

ARIS

D 4.4 Nichtlineare, modellbasierte Steuer- und Regelalgorithmen

D5.1 Steuer- und Regelungsalgorithmenintegration in das Gebäudemanagementsystem und Validierung

Projekt Referenz	FFG Projekt Nr. 845143
Projekt Akronym	ARIS
Projekt Titel	Anwendung nichtlinearer Regelungstechnik und intelligenter Sensorik zur Effizienzsteigerung in Gebäuden
Programm	ENERGIE DER ZUKUNFT
Ausschreibung	SdZ 1. Ausschreibung

Autoren	Name	Organisation
	Tarik Ferhatbegovic	AIT EN SBC
	Martin Litzenberger	AIT DSS
	Mir Muhammad Umar	AIT DSS

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Lüftungssystem - Modellbasierter Reglerentwurf in Simulationsumgebung	3
2.1	Struktur des Regler Entwurfs	4
2.2	Prozessablauf	4
2.2.1	Kostenterm I	5
2.2.2	Kostenterm II	6
2.2.3	Kostenterm III	6
2.2.4	Solver	7
2.2.5	Vergleich der unterschiedlichen Implementierungen	10
3	Implementierung des Reglers in der GUI	12
3.1	Simulationsergebnis für Raum 01 – 22	14
3.2	Simulationsergebnis für Gesamtvolumenstrom und Leistungsaufnahme des Ventilators	17
4	Simulations-Studie E+E Gebäude	18
4.1	Simulationsergebnis für vier Räume im Obergeschoss I	22
5	HIL-Lauf ENERGYbase zur formalen Validierung	22
5.1	Datentransfer	23
5.2	Optimierungsplattform	23
5.2.1	MPC Prozessablauf	23
5.2.2	Prozessablauf	25
5.3	Visualisierung	25
6	Verwendung des PID Reglers für die Belegungsschätzung	26
7	Anhang 1: PID Controller Implementation for Room Occupancy Estimation Models	28
7.1	CO ₂ Model Implementation	28
7.1.1	Modelling Approach in Matlab Simulink	28
7.1.2	Filters	29
7.1.3	Tuning the PI Controller	29
7.2	Heat Model Implementation	31
7.3	Humidity Model	32
	Referenzen	38

1 Einleitung

Die Einbindung von modellbasierten regelungstechnischen Ansätzen unter Verwendung von dynamischen linearen/nichtlinearen Modellen können für das Energiemanagement innerhalb der Gebäudeautomation bemerkenswerte Vorteile für die Verbesserung der Gebäudeenergiesystemleistung gegenüber anderen Regelungsansätzen bieten (dazu siehe insbesondere [1],[2],[3],[4],[5]). Dies bedeutet, dass zum aktuellen Zeitpunkt ein Betriebsplan für die HKL-Gewerke (Heizung, Kühlung, Lüftung) für einen ausgewählten und optimalen Zeithorizont formuliert wird, basierend auf den innen (interne Lasten) und außen gegebenen Bedingungen (Temperatur und Luftqualität, Betriebszeiten, etc.) als auch durch Einbindung kommender Störungen (z.B.: Belegung), Zeitabhängigkeiten oder praktischer Einschränkungen (z.B.: thermischer Komfortbereich). Die flexiblen Betriebskriterien, verbesserte Handhabung von Einschränkungen und MIMO (multiple-input-multiple-output) Merkmale der eingesetzten Modellcharakteristika, erhöhen das Energiemanagementpotential um damit insgesamt die Systemleistung des Gebäudebetriebs weiter zu verbessern. Modellbasierte Ansätze innerhalb der angewandten Regelungstechnik bieten Gebäudeenergieeinsparungspotentiale von 15% - 28% im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten regelbasierten HLK-Regler Ansätzen auf dem Markt (dazu siehe [6],[7],[8],[9],[10],[11]).

2 Lüftungssystem - Modellbasierter Reglerentwurf in Simulationsumgebung

Neben der Datenkommunikation ist vor allem der modellbasierte Regler, welcher in letzter Instanz für die Optimierung verantwortlich ist der Hauptbestandteil des aX5 Systems. Das im Regel- Entwurf verwendete mathematische Modell basiert auf einem rigorosen Prozessentwurf. Dieser unterteilt den Prozess in drei Teilmodelle:

- (1) Modell für die Raumluftqualität (CO₂ Produktionsrate als Funktion der Zuluft Ströme und der Belegungsrate)
- (2) Modell für Druckverlust im Gebäude-Rohrleitungssystem (Druckverlust als Funktion des Luftvolumenstroms und der Rohrgeometrie)
- (3) Modell für die Lüftungsklappenstellung (Klappenwinkel als Funktion des optimalen Luftvolumenstroms)

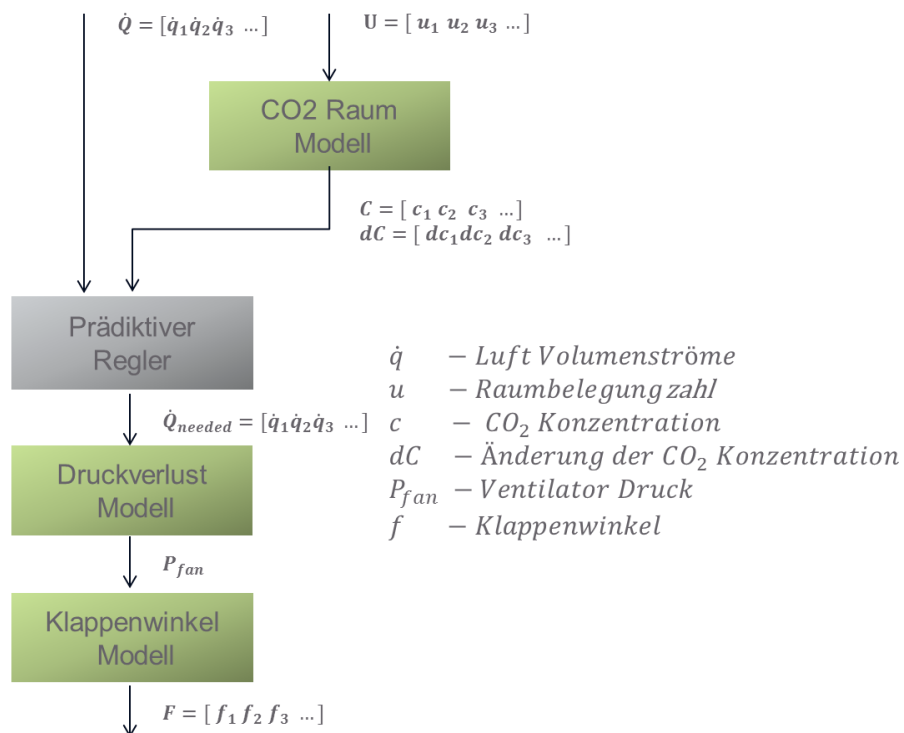


Abbildung 1: Optimierungsstruktur

Für den Regler Entwurf wird folgender Strukturansatz gewählt.

2.1 Struktur des Regler Entwurfs

Kern des Regelalgorithmus ist das Modell für die Raumluftqualität.

Die Konzentration von CO₂ in Innenräumen dient vor allem als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der von Menschen abgegebenen organischen Emissionen und Geruchsstoffe. Aus diesem Grund wurden für Innenräume Maximalwerte für die CO₂- Konzentration festgelegt.

Über die „Pettenkofer-Zahl“ wird auch heute noch ein CO₂ Wert von 1.000 ppm als brauchbares Kriterium für gute Raumluftqualität definiert. In anderen Ländern gelten 1.500 ppm als empfohlener Grenzwert. Auch die DIN 1946 T2 legt 1.500 ppm als Grenzwert fest.

Vom CO₂- Gehalt der Raumluft auf die Luftwechselrate gelangt man mit einer Massenbilanzierung.

Zufuhr + Produktion \equiv Abfuhr + Speicherung

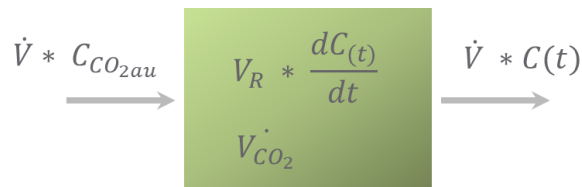


Abbildung 2: Massenbilanzierung

Die Lösung der obigen Differentialgleichung ergibt.

$$C_E = C_{CO_2,au} + \frac{\dot{V}_{CO_2}}{n * V_R} + \left(C_0 - C_{CO_2,au} - \frac{\dot{V}_{CO_2}}{n * V_R} \right) * e^{-nt}$$

mit den Größen:

C_E : CO₂-Konzentration am Ende des betrachteten Zeitraums [ppm]

$C_{CO_2,au}$: Kohlendioxidkonzentration der Außenluft

C_0 : CO₂-Konzentration am Beginn des betrachteten Zeitraums [ppm]

t : Zeit [h]

n : Luftwechselrate [h^{-1}]

V_R : Raumvolumen

Raumvolumen V_R

V_{CO_2} : Ein- und Austrittsvolumenstrom

2.2 Prozessablauf

Der implementierte MPC (Modell Prädiktiver Regler) verwendet obiges Modell um über einen gegebenen Prädiktionshorizont die optimale Stellgrößentrajektorie zu berechnen. Die Berechnung der optimalen Stellgrößentrajektorie kann als Minimallösung folgender Zielfunktion definiert werden.

$$\min_{[u]} \left\{ \sum_k^{Np} \sum_i^{ny} Q * f(y_{k,i}) + \sum_l^{Nc} \sum_i^{nu} R * \Delta u_{l,i}^2 + \sum_l^{Nc} \sum_i^{nu} S * f(u_{l,i}) \right\}$$

$$f(y_{k,i}) = \begin{cases} (y_{k,i} - y_{ref})^2 & , \text{zoneHigh} < y_{k,i} < -\text{zoneLow} \\ \text{zoneslope} * \text{abs}(y_{k,i} - y_{ref}), & -\text{zoneLow} < y_{k,i} < \text{zoneHigh} \end{cases}$$

s.t.

$$y(t) = C_E(t)$$

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}$$

$$du_{min} \leq du \leq du_{max}$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}$$

2.2.1 Kostenterm I

Der erste Kostenterm $\sum_k^{Np} \sum_i^{ny} Q * f(y_{k,i})$ bewertet die quadratische Abweichung zwischen CO2 Soll- und Istwert über den Prädiktionshorizont NP über die Gesamtzahl der optimierten Räume ny. Über die Gewichtsmatrix Q können Räume priorisiert werden. Eine Besonderheit stellt die Zonenfunktionalität dar.

$$f(y_{k,i}) = \begin{cases} (y_{k,i} - y_{ref})^2 & , \text{zoneHigh} < y_{k,i} < -\text{zoneLow} \\ \text{zoneslope} * \text{abs}(y_{k,i} - y_{ref}), & -\text{zoneLow} < y_{k,i} < \text{zoneHigh} \end{cases}$$

Diese ermöglicht eine Regelung innerhalb eines definierten Bandes um den Sollwert. D.h., innerhalb des definierten Bandes wird eine Abweichung zwischen CO2 Soll- und Istwert wesentlich geringer gewichtet. Dies ergibt wesentlich glattere Regeltrajektorien und ermöglicht eine kostenoptimale Regelstrategie. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen eine Simulation Studie für einen Raum über einen Zeitraum von 12 Stunden. Die Abtastzeit TS beträgt 10min.

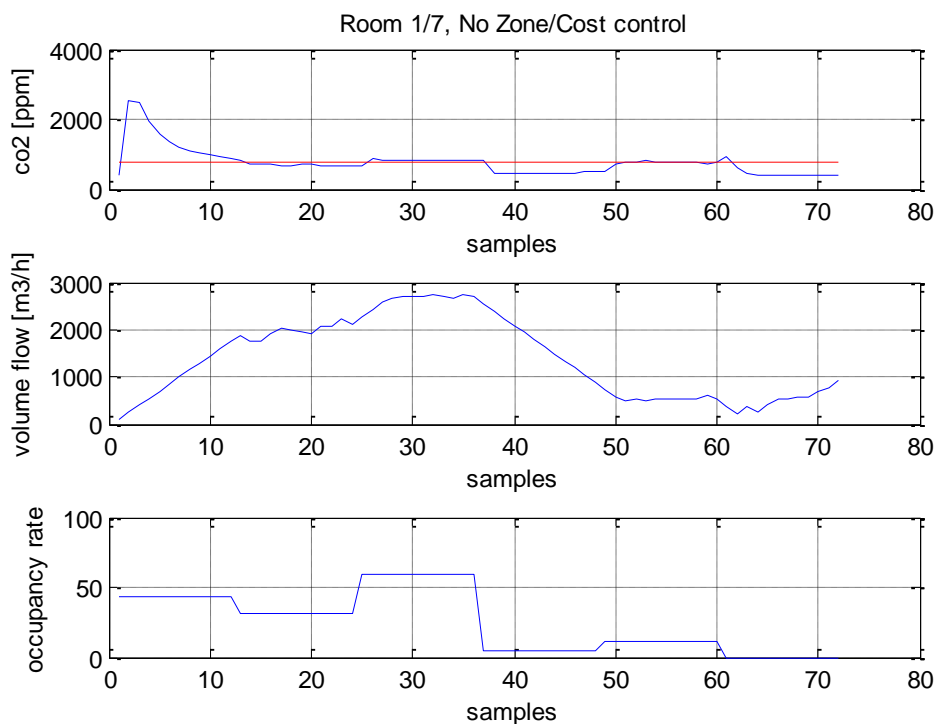


Abbildung 3: Simulation ohne Zone

Deutlich erkennt man bei Regelung ohne Zonenfunktion das Bestreben des Reglers die Raumluft CO2 Werte exakt auf Sollwert 800 ppm zu regeln. Ebenfalls klar zu sehen, sind die über die Nebenbedingung der Optimierung vorgegebenen max. Verstell-Geschwindigkeitsbeschränkungen von 150m3/h und Abtastschritt.

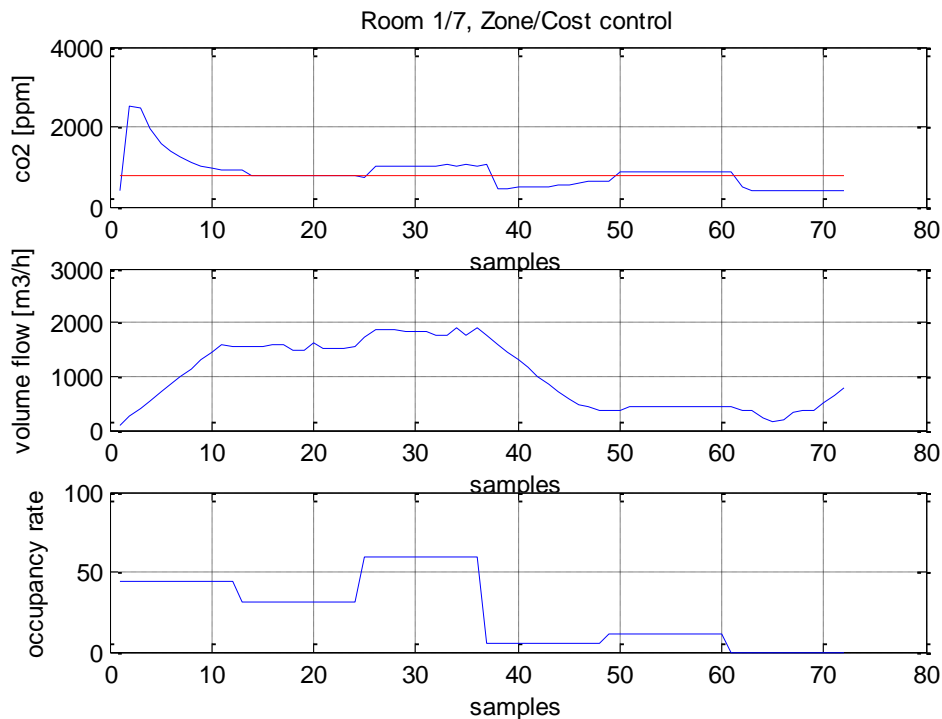


Abbildung 4: Simulation mit Zone

Deutlich erkennt man bei Regelung mit Zonenfunktion das Bestreben des Reglers die Raumluft CO2 Werte nur noch innerhalb des definierten Bandes von ± 200 ppm um den Sollwert 800 ppm zu regeln. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad ermöglicht eine wesentlich kostenoptimalere Fahrweise, der maximale Volumenstrom liegt bei identer Raumbelugung wie in der obigen Simulation unter 2000m3/h, eine Reduktion des max. Volumenstroms um beinahe 1000m3/h im Vergleich zum ersten Fall.

2.2.2 Kostenterm II

Der zweite Kostenterm $\sum_l^{Nc} \sum_i^{nu} R * \Delta u_{l,i}^2$ bewertet die Änderung der Volumenströme. Je höher diese pro Zeitschritt sind, desto höher die resultierenden Kosten. Dies führt dazu, die eingesetzte Regelenergie zu minimieren. Wiederrum können über die Gewichtsmatrix R einzelne Volumenströme priorisiert werden. Ein minimales Gewicht ist auch notwendig um ein Oszillieren der Stellgröße an der Zonengrenze zu vermeiden.

2.2.3 Kostenterm III

Dieser Term $\sum_l^{Nc} \sum_i^{nu} S * f(u_{l,i})$ bewertet die realen Kosten der aktuellen Stellgrößentrajektorie. Bei einer Ventilator Kennlinie ergibt sich ein kubischer Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und elektrischer Leistungsaufnahme.

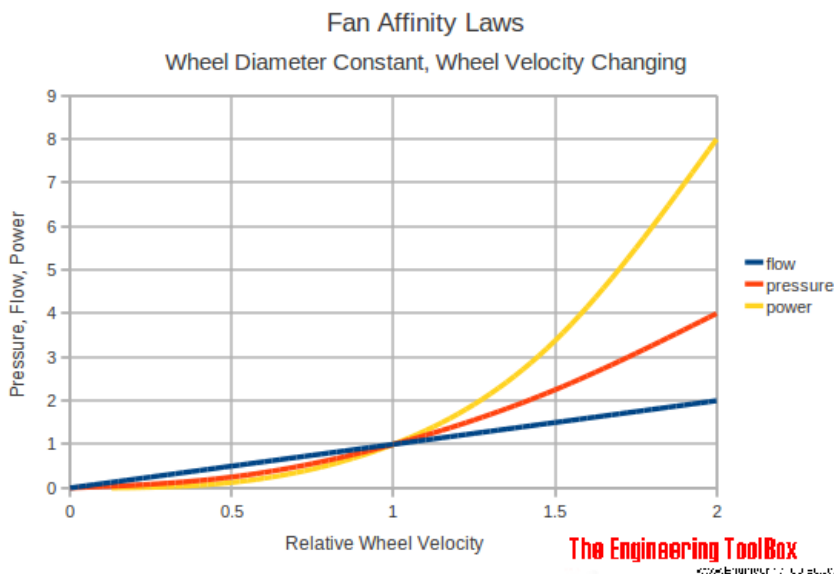


Abbildung 5: Ventilator Kennlinie

Für den im Realgebäude verwendeten Ventilator wurde über empirische Parameteridentifikation die Kennlinie bestimmt.

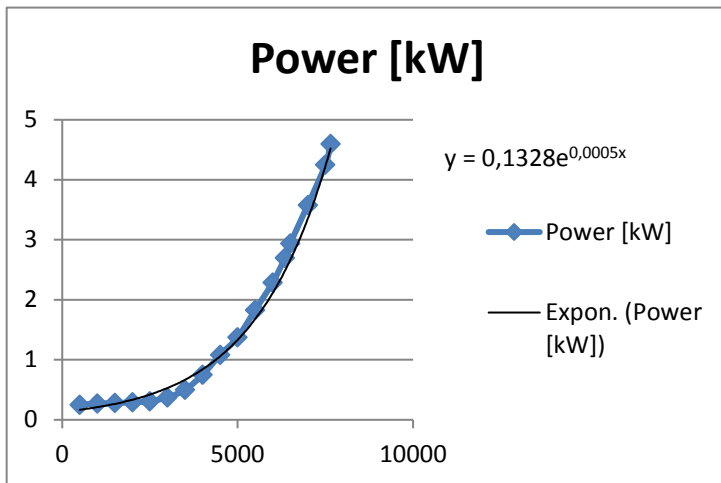


Abbildung 6: Parameter Identifikation

Durch Kenntnis dieser Kennlinie ist der Regler in der Lage die Leistungsminimale Stellgrößentrajektorie zu bestimmen und damit auch die Kosten zu minimieren.

Der Codeausschnitt zeigt die Implementierung der Zielfunktion. In der letzten Zeile werden alle drei Kostenanteile aufsummiert.

```

%%-----
% nested function that computes the objective function
function F = nestedfun(x)
    for k=1:np
        ii=(k-1)*ny+(1:ny);
        yh(k*ny+(1:ny))=co2_calc(yh(ii),x(min(ii,maxiu)),Vr,dv(k,:),0,0,ts,Co2au);
    end
    % check if zone objective used at all
    if any(z),
        ize = yh(ny+(1:pn)) - 10 > zlb & yh(ny+(1:pn)) + 10 < zub;
        ize=ize & z;
        % if in zone and used , replace normal penalty weight with in zone weight
        ywt(ize)=zwt(ize);
    end
    % build weighted moving of actuators cost part
    dx=abs(diff([xp;reshape(x,ny,[])]));
    Fdx=reshape(dx',[ ],1);
    % build vanpower cost part
    % sum up the flows first
    Fpow=vanpower_calc(sum(reshape(x,nu,nc)),0.1328,5e-4);
    % build squared error cost part
    Fy=ywt'*(abs(r-yh(ny+(1:pn)))).^2);
    % sum up to build total costs
    F=Fy+uwt'*Fpow+duwt'*Fdx;
end

```

2.2.4 Solver

Kern der Optimierung stellt der verwendete Solver dar. Im Zuge des Projekts wurden unterschiedliche Lösungsansätze evaluiert und implementiert. Als Entwicklungswerkzeug wurde das Mathematikpaket MATLAB® der Firma Mathworks, Inc. verwendet. Unterschiedliche Varianten wurden im Zuge des Projekts evaluiert. Fmincon - implementiert eine Gradienten-basierende Methode für kontinuierliche Zielfunktionen und Nebenbedingungen. Wesentlich ist die Existenz kontinuierlicher erster Ableitungen. Der Algorithmus versucht eine nicht-lineare multivariate Zielfunktion mit Nebenbedingungen zu minimieren.

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A * x \leq b \\ Aeq * x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

Durch Verwendung der Ungleich-Nebenbedingung $A * x \leq b$ kann die Stellgrößengeschwindigkeitsbeschränkung definiert werden. Die absoluten Stellgrößenbeschränkungen werden über die Relation $lb \leq x \leq ub$ definiert. x_0 stellt den Startwert der Optimierung (Ist-Stellgröße zum aktuellen Zeitpunkt t) dar.

```
%-----%
fmincon...
%-----%
if strcmpi(solver, 'LNLP')
    options = optimset('Display', 'off', 'Algorithm', 'active-set');
    [x, fval] = fmincon(@nestedfun, x0, mod.dm.A1, b1, [], [], lb, ub, [], options);
    x=x(:)';
```

Pattern search (PS) stellt eine numerische, nicht gradientenbasierende Optimierungsmethode dar. Der Ansatz ist daher auch für nicht-kontinuierliche und/oder differenzierbare Optimierungsprobleme geeignet. Sie sind auch unter den Bezeichnungen direct-search, derivate-free, oder black-box Methoden bekannt. Die Grundidee des iterativen Verfahrens liegt in der Generierung einer Menge von sogenannten Gitterpunkten. Dieses Gitter wird aus dem aktuellen Punkt (Startpunkt) durch Transformation mit einer Menge von Richtungsvektoren erzeugt. Liefert die Auswertung der Zielfunktion für einen Gitterpunkt ein besseres Ergebnis als der aktuelle Punkt, wird der aktuelle Punkt durch diesen ersetzt und dient als Startwert für den nächsten Iterationschritt.

```
%-----%
% pattern search algorithm...
%-----%
elseif strcmpi(solver, 'PS')
    options = psoptimset('Display', 'off');
    [x, fval] = patternsearch(@nestedfun, x0, mod.dm.A1, b1, [], [], lb, ub, [], options);
    x=x(:)';
```

Scatter search (SCS) stellt einen evolutionären Ansatz dar und ist inspiriert von Strategien zur Zusammenführung von Entscheidungsregeln und Constraints. Im Unterschied zu anderen evolutionären Ansätzen, wie z.B. Genetischen Algorithmen basiert die Generation neuer Elemente auf Strategie anstatt auf Zufall. Die Funktionsweise kann in 4 Schritte unterteilt werden:

- (1) Initialisierung des Referenzsets
- (2) Neue Lösung durch Kombination
- (3) Lokale Verbesserung der Lösung
- (4) Beste Lösung in Referenzset aufnehmen, Schritte 2-4 wiederholen bis Referenzset konstant, Diversifizieren mit Wiederholung von (1)

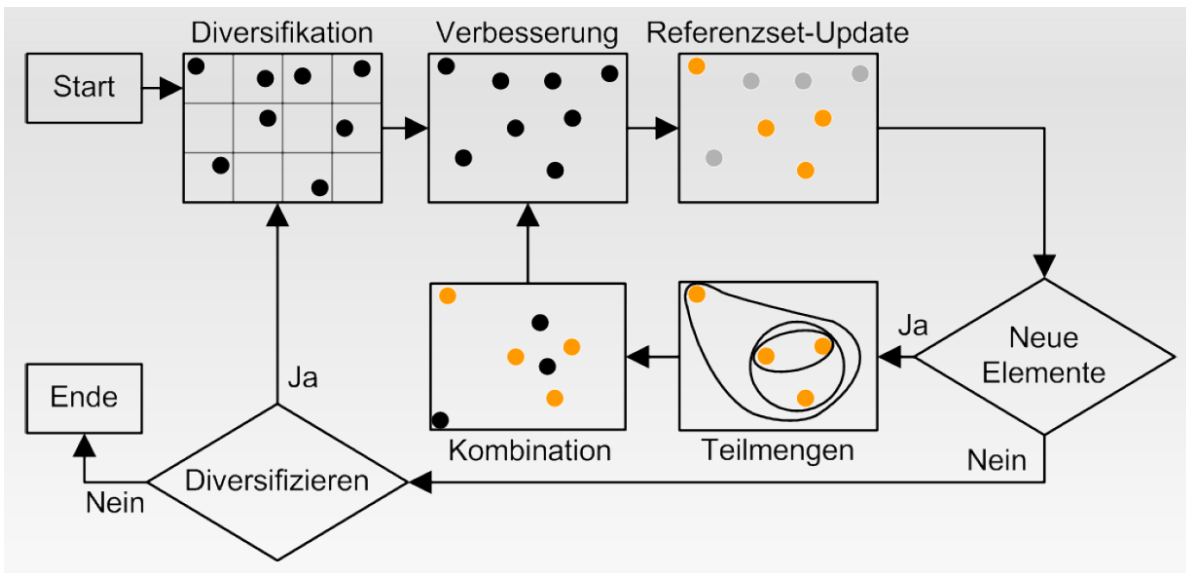


Abbildung 7: Scatter Search Algorithmus

Im gegenständlichen Projekt wurde der implementierte Algorithmus noch um die Möglichkeit eines finalen Gradienten-Solver Laufs mittels `fmincon` erweitert. Der resultierende Hybrid-Algorithmus verwendet die optimale Lösung als Startwert `x0` für den Gradienten-Solver, dies erhöht die Stabilität der Lösung erheblich (dazu siehe [11],[12]).

```
%----- %
scatter search algorithm...%----- %
-----
```

```
elseif strcmpi(solver, 'SCS')
    [x, fval]=scsopt(@nestedfun, x0, mod.dm.A1, b1, lb, ub, 0);
```

Global search (GS) implementiert einen “scatter-search” Algorithmus zur Generierung einer Menge von Startpunkten. Der Algorithmus bewertet die Startpunkte und verwirft jene, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die aktuell beste Lösung nicht verbessern. Von als aussichtsreich bewerteten Punkten wird ein Gradientensolver-run mittels `fmincon` gestartet. Der Algorithmus terminiert nach einer maximalen Anzahl von Iterationen oder wenn keine weitere signifikante Verbesserung der gefundenen optimalen Lösung erzielt wird (dazu siehe [11],[12],[13]).

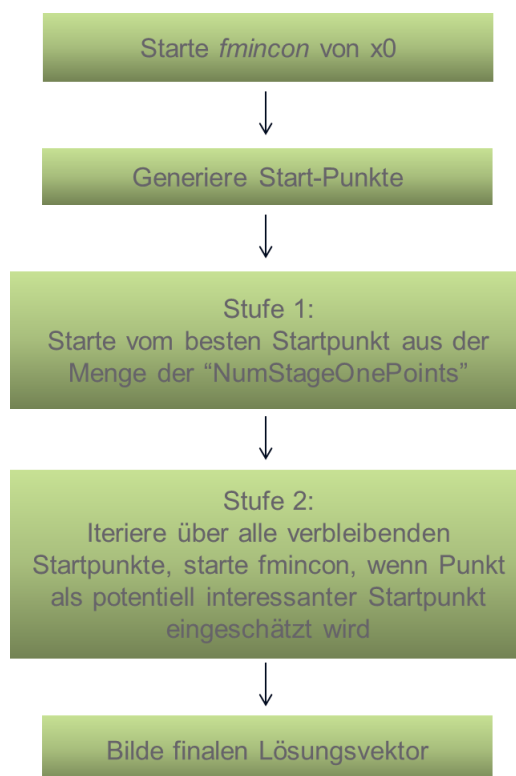


Abbildung 8: Global Search Algorithmus

```

%----- %
global search algorithm...
%-----
elseif strcmpi(solver, 'GS')
    gs=gsoptimset('StartPointsToRun', 'bounds', 'NumTrialPoints', 50, 'NumStageOnePoints', 10, 'BasinRadiusFactor', 0.1);
    problem=gsoptimcreate('fmincon', @nestedfun, x0, 'A', mod.dm.A1, 'b', bl, 'lb', lb, 'ub', ub);
    [x, fval]=gsnlp(gs, problem);

```

2.2.5 Vergleich der unterschiedlichen Implementierungen

Die Simulation Studie betrachtet zwei Räume über einen Beobachtungszeitraum von 12 Stunden.

Blau: Raum 01, Grün: Raum 07

Als Kenngrößen für den MPC gelten.

- (1) Abtastzeit $TS = 600\text{sec}$.
- (2) Prädiktionshorizont NP des MPC = 18 Samples, entspricht 3 h.
- (3) Kontrollhorizont NC des MPC = 3 Samples, entspricht 30 min
- (4) CO_2 Sollwerte $\text{SPCO}_2 = 800$ [ppm]
- (5) Gewichtsmatrix $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
- (6) Stellgrößenbeschränkungen $[\text{min}, \text{max}, \Delta\text{max}] = [1, 1, 4000, 4000, 300, 300]$; [m^3/h]
- (7) Zonendefinition $[\text{min}, \text{max}] = [400, 400, 200, 200]$; [ppm]
- (8) Zonengewicht = $[5\text{e-}3, 5\text{e-}3]$
- (9) Gewichtsmatrix $R = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}$
- (10) Gewicht $S = 1\text{e}4$

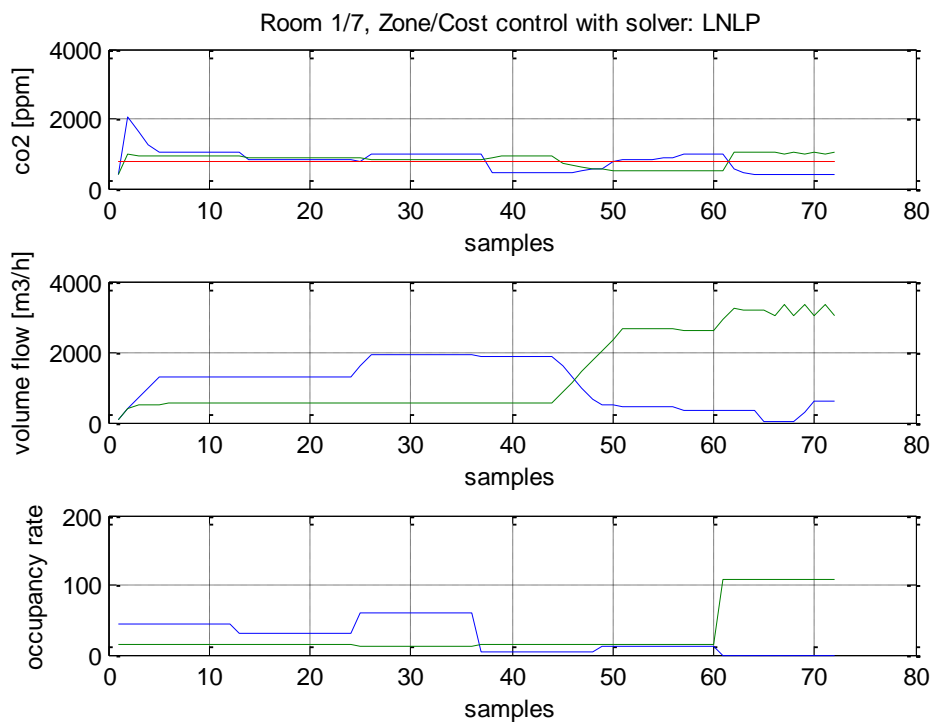


Abbildung 9: Solver LNL

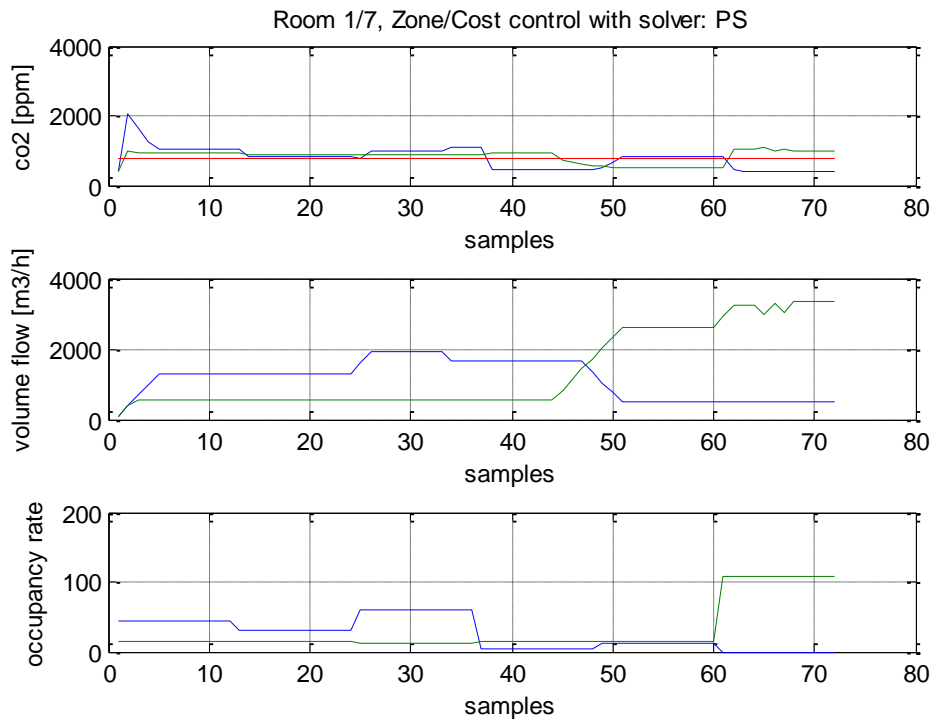


Abbildung 10: Solver PS

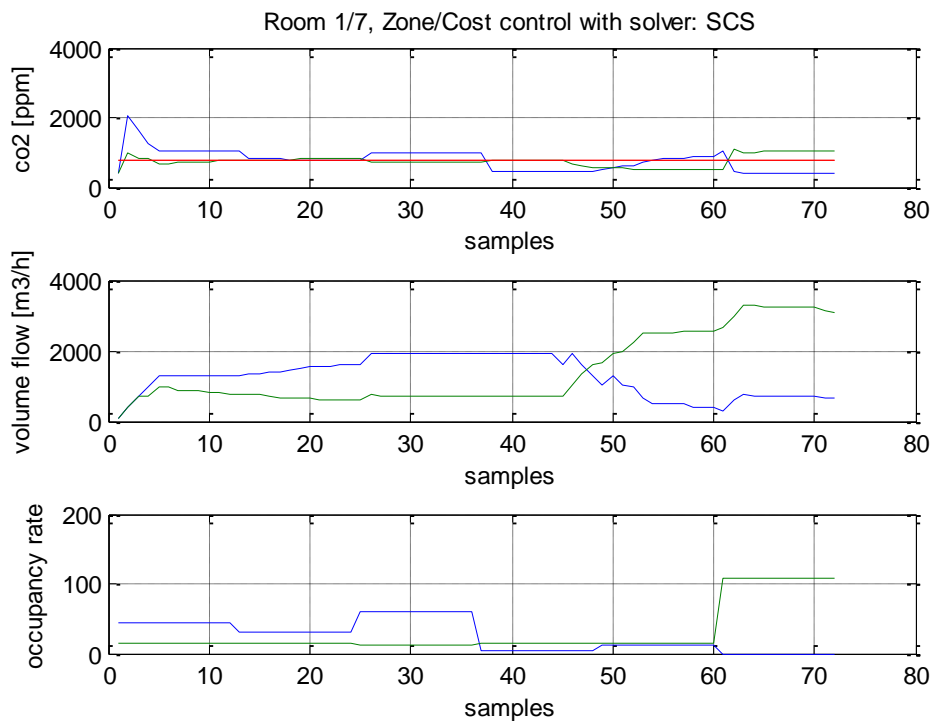


Abbildung 11: Solver SCS

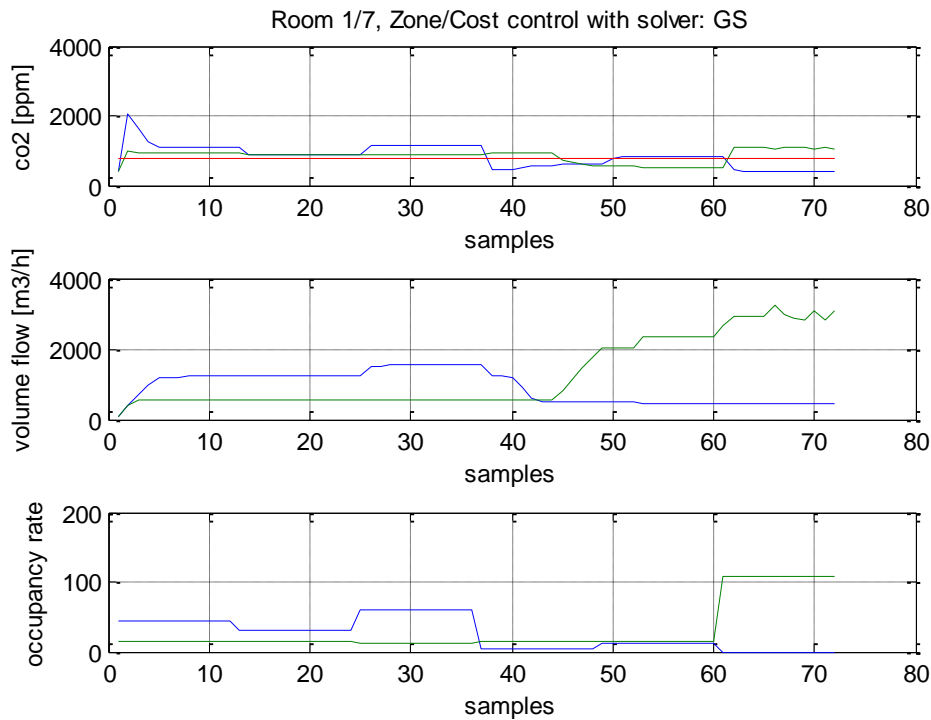


Abbildung 12: Solver GS

Als Stellgrößentrajektorie ergibt sich in jedem Abtastschritt der optimale Eintrittsluftvolumenstrom pro betrachteten Raum.

Alle vier Solver zeigen sehr ähnliche optimale Stellgrößentrajektorien. Eindeutig ist das Bestreben die Zonen im Sinne der Kostenoptimalität auszunutzen. Kostentechnisch scheint der GS-Algorithmus das beste Ergebnis zu liefern.

	Komplexität	Laufzeit [sec]	Performance
<i>Fmincon</i>	gering	20	gut
<i>Pattern Search</i>	mittel	35	gut
<i>Scatter Search</i>	mittel	111	gut
<i>Global Search</i>	hoch	210	sehr gut

Es wurde daher für alle folgenden Simulationsstudien der Solver-Algorithmus *fmincon* gewählt.

3 Implementierung des Reglers in der GUI

In dieser Simulations- Studie wurde der Regel-Algorithmus auf bis zu 22 Räume der ENERGYbase angewandt. Das Simulation Programm untergliedert sich in folgende Teilbereiche:

- (1) Einlesen der Gebäude- Raum-Geometrie Parameter
- (2) Einlesen der Raumbelagungs-Trajektorien
- (3) Definition der MPC- Regelparameter
- (4) Berechnung der optimalen Volumenstrom-Trajektorien
- (5) Einlesen der Gebäude Lüftungsrohr-Geometrie Parameter
- (6) Berechnung der Druckverluste
- (7) Berechnung der optimalen Lüftungsklappenwinkel

Ad(1)

Raumnr.:	Bezeichnung	Beschreibung	Volumen [m ³]	Geregelt
01	E0.04	Seminar 1	153	Ja
02	E0.11	Seminar 2	194.58	Ja

R01													
	Description	Room (1) correspond to E1.04 (DESIGO) - E0.04 (Reality)											
	Sections	b	c	L	c	L	c	f	S	c	L	n	
	Lengths	0	1	0	1	0	1	0	1.1	1	0	0	0
	Widths1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Widths2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 14: Lüftungstopologie zu Raum

Über die Zuordnungstabelle wird das Rohrsystem zu jedem einzelnen Raum beschrieben.

MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_L			
MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_R			
MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_R	BRF1_R_1	BRF1_R_2	
MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_R	BRF1_R_1		
MBR	MBRF1	BRF1					
MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_L	BRF1_L_1		
MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_L	BRF1_L_1		
MBR	MBRF1	BRF1	BRF1_1	BRF1_R	BRF1_R_1	BRF1_R_2	BRF1_R_3
MBR	MBRF2	MBRF2_1	MBRF2_2	MBRF2_3	MBRF2_4	MBRF2_5	
MBR	MBRF2	MBRF2_1	MBRF2_2	MBRF2_3	MBRF2_4	MBRF2_5	
MBR	MBRF2	MBRF2_1	MBRF2_2	MBRF2_3	MBRF2_4		
MBR	MBRF2	MBRF2_1	MBRF2_2	MBRF2_3			
MBR	MBRF2						
MBR	MBRF2	MBRF2_1					
MBR	MBRF2	MBRF2_1	MBRF2_2				
MBR	MBRF2	MBRF2_1	MBRF2_2	MBRF2_3	MBRF2_4	MBRF2_5	

Abbildung 15: Zuordnungstabelle

Ad(6)

Durch Kenntnis des benötigten Gesamtvolumenstroms und der detaillierten Modellierung des Lüftungssystems können die Druckverluste bis zu jedem Raum berechnet werden. Dies liefert Kenntnis über den benötigten Gesamtdruck.

Ad(7)

Berechnung des Lüftungsklappenwinkels für jeden Raum als Funktion des benötigten Volumenstroms.

3.1 Simulationsergebnis für Raum 01 – 22

Die einzelnen Abbildungen zeigen die CO2 Raumluftentwicklung sowie die zugehörigen Soll-Luftvolumenströme und notwendigen Klappenwinkel für gegebene Raumbelastung.

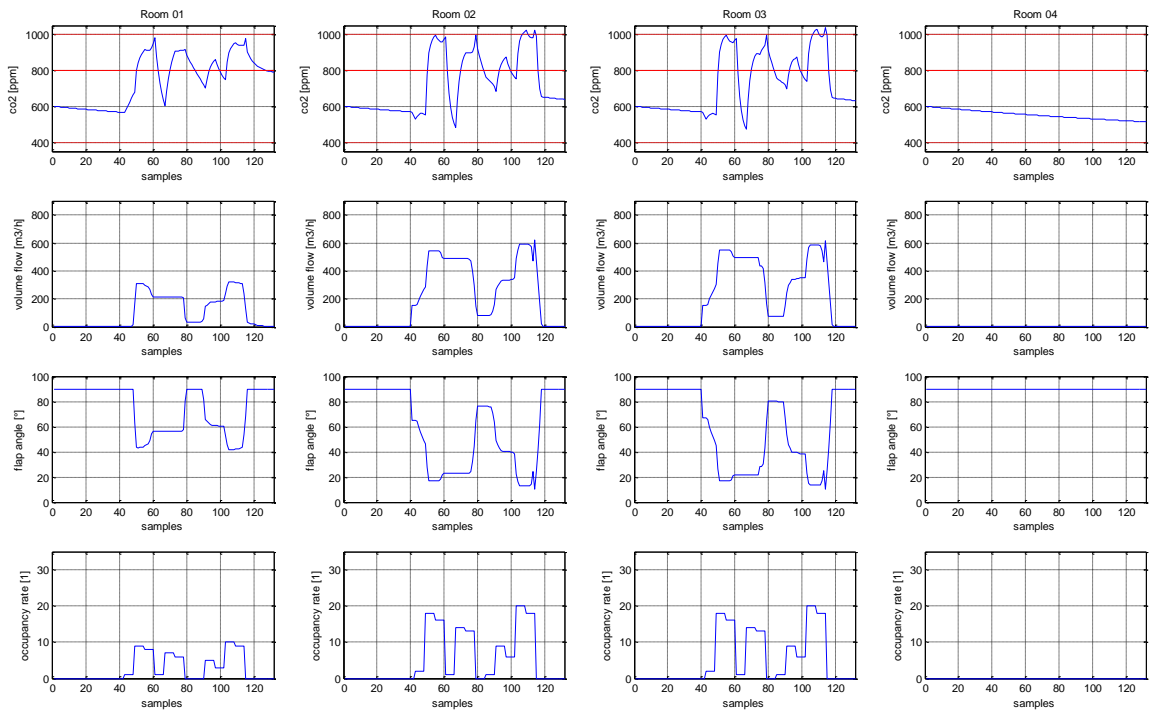


Abbildung 16: Raum 01 - 04

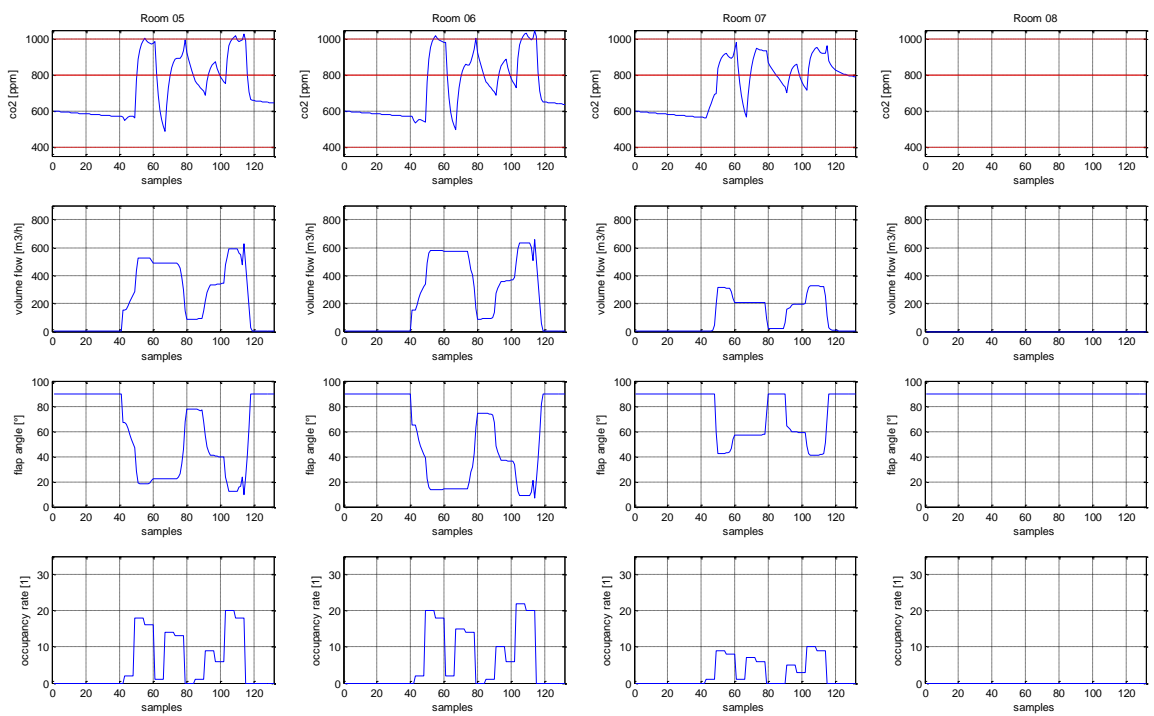


Abbildung 17: Raum 05 - 08

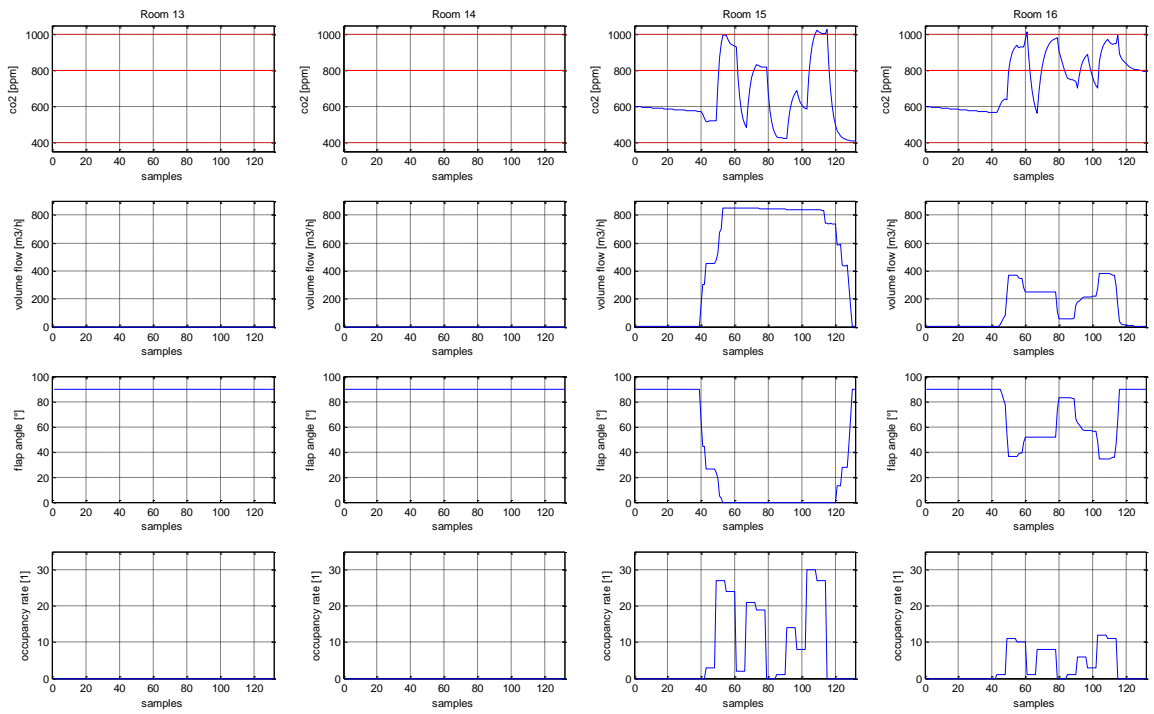


Abbildung 18: Raum 13 - 16

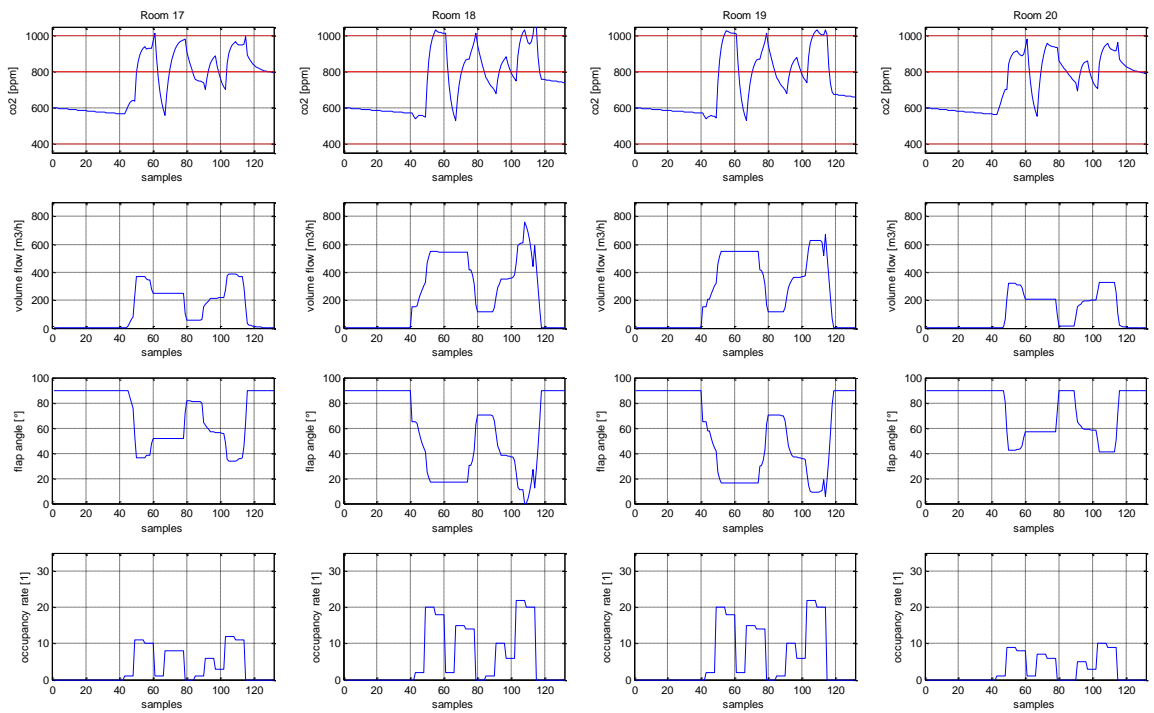


Abbildung 19: Raum 17 - 20

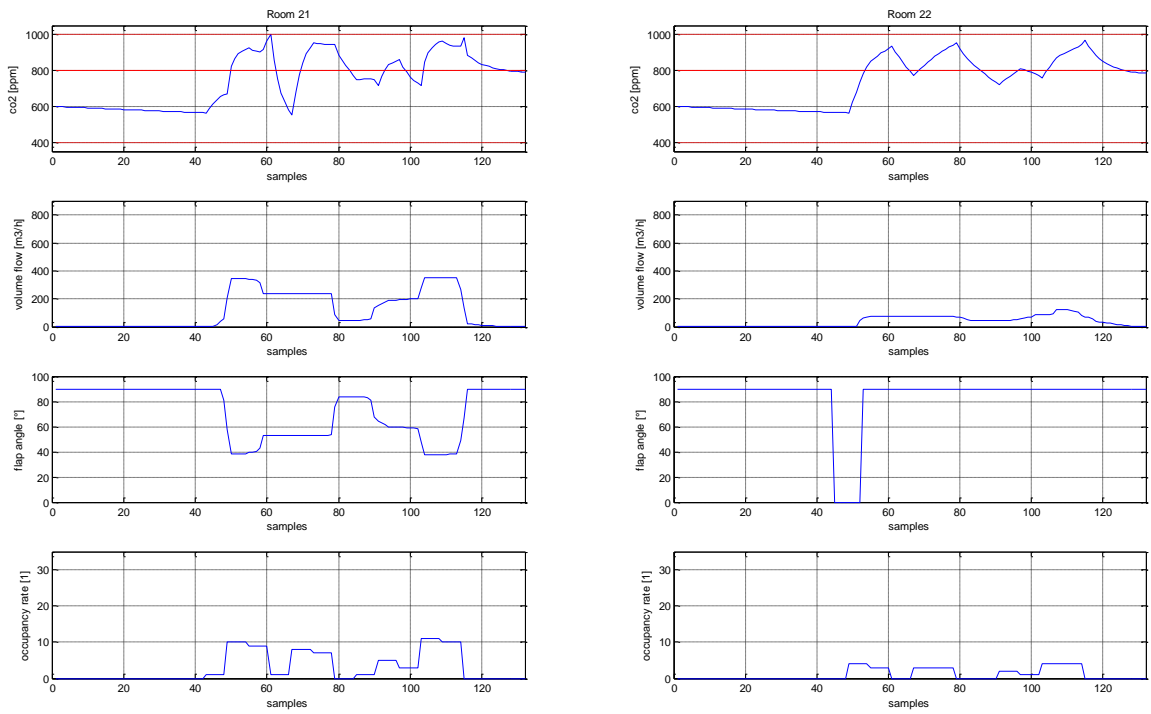


Abbildung 20: Raum 21 - 22

3.2 Simulationsergebnis für Gesamtvolumenstrom und Leistungsaufnahme des Ventilators

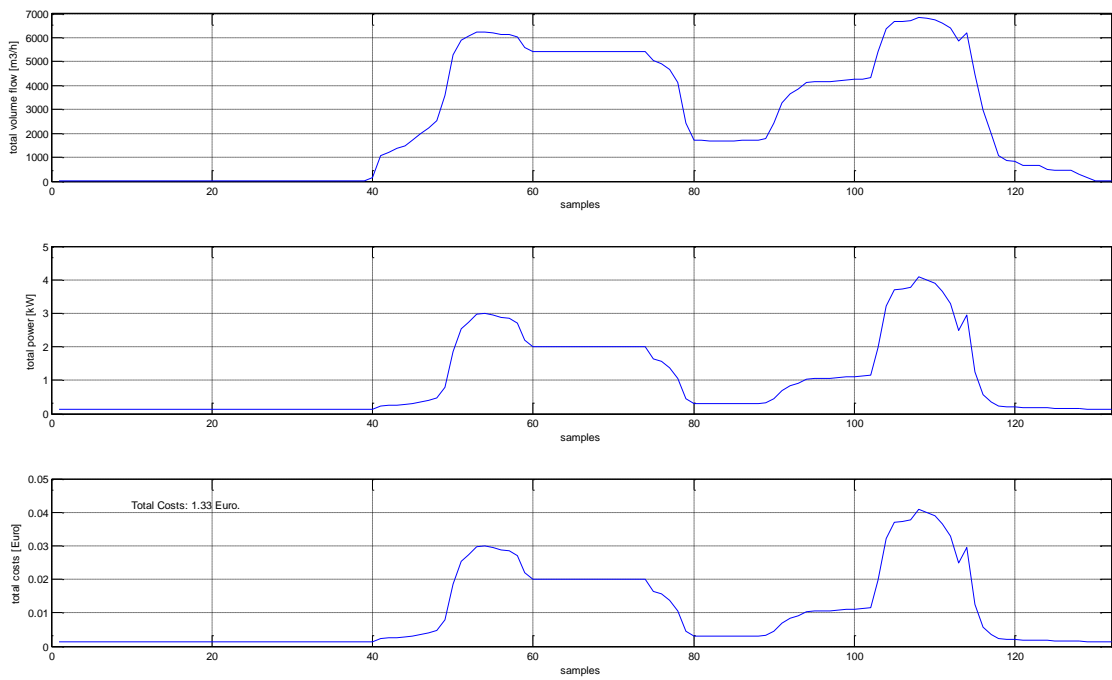


Abbildung 21: Leistungsaufnahme Ventilator

4 Simulations-Studie E+E Gebäude

In dieser Simulation Studie wurde der Regel-Algorithmus auf das E+E Gebäude angewandt. Die Gebäuderaumtopologie wird in einer 4 x N Daten- Struktur abgebildet. Die Geschosse (Untergeschoß, Erdgeschoß, Obergeschoß I und Obergeschoß II) werden im Zeilenindex abgebildet. Der Spaltenindex 1 .. N indiziert jeden Raum pro Stockwerk.

Das Simulations Programm untergliedert sich in folgende Teilbereiche:

- (1) Einlesen der Gebäude -Raum-Geometrie Parameter
- (2) Einlesen der Raumbelagungs-Trajektorien
- (3) Definition der MPC- Regelparameter
- (4) Berechnung der optimalen Volumenstrom-Trajektorien
- (5) Einlesen der Gebäude Lüftungsrohr-Geometrie Parameter
- (6) Berechnung der Druckverluste

■

Ad(1)

Untergeschoß	Bezeichnung	Beschreibung	Volumen [m ³]
	8114	Archiv	187.6
	8103	Labor 1	147.6
	8104	Labor 4	78.4
	8105	EDV Lager	39.5
	8107	E-Technik	39.5
	8108	Heizraum	165.1
	8110	Technik Kältemaschinen	36.8
	8115	Gaslöschanlage	7.5
	8102	Vorraum	45
	8106	Gang	92.2
	8113	Lager Veranstaltung	45.9
	8112	Labor 2	383
	8111	Labor 3	165.5

Erdgeschoß	Bezeichnung	Beschreibung	Volumen [m ³]
	8233	Meeting 1	106.5
	8232	Meeting 2	101.9
	8230	Teeküche	46.5
	8229	Meeting 3	100.9
	8228	Büro	49.5
	8227	Büro	100.9
	8226	Büro	100.9
	8225	Büro	92.1
	8222	Mitarbeiterküche	40.9
	8218	Kantine	384.2
	8223	WC	13.7
	8224	WC	13
	8217	Aufwärmküche	98.8
	8216	Putzmittelraum	20.5
	8213	Getränkelerager	55.1
	8212	Zwischenlager	47.1
	8210	Arztraum	39.9
	8211	Ruheraum	27
	8208	Ruheraum	54.9
	8207	Gang	216.8
	8203	Foyer/Schauraum	250.7
	8205	Portier	27.9
	8206	WC-B/D	12.3
	8204	WC-H	11.7
	8209	E-Technik	14.2
	8214	Vorraum	17.1

Obergeschoß I	Bezeichnung	Beschreibung	Volumen [m ³]
	8326	Meeting	91.5
	8325	Büro	85
	8323	Teeküche	39.5
	8322	Büro	130.4
	8321	Büro	86.4
	8320	Büro	86.4
	8319	Büro	86.4
	8318	Büro	86.4
	8317	Büro	86.4
	8315	Büro	78.8
	8314	Büro	78.8
	8313	Büro	38.7
	8312	Büro	38.7
	8311	Büro	78.8
	8310	Büro	38.7
	8309	Büro	38.7
	8308	Büro	44.6
	8304	WC-H	16.4
	8305	WC-D	15.7
	8306	LAN-Raum	21
	8303	Putzmittel	12
	8302	Gang	164.7
	8301	Büro	69.5

Obergeschoß II	Bezeichnung	Beschreibung	Volumen [m ³]
	8427	Büro GF	80.9
	8426	Meeting	85
	8424	Teeküche	39.8
	8423	Büro	42.4
	8422	Büro	86.4
	8421	Büro	86.4
	8420	Büro	174.4
	8419	Büro	42.4
	8418	Büro	42.4
	8417	Büro	86.4
	8416	Büro	78.8
	8415	Büro	78.8
	8414	Büro	78.8
	8413	Büro	38.7
	8412	Büro	38.7
	8411	Büro	78.8
	8410	Büro	44.6
	8407	WC-D	15.7
	8406	WC-H	16.4
	8405	Putzmittel	12
	8408	LAN-Raum	21
	8403	Büro	45
	8402	Büro	78.8
	8401	Büro GF	78.8
	8428	Sekretariat	52.7
	8404	Gang	176.2
	8409	Gang	76.7

Ad(2)

Für jeden der Räume wird eine Raumbelugungstrajektorie (Anzahl der Person im Raum) hinterlegt. Diese Information stellt aus regelungstechnischer Sicht eine bekannte Störgröße für den Optimierungsalgorithmus dar.

Ad(3)

- Abtastzeit TS = 6 min.
- Prädiktionshorizont NP des MPC = 20 Samples, entspricht 2 h.
- Kontrollhorizont NC des MPC = 3 Samples, entspricht 18 min
- CO2 Sollwerte SPCO2 = 800 [ppm]
- Gewichtsmatrix $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
- Stellgrößenbeschränkungen [min, max, Δmax] = [1, 1, 4000, 4000, 150, 150]; [m3/h]
- Zonendefinition [min, max] = [400, 400, 200, 200]; [ppm]
- Zonengewicht = [5e-3, 5e-3]
- Gewichtsmatrix $R = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}$
- Gewicht S = 1e3

Die Außenluft- CO2 Konzentration wird konstant mit 400 ppm angenommen. Die Raum- CO2 Startkonzentration ist mit 400 ppm definiert.

Ad(4)

Der Simulationszeitraum erstreckt sich über 22 Stunden.

Ad(5)

Über eine Konfigurationsdatei wird wiederum die Gebäude – Lüftungstopologie sowie die Geometrie Parameter sämtlicher Rohrabschnitte eingelesen. Über eine Zuordnungstabelle wird das Kanalsystem vom zentralen Gesamtvolumenstrom – Eintrag (Ventilator) bis zu jedem einzelnen Raum abgebildet.

Ad(6)

Durch Kenntnis des benötigten Gesamtvolumenstroms und der detaillierten Modellierung des Lüftungssystems können die Druckverluste bis zu jedem Raum berechnet werden. Dies liefert Kenntnis über den benötigten Gesamtdruck.

Bedienoberfläche

Aufgrund der 4 Geschoßebenen und der hohen Anzahl von Räumen mit unterschiedlicher Nutzung wurde für die Simulation eine eigene Bedienoberfläche implementiert.

Room Id	Description	Controlled		06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
8233	Meeting 1	<input checked="" type="checkbox"/>	ROR	0	0	3	6	6	6	6	0	3	
8232	Meeting 2	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0	3	6	6	6	6	0	3	
8230	Teeküche	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8229	Meeting 3	<input type="checkbox"/>		0	0	3	6	6	6	6	0	3	
8228	Büro	<input type="checkbox"/>		0	0	2	2	1	1	1	0	1	
8227	Büro	<input type="checkbox"/>		0	0	4	4	2	2	2	0	2	
8226	Büro	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0	4	4	2	2	2	0	2	
8225	Büro	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0	4	4	2	2	2	0	2	
8222	Mitarbeiterkü...	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8218	Kantine	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8223	WC	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8224	WC	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8217	Aufwärmkü...	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8216	Putzmittelraum	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8213	Getränkelager	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8212	Zwischenlag...	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8210	Arztraum	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8211	Ruheraum	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8208	Ruheraum	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8207	Gang	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8203	Foyer/Schau...	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8205	Portier	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8206	WC-B/D	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8204	WC-H	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8209	E-Technik	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	
8214	Vorraum	<input type="checkbox"/>		0	0	1	2	2	2	2	2	2	

Abbildung 22: Bedienoberfläche E+E

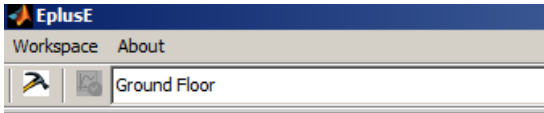


Abbildung 23: Menüleiste E+E

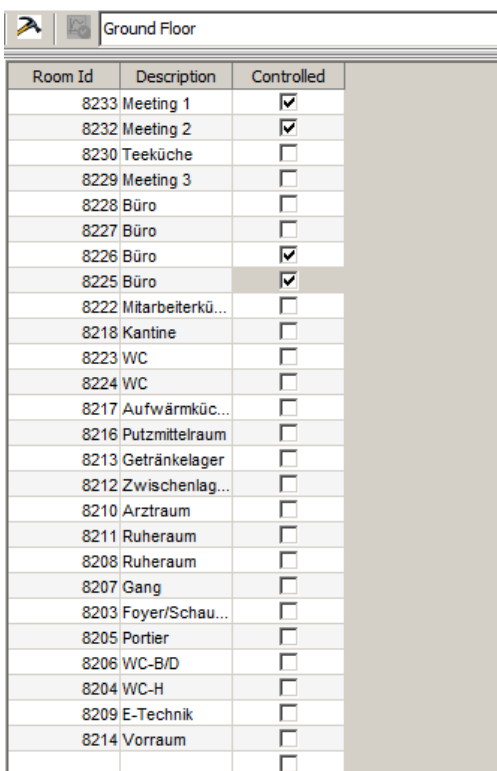
Die Oberfläche besteht aus einer Menüleiste mit den Menüeinträgen:

- Workspace
Ermöglicht über das „Quit“ Kommando das Schließen der Applikation
- About
Stellt Information zu Autor und Release zur Verfügung.

Unter der Menüleiste befindet sich die Werkzeugleiste. Die beinhaltet das Werkzeug für

- Simulation
Startet einen Simulationslauf mit allen ausgewählten Räumen.
- Plot
Dient der Visualisierung der Ergebnisse
- Kombinationsfeld
Bietet Auswahl der Geschoßebene

Nach Auswahl einer Geschoßebene werden in einem Geschossexplorer alle im Geschos existierenden Räume aufgelistet. Durch Aktivieren des Auswahlkästchens „Controlled“ wird der entsprechende Raum dem Regel-Algorithmus zugewiesen.



Room Id	Description	Controlled
8233	Meeting 1	<input checked="" type="checkbox"/>
8232	Meeting 2	<input checked="" type="checkbox"/>
8230	Teeküche	<input type="checkbox"/>
8229	Meeting 3	<input type="checkbox"/>
8228	Büro	<input type="checkbox"/>
8227	Büro	<input type="checkbox"/>
8226	Büro	<input checked="" type="checkbox"/>
8225	Büro	<input checked="" type="checkbox"/>
8222	Mitarbeiterkü...	<input type="checkbox"/>
8218	Kantine	<input type="checkbox"/>
8223	WC	<input type="checkbox"/>
8224	WC	<input type="checkbox"/>
8217	Aufwärmküc...	<input type="checkbox"/>
8216	Putzmittelraum	<input type="checkbox"/>
8213	Getränkelager	<input type="checkbox"/>
8212	Zwischenlag...	<input type="checkbox"/>
8210	Arztraum	<input type="checkbox"/>
8211	Ruheraum	<input type="checkbox"/>
8208	Ruheraum	<input type="checkbox"/>
8207	Gang	<input type="checkbox"/>
8203	Foyer/Schau...	<input type="checkbox"/>
8205	Portier	<input type="checkbox"/>
8206	WC-B/D	<input type="checkbox"/>
8204	WC-H	<input type="checkbox"/>
8209	E-Technik	<input type="checkbox"/>
8214	Vorraum	<input type="checkbox"/>

Abbildung 24: Raumexplorer

Die zugehörige Raumbelungs- Trajektorie ist in derselben Zeile rechts für jeden Raum eingeblendet. Der Belungswert pro Stunde kann vom Bediener editiert werden.

	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
ROR	0	0	3	6	6	6	6	0	3
	0	0	3	6	6	6	6	0	3
	0	0	1	2	2	2	2	2	2
	0	0	3	6	6	6	6	0	3
	0	0	2	2	1	1	1	0	1
	0	0	4	4	2	2	2	0	2
	0	0	4	4	2	2	2	0	2
	0	0	4	4	2	2	2	0	2

Abbildung 25: Raumbelegungsmatrix

4.1 Simulationsergebnis für vier Räume im Obergeschoss I

Die Simulationsergebnis für vier Räume in Abbildung 26 zeigen wieder deutlich die Zonenfunktionalität in der Zielfunktion. Der CO₂ Wert im Raum bewegt sich einem Band um den Zielwert 800 ppm. Ebenso ist der Vorteil der prädiktiven Regelung gegenüber einer klassischen Feedback- Regelung in der Behandlung von messbaren Störgrößen (Raumbelegung) zu sehen. Die Optimierung reagiert bereits wenn sich die Raumbelegungszahl ändert und regelt diese Kostenoptimal aus.

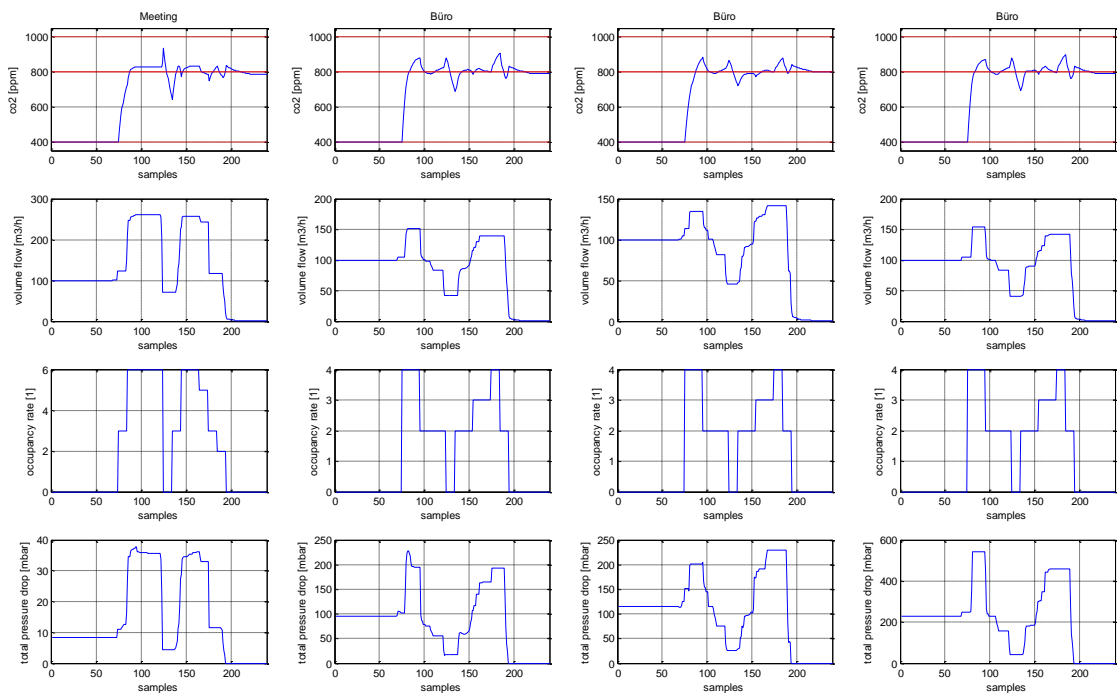


Abbildung 26: Simulation E+E

5 HIL-Lauf ENERGYbase zur formalen Validierung

Im Zuge des HIL-Laufs¹ wird die Hardware und Netzwerk- Topologie des Projektes „CoOpt“ (dazu siehe [14]) adaptiert. In diesem Setup wird der Validierungs-Feldtest ausgeführt, der in Deliverable D5.2 „Evaluierungsbericht“ beschrieben ist. Die Auswertung der Nutzerbefragung zu diesem Experiment beschreibt Deliverable D5.3 „Nutzenanalyse und Benutzerfeedback“.

Das folgende Schema liefert einen Überblick über die installierten Komponenten bzw. eingesetzten Schnittstellen zu den einzelnen Teilnehmern.

¹ Hardware-in-the-Loop Lauf an der ENERGYbase

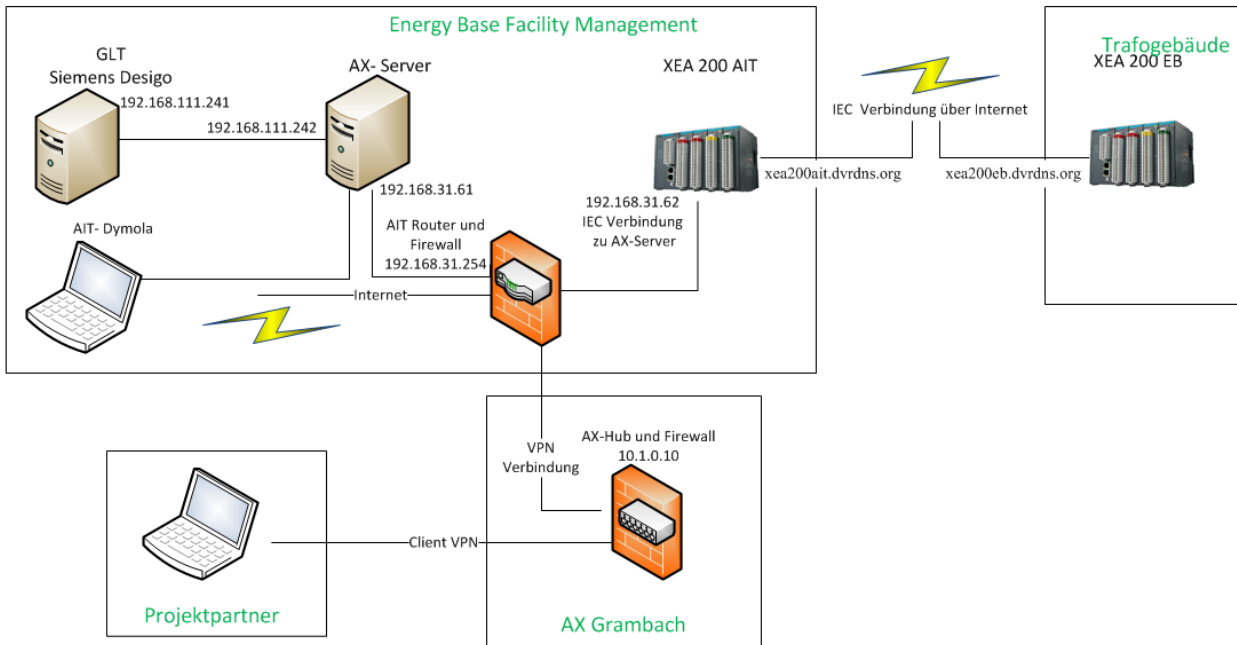


Abbildung 27 : Systemübersicht

5.1 Datentransfer

Die Messdaten aller Sensoren und Aktuatoren werden über BACnet auf den aX- Server übertragen.

Das Kommunikationsprotokoll Building Automation and Control Networks (BACnet) ist ein Kommunikationsprotokoll für Gebäudeautomatisierung. Entwickelt wird das Protokoll von der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Eine detaillierte technische Beschreibung findet sich (dazu siehe [14]).

Zentraler Knotenpunkt ist eine SQL- Datenbank in der sämtliche Informationen zusammengefasst werden. Zum Lesen und Schreiben von Datenbankwerten gibt es im aX5 standardisierte Funktionen. In Klassen können SQLQueries und SQLMethods konfiguriert werden.

Möchte man diese Datenbankwerte auch in der aX5- Soft SPS verarbeiten, gibt es eine Funktion „DataReader“ mit dem man die Werte auf einzelne SPS Variablen zuweisen kann. Zum Schreiben der Werte in die Datenbank gibt es den „DataWriter“ (dazu siehe [14]).

5.2 Optimierungsplattform

Neben der Datenkommunikation ist vor allem der modelbasierte Regler, welcher in letzter Instanz für die Optimierung verantwortlich ist, Hauptbestandteil des aX5 Systems. Der aX5-MPC war vor der ARIS Installation bereits vielfach in industriellen Umgebungen (Pulp&Paper, Umwelt) im Einsatz. Komplexere Modellstrukturen und vor allem Nichtlinearitäten im ARIS Projekt welche sich auf Grund der Modellstruktur ergaben, machten eine Entwicklung im aX5-MPC notwendig. Somit war neben der Integration im Projekt auch ein erheblicher Mehraufwand in der Adaption vom Bestandsregler notwendig.

Die Bestandsregler Änderungen sind in das aX5-Core System eingeflossen. Die applikationsspezifischen Anpassungen und Neuentwicklungen wurden als eigener Userprozess ausgeführt welcher im Zuge des HIL Laufes auch eine rasche Adaption erlaubte.

5.2.1 MPC Prozessablauf

Default Kenngrößen:

- Abtastzeit $T_s = 900s$.
- Prädiktionshorizont N_p des MPC = 8 Samples, entspricht 2 h.
- Kontrollhorizont N_c des MPC = 2 Samples, entspricht 30 min
- $CO_{2,aus}$ Außen Luft wird konstant mit 400 ppm angenommen

Regelparameter für Seminarraum E0.04

E0.04	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	700	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	600	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		400	100			Ja

Regelparameter für Seminarraum E0.11

E0.11	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	700	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	600	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		400	100			Ja

Regelparameter für Seminarraum E0.12

E0.12	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	700	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	600	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		400	100			Ja

Regelparameter für Seminarraum E0.13

E0.13	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	666	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	600	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		300	100			Ja

Regelparameter für Seminarraum E0.14

E0.14	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	640	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	1200	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		300	100			Ja

Regelparameter für Seminarraum E0.15

E0.15	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	650	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	1200	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		300	100			Ja

Regelparameter für Seminarraum E0.22

E0.22	Type	Sollwert	Gewicht	PHI	Min	Max	Δ Max	Δ MV Gew.	Aktiv
	CV	500	1	0.8					
	MV		$1e^3$		1	1200	100	8	
	Zone		$5e^{-3}$		300	100			Ja

5.2.2 Prozessablauf

Im initialen Schritt erfolgt das Einlesen der Gebäude- Raum-Geometrie Parameter sowie der Gebäude Lüftungsrohr-Geometrie Parameter

Der Prozessablauf innerhalb eines Optimierungsschrittes besteht aus den folgenden Tasks:

- (1) Einlesen der MPC- Regelparameter
- (2) Einlesen der aktuellen CO2 und Volumenstrom Messwerte
- (3) Einlesen der aktuellen Raumbesetzungszahl
- (4) Berechnung der optimalen Volumenstrom-Trajektorien
- (5) Berechnung der Druckverluste
- (6) Berechnung der optimalen Lüftungsklappenwinkel

5.3 Visualisierung

Für eine einfache Bedienmöglichkeit der Regelapplikation wurde eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt.

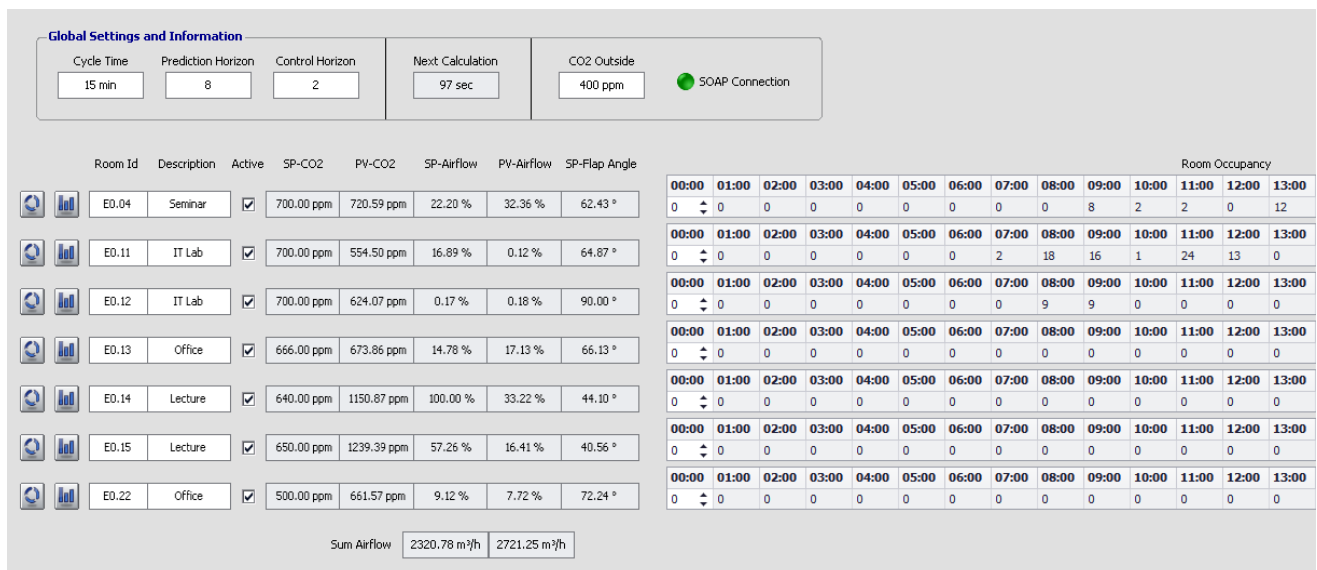


Abbildung 28: Bedienoberfläche ax5

Im oberen Bereich werden globale Regler Einstellungen, die Zeit bis zum nächsten Rechenschritt sowie der aktuelle Verbindungsstatus des Regelprozesses zum AX5 Framework wird angezeigt.

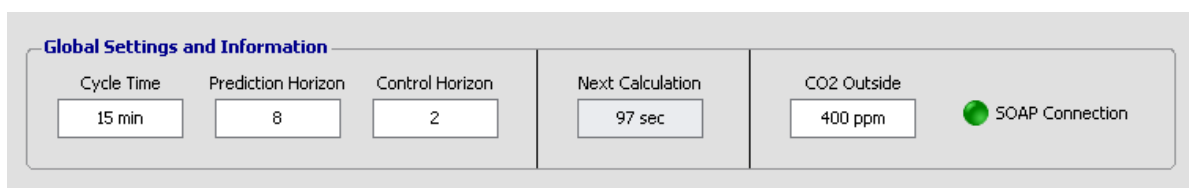


Abbildung 29: Regelparameter und Information

Darunter links sind alle möglichen regelbaren Räume (VAV Boxen vorhanden) mit Raum- Id. und Bezeichnung ersichtlich. Durch Auswahl der "Aktive" Auswahlbox wird der Raum dem Regel- Algorithmus zugeordnet. Sollwerte und Prozesswerte für CO2, Luftvolumenstrom und Klappenwinkel folgen.

Room Id	Description	Active	SP-CO2	PV-CO2	SP-Airflow	PV-Airflow	SP-Flap Angle
E0.04	Seminar	<input checked="" type="checkbox"/>	700.00 ppm	720.59 ppm	22.20 %	32.36 %	62.43 °
E0.11	IT Lab	<input checked="" type="checkbox"/>	700.00 ppm	554.50 ppm	16.89 %	0.12 %	64.87 °
E0.12	IT Lab	<input checked="" type="checkbox"/>	700.00 ppm	624.07 ppm	0.17 %	0.18 %	90.00 °
E0.13	Office	<input checked="" type="checkbox"/>	666.00 ppm	673.86 ppm	14.78 %	17.13 %	66.13 °
E0.14	Lecture	<input checked="" type="checkbox"/>	640.00 ppm	1150.87 ppm	100.00 %	33.22 %	44.10 °
E0.15	Lecture	<input checked="" type="checkbox"/>	650.00 ppm	1239.39 ppm	57.26 %	16.41 %	40.56 °
E0.22	Office	<input checked="" type="checkbox"/>	500.00 ppm	661.57 ppm	9.12 %	7.72 %	72.24 °
Sum Airflow			2320.78 m³/h	2721.25 m³/h			

Abbildung 30: Soll- und Messwerte

Rechts davon findet sich die Tages- Raumbelegungsmatrix mit Dimension 7 x 24. Jeder Eintrag in der Stundenmatrix kann vom Bediener angepasst werden.

Room Occupancy													
00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2	2	0	12
0	0	0	0	0	0	0	2	18	16	1	24	13	0
0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 31: Raumbelegungsmatrix

6 Verwendung des PID Reglers für die Belegungsschätzung

Die im ARIS Projektdokument D4.1 „Mathematische Formulierungen“ beschriebenen Erhaltungsgleichungen für die zur Raumbelegungsschätzung genutzten Größen CO₂, Wärme und Feuchte wurden in PID Reglern mit Matlab Simulink implementiert. Das Konzept ist in Figure 1 vereinfacht skizziert und beruht darauf für eine Annahme für die Anzahl der Personen im Raum über das Modell den erwarteten Messwert für CO₂ Konzentration, Raumlufttemperatur oder relative Feuchte der Raumluft zu berechnen. Hierzu werden noch die „Störgrößen“ wie z.B. aus Sensoren berechneter CO₂-Eintrag durch Lüftung, Wärmeeintrag durch Sonnenstrahlung etc., gemäß der Formulierungen in Dokument D4.1, mit berücksichtigt.

Der Regler benutzt nun den Messwert der entsprechenden Größe aus der Raumsensorik als Setpoint und „regelt“ die Schätzung der Personenzahl bis der Modellwert dem Messwert entspricht.

Die Details der Implementierung in Simulink sowie das „Tuning“ des Reglers für das CO2-Modell werden im Anhang 1 im Detail beschrieben.

Dem PID Regler nachgeschaltet ist noch ein Ausgabefilter der ungewöhnliche Zustände erkennt, wie z.B. das Öffnen eines Fensters über das plötzliche Fallen der Raumtemperatur oder des CO2 Levels, und damit den Ausgang der Personenschätzung auf „ungültig“ stellt. Da die Personenanzahlschätzung im Regler durch eine Dezimalzahl repräsentiert ist wird ebenfalls noch eine Rundung der Personenanzahl auf ganze Personen vorgenommen.

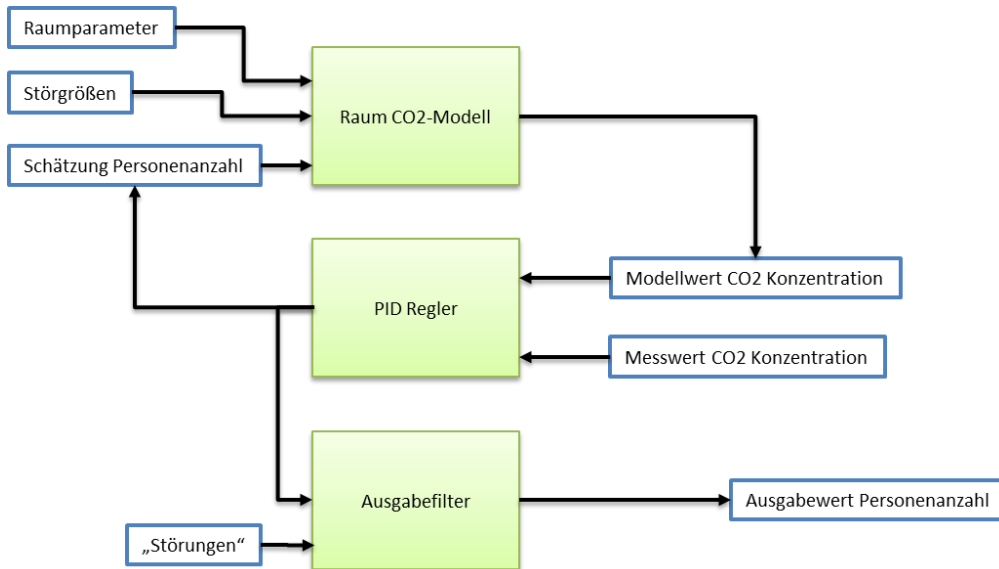


Figure 1 Schema des Konzepts der Raubelegungsschätzung mittels PID Regler.

7 Anhang 1: PID Controller Implementation for Room Occupancy Estimation Models

The models presented in this section are based on the mathematical formulations of the mass balance equations for CO₂, heat and humidity in a room as presented in the ARIS deliverable document D4.1.

7.1 CO₂ Model Implementation

7.1.1 Modelling Approach in Matlab Simulink

The Simulink models can use the data defined in the workspace, but the problem arises when the data has to be calculated and used sample by sample from the workspace, for that we have to use a 'From Workspace' block. In order to feed the signal from workspace into the block the data has to be converted into timeseries object using MATLAB [timeseries](#) function. As our x-axis is in datetime format it has to be converted into a date-string first. The whole subsystem can be synchronized using a trigger and a pulse generator.

In Figure 6 the first subsystem (block) has all the inputs that are required to run the model these input come directly either from the database or the room structure like for example the ground truth is stored in our room structure and so is the room volume but the Air flow and CO₂ level is directly retrieved from our database. The "CO_OUT"² accumulates all the sources which cause the CO₂ to escape from the room which includes air flowing out of the room and leakages. The subsystem above "CO_IN" similarly adds up all the sources which bring in more CO₂ to the room, this subsystem though doesn't include the major source of CO₂ which is the humans present inside the room, which is added in the subsystem "GT2CO_Litrepersec" This converts the CO₂ generated by people into liters/sec using the G value which is discussed above and its values explained in Table 1. In our case the G value tested suitable for this model was "seated/writing". In the subsystem "Room_Parameters" mathematical routines are applied to all these input parameters according to the mass balance equation for CO₂.

The flowrates from the sensor inputs for air in and air out sensors are in percentage of the maximum air flow, the maximum airflow depends upon the size of the VAV box in the room as for example a 200mm VAV box can provide a maximum of $1357 \text{ m}^3/\text{h}$ of airflow, so we are getting a value of 40 from the Air In sensor this means the airflow is $0.40 * 1357 = 542.8 \text{ m}^3/\text{h}$. The Air in value had to be converted in percentage first and then into meter cube per second so it has to be divided by 3600.

The Ground Truth which was recorded for each class room was in number of people which has to be converted into CO₂ generation rate so gain G is multiplied according to the type of activity happening in the room; it was assumed that the CO₂ generation was that of a person writing. The unit of G is in Litres/min which has to be converted into Litres/sec so has to be divided by 60.

The CO₂ from the sensor input is in parts per million, the factor to convert from ppm to L/m^3 is 0.001013439 so each carbon dioxide value is multiplied by this factor. The outside air CO₂ level was taken as 435 ppm.

The leakage flow is obviously there because the rooms are not expandable, so if there is a difference between air in and air out values the rest has to be leakage through the doors and windows, so using a MATLAB function block we define our leakage infiltration and exfiltration values in m³/min which was further divided by 60 to convert it into a m³/sec using a gain block.

Air leakages were also added to the model using MATLAB's user defined functions in which leakage was calculated using a MATLAB code.

In the end all the values which had to be multiplied with Δt are multiplied with 60 which is our sampling time and in order to get $vC_R(t - \Delta t)$ we applied a one sample delay to the CO₂ modeled and is fed back and multiplied with volume V.

The resulting output of this model would a modeled CO₂ level which would give us a CO₂ value based on the occupancy input, as discussed in the 'Approach' section this input has to come from a PI output. The difference between the nominal modeled CO₂ level and measured CO₂ will be countered by the PI controller because the remaining CO₂ will be coming from a human source and the controller will set the occupancy such that there is no difference left between the measured and modeled levels.

² Note that in the models CO₂ variables are denoted as „CO“, not “CO2”

In Figure 7 the “Room_Subsystem” has all the subsystems as discussed above for the Figure 6 whose main output is the CO₂ modeled this value is then compared with the measured CO₂ via discrete PI controller, The output of this PI controller is noisy so many filter routines have to be applied to this output.

7.1.2 Filters

In the Figure 8 the “Occupancy Unfiltered” is the output retrieved from the PI controller which has to be further filtered as the PI controller output can go into negative and the occupancy can never be negative therefore the “Saturation” block removes all the negative values, the next block is the moving average filter and the next filter cascaded to the this filter is the Gaussian filter which removes all the high frequencies. The AIT_Buffer was a self-made block to replace the DSP toolbox’s Buffer block which stores the last amount of X number of values for observation, this block is necessary as we need it to check for the faulty sensor values if the sensor value seems unchanged then it means that sensors are not working properly, the second AIT_Standard_Deviation was also made using MATLAB level-2 S-functions which replaces the standard deviation block available in the DSP toolbox.

The “Temperature Drop Detection” function checks if the temperature has dropped below a certain level in a given amount of time in real-time operation which was a functionality added to the model as there were times when the CO₂ level dropped but there was no way to record the window activity therefore it can be calculated based upon a sudden drop in temperature as temperature drops more rapidly than CO₂ when a window is opened.

7.1.3 Tuning the PI Controller

The following steps have been performed to tune the PI controller:

Step 1: Determine the P gain when the output starts to oscillate that P gain is called $K_{critical}$. Divide $K_{critical}$ by the Tyreus-Luyben chart value for Proportional gain.

Step 2: Acquire $P_{critical}$ by measuring the time difference between the two oscillations and then divide it with a value given in the chart to gain T_i .

Step 3: Obtain the value of Ki by dividing K_p/T_i .

Step 4: Further tune the gains if needed.

Table 1 Tyreus-Luyben Tuning Rules for PI and PID

	K_p	τ_{Int}	τ_{Der}
PI	$K_{critical}/3.2$	$2.2P_{critical}$	
PID	$K_{critical}/2.2$	$2.2P_{critical}$	$P_{critical}/6.3$

Integrator gain K_i was set to zero and Proportional gain P was varied such that the output starts to oscillate about the set point

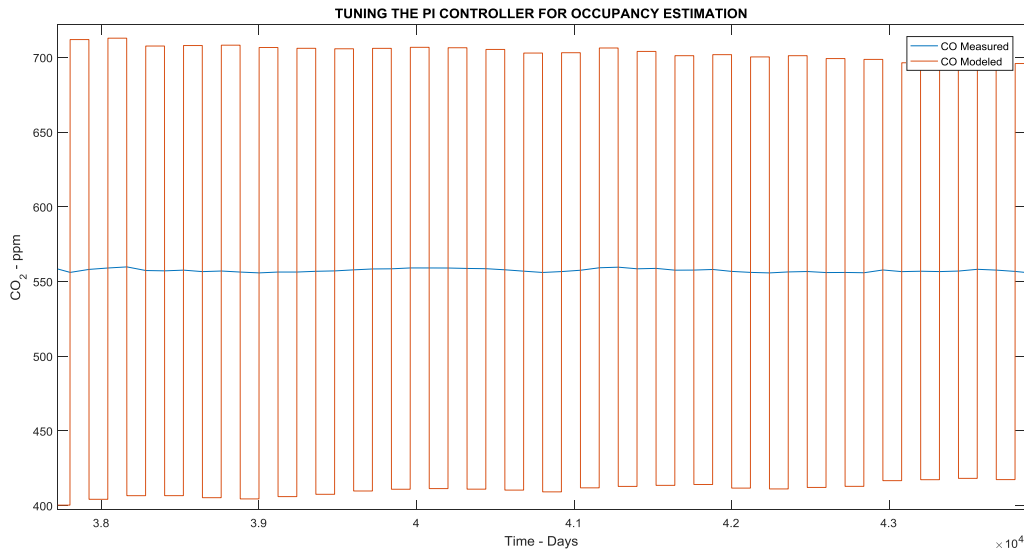


Figure 2 'CO₂ Modeled' oscillation about the measured CO₂ for $K_p = 1.352$

When changing the P it has to be noted that if the output is becoming unstable we have to reduce the Proportional gain like the below given example

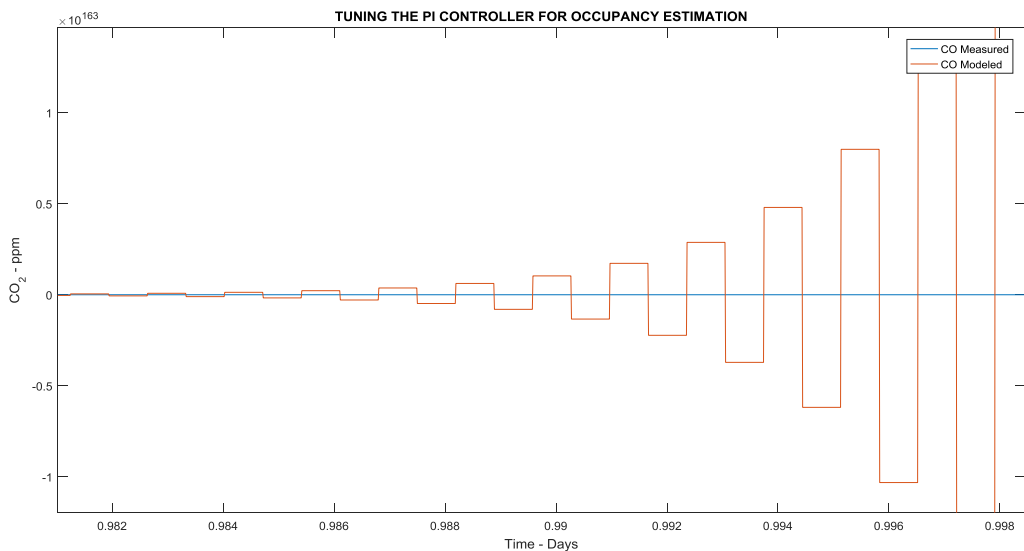


Figure 3 Unstable 'CO₂ Modeled' with time for $K_p = 1.552$

If the Amplitude of the oscillations is very high at the starting and low in the steady state we need to increase the Proportional gain such that the oscillations have the same amplitude like given in Figure 2.

The gain P at which the output starts to oscillate is called critical gain or $K_{critical}$ which in our case was

$$K_{critical} = 1.352$$

In order to get our Proportional gain P we have to divide this value by 3.2 according to the chart

$$K_p = 1.352 / 3.2 = 0.4225$$

In order to get our K_i , we have to determine our $P_{critical}$ which is the distance between peaks of 2 oscillations which in our case was found to 0.0014 days. From this we can calculate our τ_{Int} by multiplying our $P_{critical}$ by a factor of 2.2 so

$$\tau_{Int} = 0.00308$$

In the end K_i can be calculated by dividing K_p by τ_{Int}

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_{Int}} = \frac{0.4225}{0.00308} = 137.175$$

The sampling time of the PI controller was set to 1.15 secs as a result we can see our CO₂ modeled follows the CO₂ measured very closely

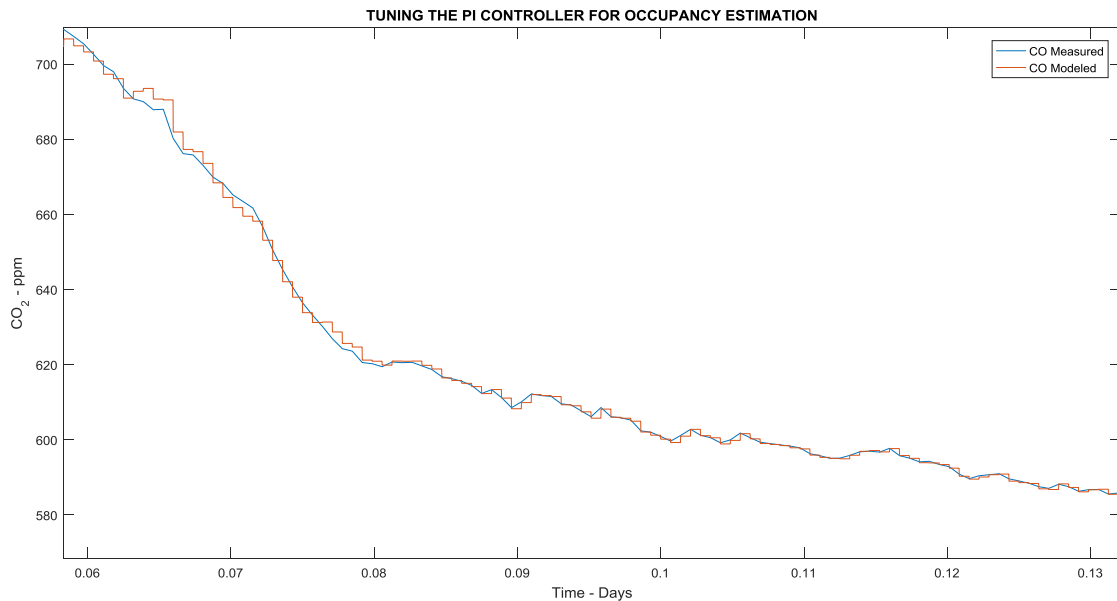


Figure 4 Stable output for 'CO₂ Modeled' for K_p= 0.676 and K_i = 137.175

7.2 Heat Model Implementation

For the heat model, each part of the equation was modeled into each separate subsystem

$$T_i = \frac{\Delta t T_j + h_{wk} S_{wk} T_{wk} \Delta t R + T_{i-1} \rho V C R + \Phi \Delta t R + EE \Delta t R N}{\rho V C R + h_{wk} S_{wk} \Delta t + \Delta t}$$

In Figure 7 the first subsystem has all the inputs required to run the model, most of these inputs are simply constants but the rest are the retrieved directly from the database such as the room and ceiling temperature etc. In the input 'TO' is the outside temperature, 'SI' is the solar irradiation, 'TO_K' is the outside temperature converted into Kelvin scale, 'Dimen1' 'Dimen2' and 'Dimen3' are the dimensions of the room for which occupancy is being estimated. 'TC' is the ceiling temperature; 'GT' is the ground truth, 'RV' is the room volume which is already being calculated in a MATLAB function, 'delta_t' is the sampling time which in our case is 60 seconds. 'TR' is the room temperature and 'BT_K' is the body temperature which is required to calculate the heat coefficient for human disturbance to the system.

The subsystem 'Energy_Occupancy' implements the equation $EE \Delta t R N$ by adding the human impact on the room temperature; this is the most relevant block for the system as the amount of heat radiated has to be calculated 'Heat_transfer_coefficient1' block. The amount of heat produced depends upon the current room temperature; the lower the room temperature the more the heat will be released into the system.

The 'Irradiation_factor' subsystem adds $\Phi \Delta t R$ to the input, which is the amount of heat added to the system by the sun, inside the subsystem the however there are certain attenuation factors which would reduce this effect as all of the irradiation does not enter the room, which has to be tuned while simulating the results.

'Surface_of_the_wall' simply calculates and adds the surface of the wall /ceiling which is radiating the heat, In our equations we consider our walls to be completely insulated so the only surface which is radiating the heat is our ceiling.

The 'Heat_transfer_coefficient' calculates the total heat radiated by the ceiling due to concrete core activation system which regulates the heat inside the room for which we derived an equation from Stefan-Boltzmann law

$$h_w k = \sigma(T_h^2 + T_c^2)(T_h + T_c)$$

The 'Thermal_Resistance' subsystem calculates the thermal resistance of the surface through which the heat can be transferred from outside, as we considered our walls to be completely insulated the heat can only be transferred through the glazed window, thermal resistance is defined as

$$R = \frac{1}{U * A}$$

Where U is the U-value for each type of glazing i.e single, double and triple glazing this is also highly dependent of the gas or matter used between the glass panes so it has to be tuned during the simulation as the exact value was not available.

'Specific_heat_capacity_air' calculates the specific heat air capacity for any given temperature inside the room.

'Math_Operations' subsystem put together all the sources and sinks of heat inside the room. It adds, subtracts and divides all the factors according to the equation. The main output which we need to calculate our estimation is the temperature modeled, which is an output names 'TR_MOD'. This modeled temperature has to be now compared with the actual room temperature values measured by the sensor.

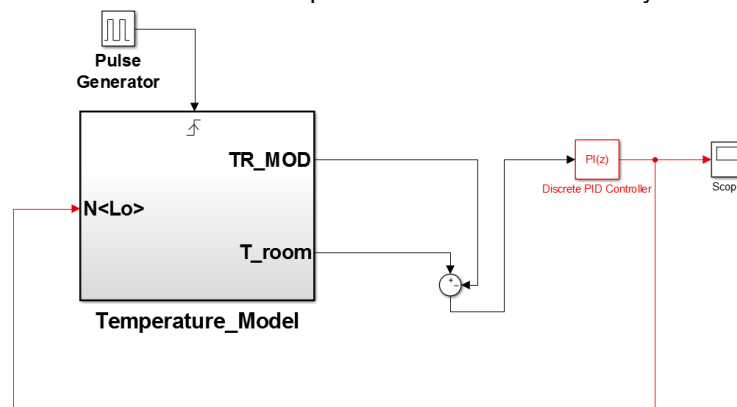


Figure 5 Room and Modeled temperature values as an input to the main PI controller

The occupancy estimate is the values at the output of the PI controller in Figure 9. It can be observed that for the temperature sensor there are no filters applied at the output unlike the CO₂ model, The reason for this is that the temperature sensor values didn't changed rapidly like CO₂ sensor values so they would remain at almost at the same value for like 15 minutes or even 1 hours, If there is no sudden change in the temperature this would mean that the PI controller doesn't have to drastically change the estimation values to reduce the error between temperature modeled and temperature measured, so resultantly there were no or very small negligible oscillations so there was no need to add any filter routines at the output.

7.3 Humidity Model

The humidity model is very similar to that of the carbon-di-oxide, The reason being that the equation are almost similar except for the human disturbance, The human disturbance is much more temperature dependent unlike the CO₂ model, and the second difference being the

The 'INPUTS' subsystem contains all the inputs required for the model just like the CO₂ model, here 'WVGP' is the input which is the water vapor generation by a per human body per sampling time, 'TR' is simply the room temperature and this temperature is required because the human disturbance is much more current temperature dependent. 'AO_H_Level' is the humidity level of the outside air which is being measured by a sensor. 'Leakage_Humidity_In' is the assumed leakage humidity which can enter the room through the hallways if the doorway is being opened.

The 'Human_Disturbance' subsystem has a current room temperature input and the occupancy estimation which the output from our PI controller and then calculates the total humidity added to the room environment combining the entire human source present inside the room.

The 'HI_IN' subsystem simply calculates the humidity enter the room via the ventilation system or leakage. Similarly 'H_OUT' is the humidity exiting the room environment through the air ventilation or leakage.

All these above values are then applied mathematical operation according to the humidity mass balance equation in the 'Room_Parameters' subsystem. The single output of this subsystem is the Humidity modeled value, This value will then be compared with an actual humidity value measured by a sensor and difference between the two values will be the error input to the main PI controller.

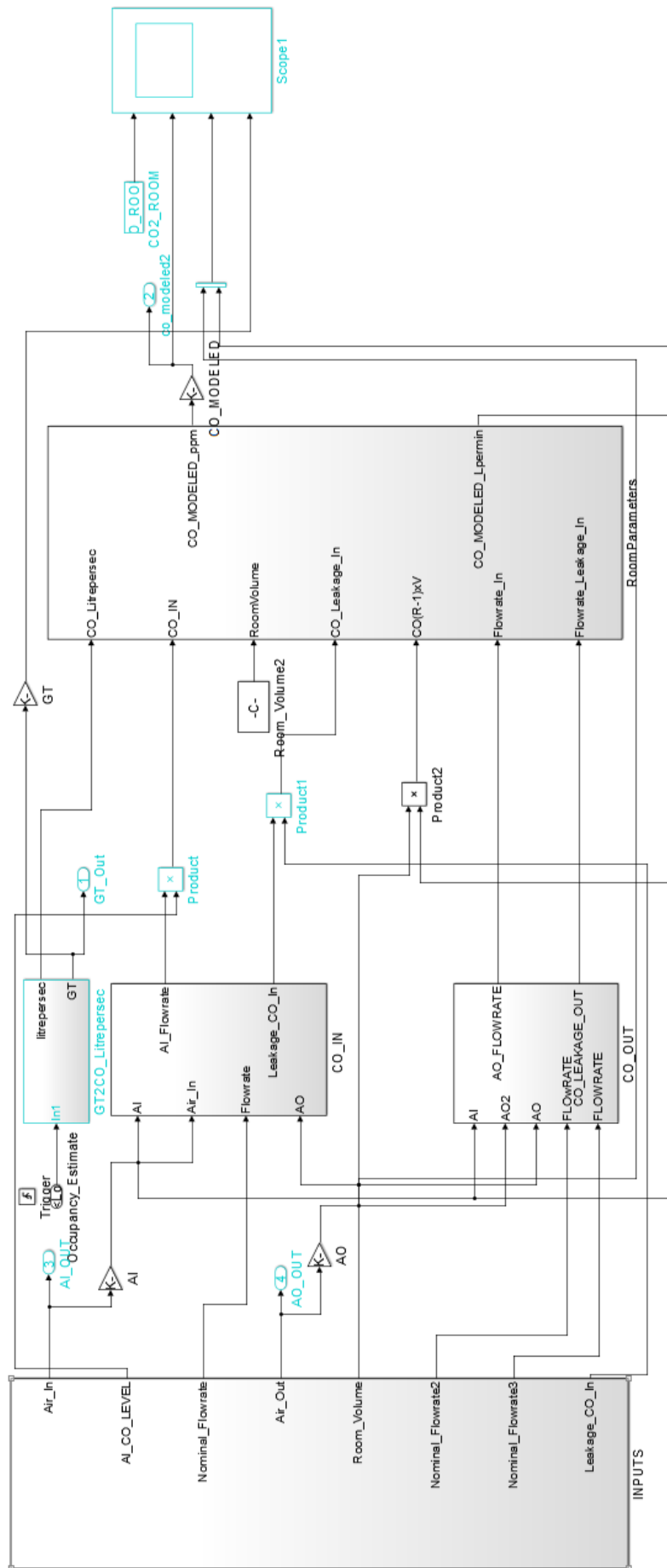


Figure 6 Schematics of the Simulink CO₂ Mass Balance Model

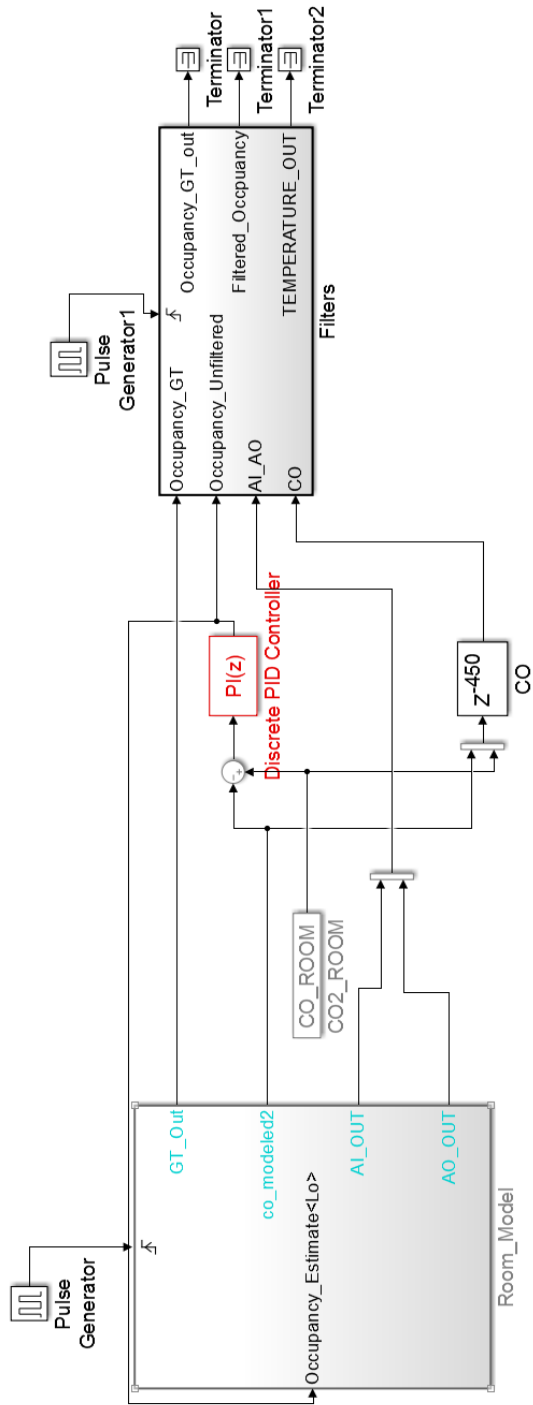


Figure 7 CO₂ Model with the PI controller

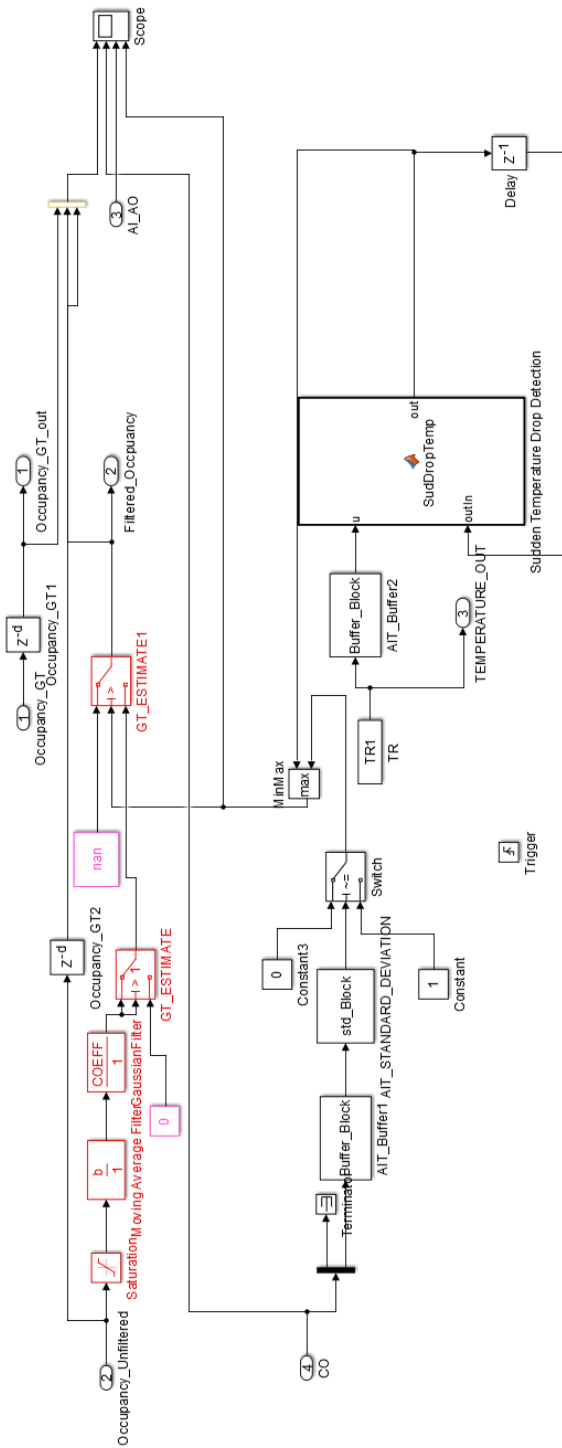


Figure 8 Filter blocks for the PI output.

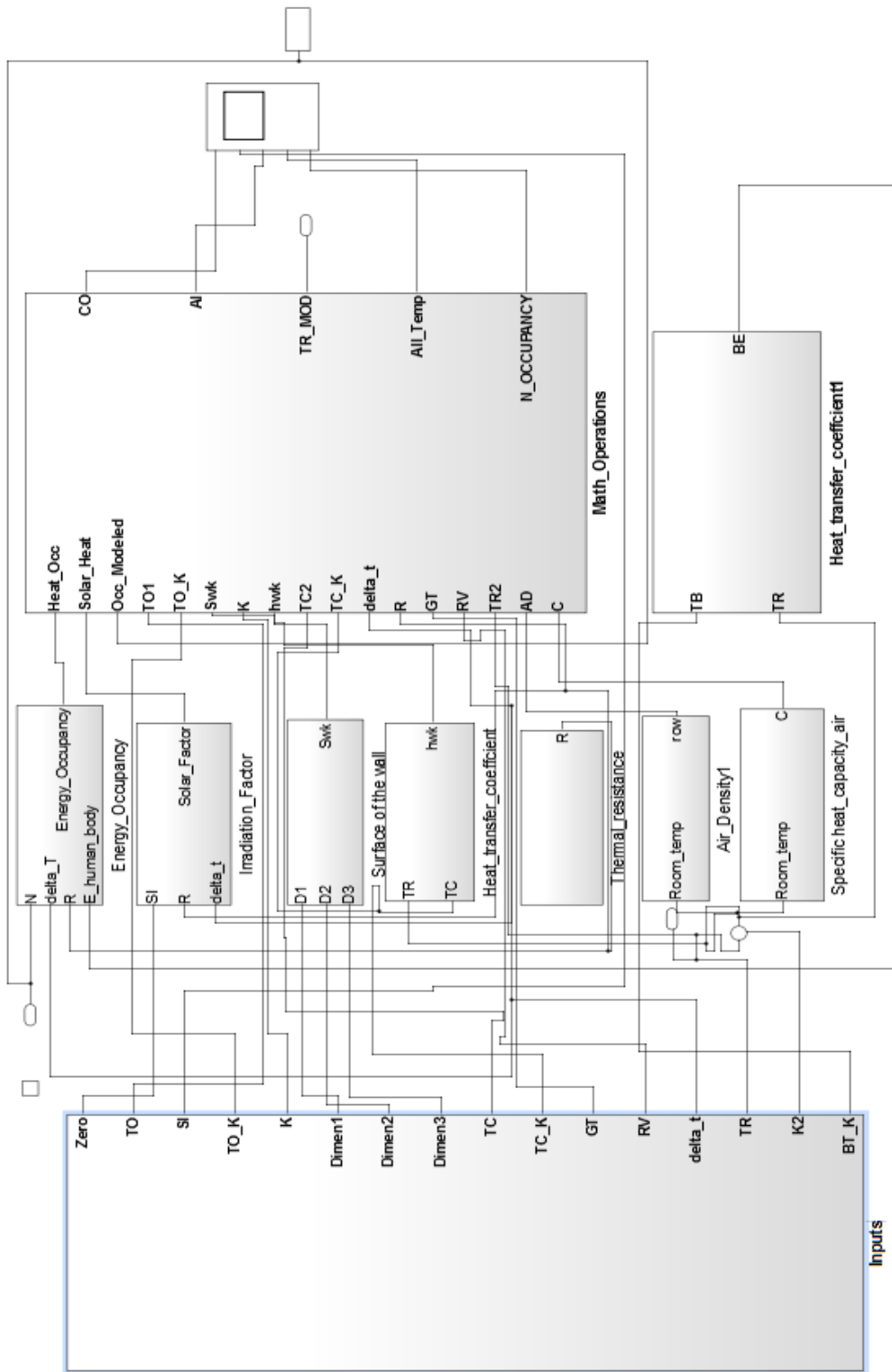


Figure 9 Schematics of the Simulink Heat Model Implementation

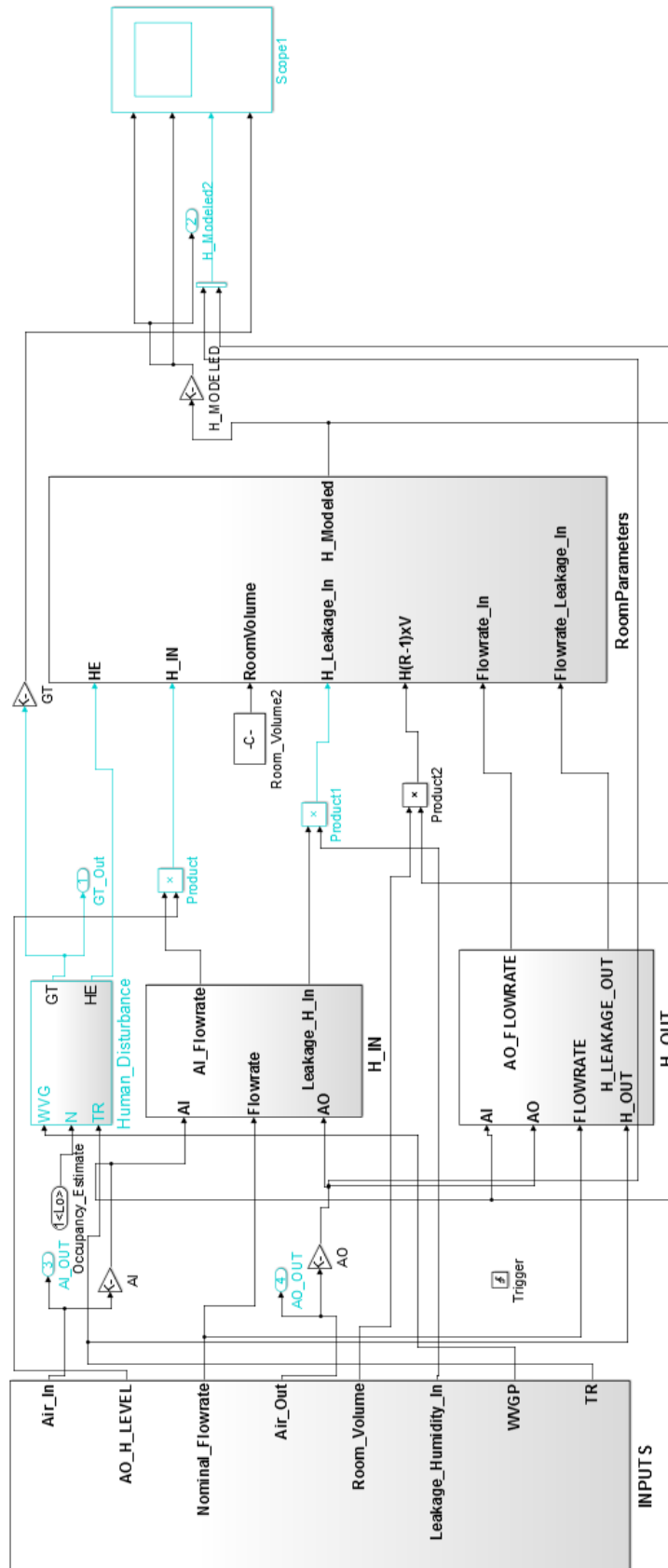


Figure 10 Schematics of the Humidity Model Simulink Implementation

Referenzen

- [1] T. Ferhatbegović, G. Zucker, and P. Palensky, "Model Based Predictive Control for a Solar-Thermal System," in Proceedings of 10th IEEE AFRICON, 2011.
- [2] T. Ferhatbegovic, S. Hauer, and G. Zucker, "Methodology for deploying model based control concepts for load shaping in the non-residential building sector," in IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, pp. 5735–5740.
- [3] G. Zucker, T. Ferhatbegovic, and D. Bruckner, "Building automation for increased energy efficiency in buildings," in 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2012, pp. 1191–1196.
- [4] J. D. Álvarez, J. L. Redondo, E. Camponogara, J. Normey-Rico, M. Berenguel, and P. M. Ortigosa, "Optimizing building comfort temperature regulation via model predictive control," *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 361–372, Feb. 2013.
- [5] J. Cigler, D. Gyalistras, J. Siroky, V.-N. Tiet, and L. Ferkl, "Beyond theory: the challenge of implementing Model Predictive Control in buildings," presented at the Proceedings of the 11th REHVA World Congress Clima 2013, Prague, Czech Republic, 2013.
- [6] F. Oldewurtel, D. Gyalistras, M. Gwerder, C. N. Jones, A. Parisio, V. Stauch, B. Lehmann, and M. Morari, "Increasing Energy Efficiency in Building Climate Control using Weather Forecasts and Model Predictive Control," in Clima - RHEVA World Congress, Antalya, Turkey, 2010.
- [7] M. Avci, M. Erkoc, A. Rahmani, and S. Asfour, "Model predictive HVAC load control in buildings using real-time electricity pricing," *Energy and Buildings*, vol. 60, pp. 199–209, May 2013.
- [8] D. Lazos, A. B. Sproul, and M. Kay, "Optimisation of energy management in commercial buildings with weather forecasting inputs: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 587–603, Nov. 2014.
- [9] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann, and M. Morari, "Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 15–27, Feb. 2012.
- [10] J. \vSiroký, F. Oldewurtel, J. Cigler, and S. Privara, "Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system," *Applied Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 3079–3087, Sep. 2011.
- [11] Ugray, Zsolt, Leon Lasdon, John C. Plummer, Fred Glover, James Kelly, and Rafael Marti. Scatter Search and Local NLP Solvers: A Multistart Framework for Global Optimization. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 19, No. 3 2007, pp. 328-340.
- [12] Glover, F. „A template for scatter search and path relinking.“ *Artificial Evolution* (J.-K. Hao, E.Lutton, E. Ronald, M.Schoenauer, D.Snyers, eds.). Lecture Notes in Computer Science, 1363, Springer, Berlin/Heidelberg, 1998, pp. 13-54
- [13] Dixon, L. and G.P.Szegö. „The Global Optimization Problem: an Introduction.“ *Towards Global Optimisation 2*(Dixon, L.C.W. and G. P. Szegö, eds.). Amsterdam, The Netherlands: North Holland, 1978.
- [14] Projekt SmartCityGrid:CoOpt, Koordinierte Optimierung von erneuerbarer Energie in Netz und Gebäude bei Planung und Betrieb, Projektnummer 834677, Programm: Neue Energien 2020, 5. Ausschreibung