

# Strömungssimulation für ein Reinraumprojekt

Dr.-Ing. Roland Rydzewski, Ingenieurbüro Mayer AG

Die Reinraumtechnik als spezieller Zweig der Klimatechnik hat durch eine geeignete Luftführung im Raum sicherzustellen, dass bestimmte Arbeitsbereiche vor unerwünschten Verunreinigungen geschützt werden. Mit der Strömungssimulation steht heute ein leistungsfähiges Instrument zur Verfügung, Luftströmungen im Raum im voraus zu berechnen. Dadurch kann die Anordnung und Auslegung der Zu- und Abluftdurchlässe sowie die Gestaltung der Lamina-Flow-Einheiten (LF-Einheiten) dahingehend optimiert werden, dass die gestellten Reinheitsanforderungen sicher und auf möglichst wirtschaftliche Weise erfüllt werden. Weiterhin gibt die Strömungssimulation wertvolle Hinweise für eine reinraumtechnisch optimale Gestaltung des Raumes sowie der verschiedenen Einbauteile. Im folgenden wird anhand eines Neubauprojektes beispielhaft dargestellt, was Strömungssimulation im Zusammenhang mit der Planung von Reinräumen zu leisten vermag.

Bei dem zu simulierenden Raum handelt es sich um einen Reinraum der Klasse C, welcher als Teil der derzeit im Bau befindlichen neuen Insulinproduktionsanlage der Aventis Pharma Deutschland GmbH in Frankfurt a. M. errichtet wird. Die Strömungssimulation wurde im Auftrag der Linde-KCA-Dresden GmbH durchgeführt, welche als Generalplaner fungiert.

## Geometrie-Modell

Die Geometrie des Raumes sowie der wesentlichen Einbauteile wurden in einem Modell (Abb.1) erfaßt. Man erkennt dort u. a.

- die Raumumschließungsflächen (grau)
- Decken-Luftauslässe (rot)
- LF-Einheit (blau)
- Lösemittelbehälter (grau)
- Drucknutschen (grau)
- Stahlbühne (grau)
- Abluftdurchlässe (ocker)
- eine Plexiglasabtrennung (Arbeitsschutz, grau).

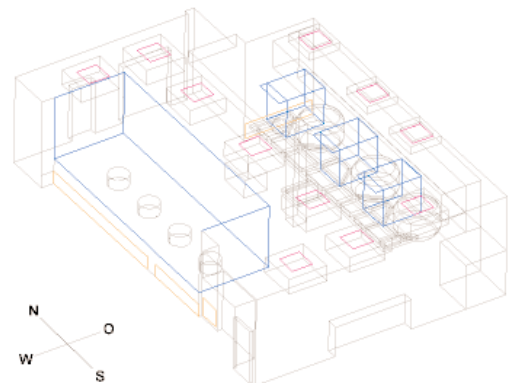


Abb.1 Raummodell

Längs der östlichen Raumwand erstreckt sich unter der Decke eine dicht belegte Rohrtrasse, deren Aussehen im einzelnen noch nicht feststand. Sie wird in dem Modell durch einen poröser Körper (grau) mit entsprechend angepassten Werten der Porosität und der Strömungswiderstandsbeiwerte repräsentiert. Aufgrund der abschirmenden Wirkung dieser Rohrtrasse bestand die Befürchtung, dass die darüber angeordneten Luftauslässe nur eingeschränkt wirksam werden, so dass eine ausreichende Durchspülung des östlichen Teils des Raumes nicht gesichert erschien. Diese Unsicherheit war mit ein Anlaß zur Durchführung der Strömungssimulation.

## Luftauslässe

Raumluftströmungen werden wesentlich durch die Strömungscharakteristik der Luftauslässe bestimmt. Weil hierzu keine ausreichenden Herstellerdaten verfügbar waren, wurde die Strömung im Innern und in der näheren Umgebung des Luftauslasses vorab durch eine separate Simulation berechnet. Das resultierende Geschwindigkeitsprofil in der Luftaustrittsebene wurde als Randbedingung in die Simulation der Raumluftströmung eingesetzt.

## Strömungsgeschwindigkeiten im Raum

Die Ergebnisse der Simulation werden in ausgewählten Schnittebenen visualisiert. Abb. 2 zeigt als Beispiel einen Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in einem Schnitt durch zwei LF-Einheiten. Der Geschwindigkeitsbetrag wird durch die Farbe angezeigt, siehe Randskala. Man erkennt die gerichtete Strömung innerhalb der LF-Einheiten sowie die Aufspaltung dieser Strömung an den

Trägern der Stahlbühne. Weiterhin erkennt man links oben eine Drallauslassströmung. Die Vielzahl der auftretenden Wirbel gibt einen Eindruck von der Komplexität des Strömungsgeschehens.

### Emissionssituation im Raum

Eine Antwort auf die am Beginn dieser Simulation stehende Frage der ausreichenden Durchspülung des Raumes ist nur durch die Berechnung der Konzentrationen an Partikeln und Luftkeimen (Koloniebildenden Einheiten, KBE) möglich. Diese basiert auf der Kenntnis der zu erwartenden Emissionen. Die wesentlichen Emissionsquellen sind in diesem Fall die in dem Raum arbeitenden Personen. Eine Person in Reinraumkleidung emittiert bei leichter körperlicher Tätigkeit pro Minute typischerweise 2.000.000 Partikel  $> 0,5 \mu\text{m}$  sowie 1.000 KBE. Eine relativ günstige Emissionssituation wäre dann gegeben, wenn die Personen ihren Standort innerhalb des Raumes ständig wechselten, so dass im Idealfall von einer homogen verteilten Emission ausgegangen werden könnte. Eine relativ ungünstige Situation läge vor, wenn die Personen sich jeweils an festen Orten aufhielten, was lokal konzentrierte Emissionen zur Folge hätte. Beide genannten Grenzfälle sind simuliert worden. Die Realität wird irgendwo zwischen diesen Extremen liegen.

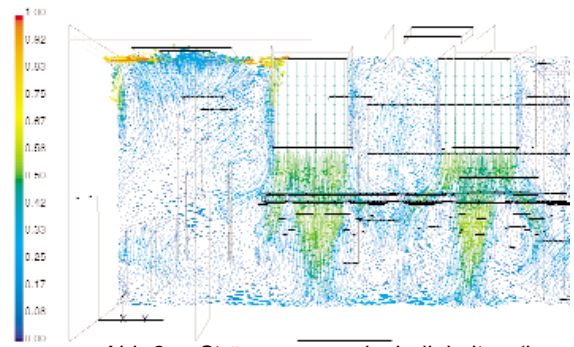


Abb.2 Strömungsgeschwindigkeiten (in m/s) in einer vertikalen Schnittebene durch zwei Laminar-Flow-Einheiten

### Konzentrationen bei homogen verteilter Emission

Bei homogen im Raum verteilter Emission zeigt die Simulation Maximalkonzentrationen von 96.000 Partikeln/ $\text{m}^3$  und von 48 KBE/ $\text{m}^3$ . Da die Grenzwerte laut GMP-Leitfaden 3.500.000 Partikel/ $\text{m}^3$  bzw. 100 KBE/ $\text{m}^3$  betragen, entspricht dies 2,8 % bzw. 48 % des höchstzulässigen Wertes. Die Partikelkonzentration ist also in jedem Fall als unkritisch einzustufen, daher wird im folgenden nur noch die KBE-Konzentration betrachtet.

Abb. 3 zeigt die räumlichen Konzentrationsverteilungen in einer ausgewählten Schnittebene bei einem Betrieb der LF-Einheiten mit 33 % der Vollast-Leistung. Bei ausgeschalteten LF-Einheiten erweist sich das mittlere Konzentrationsniveau als deutlich höher. Daraus leitet sich die Empfehlung ab, die LF-Einheiten ständig in dem genannten Dauerbetriebszustand zu fahren.

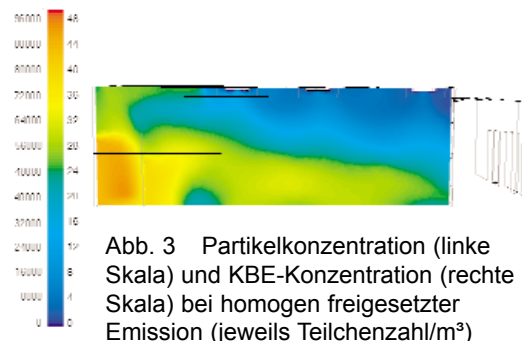


Abb. 3 Partikelkonzentration (linke Skala) und KBE-Konzentration (rechte Skala) bei homogen freigesetzter Emission (jeweils Teilchenzahl/ $\text{m}^3$ )

Relativ hohe KBE-Konzentrationen werden innerhalb der nach oben offenen Plexiglasabtrennung erreicht. Es handelt sich dort um einen schlecht durchspülten Bereich. Zur Verbesserung der Situation wurde eine Aufständigung der Wand von 25 cm Höhe untersucht. Die Simulation zeigt jedoch nur eine unwesentliche Verbesserung, da der Luftaustausch mit der Umgebung immer noch sehr eingeschränkt ist. Daher sollte anstatt geschlossener Trennflächen z. B. eine Abtrennung mittels eines Gitters aus senkrecht angeordneten Edelstahlrohren gewählt werden.

Relativ niedrige Konzentrationen erkennt man im oberen Teil der Rohrtrasse. Die aus den darüber liegenden Luftauslässen austretende reine Luft kann sich aufgrund der abschirmenden Wirkung der Rohrtrasse nur begrenzt in den Raum hinein verteilen und konzentriert sich dort.

### Konzentrationen bei konzentriert freigesetzter Emission

Zur Berechnung im Fall konzentriert freigesetzter Emissionen wurden sechs Personen auf den Raum verteilt, wobei von der besonders ungünstigen Situation ausgegangen wurde, dass drei Personen sich im Bereich unter der Rohrtrasse aufhalten. Für diesen Fall zeigt Abb. 4 Konzentrationen von bis zu 530 KBE/ $\text{m}^3$ , also eine mehr als fünffache Überschreitung des

Grenzwertes und einen mehr als zehnfach höheren Wert als im vorangegangenen Fall. Auch wenn man die nächste Umgebung der Personen als irrelevant ausklammert, da die Messungen im Zuge der Validierung nicht so nahe an Personen vorgenommen werden, muß man die großräumig auftretenden Konzentrationen mit Werten um 150 KBE/m<sup>3</sup> als kritisch einstufen. Eine zusätzlich ausgeführte Simulation der zeitlichen Entwicklung ergab jedoch, dass sich dieses Kontaminationsbild erst im Verlauf von ca. 8 Minuten ausbildet, nachdem die Personen sich dort aufgestellt haben. Die Situation wird dadurch entschärft, dass ein Aufenthalt von drei Personen unter der Rohrtrasse über die Dauer von mehreren Minuten betrieblich ausgeschlossen werden kann.

Eine weitere Verbesserung bringt die zusätzliche Anordnung eines großflächigen Quellluftauslasses, der von der Trennwand aus in den Raum hinein ausbläst. Wie Abb. 5 zeigt, reduziert sich damit der Bereich mit Konzentrationen > 100 KBE/m<sup>3</sup> auf eine nähere Umgebung der Personen.

## Fazit

Durch das Gesamtpaket aller genannten technischen und betrieblichen Maßnahmen (Umgestaltung der Trennwand, Dauerbetrieb der LF-Einheiten mit 33 % der Vollast-Leistung, Begrenzung des Aufenthalts von Personen unter der Rohrtrasse, Anordnung eines zusätzlichen Luftauslasses) kann erwartet werden, dass der Raum die Anforderungen der Reinheitsklasse C erfüllen wird. Für eine Reduzierung der Luftmenge zwecks Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist kein Spielraum vorhanden. Es wird deutlich, dass eine möglichst genaue Kenntnis der Emissionssituation im Raum von entscheidender Bedeutung ist.

## Ausblick

Im Bereich der Raumluftechnik können durch Strömungssimulation weiterhin detaillierte Informationen über Temperaturen, Luftgeschwindigkeiten, Turbulenzgrade, Behaglichkeitsparameter für Personen und andere Größen gewonnen werden. Strömungssimulation wird sich in den kommenden Jahren zu einem obligaten Planungsinstrument für Räume mit besonderen Anforderungen entwickeln.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten bestehen in der Optimierung von raumluftechnischen Komponenten, in der Berechnung von Gas- und Flüssigkeitsströmungen in Behältern und verfahrenstechnischen Apparaten sowie in der Brandsimulation in Gebäuden, um nur einige Beispiele zu nennen.

Autor: Dr.-Ing. Roland Rydzewski  
 Firma: Ingenieurbüro Mayer AG  
 Johannes-Gutenberg-Straße 1  
 87724 Ottobeuren  
 Tel. 08332 / 9201 - 36  
 Fax. 08332 / 9201 - 99  
 e-mail roland.rydzewski@ib-mayer.com  
 Internet www.ib-mayer.com

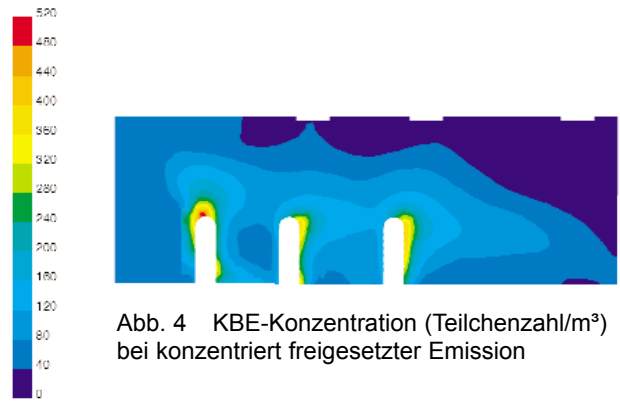


Abb. 4 KBE-Konzentration (Teilchenzahl/m<sup>3</sup>) bei konzentriert freigesetzter Emission

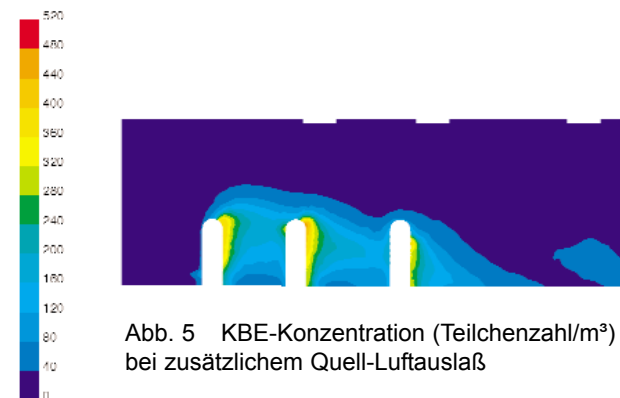


Abb. 5 KBE-Konzentration (Teilchenzahl/m<sup>3</sup>) bei zusätzlichem Quell-Luftauslaß