



## Raumdrucksimulation für das Design und die virtuelle Inbetriebnahme von HVAC-Anlagen

16. SCC-Event in Pratteln am 08.April 2019 / Tisch 16 im Ausstellerraum

Dipl.-Ing.(FH) Michael Kuhn

Leiter STZ EURO



# Inhalt

---

## **Raumdrucksimulation für das Design und die virtuelle Inbetriebnahme von HVAC-Anlagen**

- 1 Kurzvorstellung STZ EURO
- 2 Kurzvorstellung Dymola
- 3 Anwendungsfall: Thermische Simulation
- 4 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für eine Prüfkabine
- 5 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion
- 6 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Druckregelung von Schleusen

## 1 Kurzvorstellung STZ EURO – Übersicht

---

### **STZ EURO**

### **Die Experten für Messung und Optimierung von Luft-, Klima- und Reinraumtechnik**

Leiter:

Dipl.-Ing. (FH) Michael Kuhn

gegründet:

am 1.6.1987 als Transferzentrum 94  
der Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung, Stuttgart

Mitarbeiter:

9 Ingenieure, 2 Verwaltungskräfte

Zentrale:

Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer,  
Stuttgart. Ein Unternehmen der Steinbeis-Stiftung.

Ingesamt über 5000 Professoren, Ingenieure und sonstige Mitarbeiter  
in über 1000 Transferzentren  
mit einem Jahresumsatz von über 160 Mio €

# 1 Kurzvorstellung STZ EURO – Dienstleistungen



## **Reinraummessungen/Qualifizierung:**

Filterlecktest, Erholzeit, Reinheitsklasse, Raumdruck  
Temperatur/Feuchte, Mapping, Dichtigkeit, Volumenstrom,  
Luftgeschwindigkeit, Strömung.  
Konzeptionelle Beratung und Erstellung von SOPs und Risikoanalysen.



## **Inbetriebnahme:**

Planung und Durchführung einschließlich virtueller Inbetriebnahme für  
Isolatoren, komplexe HVAC-Anlagen und Systeme mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Begasung.  
Qualitätssicherung bei großen Inbetriebnahmeprojekten.



## **Schulung/Beratung:**

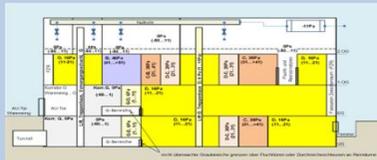
Schulung von Anlagenbetriebs- und Messpersonal (Lüftungs- und  
Messtechnik) in Theorie und Praxis. Schulung von Reinraumpersonal  
bezüglich korrektem strömungstechnischem Verhalten.

# 1 Kurzvorstellung STZ EURO – Dienstleistungen



## **Strömungstechnische Optimierung:**

Isolatoren, RABS, LF-Einheiten, Wiegekabinen, Sicherheitswerkbänke, BFS-Anlagen ect.. Optimierung durch messtechnische Analysen vor Ort, per CFD und/oder durch Modelluntersuchungen z.B. im Reinraum der Hochschule Offenburg. Konzeptionelle Beratung.



## **Raumdruckoptimierung:**

HVAC-Systeme, Isolatoren, Referenzleitungen (Nullrohre), Monitoringsysteme. Messtechnische Analysen, Anlagensimulation und konzeptionelle Beratung.



## **Energieoptimierung:**

Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik. Wirkungsgradoptimierung, Laufzeitoptimierung, Sollwertoptimierung, Anlagen- und regelungstechnische Optimierung. Energiemonitoring und Berichtswesen. Konzeptionelle Beratung.

## 2 Kurzvorstellung Dymola

---

### Dymola – **D**ynamic **M**odeling **L**aboratory

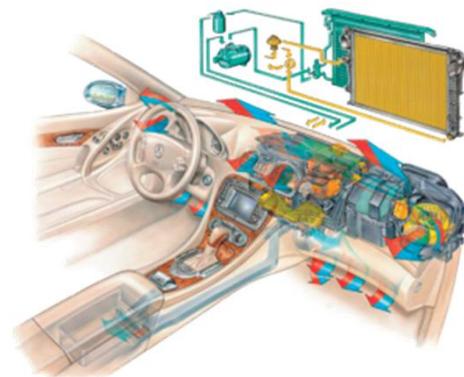
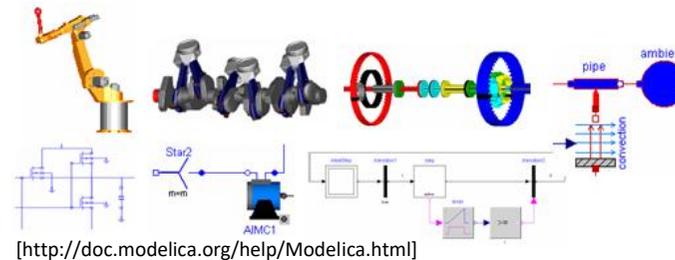
- Entwicklungsumgebung und Simulationstool für die objektorientierte, gleichungsbasierende Modellierungssprache Modelica
- Modellierung von dynamischen physikalischen Systemen
- Nutzung von unterschiedlichen Bibliotheken:
  - Modelica Standard Library:  
1360 Modelle und Blöcke  
1280 Funktionen  
Entwicklung seit 1996
  - Modelica Buildings Library:  
Modelle für HVAC-Komponenten
  - STZ EURO-Library:
    - erweiterte und optimierte HVAC-Modelle
    - verschiedene HVAC-Gesamtsysteme einschließlich MSR



## 2 Kurzvorstellung Dymola

Modelica eignet sich insbesondere für die Abbildung komplexer physikalischer Systeme. Anwendungsbereiche:

- Mechanik
- Elektrotechnik
- Thermodynamik
- Hydraulik
- Regelungstechnik
- Prozesstechnik

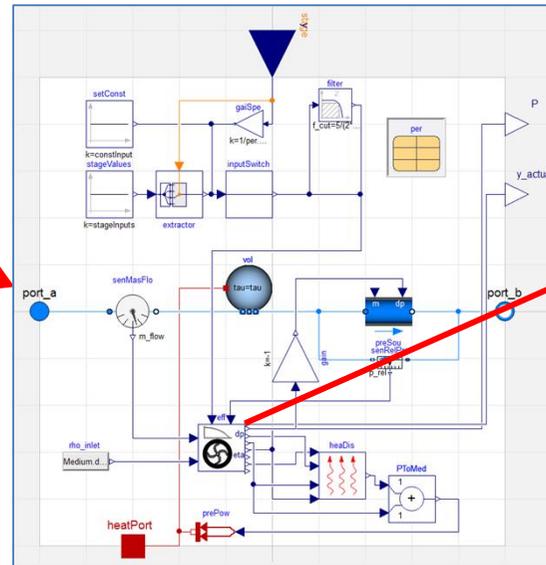
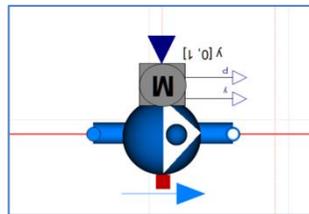


[<http://www.claytex.com/products/dymola/model-libraries/air-conditioning-library/>]

## 2 Kurzvorstellung Dymola

### Grundprinzip: Blockbauweise

Beispiel:  
Ventilator



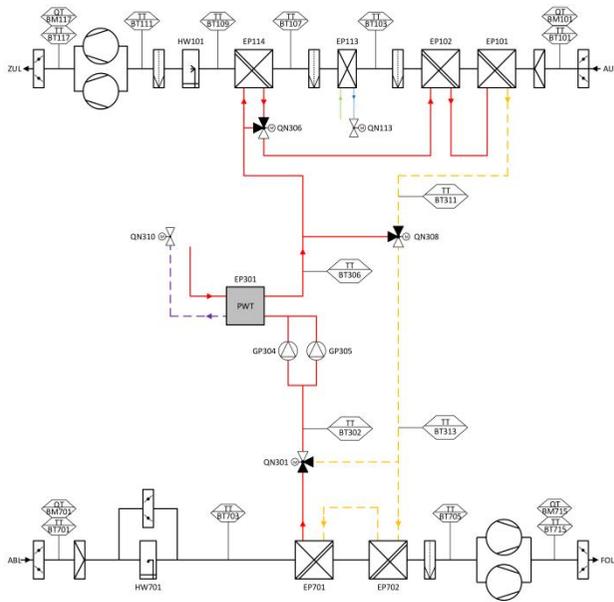
```
parameter Boolean haveMinimumDecrease=
  Modelica.Math.BooleanVectors.allTrue({(per.pressure.dp[i + 1] -
  per.pressure.dp[i])/(per.pressure.V_flow[i + 1] - per.pressure.V_flow[
  i]) < -kRes for i in 1:nOri - 1}) "Flag used for reporting";

parameter Boolean haveDPMax = (abs(per.pressure.V_flow[1]) < Modelica.Constants.eps)
  "Flag, true if user specified data that contain dpMax";

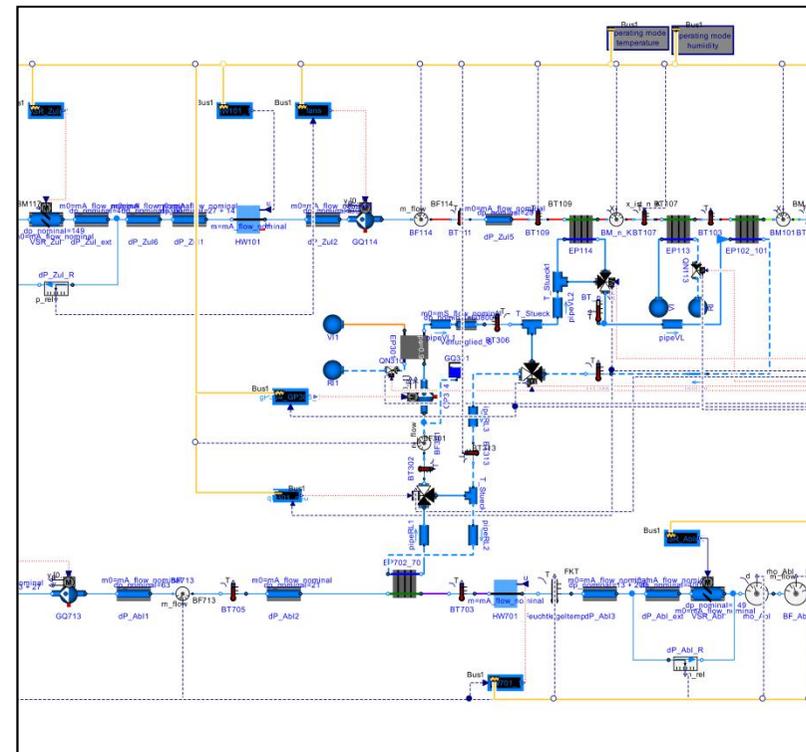
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput dp_internal
  "If dp is prescribed, use dp_in and solve for r_N, otherwise compute dp using r_N";
function getPerformanceDataAsString
  input Buildings.Fluid.Movers.BaseClasses.Characteristics.flowParameters pressure
    "Performance data";
  input Real derivative[:](unit="kg/(s.m4)") "Derivative";
  input Integer minimumLength = 6 "Minimum width of result";
  input Integer significantDigits = 6 "Number of significant digits";
  output String str "String representation";
algorithm
  str := "";
  for i in 1:size(derivative, 1) loop
    str :=str + " V_flow[" + String(i) + "]" = " + String(
      pressure.V_flow[i],
      minimumLength=minimumLength,
      significantDigits=significantDigits) + "\t" + "dp[" + String(i) + "]" = " +
      String(
        pressure.dp[i],
        minimumLength=minimumLength,
        significantDigits=significantDigits) + "\tResulting derivative dp/dV_flow = "
      + String(
        derivative[i],
        minimumLength=minimumLength,
        significantDigits=significantDigits) + "\n";
  end for;
end getPerformanceDataAsString;
```

### 3 Anwendungsfall: Thermische Simulation

#### Anwendungsfall: Optimierung WRG-System (KVS)



Michael Kuhn / STZ EURO



16. SCC-Event Pratteln 08. April 2019

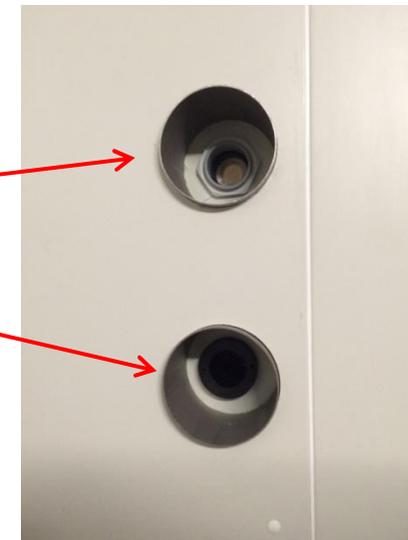
Seite 9 von 27

## 4 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für eine Prüfkabine

### Aufbau Prüfkabine



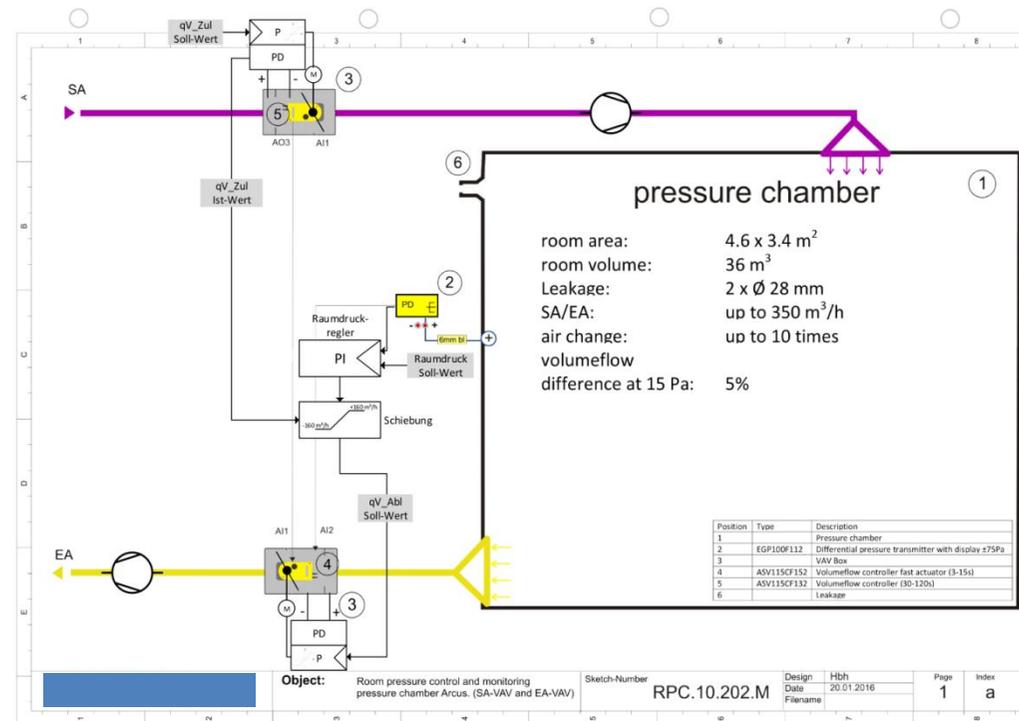
Ansicht der Prüfkabine von außen, hier: Lindab LT600 zur Messung des Leckluftvolumenstroms bzw. Bestimmung der Raumdichtheitsklasse nach VDI 2083-19 angeschlossen



Ansicht der Leckage-Öffnungen von Innen

## 4 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für eine Prüfkabine

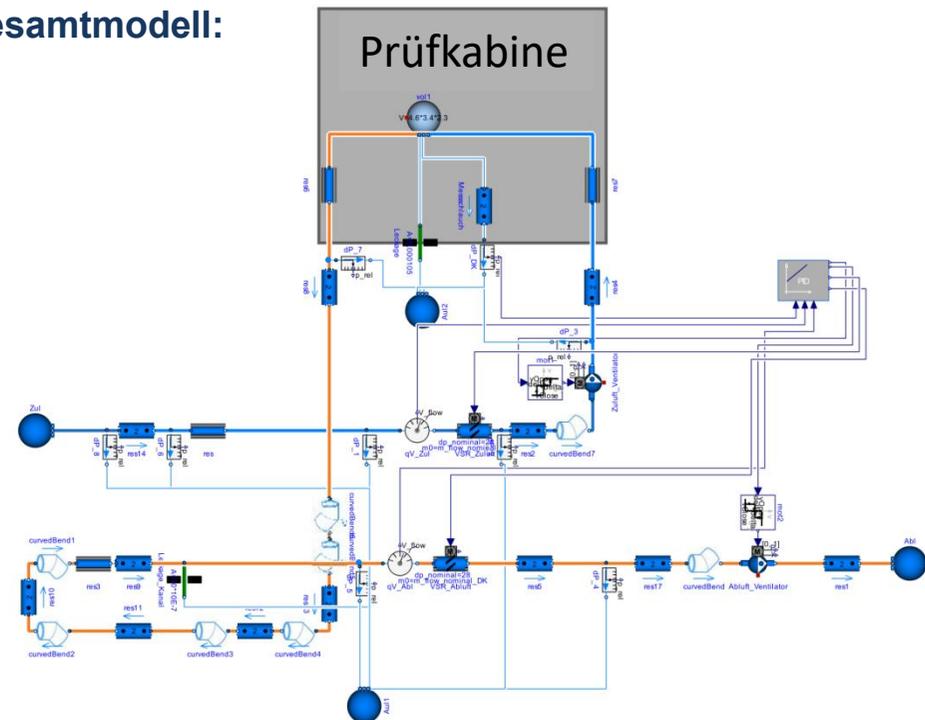
### Schematischer Aufbau:



## 4 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für eine Prüfkabine

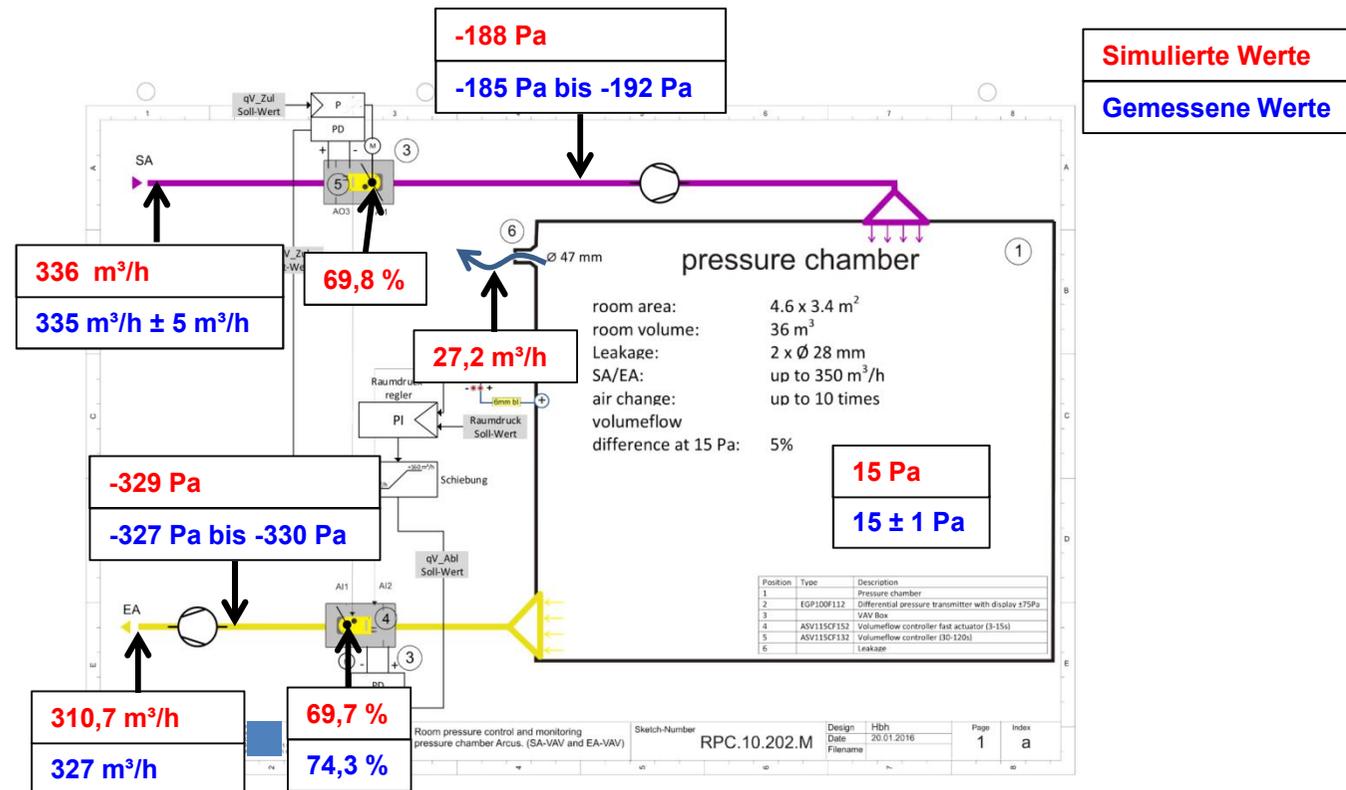
### Modell-Aufbau in Dymola - Übersicht Gesamtmodell:

- Abbildung aller Lüftungstechnischen Komponenten
- Berücksichtigung der realen Ventilator-Kennlinien
- Berücksichtigung der zuvor bestimmten Raumdichtheitsklassen
- Berücksichtigung des Druckverlustes im Kanalnetz
- Möglichkeit zur Eingabe bzw. Anpassung der Öffnungscharakteristik der Klappen (falls vorhanden)
- Berücksichtigung von Dichte-Änderung



# 4 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für eine Prüfkabine

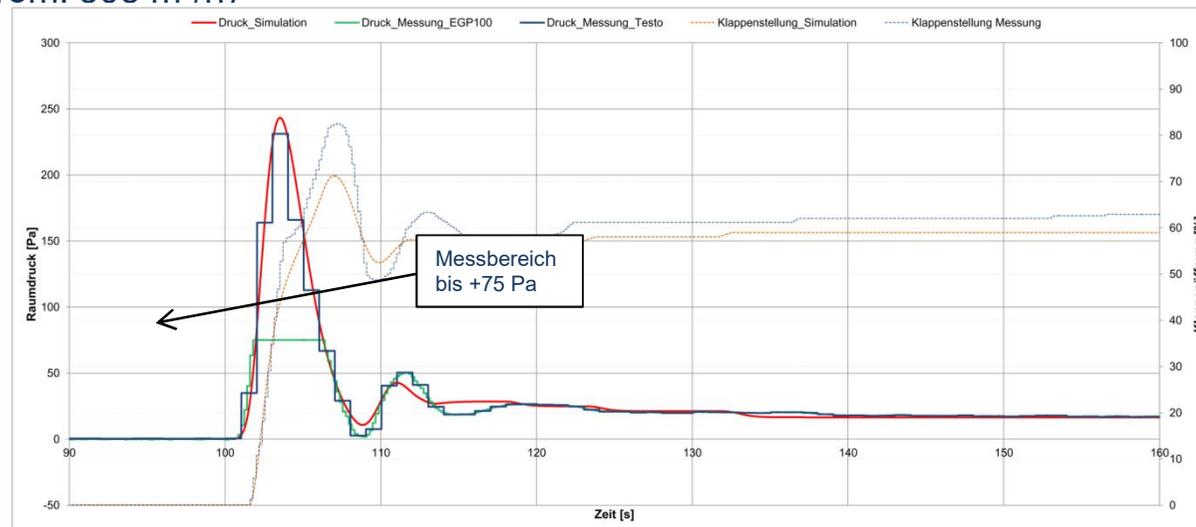
## Vergleich statischer Zustand:



## 4 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für eine Prüfkabine

### Anfahrbetrieb:

- Raumdichtheitsklasse 1 nach VDI 2083-19
- Ventilatoren auf maximalem Sollwert (10 V)
- Sollwert Raumdruck: 15 Pa
- Zu- und Abluft-Klappen geschlossen, bei  $t=100$  s wird Zuluft-Klappe geöffnet (Sollwert Zuluft-Volumenstrom:  $305 \text{ m}^3/\text{h}$ )



## 5 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

---

### **Kurzbeschreibung:**

- Containment bestehend aus:  
Abfüllraum, Beladeraum und vier  
Schleusen (Material und Personal)  
Gesamtfläche: ca. 177 m<sup>2</sup>  
Gesamtvolumen: ca. 785 m<sup>3</sup>
- Lufttechnische Versorgung über eine  
zentrale RLT-Anlage (RLT007)  
und Druckhalteanlagen  
während der Desinfektion

## 5 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

---

### **Grober Ablauf**

#### **Dekontaminationsprozess:**

1. Abdichten zu angrenzenden Räumen
2. Öffnung innenliegende Schleusentüren
3. Temperatur/Feuchte konditionieren
4. Reduzierung Raumdruck und Luftwechsel:  
Herunterfahren Zentralgerät RLT007
5. Umschaltung auf Druckhalteanlagen
6. Desinfektion mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
7. Erhöhung Raumdruck und Luftwechsel:  
Umschaltung auf RLT007
8. Schließung innenliegende Schleusentüren
9. Normalbetrieb

## 5 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

---

### **Technische Daten:**

- Ca. 22.000 m<sup>3</sup>/h Zuluft- bzw. Abluftmenge
- 14 Zuluftvolumenstromregler  
(schnellste Laufzeit Stellantriebe: 2 s)
- 12 Abluftvolumenstromregler  
(schnellste Laufzeit Stellantriebe: 2 s)
- 34 Drossel- und Absperrklappen  
(ohne Zentralgerät)
- Raumdruck-, Kanaldruck- und  
Volumenstromregelung digital via Software  
(frei programmierbar, individuell angepasst)
- Grundlage Raumdruckregelung:  
Kaskadenregelung, Zuluftmengen-Istwert  
wird als (schiebbarer) Sollwert für die Abluft  
verwendet

## 5 Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

---

### **Ziele virtuelle Inbetriebnahme:**

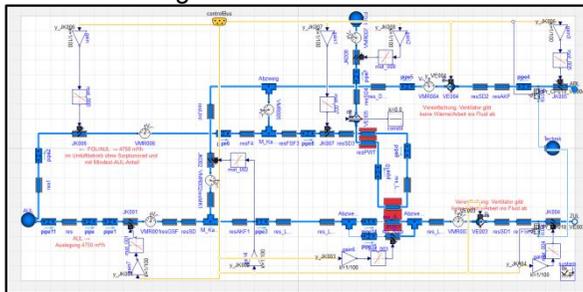
- Überprüfung des technischen Konzepts
- Festlegung/Entwicklung der erforderlichen Regelstrategie, Einstellwerte und Regelparameter noch vor der realen Inbetriebnahme
- Einhaltung aller definierten Akzeptanzkriterien (z.B. Raumdruck)
- Vermeidung überhöhter Anlagen- und Raumdifferenzdrücke
- Zeitliche Verkürzung der realen Inbetriebnahme

Dazu ist es notwendig, das Modell möglichst realitätsnah aufzubauen.

# 5. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

## Modellaufbau Gesamtmodell:

Modell Zentralgerät RLT007

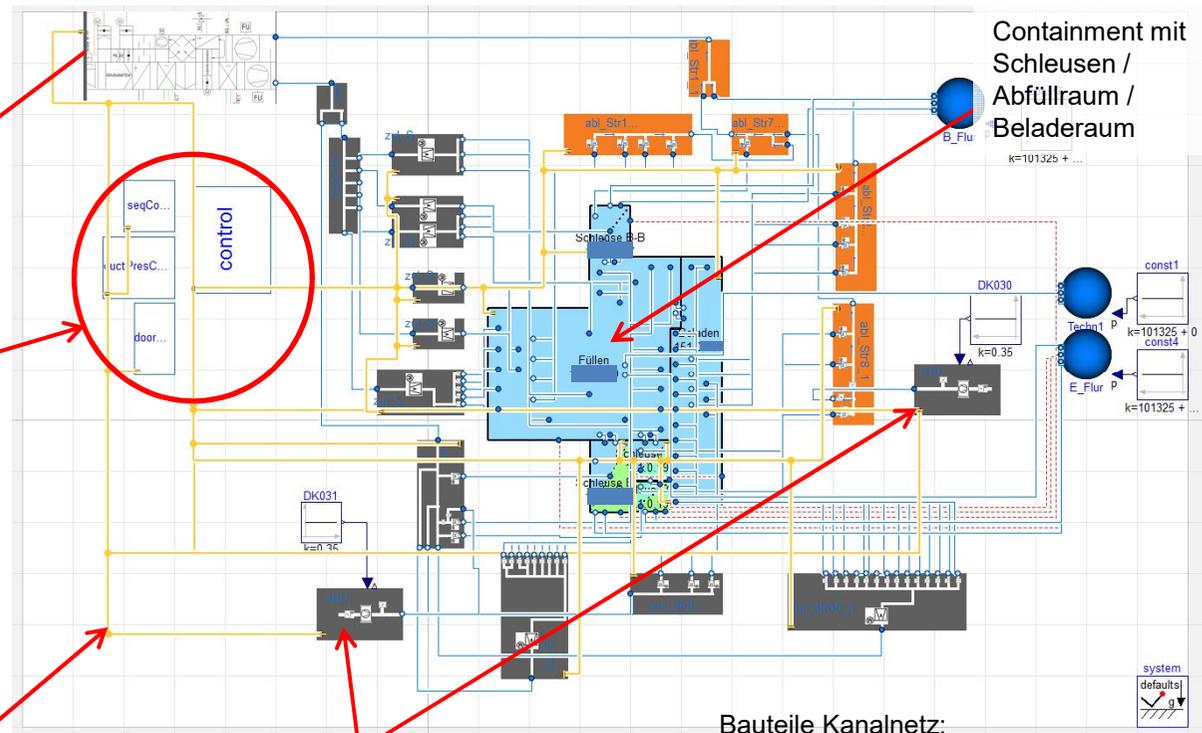


### Controller:

- Steuerung Betriebsart
- Regler Volumenstromboxen / Raumdruck / Kanndruck
- Tür-Steuerung
- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Steuerung
- Klappen-Steuerung

BUS-System zum übersichtlichen Informationsaustausch aller Signale

Michael Kuhn / STZ EURO



Druckhalteanlagen

16. SCC-Event Pratteln 08. April 2019

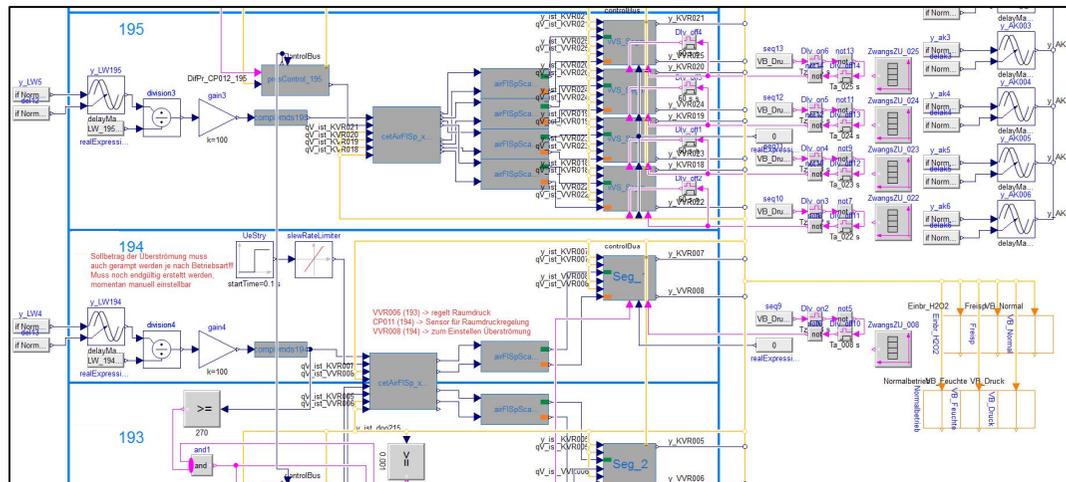
Bauteile Kanalnetz:  
orange = Abflutseite  
grau = Zuluftseite

Seite 19 von 27

## 5. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

### Raumdruck- und Volumenstromregelung:

- Realisierung der Struktur erfolgte gemäß Software-Aufbau der zuständigen Regelungstechnik-Firma mit den wichtigsten Einstellmöglichkeiten der Parameter
- Individuell erweiterbar / anpassbar



### Individuelle Parametrierung wichtiger Regler- und Einstellwerte

Parameter	Value	Unit	Description
Xpp	0.5	Pa	Wert Neutrale Zone
k	0.9	%/Pa	Verstärkung (%/Pa)
Tn	5.5	s	Nachstellzeit
YctrMax	100	%	Max Regler-Ausgang (%)
YctrMin	0	%	Min Regler-Ausgang (%)
TI0to100	0.1	s	schnellste Anstiegszeit am Reglerausgang
TI100to0	0.1	s	schnellste Abfallzeit am Reglerausgang

**Grenzen für Druckregelung (max/min Schiebung des Zuluft-Sollwerts)**

AirFITnMax	1500	m <sup>3</sup> /h	Max. Überström-Luftvolumenstrom
AirFITnMin	-1500	m <sup>3</sup> /h	Min. Überström-Luftvolumenstrom

**Schwellenwerte**

TshVal	0.1		Schwellenwert für Schiebung-qV (m <sup>3</sup> /h)
--------	-----	--	----------------------------------------------------

**Türkontakt Logik: mögliche Verzögerungszeit**

DlyPRCTDoor_on	0	s	Verzögerung des Einfrierens des Reglers wenn Türe öffnet
DlyPRCTDoor_off	0.2	s	Verzögerung des Reaktivierens des Reglers wenn Türe schließt

**Reset Reglerausgang**

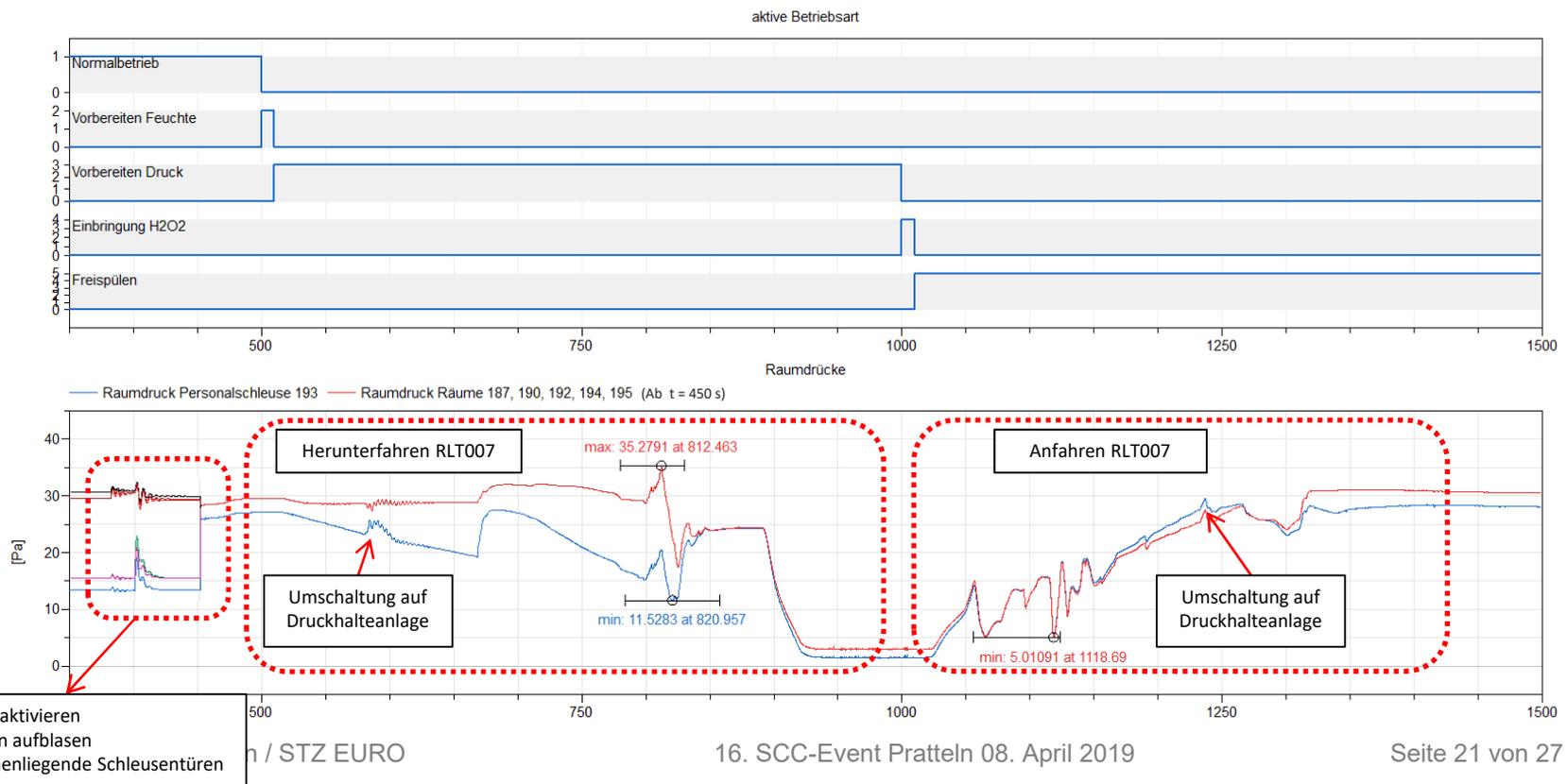
ResMthd	false		true = Reset Regler auf Speicherwert, false = Reset Regler auf manuellen Wert
YRes	50		Wert Reglerausgang bei ResMthd=false (manueller Wert)

**Messbereich Differenzdruckfühler Fischer DE46L700P8CNIWCMW**

dFmax	100	Pa	max-Wert -> entspricht 10 Volt
-------	-----	----	--------------------------------

# 5. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

## Raumdruckverlauf während eines Desinfektionsprozesses:



## 5. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Projekt mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Desinfektion

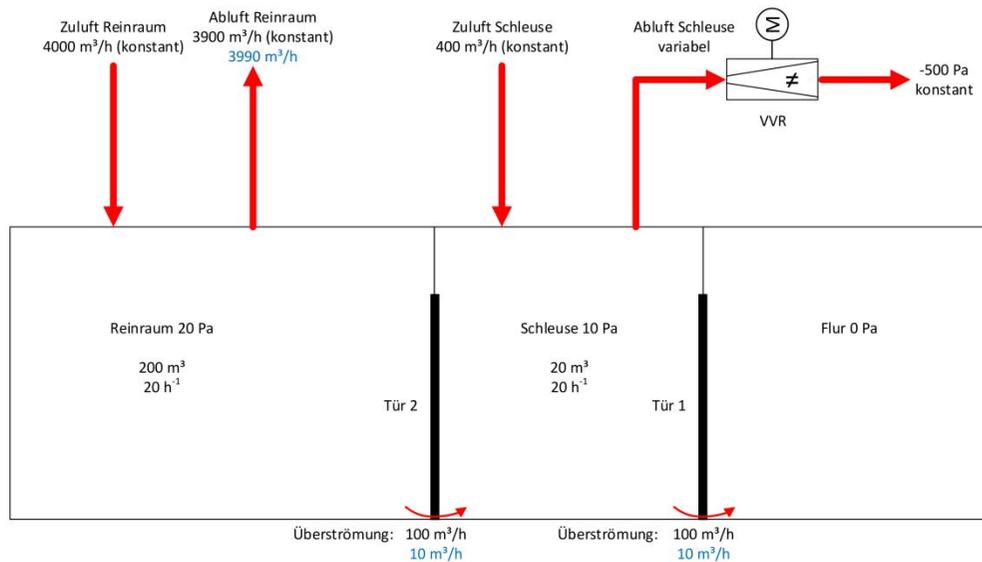
---

### **Projektstand aktuell:**

- Simulationsmodell wurde so aufgebaut, wie Anlage gebaut wurde
- Übernahme der Einstellwerte und Parameter aus der realen Inbetriebnahme von der ausführende Regelungstechnik-Firma an STZ EURO (in Bearbeitung)
- Vergleich der realen Trendverläufe mit den simulierten Trendverläufen (in Bearbeitung)
- Weitere Optimierung des Systems anhand der Simulation (geplant)

## 6. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Druckregelung von Schleusen

### Schema (vereinfachter Aufbau):



### Simulationsvarianten:

#### Abluftvolumenstrom Schleuse

- Raumdruckregelung mit variablem Volumenstromregler
  - \* mit/ohne Türkontakt
  - \* Antriebslaufzeit 3 s / 120 s
  - \* große/kleine Überströmung
- Raumdruckregelung mit geregelter Klappe
  - \* mit/ohne Türkontakt
  - \* Antriebslaufzeit 3 s / 120 s
  - \* große/kleine Überströmung
- Keine Raumdruckregelung (Konstantvolumenstromregler)
  - \* mit/ohne Türkontakt
  - \* Antriebslaufzeit 3 s / 120 s
  - \* große/kleine Überströmung

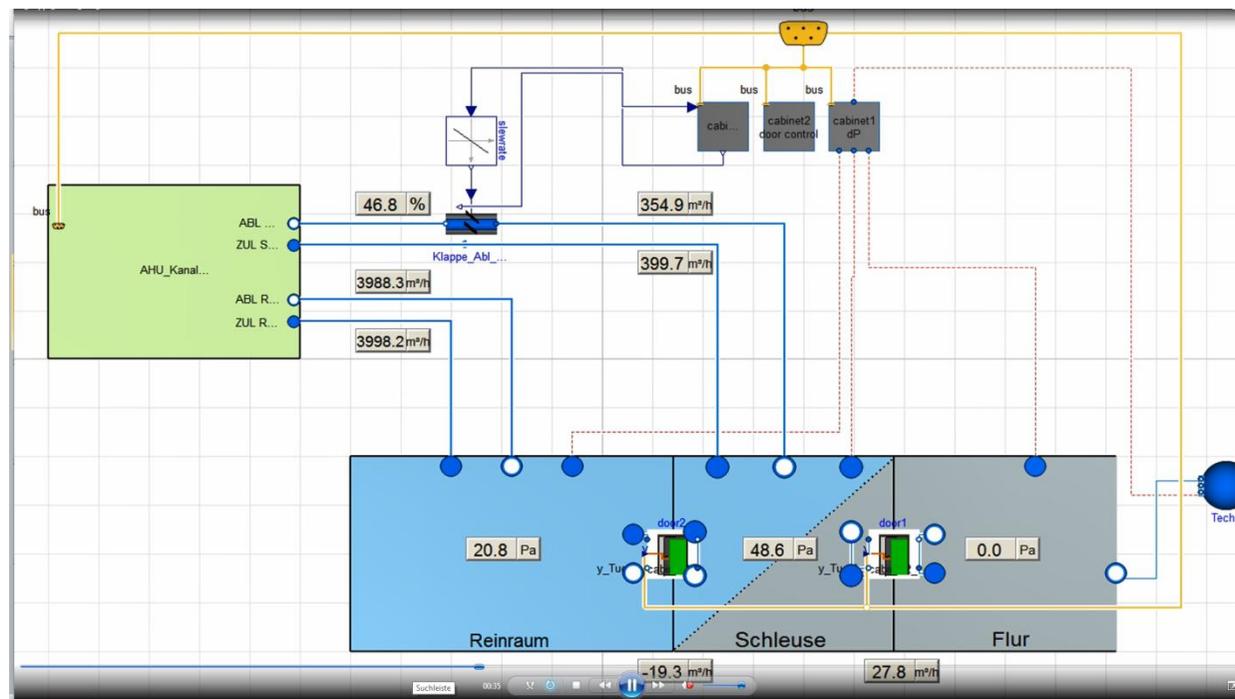
## 6. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Druckregelung von Schleusen

### Ergebnisse der Simulationsvarianten (Auszug):

Fall-Nr.	Beschreibung	Überströmungen	Laufzeit Stellantrieb	Mit/Ohne Türkontaktlogik	Druckverlauf bei			
					Aktivität Tür 1		Aktivität Tür 2	
					Schleuse Min: Max:	Reinraum Min: Max:	Schleuse Min: Max:	Reinraum Min: Max:
3	Schleuse mit Druckregelung direkt über Stellantrieb über einer Abluftklappe und mit konstanten Zuluftvolumenstrom. Reinraum mit konstanten Zu- und Abluftvolumenstrom.	Überströmung über Türen 100 m³/h	120 s	Mit	0	10	5,7	10
					10	20	17,5	20
4		120 s	Ohne	0	10	5,4	10	
				23,7	33,5	17,0	20	
5		3 s	Mit	0	10	5,7	10	
				10	20	17,5	20	
6		3 s	Ohne	0	10	6,0	10	
				45,9	46,6	17,6	20	
7		Überströmung über Türen 10 m³/h	120 s	Mit	0	10,7	6,4	10,1
					10,3	20	19,1	20
8	120 s	Ohne	0	10,7	6,6	7,4		
			48,5	46,7	17,9	20		
9	3 s	Mit	0	10,4	6,4	10,2		
			10,2	20	18,9	20		
10	3 s	Ohne	0	10,4	8,0	8,4		
			356,6	42,3	18,9	20		

## 6. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Druckregelung von Schleusen

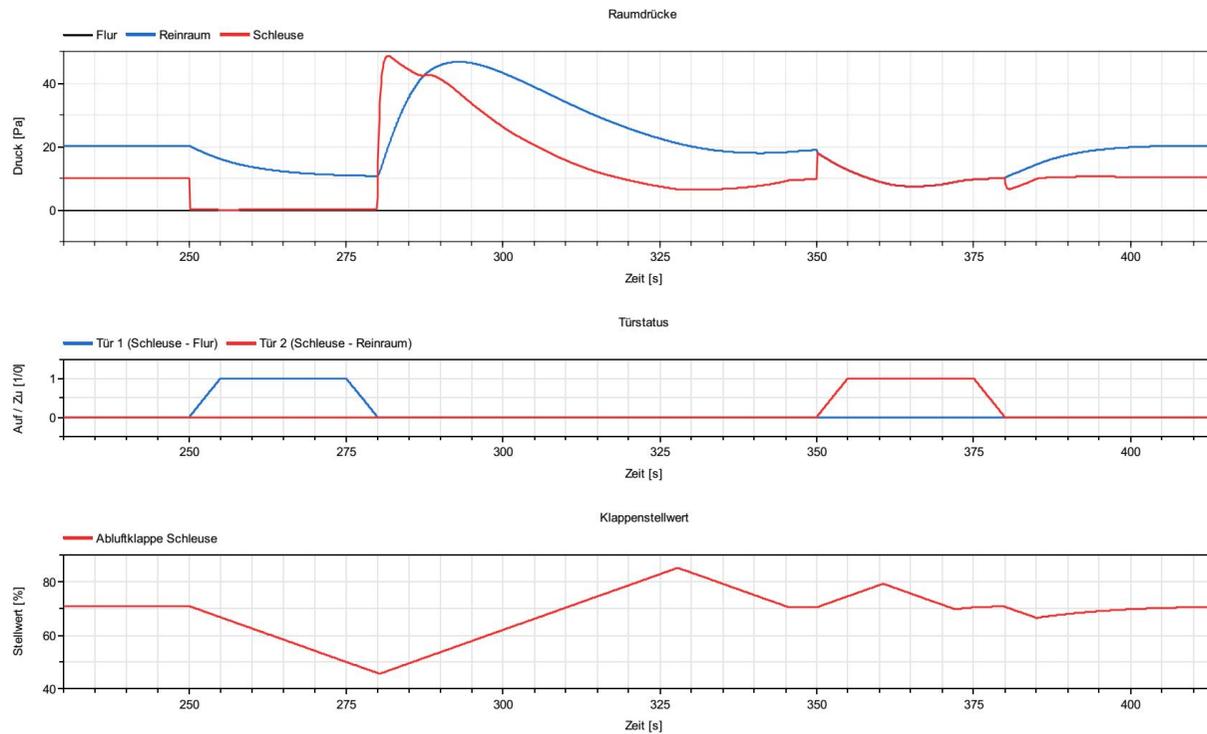
### Ergebnisse der Simulationsvarianten (Fall-Nr. 8):



- Abluftvolumenstrom Schleuse
- Raumdruckregelung mit Stellklappe
    - \* ohne Türkontakt
    - \* Antriebslaufzeit 120 s
    - \* kleine Überströmung

## 6. Anwendungsfall: Hydraulische Simulation für Druckregelung von Schleusen

### Ergebnisse der Simulationsvarianten (Fall-Nr. 8):



- Abluftvolumenstrom Schleuse
- Raumdruckregelung mit Stellklappe
  - \* ohne Türkontakt
  - \* Antriebslaufzeit 120 s
  - \* kleine Überströmung

Vielen Dank für Ihr Interesse, gerne beantworte ich Ihre Fragen...



Dipl.-Ing. (FH) Michael Kuhn  
STZ EURO  
Badstraße 24 a, D 77652 Offenburg  
Tel: +49 781 203547-00  
Fax: +49 781 203547-99  
Internet: [www.stz-euro.de](http://www.stz-euro.de)  
Email: [mkuhn@stz-euro.de](mailto:mkuhn@stz-euro.de)

- ...Lehrbeauftragter an der Hochschule Offenburg für Reinraumtechnik und an der FH Nordwestschweiz
- ...Vorsitzender der VDI-Richtlinien 2083-19 und -4.2  
Mitarbeit bei den Richtlinien 2083-3 und -16
- ...Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Luft- und Klimatechnik insbesondere Reinraumtechnik