NAMUR - Interessengemeinschaft
Automatisierungstechnik der Prozessindustrie e.V.

AK-PRAXIS

Raumdifferenzdruckmessung in Systemen der TGA

Stand: 2024-11-06

AK 1.7 Prozessnahe Gebäudeautomation

Beteiligte Mitglieder

Göbel	**Michael**	**Bayer AG, Arbeitskreisleiter**
Baldes	Andreas	Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG
Bullinger	**Alexander**	**BASF SE**
Dennhart	Torsten	Process Automation Solutions GmbH
Etzbach	**Gerhard**	**Sanofi-Aventis Deutschland GmbH**
Hinck	Eike	Stadt Köln
Krüttgen	Michael	TH Köln
Kliemt	Daniel	Bilfinger Maintenance GmbH
Mayyah	**Nima**	**Bayer AG**
Müller	Prof. Dr. Jochen	TH Köln
Niedermeier	Hans-Jürgen	Wacker Chemie AG
Richter	Gregor	Merck KGaA
Schauß	**Jörg**	**Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG**
Schramm	Jörg	Evonik Technology & Infrastructure GmbH
Schubert	Frank	Beckhoff Automation

Diese AK-PRAXIS spiegelt die Erfahrungen der Mitglieder im AK 1.7 wider und ist im Rahmen des Arbeitskreises abgestimmt. Sie hat nicht den Konsensgrad einer NAMUR-Empfehlung oder eines NAMUR-Arbeitsblatts. Mit einer AK-PRAXIS hat der Arbeitskreis die Möglichkeit, zeitnah eigene Erfahrungen für interessierte Leser zur Verfügung zu stellen.

Inhalt

1. Einleitung 2
2. Differenzdruckregelkreis 3
2.1. Sollwert 4
2.2. Nullpunkt / Referenzpunkt 6
2.3. Referenzleitung / Messleitung 7
2.4. Differenzdruckmessung 10
2.4.1. Messprinzip: 1 Sensor mit Splitter 11
2.4.2. Messprinzip: 2 Sensoren ohne Splitter 11
2.5. Steuern & Regeln 12
2.5.1. Überdruckregelung 12
2.5.1.1. Räume mit einem Volumenstrom bis zu 3.000 m³/h Zu-/Abluft 12
2.5.1.2. Räume ab einem Volumenstrom von 3.000 m³/h Zu-/Abluft 12
2.5.2. Unterdruckregelung 12
2.5.2.1. Räume mit einem Volumenstrom bis zu 3.000 m³/h Zu-/Abluft 12
2.5.2.2. Räume ab einem Volumenstrom von 3.000 m³/h Zu-/Abluft 12
2.5.3. Besondere Anforderungen an die Regelklappen und deren Antriebe 13
2.6. Kalibrieren 13
3. Abkürzungsverzeichnis 13

1. Einleitung

In Produktions- und Laborgebäuden besteht sehr oft die Anforderung, dass Räume in unterschiedlichen Druckstufen zueinander betrieben werden müssen. Typische Druckstufen sind 0 Pa, 15 Pa, 30 Pa und 45 Pa. Die Druckabstufung dient dem Produktschutz, z.B. durch Staub, Schmutzpartikel oder Kreuzkontamination. Erweitert werden die Anforderungen an die Erfüllung von Health-Safety-Environment (HSE)-Vorgaben, wie z.B. dem Personenschutz.

Alle Räume verfügen über einen gemeinsamen Druck-Bezugspunkt, der als Referenzpunkt bezeichnet wird, z.B. die Außenluft oder ein definierter Bezugsraum. Die Regelung der Druckstufen erfolgt durch ein Automationssystem. Die Überwachung der Druckstufen kann in einem qualifizierten Monitoringsystem abgebildet werden.
Zur Erfassung der Raumdrücke werden geeignete Differenzdrucksensoren verwendet. In dieser AK-PRAXIS werden Erfahrungen, Beispiele und Empfehlungen zum Aufbau und Installation eines Druckstufenkonzeptes mittels Differenzdruckmessungen wiedergegeben.

2. Differenzdruckregelkreis

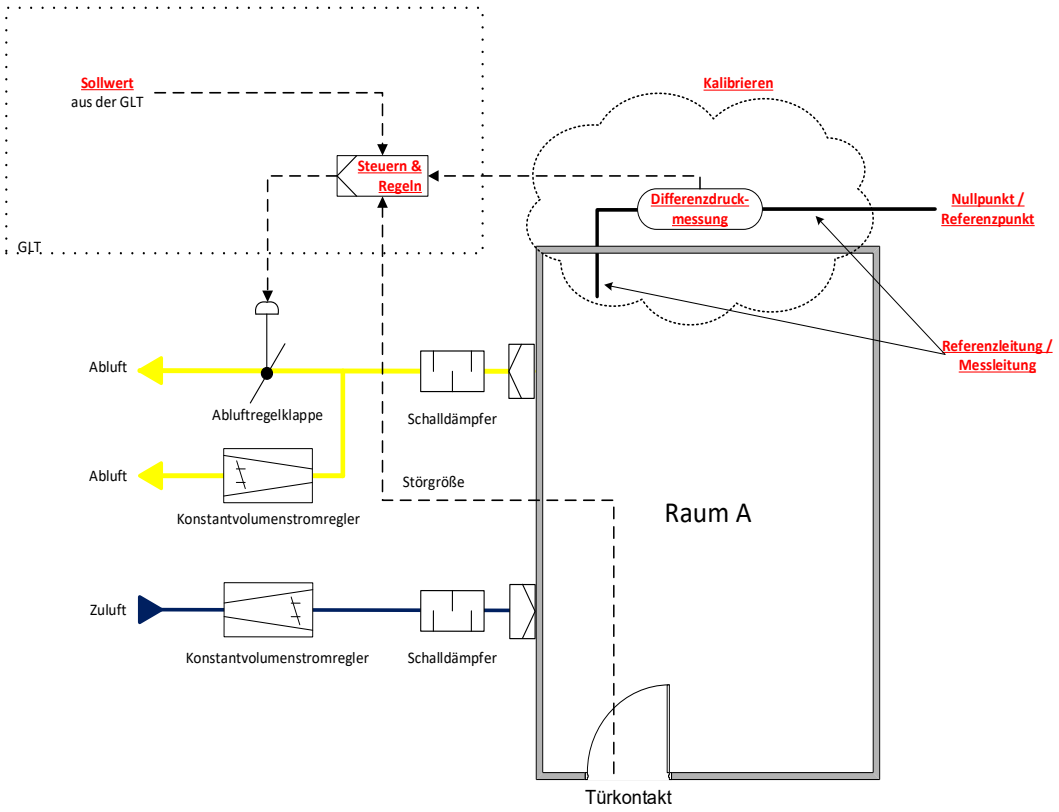

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Differenzdruckmessung inklusive Raumdruckregelung (Abluftgeregelt, Anwendung: Überdruckregelung)

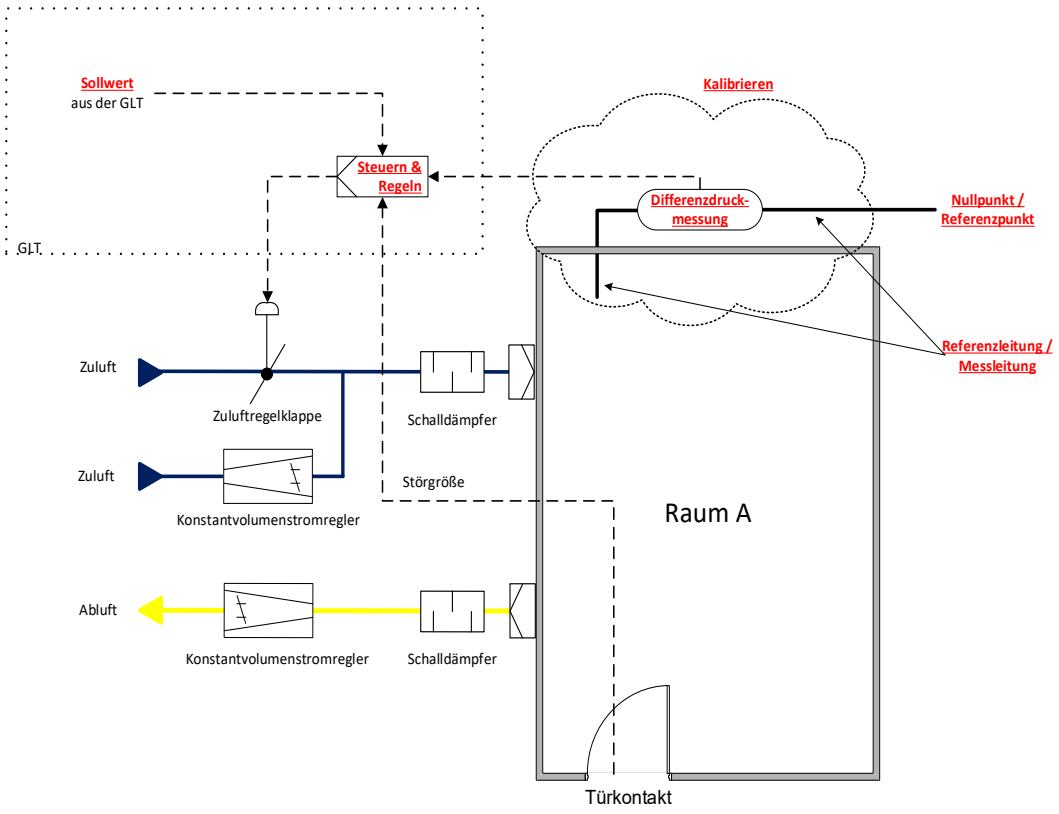

Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Differenzdruckmessung inklusive Raumdruckregelung (Zuluftgeregelt, Anwendung: Unterdruckregelung)

2.1. Sollwert

Bei der Auswahl der geeigneten Sollwerte, müssen verschiedene Punkte berücksichtigt werden.

- Durch die Auswahl muss die geforderte Druckdifferenz zwischen den einzelnen Räumen und den Produktionsbereichen gewährleistet werden.
- Druckdifferenzwerte werden z.B. im EU GMP Leitfaden, von der FDA oder anderen Ländern und deren Behörden vorgegeben bzw. empfohlen.
- Es muss die maximale Fehlertoleranz des Messkreises mitberücksichtigt werden. Hierdurch muss gewährleistet werden, dass selbst im maximalen Fehlerfall eine Druck- oder Überströmungsumkehr nicht erreicht werden kann.
- Es muss durch die Druckabstufung ein maximaler Spielraum für die Festlegung von Grenzwerten zur Überwachung bleiben. Gerade bei sensiblen Raumdifferenzdruckregelungen ist hierfür eine Toleranz von mindestens 5 Pa einzuhalten.

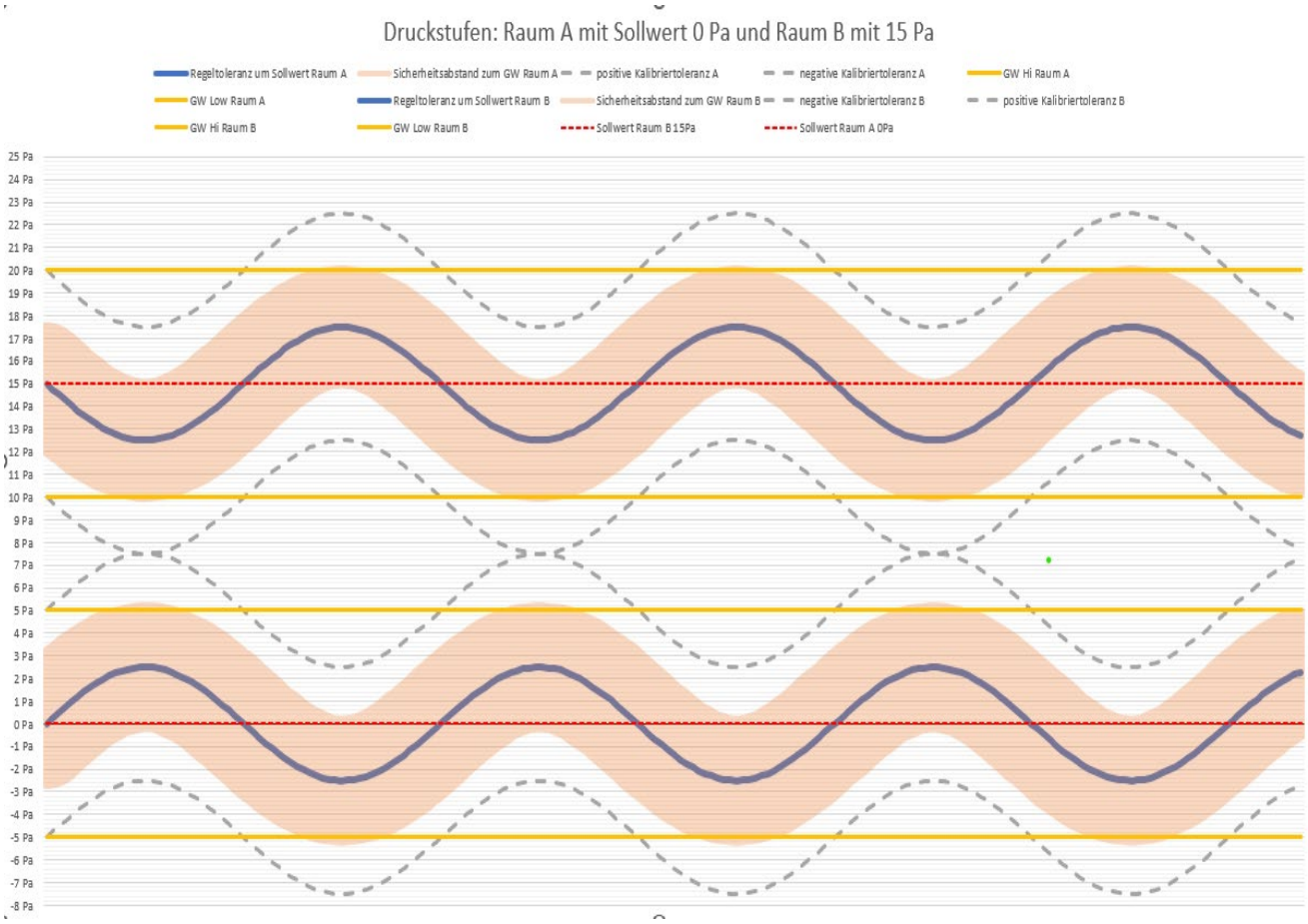

Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Sollwerte, Istwerte, Toleranzen und Grenzwerte zweier Räume mit einem Druckunterschied von 15 Pa

In Abbildung 3 sind beispielhaft zwei Räume und deren Raumdrücke zueinander dargestellt.
Die rot gestrichelte Linie stellt den Sollwert der Räume dar. Der Sollwert von Raum A beträgt 0 Pa und der Sollwert von Raum B beträgt 15 Pa.
Die blaue Linie stellt die Regeltoleranz um den Sollwert dar.
Die breite, orangene Linie stellt einen weiteren Toleranzbereich dar, welcher aufgrund von Störgrößen erreicht werden kann. Störgrößen sind z.B. das Ein- bzw. Ausschalten eines Entstaubers oder das Öffnen und Schließen von Türen.
Aufgrund dieser beiden benannten Toleranzen ist ein Sicherheitsabstand von ±5 Pa um den jeweiligen Sollwert für die einzustellenden Alarmgrenzen nötig (gelbe Linien).
Die gestrichelte, graue Linie stellt die festgelegte maximale Sensorabweichung dar, welche ggf. erst bei der Jahreskalibrierung auffallen könnte. Sensorabweichungen sind z.B. ein Driften des Messwertes. Diese zusätzlichen ±2,5 Pa stellen sicher, dass im Fall einer Toleranzabweichung keine Überschneidung der Raumdrücke entsteht. Diese Gerätetoleranz wird in Qualifizierungsgesprächen festgelegt und ist bei der Auswahl geeigneter Messtechnik zu berücksichtigen.

2.2. Nullpunkt / Referenzpunkt

Zur Realisierung von stabilen Differenzdruckmessungen für Räume / Reinräume, welche einen vorgegebenen Differenzdruck einhalten müssen, ist ein Referenzdruck an einem Referenzpunkt notwendig.
Zur Vermeidung von Wind- und Witterungseinflüssen wird die Installation des Bezugspunkts innerhalb des Gebäudes empfohlen.
Die mögliche Realisierung des Bezugspunkts an einer Außenwand des Gebäudes wird nicht favorisiert, da Witterungseinflüsse zu Abweichungen der Nullpunktstabilität führen können.
Weitere Nachteile bei einer Außeninstallation sind:

- Witterungsbeständigkeit der Materialien z.B. gegen Hitze, Frost, UV-Strahlung, usw.
- Möglicher Befall durch Tiere und Insekten
- Höherer Wartungsaufwand

Ein guter Aufstellungsort ist ein großer, unbelüfteter und beruhigter Raum ohne Fenster im Inneren des Gebäudes. Beruhigt bedeutet, dass der Raum vor Einflüssen, welche zu Druckschwankungen führen können, geschützt ist.
Mögliche Einflüsse sind:

- Aufzüge
- Regelmäßiger Durchgangsverkehr
- Druckänderungen durch Winterungseinflüsse wie z.B. Wind durch eine Fensterfront

Die Ausführung des Nullpunkts muss mittels einem zusätzlichen Referenzdruckbehälter erfolgen. Bei großen Räumen bzw. Gebäuden ist es von Vorteil mehrere miteinander verbundene Referenzdruckbehälter zu verwenden.

Referenzdruckbehälter:
Ist ein Druckbehälter zur Dämpfung atmosphärischer Schwankungen auf dem Referenzdrucksignal für druckgeregelte Räume. Der Referenzdruckbehälter dient als Referenz Nullpunkt für die Messungen, für die Kalibrierung und der Dokumentation.
Funktion:
Der Referenzdruckbehälter ist wie ein elektrotechnisches RC-Glied (ohmsche und kapazitive Schaltung) zu verstehen. Durch die exakte Anpassung eines laminaren Widerstandes und einer Kapazität zueinander werden die Amplituden des atmosphärischen Druckes auf ein stabiles Signal geglättet. Dieses geglättete Signal wird als Referenz für nachfolgende Raumdruckregelkreise verwendet.
Fertige Referenzdruckbehälter werden am Markt angeboten.

Abbildung 4: Referenzdruckbehälter in einer Lüftungsanlage (Quelle: Bayer AG)

2.3. Referenzleitung / Messleitung

Die Positionen der Messstutzen innerhalb des Raumes sollten so gewählt werden, dass sie so weit wie möglich von den Zuluft- oder Abluftauslässen entfernt und somit in einem beruhigten Bereich des Raumes installiert sind. Die Messstutzen sollten leicht zu erreichen sein, um sie für die Kalibrierung der Messstrecke dicht verschließen zu können.

Alle Rohr- bzw. Schlauchverbindungen sollen die größte mögliche Dichtheit gewährleisten. Wenn eine hohe Dichtheit und Stabilität der Rohrinstallation gewährleistet ist (gelötet oder geschweißt), kann eine Installation innerhalb von Reinraumdoppelwänden vorgenommen werden. Bei flexiblen und gesteckten Schlauchverbindungen ist eine Installation innerhalb von Reinraumwänden auf Grund der schlechten Erreichbarkeit im Fehlerfall nicht zu empfehlen. Alternativ ist der Anschluss in der Decke möglich, wenn die Erreichbarkeit des Stutzens gegeben ist.
Es sind Anschlussstutzen für die Kalibrierung vorzusehen, damit die Kalibrierung durchgeführt werden kann, ohne den Messkreis zu öffnen.

Seitens NAMUR wurden Versuche mit unterschiedlichen Schläuchen, Kupplungen und Anschlüssen durchgeführt, um herauszufinden inwiefern dies einen Einfluss auf die Qualität der Druckmessung hat.

In der Regel kommen zwei Anschlusstechniken zum Einsatz:
- CK-Schnellverschraubung z.B. für Schlauch Außen/Innen – 6/4
- Steckverbindungen z.B. für Schlauch Außen/Innen – 6/4

<u>CK-Schnellverschraubungen (POM, Polyacetal)</u>
Die Installation in Verbindung mit einem PU-Schlauch eignet sich für dauerhafte Installationen, die nicht mehr geöffnet werden müssen. Man erhält eine sehr stabile Verbindung.
Die Kombination in Verbindung mit einem PTFE-Schlauch ist nicht möglich. Dies beruht auf der Steifigkeit der PTFE-Schläuche.

Abbildung 5: CK-Schnellverschraubung

<u>Steckverbindungen (Edelstahl)</u>
Mit diesen Steckverbindern lassen sich mechanisch stabile Verbindungen herstellen. Sie lassen sich durch Eindrücken sehr leicht lösen und sind somit für Kalibrieranschlüsse geeignet. Sie lassen sich in Verbindung mit PTFE- und PU-Schläuchen verwenden. Eine saubere Schnittkante ist bei diesen Verbindern zwingend notwendig.
Bei sehr starkem Zug werden die Verbindungen undicht.

Abbildung 6: Schlauchsteckverbinder

Schlauchleitungen:
Sehr häufig werden 6 und 8mm (Außendurchmesser) Schlauchleitungen eingesetzt. Der am meisten eingesetzte Standard ist 6/4mm (Außen/Innen).
Man sollte nur kalibrierte Schläuche verwenden. Es ist darauf zu achten, ob es sich um außen- oder innenkalibrierte Schläuche handelt.
Die Schlauchleitung und Kupplung sollten vom gleichen „System / Hersteller“ sein. Damit wird sichergestellt, dass die Maße der Kupplung und Schlauchdurchmesser zusammenpassen.
Sehr oft werden PTFE und PU-Schläuche eingesetzt.

PTFE-Schlauch:
Der PTFE-Schlauch ist sehr rutschig und steif. Aus diesem Grund ist die Montage mit den CK-Schnellverschraubungen nicht möglich. Bei PTFE-Schläuchen sind zwingend Schlauchschneider zu verwenden, ansonsten ist die Verbindung undicht.

Abbildung 7: Schlauchschneider

Abbildung 8: Links Schnittbild mit Schlauchscheider, rechts Schnittbild mit Seitenschneider

PU-Schlauch:
Der PU-Schlauch ist weich und wesentlich flexibler als der PTFE-Schlauch. Er lässt sich auch mit den CK-Schnellverschraubungen verwenden.

Verwendung von Ventilen zur Erleichterung der Kalibrierung:
Die Handhähne / Ventile sind in der Regel in ihren Zwischenstellungen undicht. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass sie in Ihrer Endstellung gegen unsachgemäße Bedienung gesichert werden.

Alle verwendeten Materialien sind auf Beständigkeit gegen die verwendeten Reinigungs- und Begasungsmittel zu prüfen, z.B. Wasserstoffperoxyd als gasförmiges Desinfektionsmittel.
Nicht alle Kunststoffe sind beständig. Eine Prüfung sollte im Vorfeld mittels Anfrage beim Hersteller erfolgen.

Fazit:
In der Planung sollte ein Augenmerk auf die Verbindungstechniken gelegt werden. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten ist entscheidend für eine ordnungsgemäße Druckmessung. Die angegebenen Verbindungstechniken sind bei ordnungsgemäßer Anwendung im geprüften Bereich von ±100 Pa dicht.
Es können verschiedene Verbindungstechniken in Kombination eingesetzt werden. Dabei kann man die unterschiedlichen Eigenschaften entsprechend ausnutzen.

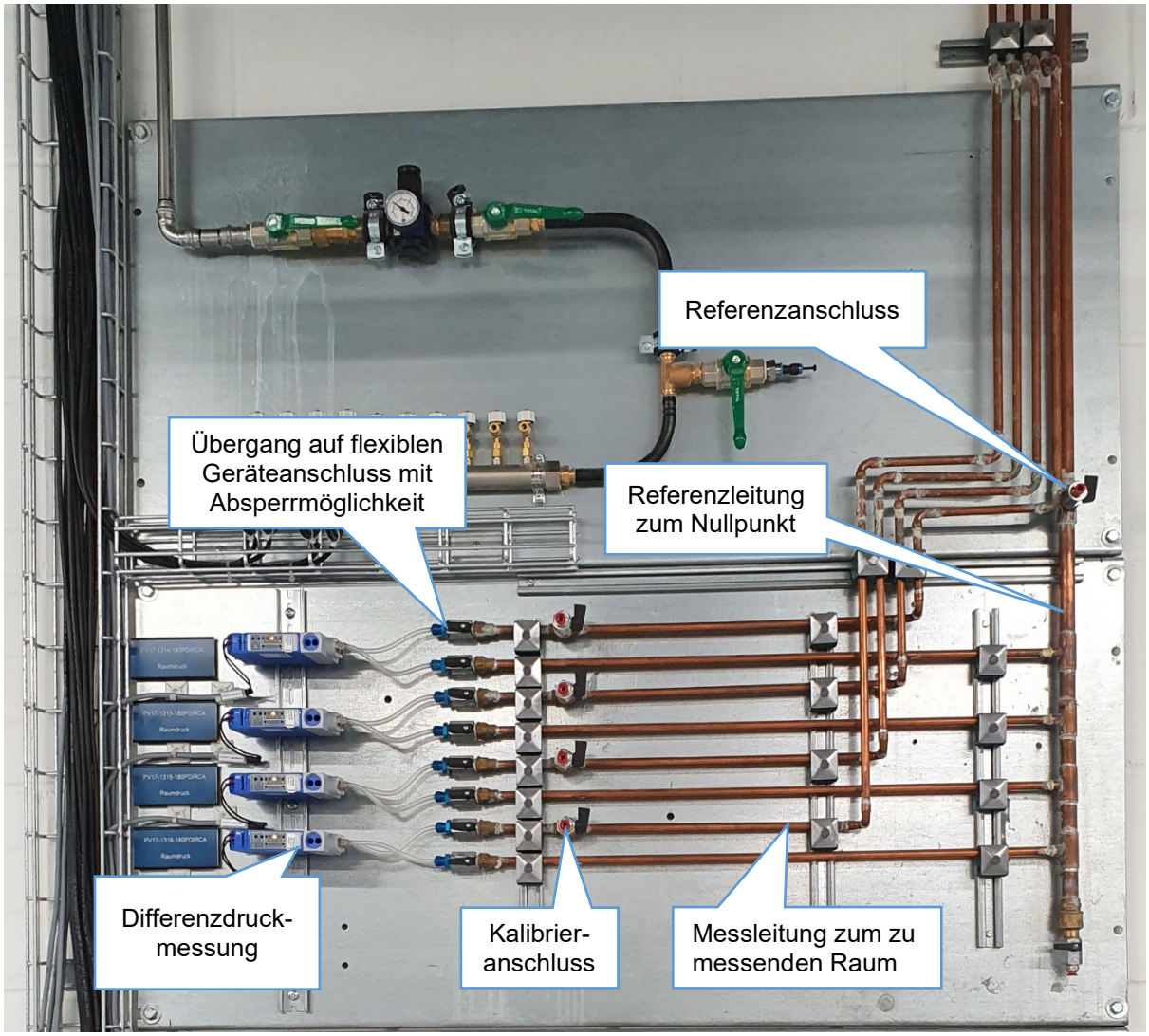

Abbildung 9: Beispiel Montageplatte Raumdruckmessung (Quelle: Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG)

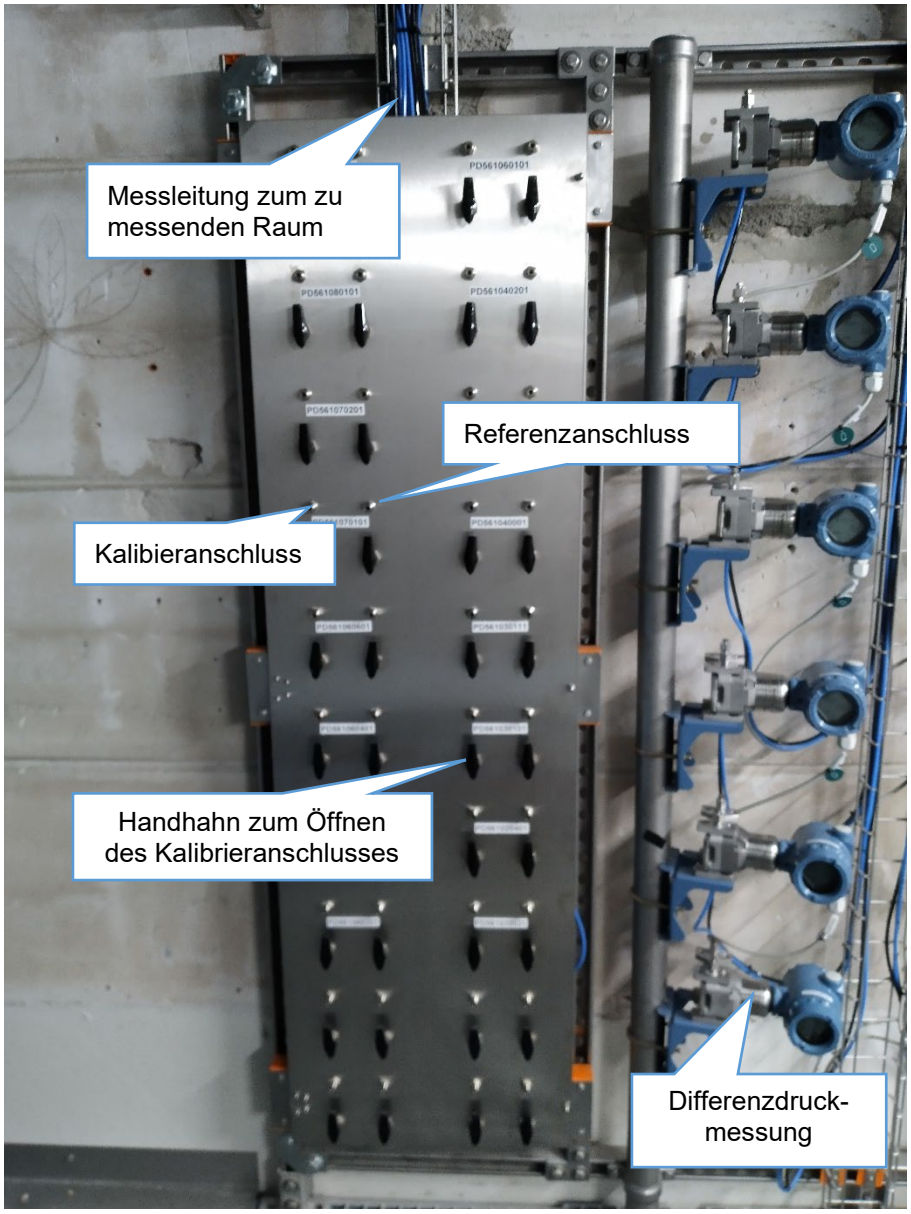

Abbildung 10: Beispiel Montageplatte Raumdruckmessung (Quelle: Sanofi-Aventis Deutschland GmbH)

2.4. Differenzdruckmessung

Für den Aufbau der Druckmessung wird empfohlen, aufgrund von Instandhaltungsmaßnahmen und Zugänglichkeit, die Auswerteelektronik zentral an einem Ort zu bündeln und aufzustellen. Empfohlen wird der Aufbau auf einer Montageplatte oder in einem Schrank. Auf die Herstellerangaben bezüglich Aufstellungsort und Aufstellungsbedingungen, wie z.B. Umgebungstemperatur, Ex-Zone, Berührungsschutz, IP-Klasse usw., ist zu achten.

Die Verfügbarkeit der Druckmessung sollte in einem Sicherheitsgespräch festgelegt werden. Ggf. ist eine USV gepufferte Spannungsversorgung sinnvoll.

2.4.1. Messprinzip: 1 Sensor mit Splitter

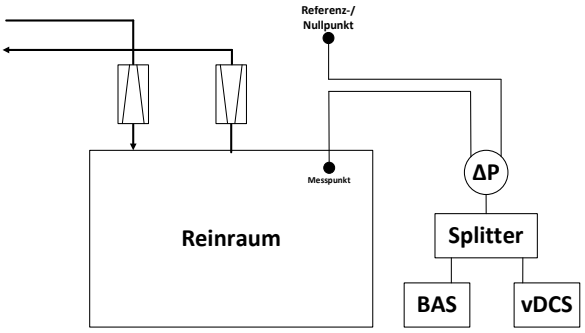

Abbildung 11: Variante 1 mit einem Differenzdrucksensor

Variante 1 Abbildung 11: Es wird ein Sensor installiert, dessen Messsignal über einen Signalsplitter auf das BAS (Building Automation System / Gebäudeautomation) und vDCS (Monitoring-System) gedoppelt wird.
Vorteil: Weniger Aufwand und Kosten da nur ein Sensor kalibriert werden muss.
Nachteil: Ein Sensorausfall oder -defekt hat zur Folge, dass die Messung incl. der Raumdruckregelung ausfällt oder sie bis zur nächsten Kalibrierung falsch misst.

2.4.2. Messprinzip: 2 Sensoren ohne Splitter

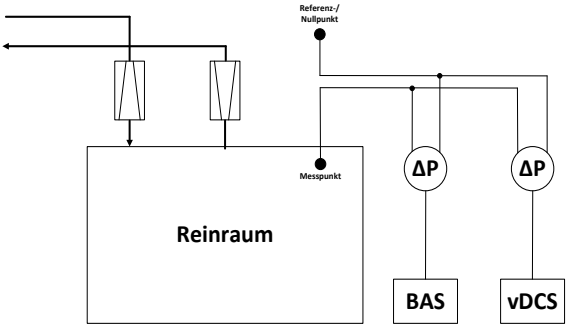

Abbildung 12: Variante 2 mit zwei Differenzdrucksensoren

Variante 2 Abbildung 12: Es werden zwei Sensoren installiert, die an einer gemeinsamen Messleitung angeschlossen sind. Die gemessenen Werte werden getrennt voneinander an das BAS und vDCS weitergeleitet.
Vorteil: Durch zwei unabhängige Sensoren können die Inbetriebnahme, Tests und das Beheben von Störungen an den Sensoren unabhängig voneinander durchgeführt werden. Ein Sensorausfall oder -defekt hat zur Folge, dass entweder die Raumdruckmessung oder die Raumdruckregelung ausfallen. Zu jeder Zeit kann aber eine Aussage über den aktuellen Raumdruck getroffen werden.
Nachteil: Aufbau von zwei Messkreisen. Doppelte Installations-/ Kalibrier-/ und Wartungskosten.

Beide Sensoren sind beim Kalibrierverfahren identisch zu behandeln. Weiterhin ist zu empfehlen, dass beide Sensoren baugleich sind und die gleichen Alarmgrenzen und Messbereiche haben.

2.5. Steuern & Regeln

Zur Steuerung und Regelung über die Differenzdruckmessung gehen wir in diesem Dokument von einem einfachen Bespiel aus. Es handelt sich wie in Abbildung 1 dargestellt um einen Reinraum mit einer einfachen Zu- und Abluft. In der Zuluft ist ein Konstantvolumenstromregler installiert, der den konstanten Luftwechsel im Raum sicherstellt. Diese Anforderung einer konstanten Luftwechselrate wird oft für Reinräume gestellt und wird mit dieser Installationsvariante erfüllt.
Zur Regelung des Drucks innerhalb des Reinraumes wird in der Abluft eine Regelklappe installiert. Der Istwert des Raumdrucks wird auf einen Regler aufgeschaltet. Der Regler vergleicht den vorgegebenen Sollwert mit dem Istwert und regelt das Stellglied (hier Regelklappe) gemäß dem Sollwert aus. Es wird die Verwendung von Regelklappen in der Abluft empfohlen, da diese direkt angesteuert werden können und in der Praxis eine bessere Regelbarkeit erreichen. Bei Verwendung von Volumenstromreglern wird eine Kaskadierung von Raumdruck- und Volumenstromregelung erzeugt, die sich negativ auf das Regelverhalten des Gesamtsystems auswirkt.

Mit Hilfe der Zustandsüberwachung von Türen (Auf / Zu) erhält man ein Mittel zur Diagnose und Bewertung von Raumdruckabweichungen. Der Nachweis, ob Druckschwankungen durch ein Türöffnen bzw. -schließen verursacht wurden, ist somit möglich und kann in die Bewertung möglicher Abweichungen einfließen.
Die Zustandsüberwachungen der Türen werden auf die Regelung aufgeschaltet, um das Stellsignal für den Zeitraum der Türöffnung einzufrieren und somit ein Überschwingen der Regelung nach dem Schließen der Tür zu vermeiden.

2.5.1. Überdruckregelung

2.5.1.1. Räume mit einem Volumenstrom bis zu 3.000 m³/h Zu-/Abluft

Zuluft über einen fest eingestellten Konstant-Volumenstromregler oder einen variablen Volumenstromregler mit einer festen Sollwertvorgabe. Abluft über einer Regelklappe, welche von einem Differenz-Drucksensor über die GLT geregelt wird.

2.5.1.2. Räume ab einem Volumenstrom von 3.000 m³/h Zu-/Abluft

Konstante Zuluft über einem fest eingestellten Konstant-Volumenstromregler oder einen variablen Volumenstromregler mit einer festen Sollwertvorgabe. Abluft zum Hauptanteil ebenfalls über einen fest eingestellten Volumenstromregler und über eine parallele Regelklappe, welche von einem Differenz-Drucksensor über die GLT geregelt wird. Der Volumenstrom über die Regelklappe ist abhängig vom Gesamtvolumenstrom und den Leckagen des Raumes. Die Auslegung muss raumspezifisch durch das Gewerk Lüftung erfolgen.
Ein erster grober Anhaltswert kann mit 300 bis 600 m³/h unabhängig vom Gesamtvolumenstrom oder 1/3 des Gesamtvolumenstromes angenommen werden.

2.5.2. Unterdruckregelung

Die Unterdruckregelung eines Raums kann wie im Kapitel 2.5.1 beschrieben ausgeführt werden. Um Zuluftmenge sparen zu können, ist aber auch eine Regelung wie im Folgenden beschrieben möglich. Qualitativ sind beide Varianten gleich zu betrachten.

2.5.2.1. Räume mit einem Volumenstrom bis zu 3.000 m³/h Zu-/Abluft

Abluft über einen fest eingestellten Konstant-Volumenstromregler oder einen variablen Volumenstromregler mit einer festen Sollwertvorgabe. Zuluft über eine Regelklappe, welche von einem Differenz-Drucksensor über die GLT geregelt wird.

2.5.2.2. Räume ab einem Volumenstrom von 3.000 m³/h Zu-/Abluft

Konstante Abluft über einen fest eingestellten Volumenstromregler oder einen variablen Volumenstromregler mit einer festen Sollwertvorgabe. Zuluft zum Hauptanteil ebenfalls über einen fest eingestellten Volumenstromregler und über eine parallele Regelklappe, welche von einem Differenz-Drucksensor über die GLT geregelt wird. Der Volumenstrom über die Regelklappe ist abhängig vom Gesamtvolumenstrom und den Leckagen des Raumes. Die Auslegung muss raumspezifisch durch das Gewerk Lüftung erfolgen.
Ein erster grober Anhaltswert kann mit 300 bis 600 m³/h unabhängig vom Gesamtvolumenstrom oder 1/3 des Gesamtvolumenstromes angenommen werden.

2.5.3. Besondere Anforderungen an die Regelklappen und deren Antriebe

Bei sehr luftdichten Räumen (geringe Leckagen) ab der Dichtheitsklasse größer gleich 4 (höhere Klassen bedeutet, dass geringere Leckagen zulässig sind) gemäß VDI 2083-19 könnte es aufgrund der Positioniergenauigkeit und der geringeren Hysterese sinnvoll sein einen pneumatischen Antrieb an den Regelklappen einzusetzen. Zur Klasse 4 der VDI 2083-19 gehören z.B. BSL3-Sicherheitslabore, BSL4-Sicherheitslabore sind in Klasse 5 enthalten.

Die in der pharmazeutischen Produktion anzufindenden Reinräume entsprechen der Klasse 3 oder geringer der VDI 2083-19, so dass hier von einer größeren Leckage-Rate ausgegangen werden kann. Bei diesen empfehlen wir den Einsatz elektrischer Antriebe und eine Regelung über das BAS. Dies hat sich vielfach in der Praxis bewährt.

Weiterhin hat sich in der Praxis der Schnellläufer-Antrieb an den Regelklappen bewährt. Dadurch ist eine Ausregelung der Störungen in den Reinräumen schneller gewährleistet, jedoch muss die höhere Stromaufnahme dieser Antriebe Berücksichtigung finden.

2.6. Kalibrieren

Im Folgenden wird ein mögliches Vorgehen zur Kalibrierung einer Raumdruckmessung beschrieben. Siehe hierzu auch Abbildung 9.

1. Regelungen der Gebäudeautomation auf Betriebsart Hand stellen.
2. Dichtes Verschließen des Messstutzens im zu messenden Raum.
3. Anschließen des Druckprüfmittels am vorgesehenen Kalibrieranschluss auf der Montageplatte der Differenzdruckmessungen.
4. Öffnen des Kalibrieranschlusses.
5. Vorgabe des ersten Sollwerts. Hierbei wird die gesamte Messstrecke bis zum zu messenden Raum mit Druck beaufschlagt. Eine Undichtigkeit der Messleitung kann so direkt festgestellt werden.
6. Ablesen des ersten Messwerts.
7. Wiederholung der Punkte 5 und 6, bis alle Prüfpunkte kalibriert sind.
8. Schließen des Kalibrieranschlusses.
9. Durch eine weitere Druckvorgabe am Prüfmittel ist sicherzustellen, dass der Kalibrieranschluss auch dicht verschlossen ist.
10. Abziehen des Druckprüfmittels.
11. Öffnen des Messstutzens im zu messenden Raum.

3. Abkürzungsverzeichnis

BAS	Building Automation System / non GMP
FDA	Food & Drug Association
GLT	Gebäudeleittechnik
GMP	Good Manufacturing Practice
GW	Grenzwert
HSE	Health Safety Environment
TGA	Technische Gebäude Ausrüstung
vDCS	validated Distribution Control System / GMP Monitoring System