



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Integration von kombinierten PV-/thermischen Kollektoren in Gebäudesystemen

PV/T-Schiefer – dynamisches Simulationsmodell

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Sven Robert Kropf, ETH-Zürich
www.ethz.ch

Impressum

Datum: 16. Januar 2004

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Projektnummer: 40249

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund und Ziele	5
2. Das physikalische System	6
3. Die Strömung der Luft	7
4. Die Energiebilanzen	8
5. Der Überblick über das Modell	11
6. Der NMF-Code	12
7. Alle im Modell verwendeten Grössen	14
8. Die Validierung	18
anhand der Labormessung HTA	19
anhand der Feldmessung Steinhausen	27
Zusammenfassung	32
Fazit	33
9. Literaturverzeichnis	33

Adresse

Sven Kropf
Institut für Hochbautechnik
Fachgruppe Air&Climate
ETH Zentrum WET A1
CH-8092 Zürich
Schweiz

sven.kropf@freesurf.ch

Das Projekt wurde unterstützt durch:

Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"
Hochschule für Architektur Luzern, Zentrum für interdisziplinäre Gebäudetechnik

1. Hintergrund und Ziele

Unter dem Namen "PV/T-Schiefer" (PV/T = Photovoltaik/Thermie) läuft an der ETH Zürich ein vom Bundesamt für Energie und von der Fachhochschule Zentralschweiz unterstütztes Projekt zur Entwicklung einer neuartigen Hinterlüftung gebäudeintegrierter Photovoltaik. Das Prinzip des PV/T-Schiefers ist in Fig. 1 illustriert. In erster Linie geht es darum, in einem hohen Grad ins Gebäude integrierte PV-Module mit Aussenluft zu kühlen, um einen besseren elektrischen Wirkungsgrad der Zellen zu erreichen. In zweiter Linie soll untersucht werden, inwieweit die durch die Hinterlüftung gewonnene Wärme genutzt werden kann.

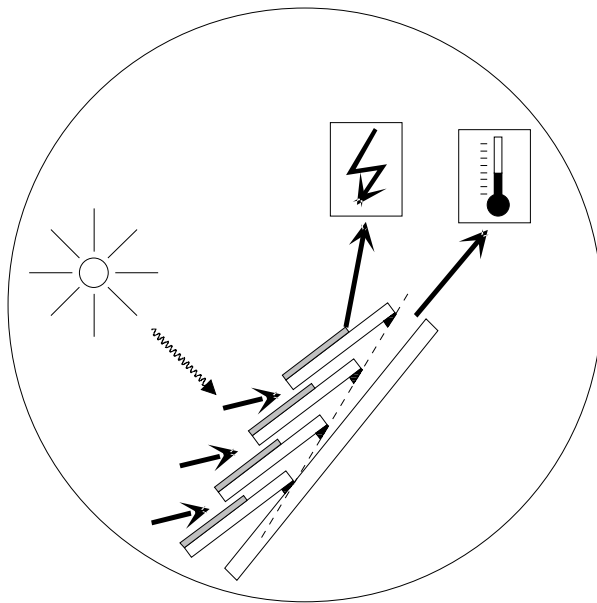


Fig. 1: Das Prinzip des PV/T-Schiefers

Ein Ziel dieses Projektes ist es, erste Anwendungen in der Praxis zu beschreiben und deren Gesamtnutzungsgrad abzuschätzen. Um dies für die vielversprechendsten Nutzungsarten möglichst genau tun zu können, ist es von Vorteil, für den Wärmegewinn der Komponente ein dynamisches Simulationsmodell zu haben, welches direkt mit einem dynamischen Gebäudemodell gekoppelt werden kann.

Eine ideale Grundlage dazu bildet das Gebäudesimulationsprogramm IDA ICE ("Indoor Climate and Energy") (siehe www.equa.se), welches dem Benutzer erlaubt, neue Modelle im sogenannten NMF-Format zu schreiben und ins Programm zu implementieren.

In das physikalische Modell fliessen Ergebnisse aus ersten Laboruntersuchungen (siehe [1] Kropf 1999) ein. Zur Validierung des Modells dienen die Messresultate einer Labormessung auf dem Dach der HTA Luzern (siehe [2] Kropf 2002) und diejenigen einer Feldmessung am Obstweg 12 in Steinhausen (siehe [3] Kropf 2002).

Das Modell dient einerseits der Vorhersage des Ertrags der Komponente (siehe [5] Kropf 2003), andererseits für Vorhersagen betreffend Nutzungsgrad möglicher Anwendungen (siehe [6] Kropf 2003).

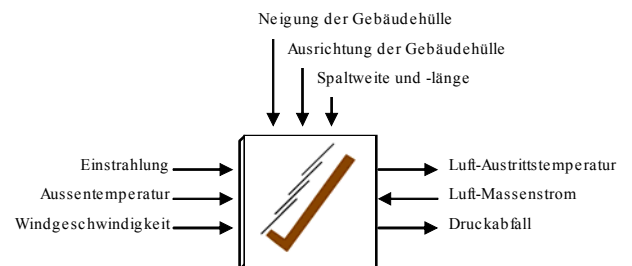


Fig. 2: Ein- und Ausgabegrößen des NMF-Modells

2. Das physikalische System

Das System "PV/T-Schiefer" besteht aus 5 Teilsystemen: 2 feste Körper und 3 Luftgefüllte Volumen:

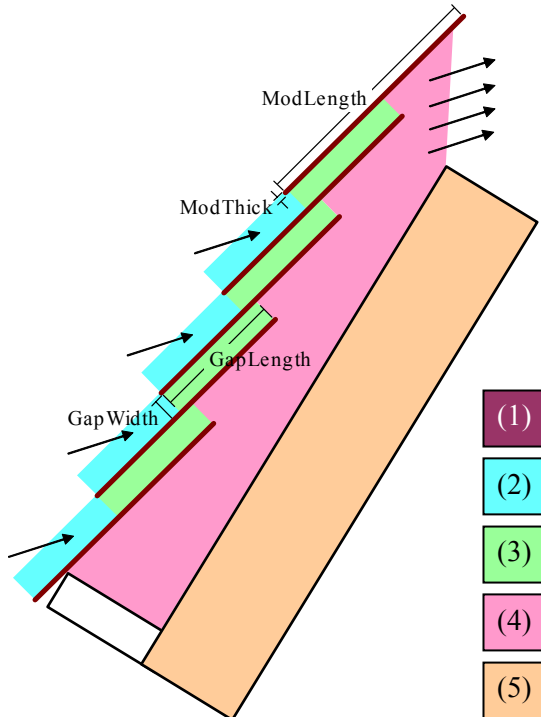


Fig. 3: Die 5 Teilsysteme

(1) "Mod": nMod PV-Modul-Reihen mit folgenden geometrischen Größen:

- ModLength (m): Modulreihen-Höhe
- ModWidth (m): Modulreihen-Breite
- ModThick (m): Modul-Dicke
- AMod (m²): Fläche für eine Modulreihe
- ATot (m²): Totale der Sonne ausgesetzte Modul-Fläche

(2) "In": nGap = nMod-1 dünne Luftfilme über den Modulen. Die Dicke der Luftfilme ist gleich der Spaltweite definiert:

- GapWidth (m): Luftfilm-Dicke
- AModFree (m²): Luftfilm-Fläche, welche der frei bleibenden und demzufolge mit Solarzellen belegten Fläche einer Modulreihe entspricht
- VolAirIn (m³): Luftfilm-Volumen

(3) "Gap": nGap Luftspalten zwischen den PV-Modulen mit folgenden geometrischen Größen:

- GapWidth (m): Spaltweite
- GapLength (m): Spaltlänge
- VolAirGap (m³): Spaltvolumen

(4) "Chan": 1 Luftkanal zwischen den PV-Modulen und der Unterkonstruktion mit:

- VolAirChan (m³): Kanalvolumen

(5) "Ins": 1 Unterkonstruktion (Lattung und Wärmedämmung) ohne definierte geometrische Größen.

Die Flächen und die Volumen werden demnach wie folgt berechnet:

$$AMod = ModLength \cdot ModWidth \quad (31)$$

$$AModFree = (ModLength - GapLength) \cdot ModWidth \quad (32)$$

$$ATot = nGap \cdot AModFree + AMod \quad (33)$$

$$VolAirIn = AModFree \cdot GapWidth \quad (34)$$

$$VolAirGap = (AMod - AModFree) \cdot GapWidth \quad (35)$$

Das System "PV/T-Schiefer" übernimmt gewisse Größen aus seiner Umgebung und gibt andere weiter. Hierzu werden die unbekannten Variablen des Modells in sog. Links zusammengefasst. Die einzelnen Variablen müssen entweder dem Modell als Randbedingung gegeben werden oder werden vom Modell berechnet. Die in Links zusammengefassten Austauschvariablen des Modells sind in Fig. 4 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

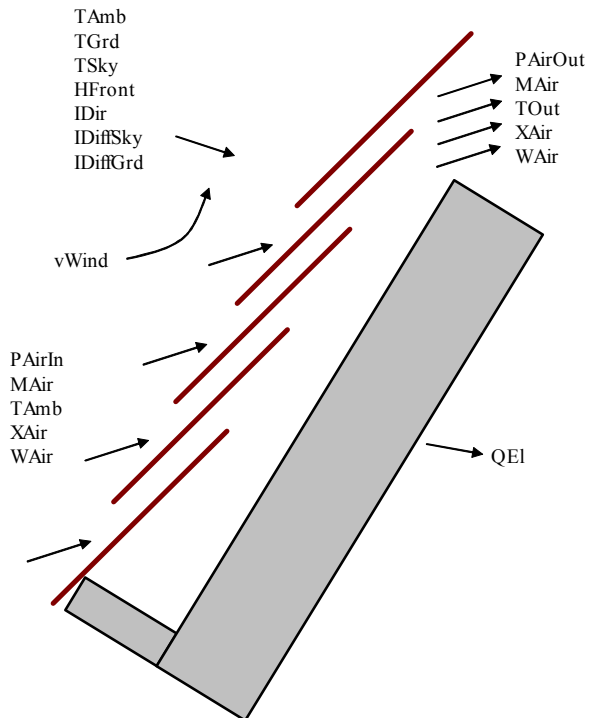


Fig. 4: Die Links des Modells mit den Input- und Output-Variablen

3. Die Strömung der Luft

Die Umgebungsluft tritt durch die Luftfilme in das System "PV/T-Schiefer" ein. Damit das NMF-Modell die in IDA ICE aufbereiteten Daten übernehmen kann, müssen die Eigenschaften der eintretenden Luft in einem Link des Typs "UniAir" verknüpft werden. Dieser Link besteht aus:

- PAirIn (Pa): Umgebungs-Luftdruck
- MAir (kg/s): Luftmassenstrom durch alle Spalten
- TAmb (°C): Umgebungstemperatur
- XAir (mg/kg): CO₂-Gehalt der Luft
- WAir (kg/kg): absolute Luftfeuchtigkeit

Der absolute Luftvolumenstrom durch alle Spalten VolFlowAir in m³/h beträgt:

$$\text{VolFlowAir} = \frac{\text{MAir} \cdot 3'600}{\text{RhoAirGap}} \quad (01)$$

RhoAirGap ist die Dichte der Luft im Spalt in kg/m³.

Der flächenspezifische Luftvolumenstrom durch die Spalten in m³/(h m²) beträgt:

$$\text{SpecVolFlo wAir} = \frac{\text{VolFlowAir}}{\text{ATot}} \quad (02)$$

Die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit im Spalt vAirGap in m/s beträgt:

$$v_{\text{AirGap}} = \frac{\text{VolFlowAir}/3'600}{n_{\text{Gap}} \cdot \text{GapWidth} \cdot \text{ModWidth}} \quad (03)$$

Ein zweiter Link des Typs "UniAir" gibt die nötigen Eigenschaften der aus dem System "PV/T-Schiefer" austretenden Luft weiter. Dieser Link besteht aus:

- PAirOut (Pa): Luftdruck Austritt
- MAir (kg/s): Luftmassenstrom durch alle Spalten
- TOut (°C): Luft-Austrittstemperatur
- XAir (mg/kg): CO₂-Gehalt der Luft
- WAir (kg/kg): absolute Luftfeuchtigkeit

PAirOut wird wie folgt berechnet:

$$\text{PAirOut} = \text{PAirIn} - \text{DeltaP} \quad (27)$$

Wobei der Druckabfall DeltaP wie folgt angesetzt wird:

$$\text{DeltaP} = C \cdot \left(\frac{\text{MAir}}{\text{ATot}} \right)^n \quad (26)$$

Die Parameter C und n sind abhängig von den Spaltdimensionen (GapLength und GapWidth). Sie wurden mittels CFD für acht 6mm weite und 40cm lange Spalten auf C = 1.3 10⁴ und n = 1.8 bestimmt.

Die Windgeschwindigkeit vWind (in m/s) ist in keinem Link vorhanden und muss deshalb in einem separaten Link vom Modell eingelesen werden können.

4. Die Energiebilanzen

Die Energie tritt in Form von Strahlung in das System "PV/T-Schiefer" ein. Damit das NMF-Modell die in IDA ICE aufbereiteten Daten übernehmen kann, müssen die Daten für den Wärmeaustausch mit der Umgebung in einem Link des Typs "Face2Wall" verknüpft werden. Dieser Link besteht aus:

- T_{Amb} (°C): Umgebungstemperatur
- T_{Grd} (°C): Bodentemperatur der Umgebung
- T_{Sky} (°C): Himmelstemperatur
- H_{Front} (W/m² K): konvektiver Wärmeübergangskoeffizient Modul → Umgebung
- $IDir$ (W/m²): Direkte Solarstrahlung auf die geneigte Modulfläche
- $IDiffSky$ (W/m²): Diffuse Himmelsstrahlung auf die geneigte Modulfläche
- $IDiffGrd$ (W/m²): Reflektierte Bodenstrahlung auf die geneigte Modulfläche

Da für das PV/T-Modell die Art der auftreffenden Strahlung keine Rolle spielt, werden die drei Strahlungsanteile in Gleichung (06) zusammengezählt:

$$RadSun = IDir + IDiffSky + IDiffGrd \quad (06)$$

RadSun ist somit die totale auf die geneigte Modulfläche eintreffende Solarstrahlung in W/m². Ein Teil von dieser Einstrahlungsleistung wird an der Moduloberfläche reflektiert:

$$Rad_{Refl} = Re_{fl} \cdot RadSun \quad (07)$$

wobei Re_{fl} der als Parameter definierte Reflexionsgrad des Moduls ist. Ein weiterer Anteil von RadSun wird in elektrische Energie umgewandelt:

$$QEI = (1 + elDeg \cdot (25^\circ C - T_{Cell})) \cdot etaEl \cdot RadSun \cdot ATot \quad (08)$$

Dabei ist:

- QEI (W): die gesamte von allen PV/T-Modulen des Systems generierte elektrische Gleichstromleistung
- $elDeg$ (K⁻¹): der als Parameter definierte Temperaturgradient des Zellwirkungsgrades
- T_{Cell} (°C): die berechnete Zelltemperatur
- $etaEl$ (-): der als Parameter definierte elektrische Modulwirkungsgrad bei 25°C
- $RadSun$ (W/m²): die totale auf die geneigte Modulfläche eintreffende Solarstrahlung

- $ATot$ (m²): die totale der Sonne ausgesetzte Modul-Fläche

Der übrigbleibende, im Modul in Wärme umgewandelte Anteil der auftreffenden Strahlung wird auf drei Wege wieder abgeführt: Konvektiv an die Umgebung ($Q_{ConvFront}$), konvektiv an den Spalt ($Q_{ConvGap}$) und mittels langwelliger Strahlung an die Umgebung ($Q_{LWFront}$). Diese drei Wärme-flüsse werden wie folgt berechnet:

$$Q_{ConvFront} = H_{Front} \cdot ATot \cdot (T_{Cell} - T_{In}) \quad (14)$$

Wobei H_{Front} der konvektive Wärmeübergangskoeffizient der Modulvorderseite in W/(m² K) ist. Dieser wird vom IDA ICE Fassaden-Modell berechnet und ist abhängig von der Windgeschwindigkeit.

$$Q_{LWFront} = ATot \cdot BOLTZ \cdot \left(\frac{180 - Slope}{180} \cdot e_{LW2Sky} \cdot (T_{Cell_{Abs}}^4 - T_{Sky_{Abs}}^4) + \frac{Slope}{180} \cdot e_{LW2Grd} \cdot (T_{Cell_{Abs}}^4 - T_{Sky_{Abs}}^4) \right) \quad (15)$$

Wobei $T_{..._{Abs}} = T_{...} + 273.15$ die absolute Temperatur in Kelvin bedeutet.

$$Q_{ConvGap} = n_{Gap} \cdot H_{Gap} \cdot A_{ModFree} \cdot (T_{Cell} - T_{Gap}) \quad (16)$$

Wobei H_{Gap} der berechnete konvektive Wärmeübergangskoeffizient im Spalt in W/(m² K) ist und wie folgt angesetzt wird:

$$H_{Gap} = \text{Max}(H_{Gap_{Min}}, C_1 \cdot v_{AirGap}^{n_1}) \quad (04)$$

Die Parameter H_{GapMin} , C_1 und n_1 können von den Spaltdimensionen (GapLength und GapWidth) und von der Art der Konvektion (frei, gemischt oder erzwungen) abhängen. Sie müssen bei der Modellvalidierung bestimmt werden.

Die Energiebilanz für die PV/T-Module (Teilsystem (1) "Mod") lautet wie folgt:

$$A_{Tot} \cdot \text{ModThick} \cdot \rho_{Mod} \cdot C_{Mod} \cdot \frac{dT_{Cell}}{dt} = \text{RadSun} \cdot A_{Tot} - \text{RadRefl} \cdot A_{Tot} - Q_{EI} - Q_{ConvFront} - Q_{LWFront} - Q_{ConvGap} \quad (09)$$

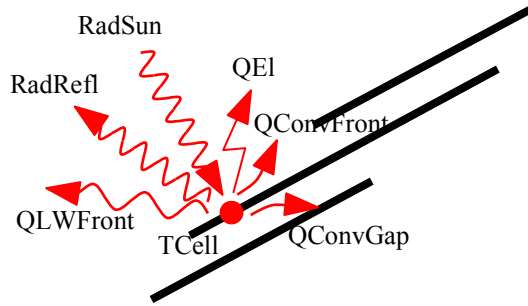


Fig. 5: Teilsystem (1) "Mod"

Die konvektiv an die Umgebung abgegebene Wärme ($Q_{ConvFront}$) teilt sich auf in einen verlorenen ($Q_{ConvLost}$) und einen vom Spalt zurückgewonnenen (Q_{GapIn}) Anteil:

$$Q_{GapIn} = M_{Air} \cdot C_{P_AIR} \cdot (T_{In} - T_{Amb}) + C_{Back_2} \cdot (T_{In} - T_{Gap}) \quad (17)$$

Der zweite Term ist gegenüber dem ersten sehr klein und kommt erst zum Tragen wenn $M_{Air}=0$ wird. Er sorgt dafür, dass die im Spalt verbleibende Wärme nach dem Abstellen der Hinterlüftung entweichen kann.

$$\text{CaptEff} = \frac{Q_{GapIn}}{Q_{GapIn} + Q_{ConvLost}} \quad (18)$$

$$Q_{ConvLost} = \left(\frac{1}{\text{CaptEff}} - 1 \right) \cdot Q_{GapIn} \quad (19)$$

Dabei ist CaptEff der Anteil der vom Modul konvektiv an die Umgebung abgegebenen Wärme, welcher durch die Spalten wieder "eingefangen" wird. CaptEff gilt es für die verschiedenen Neigungswinkel (Slope) und Spaltweiten (GapWidth) jeweils neu zu bestimmen und wird dabei wie folgt angesetzt:

$$\text{CaptEff} = \text{Max} \left(\text{CaptEff}_{Min}, C_2 \cdot \left(1 - e^{-C_3 \cdot \frac{M_{Air} - C_4}{A_{Tot}}} \right) \right) \quad (05)$$

Die Parameter CaptEff_{Min} , C_2 und C_3 können von den Spaltdimensionen (GapLength und GapWidth), von der Windgeschwindigkeit (v_{Wind}) und vom Neigungswinkel (Slope) abhängen. Sie müssen bei der Modellvalidierung bestimmt werden.

Die Energiebilanz für die Luftfilme (Teilsystem (2) "In") lautet wie folgt:

$$n_{Gap} \cdot \text{VolAirIn} \cdot \rho_{AirIn} \cdot C_{P_AIR} \cdot \frac{dT_{In}}{dt} = Q_{ConvFront} - Q_{GapIn} - Q_{ConvLost} \quad (10)$$

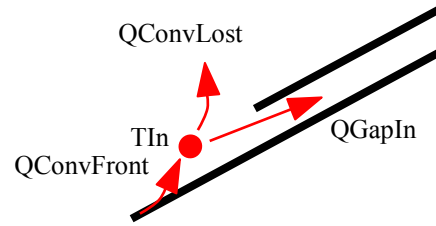


Fig. 6: Teilsystem (2) "In"

Wobei die Dichte der in den Spalt eintretenden Luft ρ_{AirIn} temperaturabhängig ist:

$$\rho_{AirIn} = \frac{348 \text{ kg K/m}^3}{T_{InAbs}} \quad (24)$$

Analog gilt für die aus den Spalten austretende Luft:

$$Q_{GapOut} = M_{Air} \cdot C_{P_AIR} \cdot (T_{Gap} - T_{Amb}) + C_{Back_1} \cdot (T_{Gap} - T_{Out}) \quad (20)$$

Wieder ist der zweite Term gegenüber dem ersten sehr klein und kommt erst zum Tragen wenn $M_{Air}=0$ wird. Er sorgt dafür, dass die im Kanal verbleibende Wärme nach dem Abstellen der Hinterlüftung in die Spalten entweichen kann.

Die Parameter C_{Back_1} und C_{Back_2} sind von derselben Größenordnung und können von den Spaltdimensionen (GapLength und GapWidth), von der Windgeschwindigkeit (v_{Wind}) und vom Neigungswinkel (Slope) abhängen. Sie müssen bei der Modellvalidierung bestimmt werden.

Die Energiebilanz für die Spalten (Teilsystem (3) "Gap") lautet wie folgt:

$$n_{\text{Gap}} \cdot \text{VolAirGap} \cdot \text{RhoAirGap} \cdot \text{CP_AIR} \cdot \frac{dT_{\text{Gap}}}{dt} = Q_{\text{ConvGap}} + Q_{\text{GapIn}} - Q_{\text{GapOut}} \quad (11)$$

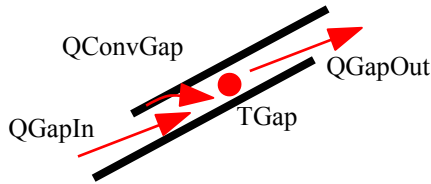


Fig. 7: Teilsystem (3) "Gap"

Wobei die Dichte der aus dem Spalt austretenden Luft RhoAirGap wiederum temperaturabhängig ist:

$$\text{RhoAirGap} = \frac{348 \text{ kgK} / \text{m}^3}{T_{\text{Gap Abs}}} \quad (23)$$

Die im Hinterlüftungskanal gesammelte Wärme wird zum Teil in der wärme-gedämmten Unterkonstruktion zwischenge-speichert (Q_{Ins}), früher oder später aber in der Luft abtransportiert (Q_{Out}):

$$Q_{\text{Out}} = \text{MAir} \cdot \text{CP_AIR} \cdot (T_{\text{Out}} - T_{\text{Amb}}) \quad (21)$$

$$Q_{\text{Ins}} = \text{CoeffIns} \cdot (T_{\text{Out}} - T_{\text{Ins}}) \quad (22)$$

Die Energiebilanz für den Luftkanal (Teilsystem (4) "Chan") lautet wie folgt:

$$\text{VolAirChan} \cdot \text{RhoAirOut} \cdot \text{CP_AIR} \cdot \frac{dT_{\text{Out}}}{dt} = Q_{\text{GapOut}} - Q_{\text{Out}} - Q_{\text{Ins}} \quad (12)$$

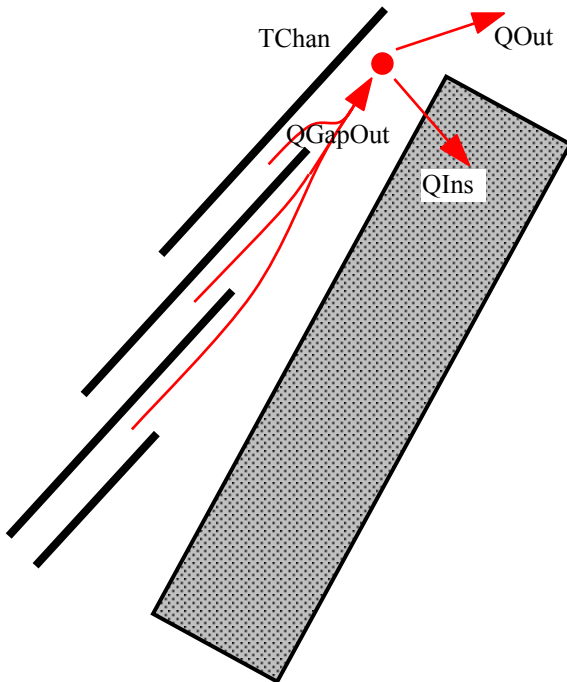


Fig. 8: Teilsystem (4) "Chan"

Wobei die Dichte der aus dem Kanal austretenden Luft RhoAirOut wiederum temperaturabhängig ist:

$$\text{RhoAirOut} = \frac{348 \text{ kgK} / \text{m}^3}{T_{\text{Out Abs}}} \quad (25)$$

Die Energiebilanz für die Unterkonstruktion (Teilsystem (5) "Ins") lautet wie folgt:

$$\text{CapIns} \cdot \frac{dT_{\text{Ins}}}{dt} = Q_{\text{Ins}} \quad (13)$$

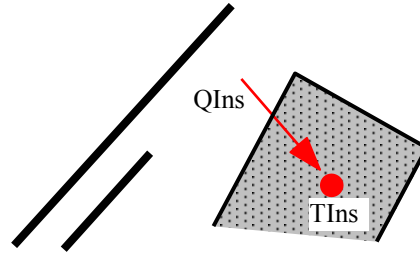


Fig. 9: Teilsystem (5) "Ins"

Die Parameter CoeffIns und CapIns sind von der Art und Grösse der Unterkonstruktion, sowie der Dicke der Wärmedämmung abhängig. Sie müssen bei der Modellvalidierung bestimmt werden.

5. Der Überblick über das Modell

(das wichtigste auf einen Blick - nur als Arbeitspapier gedacht, nicht als "Einstieg" in das Modell)

PVT

$$\text{VolFlowAir} = \text{MAir} / \text{RhoAirGap} * 3600$$

$$\text{SpecVolFlowAir} = \text{VolFlowAir} / ATot$$

$$\mathbf{vAirGap} = \mathbf{VolFlowAir}/3600 / (nGap * GapWidth * ModWidth)$$

$$\mathbf{HGap} := \max(HGapMin, Cl * \mathbf{vAirGap}^{**nl})$$

$$\text{CaptEff} := \max(\text{CaptEffMin}, C2 * (1 - \exp(-C3 * (\text{MAir} - C4) / ATot)))$$

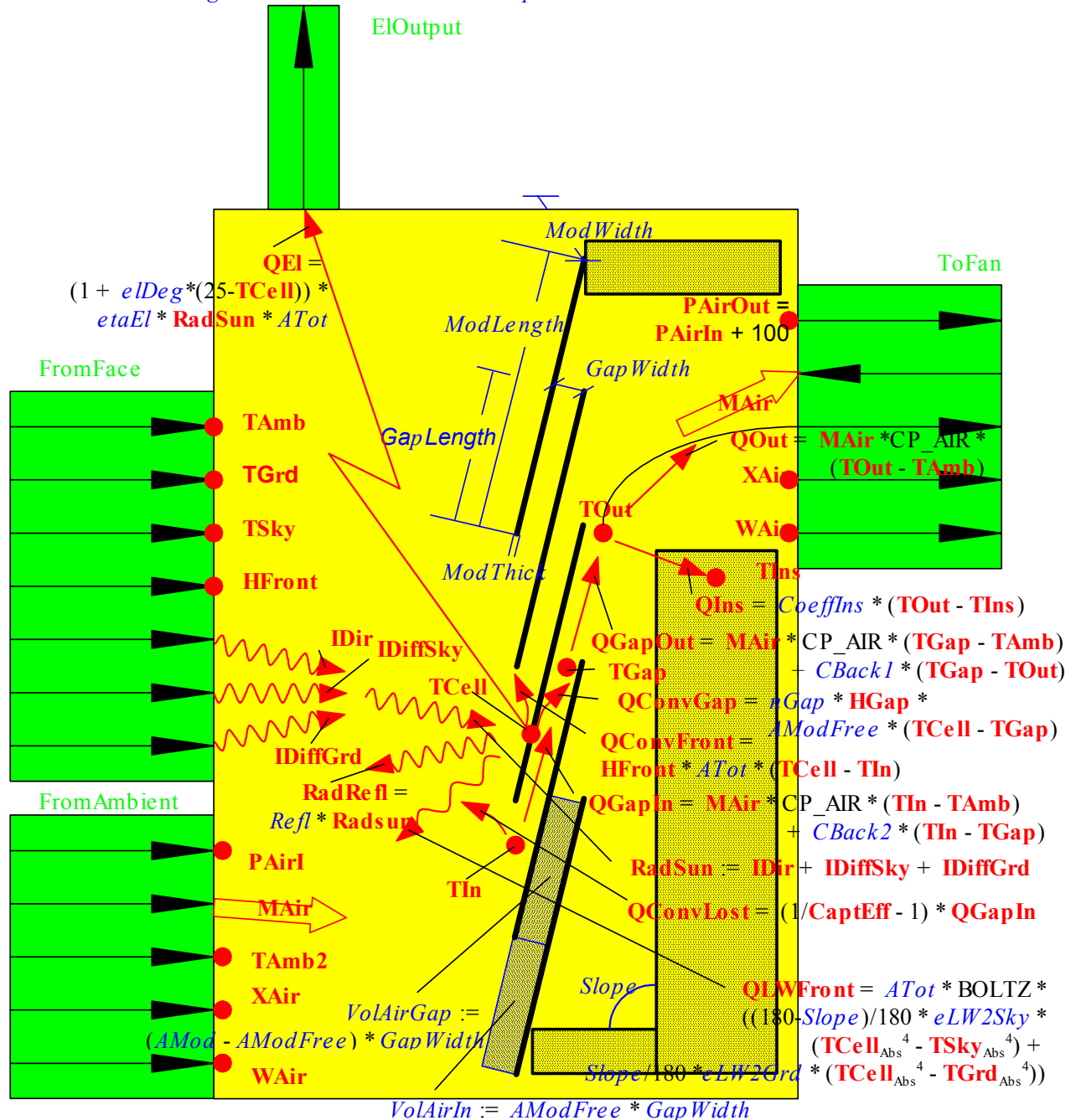
$$\text{RhoAirGap} = 348 / \text{TGap}_{\text{Abs}} \quad \text{RhoAirIn} = 348 / \text{TIn}_{\text{Abs}} \quad \text{RhoAirOut} = 348 / \text{TOut}_{\text{Abs}}$$

$$\Delta P := C * (M_{Air}/A_{Tot})^{**n} \quad P_{AirOut} = P_{AirIn} - \Delta P$$

$$nGap := nMod - 1$$

$$AModFree := (ModLength - GapLength) * ModWidth$$

$$AMod := ModLength * ModWidth \quad ATot := nGap * AModFree + AMod$$



gelb: NMF-Modell

blau kursiv: Parameter

rot fett: Variablen

grün: Links

Fig. 10: Schematische Skizze des NMF-Modells für den PVT/T-Schiefer

6. Der NMF-Code

CONTINUOUS_MODEL PVT

ABSTRACT

"PV-T-Slate"

EQUATIONS

```

/*01*/ VolFlowAir = MAir / RhoAirGap * 3600;
/*02*/ SpecVolFlowAir = VolFlowAir / ATot;
/*03*/ vAirGap = VolFlowAir/3600 / (nGap*GapWidth*ModWidth);
/*04*/ HGap := max(HGapMin, C1 * vAirGap**n1);
/*05*/ CaptEff := max(CaptEffMin, C2*(1 - exp(-C3*(MAir-C4)/ATot)));
/*06*/ RadSun := IDir + IDiffSky + IDiffGrd;
/*07*/ RadRefl := Refl * RadSun;
/*08*/ QEl = (1 + elDeg*(25-TCell)) * etaEl * RadSun * ATot;
/*09*/ AModFree * ModThick * RhoMod * CMod * TCell' = RadSun * AModFree - RadRefl * AModFree -
- QEl/ATot*AModFree - QConvFront/ATot*AModFree - QLWFront/ATot*AModFree - QConvGap/nGap;
/*10*/ RhoAirIn * VolAirIn * CP_AIR * TIn' = QConvFront/ATot*AModFree
- QGapIn/nGap - QConvLost/ATot*AModFree;
/*11*/ RhoAirGap * VolAirGap * CP_AIR * TGap' = QConvGap/nGap + QGapIn/nGap - QGapOut/nGap;
/*12*/ RhoAirOut * VolAirChan * CP_AIR * TOut' = QGapOut - QOut - QIns;
/*13*/ CapIns * TIns' = QIns;
/*14*/ QConvFront = HFront * ATot * (TCell - TIn);
/*15*/ QLWFront = ATot * BOLTZ * (((180-Slope)/180 * eLW2Sky * ((TCell-ABS_ZERO)**4
- (TSky-ABS_ZERO)**4) + (Slope/180 * eLW2Grd * ((TCell-ABS_ZERO)**4
- (TGrd-ABS_ZERO)**4)));
/*16*/ QConvGap = nGap * HGap * AModFree * (TCell - TGap);
/*17*/ QGapIn = MAir * CP_AIR * (TIn - TAmb) + CBack2 * (TIn - TGap);
/*19*/ QConvLost = (1/CaptEff - 1)*QGapIn;
/*20*/ QGapOut = MAir * CP_AIR * (TGap - TAmb) + CBack1 * (TGap - TOut);
/*21*/ QOut = MAir * CP_AIR * (TOut - TAmb);
/*22*/ QIns = CoeffIns * (TOut - TIns);
/*23*/ RhoAirGap = 348 / (TGap - ABS_ZERO);
/*24*/ RhoAirIn = 348 / (TIn - ABS_ZERO);
/*25*/ RhoAirOut = 348 / (TOut - ABS_ZERO);
/*26*/ DeltaP := 100/*C * (MAir/ATot)**n/*;
/*27*/ PAirOut = PAirIn - DeltaP;
/*28*/ QAmbRef = MAir * CP_AIR * (TAmb - TRef);
/*29*/ QOutRef = MAir * CP_AIR * (TOut - TRef);

```

LINKS

Face2Wall	FromFace	TAmb, TGrd, Tsky, HFront, IDir, IDiffSky, IDiffGrd;
UniAir	ToFan	PAirOut, POS_OUT MAir, TOut, XAir, WAir;
UniAir	FromAmbient	PAirIn, POS_IN MAir, TAmb2, XAir, WAir;
Q	ElOutput	POS_OUT QEl;
T	Temperature	TOut;
T	RefTempLink	TRef;
V	WindVel	POS_IN vWind;

VARIABLES

MassFlow	MAir	IN	1	0	BIG "Total mass flow"
VolFlow_h	VolFlowAir	OUT	1	0	BIG "Total hourly volume flow"
SpecVolFlow_h	SpecVolFlowAir	OUT	0.2	0	BIG "Specific hourly volume flow"
Vel	vAirGap	OUT	0.5	0	BIG "Air velocity in gap"
Velocity	vWind	IN	1	0	BIG "Wind velocity"
Factor	CaptEff	LOC	0.5	0	1 "Part of convected heat, captured by gap"
HeatConda	HGap	LOC	15	SMALL	BIG "Heat coefficient in gap"
HeatConda	HFront	IN	15	SMALL	BIG "Heat coefficient at module front"
RadA	RadSun	LOC	0	0	BIG "Total radiation absorbed at cell"
RadA	IDir	IN	0	0	BIG "Direct solar radiation"
RadA	IDiffSky	IN	0	0	BIG "Diffuse radiation from sky"
RadA	IDiffGrd	IN	0	0	BIG "Diffuse radiation from ground"
RadA	RadRefl	LOC	0	0	BIG "Reflected radiation from glass"
HeatFlux	QConvFront	OUT	0	-BIG	BIG "Heat convection at front"
HeatFlux	QConvLost	OUT	0	-BIG	BIG "Lost part of convected heat at front"
HeatFlux	QGapIn	OUT	0	-BIG	BIG "Heat transport into gap"
HeatFlux	QLWFront	OUT	0	-BIG	BIG "Long wave radiation at front"
HeatFlux	QConvGap	OUT	0	-BIG	BIG "Heat convection into gap"
HeatFlux	QGapOut	OUT	0	-BIG	BIG "Heat out of gap"
HeatFlux	QOut	OUT	0	-BIG	BIG "Heat to fan"
HeatFlux	QIns	OUT	0	-BIG	BIG "Heat to insulation"
HeatFlux	QEl	OUT	0	-BIG	BIG "Electrical output of the whole roof"
HeatFlux	QAmbRef	OUT	0	-BIG	BIG "Heat from ambient regarding TRef"
HeatFlux	QOutRef	OUT	0	-BIG	BIG "Heat to fan regarding TRef"
Temp	TRef	IN	20	ABS_ZERO	BIG "Reference temperature for QAmbRef"
Temp	TAmb	IN	20	ABS_ZERO	BIG "Ambient air temperature"
Temp	TAmb2	IN	20	ABS_ZERO	BIG "Ambient air temperature"
Temp	TGrd	IN	20	ABS_ZERO	BIG "Ground temperature"
Temp	TSky	IN	20	ABS_ZERO	BIG "Sky temperature"
Temp	TCell	OUT	20	ABS_ZERO	BIG "Cell temperature"

Temp	TGap	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"Air temperature in gap"
Temp	TIn	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"Air temperature before gap"
Temp	TOut	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"Output air temperature"
Temp	TIns	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"Temperature of insulation"
Density	RhoAirGap	OUT	1	SMALL	BIG	"Density of air in gap"
Density	RhoAirIn	OUT	1	SMALL	BIG	"Density of air before gap"
Density	RhoAirOut	OUT	1	SMALL	BIG	"Density of air after gap"
Pressure	PAirOut	OUT	1425	-BIG	BIG	"Pressure of leaving air"
Pressure	PAirIn	IN	1325	-BIG	BIG	"Pressure of leaving air"
Pressure	DeltaP	LOC	100	-BIG	BIG	"Pressure Drop from PV/T-In to PV/T-Out"
HumRatio	WAir	IN	0.01	0	1	"Humidity ratio"
Fraction_y	XAir	IN	594	0	BIG	"Pollutant fraction"

MODEL_PARAMETERS

Int	nMod	SMP	5	2	BIGINT	"Number of Modules"
Int	nGap	CMP	4	1	BIGINT	"Number of Gaps"

PARAMETERS

Volume	VolAirGap	C_P	0.003	SMALL	BIG	"Volume of air in gap"
Volume	VolAirIn	C_P	0.003	SMALL	BIG	"Volume of air film in front of cells"
Volume	VolAirChan	S_P	0.5	SMALL	BIG	"Volume of air in channel"
Area	ATot	C_P	5	SMALL	BIG	"Total module area"
Area	AMod	C_P	1	SMALL	BIG	"Area of 1 module"
Area	AModFree	C_P	0.5	SMALL	BIG	"Cell area of 1 module"
Length	GapWidth	S_P	0.006	SMALL	BIG	"Gap width"
Length	GapLength	S_P	0.5	SMALL	BIG	"Gap length"
Length	ModWidth	S_P	1	SMALL	BIG	"Module width"
Length	ModLength	S_P	1	SMALL	BIG	"Module length"
Length	ModThick	S_P	0.005	SMALL	BIG	"Module thickness"
Factor	C	S_P	15	SMALL	BIG	"C in DeltaP := C * MAir**n"
Factor	n	S_P	0.81	SMALL	BIG	"n in DeltaP := C * MAir**n"
HeatConda	HGapMin	S_P	15	SMALL	BIG	"Minimal Heat coefficient in gap"
Factor	C1	S_P	15	SMALL	BIG	"C1 in HGap := C1 * vAir**n1"
Factor	n1	S_P	0.81	SMALL	BIG	"n1 in HGap := C1 * vAir**n1"
Factor	CaptEffMin	S_P	0.01	0	1	"Minimal Capture Efficiency"
Factor	C2	S_P	0.8	0	1	"CaptEff := C2*(1 - exp(-C3*(MAir-C4)/ATot))"
Factor	C3	S_P	1	SMALL	BIG	"CaptEff := C2*(1 - exp(-C3*(MAir-C4)/ATot))"
Factor	C4	S_P	1	-BIG	BIG	"CaptEff := C2*(1 - exp(-C3*(MAir-C4)/ATot))"
Factor	CBack1	S_P	15	SMALL	BIG	"CBack1 in QBack1 = CBack1 * (TGap - TOut)"
Factor	CBack2	S_P	15	SMALL	BIG	"CBack2 in QBack2 = CBack2 * (TIn - TGap)"
HeatCond	CoeffIns	S_P	50	SMALL	BIG	"Heat Coefficient Channel->Insulation"
HeatCap	CapIns	S_P	1000	SMALL	BIG	"Heat Capacity of Insulation"
Factor	eLW2Sky	S_P	0.9	0	1	"Emissivity of module glass vs. sky"
Factor	eLW2Grd	S_P	0.9	0	1	"Emissivity of module glass vs. ground"
Factor	Refl	S_P	0.1	0	1	"Reflection rate of module glass"
Factor	etaEl	S_P	0.1	0	1	"Module efficiency at 25°C"
Factor	ElDeg	S_P	0.005	-BIG	BIG	"Degradation of module efficiency per °C"
Angle	Slope	S_P	90	0	90	"Slope of module surface"
Density	RhoMod	S_P	2500	SMALL	BIG	"Density of module"
HeatCapM	CMod	S_P	800	SMALL	BIG	"Mass heat capacity of module"

PARAMETER_PROCESSING

```

/*30*/ nGap := nMod - 1;
/*31*/ AMod := ModLength * ModWidth;
/*32*/ AModFree := (ModLength - GapLength) * ModWidth;
/*33*/ ATot := nGap * AModFree + AMod;
/*34*/ VolAirIn := AModFree * GapWidth;
/*35*/ VolAirGap := (AMod - AModFree) * GapWidth;

```

END_MODEL

7. Alle im Modell verwendeten Grössen

Variablen

MAir: Totaler Luft-Massenstrom durch alle Spalten zwischen den PV/T-Schiefern in kg/s. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

VolFlowAir: Totaler Luft-Volumenstrom durch alle Spalten zwischen den PV/T-Schiefern in m³/h. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 01 aus MAir und RhoAirGap berechnet.

SpecVolFlowAir: Spezifischer Luft-Volumenstrom pro PV-Fläche in m³/(h m²). Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 02 aus VolFlowAir und ATot berechnet.

vAirGap: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Luft in allen Spalt zwischen den PV/T-Schiefern in m/s. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 03 aus VolFlowAir, nGap und den Spaltdimensionen GapWidth und ModWidth berechnet.

vWind: Windgeschwindigkeit in m/s. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

CaptEff: Dimensionsloser Wärme-Erfassungsgrad ("Capture Efficiency"): Von der durch Konvektion vom PV/T-Schiefer an die Umgebung abgegebenen Wärme der Anteil, welcher durch die Spalten zwischen den Schiefern wieder eingefangen wird. Die LOC-Variable wird gemäss Gleichung 05 aus CaptEffMin, C2, C3, C4 und MAir berechnet.

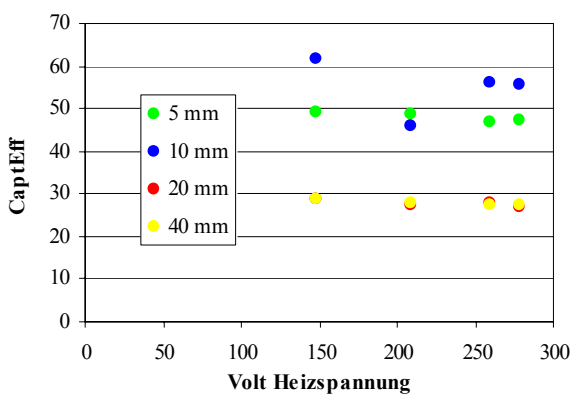


Fig. 11: Messresultate aus ([1] Kropf 1999): CaptEff in Funktion der Heizspannung (also der solaren Einstrahlung) für verschiedene Spaltweiten.

Fig. 11 zeigt, dass CaptEff nicht wesentlich von der solaren Einstrahlung abhängt, wohl aber von der Spaltweite: Für Spaltweiten von 5 und 10mm ist CaptEff deutlich höher als für Spaltweiten von 20 und 40mm.

CaptEffMin, C2, C3 und C4 sind also für verschiedene Spaltweiten nicht gleich gross.

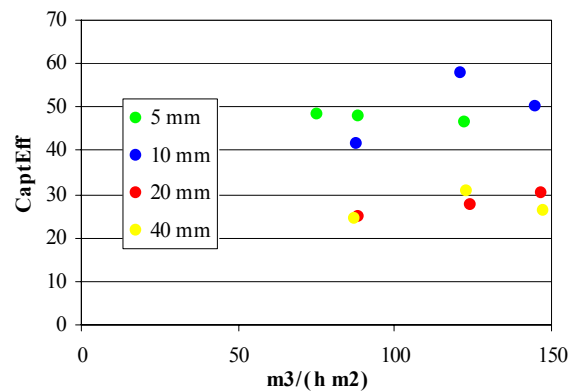


Fig. 12: CaptEff in Funktion des spezifischen Luft-Volumenstroms für verschiedene Spaltweiten.

Fig. 12 zeigt, dass CaptEff mit zunehmendem Luftvolumenstrom im Spalt zunimmt. In Gleichung 05 bedeutet C2 der Wert für CaptEff für grosse Luftmassenströme. C3 gibt an, wie schnell dieser Wert mit steigendem Luftmassenstrom erreicht wird:

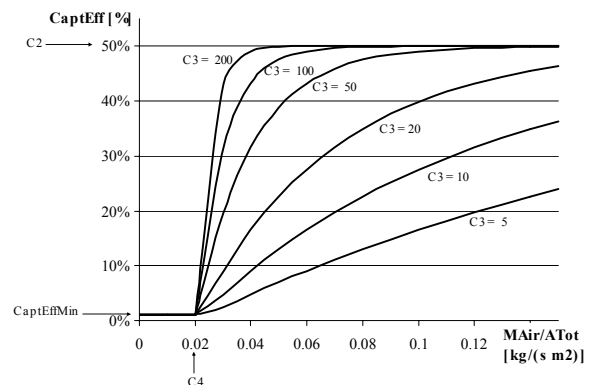


Fig. 13: CaptEff für CaptEffMin=0.01, C2=0.5, C4=0.02 kg/(s m²) und verschiedene Werte für C3.

HGap: Konvektiver Wärmeübergangs-Koeffizient im Spalt in W/(m² K). Die LOC- Variable wird gemäss Gleichung 04 aus HGapMin, C1, n1 und vAirGap berechnet.

Richtwerte für C1 und n1 geben die Resultate aus den Labormessungen, dargestellt in Fig. 14 (aus [1] Kropf 1999, Seite 60). In der Modellvalidierung (Kapitel 8) sollen sie neu bestimmt werden.

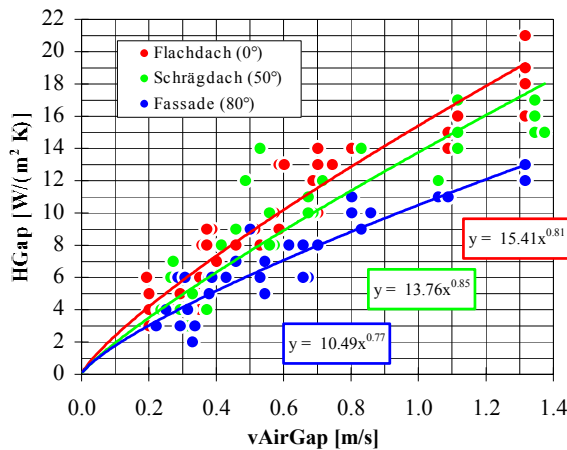


Fig. 14 (aus [1] Kropf 1999, Seite 60): H_{Gap} in Funktion von v_{AirGap} : Gleichung 04 (Linien) im Vergleich mit den Messungen (Punkte).

HFfront: Konvektiver Wärmeübergangs-Koeffizient für die Vorderseite der PV/T-Schiefer in $W/(m^2 K)$. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

RadSun: Total auf die PV-Fläche eingestrahle Leistung in W. Die LOC-Variable wird gemäss Gleichung 06 als Summe aus $IDir$, $IDiffSky$ und $IDiffGrd$ berechnet.

IDir: Direkte Sonneneinstrahlung auf die gesamte PV-Fläche in W. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

IDiffSky: Diffuse, vom Himmel gestreute Sonneneinstrahlung auf die gesamte PV-Fläche in W. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

IDiffGrd: Diffuse, vom Boden reflektierte Sonneneinstrahlung auf die gesamte PV-Fläche in W. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

RadRefl: Von der gesamten PV-Fläche reflektierte Solarstrahlung in W. Die LOC-Variable wird gemäss Gleichung 07 aus $Refl$ und $RadSun$ berechnet.

QConvFront: von der gesamten PV-Fläche konvektiv an die Umgebung abgegebene Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 14 aus $HFfront$, $ATot$, T_{Cell} und T_{In} berechnet.

QConvLost: Anteil von $QConvFront$, welcher durch den Wind endgültig an die Umgebung abgegeben wird, in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 19 aus $CaptEff$ und $QGapIn$ berechnet.

QGapIn: Von der Umgebung in sämtliche Spalten zwischen den PV/T-Schiefern transportierte Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 17 aus $MAir$, T_{Amb} , T_{In} und T_{Gap} berechnet. Der zweite Term in Gleichung 17 sorgt dafür, dass im Fall $MAir=0$ Wärme konvektiv von den Spalten an die Umgebung entweicht.

QLWFront: Von der gesamten PV-Fläche an die Umgebung (Himmel und Boden) abgestrahlte Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 15 aus $ATot$, $Slope$, $eLW2Sky$, $eLW2Grd$, T_{Cell} , T_{Sky} und T_{Grd} berechnet.

QConvGap: Von allen PV/T-Schiefern konvektiv in die Spalten nach hinten abgegebene Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 16 aus $nGap$, H_{Gap} , $AModFree$, T_{Cell} und T_{Gap} berechnet.

QGapOut: Totale aus allen Spalten zwischen den PV/T-Schiefern in den Hinterlüftungskanal transportierte Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 20 aus $MAir$, T_{Gap} , T_{Amb} und T_{Out} berechnet. Der zweite Term in Gleichung 20 sorgt dafür, dass im Fall $MAir=0$ Wärme konvektiv vom Hinterlüftungskanal in die Spalten entweicht.

QOut: Totale in der Hinterlüftungsluft gewonnene und vom Hinterlüftungskanal abtransportierte Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 21 aus $MAir$, T_{Amb} und T_{Out} berechnet.

QIns: Gesamte vom Hinterlüftungskanal in die Wärmedämmung des Unterdachs eindringende Wärmeleistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 22 aus $CoeffIns$, T_{Out} und T_{Ins} berechnet.

QEI: Von allen PV/T-Schiefern gewonnene elektrische Leistung in W. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 08 aus $eIDeg$, T_{Cell} , $etaEI$, $RadSun$ und $ATot$ berechnet.

TAmb: Umgebungstemperatur in $^{\circ}C$. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

TAmb2: Umgebungstemperatur in $^{\circ}C$. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

TGrd: Bodentemperatur der Umgebung in $^{\circ}C$. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

TSky: Himmelstemperatur in $^{\circ}C$. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

TCell: Durchschnittliche Modultemperatur aller PV/T-Schiefer in $^{\circ}C$. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 09 (Energiebilanz für die PV/T-Module) aus $ATot$, $AModFree$, $ModThick$, $RhoMod$, $CMod$, $RadSun$, $RadRefl$, QEI , $QConvFront$, $QLWFront$, $nGap$ und $QConvGap$ berechnet.

TGap: Durchschnittliche Lufttemperatur in allen Spalten zwischen den PV/T-Schiefern in $^{\circ}C$. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 11 (Energiebilanz für die Spalten zwischen den PV/T-Schiefern) aus $RhoAirGap$, $VolAirGap$, $nGap$, $QConvGap$, $QGapIn$ und $QGapOut$ berechnet.

TIn: Durchschnittliche Temperatur der Luft unmittelbar vor den Spalten zwischen den PV/T-Schiefern in $^{\circ}C$. Die OUT-Variable wird gemäss

Gleichung 10 (Energiebilanz der Luftvolumen vor den Spalten) aus RhoAirIn , VolAirIn , QConvFront , ATot , AModFree , nGap , QGapIn und QConvLost berechnet.

TOut: Temperatur der im Hinterlüftungskanal abgeführten Warmluft in °C. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 12 (Energiebilanz für den Hinterlüftungskanal) aus RhoAirOut , VolAirChan , QGapOut , QOut und QIns berechnet.

TIns: Durchschnittliche Temperatur der Wärmedämmung im Unterdach in °C. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 13 (Wärmebilanz der Wärmedämmung) aus CapIns und QIns berechnet.

RhoAirGap: Dichte der Luft in den Spalten zwischen den PV/T-Schiefern. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 23 aus TGap berechnet.

RhoAirIn: Dichte der Luft unmittelbar vor den Spalten zwischen den PV/T-Schiefern. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 24 aus TIn berechnet.

RhoAirOut: Dichte der Luft im Hinterlüftungskanal. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 25 aus TOut berechnet.

PAirOut: Luftdruck der aus dem Hinterlüftungskanal austretenden Luft in Pa. Die OUT-Variable wird gemäss Gleichung 27 aus PAirIn und DeltaP berechnet.

PAirIn: Luftdruck der in die Spalten eintretenden Luft in Pa. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

DeltaP: Gesamter Druckverlust über alle Spalten. Die LOC-Variable wird gemäss Gleichung 26 aus MAir und ATot berechnet.

WAir: Absolute Luftfeuchtigkeit der in die Spalten eintretenden Luft in g/g. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

XAir: CO₂-Gehalt der in die Spalten eintretenden Luft in mg/kg. Die IN-Variable benötigt das Modell als zeitabhängige Randbedingung.

Parameter

nMod: totale Anzahl Reihen von PV/T-Schiefer. Den Modellparameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

nGap: totale Anzahl Spalten zwischen den PV/T-Schiefern. Der Modellparameter wird gemäss Gleichung 28 aus nMod berechnet.

VolAirGap: Volumen einer Luftspalte zwischen zwei PV/T-Schiefer-Reihen in m³. Der Parameter wird gemäss Gleichung 33 aus AMod , AModFree und GapWidth berechnet.

VolAirIn: Volumen des Luftfilmes über einer PV/T-Schiefer-Reihe (mit GapWidth als Filmdicke) in m³. Der Parameter wird gemäss Gleichung 32 aus AModFree und GapWidth berechnet.

VolAirChan: Volumen des gesamten Hinterlüftungskanals in m³. Der Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

ATot: Gesamte PV-Fläche in m². Der Parameter wird gemäss Gleichung 31 aus nGap , AModFree und AMod berechnet.

AMod: Gesamte Fläche einer PV/T-Schiefer-Reihe in m². Der Parameter wird gemäss Gleichung 29 aus ModLength und ModWidth berechnet.

AModFree: Freie (= von der nächsten Reihe nicht überlappter Bereich) Fläche einer PV/T-Schiefer-Reihe in m². Der Parameter wird gemäss Gleichung 30 aus ModLength , GapLength und ModWidth berechnet.

GapWidth: Weite des Spaltes zwischen zwei PV/T-Schiefer in m. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

GapLength: Länge eines Spaltes zwischen zwei PV/T-Schiefer in m. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

ModWidth: Breite einer PV/T-Schiefer-Reihe in m. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

ModLength: Gesamte Länge eines PV/T-Schiefers in m. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

ModThick: Dicke eines PV/T-Schiefers in m. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

C: Koeffizient für die Berechnung von DeltaP (siehe Gleichung 26). Der Parameter wurde mittels CFD für acht 6mm weite und 40cm lange Spalten auf den Wert $1.3 \cdot 10^4$ bestimmt.

n: Exponent für die Berechnung von DeltaP (siehe Gleichung 26). Der Parameter wurde mittels CFD für acht 6mm weite und 40cm lange Spalten auf den Wert 1.8 bestimmt.

HGapMin*: Minimaler konvektiver Wärmeübergangskoeffizient im Spalt in $W/(m^2 K)$ für den Fall $v_{AirGap} \approx 0$.

C1*: Koeffizient für die Berechnung von HGap (siehe Gleichung 04). Der Parameter wurde in einer Labormessung (siehe [2] 1999, Seite 60) auf den Wert von zwischen 8 und 20 (abhängig unter anderem auch vom Neigungswinkel Slope) bestimmt.

n1*: Exponent für die Berechnung von HGap (siehe Gleichung 04). Der Parameter wurde in einer Labormessung (siehe [2] 1999, Seite 60) auf den Wert von zwischen 0.7 und 0.9 bestimmt.

CaptEffMin*: Minimaler dimensionsloser Wärme-Erfassungsgrad "Capture Efficiency" für den Fall $v_{AirGap} \approx 0$.

C2*: Koeffizient für die Berechnung von CaptEff (siehe Gleichung 05). Der Parameter entspricht dem Wert für CaptEff für den Fall $v_{AirGap} \rightarrow \infty$ und liegt also zwischen 0 und 1.

C3*: Exponent für die Berechnung von CaptEff (siehe Gleichung 05). Der Parameter bestimmt, wie schnell CaptEff mit steigender v_{AirGap} gegen den Wert C2 streben soll.

C4*: Koeffizient für die Berechnung von CaptEff (siehe Gleichung 05).

CBack1*: Koeffizient für die konvektive Entweichung der Wärme aus dem Hinterlüftungskanal in die Spalten in W/K (v.a. für den Fall $MAir=0$, siehe Gleichung 20). Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

CBack2*: Koeffizient für die konvektive Entweichung der Wärme aus den Spalten in die Umgebung in W/K (v.a. für den Fall $MAir=0$, siehe Gleichung 17). Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

CoeffIns*: Koeffizient für den Wärmefluss vom Hinterlüftungskanal in die Wärmedämmung im Unterdach in W/K . Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

CapIns*: Wärmekapazität der Wärmedämmung im Unterdach in J/K . Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

eLW2Sky: Dimensionsloser Emissionsgrad der PV/T-Schiefer für die Abstrahlung gegen den Himmel. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. Mit $eLW2Sky =$

0.9 wird das Modell hier keine wesentlichen Fehler aufweisen.

eLW2Grd: Dimensionsloser Emissionsgrad der PV/T-Schiefer für die Abstrahlung gegen den Boden. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. Mit $eLW2Grd = 0.9$ wird das Modell hier keine wesentlichen Fehler aufweisen.

Refl: Dimensionsloser Reflexionsgrad der PV/T-Schiefer für kurzwellige Strahlung. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. Der Glas-Hersteller gibt für diesen Wert $Refl = 0.09$ an.

etaEl: Dimensionsloser elektrischer Wirkungsgrad PV/T-Schiefer bei $25^\circ C$ (Zellwirkungsgrad * Flächenanteil der Zellen im Modul). Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. Er wurde mittels Messung auf $etaEl=0.0989$ bestimmt (siehe [3] 2002, Seite 5).

ElDeg: Temperaturgradient des elektrischen Wirkungsgrades der Zellen in K^{-1} . Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. In der Literatur findet man für kristalline Zellen durchwegs $ElDeg=0.005$.

Slope: Neigungswinkel der Gebäudehülle gegenüber der Horizontalen in $^\circ$. Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung.

RhoMod: Dichte der Module in kg/m^3 . Den Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. Der Glas-Hersteller gibt für diesen Wert $RhoMod = 2500 kg/m^3$ an.

CMod*: Spezifische Wärmekapazität der Module in $J/(kg K)$. Dieser Parameter benötigt das Modell als zeitunabhängige Randbedingung. Der Glas-Hersteller gibt für diesen Wert $CMod = 2500 J/(kg K)$ an.

Links

FromFace: Für die Verbindung mit dem Fassaden-Modell von IDA ICE (Input von T_{Amb} , T_{Grd} , T_{Sky} , H_{Front} , $IDir$, $IDiffSky$ und $IDiffGrd$).

ToFan: Für die Verbindung mit dem Ventilator-Modell von IDA ICE (Input von $MAir$, Output von $PAirOut$ und $TOut$).

FromAmbient: Input von $PAirIn$, $MAir$, T_{Amb2} , X_{Air} und W_{Air} .

ElOutput: Output von Q_{El} .

Temperature: Output von $TOut$.

WindVel: Input von v_{Wind} .

8. Die Validierung

Die in Kapitel 5 mit * bezeichneten Parameter (insgesamt 11) sind diejenigen, welche bei der Validierung so angepasst werden müssen, dass die Simulation möglichst genau mit den Messungen übereinstimmt. 11 Freiheitsgrade für die Modell-Anpassung sind zwar etwas viel, aber nicht alle Parameter werden auf die Resultate einen gleich starken Einfluss haben. HGapMin, CaptEffMin, CBack1 und CBack2 sind beispielsweise 4 Parameter, welche nur bei kleinen Luftgeschwindigkeiten überhaupt zum Tragen kommen.

Das Ziel der Validierung ist, alle Parameter für einen möglichst breiten Anwendungsbereich des PV/T-Schiefers bestimmen zu können.

Zur Validierung des Modells dienen zwei Messungen:

1. Labormessung auf dem Dach der HTA Luzern (siehe [2] Kropf 2002):



Fig. 15: Labormessung HTA Luzern

2. Feldmessung am Obstweg 12 in Steinhausen (siehe [3] Kropf 2002):



Fig. 16: Feldmessung Obstweg 12

Um die gesuchten Parameter isoliert zu bestimmen, wurde insbesondere die 1. Messung sehr detailliert durchgeführt. Ausserdem sollte durch Variierung anderer Parameter bei Messung 1 ermöglicht werden, die Abhängigkeit der gesuchten Parameter von den variierten Parametern zu bestimmen.

gesuchte Parameter*:

- Konstanten für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs-Koeffizienten im Spalt HGap (HGapMin, C1, n1)
- Konstanten für die Berechnung des Wärme-Erfassungsgrades CaptEff (CaptEffMin, C2, C3, C4)
- Koeffizienten für das Entweichen der Wärme bei MAir=0 (CBack1, CBack2)
- Wärmekapazität und Wärmeeintragskoeffizient der Unterkonstruktion mit Wärmedämmung (CapIns, CoeffIns)

variierte Parameter:

- Neigung (Slope)
- Spaltweite (GapWidth)
- Luftmassenstrom (MAir) bzw. Luftgeschwindigkeit im Spalt (vAirGap)

Aus verschiedenen Gründen können die Messresultate leider nicht für eine Validierung in der geplanten Genauigkeit dienen:

- Die zu kleine Genauigkeit des verwendeten Anemometer erlaubt keine Aussage über die Verteilung des totalen Luftmassenstromes auf die einzelnen Spalten. Demzufolge können die Konstanten für die Berechnung von HGap nicht isoliert für die einzelnen Spalten bestimmt werden. Es kann nur die Abhängigkeit des mittleren HGap von der mittleren vAirGap untersucht werden.

- Während einer langen ersten Messperiode wurde eine wesentliche undichte Stelle (Leck) unter dem untersten Modul nicht beachtet. Dieses Leck bewirkte, dass zusätzlich unerwärmte oder wenig erwärmte Luft in den Kanal hinter den PV-Modulen gelangte. Dies verunmöglicht es, vom gemessenen Gesamtmassenstrom $\dot{m}_{Air}$ auf die Spaltgeschwindigkeit v_{AirGap} zu schliessen.

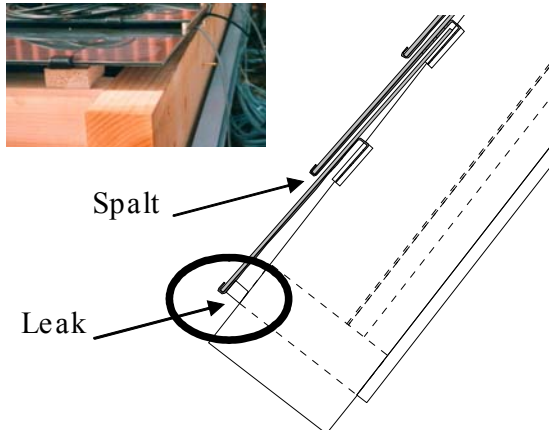


Fig. 17: Das Leck unterhalb des untersten Moduls

Dieses Leck wurde erst am 26. November abgedichtet. Die Messungen vor diesem Datum sind für die Validierung also unbrauchbar. Nachher wurde aber GapWidth und Slope nicht mehr verändert. Demzufolge können die gesuchten Parameter nur für die Einstellung nach dem 26. November (Slope = 90° und GapWidth = 6mm) bestimmt werden.

Die Messung der Spaltaustrittstemperaturen der einzelnen Spalten können also wegen dem unbeachteten Leck und wegen der zu ungenauen Messung der lokalen Luftgeschwindigkeiten nicht gebraucht werden.

Mit einer CFD-Rechnung ("Computational Fluid Dynamics") könnte über eine Validierung des genau genug ausgemessenen Temperaturfeldes das nicht oder zu ungenau ausgemessene Geschwindigkeitsfeld bestimmt und so die Genauigkeit und der Anwendungsbereich der Validierung erheblich verbessert werden. Darauf muss aber leider v.a. aus Zeitgründen verzichtet werden.

Wir beschränken uns deshalb auf die Bestimmung der Parameter für folgende zwei Situationen:

- A (gemäss 1. Messung):
 $\dot{m}_{Air}$ variabel, Slope = 90° , GapWidth = 6mm,
 GapLength = 40cm, Unterkonstruktion wie in der Labormessung (siehe [2] Kropf 2002).
 B (gemäss 2. Messung):

SpecVolFlowAir = $20 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$, Slope = 45° ,
 GapWidth = 6mm, GapLength = 40cm,
 Unterkonstruktion wie in der Feldmessung (siehe [3] Kropf 2002).

Validierung anhand der Labormessung HTA

Messdatum: 21. Dezember 2001 - 7. April 2002

Messbericht siehe ([2] Kropf 2002)

$A_{Tot} = 6.51 \text{ m}^2$

$n_{Mod} = 8$

Slope = 90°

ModWidth = 2.33 m

GapWidth = 6 mm

GapLength = 40 cm

SpecVolFlowAir = 15 ... $130 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$

Steuerung Ventilator: Dauerbetrieb

Folgende Parameter werden im Voraus festgesetzt:

$n_{Mod} = 8$

$\text{VolAirChan} = 0.5 \text{ m}^3$

GapWidth = 0.006 m

GapLength = 0.4 m

ModWidth = 2.325 m

ModLength = 0.7 m

ModThick = 0.006 m

ELW2Sky = 0.9

ELW2Grd = 0.9

Refl = 0.09

EtaEl = 0.0989

ElDeg = 0.005

Slope = 90°

$\rho_{Mod} = 2500 \text{ kg/m}^3$

$C_{Mod} = 800 \text{ J/(kg K)}$

Da der Ventilator bei der Messung auf Dauerbetrieb (Tag und Nacht) eingestellt war, können auch folgende Parameter (weil sie auf die Resultate keinen Einfluss haben) gesetzt werden:

$H_{GapMin} = 0.1 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

$C_{aptEffMin} = 0.01$

$C_{Back1} = 10^{-6} \text{ W/K}$

$C_{Back2} = 10^{-6} \text{ W/K}$

Schritt 1

Als Testtag wird vorerst der 26. März 2002 ausgewählt - ein bis auf kleine Störungen zwischen 11 und 12 Uhr durchwegs sonniger Tag, während dem der Ventilator auf einer mittleren Stufe ($48 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$) eingestellt war. In einem ersten Schritt werden HGap auf $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und CapTEff auf 0.5 konstant angenommen, d.h.:

$$\begin{aligned} C_1 &= 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \\ n_1 &= 10^{-6} \\ C_2 &= 0.5 \\ C_3 &= 10^6 \\ C_4 &= 0 \end{aligned}$$

Dabei wird die Auswirkung von CcoeffIns und CapIns auf das Simulationsresultat untersucht:

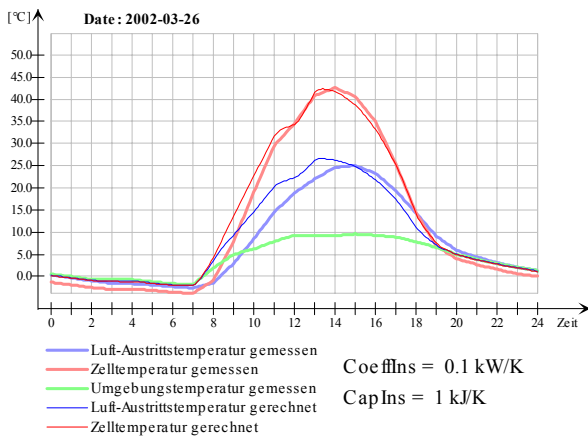


Fig. 18

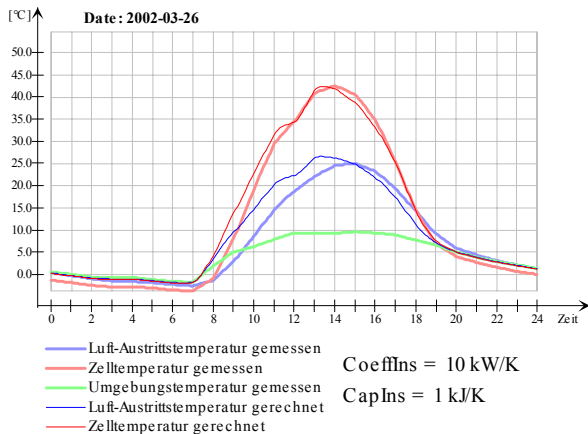


Fig. 19

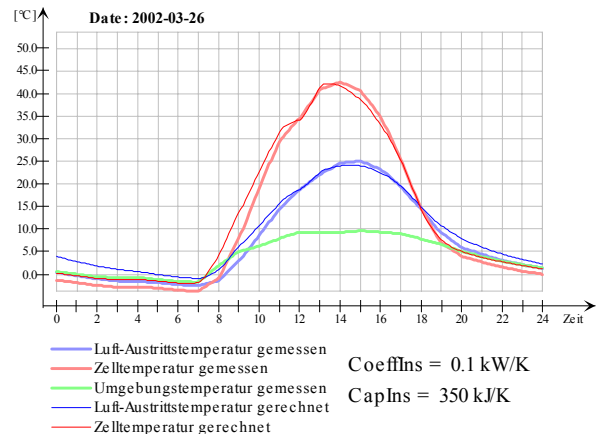


Fig. 20

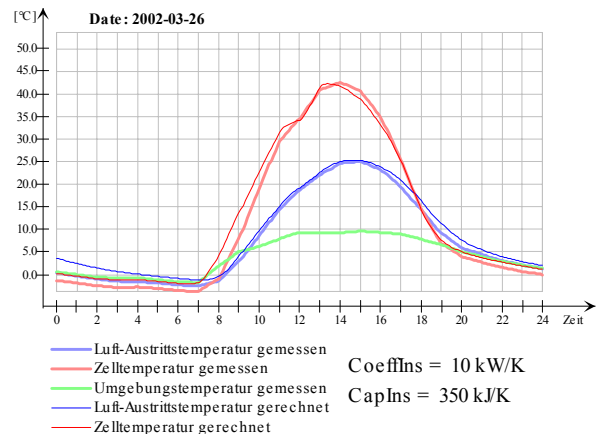


Fig. 21

CapIns hat den deutlich grösseren Einfluss auf TOut als CcoeffIns. Dieser Parameter bestimmt im Wesentlichen, mit welcher "Verspätung" die Abwärme der Photovoltaik aus dem PV/T-Kollektor austritt. CcoeffIns hat einen kleinen Einfluss darauf, wie schnell TOut vormittags ansteigt und abends wieder sinkt. CcoeffIns darf allerdings nicht zu klein gewählt werden, weil so die Wärme nicht mehr in die Unterkonstruktion dringen kann, was gleichbedeutend ist mit einem kleinen Wert für CapIns:

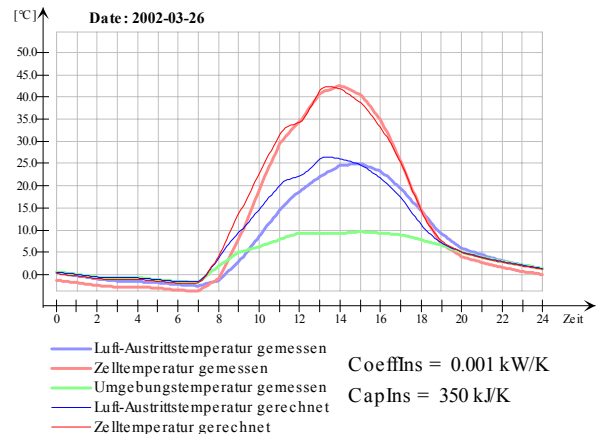


Fig. 22

Für die Bestimmung der weiteren Parameter wählen wir:

$$\text{CoeffIns} = 10 \text{ kW/K}$$

$$\text{CapIns} = 350 \text{ kJ/K}$$

Schritt 2

In einem zweiten Schritt wird der Einfluss von HGap und CaptEff auf TCell und TOut untersucht. Folgende Parameter bleiben dabei konstant:

$$n_1 = 10^{-6}$$

$$C_3 = 10^6$$

$$C_4 = 0$$

$$\text{CoeffIns} = 10 \text{ kW/K}$$

$$\text{CapIns} = 350 \text{ kJ/K}$$

Aus $n_1 \approx 0$ folgt $\text{HGap} = C_1$ und

aus $C_3 \approx \infty$ und $C_4 = 0$ folgt $\text{CaptEff} = C_2$

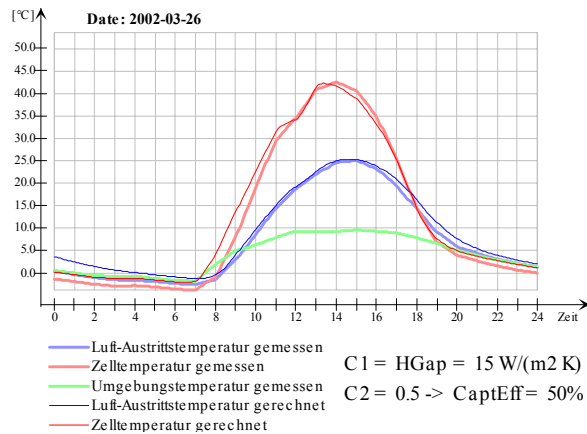


Fig. 23

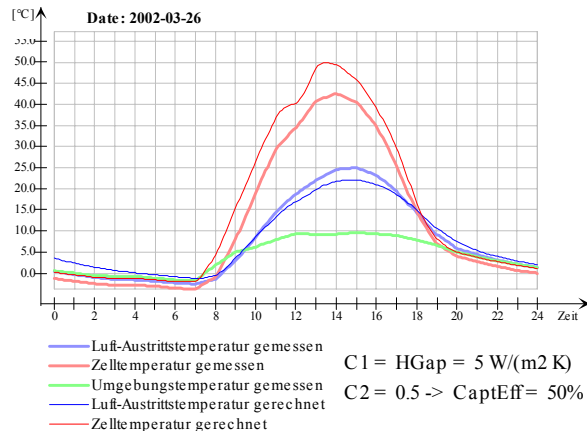


Fig. 24

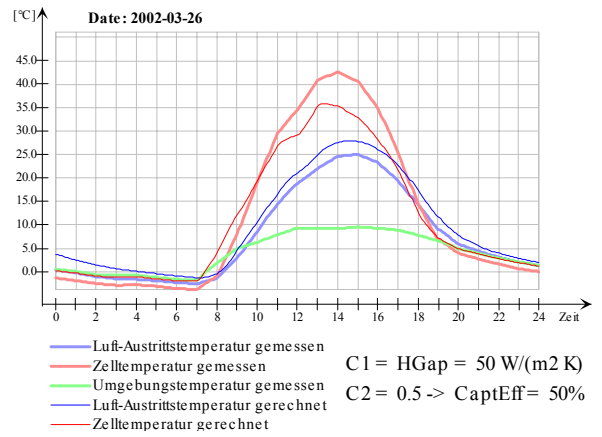


Fig. 25: Vergleich Messung - Simulation

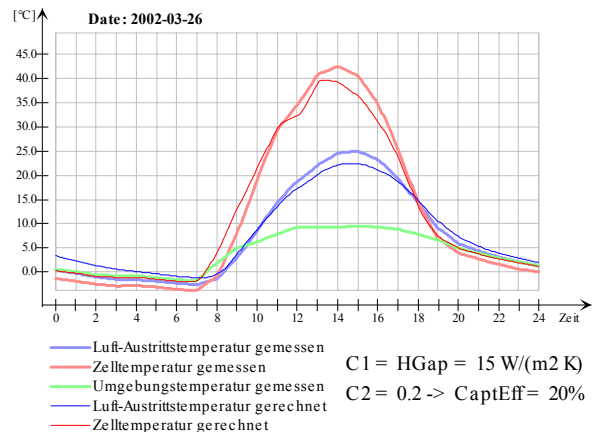


Fig. 26

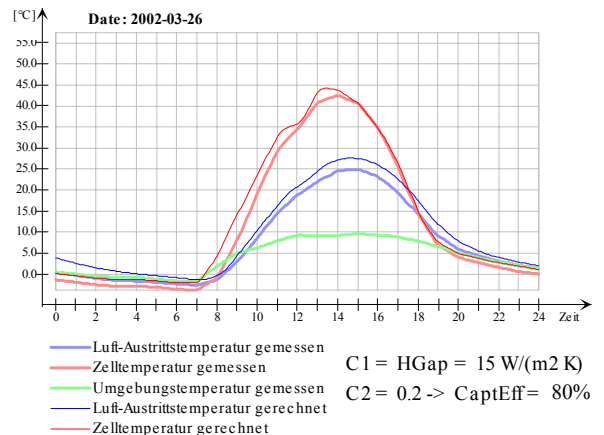


Fig. 27

Wie erwartet führt ein höherer Wert für den Wärmeübergangskoeffizienten HGap zu einer kleineren Differenz zwischen TCell und TOut, was für den PV/T-Kollektor anzustreben ist. Der Einfluss auf TCell ist dabei etwa doppelt so stark wie derjenige auf TOut.

Der Einfluss des Wärme-Erfassungsgrades CaptEff auf TCell und TOut ist kleiner, beträgt aber trotzdem bis zu 3°C. Ein höherer Wert für CaptEff führt erwartungsgemäß zu höheren Temperaturen TCell und TOut.

Für die am 26. März 2002 vorliegenden Bedingungen (insbesondere SpecVolFlowAir = $48 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$) finden wir also folgende geeigneten Parameter:

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \\ n_1 = 10^{-6} \end{array} \right\} \rightarrow \text{HGap} = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$\left. \begin{array}{l} C_2 = 0.5 \\ C_3 = 10^6 \\ C_4 = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \text{CaptEff} = 50\%$$

$$\text{CoeffIns} = 10 \text{ kW/K}$$

$$\text{CapIns} = 150 \text{ kJ/K}$$

Schritt 3

Im dritten Schritt sollen die beiden ersten Schritte für andere Tage (mit anderen Luftmassenströmen) wiederholt werden:

3 Tage später - am 29. März 2003 - lief der Ventilator auf hoher Stufe ($75 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$). Mit denselben Parameterwerten sieht der Vergleich zwischen Messung und Simulation wie folgt aus:

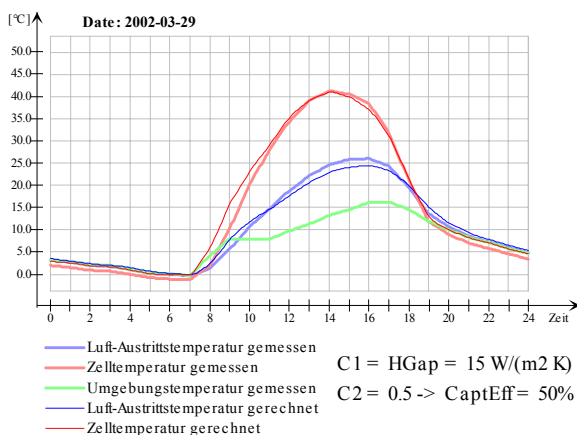


Fig. 28

Um eine noch bessere Übereinstimmung zu bekommen, müssen sowohl HGap als auch CaptEff erhöht werden:

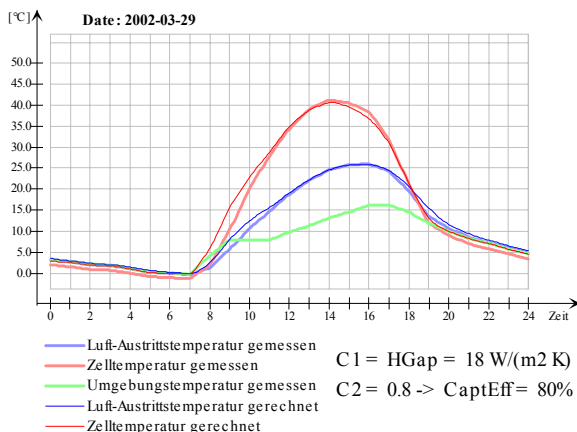


Fig. 29

Am 25. März lief der Ventilator auf tiefer Stufe ($18 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$). Hier sieht der Vergleich zwischen Messung und Simulation wie folgt aus:

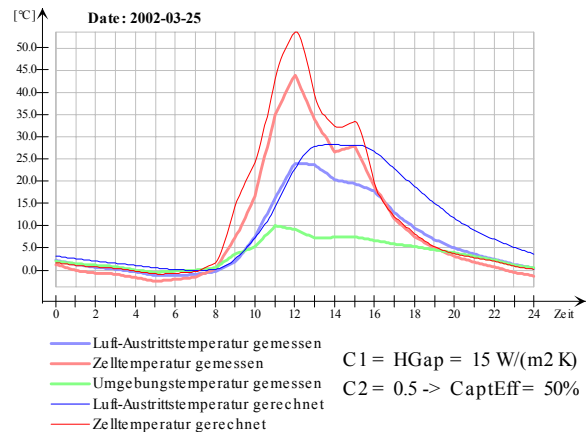


Fig. 30

Um eine bessere Übereinstimmung zu bekommen, müssen HGap und CaptEff erwartungsgemäss kleiner sein. Aber auch CapIns muss verkleinert werden:

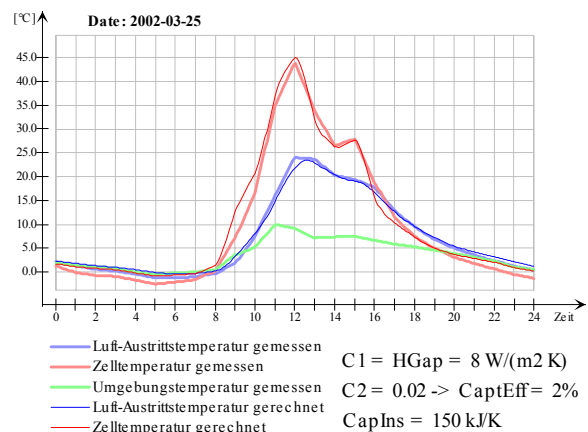


Fig. 31: Vergleich Messung - Simulation

CapIns kann aber nicht von der Luftgeschwindigkeit abhängig sein. Also wird getestet, wie gut die Übereinstimmung mit dem neuen kleineren Wert für CapIns an den beiden anderen Tagen noch stimmt. Die Übereinstimmung bleibt hier gut, wenn die anderen Parameter für HGap und CaptEff geringfügig angepasst werden:

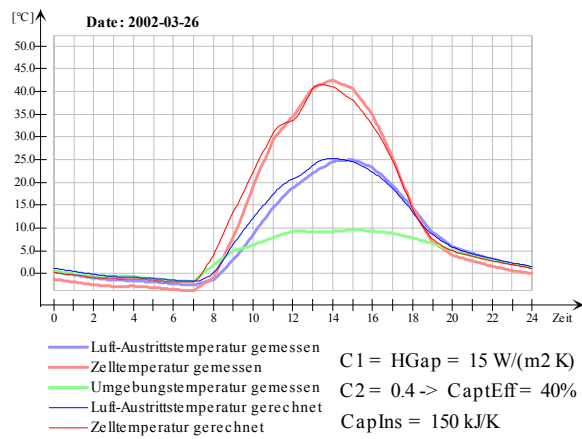


Fig. 32

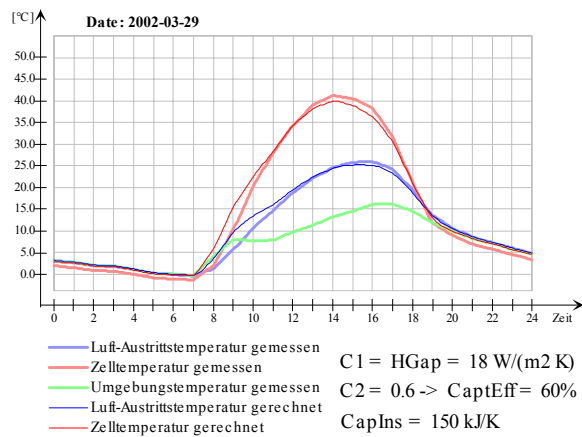


Fig. 33

Am 30. Januar lief der Ventilator auf $20.5 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Eine gute Übereinstimmung kann für folgende Werte für HGap und CaptEff gefunden werden:

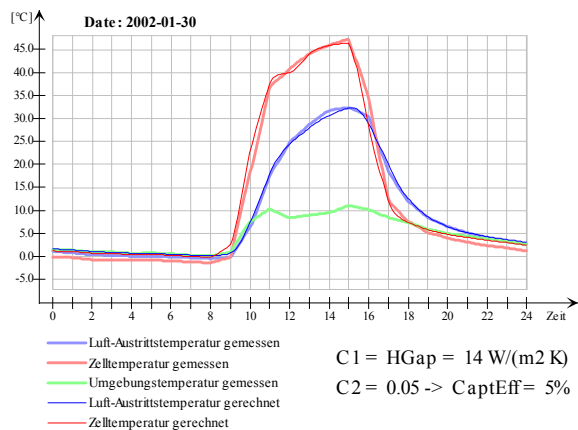


Fig. 34

Am 10. März lief der Ventilator auf $130 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Eine gute Übereinstimmung kann für folgende Werte für HGap und CaptEff gefunden werden:

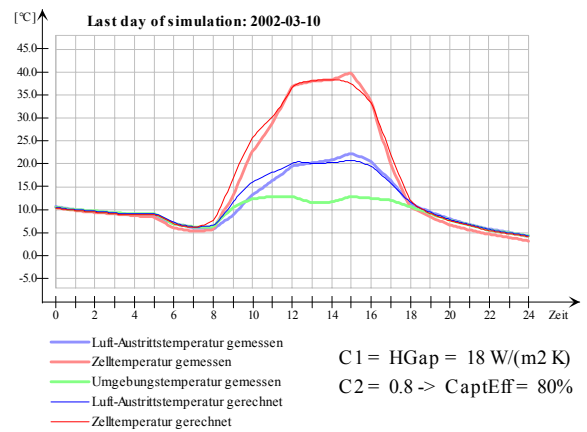


Fig. 35

Am 5. April lief der Ventilator auf $126 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Eine gute Übereinstimmung kann für folgende Werte für HGap und CaptEff gefunden werden:

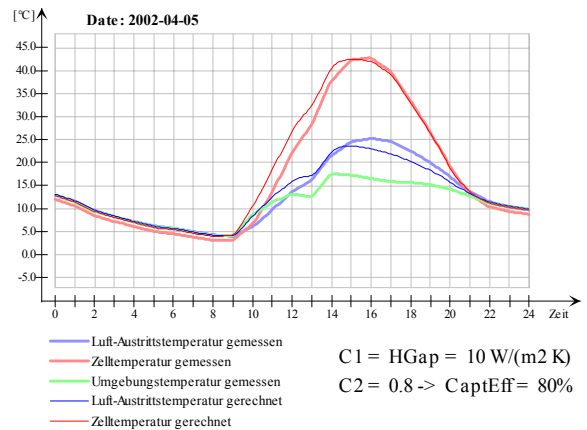


Fig. 36

Der tiefe Wert für HGap scheint hier für den grossen Luftmassenstrom eher unrealistisch.

Schritt 4

In einem letzten Schritt sollen nun die Abhängigkeiten von HGap und CaptEff von der Luftgeschwindigkeit im Spalt bzw. dem Luftmassenstrom so gefunden werden, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für alle Tage gut ist. Mit konstanten HGap und CaptEff ist diese Übereinstimmung immer an einzelnen Tagen schlecht:

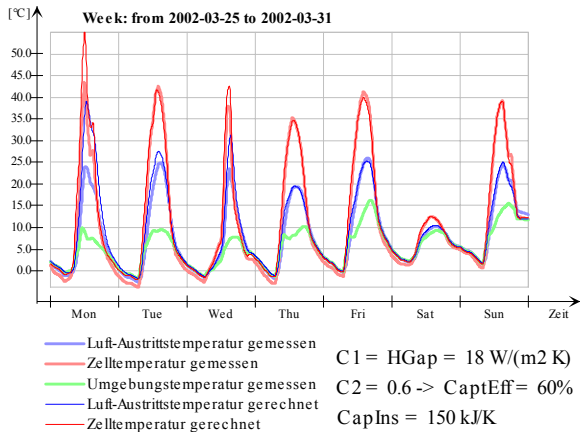


Fig. 37: Hohe Werte für HGap und CaptEff führen zur Überschätzung von TCell und TOut an Tagen mit kleinen Luftmassenströmen (Montag bis Mittwoch)

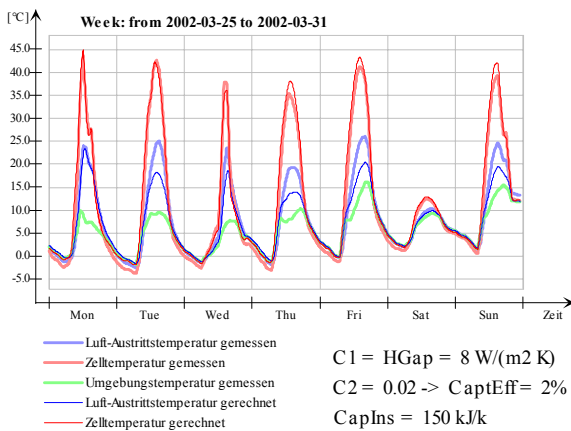


Fig. 38: Tiefe Werte für HGap und CaptEff führen zur Unterschätzung von TOut an Tagen mit grossen Luftmassenströmen (Dienstag bis Freitag)

Der Ansatz für HGap lautet:

$$HGap = C_1 \cdot v_{AirGap}^{n_1} \quad (\text{mindestens } HGap_{Min})$$

und derjenige für CaptEff lautet:

$$CaptEff = C_2 \cdot \left(1 - e^{-C_3 \frac{MAir - C_4}{ATot}} \right) \quad (\text{mind. } CaptEff_{Min})$$

Durch Verändern der Parameter C_1 , n_1 , C_2 , C_3 und C_4 soll die beste Übereinstimmung für die ganze Woche gesucht werden. Dabei helfen die in den vorgängigen Schritten gefundenen Werte für HGap und CaptEff für die einzelnen Tage:

Tag	vAirGap	HGap	MAir	CaptEff
30.1.	0.4 m/s	14 W/(m² K)	0.05 kg/s	5 %
8.3.	2.4 m/s	18 W/(m² K)	0.28 kg/s	80 %
25.3.	0.3 m/s	8 W/(m² K)	0.04 kg/s	2 %
26.3.	0.9 m/s	15 W/(m² K)	0.11 kg/s	40 %
29.3.	1.4 m/s	18 W/(m² K)	0.17 kg/s	60 %
5.4.	2.3 m/s	10 W/(m² K)	0.27 kg/s	80 %

Tab. 1: In Schritt 1-3 bestimmte Werte für HGap und CaptEff bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten bzw. Luftmassenströmen.

Die beste Kurven-Anpassung für HGap (siehe Fig. 39) findet man bei:

$$C_1 = 15.1 \\ n_1 = 0.27$$

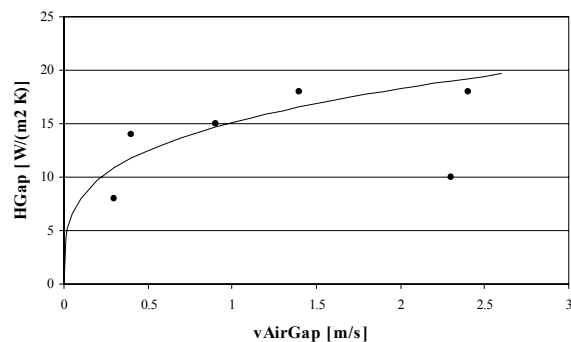


Fig. 39: Kurven-Anpassung für HGap

Die beste Kurven-Anpassung für CaptEff (siehe Fig. 40) findet man bei:

$$C_2 = 0.94 \\ C_3 = 52.9 \\ C_4 = 0.043$$

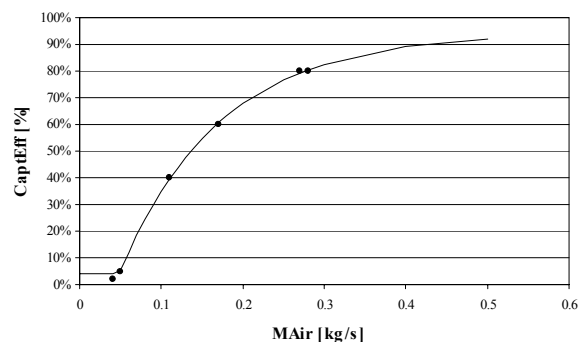
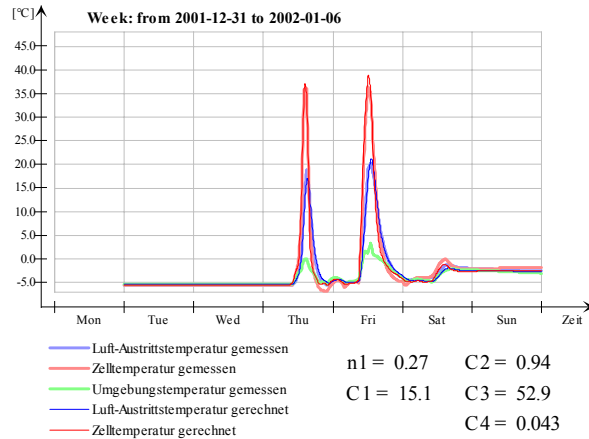
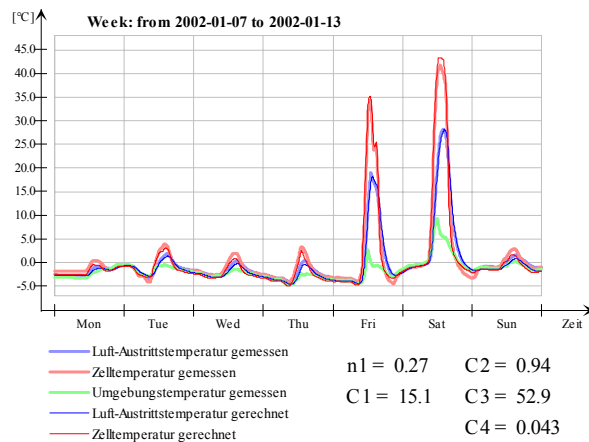
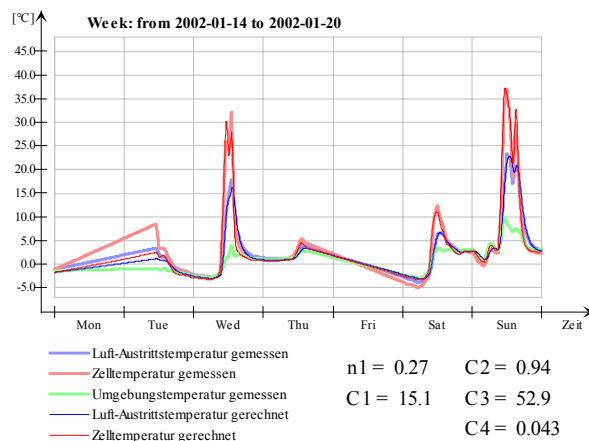
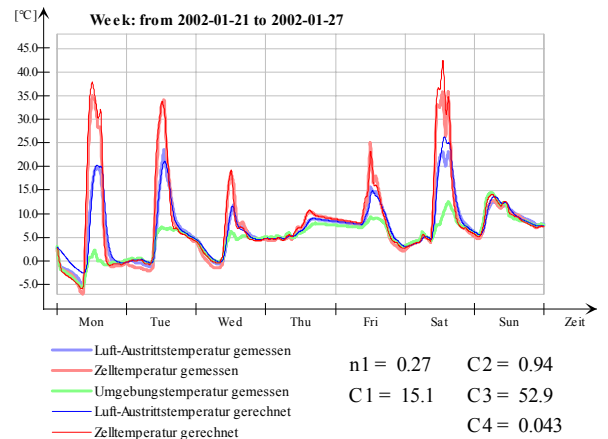
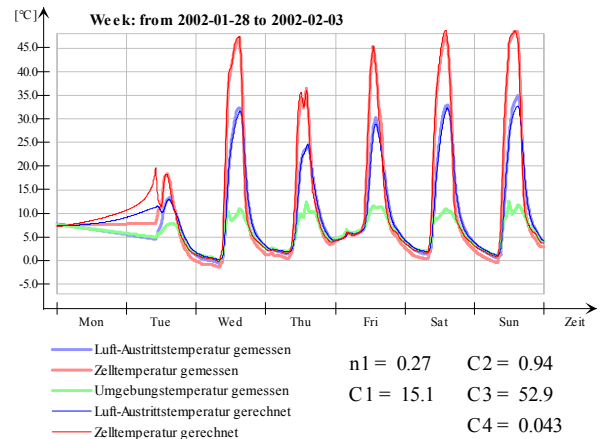
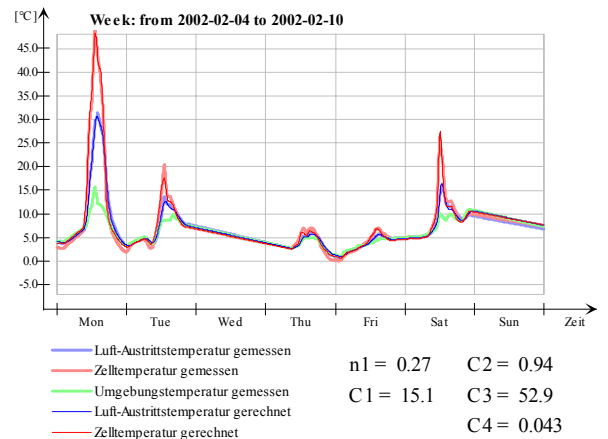
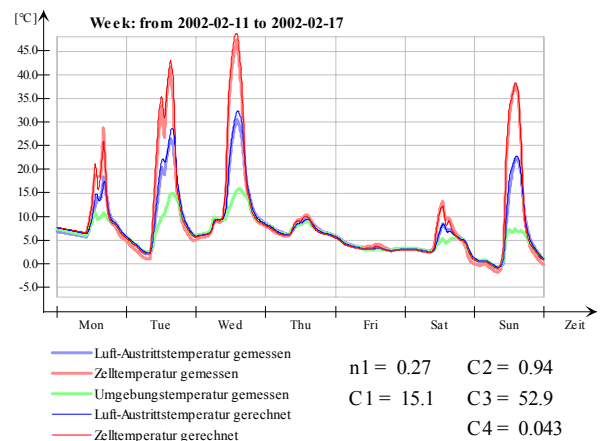


Fig. 40: Kurven-Anpassung für CaptEff

Schritt 5

Als letzter Schritt wird die Übereinstimmung von Messung und Simulation für die ganze Messzeit vom 11. Januar bis zum 7. April überprüft (Fig. 41-54). Dabei stellt sich heraus, dass der Wert für CaptEff bei kleinem Luftmassenstrom sehr heikel ist. Über die ganze Messperiode erhält man die beste Übereinstimmung der Simulation mit den Messwerten, wenn man zusätzlich zu den bereits bestimmten Parametern CaptEffMin auf 0.06 setzt:

**Fig. 41****Fig. 42****Fig. 43****Fig. 44****Fig. 45****Fig. 46****Fig. 47**

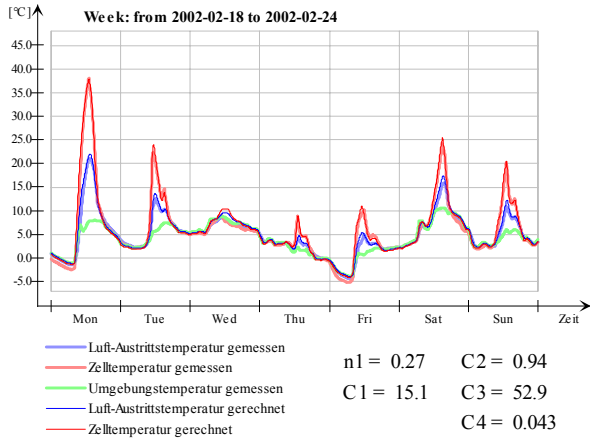


Fig. 48

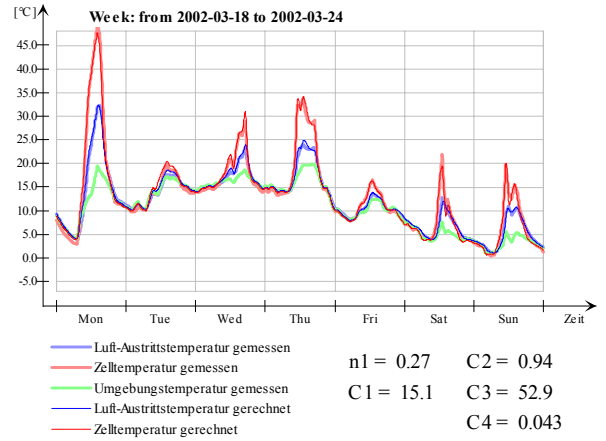


Fig. 52

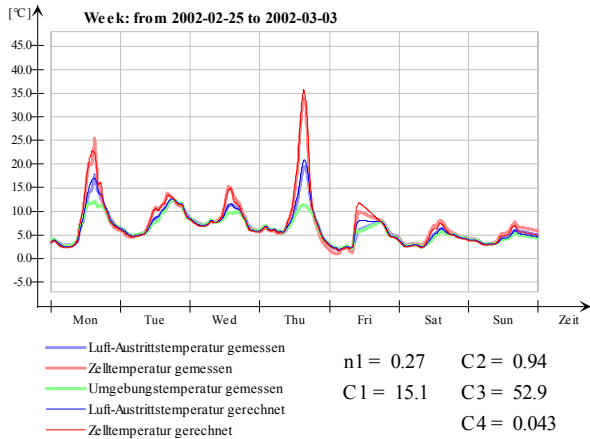


Fig. 49

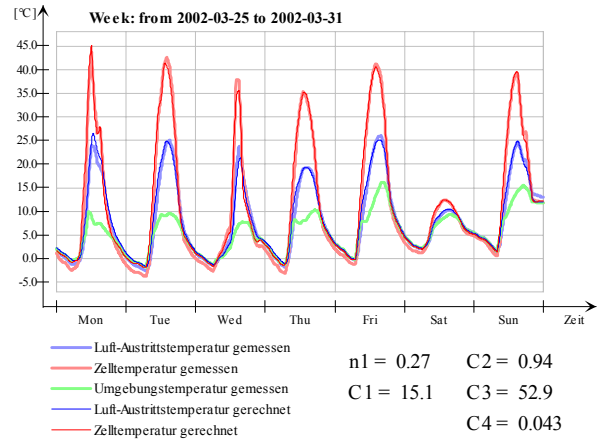


Fig. 53

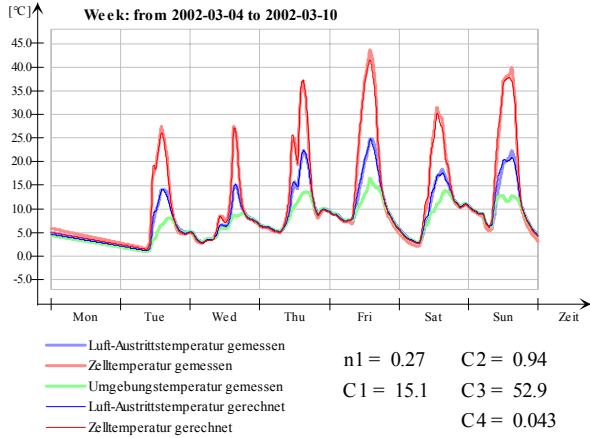


Fig. 50

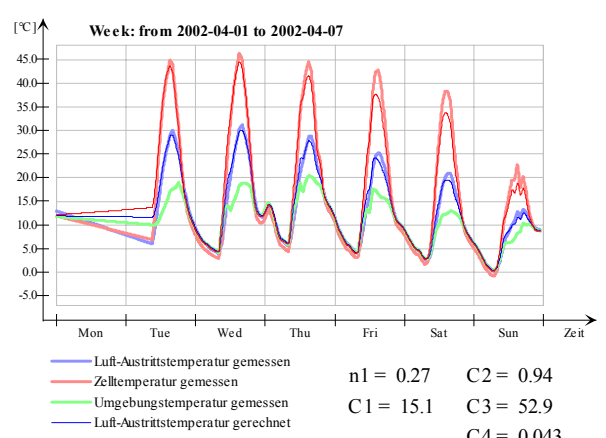


Fig. 54

Für die Labormessung HTA finden wir somit folgende Parameterwerte:

$H_{GapMin} = 0.1 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
 $C_1 = 15.1$
 $n_1 = 0.27$
 $C_{aptEffMin} = 0.06$
 $C_2 = 0.94$
 $C_3 = 52.9$
 $C_4 = 0.043$
 $C_{Back_1} = 10^{-6}$
 $C_{Back_2} = 10^{-6}$
 $Coeff_{flns} = 10'000 \text{ W/K}$
 $Cap_{flns} = 150'000 \text{ J/K}$

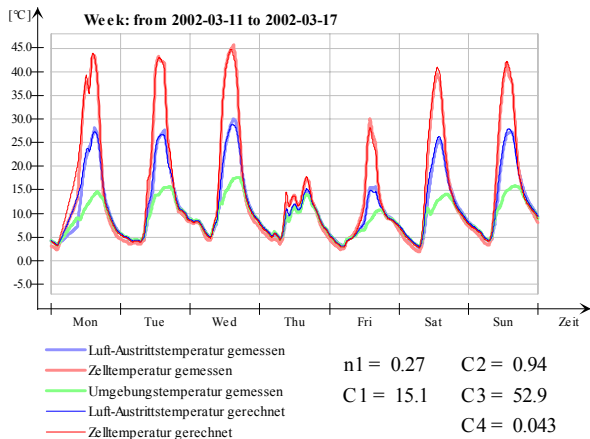


Fig. 51

Validierung anhand der Feldmessung Steinhausen

Messdatum: 4. Juni 2002 - 13. Oktober 2002

Messbericht siehe ([3] Kropf 2002)

$A_{Tot} = 12.32 \text{ m}^2$

$n_{Mod} = 8$

Slope = 45°

ModWidth = 4.4 m

GapWidth = 6 mm

GapLength = 40 cm

SpecVolFlowAir = $20 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$

Steuerung Ventilator: On/Off nach TOut

Folgende Parameter werden im Voraus
festgesetzt:

$n_{Mod} = 8$

$VolAirChan = 0.8 \text{ m}^3$

GapWidth = 0.006 m

GapLength = 0.4 m

ModWidth = 4.4 m

ModLength = 0.7 m

ModThick = 0.006 m

ELW2Sky = 0.9

ELW2Grd = 0.9

Refl = 0.09

EtaEI = 0.0989

ElDeg = 0.005

Slope = 45°

$RhoMod = 2500 \text{ kg/m}^3$

$CMod = 800 \text{ J/(kg K)}$

Da dieselben Module verwendet werden wie bei der Labormessung, werden auch ähnliche Werte für die 11 gesuchten Parameter erwartet. Abweichungen gegenüber der Labormessung bestehen jedoch bei:

1. der Breite des PV/T-Feldes (ModWidth), was keinen grossen Einfluss auf die gesuchten Parameter haben sollte.
2. dem Neigungswinkel (Slope), was den Wert von HGap und CaptEff verändern kann.
3. der Wärmedämmung in der Unterkonstruktion, was zu anderen Werten für CapIns und CoeffIns führen kann.
4. der Steuerung des Ventilators (on/off). Da der Ventilator ganz abgestellt wird, wenn die Luft-Austrittstemperatur einen bestimmten Wert unterschreitet, sind CBack₁ und CBack₂ nicht mehr vernachlässigbar. Weil der Ventilator nur auf einer Stufe läuft, macht es keinen Sinn, mit variablen Werten für HGap und CaptEff zu rechnen.

Schritt 1

Um HGap und CaptEff konstant zu halten, wird wieder $n_1 \approx 0$, $C_3 \approx \infty$ und $C_4 = 0$ gesetzt:

$$n_1 = 10^{-6}$$

$$C_3 = 10^6$$

$$C_4 = 0$$

Daraus folgt $HGap = C_1$ und $CaptEff = C_2$.

In einem ersten Schritt werden dann für die erste Messwoche Messungen und Simulationsresultate für verschiedene CapIns, CBack, HGap und CaptEff verglichen und nach den Parameterwerten mit der besten Übereinstimmung gesucht:

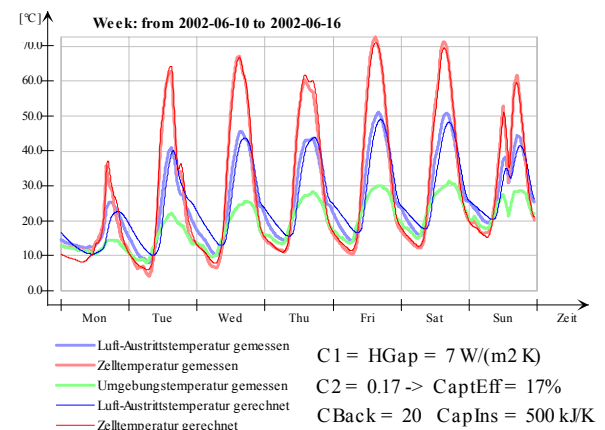
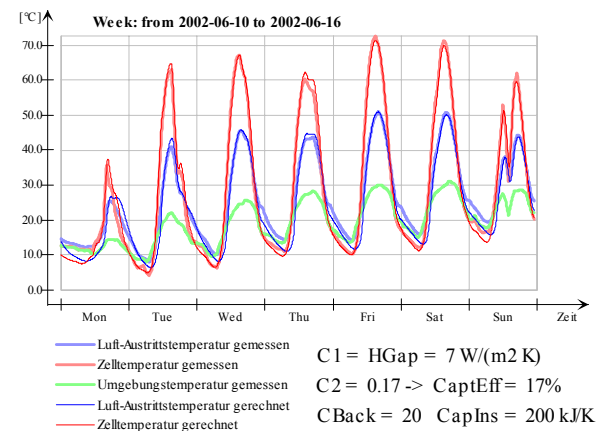
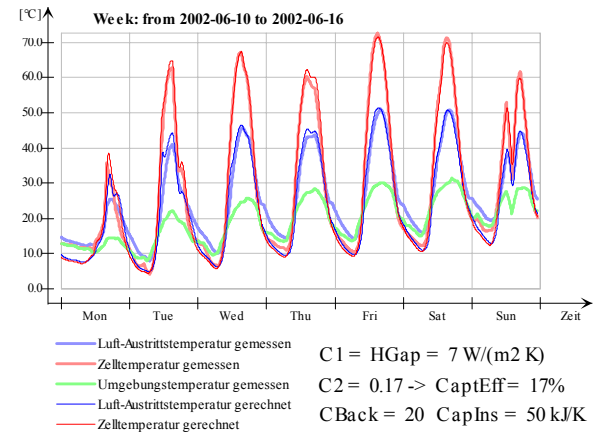


Fig. 55: Simulation mit verschiedenen Werten für CapIns.

Fig. 55 zeigt die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für $\text{CapIns} = 200 \text{ kJ/K}$. Ein kleinerer Wert führt zu einem zu frühen Peak von T_{Out} und umgekehrt führt ein grösserer Wert zu einem zu späten Peak von T_{Out} .

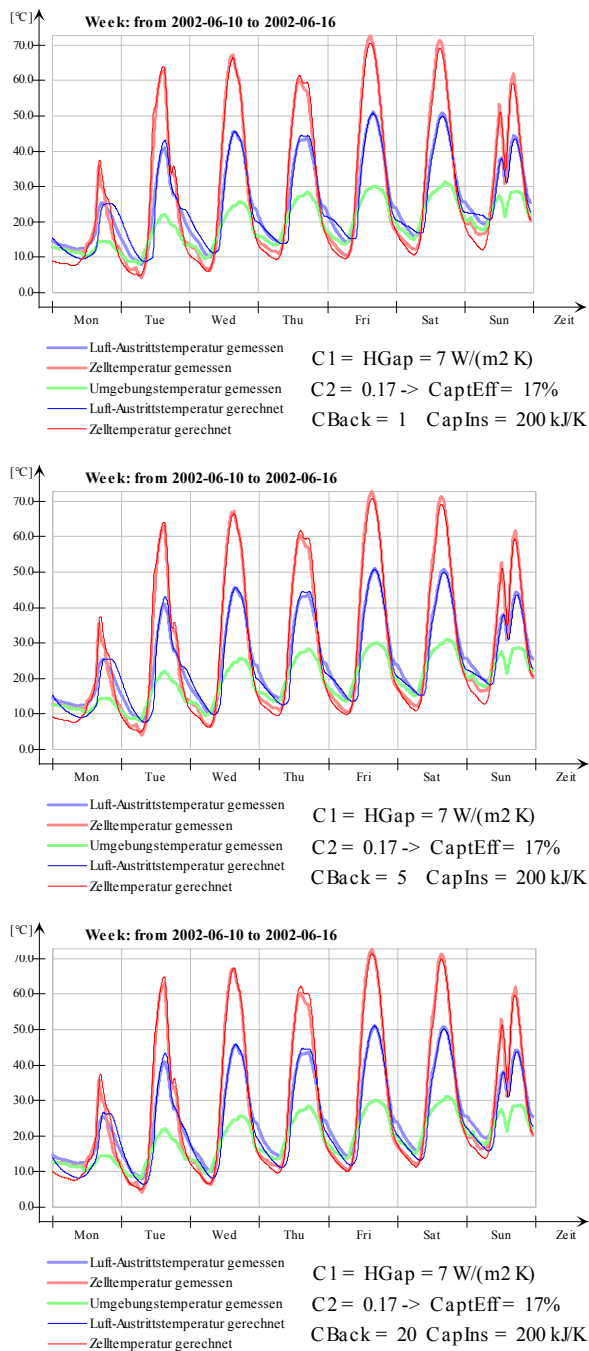


Fig. 56: Simulation mit verschiedenen Werten für $C\text{Back}$ ($C\text{Back1}$ und $C\text{Back2}$ wurden immer auf denselben Wert gesetzt).

Fig. 56 zeigt die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für $C\text{Back} = 5$. $C\text{Back}$ hat vor allem Einfluss auf das "Abklingen" von T_{Out} während der Nacht.

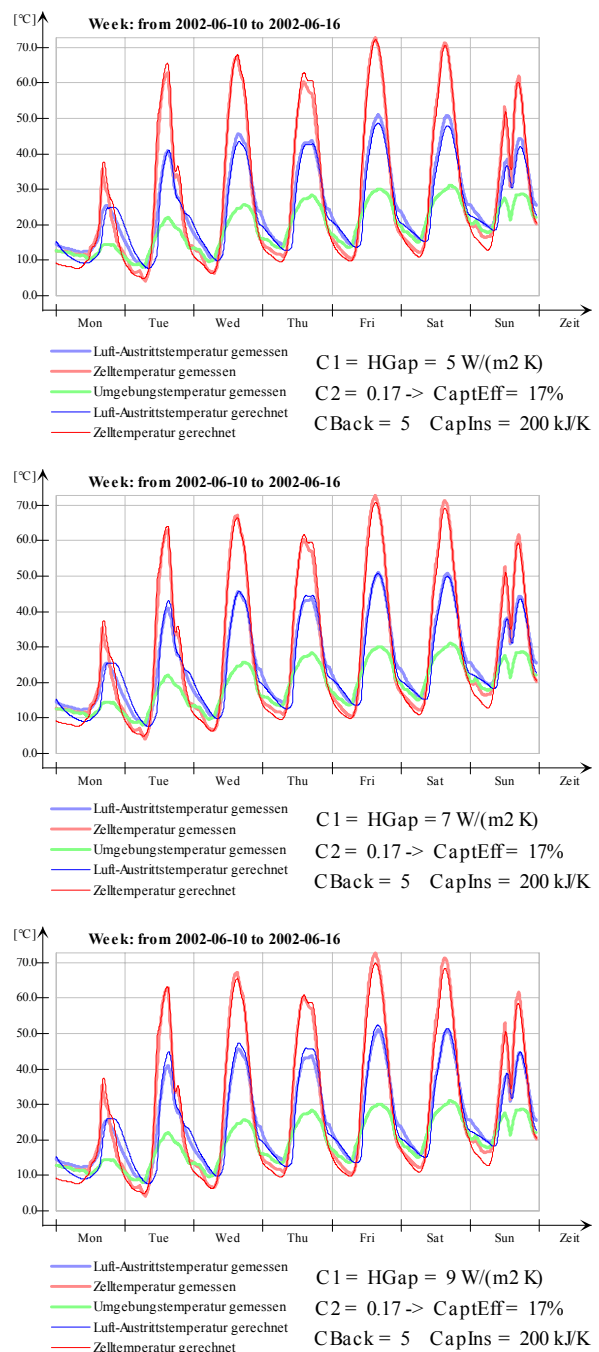


Fig. 57: Simulation mit verschiedenen Werten für HGap .

Fig. 57 zeigt die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für $\text{HGap} = 7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Ein kleinerer Wert führt zu einem zu grossen Abstand zwischen den beiden Peaks von T_{Cell} und T_{Out} und umgekehrt führt ein grösserer Wert zu einem zu kleinen Abstand zwischen den beiden Peaks von T_{Cell} und T_{Out} .

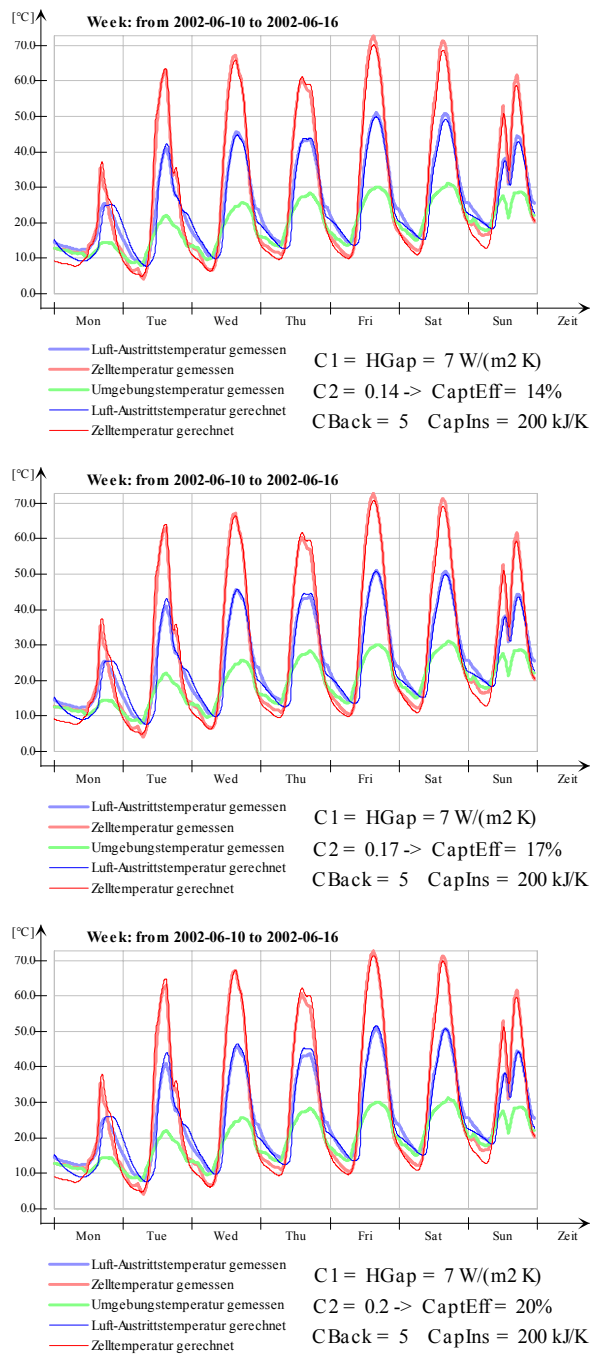


Fig. 58: Simulation mit verschiedenen Werten für CaptEff.

Fig. 58 zeigt die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für CaptEff = 14%. Ein grösserer Wert führt zu hohen Peaks von TCell und von TOut.

Schritt 2

Als letzter Schritt wird die Übereinstimmung von Messung und Simulation für die ganze Messzeit vom 4. Juni bis zum 13. Oktober überprüft (Fig. 59-77).

Die Simulationsergebnisse sind an Tagen mit wenig Sonne nicht immer genügend (siehe z.B. Fig. 75). Hauptgrund dafür ist die schlechte Übereinstimmung des Modells mit der Wirklichkeit in zwei Fällen: Einerseits bei nicht laufendem Ventilator und andererseits bei zu ungenau erfasster Diffusstrahlung. Aus denselben Gründen stimmen die Simulationsergebnisse auch Nachts nicht immer gut mit den Messungen überein (siehe z.B. Fig. 76).

Wesentlich ist aber, dass die Resultate dann stimmen, wenn das System in Betrieb ist. Qualitativ stimmen die berechneten Tagesverläufe der Zell- und der Luft-Austrittstemperatur sehr gut überein und deren Tagesmaxima weichen um höchstens 2°C ab:

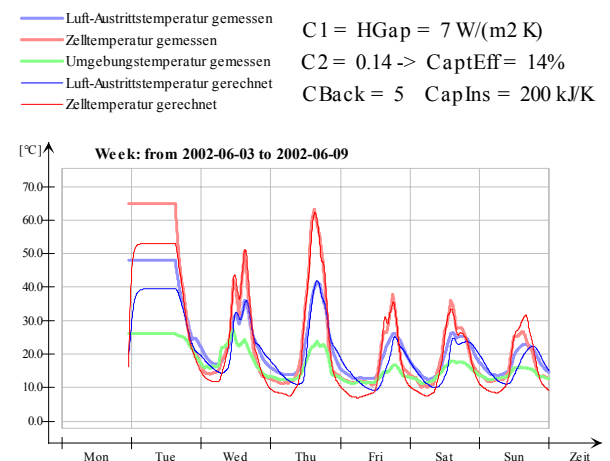


Fig. 59

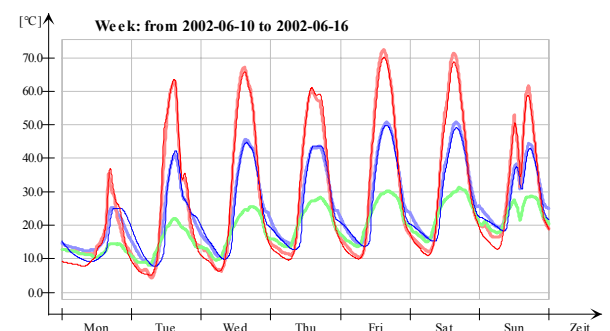


Fig. 60

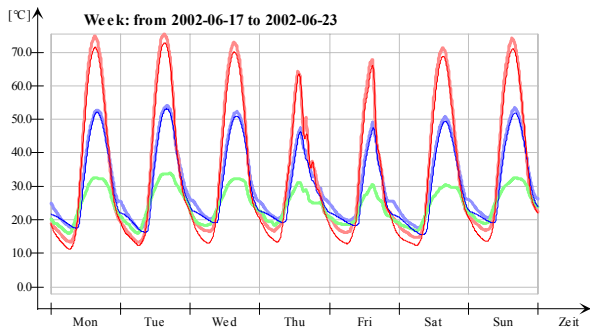


Fig. 61

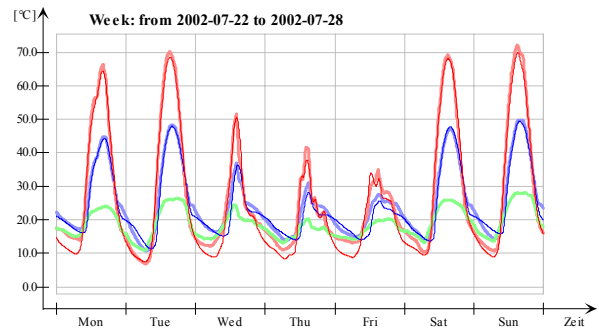


Fig. 66

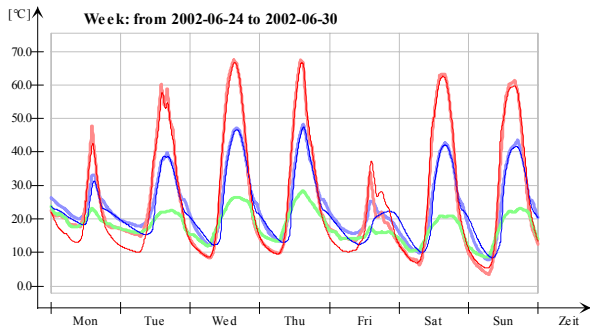


Fig. 62

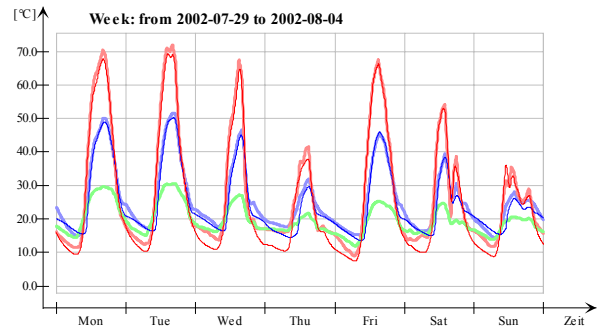


Fig. 67

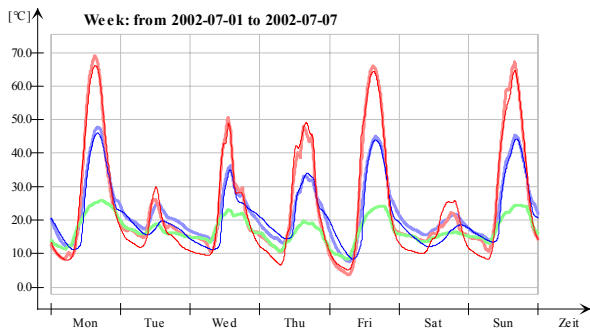


Fig. 63

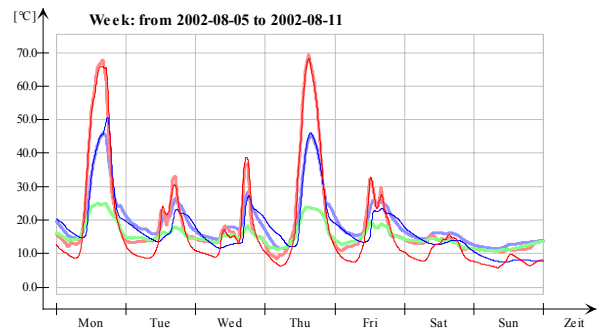


Fig. 68

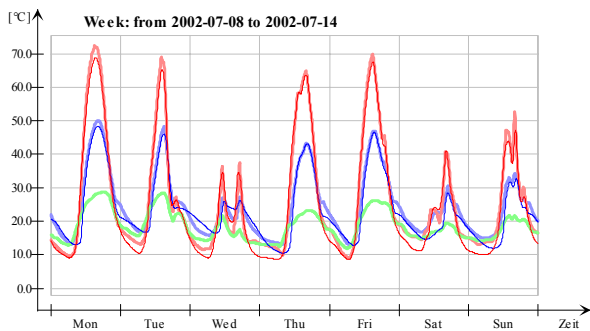


Fig. 64

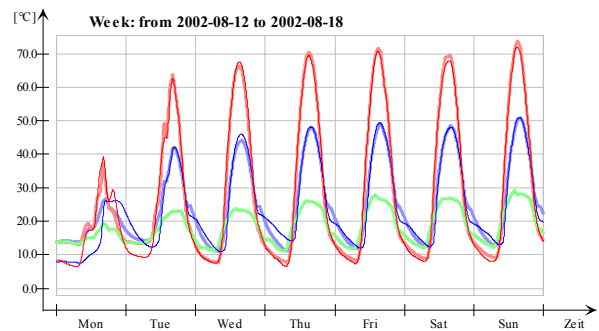


Fig. 69

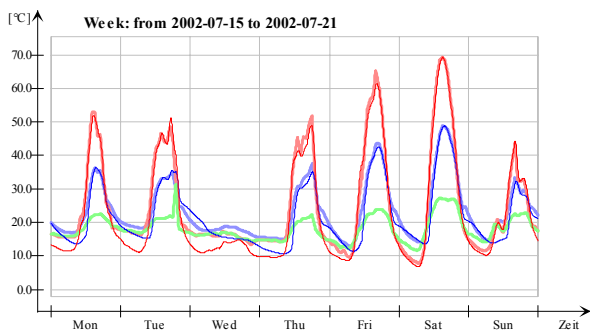


Fig. 65

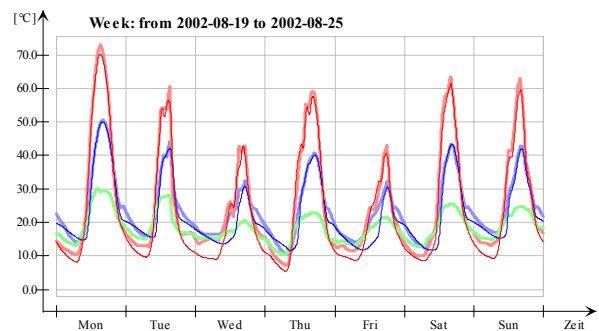


Fig. 70

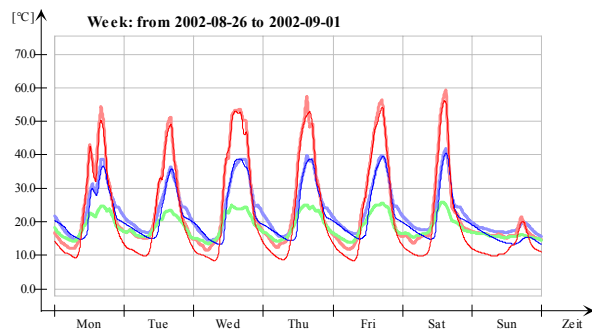


Fig. 71

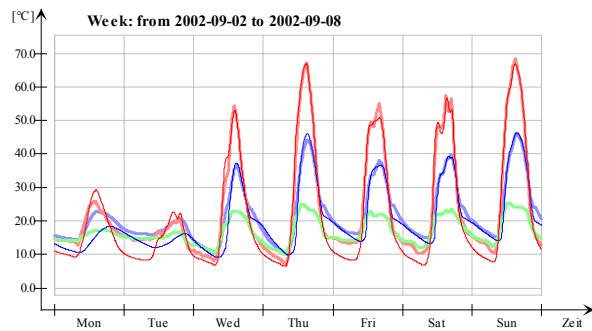


Fig. 72

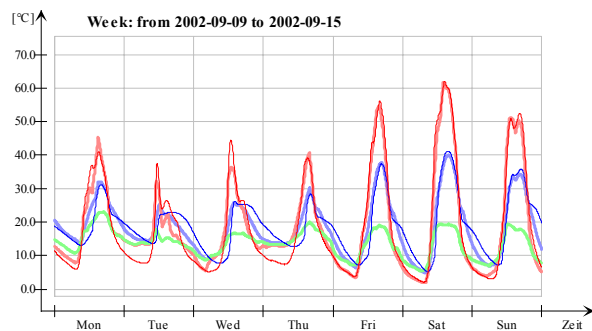


Fig. 73

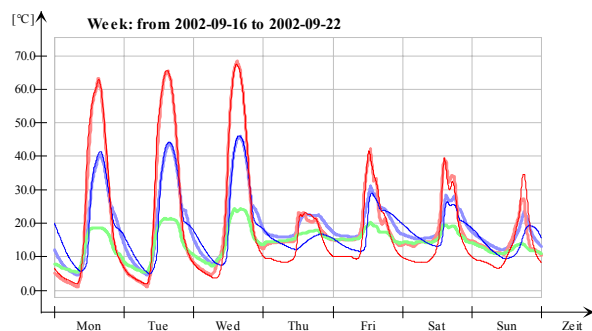


Fig. 74

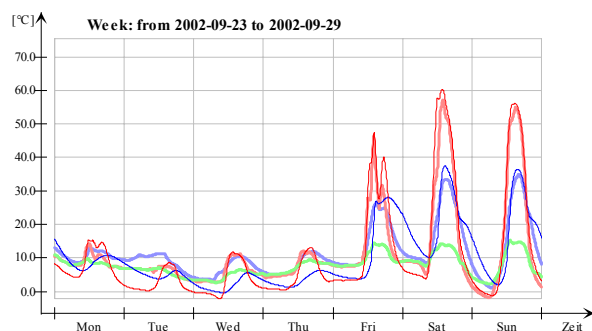


Fig. 75

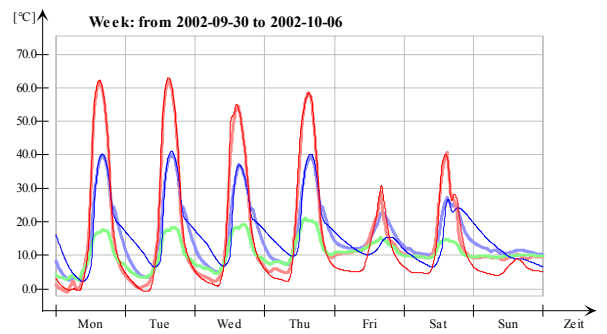


Fig. 76

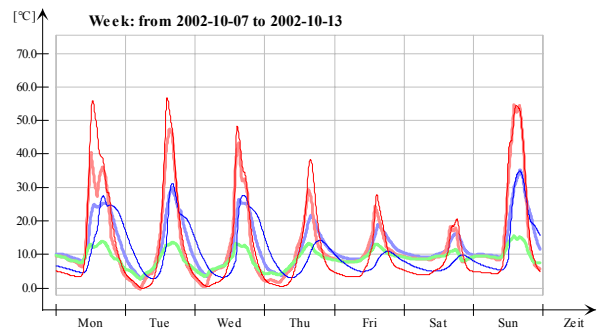


Fig. 77

Die Frage nach möglichen Gründen für die kleine Abweichung der Tagesmaxima kann nicht eindeutig beantwortet werden. Da die Temperaturen nicht regelmässig gleich unter- oder überschätzt werden, muss der gesuchte Einfluss ein zeitlich unkonstanter sein.

Eine mögliche Ursache wäre beispielsweise die zu ungenaue Bestimmung der Himmelstemperatur. In der Simulation wird dazu folgender einfache Ansatz angewendet:

$$T_{\text{Sky}} = T_{\text{Amb}} - 10^{\circ}\text{C}$$

Welchen Einfluss eine Abweichung der Himmelstemperatur um 10°C auf die Zell- und die Luft-Austrittstemperatur hat, zeigt Fig. 78. Je nach Annahme der Himmelstemperatur stimmen die Resultate für die einen oder die anderen Tage. Da die Himmelstemperatur abhängig ist von vielen anderen Grössen nebst der Umgebungstemperatur kann es tatsächlich sein, dass am einen Tag der eine Ansatz besser stimmt und am anderen der andere.

Eine andere mögliche Ursache kann auch der Einfluss des Windes sein, welcher nicht alle Tage gleich stark ist und im Modell nicht genügend mitberücksichtigt wurde.

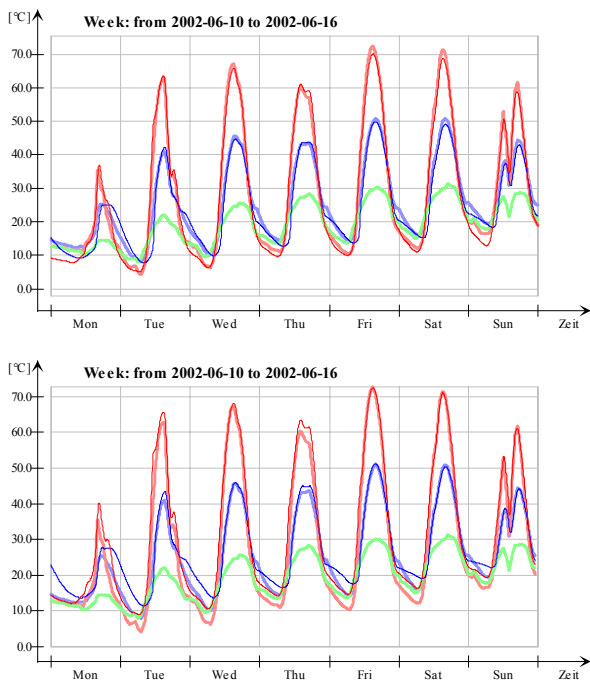


Fig. 78: Simulation der ersten Messwoche mit $T_{sky} = T_{Amb} - 10^\circ\text{C}$ (oben) im Vergleich mit derselben Simulation mit $T_{sky} = T_{Amb}$

Im Allgemeinen stimmen die Simulationen während den Betriebszeiten des PV/T-Kollektors genügend genau überein.

Für die Feldmessung am Obstweg 12 in Steinhausen finden wir somit folgende Parameterwerte:

$H_{GapMin} = 0.1 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
 $C_1 = 7$
 $n_1 = 10^{-6}$
 $CaptEffMin = 0.06$
 $C_2 = 0.14$
 $C_3 = 10^6$
 $C_4 = 0$
 $CBack_1 = 5$
 $CBack_2 = 5$
 $CoeffIns = 20'000 \text{ W/K}$
 $CapIns = 200'000 \text{ J/K}$

Da der PV/T-Kollektor immer mit demselben Luftvolumenstrom betrieben wurde, ist es nicht möglich, H_{Gap} und $CaptEff$ für andere Luftvolumenströme zu bestimmen. Die oben aufgeführten Parameterwerte gelten deshalb ausschliesslich für:

Neigungswinkel 45°
 Spaltlänge 30 cm
 Spaltweite 6 mm
 spez. Luftvolumenstrom $22 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$
 -> Luftgeschwindigkeit im Spalt 0.4 m/s

Zusammenfassung

Ursprünglich war geplant, die Parameter für mehrere Spaltweiten und für mehrere Neigungswinkel in Abhängigkeit des Luftvolumenstromes zu bestimmen. Dies ist aber mit den durchgeführten Messungen nicht gelungen. Fig. 79 und Fig. 80 zeigen die in der zweiten Validierung bestimmten Werte für H_{Gap} bzw. $CaptEff$ im Vergleich zu den in der ersten Validierung bestimmten Werten in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit im Spalt bzw. des Luftmassenstroms.

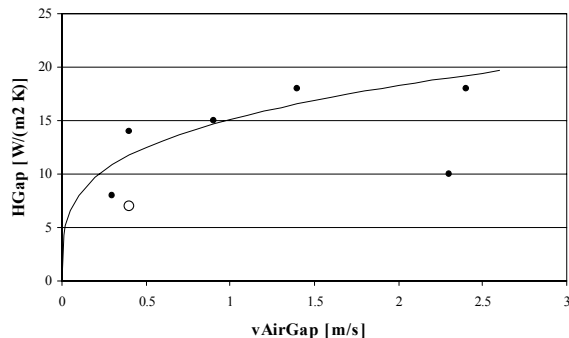


Fig. 79: Linie und schwarze Punkte: In der ersten Validierung (Neigungswinkel 90°) bestimmten Werte für H_{Gap} in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit im Spalt.

Weisser Punkt: In der zweiten Validierung (Neigungswinkel 45°) bestimmter Wert für H_{Gap} bei $v_{AirGap} = 0.4 \text{ m/s}$.

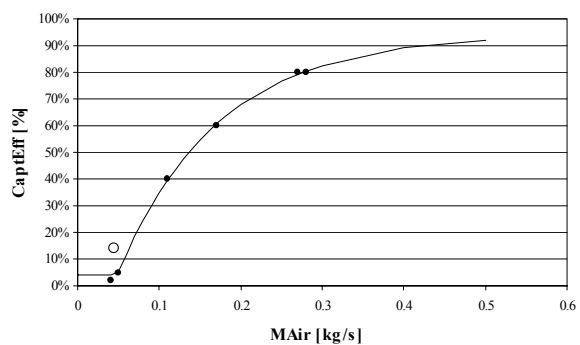


Fig. 80: Linie und schwarze Punkte: In der ersten Validierung (Neigungswinkel 90°) bestimmten Werte für $CaptEff$ in Abhängigkeit des Luftmassenstroms.

Weisser Punkt: In der zweiten Validierung (Neigungswinkel 45°) bestimmter Wert für $CaptEff$ bei $MAir = 0.085 \text{ kg/s}$, was bezogen auf die kleinere Fläche der ersten Messung einem Luftmassenstrom von 0.045 kg/s entspricht.

Hingegen ist es gelungen, für folgende Situationen alle im Modell enthaltenen Parameter soweit zu identifizieren, dass eine äusserst genaue Voraussage der zu erwartenden PV/T-Luftaustrittstemperatur ($\pm 2^\circ\text{C}$) möglich ist:

Situation 1

nMod = 8
Slope = 45°
GapWidth = 6 mm
GapLength = 40 cm
SpecVolFlowAir = $20 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2)$

Situation 2

nMod = 8
Slope = 90°
GapWidth = 6 mm
GapLength = 40 cm
SpecVolFlowAir = $15 \dots 130 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2)$

Bei genauerer Kenntnis bestimmter Wetterparameter (z.B. Himmelstemperatur, Windgeschwindigkeit) kann mit noch genaueren Voraussagen gerechnet werden.

Das Modell ist auch für andere Situationen anwendbar, wenn auch die Genauigkeit dabei etwas nachlässt. Um in allgemeinen Fällen auf gleich oder ähnlich genaue Voraussagen zu kommen, wären entweder weitere experimentell unterstützte Parameter-Identifikationen oder genauere experimentelle Untersuchungen am Spalt (Wärmeübergangskoeffizient und Wärme-Erfassungsgrad) notwendig.

Für die geplanten Simulationen zur Untersuchung der Nutzung der Wärme in der PV-Hinterlüftung ist die erreichte Genauigkeit des Modells ausreichend.

9. Literaturverzeichnis

Sämtliche Hefte erhältlich beim Autor

- [1] Sven Kropf: "Multifunktionale Gebäudehülle: Wetterschutz, PV und Luftkollektor"; Zürich 1999.
- [2] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Labormessungen"; Horw 2002.
- [3] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Obstweg 12, Steinhausen"; Horw 2002.
- [5] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Ertragsatlas"; Zürich 2003.
- [6] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Anwendungsbeispiele und Fallstudien"; Zürich 2003.

Web-Adresse

www.equa.se (Entwickler und Vertreiber der IDA Software)