

Modellgrundlagen zur Bewertung der Energie-Effizienz und zur Unterstützung einer energieoptimalen Betriebsführung von Hallen bzw. großen Räumen

Inhalt

1. STRÖMUNGS- UND THERMODYNAMISCHE MODELLE AUF BASIS DER NAVIER-STOKES-GLEICHUNGEN	2
1.1. Modellentwicklung für 2 Anwendungen und Validierung	3
1.1.1. Großer Versammlungsraum	3
1.1.2. Alte Sporthalle im Sportforum Berlin	5
2. MODELLE ZUR ENTWICKLUNG VON OPTIMALEN ENERGIEFAHRPLÄNEN AUF BASIS VON THERMODYNAMISCHEN UND FLIEBBILANZEN.	7
2.1. Modellentwicklung für 2 Anwendungen und Validierung	8
2.1.1. Großer Versammlungsraum	9
2.1.2. Alte Sporthalle im Sportforum Berlin	10
Abbildung 1: Entwicklungstool für Strömungsmodelle	2
Abbildung 2: Modell für einen großen Versammlungsraum	3
Abbildung 3: Simulation und Messung Versammlungsraum Szenario 1	4
Abbildung 4: Simulation und Messung Versammlungsraum Szenario 2	4
Abbildung 5: Simulation und Messung Versammlungsraum Szenario 3	4
Abbildung 6: Simulationen und Messungen in der Sporthalle	5
Abbildung 7: räumliche Verteilung von Strömung und Temperatur (1.5m Höhe nach 30 min)	6
Abbildung 8: Entwicklungstool zur Entwicklung optimaler Energiebewirtschaftung für Gebäude	7
Abbildung 9: Energiebedarf und Komfort Temperatur im Vergleich	9
Abbildung 10: Energiebedarf im Vergleich (links ohne Heizung, rechts mit)	10
Abbildung 11: Komfort Temperatur und relative Feuchte im Vergleich	10
Abbildung 12: Komfort Temperatur, rel. Feuchte und Energiebedarf im Vergleich	11
Abbildung 13: Energiebedarf im Vergleich (links mit Publikum, rechts ohne)	11

1. Strömungs- und thermodynamische Modelle auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen

Modellgrundlage bilden die Bilanzgleichungen inkl. der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (V \cdot \nabla) \cdot \phi - D_\phi \nabla^2 \phi = S_\phi \text{ für}$$

$\phi = V_j$ Strömungskomponente in j Richtung

$\phi = 1$ Kontinuitätsgleichung der Masse

$\phi = C$ Erhaltungsgleichungen für ideale Gase

$\phi = T$ Diffusionsgleichung für Temperatur

$D_\phi =$ Diffusionskoeffizient

$S_\phi =$ Quellterme

Es wurde in Matlab eine Entwicklungsumgebung mit grafischer Eingabe und variablen Anfangs- und Randbedingungen erstellt mit dessen Hilfe parameterabhängige Modelle für die Strömungsverhältnisse und Temperaturverteilung in Gebäuden entwickelt werden können. Verwendet wird der Solver cfd0 des NIST (National Institute of Standards and Technology USA).

Ein Modell besteht dann aus Objekten der Klassen

- Wände mit konstanter Temperatur oder Wärmefluss
- Öffnungen nach innen bzw. nach außen und
- Blöcke durchlässig oder fest mit konstantem Wärmefluß.

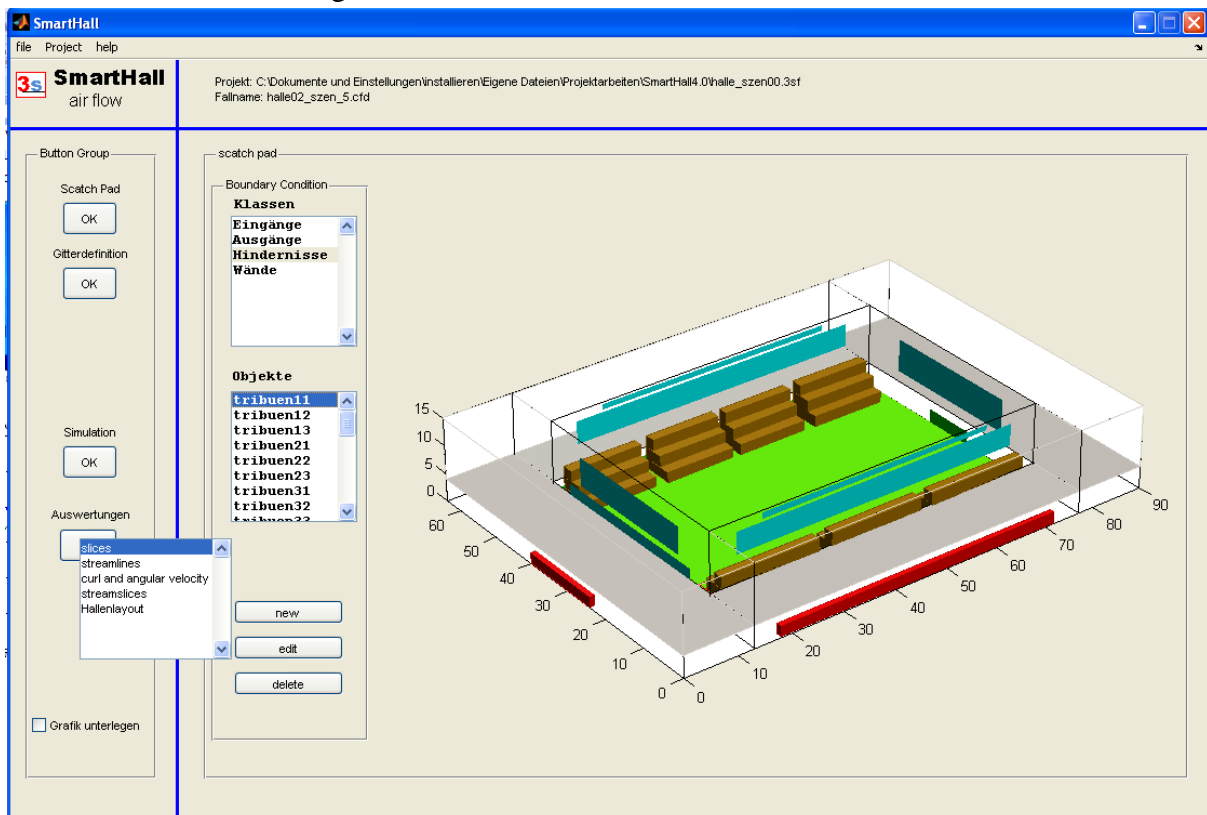


Abbildung 1: Entwicklungstool für Strömungsmodelle

1.1. Modellentwicklung für 2 Anwendungen und Validierung

1.1.1. Großer Versammlungsraum

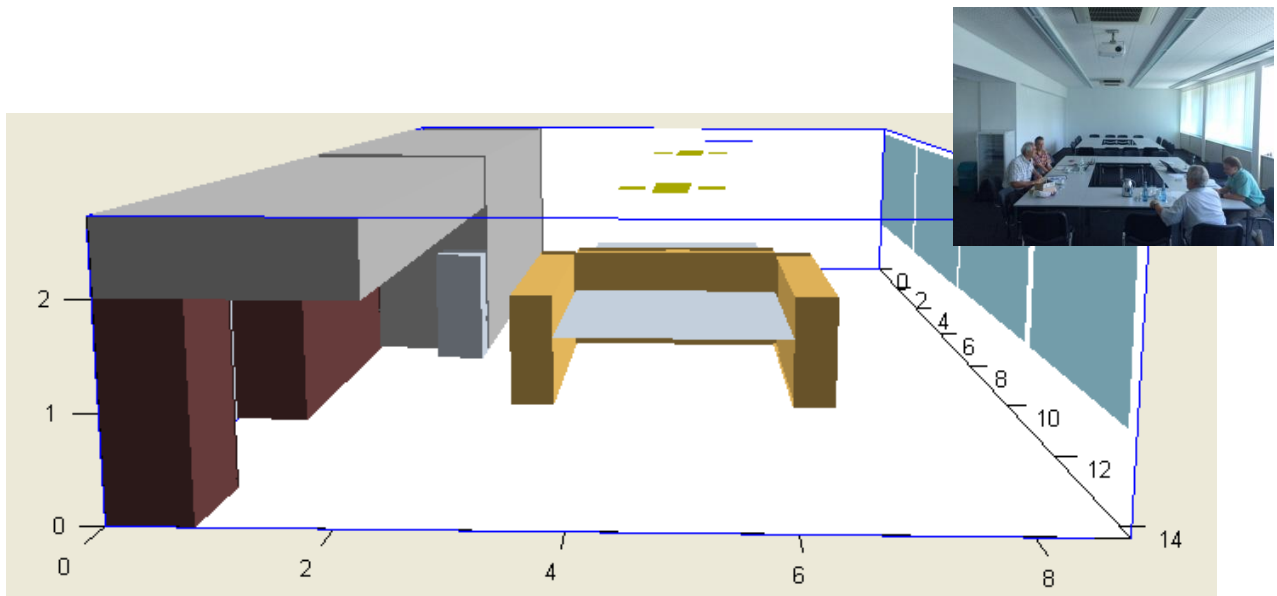


Abbildung 2: Modell für einen großen Versammlungsraum

Das entwickelte Modell wurde für mehrere Szenarien mit Messungen an jeweils 2 ausgewählten Standorten überprüft.

Dies waren die folgenden Szenarien:

- 11.09.2016 6:00-12:00 und 11.09.2016 08:00-13:00
Außentemperatur $T_{\text{out}}=30^{\circ}\text{C}$, Anfangstemperatur $T_0=26^{\circ}\text{C}$, Fenster zu, Kühlung aus
- 26.09.2016 12:00-16:00
Außentemperatur $T_{\text{out}}=30^{\circ}\text{C}$, Anfangstemperatur $T_0=26^{\circ}\text{C}$, Fenster zu, Kühlung an
- 27.09.2016 11:00-13:00
Außentemperatur $T_{\text{out}}=26^{\circ}\text{C}$, Anfangstemperatur $T_0=22^{\circ}\text{C}$, Fenster auf, Kühlung aus

Nachfolgend sind die Ergebnisse dargestellt.

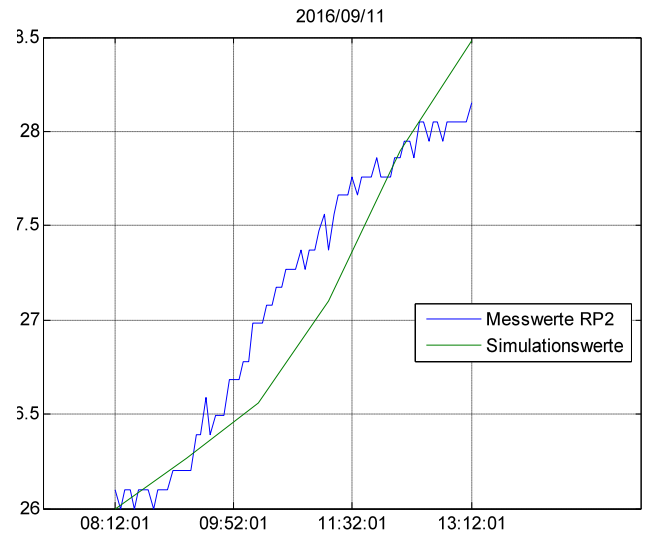
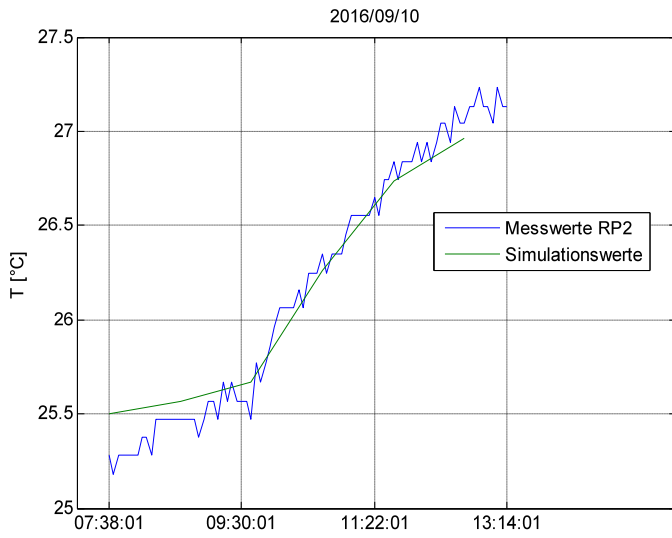


Abbildung 3: Simulation und Messung Versammlungsraum Szenario 1

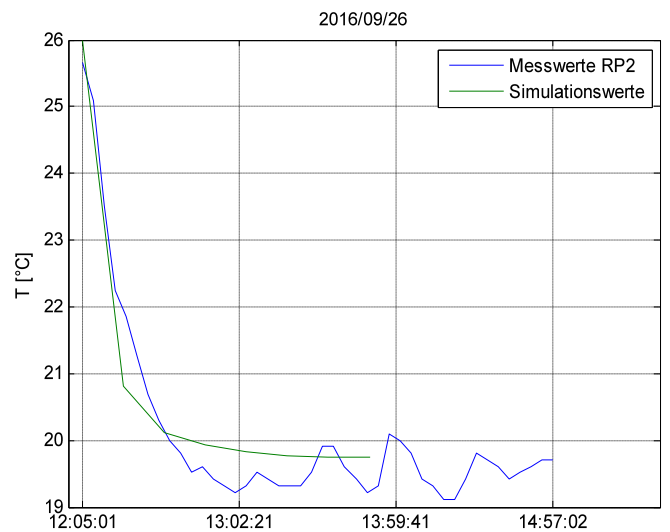
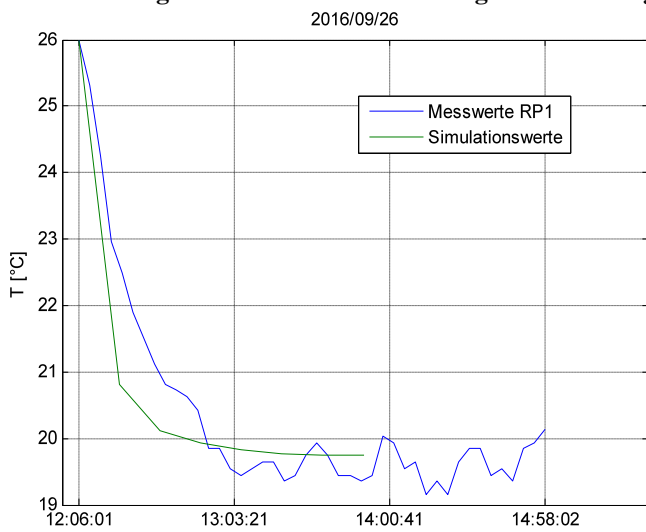


Abbildung 4: Simulation und Messung Versammlungsraum Szenario 2

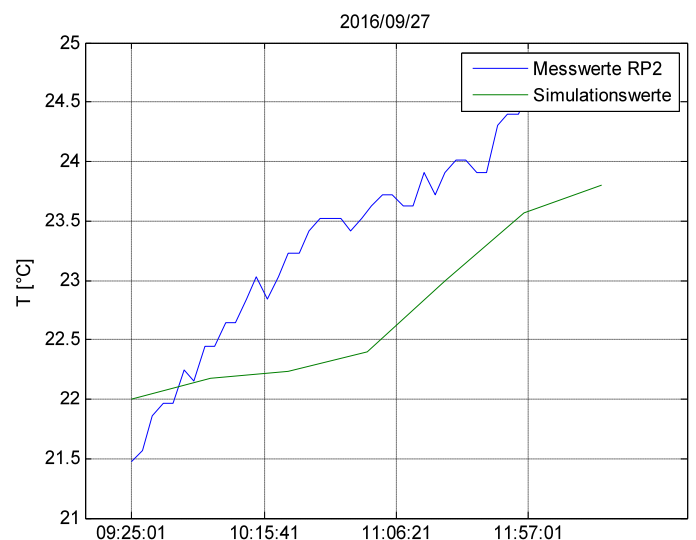
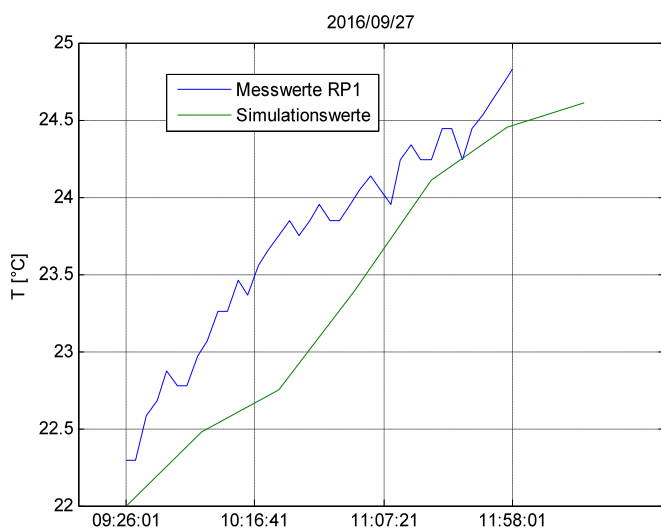
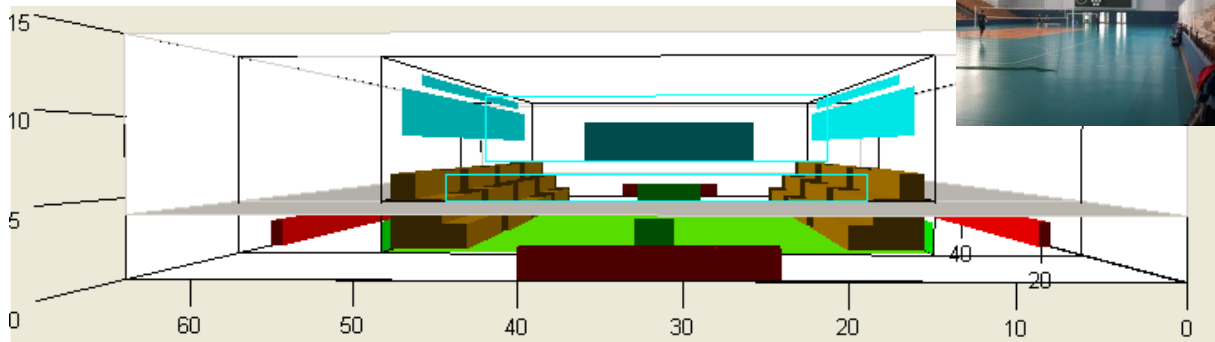


Abbildung 5: Simulation und Messung Versammlungsraum Szenario 3

1.1.2. Alte Sporthalle im Sportforum Berlin



Das entwickelte Modell wurde mit Messungen an mehreren ausgewählten Standorten zu verschiedenen Zeiten überprüft.

Das Szenarium der Messkampagne sieht folgender Maßen aus:

- Gemessene Temperaturen als Startwerte (unterschiedlich in Vorhallen und Halle), kein Publikumsverkehr, Tore zur Eingangsvorhalle geschlossen, Heizung große Heizkörper 30kW, kleine Heizkörper 10kW

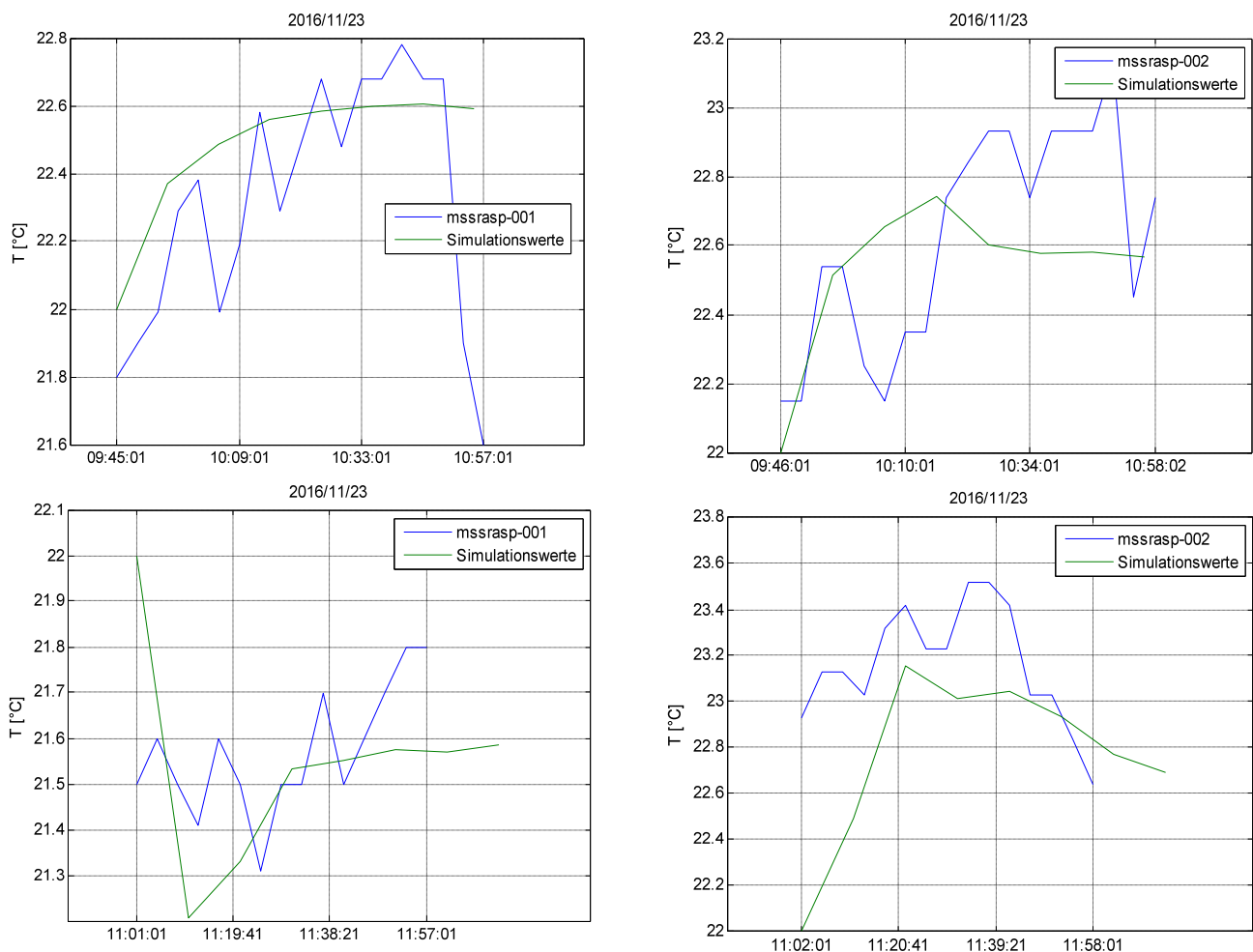


Abbildung 6: Simulationen und Messungen in der Sporthalle

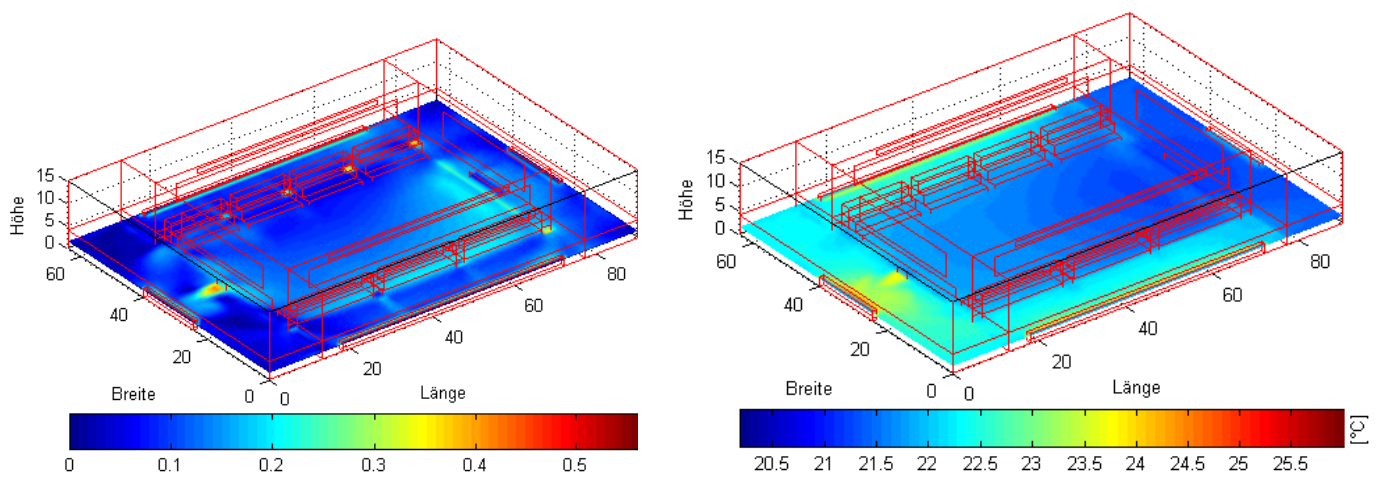


Abbildung 7: räumliche Verteilung von Strömung und Temperatur (1.5m Höhe nach 30 min)

2. Modelle zur Entwicklung von optimalen Energiefahrplänen auf Basis von thermodynamischen und Fließbilanzen.

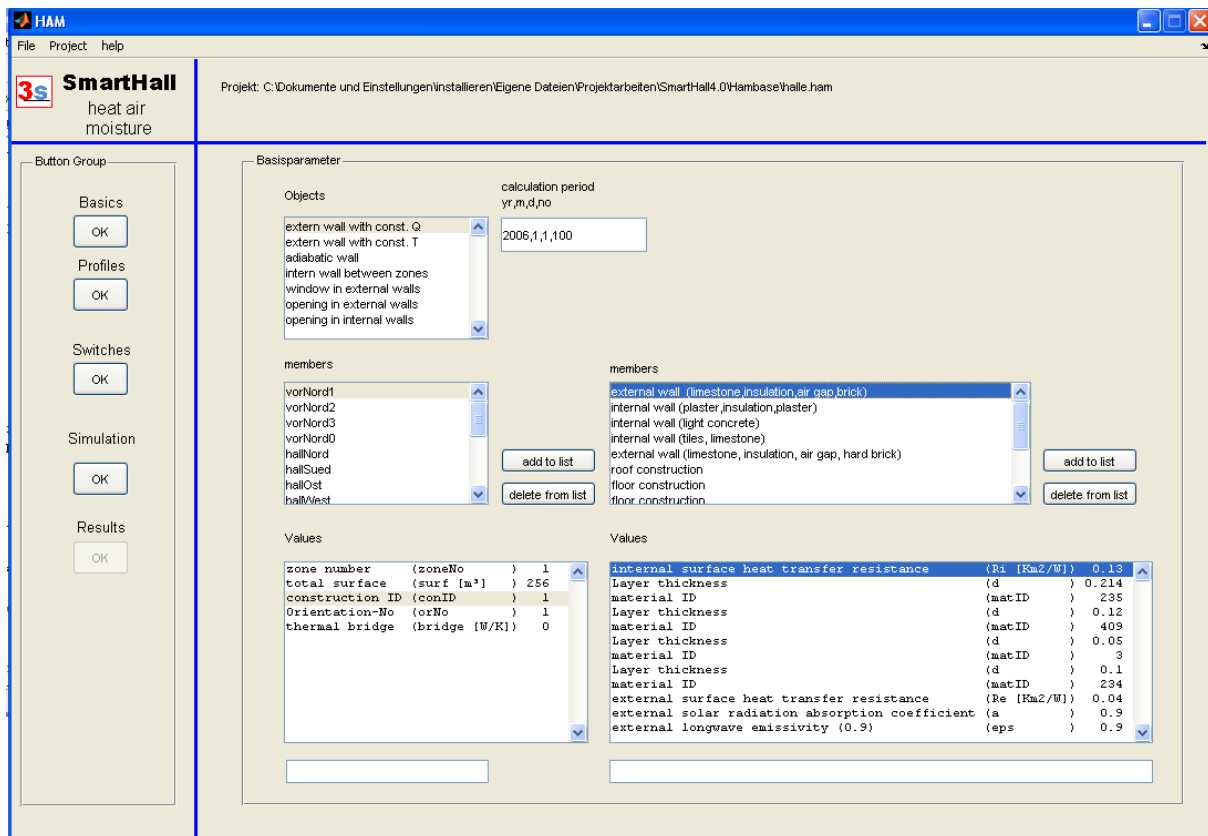


Abbildung 8: Entwicklungstool zur Entwicklung optimaler Energiebewirtschaftung für Gebäude

Es wurde in Matlab eine Umgebung zur Entwicklung von Energiemodellen erstellt

- mit variablen Anfangs-, bautechnischen,
- thermischen und
- Wetterbedingungen sowie
- HLK-Voraussetzungen,

mit dessen Hilfe parameterabhängige Modelle für die Strömungsverhältnisse, Temperaturverteilung und Energieeinsatz sowie Verluste in Gebäuden entwickelt werden können.

Die bautechnischen, thermischen und sonstige Parameter werden aus integrierten Tabellen (entsprechender DIN-Vorschriften) einbezogen. Für alle Parameter gibt es vorgefertigte (gebräuchlichste) Werte oder die Möglichkeit die entsprechenden physikalischen und bautechnischen Parameter direkt einzugeben.

Die Modellgrundlagen bilden ein hygrisches Raummodell und ein thermisches Netzwerk:

- Feuchtemodell:

$$G = \frac{d}{dt} C_f^t p_v$$

$$C_f^t = C_f p_{sat}(T_{ref}) / p_{sat}(T_a) \quad \text{the hygroscopic capacitance of the furnishings}$$

$$p_{sat}(T_a) \quad \text{saturation vapour pressure at } T_a$$

T_{ref} reference T (C_f at this T)

$$C_{va} \frac{dp_{va}}{dt} + \frac{dC_f^t p_{va}}{dt} = - \sum G_{ab} - \sum G_{xy} + G_p + G_g$$

C_{va} moisture storage coefficient
 p_{va} vapour pressure of zone a [Pa]
 G_{xy} vapour flow to the envelope [kg/s]
 G_p (de-)humidification
 G_g vapour source [kg/s]
 G_{ab} vapour transfer by airflow from zone b to a

- Thermisches Netzwerkmodell

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = L_{xa}(T_x - T_a) - \sum \phi_{ab} - \phi_c - \frac{h_{cv}}{h_r} \phi_r$$

$$0 = -L_{xa}(T_x - T_a) - \sum \phi_{xy} + \phi_r + \phi_r$$

$$\sum \phi_{ab} = L_a(T_a - T_e) + \sum_b L_{ab}(T_a - T_b)$$

T_a air T
 T_x resultant T
 h_r, h_{cv} surface weighted mean surface heat transfer coefficient
 ϕ_p total radiant heat input
 ϕ_c convective part
 ϕ_{ab} heat flow from zone a with T_a to b with T_b
 ϕ_{xy} heat loss trough envelope from T_x to T_y (envelope T's)
 L_a ventilation heat loss
 L_{ab} heat loss coefficient for heat flow from zone b to a

Die dynamischen Gebäudemodelle setzen sich aus den DG für die einzelnen Wände mit jeweils linearen DG's zusammen. Dies wird wegen der linearen DG's im Frequenzbereich als Admittance bzw. im Z-Bereich als Transferfunktion abgebildet. Einbezogen ist der Solver HAM der Eindhoven University of Technology.

Ein Modell besteht dann aus Objekten zu den Klassen

- externe Wände mit konstantem Wärmefluß,
- externe Wände mit konstanter Temperatur,
- adiabatische Wände,
- Fenstern in externen Wänden,
- Öffnungen in externen Wänden und
- Öffnungen zwischen Räumen
sowie aus Nutzungsprofilen mit
- HLK-Parameter,
- Publikum (Prognose),
- Wetterdaten (Prognose)
- Heizungs-/Kühlungsprofile nach Tageszeit und Wochentag ect.

2.1. Modellentwicklung für 2 Anwendungen und Validierung

Mit Einbeziehung der Wetterdaten

- Globalstrahlung [W/m^2],

- Außentemperatur,
- Direkte Sonnenstrahlung (Normale in Sonnenrichtung) [W/m^2],
- Wolkenbedeckung(1...8),
- relative Luftfeuchte außen,
- Windgeschwindigkeit,
- Windrichtung (degrees north).

werden für verschiedene **Nutzungsprofile**, die für verschiedene Räume und Zeiten vorgegeben werden, der Energiebedarf, die Verluste durch Transmission und Luftbewegung sowie zusätzliche Energie und Feuchtigkeitsquellen berechnet. Durch den Vergleich verschiedenen Nutzungsprofile mit prognostizierten Wetter-, Publikumsdaten und anderer Nutzungsdaten wird ein optimaler Energiefahrplan abgeleitet.

2.1.1. Großer Versammlungsraum

Der Energiebedarf des Raumes für 2 einfache Nutzungsszenarien:

- Nachts Heizung auf 18°C , tags auf 20°C , Wetterdaten vom 27.09.2016,
- Nachts ohne Heizung

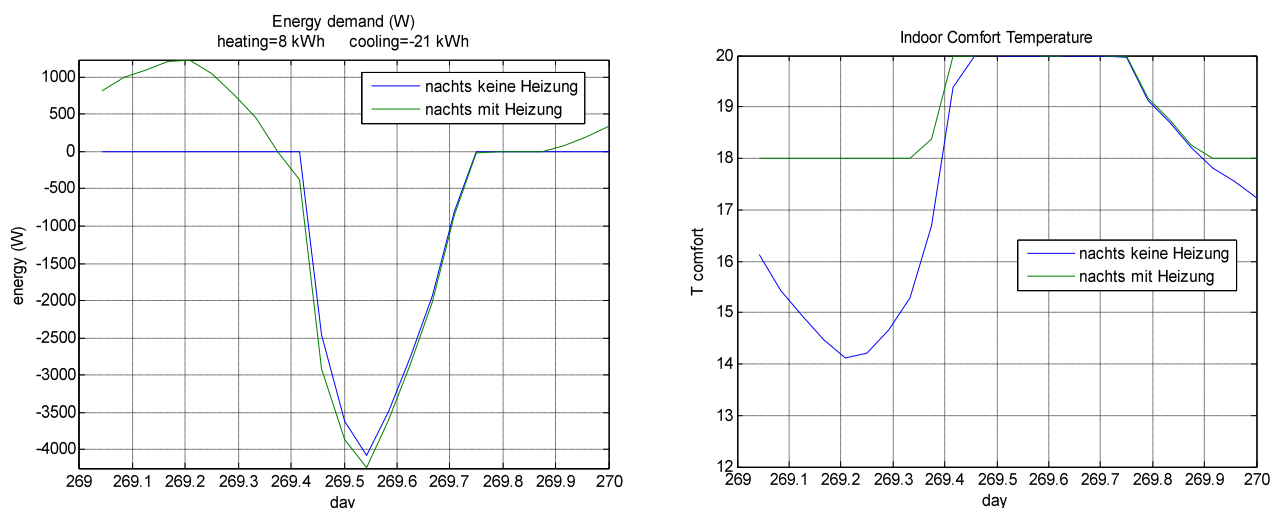


Abbildung 9: Energiebedarf und Komfort Temperatur im Vergleich

Die Energiebilanz der beiden Szenarien ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei bedeutet

Solar utility factor	Beitrag der Sonneneinstrahlung zur Heizenergie
Casual utility factor	Beitrag der zusätzlichen Quellen zur Heizenergie
Trans	Verluste durch Transmission
Vent	Verluste durch Luftbewegung
Cooling	Einsatz zur Kühlung
solar	Sonneneinstrahlung
casual	zusätzliche Quellen (z.B. Publikum)
heating	Heizenergie

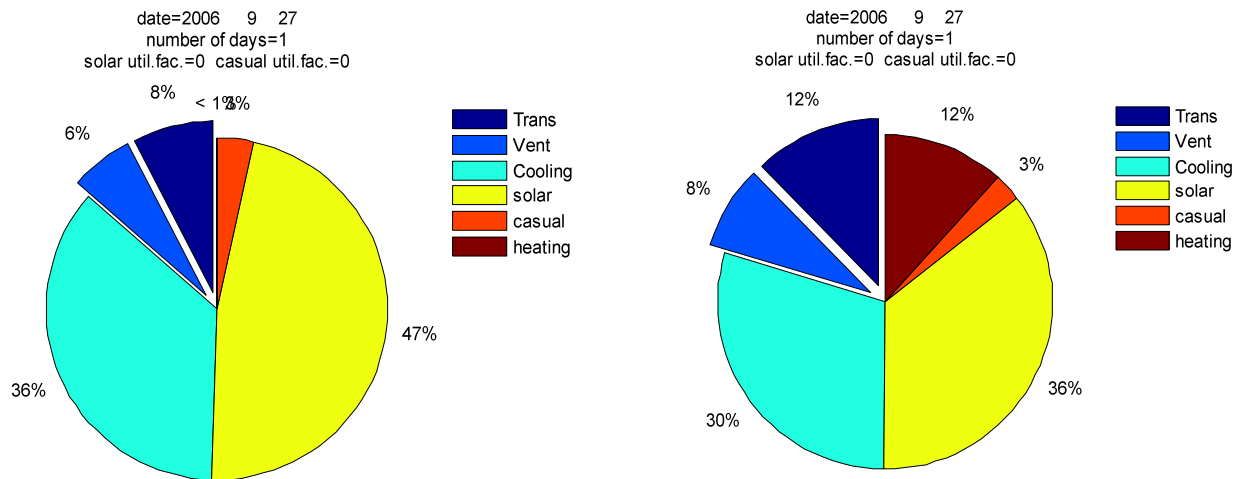


Abbildung 10: Energiebedarf im Vergleich (links ohne Heizung, rechts mit)

2.1.2. Alte Sporthalle im Sportforum Berlin

Der Energiebedarf der Halle für 2 Nutzungsszenarien:

- Sollwerte der Vorhallen 22°C, Sollwert für die Halle 20°C, von 8:00-18:00 Publikumsverkehr, Wetterdaten vom 23.11.2016 .Tore zur Eingangsvorhalle geschlossen
- Sollwerte der Vorhallen 22°C, Sollwert für die Halle 20°C, kein Publikumsverkehr, Wetterdaten vom 23.11.2016 .Tore zur Eingangsvorhalle geschlossen.

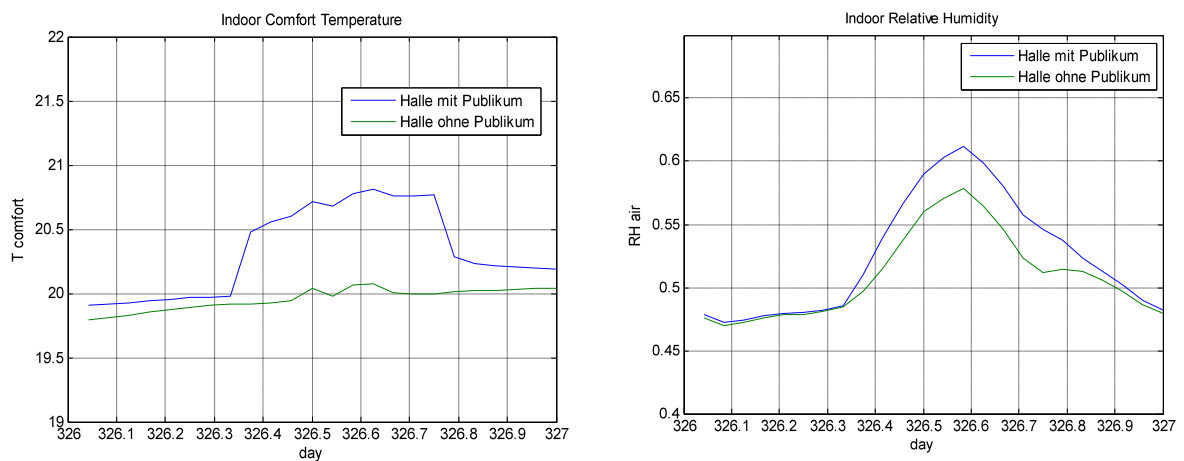


Abbildung 11: Komfort Temperatur und relative Feuchte im Vergleich

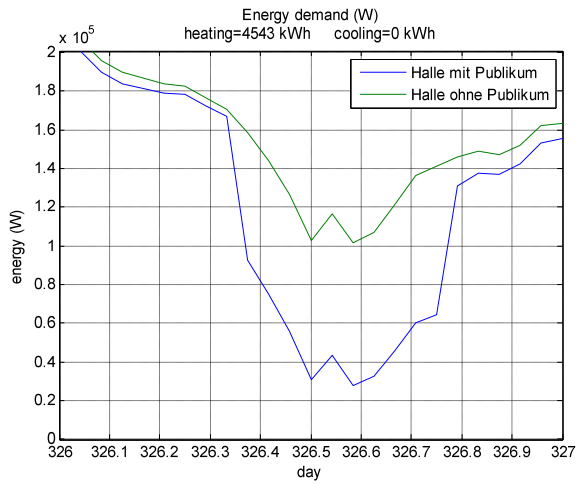


Abbildung 12: Energiebedarf im Vergleich

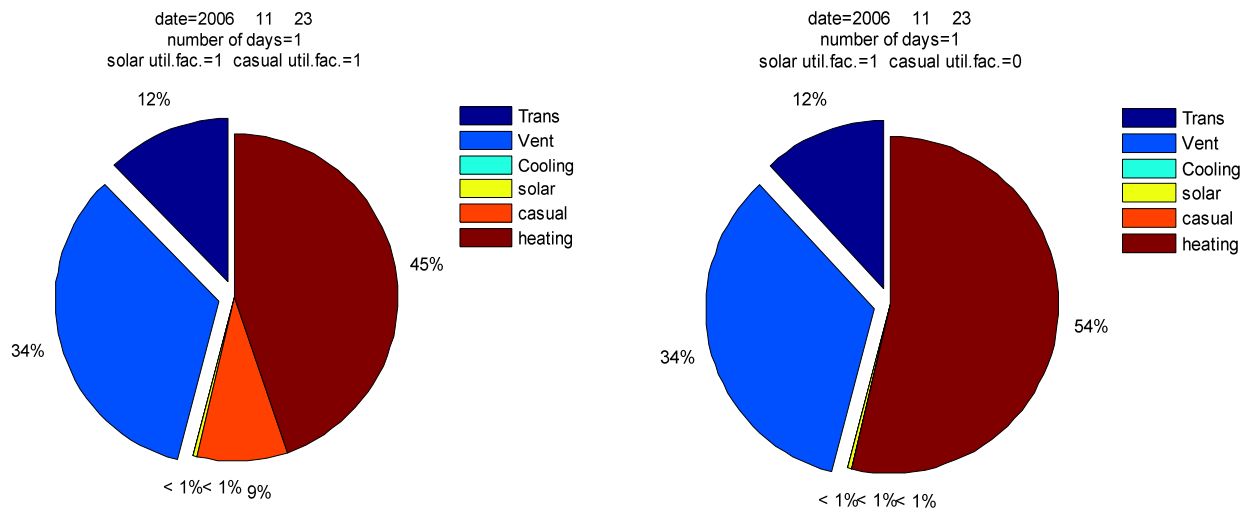


Abbildung 13: Energiebedarf im Vergleich (links mit Publikum, rechts ohne)