumen wird eine Reduzierung der verkehrsbedingten Emissionen immer wichtiger. Die Arbeit beschäftigt sich mit der Feinstaubemission einer handelsüblichen Bremse an einem Kraftfahrzeug. Zu diesem Zweck wurde auf einem Bremsenprüfstand ein eigener Testaufbau konzipiert, der es ermöglicht, die entstehenden Feinstaubemissionen in Echtzeit zu bestimmen. Die Emissionen werden mit einem Diffusionsladungsmesssystem bzw. einem photo-akustischen Sensor und einem gravimetrischen Partikelsammler bestimmt. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, wurde ein passendes Fahrprofil zur Durchführung eines Prüfdurchganges entwickelt. Die Auswertung der Messungen identifizierte die wesentlichen Einflüsse auf die Feinstaubemission: die Fahrgeschwindigkeit, die Verzögerung und die Temperatur der Bremsscheibe. Der entstandene Bremsenabrieb wurde analytisch mittels Elektronenmikroskop untersucht. Als Hauptbestandteile des Bremsenabriebs wurden Eisen und Kupfer festgestellt. Der höchste Messwert für die Feinstaubemission betrug $1980 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ bei einer Hochgeschwindigkeitsbremsung.

Abstract

Due to the growth of the population in the urban regions, a reduction of traffic related emissions becomes more and more important. This thesis focuses on the measurement of particulate matter emissions of a commercial brake on a motor vehicle. For this purpose, a specific construction is designed to measure the emerging particle emissions in real time. This construction is mounted on a brake test bench. The emissions were quantified by means of a diffusion charger measurement system, a photo acoustic sensor and a gravimetric particle collector. A driving pattern for a test run was developed in order to simulate real driving situation. The evaluation of the data identifies the following influences on the particulate matter emissions: driving speed, deceleration and temperature of the brake disc. The emerged brake wear was analyzed by means of an electron microscope. Iron and copper were determined as the main components of brake wear. The highest measurement reading for the particulate matter was $1980 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ during a high speed brake action.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Fahrzeuggesteuerung.....	3
2.1.1	Entwicklung der Bremse für den Personenkraftwagen.....	3
2.1.2	Wirkungsweise der hydraulischen Bremse.....	4
2.1.3	Interaktion zwischen Bremsscheibe und Reibbelag.....	5
2.2	Feinstaub.....	8
2.2.1	Ursachen für die Entstehung von Feinstaub.....	9
2.2.2	Gesundheitliche Auswirkungen.....	12
2.2.3	Ablagerungsrate der Partikel im menschlichen Körper.....	14
3	Entwicklung eines Testaufbaues zur Ermittlung der Partikelemission einer Fahrzeugbremse.....	17
3.1	Analyse bestehender Versuche.....	17
3.2	Konzeptionierung eines neuen Testaufbaues.....	21
3.2.1	Ausgangslage.....	21
3.2.2	Auflistung der benötigten Komponenten.....	22
3.2.3	Gesamtaufbau.....	29
3.3	Strömungssimulation der Gehäuseausführungen.....	32
3.3.1	CFD-Methode.....	32
3.3.2	Vorbereitung des CAD-Modelles für die Simulation.....	34
3.3.3	Netzgenerierung.....	36
3.3.4	Randbedingungen.....	37
3.3.5	Vergleich der beiden Gehäuseausführungen.....	39
4	Aufbau und Durchführung der Messung.....	41
4.1	Messprinzip.....	41
4.2	Probenahme.....	41
4.2.1	Entnahmesonde.....	41
4.2.2	Isokinetische Probenahme.....	42
4.3	Messgeräte.....	44
4.3.1	PM-PEMS.....	44
4.3.1	PN-PEMS.....	47
4.3.2	Überwachung der statischen Druckdifferenz an der Irisblende.....	49

4.4	Prüfprogramm für die Versuchsdurchführung.....	50
4.4.1	Entwicklung eines Prüfprogrammes	50
4.4.2	Beschreibung Schwungmassenbremsprüfstand	52
4.5	Aufbau des Prüfstandes.....	54
4.6	Prüfablauf	62
5	Auswertung.....	64
5.1	Abbau des Prüfstandes.....	64
5.2	Auswertung PN-PEMS.....	71
5.3	Auswertung PM-PEMS	76
5.4	Elektronenmikroskop Analyse der Feinfilter und des Bremsbelages	82
5.4.1	Elektronenmikroskop Analyse der Feinfilter	82
5.4.2	Elektronenmikroskop Analyse des Bremsbelages	86
5.5	Diskussion	89
6	Ausblick	93
7	Literaturverzeichnis.....	94
8	Abbildungsverzeichnis	96
9	Tabellenverzeichnis	98
10	Formelverzeichnis.....	99
11	Anhang	I

Abkürzungsverzeichnis

<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CVS</i>	<i>Constant Volume Sampler</i>
<i>ECE</i>	<i>Economic Commission for Europe</i>
<i>EDX</i>	<i>Energiedispersive Röntgenspektroskopie</i>
<i>FELMI</i>	<i>Institute for Electron Microscopy and Nanoanalysis of the TU Graz</i>
<i>GFM</i>	<i>Gravimetric Filter Module</i>
<i>HEPA</i>	<i>High Efficiency Particulate Airfilter</i>
<i>KFZ</i>	<i>Kraftfahrzeug</i>
<i>LDSA</i>	<i>Lung Deposited Surface Area</i>
<i>MSS</i>	<i>Micro Soot Sensor</i>
<i>NAO</i>	<i>Non Asbestos Organics</i>
<i>OEM</i>	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
<i>PAN</i>	<i>Polyacrylnitril</i>
<i>PM-PEMS</i>	<i>Particulate Matter Portable Emissions Measurement System</i>
<i>PN-PEMS</i>	<i>Particulate Number Portable Emissions Measurement System</i>
<i>PTFE</i>	<i>Polytetrafluorethylen</i>
<i>RANS</i>	<i>Reynolds-Averaged-Navier-Stokes</i>
<i>REM</i>	<i>Rasterelektronenmikroskop</i>
<i>SAE</i>	<i>Society of Automotive Engineers</i>
<i>Semimet</i>	<i>Semimetallische Reibbeläge</i>
<i>UNECE</i>	<i>United Nations Economic Comissions for Europe</i>
<i>ZFE</i>	<i>Graz Centre for Electron Microscopy</i>

1 Einleitung

Die Wachstumsprognosen zeigen auf, dass die Bevölkerungsdichte in den Ballungsräumen in den nächsten Jahren steigen wird. Für das Umland von Wien wird beispielsweise ein Zuwachs von 130.000 Menschen bis zum Jahr 2030 erwartet, [1]. Daraus resultiert ein steigendes Verkehrsaufkommen, in Folge dessen werden die verkehrsbedingten Emissionen wie, Luftschadstoffe und Feinstaub ebenfalls steigen. Laut einem Bericht der Kleinen Zeitung, in ihrer Onlineausgabe vom 09.04.2015, sind dieses Jahr in Graz die zulässigen Überschreitungstage von der Feinstaubbelastung von PM_{10} (Particulate Matter, Durchmesser $< 10 \mu m$) bereits ausgeschöpft, [2].

Verkehrsbedingter Feinstaub lässt sich hinsichtlich seines Ursprunges unterteilen. Als Erstes sei der Verbrennungsmotor als Verursacher genannt, dessen Emissionen aufgrund der gesetzlich geltenden Abgasnormen reglementiert sind. Als weitere Feinstaubquelle gibt es den Abrieb, welcher sich aus dem Fahrbahn-, Reifen-, Kupplungs- und Bremsenabrieb zusammensetzt. Eine Arbeitsgruppe der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) beschäftigt sich seit Mai 2014 speziell mit den Non-Exhaust Emissions, also den Emissionen die nicht durch den Verbrennungsmotor, sondern durch Bremsen- und Reifenabrieb verursacht werden (siehe Diagramm 2-1). Die Ergebnisse wurden in einem Abschlussbericht zusammengefasst. Aus diesem Bericht geht hervor, dass in Bezug auf den Abrieb von Bremsen und Reifen noch offene Fragestellungen verbleiben. Die Fragestellungen, die beide Verursacher betreffen, sind im Wesentlichen die Messmethode bzw. die Probenahme, die Größenverteilung der Partikel und ein geeignetes Fahrprofil welches reale Fahrbedingungen abdeckt, [3].

Weitere Untersuchungen wurden durchgeführt mit dem Ziel die jeweiligen Anteile der Verursacher an der Gesamtemission der Non-Exhaust Emissions zu ermitteln. Die jeweilige Bestimmung der Anteile erfolgt mit Hilfe von Tracer Elementen. Tracer Elemente sind Elemente, die für den jeweiligen Verursacher typisch sind, zum Beispiel sind Eisen (Fe), Kupfer (Cu) und Antimon (Sb) für den Bremsenabrieb typische Tracer Elemente. Aufgrund der verschiedenen Zusammensetzung der Bremsbeläge ist es jedoch schwierig, die Tracer Elemente richtig zuzuordnen.

Dieselbe Problematik ergibt sich auch bei den anderen Verursachern von Abrieb (Reifen-, Kupplung-, Straßenabrieb). Weitere Einflussfaktoren auf die verkehrsbedingte Feinstaubemission sind das Fahrverhalten und das Fahrprofil, welches von Fahrer zu Fahrer unterschiedlich ist. Aus diesem Grund ist es schwierig, die Anteile an der Gesamtemission zuverlässig aufzuschlüsseln, [4]. Es lässt sich die Aussage treffen, dass gerade in bewohnten Gebieten die Feinstaubursachen genauer analysiert werden müssen, um die richtigen Maßnahmen zu einer wirkvollen Reduktion zu ergreifen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Validierung der PM_{10} Emissionen einer KFZ-Bremse (Kraftfahrzeug). Diese Feinstaubklasse wird bereits flächendeckend überwacht. Zur Ermittlung des Abriebs von der Bremse wird im Rahmen dieser Arbeit auf einem bestehenden Bremsenprüfstand an der TU Graz am Institut für Fahrzeugtechnik ein Testaufbau konstruiert und aufgebaut. Der Testaufbau hat die Aufgabe, den Abrieb der Bremse möglichst ohne Partikelverluste zu sammeln und auszuwerten. Die Auswertung erfolgt hinsichtlich der Partikelmassenemission, der Bestimmung des LDSA-Wertes (Lung Deposited Surface Area) und einer analytischen Untersuchung des gesammelten Bremsenabriebs mittels eines Elektronenmikroskops.

Der erste Abschnitt behandelt die Grundlagen. Darin wird die Funktionsweise der KFZ-Bremse näher erläutert. Weiters wird die Thematik Feinstaub hinsichtlich ihrer Ursache und Gesundheitsauswirkungen näher beleuchtet. Der nächste Abschnitt „Entwicklung eines Testaufbaues zur Ermittlung der Partikelemission einer Fahrzeugbremse“ beschreibt den Entstehungsprozess des Aufbaus am Bremsenprüfstand. Ausgehend von der Ausgangslage am Bremsenprüfstand und Recherche von anderen Untersuchungen wird ein neuer Prüfstand am Bremsenprüfstand konzeptioniert und aufgebaut. Der dritte Abschnitt „Aufbau und Durchführung der Messung“ beschreibt den Messaufbau und den Ablauf der Versuche. Die verwendeten Messgeräte und deren Funktionsweisen werden kurz erläutert. Das gewählte Prüfprogramm wird näher erklärt. Der vierte Abschnitt „Auswertung“ beschreibt die Auswertung der Messergebnisse und die chemische Analyse der gesammelten Feinstaubproben. Die Diskussion der Messergebnisse bildet den Abschluss des Abschnittes der „Auswertung“. Abschließend erfolgt ein Ausblick basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit.

2 Grundlagen

2.1 Fahrzeugbremse

Die Bremse am KFZ hat die Aufgabe das Fahrzeug in jeder erdenklichen Situation sicher abzubremsen bzw. zum Stillstand zu bringen, unter Gewährleistung eines einfachen und beherrschbaren Fahrzustandes, [5].

2.1.1 Entwicklung der Bremse für den Personenkraftwagen

Seit Beginn der Entwicklung des Verbrennungsmotors und der Entstehung der ersten Kraftfahrzeuge wurde die Weiterentwicklung der Bremse forciert. Reichte bei den ersten Automobilen noch eine mechanisch betätigte Bremse direkt am Rad (Abbildung 2-1), stiegen die Anforderungen an die Leistung der Bremse direkt mit der Motorleistung und dem Fahrzeuggewicht an, [5].

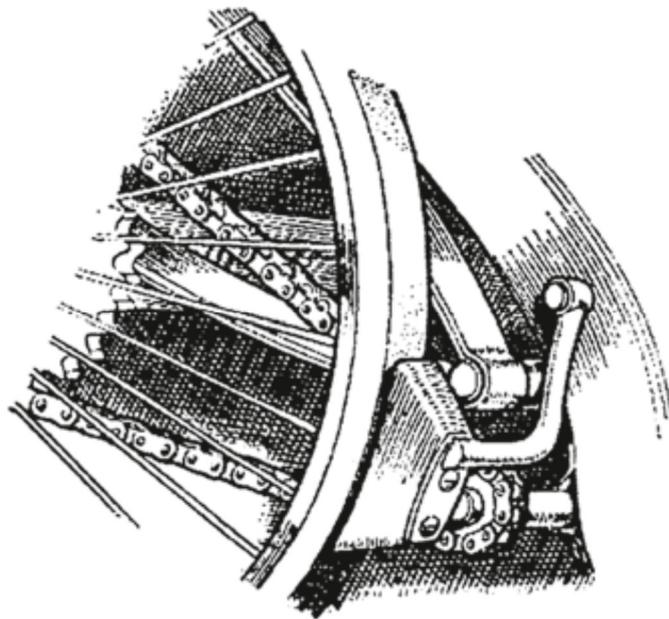


Abbildung 2-1 Klotzbremse auf die Hinterräder wirkend [5]

Ende der 1920er Jahre wurde die mechanisch betätigte Bremse durch die hydraulische Reibungsbremse verdrängt. Diese hatte weniger bewegte Teile und höhere Leistung und war somit für die fortschreitende Motorisierung gut geeignet. In den 1950er Jahren setzte sich die Scheibenbremse (an der Vorderachse) durch. Zusammen mit der Aufteilung der Betätigung in zwei geteilte hydraulische Kreise

hat sich die Wirkungsweise des Bremssystems nicht mehr grundlegend verändert, [5].

Mit der Entwicklung von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antrieb, rückt auch die Möglichkeit der Rekuperation in den Vordergrund. Somit ist ein Abbremsen des Fahrzeuges mit Hilfe der Antriebseinheit möglich und reduziert die Belastung der Reibungsbremse bzw. die Reichweite der Fahrzeuge wird erhöht, [5].

2.1.2 Wirkungsweise der hydraulischen Bremse

In Abbildung 2-2 ist der Aufbau einer hydraulischen Bremse abgebildet. Über das Fußpedal wird die gewünschte Bremskraft über den Bremskraftverstärker an den Hauptbremszylinder weitergegeben, welcher den Druck im System aufbaut. Über die Hydraulikleitungen wird der Druck an die Bremsen geleitet. Durch das Anpressen des Reibbelages an die Scheibe bzw. Trommel wird das Fahrzeug verzögert. Die kinetische Energie des Fahrzeuges wird Großteils in thermische Energie umgewandelt, [5].

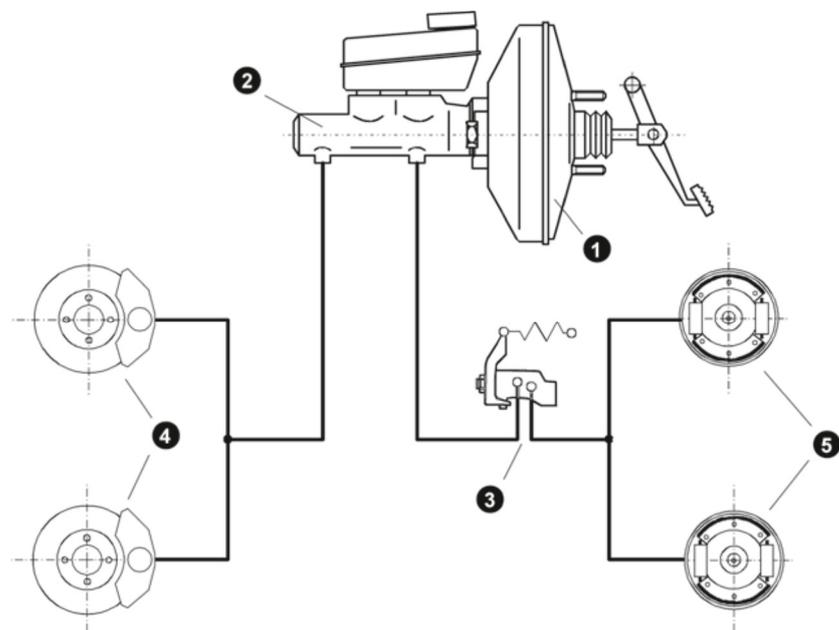


Abbildung 2-2 Komponentenaufteilung der hydraulischen Bremse, 1: Bremskraftverstärker, 2: Hauptbremszylinder, 3: Bremskraftregler für die Hinterachse, 4: vordere Brems Scheiben, 5: hintere Trommelbremse [5]

2.1.3 Interaktion zwischen Bremsscheibe und Reibbelag

Diese Arbeit beschränkt sich primär auf den Bremsbelag bzw. die Interaktion von Bremsscheibe und Reibbelag und der daraus folgenden Feinstaubemission.

Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, erfolgt die Bremsung durch Reibung zwischen Bremsscheibe und Reibbelag, wobei eine große Menge an Wärmeenergie frei wird. Die auftretende Wärmeenergie wird mittels Konvektion und Strahlung wieder an die Umgebung abgegeben, bzw. über Wärmeleitung an weitere Komponenten (Felge, Radnabe, Radlager etc.) weitergegeben. Bei einem Wagen der Kompaktklasse beträgt die Bremsleistung, bei einer Bremsung aus 100 km/h mit einer Verzögerung von 1 g ($9,81 \text{ m/s}^2$) rund 340 kW. Diese führt zu einer großen thermischen Belastung des Systems, Spitzentemperaturen von 600 – 700 °C werden erreicht. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen hinsichtlich thermischer Stabilität über einen weiten Temperaturbereich. Es ist wünschenswert, dass der Reibbeiwert über einen weiten Temperaturbereich konstant bleibt. Nach dem Einlaufprozess bleibt der Reibwert μ konstant, [5].

Bei der Entwicklung von standfesten Reibbelägen haben sich drei Reibmaterialfamilien durchgesetzt: Semimetallische Reibbeläge, NAO Reibbeläge und Low Steel Reibbeläge. Diese werden im Folgenden kurz erläutert:

Semimetallische Reibbeläge (Semimet): Zur Ablöse von Asbest in Reibbelägen wurde als erste Alternative Stahlwolle bzw. Eisenpulver an Stelle von Asbest in den Belägen eingesetzt. Der Reibwert ist relativ gering, $\mu \leq 0,4$. Weiters stellte sich nach kurzer Zeit ein Problem in der Verschleißfestigkeit heraus. In Kombination mit hohen Geschwindigkeiten bzw. hohem Fahrzeuggewicht steigt der Verschleiß überproportional an. Hauptabsatzmarkt dieser Art der Bremsbeläge sind die USA, [5].

NAO Reibbeläge: NAO ist die Abkürzung für Non Asbestos Organic. Parallel zur Entwicklung der Semimet Reibbeläge wurde in Japan die Entwicklung der NAO-Beläge vorangetrieben. Das Ziel der Entwicklung war es, an Stelle von eisenhaltigem Material (Stahlwolle bzw. Eisenpulver) organisches Material zu verwenden. Der Reibwert ist ähnlich zu den Semimets ($\mu = 0,3 - 0,4$). Somit sind diese Beläge ebenfalls nicht für hohe Geschwindigkeiten bzw. hohes

Fahrzeuggewicht geeignet. NAO-Reibbeläge sind oft als Erstausrüstung in KFZ im japanischen Markt verbaut und ebenfalls in den USA stark vertreten, [5].

Low Steel Reibbeläge: Einen weiteren Entwicklungsschritt stellen die Low Steel Reibbeläge dar, die auch faserhaltige Reibbeläge genannt werden. Durch eine Mischung von organischen bzw. anorganischen Fasern wird versucht, die Eigenschaften von Asbest zu imitieren. Zur Gänze lässt sich Asbest nicht mit Fasern substituieren. Asbest hat den großen Vorteil, dass es über einen weiten Temperaturbereich konstante Reibungskoeffizienten aufweist. Als Zusätze in den Reibbelag werden noch Abrasivstoffe, Schmiermittel und Metalle eingesetzt. Diese Familie der Reibbeläge stellt den größten Vertreter am europäischen Bremsenmarkt dar, [5].

Die Inhaltsstoffe der Reibbeläge haben eine Auswirkung auf die Partikelemission. Die Low Steel Reibbeläge haben eine höhere Emission an Partikelmasse (ca. 4-fach) und Partikelanzahl (ca. 2 – 3-fach) im Vergleich zu Semimet- und NAO-Reibbeläge, [6]. Auch die Ausführung der Bremsanlage hat Auswirkungen auf die Partikelemission. Gegenüber Scheibenbremsen sammelt sich bei Trommelbremsen der Abrieb vorrangig in der Bremse und wird nicht an die Umgebung abgegeben, [7].

In Tabelle 2-1 findet sich eine Auflistung der wichtigsten Bestandteile der Reibbeläge, genaue Zusammensetzungen lassen sich aufgrund der Firmengeheimnisse bzw. der fortschreitenden Entwicklung der Beläge nicht definieren. Die Tabelle 2-1 ist natürlich nicht vollständig, es gibt noch mehrere Arten von Bremsbelägen, zum Beispiel Hybridbeläge und metallfreie Beläge. Alle bis jetzt aufgezählten Reibbeläge sind für Bremscheiben bzw. Bremstrommeln aus Grauguss ausgelegt. Für nichtmetallische Bremscheiben (Keramik bzw. Carbon Bremscheiben), die im Rennsport und bei hochmotorisierten Fahrzeugen verwendet werden, müssen eigene Reibbeläge entwickelt werden. Die Betriebstemperaturen der nichtmetallischen Bremscheiben liegen höher und würden bei den konventionellen Reibbelägen zu einem Versagen führen. Als Kompromiss wurden organische Low Steel Reibbeläge entwickelt, diese verlieren ihre Festigkeit bei rund 800 °C, die Keramikscheibe besitzt jedoch eine Betriebstemperatur von rund 900 °C.

Durch Umweltschutzaufgaben bzw. Selbstbeschränkungen der Bremsenhersteller ist zum Beispiel Asbest ausnahmslos verboten. Weitere Materialien wie zum Beispiel Kupfer werden sukzessive reduziert. Die Entwicklung geht in Richtung ABC-freie Beläge, also Beläge die keine Inhaltsstoffe wie Antimon, Blei und Cadmium enthalten. Damit wird die Umweltbelastung und Gesundheitsauswirkungen durch Schwermetalle weiter reduziert, [5].

Tabelle 2-1 Bestandteile der wichtigsten Vertreter der Reibbeläge (in Gewichtsprozent) [5]

Rohstoff	Semimet	NAO	Low Steel
Stahlwolle	60		20
Kupfer		21,6	16
Buntmetalle	3	0,6	1,2
Aluminiumoxid		2,5	
Glimmer		3	6,5
Schwerspat	15	16	9,5
Calciumhydroxid	5	4	
Eisenoxid			10
Zinksulfid		5,2	6
Graphit	10	4	4
Petrolkoks		14	16
Kaliumtitanat		15	
Faser (z.B. PAN)	2	6	1,4
Kautschuk	5	1,6	4
Harz		6,5	5,4

2.2 Feinstaub

Mit Übernahme der EU-Richtlinie 1999/30/EG in nationales Recht wurden verbindliche Immissionsgrenzwerte eingeführt, unter anderem auch für PM₁₀. Damit ist in den letzten Jahren der Schwebstaub (Particulate matter, PM) als Luftschadstoff in den Vordergrund gerückt. Zur Klassifizierung des Schwebstaubes werden die Massenkonzentration (in µg/m³) und der aerodynamische Durchmesser (in µm) herangezogen. Als Feinstaub wird im allgemeinen Sprachgebrauch der PM₁₀ Anteil des Schwebstaubes bezeichnet, welcher jedoch nur eine Teilmenge ist. In Tabelle 2-2 ist eine Übersicht der derzeitigen Einteilung des Schwebstaubes dargestellt. Grundsätzlich lässt sich eine Unterscheidung zwischen primärem und sekundärem Feinstaub treffen. Primärer Feinstaub wird direkt aus der Emissionsquelle an die Umgebung abgegeben, sekundärer Feinstaub entsteht durch luftchemische Prozesse aus gasförmigen Emissionen (z.B. Ammoniak, Schwefeldioxid, Stickstoffoxide), [8].

Zur Einteilung des Schwebstaubes wird der aerodynamische Durchmesser als Vergleichsgröße verwendet. Als aerodynamischer Durchmesser wird der Durchmesser einer Kugel bezeichnet (Dichte $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) bezeichnet, die dieselbe Sinkgeschwindigkeit wie das unregelmäßig geformte Partikel besitzt, [9].

Tabelle 2-2 Größeneinteilung der Schwebstaubbelastung [8]

Bezeichnung	Beschreibung
PM ₁₀	Als PM ₁₀ werden Partikel bezeichnet deren aerodynamischer Durchmesser $d_{ae} < 10 \text{ µm}$ ist
PM _{2,5}	Als PM _{2,5} werden Partikel bezeichnet deren aerodynamischer Durchmesser $d_{ae} < 2,5 \text{ µm}$ ist
PM _{10-2,5}	Partikel die größer als 2,5 µm aber kleiner als 10 µm sind, werden auch als „coarse particles“ bezeichnet

2.2.1 Ursachen für die Entstehung von Feinstaub

Feinstaub hat einerseits natürlichen Ursprung, zum Beispiel Aufwirbelung von Erdreich, Vulkanausbrüche, Pollen etc.; andererseits gibt es auch noch den anthropogenen Ursprung, also vom Menschen verursachter Feinstaub. Der Großteil des anthropogenen Anteils setzt sich aus Verbrennungsprozessen (primärer und sekundärer Feinstaub) und mechanischen Prozessen (zum Beispiel Bearbeitung von Material, Abrieb im Straßenverkehr) zusammen.

Die Gesamtbelastung des Feinstaubes aus dem Straßenverkehr setzt sich im Wesentlichen aus den motorischen Emissionen, Abrieb von Bremsen, Reifen, Straßenbelag und wiederaufgewirbelten Staub zusammen. Betrachtet man die jeweiligen Anteile an der Gesamtbelastung, so muss man eine Differenzierung hinsichtlich des Standortes treffen. Im städtischen Bereich ist der Anteil des Bremsenabriebs höher als auf der Autobahn. Vergleiche hierzu Diagramm 2-1 und Diagramm 2-2. Der unterschiedlich stark ausgeprägte Anteil von Bremsenabrieb liegt am stark unterschiedlich ausgeprägten Fahrverhalten zwischen Stadt und Autobahn. Der erhöhte Anteil von Wiederaufwirbelung an der Autobahn kann durch starken Verkehrsaufkommen und der höheren Geschwindigkeit erklärt werden. Durch das erhöhte Verkehrsaufkommen wird der Staub längere Zeit in Schwebelage gehalten, [4], [10].

Anteil der PM10 Emission in der Stadt

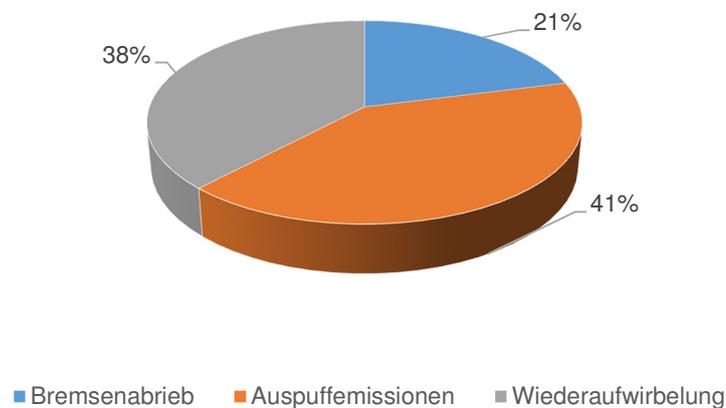


Diagramm 2-1 Anteil PM10 Emission an der Gesamtbelastung in der Stadt (Zürich) [10]

Anteil der PM10 Emission an der Autobahn

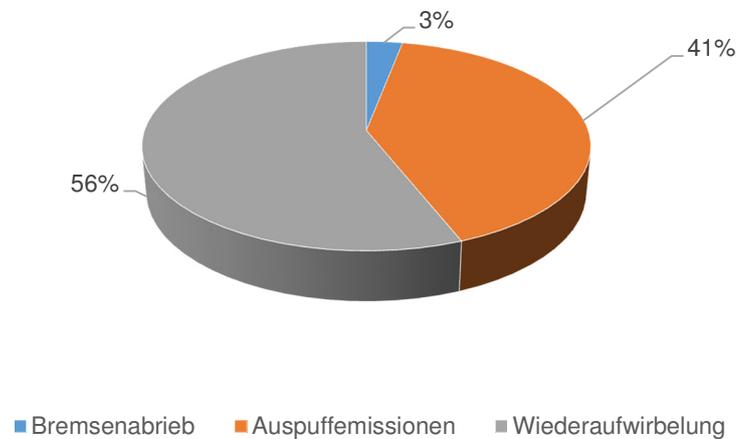


Diagramm 2-2 Anteil PM10 Emission an der Gesamtbelastung an der Autobahn [10]

Ein nicht vernachlässigbarer Teil der Feinstaubbelastung in städtischen Gebieten ist somit auf Bremsenabrieb rückzuführen. Der Bericht der UNECE, [3], weist ebenfalls auf den Anteil des Bremsenabriebs hin. Dem Bericht zu Folge werden rund 16 – 55 % dem Bremsenabrieb zugeordnet. Die Spannweite ist groß, da weder standardisierte Mess- bzw. Prüfaufbauten noch normierte Fahrzyklen vorgeschrieben sind. Von dem Gesamtabrieb der Bremse werden rund 50 % als Schwebestaub emittiert, jeweils 80 % gehören der Größenklasse PM₁₀ an, 60 % PM_{2,5}. Die Entstehungsmechanismen für PM₁₀ sind Abrieberscheinungen, welche die Grobfraction, „coarse particles“, erzeugen. Thermochemische Vorgänge generieren aufgrund der entstehenden Reibungswärme die Feinfraction PM_{2,5}, [3].

Zur Bestimmung der Anteile der einzelnen Verursacher haben sich zwei Messmethoden etabliert. Diese werden anschließend kurz erläutert.

Eine Möglichkeit für die Bestimmung der Feinstaubquelle ist eine Messung direkt neben der vermeintlichen Quelle, zum Beispiel Straße, Industrie. Als Referenz für die Hintergrundbelastung wird eine weitere Messung, an einem etwas weiter entfernten, unbelasteten Punkt durchgeführt. Dies sind zum Beispiel Innenhöfe von Siedlungen bzw. große Parkanlagen. Die Feinstaubbelastung errechnet sich aus der Differenz der beiden Messstationen. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Messstation 1 misst die Hintergrundbelastung, Messstation 2 die

Gesamtbelastung direkt bei der Quelle. Dieses Messprinzip findet hauptsächlich in verbauten Gebieten Anwendung, [4], [10].

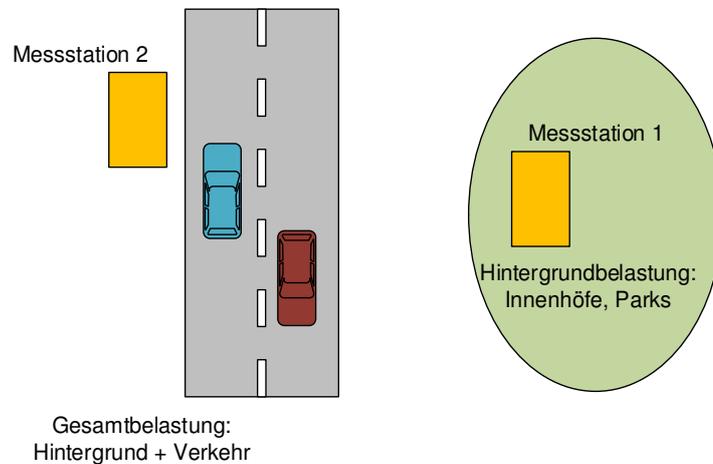


Abbildung 2-3 Messung der Gesamtbelastung und der Hintergrundbelastung

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Feinstaubquelle sind die sogenannten Luv-Lee Messungen. Hierbei werden wiederum zwei Messstationen benötigt, eine für die Hintergrundbelastung und eine für die Gesamtbelastung. Die Messstationen werden in der Nähe der Quelle angeordnet. Voraussetzung für eine korrekte Messung ist eine definierte Windrichtung. Diese verhindert, dass die Gesamtbelastung zu der Messstation für die Hintergrundbelastung transportiert wird. Die Feinstaubbelastung errechnet sich aus der Differenz der beiden Messergebnisse. Dieses Messprinzip ist nur in unbebauten Gegenden sinnvoll, zum Beispiel entlang von Autobahnen und Schnellstraßen. Das Prinzip ist in Abbildung 2-4 dargestellt. Hier misst Messstation 1 die Hintergrundbelastung, Messstation 2 die Gesamtbelastung, [4], [10].

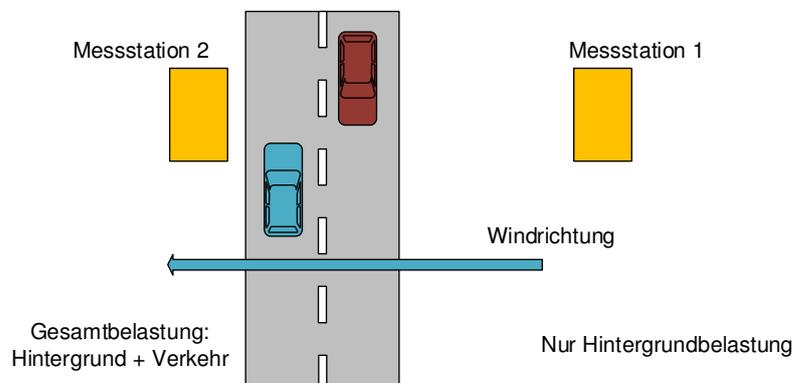


Abbildung 2-4 Schematische Darstellung einer Luv-Lee Messung

Anschließend erfolgt die weitere Aufteilung hinsichtlich des Feinstaubursprunges mit typischen Tracerelementen. Für Bremsenabrieb sind dies: Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Antimon (Sb), Silicium (Si), Barium (Ba) und verschiedene Sulfate. Für Reifen sind dies: Zink (Zn), elementarer Kohlenstoff (C) und organischer Kohlenstoff (OC). Bei Straßenabrieb muss man differenzieren zwischen Asphalt,- und Betonfahrbahn. Asphalt besteht Großteils aus Split und Bitumen. Beton ist eine Mischung aus Grobmaterial, Sand und Zement, [4], [10].

2.2.2 Gesundheitliche Auswirkungen

Die gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub sind vielschichtig und schwer abzugrenzen. Es gibt verschiedene Ansätze zur Evaluierung der Effekte: „Studien zur persönlichen Exposition, epidemiologische Studien, toxikologische Studien inklusive Tierversuche, kontrollierte Expositionsexperimente und In-vitro-Studien.“ [8 S. 23] Die Größe der Partikel hat Einfluss auf die Gesundheitsauswirkungen. Die $PM_{2,5}$ Konzentration ist dabei ein guter Indikator für die Beschreibung der durch die PM-Exposition verursachten Effekte. Besonders Inhaltsstoffe, wie Metalle, organische Verbindungen, ultrafeine Partikel (<100 nm) und Endotoxine entscheiden über die toxikologische Wirkung des Schwebstaubes, [8].

In Tabelle 2-3 ist aufgeführt, welche gesundheitlichen Auswirkungen auf die PM_{10} Belastung zurückzuführen sind. Die PM_{10} Belastung durch den Verkehr ist in einer eigenen Spalte dargestellt. Die Werte sind jeweils bezogen auf ein Jahr und gültig für Österreich, [11]. Aus der Tabelle lässt sich ableiten, dass rund die Hälfte der Erkrankungen und Vorfälle durch den Verkehr verursacht wird. Eine Reduktion der Feinstaubemissionen ist also von großem Nutzen für die Gesundheit der Bevölkerung. Die Werte wurden mit Hilfe von epidemiologischen Untersuchungen abgeleitet, diese Methode wird nachfolgend erläutert.

Tabelle 2-3 Anzahl bzw. Tage mit Krankheiten verursacht durch Schwebestaub PM₁₀ für Österreich [11]

	Anzahl oder Tage	
	Gesamt PM ₁₀ Belastung	Verkehrsbedingte PM ₁₀ Belastung
Langfristige Sterblichkeit (Erwachsene > 30 Jahre)	5 600	2 400
Spitalsaufnahme wegen Atemwegserkrankung	3 400	1 500
Spitalsaufnahme wegen Herz-Kreislauf Erkrankung	6 700	2 900
Neuerkrankung chronische Bronchitis (Erwachsene > 25 Jahre)	6 200	2 700
Bronchitis (Kinder < 15 Jahre)	47 700	20 600
Tage mit eingeschränkter Aktivität (Erwachsene > 20 Jahre)	3,1 x 10 ⁶	1,3 x 10 ⁶
Asthmaanfälle (Kinder < 15 Jahre)	34 700	15 000
Tage mit Asthmaanfällen (Erwachsene > 15 Jahre)	94 000	40 000

Bei Epidemiologische Studien wird der Zusammenhang zwischen verschiedenen medizinischen Parametern, zum Beispiel Krankenhausaufenthalte oder Todesfälle, untersucht. Der Vorteil liegt darin, dass eine große Anzahl an Menschen erfasst wird. Ferner findet die Exposition der Bevölkerung unter realen Bedingungen statt. Personen die empfindlicher auf Luftschadstoffe reagieren (zum Beispiel Kinder oder ältere Personen) sind ebenfalls in der Studie berücksichtigt, [8].

Epidemiologische Studien haben gezeigt, dass sich durch die Schwebestaubbelastung Effekte auf das Herz-Kreislaufsystem ergeben. Die Auswirkungen sind zum Beispiel: verringerte Herzfrequenzvariabilität, Erhöhung der Plasmaviskosität, Erhöhung des Spiegels des C-reaktiven Proteins, Dysfunktion des Endothels und Auslösung von Herzinfarkten, [8].

2.2.3 Ablagerungsrate der Partikel im menschlichen Körper

Die Ablagerungsrate der Partikel ist hauptsächlich von der Partikelgröße abhängig. In Abbildung 2-5 ist die Ablagerungsrate von Partikeln im menschlichen Körper, in Abhängigkeit der Partikelgröße, angegeben. Der Partikelgrößenbereich ist von $0,01 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$ dargestellt. Die schwarze Linie stellt die Gesamtablagerungsrate im Atmungssystem des Körpers dar. Die farbigen Verläufe entsprechen der Ablagerungsrate im farblich passenden Teil des Atmungssystems. Die höchsten Ablagerungsraten werden bei Partikeln im Größenbereich von $d \sim 10 \mu\text{m}$ und im Größenbereich $d \sim 0,01 \mu\text{m}$ festgestellt. Die Orte der Ablagerung sind aber bei beiden Partikelgrößen völlig unterschiedlich. Bei großen Partikeln ($d \sim 10 \mu\text{m}$) sind die Hauptablagerungsorte die oberen Luftwege (grün und gelb markiert). Die Partikel im Größenbereich von $1 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$ dringen allerdings auch bis in die Lunge vor und lagern sich dort ab (blau und rot markiert). Kleinere Partikel ($d \sim 0,01 - 0,1$) lagern sich hauptsächlich in der Lunge bzw. in den Lungenbläschen ab (blau und rot markiert). Ausgehend von der Erkenntnis, dass der Bremsenabrieb hauptsächlich $\text{PM}_{2,5}$ [3] hervorruft und dass das Maximum der Partikelemission bei rund $0,1 \mu\text{m}$ (100 nm) liegt, siehe Abbildung 2-7, wird der Partikelbereich kleiner $1 \mu\text{m}$ ausführlich behandelt.

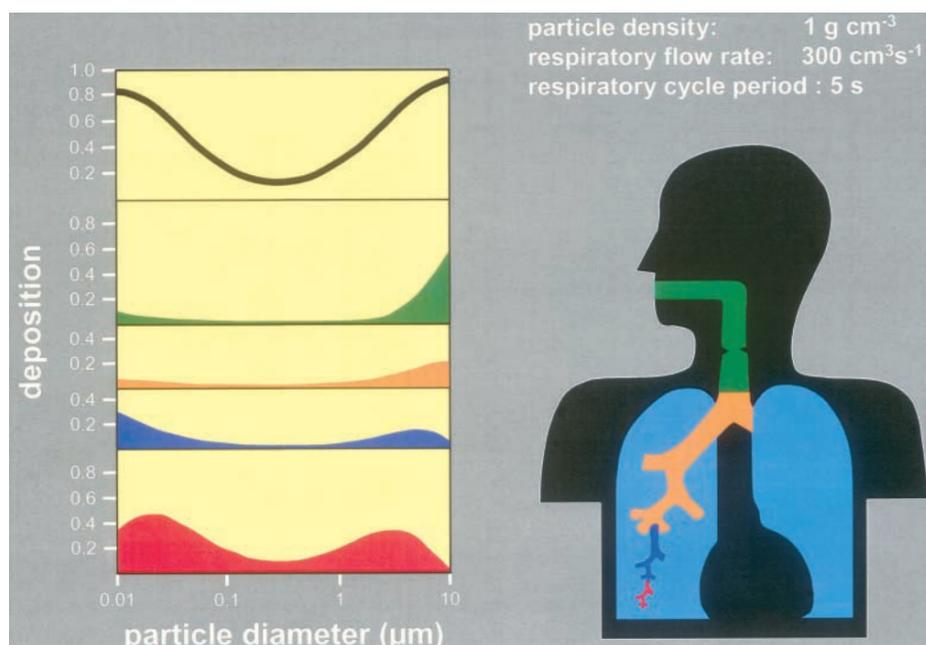


Abbildung 2-5 Ablagerungsrate von Partikel im menschlichen Körper im Partikelgrößenbereich von $0,01 - 10 \mu\text{m}$ [12]

In Abbildung 2-6 ist die Ablagerungsrate der Partikel im Größenbereich von 0,01 – 1 μm dargestellt. Die schwarze Linie stellt die Ablagerung in den oberen Luftwegen dar, also Nasenhöhlen, Nasenschleimhaut etc. Hierbei ist zu beachten, dass die Ablagerung bei größeren Partikeln ab ca. 300 nm und unterhalb von 30 nm ansteigt. Der rote Verlauf stellt die Ablagerung in der Luftröhre bzw. im Luftröhrensystem dar. Die Ablagerung ist umgekehrt proportional zu der Partikelgröße. Die blaue Kurve stellt die Ablagerung in den Lungenbläschen dar; im Größenbereich von 20 nm lagern sich hier rund die Hälfte der Partikel ab. Die Summenkurve zeigt ein Minimum im Bereich von 200 nm. Bei kleinen Partikeln ($d \sim 10 \text{ nm}$) erreicht die Ablagerungsrate rund 90 %, wobei der Großteil hierbei bis in die Lungenbläschen vordringt und nur schwer wieder ausgestoßen werden kann. Große Partikel hingegen ($> 300 \text{ nm}$) lagern sich überwiegend in den oberen Luftwegen ab und können vergleichsweise leicht wieder ausgestoßen werden.

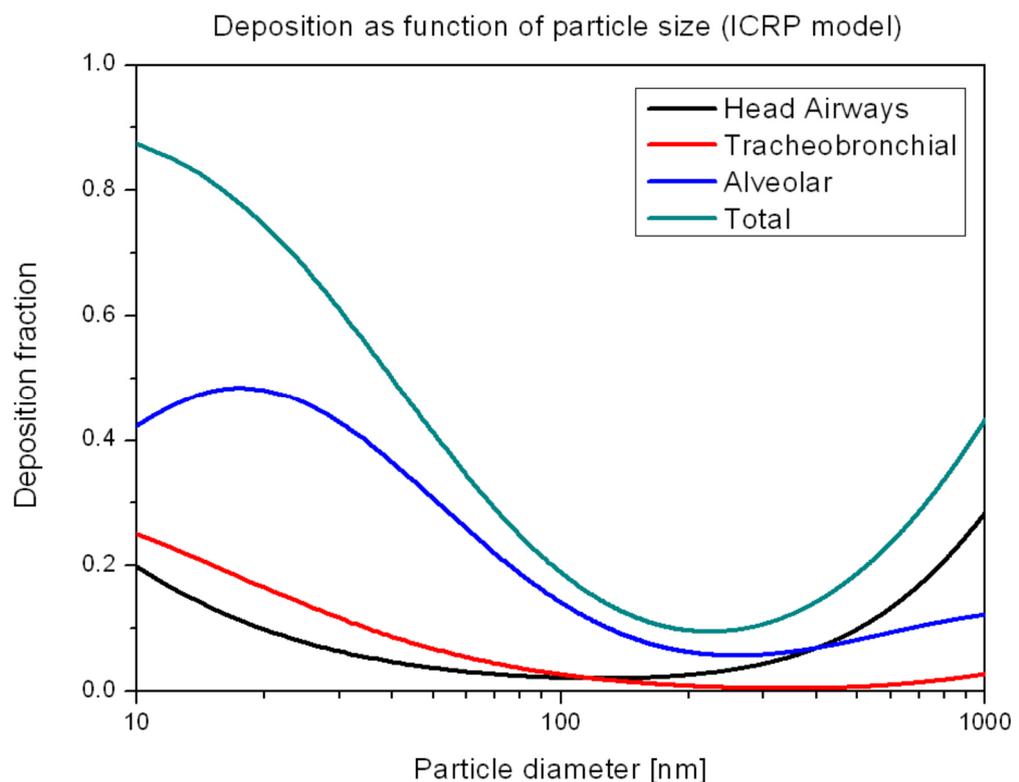


Abbildung 2-6 Ablagerungsrate von Partikel im menschlichen Körper von im Partikelgrößenbereich von 0,01 – 1 μm [13]

Vergleicht man die beiden Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 erkennt man, dass sich der Größenbereich der maximalen Partikelemission die Gesamtablagerungsrate überdecken. Somit lagern sich die Partikel im Körper ab und verursachen Schäden am Organismus, [14].

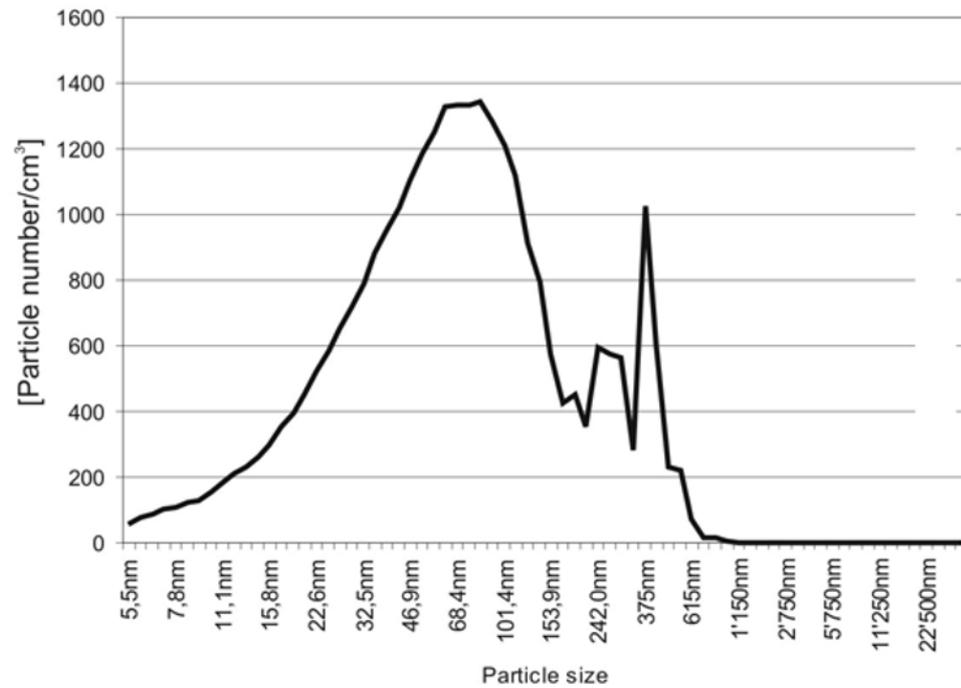


Abbildung 2-7 Größenverteilung des Bremsenabriebs [14]

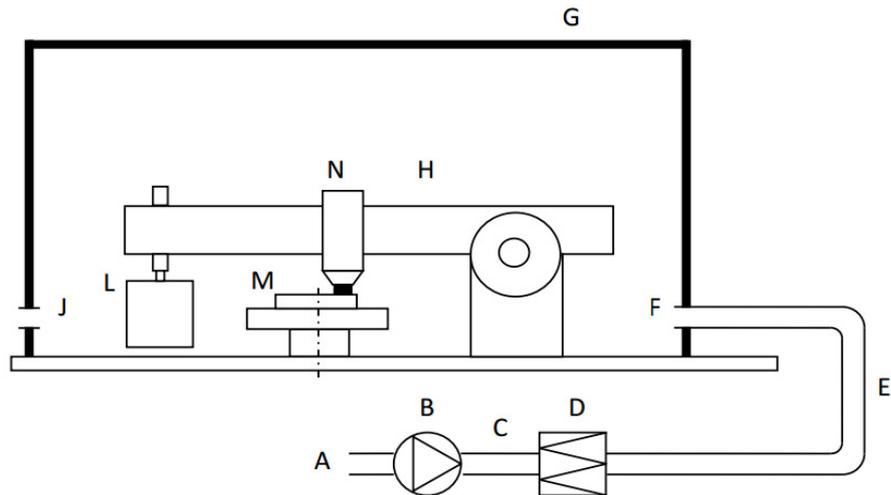
3 Entwicklung eines Testaufbaues zur Ermittlung der Partikelemission einer Fahrzeugbremse

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung des Testaufbaues. Als erster Schritt für die Entwicklung werden bereits durchgeführte Untersuchungen analysiert. Der nächste Schritt beinhaltet die Beschreibung bestehenden Komponenten, welche am Institut für Fahrzeugtechnik bereits vorhanden sind, und die zusätzlichen Komponenten, welche angefertigt oder als Zukaufteil bestellt werden. Die Abluftsituation wird zusätzlich noch mit Hilfe einer CFD-Analyse (Computational Fluid Dynamics) untersucht und bewertet.

3.1 Analyse bestehender Versuche

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Bremsenabrieb zu erzeugen und zu messen. Es gab mehrere Versuche. Diese Versuche reichen von Laboruntersuchungen in einem kleinen Rahmen, über Versuche auf einem Schwungmassenbremsprüfstand bis hin zu Adaptionen direkt am Fahrzeug. Diese Versuche werden anschließend näher erläutert.

Eine Möglichkeit zur Erzeugung von Bremsabrieb ist der sogenannte „Pin on Disc“-Versuch (Abbildung 3-1), welcher zu den Laborversuchen zählt. Hierbei wird nicht die Leistungsfähigkeit der Bremse beurteilt, sondern die grundlegenden Reibungsparameter und Partikelemission werden untersucht. Dabei wird eine Probe des Reibbelages unter konstanter Belastung und Geschwindigkeit untersucht. Die Prüfkammer (G) wird während der gesamten Messung mit partikelfreier Luft gespült. Die partikelbeladene Luft wird im Auslass (J) gesammelt und untersucht. Dieser Versuch ist gut dafür geeignet die grundlegenden Zusammenhänge des Abriebs zu untersuchen. Ein direkter Vergleich mit der Gesamtemission am Fahrzeug ist allerdings nicht möglich.



Schematic of the test equipment. A: Room air; B: Fan; C: Flow rate measurement; D: Filter; E: Flexible tube; F: Inlet for clean air, measurement point; G: Closed box (Chamber); H: Pin-on-disk machine; I: Air inside box, well mixed; J: Air outlet, measurement points; L: Dead weight; M: Rotating disk sample; N: Pin Sample.

Abbildung 3-1 Übersicht Pin on Disc Versuch [15]

Realitätsnäher sind Versuche am Schwungmassenbremsprüfstand. Hierbei wird der komplette Bremsenaufbau eines Fahrzeuges verwendet, siehe Abbildung 3-2. Schwierig gestaltet sich die Probenahme des Abriebs. Im Gegensatz zum „Pin on Disc“-Versuch wird hier auf ein Gehäuse über der Bremse verzichtet. Die Probenahme erfolgt direkt unter dem Bremssattel. Die Bremse wird durch gefilterte Zuluft umspült. Durch den Verzicht auf ein Gehäuse werden Partikel durch den Luftstrom verweht und gelangen nicht in die Sonde der Probenahme. Dies verfälscht das Messergebnis.

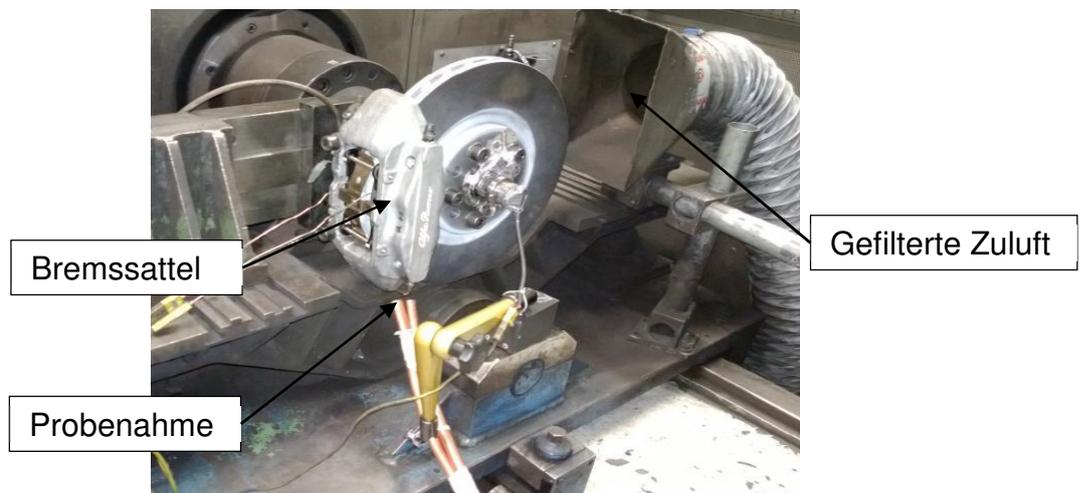


Abbildung 3-2 Versuchsaufbau am Schwungmassenbremsprüfstand [16]

Im nächsten Versuch wird direkt an der Bremse am Fahrzeug ein Gehäuse angebracht, siehe Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4. Dieses Gehäuse hat einen Inhalt von rund 250 l. In das Gehäuse wird gefilterte Luft eingeblasen, um einen Überdruck gegenüber der Umgebung zu erzeugen. Somit wird ein Einströmen von Umgebungsluft verringert. Die Probenahme erfolgt direkt in dem Gehäuse. Bei diesem Versuch wurde die medizinische Auswirkung von Bremsabrieb auf lebende Körperzellen untersucht. Der Vorteil von diesem Aufbau ist es, dass das Gesamtsystem der Bremse benutzt wird. Das Fahrprofil wird manuell durchgeführt, d. h., dass hierbei leichte Abweichungen durch den Bediener entstehen, [14].

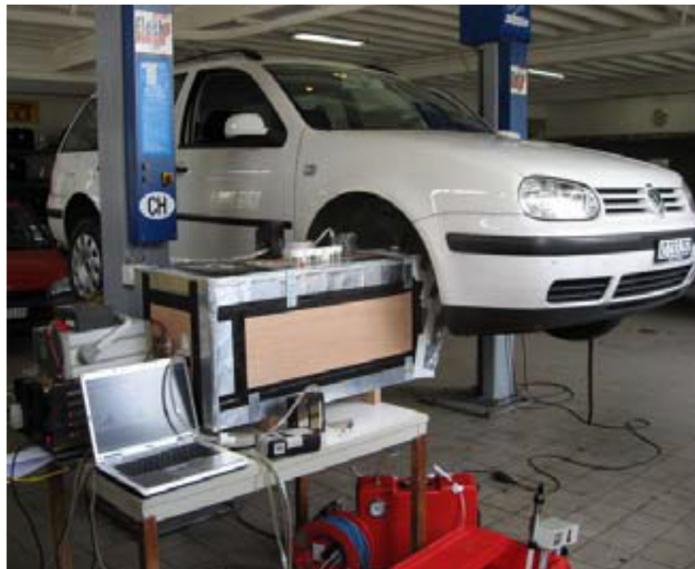


Abbildung 3-3 Adaptionen direkt am Fahrzeug [17]



Abbildung 3-4 Ansicht des Gehäuses aus Fahrzeugrichtung [17]

In Tabelle 3-1 ist eine Übersicht der aufgeführten Versuche dargestellt. Deren Vor- und Nachteile werden anschließend kurz erläutert.

Tabelle 3-1 Übersicht der Vor- und Nachteile der erläuterten Versuche

Versuchsbeschreibung	Vorteile	Nachteile
Pin on Disc	Definierter Programmablauf Reproduzierbare Ergebnisse	Nicht auf das Gesamtsystem „Bremse“ übertragbar
Versuch am Schwungmassenbremsprüfstand	Definierter Programmablauf Reproduzierbare Ergebnisse	Einfluss der Umgebung bei Verzicht auf ein Gehäuse
Messung am Fahrzeug	Reale Einbausituation	Einfluss durch Bediener Abgrenzung zur Umgebung

Der Vorteil des „Pin on Disc“-Versuch ist der definierte Prüfungsablauf und die damit verbundene Reproduzierbarkeit. Der Versuch ist gut geeignet, um die Parameter der Reibung und die Zusammenhänge des Abriebs zu untersuchen. Der Nachteil liegt darin, dass die Ergebnisse nicht auf das Gesamtsystem „Bremse“ übertragbar sind, da nur eine Probe der Reibungspartner in Verwendung ist.

Die Vorteile eines Versuchs auf einem Schwungmassenbremsprüfstand sind ebenfalls der definierte Programmablauf und die damit verbundene Reproduzierbarkeit. Der Einfluss durch die Umgebung auf die Probenahme ist nachteilig, wird aber durch Verwenden eines Gehäuses über dem Aufbau kompensiert. Die Probenahme, wie in der dargestellten Ausführung (siehe Abbildung 3-2), ist ungeeignet für korrektes Erfassen der Partikel. Diese Problematik der Probenahme wird in Kapitel 4.2 näher erläutert.

Der Versuch direkt am Fahrzeug hat den großen Vorteil, dass die reale Einbausituation (Fahrzeugaufhängung etc.) der Bremse am KFZ berücksichtigt wird. Die Nachteile, die sich bei dieser Durchführung ergeben (Abbildung 3-3), sind der Einfluss durch den Bediener auf das Fahrprofil und die schwierige Abgrenzung zur Umgebung. Den Einfluss des Bedieners kann man durch eine elektronisch geregelte Betätigung der Bremse und des Gaspedals ausschließen. Als weiteren

Nachteil ergibt sich die Abgrenzung zur Umgebung, da das Gehäuse viele Öffnungen (Abbildung 3-4) für die Fahrzeugaufhängung und die Antriebswelle hat. Für die Konzeptionierung eines neuen Testaufbaues fiel die Wahl auf eine Versuchsdurchführung an einem Schwungmassenbremsprüfstand. Die damit verbundenen Vorteile (definiertes Fahrprofil und Reproduzierbarkeit) sind wichtig für die Durchführung der Messungen. Des Weiteren wird eine handelsübliche KFZ-Bremse verwendet. Der Einfluss der Umgebung wird durch die Verwendung eines geschlossenen Gehäuses über der Bremse verhindert. Zum Abtransport der entstehenden Partikel wird ein Abluftsystem vorgesehen. Die Probenahme der Partikel wird in dem Abluftsystem durchgeführt, ähnlich zu dem „Pin on Disc“-Versuch.

3.2 Konzeptionierung eines neuen Testaufbaues

Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Entwicklung eines neuen Testaufbaues dargestellt. Das Ziel ist es, einen möglichst einfachen Umbau der bestehenden Anlage zu gewährleisten. Dabei sollen bestehende Komponenten übernommen und neue Bauteile hinzugefügt werden.

3.2.1 Ausgangslage

Der Grundaufbau inklusive der Bremse, ist eine bereits existierende Baugruppe, die am Institut für Fahrzeugtechnik verfügbar ist. In Abbildung 3-5 ist eine Übersicht über den Aufbau abgebildet, hierbei ist der Bremssattel nicht modelliert. Gut zu erkennen ist die Antriebswelle inkl. der elektrischen Anschlussklemmen zur Temperaturmessung der Bremsscheibe. Am dargestellten Aufbau sind keine Änderungen notwendig.

Bei dem Bremssystem handelt es sich um eine hydraulisch betätigte Faustsattelbremse mit Schwimmsattel. Das Modell der Bremse ist an der Vorderachse des Fahrzeuges Toyota Hiace (XH10) in der Bauzeit von 1995-2012 in Verwendung. Die Bremsscheibe ist innenbelüftet und hat einen Durchmesser von 285 mm und eine Dicke von 28 mm im Auslieferungszustand. Das Verschleißmaß für die Bremsscheibe beträgt laut Fahrzeughersteller 26 mm. Die Bremsbeläge haben im Auslieferungszustand eine Dicke von ca. 15,5 mm.

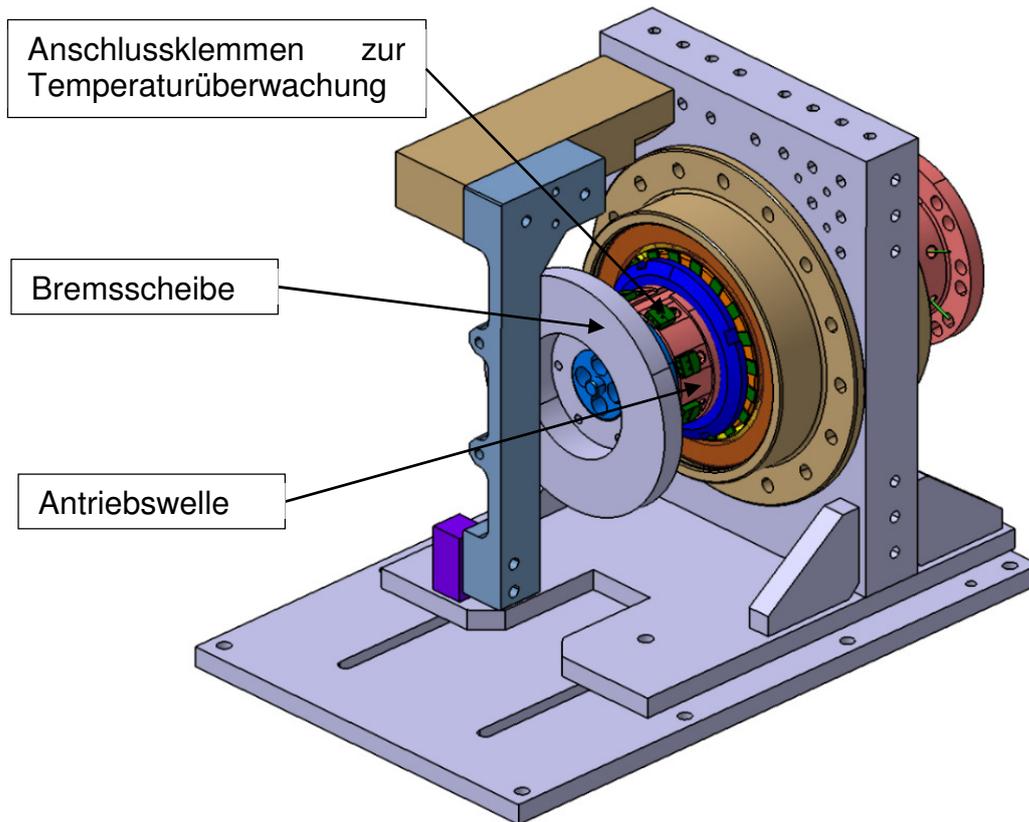


Abbildung 3-5 Grundaufbau des bestehende Adapters zur Bremsenprüfung

3.2.2 Auflistung der benötigten Komponenten

Zur Bestimmung der emittierten Partikel ist es wichtig für eine saubere bzw. staubfreie Prüfumgebung zu sorgen. Der Aufbau befindet sich in einem abgetrennten Teil der Prüfstandshalle. Die Staubbelastung dürfte durch die geregelte Belüftungsanlage gering sein. Es lässt sich jedoch nicht ausschließen, dass sich durch die Lüftungsanlage bzw. durch andere Tätigkeiten in der Halle eine Hintergrundbelastung an PM₁₀ Partikel ergibt, die das Messergebnis verfälschen könnte. Aus diesem Grund ist es wichtig, für eine konditionierte Umgebung zu sorgen. Um dies zu bewerkstelligen, wird ein geschlossenes Gehäuse über den Prüfaufbau montiert. Um Emissionen messen zu können, ist eine geregelte Umströmung der Bremse und somit eine Durchströmung des Gehäuses notwendig. Die Durchströmung stellt auch die notwendige Kühlung für die Bremscheibe sicher.

Im Gegensatz zum „Pin on Disc“ Versuch wird im hier entwickelten Aufbau die Luft mit einem Ventilator aus dem Gehäuse gesaugt. Die zuströmende Luft in das

Gehäuse durchströmt sogenannte HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Airfilter). Somit ist gewährleistet, dass sich im abgesaugten Luftvolumen nahezu ausschließlich die abgeriebenen Partikel aus den Kontaktflächen zwischen Bremsscheibe und Bremsbelägen befinden.

In Abbildung 3-6 ist der Zusammenbau des konstruierten Gehäuses abgebildet. Die rot markierten Elemente stellen die erwähnten HEPA-Filterelemente, also die Öffnung für die angesaugte Luft, dar. Durch die kreisrunde Öffnung wird die mit Partikel belastete Luft abgesaugt, welche anschließend zur Probenahme gelangt.

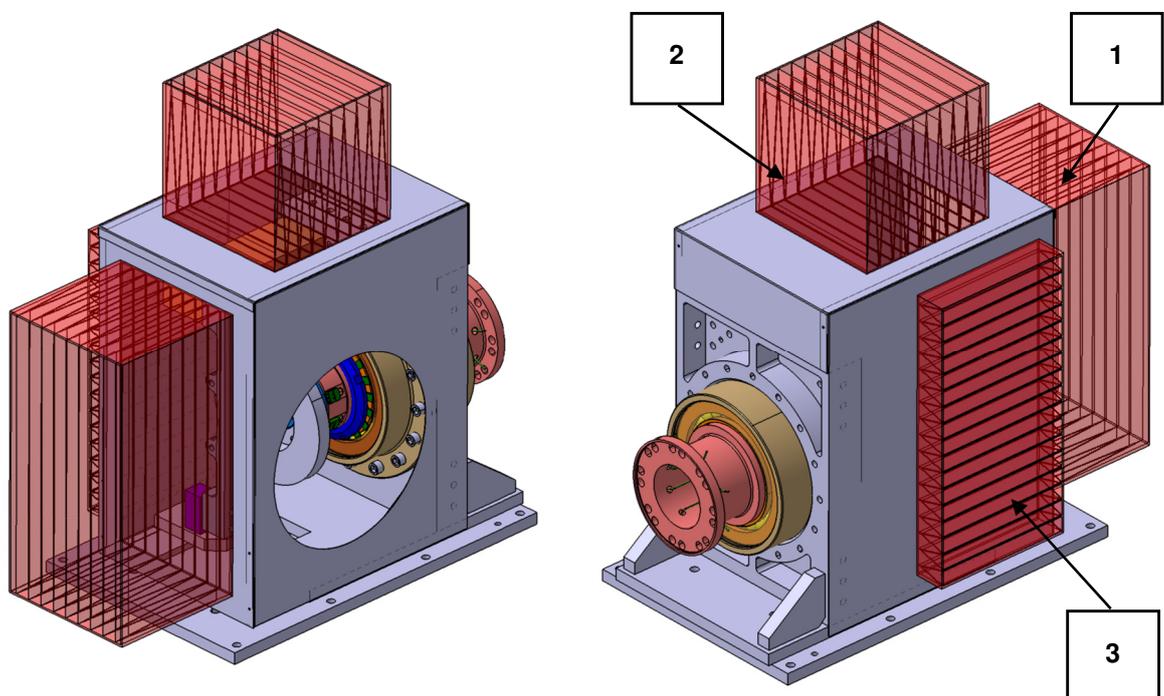


Abbildung 3-6 Übersicht inkl. Gehäuse

HEPA-Filterelemente

Diese Filterelemente sind zur Sicherstellung einer staubfreien Zuluft von besonderer Bedeutung. Des Weiteren ist für den Transport der Partikel wichtig, dass der Bremsattel möglichst gut umströmt ist damit eine Ablagerung des Bremsstaubes verhindert werden kann. Für eine optimale Durchströmung des Gehäuses wird an jeder Wand ein Ausschnitt vorgesehen. Die Filter entsprechen der Filterklasse H13. Diese Klasse gewährleistet einen Abscheidegrad $> 99,95\%$ bis zu einer Partikelgröße $< 1\ \mu\text{m}$, [18].

Die Filter sind rechts in Abbildung 3-6 ersichtlich und sind nummeriert. Filter Nr. 3 besitzt aufgrund der Platzverhältnisse am Prüfstand eine niedrigere Bauhöhe als Filter Nr. 1 und Nr. 2. Die Filter stammen von der Firma Unifil, die technischen Daten sind in Tabelle 3-2 aufgeführt:

Tabelle 3-2 Auflistung der technischen Daten der HEPA-Filterelemente [19], [20]

Filter Nr.	Baugröße: B x H x T in mm	Artikelnummer	Druckverlust in Pa bei Nennvolumenstrom
1	305 x 610 x 292	230811	265 Pa bei 1700 m ³ /h
2	305 x 305 x 292	230810	275 Pa bei 850 m ³ /h
3	305 x 610 x 68	226362	100 Pa bei 290 m ³ /h

Das Filterverhalten lässt sich auf drei wesentliche Mechanismen zurückführen, Diffusion, Sperrereffekt und Trägheit. Diese Mechanismen werden folgend kurz erläutert.

Die Diffusion ist für die Abscheidung der Partikel in einem Größenbereich bis etwa $\leq 0,1 \mu\text{m}$ verantwortlich. Die Diffusionsabscheidung ist gekennzeichnet durch eine rein zufällige Bewegung der Partikel in dem umgebenden Medium. Durch die zufällige Bewegung gelangt das Partikel an die Filteroberfläche und wird abgeschieden, [18].

Der Sperrereffekt ist für Partikel in einem Größenbereich von $0,5 - 1 \mu\text{m}$ dominierend. Die Partikel folgen exakt der Strömungslinie und bleiben aufgrund ihrer Ausmaße am Filtermaterial haften und werden somit abgeschieden, [18].

Der Trägheitseffekt ist für die Abscheidung von Partikel ab einer Größe von $1 \mu\text{m}$ verantwortlich. Die Partikel folgen aufgrund ihrer Trägheit den Strömungslinien nicht mehr und gelangen an die Filteroberfläche, [18].

Das Filterverhalten ist auf ein Zusammenspiel der drei Filtereffekte (Diffusion-, Sperr-, und Trägheitseffekt) zurückzuführen. In Abbildung 3-7 sind die einzelnen Filtereffekte dargestellt, wobei U die Anströmgeschwindigkeit und A_f den Durchmesser der Filterfaser darstellt.

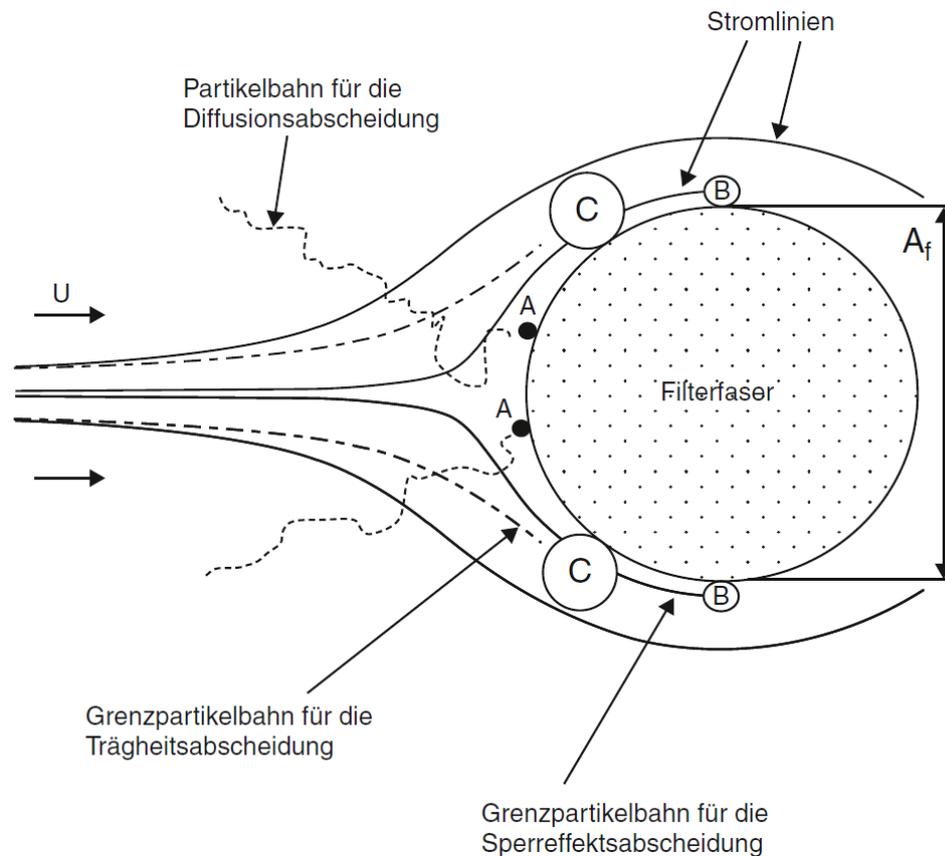


Abbildung 3-7 Wirksame Abscheideeffekte am HEPA-Filter [18]

Gehäuse

Das entwickelte Gehäuse besteht aus mehreren Einzelteilen die miteinander vernietet sind. Es erfüllt mehrere Aufgaben zugleich. Einerseits garantiert es eine kontrollierte Umgebung, um die Einflüsse der Umgebung möglichst gering zu halten. Andererseits bietet es eine Befestigungsmöglichkeit für die Filter. Für die Form des Abzuges gibt es mehrere Möglichkeiten. Aufgrund der einfacheren Anbindung ergaben sich zwei Lösungen: entweder direktes Anflanschen des Rohrdurchmessers an das Gehäuse, oder ein Übergangsstück von einem größeren Durchmesser auf den Rohrdurchmesser von 315 mm.

In Abbildung 3-8 ist ein Vergleich zwischen den beiden Möglichkeiten abgebildet. Im Vergleich ist die Bremsscheibe in ihrer Einbauposition am Prüfstand abgebildet. Die Bremsscheibe ist zentral um die Mittelachse des Anschlussstutzens angebracht. Die Drehrichtung ist ebenfalls angedeutet. Die Strömungszustände für beide Anschlussvarianten wurden mit Hilfe eines 3D-CFD-Simulationsprogrammes, Solid Works 2013 Flow Simulation, gegenübergestellt und anschließend bewertet.

Dabei hat sich gezeigt, dass der trichterförmige Stutzen weniger Wirbel im Bereich des Öffnungsquerschnitts im Gehäuse aufweist, verglichen mit dem geraden Rohranschluss. Somit wird der trichterförmige Anschlussstutzen verwendet.

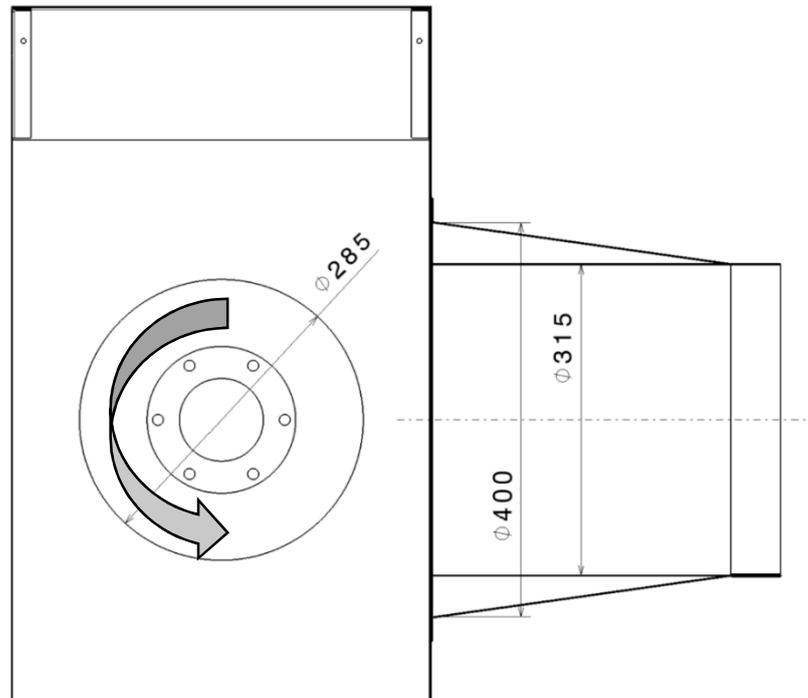


Abbildung 3-8 Querschnittvergleich zwischen Trichter und gerader Anschlussstutzen

In Abbildung 3-9 ist das Gehäuse inkl. dem trichterförmigen Anschlussstutzen erkennbar. Der Trichter verjüngt sich vom Ausgangsdurchmesser von 400 mm auf den Rohrdurchmesser von 315 mm. Die restliche Abluftstrecke besitzt einen Rohrdurchmesser von 315 mm.

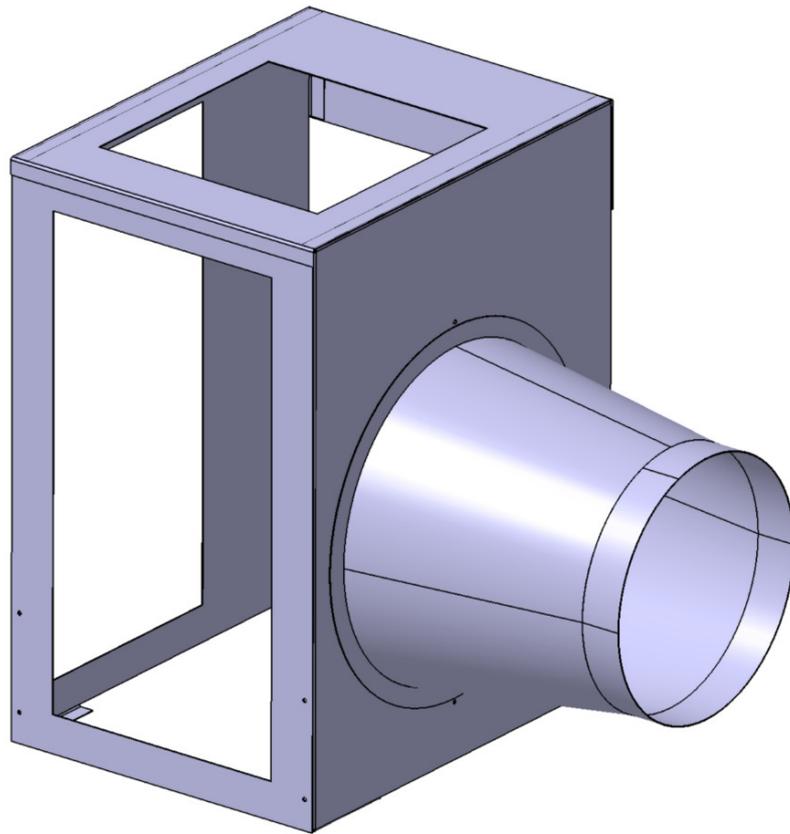


Abbildung 3-9 Gehäuse inkl. Anschlussstutzen

Bremsenkomponenten

Die Bremsenkomponenten sind serienmäßige OEM-Komponenten (Original Equipment Manufacturer) also Bauteile welche, wie bereits erwähnt, von der Firma Toyota in Verwendung sind. Die Verwendung von OEM-Teilen sichert die gleichbleibende Qualität der Bauteile und somit die Reproduzierbarkeit der Versuche. Die Bremscheiben sind aus Grauguss gefertigt. Die Zusammensetzung der Bremsbeläge wird im Kapitel 5.4.2 (S. 86) näher betrachtet. Die verwendeten Teilenummern lauten:

Bremsscheibe: Toyota 43512-26140

Bremsbeläge: Toyota 4465-26370

Irisblende

Die Irisblende wird für die Bestimmung des Volumenstroms durch das Abluftsystem benutzt. Die Druckmessung mittels Blende basiert auf dem Wirkdruckverfahren. Das Wirkdruckverfahren (Abbildung 3-10) benötigt zur Bestimmung des Volumenstroms eine Blende bzw. eine Drossel, welche zu einer Änderung des statischen Druckes ($\Delta p = p_1 - p_2$) zwischen den Messstellen führt. Mit der Druckdifferenz Δp in Pa, der Dichte des Fluids ρ in kg/m^3 und einer Blendenabhängigen Konstante c lässt sich der Durchfluss Q in m^3/s berechnen, [21]. Der Zusammenhang zwischen diesen Größen ist in Gleichung (3-1) dargestellt. Für eine korrekte Messung ist laut Datenblatt vor bzw. nach Einbauten, Krümmer, Abzweigungen etc. ein Mindestabstand vom 1 – 3-fachen des Rohrdurchmessers einzuhalten. In der Anordnung nach Abbildung 3-11 liegt zwischen der Irisblende (5) und dem vorangegangenen 90° Bogen eine Strecke von rund 1 m. Dies entspricht rund dem 3-fachen Rohrdurchmesser.

$$Q = c * \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

Gleichung (3-1)

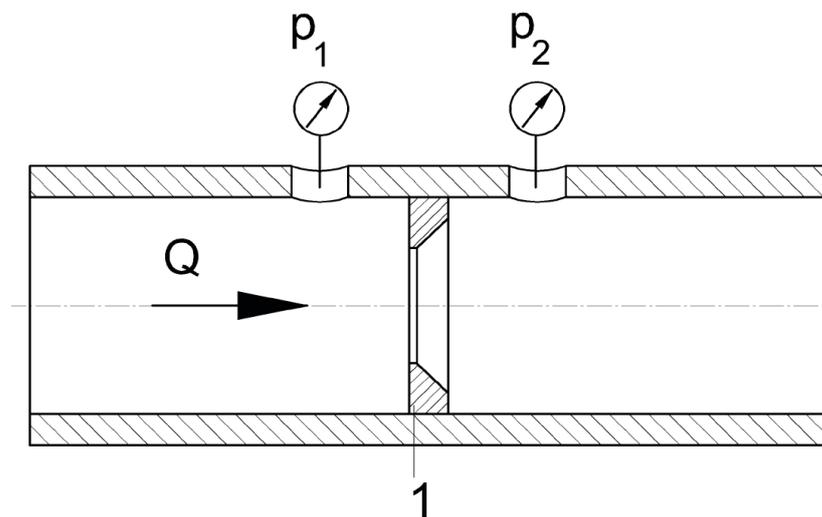


Abbildung 3-10 Wirkdruckverfahren, 1..Drosselstelle [21]

3.2.3 Gesamtaufbau

Unter Berücksichtigung der Platzverhältnisse am Prüfstand und der korrekten Abfolge der einzelnen Komponenten wurde folgendes Layout konzipiert. Die einzelnen Komponenten sind zur Veranschaulichung in Abbildung 3-11 dargestellt und farblich markiert. Die Verrohrung hat einen Innendurchmesser von 315 mm. Position 1 zeigt die HEPA-Filterelemente, hier nur auf einen Filter bezogen, Position 2 stellt das Gehäuse dar. Gut erkennbar ist der ausgeführte Anschlussstrichter für die Abluftstrecke. Das angeschlossene Rohr hat eine Gesamtlänge von drei Meter. Bis zur Entnahmestelle, an Position 3, ist es wichtig, Bögen bzw. Umlenkungen zu vermeiden, um einen möglichen Partikelverlust aus der Strömung zu unterbinden. Die Entnahmestelle ist am Ende des geraden Rohres angeordnet. Die Entfernung der Probenentnahme zur Bremsscheibe beträgt rund 2,5 m. Direkt nach der Entnahmestelle ist eine Filterbox, Position 4, angeordnet, um eine übermäßige Verschmutzung der nachfolgenden Komponenten zu unterbinden. Position 5 bezeichnet die justierbare Irisblende. Zur korrekten Messung des Durchflusses benötigt diese eine gerade Zu- und Abströmstrecke, die jeweilig rund einen Meter betragen. Position 6 zeigt den Axialventilator, welcher den Luftstrom durch das Rohrsystem sicherstellt. Der Axialventilator ist an einem Frequenzumrichter angeschlossen, um den Luftstrom zu variieren. Nach dem Axialventilator wird die Abluft durch einen flexiblen Schlauch dem Filtersystem der bestehenden Klimaanlage der Prüfkammer zugeführt. Somit wird verhindert, dass verunreinigte Luft in die Halle geblasen wird. Position 7 deutet den Antrieb des Schwungmassenbremsprüfstandes an. Das gesamte Rohrsystem und die einzelnen Komponenten sind in Stahl ausgeführt. Damit wird verhindert, dass sich durch elektrostatische Effekte Ablagerungen bilden. Die Abluftstrecke ist elektrisch leitend mit dem Schwungmassenbremsprüfstand verbunden und somit geerdet.

Eine Auflistung der bestellten Lüftungskomponenten und der Filter befindet sich im Anhang Tabelle 11-4.

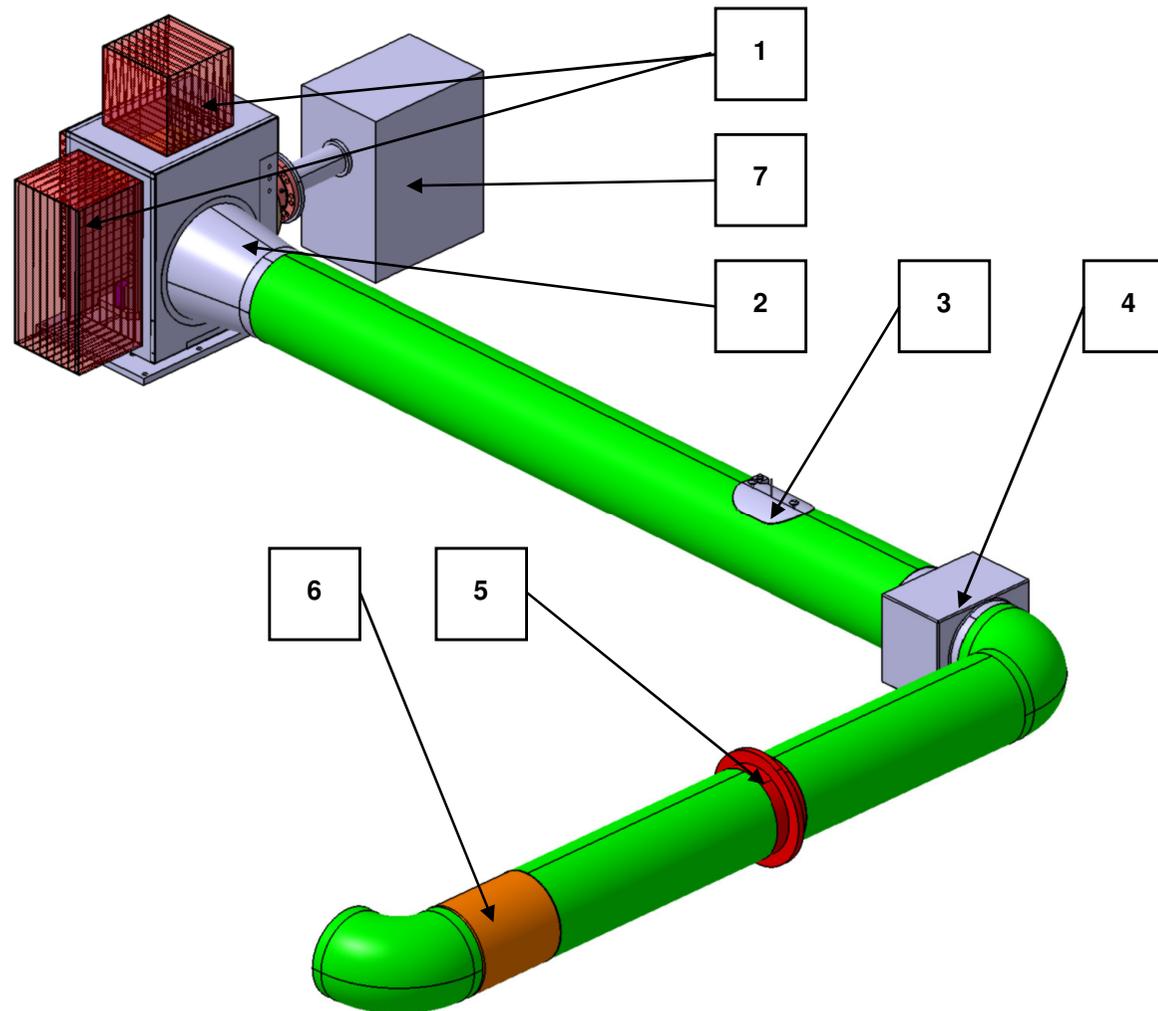


Abbildung 3-11 Komponentenübersicht Messstrecke Vorderansicht : 1: HEPA-Filter 2: Gehäuse, 3: Entnahmestelle der Partikelprobe, 4: Luftfilterbox, 5: Irisblende, 6: Axialventilator, 7: Antrieb Schwungmassenbremsprüfstand

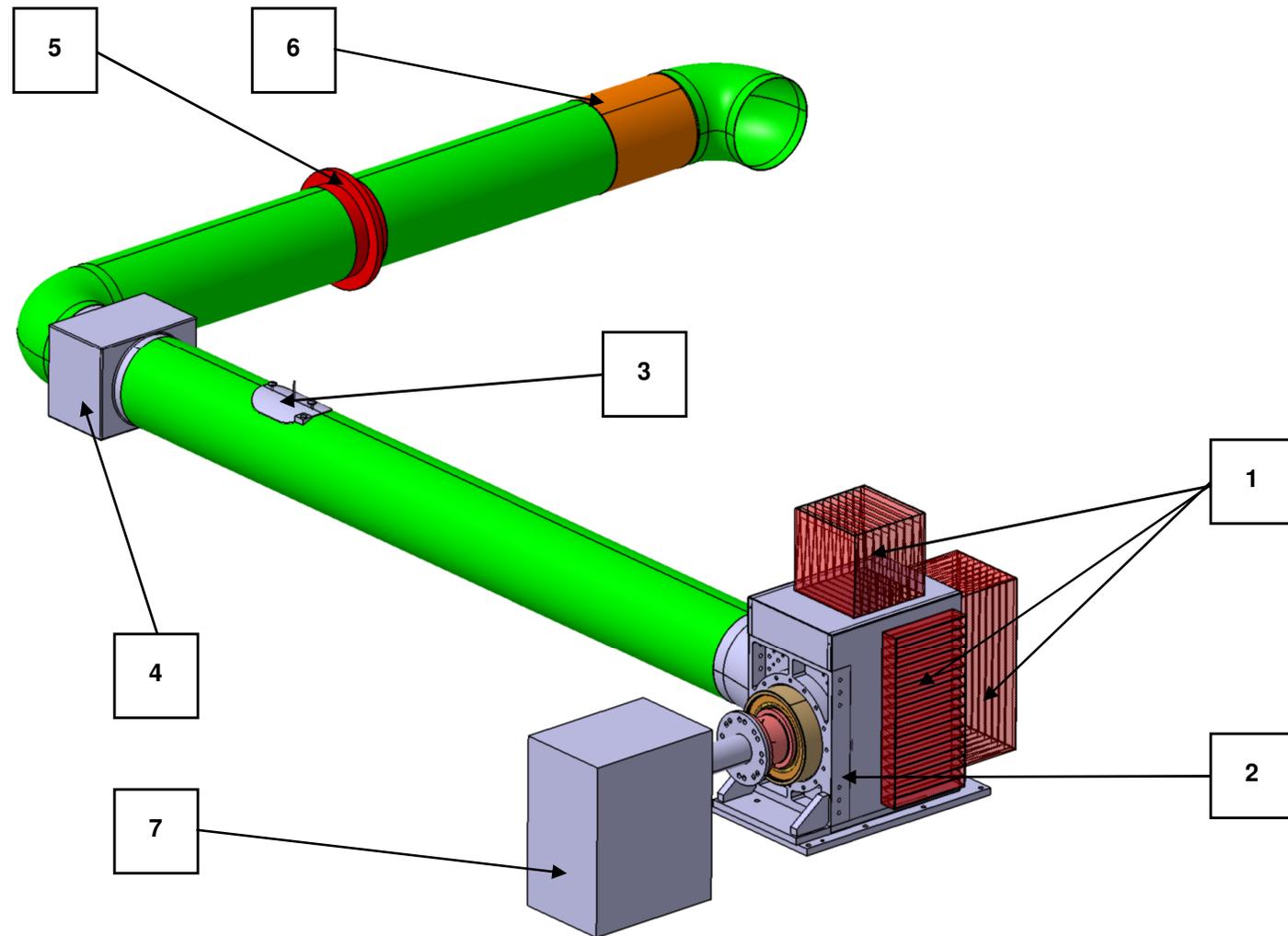


Abbildung 3-12 Komponentenübersicht Messstrecke Rückansicht : 1: HEPA-Filter 2: Gehäuse, 3: Entnahmestelle der Partikelprobe, 4: Luftfilterbox, 5: Irisblende, 6: Axialventilator, 7: Antrieb Schwungmassenbremsprüfstand

3.3 Strömungssimulation der Gehäuseausführungen

Zur Bewertung der Abluftsituation am Testaufbau wurde der Aufbau bzw. die Form des Abluftstutzens mit Hilfe einer Strömungssimulation berechnet. Es werden die beiden Ausführungen des Abluftstutzens, gerade und trichterförmig, miteinander verglichen und bewertet. In diesem Abschnitt wird kurz auf die Simulation eingegangen.

3.3.1 CFD-Methode

Der Berechnung von Strömungen ist ein sehr komplexer Aufgabenbereich. Die exakte Berechnung ist nur unter gewissen Voraussetzungen bzw. für einfache Situationen möglich. Zur korrekten Berechnung einer Strömung sind mehrere Erhaltungsgleichungen gleichzeitig zu erfüllen: Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung. Aus den Erhaltungsgleichungen ergeben sich Differentialgleichungen, die zugleich gelöst werden müssen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedient man sich numerischer Lösungsmethoden. Damit werden die Differentialgleichungen mit Hilfe von numerischen Gleichungen angenähert und können anschließend mit ausreichender Genauigkeit gelöst werden. Die CFD-Berechnung gilt als abgeschlossen, wenn die Erhaltungsgleichungen (Massen-, Impuls-, Energiegleichung) hinsichtlich ihrer jeweiligen Lösungen konvergieren. Konvergenz bedeutet, dass sich jede Erhaltungsgleichung einer Lösung angenähert hat und sich trotz weiterer Iterationsschritte innerhalb eines definierten Toleranzbereichs nicht mehr verändert, [22].

Zur numerischen Berechnung der Erhaltungsgleichungen wird ein Berechnungsmodell benötigt. Das Berechnungsmodell, welches in der kommerziellen Software Solidworks Flow Simulation zum Einsatz kommt, ist das sogenannte RANS-Modell (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes). In Abbildung 3-13 ist ein zeitlich stationärer Verlauf einer Größe der Strömung dargestellt. Die hier dargestellte Größe ist die Strömungsgeschwindigkeit. Das RANS-Modell trennt zur Berechnung die gesuchte Größe in einen mittleren Anteil und in einen Anteil, der um den mittleren Anteil schwankt, auf. In Abbildung 3-13 ist der mittlere Anteil \bar{u} und der schwankende Anteil u' . Durch die Aufteilung der Größe in einen mittleren und schwankenden

Anteil wird die Berechnung vereinfacht. Der schwankende Anteil u' ist der turbulente Anteil der Geschwindigkeit. Durch die Einführung des turbulenten Anteils u' wird zur Lösung der Gleichung ein weiteres Berechnungsmodell benötigt, ein sogenanntes Turbulenzmodell. Das verwendete Turbulenzmodell von Solidworks Flow Simulation ist das sogenannte k - ϵ -Modell. Mit dem k - ϵ -Modell werden zwei weitere Variablen, k und ϵ , eingeführt, um den turbulenten Anteil der Strömung zu berechnen. Die Variable k beschreibt die kinetische Energie der Turbulenz. Die Variable ϵ beschreibt die Dissipation der Turbulenz. Dissipation beschreibt die Reibung der turbulenten Strömung, also die Umwandlung kinetischer Energie in thermische Energie, [22], [23].

Das RANS-Modell und das dazugehörige k - ϵ -Modell werden in die Erhaltungsgleichungen (Masse-, Impuls-, und Energiegleichung) implementiert. Die Differentialgleichungen der Erhaltungsgleichungen werden somit in numerische Gleichungen umgewandelt und können anschließend iterativ gelöst werden.

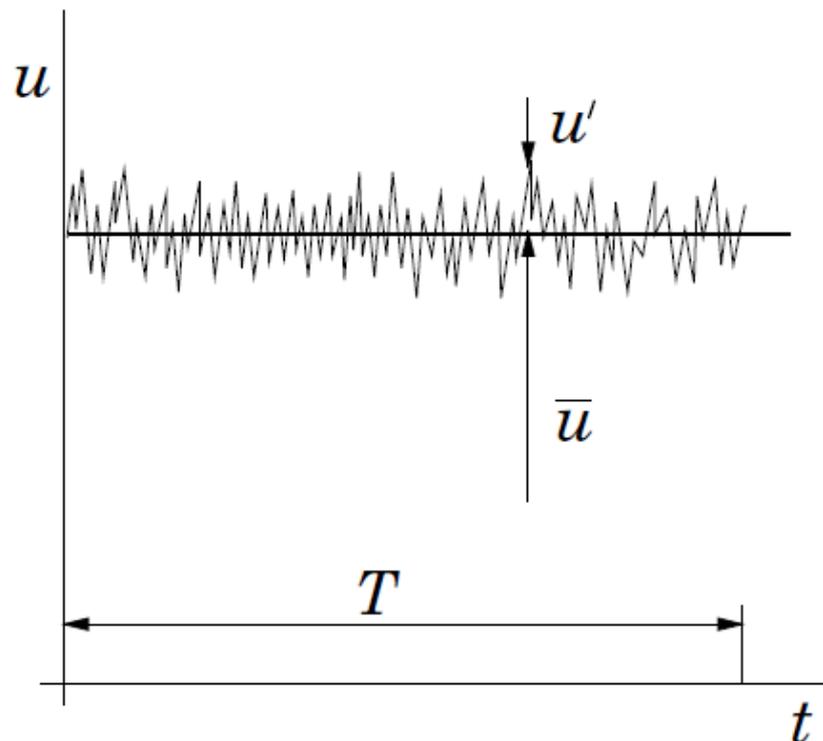


Abbildung 3-13 Darstellung RANS-Modell [23]

3.3.2 Vorbereitung des CAD-Modelles für die Simulation

Zur Vereinfachung der Berechnung werden kleine Details, wie Bohrungen, kleine Verrundungen etc. ausgeblendet, um den Rechenaufwand zu verringern. Da kein Modell für den Bremssattel vorliegt, wurde ein Ersatzkörper als Ersatz modelliert. Das Gehäuse ist für die Simulation aus einem Stück modelliert und die Filter werden als poröse Medien angenommen. Die Rotation der Bremsscheibe bzw. der dazugehörigen Welle werden durch die Definition von Oberflächengeschwindigkeiten berücksichtigt. In Abbildung 3-14 ist das vereinfachte Modell abgebildet (vgl. Abbildung 3-5). Es ist ausreichend, die Geometrie, die sich innerhalb des Gehäuses befindet, zu vereinfachen. Die außerhalb liegende Geometrie ist nicht berücksichtigt und ist aus diesem Grund auch nicht bearbeitet.

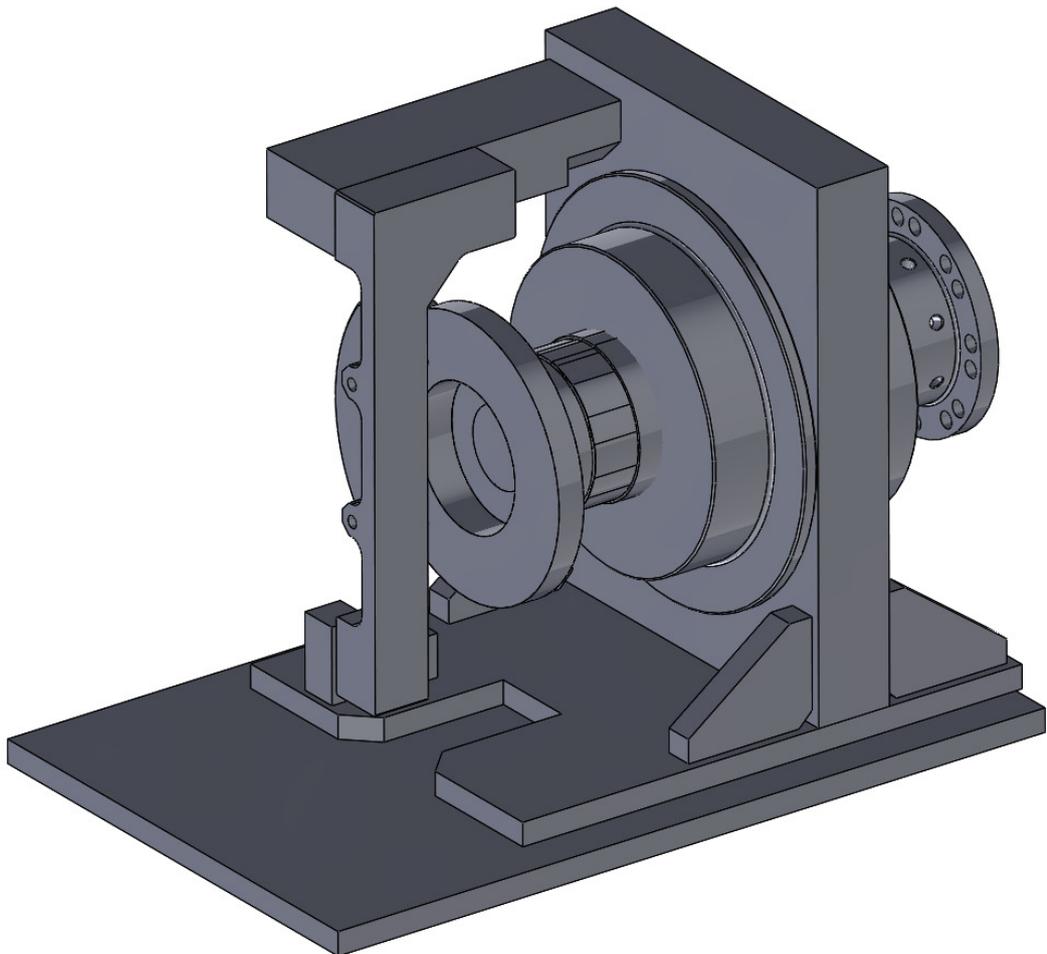


Abbildung 3-14 Vereinfachtes CAD-Modell

In Abbildung 3-15 ist das vollständige Modell für die Simulation dargestellt, wobei das Modell für den geraden Abluftausgang abgebildet ist. Die Randbedingungen sind für beide Ausführungen der Abluft identisch. Die rot dargestellten Volumina entsprechen den drei Filtern (Abbildung 3-6) für die Simulation.

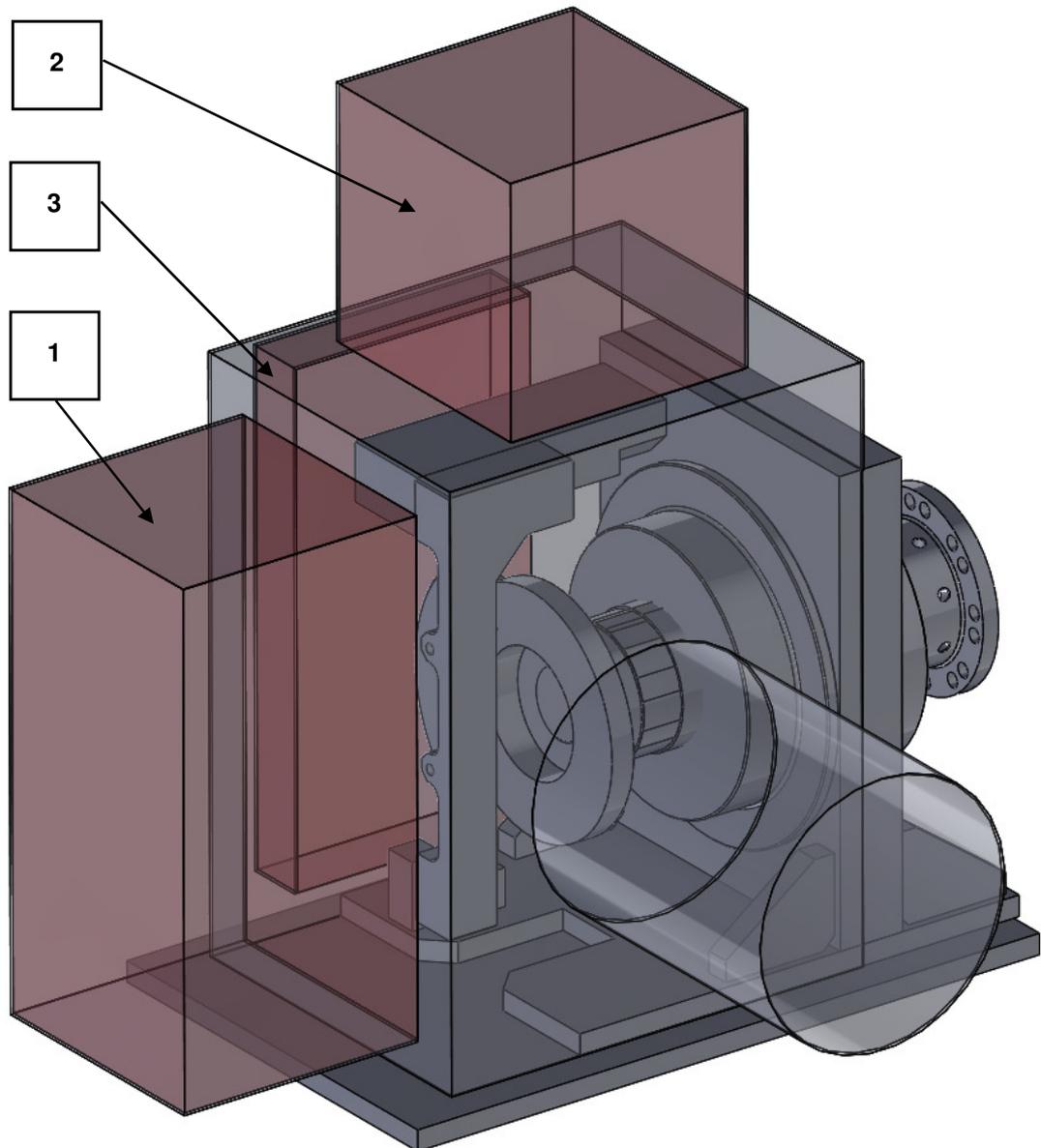


Abbildung 3-15 Geometrisches Simulationsmodell für die 3D-CFD Analyse

3.3.3 Netzgenerierung

Die CFD-Berechnung in Solidworks arbeitet nach der finiten Volumenmethode. Das zu berechnende Strömungsgebiet muss also in kleine Teilvolumina aufgeteilt werden. Das Netz besteht für diese Berechnung aus Quadern. Bei den Rändern des Berechnungsvolumens werden die Quader, welche einerseits im Fluid andererseits im begrenzenden Festkörper sind, geschnitten und als sogenannte partielle Zellen behandelt. In Abbildung 3-16 ist das Berechnungsnetz dargestellt. Die Bremsscheibe ist blau dargestellt, das Netz wurde im Bereich der Bremsscheibe verfeinert, um die Geometrie des Bremssattels besser zu berücksichtigen. An den Systemgrenzen sind die partiellen Zellen gut erkennbar. Daraus ergeben sich rund 750 000 Fluidzellen und 165 000 partielle Zellen.

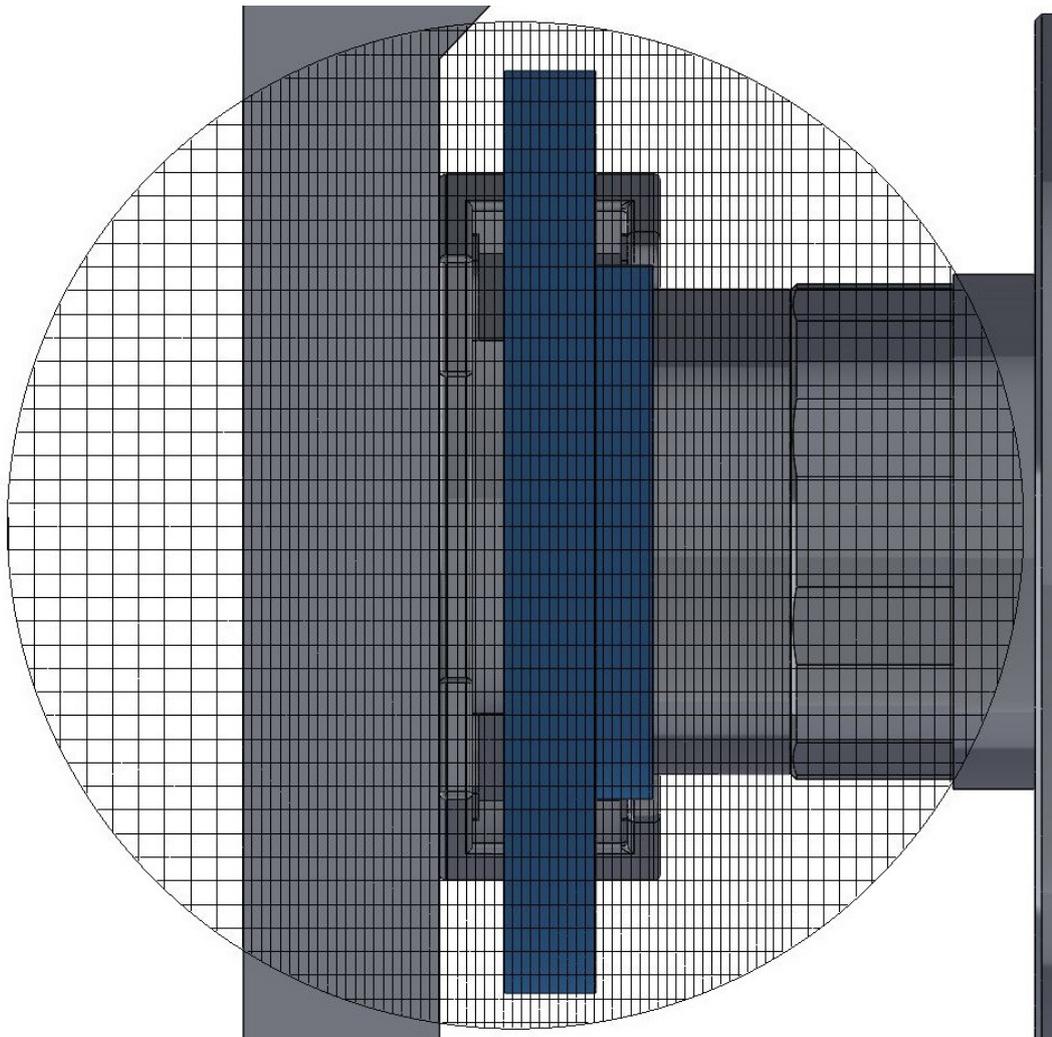


Abbildung 3-16 Netzdarstellung

3.3.4 Randbedingungen

Die Strömungssimulation benötigt an den Systemgrenzen, an denen ein Volumenstrom in das System eintritt bzw. verlässt, vorgegebene Randbedingungen. Aufgrund dieser Randbedingungen stellt sich im System ein Strömungszustand ein.

Die Strömungssimulation des Gehäuses wird als stationäres System angenähert. Der Volumenstrom durch das System ist unabhängig von der Zeit und konstant. Zum Vergleich rechnen beide betrachteten Modelle mit den gleichen Randbedingungen. An jeder Gehäuseöffnung wird ein sogenannter „Deckel“ vorgesehen. Diese Deckel schließen das Gehäuse ab und dienen als Systemgrenzen. An den Systemgrenzen werden die Randbedingungen definiert. An den Einlassöffnungen wird der Umgebungsdruck mit 1013,25 mbar angenommen, an der Auslassöffnung wird ein konstanter Volumenstrom mit 1500 m³/h definiert. Als Fluid wird Luft bei 20 °C angenommen. Die drei Filterelemente (siehe Abbildung 3-6) werden als poröse Medien angenommen, das bedeutet die Filter besitzen für die Strömung einen Strömungswiderstand. Der Strömungswiderstand der Filter äußert sich durch einen Druckverlust. Der Druckverlust ist direkt proportional zu dem Durchfluss durch die Filter, der Druckverlust ist ausgehend von Tabelle 3-2 definiert.

Als Berechnungsziele der Strömungssimulation gelten allgemein die Erhaltungsgleichungen (Massen-, Impuls- und Energieerhaltung). Für eine genauere Analyse der CFD-Berechnung werden noch weitere Ziele definiert. Die Ziele werden als Kriterium für die Konvergenz der CFD-Berechnung berücksichtigt. Als zusätzliche Ziele werden die Massenströme an jeder Gehäuseöffnung definiert. Zusätzlich zu den Erhaltungsgleichungen müssen die Ergebnisse der Massenströme ebenfalls konvergieren.

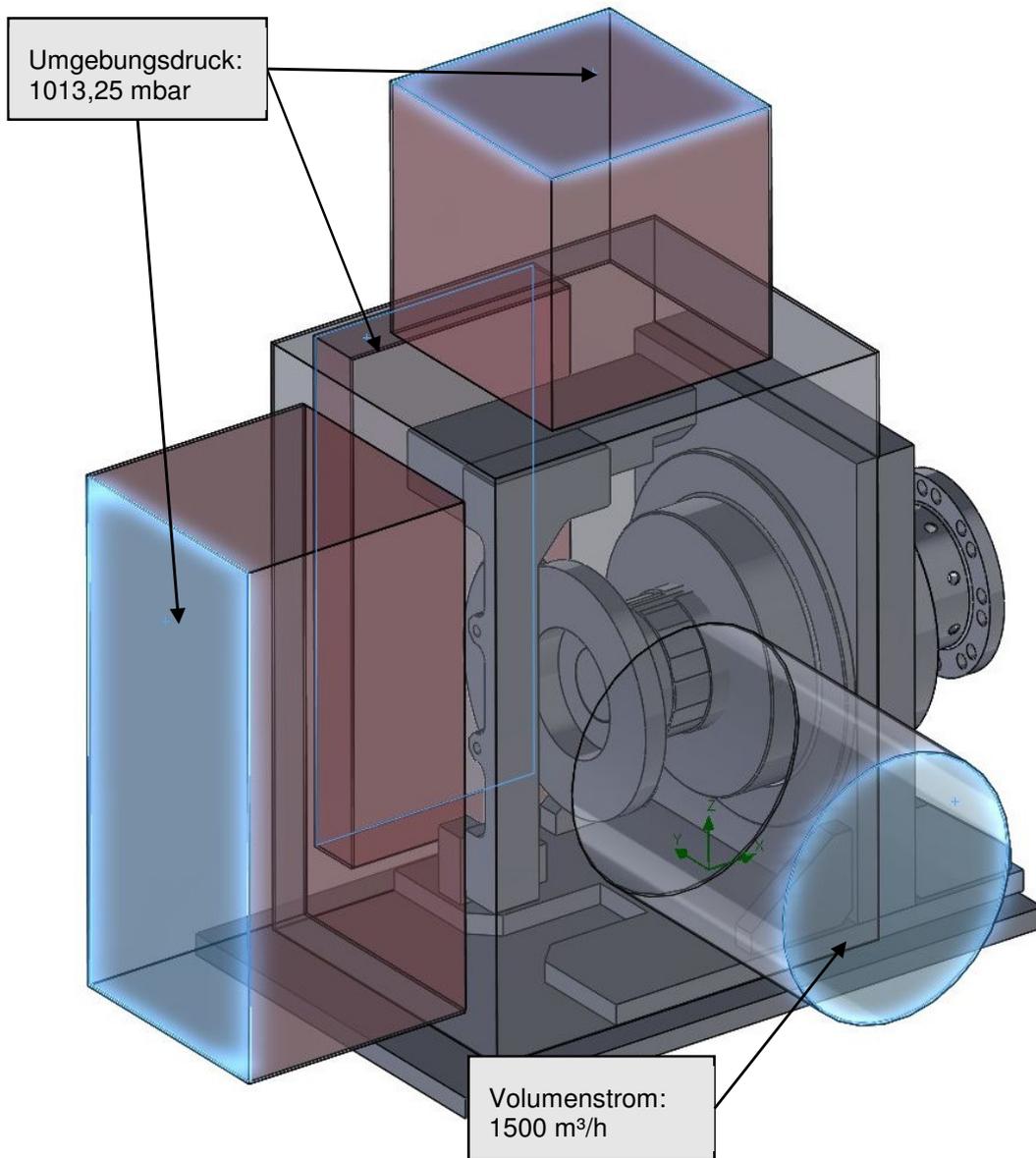


Abbildung 3-17 Randbedingungen für die CFD-Simulation

3.3.5 Vergleich der beiden Gehäuseausführungen

Zum Vergleich der Auslassöffnungen werden die Geschwindigkeitsprofile im Querschnitt betrachtet. In Abbildung 3-18 sind beide Profile gegenübergestellt. Es ist die absolute Geschwindigkeit der Strömung dargestellt. Die Richtung der dominierenden Strömungsgeschwindigkeit ist durch den Pfeil angedeutet. Es ist gut ersichtlich, dass die Strömung im trichterförmigen Auslass über eine längere Strecke beschleunigt wird, während die Strömung im geraden Auslass in einem Bruchteil (Schnitt E) der Strecke beschleunigt wird. Dieser hohe Geschwindigkeitsgradient kann zu einer Abscheidung von Partikel führen, welche unbedingt zu vermeiden ist. Aus der Abbildung 3-18 geht weiters hervor, dass auch bei dem trichterförmigen Anschlussstück ein kleines Gebiet, sogenanntes Totwassergebiet, mit geringer Strömungsgeschwindigkeiten existiert. Das Totwassergebiet ergibt sich aus der starken Umlenkung der Strömung von dem Gehäuse in das Übergangsstück. Daraus ergibt sich auch ein kleines Gebiet mit erhöhter Geschwindigkeit im Übergangsquerschnitt (Schnitt „E“). Gebiete mit erhöhter Geschwindigkeit ziehen sich beim geraden Übergangsstück tiefer in das Gehäuse zurück. Auf die Aufteilung des Volumenstroms auf die verschiedenen Eintrittsöffnungen haben die beiden Formen des Anschlussstutzens keinen merklichen Einfluss. Die Strömungsgebiete mit erhöhter Geschwindigkeit bzw. Totwassergebiete ließen sich mit einem besseren Übergang auf das Anschlussstück vermindern, zum Beispiel durch eine Abrundung am Übergangsquerschnitt „E“.

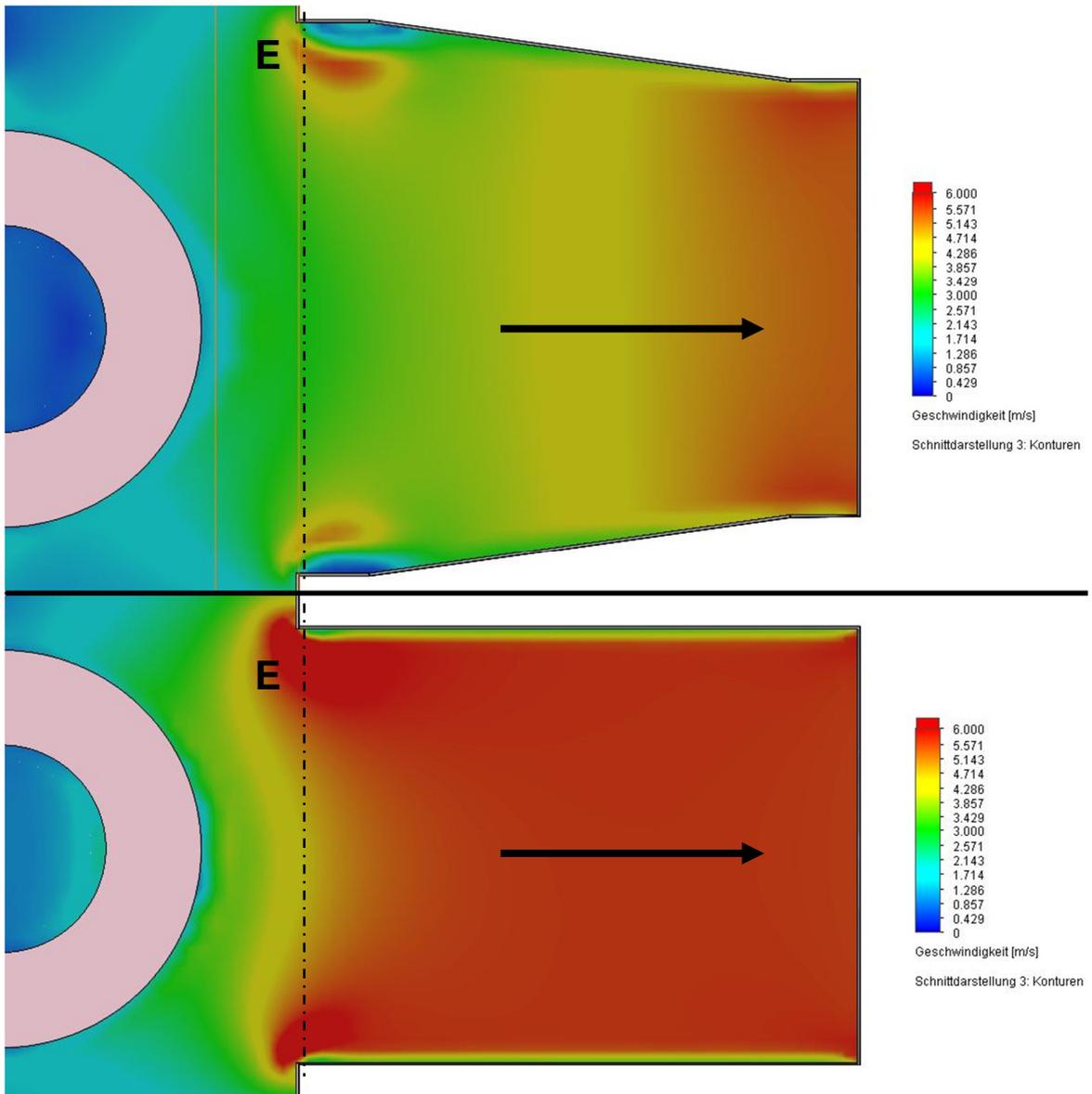


Abbildung 3-18 Vergleich der beiden Geschwindigkeitsprofile

4 Aufbau und Durchführung der Messung

4.1 Messprinzip

Der Messaufbau ist dem Prinzip einer CVS-Anlage (Constant Volume Sampler) sehr ähnlich. Über die Irisblende und den regelbaren Axialventilator wird während der gesamten Messung ein konstanter Volumenstrom durch das Abluftsystem eingestellt. Aus diesem Volumenstrom entnimmt das Messgerät die Probe. Diese Methode hat den Vorteil, dass mit der gemessenen Konzentration direkt auf die Gesamtemission zurückgerechnet werden kann.

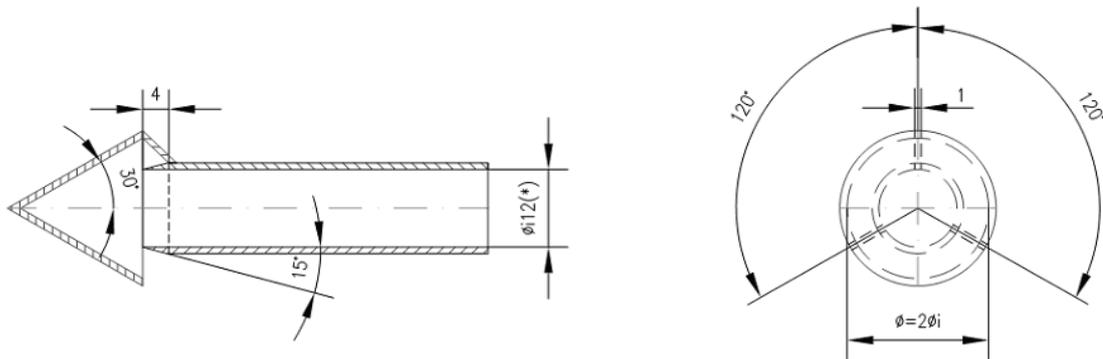
Eine CVS-Anlage wird in der Motorenentwicklung eingesetzt, um das Emissionsverhalten der Motoren zu bestimmen. Dazu wird das ausgestoßene Abgas mit gefilterter Umgebungsluft verdünnt, Durch Blenden wird der Volumenstrom in der Anlage konstant gehalten. Aus dem verdünnten Abgasstrom wird die Probe entnommen und anschließend analysiert.

4.2 Probenahme

Es gibt mehrere Möglichkeiten der Probenahme zur Bestimmung der Partikelbeladung, die isokinetische Probenahme und die Probenahme mittels einer Entnahmesonde nach ECE R83, Economic Commission for Europe. Die Vorschrift R83 beschreibt direkt die Messung der Schadstoffemissionen von KFZ. Beide Möglichkeiten der Probenahme werden im Anschluss kurz erläutert.

4.2.1 Entnahmesonde

Die bei dieser Versuchsdurchführung verwendete Sonde entspricht einer Sonde nach ECE R83. Die Ausrichtung der Entnahmesonde wird in der ECE R83 vorgeschrieben. Die Entnahmesonde, siehe Abbildung 4-1, wird in den mit Partikel beladenen Luftstrom mit der Spitze entgegen die Strömungsrichtung eingebracht. Die Entnahmeposition der Probe sollte möglichst in der Mittelachse der CVS-Anlage liegen. Diese Entnahmesonde sortiert, im Gegensatz zur isokinetischen Probenahme, größere Partikel ($> PM_{10}$) bereits selbstständig aus. Diese Art von Entnahmesonden ist bei der Ermittlung des Partikelaustrittes für die Typzulassung von KFZ im Einsatz. Somit ist diese Art der Probenahme bewährt und reproduzierbar.



(*) Minimum internal diameter
Wall thickness ~ 1 mm - Material: stainless steel

Abbildung 4-1 Entnahmesonde nach ECE R83 [24]

4.2.2 Isokinetische Probenahme

Bei der Probenahme wird nur ein kleiner Teil des Volumenstroms für die Messung entnommen, aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, dass es bei der Probenahme zu keinem Verlust der Partikel kommt. Um den Fehler zu reduzieren, empfiehlt es sich die Absaugung in Richtung der Anströmung und in möglichst gleicher Geschwindigkeit durchzuführen wie die Anströmung. Ist dies der Fall spricht man von einer isokinetischen Probenahme. Das Geschwindigkeitsverhältnis v/w hat einen großen Einfluss auf die Probenahme. Hierbei steht w für die Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung und v für die Geschwindigkeit in der Messsonde. Bei einer Abweichung der Geschwindigkeit kommt es zu einem Messfehler, in Abbildung 4-2 ist dies dargestellt. Bei abweichender Geschwindigkeit kommt es aufgrund der Trägheit der Teilchen zu einem Messfehler, je größer der Partikeldurchmesser desto ausgeprägter ist dieser Effekt. Für den Fall das $w > v$ werden die Stromlinien nach außen gedrängt, die Partikel können dem Stromfaden nicht mehr folgen und gelangen in den Messkopf. Somit kommt es zu einer Anreicherung an größeren Partikeln. Umgekehrt wenn $w < v$ können die Partikel dem Stromfaden ebenso nicht folgen und gelangen nicht in den Messkopf, das Ergebnis wird verfälscht. Die Abweichungen sind einerseits von den Geschwindigkeitsverhältnissen abhängig, andererseits auch von der Partikelgröße. In Abbildung 4-3 ist der Einfluss von Partikelgröße und Geschwindigkeitsverhältnis auf den Wirkungsgrad der Probenahme abgebildet. Die Schwierigkeit die sich bei dieser Art der Probenahme ergibt, ist der Abgleich der beiden Geschwindigkeiten,

w und v, um keinen Partikelverlust durch die Probenahme zu erhalten. Bei dem durchgeführten Versuch liegt das Verhältnis v/w bei rund 0,1. Um die Problematik des Partikelverlustes zu entgehen wird die Entnahmesonde nach ECE R83 gewählt. Durch die Untersuchung des Feinstaubes der Klassifizierung PM₁₀, ist eine Erfassung aller Partikelgrößen nicht notwendig.

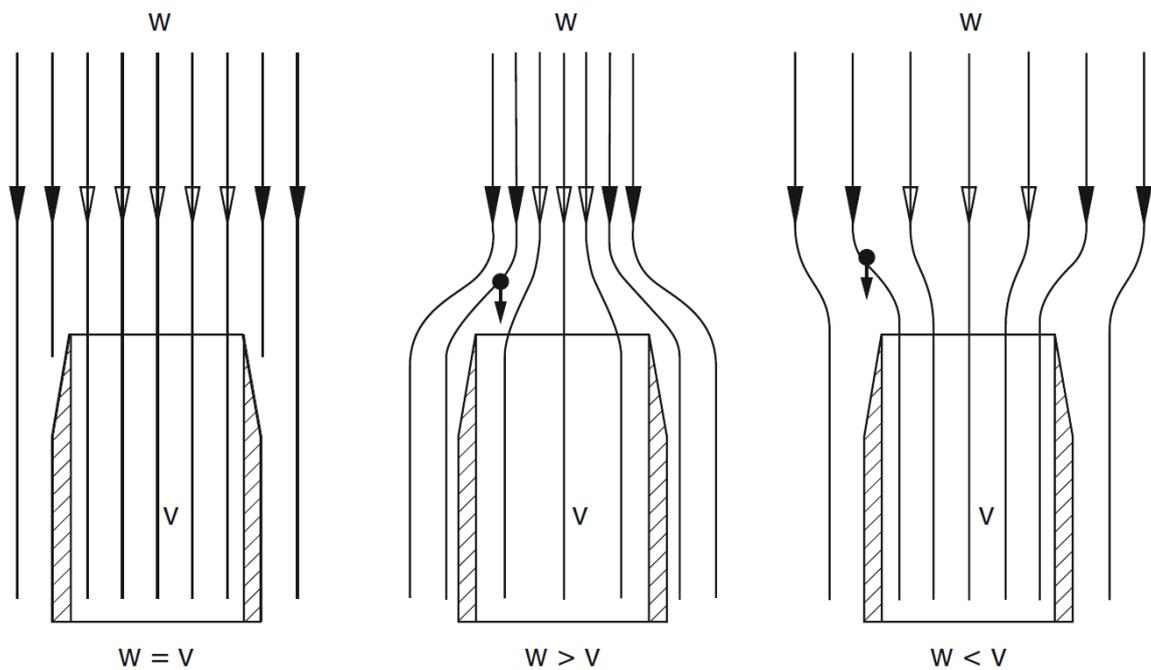


Abbildung 4-2 Prinzipdarstellung der Isokinetische Probenahme [18]

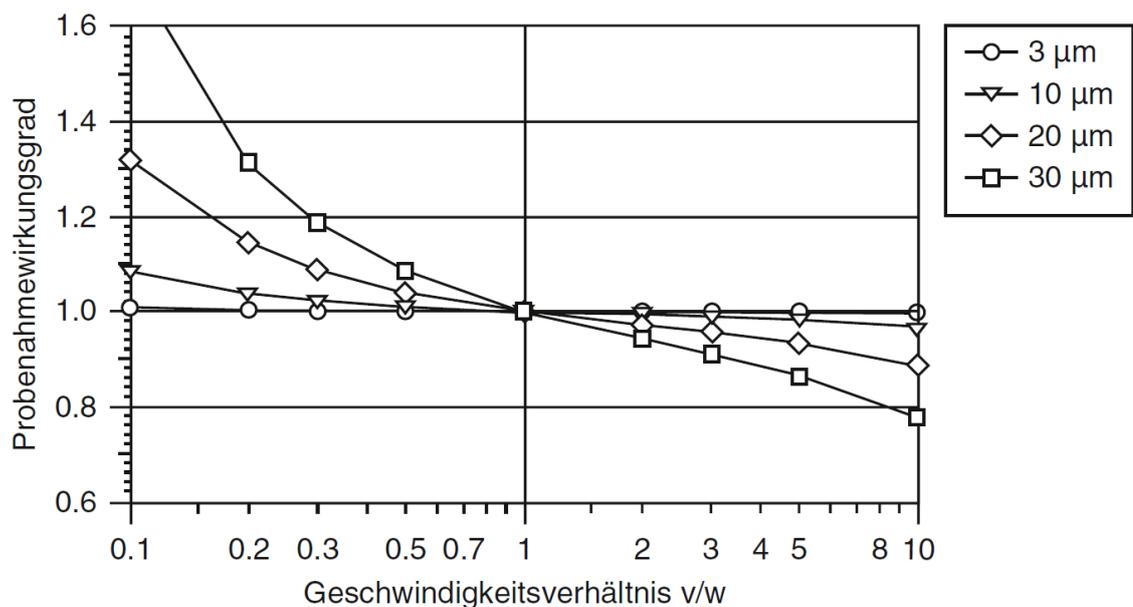


Abbildung 4-3 Einfluss der Partikelgröße und der Geschwindigkeitsverhältnisse auf den Wirkungsgrad der Probenahme [18]

4.3 Messgeräte

Für die Messung der partikelbeladenen Luft kommen zwei Messgeräte der Firma AVL zum Einsatz: PM-PEMS (Serien Nr. 140) und PN-PEMS (Serien Nr. PT1). Hierbei bezieht sich PM bzw. PN auf die Messgröße. PM steht für Particulate Matter und bezieht sich somit auf die Partikelmasse. PN steht für Particulate Number und bezieht sich auf die Partikelanzahl. PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) bezieht sich auf die mobile Anwendung der Messgeräte. Jedes Messgerät erhält eine eigene Entnahmesonde, um eine gegenseitige Beeinflussung bei der Probenahme zu unterbinden. Beide Messgeräte sind während der Messungen mit einem Laptop verbunden, welcher die relevanten Messgrößen für die spätere Auswertung aufzeichnet. Die beiden Messgeräte und die Messprinzipien werden folgend kurz erläutert.

4.3.1 PM-PEMS

Dieses Messgerät besteht aus den folgenden drei Modulen: Sensoreinheit, GFM (Gravimetric Filter Module) und eine Verdünnierzelle mit Transferleitung. Die Steuerung bzw. die Kommunikation mit dem Messgerät funktioniert mittels Netzwerkanschluss. In Abbildung 4-4 ist das Blockschaltbild der PM-PEMS abgebildet. Gut ersichtlich ist die physische Unterteilung der drei einzelnen Module, aus denen das Messgerät besteht. Die Pfeile repräsentieren die verschiedenen Volumenströme, die durchgezogene Linie repräsentiert den beladenen Strom, die gestrichelte Linie die Verdünnungsluft und die strichpunktierte Linie den gefilterten Strom nach der Messung. Vor dem Austritt aus dem Gerät wird der Luftstrom gefiltert, um die Partikel zu entfernen.

Die Sensoreinheit beinhaltet die Messung der Partikelbeladung in mg/m^3 . Die Aufzeichnung erfolgt kontinuierlich und zeitaufgelöst. Somit lassen sich die einzelnen Messwerte den Bremsungen zuordnen. Zur Bestimmung der Partikelbeladung in mg/m^3 wird der Micro Soot Sensor (MSS) benutzt. Der MSS arbeitet auf Grundlage des photoakustischen Effekts. Die Partikel werden mit Hilfe eines Laserstrahles periodisch erwärmt. Durch das Aufheizen bzw. das Abkühlen und der damit verbundenen Ausdehnung entstehen Schallwellen, welche mit

Mikrofonen gemessen werden. Die Amplituden der Schallwellen sind proportional zu der Partikelmasse, die sich in der Probe befindet.

Die GFM beinhaltet die gravimetrische Filtereinheit und die Aufbereitung bzw. Regelung des Verdünnungsluftstromes. In der GFM wird während der Messung ein Feinfilter (Typ: EMFAB TX40HI20-WW 47 mm) beladen. Dieser wird vor dem Einlegen in die PM-PEMS und nach der Messung gewogen, um die gesamte Partikelbeladung zu bestimmen. Des Weiteren wird auch Untersuchung des Feinfilters mittels Elektronenmikroskop durchgeführt.

Die Verdünnerzelle ist direkt an der Entnahmestelle angebracht, in dieser wird der entnommene Volumenstrom mit der aufbereiteten Luft verdünnt. Aufbereitete Luft bedeutet in diesem Fall, dass die Luft gefiltert und entfeuchtet zur Verdünnerzelle geleitet wird. Die Verdünnung hat den Zweck, etwaige auftretende Konzentrationsspitzen, die über der Messgrenze des Messgeräts liegen, abzumindern und andererseits, die Kondensation des Messgases zu verhindern. Die Verdünnungsrate kann angepasst werden. Die Verdünnungsrate ist frei wählbar und ist direkt proportional zu dem entnommenen Volumenstrom. Für diese Messung wurde die Verdünnungsrate d auf den konstanten Wert $d = 5$ gesetzt. Das heißt, zu einem entnommenen Volumenanteil aus dem Abluftsystem werden vier Anteile Verdünnungsluft hinzugegeben. Somit ergeben sich in Summe fünf Anteile, $d = 5$.

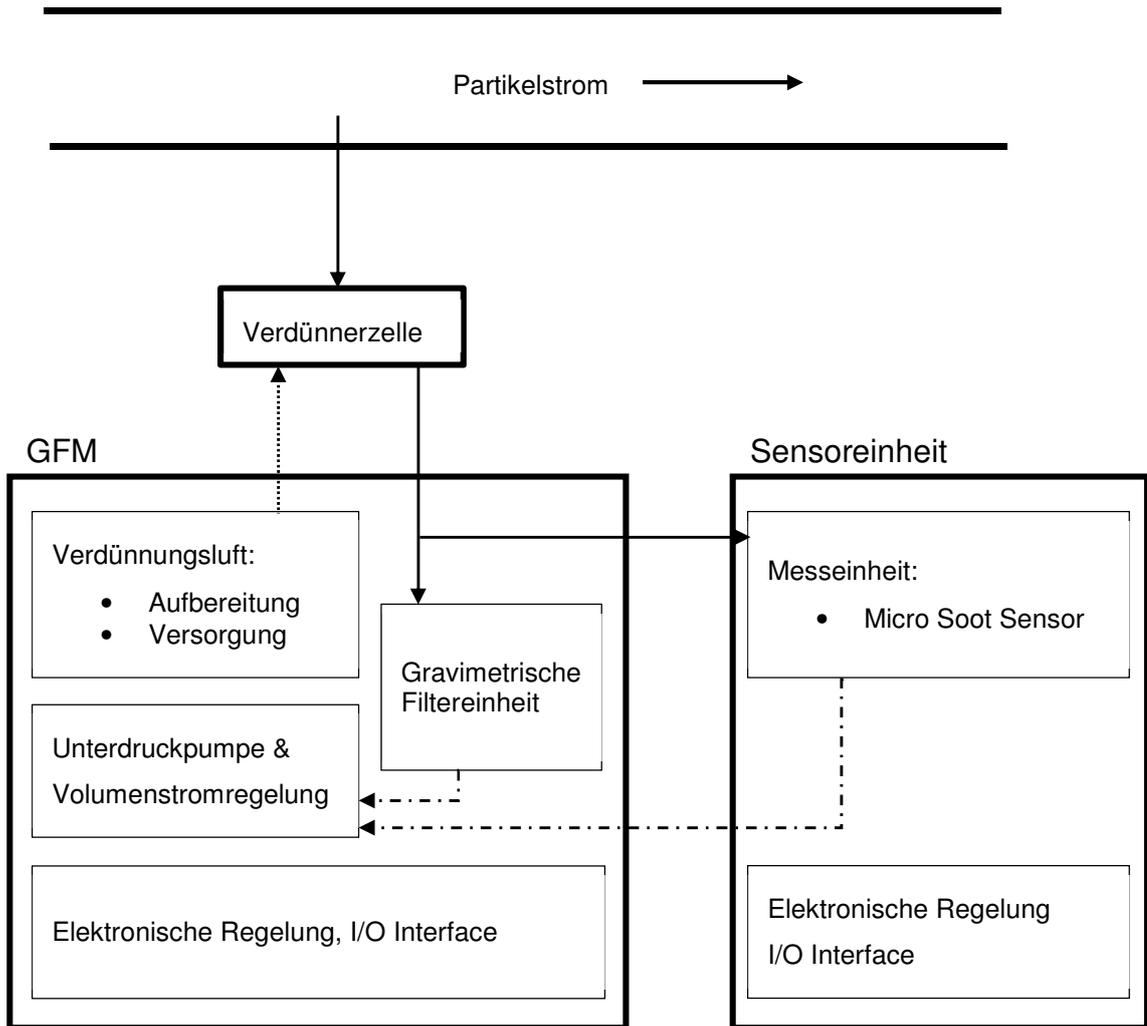


Abbildung 4-4 Blockschaubild PM-PEMS

4.3.1 PN-PEMS

Dieses Messgerät besteht ebenfalls aus mehreren Modulen, analog zur PM-PEMS ist eine Verdünnnerzelle vorhanden. Die Sensoreinheit beinhaltet die Verdünnungsluftaufbereitung und die komplette Messtechnik. Weiters sind zwei analoge Messeingänge vorhanden, damit können direkt Daten vom Prüfstand übertragen und aufgezeichnet werden. Das Messgerät ist mittels serieller Schnittstelle mit dem Laptop verbunden. Das Blockschaltbild in Abbildung 4-5 zeigt die Volumenströme des Messgeräts, hierbei stellen die durchgezogenen Linien die partikelbeladene Luft, die gestrichelte Linie die Verdünnungsluft und die strichpunktierte Linie den Luftstrom nach dem Messgerät dar. Vor dem Austritt aus dem Gerät wird die partikelbeladene Luft gefiltert.

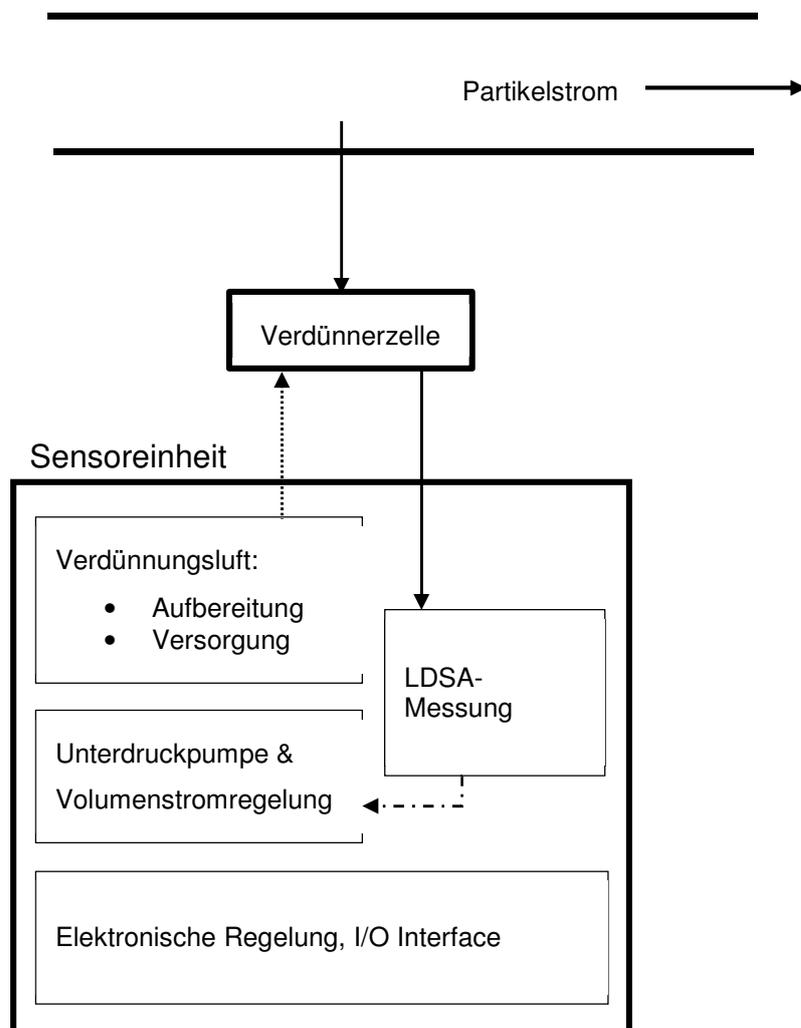


Abbildung 4-5 Blockschaltbild PN-PEMS

Die Klassifizierung des Feinstaubes erfolgt über das Volumen, zum Beispiel mg/m^3 oder die Anzahl $1/\text{m}^3$. Die reine Angabe der Masse bzw. der Partikelanzahl ist jedoch nicht ausreichend hinsichtlich der Gesundheitsgefährdung. Die PN-PEMS misst nicht die Partikelanzahl, sondern bestimmt den LDSA-Wert in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, also wieviel μm^2 an Partikeloberfläche pro inhaliertem cm^3 enthalten sind. Zur Bestimmung des LDSA-Wertes werden die Partikel elektrisch geladen. Die partikelbeladene Luft passiert einen Draht an dem eine modulierte Hochspannung anliegt, die zur teilweisen Ionisierung der Luft führt und sich auf diese Weise geladene Luftmoleküle an der Partikeloberfläche anlagern können. Anschließend wird die Ladung der Partikel mit einem Elektrometer gemessen, diese Ladung ist proportional zur Partikeloberfläche und korreliert mit dem LDSA-Wert. Zur Veranschaulichung warum die Messung der Partikelmassenemission für die Auswirkungen auf die Gesundheit (Vgl. Kapitel 2.2) nicht ausreicht: verglichen werden zwei unterschiedlich große Partikel (gleiche Dichte, ideale Kugelform) zum Beispiel 40 nm und 200 nm. Es ergibt sich für das große Partikel ein 125-fach höheres Gewicht und dementsprechend eine höhere Gewichtung bei der PM-Klassifizierung als für das kleinere. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit um ein vielfaches kleiner, im Körper abgelagert zu werden - im Gegensatz zum kleineren Partikel (vgl. Abbildung 2-6). Das große Partikel besitzt eine Wahrscheinlichkeit von rund 10 %, dass es abgelagert wird. Das kleine hingegen besitzt eine Wahrscheinlichkeit von rund 50 %. Vergleicht man weiters die Oberfläche der Partikel (40 nm und 200 nm) ist der Unterschied in der Oberfläche nur mehr das 25-fache. Das kleinere Partikel wird aufgrund seiner Oberfläche bei der Bestimmung des LDSA-Wertes besser berücksichtigt, was die gesundheitliche Relevanz besser darstellt.

4.3.2 Überwachung der statischen Druckdifferenz an der Irisblende

Die Strömung in dem Rohrsystem ist stationär. Dennoch ist es wichtig, die statische Druckdifferenz an der Irisblende zu überwachen, um auf etwaige Abweichungen vom Betriebspunkt zu reagieren.

Die Irisblende benötigt zur Bestimmung des Durchflusses die statische Druckdifferenz der Strömung, die sich an der Blende einstellt. Mit der gemessenen Druckdifferenz und der Einstellung der Blende lässt sich der Volumenstrom berechnen. Dafür werden vom Hersteller Berechnungstabellen zur Verfügung gestellt. Für die Bestimmung des Differenzdruckes wird ein U-Rohr Manometer (Abbildung 4-6) benutzt. Der Aufbau des Manometers ist sehr simpel. Es wird an den Anschlussnippeln der Blende ein Schlauch angeschlossen. Dieser ist mit einer Sperrflüssigkeit gefüllt, in diesem Fall mit Wasser, durch den Druckabfall Δp in Pa, wie in Abbildung 3-10 erklärt, bildet sich eine Höhendifferenz Δh in m in dem Schlauch aus. Mit Hilfe der Erdbeschleunigung g in m/s^2 und der Dichte ρ in kg/m^3 der Sperrflüssigkeit lässt sich der Differenzdruck mit der Gleichung (4-1) beschreiben.

$$\Delta p = \rho * g * \Delta h$$

Gleichung (4-1)

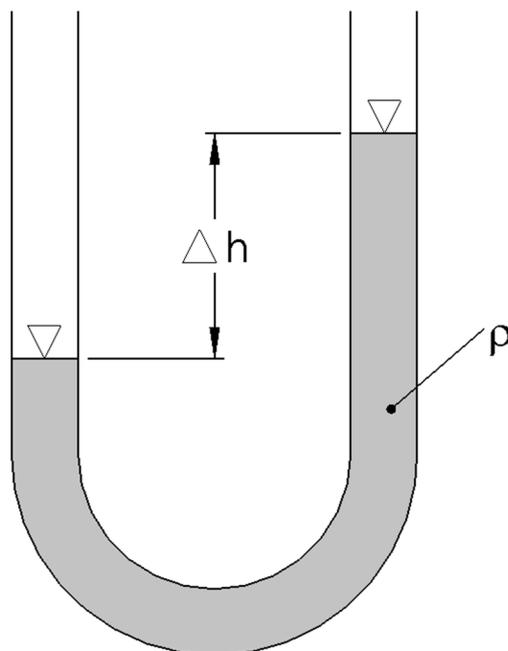


Abbildung 4-6 U-Rohr Manometer

4.4 Prüfprogramm für die Versuchsdurchführung

Im Gegensatz zur Bestimmung des Partikelaustrittes von Verbrennungskraftmaschinen, unterliegen die Bremsen keiner Regelung bezüglich ihres Abtriebsverhaltens. Wie in Kapitel 2 erwähnt, ist es nicht einfach, die Zusammensetzung der Reibmaterialien zu evaluieren und damit weiter die Auswirkungen auf die Gesundheit festzustellen. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Zusammenhänge der Entstehungsmechanismen von Feinstaub in der Bremsanlage zu analysieren.

Das Fahrprofil und damit in weiterer Folge das Bremsverhalten ist sehr unterschiedlich ausgeprägt. Erfahrungsgemäß benötigt eine Fahrt auf der Autobahn, verglichen mit einer Fahrt in der Stadt, ein gänzlich anderes Bremsverhalten. Ebenso sind die Geschwindigkeiten für beide Fälle sehr unterschiedlich. Es gilt also ein Prüfprogramm zu entwickeln bzw. zusammenzustellen, in denen beide Szenarien vorkommen und analysiert werden können. Die derzeit etablierten Prüfprogramme für Bremsen zielen jedoch nicht darauf ab, ein möglichst realistisches Fahrverhalten zu simulieren, sondern untersuchen in erster Linie die Leistungsfähigkeit der Bremse. Ein Vertreter dieser Tests ist der sogenannte „AK Master“ Test. Dieser wurde von SAE (Society of Automotive Engineers) entwickelt und unter der Norm SAE J2522 [25] veröffentlicht. Dieser Test dient dazu, einen internationalen Standard zu schaffen, um verschiedene Reibbeläge miteinander zu vergleichen. Auszüge aus diesem Test werden im Rahmen dieser Arbeit auf einem Schwungmassenbremsprüfstand durchgeführt. Es wird kein vollständiges Fahrzeug benötigt. Lediglich die serienmäßigen Bremsenkomponenten, also Bremssattel, Bremssattelträger und natürlich die Bremsscheibe und die Bremsklötze, alternativ die Bremstrommel und die Bremsbeläge werden benötigt.

4.4.1 Entwicklung eines Prüfprogrammes

Der AK Master ist ein international anerkannter Bremsentest und wird von den Bremsenherstellern benutzt um ihre Produkte zu vergleichen. Dieser Test gibt die Testbedingungen in einem engen Rahmen vor. Die Abfolgen der Bremsungen, die Geschwindigkeiten, die Bremsscheibentemperatur, die benötigten Bremsdrücke

und Verzögerungen sind vorgeschrieben. Dies gewährleistet eine hohe Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit. Im vollen Umfang beinhaltet der AK Master 404 Bremsungen. Ein vollständiger Durchgang würde zu lange dauern, um mehrere Durchgänge durchzuführen. Die Bremsklötze bzw. die Scheibe sind nach einem vollständigen Durchgang verbraucht und müssen ausgetauscht werden. Dies würde einen immensen Verschleiß und somit hohe Kosten verursachen. Um dieses Problem zu umgehen wird nicht der gesamte Test durchgeführt, sondern nur Teile davon: der im Rahmen dieser Arbeit individuell gekürzte Prüfdurchgang beinhaltet 48 Bremsungen. Der gekürzte Prüfdurchgang deckt verschiedene Fahrsituationen ab. Abbremsungen von 80 km/h auf 40 km/h bei verschiedenen Bremsdrücken repräsentieren Bremsungen wie sie bei Ortseinfahrten angewandt werden. Bremsungen von 120 km/h auf 80 km/h sind Vertreter für Bremsungen auf der Autobahn. Hochtemperaturbremsungen von 100 km/h auf 5 km/h, bis zu Temperaturen von 550 °C der Bremsscheibe, sind dabei. Eine detaillierte Auflistung des Prüfdurchganges befindet sich im Anhang in Tabelle 11-1.

Als Ersatz für die Fahrzeugmasse werden am Schwungmassenbremsprüfstand verschiedene Trägheitsmassen eingesetzt. Die Größe dieser Trägheitsmassen ist wiederum von dem untersuchten Fahrzeug abhängig. Der AK-Master schreibt die Höhe dieser Trägheit vor, die von der Bremse verzögert werden muss. Ausgehend von der Gesamtmasse, wird als Bremslast für die Vorderachse 75 % der Gesamtmasse angenommen, also jeweils 37,5 % der Masse an einer Bremse. Ausgehend von einer zulässigen Gesamtmasse des Fahrzeuges von 2600 kg [26] ergibt sich für die Bremse eine Last von 975 kg. Des Weiteren wird die Fahrgeschwindigkeit mit Hilfe der Drehzahl und des dynamischen Rollradius der Serienbereifung (195 70 R15 C 104S) [26] von 317 mm bestimmt.

4.4.2 Beschreibung Schwungmassenbremsprüfstand

Als Bindeglied zwischen Simulation und Fahrversuche sind Versuche am Prüfstand gut geeignet. Für nahezu jedes erdenkliche Merkmal gibt es den geeigneten Prüfstand bzw. Versuch. Die zu überprüfenden Größen reichen von der Festigkeitsüberprüfung über Funktionsüberprüfung weiter zur Leistungsüberprüfung und der Kontrolle der Komforteigenschaften. Für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuche wird ein Schwungmassenbremsprüfstand am Institut für Fahrzeugtechnik eingesetzt. In Diagramm 4-1 sind die Leistungs- und Drehmomentcharakteristik des Schwungmassenbremsprüfstandes abgebildet.

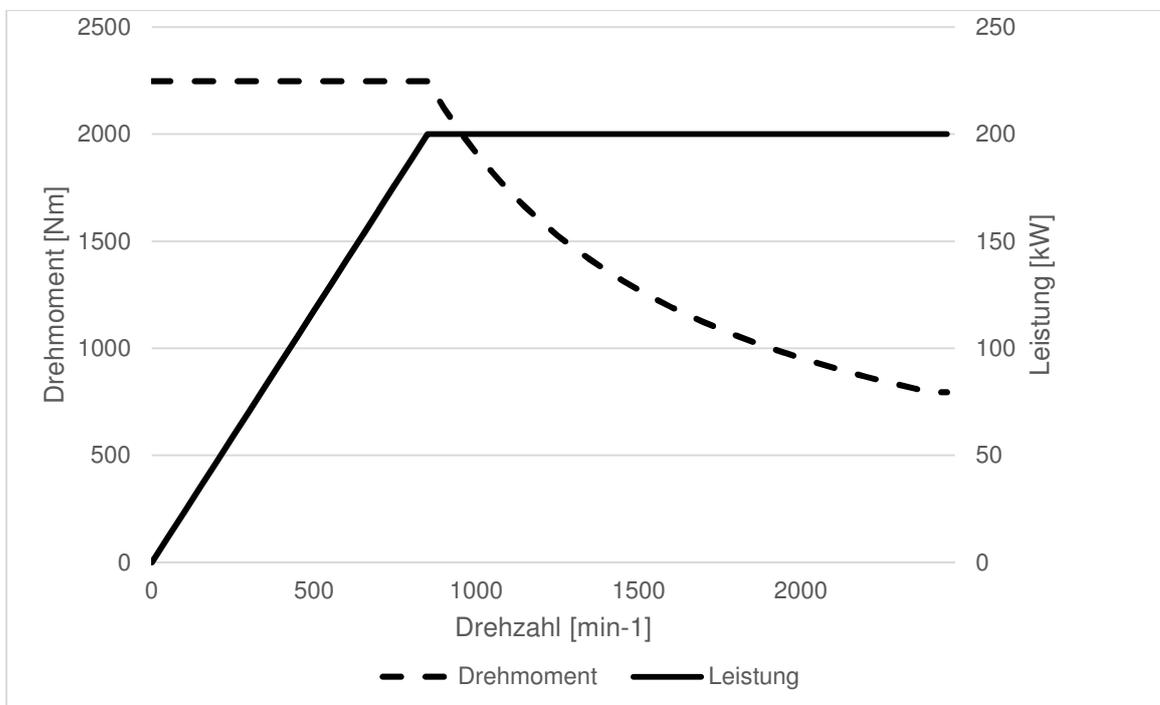


Diagramm 4-1: Leistungs- und Drehmoment Charakteristik Schwungmassenbremsprüfstand

In Abbildung 4-7 ist eine Prinzipdarstellung eines Schwungmassenbremsprüfstandes abgebildet. Mit Hilfe der Schwungmassen lässt sich die kinetische Energie des Fahrzeuges simulieren, mit der Überlagerung des Elektromotors können die genaue Fahrzeugmasse eingestellt (± 5 kg) und ein vorgegebener Fahrzyklus gefahren werden. Als Prüfobjekt dient die komplette Bremse, wie sie am Fahrzeug verbaut wird, inklusive Sattel, Bremsscheibe und Reibbelag bzw. Bremstrommel, Trägerschild mit Bremszylinder und Bremsbacken samt Reibbelag [5].

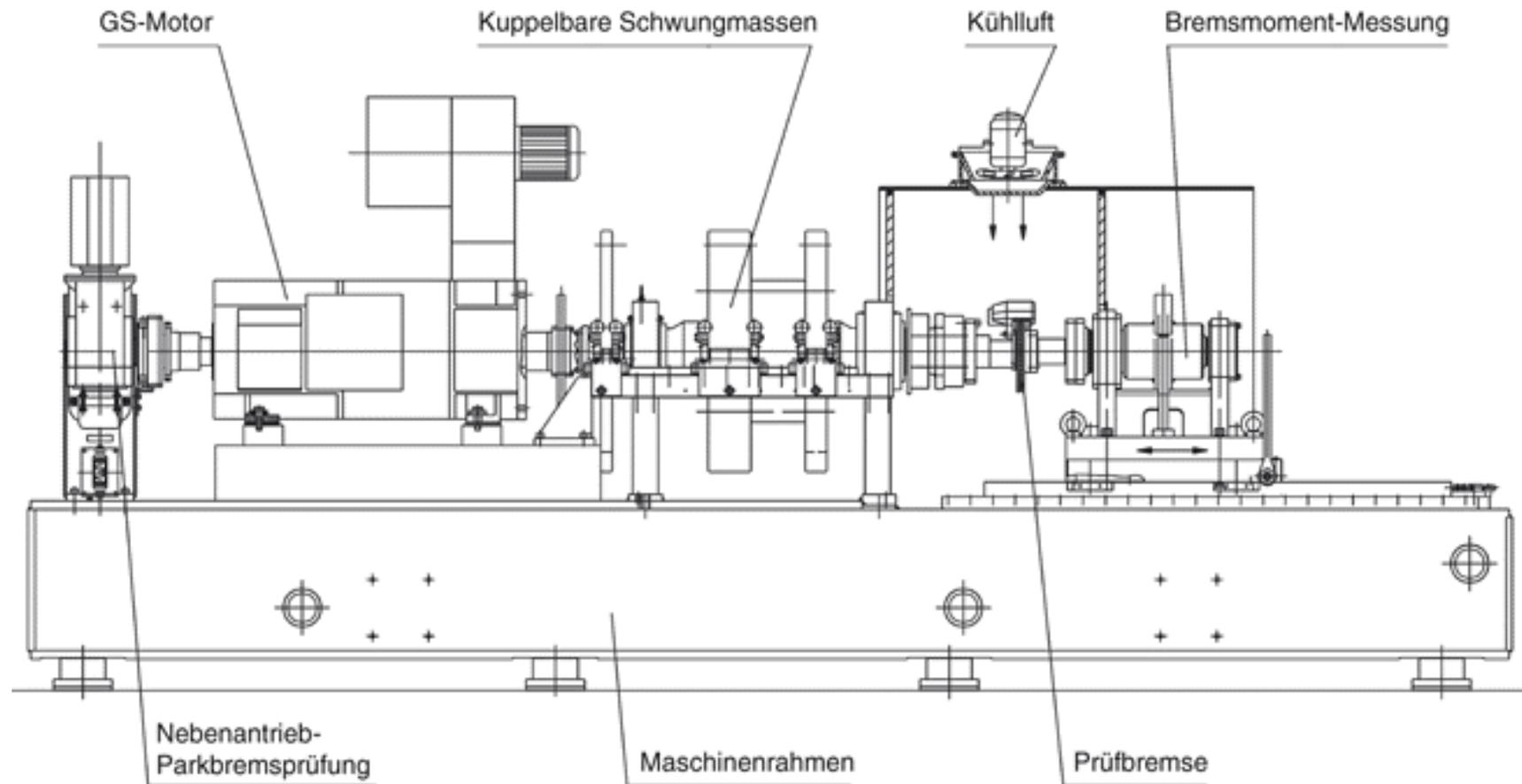


Abbildung 4-7 Prinzipdarstellung des verwendeten Schwungmassenbremsprüfstands [5]

4.5 Aufbau des Prüfstandes

Auf den nächsten Seiten werden die vom Autor gebauten bzw. adaptierten Bauteile kurz erläutert.

Im Vorfeld wurden die benötigten Komponenten der Lüftung bestellt. Eine Übersicht der bestellten Komponenten der Lüftung befindet sich im Anhang in Tabelle 11-4. Die Einzelteile des Gehäuses wurden aus Stahlblech (1 mm Wandstärke) gefertigt und zusammengefügt. In Abbildung 4-8 ist das komplette Gehäuse abgebildet. Erkennbar ist der Anschlussstutzen für den Anschluss der Absaugung. Die Gehäuseöffnungen für die Montage der HEPA-Filter sind auch ersichtlich. Die Befestigung der Filter wird mittels Gewindestangen und einer Klemmleiste realisiert.



Abbildung 4-8 Gehäuse komplett

Zur Überwachung der Bremsentemperaturen werden drei Temperatursensoren eingesetzt. Einer ist in der Bremsscheibe, kolbenseitig, eingelassen, in einer Tiefe von ca. 1 mm von der Oberfläche und ca. 13 mm vom äußeren Reibring entfernt.

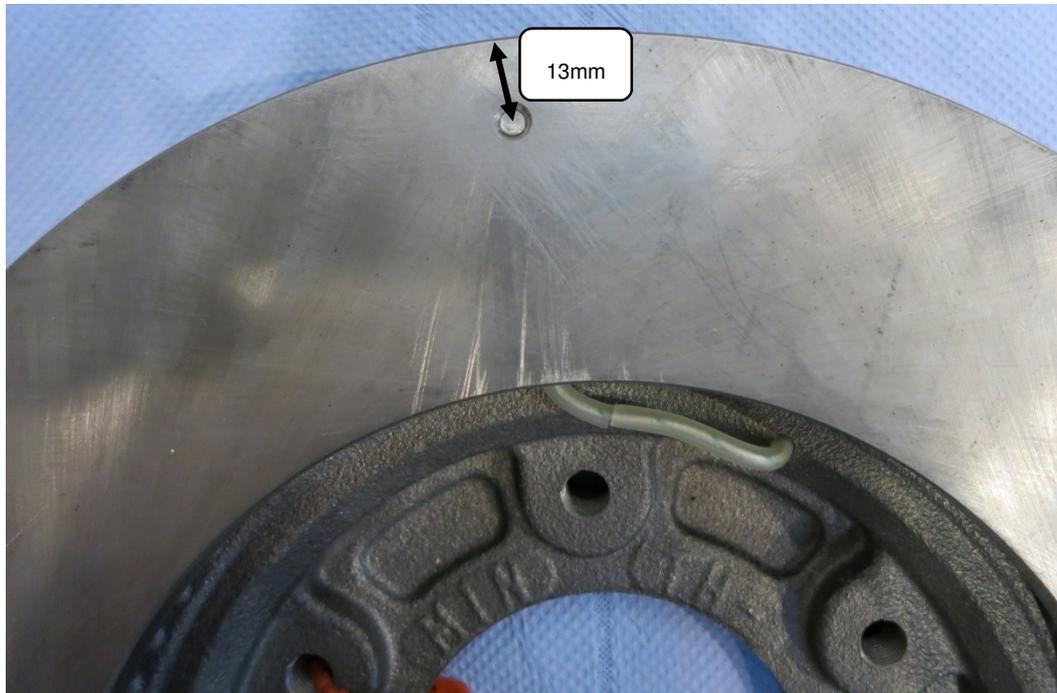


Abbildung 4-9 Bremsscheibe bestückt mit Temperaturfühler

Zwei weitere Temperaturmessstellen befinden sich jeweils in den Bremsbelägen; ein Sensor auf jeder Seite der Bremsscheibe, siehe Abbildung 4-10.



Abbildung 4-10 Bremsbeläge bestückt mit Temperaturfühler

Vor dem Beginn der Messungen werden die Massen der Bremsenkomponenten und die Stärke der Bremsbeläge bestimmt. Damit lässt sich nach den Messungen feststellen, wieviel Material von den Belägen bzw. von der Scheibe abgetragen wurde. Bremsbelag Nr. 2 ist kolbenseitig im Sattel montiert. In Tabelle 4-1 sind die Masse und Abmessungen der Bremsenkomponenten aufgelistet.

Tabelle 4-1 Masse und Abmessungen vor dem Versuch der Bremsenkomponenten

	Masse in g	Dicke in mm
Bremsbelag 1	446	15,45
Bremsbelag 2	447	15,46
Bremsscheibe	7522	28

Weitere Bauteile, welche adaptiert werden mussten, sind die Entnahmesonden. Die Sonden selbst bestehen aus der Sondenspitze und verschiedenen Rohren, die je nach geforderter Länge zusammengefügt werden können. Gut erkennbar sind in Abbildung 4-11 die Sondenspitze und die verschiedenen Rohrlängen. Die Entnahme erfolgt rund 150 mm von der Durchführung durch das Abluftrohr entfernt. Zur Durchführung durch das Rohr wird die Wartungsklappe verändert und angepasst, siehe Abbildung 4-12. In Abbildung 4-13 ist die Position der Entnahmestelle im Abluftsystem abgebildet.

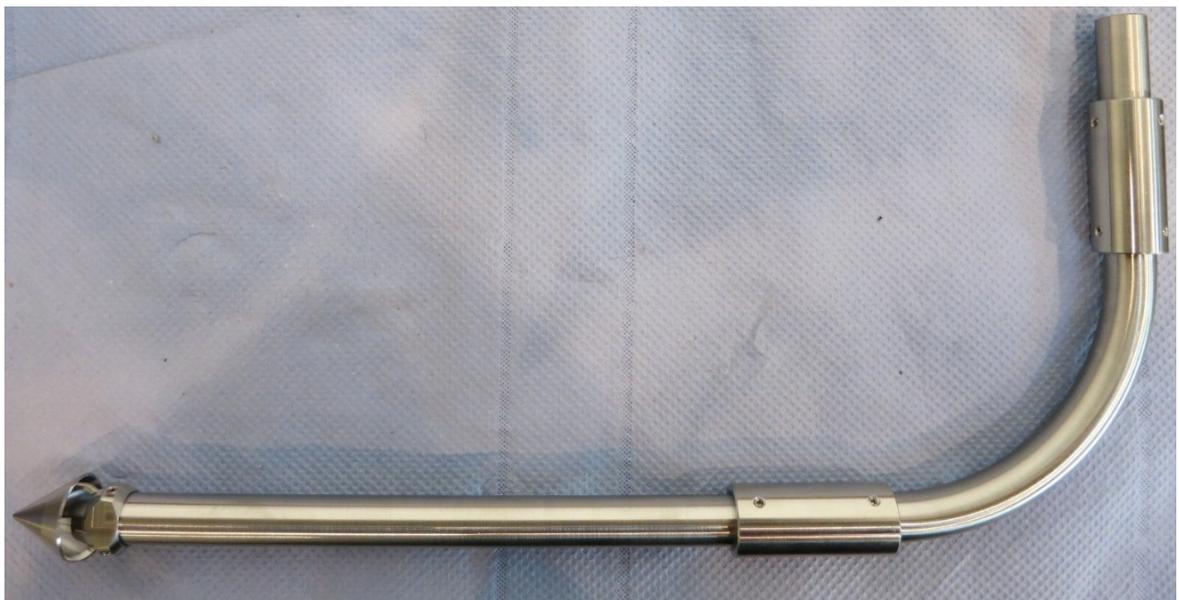


Abbildung 4-11 Entnahmesonde mit Sondenspitze nach ECE R83



Abbildung 4-12 Sondendurchführung



Abbildung 4-13 Entnahmestelle der Probe im Abluftsystem

Aus Sicherheitsgründen ist es wichtig, dass die Prüfkammer während dem Betrieb nicht zugänglich ist. Durch die Abmessungen der Abluftstrecke ist es nicht möglich, die gesamte Anlage inkl. Messequipment in der Prüfkammer unterzubringen. Aus diesem Grund wird die Türöffnung mit einer Holzplatte verschlossen, siehe Abbildung 4-14. Weiters ist auch die Probenentnahmestelle in der Wartungsklappe bzw. der flexible Schlauch zur Abluftentsorgung sichtbar.

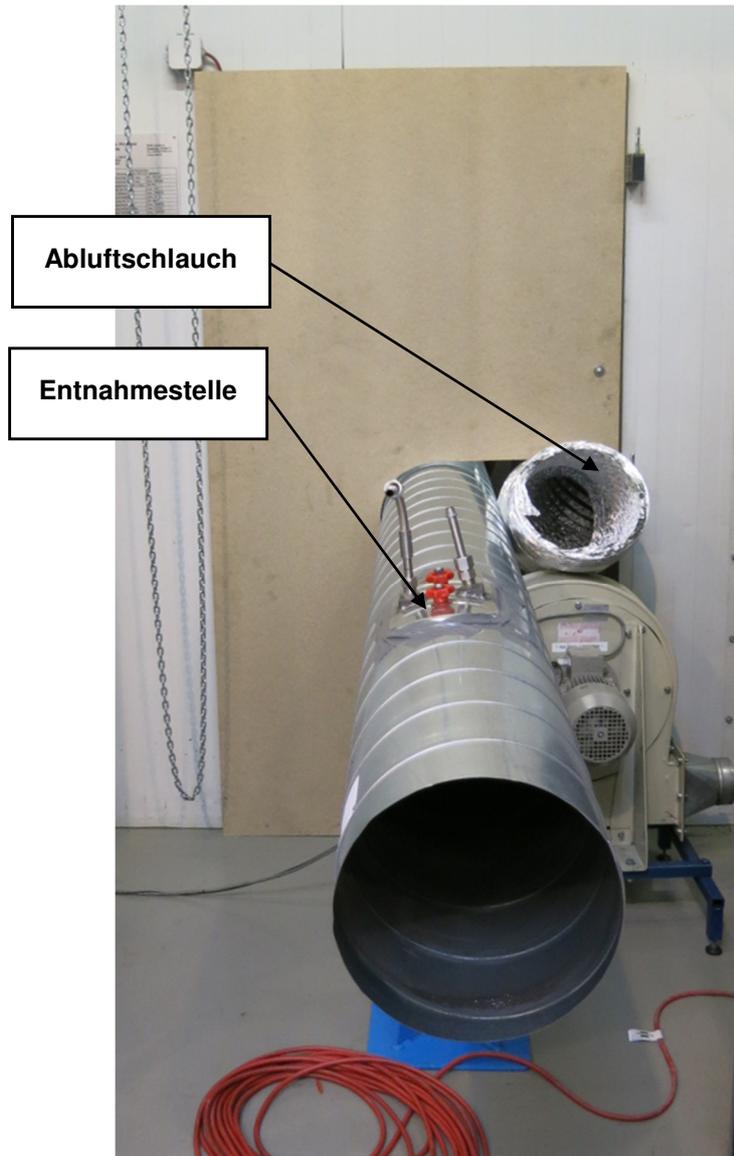


Abbildung 4-14 Prüfkammeröffnung

In Abbildung 4-15 sind der Aufbau des Gehäuses und die dazugehörigen HEPA-Filterelemente in der Prüfkammer abgebildet. Die Fugestellen am Gehäuse und am Übergang zur Rohrleitung wurden zusätzlich mit Klebeband abgedichtet. Ein Luftstrom in das Gehäuse ist somit nur mehr durch die HEPA-Filterelemente möglich.

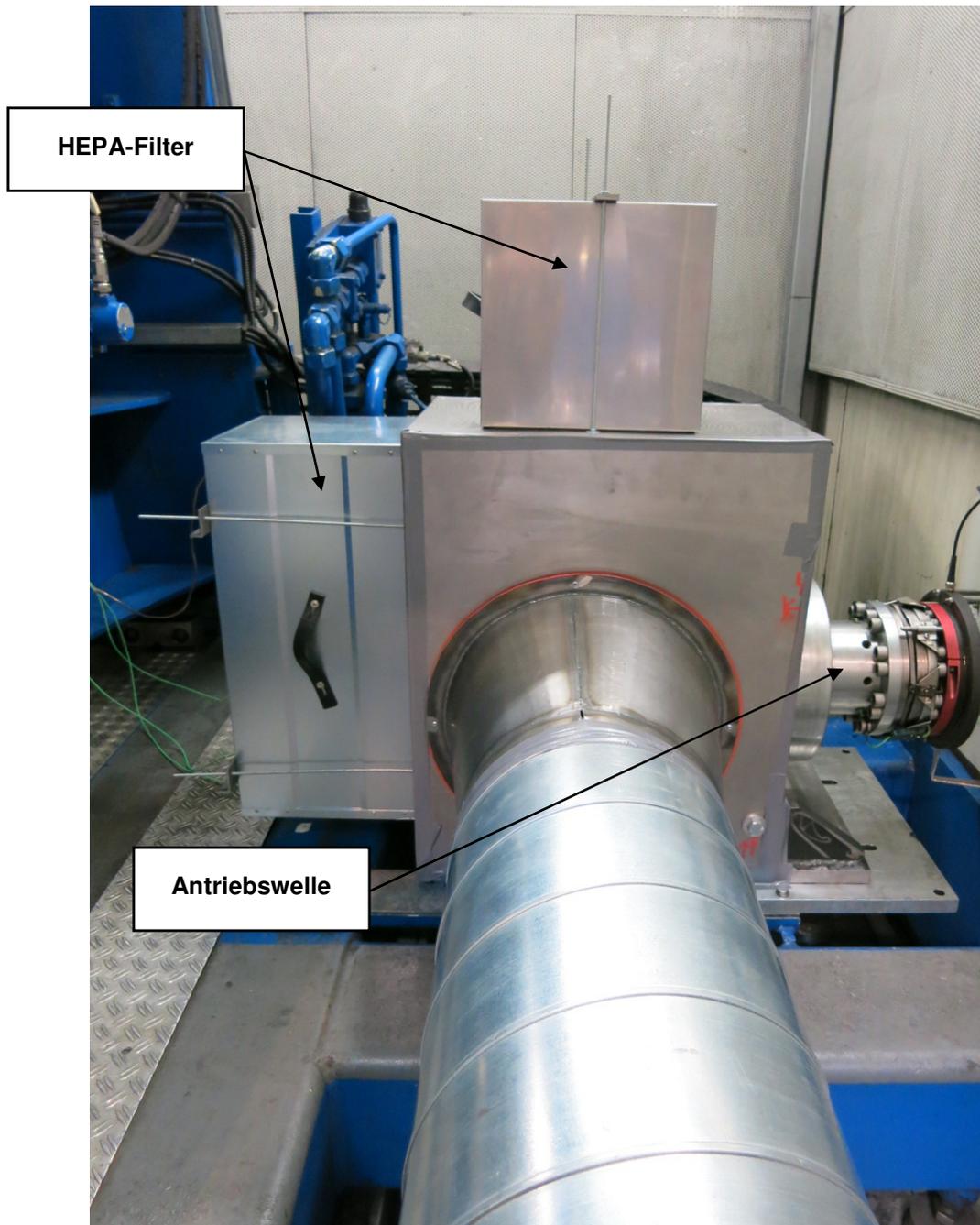


Abbildung 4-15 Aufbau Gehäuse in Prüfkammer

Als nächster Schritt wird die Anlage gemäß Abbildung 3-11 mit den modifizierten Elementen aufgebaut. In Abbildung 4-16 sind die Entnahmestrecke und der Entnahmepunkt mit den jeweiligen Verdünnern der Messgeräte ersichtlich, nach der Entnahmestelle folgt die Filtration in der Luftfilterbox.

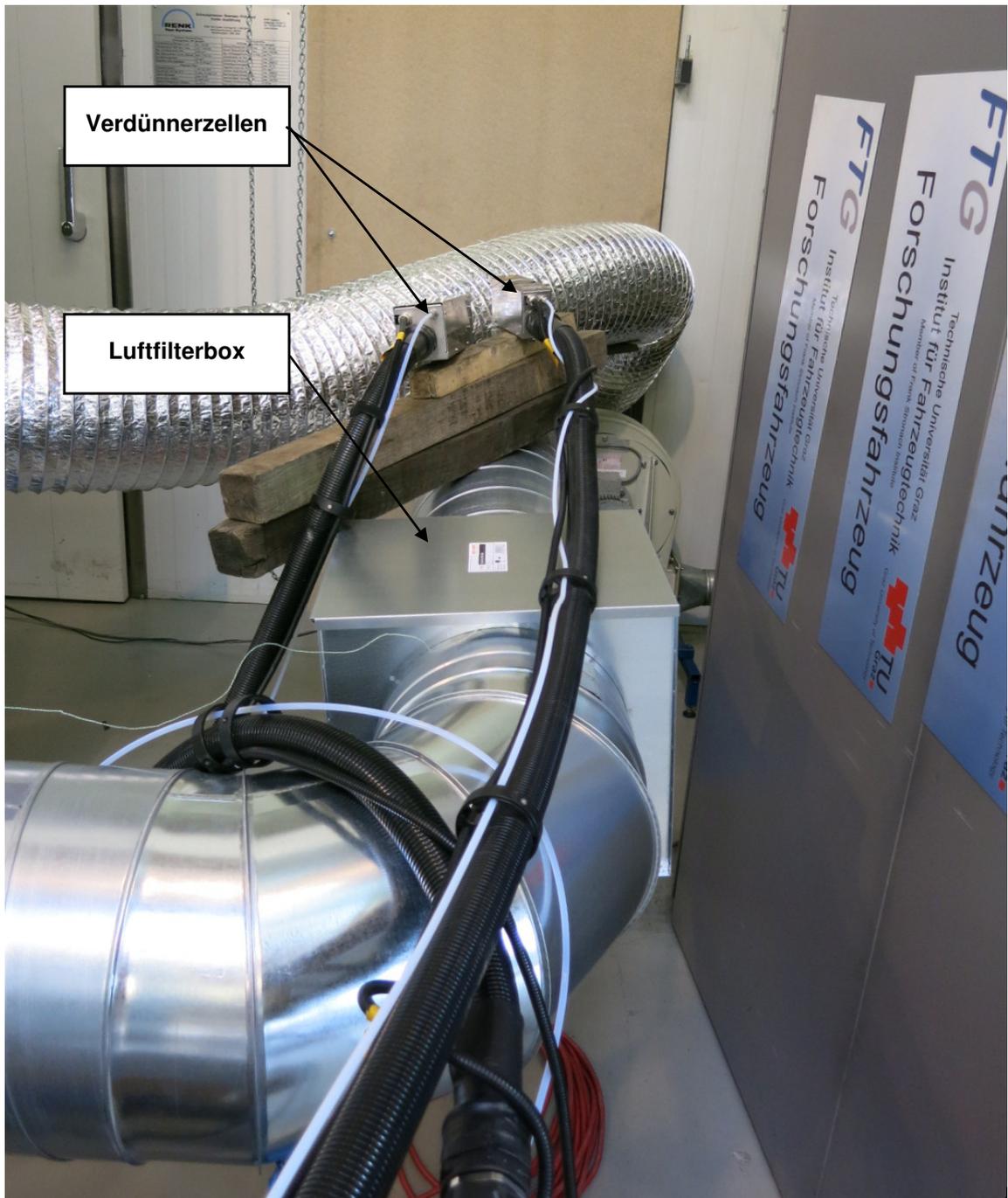


Abbildung 4-16 Entnahmestrecke

Nach der Filtration in der Luftfilterbox wird die Strömung umgelenkt (Abbildung 4-17) und passiert die letzten Elemente der Abluftstrecke. Als Erstes kommt die Irisblende und anschließend der Axialventilator und der flexible Abluftschlauch.

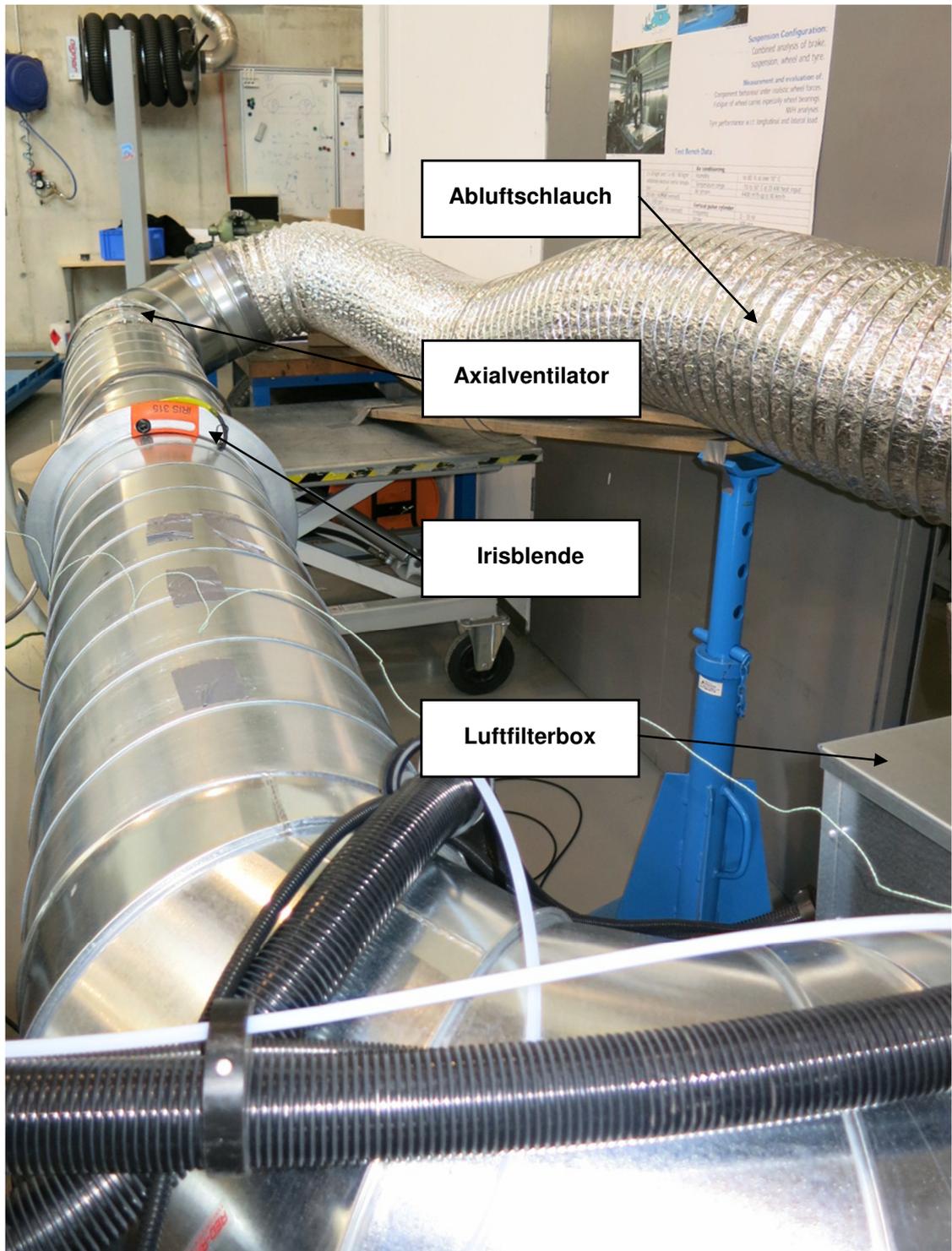


Abbildung 4-17 Volumenstrommessung nach der Entnahmestrecke

4.6 Prüfablauf

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erreichen, wurde der Prüfdurchgang insgesamt neun Mal durchgeführt. Der erste Durchgang dient dazu, die neuen Bremsenkomponenten aufeinander einzubremsen. Die nächsten beiden Durchgänge zwei und drei dienten dazu, den Abluftstrom einzustellen.

Im ersten Durchgang und der Beachtung der beiden Messgeräte (PN/PM-PEMS), lässt sich beobachten, dass bei voller Leistung des Axiallüfters und bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten der Bremsscheibe der Ausschlag der Messgeräte verhältnismäßig klein ist. Bei voller Leistung des Axiallüfters stellt sich ein Volumenstrom von 330 l/s ein. Zusammen mit dem Rohrdurchmesser von 315 mm ergibt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von rund 4,2 m/s. In den nächsten beiden Durchgängen, zwei und drei, wird die Leistung des Axialventilators verringert, der Luftdurchsatz beträgt rund 250 l/s, dies entspricht einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von rund 3,2 m/s. Der geringere Volumenstrom (250 l/s) wird bis Bremsung 23 (detaillierte Auflistung siehe Anhang Tabelle 11-1) eines Prüfdurchganges eingestellt. Mit der Verringerung des Volumenstromes wird gleichzeitig die Konzentration der Partikel in der Abluft erhöht. Der Luftdurchsatz lässt sich nicht beliebig reduzieren; er ist nötig um die entstandenen Partikel durch die Bremsung weg zu transportieren bzw. die Bremse nach einer erfolgten Bremsung wieder auf die geforderte Temperatur zu kühlen. Ab Bremsung 24 wird der Axiallüfter auf volle Leistung eingestellt und der Durchsatz beträgt 330 l/s.

Für die Auswertung werden die Messergebnisse von sechs Prüfdurchgängen herangezogen. Ein Prüfdurchgang dauert rund 3h, bedingt durch die Abkühlphasen nach den Bremsungen. In der PM-PEMS werden während eines Prüfdurchganges Feinfilter beladen. Die Feinfilter bleiben für zwei Durchgänge in der PM-PEMS verbaut. Feinfilter Nr. 3 wird während des 4. und 5. Durchganges beladen, Feinfilter Nr. 4 während dem 6. und 7. Durchgang, Feinfilter Nr. 5 während dem 8. und 9. Durchgang. Feinfilter Nr. 1 und Nr. 2 werden für die Auswertung nicht verwendet.

Die Abfolge der Bremsungen für einen Prüfdurchgang ist in einem Programm für den Bremsenprüfstand vorgegeben. Der Ablauf erfolgt vollautomatisch. Die relevanten Daten für die spätere Auswertung werden vom Prüfstand während des Durchganges gespeichert. Zu den wichtigsten Daten zählen die

Fahrgeschwindigkeit, der Bremsdruck und die Temperatur der Bremsscheibe. Der Bremsdruck und die Temperatur der Bremsscheibe werden über die analogen Signalausgänge direkt auf die PN-PEMS übertragen und aufgezeichnet. Somit ist die spätere Verknüpfung von einem Bremsereignis und dem LDSA-Wert einfacher.

Vor dem Start des Prüfdurchganges werden der Axialventilator und der festgelegte Betriebspunkt mit Hilfe des U-Rohr Manometers eingestellt. Am Frequenzumrichter wird die Drehzahl des Lüfters angepasst bis der geforderte Durchfluss gewährleistet ist. Anschließend wird die Bremsscheibe in Rotation versetzt, um etwaige Ablagerungen aus dem System zu entfernen. Erst danach werden die Messgeräte (PN- und PM-PEMS) gestartet und der Prüfdurchgang aufgerufen. Nach Beendigung des Prüfdurchganges verbleiben die Bremsscheibe in Rotation und der Axialventilator aktiv. Durch die hohe Temperatur, von über 600 °C, verursacht durch die letzte Bremsung, ist die Gefahr sehr hoch, dass es zu einem Verzug der Bremsscheibe kommt. Die Abkühlphase dauert solange an, bis die Bremsscheibe eine Temperatur von weniger als 40 °C erreicht hat. Ein Prüfdurchgang dauert inkl. der Abkühlphasen zwischen den Bremsungen rund drei Stunden.

5 Auswertung

Der letzte Punkt behandelt die Auswertung und Interpretation der Messung bzw. der Messergebnisse. Im ersten Abschnitt werden der Abbau und die Sichtkontrolle der Einzelteile dokumentiert. Als nächstes die Auswertung der PN-PEMS und der PM-PEMS; die Messergebnisse der beiden Messgeräte werden in passenden Diagrammen grafisch dargestellt. Die Berechnung der Feinstaubemission basierend auf dem beladenen Feinfilter; die Ergebnisse der Untersuchung mit dem Elektronenmikroskop der Feinfilter und des Bremsbelages stellen den letzten Punkt der Auswertung dar.

5.1 Abbau des Prüfstandes

Erster Schritt nach Beendigung der Prüfdurchgänge stellt den Abbau des Prüfstandes und die Zerlegung der Bremse dar. Hierbei werden die Abluftstrecke und das Gehäuse über der Bremse auf Ablagerungen kontrolliert und bewertet. Bis zur Luftfilterbox (vgl. Abbildung 3-11 Pos. Nr. 4) sind Partikel jeder Größe vorhanden. Bei der Filtrierung wurde der Grobstaub entfernt und Ablagerungen an den folgenden Komponenten sind Partikel der Größenklasse PM_{10} .

Die Luftfilterbox verfügt über einen Filter der Klasse G3, der Filter besitzt einen Abscheidegrad zwischen 80 – 90 % [18]. Der Filter scheidet Partikel bis zu einer Größe von 10 μm ab. Die nachfolgenden Ablagerungen an den Komponenten sind Partikel mit einer Größe $< 10 \mu m$. Die Ablagerungen sind an der Irisblende, (vgl. Abbildung 3-11 Pos. Nr. 5) siehe Abbildung 5-1, an dem Lamellenmechanismus ersichtlich. Vergleicht man diese mit dem Schmutz, der sich vor dem Filter in der Luft befunden hat Abbildung 5-2, ist gut zu erkennen, dass sich vor dem Filter eine beträchtliche Menge an Abrieb in der Luft befunden hat. Der Abrieb hat sich auch vor der Luftfilterbox an dem Übergang vom geraden Rohr, an dem die Entnahmestelle angebracht ist, an die Luftfilterbox (vgl. Abbildung 3-12 Pos. Nr. 3 und Nr. 4) angesammelt, siehe Abbildung 5-3. An den Entnahmesonden haben sich in Richtung der Anströmung ebenfalls Ablagerungen gebildet, siehe Abbildung 5-4. Die Verschleppung von der groben Staubfraktion bis zur Luftfilterbox, lässt darauf schließen, dass auch die Feinstaubfraktion (PM_{10}) von der Strömung erfasst und durch die Messgeräte gemessen wurde.



Abbildung 5-1 Verschmutzung der Lamellen der Irisblende



Abbildung 5-2 Verschmutzung der Luftfilterbox



Abbildung 5-3 Verschmutzung am Rohrübergang



Abbildung 5-4 Verschmutzung der Entnahmesonden

Besonderes Augenmerk gilt auch den Verschmutzungen und Ablagerungen in dem Gehäuse, in unmittelbarer Umgebung der Bremsscheibe. Durch die Rotation der Bremsscheibe hat sich der Abrieb direkt unter der Bremse und in Radialrichtung der Bremsscheibe abgelagert, siehe Abbildung 5-5. Weitere Ablagerungen in radialer Richtung waren auch innen am HEPA-Filter (Filter Nr. 3 vgl. Abbildung 3-6) und an der Gehäusewand zu finden, siehe Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7. Bei der Ablagerung am Gehäuse ist auch zu beachten, dass durch den größeren trichterförmigen Anschluss der Absaugung, ein Teil der Ablagerung verhindert wird und mit der Strömung aus dem Gehäuse abtransportiert wird.

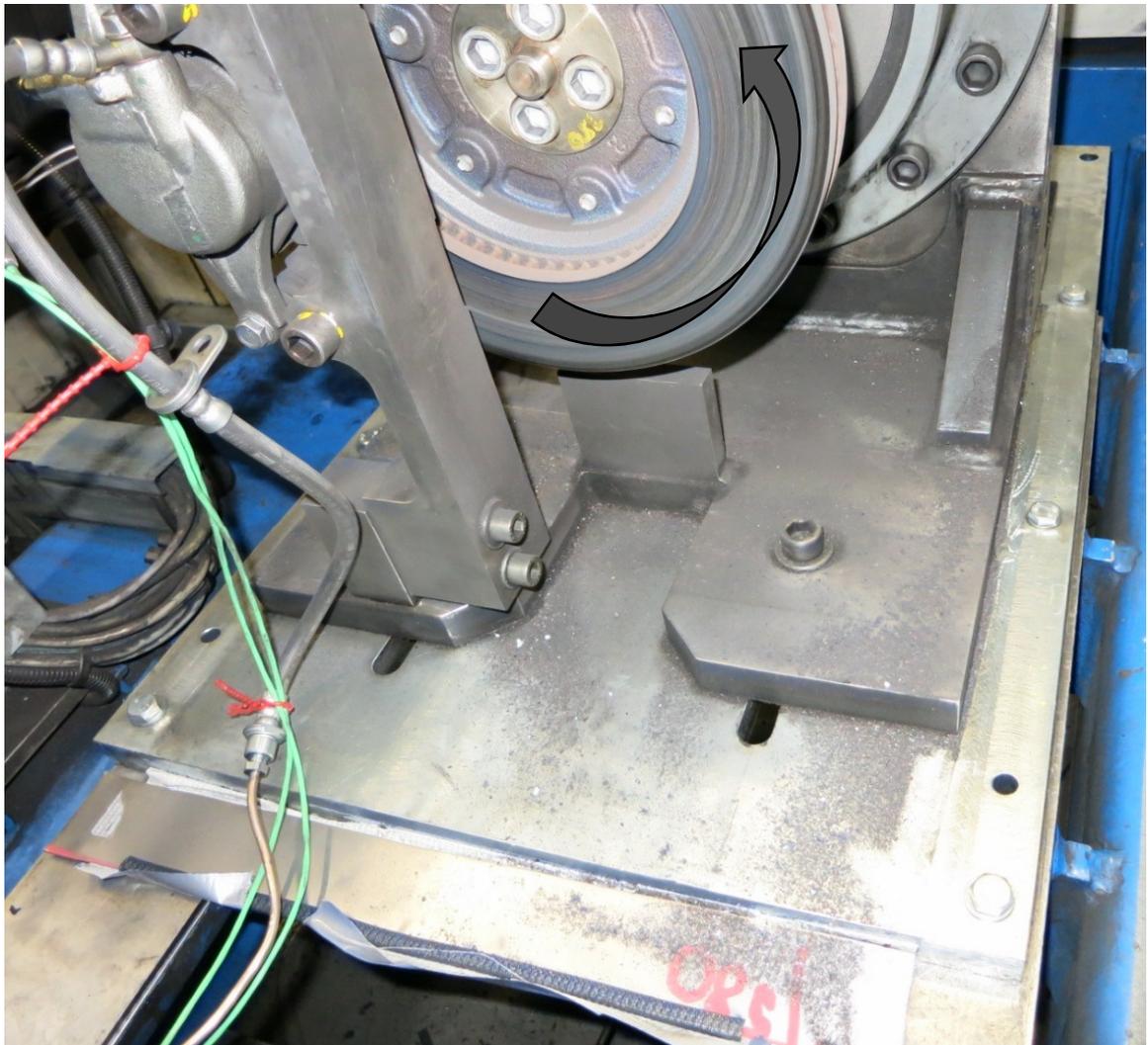


Abbildung 5-5 Ablagerung im Gehäuse



Abbildung 5-6 Ablagerung am Gehäuse in radialer Richtung



Abbildung 5-7 Ablagerung am Filter Nr. 3 innen in radialer Richtung

Als weitere wichtige Komponenten werden die Einzelteile der Bremsen näher betrachtet. Im Vorfeld wurden die Bremsenkomponenten vor dem Einbau vermessen und gewogen. Nach Beendigung der Prüfdurchgänge wurden die Komponenten ausgebaut, gereinigt und abermals vermessen, siehe Tabelle 5-1. Die Beläge haben sich schräg abgefahren, insbesondere Bremsbelag 2. Dieser war kolbenseitig an der Bremse montiert. Die erhöhte Abnutzung ist auf der Eintrittsseite des Belages aufgetreten. Beide Beläge haben jeweils rund 40 g an Reibmaterial verloren, in Summe 81 g. Die Bremsscheibe hat ebenfalls Masse verloren, im Ausmaß von 32 g.

Tabelle 5-1 Vermessung der Bremsenkomponenten nach den Prüfdurchgängen

	Masse vorher in g	Dicke vorher in mm	Masse nachher in g	Dicke nachher in mm
Bremsbelag 1	446	15,45	406	12,2 und 12,6
Bremsbelag 2	447	15,46	406	11,4 und 13,3
Bremsscheibe	7522	28	7490	28

In Abbildung 5-8 ist ein Vergleich zwischen einem benutzten und unbenutzten Belag abgebildet. Die vorgesehene Rille im Belag hat sich nahezu vollständig mit Abrieb gefüllt. Der Belag hat rund die Hälfte seines Reibbelags verloren. Durch die hohe mechanische und thermische Belastung der Beläge ist es zu einer Verfärbung der werkseitig aufgetragenen Lackierung gekommen. Hier wurden Spitzentemperaturen von rund 415 °C gemessen. Im Bereich des Scheibenauslaufes hat sich der Abrieb angesammelt, siehe Abbildung 5-9.



Abbildung 5-8 Vergleich benutzter und neuer Bremsbelag



Abbildung 5-9 Ablagerungen am Scheibenauslauf

5.2 Auswertung PN-PEMS

In diesem Abschnitt wird die Auswertung der Messergebnisse der PN-PEMS behandelt. Die Ergebnisse und Zusammenhänge werden in verschiedenen Diagrammen erläutert. In den Auswertungen werden die durchschnittlichen Messergebnisse über alle Prüfdurchläufe dargestellt, ergänzende Diagramme befinden sich im Anhang.

In Diagramm 5-1 ist der qualitative Verlauf des LDSA-Wertes während eines Prüfdurchganges (Anhang Tabelle 11-1) abgebildet. Der höchste Messwert bei Bremsung Nr. 48 liefert die Basis und stellt 100 % dar, die anderen Bremsungen werden relativ dazu dargestellt. Der höchste Messwert bei Bremsung 48 hat einen LDSA-Wert von $1981,5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Eine genaue Auflistung der Messergebnisse für jede einzelne Bremsung befindet sich im Anhang in Tabelle 11-3. Die Ordinate des Diagramms ist logarithmisch skaliert. Die farbliche Unterscheidung der eingetragenen Punkte beschreibt die verschiedenen Geschwindigkeiten aus denen die Bremsung eingeleitet wird. Es lässt sich beobachten, dass eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit vorliegt. Weiters ist feststellbar, dass sich bei gleichbleibender Geschwindigkeit der Messwert bei einem konstanten Wert einpendelt.

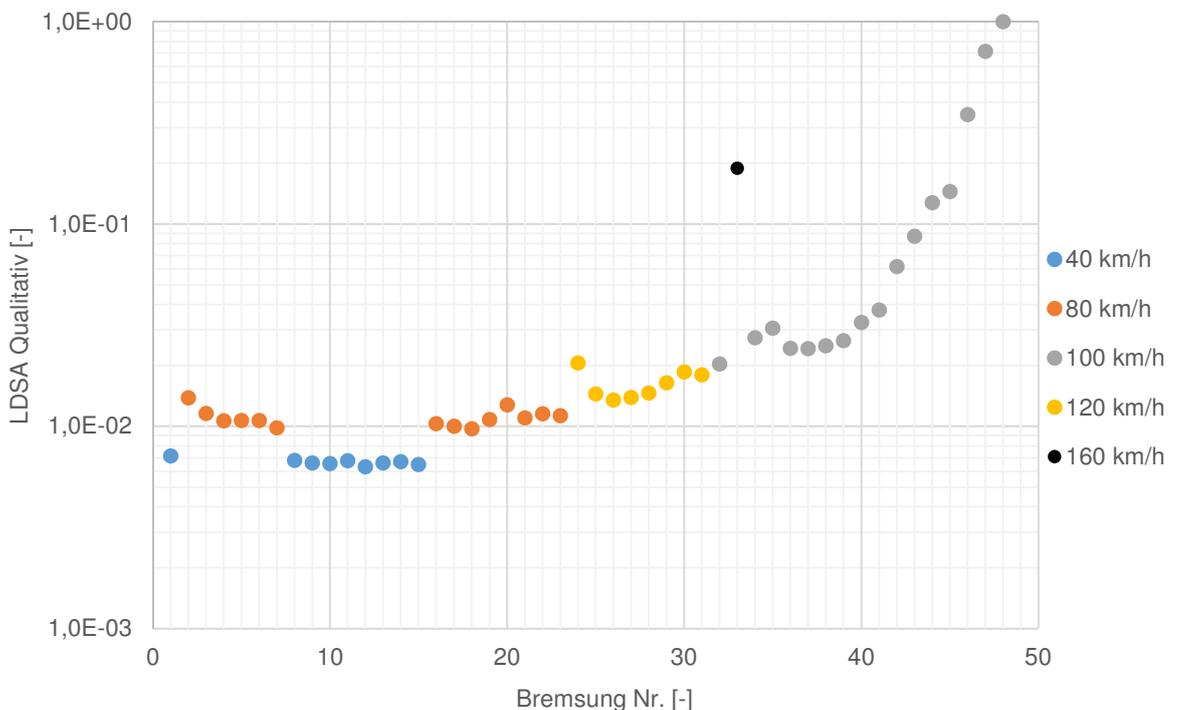


Diagramm 5-1 Qualitativer Verlauf LDSA-Wert über den kompletten Prüfdurchgang

Die Haupteinflussparameter auf den LDSA-Wert sind Geschwindigkeit, Temperatur der Bremsscheibe und der Bremsdruck. In dem nächsten Diagramm erfolgt die Bremsung jeweils mit vorgegebenem Bremsdruck, zum Beispiel Bremsung von 80 km/h auf 40 km/h bei einem konstanten Bremsdruck von 6 bar. Auch ist die Anfangstemperatur der Bremsscheibe, bis auf eine Bremsung bei 40 km/h, jeweils konstant bei 100 °C. Ein anderer Regelungsparameter für die Bremsung ist die Verzögerung, zum Beispiel Bremsung von 100 km/h auf 5 km/h mit einer konstanten Verzögerung von 0,4 g (3,92 m/s²). Diese Bremsungen werden später näher beleuchtet.

In Diagramm 5-2 ist die Abhängigkeit des LDSA-Wertes vom Bremsdruck bei verschiedenen Geschwindigkeiten dargestellt. Eine Abhängigkeit des LDSA-Wertes besonders von der Geschwindigkeit lässt sich feststellen. Exemplarisch ist auch die steigende Temperatur bei steigendem Bremsdruck bei der Bremsung aus 120 km/h dargestellt, der Zusammenhang ist analog bei den beiden anderen Geschwindigkeiten vorhanden. Die Geschwindigkeitsdifferenzen, die abgebaut werden sind nahezu identisch. Bei Bremsungen aus 80 km/h und 120 km/h werden 40 km/h abgebaut, bei Bremsungen aus 40 km/h werden 35 km/h abgebaut. Es ist ersichtlich, dass der LDSA-Wert bei höheren Geschwindigkeiten tendenziell höher liegt, des Weiteren stellt sich nach der Bremsung auch eine höhere Temperatur der Bremsscheibe ein.

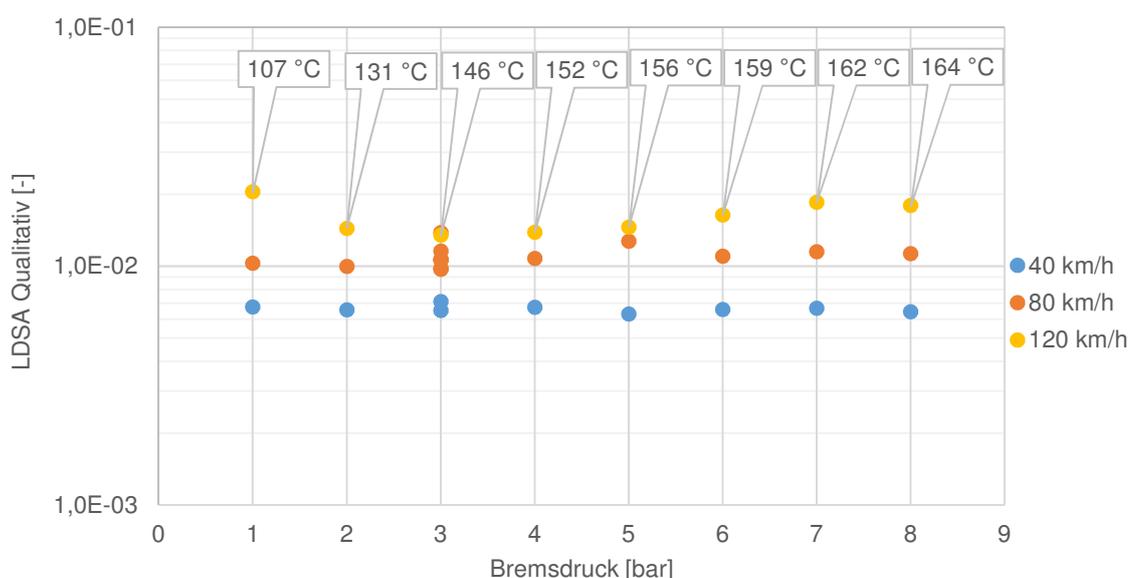


Diagramm 5-2 Qualitativer Verlauf LDSA-Wert abhängig vom Bremsdruck bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Bei den Bremsdruckgesteuerten Bremsungen sind die erreichten Spitzentemperaturen im moderaten Bereich, Spitzentemperaturen, von der Bremsscheibe in der Höhe von rund 165 °C sind aufgetreten. Es lässt sich festhalten, dass der LDSA-Wert bei Bremsdruckgesteuerten Bremsungen direkt proportional zu der Geschwindigkeit ist. Der Einfluss der Temperatur ist gering. Die Temperatur ist direkt abhängig von der Geschwindigkeit und dem Bremsdruck. Je höher der Bremsdruck oder die Geschwindigkeit, desto höher liegt auch die Endtemperatur der Bremsscheibe.

Betrachtet wird als Nächstes der LDSA-Wert in Abhängigkeit der Bremsleistung, siehe Diagramm 5-3, beide Achsen sind logarithmisch skaliert. Auf der Abszisse ist die Bremsleistung qualitativ und auf der Ordinate der LDSA-Wert qualitativ dargestellt. Der Verlauf ist ähnlich zu Diagramm 5-2. Die Werte im Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h bis 120 km/h liegen auf einem engen Bereich zusammen. Die hohe Varianz bei Bremsungen aus 100 km/h ist verursacht durch die steigende Temperatur der Bremsscheibe. Der Zusammenhang mit der Temperatur der Bremsscheibe wird anschließend genauer beleuchtet. Weiters ist ersichtlich, dass mit steigender Geschwindigkeit die Bremsleistung zunimmt. Die Bremsleistung ist abhängig von der Geschwindigkeitsdifferenz und der Verzögerung. Bei steigendem Bremsdruck nimmt natürlich auch die benötigte Verzögerungszeit ab, somit steigt auch die mittlere Bremsleistung. Vergleiche Bremsung 24 mit einer Bremsleistung von 4,6 kW und Bremsung 31 mit einer Bremsleistung von 22,5 kW. Die abgebaute kinetische Energie ist dieselbe, die Verzögerungszeit verringert sich jedoch. Ein Berechnungsbeispiel ist nachfolgend angeführt. Die maximale Bremsleistung erreicht Bremsung Nr. 33, welche rund 185,2 kW beträgt, die restlichen Leistungen der Bremsungen sind auf diesen Wert referenziert.

Die Ermittlung der Bremsleistung erfolgt mit Hilfe der kinetischen Energie und der Verzögerungszeit. Somit lässt sich die mittlere Bremsleistung errechnen. In Gleichung (5-1) ist die Berechnung der abgebauten kinetischen Energie ΔE_{kin} in J angegeben. Hierbei steht m in kg für die translatorische Masse, die verzögert wird, in diesem Falle 975 kg. v_1 in m/s für die Anfangsgeschwindigkeit und v_2 in m/s für die Endgeschwindigkeit nach der Bremsung.

$$\Delta E_{kin} = m * \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad \text{Gleichung (5-1)}$$

Die Verzögerungszeit Δt in s wird für jede einzelne Bremsung aus der Datenaufzeichnung des Prüfstands ermittelt. Somit lässt sich mit ΔE_{kin} die mittlere Bremsleistung P_{Brake} in W ermitteln, siehe Gleichung (5-2).

$$\bar{P}_{Brake} = \frac{\Delta E_{kin}}{\Delta t} \quad \text{Gleichung (5-2)}$$

Berechnungsbeispiel Bremsung Nr. 31: $m = 975 \text{ kg}$, $v_1 = 120 \text{ km/h}$, $v_2 = 80 \text{ km/h}$, $t = 13,4 \text{ s}$

$$\Delta E_{kin} = 975 * \frac{\left(\frac{120}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{80}{3,6}\right)^2}{2} = 301 \text{ kJ} \quad \text{Gleichung (5-3)}$$

$$\bar{P}_{Brake} = \frac{301}{13,4} = 22,5 \text{ kW} \quad \text{Gleichung (5-4)}$$

Im Anhang Tabelle 11-2 ist für jede Bremsung im Prüfdurchgang die dazugehörige Bremsleistung eingetragen.

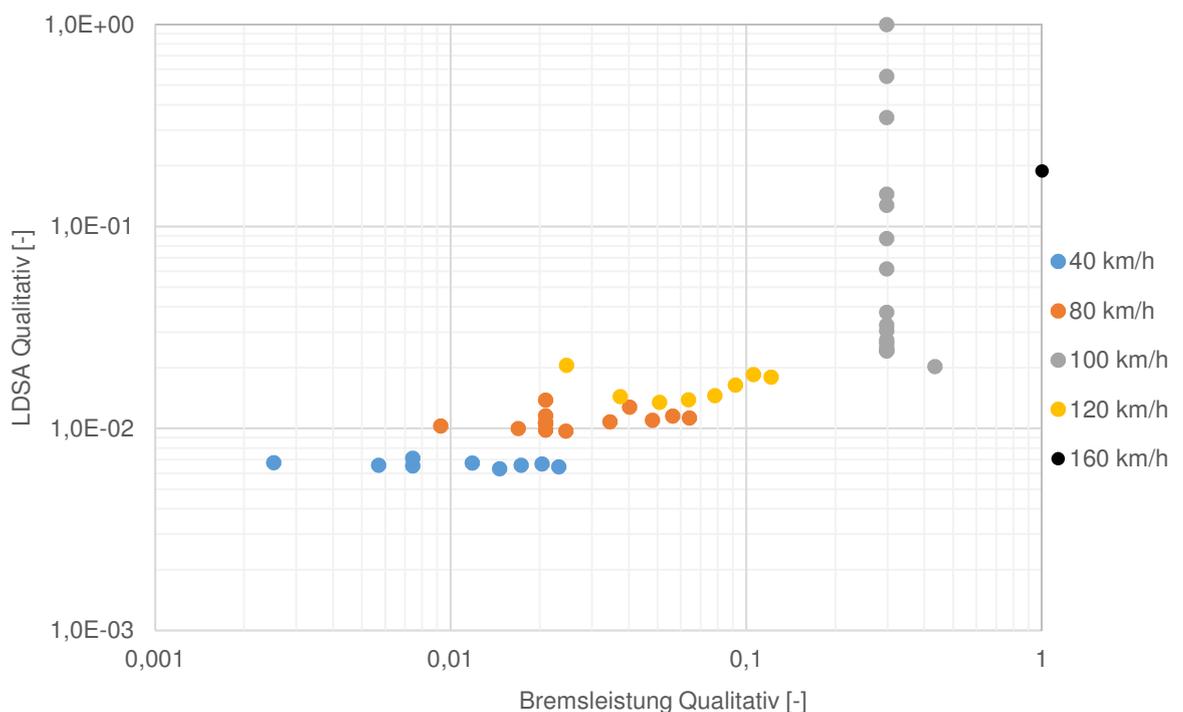


Diagramm 5-3 Qualitativer Verlauf LDSA-Wert in Abhängigkeit von der Bremsleistung

Abschließend werden die Verzögerungsgeregelten Bremsungen betrachtet, diese Bremsungen werden ab Bremsung 34 durchgeführt.

In Diagramm 5-4 ist die Abhängigkeit der Partikelemission von der Temperatur dargestellt. Die blau dargestellten Punkte repräsentieren Bremsungen von 100 km/h auf 5 km/h mit einer Verzögerung von 0,4 g (3,92 m/s²), bei sukzessiv steigender Anfangstemperatur der Bremsscheibe.

Betrachtet wird zunächst der blaue Verlauf. Der starke Zusammenhang zwischen Partikelemission und Temperatur beginnt ab einer Temperatur von etwa 500 °C. Ab diesem Temperaturbereich ist die Partikelemission exponentiell von der Temperatur abhängig. Jedoch ist die Temperatur nicht der einzige Parameter. Aufgrund der erhöhten Temperaturen und dem damit verbundenen Absinken des Reibbeiwertes μ [5], kommt es unweigerlich zu einer Erhöhung des Bremsdruckes, um die geforderte Verzögerung von 0,4 g einzuhalten, siehe Diagramm 11-3 im Anhang.

Die orange dargestellten Punkte sind Bremsungen mit einer Verzögerung von 0,6 g (5,89 m/s²), jeweils mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Die niedrigere Emission stammt von einer Bremsung von 100 km/h auf 5 km/h, die höhere Emission stammt von einer Bremsung von 160 km/h auf 80 km/h. Hier ist wieder der Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit ersichtlich. Der Faktor zwischen den beiden Emissionen in Bezug auf den LDSA-Wert beträgt das 9-fache.

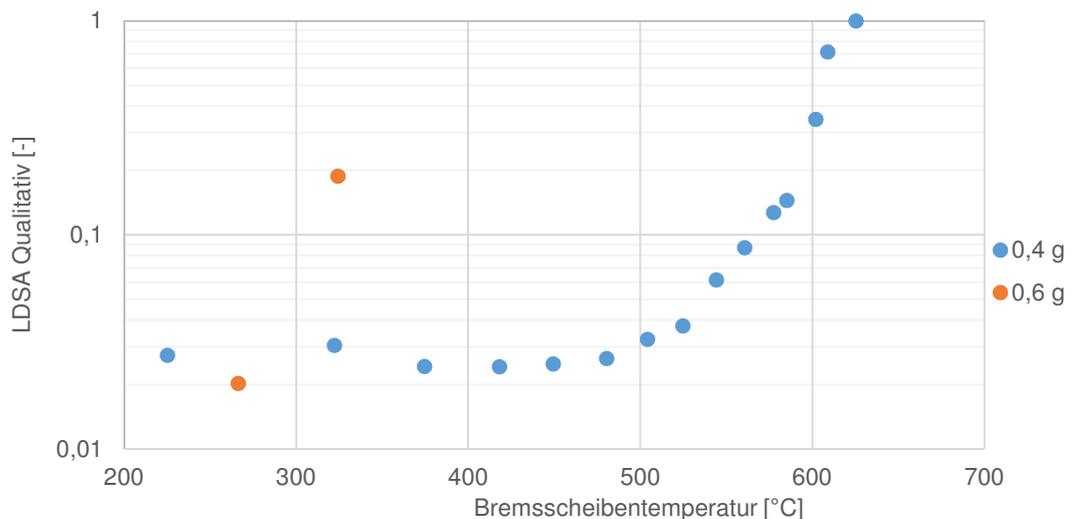


Diagramm 5-4 Qualitativer Verlauf LDSA-Wertes in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen Verzögerungen

5.3 Auswertung PM-PEMS

Analog zur Auswertung der PN-PEMS werden in diesem Kapitel wieder die verschiedenen Einflussgrößen und die Messwerte in Diagrammen dargestellt und erläutert. Eine zusätzliche Aufgabe der PM-PEMS war es die Feinfilter zu beladen. Mit Hilfe der Gewichtszunahme der Filter lässt sich auf die emittierte Feinstaubmasse während eines Prüfdurchganges zurück rechnen.

In Diagramm 5-5 ist der qualitative Verlauf des MSS während des gesamten Prüfzyklus dargestellt. Die Ordinate ist logarithmisch skaliert. Die Messwerte sind ebenfalls wieder skaliert und auf den höchsten Messwert bezogen. Dieses Mal tritt der höchste Messwert bei Bremsung Nr. 33 auf. Der höchste Messwert betrug $2,828 \text{ mg/m}^3$, die anderen Messwerte sind auf diesen referenziert. Eine genaue Auflistung der Messergebnisse für jede einzelne Bremsung ist im Anhang aufgelistet. Es lässt sich beobachten, dass die Messwerte im Vergleich zur LDSA-Messung in einem engeren Bereich zusammen liegen. Hier sind erhöhte Messauschläge, bei einer Bremsung aus einer höheren Geschwindigkeit, mit einer vorangegangenen Phase mit niedrigerer Geschwindigkeit zu beobachten. Dies verstärkt die Vermutung, dass sich bei konstanten Bremsungen Ablagerungen bilden und diese bei der nächsten Phase mit erhöhter Geschwindigkeit gelöst werden. Das anschließende Einpendeln auf einen konstanten Messwert ist sehr ähnlich zu der LDSA-Wert Messung.

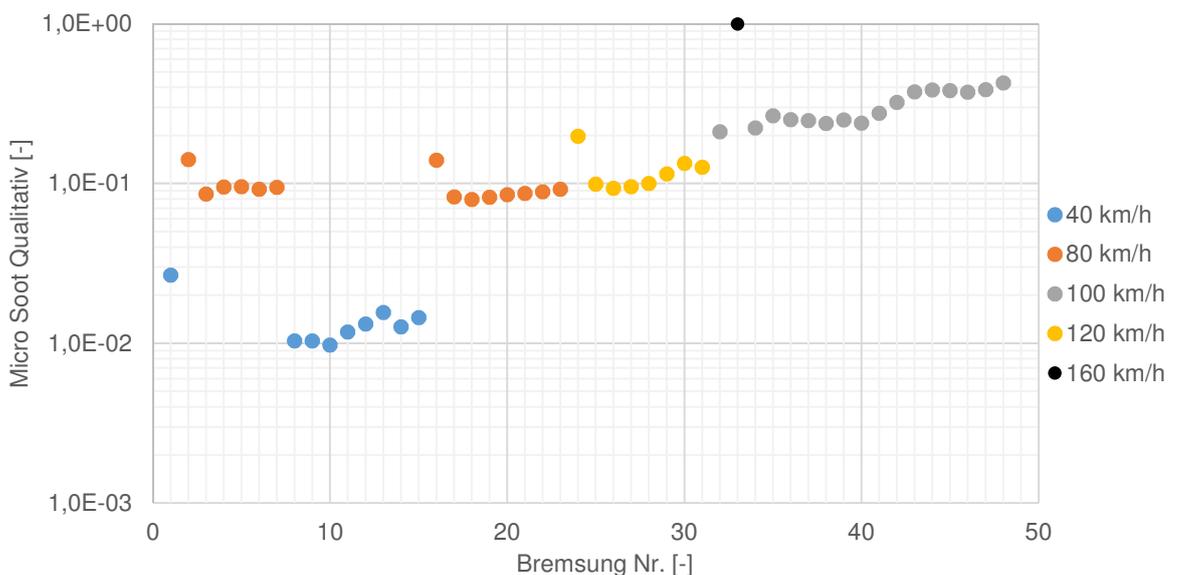


Diagramm 5-5 Qualitativer Verlauf des MSS über einen kompletten Prüfdurchgang

In Diagramm 5-6 ist der qualitative Verlauf des MSS in Abhängigkeit von dem Bremsdruck abgebildet, die Zusammenhänge sind ähnlich zu der LDSA-Messung in Diagramm 5-2, jedoch sind die Unterschiede stärker ausgeprägt. Ausgeprägt sind die Unterschiede zwischen 40 km/h und 80 km/h bzw. 120 km/h, der Faktor zwischen den Partikelemissionen beträgt rund 10. Die Unterschiede bei den Emissionen zwischen 80 km/h und 120 km/h sind gering, trotz der Geschwindigkeitszunahme von 50 %.

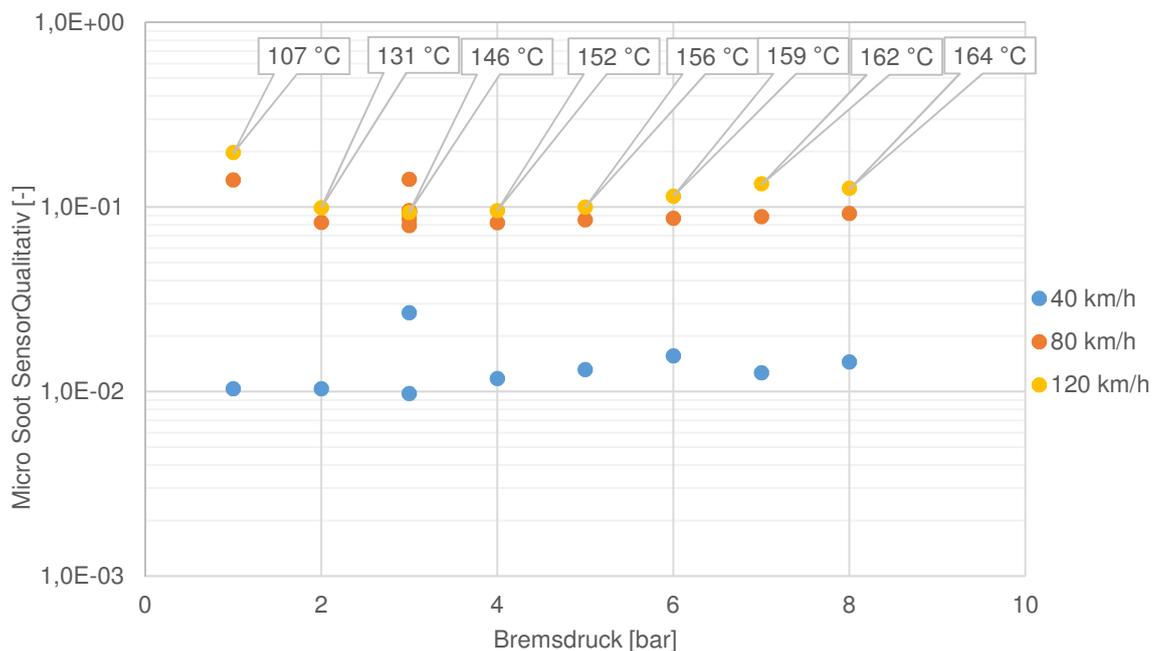


Diagramm 5-6 Qualitativer Verlauf des MSS in Abhängigkeit vom Bremsdruck bei verschiedenen Geschwindigkeiten

In Diagramm 5-7 ist der Verlauf des MSS in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt, betrachtet werden die verzögerungsgesteuerten Bremsungen. Im Gegensatz zur LDSA-Messung liegt das Maximum des MSS nicht bei Bremsung 48, sondern bei Bremsung 33. Dies unterstreicht den starken Zusammenhang der Partikelmassenemission mit der Geschwindigkeit. Bei den nachfolgenden verzögerungsgesteuerten Bremsungen ist der Verlauf der Partikelmasse leicht linear ansteigend. Dies lässt vermuten, dass die entstehende Partikelmassenemission primär von der Verzögerung abhängig ist, also der Einfluss der Temperatur gering ist.

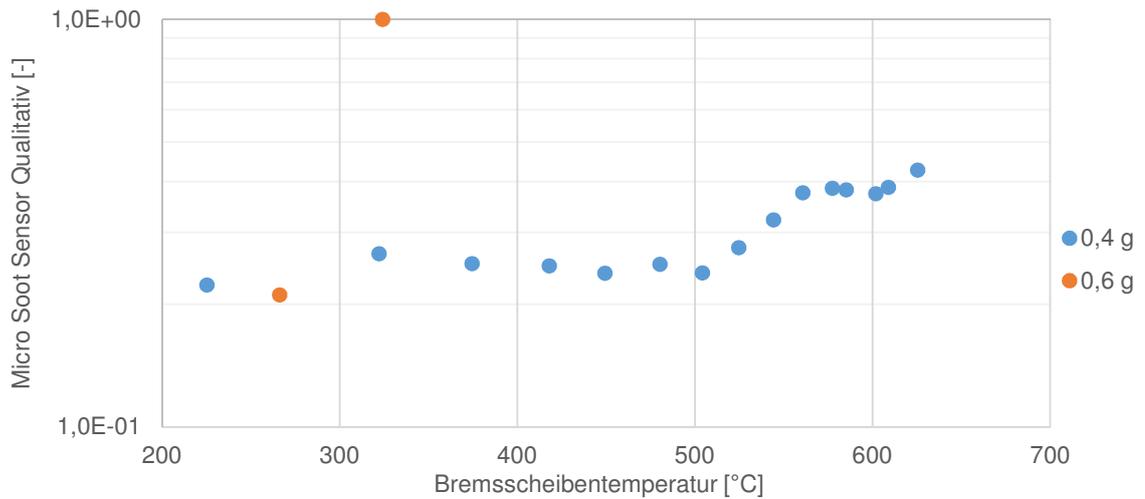


Diagramm 5-7 Qualitativer Verlauf des MSS in Abhängigkeit von der Temperatur

In Diagramm 5-8 ist der qualitative Verlauf des MSS-Signals in Abhängigkeit der Bremsleistung dargestellt. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert. Sehr deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen den 40 km/h Bremsungen und den höheren Geschwindigkeiten, weiters steigt das MSS-Signal mit steigender Bremsleistung linear an.

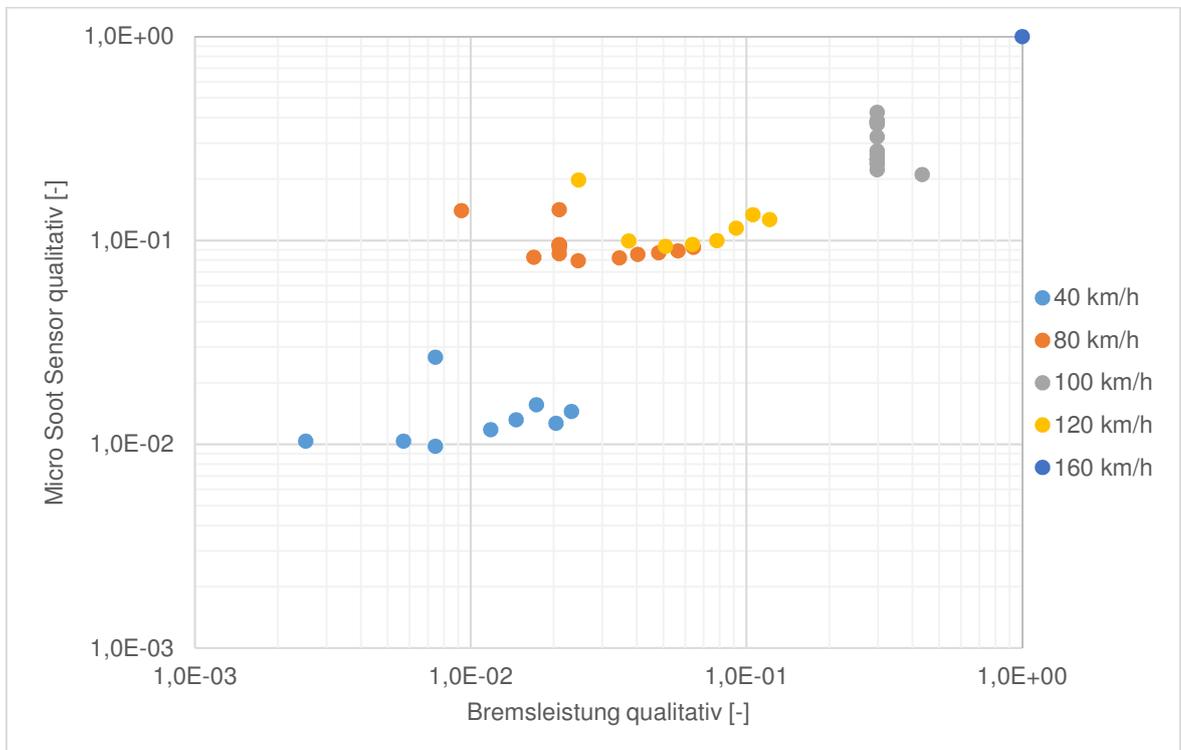


Diagramm 5-8 Qualitativer Verlauf des MSS in Abhängigkeit von der Bremsleistung

Eine weitere Aufgabe der PM-PEMS war es Feinfilter mit Feinstaub zu beladen. Die Filter wurden jeweils für zwei Prüfdurchläufe in der PM-PEMS belassen und beladen. Die Filter wurden vor dem Einlegen und nach dem Entnehmen aus dem Messgerät gewogen. Somit konnte die Partikelbeladung bestimmt werden. In Tabelle 5-2 sind die relevanten Daten dargestellt. Insgesamt wurden drei Filter beladen, welche für die anschließende Auswertung verwertbar waren. Filter Nr. 5 wurde außerdem an das FELMI-ZFE (Institute for Electron Microscopy and Nanoanalysis of the TU Graz (FELMI), Graz Centre for Electron Microscopy (ZFE Graz)) in Graz zur Untersuchung mit dem Elektronenmikroskop geliefert.

Tabelle 5-2 Massen der Feinfilter

Filter	Masse vorher in mg	Masse nachher in mg	Δm in μg
# 3	88,536	88,657	121
# 4	89,289	89,384	95
# 5	88,564	88,673	109

Ausgehend von der beladenen Partikelmasse und dem Gesamtdurchfluss durch das Abluftsystem lässt sich auf die gesamte Feinstaubemission zurückrechnen. Dafür werden noch ein paar zusätzliche Angaben benötigt wie zum Beispiel der Gesamtdurchfluss durch das Abluftsystem, der Durchfluss durch den Feinfilter etc. Alle benötigten Größen werden von der PM-PEMS aufgezeichnet.

Der entnommene Partikelstrom aus dem Abluftsystem wird kontinuierlich mit partikelfreier Luft verdünnt, der gesamte Volumenstrom, also partikelbeladene Luft und die Verdünnungsluft strömen durch den Feinfilter. Mit Hilfe der Verdünnungsrate d und dem Volumenstrom durch den Feinfilter Q_{Filter} in l/min kann der entnommene Volumenstrom $Q_{\text{PM-Out}}$ in l/min berechnet werden, siehe Gleichung (5-5).

$$Q_{\text{PM-Out}} = \frac{Q_{\text{Filter}}}{d} \quad \text{Gleichung (5-5)}$$

Mit Kenntnis des entnommenen Volumenstroms $Q_{\text{PM-Out}}$ und der Gesamtdauer t_{Ges} in min der Partikelentnahme, lässt sich das Gesamtvolumen V_{Out} in l errechnen,

welches durch die PM-PEMS aus dem Abluftsystem entnommen wurde, siehe Gleichung (5-6).

$$V_{Out} = Q_{PM-Out} * t_{Ges} \quad \text{Gleichung (5-6)}$$

Eine Größe fehlt noch, nämlich der Gesamtvolumenstrom der während eines Prüfdurchganges das System passiert hat. Dieser setzt sich zusammen aus dem verminderten Volumenstrom Q_{Low} , während der ersten Bremsungen, und dem erhöhten Volumenstrom Q_{High} . Mit den dazugehörigen Zeiten t_{Low} und t_{High} , lässt sich der gesamte Volumenstrom V_{Ges} berechnen. Es wird angenommen, dass die Strömung im Abluftsystem stationär ist, siehe Formel Gleichung (5-7). Die einzelnen Volumenströme sind in Abbildung 5-10 dargestellt. Die beiden Rechtecke stellen den Anteil des niedrigen (250 l/s) bzw. hohen (330 l/s) Volumenstroms dar. Das grau hinterlegte Rechteck deutet das entnommene Volumen durch die PM-PEMS an.

$$V_{Ges} = Q_{Low} * t_{Low} + Q_{High} * t_{High} \quad \text{Gleichung (5-7)}$$

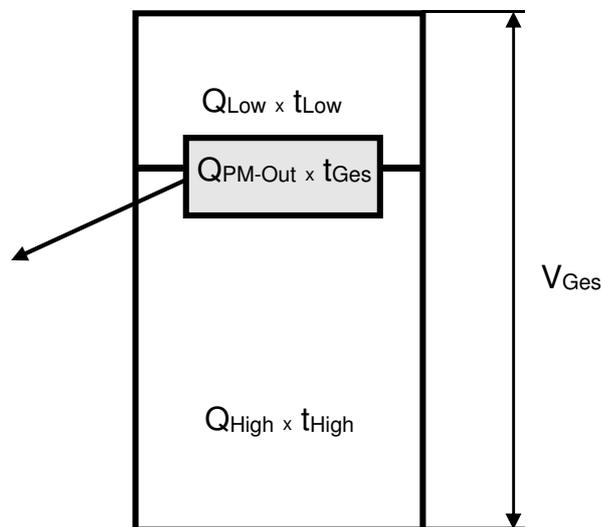


Abbildung 5-10 Darstellung der Volumenströme durch das Abluftsystem

Die Feinfilter wurden jeweils während zwei Prüfdurchgängen ($\Delta m_{Filter\ i}$ und $\Delta m_{Filter\ i+1}$) beladen. Ausgehend von der gesamt Partikelmasse Δm_{Ges} in μg , die auf dem Feinfilter abgelagert wurde und mit der Hilfe der jeweiligen Beladungszeiten $t_{Ges\ i}$ und $t_{Ges\ i+1}$ in s, lässt sich die beladene Partikelmasse des jeweiligen Prüfdurchganges bestimmen, siehe Gleichung (5-8). In Abbildung 5-11 sind die Massenanteile der abgelagerten Partikelmassen pro Prüfdurchgang

dargestellt. Weiters lässt sich mit den jeweiligen Volumenströmen $V_{Ges\ i}$ und $V_{Out\ i}$, die Gesamtmasse an Feinstaub (PM_{10}) m_{PM} berechnen, siehe Gleichung (5-9).

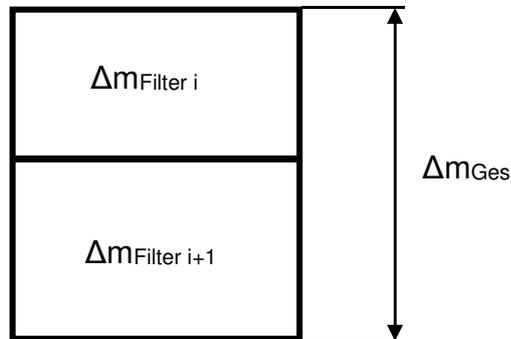


Abbildung 5-11 Gesamtmasse der gesammelten Partikel am Feinfilter

$$\Delta m_{Filter\ i} = \Delta m_{Ges} * \frac{t_{Ges\ i}}{t_{Ges\ i} + t_{Ges\ i+1}} \quad \text{Gleichung (5-8)}$$

$$m_{PM\ i} = \frac{\Delta m_{Filter\ i}}{V_{Out\ i}} * V_{Ges\ i} \quad \text{Gleichung (5-9)}$$

In Tabelle 5-3 ist eine Übersicht der berechneten Partikelemission dargestellt. Die Gesamtemission für sechs Durchläufe beträgt rund 5 g an Feinstaub der Klasse PM_{10} .

Tabelle 5-3 Übersicht Partikelemission für jeden Prüfdurchgang

Durchgang Nr.	$\Delta m_{Filter\ i}$ in μg	$V_{Ges\ i}$ in m^3	$m_{PM\ i}$ in g
4	59,7	2320	0,936
5	61,3	2370	0,955
6	47,9	2350	0,747
7	47,1	2310	0,735
8	55,0	2390	0,856
9	54,0	2420	0,841
Summe	325	14160	5,07

5.4 Elektronenmikroskop Analyse der Feinfilter und des Bremsbelages

Zur Bestimmung der Bestandteile, welche im Bremsabrieb enthalten sind, wurden jeweils ein unbeladener und ein beladener Feinfilter bzw. neuer und benutzter Bremsbelag an das FELMI-ZFE in Graz geliefert. Beide Proben wurden mit Hilfe einer REM-EDX Analyse untersucht (Rasterelektronenmikroskop Energie-dispersive Röntgenspektroskopie, engl. energy dispersive X-ray spectroscopy). Bei einer EDX-Analyse wird das Probenmaterial durch einen Elektronenstrahl angeregt. Jedes Element emittiert aufgrund der Anregung eine charakteristische Röntgenstrahlung. Eine Zuordnung hinsichtlich der Elementzusammensetzung ist daher möglich. Für die Analyse wurde jede Probe mit einer Energie von 20 keV ($1 \text{ eV} = 1,609 \times 10^{-19} \text{ J}$) durch den Elektronenstrahl angeregt.

Die vollständigen Analysen der Feinfilter und der Bremsbeläge befinden sich im Anhang.

5.4.1 Elektronenmikroskop Analyse der Feinfilter

Zur Vereinfachung der Auswertung wurde ebenfalls ein unbeladener Filter untersucht. Mit der Analyse des unbeladenen Filters lässt sich nach Analyse des beladenen Filters auf die darauf befindlichen Elemente zurückschließen.

In Abbildung 5-12 ist die REM-Aufnahme des unbeladenen Feinfilters abgebildet. Die einzelnen Glasfasern des Filtermaterials sind gut ersichtlich. In Abbildung 5-13 ist das EDX-Spektrum des neuen Filtermaterials abgebildet. Die jeweiligen Ausschläge stellen die charakteristische Röntgenstrahlung für jedes Element dar. Laut Herstellerdatenblatt des Filtermaterials besteht dieser aus Borosilikatglas Mikrofasern, verstärkt mit Glasfasern, diese sind mit PTFE (Polytetrafluorethylen, Teflon) verklebt, [27]. Die Elemente Fluor (F) und Kohlenstoff (C) stellen das PTFE dar. Die Elemente Barium (Ba), Silicium (Si), Kalium (K), Aluminium (Al), Calcium (Ca), Zink (Zn), Magnesium (Mg) und Titan (Ti) sind in den Borosilikatglasfasern bzw. im Glasfasermaterial enthalten. Der Sauerstoff (O) ist ebenfalls Bestandteil der Glasfasern, allerdings liegt dieser in Form von Oxiden vor, zum Beispiel Siliciumdioxid SiO_2 . Mit der Information, welche Elemente dem Filtermaterial

zugehören, ist es einfacher die zusätzlichen Elemente durch die Bremsstaubpartikel zu identifizieren.

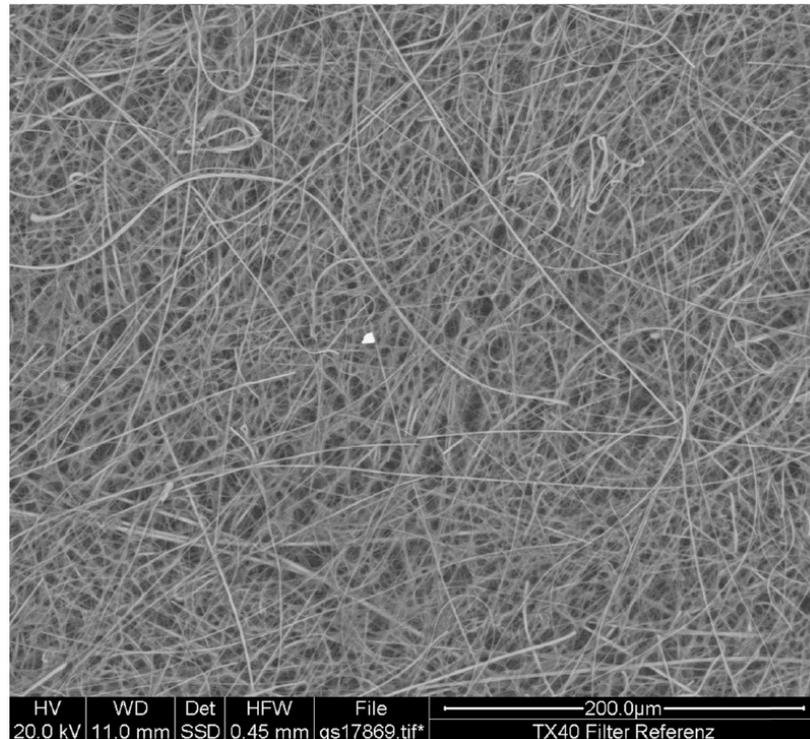


Abbildung 5-12 REM-Aufnahme des unbeladenen Feinfiltermaterials (Materialkontrast)

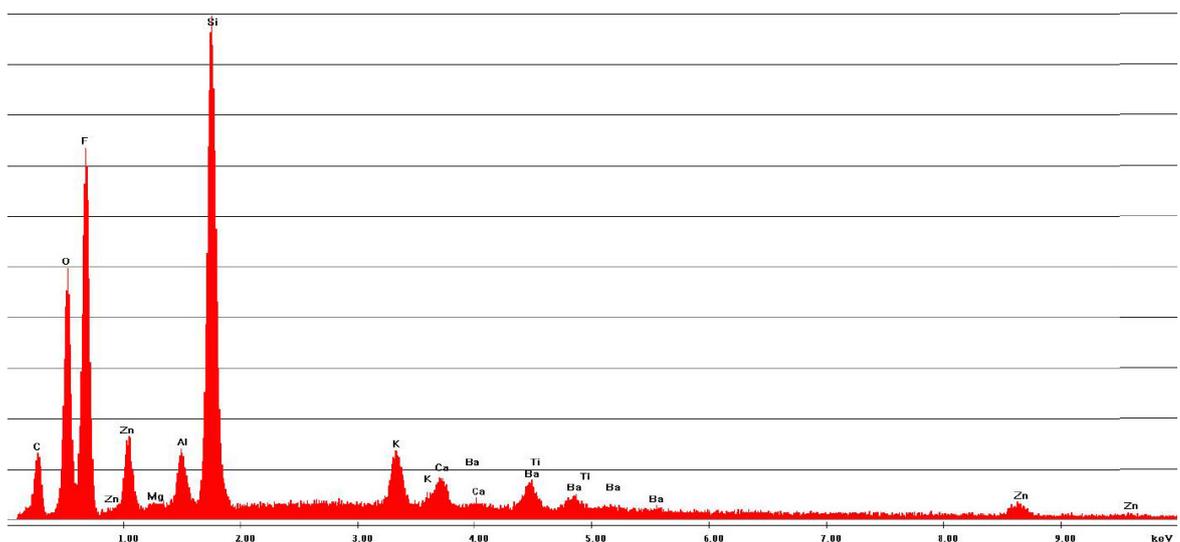


Abbildung 5-13 EDX-Spektrum des neuen Feinfiltermaterials

In Abbildung 5-14 ist eine REM-Aufnahme des beladenen Filters abgebildet. Die einzelnen Partikel heben sich durch die helle Einfärbung hervor. Die mit Zahlen markierten Bereiche wurden hinsichtlich ihrer Elementzusammensetzung

analysiert. In Abbildung 5-15 ist das EDX-Spektrum des beladenen Filtermaterials abgebildet. Zur besseren Veranschaulichung werden beide EDX-Spektren, des beladenen und des unbeladenen Filters, übereinander gelegt. Somit sind die Zusatzelemente durch den Bremsstaub leichter zu erkennen.

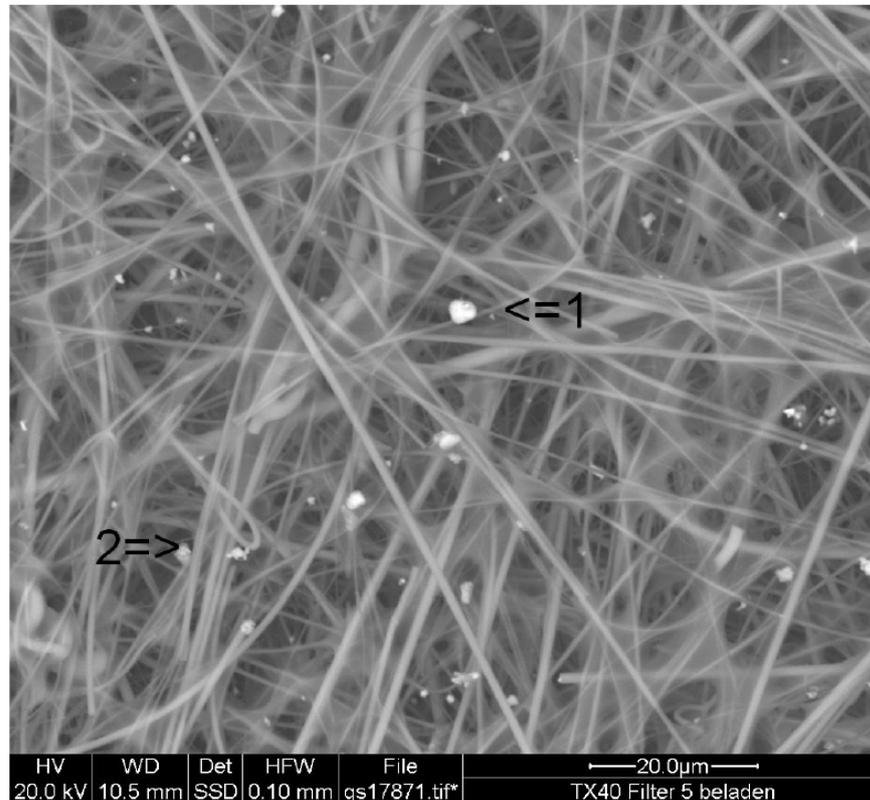


Abbildung 5-14 REM-Aufnahme des beladenen Filtermaterials (Materialkontrast)

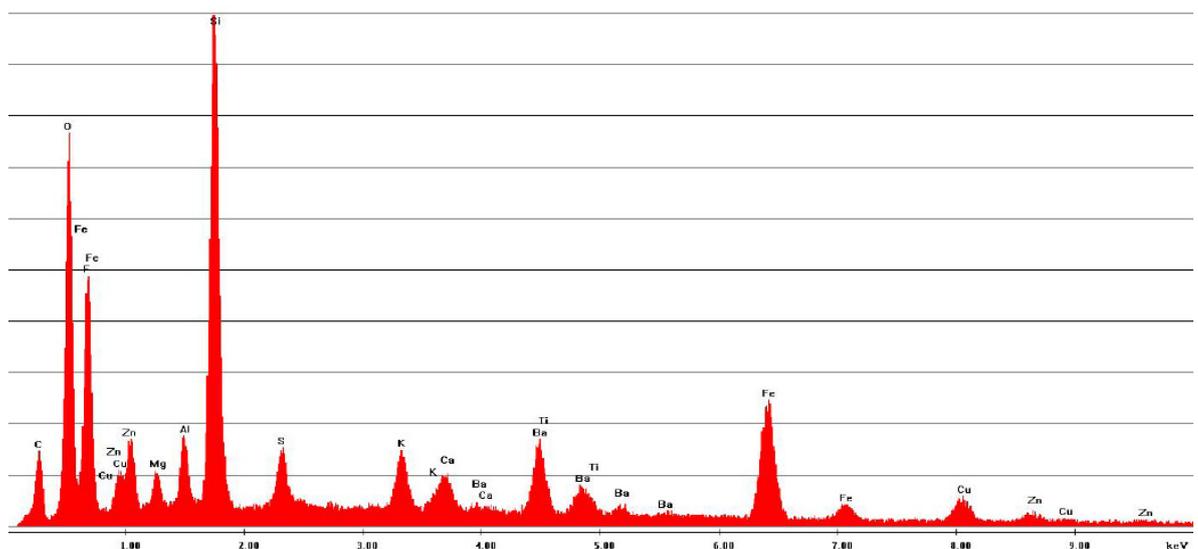


Abbildung 5-15 EDX-Spektrum des beladenen Filtermaterials

In Abbildung 5-16 ist die Kombination von beiden EDX-Spektren abgebildet. Die blau hervorgehobenen Bereiche stellen die Elemente, die dem Bremsabrieb angehören dar. Der rote Verlauf entspricht dem Spektrum des Filtermaterials. Dem Bremsabrieb sind folgende Elemente zuzuordnen: Eisen (Fe), Kupfer (Cu) und Schwefel (S). Zusätzlich ist auch ein erhöhter Ausschlag bei dem Sauerstoffanteil (O) zu beobachten.

Der Eisenanteil bzw. Sauerstoffanteil ist auf den Abrieb der Bremsscheibe und den Bremsbelag zurückzuführen. Eisen bildet zusammen mit Sauerstoff Eisenoxide, dies begründet den erhöhten Sauerstoffanteil. Kupfer und Schwefel sind dem Bremsbelag zuzuordnen. Kupfer ist bereits im Schliff des neuen Bremsbelages zu erkennen (vgl. Abbildung 5-8). Für eine vollständige Abschätzung der Inhaltsstoffe des Bremsbelages ist die Analyse des Feinfilters nicht ausreichend, da die EDX-Analyse nur Einzelelemente nachweist und nur unzureichende Informationen über Bindungen beinhaltet.

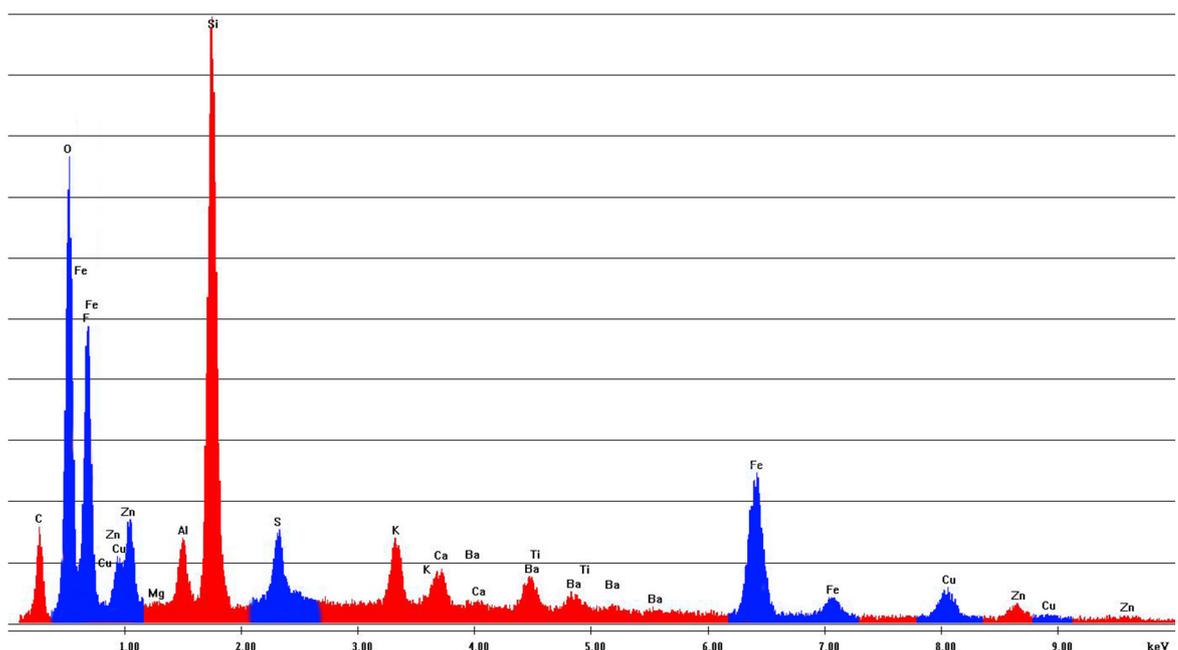


Abbildung 5-16 Kombiniertes EDX-Spektrum von neuen und beladenen Filter

5.4.2 Elektronenmikroskop Analyse des Bremsbelages

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Elektronenmikroskop Analyse der Feinfilter, wurde auch der Bremsbelag hinsichtlich seiner chemischen Elemente mittels EDX analysiert. Zur Unterscheidung welche Elemente nur im Bremsbelag enthalten sind und welche durch den Kontakt mit der Bremsscheibe zusätzlich auftreten wurde ein neuer und ein benutzter Bremsbelag mit der EDX-Analyse untersucht.

In Abbildung 5-17 ist die REM-Aufnahme eines neuen Bremsbelages abgebildet. Es sind die verschiedenen Bereiche im markierten Bereich ersichtlich. Die hellen Bereiche sind Kupfer, die dunkelgrauen Bereiche bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff (C) und im hellgrauen Bereich findet sich eine Vielzahl an Elementen, hauptsächlich Schwefel (Si), Magnesium (Mg) etc. wieder.

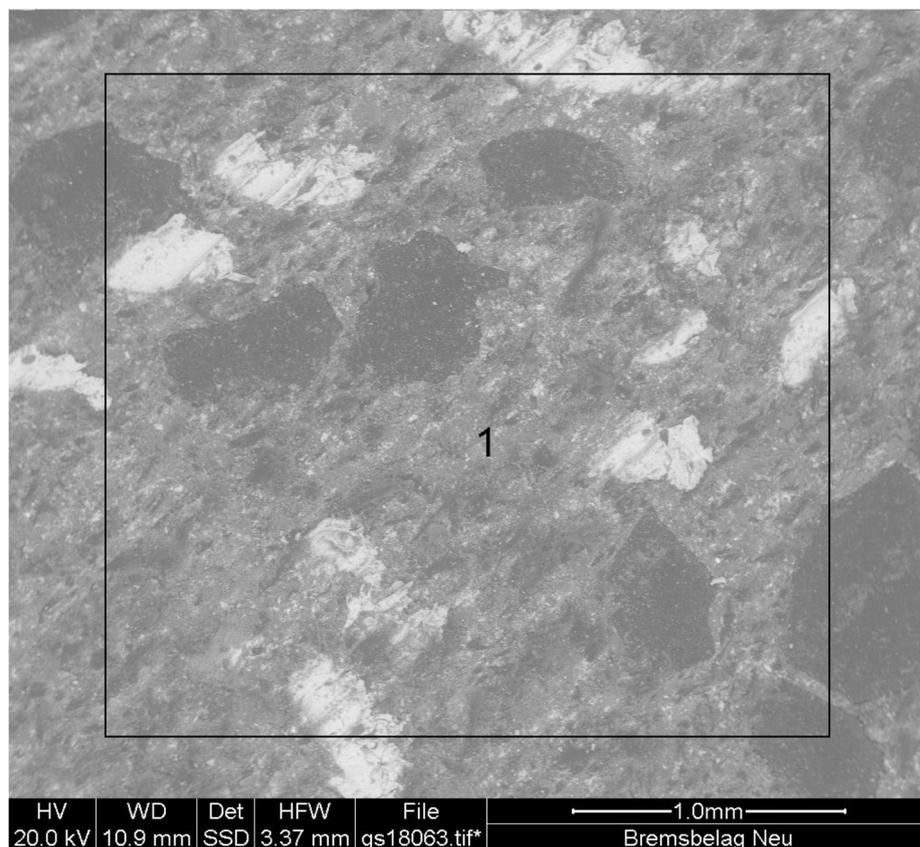


Abbildung 5-17 REM-Aufnahme eines neuen Bremsbelages (Materialkontrast)

In Abbildung 5-18 ist das EDX-Spektrum des in Abbildung 5-17 markierten Bereiches abgebildet. Es ist im Gegensatz zur Analyse der beladenen Feinfilter ein breiteres Spektrum an Elementen im Bremsbelag enthalten, als nach der Auswertung des beladenen Feinfilters (Abbildung 5-16) angenommen werden

konnte. Durch das Spektrum des Filtermaterials bleiben viele Elemente des Bremsbelages verborgen, vgl. Abbildung 5-18 mit Abbildung 5-13. Nach der Auswertung des EDX-Spektrums des neuen Bremsbelages und mit Hilfe der Tabelle 2-1, lässt sich feststellen, dass der verwendete Bremsbelag zur Familie der Low Steel Reibbeläge gehört. Bedingt durch das gleichzeitige Auftreten von Fe und Cu.

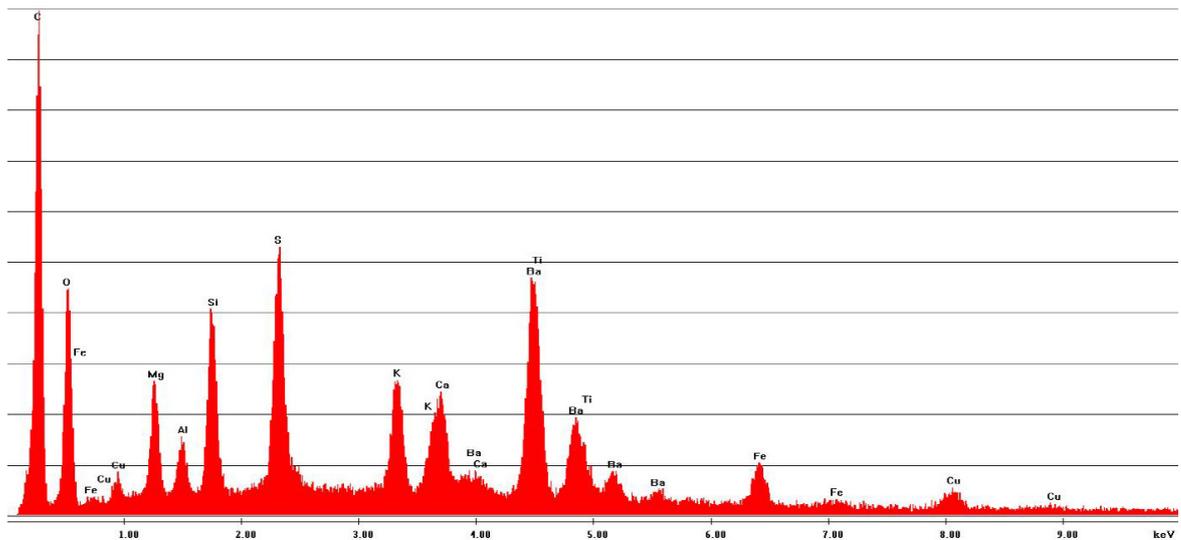


Abbildung 5-18 EDX-Spektrum eines neuen Bremsbelages

In Abbildung 5-19 ist die REM-Aufnahme eines benutzten Bremsbelages abgebildet. Der Kontaktbereich zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe ist in der linken Bildhälfte gut zu erkennen.

In Abbildung 5-20 ist das EDX-Spektrum des benutzten Bremsbelages abgebildet. Auffallend sind die erhöhten Ausschläge von Eisen (Fe) und Kupfer (Cu), im Vergleich zu einem neuen Bremsbelag. Der Ursprung von Eisen lässt schnell auf die Bremsscheibe schließen bzw. auf die Interaktion zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe. Die Erhöhung des Kupferanteils lässt den Schluss zu, dass sich das Kupfer im Bremsbelag durch die Bremsscheibe auf die gesamte Kontaktfläche verteilt hat.

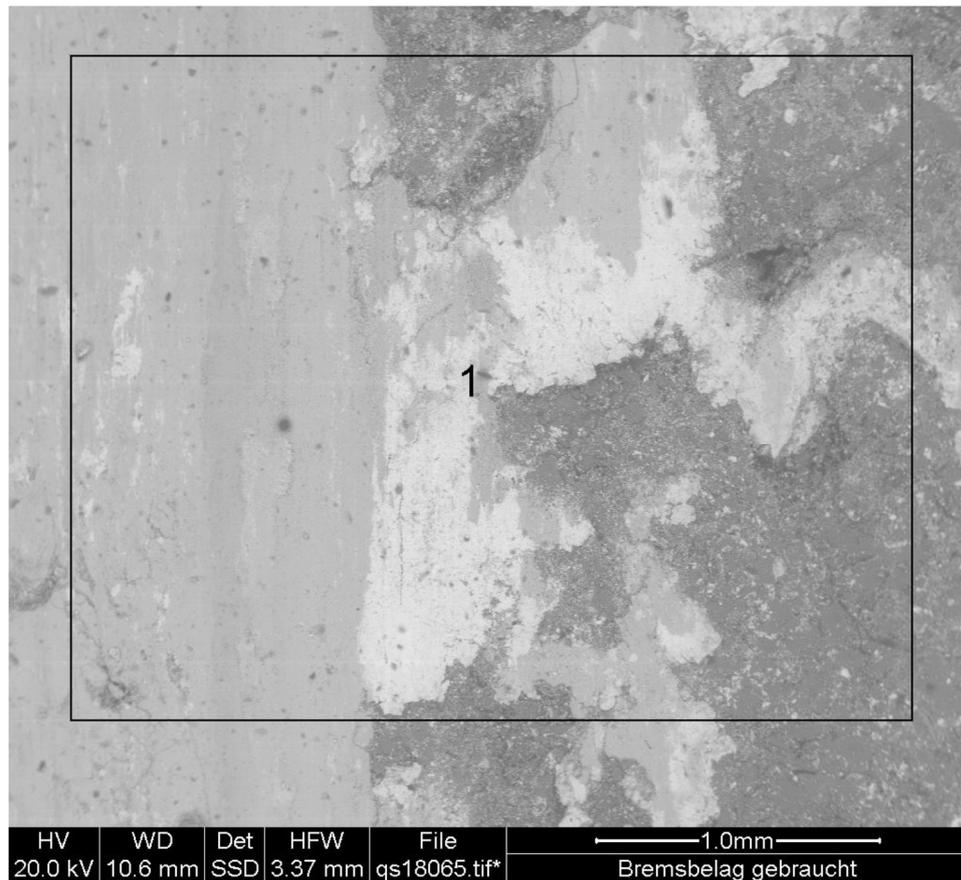


Abbildung 5-19 REM-Aufnahme eines benutzten Bremsbelages (Materialkontrast)

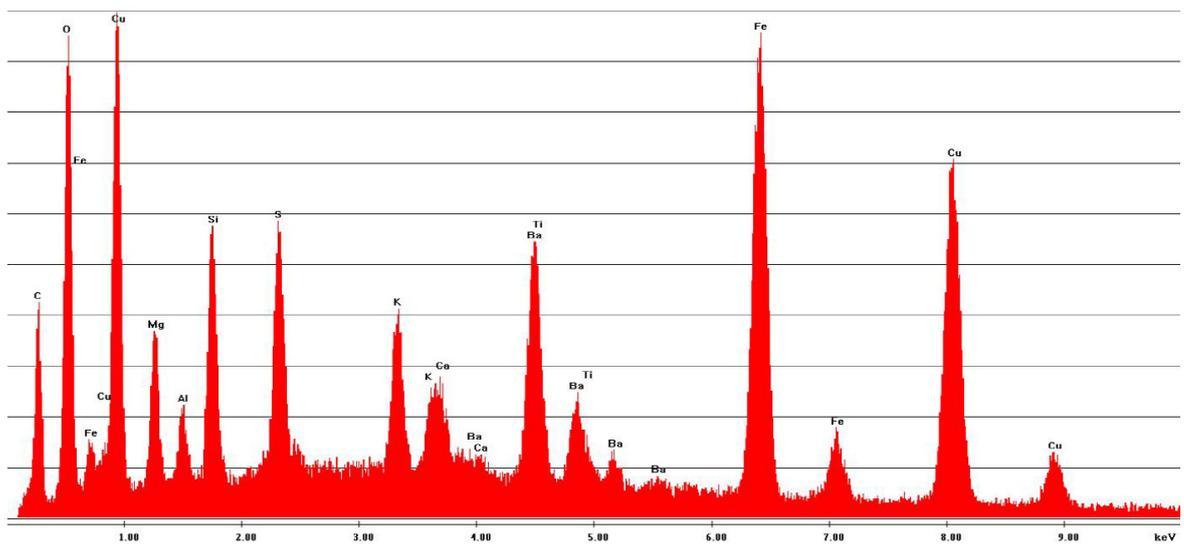


Abbildung 5-20 EDX-Spektrum eines benutzten Bremsbelages

5.5 Diskussion

Die Haupteinflussfaktoren auf die Partikelemission sind die Fahrgeschwindigkeit, die Bremsleistung und die Bremsscheibentemperatur. Mit Erhöhung der Bremsleistung ist ein Anstieg von beiden Messgrößen, LDSA und der Partikelmasse zu beobachten. Auch ist ein starker Zusammenhang zwischen dem LDSA-Wert und der Temperatur feststellbar. Der LDSA-Wert steigt exponentiell mit der Temperatur der Bremsscheibe, bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit und Bremsleistung. Vergleicht man den Verlauf des LDSA-Wertes mit der Partikelmasse, so ist feststellbar, dass der Einfluss der Temperatur auf die Emission der Partikelmasse gering ist. Es ist nur ein leicht linear ansteigender Zusammenhang erkennbar. In Diagramm 5-9 sind beide Messgrößen (LDSA und Partikelmasse) gegenübergestellt.

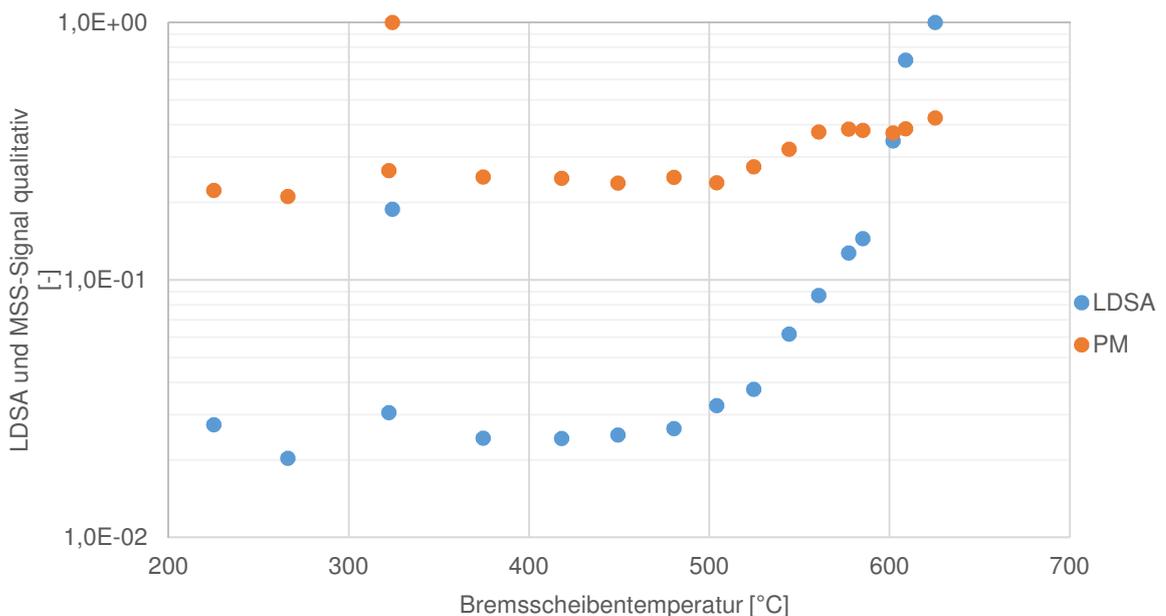


Diagramm 5-9 Gegenüberstellung LDSA-Wert und Partikelmassenkonzentration

Die Emission von Partikelmasse ist primär von der Fahrgeschwindigkeit und der Bremsleistung (siehe Diagramm 5-8) abhängig. Es lässt sich festhalten, dass die Partikelmassenemission über einen weiten Bereich konstant bleibt. Im Gegensatz dazu die Partikelanzahl, die in Anlehnung an den exponentiell steigenden LDSA-Wert, stark ansteigt. Es werden viele kleine Partikel emittiert. Damit ist die potentielle Gesundheitsgefährdung umso größer, vgl. Abbildung 2-6, je höher die

Temperatur der Bremse liegt. Im städtischen Bereich sind diese Temperaturbereiche ($> 500\text{ °C}$) schwer zu erreichen, allerdings rückt im städtischen Bereich die große Anzahl an Fahrzeugen in den Vordergrund.

Die Absaugung der Partikel durch den Axialventilator hat gut funktioniert. Durch die Verfrachtung von Grobstaub bis zur Luftfilterbox ist sichergestellt, dass auch Feinstaub (PM_{10}) zuverlässig von der Strömung erfasst wurde. Die Kühlung der Bremsscheibe erfolgte nur mittels der abgesaugten Luft. Durch die auftretenden Temperaturen nach einer Bremsung und die geforderte Temperatur für eine erneute Bremsung (siehe Anhang Tabelle 11-1 und Tabelle 11-3), ergab sich eine Abkühlphase zwischen den Bremsungen. Die Abkühlphase könnte durch Verwendung einer direkten Kühlung der Bremsscheibe deutlich abgekürzt werden. Zum Beispiel durch Verwendung eines Ventilators, dessen Luftstrom direkt auf den Bremsscheibentopf gerichtet ist.

Betrachtet wurde die errechnete PM_{10} Partikelemission in Tabelle 5-3. Die berechnete Partikelemission beschränkt sich auf die ausgewerteten Prüfdurchgänge 4 bis 9. Extrapoliert man die Durchläufe zurück bis zum ersten Durchlauf, also drei zusätzliche Prüfdurchgänge, ergibt sich eine emittierte Partikelmasse von rund 7,5 g. Gemessen an der Masse des Gesamtabriebes von Bremsscheibe und Bremsbelägen (Gesamt $\Delta m = 113\text{ g}$, aus Tabelle 5-1) entspricht das einem Anteil von rund 7 %. Andere Untersuchungen stellen fest, dass rund 50 % [6] des Abriebes als Feinstaub emittiert werden. Im Vergleich erscheint der Anteil von 7 % gering, die Ursache ist eventuell die unvollständige Durchmischung von Partikel im Luftstrom. Abhilfe könnte ein Turbulenzblech am Anfang der Entnahmestrecke schaffen um eine bessere Durchmischung zu erreichen.

Ausgehend von Tabelle 2-1 besteht der Bremsbelag aus einer breiten Palette von Materialien. Als Hauptbestandteile des Bremsbelages sind durch die Analyse mit dem Elektronenmikroskop folgende Elemente festgestellt worden: Kohlenstoff (C), Schwefel (S), Titan (Ti), Silicium (Si). Bei einer alleinigen Analyse des Feinfilters, hinsichtlich seiner Zusammensetzung, wären viele Elemente durch die Bestandteile des Feinfilters verborgen geblieben, zum Beispiel Si, Ba, Ti etc. (vgl. Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22). Für folgende Untersuchungen ist es daher vorteilhaft das

Material des Feinfilters sorgfältig auszuwählen; bzw. ein möglichst homogenes Filtermaterial zu wählen, um dessen Einflüsse zu minimieren.

Das alleinige betrachten des EDX-Spektrums des Bremsbelages ist nicht ausreichend dafür, eine Risikoanalyse bezüglich der Auswirkungen auf die Gesundheit anzufertigen. Die Gesundheitsgefährdung ist einerseits von der Größe der Partikel und andererseits von der Zusammensetzung der Partikel abhängig. Die EDX-Analyse ist nicht ausreichend um auf die Bindung der Moleküle zurückzuschließen. Dennoch werden einige Elemente bzw. Moleküle bezüglich ihrer Gesundheitsgefährdung angeführt, welche sich basierend auf der EDX-Analyse im Bremsbelag befinden könnten, als erstes Beispiel ist SiO_2 angeführt. Dieses unterscheidet sich hinsichtlich seiner Gesundheitsgefährdung wesentlich, ob es in kristalliner oder amorpher Form vorliegt. Kristallines SiO_2 verursacht schwere Entzündungen in der Lunge, wohingegen die Auswirkungen von amorphen SiO_2 schnell wieder Abklingen und keine Langzeitschäden zu befürchten sind. Cu bzw. Kupferoxid (CuO) sind ebenfalls im Bremsbelag vertreten, Cu und CuO sind nachweislich für Schäden am neurologischen System, Leber und Niere verantwortlich. Aluminiumoxid und Titanoxid verursachen Schädigungen bzw. Entzündungen der Lunge. Eisenoxide sind bezüglich ihrer Gesundheitsauswirkung unbedenklich, [28]. Ausgehend von Tabelle 2-1 können die Elemente auch in folgender Form vorliegen. Zum Beispiel Glimmer, je nach Zusammensetzung besteht dieser aus K, Ca, Si, Al, Mg, Ti und weiteren Elementen. Schwerspat besteht aus Ba, S und O, [29], [30].

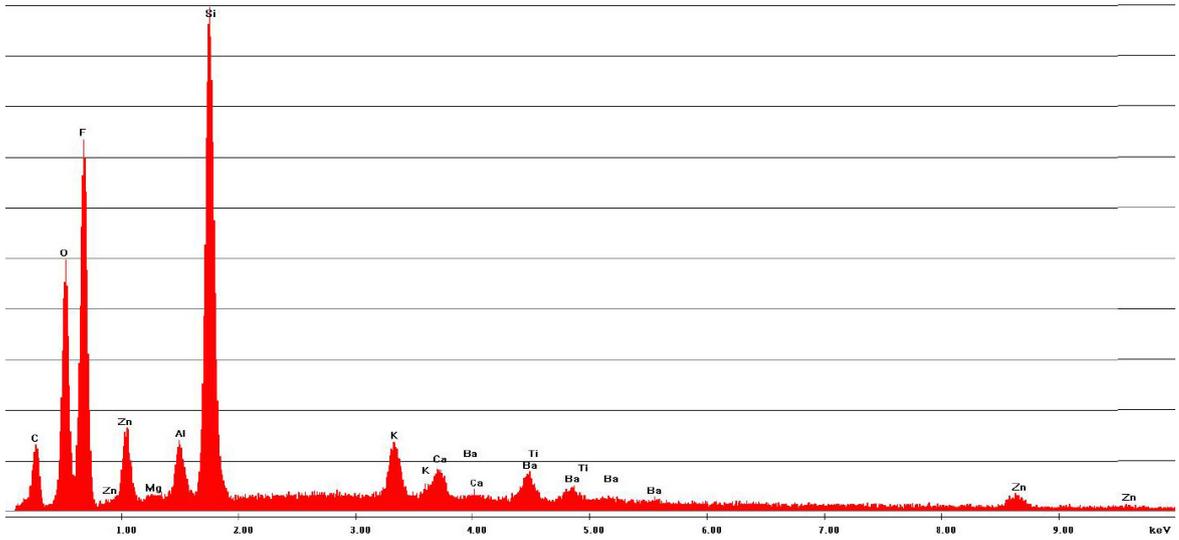


Abbildung 5-21 EDX-Spektrum des neuen Feinfiltermaterials

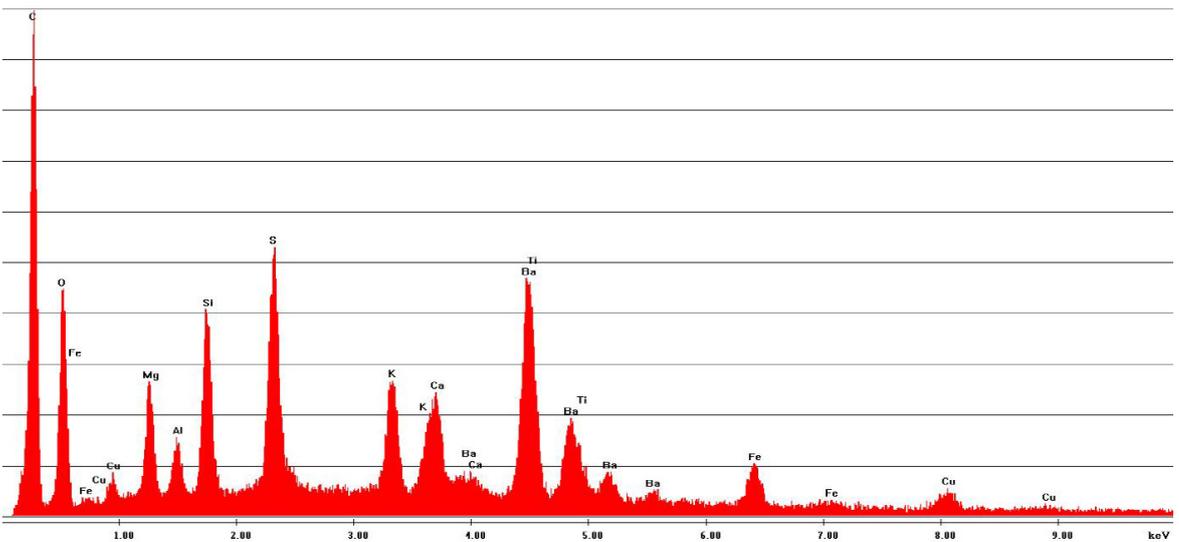


Abbildung 5-22 EDX-Spektrum eines neuen Bremsbelages

6 Ausblick

Der Testaufbau am Schwungmassenbremsprüfstand hat die Zusammenhänge zwischen Partikelemission, Fahrgeschwindigkeit, Temperatur, Bremsdruck und Bremsleistung gezeigt. Diese Ergebnisse sind allerdings nur für die untersuchte Bremsanlage gültig. Für eine weitere Überprüfung hinsichtlich der Partikelemission müssen mehrere verschiedene Bremsanlagen untersucht werden. Für nahezu alle gängigen Fahrzeugmodelle gibt es nicht nur OEM-Bremsanlagen, sondern ebenfalls viele Anbieter aus dem freien Zubehörhandel. Unter Berücksichtigung der Artenvielfalt der verschiedenen Bremsbeläge (NAO, Semimet, Low-Steel) ist es mit hohem Aufwand verbunden die gesamte Palette zu untersuchen.

Die Größenverteilung der Abriebpartikel ist ein weiterer wichtiger Punkt. Durch die Vorabscheidung der PM_{10} Fraktion durch die Entnahmesonde wurden größere Partikel abgeschieden. Eine weitere Unterscheidung hinsichtlich der Größenverteilung wurde nicht mehr getroffen. Besonders die starke Temperaturabhängigkeit des LDSA-Wertes bestärkt den Zusammenhang, dass die Fraktion $PM_{2,5}$ durch thermochemische bzw. thermomechanische Prozesse verursacht wird. Zur Einschätzung der gesundheitlichen Risiken ist eine größenabhängige Messung der Partikelemission bzw. die weitere chemische Analyse von großem Nutzen, [3].

In dem hier durchgeführten Prüfzyklus wurden realitätsnahe Bremsmanöver durchgeführt. Basierend auf den gesammelten Messdaten lassen sich beliebige weitere Fahrzyklen zusammenstellen. Damit ist es möglich die Partikelemission der Bremse mit den Emissionen des Verbrennungsmotors zu vergleichen.

Durch die Weiterentwicklung der Bremsanlagen hinsichtlich ihrer Reibmaterialien (ABC frei) und die Möglichkeit der Rekuperation wird zwar die Partikelbelastung durch die Bremse verringert, aber ein gänzlich Verzicht auf die klassische Reibungsbremse wird in naher Zukunft nicht möglich sein. Aus diesem Grunde ist es wichtig die Feinstaubemission der Fahrzeugbremse zu kennen um die richtigen Maßnahmen zu ergreifen und um diese fortlaufend zu verbessern.

7 Literaturverzeichnis

- [1]. **Gansterer, Markus.** Verkehr in den Ballungsräumen besser steuern. *Verkehr aktuell.* 2013, 2/2013.
- [2]. **Kleine Zeitung.** *Feinstaub-Jahresgrenzwert in Graz bereits überschritten.* s.l. : Kleine Zeitung, 2015.
- [3]. **Martini, Giorgio.** UNECE. [Online] 11. Mai 2014. <https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/18546889/GPRE-PMP-31-02%20Non-exhaust%20particle%20emissions-draft.docx?api=v2>.
- [4]. **Quass, Ulrich, et al.** *Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrabrieb an den PM10-Emissionen von Straßen.* Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW, 2008. ISBN 978-3-86509-786-6.
- [5]. **Breuer, Bert.** *Bremsenhandbuch.* [Hrsg.] Prof. Dr.-Ing Karlheinz H. Bill. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012. ISBN 978-3-8348-1796-9.
- [6]. **Sanders, Paul G., et al.** Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Compositions, and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Tests. *Environmental Science & Technology.* 2003, 37.
- [7]. **Day, Andrew J.** *Braking of road vehicles.* Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 9780123973146.
- [8]. **Umweltbundesamt.** *Schwebestaub in Österreich.* Wien : Umweltbundesamt, 2006. ISBN 3-85457-787-7.
- [9]. **Stieß, Matthias.** *Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1.* Heidelberg : Springer Verlag, 2009. ISBN 978-3-540-32551-2.
- [10]. **Bukowiecki, Nicolas, et al.** *PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs.* s.l. : Bundesamt für Strassen, 2009.
- [11]. **Künzli, N, et al.** Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a. *The Lancet.* 2000, 356.
- [12]. **Heyder, Joachim.** Deposition of Inhaled Particles in the Human Respiratory Tract and Consequences for Regional Targeting in Respiratory Drug Delivery. *Proceedings of the American Thoracic Society.* 2004, 1.

- [13]. **Naneos**. [Online] 5. Juli 2012. [Zitat vom: 7. April 2015.] <http://www.naneos.ch/pdf/LDSA.pdf>.
- [14]. **Gasser, Michael, et al.** Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells in vitro. *Particle and Fibre Toxicology*. 2009, 6:30.
- [15]. **Wahlström, Jens, et al.** A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. *Wear*. 2010, 268.
- [16]. **REBRAKE**. UNECE PMP. [Online] 03. April 2014. [Zitat vom: 25. Mai 2015.] <https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/16450001/GRPE-PMP-30-05%20Non-exhaust%20emissions%20rev%201.pptx?api=v2>.
- [17]. *A system to test the toxicity of brake wear particles*. **Riediker, Michael, et al.** Zürich : s.n., 2008. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles.
- [18]. **Gail, Lothar, Gommel, Udo und Hortig, Hans-Peter**. *Reinraumtechnik*. Heidelberg : Springer Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-19434-4.
- [19]. **Unifil AG**. Unifil AG. [Online] 4. Jänner 2014. [Zitat vom: 17. Juni 2015.] http://www2.cdn.unifil.ch/data/cms/products/pdf/7_Schwebestofffilter/d_7_4_1.pdf.
- [20]. —. Unifil AG. [Online] 04. Jänner 2014. [Zitat vom: 17. Juni 2015.] http://www3.cdn.unifil.ch/data/cms/products/pdf/7_Schwebestofffilter/d_7_14_1.pdf.
- [21]. **Gebhardt, Norbert und Will, Dieter**. *Hydraulik*. Heidelberg : Springer Verlag, 2011. ISBN 978-3-642-17241-7.
- [22]. **Schwarze, Rüdiger**. *CFD-Modellierung*. Berlin : Springer Verlag, 2013. ISBN 978-3-642-24377-6.
- [23]. **Ferziger, Joel H. und Peric, Milovan**. *Numerische Strömungsmechanik*. Heidelberg : Springer, 2008. ISBN 978-3-540-67586-0.
- [24]. **Economic Commission for Europe**. Economic Commission for Europe. [Online] 4. Februar 2015. [Zitat vom: 8. April 2015.] <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R083r5e.doc>.

- [25]. **SAE International**. Dynamometer Global Brake Effectiveness. [Online] SAE International, 2006. [Zitat vom: 27. Mai 2015.] http://standards.sae.org/j2522_200306/.
- [26]. **Toyota**. Toyota Walter. [Online] 15. Oktober 2008. [Zitat vom: 20. April 2015.] <http://www.toyota-walter.at/images/Image/neuwagen/14/technischedaten.pdf>.
- [27]. **Pall Life Sciences**. Pall Life Sciences. [Online] 30. Oktober 2002. [Zitat vom: 13. Mai 2015.] http://www.pall.com/pdfs/Laboratory/02.0601_Pallflex_LR.pdf.
- [28]. **DaNa**. DaNa Daten und Wissen zu Nanomaterialien. [Online] [Zitat vom: 19. Juni 2015.] <http://nanopartikel.info/>.
- [29]. **Rieder, Milan, et al**. Nomenclature of the Micas. *The Canadian Mineragolist*. 1998, 36.
- [30]. **Okrusch, Martin und Matthes, Siegfried**. *Mineralogie*. Heidelberg : Springer, 2005. ISBN 3-540-23812-3.
- [31]. **Amt der steiermärkischen Landesregierung**. *Umweltinformation Steiermark*. [Online] September 2014. [Zitat vom: 20. Mai 2015.] http://app.luis.steiermark.at/berichte/Download/Fachberichte/LRP_Steiermark_Nf2_014.pdf.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Klotzbremse	3
Abbildung 2-2 Komponentenauflistung der hydraulischen Bremse	4
Abbildung 2-3 Messung der Gesamtbelastung und der Hintergrundbelastung	11
Abbildung 2-4 Schematische Darstellung einer Luv-Lee Messung.....	11
Abbildung 2-5 Ablagerungsrate von Partikel im menschlichen Körper im Partikelgrößenbereich von 0,01 – 10 µm.....	14
Abbildung 2-6 Ablagerungsrate von Partikel im menschlichen Körper von im Partikelbgrößenbereich von 0,01 – 1 µm	15
Abbildung 2-7 Größenverteilung des Bremsenabriebs	16
Abbildung 3-1 Übersicht Pin on Disc Versuch.....	18
Abbildung 3-2 Versuchsaufbau am Schwungmassenbremsprüfstand.....	18
Abbildung 3-3 Adaptionen direkt am Fahrzeug	19
Abbildung 3-4 Ansicht des Gehäuses aus Fahrzeugsrichtung	19

Abbildung 3-5 Grundaufbau des bestehende Adapters zur Bremsenprüfung	22
Abbildung 3-6 Übersicht inkl. Gehäuse	23
Abbildung 3-7 Wirksame Abscheideeffekte am HEPA-Filter.....	25
Abbildung 3-8 Querschnittvergleich.....	26
Abbildung 3-9 Gehäuse.....	27
Abbildung 3-10 Wirkdruckverfahren	28
Abbildung 3-11 Komponentenübersicht Messstrecke Vorderansicht.....	30
Abbildung 3-12 Komponentenübersicht Messstrecke Rückansicht	31
Abbildung 3-13 Darstellung RANS-Modell	33
Abbildung 3-14 Vereinfachtes CAD-Modell.....	34
Abbildung 3-15 Geometrisches Simulationsmodell für die 3D-CFD Analyse.....	35
Abbildung 3-16 Netzdarstellung	36
Abbildung 3-17 Randbedingungen für die CFD-Simulation	38
Abbildung 3-18 Vergleich der beiden Geschwindigkeitsprofile	40
Abbildung 4-1 Entnahmesonde nach ECE R83	42
Abbildung 4-2 Prinzipdarstellung der Isokinetische Probennahme	43
Abbildung 4-3 Einfluss der Partikelgröße und der Geschwindigkeitsverhältnisse auf den Wirkungsgrad der Probenahme.....	43
Abbildung 4-4 Blockschaltbild PM-PEMS.....	46
Abbildung 4-5 Blockschaltbild PN-PEMS	47
Abbildung 4-6 U-Rohr Manometer.....	49
Abbildung 4-7 Prinzipdarstellung des verwendeten Schwungmassenbremsprüfstands.....	53
Abbildung 4-8 Gehäuse komplett	54
Abbildung 4-9 Brems Scheibe.....	55
Abbildung 4-10 Bremsbeläge	55
Abbildung 4-11 Entnahmesonde mit Sondenspitze nach ECE R83	56
Abbildung 4-12 Sondendurchführung.....	57
Abbildung 4-13 Entnahmestelle der Probe im Abluftsystem	57
Abbildung 4-14 Prüfkammeröffnung.....	58
Abbildung 4-15 Aufbau Gehäuse in Prüfkammer.....	59
Abbildung 4-16 Entnahmestrecke	60
Abbildung 4-17 Volumenstrommessung nach der Entnahmestrecke	61
Abbildung 5-1 Verschmutzung der Lamellen der Irisblende.....	65
Abbildung 5-2 Verschmutzung der Luftfilterbox	65
Abbildung 5-3 Verschmutzung am Rohrübergang	66
Abbildung 5-4 Verschmutzung der Entnahmesonden.....	66
Abbildung 5-5 Ablagerung im Gehäuse.....	67
Abbildung 5-6 Ablagerung am Gehäuse in radialer Richtung	68
Abbildung 5-7 Ablagerung am Filter Nr. 3 innen in radialer Richtung	68

Abbildung 5-8 Vergleich benutzter und neuer Bremsbelag	70
Abbildung 5-9 Ablagerungen am Scheibenauslauf	70
Abbildung 5-10 Darstellung der Volumenströme durch das Abluftsystem	80
Abbildung 5-11 Gesamtmasse der gesammelten Partikel am Feinfilter	81
Abbildung 5-12 REM-Aufnahme des unbeladenen Feinfiltermaterials (Materialkontrast)	83
Abbildung 5-13 EDX-Spektrum des neuen Feinfiltermaterials	83
Abbildung 5-14 REM-Aufnahme des beladenen Filtermaterials (Materialkontrast)	84
Abbildung 5-15 EDX-Spektrum des beladenen Filtermaterials	84
Abbildung 5-16 Kombiniertes EDX-Spektrum von neuen und beladenen Filter	85
Abbildung 5-17 REM-Aufnahme eines neuen Bremsbelages (Materialkontrast).....	86
Abbildung 5-18 EDX-Spektrum eines neuen Bremsbelages.....	87
Abbildung 5-19 REM-Aufnahme eines benutzten Bremsbelages (Materialkontrast).....	88
Abbildung 5-20 EDX-Spektrum eines benutzten Bremsbelages.....	88
Abbildung 5-21 EDX-Spektrum des neuen Feinfiltermaterials	92
Abbildung 5-22 EDX-Spektrum eines neuen Bremsbelages.....	92

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Bestandteile der wichtigsten Vertreter der Reibbeläge (in Gewichtsprozent)	7
Tabelle 2-2 Größeneinteilung der Schwebestaubbelastung	8
Tabelle 2-3 Anzahl bzw. Tage mit Krankheiten verursacht durch Schwebestaub PM ₁₀ für Österreich	13
Tabelle 3-1 Übersicht der Vor- und Nachteile der erläuterten Versuche	20
Tabelle 3-2 Auflistung der technischen Daten der HEPA-Filterelemente [19], [20]	24
Tabelle 4-1 Masse und Abmessungen vor dem Versuch.....	56
Tabelle 5-1 Vermessung der Bremsenkomponenten nach den Prüfdurchgängen	69
Tabelle 5-2 Massen der Feinfilter	79
Tabelle 5-3 Übersicht Partikelemission für jeden Prüfdurchgang	81
Tabelle 11-1 Zusammenfassung eines Prüfdurchganges	I
Tabelle 11-2 Übersicht Bremsleistung während eines Prüfdurchlaufes.....	VII
Tabelle 11-3 Gemessene LDSA-Werte und Partikelmassenkonzentration während eines Prüfdurchganges	IX
Tabelle 11-4 Bestellliste der Lüftungskomponenten	XI

10 Formelverzeichnis

Gleichung (3-1) Volumenstromberechnung Wirkdruckverfahren	28
Gleichung (4-1) Berechnung der statischen Druckdifferenz.....	49
Gleichung (5-1) Kinetische Energie.....	74
Gleichung (5-2) Bremsleistung	74
Gleichung (5-3) Rechenbeispiel kinetische Energie.....	74
Gleichung (5-4) Rechenbeispiel Bremsleistung	74
Gleichung (5-5) Entnommener Volumenstrom der PM-PEMS aus Abluftsystem	79
Gleichung (5-6) Entnommenes Volumen der PM-PEMS aus Abluftsystem.....	80
Gleichung (5-7) Gesamtvolumen durch das Abluftsystem	80
Gleichung (5-8) Berechnung des Massenanteiles pro Prüfdurchgang	81
Gleichung (5-9) Gesamtemission von PM ₁₀	81

11 Anhang

Auflistung der Bremsungen

Tabelle 11-1 Zusammenfassung eines Prüfdurchganges

Bremsevent	Parameter	Geschwindigkeit: Beginn in km/h	Geschwindigkeit: Ende in km/h	Temperaturvorgabe: Brems Scheibe in °C
1	Bremsdruck: 3 bar	40	5	< 40
2	Bremsdruck: 3 bar	80	30	< 100
3	Bremsdruck: 3 bar	80	30	< 100
4	Bremsdruck: 3 bar	80	30	< 100
5	Bremsdruck: 3 bar	80	30	< 100
6	Bremsdruck: 3 bar	80	30	< 100
7	Bremsdruck: 3 bar	80	30	< 100
8	Bremsdruck: 1 bar	40	5	< 100
9	Bremsdruck: 2 bar	40	5	< 100
10	Bremsdruck: 3 bar	40	5	< 100
11	Bremsdruck: 4 bar	40	5	< 100
12	Bremsdruck: 5 bar	40	5	< 100
13	Bremsdruck: 6 bar	40	5	< 100
14	Bremsdruck: 7 bar	40	5	< 100

Bremsevent	Parameter	Geschwindigkeit: Beginn in km/h	Geschwindigkeit: Ende in km/h	Temperaturvorgabe: Bremsscheibe in °C
15	Bremsdruck: 8 bar	40	5	< 100
16	Bremsdruck: 1 bar	80	40	< 100
17	Bremsdruck: 2 bar	80	40	< 100
18	Bremsdruck: 3 bar	80	40	< 100
19	Bremsdruck: 4 bar	80	40	< 100
20	Bremsdruck: 5 bar	80	40	< 100
21	Bremsdruck: 6 bar	80	40	< 100
22	Bremsdruck: 7 bar	80	40	< 100
23	Bremsdruck: 8 bar	80	40	< 100
24	Bremsdruck: 1 bar	120	80	< 100
25	Bremsdruck: 2 bar	120	80	< 100
26	Bremsdruck: 3 bar	120	80	< 100
27	Bremsdruck: 4 bar	120	80	< 100
28	Bremsdruck: 5 bar	120	80	< 100
29	Bremsdruck: 6 bar	120	80	< 100
30	Bremsdruck: 7 bar	120	80	< 100
31	Bremsdruck: 8 bar	120	80	< 100

Bremsevent	Parameter	Geschwindigkeit: Beginn in km/h	Geschwindigkeit: Ende in km/h	Temperaturvorgabe: Bremsscheibe in °C
32	Verzögerung: 0,6 g	100	5	< 100
33	Verzögerung: 0,6 g	160	80	< 50
34	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 100
35	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 215
36	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 283
37	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 330
38	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 367
39	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 398
40	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 423
41	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 446
42	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 465
43	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 483
44	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 498
45	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 513
46	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 526
47	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 539
48	Verzögerung: 0,4 g	100	5	< 550

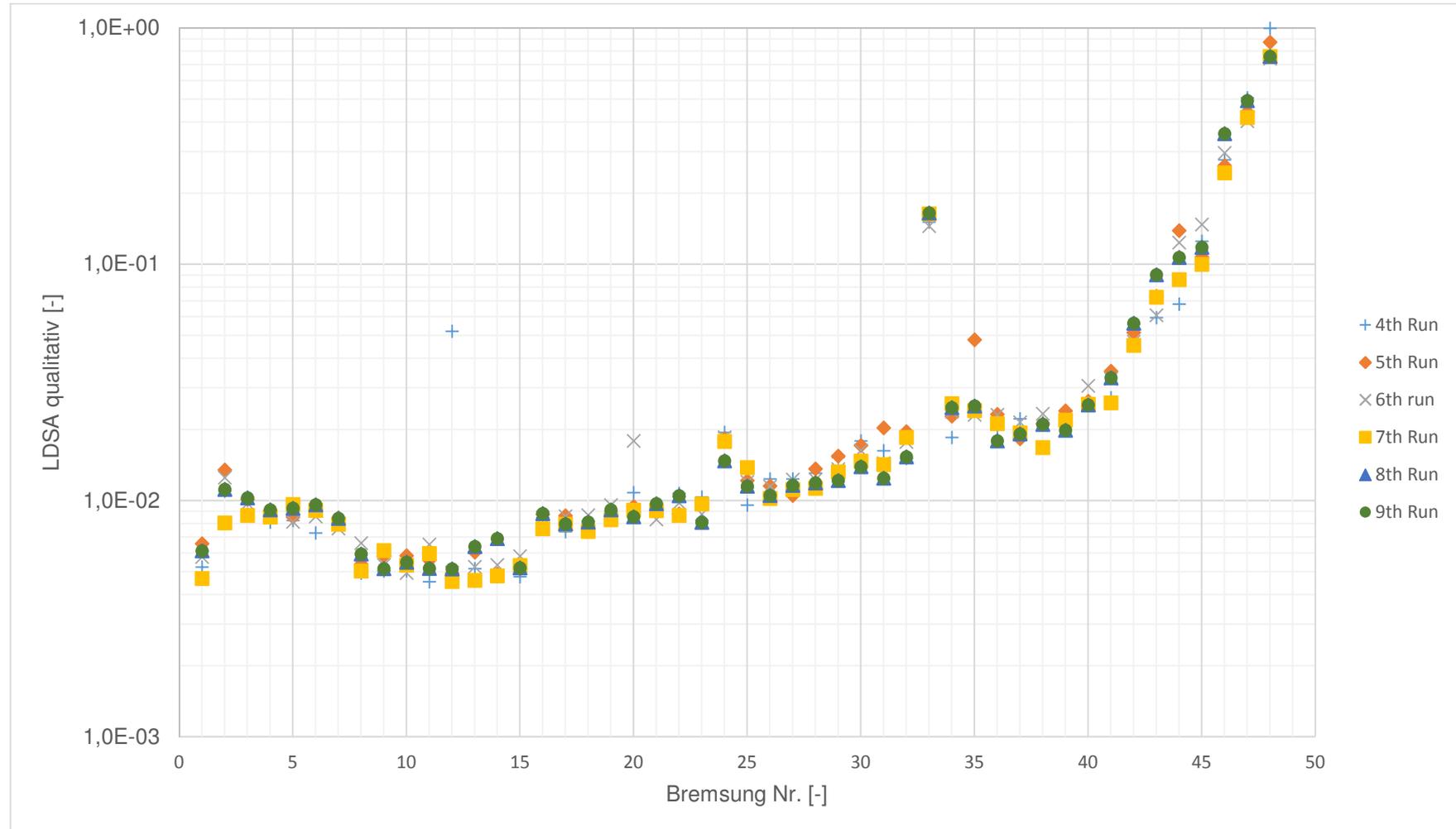


Diagramm 11-1 Qualitativer Verlauf des LDSA-Wertes während des gesamten Prüfdurchganges

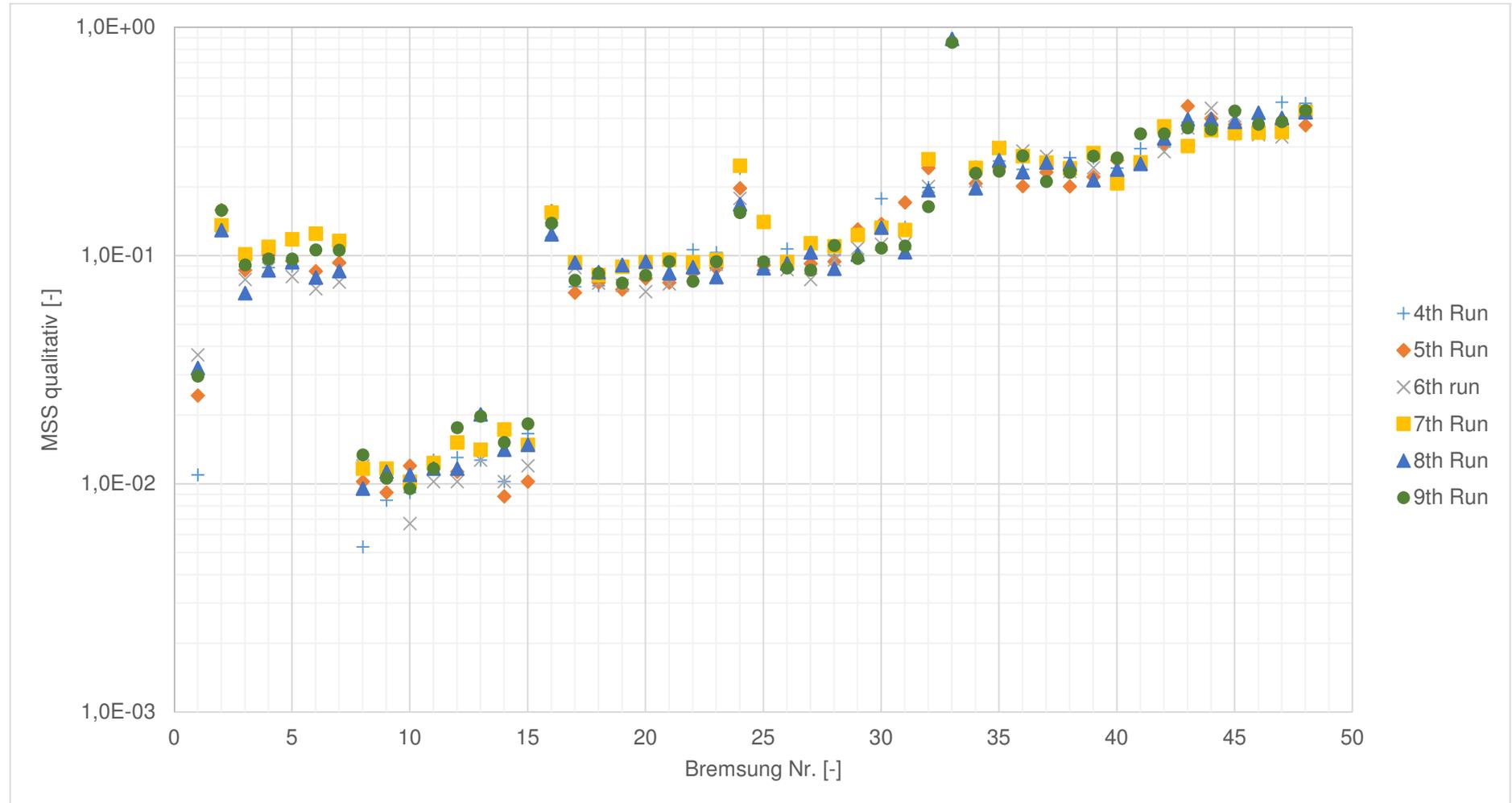


Diagramm 11-2 Qualitativer Verlauf des MSS während des gesamten Prüfdurchganges

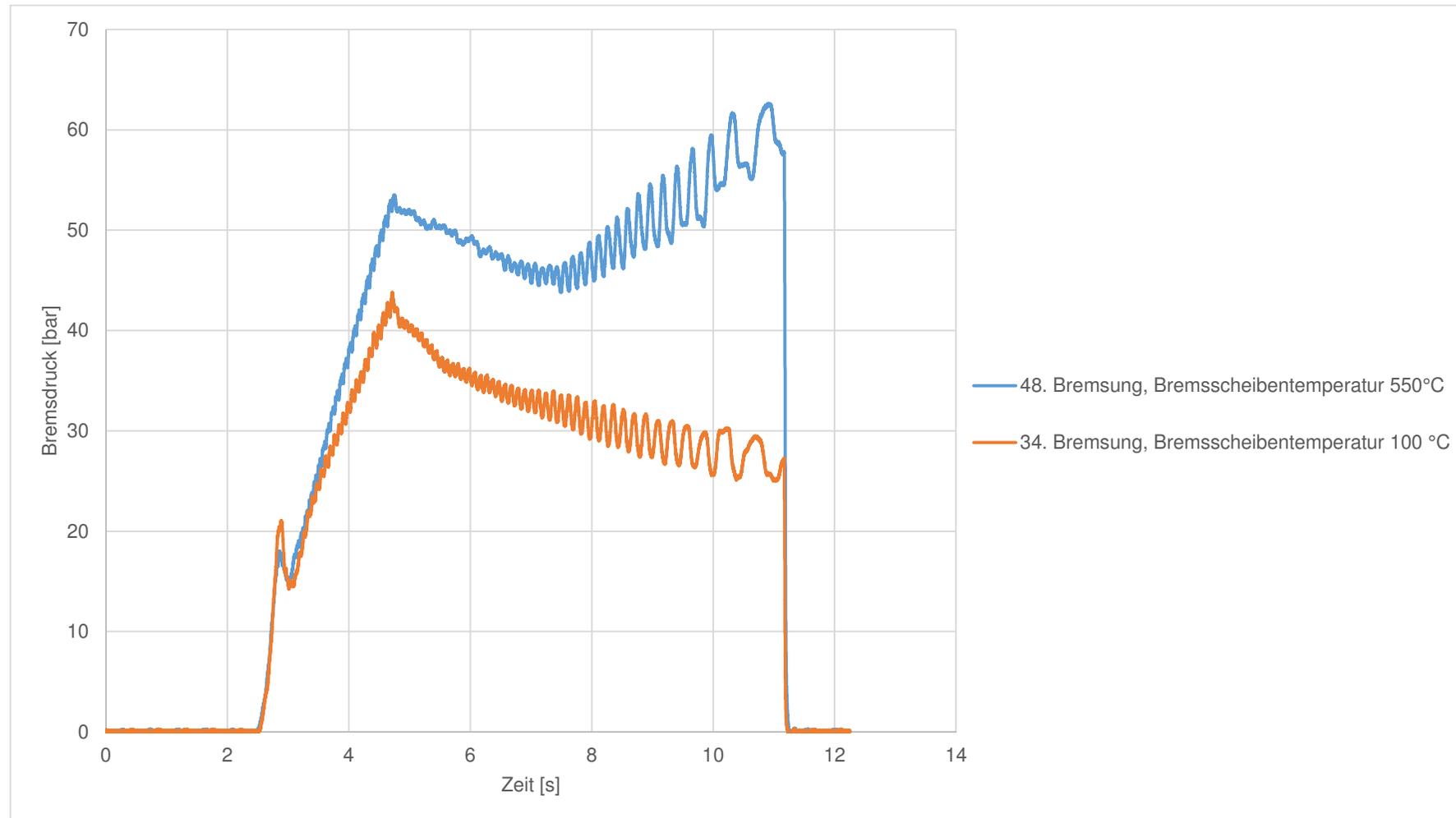


Diagramm 11-3 Vergleich Bremsdruck bei Bremsung aus 100 km/h mit 0,4 g bei verschiedenen Bremsscheibentemperaturen

Auflistung Bremsenergien bzw. Bremsleistung

Tabelle 11-2 Übersicht Bremsleistung während eines Prüfdurchlaufes

Bremsevent	Parameter	Abgebaute kinetische Energie in kJ	Verzögerungszeit in s	Bremsleistung in kW
1	Bremsdruck: 3 bar	59,2	43	1,4
2-7	Bremsdruck: 3 bar	206,9	53,4	3,9
8	Bremsdruck: 1 bar	59,2	127	0,5
9	Bremsdruck: 2 bar	59,2	56,1	1,1
10	Bremsdruck: 3 bar	59,2	43	1,4
11	Bremsdruck: 4 bar	59,2	527,1	2,2
12	Bremsdruck: 5 bar	59,2	21,9	2,7
13	Bremsdruck: 6 bar	59,2	18,5	3,2
14	Bremsdruck: 7 bar	59,2	15,7	3,8
15	Bremsdruck: 8 bar	59,2	13,8	4,3
16	Bremsdruck: 1 bar	180,6	105,4	1,7
17	Bremsdruck: 2 bar	180,6	57,6	3,1
18	Bremsdruck: 3 bar	180,6	39,8	4,5
19	Bremsdruck: 4 bar	180,6	28,2	6,4
20	Bremsdruck: 5 bar	180,6	24,2	7,5

Bremsevent	Parameter	Abgebaute kinetische Energie in kJ	Verzögerungszeit in s	Bremsleistung in kW
21	Bremsdruck: 6 bar	180,6	20,3	8,9
22	Bremsdruck: 7 bar	180,6	17,3	10,4
23	Bremsdruck: 8 bar	180,6	15,2	11,9
24	Bremsdruck: 1 bar	300,9	66	4,6
25	Bremsdruck: 2 bar	300,9	43,4	6,9
26	Bremsdruck: 3 bar	300,9	32	9,4
27	Bremsdruck: 4 bar	300,9	25,5	11,8
28	Bremsdruck: 5 bar	300,9	20,8	14,5
29	Bremsdruck: 6 bar	300,9	17,7	17
30	Bremsdruck: 7 bar	300,9	15,4	19,5
31	Bremsdruck: 8 bar	300,9	13,4	22,5
32	Verzögerung: 0,6 g	375,2	4,7	80,3
33	Verzögerung: 0,6 g	722,2	3,9	185,2
34-48	Verzögerung: 0,4 g	375,2	6,8	55,2

Auflistung LDSA-Werte und Partikelmassenkonzentration

Tabelle 11-3 Gemessene LDSA-Werte und Partikelmassenkonzentration während eines Prüfdurchganges

Bremsevent	Parameter	Mittlerer LDSA-Wert in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	PM-Konzentration in mg/m^3	Temperatur der Bremsscheibe in $^{\circ}\text{C}$
1	Bremsdruck: 3 bar	14,1	0,076	54
2	Bremsdruck: 3 bar	27,4	0,401	96
3	Bremsdruck: 3 bar	23,0	0,243	128
4	Bremsdruck: 3 bar	21,1	0,269	139
5	Bremsdruck: 3 bar	21,2	0,271	140
6	Bremsdruck: 3 bar	21,1	0,261	141
7	Bremsdruck: 3 bar	19,5	0,269	141
8	Bremsdruck: 1 bar	13,4	0,029	98
9	Bremsdruck: 2 bar	13,0	0,029	104
10	Bremsdruck: 3 bar	13,0	0,028	112
11	Bremsdruck: 4 bar	13,4	0,033	116
12	Bremsdruck: 5 bar	30,3	0,037	117
13	Bremsdruck: 6 bar	13,1	0,044	118
14	Bremsdruck: 7 bar	13,3	0,036	119
15	Bremsdruck: 8 bar	12,8	0,041	119
16	Bremsdruck: 1 bar	20,5	0,397	106
17	Bremsdruck: 2 bar	19,8	0,234	127
18	Bremsdruck: 3 bar	19,3	0,225	135

Bremsevent	Parameter	Mittlerer LDSA-Wert in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	PM-Konzentration in mg/m^3	Temperatur der Bremsscheibe in $^{\circ}\text{C}$
19	Bremsdruck: 4 bar	21,4	0,233	139
20	Bremsdruck: 5 bar	25,3	0,242	141
21	Bremsdruck: 6 bar	21,8	0,246	142
22	Bremsdruck: 7 bar	22,9	0,251	144
23	Bremsdruck: 8 bar	22,4	0,261	144
24	Bremsdruck: 1 bar	40,7	0,560	107
25	Bremsdruck: 2 bar	28,6	0,281	131
26	Bremsdruck: 3 bar	26,8	0,265	146
27	Bremsdruck: 4 bar	27,6	0,271	152
28	Bremsdruck: 5 bar	28,9	0,283	156
29	Bremsdruck: 6 bar	32,5	0,325	159
30	Bremsdruck: 7 bar	36,8	0,378	162
31	Bremsdruck: 8 bar	35,6	0,359	164
32	Verzögerung: 0,6 g	40,3	0,596	266
33	Verzögerung: 0,6 g	373,7	2,828	324
34	Verzögerung: 0,4 g	54,3	0,630	225
35	Verzögerung: 0,4 g	60,5	0,752	322
36	Verzögerung: 0,4 g	48,2	0,712	375
37	Verzögerung: 0,4 g	48,0	0,703	418
38	Verzögerung: 0,4 g	49,6	0,674	449

Bremsevent	Parameter	Mittlerer LDSA-Wert in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	PM-Konzentration in mg/m^3	Temperatur der Bremsscheibe in $^{\circ}\text{C}$
39	Verzögerung: 0,4 g	52,5	0,709	480
40	Verzögerung: 0,4 g	64,6	0,675	504
41	Verzögerung: 0,4 g	74,6	0,778	525
42	Verzögerung: 0,4 g	122,3	0,911	544
43	Verzögerung: 0,4 g	172,7	1,062	561
44	Verzögerung: 0,4 g	252,3	1,089	577
45	Verzögerung: 0,4 g	252,3	1,079	585
46	Verzögerung: 0,4 g	688,0	1,055	602
47	Verzögerung: 0,4 g	1097,8	1,094	609
48	Verzögerung: 0,4 g	1981,5	1,206	625

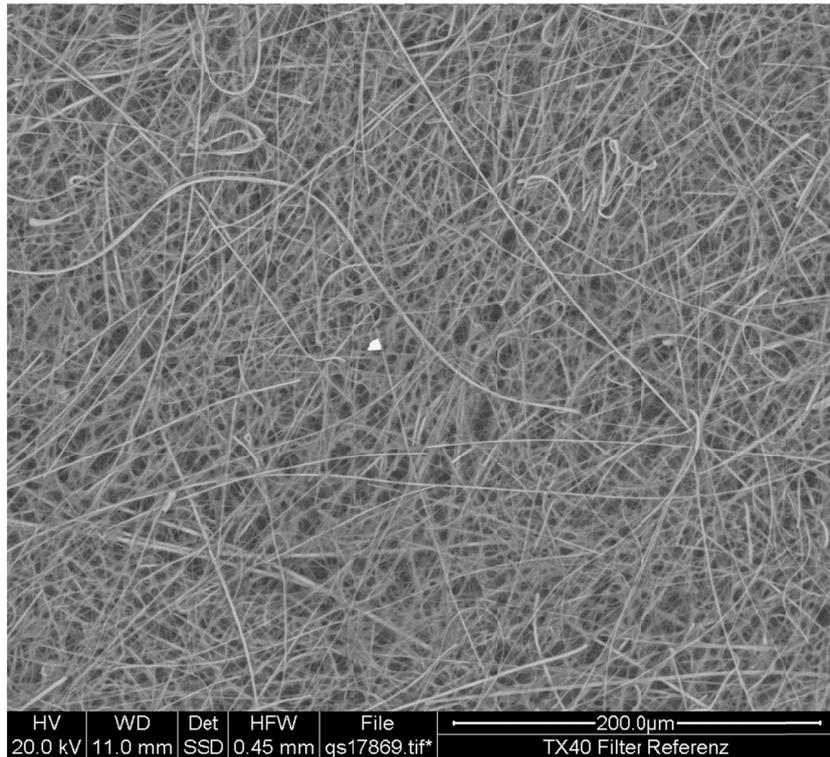
Bestellliste der Lüftungskomponenten

Tabelle 11-4 Bestellliste der Lüftungskomponenten

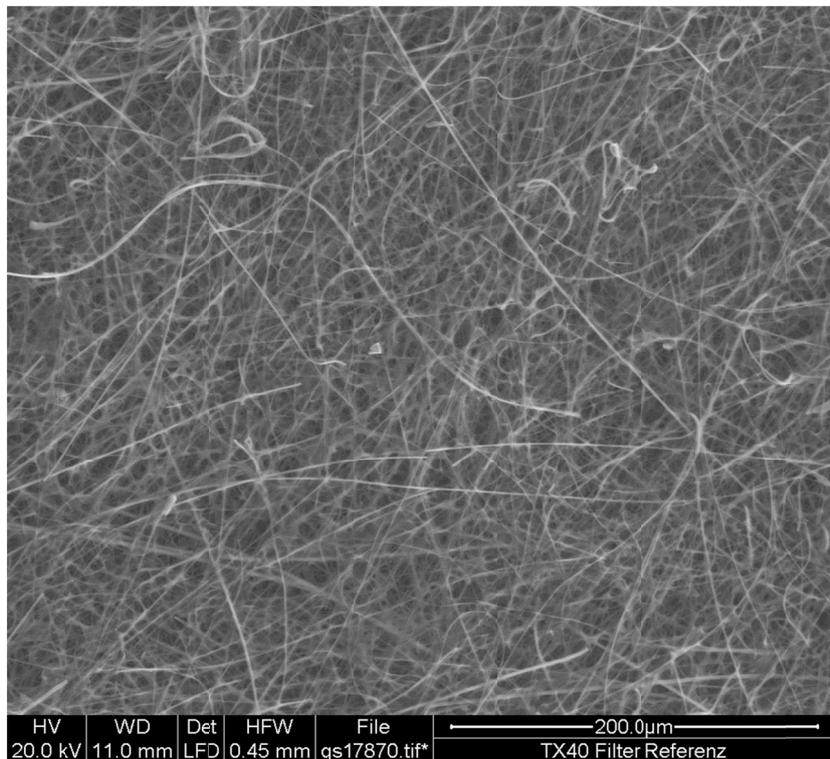
Bezeichnung	Artikelnummer	Anzahl
Axiallüfter D = 315 mm	TDE 315 D2	1
Regler für Axialventilator	FIS 2-7	1
Iris Blende D = 315 mm	IRIS 315	1
Luftfilterbox	LFB 315	1
Spiralrohr D = 315mm, L = 3 m	R 315	2
Revisionsdeckel / Rohrdurchführung	RD-Spiro 300 x 200/315	2
Bogen 90°, 315 mm	B90° 315	2
Aluflexschlauch D = 315 mm, L = 10 m	AF 315	1

Bezeichnung	Artikelnummer	Anzahl
Befestigungsmanschette D = 315 mm	MK 315	2
Muffe D = 315 mm	M 315	2
Nippel D = 315 mm	N 315	2
Schlauchbinder	SSB 250-525	3
Kassettenfilter H13, 305 x 305 x 292 mm	230810	1
Kassettenfilter H13, 305 x 610 x 292 mm	230811	1
Plattenfilter H13, 305 x 610 x 68 mm	226362	1

A14569:TX 40 Filter Referenz

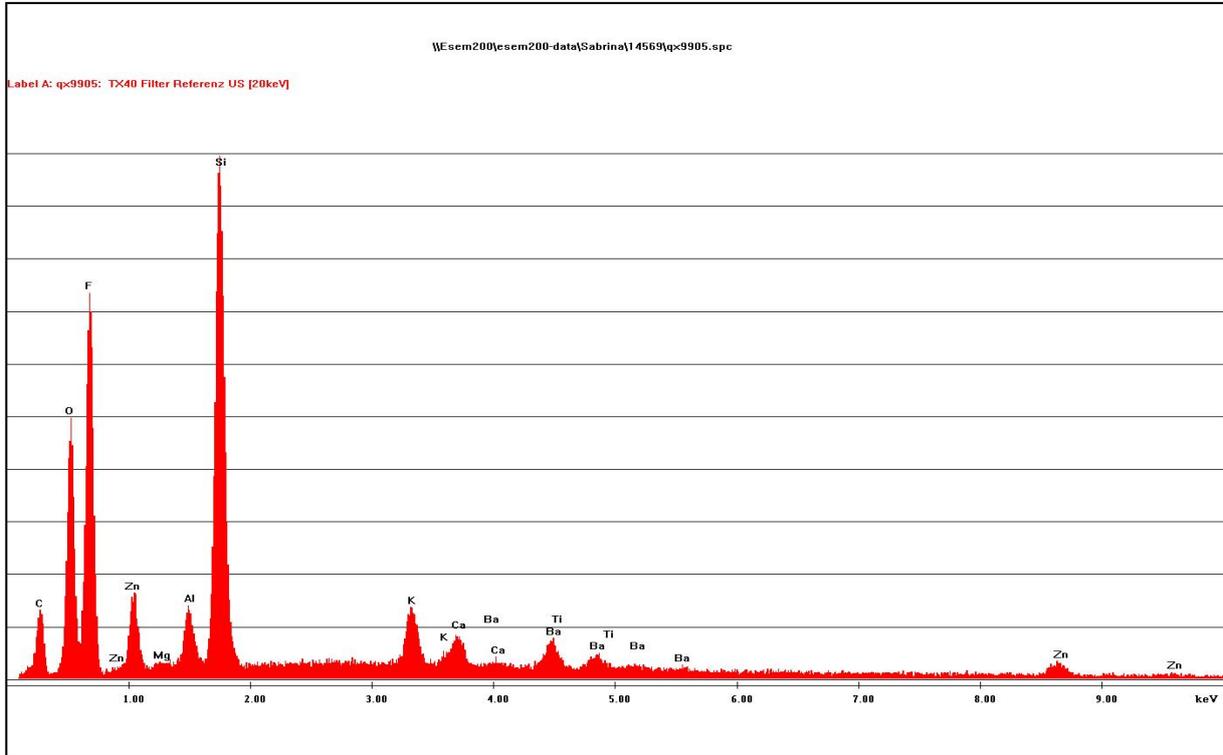


RE- Abbildung qs17869

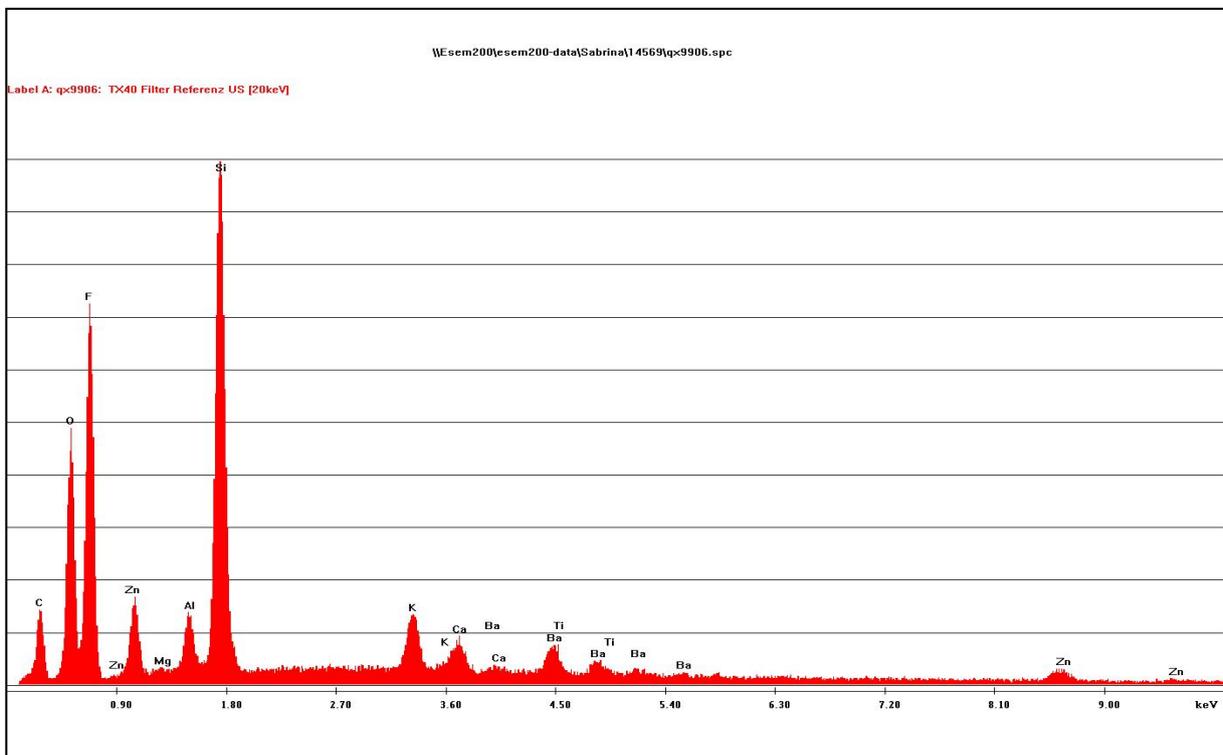


SE- Abbildung qs17870

A14569:TX 40 Filter Referenz

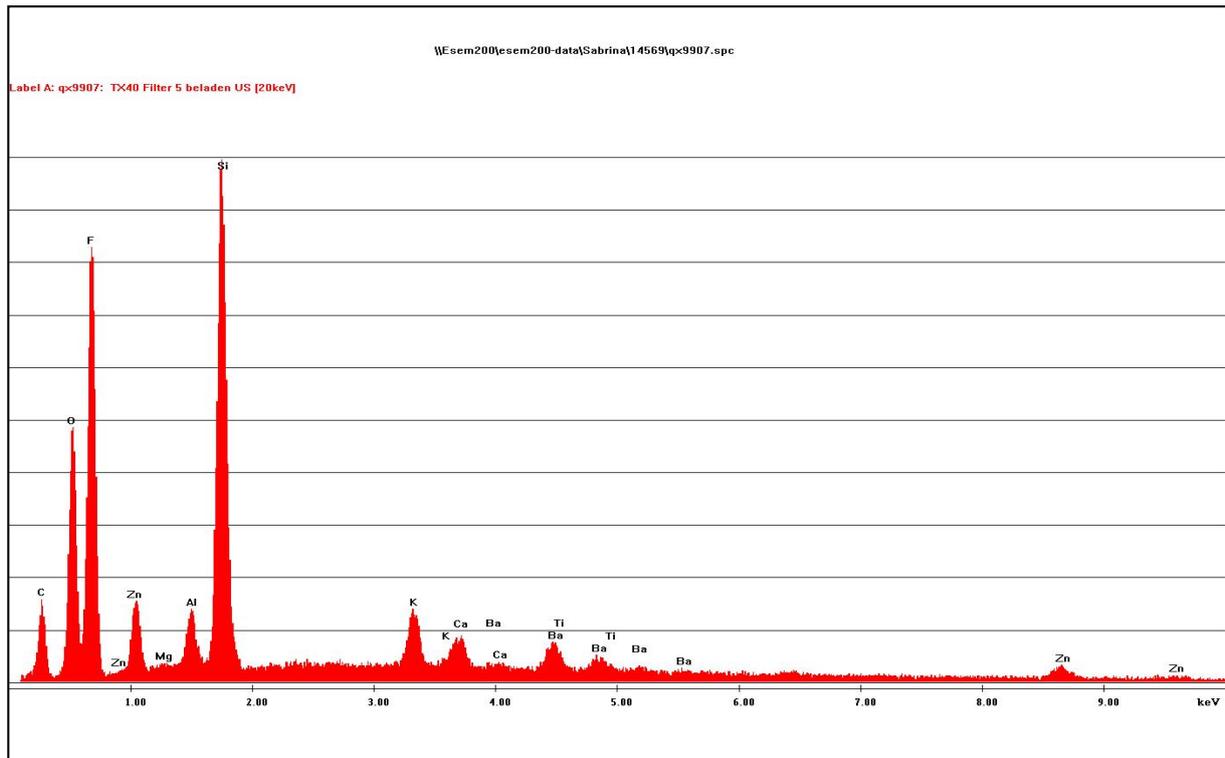


EDX-Übersichtsanalyse qx9905



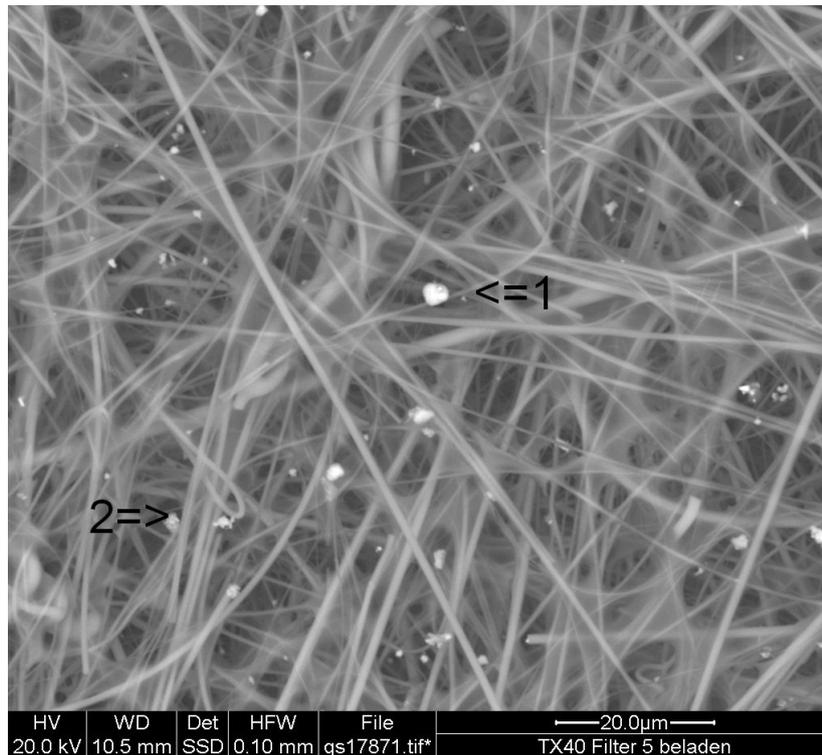
EDX- Übersichtsanalyse qx9906

A14569: TX 40 Filter #5 beladen

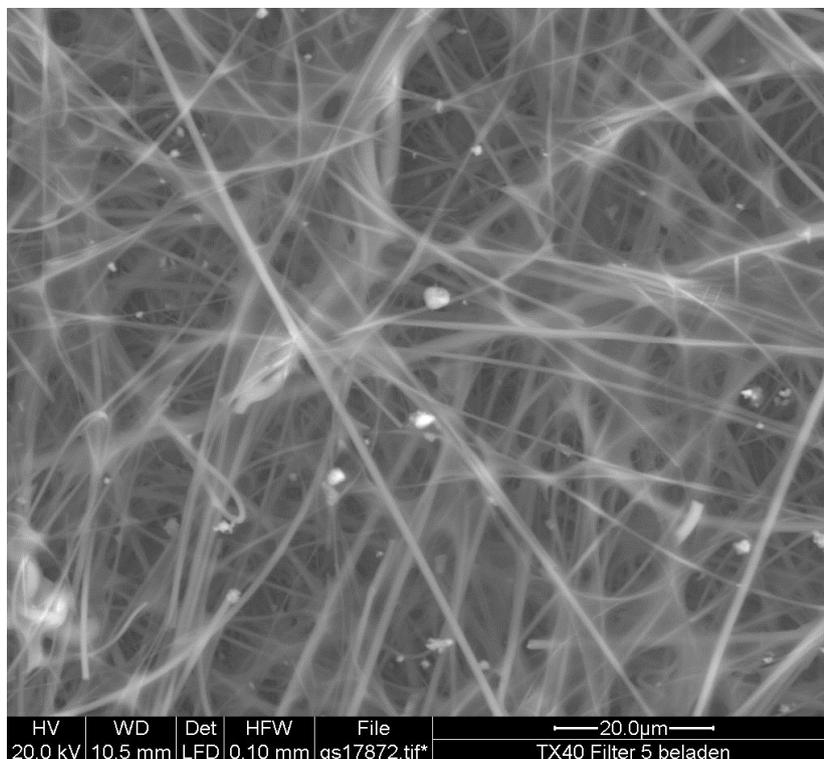


EDX- Übersichtsanalyse qx9907

A14569: TX 40 Filter #5 beladen

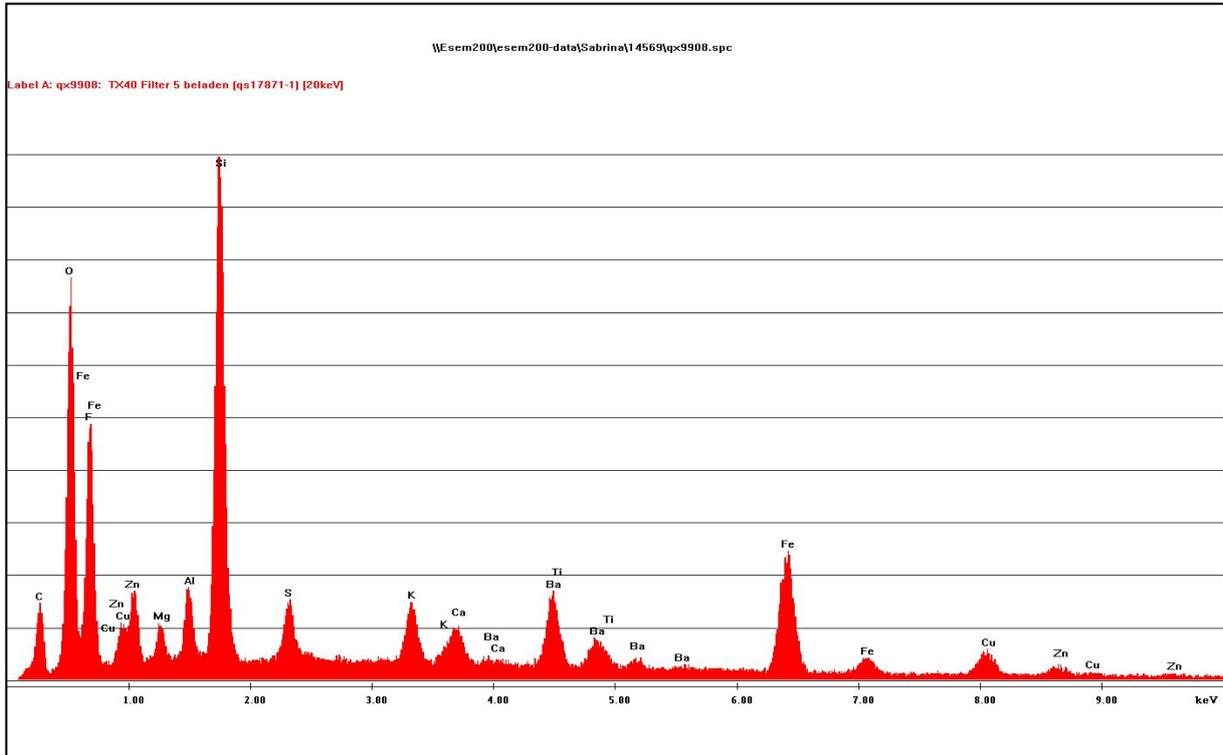


RE- Abbildung qs17871
 Analysen: qx9908 / qx9909

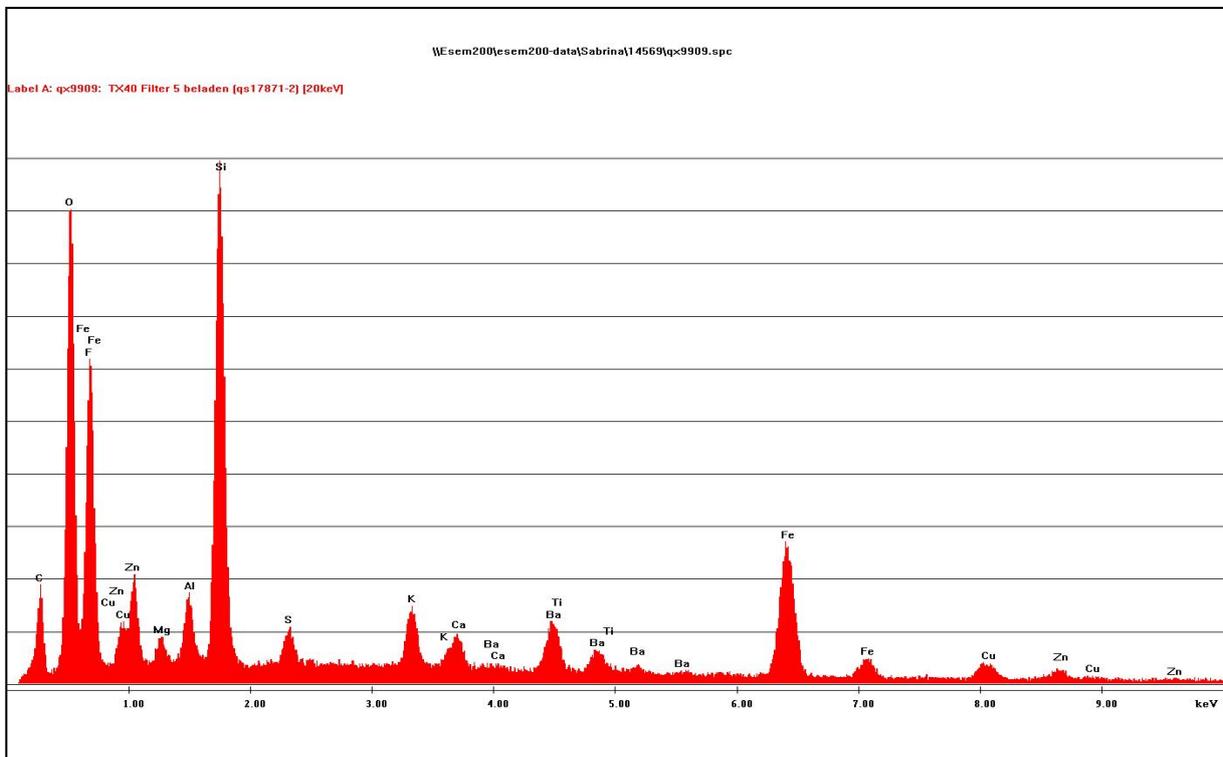


SE- Abbildung qs17872

A14569: TX 40 Filter #5 beladen

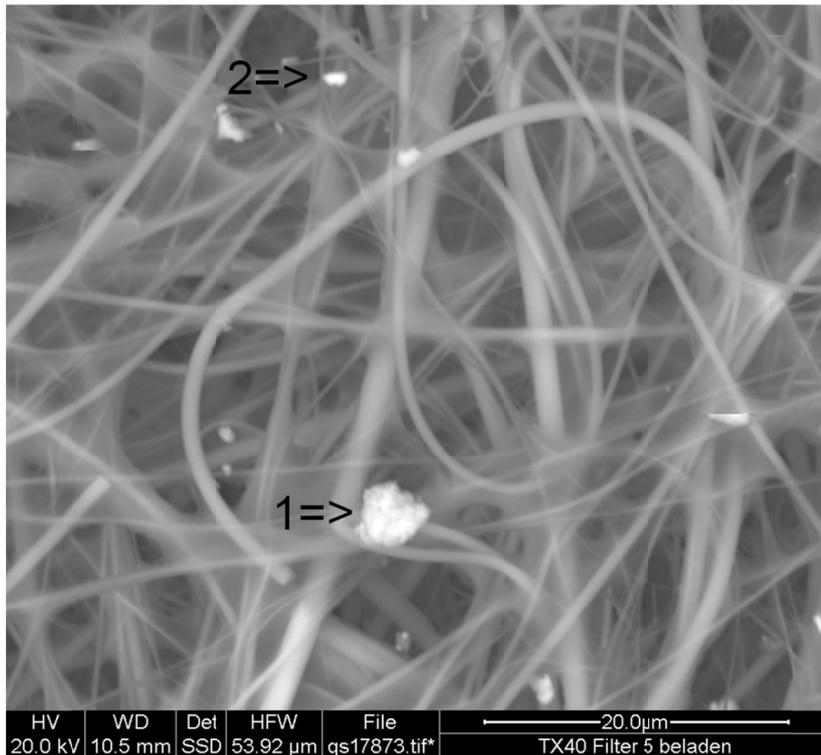


EDX- Analyse qx9908 aus Abbildung qs17871 Zone 1



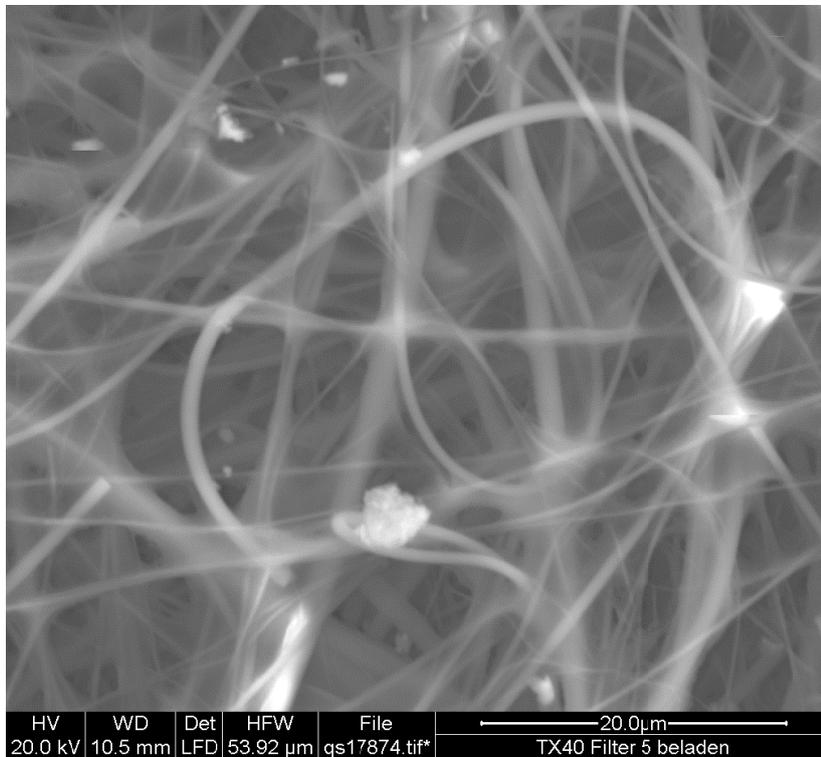
EDX- Analyse qx9909 aus Abbildung qs17871 Zone 2

A14569: TX 40 Filter #5 beladen



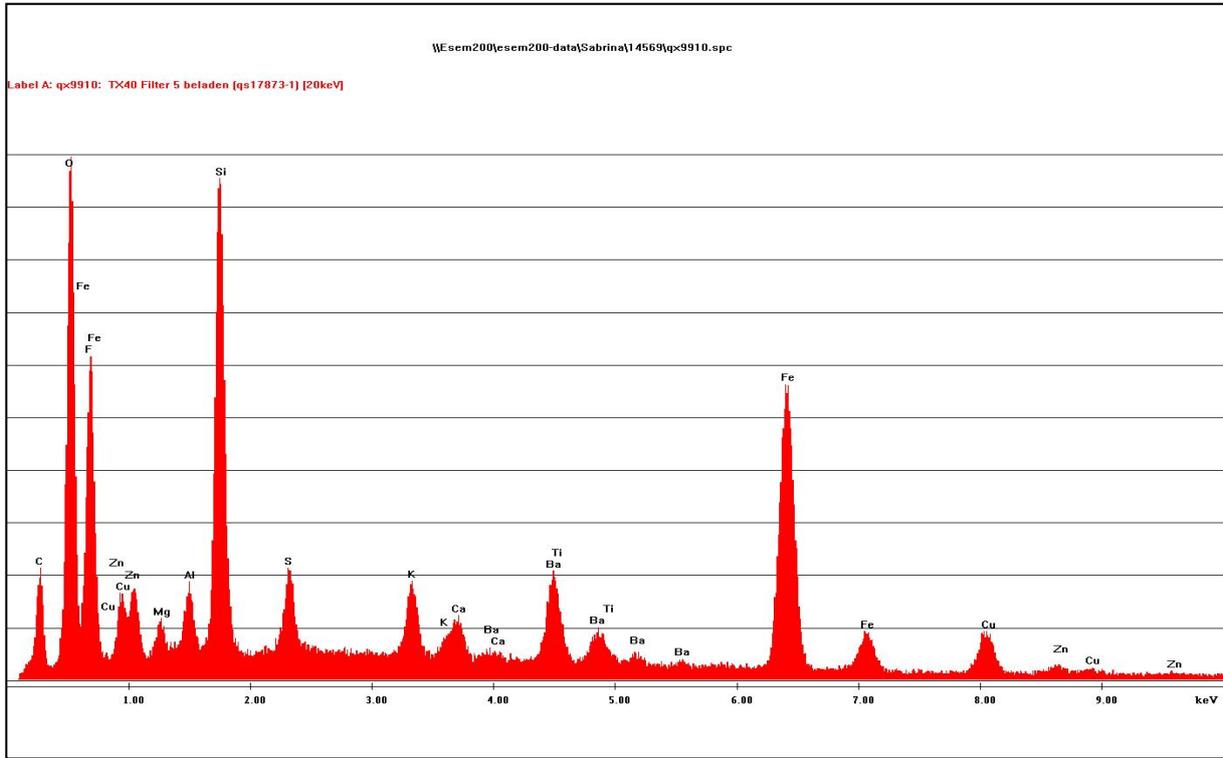
RE- Abbildung qs17873

Analysen: qx9910 / qx9911

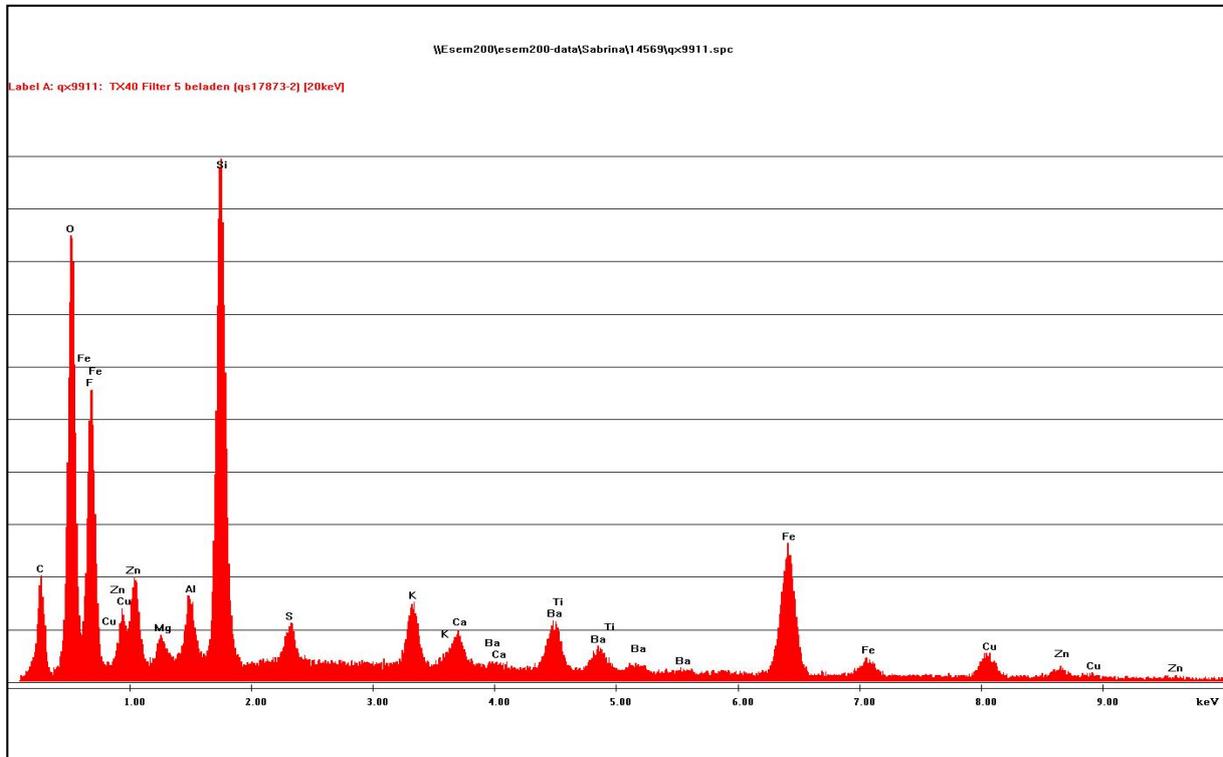


SE- Abbildung qs17874

A14569: TX 40 Filter #5 beladen

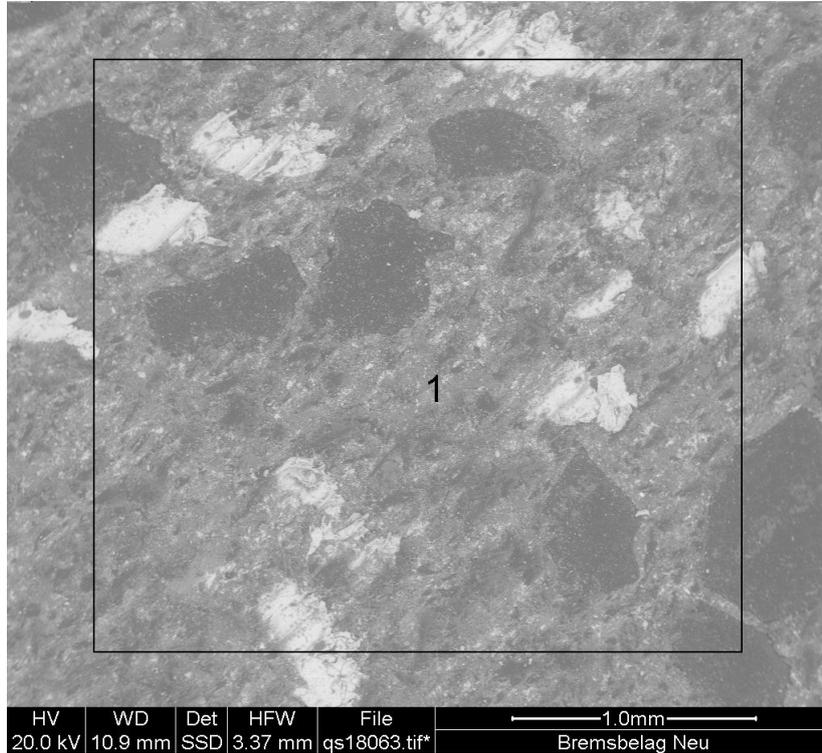


EDX- Analyse qx9910 aus Abbildung qs17873 Zone 1

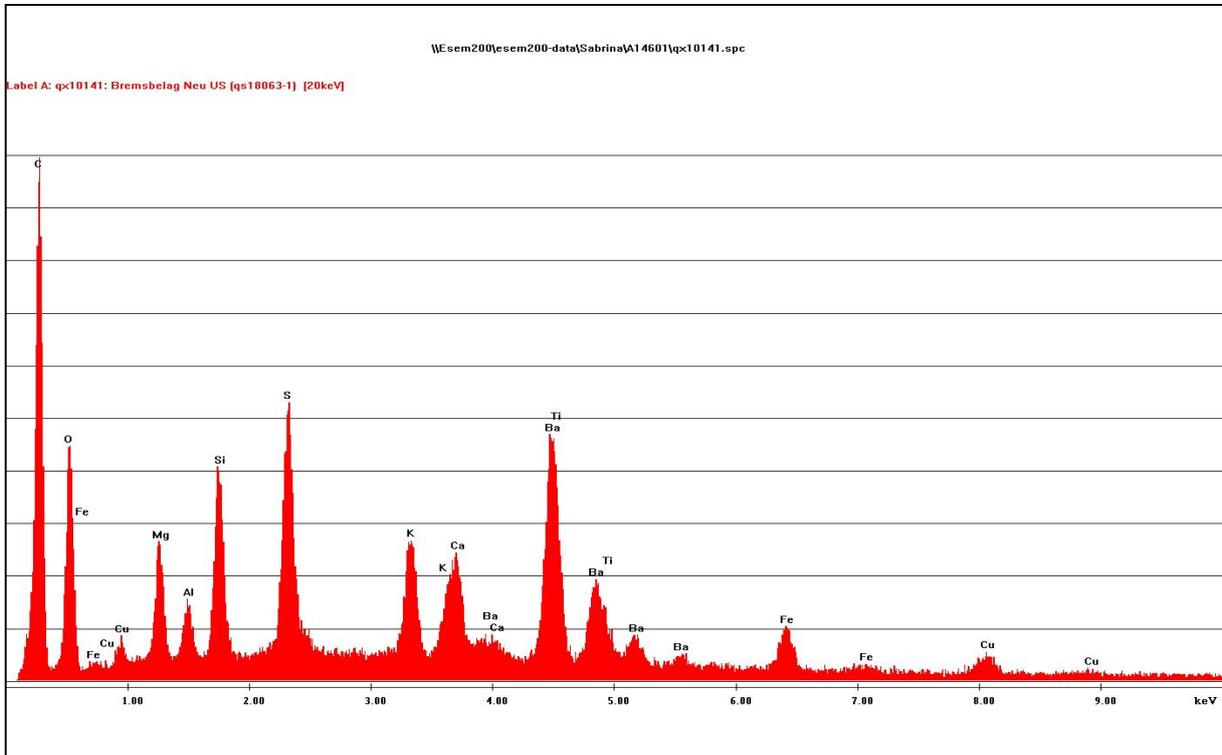


EDX- Analyse qx9911 aus Abbildung qs17873 Zone 2

A14601: Bremsbelag NEU

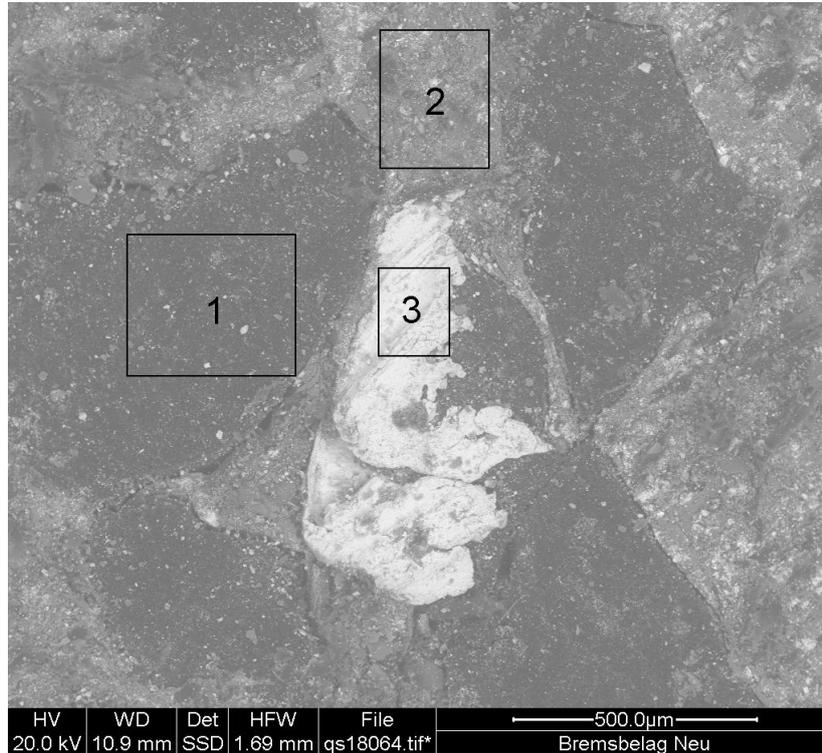


RE- Abbildung qs18063
 Analyse: qx10141

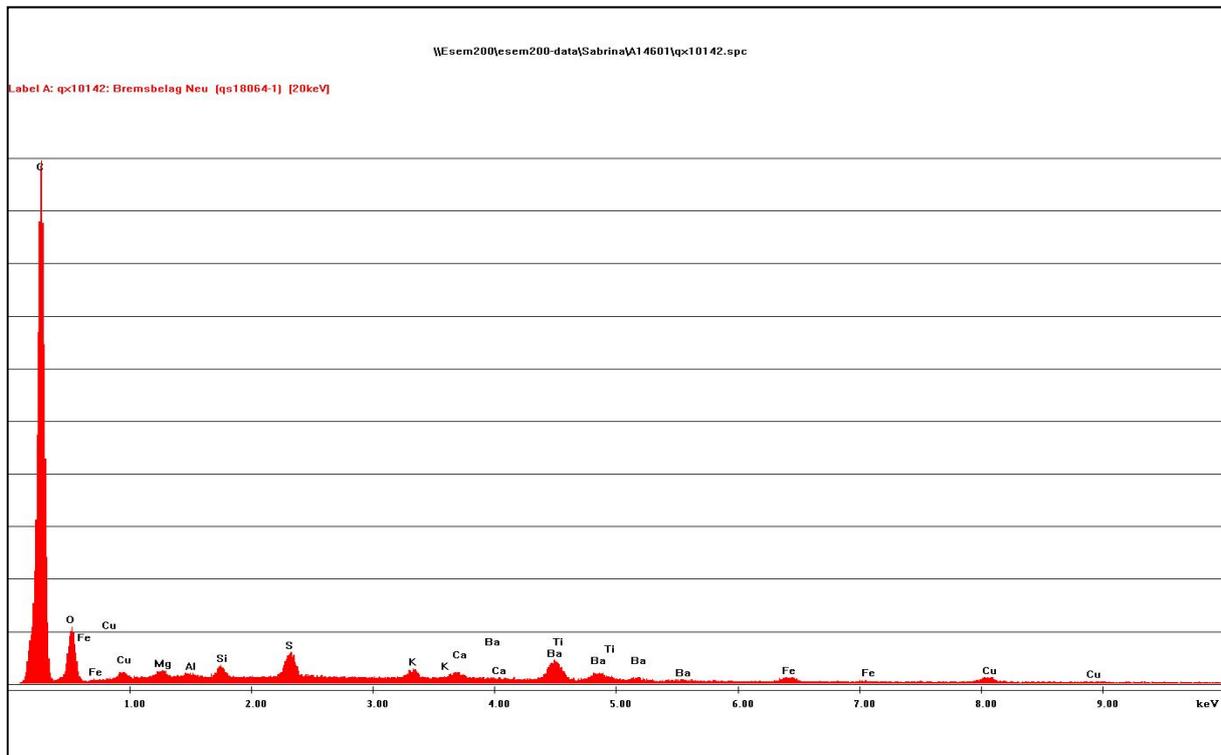


EDX- Analyse qx10141 aus Abbildung qs18063 Zone 1

A14601: Bremsbelag NEU

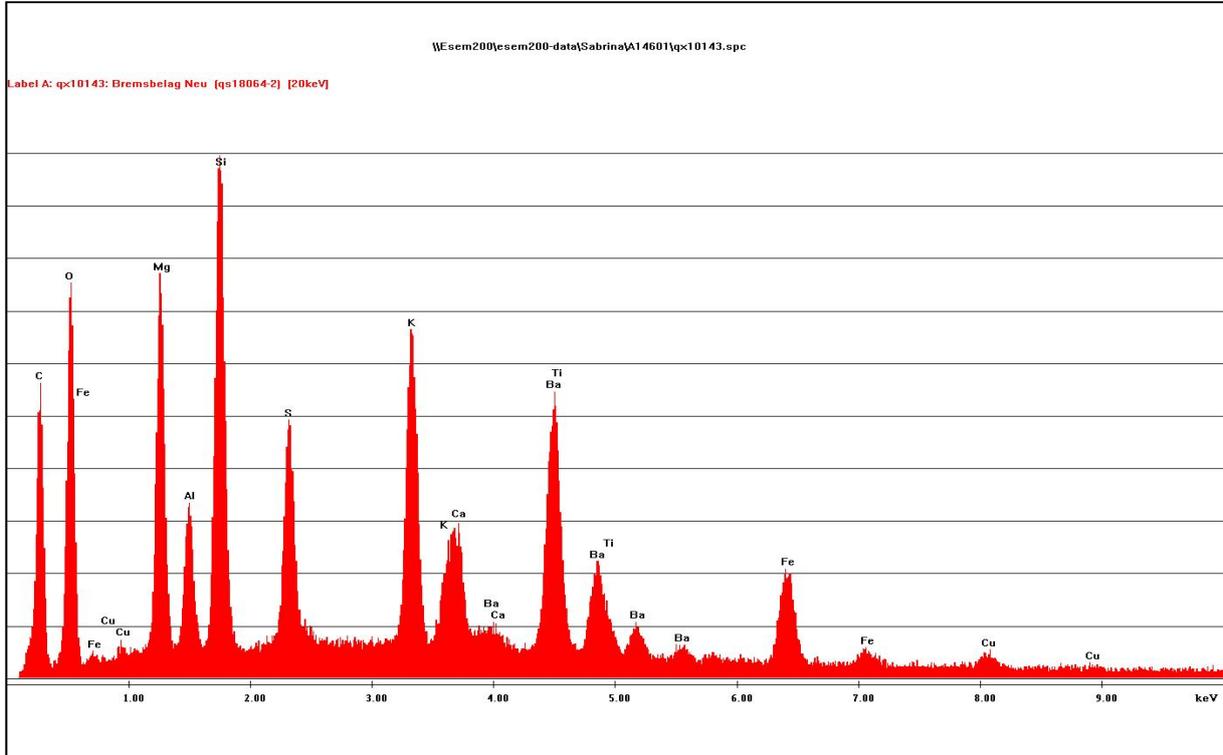


RE- Abbildung qs18064
 Analysen: qx10142 – qx10144

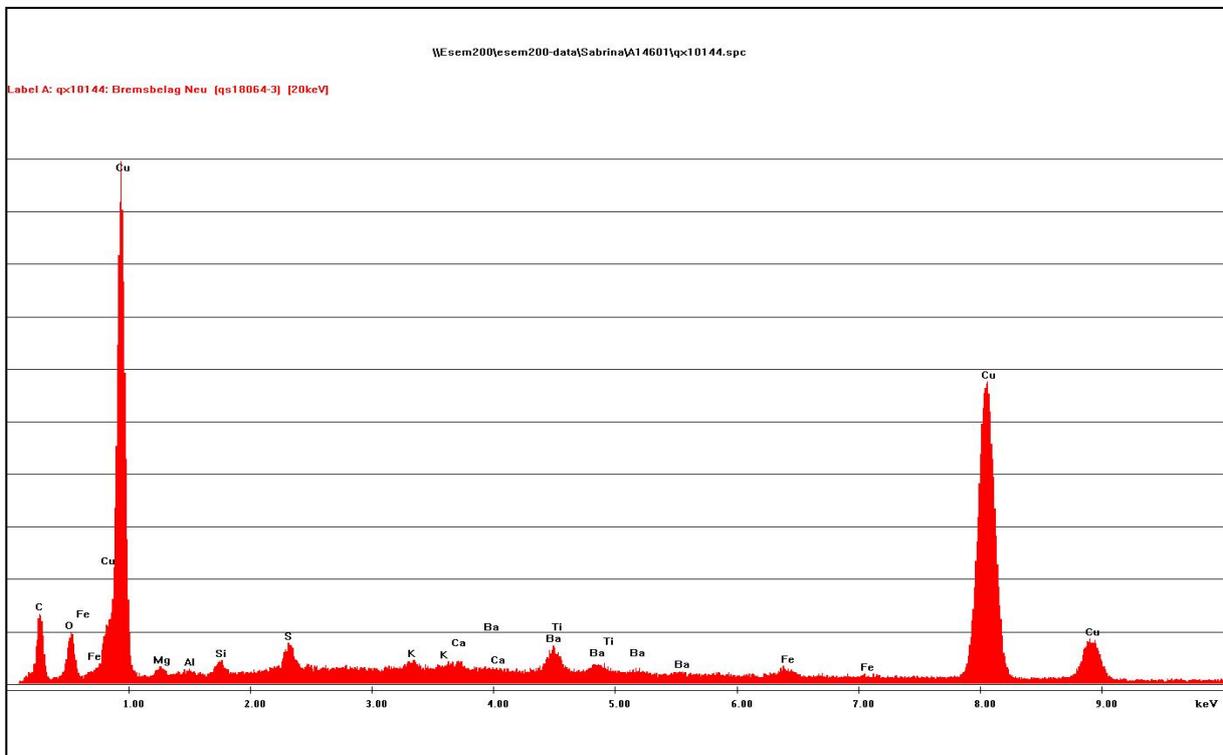


EDX- Analyse qx10142 aus Abbildung qs18064 Zone 1

A14601: Bremsbelag NEU

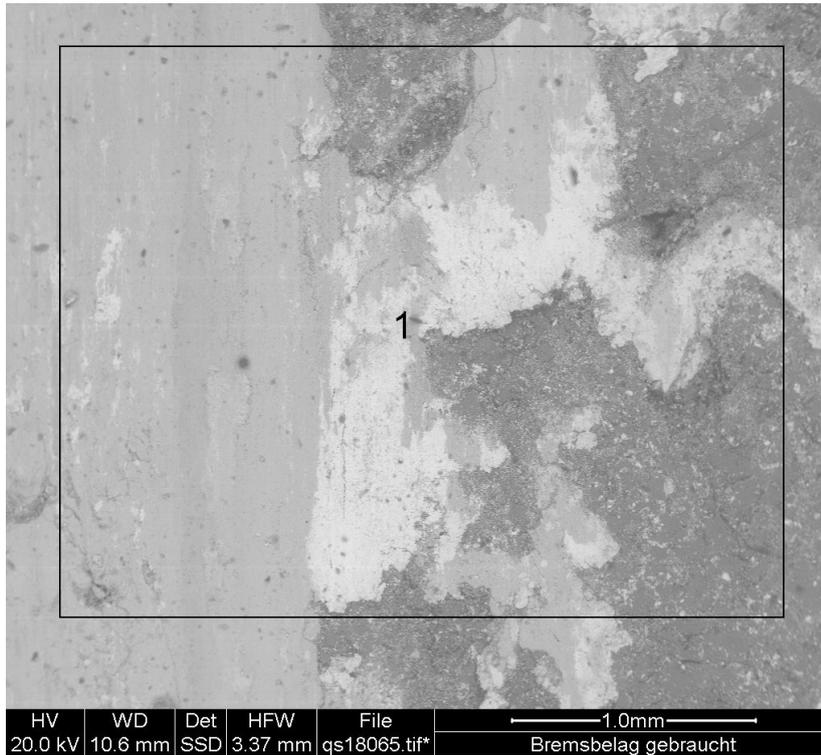


EDX- Analyse qx10143 aus Abbildung qs18064 Zone 2

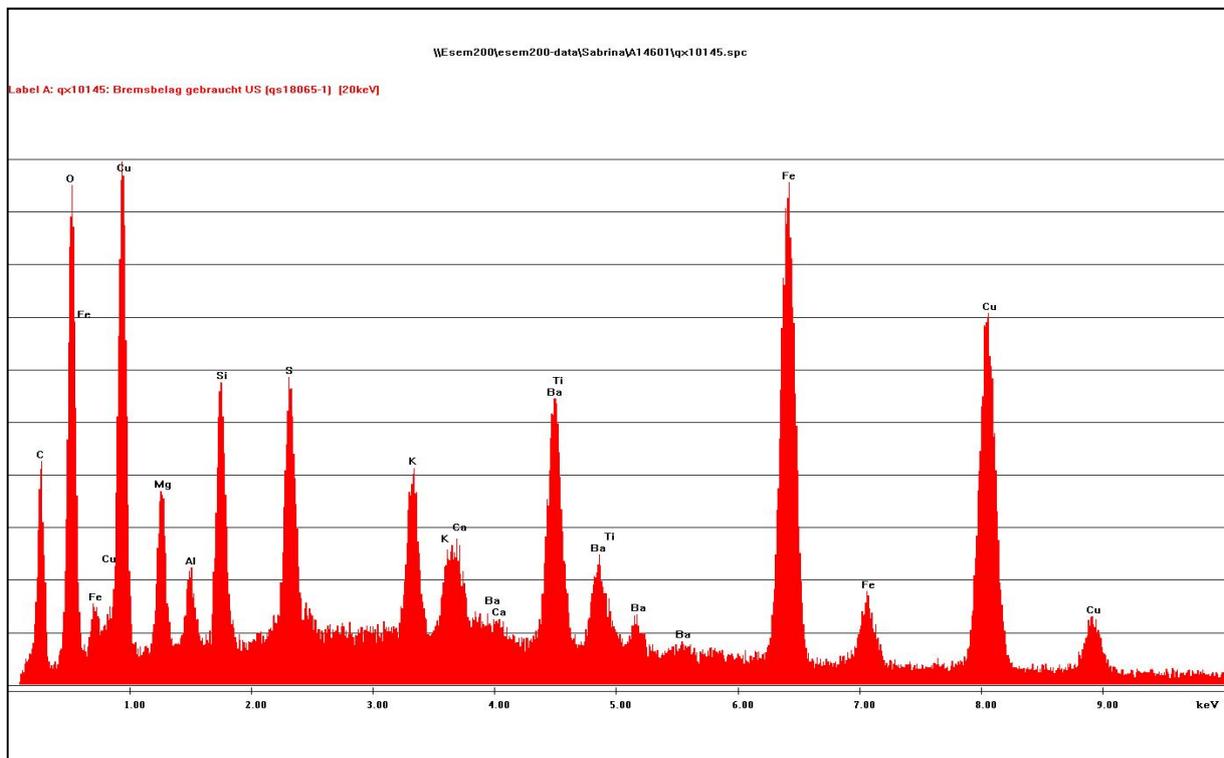


EDX- Analyse qx10144 aus Abbildung qs18064 Zone 3

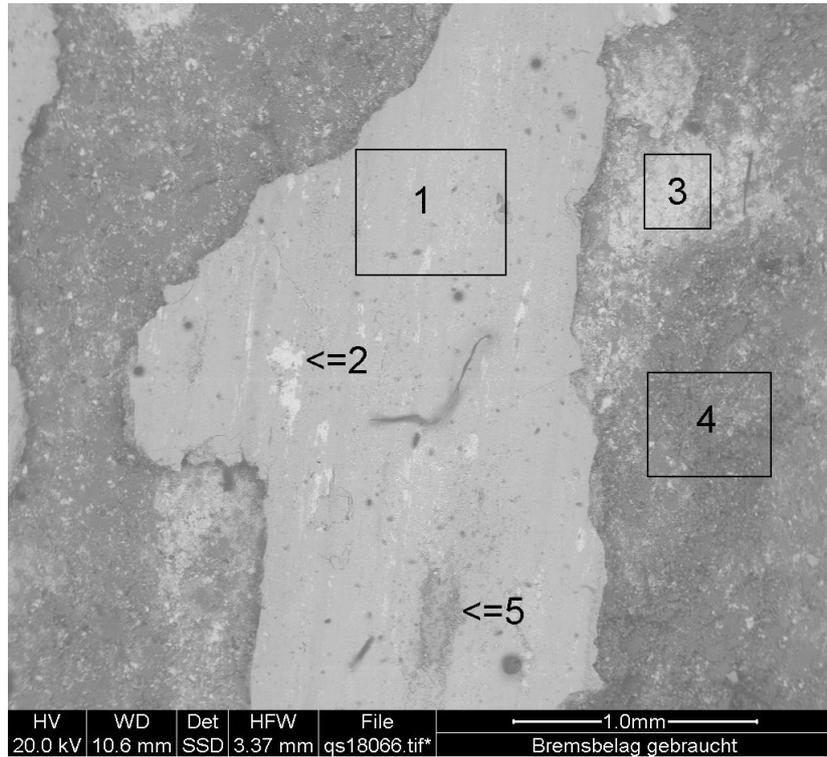
A14601: Bremsbelag gebraucht



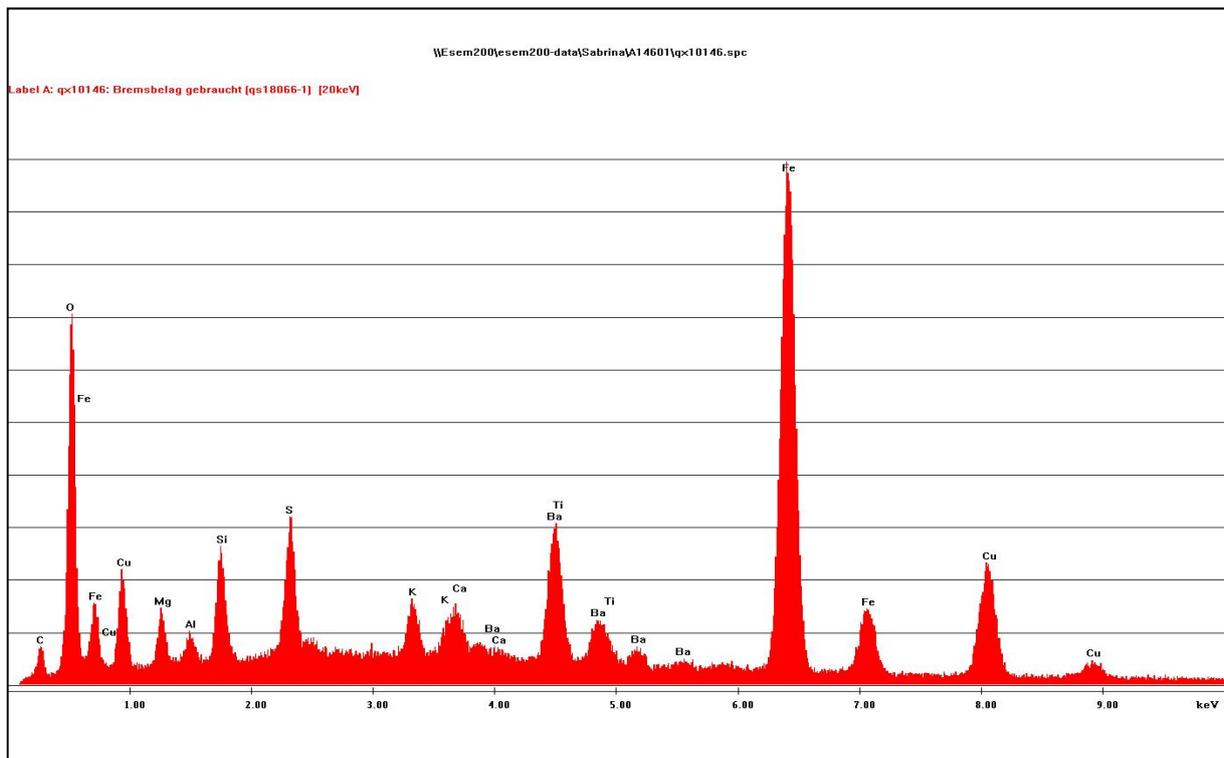
RE- Abbildung qs18065
 Analyse: qx10145



A14601: Bremsbelag gebraucht

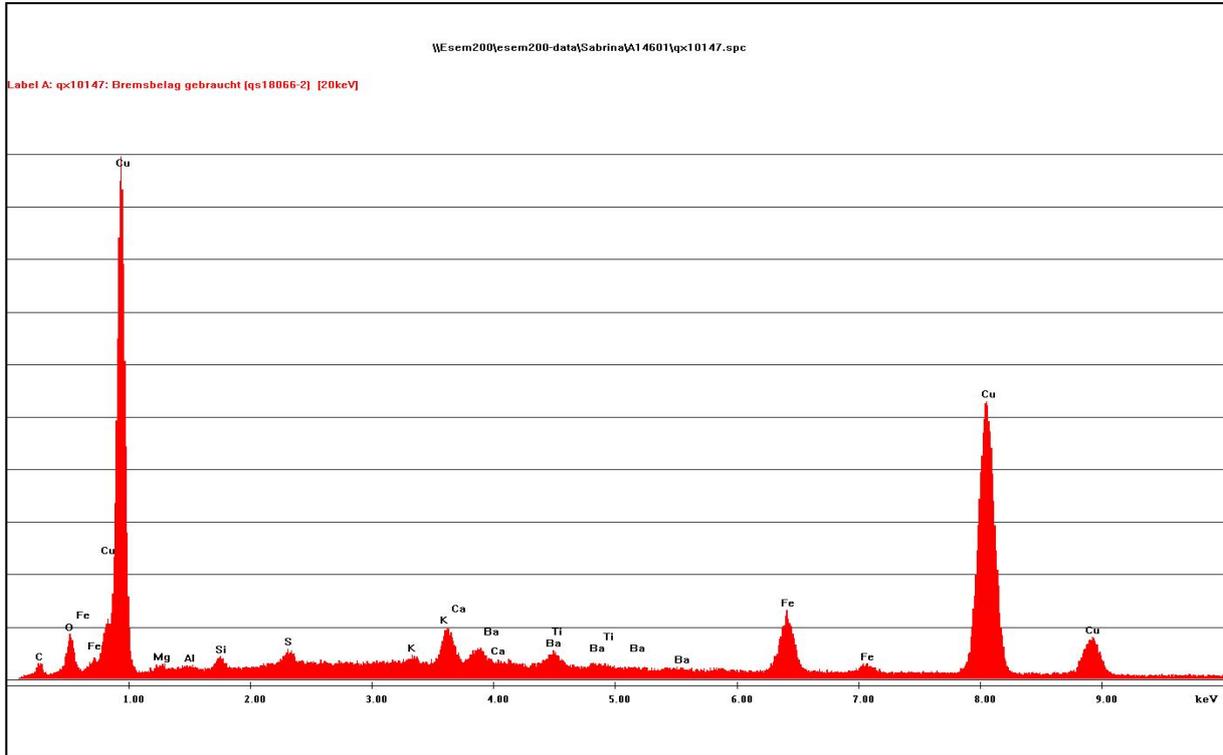


RE- Abbildung qs18066
 Analysen: qx10146 – qx10150

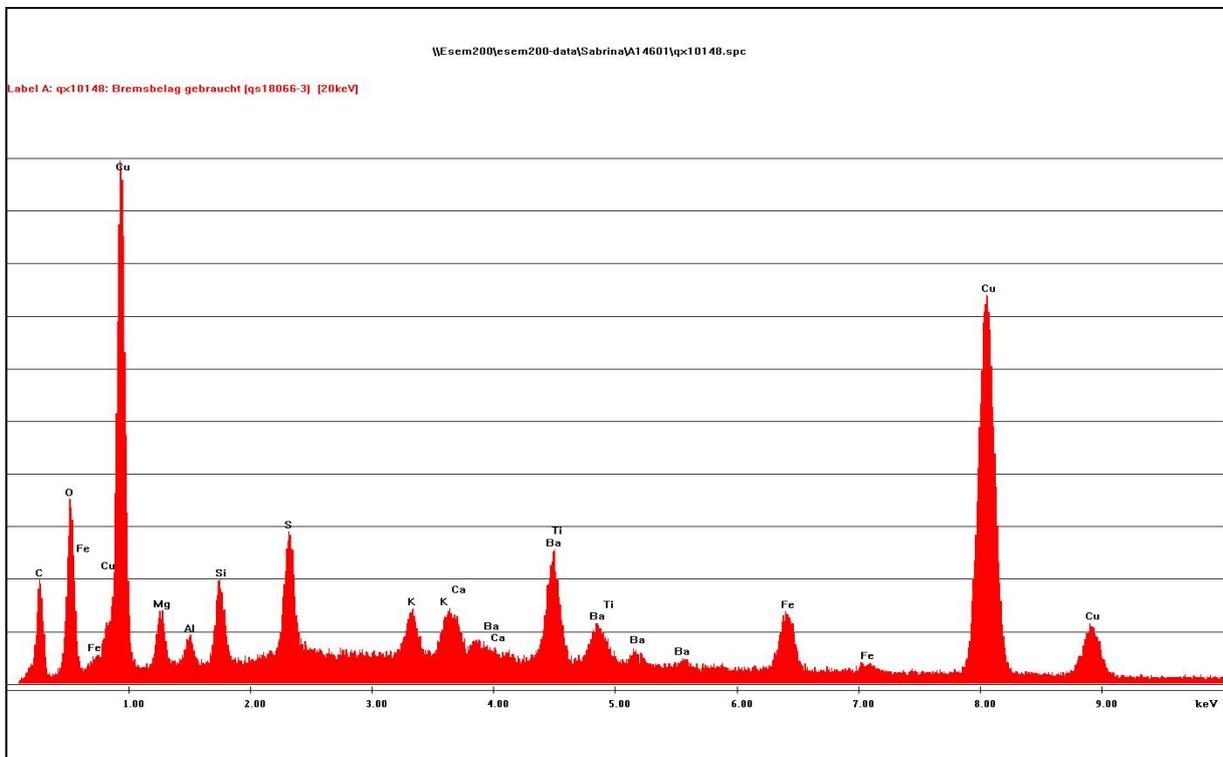


EDX- Analyse qx10146 aus Abbildung qs18066 Zone 1

A14601: Bremsbelag gebraucht

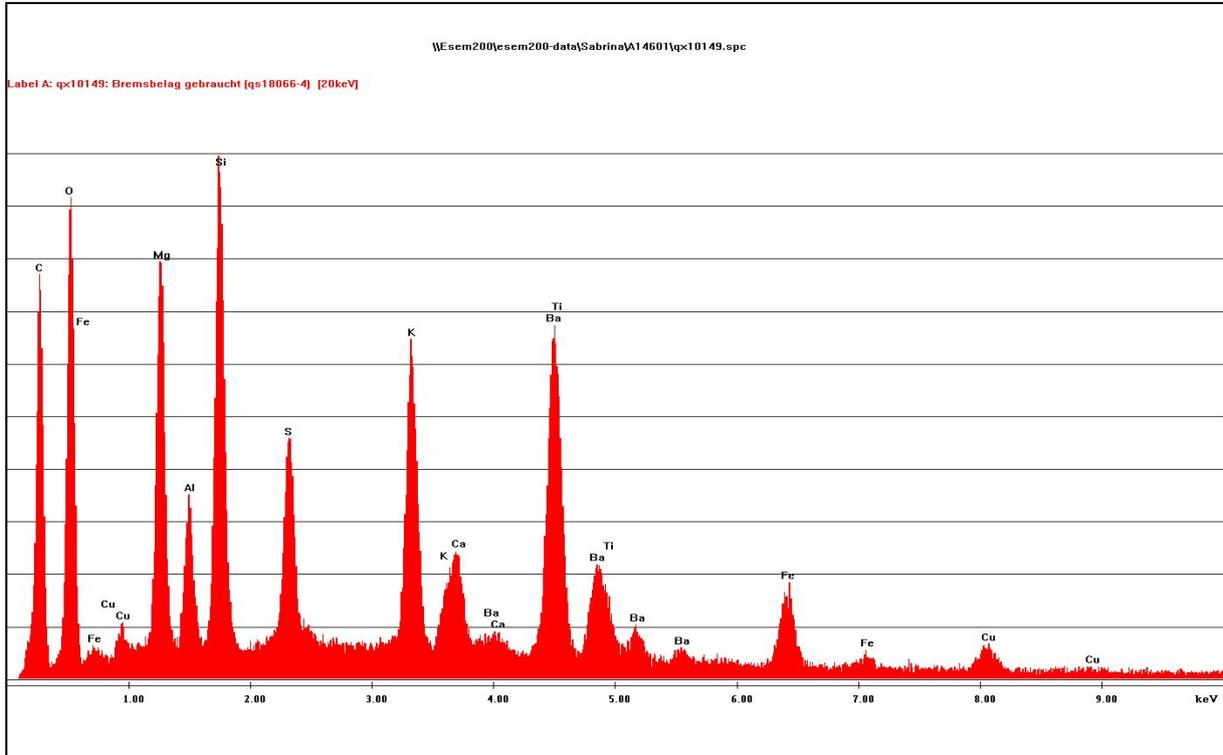


EDX- Analyse qx10147 aus Abbildung qs18066 Zone 2

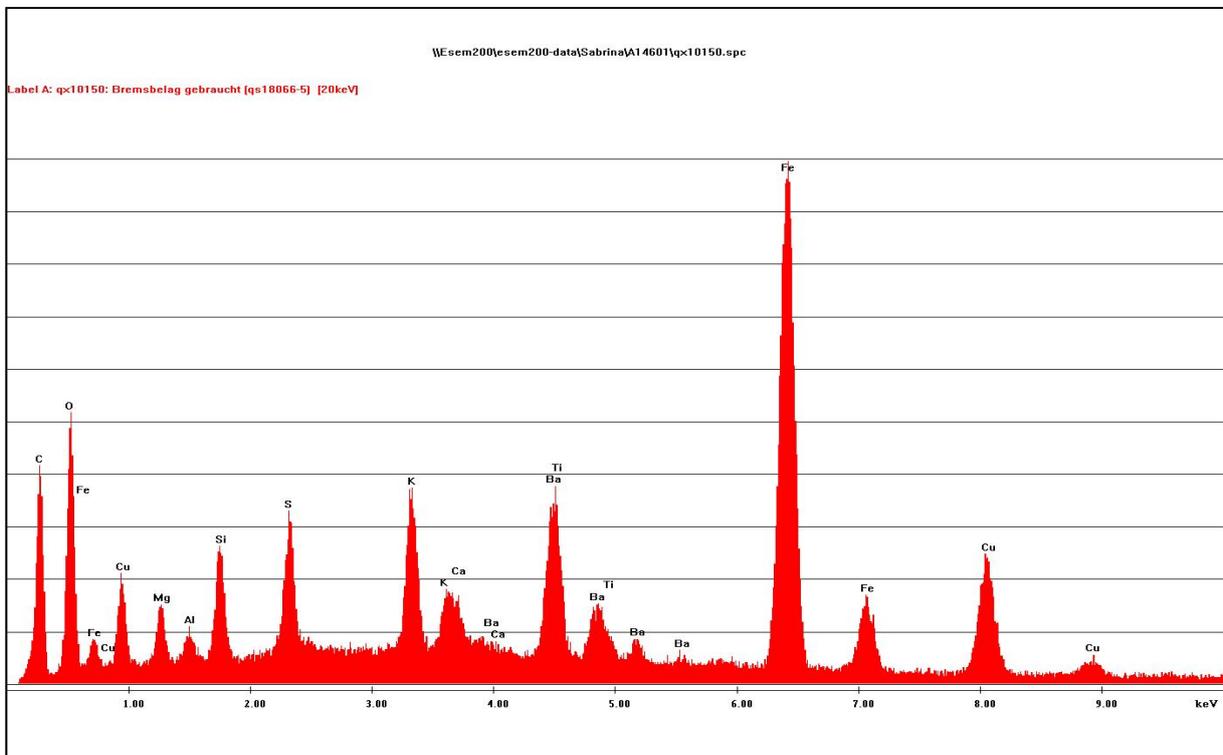


EDX- Analyse qx10148 aus Abbildung qs18066 Zone 3

A14601: Bremsbelag gebraucht

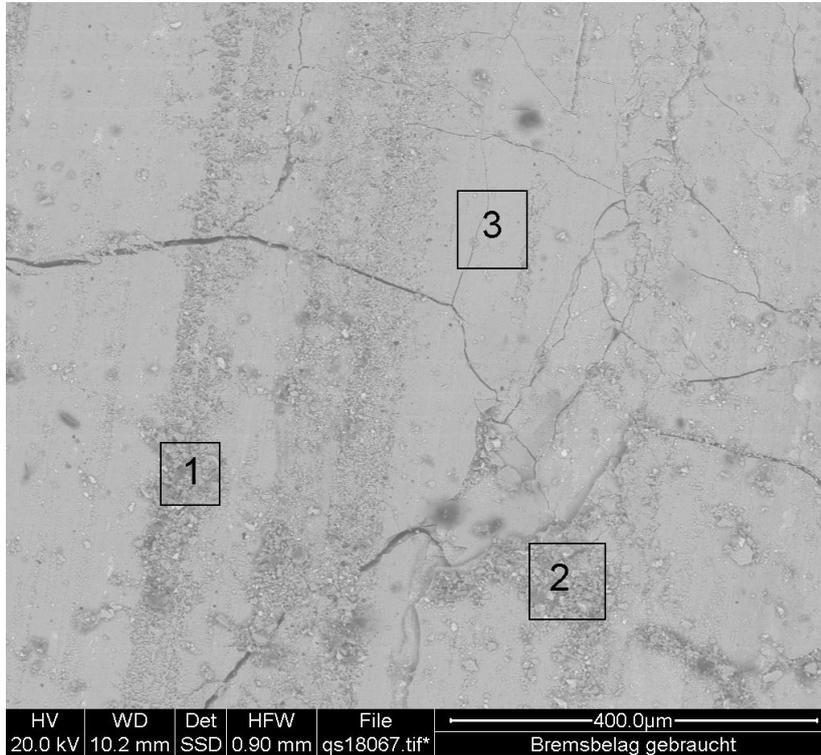


EDX- Analyse qx10149 aus Abbildung qs18066 Zone 4

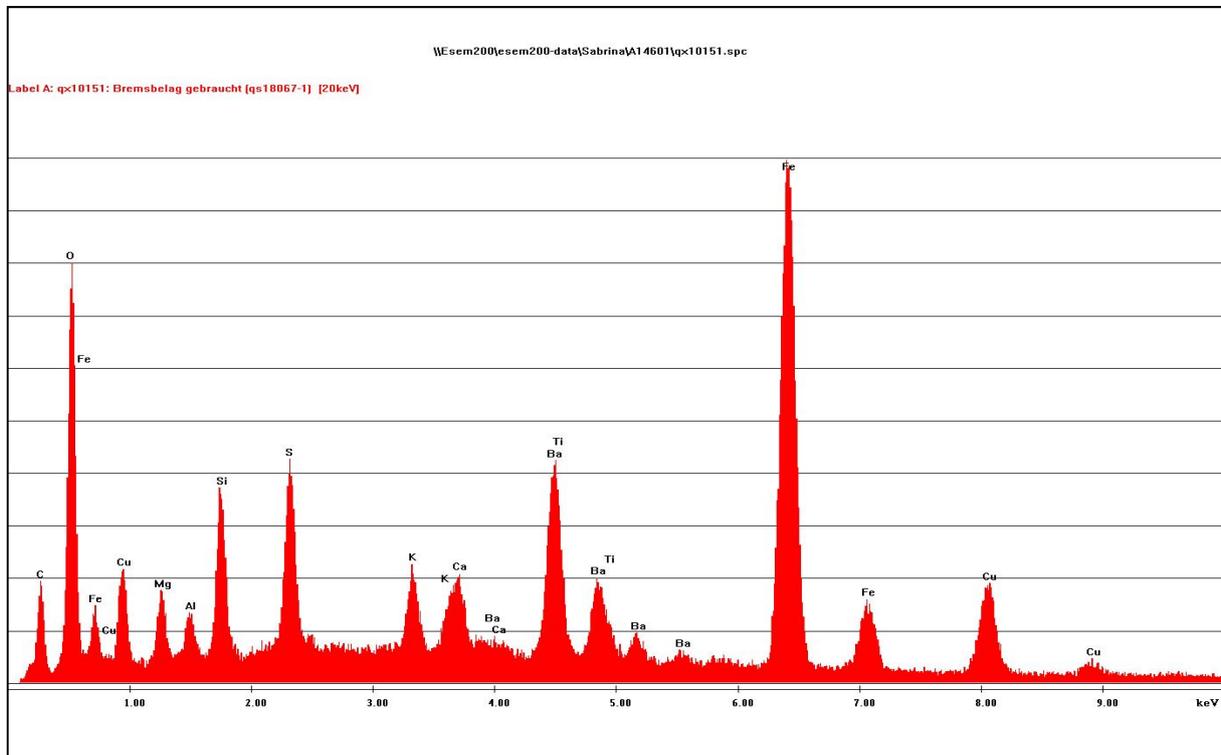


EDX- Analyse qx10150 aus Abbildung qs18066 Zone 5

A14601: Bremsbelag gebraucht

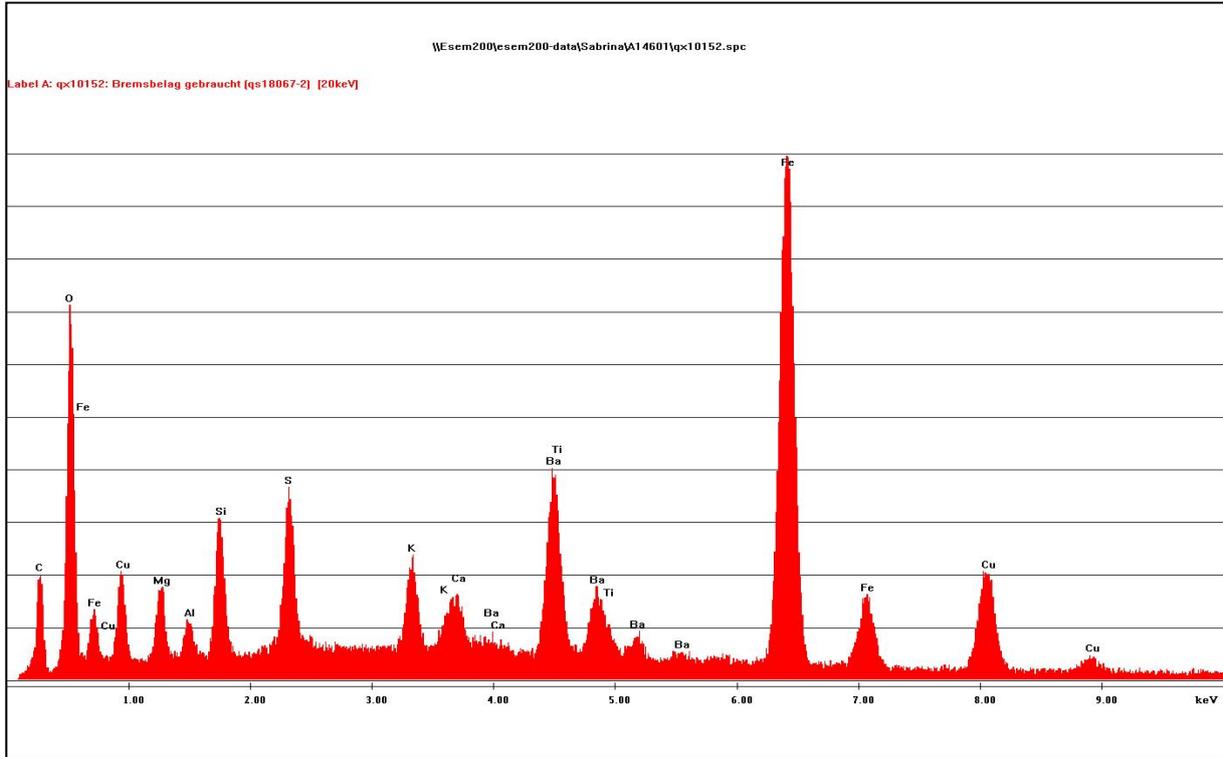


RE- Abbildung qs18067
 Analysen: qx10151 – qx10153

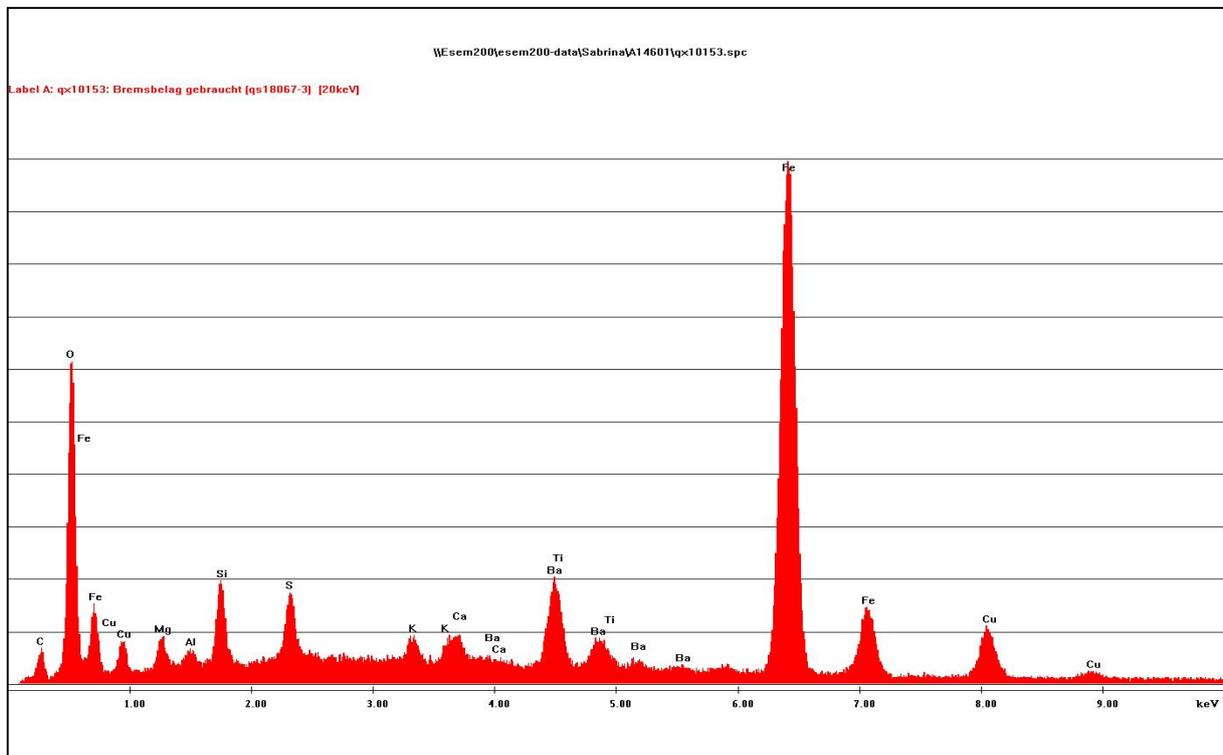


EDX- Analyse qx10151 aus Abbildung qs18067 Zone 1

A14601: Bremsbelag gebraucht



EDX- Analyse qx10152 aus Abbildung qs18067 Zone 2



EDX- Analyse qx10153 aus Abbildung qs18067 Zone 3