

Mitrotation im Wärmerad

Die interne Leckage eines Rotors besteht aus der Dichtungsleckage und der Mitrotation. Während die Leckage von der Dichtungsqualität und der Druckdifferenz abhängt, ist die Mitrotation funktionsbedingt; sie lässt sich unter Umständen - abhängig von der Ventilatoranordnung - aber durch eine Spülzone vermeiden. Diesem Umstand muss schon bei der Planung Rechnung getragen werden.

Mitrotation hat vielfache Auswirkungen

Durch die Mitrotation werden die Massenströme von Abluft/Fortluft und Aussenluft/Zuluft verändert; die Planwerte (= ohne Leckage) werden nicht mehr erreicht. Dies hat vielfache Auswirkungen:

- **Korrektur der Massenströme**
Die Abluft- und Aussenluftmassenströme müssen so korrigiert werden, dass die geplanten und notwendigen Zuluft- und Fortluftmengen (= ohne Leckage) erreicht werden.
- **Erhöhte Luftleistung der Ventilatoren**
Um die Nennleistungen von Abluft und Zuluft realisieren zu können, muss - je nach Ventilatoranordnung - mindestens ein Ventilator, oft aber beide, zusätzlich die Mitrotation fördern.
- **Geminderte Zuluftqualität**
Gibt es Mitrotation von der Abluft in die Zuluft, kann diese dadurch in der Qualität verschlechtert werden. Dieses Kriterium ist auch in der VDI 6022 Bl. 1 behandelt, wonach Wärmerückgewinner mit einer Mitrotation in die Zuluft nur zulässig sind, wenn auch die Verwendung von Umluft hygienekonform ist.
- **Technische Daten**
Durch die Mitrotation bzw. durch eine Spülzone können sich die technischen Daten (Rückwärmzahl und Druckverlust) ändern. Sie müssen deshalb überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Auf Grund dieser Auswirkungen ist die Mitrotation so klein wie möglich zu halten; dies muss bei Planung und Auslegung beachtet werden.

Mitrotation: Wie geht das?

Funktion

Funktionsbedingt wird Luft, während sie den Rotor durchströmt, von einem Luftstrom in den anderen „gedreht“; dies bezeichnet man als Mitrotation. In Bild 1 erkennt man, dass alle Abluft, die innerhalb des Winkels α eintritt, erst auf der Aussenluft-/Zuluftseite wieder austritt. Die Menge der Mitrotation (und damit der Winkel α) hängt damit von der Durchströmzeit und der Rotordrehzahl ab.

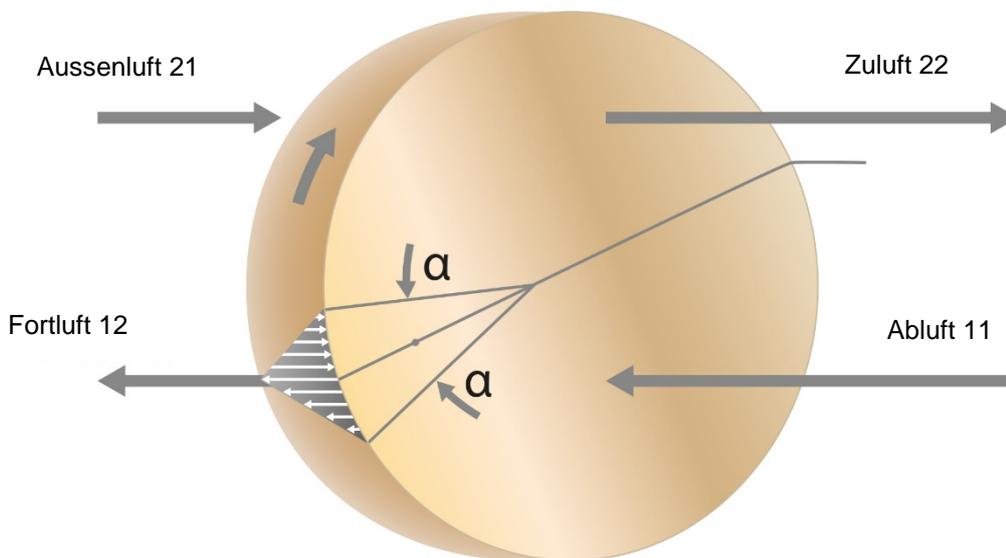


Bild 1: Mitrotation von der Abluft in die Zuluft

Vereinfachte Berechnung der Mitrotation

$$\text{Durchströmzeit } t = T/v = d^2 \cdot T / 8 \cdot V \quad [\text{s}] \quad [01]$$

mit Rotortiefe T

$$\text{Geschwindigkeit } v = V/f$$

$$\text{und halber Rotorfläche } f = d^2 \cdot \pi / 8$$

$$\text{Winkel } \alpha = \phi \cdot t = 6 \cdot n \cdot T / v \quad [^\circ] \quad [02]$$

$$\text{mit Winkelgeschwindigkeit } \phi = n \cdot 360 / 60 = 6 \cdot n$$

$$\text{Mitrotation } M = V \cdot (\alpha/180) = v \cdot f \cdot (\alpha/180) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad [03]$$

(Interessant ist, dass man die Mitrotation auch aus dem Produkt Rotorvolumen x Drehzahl (in 360/60 s) erhält.)

$$\text{Relative Mitrotation } M_r = M/V = 10 \cdot n \cdot T / 3 \cdot v \quad [\%] \quad [04]$$

Für übliche Randbedingungen ergibt sich also eine Mitrotation von etwa 3 – 13 % des Nennluftstromes; eine Grösse, die es zu berücksichtigen gilt. Kleine Werte erreicht man bei kleiner Drehzahl und hoher Luftgeschwindigkeit (Beaufschlagung).

Achtung: Die obige Berechnung ist zur Verdeutlichung idealisiert: Die Füllung des Rotors, das ist die durch Wickeln erzeugte Rotorstruktur aus Mikrokanälen, ist vernachlässigt! (Die Rotorfüllung ist meist durch den Füllgrad $FG = f_F / f$ definiert, wobei f_F die von der Füllung abgedeckte Fläche ist. Dadurch wird der freie Querschnitt reduziert; die Durchströmgeschwindigkeit wird um ca. 5 – 10 % erhöht, der Winkel α und damit die Mitrotation werden reduziert!)

Mitrotation tritt beidseitig auf

Wichtig ist, dass die Mitrotation im Rotor zweimal auftritt:

- einmal von der Abluft auf die Zuluft
- einmal von der Aussenluft auf die Fortluft

So stimmt auf den ersten Blick die Volumenstrom-Bilanz: Die fehlende Aussenluft wird durch die entsprechende Abluft ersetzt. Gerade das muss aber vermieden oder aber durch höhere Luftleistungen wenigstens kompensiert werden.

Die Spülzone hilft

Mit der Verwendung des Rotors in der Raumluftechnik wurde auch überlegt, wie man die Mitrotation vermeiden könnte. Da diese Ideen von der Konfiguration der Anlage (→ Ventilatoranordnung) abhängen, wird für die nachfolgenden Überlegungen beispielhaft immer die Konstellation in Bild 1 zu Grunde gelegt.

Eine Abdeckung funktioniert nicht

Die erste Idee, die Mitrotation zu eliminieren, ist, den Bereich des Winkels α (A-B und/oder A-C) abzudecken (siehe Bild 2). So wird (vermeintlich) verhindert, dass Luft im gefährdeten Bereich ein- bzw. austritt; eine Mitrotation ist nicht möglich. Dies ist (leider) eine Fehlüberlegung, da dazu hinter der Abdeckung ein Vakuum entstehen müsste. Dies ist aber nicht möglich; vielmehr kommt der Luftstrom hinter A-B mangels Antrieb zum Stehen und wird mit der Drehung in die Aussenluft/Zuluft transportiert.

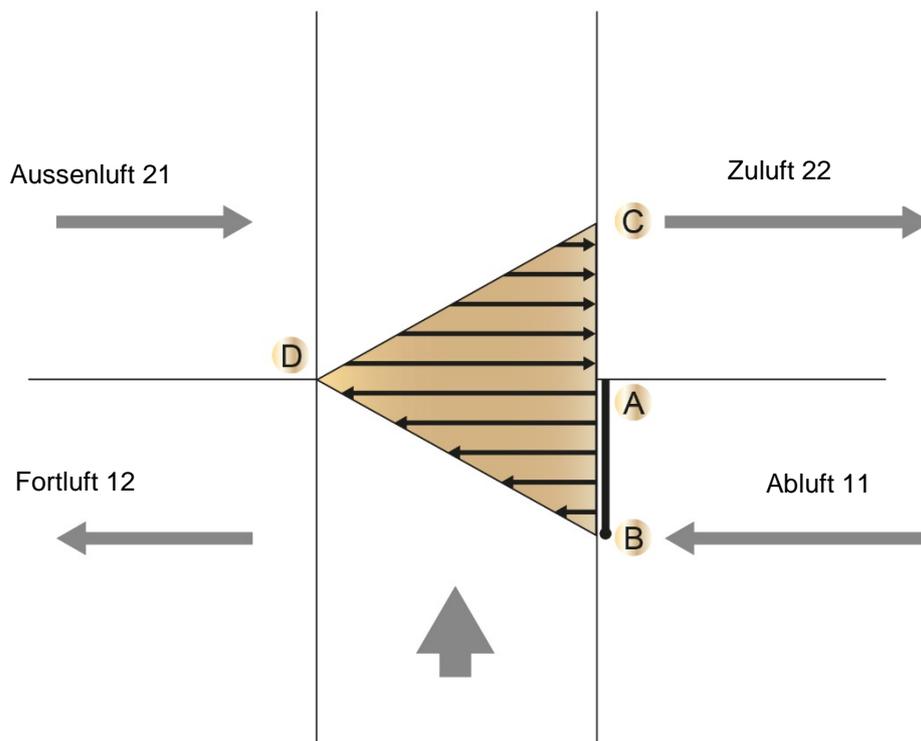


Bild 2: Eine Abdeckung funktioniert nicht

Spülzone in der Abluft

Nach dem Fehlversuch mit einer Abdeckung ist klar, dass für eine funktionierende Lösung der Luftstrom der Mitrotation umgeleitet werden muss. Eine Möglichkeit ist es, die Zone des Winkels α mit Zuluft zu beaufschlagen. Dazu ist eine Spülzone mit der Grösse A-B auf der Abluftseite nötig (Bild 3).

Über sie strömt Zuluft in den betroffenen Bereich und wird durch die Drehung wieder zurück in die Zuluft befördert: Es gibt keine Mitrotation mehr.

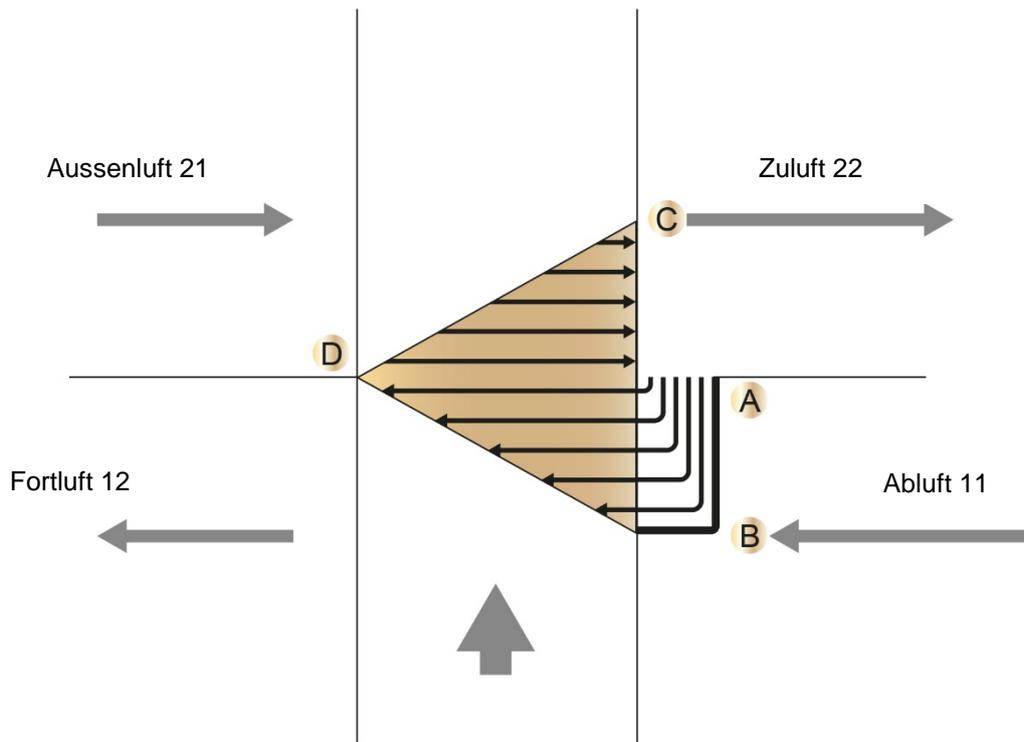


Bild 3: Spülzone in der Abluft

Damit dies funktioniert, sind entsprechende Drücke erforderlich. Der Druckunterschied zwischen p_{22} und p_{12} muss den Druckverlust der Spülluft für die Spülzone Δp_S und die Durchströmung des Rotors Δp_{1S} abdecken.

$$p_{22} = p_{12} + \Delta p_{1S} + \Delta p_S \quad [05]$$

Die Drücke p_{22} und p_{12} sind dabei durch die Ventilatoranordnung bekannt. Bekannt sind somit auch $(\Delta p_S + \Delta p_{1S})$, der Druckverlust der Spülluft in der Spülzone und im Rotor. Daraus kann jetzt vom Rotorhersteller die zugehörige Spülluftgeschwindigkeit v_S und damit die Spülzonengrösse α_S bestimmt werden. Für die Funktion dieser Anordnung ist eine gute Abdichtung zwischen Spülzone und Rotor erforderlich.

Spülzone in der Zuluft

Eine andere Möglichkeit ist es, die Mitrotation auf der Zuluftseite zu sammeln und in der Spülzone von C nach A zurück zur Abluft zu führen (siehe Bild 4). Auch dazu braucht es entsprechende Drücke: Der Druckunterschied zwischen p_{21} und p_{11} muss den Druckverlust der Spülluft für die Durchströmung des Rotors Δp_{2S} und die Spülzone Δp_S abdecken.

$$p_{21} = p_{11} + \Delta p_{2S} + \Delta p_S \quad [06]$$

Die Drücke p_{21} und p_{11} sind dabei durch die Ventilatoranordnung bekannt. Bekannt sind somit auch $(\Delta p_S + \Delta p_{2S})$, der Druckverlust der Spülluft in der Spülzone und im Rotor. Daraus kann jetzt vom Rotorhersteller die zugehörige Spülluftgeschwindigkeit v_S und damit die Spülzonengröße α_S bestimmt werden. Auch hier ist eine gute Abdichtung zwischen Spülzone und Rotor erforderlich.

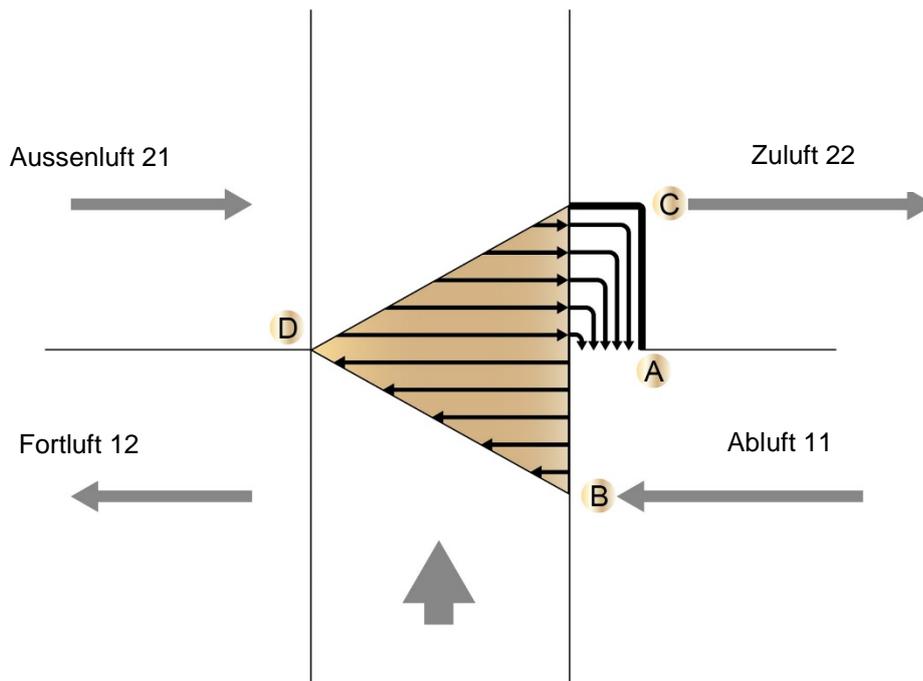


Bild 4: Spülzone in der Zuluft

Randbedingungen und Details

Die oben aufgezeigten Funktionen der Spülzonen sind theoretisch; in der Praxis gibt es aber mehrere Gründe für Abweichungen. Schlussendlich muss man erkennen, dass man die Mitrotation zwar mindern aber nicht komplett eliminieren kann.

Dichtungsqualität

Für die theoretische Funktion wird eine absolute Abdichtung zwischen Rotor und Spülzone vorausgesetzt. Da dies in der Praxis nicht möglich ist, lässt sich auch eine Mitrotation nicht komplett vermeiden.

Dichtungsprofil

Bei den theoretischen Überlegungen geht man davon aus, dass die Dichtung fadenförmig ist, d. h. als Linie aufliegt. Das gilt sowohl für die Dichtung zwischen dem Rotor und der Spülzone als auch zwischen den beiden Luftströmen; nur so ist eine exakte Dimensionierung möglich. Praktisch liegen die Dichtungen (z. B. Bürstendichtungen) aber immer als Fläche auf, so dass die Spülzonen meist etwas grösser dimensioniert werden.

Massenträgheit/Kontinuitätssatz

In den Modellen wird angenommen, dass z. B. die Richtungsumkehr der Luftströmung im Rotor ohne Verzögerung und Druckverlust erfolgt. Praktisch muss man aber mit Sog, Umlenkungen, ungleichmässiger Beaufschlagung und Reaktionszeit rechnen.

Druckverhältnisse

Wie aufgezeigt, hängt die Funktion einer Spülzone entscheidend von den Druckverhältnissen (siehe Formeln 05, 06 und 07), d. h. von der Ventilatoranordnung ab. Für die vier Möglichkeiten sind übliche Werte als **Beispiel** in Tabelle 1 aufgeführt.

Var.	AUL (2) Ventilator	ABL (1) Ventilator	p_{11} Pa	p_{12} Pa	p_{21} Pa	p_{22} Pa	$p_{22} - p_{12}$ Pa	$p_{21} - p_{11}$ Pa	$p_{21} - p_{12}$ Pa
------	-----------------------	-----------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

a	B (saugt)	C (drückt)	120	20	-170	-270	-290	-290	-190
b	A (drückt)	D (saugt)	-330	-430	560	460	890	890	990
c	A (drückt)	C (drückt)	120	20	560	460	440	440	540
d	B (saugt)	D (saugt)	-330	-430	-170	-270	160	160	260

Tabelle 1: Drücke am Rotor

In Hinblick auf die möglichen Spülzonen können die verschiedenen Varianten wie folgt beurteilt werden:

Variante a

Bei dieser häufig gewählten Konstellation ist keine Spülzone möglich, da sowohl $p_{22} - p_{12}$ als auch $p_{21} - p_{11}$ als auch $p_{21} - p_{12}$ negativ ist (Unterdruck). Notwendig ist aber nach Gleichungen 05, 06 und 07 ein Druckgefälle, um die Druckverluste der Spülluft im Rotor und in der Spülzone abzudecken. Mit einer Spülzone würde Abluft/Fortluft in die Zuluft gesaugt!

Variante b

Bezüglich der Druckdifferenz ist dies eine kritische Anordnung; es ergibt sich eine sehr hohe Geschwindigkeit der Spülluft. Die Spülzone sollte entsprechend klein sein. Bei dem gewählten Beispiel ist mit $v_S = 6.5 \text{ m/s}$ und $\alpha_S = 2 - 4^\circ$ (je nach Drehzahl von 12 oder 20 U/min) zu rechnen.

Mit solch hohen Spülluftgeschwindigkeiten ist die einwandfreie Funktion der Spülzone nicht mehr sicher. Manche Hersteller empfehlen deshalb, die Druckdifferenz auf maximal 500 Pa zu begrenzen. Eine zusätzliche Schikane in der Spülzone zur Erhöhung des Druckverlustes ist ebenfalls möglich.

Variante c

Die Druckdifferenz ist noch akzeptabel; es ergibt sich eine moderate Geschwindigkeit der Spülluft. Die Spülzone sollte entsprechend sein. Bei dem gewählten Beispiel ist mit $v_S = 4.5 \text{ m/s}$ und $\alpha_S = 3 - 6^\circ$ (je nach Drehzahl von 12 oder 20 U/min) zu rechnen.

Variante d

Die Druckdifferenz ist hier sehr klein; es ergibt sich eine entsprechend niedrige Geschwindigkeit der Spülluft. Die Spülzone muss entsprechend gross sein. Bei dem gewählten Beispiel ist mit $v_S = 2.5 \text{ m/s}$ und $\alpha_S = 6 - 10^\circ$ (je nach Drehzahl von 12 oder 20 U/min) zu rechnen.

Dimensionierung

Die Grösse der Spülzone (Winkel α_S) ist bei gegebener Rotortiefe vor allem von der Rotordrehzahl und der Spülluftgeschwindigkeit v_S – und damit von den Druckverhältnissen – abhängig. Für die Berechnung der verschiedenen Spülzonen gelten die umgestellten Formeln 05, 06 und 07:

$$p_{22} - p_{12} = \Delta p_{1S} + \Delta p_S \quad [05a]$$

$$p_{21} - p_{11} = \Delta p_{2S} + \Delta p_S \quad [06a]$$

$$p_{21} - p_{12} = \Delta p_{1S} + \Delta p_{2S} + \Delta p_S \quad [07a]$$

Mit den aus der Tabelle 1 bekannten Werten für $(\Delta p_{1S} + \Delta p_S)$, $(\Delta p_{2S} + \Delta p_S)$ und $(\Delta p_{1S} + \Delta p_{2S} + \Delta p_S)$ kann jetzt die notwendige bzw. sich ergebende Spülluftgeschwindigkeit v_S bestimmt werden.

Diese ist für die Berechnung der Spülzonengrösse α_S analog zu Formel 02 nötig:

$$\text{Winkel } \alpha_S = 6 \cdot n \cdot T / v_S \quad [^\circ] \quad [08]$$

Soweit die Dimensionierung der Spülzone, mit der (theoretisch) exakt die Mitrotation verhindert wird. Praktisch würde das zu massgeschneiderten Ausführungen für jede Anlage führen, was produktionstechnisch (nahezu) unmöglich ist. Üblich sind deshalb zwei bis drei Standardgrössen je nach den Druckverhältnissen und der Drehzahl; die geringen Abweichungen von der Ideallösung werden in Kauf genommen.

Zur Erinnerung:

Zu kleine Spülzone → geringe Mitrotation

Zu grosse Spülzone → eine geringe Menge Aussenluft geht in die Fortluft

Drehzahlregelung

Die Leistung eines Rotors wird üblicherweise über die Drehzahl geregelt, von der direkt die Grösse der Spülzone abhängt. Mit kleinerer Drehzahl wäre also eine kleinere Spülzone nötig, was nicht machbar ist. In der Regel dimensioniert man deshalb die Spülzone für die Nenndrehzahl und nimmt bei geringerer Leistung (= Drehzahl) in Kauf, dass etwas Aussenluft in die Fortluft geleitet wird.

Technische Daten

Die Installation einer Spülzone – egal welcher Ausführung – hat Einfluss auf die Leistung und den Druckverlust des Rotors. Konkrete Korrekturen hängen von der Art der Spülzone und von der Anlagenkonstellation ab.

Zusammenfassung

Funktionsbedingt gibt es bei der Verwendung eines Rotors in beiden Luftströmen eine Mitrotation, durch die Aussenluft in die Fortluft und Abluft in die Zuluft „gedreht“ wird. Diese besondere Form der internen Leckage hat verschiedene negative Auswirkungen und ist deshalb – vor allem von der Abluft in die Zuluft – nicht erwünscht. Mit einer Spülzone kann dies verhindert werden, was allerdings eine anlagenspezifische Dimensionierung voraussetzt. Dieser Auslegungsqualität sind in der Praxis durch die theoretische Berechnung, durch fehlende Daten aber auch durch den Aufwand in Konstruktion und Produktion Grenzen gesetzt: 100%-ig funktionierende Spülzonen sind nahezu unmöglich. Trotzdem ist die Verbesserung der Zuluftqualität durch eine Spülzone bei bekannten Randbedingungen und richtiger Anordnung/Ausführung deutlich. Eine Überprüfung der Funktion in der Praxis ist nicht (bzw. nur mit unverhältnismässigem Aufwand) möglich.

Verwendete Formelzeichen

d	Rotordurchmesser [m]
f	halbe Rotorfläche [m ²]
T	Rotortiefe [m]
ϕ	Winkelgeschwindigkeit des Rotors [°/s]
α	Winkel der Mitrotation [°]
α_S	Winkel der Spülzone [°]
t	Durchströmzeit [s]
n	Drehzahl [1/min]
f	Winkelgeschwindigkeit [°/s]
V	Volumenstrom [m ³ /s]
v	Strömungsgeschwindigkeit im Rotor [m/s]
v _S	Strömungsgeschwindigkeit der Spülluft im Rotor [m/s]
p	Druck [Pa]
Δp	Druckverlust [Pa]

Kontakt für Rückfragen:

Hoval Aktiengesellschaft

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Richter

Tel. +423 399 24 00

thomas.richter@hoval.com