

„Entwicklung von  
Sanierungsverfahren für  
asbest- bzw. PAK-haltige  
Oberflächenversiegelungen und  
Anstriche“

Zwischenbericht zum Abschluss der  
Laborphase

Aachen, den 31.10.2008

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	II
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1 Einleitung .....	1
1.1 Ziel .....	1
1.2 Vorgehensweise .....	1
2 Bewertungsverfahren .....	3
3 Substanzen und Lösetechniken .....	8
3.1 Substanzen .....	8
3.2 Lösetechniken .....	10
4 Versuchsaufbau .....	12
4.1 Versuchsstand .....	12
4.1.1 Dichtigkeit .....	12
4.1.2 Größe des Versuchsstandes .....	13
4.1.3 Anschlüsse .....	14
4.1.4 Messstrecke .....	15
4.2 Geräte .....	17
4.2.1 Unterdruckhaltung .....	17
4.2.2 Unterdrucküberwachung .....	18
4.2.3 Luftprobenahmegerät .....	19
4.2.4 Partikelzählgerät .....	19
4.2.5 Abwasserfilteranlage .....	21
4.2.6 Messgeräte zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit .....	22
5 Versuchsdurchführung .....	23
5.1 Verfahrensüberprüfung .....	23
5.1.1 Aufbau und Durchführung .....	23
5.1.2 Ergebnis .....	24
5.1.3 Fazit .....	25
5.2 Versuchsreihen zur Kalibrierung des Versuchsstandes .....	25

---

5.2.1	Bestimmung der Grundbelastungen.....	25
5.2.2	Versuche zur Bestimmung der Reinigungsleistung.....	26
5.2.2.1	Reinigung durch Luftwechsel .....	26
5.2.2.2	Reinigung durch Ausspülen mit Wasser .....	28
5.2.3	Sonstige Kalibrierungs- und Handlingsversuche.....	29
5.3	Hauptversuchsreihen .....	30
5.3.1	Aufbau.....	31
5.3.2	Durchführung .....	32
5.3.3	Ergebnis.....	32
6	Fazit.....	36
7	Zusammenfassung.....	45
Anhang	.....	A I

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsstand mit im Hintergrund erkennbarer Messstrecke und  
Unterdruckhaltung ..... 14

Abbildung 2: Prinzipskizze der Messstrecke..... 15

Abbildung 3: Isokinetik..... 16

Abbildung 4: Prinzip des Unterdruckhaltegeräts..... 18

Abbildung 5: Unterdrucküberwachungsgerät..... 18

Abbildung 6: Messprinzip TSI 8260 ..... 20

Abbildung 7: Abwasserfilteranlage mit dreistufiger Filtereinheit..... 21

Abbildung 8: Ergebnis der Sandsteinbearbeitung..... 24

Abbildung 9: Bestimmung der Reinigungsleistung durch Luftwechsel..... 28

Abbildung 10: Teil eines Schleusentors mit asbest- und PAK-haltigen Anstrichen... 31

Abbildung 11: Zählergebnisse des TSI 8260 für die Versuchsreihe 5.2 ..... 35

Abbildung 12: KPF-Ergebnisse der Hauptversuchsreihen..... 44

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitplan vom 01.05.2007 bis 31.05.2008 .....	2
Tabelle 2: Zeitplan vom 01.02.2008 bis 31.10.2008 .....	2
Tabelle 3: Zeitplan vom 01.11.2008 bis 30.04.2010 .....	2
Tabelle 4: Wichtungsfaktoren der Einzelkriterien.....	3
Tabelle 5: Ursprüngliche Bewertungsmatrix für die Paste .....	4
Tabelle 6: Überarbeitete Matrix zur Bewertung der Pasten .....	5
Tabelle 7: Ursprüngliche Matrix zur Bewertung des Gesamtverfahrens.....	6
Tabelle 8: Neu entwickelte Matrix zur Bewertung des Gesamtverfahrens.....	7
Tabelle 9: Teilweise ausgefüllte Matrix zur Pastenbewertung vor Versuchsbeginn....	9
Tabelle 10: Eingesetzte Pasten und die vor Versuchsbeginn abschätzbaren pos. Eigenschaften .....	10
Tabelle 11: Kalibrierung der Isokinetik.....	16
Tabelle 12: Zählergebnisse des TSI 8260 .....	24
Tabelle 13: Versuchsreihe zur Bestimmung der Reinigungsleistung.....	27
Tabelle 14: REM-Ergebnisse der Versuchsreihe 5.2 (Nadelpistole).....	33
Tabelle 15: Relative Reduzierung der Partikelanzahl beim Einsatz von Haargel (TSI 8260) .....	38
Tabelle 16: Relative Reduzierung der Partikelanzahl beim Einsatz von Handcreme (TSI 8260) .....	38
Tabelle 17: Relative Reduzierung der Partikelanzahl beim Einsatz von Mehrzweckfett (TSI 8260) .....	39
Tabelle 18: Ausgefüllte Matrix zur Pastenbewertung.....	40
Tabelle 19: Ergebnisse der Bewertungsmatrix für das Gesamtverfahren.....	41

## Abkürzungsverzeichnis

AD	Auftragsdicke der Paste
FBK	Forschungsbegleitkreis
FI	F = Fehler, I = Zeichen für elektrischen Strom
HVBG	Hauptverband der Berufsgenossenschaften
KPF	Kernporenfilter
MM	Multimaster
N	Nadelpistole
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
REM	Rasterelektronenmikroskopie

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel

Ziel des Forschungsvorhabens soll die Entwicklung eines Verfahrens zur einfachen und kostengünstigen, aber dennoch sicheren mechanischen Ablösung von asbest- bzw. PAK-haltigen Oberflächenversiegelungen sein. Dies soll allein durch den Einsatz von handelsüblichen Werkzeugen und Substanzen geschehen.

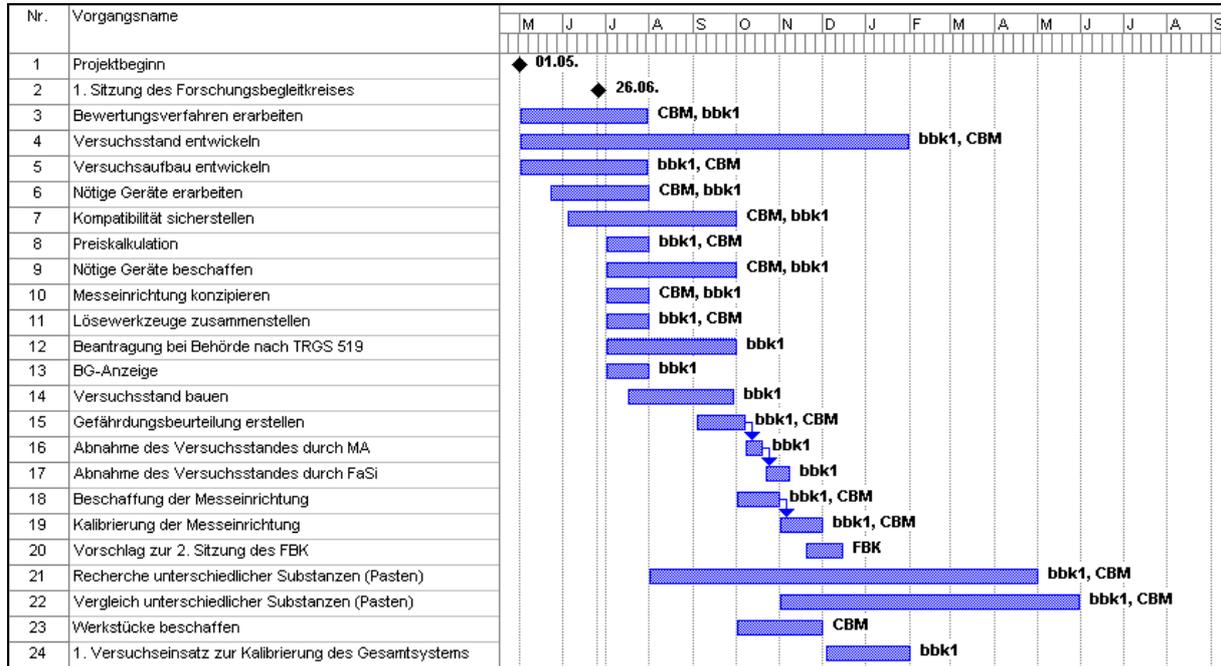
## 1.2 Vorgehensweise

Das Projekt „Entwicklung von Sanierungsverfahren für asbest- bzw. PAK-haltige Oberflächenversiegelungen und Anstriche“ wurde im Januar 2007 vom Institut für Bergbaukunde I (RWTH Aachen University) unter Mitarbeit der Firma CBM GmbH beim Hauptverband der Berufsgenossenschaften (HVBG) beantragt. Der Vertrag zwischen dem HVBG und der RWTH Aachen University kam daraufhin im April 2007 zu Stande.

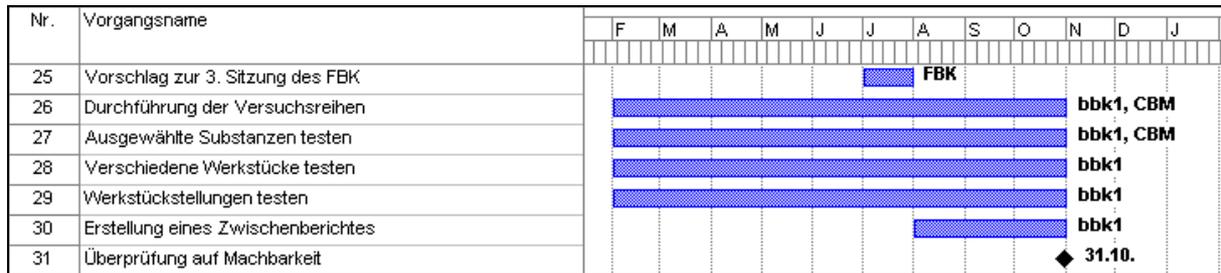
Das Projekt ist in zwei Phasen mit einer Dauer von jeweils 18 Monaten untergliedert. Die erste Phase (Laborphase) hat am 01.05.2007 begonnen und endet am 31.10.2008. Werden die Ergebnisse der Laborphase als zufriedenstellend bewertet, ist eine Weiterarbeit in der zweiten Phase (Feldversuchsphase) geplant. Diese beginnt am 01.11.2008 und endet am 30.04.2010.

Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 stellen den geplanten Projektverlauf dar.

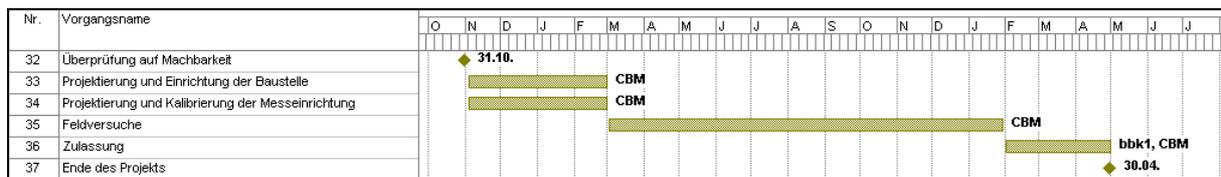
**Tabelle 1: Zeitplan vom 01.05.2007 bis 31.05.2008**



**Tabelle 2: Zeitplan vom 01.02.2008 bis 31.10.2008**



**Tabelle 3: Zeitplan vom 01.11.2008 bis 30.04.2010 (Feldversuchsphase)**



## 2 Bewertungsverfahren

Das im Antrag festgelegte Arbeitspaket 1 sieht die Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für die Paste und das Gesamtverfahren vor. Das Bewertungsverfahren dient als Instrument, um den Erfüllungsgrad der Anforderungen dokumentieren, vergleichen und beurteilen zu können.

Als Bewertungsgrundlage für die Paste wurden verschiedene Kriterien und Wichtungsfaktoren (Tabelle 4) sowie eine Matrix (Tabelle 5) entwickelt. Der Beurteilungswert der jeweiligen Paste wird mit Hilfe von folgender Formel berechnet:

$$\text{Beurteilungswert}_{\text{Paste}} = \sum_{1-10} (\text{Wichtung}_{\text{Kriterium}} \times \text{Faktor}_{\text{Kriterium}}) \quad (\text{Formel 1})$$

**Tabelle 4: Wichtungsfaktoren der Einzelkriterien**

Kriterium	Wichtung
günstig im Einkauf	0,04
einfache Transportmöglichkeit	0,04
einfache Handhabung bei der Benutzung	0,08
schadstofffrei / -arm	0,12
nicht gesundheitsschädigend	0,12
gute Bindeeigenschaften gegenüber Asbest und PAK	0,20
mechanisch gut vom Untergrund lösbar	0,12
chemische Stabilität	0,08
günstige und einfache Entsorgungsmöglichkeit	0,08
umweltfreundlich	0,12

**Tabelle 5: Ursprüngliche Bewertungsmatrix für die Paste**

<b>Faktor</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>4,0</b>	<b>5,0</b>
<b>günstig im Einkauf</b>	sehr günstig	günstig	ungünstig	teuer	sehr teuer
<b>einfache Transportmöglichkeit</b>	keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, handliche Gebinde	geringe Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, handliche Gebinde	Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, noch handhabbare Gebinde	Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, unhandliche Gebinde	großer Aufwand zum Treffen von Vorsichtsmaßnahmen, unhandliche Gebinde
<b>einfache Handhabung bei der Benutzung</b>	einfaches Auftragen möglich, stabile Konsistenz	kompliziertes Auftragen, stabile Konsistenz	sehr kompliziertes Auftragen, stabile Konsistenz	sehr kompliziertes Auftragen, leicht instabile Konsistenz	sehr kompliziertes Auftragen, instabile Konsistenz
<b>schadstofffrei / -arm</b>	keine Schadstoffe	geringfügige Menge an Schadstoffen, keine zu erwartende Gefährdung	geringfügige Menge an Schadstoffen, geringe zu erwartende Gefährdung	große Menge an Schadstoffen, Gefährdung vorhanden	große Menge an Schadstoffen, große Gefährdung vorhanden
<b>nicht gesundheitsschädigend</b>	nicht gesundheitsschädigend	geringfügige Gesundheitsschäden bei sehr langer Dauer	geringfügige Gesundheitsschäden bei mittellanger Dauer	große Gesundheitsschäden bei mittellanger Dauer	große Gesundheitsschäden bei kurzer Dauer
<b>gute Bindeeigenschaften gegenüber Asbest und PAK</b>	≥ 95%	≥ 80%	≥ 65%	≥ 50%	< 50%
<b>mechanisch gut vom Untergrund lösbar</b>	geringer Kraftaufwand zum Ablösen, Reste verbleiben kaum, keine Spritzer	Kraftaufwand zum Ablösen, Reste verbleiben kaum, kaum Spritzer	Kraftaufwand zum Ablösen, Reste verbleiben, Spritzer	Kraftaufwand zum Ablösen, viele Reste verbleiben, Spritzer	großer Kraftaufwand zum Ablösen, viele Reste verbleiben, viele Spritzer
<b>chemische Stabilität</b>	chemisch stabil	bei extremen Klimabedingungen oder Kontakt mit selten benutzten Stoffen instabil	bei extremen Klimabedingungen oder Kontakt mit anderen Stoffen instabil	bei normalen Klimabedingungen oder Kontakt mit häufig benutzten Stoffen instabil	bei normalen Klimabedingungen und Kontakt mit häufig benutzten Stoffen instabil
<b>günstige und einfache Entsorgungsmöglichkeit</b>	günstig und einfach zu entsorgen				teure und schwierige Entsorgung
<b>umweltfreundlich</b>	keine Gefährdung der Umwelt	geringfügige Gefährdung der Umwelt unter schlechtesten Bedingungen möglich	Gefährdung der Umwelt unter schlechtesten Bedingungen möglich	Gefährdung der Umwelt möglich	große Gefährdung der Umwelt wahrscheinlich

Nach Diskussion mit dem Forschungsbegleitkreis (FBK) wurde eine Vereinfachung der Matrix beschlossen. Hierzu wurden die Faktoren von vorher fünf auf eine Anzahl von drei reduziert. Außerdem wurden einige der Kriterien nochmals überarbeitet und die Matrix wurde um mehrere Kriterien ergänzt.

**Tabelle 6: Überarbeitete Matrix zur Bewertung der Pasten**

<b>Faktor</b> <b>Kriterium</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>Wichtung</b>
<b>Kosten pro Fläche</b>	< 20 € / m <sup>2</sup>	20 - 40 € / m <sup>2</sup>	> 40 € / m <sup>2</sup>	0,04
<b>einfache Transportmöglichkeit</b>	keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, handliche Gebinde	geringe Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, handliche Gebinde	großer Aufwand zum Treffen von Vorsichtsmaßnahmen, unhandliche Gebinde	0,04
<b>einfache Handhabung bei der Benutzung</b>	einfaches Auftragen möglich, stabile Konsistenz	kompliziertes Auftragen oder instabile Konsistenz	kompliziertes Auftragen und instabile Konsistenz; und/oder komplizierte Anwendung	0,10
<b>gute Bindeeigenschaften gegenüber Asbest und PAK<sup>1</sup></b>	≥ 80%	≥ 60%	< 60 %	0,22
<b>mechanisch gut vom Untergrund lösbar</b>	geringer Kraftaufwand zum Ablösen, Reste verbleiben kaum, kaum Spritzer	mäßiger Kraftaufwand zum Ablösen, Reste verbleiben, einige Spritzer	großer Kraftaufwand zum Ablösen, viele Reste verbleiben, viele Spritzer	0,08
<b>gesundheitliche Unbedenklichkeit<sup>2</sup></b>	nicht gesundheitsschädigend, keine Schadstoffe	Gesundheitsschäden möglich bzw. geringfügiger Anteil an Schadstoffen	Gesundheitsschäden wahrscheinlich bzw. großer Schadstoffanteil	0,22
<b>Entsorgungsaufwand<sup>3</sup></b>	Entsorgung ohne Auflagen	Entsorgung mit Entsorgungsnachweis	aufwändige Entsorgung mit Entsorgungsnachweis	0,06
<b>Umweltneutralität<sup>4</sup></b>	keine Gefährdung der Umwelt	Gefährdung der Umwelt möglich	Gefährdung der Umwelt	0,12
<b>allgemeine Reinigungsfähigkeit</b>	keine Nachreinigung notwendig	Nachreinigung erforderlich	aufwändige Nachreinigung notwendig	0,06
<b>thermische Stabilität<sup>5</sup></b>	> 25° C im Bereich 0 - 40° C	≥ 20° C - 25° C im Bereich 0 - 40° C	< 20° C im Bereich 0 - 40° C	0,06

<sup>1</sup> bezogen auf die Emissionen, die durch die Bearbeitung ohne Paste verursacht werden

<sup>2</sup> Die „gesundheitliche Unbedenklichkeit“ bezieht sich auf die noch unbenutzte Paste und auf die vom Hersteller angegebenen Nutzungshinweise.

<sup>3</sup> Der „Entsorgungsaufwand“ ist ebenfalls auf die unbenutzte Paste bezogen. Vergrößert diese den zu besorgenden Entsorgungsaufwand, wird die Paste je nach Ausmaß mit 2 oder 3 bewertet.

<sup>4</sup> Der Punkt „Umweltneutralität“ bezieht sich auf mögliche Gefährdungen durch Pastenverunreinigungen (ohne Asbest- oder PAK-Belastungen) für die Umwelt.

<sup>5</sup> Die „thermische Stabilität“ gibt an, ob die verwendete Substanz in ihren Eigenschaften durch Temperaturschwankungen im Bereich von 0 bis 40 °C für das Verfahren negativ verändert wird. Beispielsweise könnte sich eine Veränderung der Viskosität einstellen, die sich negativ auf das Handling auswirkt.

Einige geringfügige Änderungen wurden aufgrund der während der Versuchsreihen erarbeiteten Daten zusätzlich vorgenommen. Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist in Tabelle 6 dargestellt.

Diese Vorgehensweise wurde auch zur Entwicklung einer Bewertungsmatrix für das Gesamtverfahren gewählt. Diese ist in Tabelle 7 dargestellt. Während der Versuche hat sich diese jedoch als nicht praktikabel herausgestellt und wurde deshalb ebenfalls nochmals überarbeitet (Tabelle 8).

**Tabelle 7: Ursprüngliche Matrix zur Bewertung des Gesamtverfahrens**

<b>Kriterium</b> \ <b>Faktor</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>Wichtung</b>
<b>Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen</b>				
- Regen	resistent	bei leichten Niederschlägen resistent	nicht resistent	0,04
- Temperaturbereich	0 - 40°C	30°C aus diesem Bereich	weniger	0,08
<b>Untergrund</b>	Metallplatten, Bleche, Baustoffe	zwei von drei Untergründen	weniger als zwei	0,12
<b>Werkzeug</b>	Nadler und Multi Master	Nadler oder Multi Master	weder noch	0,08
<b>Oberflächenstruktur</b>				
- glatte Oberfläche	Lösevorgang ohne Rückstände	Lösevorgang mit wenigen Rückständen	Lösevorgang mit vielen Rückständen	0,08
- kantige Oberfläche	Lösevorgang ohne Rückstände	Lösevorgang mit wenigen Rückständen	Lösevorgang mit vielen Rückständen	0,08
- unebene Oberfläche	Lösevorgang ohne Rückstände	Lösevorgang mit wenigen Rückständen	Lösevorgang mit vielen Rückständen	0,08
<b>Oberflächenbelag</b>	Verputz und Farbe	Verputz oder Farbe	weder noch	0,08
<b>Kosten für Personal, PSA, Qualifikation, Werkzeug, Entsorgung, Vor- und Nachbereitung</b>	< 20 € / m <sup>2</sup>	< 35 € / m <sup>2</sup>	> 35 € / m <sup>2</sup>	0,12
<b>Leistung</b>	< 20 Min. / m <sup>2</sup>	< 40 Min. / m <sup>2</sup>	> 40 Min. / m <sup>2</sup>	0,12
<b>Zusatzequipment notwendig</b>	nein	empfehlenswert	erforderlich	0,12

Im Vergleich zu der ursprünglichen wurden in der neuen Matrix während der Versuche gemachte Erfahrungen berücksichtigt. Beispielsweise hat sich herausgestellt, dass die vorgeschlagenen Leistungsangaben pro Quadratmeter Fläche zu niedrig eingeschätzt wurden. Der Punkt „Werkzeug“ wurde gestrichen, da die Bewertungen

jeweils für die Kombination Werkzeug und Paste durchgeführt wurden (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 8: Neu entwickelte Matrix zur Bewertung des Gesamtverfahrens

<b>Faktor</b> <b>Kriterium</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>Wichtung</b>
<b>Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen</b>				
- Regen	resistent	bei leichten Niederschlägen resistent	nicht resistent	0,08
- Temperaturbereich	0 - 40°C	30°C aus diesem Bereich	weniger	0,10
<b>Oberflächenstruktur</b>				
- glatte Oberfläche	Lösevorgang fast ohne Rückstände (gereinigte Fläche > 98 %)	Lösevorgang mit wenigen Rückständen (gereinigte Fläche ≥ 85 %)	Lösevorgang mit vielen Rückständen (gereinigte Fläche < 85 %)	0,10
- kantige Oberfläche	Lösevorgang fast ohne Rückstände (gereinigte Fläche > 98 %)	Lösevorgang mit wenigen Rückständen (gereinigte Fläche ≥ 85 %)	Lösevorgang mit vielen Rückständen (gereinigte Fläche < 85 %)	0,10
- unebene Oberfläche	Lösevorgang fast ohne Rückstände (gereinigte Fläche > 98 %)	Lösevorgang mit wenigen Rückständen (gereinigte Fläche ≥ 85 %)	Lösevorgang mit vielen Rückständen (gereinigte Fläche < 85 %)	0,10
<b>Kosten für PSA, Qualifikation, Werkzeug, Vor- und Nachbereitung</b>	< 10 € / m <sup>2</sup>	< 20 € / m <sup>2</sup>	> 20 € / m <sup>2</sup>	0,14
<b>Leistung</b>	< 360 Min. / m <sup>2</sup>	< 480 Min. / m <sup>2</sup>	> 480 Min. / m <sup>2</sup>	0,22
<b>Vertikale</b>	unter 90° Neigung einsetzbar	bedingt unter 90° Neigung einsetzbar	nicht unter 90° Neigung einsetzbar	0,08
<b>Zusatzequipment notwendig</b>	nein	empfehlenswert	erforderlich	0,08

Die Ergebnisse aus den Matrizen sind in Kapitel 6 (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 19) dargestellt. Vor Versuchsbeginn abschätzbare Pasteneigenschaften sind bereits in Tabelle 9 dargestellt.

## 3 Substanzen und Lösetechniken

Für die Durchführung der Versuche sollten geeignete Pasten zur Bindung der Asbestfasern und PAK-Partikel sowie praktikable Lösetechniken identifiziert werden. Die Auswahl erfolgte auch hier in enger Zusammenarbeit mit dem FBK.

### 3.1 Substanzen

Für das Binden von Partikeln und Fasern beim Ablösevorgang der Farbe waren geeignete Substanzen bzw. Pasten zu finden. Diese Pasten sollten nach Möglichkeit alle Punkte der Matrix (vgl. Tabelle 6) optimal erfüllen. Zumindest einige Punkte konnten schon im Vorfeld – ohne Versuche durchgeführt zu haben – bestimmt werden (Tabelle 9).

Bei der Wahl der Pasten wurde sich an der erstellten Matrix orientiert. Zudem wurde abgeschätzt, wie sich die Pasten bei den vorher nicht bestimmbar Punkten (günstig im Einkauf, Handhabung bei der Benutzung, Bindeeigenschaften gegenüber Asbest und PAK, mechanische Lösbarkeit vom Untergrund, allgemeine Reinigungsfähigkeit) verhalten würden.

Bei den in Tabelle 9 durchgeführten Bewertungen zeigt sich, dass Haargel, Honig und Handcreme am besten beurteilt wurden. Mehrzweckfett und Schleifpaste schneiden aufgrund ihrer geringeren Umweltfreundlichkeit etwas schlechter ab. Beim Mehrzweckfett konnte vor Versuchsbeginn bereits der Punkt thermische Stabilität mitbewertet werden, da hier Vorgaben des Herstellers vorlagen. Zur Verdeutlichung sind die vor Versuchsbeginn abschätzbaren positiven Eigenschaften jeder Paste noch einmal textlich in Tabelle 10 dargestellt.

Letztlich wurde in Abstimmung mit dem FBK entschieden, dass die in Tabelle 10 aufgelisteten Substanzen für das Verfahren getestet werden sollten. Mit dieser Auswahl wurde gewährleistet, dass das Löseverfahren in einem ausreichend großen Substanzenspektrum getestet werden konnte.

**Tabelle 9: Teilweise ausgefüllte Matrix zur Pastenbewertung vor Versuchsbeginn**

		Haargel	Honig	Hand-creme	Mehr-zweckfett	Schleif-paste
1	Kosten pro Fläche	nicht bestimmbar				
2	einfache Transportmöglichkeit	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	einfache Handhabung bei der Benutzung	nicht bestimmbar				
4	gute Bindeeigenschaften gegenüber Asbest und PAK	nicht bestimmbar				
5	mechanisch gut vom Untergrund lösbar	nicht bestimmbar				
6	gesundheitliche Unbedenklichkeit	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	Entsorgungsaufwand	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	Umweltneutralität	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00
9	allgemeine Reinigungsfähigkeit	nicht bestimmbar				
10	thermische Stabilität	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	1,00	nicht bestimmbar
	Beurteilungswert					

**Tabelle 10: Eingesetzte Pasten und die vor Versuchsbeginn abschätzbaren pos. Eigenschaften**

Substanz / Paste	vor Versuchsbeginn abschätzbare positive Eigenschaften
Haargel	einfache Transportmöglichkeit, gesundheitliche Unbedenklichkeit, Entsorgungsaufwand, umweltfreundlich
Honig	einfache Transportmöglichkeit, gesundheitliche Unbedenklichkeit, Entsorgungsaufwand, umweltfreundlich
Handcreme	einfache Transportmöglichkeit, gesundheitliche Unbedenklichkeit, Entsorgungsaufwand, umweltfreundlich
Mehrzweckfett	einfache Transportmöglichkeit, gesundheitliche Unbedenklichkeit (bei pH-Neutralität), Entsorgungsaufwand, thermische Stabilität
Schleifpaste	einfache Transportmöglichkeit, gesundheitliche Unbedenklichkeit, Entsorgungsaufwand

### 3.2 Lösetechniken

Die Lösetechnik wird in erster Linie am Löseerfolg gemessen. Damit das Verfahren auch später in der Praxis ohne Probleme einsetzbar ist, sollten auf dem Markt vorhandene Geräte eingesetzt werden, die in der Lage sind, die asbest- und PAK-haltigen Farben vom Untergrund zu entfernen. Prinzipiell ist also zu betrachten, mit welcher Art von mechanischer Belastung ein Löseerfolg zu erwarten ist. Hier kommen Schleifen oder Schlagen in Betracht.

Wird jedoch eine Paste eingesetzt, müssen auch die Bewegungsart und -geschwindigkeit berücksichtigt werden. Der Einsatz eines Winkelschleifers würde beispielsweise mit Sicherheit einen großen Löseerfolg bringen, jedoch auch gleichzeitig die aufgetragene Paste vom Untergrund ablösen und aufgrund der schnellen Drehbewegung eine nicht abschätzbare Kontamination des Umfeldes verursachen.

Nach eingehenden internen Diskussionen und Gesprächen mit dem FBK wurden zwei Geräte für die Bearbeitung ausgewählt: der Multimaster der Firma Fein sowie

eine Druckluft-Nadelpistole der Firma Schneider. Der Multimaster wird mit einer Raspel in Dreiecksform bestückt. Durch Schwingungen dieser Raspel wird eine Löseleistung erreicht (→ Schleifen). Die Nadelpistole schlägt mit 28 Nadeln auf die Oberfläche und erzielt dadurch einen Löseerfolg (→ Schlagen).

In einer weiteren Optimierungsphase wurde überprüft, ob mit zusätzlichen Adaptern oder Aufsätzen an den Bearbeitungsgeräten oder sonstigen Hilfsmitteln eine nochmalige Verringerung der Partikelemissionen zu erreichen ist. Ein weiterer Effekt eines solchen Aufsatzes könnte die Verringerung der Umgebungsverunreinigung durch Pastenreste oder ein allgemein besseres Handling sein.

## **4 Versuchsaufbau**

### **4.1 Versuchsstand**

Zur Durchführung der Versuchsreihen wurde ein geeigneter Versuchsstand benötigt. Das Institut für Bergbaukunde I entschied, einen Versuchsstand zu entwickeln und zu bauen, der in Anlehnung an die TRGS 519 einen Schwarzbereich darstellt. Deshalb musste dieser als geschlossenes System ausgeführt werden.

Zur einfachen Bearbeitung der Probestücke musste er außerdem eine ausreichende Größe besitzen, über sämtliche zur Versuchsdurchführung notwendigen Anschlüsse verfügen und ein ergonomisches Arbeiten gewährleisten.

Zum Erreichen optimaler Ausleuchtung und Sichtverhältnisse wurde der Versuchsstand als Vierkantrohrrahmengestell konstruiert. Acrylglasplatten bilden die Flächen.

#### **4.1.1 Dichtigkeit**

Die Dichtigkeit des Versuchsstandes ist Voraussetzung für garantierte Arbeitssicherheit und sorgt dafür, dass die Umgebung nicht kontaminiert wird. Es soll verhindert werden, dass Asbestfasern - selbst im Fall einer defekten oder abgeschalteten Unterdruckhaltung - aus dem Versuchsstand austreten können. Außerdem wird auf diese Weise verhindert, dass von außen eintretende Partikel die Messergebnisse verfälschen. Hierzu wurden mehrere Maßnahmen getroffen.

Zunächst sind die meisten Acrylglasfenster, mit Ausnahme der beiden Öffnungsluken, mit Butylband abgedichtet. Dieses ist wasserbeständig und haftet sehr gut am Untergrund, so dass zusammen mit dem Anpressdruck der Schraubverbindungen eine nahezu hundertprozentige Dichtung entsteht. Zusätzlich zum Butylband sind im inneren Bereich des Versuchsstandes teilweise Silikonnähte zwischen Acrylglasplatten und Vierkantrohren angebracht. Diese verhindern das Anstehen von Wasser und schützen so das Abdichtband vor Beschädigungen.

Die beiden Öffnungsluken sind mit einem Fenster-Dichtband abgedichtet. Dieses hat im Vergleich zum Butylband den Vorteil, dass es nur einseitig klebt und sich somit die Öffnungsluken einfacher abnehmen lassen.

Die beiden Lufteinlässe sind jeweils doppelt gesichert. Beide verfügen über einen Schwebstofffilter gemäß EN 1822 Klasse H13, der auch in der Unterdruckhaltung zum Einsatz kommt. Falls also Luft durch die Einlässe austreten sollte, würden die (Asbest-)Partikel in den Filtern abgeschieden. Umgekehrt verhindern die Filter jedoch auch einen Eintritt von Partikeln der Außenluft in den Versuchsstand. Zwischengeschaltet sind zusätzlich zwei Drosselklappen mit Silikondichtung, die bei Bedarf geschlossen werden können. Die Klappen werden zusätzlich zur Abdichtung auch zum Schutz der Schwebstofffilter bei der nassen Reinigung des Versuchsstandes eingesetzt. Vor Versuchsbeginn wurde eine Dichtigkeitsprüfung des Versuchsstandes durchgeführt.

#### **4.1.2 Größe des Versuchsstandes**

Für den Versuchsstand wurde eine Grundfläche von zwei mal einem Meter gewählt. Die Höhe des Arbeitsraums beträgt etwa 1,30 m. An den Frontscheiben sind zwei Handschuhpaare (wasser-/luftdicht, chemikalienresistent) eingelassen.

In dieser Größe bietet der Versuchsstand ausreichend Platz für Probestücke unterschiedlicher Maße. Außerdem lassen sich mehrere Bearbeitungsgeräte und sonstiges Zubehör (Schlauch zur Reinigung, Pastenbehälter etc.) problemlos lagern und bewegen. Durch die Höhe des Arbeitsraumes sind gute Licht- und Sichtverhältnisse gegeben.



**Abbildung 1: Versuchsstand mit im Hintergrund erkennbarer Messstrecke und Unterdruckhaltung**

### **4.1.3 Anschlüsse**

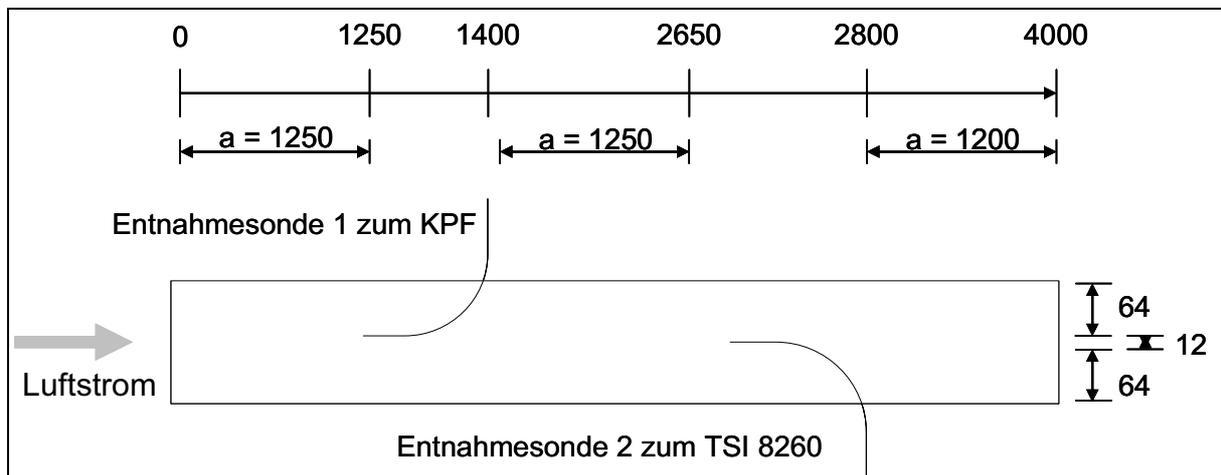
Um die Bearbeitungsgeräte betreiben zu können, wurden Strom- und Druckluftanschlüsse im Innenraum des Versuchsstandes installiert. Da während der Arbeiten eventuelle Beschädigungen der Kabel oder Wasserschäden an den Geräten (z. B. durch die Reinigung) nicht auszuschließen sind, wurde der Stromkreislauf mit einem FI-Schutzschalter (30 mA) versehen. Durch diese technische Maßnahme werden Gefährdungen des Personals durch elektrische Gefährdungsfaktoren ausgeschlossen.

Des Weiteren verfügt der Versuchsstand über einen Wasseranschluss. Dieser kann über ein Stecksystem außen und innen mit einem Schlauch verbunden werden, so dass auch im geschlossenen Zustand eine einfache Reinigung des Innenraumes möglich ist.

Das Reinigungswasser wird im Versuchsstand in zwei Edelstahlwannen gesammelt und kann über ein Siffonsystem der Abwasserfilteranlage zugeführt werden. Beide Abläufe können bei Bedarf mit je einem Kugelhahn dicht verschlossen werden.

#### 4.1.4 Messstrecke

Die Messstrecke liegt auf der dem Lufteinlass gegenüberliegenden Seite. Der Anschluss befindet sich mittig im unteren Bereich. Sie hat einen Innendurchmesser von 140 mm und eine Länge von ca. 4 m. An ihrem Ende ist das Unterdruckhaltegerät montiert, welches für Unterdruck im Versuchsstand sowie eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke sorgt. Im Abstand von 1.400 mm zum Anschluss an den Versuchsstand ist eine Entnahmesonde angeordnet, die eine Verbindung zum Luftprobenahmegerät herstellt, welches zur Beaufschlagung der Kernporfilter dient. Eine weitere Sonde ist im Abstand von 2.800 mm zum Anschluss an den Versuchsstand angeordnet. Über diese wird das Partikelzählgerät beaufschlagt. Beide Sonden sind mittig in der Messstrecke angeordnet. Die Konstruktion der Sonden sowie der Messstrecke erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 13284-1 und die VDI 2066-Blatt 1. Eine Skizze ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2: Prinzipskizze der Messstrecke**

Voraussetzung für die Luftentnahme ist laut DIN EN 13284-1 Isokinetik. Nach diversen Berechnungen von Volumenströmen und Geschwindigkeiten wurden Kalibrierungsversuche durchgeführt. Die endgültig gewählten Durchmesser und sich daraus ergebende Volumenströme bzw. Geschwindigkeiten sind in Tabelle 11 dargestellt.

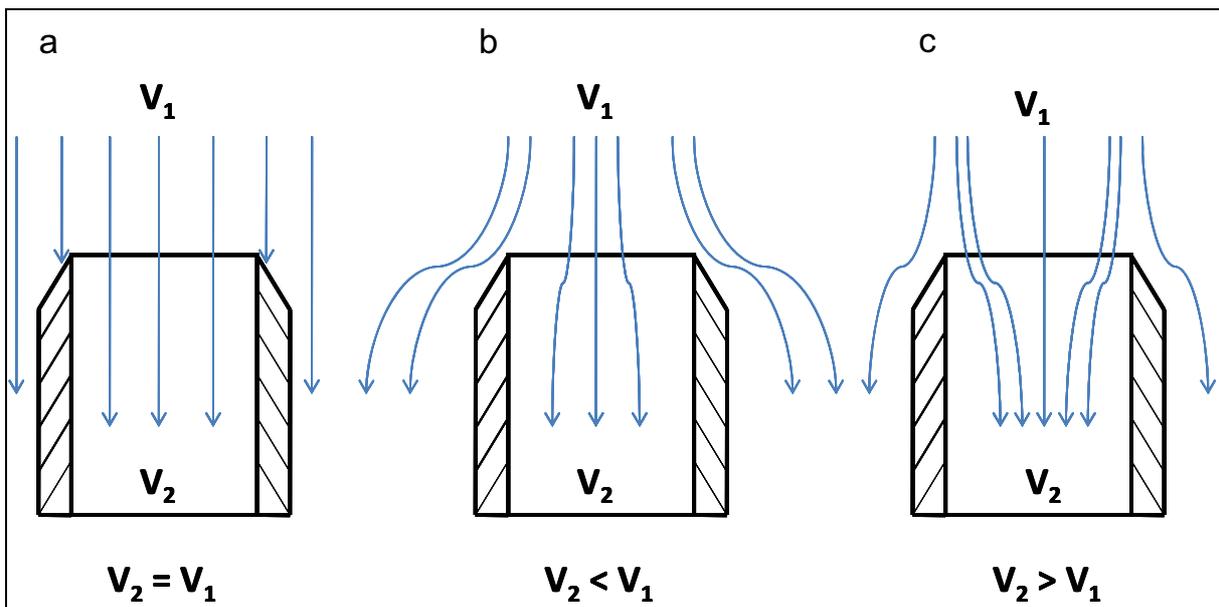
**Tabelle 11: Kalibrierung der Isokinetik**

	Innen- durchmesser	Außen- durchmesser	Strömungsge- schwindigkeit	Volumen- strom
Sonde 1, KPF	8 mm	10 mm	6,28 m/s	18,9 l/min
Sonde 2, TSI	13 mm	15 mm	6,28 m/s	50 l/min
Messstrecke	140 mm	150 mm	6,28 m/s	5800 l/min

Abbildung 3 zeigt die drei möglichen Geschwindigkeitsvariationen. Im Fall a liegt Iso-kinetik vor, d.h., die Geschwindigkeiten in der Messstrecke und in der Sonde sind gleich groß. Durch die Sonde werden nur Partikel aufgenommen, die sich genau auf die Öffnung zu bewegen. Das Ergebnis gibt reale Werte wieder.

Tritt Fall b ein, werden durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke Partikel um die Sonde herumgesogen. Bei der Messung werden also zu wenige Partikel gezählt.

Im Fall c wird das Ergebnis der Messung zu hoch ausfallen, da die Strömungsgeschwindigkeit in der Sonde höher ist und somit auch Partikel angesogen werden, die im isokinetischen Fall an der Sonde vorbeifliegen würden. Laut der DIN dürfen Messungen nur als gültig betrachtet werden, wenn sich das mittlere Geschwindigkeitsverhältnis um nicht mehr als -5 % bis +15 % ändert.



**Abbildung 3: Isokinetik**

## 4.2 Geräte

### 4.2.1 Unterdruckhaltung

Das Unterdruckhaltegerät ist am Ende der Messstrecke angeordnet und sorgt für den im Versuchsstand notwendigen Unterdruck. Dieser verhindert, dass Luft oder Partikel durch eventuell auftretende Undichtigkeiten (bspw. durch Beschädigungen) am Versuchsstand nach außen in die Atemluft gelangen können. Gleichzeitig bewirkt der Unterdruck die für die Luftprobenentnahme notwendige Luftströmung in der Messstrecke.

Bei der Kalibrierung des Versuchsstandes wurde nach einiger Zeit deutlich, dass das eingesetzte Unterdruckhaltegerät vom Typ Deconta D60 SE aufgrund der hohen Dichtigkeit des Versuchsstandes mit seiner Leistung nicht ausreichen würde, um eine für die Versuche notwendige Geschwindigkeit in der Messstrecke zu erzeugen. Daraufhin wurde es durch ein neues Gerät vom Typ Deconta Compact 900 ersetzt. Als weitere Maßnahme wurde der Luftwiderstand des Versuchsstandes verkleinert, indem ansaugseitig ein zweiter Einlass – abgesichert mit Drosselklappe und Schwebstofffilter (vgl. Kapitel 4.1.1) – konzipiert und umgesetzt wurde.

In Abbildung 4 ist das Prinzip des Unterdruckhaltegeräts erkennbar: durch die Drehung eines Ventilators wird Unterdruck in der davor angeordneten Kammer erzeugt. Die kontaminierte Luft wird angesaugt und über ein Filtersystem gereinigt. Aus der gegenüber liegenden Kammer wird die saubere Luft aufgrund des Überdrucks ausgeblasen.

Bei dem konzipierten Versuchsaufbau wird die Luft nach der Reinigung TRGS 519-konform durch eine Rohrleitung aus dem Versuchsraum ins Freie geleitet. Messungen in der Abluftleitung bestätigen die Reinigungsleistung der Filter.

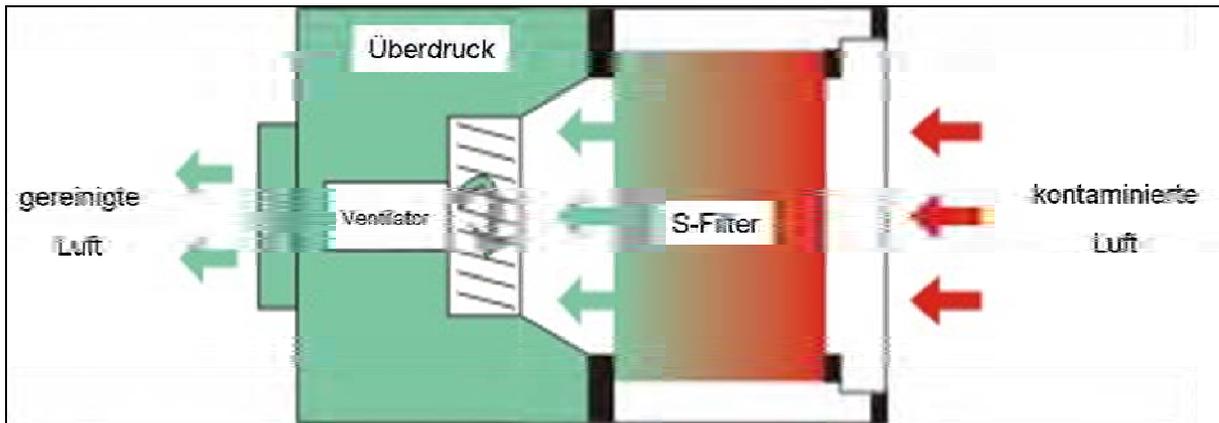


Abbildung 4: Prinzip des Unterdruckhaltegeräts<sup>6</sup>

### 4.2.2 Unterdrucküberwachung

Um über eine geeignete Kontrollmöglichkeit für den Unterdruck zu verfügen, wurde bei dem Versuchsaufbau ein Unterdrucküberwachungsgerät vom Typ Deconta Air-control „plus“ online (Abbildung 5) eingesetzt. Dieses ist über eine Schlauchleitung mit dem Versuchsstand verbunden und misst darüber den anliegenden Unterdruck. Die gemessenen Werte werden durch das Gerät kontinuierlich aufgezeichnet. Fällt der gemessene Wert auf 20 Pa oder weniger ab, gibt das Gerät ein akustisches Warnsignal aus.

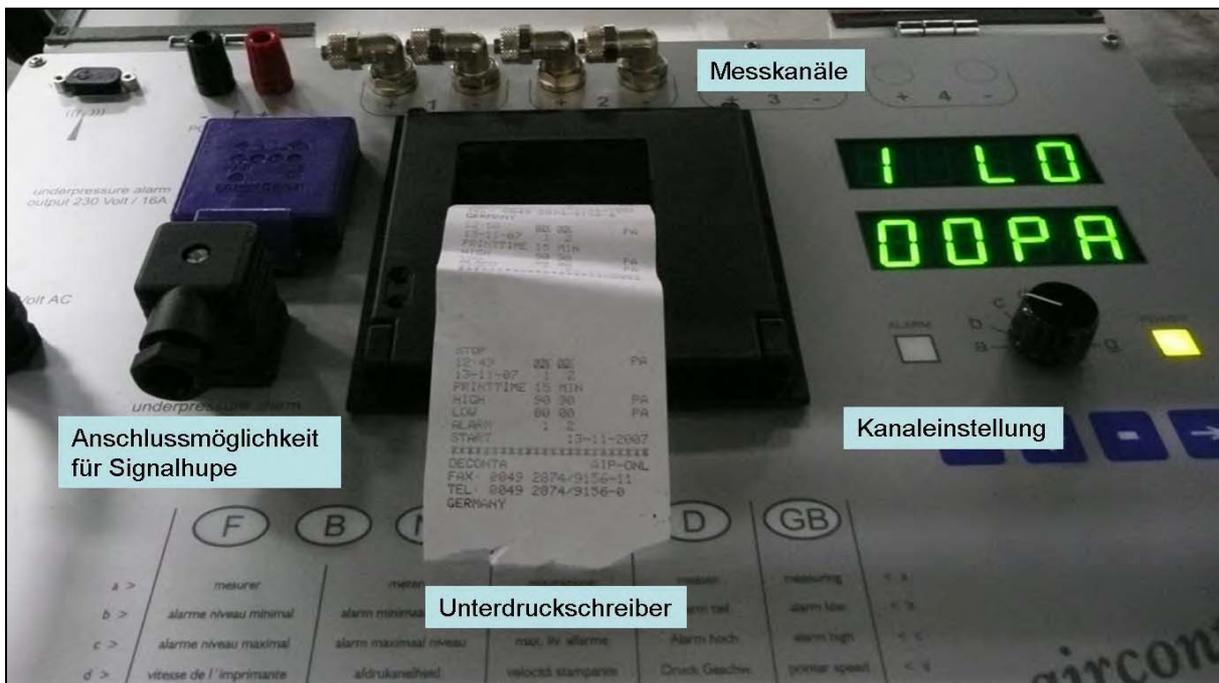


Abbildung 5: Unterdrucküberwachungsgerät

<sup>6</sup> Quelle: <http://www.deconta.com/Haupt1D.htm>

### 4.2.3 Luftprobenahmegerät

Das Luftprobenahmegerät dient der Beaufschlagung der Kernporenfilter (KPF). Eine Pumpe erzeugt über einen frei einstellbaren Zeitraum einen wählbaren Volumenstrom. Das KPF wird in einem Haltemonitor über eine Schlauchverbindung zwischen dem Gerät und der Entnahmesonde installiert. Bei laufenden Versuchen wird das Filter auf diese Weise mit der kontaminierten Luft beaufschlagt. Die Asbestfasern und sonstigen Partikel werden durch das Filter abgeschieden und können anschließend gemäß VDI 3492 bei einer Rasterelektronenmikroskopie (REM) im Labor ausgezählt und hochgerechnet werden.

### 4.2.4 Partikelzählgerät

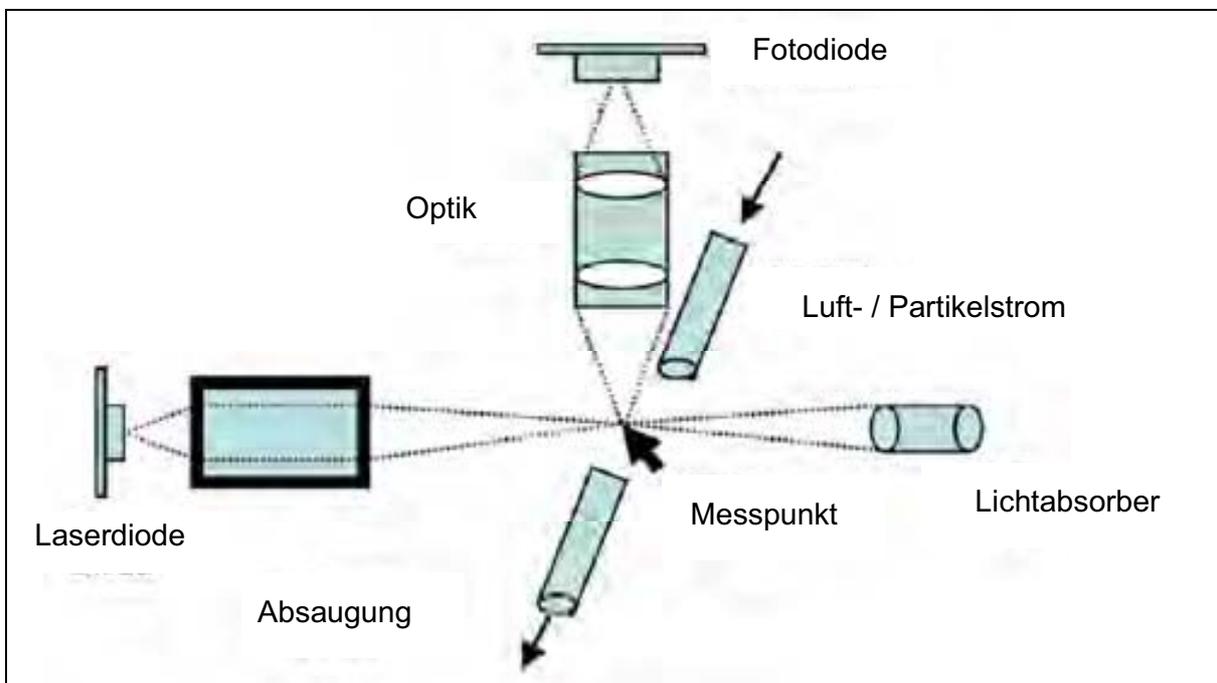
Ein Nachteil an der Analyse der KPF ist die große Zeitspanne von der Beaufschlagung bis zum Vorliegen des Ergebnisses. Inklusive des Transports zum Labor dauert die Ergebnisfindung je nach Verfügbarkeit des Rasterelektronenmikroskops drei bis zehn Tage. Die Analyse der KPF gibt außerdem nur Aufschluss über Asbestfasern, nicht aber über die Anzahl der möglicherweise PAK-haltigen Partikel.

Ein weiterer, verfahrensbedingter Nachteil ist die kurze Beaufschlagungszeit der Kernporenfilter von 5 bis 40 Minuten, wodurch sich eine relativ hohe statistische Ungenauigkeit, die über den Poissonwert zum Ausdruck gebracht wird, ergibt. Normalerweise werden die Filter über mehrere Stunden (meist 24 Stunden) beaufschlagt.

Aus diesen Gründen wurde ein nach dem neuesten Stand der Technik auf dem Markt befindliches Partikelzählgerät (TSI 8260) angeschafft. Dieses Gerät kann in einem Luftstrom vorhandene Partikel in einem Größenbereich von 0,3  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ , differenziert in sechs frei einstellbare Klassen, zählen. Die aktuellen Werte werden während des Zählens auf einem Monitor angezeigt. So kann innerhalb weniger Minuten festgestellt werden, ob, und wenn ja, wie viele, Partikel (innerhalb des Größenbereichs) in der Luft vorhanden sind. Das Gerät kann zwar nur eine quantitative und keine qualitative Aussage über Partikel treffen (im Gegensatz zur REM), jedoch werden im Vergleich zur REM alle Partikel gezählt, also auch PAK-behaftete. Es ist davon auszugehen, dass bei Erreichen der Partikelanzahl der ursprünglichen Hintergrundbelastung zumindest nahezu alle Asbest- und PAK-Partikel, die durch die Ver-

suche freigeworden sind, bereits aus dem Versuchsstand abgesaugt wurden. Dadurch können wiederum Beaufschlagungen von KPF zwischen einzelnen Versuchen und damit auch REM-Analysen eingespart werden. Dies reduziert die anfallenden Kosten in der Analytik und ermöglicht gleichzeitig eine dichtere Versuchsfolge. Außerdem können die Ergebnisse des TSI 8260 bei einem Vergleich eventuell die Ergebnisse der KPF-Analysen untermauern.

Das Messprinzip des TSI 8260 ist in Abbildung 6 zu erkennen: der Luftstrom wird durch einen Laserstrahl geleitet. Trifft der Laserstrahl auf ein im Luftstrom vorhandenes Partikel, wird dies von der Fotodiode wahrgenommen und gezählt.



**Abbildung 6: Messprinzip TSI 8260<sup>7</sup>**

Systembedingt kommt es bei dem beschriebenen Messsystem zu Koinzidenz: Beim gleichzeitigen Passieren mehrerer Partikel können kleine von großen verdeckt werden, sodass statt mehreren kleinen nur ein großes Partikel gezählt wird. Laut Hersteller liegt der Zählverlust durch Koinzidenz bei 250.000 Zählungen / ft<sup>3</sup> bei 5 %.

<sup>7</sup> Quelle: TSI, Application Note ITI-095

#### 4.2.5 Abwasserfilteranlage

Nach den Versuchen bzw. spätestens vor dem Öffnen wurde der Versuchsstand nass gereinigt. Das dafür benötigte Wasser ist nach der Reinigung möglicherweise mit Asbest kontaminiert und darf deshalb nicht direkt in die Kanalisation geleitet werden.

Zur weitestgehenden Dekontamination des Wassers wurde die Abwasserfilteranlage des Typs Deconta AS 300 M (Abbildung 7), die für die Arbeit in Schwarzbereichen entwickelt und zugelassen ist, eingesetzt. Diese pumpt das kontaminierte Wasser durch eine dreistufige Filtereinheit. Das erste Filter hat eine Porenweite von 220  $\mu\text{m}$  und scheidet die großen Partikel ab. Anschließend folgen zwei Filter mit Porenweiten von 50  $\mu\text{m}$  bzw. 1  $\mu\text{m}$ , die feine bzw. feinste Partikel abscheiden. Nachdem das Wasser das letzte Filter passiert hat, ist dessen Reinheit ausreichend und es darf in die Kanalisation abgegeben werden. Die Filter der Abwasseranlage wurden während der Laborphase mehrfach im nassen Zustand gewechselt.

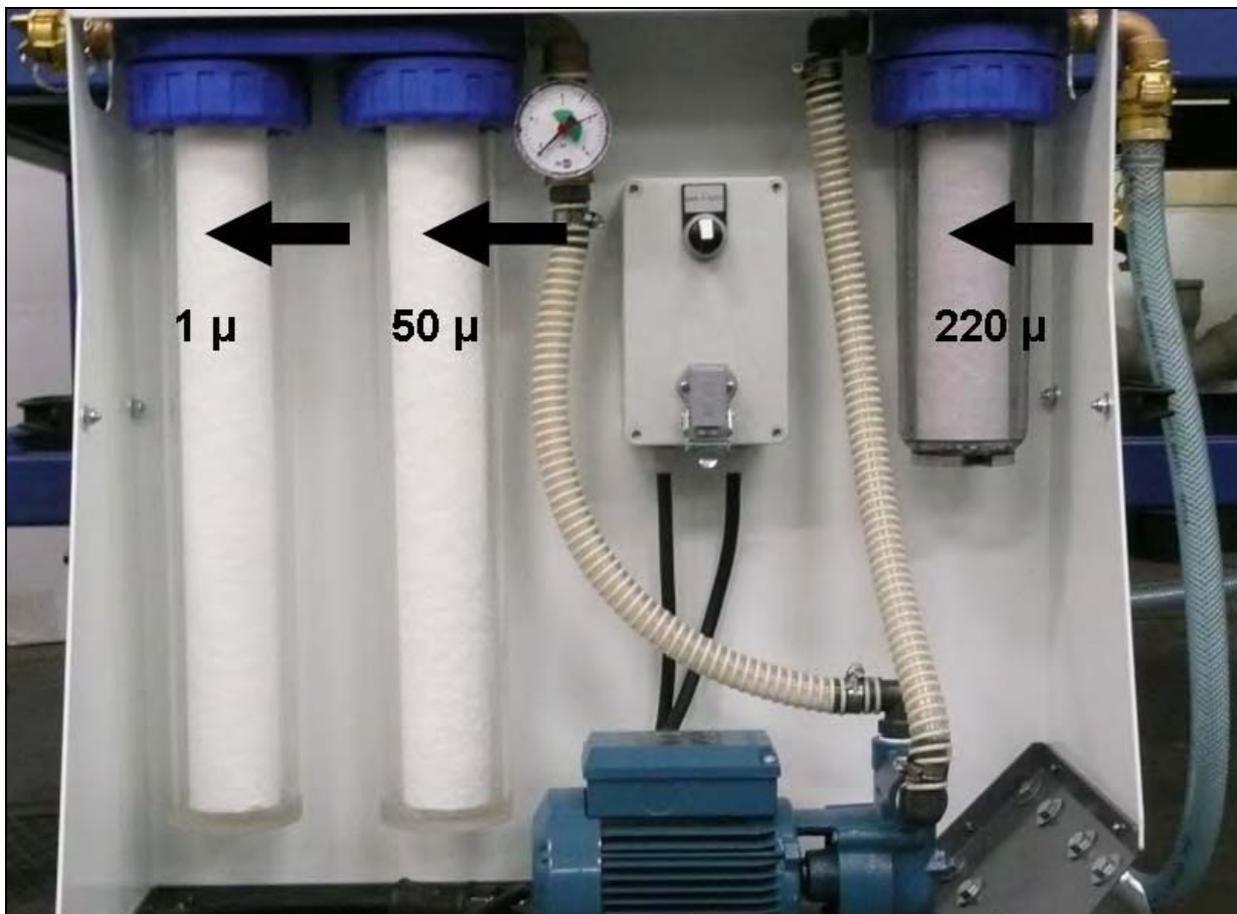


Abbildung 7: Abwasserfilteranlage mit dreistufiger Filtereinheit

#### **4.2.6 Messgeräte zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit**

Für die Durchführung der Versuche spielt die Isokinetik in der Messstrecke und in den Entnahmesonden eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 4.1, Messstrecke). Deshalb muss eine Möglichkeit der Überprüfung der Geschwindigkeiten vorhanden sein.

Zur kontinuierlichen Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Messstrecke während der Versuchsreihen wurde ein bereits vorhandenes Prandtl'sches Staurohr verwendet. Dieses wurde in die Messstrecke integriert und während der Versuche zur regelmäßigen Überprüfung betrieben.

Bei der Kalibrierung der Messstrecke konnte das Strömungsprofil mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers überprüft werden. Diese Messreihen waren nötig, um die geeignete Position der Sonden bestimmen zu können.

Weitere Anwendung fand das Hitzdrahtanemometer bei der Überprüfung des Strömungsprofils des Unterdruckhaltegeräts. Bei diesen Messungen wurde festgestellt, dass das ursprünglich für den Einsatz geplante Unterdruckhaltegerät nicht für die Versuchsdurchführungen geeignet ist, da es selbst im Leerlauf – anders als in den technischen Datenblättern ausgewiesen – eine unzureichende Leistung erbrachte (vgl. Kapitel 4.2.1).

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Verfahrensüberprüfung

Durch den Einsatz von handelsüblichen Werkzeugen und Substanzen soll ein Verfahren zum Ablösen asbest- bzw. PAK-haltiger Farben entwickelt werden. Es mussten also geeignete Werkzeuge und Substanzen recherchiert werden (vgl. Kapitel 3). Vor allem musste jedoch bewiesen werden, dass der Einsatz einer Paste bei der mechanischen Bearbeitung einer Oberfläche eine deutliche Reduzierung der Asbest- und PAK-Partikel in der Umgebungsluft bewirkt. Um die Wirksamkeit des Pastenverfahrens vor den eigentlichen Versuchen zu testen, wurde als Probestück ein Sandstein mit dem Multimaster der Firma Fein bearbeitet.

#### 5.1.1 Aufbau und Durchführung

Sämtliche Geräte sowie das Probestück wurden hierzu im Schwarzbereich abgelegt und der Versuchsstand wurde hermetisch verschlossen. Die Geräte wurden aktiviert und ein isokinetischer Zustand wurde eingestellt. Die Versuchsreihe bestand aus drei Einzelversuchen:

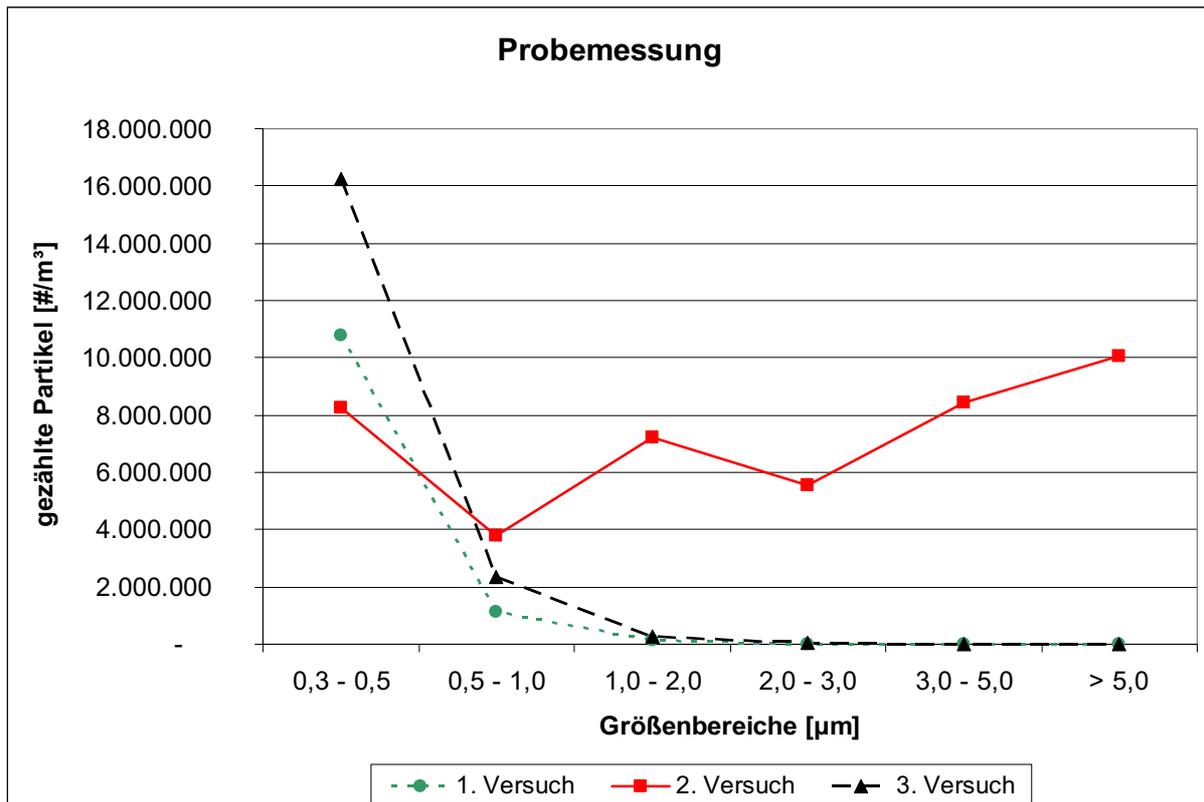
1. *Bestimmung der Hintergrundbelastung im Versuchsstand.* Hierzu wurde der Versuchsstand geschlossen und einige Minuten mit Hilfe der Unterdruckhaltung durchlüftet. Anschließend wurde das an die Messstrecke angeschlossene Partikelzählgerät für zwei Minuten aktiviert.
2. *Bearbeitung des Probestücks.* Die Oberfläche des Sandsteins wurde mit dem Multimaster zwei Minuten lang bearbeitet. Hierbei wurde wiederum das Partikelzählgerät aktiviert.
3. *Aufbringen der Paste.* Nach einer fünfminütigen Durchlüftungsphase wurde der Sandstein mit einer Schicht Mehrzweckfett bedeckt. Diese Fläche wurde wiederum bei eingeschaltetem Partikelzählgerät bearbeitet.

### 5.1.2 Ergebnis

Die oben beschriebene Versuchsreihe wurde mehrfach wiederholt und lieferte prinzipiell immer das in Tabelle 12 und Abbildung 8 dargestellte Ergebnis.

**Tabelle 12: Zählergebnisse des TSI 8260**

Partikelgröße	Anzahl Partikel 1. Versuch	Anzahl Partikel 2. Versuch	Anzahl Partikel 3. Versuch
0,3 - 0,5	10.780.529	8.274.620	16.221.146
0,5 - 1,0	1.147.196	3.793.195	2.330.665
1,0 - 2,0	146.028	7.238.010	254.687
2,0 - 3,0	16.041	5.564.101	37.026
3,0 - 5,0	5.406	8.429.594	21.341
> 5,0	1.055	10.067.064	11.811



**Abbildung 8: Ergebnis der Sandsteinbearbeitung**

Ein weiteres Ergebnis dieser Versuche ist die Wahl der Größenklassen des TSI 8260. Es hat sich deutlich gezeigt, dass gerade im Bereich größer 5 µm bei Einsatz einer Paste nur sehr wenige Partikel (< 1 %) gezählt werden. Daher wurden die

Größenklassen so gewählt, dass eine stärkere Auflösung im Bereich bis 5 µm möglich ist.

### **5.1.3 Fazit**

Die Vorversuche zur Verfahrensüberprüfung haben deutlich gezeigt, dass bei dem Einsatz einer Paste die Anzahl der emittierten Partikel deutlich verringert werden kann. Besonders Partikel der Größenbereiche ab 1 µm aufwärts werden durch die Paste sehr gut gebunden. Aufgrund der Koinzidenz lässt sich über die Größenbereiche kleiner 1 µm keine klare Aussage treffen, jedoch kann angenommen werden, dass hier ähnliche Bindeeffekte auftreten.

## **5.2 Versuchsreihen zur Kalibrierung des Versuchsstandes**

### **5.2.1 Bestimmung der Grundbelastungen**

Zur Bestimmung der Grundbelastung<sup>8</sup> wurden mehrere Versuche durchgeführt. Um einen Nachweis zu erhalten, dass keine Verunreinigung der Laborluft stattgefunden hat, wurden diese Messungen nicht nur vor Beginn der Hauptversuche, sondern auch zwischen diesen getätigt.

Zunächst wurde an mehreren Messstellen im Laborraum die vorhandene Belastung untersucht. Hierzu wurden Kernporenfilter mit Hilfe des Luftprobenahmegeräts beaufschlagt. Parallel hat das TSI 8260 jeweils die Partikelanzahl in der Raumluft gezählt.

In einem nächsten Schritt wurde die Grundbelastung im Versuchsstand bestimmt. Die Geräte (Luftprobenahmegerät und TSI 8260) wurden, wie auch später bei den Hauptversuchen, an die Messstrecke angeschlossen und die Messung wurde gestartet.

Die Ergebnisse der KPF-Analyse zeigten, dass keine Asbestbelastung der Raumluft oder – während der Hauptversuchsreihen nach ausreichender Reinigung und Durch-

---

<sup>8</sup> Grundbelastung: die Staub- und Faserbelastung, die vor Versuchsbeginn im Technikum und dem Versuchsstand vorhanden ist.

lüftungszeit – der Luft im Versuchsstand vorlag, weder vor noch während der Versuche. Alle Messwerte lagen unter der Nachweisgrenze, die bei allen Messungen zwischen 7 und 84 Fasern/m<sup>3</sup> Luft lag.

## **5.2.2 Versuche zur Bestimmung der Reinigungsleistung**

Der Versuchsstand kann auf zwei verschiedenen Arten gereinigt werden. Zum einen ist eine Reinigung durch den Luftwechsel möglich, zum anderen durch das Ausspülen mit Wasser.

### **5.2.2.1 Reinigung durch Luftwechsel**

Zur Bestimmung der Reinigungsleistung allein durch den Luftwechsel wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der in verschiedenen Intervallen Messungen durchgeführt wurden.

#### **Aufbau und Durchführung**

Der Versuchsstand wurde mit einem Probestück und allen notwendigen Werkzeugen bestückt. Anschließend wurde er unter isokinetischen Verhältnissen etwa sechs Tage lang durchlüftet, ohne an ihm zu arbeiten oder ihn zu öffnen.

Eine zehnmündige Nullmessung vor Versuchsbeginn wurde durchgeführt, anschließend eine 150 cm<sup>2</sup> große Fläche mit der Nadelpistole bearbeitet. Das Entfernen der Farbe dauerte sechs Minuten. Während dieser Zeit wurden ebenfalls eine Messung mit dem TSI 8260 und eine Beaufschlagung des KPF realisiert. Der weitere chronologische Verlauf ist Tabelle 13 zu entnehmen. Alle Messungen und Durchlüftungen fanden unter isokinetischen Verhältnissen statt.

**Tabelle 13: Versuchsreihe zur Bestimmung der Reinigungsleistung**

<i>Bezeichnung</i>	<i>Versuchs-Nr.</i>	<i>Uhrzeit Beginn</i>	<i>Dauer</i>	<i>Uhrzeit Ende</i>
Nullmessung	1001	09:07:00	00:10:00	09:17:00
Probefläche trocken bearbeiten, währenddessen Messung	1002	09:24:00	00:06:00	09:30:00
10 min durchlüften		09:30:00	00:10:00	09:40:00
Messung	1003	09:40:00	00:10:00	09:50:00
20 min durchlüften		09:50:00	00:20:00	10:10:00
Messung	1004	10:10:00	00:10:00	10:20:00
30 min durchlüften		10:20:00	00:30:00	10:50:00
Messung	1005	10:50:00	00:10:00	11:00:00
1 h durchlüften		11:00:00	01:00:00	12:00:00
Messung	1006	12:00:00	00:10:00	12:10:00
1 h durchlüften		12:10:00	01:00:00	13:10:00
Messung	1007	13:10:00	00:10:00	13:20:00
1 h durchlüften		13:20:00	01:00:00	14:20:00
Messung	1008	14:20:00	00:10:00	14:30:00
2 h durchlüften		14:30:00	02:00:00	16:30:00
Messung	1009	16:30:00	00:10:00	16:40:00
4h durchlüften		16:40:00	04:00:00	20:40:00
Messung	1010	20:40:00	00:10:00	20:50:00
12 h durchlüften		20:50:00	12:00:00	08:50:00
Messung	1011	08:50:00	00:10:00	09:00:00

## Ergebnis

Durch die Analyse der Kernporenfilter konnte keine Aussage getroffen werden, inwieweit die Asbestfaserkonzentration nachgelassen hat, da die Nachweisgrenze bei sämtlichen Analysen unterschritten wurde.

Die Zählergebnisse des TSI 8260 konnten jedoch ausgewertet werden und ergaben, dass die Konzentration von Partikeln in der Luft selbst nach nur zehnminütiger Durchlüftungszeit (entspricht bei eingestellter Isokinetik einem ca. 30-fachen Luftwechsel im Versuchsstand) wieder auf einen Basiswert, der sich bei hermetischem Verschluss des Versuchsstands und aktiver Unterdruckhaltung nach einiger Zeit einstellt, abgefallen ist. Die grafische Darstellung der Versuche zeigt Abbildung 9.

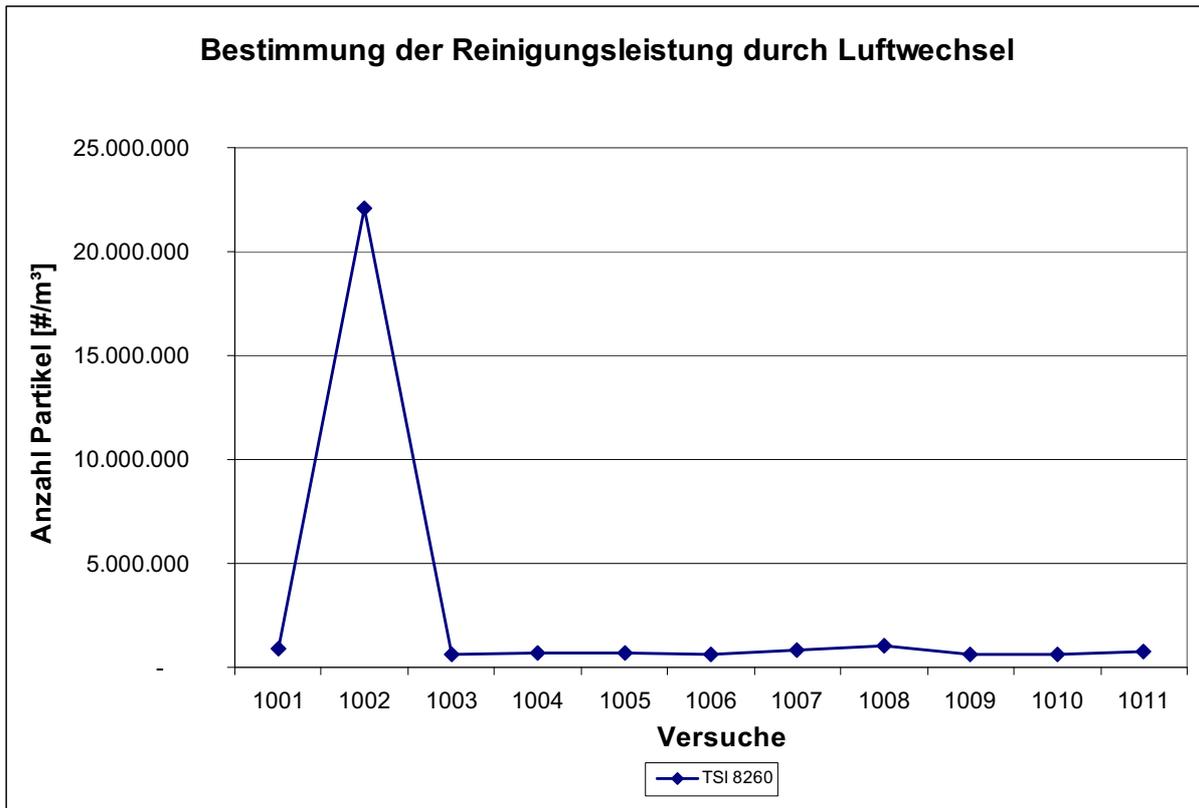


Abbildung 9: Bestimmung der Reinigungsleistung durch Luftwechsel

### Interpretation

Die Versuchsreihe zeigt, dass der Wirkungsgrad der Reinigung allein durch mehrfachen Luftwechsel sehr hoch ist. Nach nur zehnminütiger Durchlüftung stellt sich bereits eine Konzentration an Partikeln ein, die als Hintergrundbelastung definiert werden kann. Berücksichtigt man die Tatsache, dass verunreinigtes Werkzeug, Putzlapen und Restablagerungen des vorhergehenden Versuches im Versuchsstand vorhanden waren, sind die gemessenen Werte im Durchschnitt von etwa 730.000 Partikeln/m<sup>3</sup> Luft als sehr niedrig einzustufen.

### 5.2.2.2 Reinigung durch Ausspülen mit Wasser

Die Innenreinigung des Versuchsstandes mit Wasser dient in erster Linie dazu, im Versuchsstand entstandene Verunreinigungen an den Oberflächen durch die Versuchsdurchführungen wieder zu beseitigen. Durch den Einsatz von Wasser war eine Reinigungsleistung der Luft nicht zu erwarten und konnte auch im Versuch nicht festgestellt werden.

Nach Bearbeitung eines Probestücks und darauffolgendem mehrfachen Luftwechsel im Versuchsstand wurde mit dem TSI 8260 gemessen und ein KPF beaufschlagt. Anschließend wurde der Versuchsstand mit Wasser gereinigt und es wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Die Zählergebnisse des TSI 8260 vor und nach der nassen Reinigung weichen um lediglich 4 % voneinander ab; deshalb ist davon auszugehen, dass durch die nasse Reinigung keine spürbare Absenkung der Partikelkonzentration in der Luft realisiert werden kann. Die REM-Ergebnisse ergaben, dass die Faserkonzentration bei beiden Versuchen unter der Nachweisgrenze lag.

### **5.2.3 Sonstige Kalibrierungs- und Handlingsversuche**

Vor Beginn der Hauptversuche wurden unter unterschiedlichen Bedingungen Versuche durchgeführt, die durch Messungen begleitet wurden. Bei diesen Versuchen wurden die Arbeitsschritte, insbesondere der Umgang mit dem Werkzeug, das Auftragen von Pasten, die Reinigung der Probestücke sowie die Entsorgung asbest- bzw. PAK-haltiger Abfälle aus dem Versuchsstand, erprobt.

Im Rahmen dieser Versuche wurde eine Checkliste erstellt und mehrfach optimiert, welche alle erforderlichen Arbeiten in der notwendigen Abfolge beinhaltet. Diese Checkliste wurde für jede spätere Versuchsdurchführung während der Hauptversuchreihen als Arbeitsanweisung benutzt. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass kein Arbeitsschritt vergessen oder falsch ausgeführt werden kann.

Darüber hinaus wurden die installierten Sicherungsmaßnahmen wie Unterdruckhaltung, Unterdrucküberwachung, Drosselklappen und Dichtungen sowie die Auswertmethoden über einen PC inklusive diverser Software getestet.

Es hat sich herausgestellt, dass eine optimale Versuchsdurchführung möglich ist, wenn die Arbeitsfläche im Versuchsstand geteilt wird. In der linken Hälfte (absaugseitig) werden die Probestücke von einem Mitarbeiter bearbeitet. Das notwendige Equipment – z. B. Werkzeug, Paste oder Putzlappen – wird in der rechten Hälfte (ansaugseitig) vorgehalten und bei Bedarf durch einen zweiten Mitarbeiter angereicht bzw. angenommen.

Es hat sich ebenso als sinnvoll erwiesen, mehrere Probestücke im Versuchsstand vorzuhalten. Damit können die Zeiten, in denen der Versuchsstand (nach Nassreini-

gung) geöffnet ist, minimiert werden. Dies senkt die Wahrscheinlichkeit sowohl eines Partikeleintrages in den Versuchsstand als auch eines Partikelaustrages in den Weißbereich.

Für die Entsorgung wurden Abfallbeutel im Versuchsstand gelagert. Nach Ende einer jeden Versuchreihe wurden diese befüllt und nach nasser Außenreinigung über eine Schleuse in einen für die Asbestentsorgung geeigneten Abfallsack gegeben. Dieser wurde dicht mit Klebeband verschlossen sowie gekennzeichnet und über die Abteilung Abfallwirtschaft der RWTH Aachen University der Entsorgung zugeführt.

Eine Überprüfung des Abluftstromes (hinter der Unterdruckhaltung) hat ergeben, dass die Abscheideanforderungen der TRGS 519 sicher erfüllt wurden. Die REM hat ergeben, dass die Anzahl der Asbestfasern unter der Nachweisgrenze von 252 Fasern/m<sup>3</sup> Luft und damit selbst im ungünstigsten Fall deutlich unter der Forderung der TRGS 519 (max. 1.000 Fasern/m<sup>3</sup> Luft) lag.

### **5.3 Hauptversuchsreihen**

In den Hauptversuchsreihen wurden die Metallplatten mit asbesthaltiger Farbe bearbeitet. Hierzu wurden die Platten in mehrere Flächen mit einer jeweiligen Größe von 150 cm<sup>2</sup> unterteilt und nummeriert. Von jedem Probestück wurde eine Vollprobe auf ihren Asbestgehalt analysiert. Die Analysen wurden, wie auch die REM vom Hygiene-Institut des Ruhrgebiets (HYG), Gelsenkirchen, durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass in allen Farbanstrichen, die eine ungefähre Dicke von 1 mm besaßen, Chrysotilasbest mit einer Konzentration von 1-15 % enthalten war.

Die Probestücke sind Teile alter Schleusentore (vgl. Abbildung 10), die seit mehreren Jahren in Ensdorf (Saarland) gelagert werden. Die Teilstücke wurden dem Institut für Bergbaukunde I freundlicherweise von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Südwest für die Versuchsdurchführungen zur Verfügung gestellt.



Abbildung 10: Teil eines Schleusentors mit asbest- und PAK-haltigen Anstrichen

Exemplarisch für die Durchführung der Versuchsreihen wird im Folgenden die Versuchsreihe 5.2 beschrieben. Diese besteht aus den Einzelversuchen 521 bis 525. Die Flächen wurden unter feuchten Bedingungen (feuchte Oberfläche, simulierter Regen) mit der Nadelpistole bearbeitet.

### 5.3.1 Aufbau

In den Versuchsstand wurde ein geeignetes Probestück eingelegt. Als Bearbeitungsgerät wurde die Nadelpistole vorbereitet. Der Versuchsstand wurde geschlossen und die entsprechenden Geräte (vgl. Kapitel 4.2) wurden aktiviert. Eine Düse zur Beregnung des Probestückes wurde zusätzlich bereitgehalten. Haargel, Honig, Handcreme und Mehrzweckfett wurden als Pasten bereitgestellt.

### 5.3.2 Durchführung

Die Einzelversuche wurden in folgender Reihenfolge durchgeführt:

- 521: ohne Paste (Dauer: 6 min, Innentemperatur: 25°C)
- 522: Haargel (Dauer: 8 min, Innentemperatur: 25°C)
- 523: Honig (Dauer: 7 min, Innentemperatur: 25°C)
- 524: Handcreme (Dauer: 7 min, Innentemperatur: 25°C)
- 525: Mehrzweckfett (Dauer: 7 min, Innentemperatur: 25°C)

Vor der Bearbeitung einer jeden Teilfläche wurde die Oberfläche des Werkstücks jeweils angefeuchtet. Während der Versuche wurden die Teilflächen und damit auch die Pasten mehrfach mit Hilfe der Düse beregnet.

### 5.3.3 Ergebnis

Bei der Beregnung konnte festgestellt werden, dass sich sowohl Haargel als auch Honig nicht für solche Umgebungsbedingungen eignen. Beide Pasten haben sich im Wasser gelöst bzw. sind sehr stark verdünnt worden, so dass die Umgebung bei der Bearbeitung noch stärker durch Spritzer verunreinigt wurde, als es unter trockenen Bedingungen der Fall gewesen wäre. Zusätzlich konnte ein starkes Fließverhalten, insbesondere beim Honig, beobachtet werden. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Haftung auf der feuchten im Vergleich zur trockenen Oberfläche deutlich nachgelassen hat. Schon beim Auftragen auf das Probestück konnte eine verstärkte Fließneigung beobachtet werden.

Handcreme und Mehrzweckfett haben sich bei der Beregnung in ihrer Konsistenz kaum verändert. Jedoch konnte auch hier festgestellt werden, dass sich Fettschlieren – und damit vermutlich auch Asbestfasern und PAK – gelöst haben und diese teilweise abgeflossen sind.

Haargel und Honig eignen sich also aufgrund der Wasserlöslichkeit für die Bearbeitung bei feuchten Umgebungszuständen nur bedingt.

Das **Ergebnis der REM** ist in Tabelle 14 dargestellt.

**Tabelle 14: REM-Ergebnisse der Versuchsreihe 5.2 (Nadelpistole)**

		<b>Versuch 521</b>	
<b>Faserart</b>		<b>Messwert</b>	<b>oberer Poissonwert</b>
Asbestfasern gesamt	Fasern/m <sup>3</sup>	18366	41301
davon Amphibolfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
davon Chrysotilfasern	Fasern/m <sup>3</sup>	18366	
Sonstige anorganische Fasern	Fasern/m <sup>3</sup>	<1670	
davon künstl. Mineralfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
		<b>Versuch 522</b>	
<b>Faserart</b>		<b>Messwert</b>	<b>oberer Poissonwert</b>
Asbestfasern gesamt	Fasern/m <sup>3</sup>	<1259	7543
davon Amphibolfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
davon Chrysotilfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
Sonstige anorganische Fasern	Fasern/m <sup>3</sup>	<1259	
davon künstl. Mineralfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
		<b>Versuch 523</b>	
<b>Faserart</b>		<b>Messwert</b>	<b>oberer Poissonwert</b>
Asbestfasern gesamt	Fasern/m <sup>3</sup>	<1439	8621
davon Amphibolfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
davon Chrysotilfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
Sonstige anorganische Fasern	Fasern/m <sup>3</sup>	<1439	
davon künstl. Mineralfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
		<b>Versuch 524</b>	
<b>Faserart</b>		<b>Messwert</b>	<b>oberer Poissonwert</b>
Asbestfasern gesamt	Fasern/m <sup>3</sup>	<1439	8621
davon Amphibolfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
davon Chrysotilfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
Sonstige anorganische Fasern	Fasern/m <sup>3</sup>	<1439	
davon künstl. Mineralfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
		<b>Versuch 525</b>	
<b>Faserart</b>		<b>Messwert</b>	<b>oberer Poissonwert</b>
Asbestfasern gesamt	Fasern/m <sup>3</sup>	<1439	8621
davon Amphibolfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
davon Chrysotilfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		
Sonstige anorganische Fasern	Fasern/m <sup>3</sup>	<1439	
davon künstl. Mineralfasern	Fasern/m <sup>3</sup>		

Es ist eindeutig erkennbar, dass durch den Einsatz der Pasten die Partikelbelastung der Luft stark abgenommen hat. Da die Messwerte für alle Pasten unter der Nachweisgrenze liegen, wird bei der Beurteilung der für den Nachweis eines funktionierenden Pastenverfahrens ungünstigste Fall angenommen: Nachweisgrenze abzüglich 1. Dies entspricht gemäß REM-Auswertung der maximal möglichen Faserzahl pro Kubikmeter Luft. Daraus folgt, dass beim Haargel (Versuch 522) maximal 1258 Fasern/m<sup>3</sup> Luft und bei allen anderen Pasten (Versuche 523-525) maximal 1438 Fasern/m<sup>3</sup> freigesetzt wurden. Dies entspricht nur noch ca. 7 bzw. 8 % der Belastung der Bearbeitung ohne Paste (18.366 Fasern/m<sup>3</sup> Luft, Versuch 521)<sup>9</sup>.

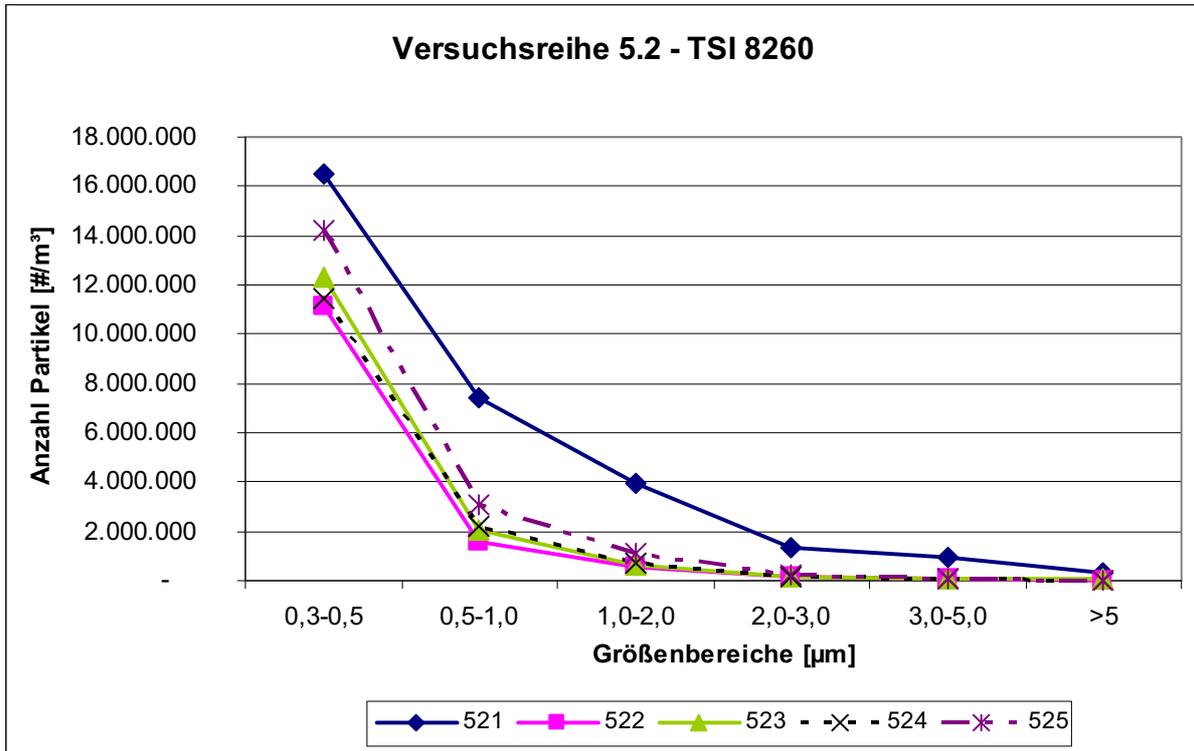
Die **Zählergebnisse des TSI 8260** zu derselben Versuchsreihe sind in Abbildung 11 grafisch zusammengefasst. Die zugrunde liegenden Daten der Messungen sind in Anhang 2 zu finden.

In den Versuchen 522-525 ist im Vergleich zum Versuch 521 (ohne Paste) eine deutliche Reduzierung der Partikel praktisch in jeder Größenklasse erkennbar. Im kleinsten Bereich (0,3-0,5 µm) schwankt die Reduzierung der Partikel pro Kubikmeter Luft zwischen 13 und 32 %. In der Klasse 0,5-1,0 µm ist eine Reduzierung der Partikelanzahl zwischen 59 und 79 % möglich.

In allen darüber liegenden Größenklassen schwankt die Reduzierung zwischen 71 und 93 %. Gerade in diesen Bereichen entspricht die Reduzierung der Partikel in den meisten Fällen den Ergebnissen der KPF-Analyse. Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihe kann man also den Schluss ziehen, dass sich die größte Anzahl an Asbestfasern in einem Größenspektrum von ca. 1 µm bis > 5 µm bewegen. Im Größenbereich 0,3-1,0 µm fällt vermutlich eine geringere Anzahl an Fasern an.

---

<sup>9</sup>Anmerkung: die Nachweisgrenze ist bei der REM abhängig von der Beaufschlagungszeit des KPF; da diese Zeit bei Versuch 522 eine Minute länger war als bei den Versuchen 523-525, ist die Nachweisgrenze hier kleiner.



**Abbildung 11: Zählergebnisse des TSI 8260 für die Versuchsreihe 5.2**

## 6 Fazit

Die Versuche während der Laborphase haben deutliche Ergebnisse geliefert. Es können belegbare Aussagen über die Effizienz der Lösetechniken, der verschiedenen Pasten sowie des Gesamtverfahrens getroffen werden.

Zunächst einmal haben die Versuche gezeigt, dass ein Lösen der Farbe prinzipiell sowohl mit dem Multimaster der Firma Fein als auch mit der Nadelpistole der Firma Schneider möglich ist. Bewegt sich die Schichtdicke der Farbe im Bereich um 1 mm oder darüber, ist die Nadelpistole klar im Vorteil, da die Reinigung der Fläche deutlich weniger Zeit erfordert. Für eine 150 cm<sup>2</sup> große Fläche benötigt man mit der Nadelpistole – je nach Paste – zwischen sechs und zwölf Minuten. Eine gleich große Fläche mit dem Multimaster zu bearbeiten, nimmt etwa 25-40 Minuten in Anspruch. Im Mittel braucht man mit dem Multimaster also etwa die fünffache Zeit für das Entfernen der Farbe. Ist die Farbe nur sehr dünn (im  $\mu\text{m}$  Bereich) aufgetragen, ist der Multimaster durchaus geeignet, eine Fläche schnell metallisch blank zu schleifen. Ein Vorteil des Multimasters ist außerdem, dass die Reinigungsleistung etwas besser als die der Nadelpistole ist. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die metallische Oberfläche sehr eben ist, da sich kleine Dellen oder sonstige Unebenheiten nur sehr schlecht mit der Raspel bearbeiten lassen. Man kann zwar versuchen, mit den Ecken oder Kanten der Raspel diese Unebenheiten zu bearbeiten, jedoch führt dies sehr schnell – nach nur einigen hundert Quadratzentimetern – zum Verschleiß der Raspel. Da eine Ersatzraspel mit ca. 30 Euro zu Buche schlägt, kann dies bei einer Fläche von einem Quadratmeter schnell zu hohen Kosten führen.

Die Nadelpistole kommt gut mit Unebenheiten zurecht. Hier kann optisch kein Unterschied im Löseerfolg zu ebenen Flächen festgestellt werden. Die Nadelpistole arbeitet letztlich effektiver und günstiger als der Multimaster, insbesondere wenn keine nahezu ebenen Flächen, wie es meistens in der Praxis der Fall ist, vorausgesetzt werden können. Strombetriebene Nadelpistolen wurden laut Hersteller vor einigen Jahren vom Markt genommen, daher konnten diese in den Versuchsreihen nicht berücksichtigt werden.

Für den Einsatz von Pasten lässt sich generell aussagen, dass eine Bindung von Partikeln – unabhängig von der Art der Paste – immer stattfindet. Dies bestätigen sowohl die Messungen des TSI 8260 als auch die Untersuchungen der Kernporenfilter. Relativ gesehen treten die größten Bindeeffekte durch Paste bei Partikeln größer oder gleich  $0,5 \mu\text{m}$  auf. Hier konnten Reduzierungen der Partikelmengen um bis zu 99 % erreicht werden. In der Größenklasse  $0,3\text{-}0,5 \mu\text{m}$  konnten immerhin noch Reduzierungen der Ursprungsbelastung (bei der Bearbeitung ohne Paste) von bis zu 64 % festgestellt werden.

Der Umgang bzw. die Handhabung mit den verschiedenen Pasten ergab, dass einige Substanzen als Bearbeitungspaste nicht oder nur sehr bedingt geeignet sind. Die Schleifpaste ist in ihrer Konsistenz sehr zäh. Dies hat zur Folge, dass sie nicht zusammen mit der Nadelpistole einsetzbar ist, da sie von den Nadeln über das Werkstück gezogen wird, dabei jedoch keine ausreichende Bindung zur Oberfläche aufbaut. Die Binefähigkeit gegenüber Asbestfasern und PAK-behafteten Partikeln ist somit auch nicht optimal. Zudem setzt die Schleifpaste das Nadelpaket der Nadelpistole sehr schnell zu. Dies führt wiederum zu einer nicht mehr ausreichenden Leistung der Nadelpistole. Zwar kann die Schleifpaste mit dem Multimaster betrieben werden, jedoch bringt der Einsatz weder eine Zeitersparnis noch eine Verbesserung der Bindung mit sich. Da die Schleifpaste zudem sehr teuer ist – ein Gebinde von 200 g kostet ca. 16 Euro und wird bei der Bearbeitung einer Fläche von 400 bis 600  $\text{cm}^2$  verbraucht – eignet sich diese nicht für den Einsatz beim Pastenverfahren.

Honig weist zwar in einigen Fällen gute Bindeeigenschaften gegenüber freiwerdenden Partikeln auf, jedoch überwiegen auch hier die Eigenschaften, die ihn für einen Einsatz für das Pastenverfahren ungeeignet machen. Zunächst einmal besitzt Honig an sich schon eine fluide Konsistenz. Dieser Effekt wird durch Hitzezufuhr noch gesteigert. Zwar ist der Vorteil daran, dass der Honig schnell wieder durch die Bearbeitung entstandene Löcher in der Pastenoberfläche schließt, jedoch führt dies auch dazu, dass er nicht für einen Einsatz außerhalb der horizontalen Ebene geeignet ist. Zudem lässt sich der Honig nach Abschluss der Arbeiten nur sehr schlecht von der Oberfläche entfernen. Die groben Reste können zwar mit dem Spachtel entfernt werden, jedoch die übriggebliebenen Reste nicht. Auch der Einsatz eines Putzlapens ist schwierig, da der Honig sehr stark klebt und dadurch Fasern vom Putzlap-

pen an der Oberfläche haften bleiben. Zur Feinreinigung wird also in jedem Fall Wasser benötigt. Damit erweist sich die Reinigung dann jedoch als relativ gründlich. Ein weiterer Nachteil des Honigs ist die anziehende Wirkung auf Insekten wie Bienen oder Wespen. Hieraus würde sich – zumindest im Frühjahr und Sommer – eine Gefährdung des Personals durch Insektenstiche ergeben.

Das Haargel hat sich als einfach zu handhaben herausgestellt. Erstens sind die Bindeeigenschaften gegenüber Partikeln vergleichsweise gut (vgl. Tabelle 15) und zweitens sind die mechanischen Eigenschaften gut für die Bearbeitung geeignet.

**Tabelle 15: Relative Reduzierung der Partikelanzahl beim Einsatz von Haargel (TSI 8260)**

Größenklasse	Minimale Reduzierung [%]	Maximale Reduzierung [%]	Mittelwert [%]
0,3-0,5	26,3	55,5	35,1
0,5-1,0	49,2	86,5	63,2
1,0-2,0	55,9	93,4	80,3
2,0-3,0	68,8	96,8	86,9
3,0-5,0	75,4	97,8	89,7
>5	71,2	98,5	89,1

Bei der Bearbeitung mit der Nadelpistole scheint der Reinigungseffekt der Oberfläche mit Haargel sogar etwas besser zu sein als ohne Paste. Vermutlich tritt durch die Bindung der Partikel in der Paste zusätzlich ein Schmirgeleffekt auf, der die Fläche poliert. Die Reinigung mit Spachtel und Putzlappen stellt kein Problem dar.

Der Einsatz der Handcreme führte ebenfalls zu guten Reduzierungen der Ursprungsbelastung (vgl. Tabelle 16).

**Tabelle 16: Relative Reduzierung der Partikelanzahl beim Einsatz von Handcreme (TSI 8260)**

Größenklasse	Minimale Reduzierung [%]	Maximale Reduzierung [%]	Mittelwert [%]
0,3-0,5	12,0	58,7	33,7
0,5-1,0	45,3	83,2	63,7
1,0-2,0	62,7	95,7	82,0
2,0-3,0	77,3	97,0	89,1
3,0-5,0	84,1	98,7	92,4
>5	82,9	99,3	92,5

Hier war jedoch ein entscheidender Nachteil, dass man aufgrund der Undurchsichtigkeit der Creme von Beginn an schlechte Sichtverhältnisse auf die zu bearbeitende Fläche hat. Ein Vorteil wiederum ist, dass eine gewisse Resistenz gegenüber Wasser besteht. Trotzdem ist die Handcreme für eine Bearbeitung unter feuchten oder gar nassen Bedingungen ungeeignet.

Das Mehrzweckfett weist ebenfalls eine gute Bindefähigkeit gegenüber Partikeln auf. Tabelle 17 zeigt die mit dem TSI 8260 gemessenen minimalen bzw. maximalen relativen Reduzierungen im Vergleich zur Ursprungsbelastung beim Einsatz von Mehrzweckfett.

**Tabelle 17: Relative Reduzierung der Partikelanzahl beim Einsatz von Mehrzweckfett (TSI 8260)**

Größenklasse	Minimale Reduzierung [%]	Maximale Reduzierung [%]	Mittelwert [%]
0,3-0,5	-17,7 <sup>10</sup>	63,9	27,4
0,5-1,0	45,1	85,8	66,4
1,0-2,0	59,4	96,0	81,9
2,0-3,0	80,4	97,4	89,8
3,0-5,0	88,2	97,9	92,6
>5	85,2	98,4	92,9

Die Reinigung mit Spachtel und Putzlappen ist relativ einfach. Jedoch kann die Fläche mit diesen Reinigungsmethoden nicht komplett fettfrei gemacht werden. Diese ist zwar nach der Reinigung mit dem Putzlappen optisch sauber, besitzt jedoch einen dünnen Fettfilm, der die Oberfläche z. B. vor Korrosion schützt. Je nach geplantem Einsatz und anschließendem Verwendungszweck kann dies ein wünschenswerter Effekt sein. Sollte der Fettfilm für die anschließende Verwendung nachteilig sein, muss dieser mit einem geeigneten Lösungsmittel entfernt werden. Zur Vermeidung von Hautreizungen sollte darauf geachtet werden, dass das eingesetzte Fett pH-neutral ist.

Zusammenfassend kann für die **Bewertung der Pasten** festgehalten werden, dass Haargel und Mehrzweckfett für das Verfahren geeignet sind. Honig, Handcreme und Schleifpaste sind ungeeignet. Tabelle 18 stellt die bearbeitete Bewertungsmatrix dar,

<sup>10</sup> Der hier gemessene Wert lag über dem der Messung ohne Pasteneinsatz. Aufgrund der großen Abweichung ist ein Messfehler wahrscheinlich.

in der die Ergebnisse der Versuchsreihen, wie in Kapitel 2 beschrieben, eingearbeitet wurden.

**Tabelle 18: Ausgefüllte Matrix zur Pastenbewertung**

		Haargel	Honig	Handcreme	Fett	Schleifpaste
1	Kosten pro Fläche	1,00	1,00	2,00	2,00	3,00
2	einfache Transportmöglichkeit	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	einfache Handhabung bei der Benutzung	2,00	3,00	3,00	1,00	3,00
4	gute Bindeeigenschaften gegenüber Asbest und PAK	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	mechanisch gut vom Untergrund lösbar	1,00	3,00	1,00	1,00	2,00
6	gesundheitliche Unbedenklichkeit	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	Entsorgungsaufwand	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	Umweltneutralität	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00
9	allgemeine Reinigungsfähigkeit	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00
10	thermische Stabilität	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00
	<b>Beurteilungswert:</b>	1,10	1,48	1,24	1,16	1,54

Haargel wurde beim Kriterium 3 mit einer „Zwei“ bewertet. Dies liegt darin begründet, dass es durch die Bearbeitung zu einer leichten Verringerung der Viskosität kommt. Dadurch nimmt die Spritzwirkung zu. Honig wurde aufgrund seiner geringen Viskosität, seiner starken Klebewirkung und der hohen Temperaturempfindlichkeit bei den Kriterien 3, 5 und 10 mit einer „Drei“ beurteilt. Die eingesetzte Handcreme erhielt wegen ihrer Undurchsichtigkeit beim Kriterium 3 die Note „Drei“. Da sie ebenso wie Mehrzweckfett teurer im Verbrauch ist als Haargel und Honig, wird hier eine „Zwei“ vergeben. Mehrzweckfett erhält außerdem aufgrund der möglichen Umweltgefährdung genauso wie die Schleifpaste eine „Zwei“ bei Kriterium 8. Die Schleifpaste er-

hält außerdem eine „Zwei“ bei den Kriterien 5 und 9, da bei der Reinigung von nicht ebenen Flächen trotz großen Kraftaufwandes Reste auf der Oberfläche und häufig auch Farbreste verbleiben. Aufgrund ihrer Undurchsichtigkeit und der Neigung, keine große Bindung zur Oberfläche aufzubauen, wird die Paste bei Kriterium 3 mit einer „Drei“ bewertet. Da der Verbrauch an Paste pro Quadratmeter Bearbeitungsfläche zwischen 200 € und 300 € kosten würde, wird auch hier eine „Drei“ vergeben.

Die Ergebnisse der **Bewertung für das Gesamtverfahren** sind in Tabelle 19 dargestellt. Die besten Ergebnisse werden hierbei von der Nadelpistole in Kombination mit Mehrzweckfett, Haargel oder Handcreme erzielt.

**Tabelle 19: Ergebnisse der Bewertungsmatrix für das Gesamtverfahren**

	Nadelpistole in Kombination mit...					Multimaster in Kombination mit...					Wichtungsfaktor
	Haargel	Honig	Handcreme	Mehrzweckfett	Schleifpaste	Haargel	Honig	Handcreme	Mehrzweckfett	Schleifpaste	
Regen	2	3	2	1		3	3	3	3	3	0,08
Temperaturbereich	1	3	1	1		1	3	1	1	1	0,10
glatte Oberfläche	1	1	1	1		1	1	1	1	1	0,10
kantige Oberfläche	1	1	1	1		3	3	3	3	3	0,10
unebene Oberfläche	1	1	1	1		2	2	2	2	2	0,10
Kosten	1	1	1	1		1	1	1	1	1	0,14
Leistung	2	2	2	2		3	3	3	3	3	0,22
Vertikale	2	<sup>11</sup>	<sup>11</sup>	2		<sup>11</sup>	<sup>11</sup>	<sup>11</sup>	<sup>11</sup>	<sup>11</sup>	0,08
Zusatz-equipment	1	1	1	1		1	1	1	1	1	0,08
Kombination aus Paste und Gerät	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	
<b>Beurteilungswert</b>	<b>1,38<sup>12</sup></b>	<b>1,50</b>	<b>1,22</b>	<b>1,30<sup>12</sup></b>		<b>1,82</b>	<b>2,02</b>	<b>1,82</b>	<b>1,82</b>	<b>1,82</b>	

<sup>11</sup> Aufgrund der schlechten Beurteilungen bei einigen Kriterien kommen der Multimaster als Bearbeitungsgerät und Honig und Handcreme als Paste nicht in Frage. Daher wurde die Leistung in der Vertikalen nicht getestet.

<sup>12</sup> Die Beurteilungswerte sind aufgrund des eingerechneten Kriteriums „Vertikale“ nicht mit den übrigen vergleichbar. Die Beurteilungswerte ohne Berücksichtigung des Kriteriums „Vertikale“ ergeben für Haargel 1,22 und für Mehrzweckfett 1,14 und sind in dieser Form vergleichbar mit den anderen Werten.

Da der Einsatz des Multimasters auf nicht glatten Flächen schwierig ist, werden die Punkte „kantige Oberfläche“ und „unebene Oberfläche“ mit den Noten „Drei“ und „Zwei“ bewertet. Wegen der teilweise langen Bearbeitungszeit wird auch der Punkt „Leistung“ mit „Drei“ beurteilt. Durch Regen kann eine elektrische Gefährdung des Personals auftreten. Deshalb wurde auch hier die Note „Drei“ vergeben. Da man bei der Bearbeitung mit der Nadelpistole für eine Fläche von einem Quadratmeter bis zu 480 Minuten benötigt, erhält die Nadelpistole beim Kriterium „Leistung“ die Note „Zwei“. Der Einsatz in der Vertikalen ist möglich, jedoch aufwändiger im Umgang. Deshalb wurde dieser Punkt mit „Zwei“ bewertet.

Betrachtet man die Ergebnisse beider Matrizen, so wird deutlich, dass der Wirkungsgrad des Pastenverfahrens am größten ist, wenn die Nadelpistole in Kombination mit Haargel oder Mehrzweckfett zum Einsatz kommt. Andere Hilfsmittel wie Aufsätze für die Geräte oder Folien zusätzlich zur Paste haben sich als nicht praktikabel erwiesen.

Die Aufsätze führen zu keiner nennenswerten Reduzierung der Emissionen. Die Spritzwirkung der Pasten nimmt zwar ab, jedoch erschweren die Aufsätze die Arbeit. Zum einen sind die Sichtverhältnisse deutlich schlechter, zum anderen wird zumindest die Nadelpistole durch sich rückstauende Paste sehr stark verstopft. Dadurch wird die Geräteleistung stark vermindert und eine häufigere Reinigung ist erforderlich. Die Folien wurden unmittelbar nach Beginn der Arbeiten durchschlagen und teilweise in die Nadelpistole eingezogen. Hierdurch ergibt sich wiederum ein erschwertes Arbeiten. Eine Emissionsminderung im Vergleich zur Bearbeitung ohne Folie ist nicht erkennbar.

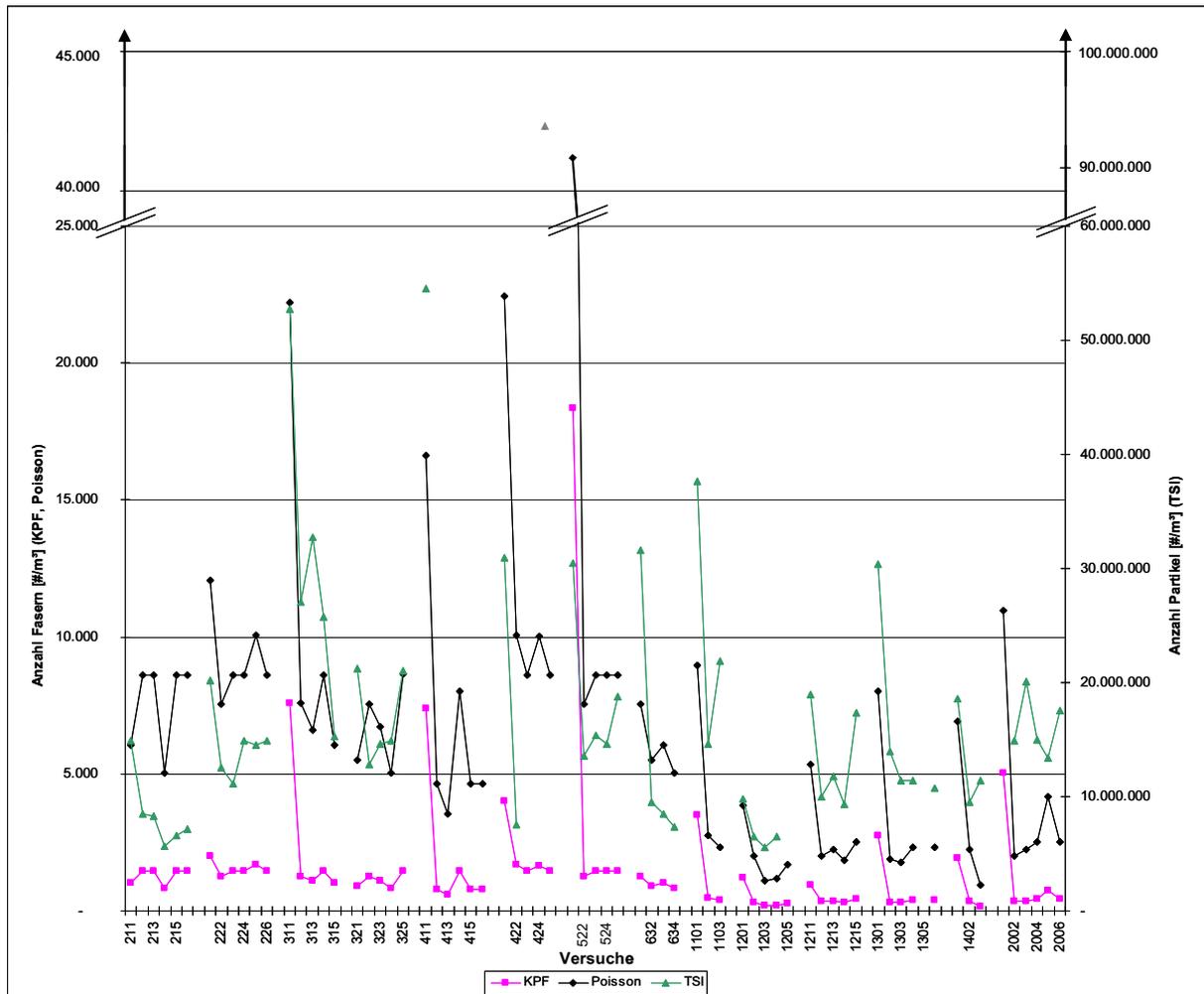
Versuche an einer vertikalen Fläche haben gezeigt, dass der Einsatz des Verfahrens auch in dieser Form möglich ist. Aufgrund der Fließneigung ist ein Einsatz in der Vertikalen jedoch schwieriger durchzuführen. Generell sollte eine Einwegschutzabdeckung auf der horizontalen Fläche unterhalb der Bearbeitungsfläche ausgelegt werden, die anschließend komplett (mit darauf getropften Pastenresten) entsorgt werden kann. Außerdem hat sich gezeigt, dass es verfahrenstechnisch von Vorteil ist, von unten nach oben zu arbeiten. In der Praxis könnte sich dies aus ergonomischen Gründen als schwer durchführbar erweisen.

Die Viskosität der eingesetzten Paste ist ein für die Bindung von Fasern und Partikeln zu berücksichtigender Faktor. Ist die Viskosität zu klein, so ist gleichzeitig die Spritzwirkung sehr hoch und die Bearbeitung einer Fläche aufgrund der Fließneigung sehr schwierig. Ist die Viskosität zu groß, so treten sehr schnell große Unregelmäßigkeiten in der Pastenverteilung auf. Dies könnte gegebenenfalls zu einer Erhöhung der Partikelemission führen.

Während der Versuchsreihen wurde mit einem Pastenaufstrich von ca. sechs bis acht Millimetern gearbeitet. In der letzten Versuchsreihe (20) wurden mit Haargel und Mehrzweckfett drei verschiedene, genau definierte Pastendicken getestet: 6 mm, 8 mm und 10 mm. Bei der Messung mit einer Fettdicke von 6 mm lag die Asbestfaseranzahl unter der Nachweisgrenze von 746 Fasern/m<sup>3</sup>. Bei sämtlichen anderen Messungen wurde eine Nachweisgrenze von maximal 422 Fasern/m<sup>3</sup> unterschritten. Da bei einem Auftrag von 10 mm Paste der Pastenverbrauch sehr hoch ist und die Bearbeitung aufgrund von Verstopfungen in der Nadelpistole, erhöhter Spritzwirkung und schlechteren Sichtverhältnissen schwieriger wird, sollte eine Auftragsdicke von 6 mm bis max. 8 mm bei der Bearbeitung eingehalten werden.

Die Ergebnisse der Hauptversuche sind grafisch in Abbildung 12 (vgl. auch Anhang 3) dargestellt. Deutlich erkennbar ist auch hier, dass die Emissionen beim Einsatz von Pasten drastisch abnehmen.

Auf der X-Achse aufgetragen sind die Versuchsnummern. Alle diejenigen, die mit einer „1“ enden, sind Versuche ohne Paste. Alle anderen wurden mit Paste durchgeführt. Genauere Informationen zu den Versuchen sind in Anhang 4 zu finden.



**Abbildung 12: KPF-Ergebnisse der Hauptversuchsreihen**

Während der Versuchsreihen 4.1 (411-416) und 4.2 (421-425) ist das TSI 8260 mehrfach, vermutlich aufgrund der zu hohen Temperaturen (das Gerät funktioniert laut Hersteller nur zuverlässig bis zu einer Temperatur von 35°C), ausgefallen. Daher sind die Messwerte hier nur unvollständig vorhanden.

## 7 Zusammenfassung

Häufig müssen in der Praxis Teile von Metallflächen bearbeitet werden, die mit asbest- oder PAK-haltigen Farben oder Farben mit unbekanntem Inhaltsstoffen bestrichen sind. Um hier eine Alternative zu bisher bestehenden – sehr aufwändigen und letztlich damit auch teuren – Verfahren zu schaffen, wurden der praktikable Einsatz und das Bindevermögen mehrerer Pasten in Kombination mit verschiedenen Bearbeitungsgeräten getestet. Bei der Umsetzung des Verfahrens war das Ziel, handelsübliche Lösegeräte und Substanzen zum Einsatz zu bringen.

In Zusammenarbeit mit dem vom HVBG eingesetzten Forschungsbegleitkreis wurden als Bearbeitungsgerät der Multimaster der Firma Fein und die Druckluft-Nadelpistole NP-AT 28 SYS der Firma Schneider ausgewählt. Bei den Pasten entschied man sich für Haargel, Honig, Handcreme, Mehrzweckfett und Schleifpaste.

Um die Versuche ohne Kontamination der Umgebung, Schädigung der Mitarbeiter oder Beeinträchtigung der Messergebnisse durch externe Faktoren durchführen zu können, wurde ein nach außen hin abgedichteter Versuchsstand entwickelt. Durch Handschuheingriffe ist das Bearbeiten der Probestücke von außen möglich. Ein Unterdruckhaltegerät sorgt für entsprechende Luftströmungen in der Messstrecke und verhindert gleichzeitig, dass Asbestfasern oder Staubpartikel im Fall von Beschädigungen der Abdichtungen aus dem Versuchsstand heraus in die Atemluft gelangen können. Die Anforderung der TRGS 519 an die Reinheit der Abluft werden durch die Filterung im Unterdruckhaltegerät klar erfüllt.

In der Messstrecke werden über Entnahmesonden zwei Luftströme unter isokinetischen Bedingungen in Anlehnung an die DIN EN 13284-1 sowie die VDI 2066-Blatt 1 entnommen. Mit einem dieser Luftströme wird mittels eines Luftprobenahmegeräts ein Kernporenfilter beaufschlagt, welches anschließend rasterelektronenmikroskopisch im Labor analysiert wird. Der andere Luftstrom wird durch ein Partikelzählgerät abgeleitet. Dieses kann Partikel ab einer Größe von  $0,3 \mu\text{m}$  kontinuierlich in einem Luftstrom detektieren und zählen. Beide Geräte wurden während der Versuche kontinuierlich betrieben. Da sowohl Flächen ohne als auch mit Pasten bearbeitet wur-

den, kann auf diese Weise eine Aussage über die Bindefähigkeit der Pasten getroffen werden.

Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass sich nicht alle Substanzen für das Pastenverfahren eignen. Anhand der Bewertungsmatrix und zusätzlicher Kriterien haben sich Haargel und Mehrzweckfett als die optimalen Pasten erwiesen.

Die Auswahl der brauchbaren Pasten hängt im Wesentlichen mit den Eigenschaften zusammen, die für die Bearbeitung wichtig sind, da sich gezeigt hat, dass alle vor Versuchsbeginn ausgewählten Substanzen bei richtiger Anwendung eine gute Bindeeigenschaft gegenüber Staub besitzen. Die Unterschiede sind hier nur sehr gering.

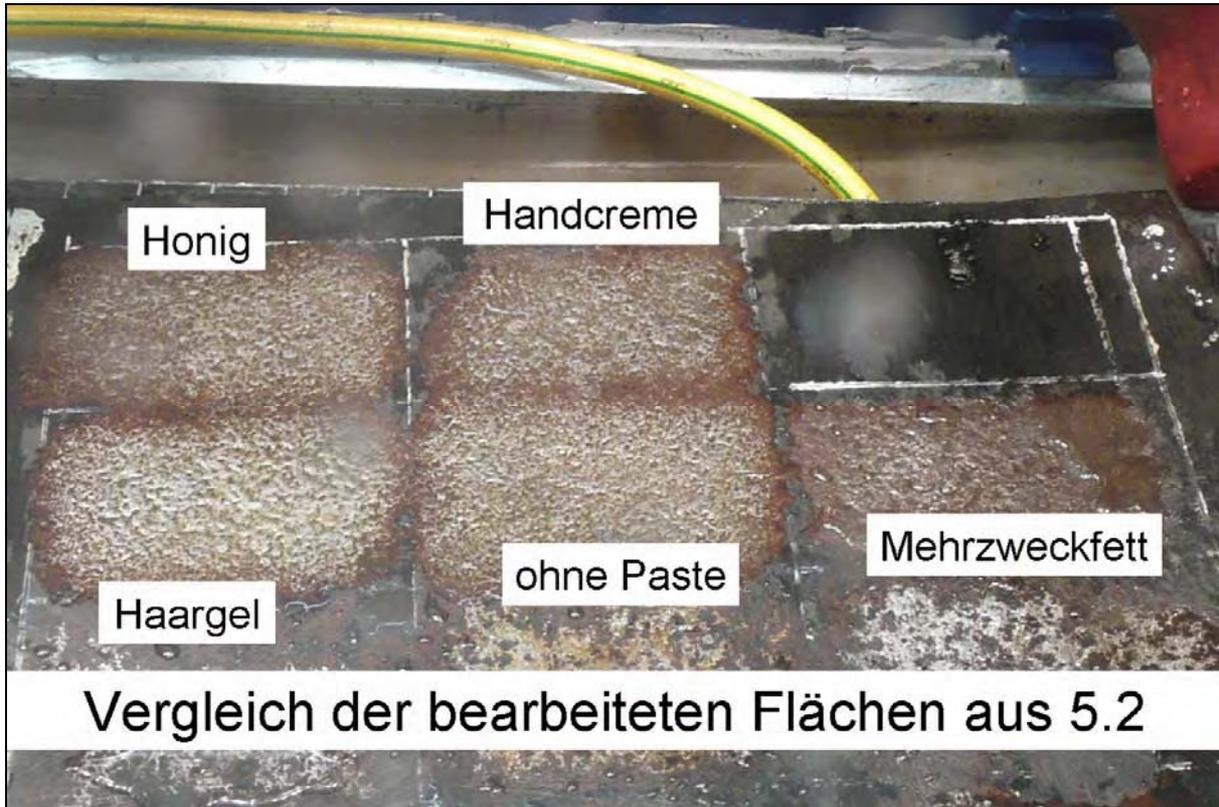
Im Rahmen der Laborversuche konnte die Effizienz des „pastösen“ Verfahrens unter unterschiedlichsten Einsatzbedingungen getestet, analysiert und bewertet werden. Insgesamt wurden ca. 100 Versuchsflächen bearbeitet. Unter Berücksichtigung aller vorliegenden Daten, kann eindeutig belegt werden, dass beim Einsatz des Pastenverfahrens zuverlässig gewährleistet wird, dass die Emission von Asbestfasern und PAK-behafteten Partikeln wesentlich reduziert wird und somit alle Voraussetzungen erfüllt sind, um als Verfahren geringer Exposition nach BGI 664 geprüft und anerkannt zu werden.

Großeinsätze und ein Antrag zur Aufnahme in die BGI 664 gehören zur Aufgabenstellung der zweiten Projektphase. Wir bitten um Zustimmung, das Projekt aufgrund der bisherigen positiven Ergebnisse weiter durchführen zu dürfen.

## Anhang

Anhang 1: Fotos zur Versuchreihe 5.2 .....	A II
Anhang 2: TSI 8260 Zählergebnisse der Versuchsreihe 5.2 .....	A VII
Anhang 3: Ergebnisse der Hauptversuchsreihen .....	A VIII
Anhang 4: Übersicht über die durchgeführten Hauptversuchsreihen .....	A IX

**Anhang 1: Fotos zur Versuchreihe 5.2**

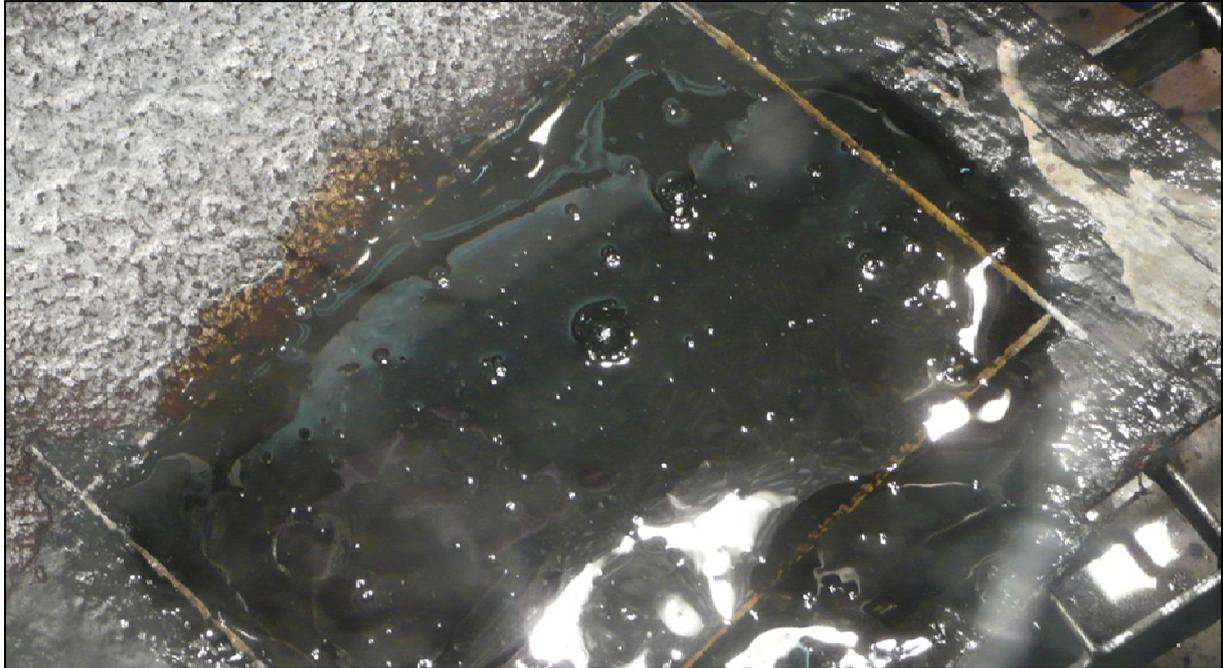




Haargel



Bearbeitung mit Haargel



**Honig**



**Bearbeitung mit Honig**



**Handcreme**



**Bearbeitung mit Handcreme**

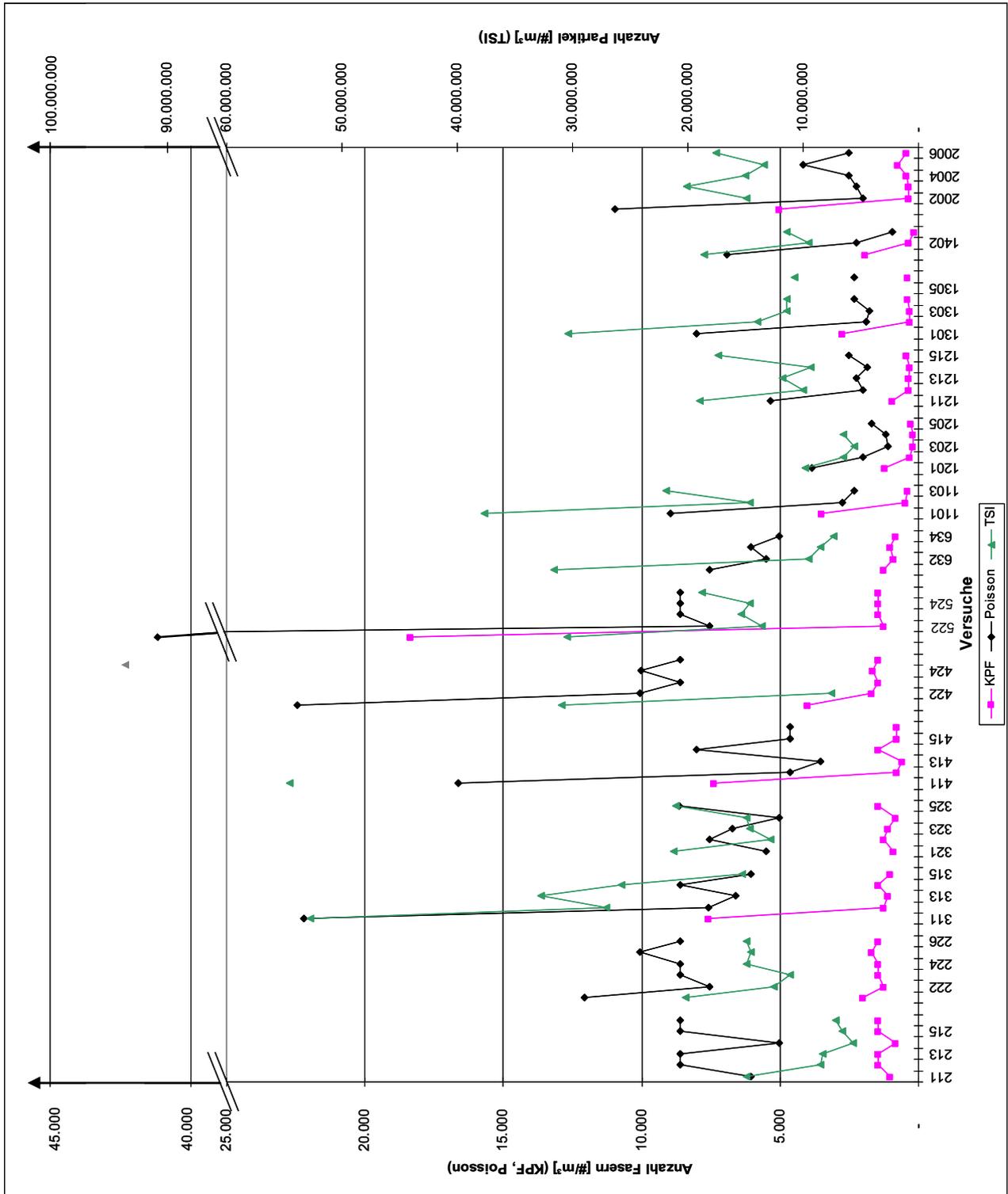


**Anhang 2: TSI 8260 Zählergebnisse der Versuchsreihe 5.2**

		<b>521</b>	<b>522</b>	<b>523</b>
Datum		04.08.2008	04.08.2008	04.08.2008
Volumen [m <sup>3</sup> ]		0,30142	0,4238	0,3573
$\Sigma$				
>0,3		30.441.994	13.572.254	15.362.638
>0,5		13.974.619	2.406.142	3.020.254
>1		6.537.801	822.488	999.595
>2		2.569.664	277.559	330.881
>3		1.244.293	128.634	151.147
>5,0		316.941	37.359	48.447
$\Delta$				
0,3-0,5		16.467.375	11.166.112	12.342.384
0,5-1,0		7.436.818	1.583.654	2.020.659
1,0-2,0		3.968.137	544.929	668.714
2,0-3,0		1.325.371	148.925	179.734
3,0-5,0		927.352	91.275	102.700
>5		316.941	37.359	48.447

		<b>524</b>	<b>525</b>	
Datum		04.08.2008	04.08.2008	
Volumen [m <sup>3</sup> ]		0,3632	0,3509	
$\Sigma$				
>0,3		14.603.395	18.808.012	
>0,5		3.157.885	4.558.721	
>1		981.348	1.491.658	
>2		246.338	372.158	
>3		92.492	136.772	
>5,0		24.517	28.719	
$\Delta$				
0,3-0,5		11.445.510	14.249.291	
0,5-1,0		2.176.537	3.067.063	
1,0-2,0		735.010	1.119.500	
2,0-3,0		153.846	235.386	
3,0-5,0		67.975	108.053	
>5		24.517	28.719	

Anhang 3: Ergebnisse der Hauptversuchsreihen



**Anhang 4: Übersicht über die durchgeführten Hauptversuchsreihen**

Nr.	KPF	Poisson	TSI	Gerät	Paste	Sonstiges
211	1.007	6.034	14.858.756	MM	keine	
212	1.439	8.621	8.523.263	MM	Haargel	
213	1.439	8.621	8.273.936	MM	Honig	
214	836	5.029	5.700.792	MM	Handcreme	
215	1.439	8.621	6.606.959	MM	MZ-Fett	
216	1.439	8.621	7.214.910	MM	Schleifpaste	
221	2.014	12.069	20.157.625	MM	keine	
222	1.259	7.543	12.593.623	MM	Haargel	
223	1.439	8.621	11.091.418	MM	Honig	
224	1.439	8.621	14.860.642	MM	Handcreme	
225	1.678	10.057	14.509.705	MM	MZ-Fett	
226	1.439	8.621	14.950.247	MM	Schleifpaste	
311	7.593	22.191	52.694.100	N	keine	
312	1.265	7.583	27.076.494	N	Haargel	
313	1.104	6.622	32.755.586	N	Honig	
314	1.438	8.621	25.754.044	N	Handcreme	
315	1.006	6.034	15.264.520	N	MZ-Fett	
321	916	5.486	21.255.263	N	keine	
322	1.259	7.543	12.812.717	N	Haargel	
323	1.119	6.705	14.596.599	N	Honig	
324	839	5.029	14.901.294	N	Handcreme	
325	1.446	8.667	21.027.446	N	MZ-Fett	
411	7.385	16.608	54.501.624	MM	keine	Temperatur im Versuchsstand erhöht
412	774	4.642	Fehlmessung	MM	Haargel	
413	591	3.550	Fehlmessung	MM	Honig	
414	1.438	8.016	Fehlmessung	MM	Handcreme	
415	774	4.642	Fehlmessung	MM	MZ-Fett	
416	774	4.642	Fehlmessung	MM	Schleifpaste	
421	4.028	22.444	30.974.552	N	keine	Temperatur im Versuchsstand erhöht
422	1.677	10.057	7.559.346	N	Haargel	
423	1.438	8.621	Fehlmessung	N	Honig	
424	1.669	10.005	94.607.294	N	Handcreme	
425	1.438	8.621	Fehlmessung	N	MZ-Fett	

Nr.	KPF	Poisson	TSI	Gerät	Paste	Sonstiges
521	18.366	41.301	30.441.994	N	keine	Regen simuliert
522	1.258	7.543	13.572.254	N	Haargel	
523	1.438	8.621	15.362.638	N	Honig	
524	1.438	8.621	14.603.395	N	Handcreme	
525	1.438	8.621	18.808.012	N	MZ-Fett	
631	1.259	7.543	31.640.842	N + MM	keine	Kombination von Nadelpistole und Multimaster
632	916	5.486	9.492.520	N + MM	Haargel	
633	1.007	6.034	8.443.913	N + MM	Handcreme	
634	839	5.029	7.335.534	N + MM	MZ-Fett	
1101	3.503	8.969	37.609.682	N	keine	Größere Bearbeitungsfläche (600 mm <sup>2</sup> )
1102	458	2.743	14.665.981	N	Haargel	
1103	387	2.321	21.929.196	N	MZ-Fett	
1201	1.199	3.840	9.815.494	MM	keine	
1202	332	1.991	6.555.054	MM	Haargel	
1203	186	1.117	5.530.349	MM	MZ-Fett	
1204	197	1.183	6.537.610	MM	Haargel	MM + Aufsatz
1205	280	1.676	Fehlmessung	MM	MZ-Fett	MM + Aufsatz
1211	959	5.344	18.972.365	N	keine	
1212	336	2.011	9.957.222	N	Haargel	
1213	373	2.235	11.771.802	N	MZ-Fett	
1214	305	1.829	9.350.504	N	Haargel	N + Aufsatz
1215	420	2.514	17.392.734	N	MZ-Fett	N + Aufsatz
1301	2.747	8.027	30.362.748	N	keine	
1302	315	1.886	13.952.337	N	MZ-Fett	
1303	296	1.775	11.371.659	N	MZ-Fett	Folie
1304	387	2.321	11.404.707	N	Haargel (neu)	
1305	Versuch abgebrochen			N	Haargel (neu)	Folie
1306	387	2.321	10.711.704	N	MZ-Fett (neu)	
1401	1.918	6.929	18.553.706	N	keine	Versuch in der Vertikalen
1402	373	2.235	9.536.693	N	Haargel	
1403	160	958	11.374.431	N	MZ-Fett	

Nr.	KPF	Poisson	TSI	Gerät	Paste	Sonstiges
2001	5.035	10.960	Fehlmessung	N	keine	
2002	336	2.011	14.885.610 <sup>13</sup>	N	Haargel	AD <sup>14</sup> 6 mm
2003	373	2.235	20.072.023 <sup>15</sup>	N	Haargel	AD <sup>14</sup> 8 mm
2004	420	2.514	14.956.225 <sup>16</sup>	N	Haargel	AD <sup>14</sup> 10 mm
2005	746	4.156	13.409.846 <sup>17</sup>	N	MZ-Fett	AD <sup>14</sup> 6 mm
2006	422	2.528	17.502.352 <sup>18</sup>	N	MZ-Fett	AD <sup>14</sup> 8 mm

<sup>13</sup> Messwert nach ca. 40 % der Bearbeitungszeit

<sup>14</sup> Auftragsdicke der Paste

<sup>15</sup> Messwert nach ca. 56 % der Bearbeitungszeit

<sup>16</sup> Messwert nach ca. 99 % der Bearbeitungszeit

<sup>17</sup> Messwert nach ca. 67 % der Bearbeitungszeit

<sup>18</sup> Messwert nach ca. 63 % der Bearbeitungszeit