



5 Verbesserung der Stofffassung an Werkzeugmaschinen mittels Strömungssimulation ¹

Dipl.-Ing. Bing Gu,
Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Jörg Schmid,
Fa. HLK Stuttgart GmbH

5.1 Problembeschreibung

An Werkzeugmaschinen gelangen Kühlschmierstoffe (KSS) auf folgenden Wegen in die Produktionshalle und damit in den Aufenthaltsbereich der Beschäftigten:

- über die Restkonzentration in der sogenannten Reinluft,
- über die warmen bzw. heißen KSS-benetzten Späne und Werkstücke,
- über Öffnungen und Undichtigkeiten, wenn diese im Abschleuderbereich rotierender Teile liegen bzw. örtlich Überdruck herrscht,
- beim Öffnen der Türen am Ende eines Bearbeitungszyklus.

Um die KSS-Freisetzung über Öffnungen und Undichtigkeiten zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass an diesen Stellen Unterdruck herrscht. Daraus ergibt sich eine der wesentlichen Aufgaben des bei solchen Werkzeugmaschinen üblichen Abluftsystems; typische Luftwechselraten sind 300 h^{-1} und darüber. Mit diesem Luftwechsel soll auch das Ausströmen KSS-beladener Luft beim Öffnen der Einhausungstür vermieden werden. Weitere Aufgaben des Abluftsystems sind die Begrenzung der KSS-Konzentration sowohl aus Gründen des Explosionsschutzes als auch aus bearbeitungstechnischen Gründen sowie die Abfuhr thermischer Lasten. Letzteres ist allerdings nur bei der Minimalmengenschmierung bzw. bei der Trockenbearbeitung von Bedeutung, da bei der überfluteten Kühlung/Schmierung die wesentlichen thermischen Lasten vom KSS aufgenommen werden.

¹ Nachdruck aus: Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006) Nr. 10, S. 417-422, Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Springer VDI Verlags, Düsseldorf



Eines der Probleme ist, dass die Wirkungsgrade von Abscheidern vom Luftstrom abhängen. Mit zunehmendem Luftstrom nehmen die Wirkungsgrade grundsätzlich ab, wodurch der Anteil der KSS-Bestandteile in der Reinluft steigt.

Die Forderung, dass keine Späne und/oder KSS-Partikeln aus der Maschine hinaus geschleudert werden, sollte in den meisten Fällen verhältnismäßig einfach zu erfüllen sein. Sofern die Abluftöffnungen nicht eindeutig außerhalb dieses Schleuderbereiches angeordnet sind, sollten sie mit einer Blende versehen werden, deren Durchmesser größer ist als derjenige der Abluftöffnung. Um zu vermeiden, dass größere KSS-Partikeln zum Abscheider gelangen, sollten sich sogenannte Spritzwasserabscheider bzw. Vorabscheider direkt an die Abluftöffnung an der Einhausung anschließen.

Dem Problem der Freisetzung von KSS-Partikeln über die Späne kann man begegnen, indem man die Späneabfuhr in das Abluftsystem einbezieht. Dies wird später anhand eines Beispiels gezeigt.

5.2 Analyse der Strömungsvorgänge in der Einhausung

Abbildung 1 zeigt eine der Drehmaschinen im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, die im Rahmen eines Teilprojekts exemplarisch untersucht wurde. In Abbildung 2 (siehe Seite 93) ist das Modell der Maschine für die Strömungssimulation mit den wesentlichen Einbauten sowie Öffnungen und Undichtigkeiten zu sehen.



Abbildung 1:
Drehmaschine im WZL der RWTH
Aachen

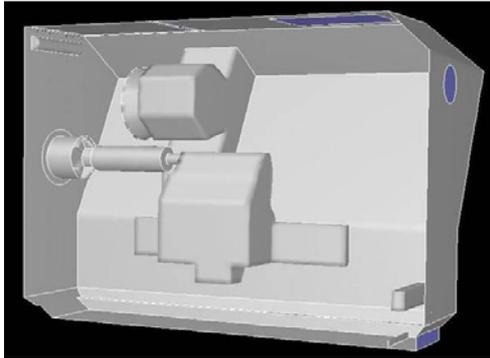


Abbildung 2:
Modell der Drehmaschine
für die Strömungssimulation

In den Abbildungen 3 bis 8 (siehe Seite 94 bis 96) sind die simulierten Strompfadlinien sowie die zugehörigen Druckverhältnisse in der Einhausung für einen Abluftstrom von $650 \text{ m}^3/\text{h}$ und für eine maximale Spindeldrehzahl der Maschine von $3\,000 \text{ U/min}$ dargestellt. Gezeigt werden die Verhältnisse für die Fälle,

- dass nur die Abluftanlage in Betrieb ist (keine rotierenden Teile),
- dass nur die Spindel etc. rotiert (ohne Abluftstrom) und
- die dem realen Betrieb entsprechende Kombination beider Vorgänge.

Abbildung 3 zeigt die Strompfadlinien ausgehend von der Öffnung für die Späneabfuhr. Für den Fall, dass nur die Abluftanlage in Betrieb ist, gelangt etwa die Hälfte der nachströmenden Luft durch diese Öffnung in die Einhausung. Der Luftstrom legt sich an den Boden an und strömt nach links. Von der Seitenwand wird er dann nach oben und im weiteren Verlauf von der Decke wieder nach rechts zur Abluftöffnung hin abgelenkt.

Die zugehörige Druckverteilung ist in Abbildung 4 dargestellt. Im Mittel herrscht ein Unterdruck gegenüber der Umgebung von etwa 7 Pa . Man erkennt, dass der Unterdruck an den Umlenkstellen in den beiden Ecken links unten und oben wegen des Staudrucks der Luftströmung etwas schwächer ist.

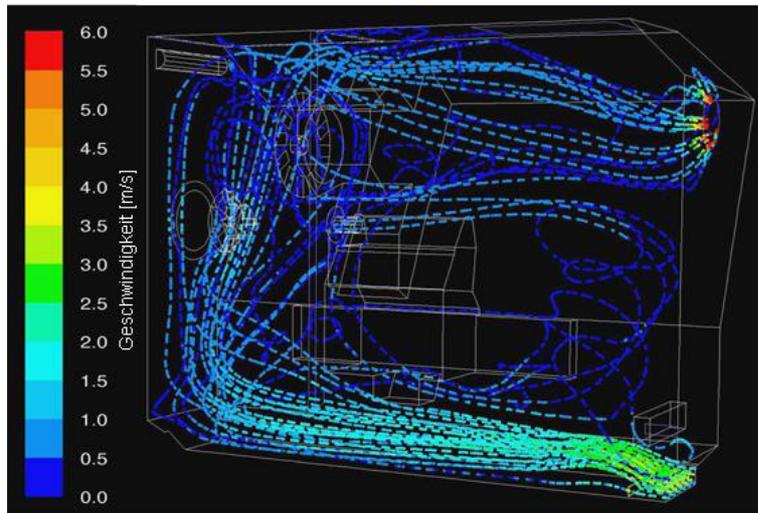


Abbildung 3:
Strompfadlinien innerhalb
der Maschine bei ein-
geschalteter Abluftanlage

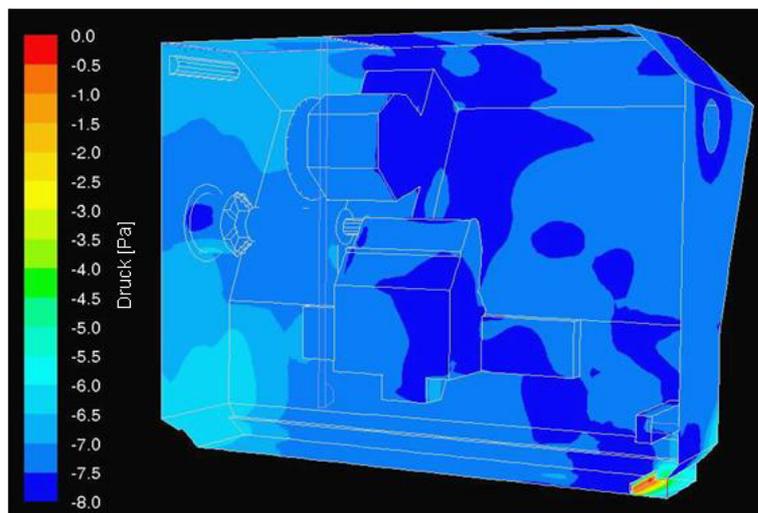


Abbildung 4:
Druckverteilung innerhalb
der Maschine bei ein-
geschalteter Abluftanlage

Bei abgeschalteter Abluftanlage wirken die Spannbacken der Drehmaschine wie ein Propeller, der die Luft radial verdrängt (Abbildung 5). Die Nachströmung erfolgt axial über das eingespannte Werkstück hinweg. Vom Backenfutter ausgehend entstehen so zwei entgegengesetzt gerichtete Luftwalzen. Im Bereich der Schließfugen der von rechts nach links schließenden Schiebetür entsteht Überdruck (Abbildung 6). An diesen Stellen kann KSS-beladene Luft ausströmen. Bei der Kombination beider Vorgänge, die der Simulation des realen Betriebs entspricht, sind keine klaren Luftwalzen mehr zu erkennen (Abbildung 7). Die Strömung erfasst in diesem Fall die gesamte Einhausung. Der vom Abluftventilator erzeugte Unterdruck reicht nicht aus, um das Ausströmen von KSS-beladener Luft an den bereits erwähnten Türfugen zu vermeiden (Abbildung 8).

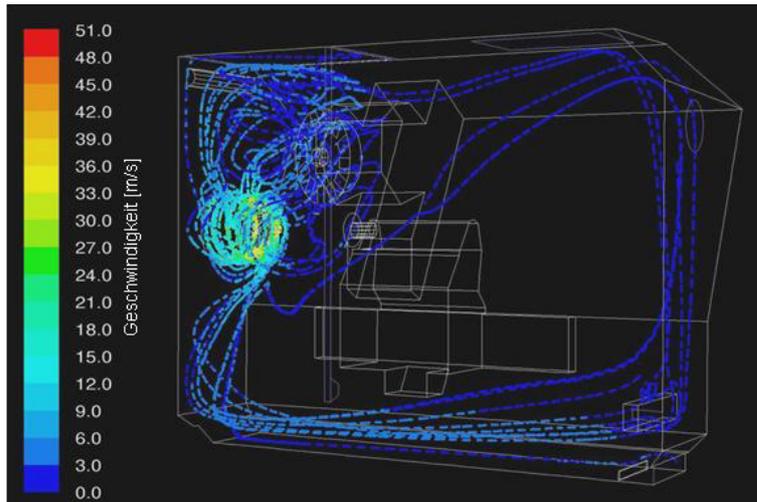


Abbildung 5:
Strompfadlinien innerhalb
der Maschine bei abge-
schalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

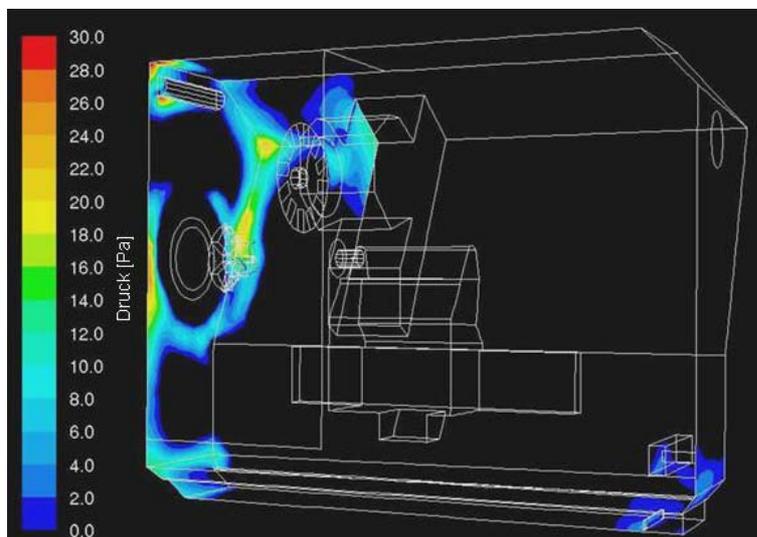


Abbildung 6:
Druckverteilung inner-
halb der Maschine bei abge-
schalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

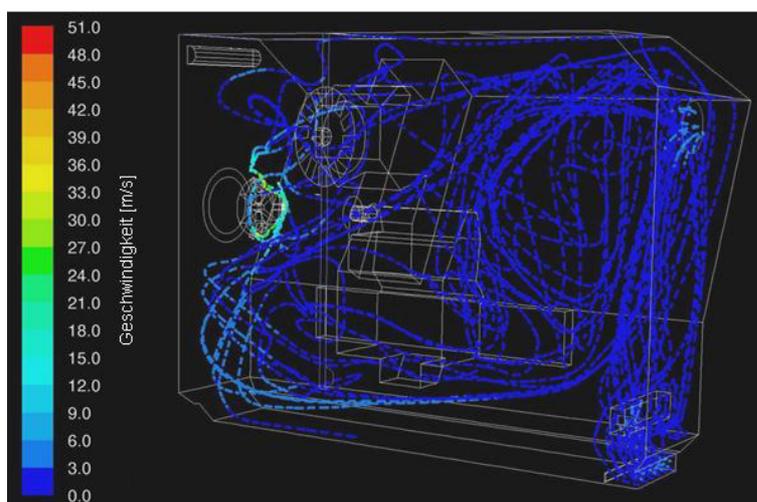


Abbildung 7:
Strompfadlinien inner-
halb der Maschine bei einge-
schalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

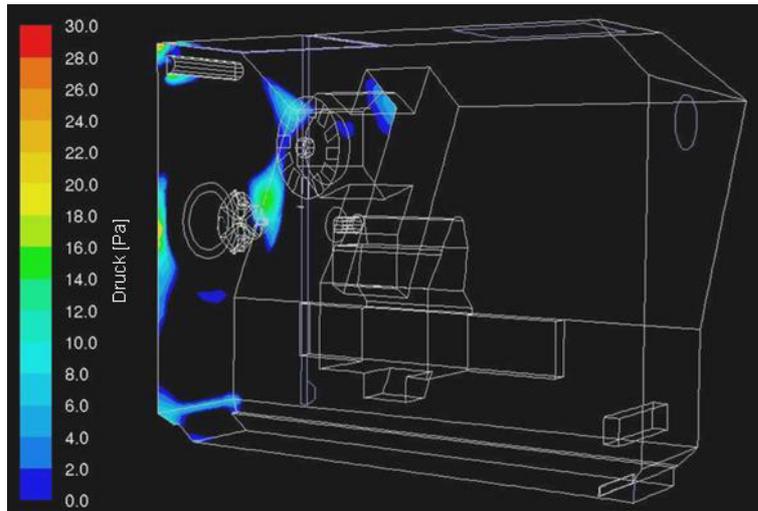
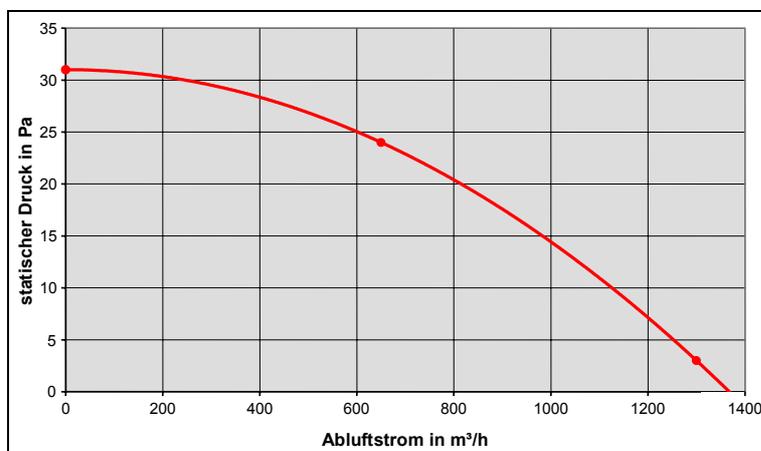


Abbildung 8:
Druckverteilung innerhalb
der Maschine bei eingeschalteter Abluftanlage und
einer Spindeldrehzahl von
3 000 U/min

5.3 Ermittlung der Mindestabluftröme

Aus dem Vergleich der Druckverhältnisse bei Rotation von Spindel und Werkzeug ohne Abluftstrom mit den entsprechenden Druckverhältnissen bei Betrieb der Abluftanlage kann der Zusammenhang zwischen dem statischen Druck an den potenziell undichten Stellen der Einhausung und dem Abluftstrom abgeleitet werden. Der Durchmesser der Abluftöffnung spielt in dieser Hinsicht praktisch keine Rolle. Abbildung 9 verdeutlicht den Zusammenhang.

Abbildung 9:
Grafische Ermittlung des Mindestabluftröms für eine
Drehmaschine mit einer Spindeldrehzahl von 3 000 U/min

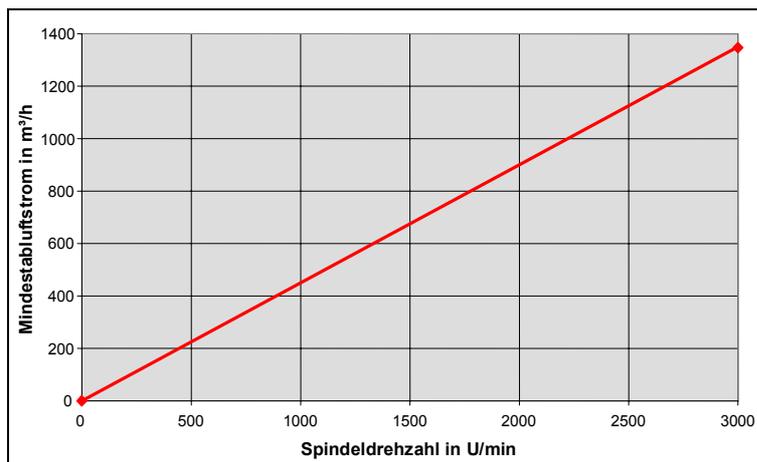




Für die Ermittlung des Verlaufs genügen zwei Punkte, weil man weiß, dass die Abhängigkeit zwischen den beiden Größen quadratisch ist. Die Maschine erreicht demnach bei Betrieb mit einer Maximaldrehzahl von 3 000 U/min erst bei einem Abluftstrom von 1 350 m³/h an den kritischen Stellen einen statischen Druck von 0 Pa.

In Abbildung 10 ist der Zusammenhang zwischen dem Mindestablufstrom und der Spindeldrehzahl dargestellt. Wenn innerhalb der Einhausung keine bzw. nur geringe Thermik vorliegt und keine Teile rotieren, ist auch kein Abluftstrom erforderlich. Damit ist der Nullpunkt vorgegeben. Aufgrund des linearen Zusammenhangs der beiden Variablen genügt ein weiterer Punkt für die Erstellung des Diagramms.

Abbildung 10:
Abhängigkeit des Mindestablufstroms von der Spindeldrehzahl



Bei den Versuchen des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BGIA im WZL an dieser Maschine betrug die maximale Drehzahl beim Schlichten 950 U/min. Aus Abbildung 10 folgt, dass unter diesen Bedingungen ein Mindestablufstrom von etwa 450 m³/h erforderlich gewesen wäre.

Wenn der Abluftstrom nicht wegen anderer Anforderungen, z. B. Begrenzung der KSS-Konzentration aus Gründen des Explosionsschutzes oder der notwendigen Abfuhr thermischer Lasten, hoch gehalten werden muss, besteht also die Möglichkeit, den Abluftstrom an die Spindeldrehzahl zu koppeln und so den Abscheidegrad am Abscheider günstig zu beeinflussen.



5.4 KSS-Konzentration in der Abluft

Es stellt sich nun die Frage, ob es möglich ist, durch eine entsprechende Anordnung der Abluftöffnung in der Einhausung den Mindestablufstrom auch für stationäre Bearbeitungsvorgänge zu senken und damit die Abscheider zu entlasten.

Im stationären Betrieb muss aus Bilanzgründen der aus der Maschine abgeführte KSS-Strom genau so groß sein wie der an der Quelle. Dabei ist nicht der über die verschiedenen Zufuhrsysteme in die Einhausung eingebrachte KSS-Strom ausschlaggebend, sondern der Strom an luftgetragenen KSS-Partikeln, der an der Bearbeitungsstelle entsteht. Man kann davon ausgehen, dass dieser KSS-Quellstrom im Wesentlichen vom Bearbeitungsvorgang und der Art der Einbringung abhängt. Damit ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen der Quellstärke $\dot{m}_{\text{KSS, luftgetragen}}$ und dem Ablufstrom \dot{V}_{Abluft} und somit die mittlere Konzentration K_{KSS} in der Abluft:

$$K_{\text{KSS}} = \frac{\dot{m}_{\text{KSS, luftgetragen}}}{\dot{V}_{\text{Abluft}}} \quad (1)$$

Für den stationären Fall ist die KSS-Konzentration in der Abluft demnach unabhängig vom Ort der Anbringung innerhalb der Einhausung.

5.5 Einfluss der Luftführung auf die KSS-Konzentrationsverteilung in der Einhausung

Die Abbildungen 11 bis 14 (siehe Seite 99 ff.) zeigen die Verteilung der KSS-Konzentration in einer Längsebene der Einhausung für einen Referenzfall und drei Varianten. Die Skalierung der KSS-Konzentrationen ist normiert auf die mittlere Konzentration in der Abluft. Demnach zeigen die roten Bereiche örtliche Konzentrationen, die dreimal so hoch sind wie die in der Abluft.

Im Referenzfall (Abbildung 11) erfolgt der Schlichtvorgang bei einer Drehzahl von 950 U/min. Dies entspricht einer Schnittgeschwindigkeit von 400 m/s bezogen auf den aktuellen Werkstückdurchmesser. Die Abluft wird über die vorgesehene Abluftöffnung (rechts oben im Bild) abgeführt (650 m³/h). Die Konzentrationsverteilung ist



sehr ungleichmäßig und die mittlere Konzentration in der Einhausung hoch. Sie beträgt das 1,4-fache der Konzentration in der Abluft.

Abweichend vom Referenzfall ist in Variante I die Abluftöffnung geschlossen (Abbildung 12). Das Abluftsystem ist stattdessen an die Öffnung für die automatische Späneabfuhr angeschlossen. Die Bereiche hoher Konzentration sind kleiner als im Referenzfall und somit ist auch die mittlere Konzentration in der Einhausung deutlich niedriger. Sie beträgt hier das 0,9-fache der Konzentration in der Abluft.

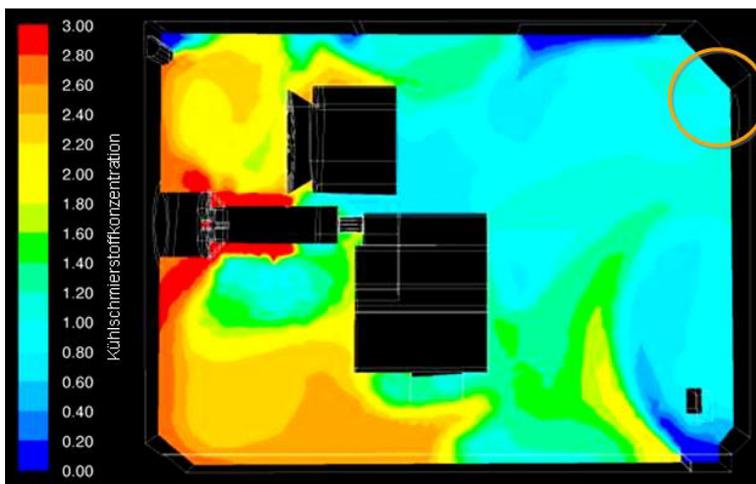


Abbildung 11:
Verteilung der Kühl-
schmierstoffkonzentration
im Referenzfall

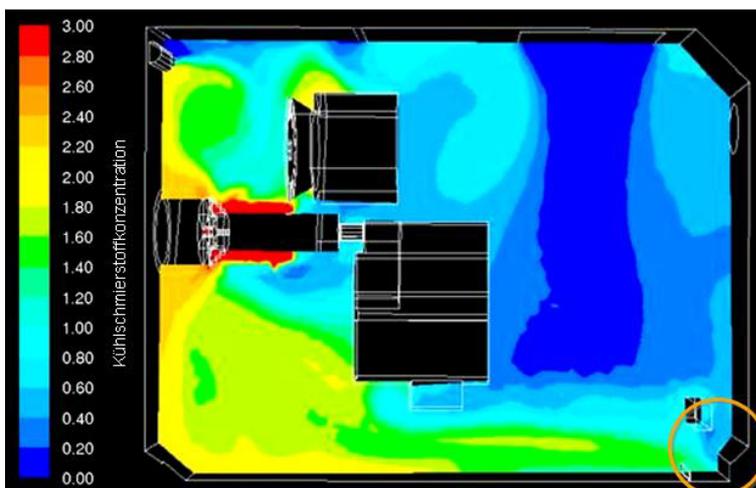


Abbildung 12:
Verteilung der Kühl-
schmierstoffkonzentration
für Variante I

In Variante II werden die oberen Türfugen als Abluftöffnungen angenommen (Abbildung 13, Seite 100). Hier sind die Verhältnisse im Vergleich zu Variante I nochmals verbessert. Die mittlere Konzentration in der Einhausung beträgt nur das 0,4-fache der Abluft.



In Variante III wird die Luft im Bereich der Öffnung für die Späneabfuhr so zugeführt, dass gezielt ein regelrechter hydraulischer Kurzschluss hin zur Abluftöffnung entsteht (Abbildung 14). Entsprechend hoch ist die mittlere Konzentration in der Einhausung, sie beträgt das 1,5-fache der Abluft.

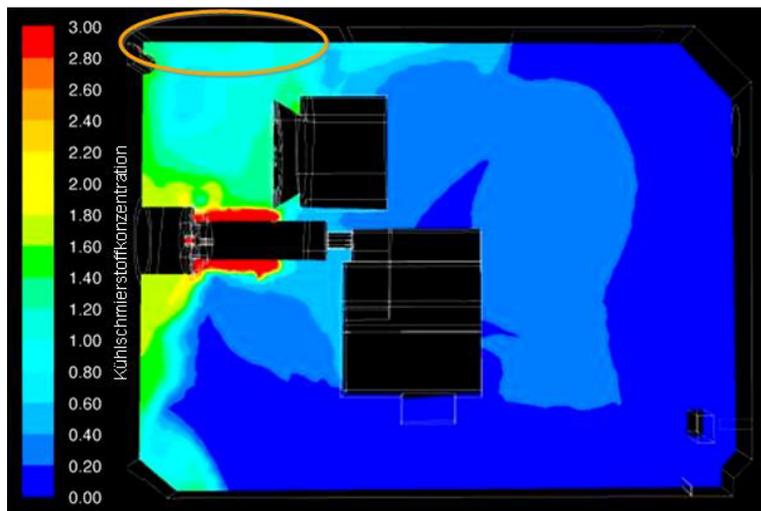


Abbildung 13:
Verteilung der Kühlschmierstoffkonzentration für Variante II

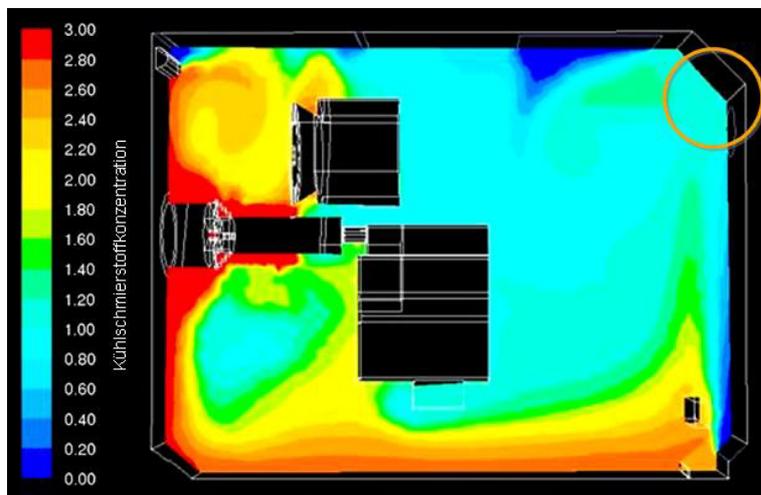


Abbildung 14:
Verteilung der Kühlschmierstoffkonzentration für Variante III

Die KSS-Konzentration in der Abluft stellt kein geeignetes Kriterium für die Anordnung der Abluftöffnungen innerhalb der Einhausung dar. In Verbindung mit der Führung der Zuluft hat die Anordnung aber großen Einfluss auf die Konzentrationsverteilung und die mittlere Konzentration in der Einhausung. Dies wiederum ist wichtig im Hinblick auf den Explosionsschutz und hinsichtlich der Anfangsbedingungen für den Moment des Türöffnens.



5.6 Instationäre Vorgänge beim Öffnen der Einhausung am Ende eines Bearbeitungsvorgangs

Immer wieder wird die Frage diskutiert, ob während des stationären Bearbeitungsvorgangs oder während des instationären Vorgangs beim und nach dem Öffnen der Einhausungstür mehr KSS-Partikeln bzw. -masse in die Produktionsbereiche entweichen. Die Zeitkonstante T für die mittlere Konzentration an luftgetragenen KSS-Partikeln nach Beginn eines Bearbeitungsvorgangs ist folgendermaßen definiert:

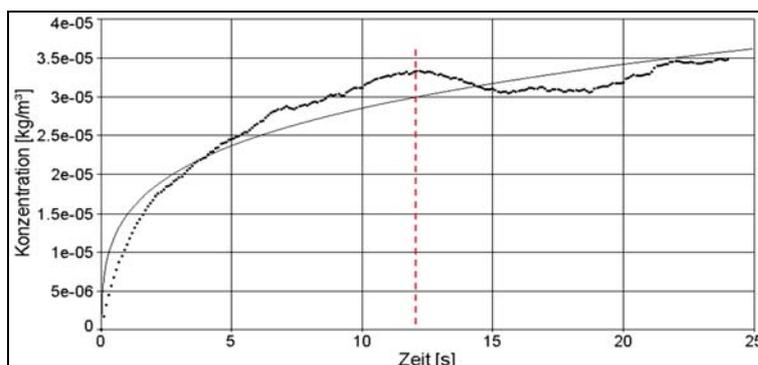
$$T = \frac{m_{\text{Luft, Einhausung}}}{\dot{m}_{\text{Abluft}}} \hat{=} \frac{V_{\text{Luft, Einhausung}}}{\dot{V}_{\text{Abluft}}} \hat{=} \frac{1}{n} \text{ in s} \quad (2)$$

Sie entspricht dem Kehrwert der dimensionslosen Luftwechselrate n in Sekunden. Angewandt auf die untersuchte Drehmaschine ergibt sich wie folgt eine Zeitkonstante von 12 s:

$$T = \frac{V_{\text{Luft, Einhausung}}}{\dot{V}_{\text{Abluft}}} = \frac{2,2 \text{ m}^3}{650 \text{ m}^3/\text{h}} \approx 12 \text{ s} \quad (3)$$

Nach einer Zeitspanne, die dem Vier- bis Fünffachen dieser Konstante entspricht – also nach weniger als einer Minute – ist der Endwert praktisch schon erreicht (siehe Abbildung 15). Der simulierte Verlauf der Aufkonzentration – durchgezogene Linie in Abbildung 15 – stimmt gut mit dieser Annahme überein.

Abbildung 15:
Zeitabhängiger Verlauf der Kühlschmierstoffkonzentration in der Einhausung der Drehmaschine für den Schruppvorgang





Welcher Einfluss überwiegt, hängt also davon ab, welche KSS-Mengen beim Türöffnen einerseits und beim stationären Bearbeitungsvorgang andererseits (hier pro Zeiteinheit) freigesetzt werden und wie sich diese beiden Phasen zum gesamten Maschinenzyklus im konkreten Fall zusammensetzen.

Die Vorgänge beim Türöffnen sind sehr verschieden und hängen neben der Maschinengeometrie von folgenden Faktoren ab:

- Luftgeschwindigkeiten und -richtungen unmittelbar vor der Türöffnung; die hier gespeicherten Impulse bauen sich zwar schnell ab, beeinflussen aber den Vorgang während der allerersten Zeit nach bzw. während des Türöffnens.
- Thermik an mehr oder weniger heißen Werkzeugen und Werkstücken
- Abluftstrom und Luftführung bei offener Tür; beides kann vom Fall der stationären Bearbeitung abweichen.

Abbildung 16 (siehe Seite 103) gibt den Verlauf der KSS-Konzentration in der Einhausung in zwei senkrecht zueinander stehenden Schnittebenen bei geöffneter Tür am Ende eines Schruppvorgangs wieder. Dargestellt sind die Konzentrationsverteilungen für die Zeitpunkte unmittelbar nach dem Öffnen der Tür sowie nach einer Sekunde, nach vier Sekunden und nach ungefähr zehn Sekunden. Die Bilder vermitteln einen Eindruck davon, wie schnell die KSS-beladene Luft in der Einhausung abgesaugt wird.

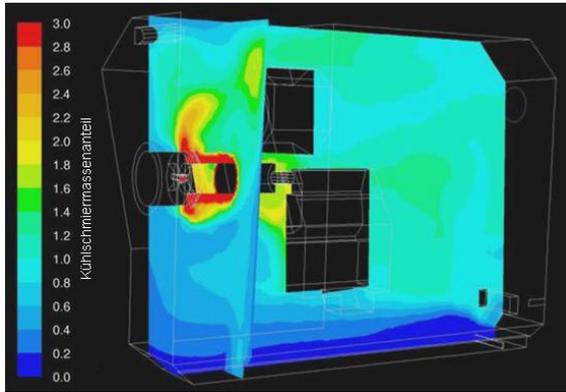
Abbildung 17 (siehe Seite 104) zeigt für die gleichen Zeitpunkte wie in Abbildung 16 die Konzentrationsverteilungen in der Einhausung und im Bedienbereich des Arbeiters. Die Schnittebene liegt diesmal in der Mitte der Tür. Dabei ist zu beachten, dass wegen der gewählten Skalierung nur Konzentrationen bis zum 0,1-fachen der Abluft dargestellt werden. Es ist deutlich zu sehen, wie nach wenigen Sekunden KSS-beladene Luft in den Aufenthaltsbereich gelangt.



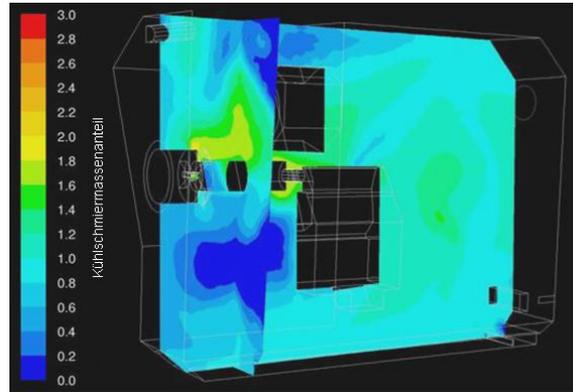
Abbildung 16:

Verlauf der Kühlschmierstoffkonzentration in der Einhausung der Drehmaschine für den Schrappvorgang

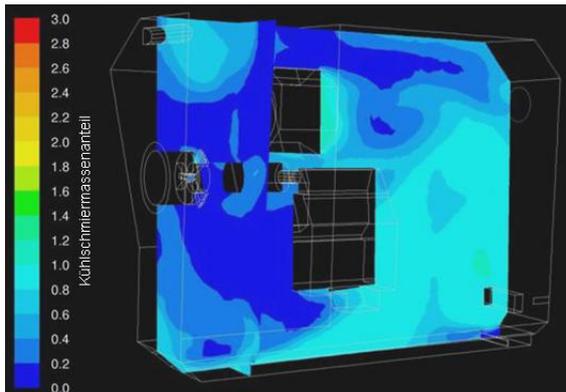
(a) direkt nach Öffnen der Tür



(b) eine Sekunde nach Öffnen der Tür



(c) vier Sekunden nach Öffnen der Tür



(d) ~10 Sekunden nach Öffnen der Tür

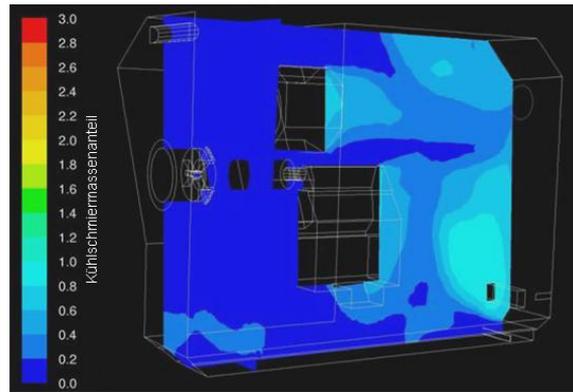
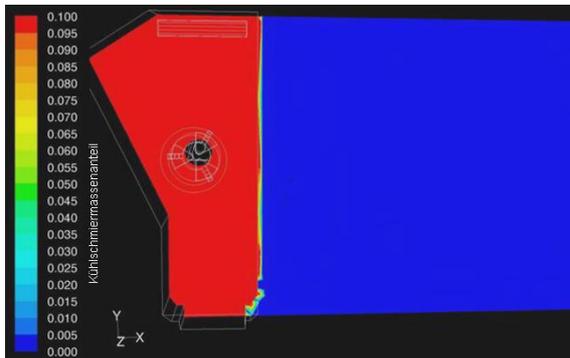


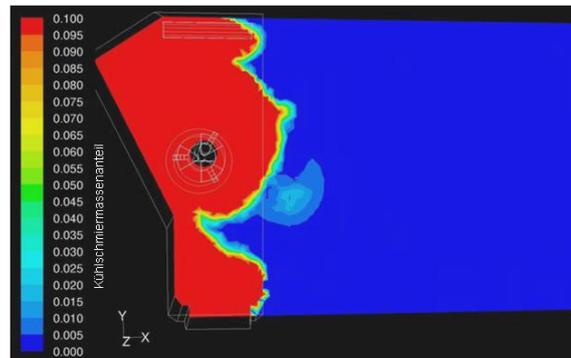


Abbildung 17:
Verlauf der Kühlschmierstoffkonzentration in der Einhausung
der Drehmaschine für den Schruppvorgang

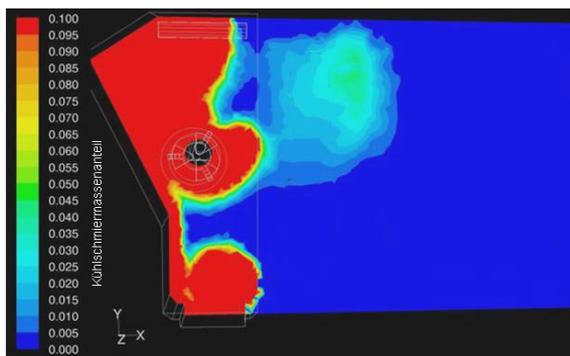
(a) direkt nach Öffnen der Tür



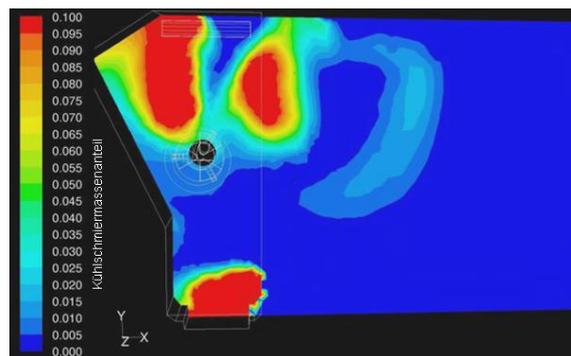
(b) eine Sekunde nach Öffnen der Tür



(c) vier Sekunden nach Öffnen der Tür



(d) ~ 10 Sekunden nach Öffnen der Tür



5.7 Zusammenfassung

- Die Druckverhältnisse in den Einhausungen werden von den rotierenden Teilen bestimmt. Die Abluftströme können an deren Drehzahl angepasst werden.
- Die Konzentration luftgetragener KSS-Bestandteile in der Abluft ist kein geeignetes Kriterium für die Anordnung der Abluftöffnungen innerhalb der Einhausung.
- Die Luftführung hat einen großen Einfluss auf Niveau und Verteilung der KSS-Konzentrationen in der Einhausung. Dies wiederum schafft mehr oder weniger günstige Bedingungen hinsichtlich des Explosionsschutzes sowie für die Phase des Öffnens der Einhausungstür.



- Wegen kleiner Zeitkonstanten gehen KSS-Konzentrationen schnell in stationäre Verhältnisse über, was für die Gewichtung der Emissionen während der Bearbeitung bzw. beim Türöffnen wichtig ist.

In weiteren Untersuchungen

- soll zum einen der Schwerpunkt von wassergemischten KSS auf mineralische und synthetische Öle verlagert werden,
- soll zum anderen der Schwerpunkt von „überfluteter“ Kühlung/Schmierung auf Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung (starke Thermik) verlagert werden,
- sollen die besonderen Belange des Explosionsschutzes berücksichtigt werden.

Darüber hinaus sollen Untersuchungen zur Reduzierung der Entstehung von KSS-Aerosolen bei der Bearbeitung – also direkt am Ort der Entstehung – durchgeführt werden.