

## BAUSIM 2014: EINFLUSS VON DYNAMISCHEN DURCHFLUSSKOEFFIZIENTEN AUF DAS DRUCKDIFFERENZKONZEPT

S. Brandt<sup>1</sup>, M. Kriegel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hermann-Rietschel-Institut, TU-Berlin, Berlin, Germany

### KURZFASSUNG

Dieser Beitrag beschreibt die Anforderungen an die Druckhaltung in Reinräumen und gibt die theoretischen Grundlagen zur Berechnung des Volumenstroms durch eine Türöffnung in Abhängigkeit vom Druckverlust wieder. Mit Hilfe von 1D-Simulationswerkzeugen wird gezeigt, dass Drucksprünge und Rückströmungen bei Störungen, wie beispielsweise einer Türöffnung, auftreten. Um dies zu verhindern, wird in der Praxis großer Aufwand betrieben. Eine Lösung könnten neue gesteuerte Türregelprozesse sein. Dafür werden genauere Angaben über Druckexponenten und Durchflusskoeffizienten benötigt. Eine dynamische Auflösung dieser Vorgänge wird untersucht und in Modelle zur genaueren Abbildung der Regelprozesse integriert.

### ABSTRACT

This paper investigates the requirements for maintaining the pressure in clean rooms and describes the theoretical principles for the calculation of volume flows as a function of pressure losses. With the aid of 1D simulation tools it is illustrated that pressure changes and backflows arise due to disturbances, such as door openings. In order to prevent these effects great effort is expended in practice. A solution might be the adaption of new door-control methods, which require more detailed information on pressure exponents and flow coefficients. The focus of this paper is to study the dynamic resolution of these operating sequences and to integrate them into models to enable a more accurate mapping of the control processes..

### EINLEITUNG

Räume mit Anforderungen an die Luftreinheit im Bereich der Produktion, Medizin, Technik oder Forschung müssen im allgemeinen unterschiedliche Gütekriterien an die kontrollierte Umgebung erfüllen. Um angrenzende Bereiche unterschiedlicher Reinheitsgrade zu schützen, sollte gegenüber dem niedrigeren Reinheitsbereich ein erhöhter statischer Druck gehalten werden. Die Abgrenzung von reinen Räumen zu unreineren Räumen wird nach DIN EN ISO 14644-4 in drei verschiedene Systeme unterteilt: das Barrierekonzept, das Verdrängungskonzept und

das Druckdifferenzkonzept. Alle haben das Ziel, die luftgetragenen Teilchen wie Partikel und Keime, in einem abgegrenzten Bereich auf ein definiertes Maß zu reduzieren. Das Barrierekonzept sieht eine Erstellung eines undurchdringlichen Hindernisses vor, um eine Kontamination aus unreineren Bereichen zu verhindern. Das Verdrängungskonzept sieht einen großen Volumenstrom mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 0,2 m/s vor und trennt reine Bereiche und angrenzende weniger reine Bereiche mit einem niedrigen Differenzdruck. Das Druckdifferenzkonzept stellt das Gegenstück zum Verdrängungskonzept dar. Hierbei soll ein großer Differenzdruck, der bevorzugt im Bereich von 5 bis 20 Pa liegt, um das Öffnen von Türen noch zu ermöglichen, mit geringem Volumenstrom erzeugt werden. Um einen entgegengesetzten Luftstrom zu unterbinden, muss die Druckdifferenz stabil aufgebaut werden. Der Zugang zum reinsten Raum wird über ein Schleusensystem unterschiedlicher Raumklassen bereitgestellt. Die Anzahl der Schleusen variiert, so dass das Gesamtsystem eine drei- bis vierstufige Druckkaskade zwischen den angrenzenden Räumen aufweisen kann. Die Regelung dieser Systeme wird über eine Folgeregelung der Zu- oder Abluft raumweise umgesetzt. Im stationären Zustand ist die Druckhaltung gut regelbar. Einflüsse, wie Störgrößen bei Öffnung und Schließung der Tür, sowie interne variabel schaltbare Verbraucher, beeinflussen jedoch den Regelprozess. Hinzukommen Partikel- und Keimeintragungen durch den Menschen im Arbeitsprozess.

### GRUNDLAGEN

Bei der Untersuchung von Türöffnungen ist es wesentlich, beschreiben zu können, welcher Leckagevolumenstrom sich abhängig vom Druckgefälle zum benachbarten Raum einstellt. Die Charakteristik eines Volumenstroms durch Öffnungen und der damit verbundene Druckverlust wird über den allgemeinen Potenzansatz beschrieben:

$$Q = c \cdot \Delta p^n \quad (1)$$

$c$  = Durchflusskennwert in  $m^3/(h \cdot Pa^n)$

$n$  = Druckexponent

$\Delta p$  = Druckdifferenz in Pa

Für turbulente Strömungen ist  $n=0,5$  und für laminare Strömungen  $n=1$ . Mit Hilfe der Bernoulligleichung für setige, inkompressible Fluide wird Gleichung 1 für den Volumenstrom durch eine Öffnung in die am weitesten in der Praxis angewendete Gleichung überführt:

$$Q = C_D A \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (2)$$

$Q = \text{Volumenstrom in m}^3/\text{h}$

$C_D = \text{Durchflusskennwert}$

$A = \text{Fläche der Öffnung in m}^2$

$\rho = \text{Luftdichte in m}^3/\text{h}$

$\Delta p = \text{Druckdifferenz in Pa}$

Der Durchflusskennwert  $C_D$  ist eine dimensionlose Größe und hängt von der Geometrie der Öffnung und der Reynoldszahl der Strömung ab. Die Beschreibung der Geometrie der Öffnung und somit der verbundene Volumenstrom und Druckverlust wird als Leakage-Funktion bezeichnet. Theoretische Untersuchungen für verschiedene geometrische Anordnungen sind in Hopkins und Hansford, 1974, Etheridge, 1977, Kronvall, 1980 und Esdorn, 1978 zu finden. Die Werte des dimensionslosen Durchflusskennwertes liegen im Bereich 0 ... 1. In Untersuchungen konnte Maas, 1989 Werte zwischen 0,6 und 0,75 bestätigen. Mahajan, 1986 und 1987 hat aber auch Werte im Bereich 0,33 ermittelt. Bei den Druckexponenten sind Werte im Bereich 0,65 für kleine Öffnungen von Dols and Walton, 2002 und Walton, 1989 nachgewiesen worden. Esdorn, 1978 hat im ersten Ansatz für Spaltöffnungen den Druckexponenten  $2/3$  verwendet und konnte in der Untersuchung zeigen, dass je nach Spalttiefe und Spalthöhe die Werte des Druckexponenten zwischen 0,5 und 1 variieren.

Für andere geometrische Bauteile, wie z.B. für Türen und Fenster, sind im Ashrae 1997 Werte für effektive Luftleckageflächen angegeben. Bei dieser Methode wird die effektive Luftleckagefläche bei einem Referenzdifferenzdruck und konstantem Durchflusskoeffizienten ermittelt. Die mathematische Implementierung von Gleichung 2 sowie der effektiven Luftleckageflächen wird von Wetter 2006, beschrieben und ist in der Modelica Building Library implementiert, welche auf der Modellsprache Modelica beruht.

In Abbildung 1 ist für einige der oben genannten Untersuchungen der Druck über den Volumenstrom dargestellt. Alle Kurven beziehen sich auf die gleiche Öffnungsfläche. In der deutschen Praxis hat sich ein Durchflusskennwert von 0,72 für scharfkantige Öffnungen durchgesetzt und in der amerikanischen Vorschrift ein Wert von 0,65. Weiter sind Berechnungen nach Esdorn 1978, Etheridge 1977 und nach ASHRAE 1997 mit der effektiven Leakagefläche integriert. Zusätzlich ist das Ergebnis einer dreidimensionalen Strömungsberechnung mit CCM+ (CD-ADAPCO Inc.) dargestellt.

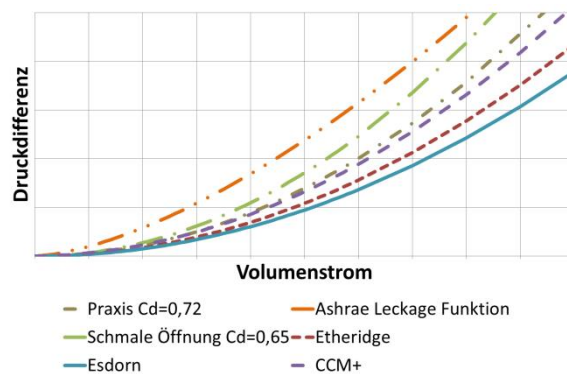


Abbildung 1: Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden

Es ist zu erkennen, dass innerhalb der theoretischen Beschreibungen des Druckverlustes über den Volumenstrom Abweichungen in den praktisch ermittelten Werten auftreten. Die relative Abweichung zwischen den theoretischen Beschreibungen sind über den ganzen Bereich gleich.

## SIMULATION

In der ersten Phase des Projektes „Druckhaltung Reinraum“ sind bestehende Druckhaltungssysteme in Laborräumen und ihre Regelalgorithmen untersucht worden. Dies ist mit der eindimensionalen Softwareumgebung Modelica und der Bibliothek Modelica Buildings Library erfolgt. In dieser Phase des Projektes wurde auf die Werte für den Durchflusskennwert und den Druckexponenten für Türen und Öffnungen von Wetter, 2013 zurückgegriffen. Als Grundaufbau für die Simulationen ist eine dreistufige Druckhaltung vorgesehen worden. Der Aufbau besteht aus drei Räumen und einem angrenzenden Flur, wie in Abbildung 2 dargestellt.

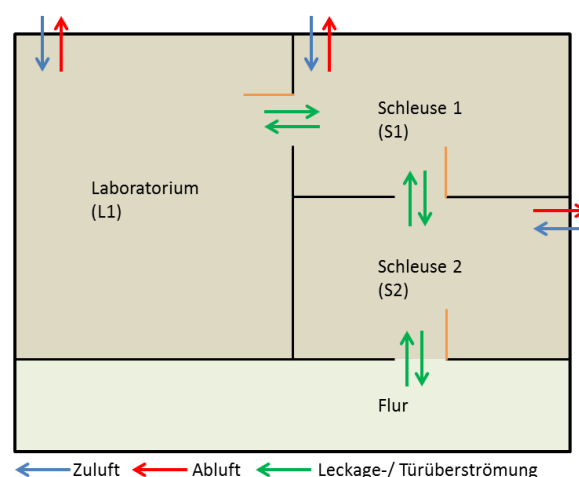


Abbildung 2: Darstellung des Reinraumsystems für die Simulationen

Jeder Raum verfügt über einen separaten Zuluft- und Abluftvolumenstrom. Zusätzliche Digestorien oder

weitere Einbauten mit separater Volumenstromregelung werden in diesem Modell nicht betrachtet und es sind keine Temperaturunterschiede zwischen den Räumen implementiert. Es stehen drei Einstellungen der Volumenstromregelung zur Verfügung. Wahlweise wird die Abluft oder die Zuluft geregelt oder beide sind konstant. Bei konstanter Einstellung entspricht die Volumenstromdifferenz im stationären Zustand der gewünschten Druckdifferenz von 10 Pa. Als Volumenstromreserve für die maximale Abluft oder die maximale Zuluft ist die doppelte Luftwechselrate die obere Grenze. Wichtige Randbedingungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Somit ergeben sich bei drei verschiedenen Regeloptionen und bei drei betrachteten Räumen 27 verschiedene Kombinationen, die untersucht worden sind. Alle Räume verfügen jeweils über eine Tür zum Nachbarraum entsprechend der Reihenfolge der Druckkaskade. Im ersten Ansatz werden die Türen nacheinander von innen nach außen geöffnet, entsprechend einer Person, die das Labor verlässt und auf den Flur geht. Hierbei werden die Türen nacheinander geöffnet und wieder geschlossen, so dass zu keinem Zeitpunkt 2 Türen gleichzeitig geöffnet sind.

Tabelle 1:  
Randbedingungen der Simulation

WERT	L1	S1	S2
Fläche	25 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>
Höhe	3 m	3 m	3 m
effektive Leckage-Fläche	0,01 m <sup>2</sup>	0,01 m <sup>2</sup>	0,01 m <sup>2</sup>
Soll Druckdifferenz	10 Pa	10 Pa	10 Pa
Türfläche	2 m <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Türöffnung Start	180 s	320 s	400 s
Zeit Tür auf	5 s	5 s	5 s
Zeit Tür offen	50 s	50 s	50 s
Zeit Tür schließt	5 s	5 s	5 s
Luftwechsel	25 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	25 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	25 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
Modelica Regelungseinstellung			
PID - K	1	1	1
PID - Ti	0.5 s	0.5 s	0.5 s
PID - Td	0.1 s	0.1 s	0.1 s

## ERGEBNISSE

In Abbildung 2 ist der Druckverlauf über die Zeit dargestellt. In diesem Fallbeispiel ist jeweils der Zuluftvolumenstrom in allen drei Räumen geregelt worden und der Abluftvolumenstrom konstant gehalten. Es ist deutlich zu erkennen, dass es beim Öffnen jeder Tür zu einem Druckabfall zum benachbarten Raum kommt und sich ein mittlerer Druck einstellt. Beim Schließen der Tür im Labor bei 240 Sekunden entsteht sowohl ein positiver Drucksprung im Labor als auch ein negativer

Drucksprung in der Schleuse 1 und Schleuse 2. Ursache hierfür ist, dass der Zuluftvolumenstromregler nicht schnell genug schließt und somit der Raumdruck im Labor steigt.

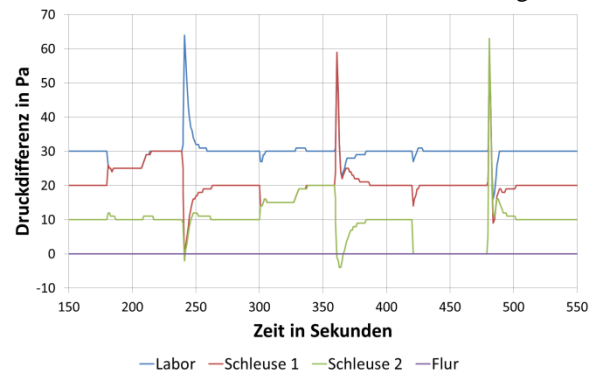


Abbildung 2: Druckverlauf bei Türöffnung und Regelung des Zuluftvolumenstroms in jedem Raum

Gleichzeitig öffnet der Zuluftvolumenstromregler in der Schleuse 1 nicht schnell genug und es wird mehr Luft aus dem Raum herausgeführt als eingebracht. Dadurch wird über die definierte Undichtigkeit der Tür zur Schleuse 2 Luft in die Schleuse 1 angesaugt. Dieser Effekt vollzieht sich ebenfalls an der Tür zum Flur in Schleuse 2. In diesem Beispiel wird ein Unterdruck erzeugt und die Reinraumdruckhaltung wird nicht durchgängig erfüllt. Deshalb kann nicht gewährleistet werden, dass keine Luft aus unreinen Bereichen in reinere Bereiche strömt. Das Überschwingen bzw. Unterschwingen des Druckes in der Reinraumkombination in Abbildung 2 wird auch beobachtet, wenn die anderen beiden Türen geöffnet und geschlossen werden. Die Effekte sind die gleichen und es werden Rückströmungen von unreinen Bereichen zu reineren Bereichen beobachtet. Wie in Tabelle 1 abgebildet, dauert der Prozess der Türöffnung insgesamt 60 Sekunden, wobei für den Öffnungs- und Schließprozess jeweils 5 Sekunden angesetzt worden sind. Die Berechnung des Verhältnisses der offenen zur geschlossenen Türfläche erfolgt in Modelica linear. In Abbildung 3 sind drei Ergebnisse des Druckverlaufes für einen gesteuerten Türprozess dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein kontrollierter Schließprozess zu geringeren Drucksprüngen führt und Rückströmungen verhindert. Der Faktor in der Abbildung 3 von oben nach unten liegt hier im Modelicamodell bei etwa 1000. Solch ein Schließprozess ist natürlich nicht in der Praxis zu realisieren.

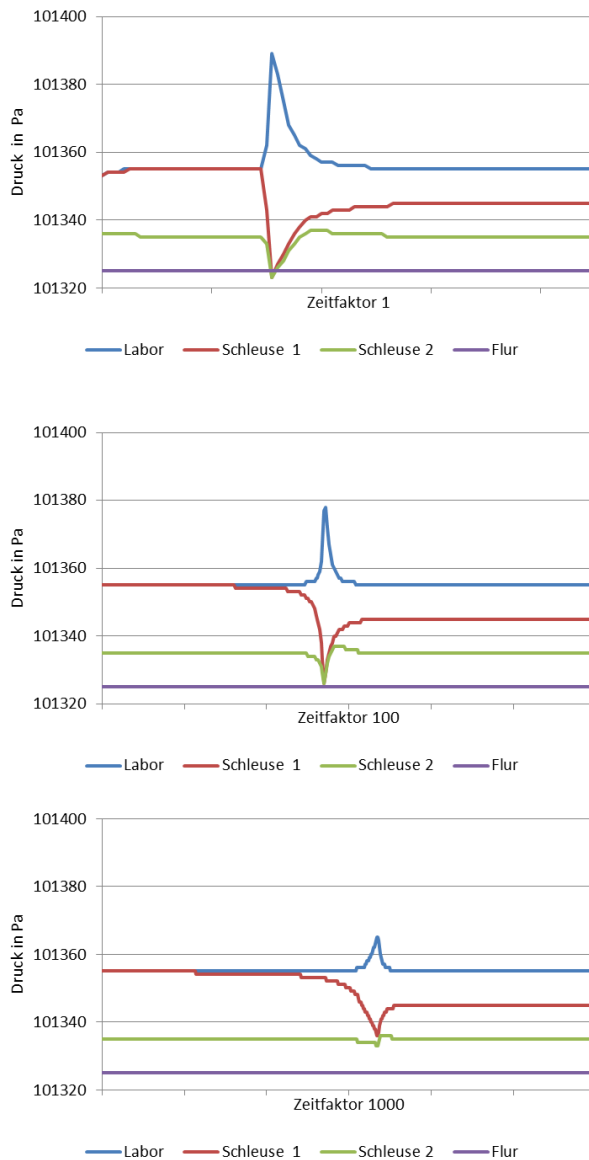


Abbildung 3: Darstellung des Druckverlaufes bei angepasster Türsteuerung

Der zeitliche Verlauf der Öffnungsfläche eines angepassten Türschließungsprozesses ist in Abbildung 4 dargestellt. Die blaue Linie zeigt die aktuelle lineare Modelica-Implementierung und die rote gestrichelte Linie eine angepasste Türsteuerungslinie. Wenn der Schließprozess für große Öffnungsflächen anfangs schneller und am Ende für kleine Öffnungsflächen langsamer geht, dann hat der Regler ausreichend Zeit, den Drucksprünge entgegen zu wirken.

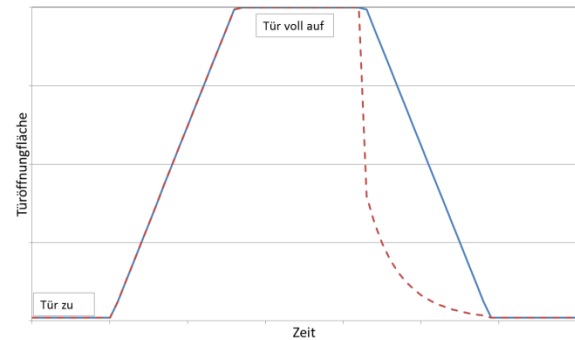


Abbildung 4: Darstellung der offenen Türfläche bei angepasster Türsteuerung

Für die Integration der roten gestrichelten Linie, wie in Abbildung 4 dargestellt, sind genauere Kenntnisse über die Druckexponenten und die Durchflusskennwerte erforderlich. In den Grundlagen wurden die theoretischen Modelle zur Beschreibung der Drücke bei einer konstanten Öffnungsfläche, siehe Abbildung 1, dargestellt. Genauere Kenntnisse über das dynamische Verhalten der Durchflusskennwerte bei Änderung der Öffnungsfläche sind zu ermitteln, um das zeitliche Verhalten besser beschreiben zu können. Dafür wird aktuell am Hermann-Rietschel-Institut ein Forschungsreinraum aufgebaut. Daran sollen u.a. Türöffnungsprozesse genauer untersucht werden. Ziel der Untersuchung wird es sein, die Druckhaltung auf einfache Weise zu stabilisieren und in Grundlagenexperimenten eine dynamische Beschreibung in der Form

$$C_D(t) = f(\text{Geometrie}, Re) \quad (3)$$

für verschiedene Türarten zu ermitteln. Die Ergebnisse fließen in Modelle zur besseren Beschreibung des Druckverhaltens in Modelica ein.

## FAZIT

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass in Abhängigkeit von der gewählten Regelstrategie Rückströmungen in Reinraumkombinationen auftreten können. Reale Regelungskonzepte verwenden komplexe Regelalgorithmen oder frieren die Regelung bei Störgrößenaufschaltung wie Türöffnungsprozessen komplett ein. Im ersten Ansatz konnte anhand von Simulationen gezeigt werden, welche prinzipiellen Möglichkeiten derzeit zur Verfügung stehen, um dem entgegenzuwirken.

Ein vielversprechender Ansatz besteht in der kontrollierten Regelung der Türschließprozesse. Für den Entwurf adäquater Regelstrategien ist es hierbei essenziell, das Leckageverhalten der Türen genauer abbilden zu können als dies derzeit möglich ist. Zukünftige experimentelle und numerische Studien können helfen, hierfür bessere dynamische Modelle zu entwickeln. Dies könnte in Zukunft auch zu einer Reduzierung (Messpunkte) der Kosten in der Gebäudeautomation führen.

## DANKSAGUNG

Wir danken dem ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand), Förderkennzeichen KF2780703AB3 Druckhaltung Reinraum und der Dr. Diestel GmbH.

## LITERATUR

- ASHRAE Fundamentals, 1997. Refrigeration and Air Conditioning Engineers. American Society of Heating.
- DIN EN ISO 14644-4, Juni 2003.
- Dols, W., Walton, G., 2002. CONTAM 2.0 user manual, multizone airflow and contaminant transport analysis software. Technical Report NISTIR6921, National Institute of Standards and Technology.
- Esdorn, H., Rheinländer, J., 1978. Zur rechnerischen Ermittlung von Fugendurchlaßkoeffizienten und Druckexponenten für Bauteilfugen. HLH 29 (3), S. 101-108.
- Etheridge, D.W., 1977. Crack flow equations and scale effect. Building and Environment 12:181
- Hopkins, L.P., Hansford, B., 1974. Air flow through cracks. Building Service Engineer 42 (September).123
- Kronvall, J., 1978. Testing of homes for air leakage using a pressure method. ASHRAE Transactions 84(1):72
- Mahajan, B., 1987. Measurement of interzonal heat and mass transfer by natural convection. Solar Energy, 38:437-446.
- Mahajan, B., Hill, D., 1986. Interzonal natural convection for various aperture configurations. ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, American Society of Mechanical Engineers.
- Van der Mass, J., Roulet C. A., Hertig, J. A., 1989. Some aspects of gravity driven airflow through large apertures in buildings. ASHRAE Transactions, 95(2):573-583.
- Walton, G., 1989. Airflow network models for element based building airflow modeling. ASHRAE Transactions, 95(2):611-620.
- Wetter, M., 2006. Multizone Airflow Model in Modelica. In Submitted to: Modelica conference 2006, Vienna.
- Wetter, M., 2013. Modelica Library for Building Energy and Control Systems, Lawrence Berkeley National Laboratory, December 13, 2013: Release Version 1.5 build 2.