



**Handte Umwelttechnik GmbH**  
**Ludwigstaler Straße 149**  
**78532 Tuttlingen**

Erforschung neuer Methoden zur Umluftführung an  
Werkzeugmaschinen für energie- und verbrauchsreduzierte  
Schichtlüftung in Werkhallen

## **ABSCHLUSSBERICHT**

über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem  
Az: 27038 – 21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von Dr.-Ing. Jakob Handte

Tuttlingen, Oktober 2010

06/02

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>27038 – 21/2</b>	Referat	Fördersumme	<b>120.000,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Erforschung neuer Methoden zur Umluftführung an Werkzeugmaschinen für energie- und verbrauchsreduzierte Schichtlüftung in Werkhallen</b>			
<b>Stichworte</b>	Energie, Hallenlüftung, Maschinenabluft/-umluft			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>18 Monate</b>	<b>28.01.2009</b>	<b>27.07.2010</b>	<b>1</b>	
Zwischenberichte	Kurzbericht / 6-monatig			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Handte Umwelttechnik GmbH Ludwigstaler Str. 149 78532 Tuttlingen		Tel	+49 7461 7011-0
			Fax	+49 7461 7011-49
			Projektleitung	<b>Dr.-Ing. Jakob Handte</b>
			Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>	keine			

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Das Vorhaben hatte zum Ziel, neue Methoden zur Reduzierung des Energie- und Medienverbrauchs von Werkhallen mit Werkzeugmaschinen-Ausrüstung zu untersuchen. Die benötigte Hallenzuluft sollte um 40% reduziert werden. Beim Frischwasser (Verdampfungsausgleich bei wasserbasiertem Kühlschmierstoff – KSS) war eine bis zu 90 %ige Reduzierung vorgesehen, ebenso bei organischen Emissionen. Allgemeine Verbesserung der Halleninnenluft sowie Erhöhung der Standzeit des KSS waren weitere umweltrelevante Ziele.

***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

- I) Grundlagen I / Strömungsverhältnisse an der WZM  
Generelle Berechnungen und Simulationen zum Umluft-Ansatz; Theoretische Analysen (Simulationen) zu möglichen Austrittsstellen von Emissionen als Grundlage zu einer ersten Festlegung sinnvoller Erfassungsstellen; Adäquate Untersuchungen zu möglichen Einleitungsstellen
- II) Grundlagen II / Strömungsverhältnisse in einer Werkhalle, in der sich eine WZM mit Kreislaufführung der Prozessluft befindet; separate Untersuchung der Szenarien:
  - eine WZM
  - mehrere WZM
- III) Grundlagen III / Untersuchungen zur Erzeugung zuverlässiger Sättigungszustände in der WZM  
Versuche / Berechnungen zur Kühlung; Bestehen eventuell Konsequenzen für das Umluftsystem (u. U. korrosive Verhältnisse)?

IV) Experimentelle Absicherung

Konzeption und Aufbau eines Laborversuchsstandes im Handte Technikum; Übertragung erfolgversprechender Simulationen/Berechnungen in entsprechende Experimente; Evaluierung der theoretischen Arbeiten; Rückführung der Versuchsergebnisse in die Modellbildung / -optimierung

V) Konzeptfixierung

Herausarbeitung eines abgesicherten Modellverständnisses vom beschriebenen Lüftungsszenario; Klare Definition aller bekannten (bzw. im Laborexperiment zugänglichen) Einflussparameter; Modell- und Versuchsdokumentation

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel. 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

### *Ergebnisse und Diskussion*

Auf der Grundlage fundierter und umfassender Simulationen und Berechnungen wurden technisch praktikable Konzepte für eine Kreislaufführung von Prozessluft an Werkzeugmaschinen erarbeitet. Eine Evaluierung in einer realen Produktionsumgebung zeigte die volle Praxistauglichkeit der gefundenen Lösungsansätze.

Alle Lösungsansätze sind detailliert theoretisch untersetzt. Zum Teil wurden zu Validierungszwecken auch verschiedene Szenarien gegenübergestellt. Davon ausgehend kann von einer guten Verallgemeinerbarkeit bzw. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf interessierte Anwender ausgegangen werden.

Im Einzelnen wurden folgende Projektziele erreicht:

- Reduzierung der (bisher als Verdampfungsausgleich bei wasserbasierten KSS benötigten) Frischwassermenge an der WZM um bis zu 90 % → Allerdings lassen die Versuche erwarten, dass durch das Wegfallen der bisherigen Verdunstungskälte zusätzliche Kühltechnik installiert werden muss.
- Reduzierung der C-org-Emission in Abhängigkeit von der Schmierungsart um bis zu 90 %
- Reduzierung der benötigten Zuluft um bis zu 40 %
- Reduzierung der Schadstoffemission aus der WZM in Abhängigkeit von der Schmierungsart z. T. über 50 %.
- Die Ergebnisse lassen eine Verbesserung der Halleninnenluft erwarten. Für einen großtechnischen quantitativen Nachweis fehlten im Projekt die Voraussetzungen.
- Standzeitverbesserungen beim KSS konnten während der Projektlaufzeit nicht erkannt werden. Erweiterte Versuche hierzu hätten den Projektrahmen gesprengt. Angesichts der sehr guten sonstigen Ergebnisse schmälert dies das Projektergebnis aber nur marginal.

Insgesamt ist es gelungen, gleichermaßen effektive Lösungen sowohl für wassermischbare als auch nicht-wassermischbare Kühlschmierstoffe zu erarbeiten.

### *Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation*

Das wichtigste Instrument zur Verbreitung der Ergebnisse ist unsere aktive Tätigkeit im entsprechenden VDI-Arbeitskreis, über den alle interessierten Nutzer und andere relevanten Stellen effektiv und kompetent über unsere Ergebnisse unterrichtet werden. Über diesen Kanal können auch konkrete weiterführende Maßnahmen angeschoben werden. Flankiert werden diese Aktivitäten von entsprechenden Veröffentlichungen auf unserer Homepage. Ergänzend ist angedacht, auch Möglichkeiten von Messeauftritten und Fachveröffentlichungen in Zeitschriften zu nutzen.

### *Fazit*

Generell ist die Rückführbarkeit von Prozessluft sowohl aus Systemen mit wassermischbaren als auch mit nicht-wassermischbaren Kühlschmierstoffen praxistauglich nachgewiesen. Das Projektziel ist damit vollinhaltlich erfüllt.

Insbesondere sind die anlässlich eines Besuchs bei Fa. Daimler von Herrn Dr. Schwacke / DBU in Augenschein genommenen Versuche zur Verwendung eines neuen Filtermediums (Betrieb ohne Additiv) sehr positiv verlaufen. Im Ergebnis wird eine erste größere Anlage aktuell auf das neue Filtermaterial umgerüstet. Für den Projekterfolg ist dies vor allem mit Blick auf Verfahren der Mindermengenschmierung von entscheidender Bedeutung, da auch feinste Aerosole ausgefiltert werden und sich nicht im Kreislauf aufkonzentrieren.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. VERZEICHNIS VON BILDERN UND TABELLEN</b>	<b>6</b>
<b>2. VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN UND DEFINITIONEN</b>	<b>7</b>
<b>3. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>9</b>
<b>4. EINLEITUNG</b>	<b>10</b>
<b>5. HAUPTTEIL</b>	<b>14</b>
5.1. EINZELNE ARBEITSSCHRITTE UND DABEI ANGEWANDTE METHODEN	14
5.2. TATSÄCHLICH ERZIELTEN ERGEBNISSE	32
5.3. ABWEICHUNGEN DER ERGEBNISSE VON DER ZIELSTELLUNG	32
5.4. UNERWARTET AUFGETRETENE PROBLEME	32
5.5. ÖKOLOGISCHE, TECHNOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER VORHABENSERGEBNISSE IM ABGLEICH MIT DEM STAND DES WISSENS, DER TECHNIK, DES HANDELNS UND DER GESETZLICHEN MINDESTANFORDERUNGEN	33
5.6. MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE	34
<b>6. FAZIT</b>	<b>36</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>37</b>
<b>8. ANHÄNGE</b>	<b>38</b>

## 1. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

---

### Bilder

ABBILDUNG 1: ABLUFTTECHNISCHES SZENARIO AN EINER WZM .....	10
ABBILDUNG 2: PRINZIP DER SCHICHLÜFTUNG EINER WERKHALLE .....	11
ABBILDUNG 3: ALLGEMEINE SIMULATIONSBASIS .....	14
ABBILDUNG 4: VERSCHIEDENE STRÖMUNGSSZENARIEN .....	15
ABBILDUNG 5: GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN AUF DER XY- AUSLASSEBENE .....	16
ABBILDUNG 6: DETAILANALYSE EINER ABSAUGUNG DURCH DEN SPÄNETRICHTER.....	17
ABBILDUNG 7: 80%- UND 100%- LÜFTRÜCKFÜHRUNG IN DEN ARBEITSRAUM .....	18
ABBILDUNG 8: ISOFLÄCHEN MIT GESCHWINDIGKEITEN GRÖßER ALS 1 M/S .....	18
ABBILDUNG 9: ABLUFTTECHNISCHE WIRKUNGSMECHANISMEN .....	19
ABBILDUNG 10: EMISSIONEN EINER WZM BEI EMULSIONSBEARBEITUNG .....	20
ABBILDUNG 11: EMISSION BEI ÖLBEARBEITUNG IN [MG/M <sup>3</sup> ] .....	20
ABBILDUNG 12: STOFFBILANZEN EINES ARBEITSRAUMES .....	21
ABBILDUNG 13: KONZEPT FÜR ÜBERGANG ZUM LUFTKÜHLER .....	22
ABBILDUNG 14: SIMULATION ZUR RÜCKFÜHRUNG DER GEREINIGTEN ABLUFT ÜBER DEN TRICHTER (DARGESTELLT SIND ISOFLÄCHEN MIT GESCHWINDIGKEITEN GRÖßER ALS 0,7 M/S) .....	23
ABBILDUNG 15: VERSUCHSAUFBAU I – FILTRATION VON EMULSION OHNE SIPHON, SPÄNERESISTENT ....	24
ABBILDUNG 16: VERSUCHSAUFBAU II – FILTRATION VON EMULSION OHNE SIPHON, SPÄNERESISTENT, ABSCHIEDUNG VON NEBEL .....	24
ABBILDUNG 17: VERSUCHSAUFBAU III – FILTRATION VON EMULSION OHNE SIPHON, SPÄNERESISTENT, ABSCHIEDUNG VON NEBEL .....	25
ABBILDUNG 18: AUSGANGSZUSTAND .....	25
ABBILDUNG 19: VERSUCHSDURCHFÜHRUNG MIT RÜCKFÜHRUNG.....	26
ABBILDUNG 20: VERSUCHE MITTELS MEMBRANFILTER.....	27
ABBILDUNG 21: WIRKUNGSMECHANISMUS DES ADDITIV-EINSATZES .....	28
ABBILDUNG 22: INJEKTION DES ADDITIVES ZUM SCHUTZ DER FILTERELEMENTE .....	29
ABBILDUNG 23: ANLAGENKONZEPT EINER FILTERANLAGE MIT ADDITIV-INJEKTION .....	29
ABBILDUNG 24: FINALER MUSTERAUFBAU (LINKS) UND VERWENDETE FILTERELEMENTE (RECHTS) .....	31
ABBILDUNG 25: LUFTTECHNISCHE BILANZ DES PROJEKTS (RECHTS) IM VERGLEICH ZUM STAND DER TECHNIK (LINKS) .....	33
ABBILDUNG 26: WASSERTECHNISCHE BILANZ DES PROJEKTS (RECHTS) IM VERGLEICH ZUM STAND DER TECHNIK (LINKS) .....	34
ABBILDUNG 27: PARTIKELBELASTUNG – BILANZ DES PROJEKTS (RECHTS) IM VERGLEICH ZUM STAND DER TECHNIK (LINKS) .....	34

### Tabellen

TABELLE 1: VERGLEICH VON ÖL- UND WASSER-BASIERTEN KSS .....	27
TABELLE 2: ROHGASWERTE DER ABSCHLIEßENDEN VERSUCHSREIHEN .....	30
TABELLE 3: REINGASWERTE DER ABSCHLIEßENDEN VERSUCHSREIHEN (MESSUNGS-NR. ADÄQUAT ZU TABELLE 2).....	30
TABELLE 4: ERREICHTE UMWELTRELEVANTE PROJEKTZIELE .....	32

## 2. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

---

Folgende Begriffe sind im Text bei erstmaliger Erwähnung **fett** dargestellt. Die Begriffe sind alphabetisch geordnet (nicht nach dem Auftreten im Text).

<b>Abluft</b>	Abluft ist die aus einem Raum (hier konkret aus einer Maschine/Anlage) gezielt abgesaugte Luft. Diese wird im Sinne des Projektansatzes weiter verwendet, indem diese nach entsprechender Behandlung als Sekundärluft der Anlage wieder zugeführt wird.
<b>C-org</b>	Wert für die Verunreinigung der Luft mit Organik. Nach momentanen Richtlinien ist im Maschinenumfeld eine maximale Konzentration von 2 mg/m <sup>3</sup> einzuhalten.
<b>Isoflächen</b>	Isoflächen sind Flächen, die im Raum benachbarte Punkte gleicher Merkmale oder Werte einer bestimmten Größe (im Projekt speziell Strömungsintensität) miteinander verbinden. Die Bedeutung von Isoflächen liegt in der computergraphischen Visualisierung von Skalarfeldern bzw. Gittern.
<b>KSS</b> ( <b>K</b> ühl <b>s</b> chmier <b>s</b> t <b>o</b> ff)	Kühlschmierstoffe dienen in der Fertigungstechnik beim Trennen und Umformen auf Werkzeugmaschinen der Wärmeabfuhr und Verminderung der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück durch Schmierung. Zusätzlich dienen sie bei einigen Zerspanungsprozessen zur Entfernung der Späne durch Abspülen aus dem Arbeitsumfeld. Nebeneffekt der Kühlschmiermittel kann ein Korrosionsschutz des Werkstücks sein.
<b>Mischluft</b>	Mischluft kennzeichnet in der Ablufttechnik die Mischung von Außenluft und Abluft. Diese Mischluft wird anschließend als Zuluft in den Arbeitsraum (Werkhalle) geführt. In Mischluftanlagen führt die Beimischung von Abluft tendenziell zur Verschlechterung der Luftqualität.
<b>Schichtlüftung</b>	Eine Schichtlüftung nutzt die Thermikströmung von Wärmequellen bei Arbeitsprozessen (Schichtströmung). Zur Nutzung der Thermik für den Wärme- und Arbeitsstofftransport vom Arbeitsbereich in den darüber liegenden Raumbereich (Schadstoffanreicherungsbereich) und zum Aufbau einer weniger belasteten Schicht im Arbeitsbereich muss die Zuluft impulsarm (Austrittsgeschwindigkeit $\leq 0,5$ m/s) nahe dem oder besser im Arbeitsbereich zugeführt werden. Dabei dürfen die Thermikströme von den Zuluftstrahlen nicht durch Querströmungen gestört wer-

den. Der Zuluftstrom aus Schichtluftdurchlässen oder Diffusoren im Arbeitsbereich muss so bemessen sein, dass er für die Thermik- und Erfassungsluftströme bis zu einer Raumhöhe von ca. 2,5 m ausreicht. Auf Grund der Untertemperatur der Zuluft verteilt sich diese in Bodennähe (Schadstoffentlastungsbereich). Im Bereich der Arbeitsraumdecke werden die aufsteigenden Emissionen nahezu vollständig erfasst und abgesaugt. (siehe auch [DIN3802]).

### **Sekundärluft**

Abluft, die nach Durchlaufen eines Luftbehandlungssystems demselben Bearbeitungsraum, dem sie entnommen wurde, als Bestandteil der Zuluft wieder zugeführt wird. (zum Vergleich → siehe *Umluft*)

### **Umluft**

Umluft ist Abluft, die in ein Luftbehandlungssystem rückgeführt wird und mindestens einem Raum als Bestandteil der Zuluft wieder zugeführt wird, aus dem sie nicht entnommen wurde. (zum Vergleich → siehe *Sekundärluft*)

### **Werkzeugmaschine**

Als Werkzeugmaschine bezeichnet man alle Maschinen, die zur Bearbeitung von Werkstücken mit Werkzeugen dienen. In der Praxis werden speziell umformende, trennende (d. h. zerteilende, spanende und abtragende) und fügende Maschinen als Werkzeugmaschinen bezeichnet. Dazu gibt es die Normen DIN 8580 ff (Verfahren) und DIN 69 651 Teil 1 (Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung), die inhaltlich aufeinander Bezug nehmen.

### **Zuluft**

In der Ablufttechnik kennzeichnet Zuluft die einer Maschine / Anlage zugeführte Luft. Durch Filtern, Erwärmen, Kühlen und Be- oder Entfeuchten kann die Zuluft vorbehandelt sein.



### 3. Zusammenfassung

---

Im Umfeld von Werkzeugmaschinen (WZM) entstehen im Betrieb lufttechnisch relevante Emissionen in Form von Abwärme, Abluft und Verunreinigung derselben (Späne, Tröpfchen, Aerosole/Nebel). Für die notwendige Qualität der Hallen-Innenluft sorgen in modernen Produktionshallen spezielle Luftsysteme, die heute zumeist nach dem Prinzip der Schichtlüftung arbeiten. Bei einer typischen Werkzeugmaschine mit einem Durchsatz des Absaugsystems von z.B. 1.000 m<sup>3</sup>/h entsteht dabei allein zur Sicherstellung einer akzeptablen Luftqualität in der Halle ein Energiebedarf in Höhe von 30.000 kWh/Jahr, was einer jährlichen Emission von ca. 11.700 kg CO<sub>2</sub> entspricht. Ähnlich gravierend ist die Situation beim Wasserverbrauch. Zum Ausgleich von (bisher unvermeidbaren) Verdunstungen hat eine typische Maschine einen Wasserverbrauch von 25.000 Litern pro Jahr. Auch bei Verunreinigung der Luft mit Organik ermöglichte der Stand der Technik gerade so die Einhaltung der Normen.

Aus den Vorbetrachtungen wurde das Grundprinzip der klassischen Schichtlüftung als ursächlich für die beschriebenen Umweltprobleme herausgestellt. Dem Vorhaben lag daher die Idee zugrunde, Möglichkeiten zu erforschen, um in größerem Umfang eine unmittelbare Rückführung der Prozessluft direkt in die WZM zu erreichen (Kreislaufführung).

Es wurden detaillierte Strömungsverhältnisse an der WZM (unter Einbeziehung strömungstechnischer Simulationen) analysiert. Strömungsszenarien einer Werkhalle, in der sich eine WZM mit Kreislaufführung der Prozessluft befindet, wurden betrachtet und letztlich wurden Versuche zur Parametrierung eines Kreislaufsystems mit dem Ziel der Erzeugung zuverlässiger Sättigungszustände in der WZM durchgeführt.

In langwierigen Versuchsreihen und nach mehrfachen technischen Überarbeitungen wurde letztlich eine Lösung gefunden, die in Abhängigkeit von der Schmierungsart eine Reduzierung des Frischwasserverbrauchs und der C-org Emissionen um bis zu 90 %, der Schadstoffemissionen aus der WZM um bis zu 50 % und eine Reduzierung der benötigten Zuluft um bis zu 40 % erlaubt. Letzterer Wert kann 1:1 in Einsparung an Versorgungsenergie (s. o) umgerechnet werden. Auch eine Verbesserung der Halleninnenluft wird angenommen, konnte aber im Rahmen des Projekts nicht tiefgreifender quantitativ untersucht werden.

Insgesamt wurde damit zum einen nachgewiesen, dass eine Kreislaufführung von Prozessluft an WZM ohne Verschlechterung der Fertigungsergebnisse der WZM prinzipiell möglich ist. Es wurden praktikable technische Lösungsansätze präsentiert, die sich auch unter sehr praxisnahen Bedingungen als funktionsfähig und robust erwiesen haben. Zudem sind die gefundenen Lösungen für den Anwender (v. a. aufgrund der immensen Ressourceneinsparungen) auch ökonomisch sinnvoll.

#### 4. Einleitung

Im Umfeld von Werkzeugmaschinen (WZM) entstehen im Betrieb lufttechnisch relevante Emissionen in Form von Abwärme, Abluft und Verunreinigung derselben (Späne, Tröpfchen, Aerosole/Nebel).

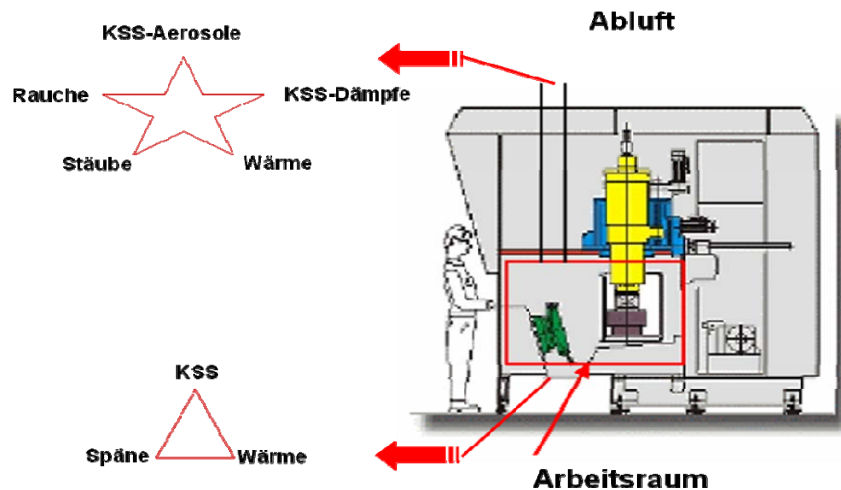


Abbildung 1: Ablufttechnisches Szenario an einer WZM

Gemäß [BGR 143] hat der Unternehmer dafür zu sorgen, dass unter Berücksichtigung von Fertigungsverfahren, KSS und Einsatzbedingungen Sicherheitsmaßnahmen derart getroffen werden, dass die Atemluft des Werkers frei von gesundheitsgefährlichen Stoffen und KSS-Dämpfen, -Nebeln oder -Rauchen ist.

Zur Beseitigung von Wärme- und Stofflasten aus dem Arbeitsbereich von Werkzeugmaschinen hat sich die sog. Schichtlüftung unter Nutzung der Thermikluftströme als leistungsfähiges und über weite Bereiche sehr effizientes Luftführungskonzept bewährt. Es wird in der [DIN3802] beschrieben.

Der Grundgedanke dieses Luftführungskonzeptes geht von der Ausbildung zweier Strömungsbereiche mit unterschiedlicher Qualität in einer Fertigungshalle aus. Die untere Schicht mit dem Arbeitsbereich verfügt über nahezu Zuluftqualität und wird auf eine Höhe um 2,5 m eingestellt (nicht zu hoch aber zuverlässig über der Körperhöhe der Anlagenbediener). Aus den Maschinen abgesaugte Wärme- und Stofflasten gelangen in den oberen Hallenbereich und bilden dort die zweite, belastete Luftschicht.

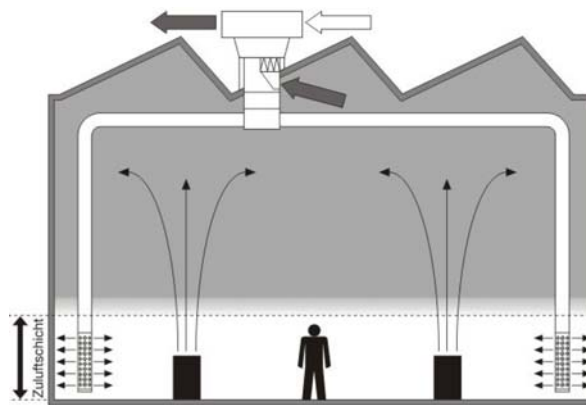


Abbildung 2: Prinzip der Schichtlüftung einer Werkhalle

Die stabile Ausbildung der unteren Luftschicht (Zuluftschicht), wird dadurch erreicht, dass im Arbeitsbereich genau so viel kühlere Zuluft eingebracht wird, wie durch die Maschinenabsaugung in den oberen Luftbereich gelangt.

Diese Vorgehensweise funktioniert technisch, hat allerdings prinzipbedingt gravierende umweltrelevante Nachteile:

Die maximal zulässige Belastung der Maschinenzuluft beträgt  $\frac{1}{5}$  des erlaubten Grenzwertes für organische Belastungen <sup>1</sup> (vgl. auch nachf. Abschn. zu organischen Belastungen). Es ist also erforderlich, durch Zuluft für eine entsprechende Verdünnung zu sorgen, wozu wiederum ein entsprechender Luftstrom als Abluft die Halle verlassen muss.

Diese Abluft bedingt einen nicht unerheblichen Energiebedarf.

In Vorversuchen haben wir ermittelt, dass 1 m<sup>3</sup>/h der aus der Maschine abgesaugten Luft pro Jahr <sup>2</sup> einen Energiebedarf (im Wesentlichen Antriebsenergie und Heizleistung) in der Größenordnung von 30 kWh hat.

Bei einer typischen Werkzeugmaschine mit einem Durchsatz von z.B. 1.000 m<sup>3</sup>/h entsteht also nur für die Umluft ein Energiebedarf in Höhe von 30.000 kWh.

Eine saubere Trennung der Energieanteile für Lüfterantrieb und Hallenheizung ist nur eingeschränkt möglich, da zum einen systematische Untersuchungen hierzu bisher fehlen und andererseits eine Abhängigkeit von den realen Verhältnissen vor Ort besteht. Zum Zwecke der Modellrechnung wird daher ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 0,39 kg/kWh (arithmetischer Durchschnitt <sup>3</sup>) zugrunde gelegt.

<sup>1</sup> gem. MAK-Wert (diese werden momentan als DIN 3802 überarbeitet, gelten aber zunächst weiter als Richtwert)

<sup>2</sup> modellhaft mit 4.000 h/Jahr gerechnet (= 250 Arbeitstage x 16 Stunden)

<sup>3</sup> Eine kWh Heizleistung verursacht ca. 0,25 kg CO<sub>2</sub> bei einer Gasheizung und ca. 0,36 kg CO<sub>2</sub> bei einer Ölheizung. Mit dem derzeitigen deutschen Energiemix werden pro kWh Strom 0,55 kg CO<sub>2</sub> erzeugt.

Die o. g. charakteristische Maschine erzeugt also pro Jahr ca. 11.700 kg CO<sub>2</sub> ausschließlich für die Sicherstellung einer akzeptablen Luftqualität in der Halle.

Der Wert steigt linear zur Anzahl der Maschinen in der Halle. In Vorgesprächen wurden selbst bei mittelständischen Firmen 10 und mehr Maschinen in einer Halle vorgefunden.

Da die Lüftung nicht ausschließlich maschinengekoppelt ist, kann auch mit optimierten Methoden keine 100%-ige Eliminierung dieses Wertes erfolgen. Nach den vorliegenden Vorkenntnissen gingen wir aber davon aus, dass eine Reduzierung des momentanen Lüftungsbedarfs um ca. 40 % erreichbar sein sollte. Mit den o. g. Zahlen entspricht dies einer Einsparung von ~ 4.700 kg CO<sub>2</sub> pro Maschine und Jahr – und das sogar bei verbesserten Prozesseigenschaften und ohne Einbuße am Produkt.

Neben den o. g. energetischen Aspekten sind auch noch weitergehende Bereiche zu betrachten. So gelangen durch die intensive Vermischung des Kühlschmierstoffs mit der Luft im Maschinenraum in einer typischen Maschine (s. o.) etwa 100 Liter Wasser pro Tag in die Abluft. Der größte Anteil ist Dampf und damit nicht von den klassischen Filtern erfassbar.

Auch das Wasser wird mit der Abluft an die Umgebung abgegeben und muss nachdosiert werden.

Mit den Modellzahlen gem. <sup>2</sup> ergibt sich ein Wasserverbrauch pro Maschine von 25.000 Litern pro Jahr. Auch hier sei darauf verwiesen, dass sich selten nur eine Maschine in der Halle befindet.

Hier wurde projektvorbereitend geschätzt, mit dem neuen Verfahren diesen Wasserbedarf um 90 % reduzieren zu können.

Abschließend muss auch die Verunreinigung der Luft mit Organik betrachtet werden. Zur Gewährleistung einer zulässigen maximalen Konzentration von 2 mg/m<sup>3</sup> organischer Verunreinigung in der Maschinenzuluft müssen nach heutiger Technologie – wie oben beschrieben – erhebliche Luftmengen bewegt werden, um durch Verdünnung entsprechende Effekte zu erreichen. Dieser Wert wird mit aktueller Schichtlüftung dann erreicht, wenn eben <sup>4</sup>/<sub>5</sub> der Maschinenabluft aus der Halle entfernt werden.

Ein Großteil der organischen Fracht liegt als Dampf vor und passiert damit konventionelle Filtersysteme weitestgehend. Frachten an C-org von 3.000 mg/h im Abluftstrom sind typisch.

Für die o. g. Maschine mit einer Absaugung von 1.000 m<sup>3</sup>/h bedeutet das, dass bei einer Hallenabsaugung von 800 m<sup>3</sup>/h (entspricht <sup>4</sup>/<sub>5</sub>) und einem angenehme-

nen Durchmischungsfaktor von 0,5 der Maximalwert von 2 mg/h gerade erreicht wird.

Der Stand der Technik ermöglicht also gerade so die Einhaltung der Normen. Verbesserungen erfordern eine weitere Erhöhung der (ohnehin problematischen) Luftaustauschquote.

Auch hier versprochen die projektvorbereitenden Gedankenexperimente, dass die Emissionen an organischen Kohlenstoffverbindungen aus der Maschine substanziell reduziert werden können – wir erwarteten Reduzierungen um ebenfalls bis zu 90 %.

Aus den Vorbetrachtungen wurde also das Grundprinzip der klassischen Schichtlüftung als ursächlich für die beschriebenen Umweltprobleme herausgestellt.

Dem Vorhaben lag daher die Idee zugrunde, Möglichkeiten zu erforschen, um in größerem Umfang eine unmittelbare Rückführung der Prozessluft direkt in die WZM zu erreichen. Man spricht dabei von sog. Sekundärluft.

## 5. Hauptteil

### 5.1. Einzelne Arbeitsschritte und dabei angewandte Methoden

#### Grundlagen I / Strömungsverhältnisse an der WZM

Die Ausgangsbasis für die davon ausgehenden Untersuchungen bildete die Erstellung eines Simulationsraums, welcher eine Werkzeugmaschine grob geometrisch aber mit allen relevanten Zu- und Abluftschnittstellen abbildet. Im Verlauf des Projekts wurde dieses Modell sukzessive mit konkreten Daten versorgt und dabei kontinuierlich am realen Experiment verifiziert.

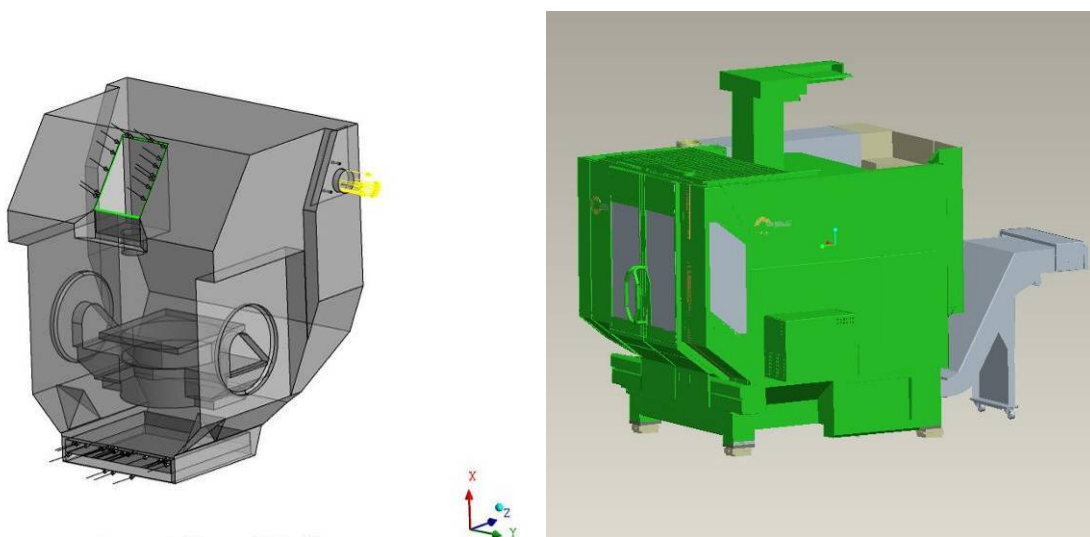


Abbildung 3: Allgemeine Simulationsbasis

Parallel hierzu erfolgte die Konzipierung eines Laborversuchsstandes, wobei dies abweichend zur Planung nicht im Handte-Technikum stattfand, sondern bei einem Anwender, welcher uns freundlicherweise seine Infrastruktur für unsere Experimente zur Verfügung stellte.

Der Vorteil dabei war, dass frühzeitig unter realen Bedingungen gearbeitet werden konnte. Vor allem bot dies für unseren Modellierungsansatz ausgezeichnete Möglichkeiten zur Verfeinerung des Simulationsmodells, die wir im eigenen Technikum nicht bzw. nur mit deutlich höherem Aufwand hätten erreichen können.

An dem Laborstand wurde auch eine komplette Iststands-Aufnahme vorgenommen, um das Modell mit einer ersten Basisparametrierung zu versorgen. Diese Iststands-Aufnahme wurde zeitnah durch entsprechende Strömungssimulationen begleitet.

In weitergehenden Untersuchungsreihen wurden (in dieser Phase zunächst ohne Luftrückführung) verschiedene strömungstechnische Varianten verglichen:

- Variante 1:     - ohne Luftrückführung  
                   - im stationären Zustand  
                   - ohne Wärmeeintrag  
                   - Absaugstelle mit 0,2878 kg/s
- Variante 2:     - ohne Luftrückführung  
                   - im stationären Zustand  
                   - ohne Wärmeeintrag  
                   - zwei Absaugstellen mit je 0,1439 kg/s
- Variante 3:     - ohne Luftrückführung  
                   - im stationären Zustand  
                   - ohne Wärmeeintrag  
                   - eine Absaugstelle mit 0,2878 kg/s  
                   - mit Leitblech im Späneförderer zur Strömungsumlenkung.

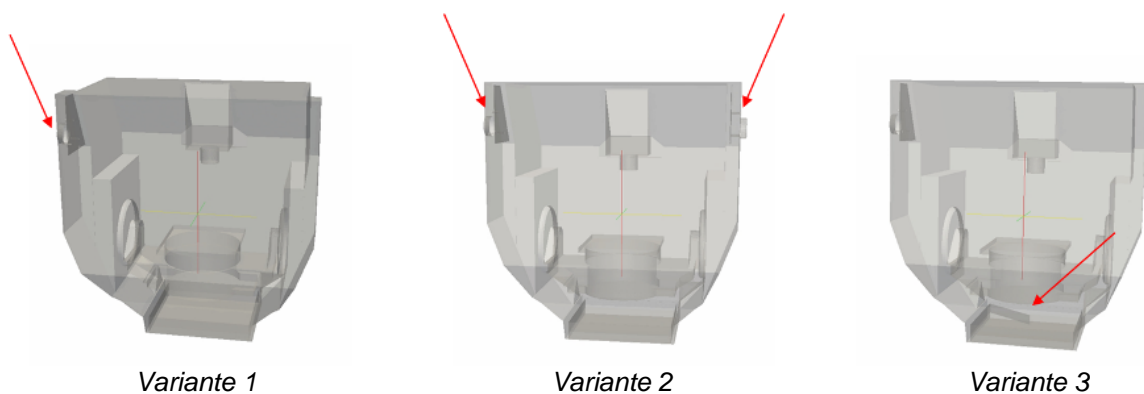


Abbildung 4: Verschiedene Strömungsszenarien

Neben der Analyse des Effekts unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten wurden speziell die Geschwindigkeitsvektoren in unterschiedlichen Schnittebenen der Maschine eingehend analysiert.

Nachfolgend ist eine solche Analyse exemplarisch dargestellt. Die visualisierten Werte beziehen sich auf die dargestellte XY-Auslassebene.



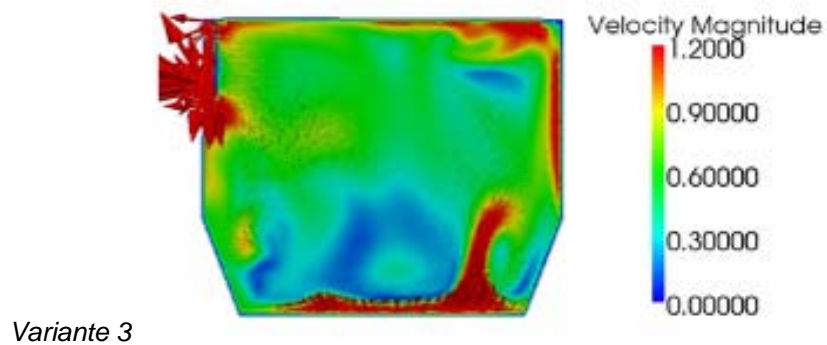
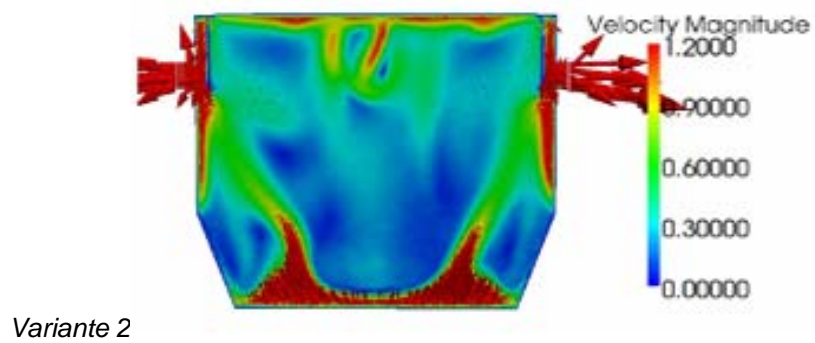
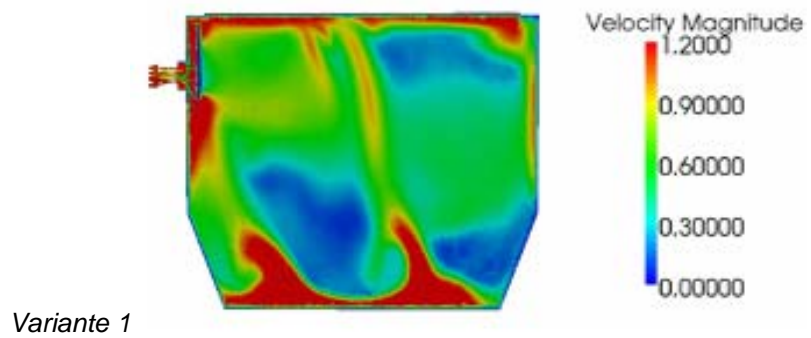
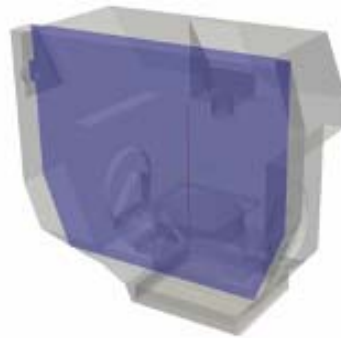


Abbildung 5: Geschwindigkeitsvektoren auf der XY- Auslassebene  
(oben...Lage dieser Ebene)



Die Absaugung durch den Spänetrichter wurde anschließend noch einer detaillierteren Analyse unterzogen.

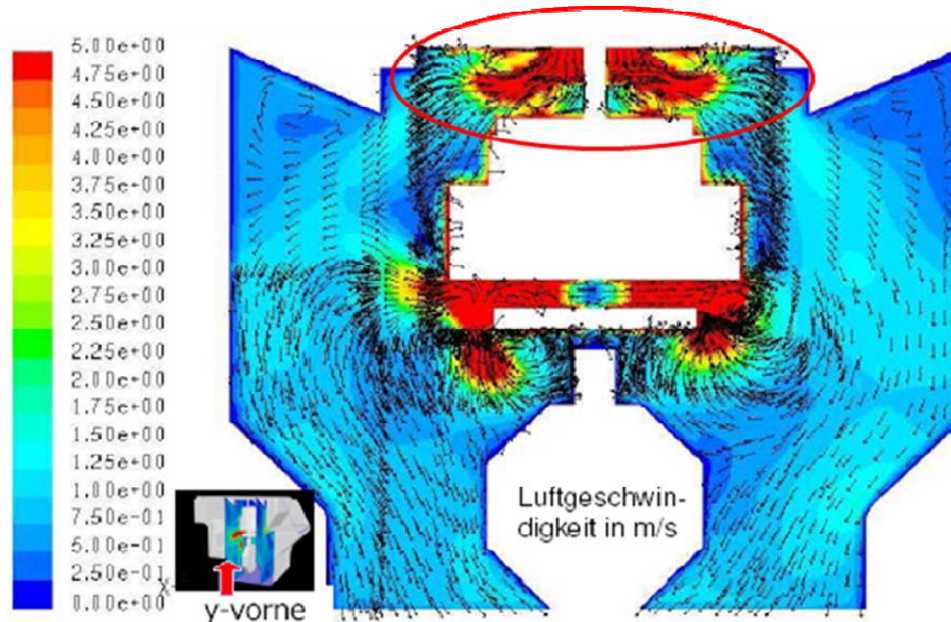


Abbildung 6: Detailanalyse einer Absaugung durch den Spänetrichter

Der in Abbildung 6 rot eingerahmte Bereich zeigt, dass eine klare Down-Flow-Strömung entsteht. Der Kopfbereich der WZM wird mit der gereinigten Abluft gespült.

Davon ausgehend wurden die Versuche bezüglich der Luftrückführung erweitert.

Variante 1:     - mit 80% Luftrückführung durch den Späneförderer  
                   - im stationären Zustand  
                   - ohne Wärmeeintrag  
                   - mit einer Absaugstelle mit 0,2878 kg/s

Variante 2:     - mit 100% Luftrückführung durch den Späneförderer  
                   - im stationären Zustand  
                   - ohne Wärmeeintrag  
                   - mit einer Absaugstelle a 0,2878 kg/s

In beiden Fällen wird der rückgeführte Volumenstrom mit einer (aus Versuchen und Erfahrungswerten gemittelten) Temperatur von 299 K (26 °C) zugrundegelegt, während die Umgebungstemperatur mit 296 K (23 °C) angesetzt wird.

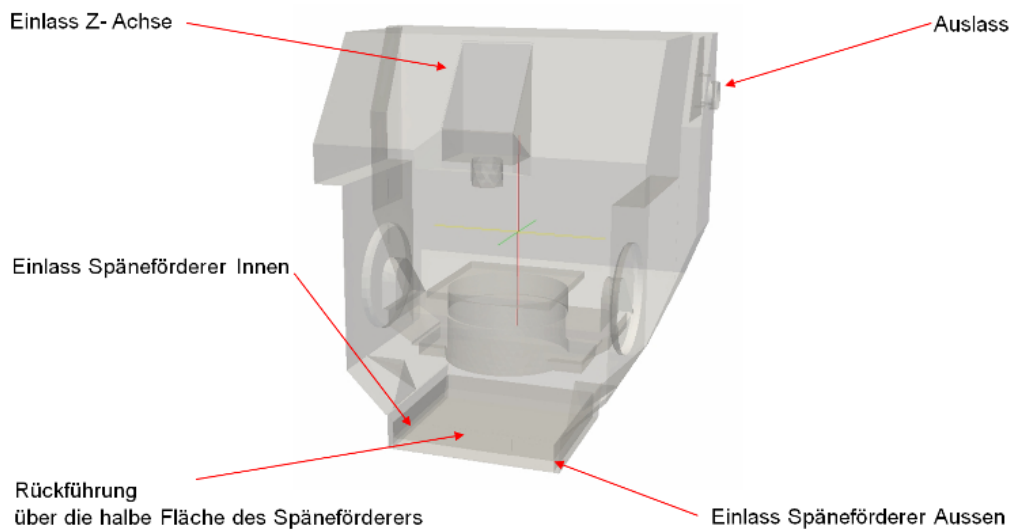


Abbildung 7: 80%- und 100%- Lüftrückführung in den Arbeitsraum

Nachfolgend ist die Simulation der Isoflächen im Vergleich von Ist-Zustand, 80%-Rückführung und 100%-Rückführung dargestellt (nachfolgende Abbildung zeigt die Isoflächen mit Geschwindigkeiten > 1 m/s).

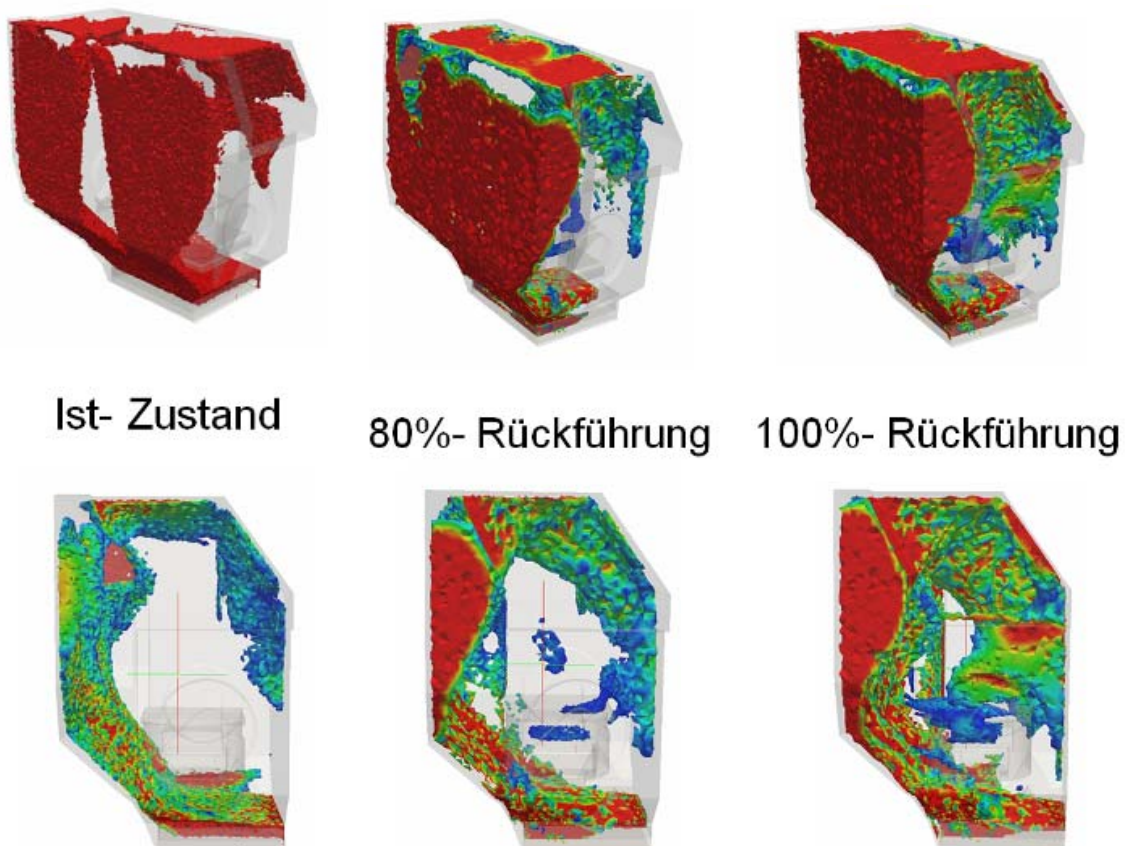


Abbildung 8: Isoflächen mit Geschwindigkeiten größer als 1 m/s

Durch Betrachten der Geschwindigkeitsverteilung auf der XZ-Mittelebene kann man erkennen, dass die Umspülung der Tür im Fall der 100%-Lufrückführung deutlich besser ausgeprägt ist. Die Luftschicht mit hoher kinetischer Energie ist hier breiter als bei der 80%-Rückführung. Die Durchspülung im Innenraum der Werkzeugmaschine ist in beiden Fällen nahezu identisch, bis auf einzelne Bereiche, welche bei der 100%-Lufrückführung mit geringfügig höheren Geschwindigkeiten durchströmt werden.

Den Vorteil der Variante mit den höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Innenraum sehen wir darin, dass die Schadstoffe, welche während des Bearbeitungsprozesses entstehen, schneller abtransportiert werden.

Diese Simulationsergebnisse flossen unmittelbar in einen erweiterten Versuchsaufbau ein und wurden dort im praktischen Versuch überprüft (s. u.).

### Grundlagen II / Strömungsverhältnisse in einer Werkhalle, in der sich eine WZM mit Kreislaufführung der Prozessluft befindet

Zunächst wurde das Systemumfeld einer eingehenden Analyse unterzogen und es wurden alle wesentlichen Einflussparameter einer kreislaufforientierten Maschinenabluft-Lösung diskutiert. Nachfolgend sind die herausgearbeiteten wesentlichen Wirkungsmechanismen zusammengefasst.

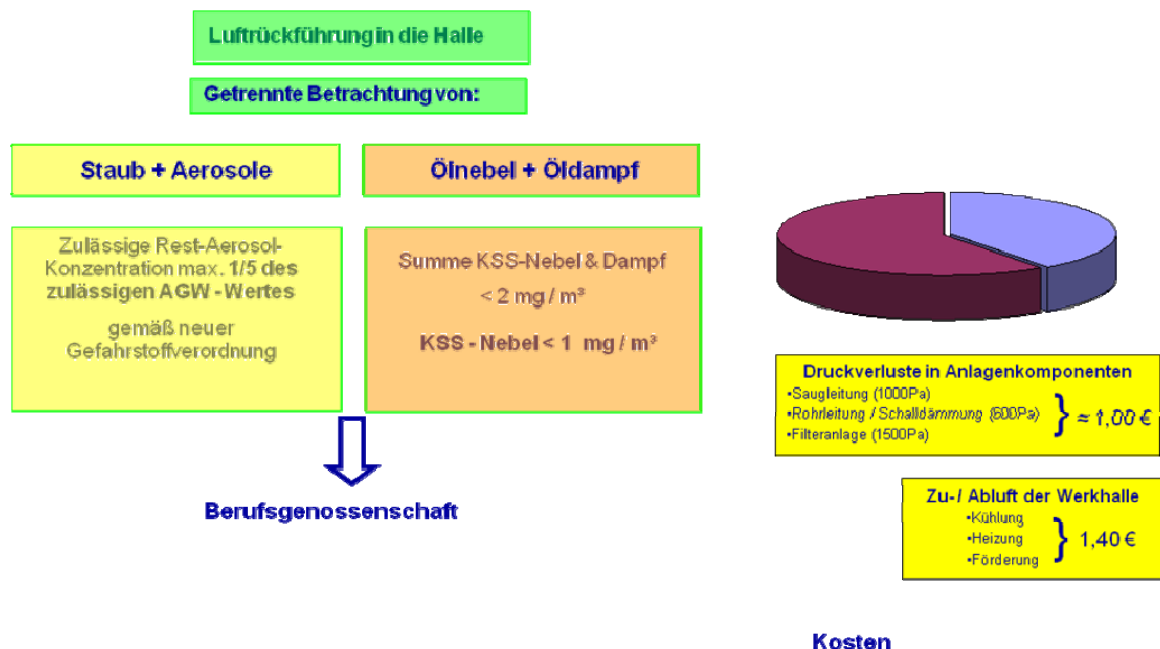


Abbildung 9: Ablufttechnische Wirkungsmechanismen

Auch wurde eine konkrete Überprüfung typischer Stoffströme vorgenommen.

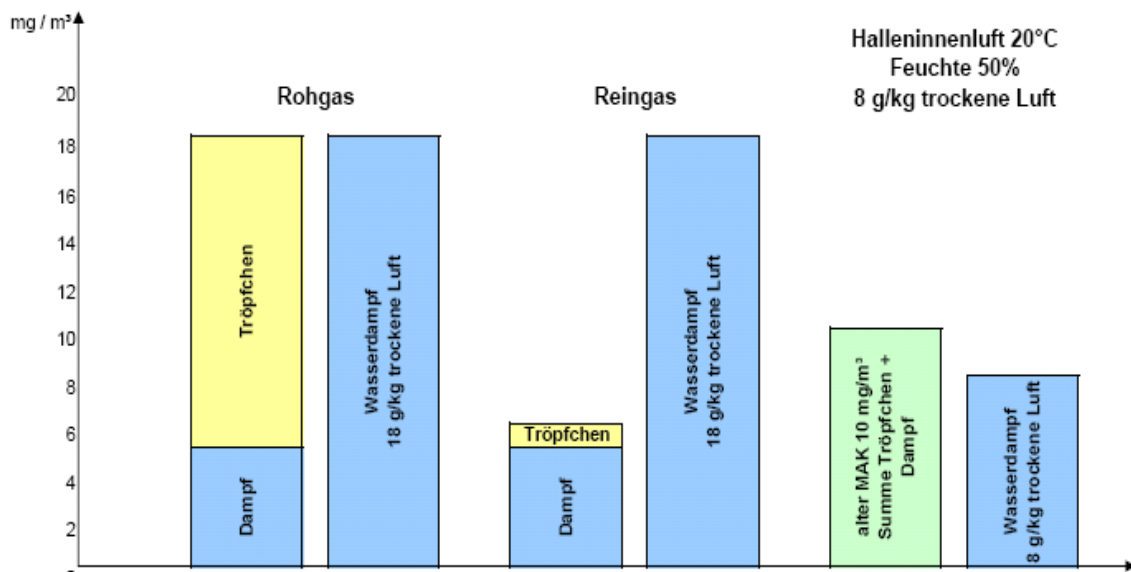


Abbildung 10: Emissionen einer WZM bei Emulsionsbearbeitung

Adäquate Untersuchungen erfolgten zur Ölbearbeitung:

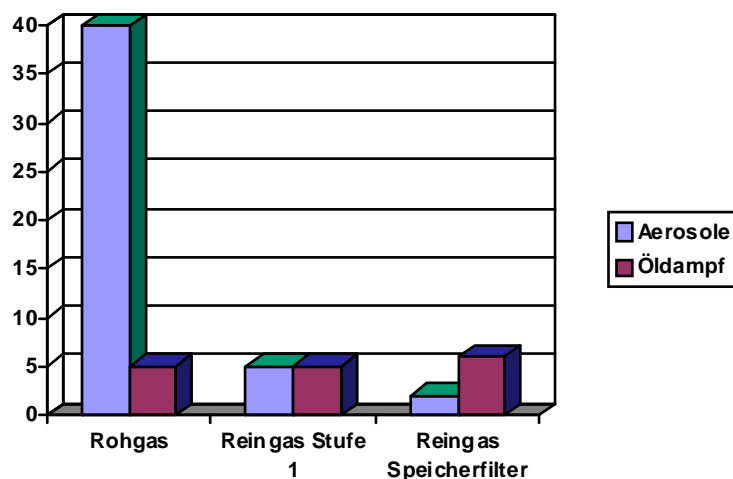


Abbildung 11: Emission bei Ölbearbeitung in [mg/m³]

Die Dampfphase nimmt im Speicherfilter durch die große benetzte Oberfläche bis zur temperaturabhängigen Sättigungskonzentration zu. Eine Abkühlung des gesättigten Abluftstromes durch aktive Kühlung führt zur Rekondensation von Öl.

Davon ausgehend wurden konkrete Stoffbilanzen in Produktionsräumen näher beleuchtet.

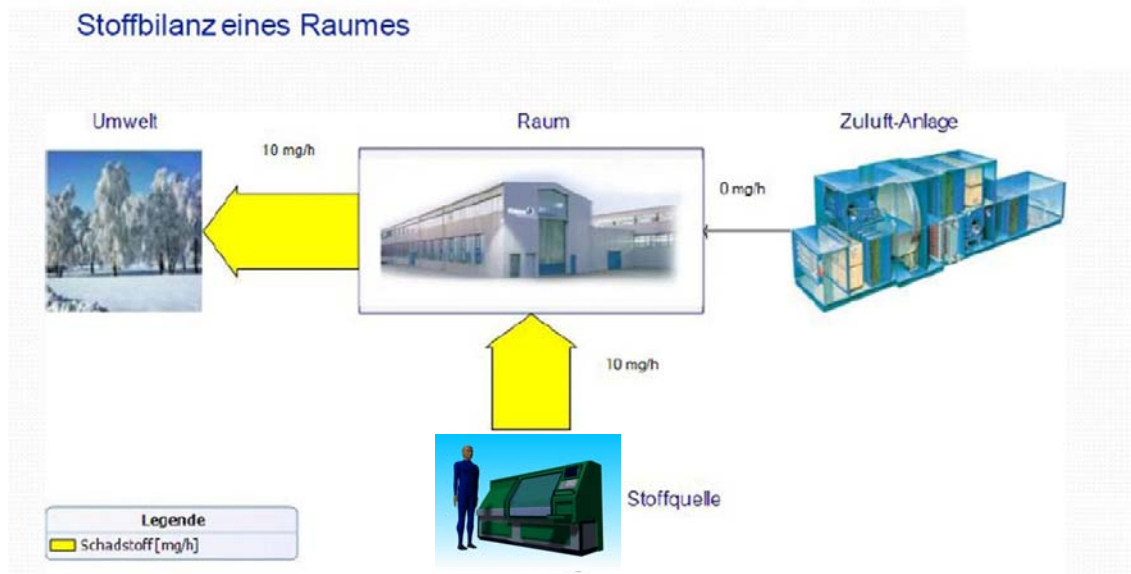


Abbildung 12: Stoffbilanzen eines Arbeitsraumes

Mit diesem Grundansatz erfolgten Modellrechnungen für verschiedene lüftungstechnische Szenarien:

**(A) Mischlüftung**

- Bei dezentralen Abscheidern Fracht 3.000 mg/h C-org
- benötigte Luftleistung der Hallenlüftung, um auf 2 mg/m<sup>3</sup> in der Mischung zu kommen → 38 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> = 1.500 m<sup>3</sup>/h
- Feuchtigkeit Zuluft 20 °C 7 g/kgtr Luft 50 %
- In der Mischluft 22 °C 11,5 g/kgtr Luft 70 %
- Δ t aus Abluft +1 °C in Mischluft

**(B) Schichtlüftung nach VDI 2066**

- Bei dezentralen Abscheidern Fracht 3.000 mg/h C-org
- benötigte Luftleistung der Hallenlüftung → 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> = 800 m<sup>3</sup>/h um mit einem Durchmischungsfaktor von 0,5, eine Rückluftkonz. von ~ 2 mg/m<sup>3</sup> zu erreichen.
- Feuchtigkeit 11,5 g/kgtr Luft 70 %

**(C) Kreislaufführung, Abluftrückführung als Prozessluft in den Arbeitsraum → Projektansatz**

- Fracht C-org 300 mg/h
- Feuchtigkeit 720 g/h
- benötigte Luftleistung der Hallenlüftung 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> ~ 500 m<sup>3</sup>/h bei Schichtlüftung
- Dies ergibt eine Konzentration am Arbeitsplatz bei einer Schichtluftführung mit einem Durchmischungsfaktor von 0,5 in Höhe von 0,3 mg/m<sup>3</sup> C-org, Feuchtigkeit von 8,5 g/kgtr Luft 55 %.

Damit wurde der Lösungsansatz einer Kreislaufführung klar bestätigt.



### Grundlagen III / Untersuchungen zur Erzeugung zuverlässiger Sättigungszustände in der WZM

Es wurden – bereits parallel zu den laufenden Arbeiten in „Grundlagen I“ – neue Abscheiderkonzepte (mit Kreislaufführung) untersucht, wobei uns zunächst die Untersuchung sinnvoller Lösungen für die Anbindung der Prozesslufterfassung an einen geeigneten Luftkühler beschäftigte. Hierzu wurde eine Konstruktion sowie ein entsprechender Musteraufbau vorgenommen (siehe nachfolgende Abbildung 13).

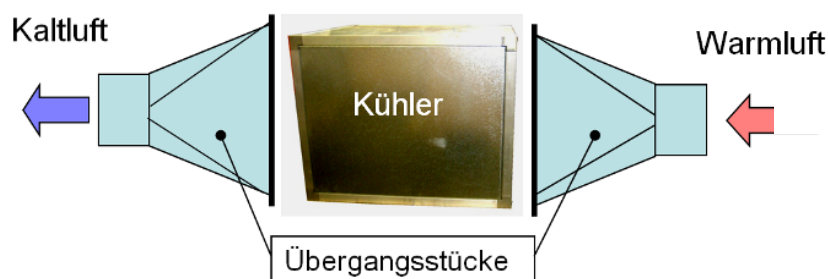
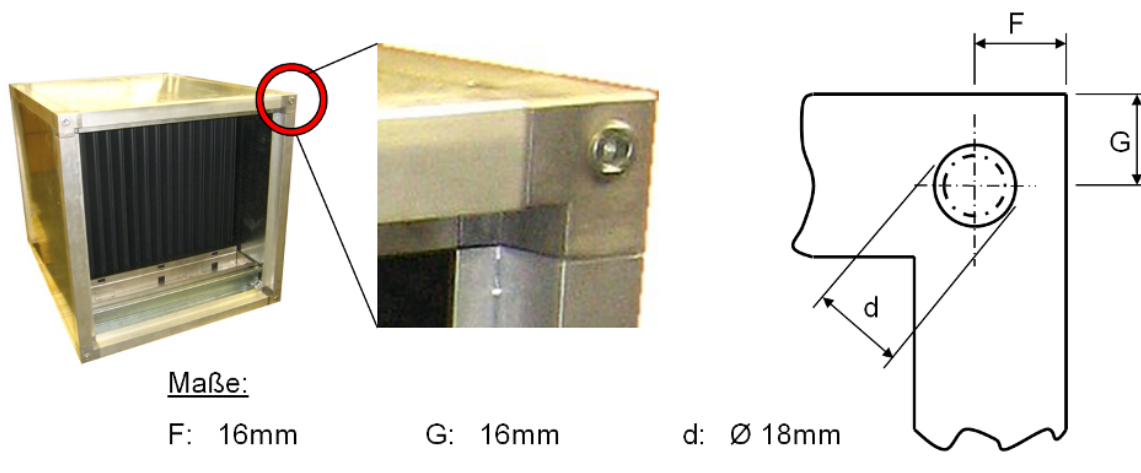


Abbildung 13: Konzept für Übergang zum Luftkühler

Die speziell in „Grundlagen I“ erarbeiteten Ansätze zur Prozesslufterfassung und Luftrückführung wurden an diesem Aufbau überprüft. Konkret flossen die Simulationsergebnisse kontinuierlich in den Versuchsstands Aufbau ein und wurden dort im praktischen Experiment überprüft.

Dabei wurden insbesondere die Strömungsgeschwindigkeiten der Ein- und Auslässe bei aktiver Rückströmungskontrolle analysiert, mit dem Ziel, die Simulationsergebnisse zu verifizieren. Die Ergebnisse bestätigten zunächst, dass die Umspülung der Tür im Fall der 100%-Luftrückführung tatsächlich deutlich besser ausgeprägt ist.

Mit diesen bestätigten Messwerten erfolgten erneute Simulationen mit dem Ziel der Detaillierung und Verfeinerung des Modellansatzes.

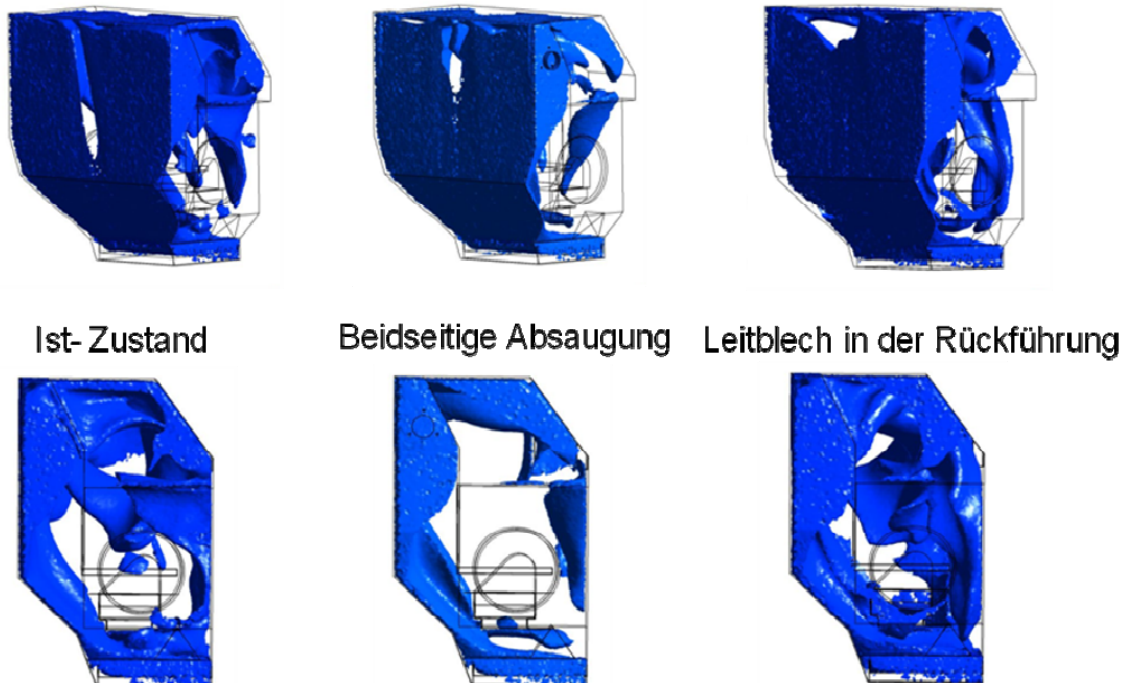


Abbildung 14: Simulation zur Rückführung der gereinigten Abluft über den Trichter (dargestellt sind Isoflächen mit Geschwindigkeiten größer als 0,7 m/s)

Durch eine geeignete Auswahl der Materialien und eine tottraumoptimierte Konstruktion traten in den Versuchen keinerlei korrosionsbedingte Störungen auf. Dieser Aspekt kann damit als beherrscht angesehen werden.

#### Experimentelle Absicherung

Nach Ermittlung und Beschaffung einer geeigneten Kühleinheit erfolgten auf dieser Basis Planung und Aufbau der Versuchsanlage. Es wurden – ausgehend von den Simulationen und dem sukzessiven Erkenntnisgewinn zwei Optimierungsdurchläufe absolviert:

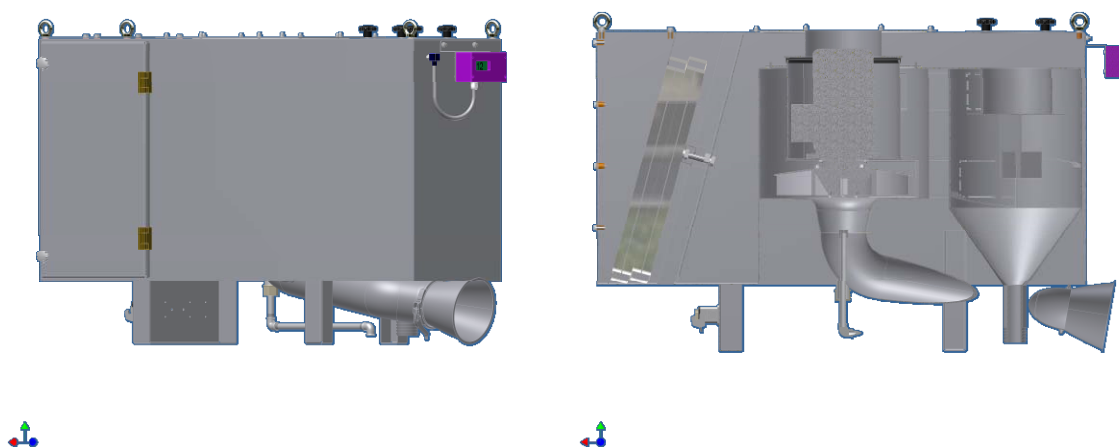


Abbildung 15: Versuchsaufbau I – Filtration von Emulsion ohne Siphon, Späneresistent

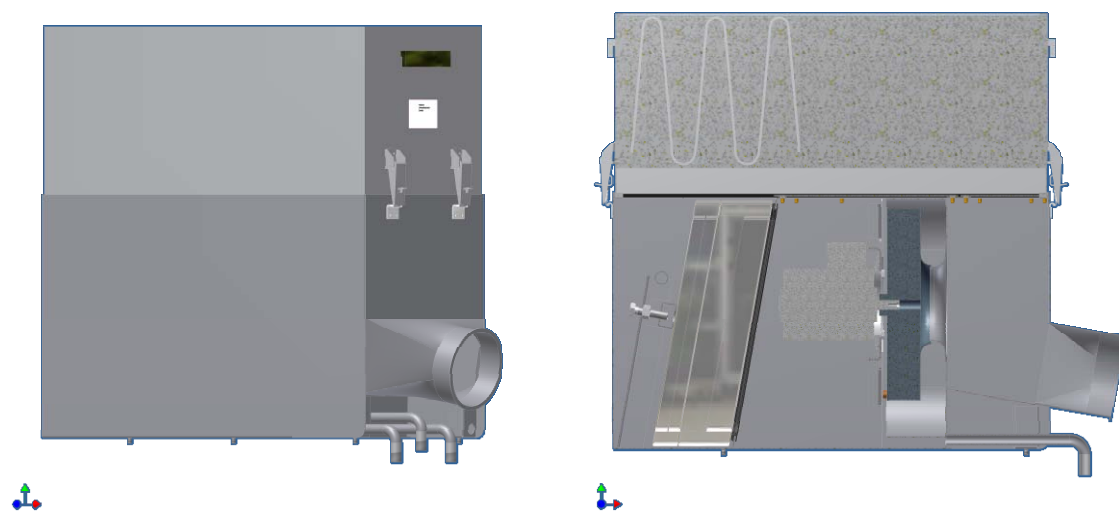


Abbildung 16: Versuchsaufbau II – Filtration von Emulsion ohne Siphon, Späneresistent, Abscheidung von Nebel



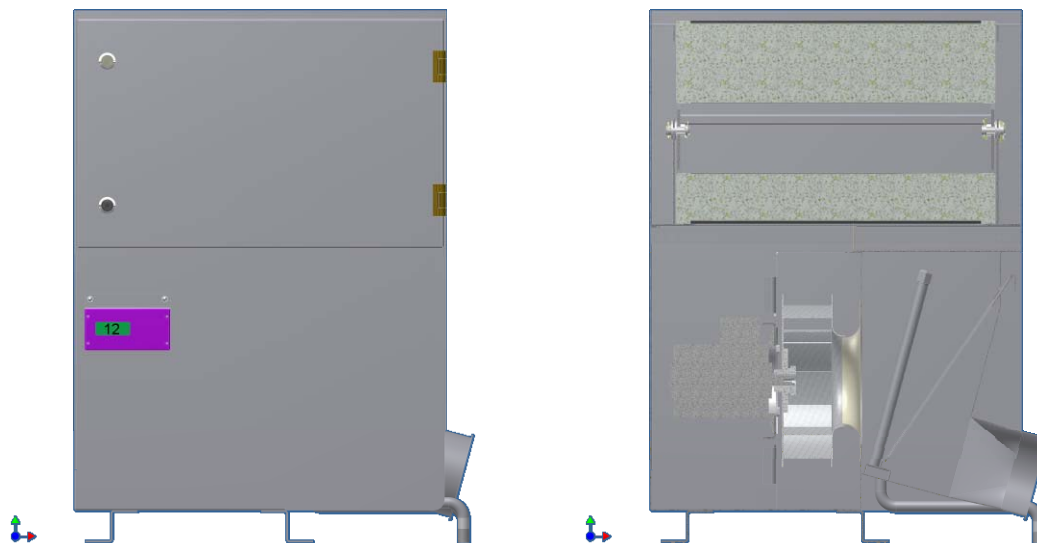


Abbildung 17: Versuchsaufbau III – Filtration von Emulsion ohne Siphon, Späneresistent, Abscheidung von Nebel

Die Kriterien zur Optimierung der Varianten wurden in parallel durchgeführten praktischen Untersuchungen gewonnen. Dabei wurden verschiedene Zustandsituationen der Luftrückführung mit und ohne Kühlsystem analysiert.

Gemessen wurden:

- Luftfeuchte (M1)
- Raumtemperatur (M2) und
- Leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe (FID-Messung, M3).

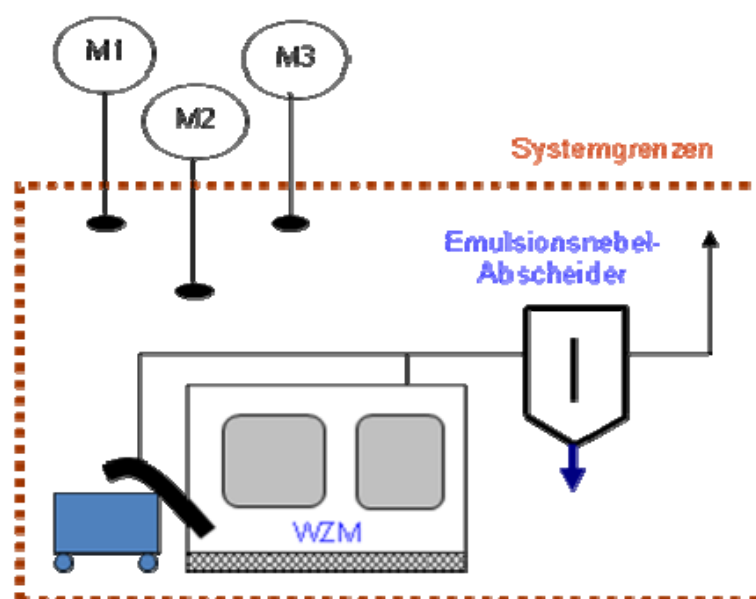


Abbildung 18: Ausgangszustand

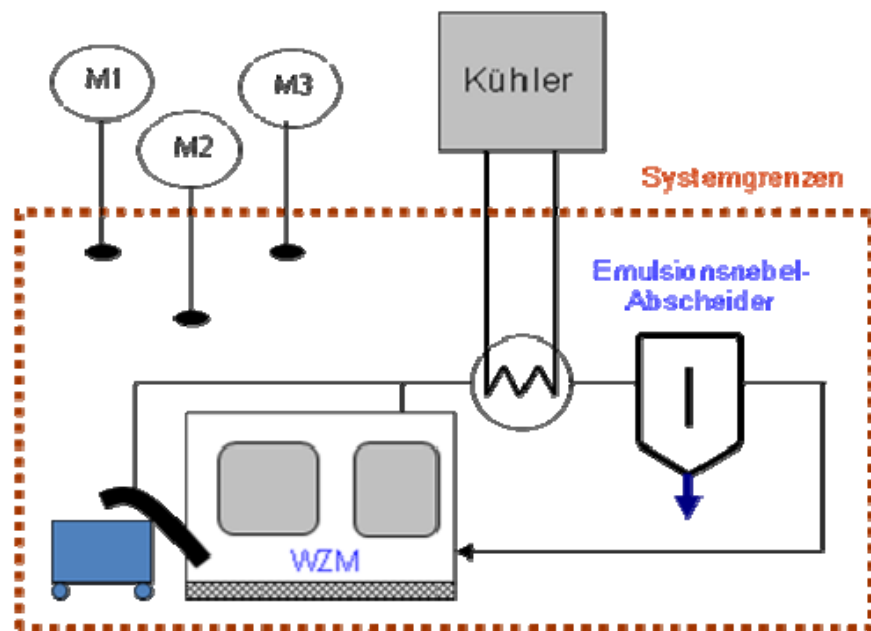


Abbildung 19: Versuchsdurchführung mit Rückführung

Nach der Aufbereitung der Messdaten und einem Zustandsvergleich vor und nach der Luftrückführung kann festgestellt werden, dass mit wasserbasierten KSS **Reduktionen des Wasserverbrauchs um bis zu 90 % (!!)** erreichbar sind.

Bei den Versuchen stießen wir allerdings auch auf das Phänomen, dass die nunmehr fehlende Verdunstungskälte sich offenbar im Energiehaushalt des Systems niederschlägt – und zwar in Form von erhöhten Medientemperaturen. Inwieweit diese Tatsache für den späteren praktischen Betrieb relevant ist, kann noch nicht abgeschätzt werden. Gegebenenfalls müsste zusätzliche Kühltechnik installiert werden, was u. U. den Gesamteffekt etwas schmälert. Hier bietet die Serienentwicklung (nach dem Projekt) noch einige Potenziale. Die physische Umsetzung dieser Details hätte jedoch den Rahmen dieses Projekts gesprengt.

Bereits ohne die abschließenden Detailarbeiten können wir festhalten, dass die Prozessluft aus Systemen, welche mit wasserlöslichen Kühlschmierstoffen arbeiten, problemlos im Kreis geführt und bei Bedarf auch an die Werkhalle abgegeben werden kann. Dieser Teil des Projektziels ist damit erfüllt.

Die ablufttechnische Funktion für wassermischbare KSS war damit zufriedenstellend gelöst, allerdings war aus früheren Entwicklungen bekannt, dass sich derartige Ergebnisse nicht zwangsläufig 1:1 auf nicht-wassermischbare KSS übertragen lassen. Insbesondere fanden wir in früheren Untersuchungsberichten Erkenntnisse, dass sich bei den Parametern „Konzentration“ und „Partikelverteilung“ (jeweils bezogen auf die Rohgaskonzentration) erhebliche Unterschiede zwischen wassermischbaren und nicht-wassermischbaren KSS zeigen können (Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich von Öl- und Wasser-basierten KSS

		Rohgas- konzentrat. mg/m <sup>3</sup>	davon Dampf mg/m <sup>3</sup>	Partikel mg/m <sup>3</sup> <10 µm	Partikel mg/m <sup>3</sup> <1 µm
Stirnkopffräsen	wg KSS	6	4	0,5 - 2	0,5
	nw KSS(Öl)	51	24	1 - 5	- 2
Außenlängsdrehen	wg KSS	13	10	0,6 - 2	0,5
	nw KSS(Öl)	80	20	1 - 10	- 4
Schleifen	wg KSS	50	17	2 - 5	1
	nw KSS(Öl)	220	30	2 - 10	-10

Zum Teil werden bei Öl-mischbaren KSS also verstärkt Feinstaerosole gebildet, die von herkömmlichen Gewirke-basierten Ölfiltern nicht zufriedenstellend zurückgehalten werden. Dies ist für die Gesamtlösung aber problematisch, da im Regelfall immer Maschinen mit unterschiedlichen Kühlschmierstoffsystemen in einer Halle in Betrieb sind. Eine Insellösung, die nur für wasserlösliche Systeme greift, hätte also nur bedingte Wirksamkeit.

Eine zweite Versuchsreihe betrachtete daher speziell Systeme, die mit nicht-wassermischbaren (also Öl-basierten) Kühlschmierstoffen arbeiten. Bei den diesbezüglichen Betrachtungen wurde vor allem der Frage nachgegangen, warum die eingesetzten Abscheider zwar gut geeignet für Aerosole sind, jedoch für Dämpfe nur mangelhafte Rückhaltung zeigen.

Wir haben zunächst mit Membranfiltern experimentiert, was allein aber noch nicht den Durchbruch brachte.

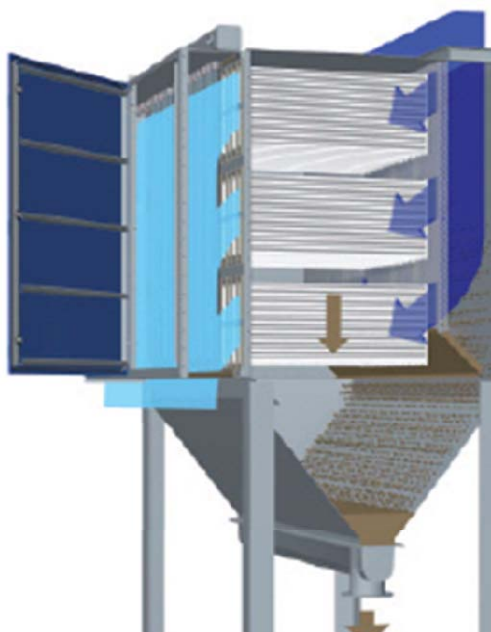


Abbildung 20: Versuche mittels Membranfilter

In langwierigen Untersuchungsreihen wurde als sinnvoller Ansatz die Kombination aus Membranfilter und einem lipophilen Additiv herausgearbeitet. Als Öl-Binder eignet sich z. B. einfache Sportplatzkreide.

Es wurde folgender Wirkungsmechanismus herausgearbeitet:

Abbildung 21 zeigt links das bisherige Szenario: Klebrige Partikel „verstopfen“ die Poren des Filtermediums. Durch das Additiv (rechts) entsteht an der Filteroberfläche eine Öl-bindende Schicht – gewissermaßen ein Precoat – welches die Öl-Tröpfchen bindet und so deren Eindringen in das Filtermedium unterbindet.

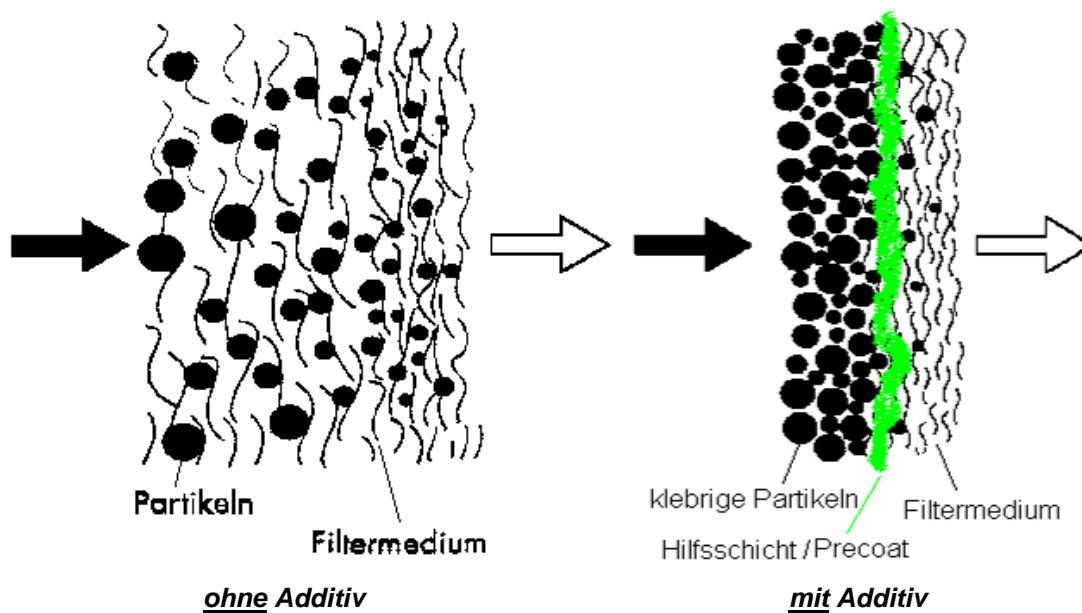


Abbildung 21: Wirkungsmechanismus des Additiv-Einsatzes

Abbildung 22 zeigt einen Versuch mit entsprechenden Filterelementen und das Zerstäuben und Eindüsen des Additivs. Mit dieser Lösung wurden Reingaswerte erreicht, die selbst den strengen Vorgaben der Automobilindustrie genügen.



Abbildung 22: Injektion des Additives zum Schutz der Filterelemente

Es ergibt sich folgendes Anlagenschema:

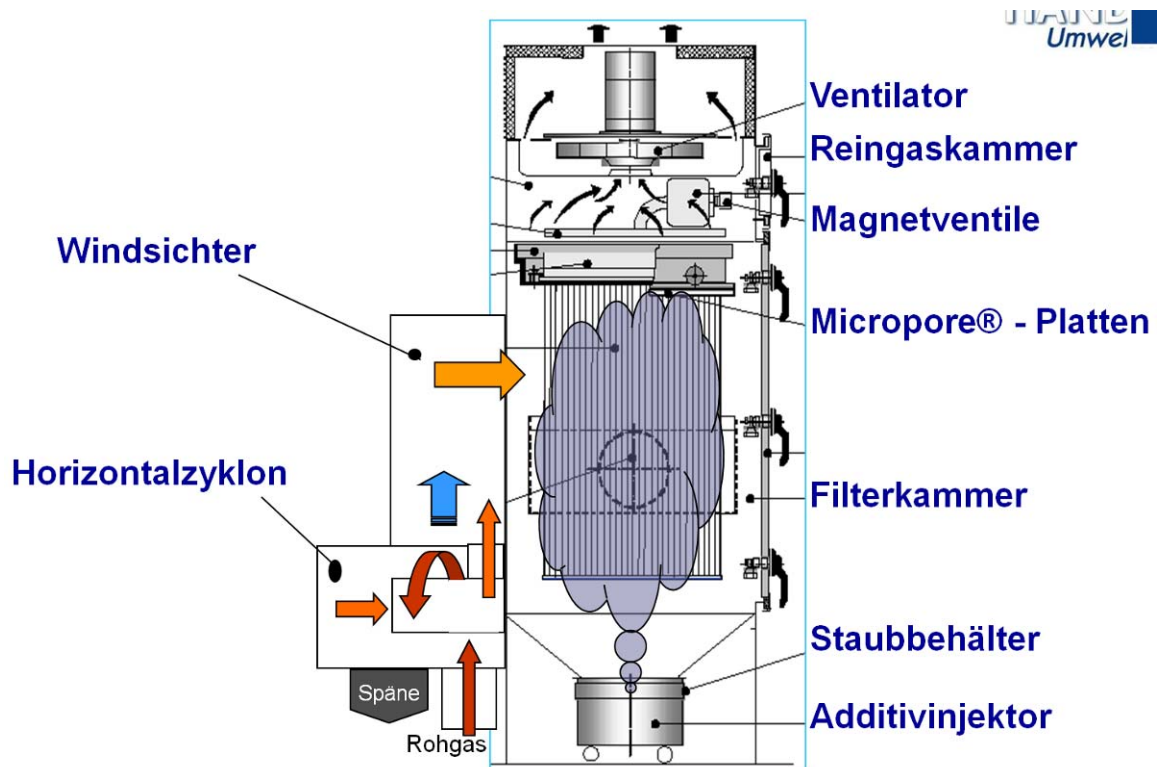


Abbildung 23: Anlagenkonzept einer Filteranlage mit Additiv-Injektion

Diese Technologie funktioniert gut, allerdings verklebt das Kreide-Öl-Gemisch nach bestimmter Zeit und ist dann unwirksam. Eine Aufbereitung ist möglich (z. B. thermisch / Kreide kann wieder für Prozess genutzt werden). Wir waren allerdings bestrebt, die Aufbereitungszyklen möglichst sehr lang zu gestalten. Eine zweite Versuchsreihe hatte daher eine Kombination aus zwei unterschiedlichen Membranen und dem Öl-Binder zum Inhalt. Dies führt zu einer signifikanten Verlängerung der Reinigungsintervalle. Dennoch blieb letztlich ein Misch-Stoff, der zusätzliche Aufbereitungskosten verursacht.

Es wurde daher ein dritter Lösungsansatz untersucht, der eine völlig neue Membran einsetzt. Mit dieser Membran ist es möglich, dass zusätzliche Öl-Binder entfallen können. Es wurde ein Testfilter (700 m<sup>3</sup>/h) aufgebaut und im Testfeld unter Praxisbedingungen erprobt. Dabei zeigen sich sehr zufriedenstellende Werte:

Tabelle 2: Rohgaswerte der abschließenden Versuchsreihen

<b>Rohgas</b>				
<b>Messung Nr.</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Messzeitraum	[Uhrzeit]	13:45-14:15	14:20-14:50	15:00-1530
<b>Mineralöl Aerosolphase</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	6,4	5,8	7,1
<b>Mineralöl Gasphase</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,8	0,6	0,4
<b>Summe Aerosol + Gasphase</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	7,2	6,4	7,5
<b>Staubpartikel</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	2,9	0,3	< 0,2

Tabelle 3: Reingaswerte der abschließenden Versuchsreihen (Messungs-Nr. adäquat zu Tabelle 2)

<b>Reingas</b>				
<b>Messung Nr.</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Messzeitraum	[Uhrzeit]	13:45-14:15	14:20-14:50	15:00-1530
<b>Mineralöl Aerosolphase</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	1,8	2,0	2,5
<b>Mineralöl Gasphase</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,8	0,8	0,6
<b>Summe Aerosol + Gasphase</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	2,6	2,8	3,1
<b>Staubpartikel</b>				
Konzentration	[mg/m <sup>3</sup> ]	< 0,2	< 0,2	< 0,2



## Konzeptfixierung

Nach den guten Ergebnissen der Abschlussversuche wurden die letztlich erarbeiteten Lösungen dokumentiert und systemtechnisch abgeglichen. Nachfolgend sind der finale Musteraufbau sowie die verwendeten Filterelemente gezeigt.

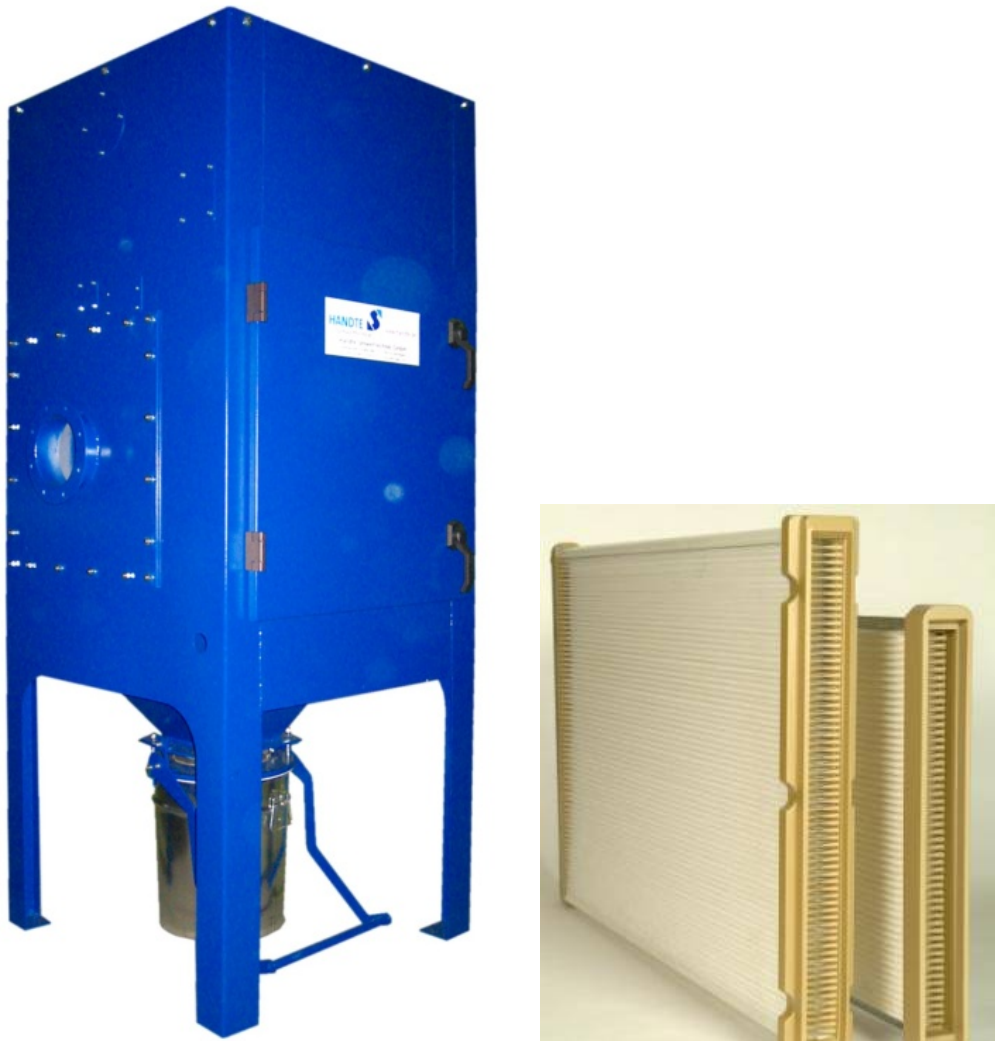


Abbildung 24: Finaler Musteraufbau (links) und verwendete Filterelemente (rechts)

## 5.2. Tatsächlich erzielten Ergebnisse

Tabelle 4: Erreichte umweltrelevante Projektziele

Parameter	Projektziel: Reduzierung um bis zu...	Erfüllung
Bei wassermischbaren KSS → Reduzierung der benötigten Frischwassermenge an der WZM als Verdampfungsausgleich	- 90 %	✓*)
Reduzierung der benötigten Zuluft (entsprechend Reduzierung des Aufwandes für Lüftungsenergie)	- 40 %	✓
Reduzierung der C-org Emission	- 90 %	✓
Reduzierung der Schadstoffemission aus der WZM	- 50 %	✓
Verbesserung der Halleninnenluft	✓***)	
Standzeitverlängerung des KSS	konnte nicht nachgewiesen werden	

\*) Gegebenenfalls mit der Konsequenz, dass zusätzliche Kühltechnik nötig wird. Für Öl-basierte Systeme ist dieser Parameter nicht von Relevanz.

\*\*) In Abhängigkeit von der Schmierungsart kann z. T. auch eine Erhöhung der Standzeit des Kühlschmierstoffes erwartet werden. Explizite Nachweisversuche in diese Richtung waren im Projektrahmen nicht möglich.

\*\*\*) Subjektiv im Versuch zu erahnen, jedoch im momentan nicht quantifizierbar.

## 5.3. Abweichungen der Ergebnisse von der Zielstellung

**Die wesentlichen Zielstellungen wurden erreicht.** Es traten keine nennenswerten Abweichungen von der Zielstellung auf. Dass die ursprünglich anvisierte Standzeitverlängerung des KSS in den Versuchen nicht gezeigt werden konnte, schmälert das gute Gesamtergebnis kaum.

Auch die veranschlagte Projektlaufzeit sowie die Kostenseite wurden nicht überschritten.

In Tabelle 4 sind die Ziele und der jeweilige Erreichungsstatus gegenübergestellt.

## 5.4. Unerwartet aufgetretene Probleme

Es traten im Wesentlichen die für ein solches Projekt typischen Probleme auf (Wiederholung von Versuchen wegen unklarer Ergebnisse, mehrfache



Redesigns etc.). Auch die Problematik der Öl-basierten Systeme war nicht völlig unerwartet, da solche Differenzen bereits bei früheren Arbeiten beobachtet worden waren.

Einzig unerwarteter Aspekt – der jedoch nicht zu wirklichen Problemen führte – war der Wechsel des Erprobungspartners während der Projektlaufzeit. Auf die Aussagekraft der Ergebnisse oder deren Allgemeingültigkeit hat dies aber keinen Einfluss.

### 5.5. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand des Wissens, der Technik, des Handelns und der gesetzlichen Mindestanforderungen

Es wurden final folgende Stoff- und Energiebilanzen aufgestellt – im Vergleich zum Stand der Technik zu Projektbeginn (jeweils links). Der Stand der Technik für die C-org Belastung entspricht der gesetzlichen Mindestanforderung. Für Wasser- und Energieverbrauch gibt es keine gesetzlichen Vorgaben. Hier dokumentiert der Stand der Technik die zu Projektbeginn verfügbaren technischen besten Lösungen. Für den Bereich „Wasser“ sei zur Vollständigkeit nochmals betont, dass ggf. zusätzliche Kühltechnik nötig wird.

#### Abluft / Umluft

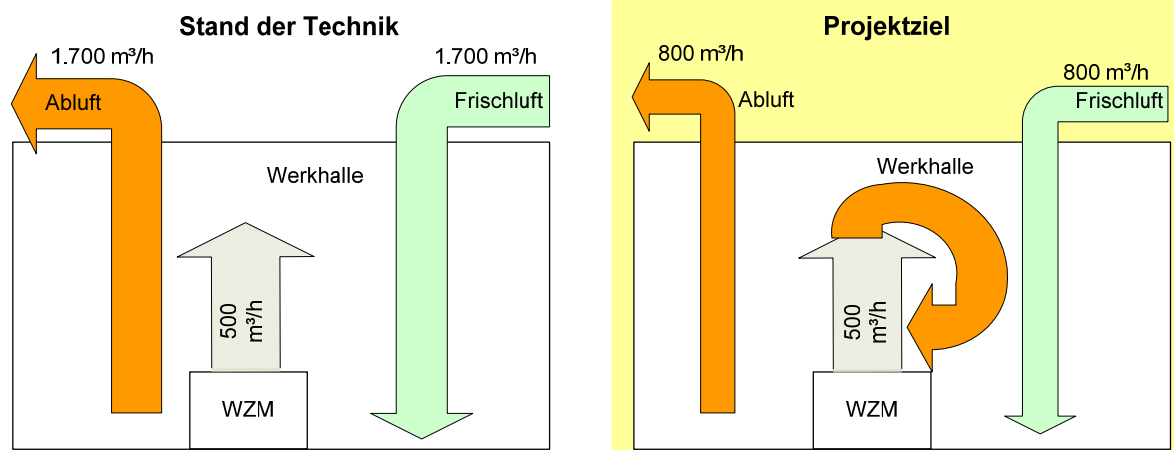


Abbildung 25: Lufttechnische Bilanz des Projekts (rechts) im Vergleich zum Stand der Technik (links)

## Wasser

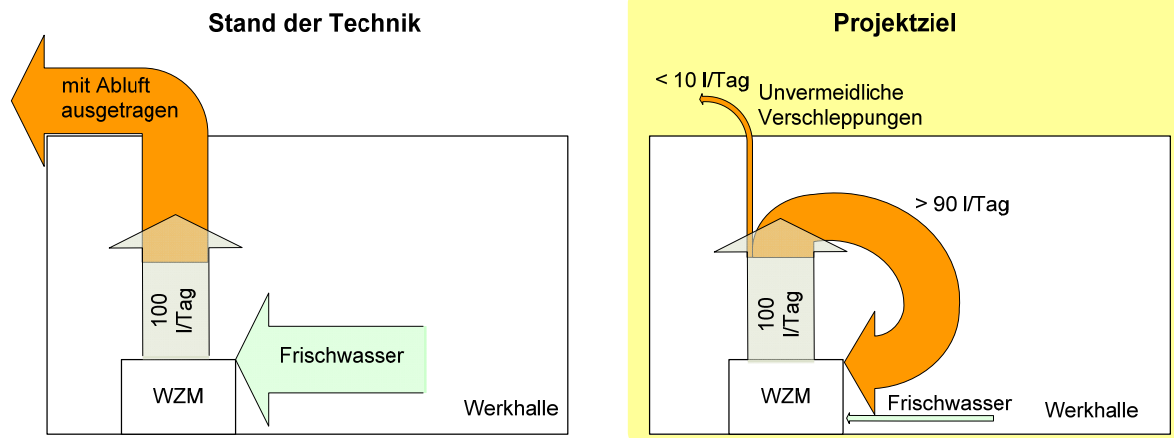


Abbildung 26: Wassertechnische Bilanz des Projekts (rechts) im Vergleich zum Stand der Technik (links)

## Belastung C-org

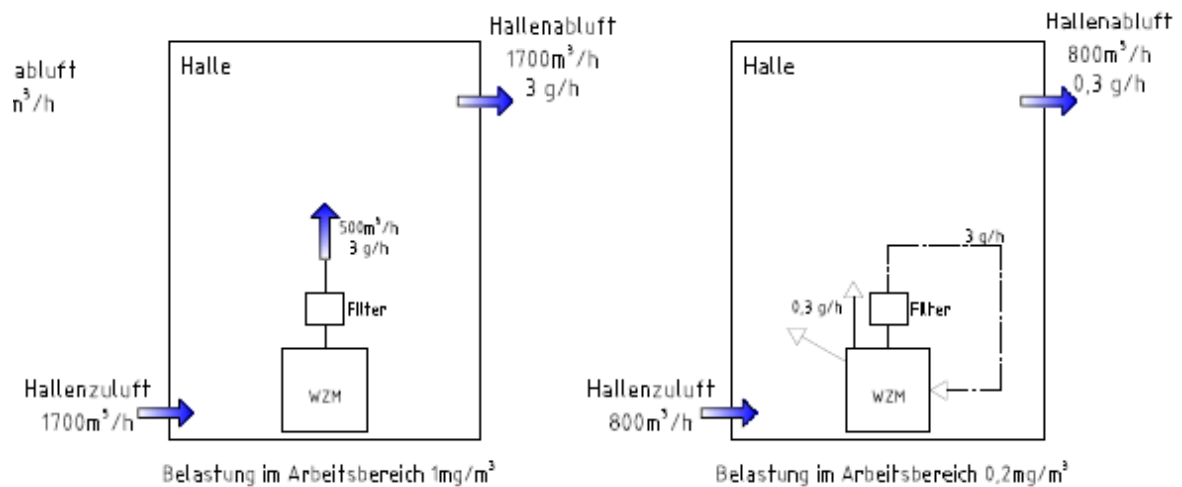


Abbildung 27: Partikelbelastung – Bilanz des Projekts (rechts) im Vergleich zum Stand der Technik (links)

### 5.6. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Wie bei bisherigen Entwicklungen auch, werden wir die Ergebnisse umfassend einer breiten Nutzerschaft zugänglich machen

Das wichtigste Instrument dabei ist unsere aktive Tätigkeit im entsprechenden VDI-Arbeitskreis, über den alle relevanten Stellen effektiv und kompetent über

unsere Ergebnisse unterrichtet werden und über den auch konkrete weiterführende Maßnahmen angeschoben werden können.

Flankiert werden diese Aktivitäten von entsprechenden Veröffentlichungen auf unserer Homepage.

Ergänzend ist angedacht, auch Möglichkeiten von Messeauftritten und Fachveröffentlichungen in Zeitschriften zu nutzen. Ein diesbezügliches Pressekonzept ist aber noch nicht final festgelegt.

## 6. Fazit

---

Generell ist die Rückführbarkeit von Prozessluft sowohl aus Systemen mit wassermischbaren als auch mit nicht-wassermischbaren Kühlschmierstoffen praxistauglich nachgewiesen. Das Projektziel ist damit vollinhaltlich erfüllt.

Insbesondere sind die anlässlich eines Besuchs von Herrn Dr. Schwacke / DBU bei Fa. Daimler in Augenschein genommenen Versuche zur Verwendung eines neuen Filtermediums (Betrieb ohne Additiv) sehr positiv verlaufen. Im Ergebnis wird eine erste größere Anlage aktuell auf das neue Filtermaterial umgerüstet.

Für den Projekterfolg ist dies vor allem mit Blick auf Verfahren der Mindermengenschmierung von entscheidender Bedeutung, da auch feinste Aerosole ausgefiltert werden und sich nicht im Kreislauf aufkonzentrieren. Durch den Additivfreien Betrieb entsteht als Filtrat ausschließlich Öl. Dieses kann unmittelbar in den Prozess zurückfließen, so dass der Kreislaufprozess abfallfrei (mit Ausnahme der unvermeidlichen Späne- und Staubfracht) arbeitet.

## 7. Literaturverzeichnis

---

- [DIN3802] Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten; VDI-Handbuch Technische Gebäudeausrüstung Band 2; Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure; Beuth Verlag GmbH; 1998
- [BGR143] Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit; Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen; Fachausschuss „Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau“ der BGZ; Januar 2006

## 8. Anhänge

---

– keine –

Tuttlingen, den 23.12.2010

---

Unterschrift der Geschäftsleitung