

Erholzeit: Lüftungseffektivität bei turbulenter Strömung

In der Praxis wird die Erholzeitmessung oft als Mass für die Aufreinigungsleistung der Lüftungsanlage bei einer Verunreinigung angesehen. Jedoch sagt die Erholzeit mehr über den tatsächlich genutzten Luftwechsel im Raum aus. Computational Fluid Dynamics simuliert Strömungen und vermeidet bauliche Fehler bereits in der Planung.

Im Rahmen der Qualifizierung muss die Erholzeit von turbulent belüfteten Reinnräumen nachgewiesen werden. Im Gegensatz zur turbulenzarmen Verdrängungsströmung werden Verunreinigungen nicht durch die gleichgerichtete Strömung ausgetragen. Bei einer turbulenten Verdünnungsströmung wird, wie der Name schon sagt, die Raumluft mit der eintretenden Zuluft durch Induktion vermischt und somit verdünnt. Die EN ISO 14644-3 besagt, dass die Prüfung der Erholzeit durchgeführt wird, um zu bestimmen, ob die Lüftungsanlage in der Lage ist, nach kurzer Beaufschlagung durch eine Quelle luftgetragener Partikel, innerhalb einer bestimmten Zeit zur festgelegten Reinheitsklasse zurückzukehren. In der Praxis wird dies häufig fehlerhaft interpretiert. Es wird oftmals davon ausgegangen, dass die Erholzeit angibt, wie lange es dauert bis eine lokale Verunreinigung im Raum über die Lüftung ausgespült wird. Beispielsweise wenn bei einem Arbeitsvorgang durch einen Mitarbeiter punktuell Partikel im Raum freigesetzt werden. Durch die turbulente Verdünnungsströmung werden diese Partikel im gesamten Raum verteilt und über die Lüftung ausgetragen. Für die Messung der Erholzeit wird zu Beginn der gesamte Raum auf eine einheitliche Partikelkonzentration angehoben. Dazu wird ein künstliches Aerosol gleichmässig im Raum verteilt und anschliessend die Zeit bestimmt, welche die Lüftungsanlage benötigt, um die Partikelkonzentration um den Faktor 100 zu verringern. Hier lässt sich schon der Unterschied beziehungsweise das Missverständnis erkennen: Bei dem im Beispiel beschriebenen Fall breiten sich die Partikel von einem Punkt im Raum ausgehend aus. Im Unterschied dazu findet die Erholzeitmessung statt, nachdem die Partikel bereits im gesamten Raum gleichmässig verteilt sind.

Alter der Luft

Die Ausbreitung von Partikeln im Raum kann an jedem Punkt anders aussehen.

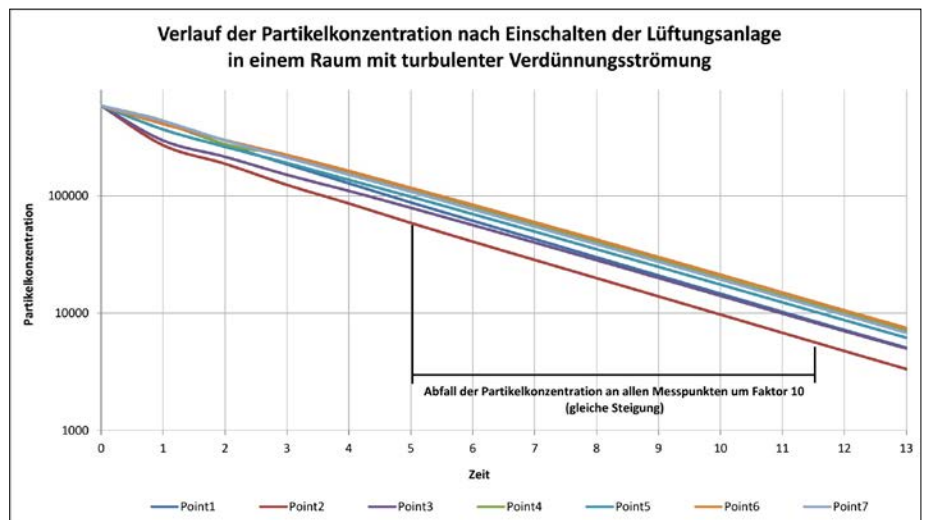


Abbildung 1: Verringerung der Partikelkonzentration an sieben Messpunkten innerhalb eines Raumes mit turbulenter Verdünnungsströmung (Bilder: STZ EURO)

Das heisst, wenn nur an einer Stelle eine Partikelkontamination auftritt, wird das Ausspülen der Partikel unterschiedlich schnell sein, je nachdem an welcher Stelle es im Raum passiert. An einem Ort in unmittelbarer Nähe und im Einflussbereich der Raumabluft wird die Kontamination schnell aus dem Raum ausgetragen. Würde die gleiche Aktion an einem Punkt nahe der Zuluft stattfinden, müssen die Partikel noch den Weg durch den Raum bis zur Abluft zurücklegen. Am Ort der Kontamination selbst wird die Partikelkonzentration schnell verringert, jedoch dauert es länger als in der Nähe des Abluftdurchlasses bis die Partikel tatsächlich den Raum verlassen haben. Je nach Position ist das Alter der Luft, also die Zeit welche sich die Luft bereits im Raum befindet, unterschiedlich hoch. Dem gegenüber wird die Dauer der Erholzeit an jedem Messpunkt im Raum das gleiche Ergebnis liefern. Voraussetzung hierfür ist, dass die Erholzeitmessung nicht im direkten Einflussbereich der gefilterten Zuluft stattfindet. Dies liegt daran, dass das Prüfaerosol zu Beginn der Erholzeitmessung bereits gleichmässig im Raum verteilt ist. Anhand

des Diagramms in Abbildung 1 lässt sich dieser Unterschied veranschaulichen. Im Diagramm dargestellt sind sieben Messstellen an verschiedenen Punkten innerhalb eines Raumes. Der Aufbau des Raumes ist in Abbildung 2 aufgezeigt, die zugehörigen Messpunkte sind aus Abbildung 3 zu entnehmen. Zuerst ist die Lüftungsanlage des Raums nicht in Betrieb und es wird eine gleichmässige Partikelkonzentration im Raum hergestellt. Dann wird die Anlage eingeschaltet und es strömt Luft über einen Schwebstofffilter mit anschliessendem Drallauslass an drei Stellen in den Raum ein. Im Diagramm lässt sich nun erkennen, dass an einigen Punkten die Partikelkonzentration rasch abfällt. Diese Punkte werden schneller mit gefilterter Zuluft versorgt und weisen somit ein geringeres Alter der Luft auf. Ab dem Zeitpunkt 5 hat sich die turbulente Luftströmung vollständig im Raum ausgebreitet und es fallen alle Kurven mit der gleichen Steigung ab. Die Erholzeit wird erst in diesem Bereich bestimmt, da die Aufgabe der Aerosolpartikel bei laufender Lüftung stattfindet und die Messung erst gestartet wird, wenn sich eine gleichmäs-

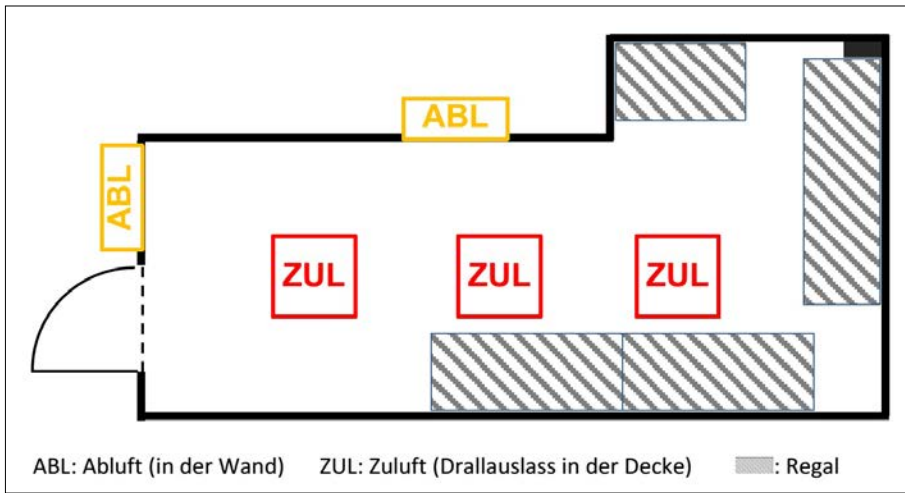


Abbildung 2: Grundriss des Versuchsraumes zum Vergleich von Erholzeit und Alter der Luft

sige Konzentration ausgebildet hat. Zwischen Zeitpunkt 5 und Zeitpunkt 11,5 fallen alle sieben Messstellen ungefähr um Faktor 10 ab, was der halben Erholzeit entspricht. Das bedeutet: An allen Messstellen wird die gleiche Erholzeit ermittelt, jedoch sieht man über den Höhenversatz der Kurven, wo zuerst die gefilterte Zuluft ankommt.

Simulation von Erholzeit und Alter der Luft

Durch eine Simulation kann die Luftausbreitung im Raum visualisiert werden.

Abbildung 4 zeigt den bereits beschriebenen Raum im Querschnitt. Hierin sind die Partikelkonzentrationen auf einer Fläche in der Mitte des Raumes zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 min ist der Raum mit einer gleichmäßigen Konzentration von Partikeln beaufschlagt. Es wird nun simuliert wie sich die Partikelkonzentrationen innerhalb dieser Ebene verringern, wenn die Lüftungsanlage in Betrieb genommen wird und dadurch gefilterte Zuluft einströmt. Nach 2 min ist ersichtlich, welche Stellen als letztes mit Zuluft versorgt werden. Diese sind

weiterhin in Rot dargestellt. Nach 5 min hat sich die Raumströmung vollständig ausgebildet. Ab diesem Zeitpunkt verringert sich die Partikelkonzentration im gesamten Raum gleichmäßig, jedoch sind die Konzentrationen je nach Ort unterschiedlich hoch. Es zeigt sich das gleiche Ergebnis wie im Diagramm unter Abbildung 1. In der grafischen Darstellung bedeutet das, die Farben ändern sich, jedoch bleibt das Muster ungefähr gleich.

Einflussfaktoren der Erholzeit

Im Kapitel B.12.1 der EN ISO 14644-3 wird die Erholzeit als Funktion des Umluftanteils, der thermischen Bedingungen und der geometrischen Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen bezeichnet. Der Umluftanteil spielt eine geringere Rolle, da die Umluft vor Wiedereintritt in den Reinraum in den meisten Fällen HEPA-filtrierte wird. Logisch ist aber auch, dass wenn die Um-

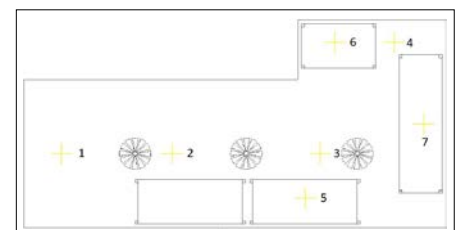


Abbildung 3: Versuchsraum mit Messpunkten für die CFD-Simulation



Lindner Reinnräume und Operationssäle zeigen ihre Qualität in hygienegerechten Komplettlösungen für Kliniken und Sterilbereiche. Und an jedem Arbeitstag im Krankenhaus.

www.Lindner-Group.com

Lindner | Bauen mit neuen Lösungen

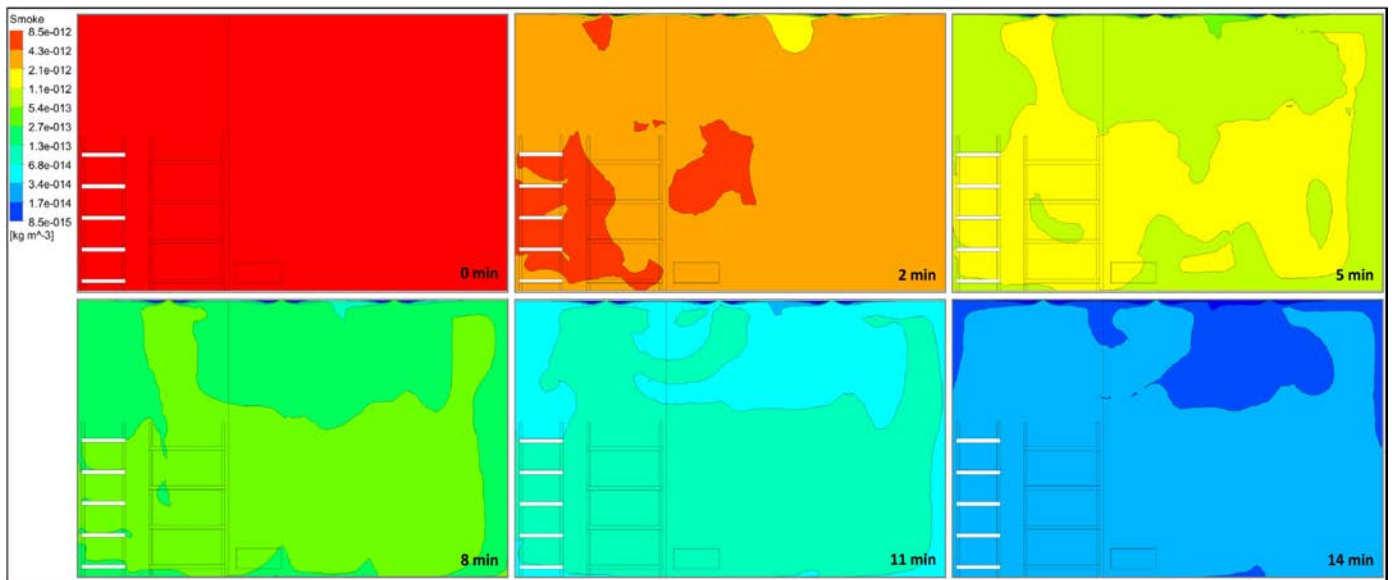


Abbildung 4: Verlauf der Partikelkonzentrationen innerhalb eines Raumes mittels Strömungssimulation grafisch dargestellt

Luft mit Partikeln belastet ist und nicht gefiltert wird, die Verringerung der Partikelkonzentrationen im Raum länger dauert. Die thermischen Bedingungen können einen positiven Einfluss auf die Durchmischung haben, beispielsweise können Wärmequellen die Turbulenzen im Raum fördern. Im Gegensatz dazu kann eine temperaturbedingte Schichtung dazu führen, dass Partikel innerhalb eines Kaltluftsees am Boden langsamer ausgetragen werden. Dies kann passieren, wenn keine ausreichende Wirbelbildung/Turbulenz im Raum vorhanden ist und sich kalte Luft am Boden absetzt. Die Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen hat nur in Bezug auf die Durchmischung im Raum einen Einfluss, aber nicht direkt auf die Erholzeit, sofern kein Kurzschluss auftritt. Bei gleichbleibender Luftmenge und unterschiedlicher Anordnung der Luftauslässe, werden an mehreren Messpunkten im Raum, die gleichen Zeiten für die Erholzeit ermittelt. Jedoch spielt die Anordnung der Luftöffnungen eine Rolle für die Effektivität der Lüftung. Wird die Zuluft unmittelbar nach Eintritt in den Raum wieder abgesaugt, ohne sich vorher über Turbulenzen im Raum auszubreiten, trägt dieser Teil der Luft nicht massgeblich zur Erholzeit bei und wird als Kurzschluss bezeichnet. Es ist also wichtig die Einbringung und Absaugung der Luft so zu konstruieren, dass ein perfekt durchmischter Raum entsteht. Für diesen kann die theoretische Erholzeit errechnet werden und diese hängt lediglich vom Luftwechsel ab. Die Luftwechselrate ist das Verhältnis aus Zuluftvolumenstrom und Raumvolumen und gibt an, wie oft das Raumvolumen pro Stunde ausgetauscht wird. Durch die Messung der Erholzeit kann dann im Vergleich zur theoretischen Erholzeit eine Aussage über die Effektivität der turbulenten Verdünnungsströmung getroffen werden. Je näher der Messwert an der theoretischen Erholzeit liegt, desto effektiver ist die Durchmi-

schung im Raum und somit die Lüftung. Ist der gemessene Wert niedriger als der berechnete, deutet dies darauf hin, dass im direkten Einfluss der Zuluft gemessen wurde. Ist es anders herum, geht ein Teil der Zuluft durch einen Kurzschluss verloren und senkt somit den tatsächlichen Luftwechsel im Raum.

Nachweis durch Messung

Im Reinraum der Hochschule Offenburg wurden Tests durchgeführt, um unterschiedliche Anordnungen der Zu- und Abluft und deren Einfluss auf die Erholzeitmessung zu überprüfen. Dabei wurde bei jeder Versuchsanordnung an vier gleichmäßig im Raum verteilten Stellen gemessen. Die Ergebnisse haben die oben beschriebenen Punkte bestätigt. Innerhalb einer Messreihe lieferten alle Messpunkte im Raum die gleiche Erholzeit. Nur die unterschiedlichen Aufbauten führten dazu, dass ein Teil der Zuluft über einen Kurzschluss den Raum verlassen hat ohne dabei eine nennenswerte Anzahl Partikel auszutragen. Durch unterschiedliche Anordnung von Zuluft und Abluft im Raum, mit mehr oder weniger Kurzschlussströmung, änderte sich erwartungsgemäss die gemessene Erholzeit, wobei an jeder

Stelle im Raum das Messergebnis der Erholzeit gleiche Werte lieferte.

In einem weiteren Test wurde im unter Abbildung 2 dargestellten Raum mit 26-fachem Luftwechsel der Einfluss der Einrichtung untersucht. Der Grundriss zeigt den Testraum mit mehreren Regalen, welche als schraffierte Flächen gekennzeichnet sind. Es handelt sich dabei um einen Pharmaproduktionsraum der Klasse B. Die Erholzeit wurde an verschiedenen Messstellen im Raum und innerhalb der Regale geprüft. Die Regale wurden zusätzlich für einzelne Versuchsreihen mit Equipment beladen. Ausserdem wurden die Regalböden als geschlossene Fläche und als Lochblech in verschiedenen Messreihen betrachtet. Die Messung lieferte an allen Messpunkten und mit den unterschiedlichen Bedingungen immer die gleiche Erholzeit, welche nur wenig über der berechneten theoretischen Erholzeit liegt. Ein geringer Teil der Zuluft geht hier also über die Abluft verloren, ohne zum Luftwechsel im Raum beizutragen. Dies konnte durch Sichtbarmachung der Luft mittels Nebel auch bewiesen werden. Die Position des Messpunktes und die Einrichtung des Raumes haben bei diesem Versuch keinen Einfluss gezeigt. Dies ist auf die



Abbildung 5: Erholzeitmessung in einem Raum mit turbulenter Verdünnungsströmung

Ergebnisse für einen Raum mit turbulenter Verdünnungsströmung und 26-fachem Luftwechsel	
theoretische Erholzeit	11 min
gemessene Erholzeit	12 min
simulierte Erholzeit	13 min

Abbildung 6: Vergleich der Ergebnisse von Theorie, Messung und Simulation

turbulente Raumströmung und einer guten Verteilung im Raum zurückzuführen. Die nahezu gleichen Ergebnisse lieferte die dazu durchgeführte Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulation.

Zeit und Kosten sparen

Falls im Rahmen der Erholzeitmessung festgestellt wird, dass die Messwerte deutlich von der theoretischen Erholzeit abweichen oder sogar die festgelegten Akzeptanzkriterien nicht erfüllt werden, ist es oft mit grossem Aufwand verbunden dies zu korrigieren. Entweder muss die Zuluftmenge erhöht werden, was zu einem erhöhten Energieverbrauch führt oder der Raum muss umgebaut werden, um die Luftströmung zu verbessern. Ein Umbau führt jedoch zu grossen Kosten und einem zeitlichen Verzug. Mit einer Strömungssimulation können die massgeblichen Parameter schon in der Planungsphase berücksichtigt und somit die Qualifizierung beschleunigt werden. Hierbei können unterschiedliche Szenarien über eine geeignete CFD-Software abgebildet und miteinander verglichen werden. Die bestmögliche Einbausituation kann dann abschliessend baulich umgesetzt werden und durch eine Erholzeitmessung bestätigt werden. Liegt das Ergebnis der Messung nahe an der theoretisch berechneten Erholzeit, spricht dies für eine gute Durchmischung.

Das Alter der Luft, also die Verteilung der Zuluft innerhalb eines Raumes, kann nur unter grossem Aufwand und nach Ausschalten der Lüftungsanlage gemessen werden. Mittels Strömungssimulation kann die Ausbreitung der Zuluft bereits vor Inbetriebnahme an jedem beliebigen Ort

im Raum analysiert werden. Damit ist es beispielsweise möglich die worst-case-Position für das Online-Monitoring festzulegen.

Die Luftwechselrate wird im Rahmen der Qualifizierungsmessungen lediglich über die Höhe des Zuluftvolumenstroms bestimmt. Das heisst, hier findet keine Kontrolle statt, ob die Luft tatsächlich dem Raum zu Gute kommt. Durch eine vorhergehende Simulation kann also auch dies schon vorab bestmöglich ausgelegt werden oder mit einer Erholzeitmessung überprüft werden. Somit können die thermischen Bedingungen, die Verteilung von Zuluft und der Partikelaustrag im Reinraum gewährleistet werden.

Optimierung im laufenden Betrieb

Auch bestehende Räume können mittels Strömungssimulationen analysiert und mögliche Verbesserungsmassnahmen herausgearbeitet werden. Dies macht es möglich die Routineprozesse weiter laufen zu lassen und somit Produktionsstillstände zu verkürzen. Nach der Simulation können die Massnahmen dann umgesetzt werden und Dank der vorab-Tests werden auch weniger Abweichungen bei der Qualifizierung der Raumlüftung auftreten.

Fazit

Durch die Erholzeitmessung kann die Aufreinigungsleistung des gesamten Raumes und die Effizienz der turbulenten Lüftung bewertet werden. Bei korrekter messtechnischer Durchführung muss an jeder Stelle im Raum die gleiche Erholzeit gemessen werden. Die Effizienz der Lüftung kann als Wirkungsgrad angegeben werden. Dieser ist durch das Verhältnis von theoretischer zu gemessener Erholzeit zu bestimmen.

Die Erholzeit liefert dagegen keine Aussage, wie schnell punktuell im Raum freigesetzte Partikel ausgespült werden. Hier spielt das Alter der Luft die massgebliche Rolle. Dies kann durch eine CFD-Simulation ermittelt und damit die Anordnung der Luftdurchlässe im Raum und darüber hinaus weitere Parameter optimiert werden.

Autoren:



Michael Kuhn, Leiter Steinbeis-Transferzentrum STZ EURO



Benjamin Pfändler, Leiter Geschäftsbereich Reinraumtechnik/Lufttechnik – Qualifizierung STZ EURO

Weitere Informationen

STZ EURO
Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Umwelt- und Reinraumtechnik
Badstrasse 24a
D-77652 Offenburg
Telefon +49 (0)781 203 547 12
bpfaendler@stz-euro.de
www.stz-euro.de

contamination control report

www.ccreport.com

vali.sys

vali.sys gmbh
hofstrasse 94
ch-8620 wetzikon

+41 43 495 92 50
info@valisys.swiss
www.valisys.swiss

innovativ kompetent kundenspezifisch

Ihr Partner für validierte Systeme!

Wir übernehmen von der Beratung über die Planung bis zur Erstellung von Komplettsystemen alles.