

PV/T-Schiefer

Pilotprojekt Steinhausen



Ausgearbeitet durch
S. Kropf, ETH Zürich

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2003

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Institut für Hochbautechnik, ETH Zürich

Autor:

S. Kropf, ETH Zürich

Begleitgruppe:

A. Moser, ETH Zürich
G. Zweifel, HTA Luzern

M. Zimmermann, EMPA, Programmleiter „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“
A. Eckmanns, Bereichsleiter Gebäude BFE

2003, als Dissertation an der ETH Zürich eingereicht

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, www.empa-ren.ch
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, enet@temas.ch, www.energieforschung.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund und Ziele	5
2. Die Situation vor dem Bau der Anlage	5
3. Die PV/T-Anlage	6
4. Die Messung	8
5. Die Simulation	10
6. Die Optimierungsvorschläge	14
7. Literaturverzeichnis	28
A. Messdaten	31
B. Simulationsresultate	37

Adresse

Sven Kropf
Zentrum für interdisziplinäre Gebäudetechnik
Hochschule für Technik und Architektur
Technikumstr. 21
CH-6048 Horw
Schweiz

sven.kropf@freesurf.ch

Das Projekt wurde unterstützt durch:

Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"
ETH Zürich, Institut für Hochbautechnik, Fachgruppe Air&Climate

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 Photo-voltaik. Ein Ziel dieses Projektes ist es, erste Anwendungen in der Praxis zu beschreiben.

Als eine vielversprechende Anwendung gilt dabei u.a. die Kombination mit einer Wärmepumpe. Die Anlage auf dem Gartenhäuschen am Obstweg 12 in Steinhausen ZG ist die erste Realisierung eines solchen Systems.

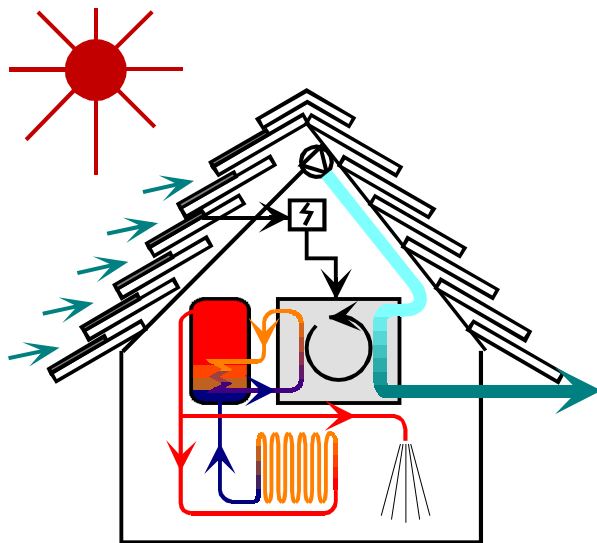


Fig. 1: Das Prinzip: PV/T als Quelle einer Luft/Wasser-Wärmepumpe

Das Objekt ermöglicht gleichzeitig eine erste Feldmessung am PV/T-Schiefer. Nach zwei erfolgreich verlaufenen Labormessungen (siehe [1] Kropf 1999 und [2] Kropf 2002) ist diese Feldmessung die logische Fortsetzung und dient einerseits als weitere Erfolgskontrolle in der Praxis und andererseits als Grundlage zur Validierung der dynamischen Simulation des Komponentenertrags und dessen Nutzung im Gebäude (siehe auch [4] Kropf 2003).

Die Erfahrungen, welche im Zusammenhang mit der Feldmessung und den parallel durchgeführten Gebäudesimulationen gemacht werden, sollen folgende Schlussfolgerungen erlauben:

- Optimierung der Steuerung der Anlage in Steinhausen (siehe Kapitel 6).
- Empfehlungen für andere Anlagen nach demselben Prinzip.
- Abschätzungen des Nutzungsgrades auch für andere Anwendungen des PV/T-Schiefers (siehe [6] Kropf 2003).

2. Die Situation vor dem Bau der Anlage



Fig. 2: Obstweg 12, Steinhausen ZG

Im Keller des Einfamilienhauses am Obstweg 12 in Steinhausen ZG (Fig. 3) steht eine Zentralheizung mit integrierter Warmwasser-Aufbereitung.

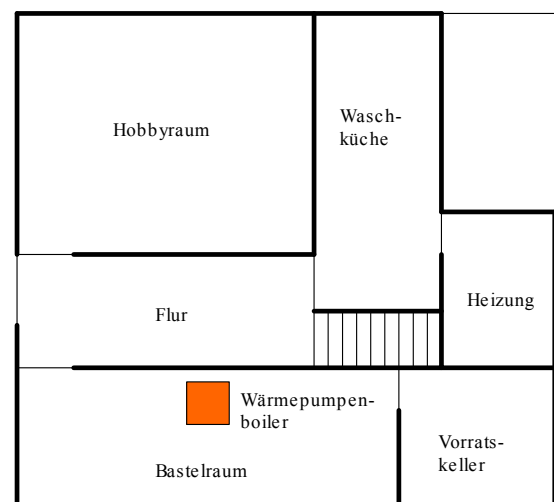


Fig. 3: Grundriss Kellergeschoss Obstweg 12

Ausserhalb der Heizperiode wird der Boilerinhalt mittels Luft/Wasser-Wärmepumpe erwärmt. Die Wärme wird dabei der Raumluft im Keller entzogen, was im Sommer zu Temperaturen von bis zu lediglich 12°C (siehe Fig. 4) und damit zu Feuchtigkeitsproblemen führt. Fig. 3 zeigt das Kellergeschoss mit dem Wärmepumpen-boiler. Beim Temperaturverlauf in Fig. 4 sind die Betriebszeiten der Wärmepumpe klar zu erkennen.

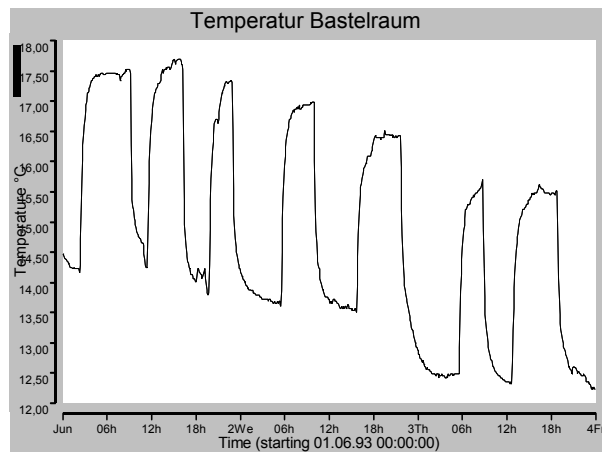


Fig. 4: Temperaturverlauf im Bastelraum vor dem Bau der PV/T-Anlage während 3 Tagen (1.-3. Juni 2001)

3. Die PV/T-Anlage

Im Sommer ist eine höhere Raumtemperatur im Kellergeschoss (insbesondere im Bastelraum) von Vorteil. Dies führt einerseits zu einem geringeren Stromverbrauch für die Warmwasser-Aufbereitung und andererseits zu wärmerer und trockenerer Luft im ganzen Kellergeschoss. Die benötigte Wärme für die Zuluft der Wärmepumpe wird mittels idealer Hinterlüftung den Photovoltaik-Ziegeln (PV/T-Schiefer) entzogen, welche auf dem Dach des Geräteschuppens im Garten der Liegenschaft montiert werden (Fig. 5).



Fig. 5: Gartenhaus mit PV/T-Schiefer

Die Hinterlüftung der PV-Ziegel sorgt gleichzeitig für eine Kühlung der Solarzellen und damit für einen erhöhten elektrischen Wirkungsgrad (Fig. 6).



Fig. 6: Aussenluft wird durch die Spalten zwischen den PV/T-Schiefern in einen Kanal über dem Unterdach abgesaugt. Die PV-Module werden so hinterlüftet und gekühlt.

Durch die Spalten gelangt die Aussenluft in einen Kanal zwischen Unterdach und PV/T-Schiefer und von dort in den Dachgiebelraum.



Fig. 7: Dachgiebelraum



Fig.8: Wärmedämmtes Rohr.

Vom Dachgiebelraum gelangt die Warmluft durch ein im Erdreich verlegtes wärmedämmtes Rohr (Fig. 8) in den Keller (Fig. 9 und Fig. 10).



Fig. 9: Zuluftröhr mit Ventilator im Bastelraum.

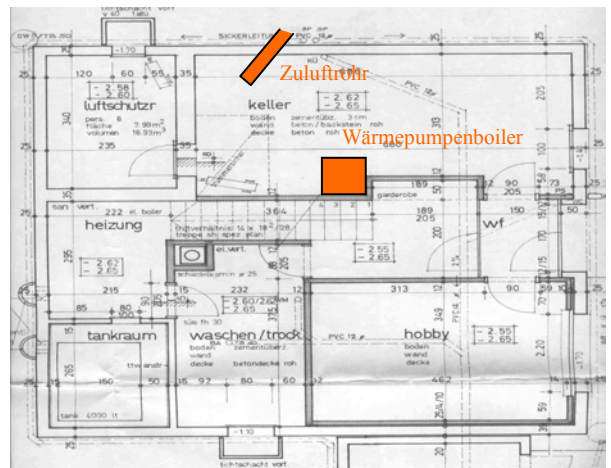


Fig. 10: Skizze des Kellergeschosses mit der Lage des Zuluftröhres und des Wärmepumpenboilers.

Auch während der Heizperiode, wenn die Wärmepumpe ausser Betrieb ist, kann bei sonnigem Wetter die PV-Hinterlüftung der Heizungsunterstützung und der Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades dienen.

Um eine übermässige Erwärmung des Vorratskellers (Luftschutzraum) im Sommer zu verhindern, wird die Warmluft vom Bastelraum durch einen Mauerdurchbruch unterhalb der Treppe in den Trocknungsraum und von dort durch das Kellerfenster wieder ins Freie geleitet.

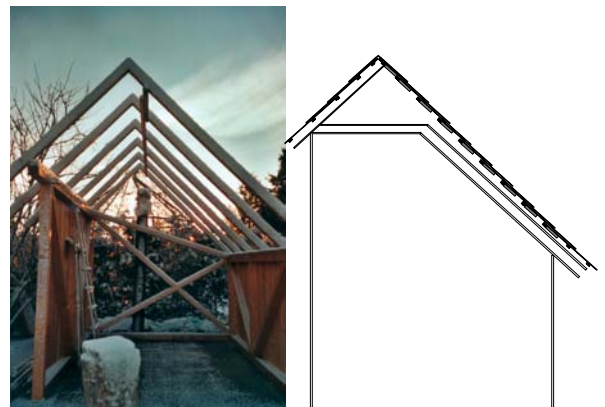


Fig. 11: Gartenhaus im Bau und Skizze der Luftführung und der Wärmedämmung unter den PV/T-Schiefern.

4. Die Messung

Vom 4. Juni bis 14. Oktober 2002 wurde die Anlage ausgemessen.

Folgende Wetterdaten wurden aufgezeichnet:

1. Sonneneinstrahlung auf die Modulfläche (mittels Pyranometer).
2. Lufttemperatur (mittels Thermoelement-Draht im Strahlungsschutz).



Fig. 12: Strahlungsschutz und Pyranometer

Insgesamt wurde an 5 Stellen die Zell- bzw. Modultemperatur gemessen (Messstellen 1-01 bis 1-05, siehe Fig. 13).

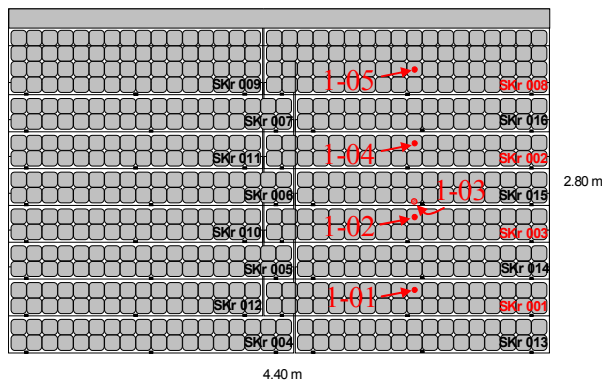


Fig. 13: Anordnung der Module und Platzierung der PT-100 (Zelltemperatur)

An insgesamt 11 Stellen wurde die Lufttemperatur gemessen (1-06 bis 1-08, 2-01 bis 2-05 und TT-1 bis TT-3).



Fig. 14: Dachgiebelraum mit Thermoelement-Temperaturfühler



Fig. 15: Wärmepumpen-Luftaustritt mit Thermoelement-Temperaturfühler

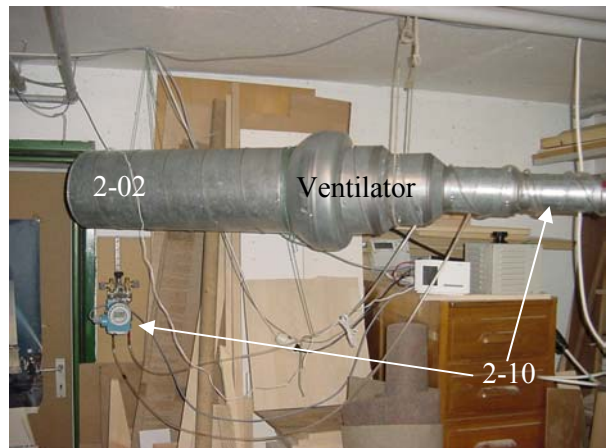


Fig. 16: Zuluft Bastelraum mit Ventilator, Thermoelement-Temperaturfühler (2-02) und Differenzdruck-Messung über ein V-Control zur Bestimmung des Luft-Volumenstroms (2-10)



Fig. 17: Impulszähler Durchfluss Warmwasser

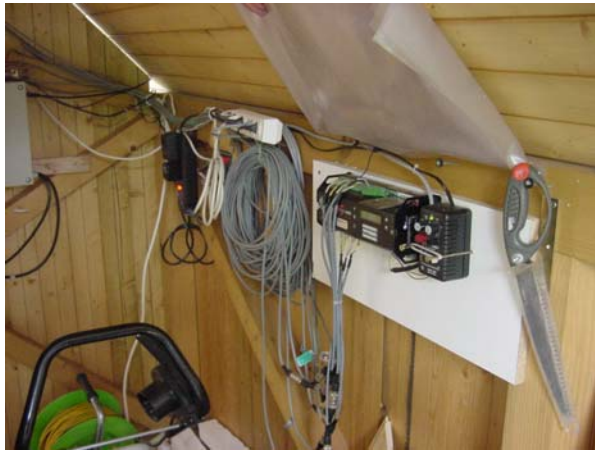


Fig. 18: Logger Datataker 1 im Gartenhaus



Fig. 19: Die 3 Wechselrichter und ein paar Messkabel

Kurz	Bezeichnung	Bild
1-01	Temp. Zelle 1	Fig. 13
1-02	Temp. Zelle 3	Fig. 13
1-03	Temp. Zelle 3 oben	Fig. 13
1-04	Temp. Zelle 2	Fig. 13
1-05	Temp. Zelle 8	Fig. 13
1-06	Temp. Kanal West	(Fig. 14)
1-07	Temp. Kanal Ost	Fig. 14
1-08	Umgebungstemp.	Fig. 12
1-09	Einstrahlung	Fig. 12
1-10	nicht belegt	
2-P1	Energie Ventilator	
2-P2	Energie Wärmepumpe	
2-P3	Durchfluss Warmwasser	Fig. 17
2-01	Temperatur Vorrat	
2-02	Temperatur Zuluft	Fig. 16
2-03	Temperatur Bastelraum	
2-04	Temperatur WP Eingang	(Fig. 15)
2-05	Temperatur WP Ausgang	Fig. 15
2-06	Temperatur Warmwasser	
2-07	Temperatur Kaltwasser	
2-08	Temperatur Kondensator	
2-09	Temperatur Verdichter	
2-10	Luft-Volumenstrom	Fig. 16
TT-1	Temp. Schlafzimmer	
TT-2	Temperatur Küche	
TT-3	Temperatur Flur	

Tab. 2: Alle Messstellen (1-... = Logger Datataker 1; 2-... = Logger Datataker 2; TT-... = Logger TinyTag)

Die Resultate sind als Zeitreihe aller gemessenen Größen im Anhang A (Fig. 72 - Fig. 76) zu finden.

Eine direkte Erfolgskontrolle der Wärmenutzung ist mit den Messresultaten allein nicht machbar, da der Warmwasserbedarf mit der stark variierenden Mitbewohnerzahl in der Zeit vor, während und nach der Messung schwankte. Dank des Simulationsmodells (siehe [4] Kropf 2003) ist es aber möglich, den Nutzen der PV-Abwärme abzuschätzen und Optimierungsvorschläge für die Anlagenbetreibung zu machen (siehe Kapitel 6).

5. Die Simulation

Das Simulationsmodell für den PV/T-Schiefer wird in ([4] Kropf 2003) ausführlich beschrieben. In diesem Kapitel wird erläutert, wie dieses Modell in der IDA Simulationsumgebung mit anderen Modellen verknüpft wird, um das konkrete System als ganzes zu simulieren.

5.1. PV/T-Schiefer

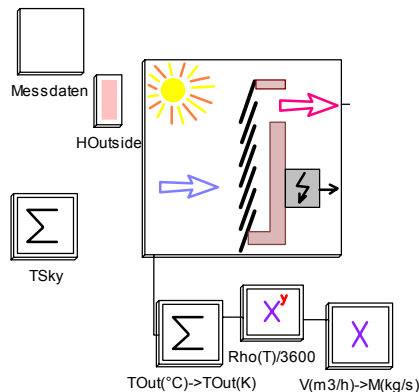
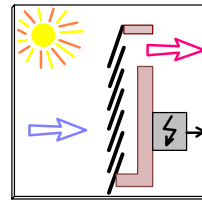
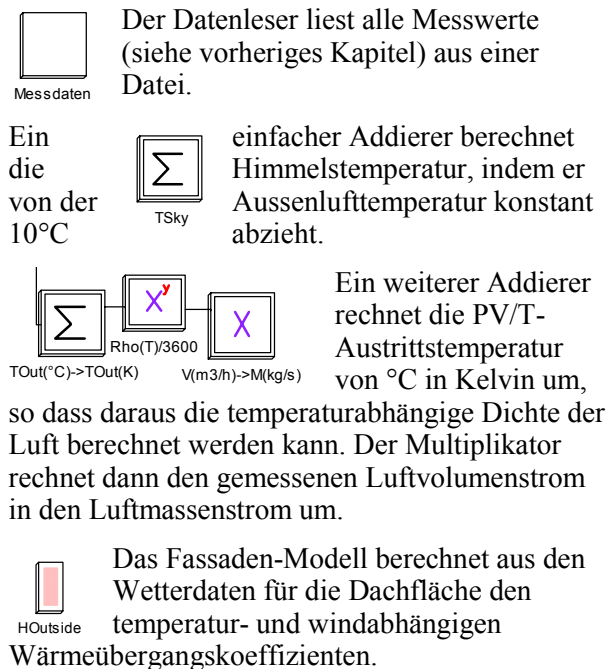


Fig. 20: Simulation des PV/T-Schiefers

Fig. 20 zeigt den Aufbau der Simulation zur Validierung der PV/T-Komponente:



Das PV/T-Modell (detaillierte Beschreibung siehe [4] Kropf 2003) berechnet aus den Wetterdaten, dem Luftmassenstrom, dem Wärmeübergangskoeffiziente

n sowie aus den eingegebenen geometrischen Parametern die Zelltemperatur, die davon abhängige gewonnene elektrische Energie und die Austrittstemperatur der Hinterlüftung.

Die Validierung des PV/T-Modells (welche u.a. mit Hilfe der Resultate aus der Feldmessung in Steinhausen durchgeführt wurde) wird in [4] 2003 genau beschrieben und diskutiert. Im Anhang (Fig. 77) findet man einen Vergleich zwischen Messung und Simulation der Zelltemperatur sowie der Temperatur der aus dem PV/T-Schiefer austretenden Luft.

5.2. Wärmeverlust im Erdreich

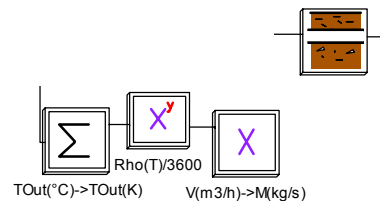
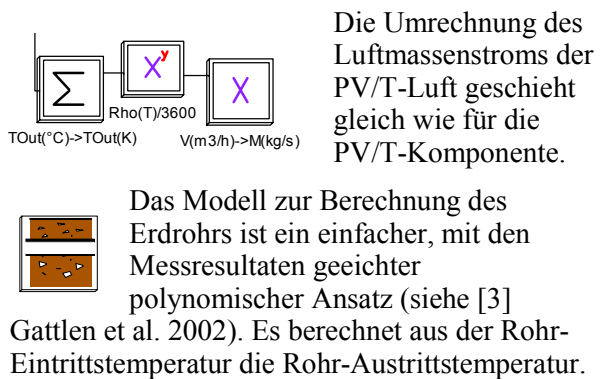


Fig. 21: Simulation des Wärmeverlusts im Erdreich

Fig. 21 zeigt den Aufbau der Simulation zur Validierung des Wärmeverlusts vom Rohr ins Erdreich:



Im Anhang (Fig. 78) findet man einen Vergleich zwischen Messung und Simulation der Temperatur der aus dem Erdrohr austretenden Luft.

Die Resultate der Simulation stimmen nur dann mit den Messungen überein, wenn das Rohr auch mit dem Luftstrom durchströmt wird, für den das Modell geeicht ist. Zu den Zeiten, während deren der Ventilator abgestellt ist (in der Nacht und an Tagen ohne Sonne) entsprechen die Messwerte (welche in dem Fall einfach die Raumtemperatur wiedergeben) nicht den simulierten Werten. Dies ist aber für die Simulation des ganzen Systems unwesentlich.

5.3. Wärmepumpe

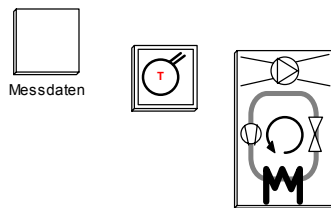
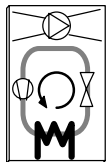


Fig. 22: Simulation der Wärmepumpe

Fig. 22 zeigt den Aufbau der Simulation zur Validierung der Wärmepumpen-Komponente:



Ein Thermostat gibt an, ob die Wärmepumpe laufen soll, indem er als on/off Signal den Wert 1 ausgibt, sobald die gemessene elektrische Wärmepumpenleistung wesentlich grösser als 0 wird.



Das Wärmepumpen-Modell berechnet aus dem on/off Signal des Thermostaten, der mit 15°C angenommenen Kaltwassertemperatur, der gemessenen Raumlufttemperatur und dem Luftmassenstrom die Lufttemperatur beim Wärmepumpen-Austritt. Eine Beschreibung des Modells findet man in ([3] Gattlen et al. 2002) oder in ([6] Kropf 2003) Anhang B. Die Kennlinien sind von ([3] Gattlen et al. 2002) entnommen (siehe Tab. 3). Allerdings stellt sich dabei im Vergleich mit der Messung eine wesentliche Diskrepanz mit der Messung heraus (siehe Kapitel 6).

TH2OEin	15	50	15	50
TLuftEin	Q thermisch		Q elektrisch	
35°C	2.80	1.97	0.28	0.47
30°C	2.56	1.80	0.27	0.46
25°C	2.38	1.65	0.26	0.46
20°C	2.25	1.52	0.26	0.45
15°C	2.17	1.42	0.25	0.45

Tab. 3: Thermische und elektrische Leistung der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Luft- und der Wasser-Eintrittstemperatur gemäss Herstellerangaben

$$A = 0.01$$

$$MH_2O = 0.02 \text{ kg/s}$$

$$MLuft = 0.6 \text{ kg/s}$$

Im Anhang (Fig. 79) findet man einen Vergleich zwischen Messung und Simulation der Temperatur der aus der Wärmepumpe austretenden Luft.

Da der Luftmassenstrom nicht gemessen wurde und demzufolge nicht bekannt war, wurde er in diesem Vergleich so eingestellt, dass Simulation und Messung möglichst gut übereinstimmen. Er wurde mit 0.6 kg/s angenommen.

Diese Übereinstimmung muss vor allem während der Betriebszeit der Wärmepumpe (zu erkennen an den Peaks nach unten) gelten. Bei ausgeschalteter Wärmepumpe geht die simulierte Austrittstemperatur automatisch auf die gemessene Raumtemperatur, welche ja als Modell-Input für die Wärmepumpen-Eintrittstemperatur verwendet wird.

5.4. Raum

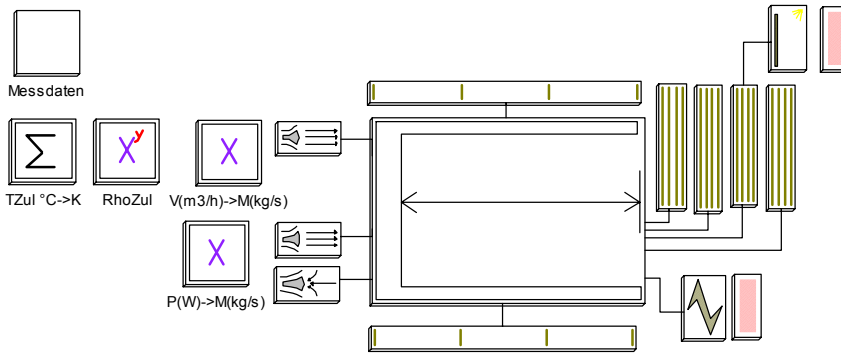
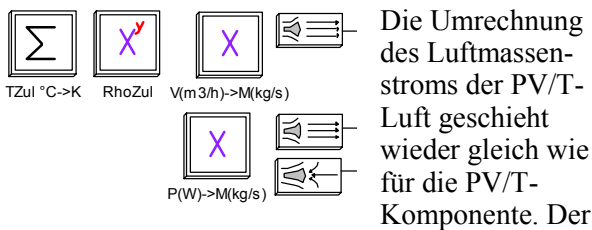
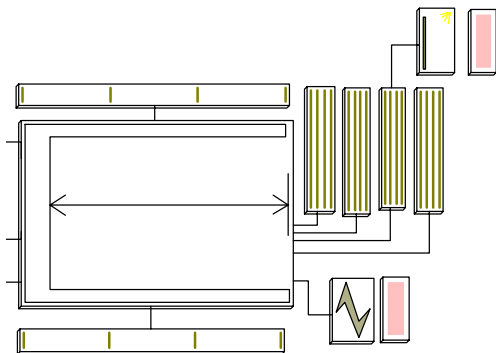


Fig. 23: Simulation des Bastelraumes

Fig. 23 zeigt den Aufbau der Simulation zur Validierung der Raum-Komponente:



Die Umrechnung des Luftmassenstroms der PV/T-Luft geschieht wieder gleich wie für die PV/T-Komponente. Der Luftmassenstrom der Wärmepumpen-Luft wird durch Multiplikation der gemessenen elektrischen Wärmepumpen-Leistung mit einem konstanten Faktor berechnet. Ein dafür vorgesehenes Lufteinlass-Modell übergibt die Massenströme und die dazugehörigen gemessenen Zulufttemperaturen an das Raummodell. Die von der Wärmepumpe eingeblasene Luftmenge wird aktiv dem Raum wieder entzogen, während die vom PV/T-Schiefer eingeblasene Luftmenge durch das "Leak"-Modell dem Raum wieder entweicht.



Das Raummodell berechnet zusammen mit den angehängten Modellen für die Wände, die der Sonne ausgesetzten Fassade (oben rechts) und dem "Leak" (unten rechts) aus den Raumtemperaturen der Nachbarräume, der Aussentemperatur und den Werten der

eintretenden Luft die mittlere Raumlufthtemperatur.

Im Anhang (Fig. 80) findet man einen Vergleich zwischen Messung und Simulation der Raumlufthtemperatur.

Es fällt dabei auf, dass die simulierte Raumtemperatur während der Betriebszeit der Wärmepumpe und/oder des PV/T-Schiefers deutlich tiefer ist als die gemessene Raumtemperatur. Dies wird dadurch erklärt, dass die Messsonde der Raumlufthtemperatur nur einige Zentimeter unter der Decke installiert war. Offenbar hat sich während des Einblasens von Luft, welche wesentlich kühler oder wärmer ist als die Raumlufthtemperatur, ein grosser vertikaler Temperaturgradient eingestellt. Das Raummodell berechnet aber die Raumtemperatur der optimal gemischten Luft.

Dass die Wärmebilanz des Raumes stimmt, zeigt die Übereinstimmung von Simulation und Messung der Raumlufthtemperatur zwischen den Betriebszeiten von Wärmepumpe und PV/T-Schiefer.

Zu Beginn der Simulation muss sich das System (Raum und Wände) zuerst durch einen Vorlauf von ca. einer Woche einschwingen, da die Starttemperaturen nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Während der letzten zweieinhalb Wochen der Messung blieb die Wärmepumpe abgestellt. In dieser Zeit liegt die simulierte Raumtemperatur 1-2 °C tiefer als die gemessene, wofür keine Erklärung gefunden wurde. Wahrscheinlich hat es aber mit der Umschaltung vom Wärmepumpenbetrieb zum Heizkesselbetrieb zu tun, welche einen neuen wesentlichen Wärmegewinn im Bastelraum zur Folge haben könnte.

5.5. Das ganze System

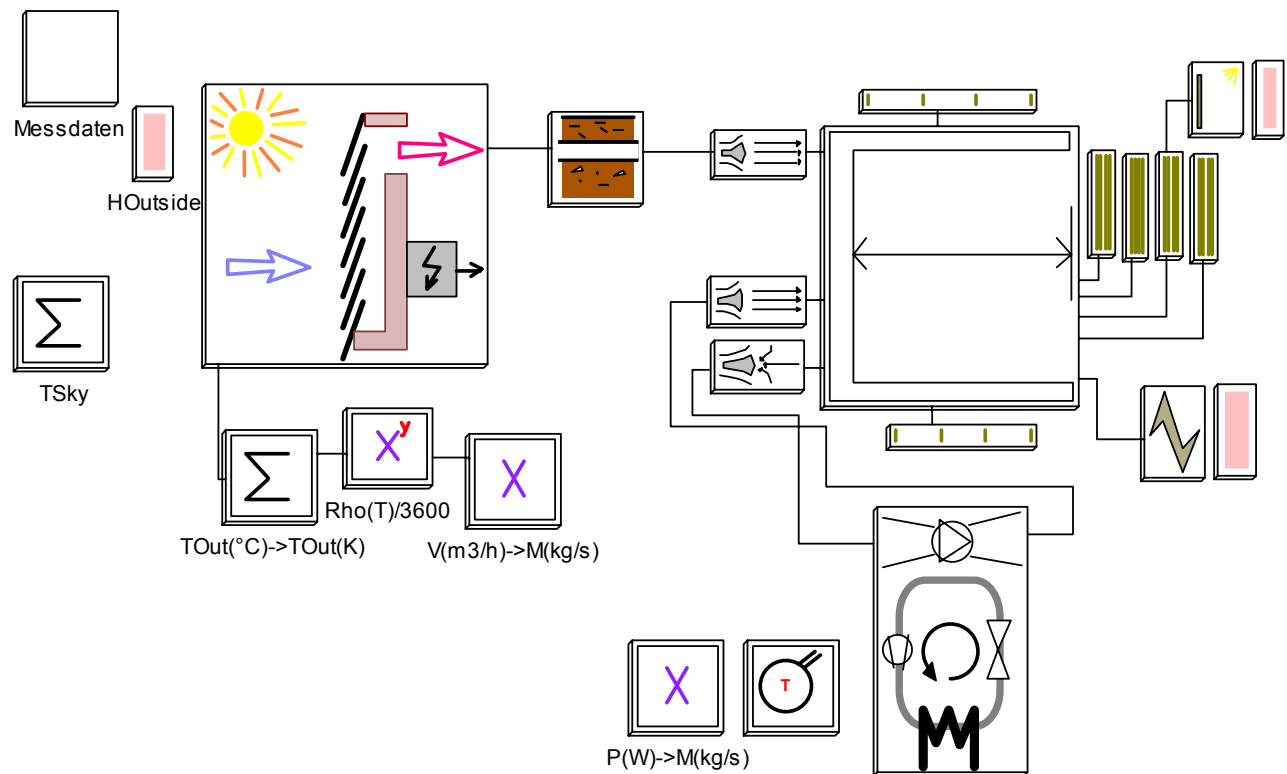


Fig. 24: Simulation des ganzen Systems

Im Anhang (Fig. 81) findet man einen Vergleich zwischen Messung und Simulation für das ganze System PV/T-Schiefer / Erdrohr / Wärmepumpe / Raum.

Im Unterschied zur Simulation des Raumes alleine werden hier nicht die gemessenen Temperaturen der von der Wärmepumpe und dem PV/T-Schiefer kommenden Luft dem Raummodell übergeben, sondern jeweils die mit den entsprechenden Modellen berechneten.

Die Simulationsergebnisse stimmen auch hier sehr gut mit den gemessenen Werten überein.

Die Simulation des Warmwasserspeichers wäre nötig, um auch noch die Betriebszeiten der Wärmepumpe zu simulieren. Da aber für die Messung des Warmwasserdurchflusses ein dafür ungeeigneter Zähler verwendet wurde, kann die Speicherentladung nicht genau genug quantifiziert werden.

6. Die Optimierungsvorschläge

In diesem Kapitel werden Vorschläge, wie die Anlage bezüglich Stromverbrauch der Wärmepumpe und Temperaturstabilität im Bastelraum optimiert werden kann, mittels Simulationen überprüft.

Für diese Simulationen muss als erstes ein relevantes Bedarfsprofil für das Warmwasser definiert werden. Die dafür massgebenden Messresultate sind:

Monat	WW [L/h]	P(WP) [W]
Juni	4.2	88.50
Juli	6.4	105.98
August	14.0	185.89
September	12.5	148.61
Oktober	10.4	1.28

Tab. 4: durchschnittlicher Warmwasserverbrauch (WW) und durchschnittliche elektrische Leistung der Wärmepumpe (P(WP)) während der Messung.

Temperatur Kaltwasser: 15°C

Temperatur Warmwasser: 45°C

Um das Brauchwasser von 15°C auf 45°C aufzuwärmen, ist pro Liter eine Energie von 30°C x 4'183 J/°C = 125 kJ aufzubringen. Um den Warmwasserverbrauch in Tab. 4 von L/h in den dazugehörigen Energiebedarf in kJ/Tag umzurechnen, multipliziere man also mit 3'000:

$$\dots \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot 125 \frac{\text{kJ}}{\text{L}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{Tag}} = \dots \cdot 3'000 \frac{\text{kJ}}{\text{Tag}}$$

Um die Wärmepumpenleistung von W in kJ/Tag umzurechnen, multipliziere man mit 86.4:

$$\dots \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 3'600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{Tag}} \cdot \frac{1\text{kJ}}{1'000\text{J}} = \dots \cdot 86.4 \frac{\text{kJ}}{\text{Tag}}$$

Dies erlaubt einen Vergleich der elektrischen Endenergie der Wärmepumpe mit seiner thermischen Nutzenergie und die Bestimmung der Monatsarbeitszahl des Wärmepumpenboilers:

Monat	WW [kJ/Tag]	P(WP) [kJ/Tag]	MAZ
Juni	12'600	7'646	1.6
Juli	19'200	9'157	2.1
August	42'000	16'061	2.6
September	37'500	12'840	2.9
Oktober	31'200	-	-

Tab. 5: thermische Nutzenergie (WW), elektrische Endenergie (P(WP)) und Monatsarbeitszahl (MAZ).

Beim Studium der Daten von Tab. 5 fällt auf, dass nicht nur beim Verbrauch, sondern auch bei der Monatsarbeitszahl wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen Monatswerten vorliegen:

- Im Juni und Juli lebten weniger Leute im betreffenden Haushalt. Der kleinere Verbrauch liegt insbesondere an den tieferen Spitzen am Abend (wenn geduscht wird).
- Die verschwindend kleine elektrische Endenergie im Oktober ist darauf zurückzuführen, dass Anfang dieses Monats die Wärmepumpe abgestellt und die Warmwasseraufbereitung stattdessen vom Heizkessel übernommen wurde.
- Die Monatsarbeitszahl fällt grundsätzlich wesentlich schlechter aus, als die Herstellerangaben versprechen. Diese müssten gemäss den Simulationsresultaten (siehe weiter unten) im durchschnitt 3.9 betragen.
- Mögliche Gründe für die Unterschiede in der Monatsarbeitszahl sind
 - unterschiedliche Laufzeiten der Wärmepumpe (lange Laufzeiten wirken sich positiv auf die Arbeitszahl aus)
 - unterschiedliche Betriebszeiten der Wärmepumpe (bei hoher Bastelraumtemperatur ist die Arbeitszahl höher)
 - von den angenommenen 15°C abweichende effektive Kaltwasser-Temperatur (ist diese effektiv höher als angenommen, so ist die effektive thermische Nutzenergie und damit auch die effektive Arbeitszahl tiefer und umgekehrt).

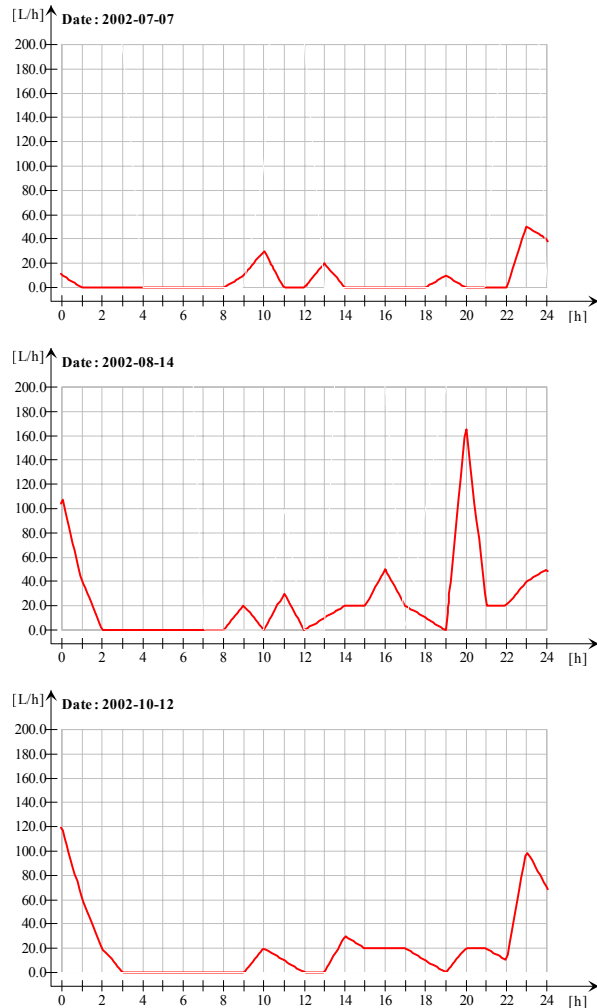


Fig. 25: Gemessener Warmwasserverbrauch an 3 Stichtagen.

Als Grundlage für den zu definierenden Warmwasser-Bedarfsfahrplan dient Tab. 4 und Fig. 25. Er soll folgendes beinhalten:

- Durchschnittlicher täglicher Warmwasserbedarf von ca. 250 Liter
- Kein Warmwasserbedarf zwischen 0 Uhr und 8 Uhr
- Bedarfsspitzen am späten Abend zwischen 20 Uhr und 24 Uhr
- Stark schwankender Bedarf am Abend
- Spitzenwerte von ca. 450 Liter/Tag

Das Wochenprofil für den Warmwasserverbrauch wurde deshalb wie folgt festgelegt:

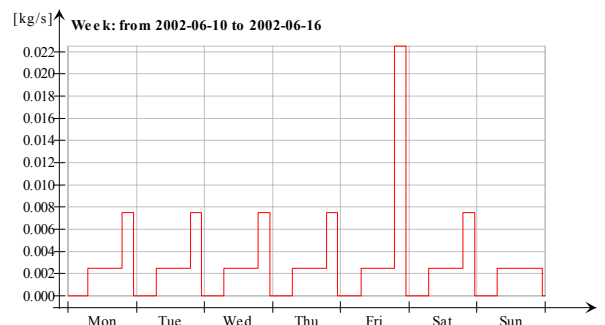
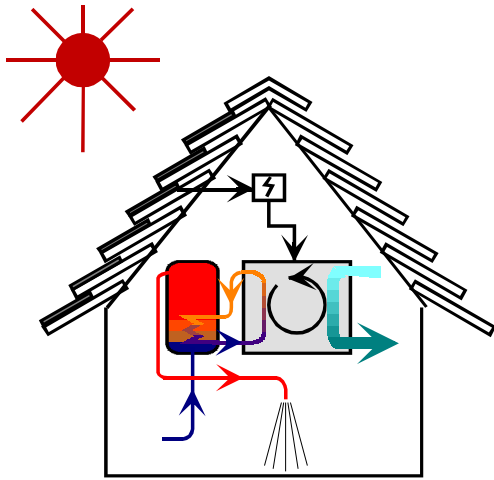


Fig. 26: Fahrplan Warmwasserverbrauch

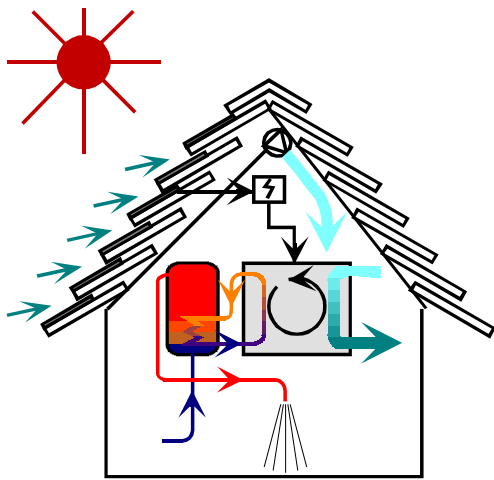
Simulationen

Folgende 5 Situationen wurden simuliert:

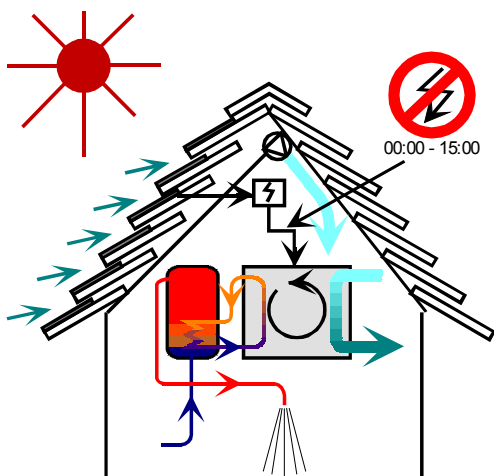
A: PV ohne Hinterlüftung.



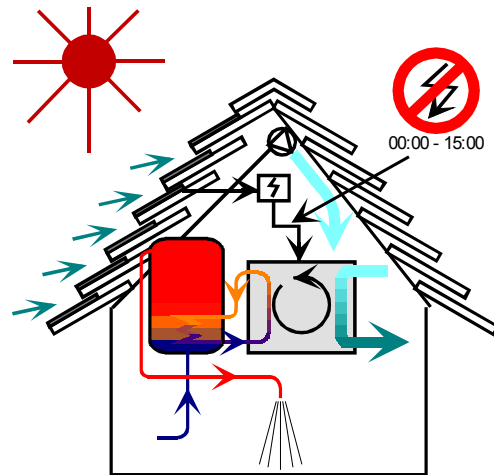
B: Aktuelle Situation mit PV/T-Schiefer, Wärmepumpe nur bedarfsgesteuert.



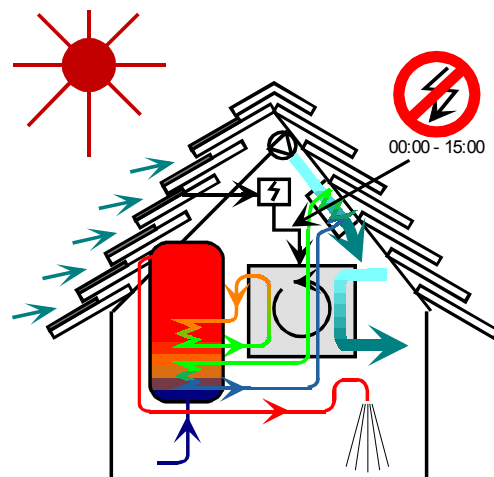
C (1. Optimierungsschritt): Speicherladung zwischen 15:00 und 16:00, danach bis 24:00 nur bei Bedarf.



D (2. Optimierungsschritt): Grösserer Speicher.



E (3. Optimierungsschritt): Vorerwärmung direkt über Wärmetauscher, Nacherwärmung wie bisher über Wärmepumpe.



Mit den gemessenen Wetterdaten als Eingabedaten wurde jeweils die Periode vom 1. Juli bis zum 30. September simuliert.

Resultate Energieverbrauch

Es interessiert einerseits, wie viel elektrische Energie die Photovoltaik ins Stromnetz einspeist ("PV") und andererseits wie viel elektrische Energie die Wärmepumpe zur Warmwasser-Bereitstellung benötigt ("WP el"). Zieht man zweitens zusammen mit der elektrischen Energie aller Pumpen und Ventilatoren von ersteren ab, so erhält man die Strommenge, welche für den restlichen Haushalt zur Verfügung steht ("PV Rest"). Für die Bewertung der ganzen Anlage weniger wesentlich, aber für das Verständnis nicht weniger interessant, ist die Wärmemenge, welche die Wärmepumpe in den Speicher bringt ("WP th") und die aus WP el und WP th resultierende durchschnittliche Monatsarbeitszahl für die drei simulierten Monate Juli, August und September ("MAZ"):

	PV	PV Rest	WP el	WP th	MAZ
A	156	57	99	368	3.72
B	180	81	95	367	3.85
C	180	96	80	334	4.16
D	180	80	96	379	3.94
E	180	115	59	219	3.73

Tab. 6: Durchschnittsleistungen über die simulierte Periode (Erklärung siehe Text)

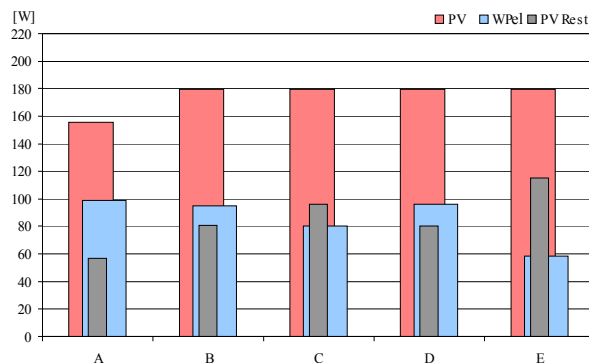


Fig. 27: elektrische Durchschnittsleistungen (Erklärungen siehe Text)

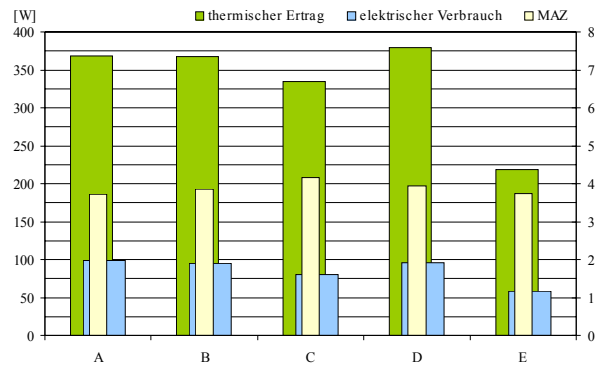


Fig. 28: Durchschnittsleistungen und durchschnittliche Monatsarbeitszahl für die Wärmepumpe (Erklärung siehe Text)

Resultate Komfort

Es interessiert einerseits, ob die Anlage den Warmwasserbedarf des Haushalts decken kann und andererseits, während wie vielen Stunden die Temperatur im Baderraum für die Behaglichkeit zu tief (<16°C) resp. zu hoch (>24°C) ist:

	Anzahl Stunden mit Raumtemperatur unter 16°C	Anzahl Stunden mit Raumtemperatur über 24°C
A	830	0
B	550	90
C	330	50
D	330	50
E	310	30

Tab. 7: Anzahl Stunden mit unbehaglicher Raumtemperatur

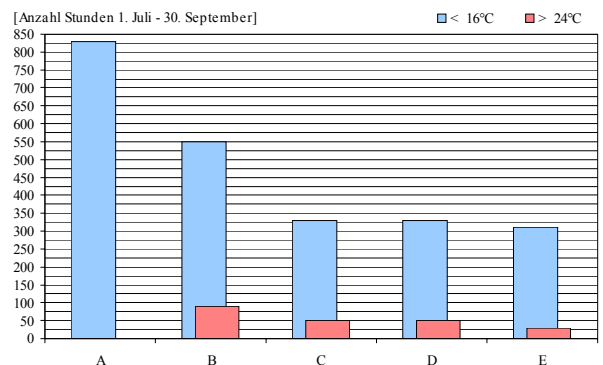


Fig. 29: Anzahl Stunden mit unbehaglicher Raumtemperatur

Die Systeme A-C vermögen den Warmwasserbedarf an Tagen mit hohem Verbrauch von der Leistung der Wärmepumpe und der Kapazität des Speichers her nicht ganz zu decken (siehe folgende Seiten). An Tagen mit normalem Verbrauch bekundet einzig System C Mühe.

Simulation A

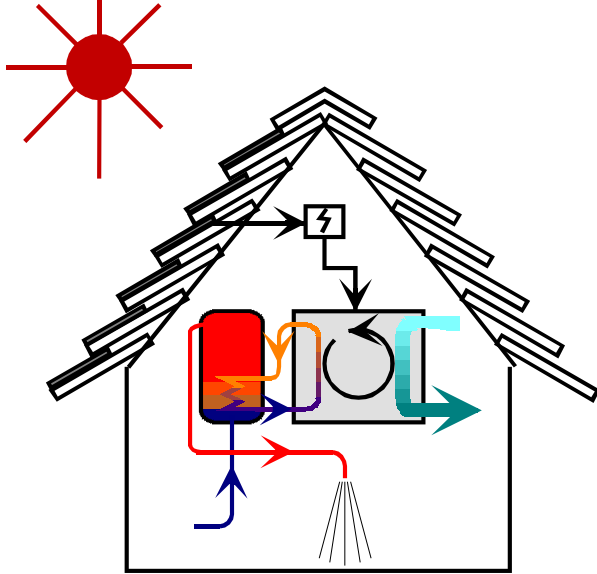


Fig. 30: System für Simulation A

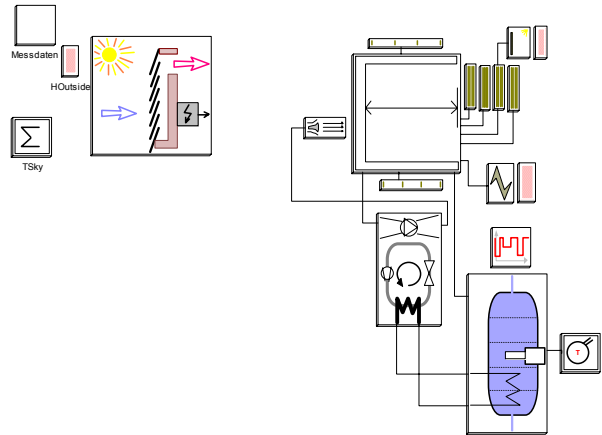


Fig. 31: Schema in IDA ICE für Simulation A

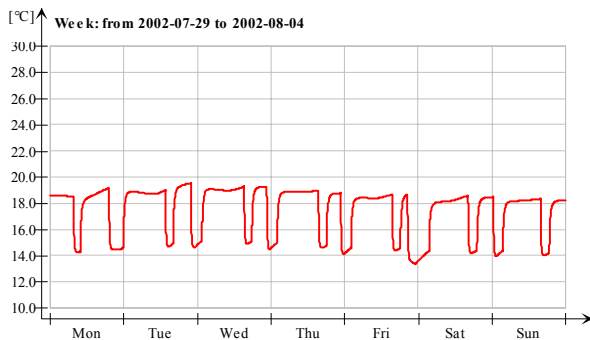


Fig. 32: Raumtemperatur

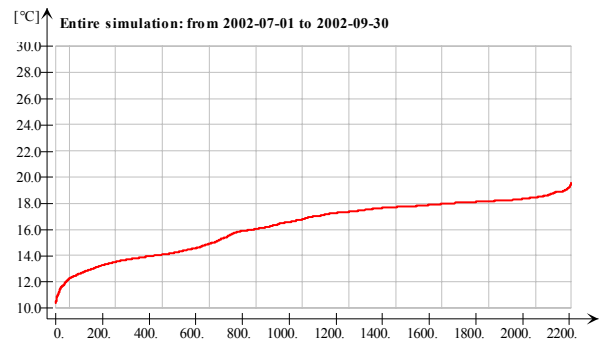


Fig. 33: Raumtemperaturverteilung

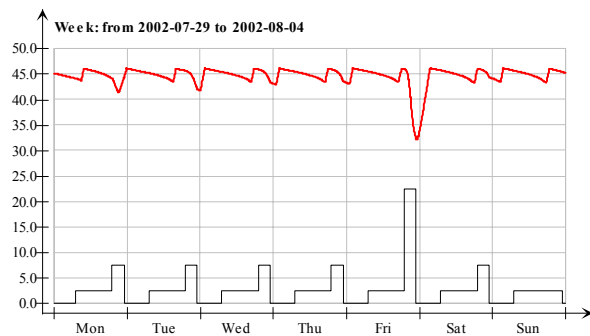


Fig. 34: Warmwasser Temperatur (°C) und Verbrauch (g/s)

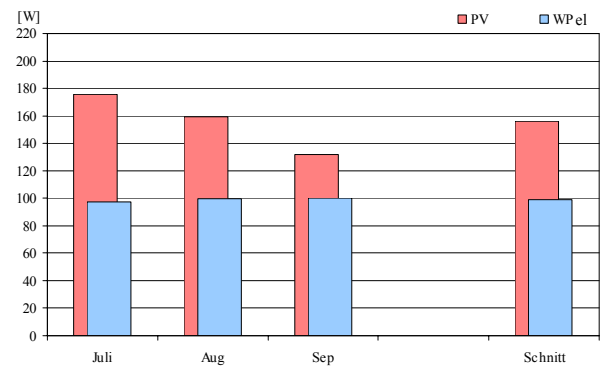


Fig. 35: elektrischer Ertrag der PV und elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe

Monat	PV	WP el	WP th	MAZ
Juli	175	97	365	3.76
August	159	100	374	3.75
September	132	100	366	3.62
Schnitt	156	99	368	3.72

Tab. 8: Elektrischer Ertrag PV (W); elektrischer Verbrauch WP (W); thermischer Ertrag WP (W); Monatsarbeitszahl WP.

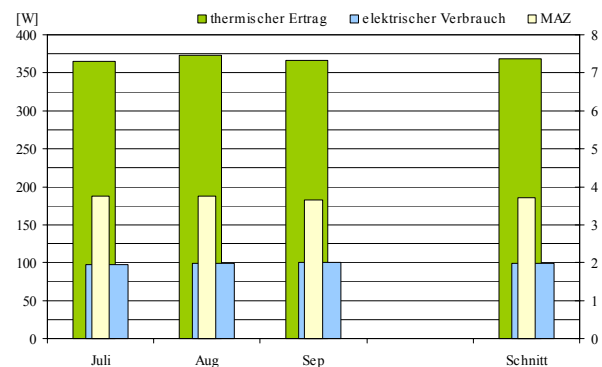


Fig. 36: Monatsarbeitszahl (MAZ) der WP

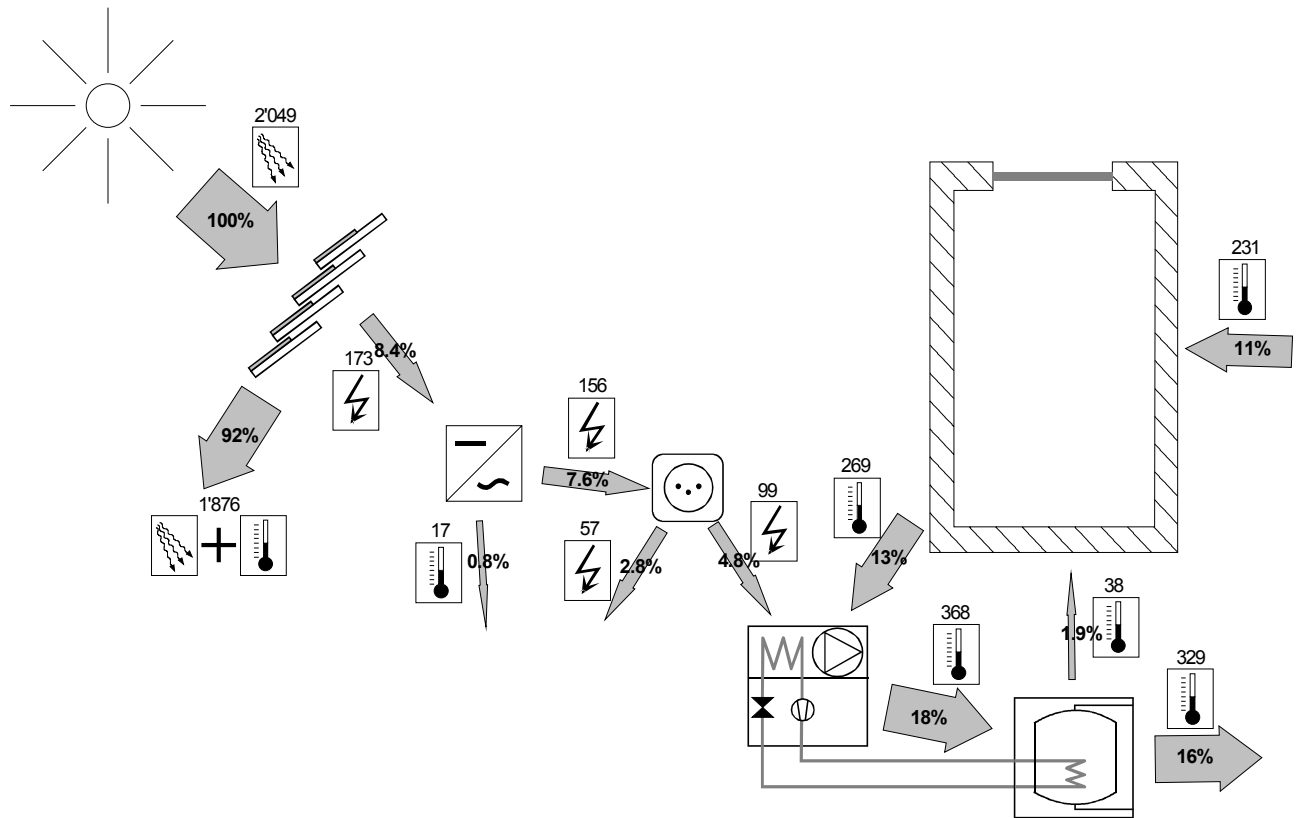


Fig. 37: Bilanz der Energieflüsse des Systems A. Die angegebenen Absolutwerte entsprechen der durchschnittlichen Leistung in W für die ganze Simulationsperiode 1. Juli bis 30. September. Die Prozentwerte beziehen sich auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche.

Die Simulation der PV-Anlage läuft bei System A unabhängig von derjenigen für den Raum, die Wärmepumpe und den Speicher (siehe Fig. 31). Der Massenstrom für die Hinterlüftung beträgt konstant 0.

Fig. 32 zeigt beispielhaft die Bastelraumtemperatur während der Woche vom 29. Juli bis zum 4. August. Die Betriebszeiten der Wärmepumpe sind klar an Hand der markant abgesenkten Raumtemperatur zu erkennen.

Fig. 33 zeigt die Verteilung der Raumtemperatur auf die 2'200 Stunden der Simulationsperiode. Die mittlere Raumtemperatur beträgt 16.3 °C.

Fig. 34 zeigt die zu starke Absenkung der Speichertemperatur (oberste Schicht) bei zu grossem Warmwasserverbrauch (Freitag Abend).

Tab. 8 und Fig. 35 - Fig. 37 zeigen die Bilanz der verschiedenen Energieflüsse des Systems. Angegeben ist jeweils die über die ganze Simulationsperiode gemittelte Leistung in Watt.

Simulation B

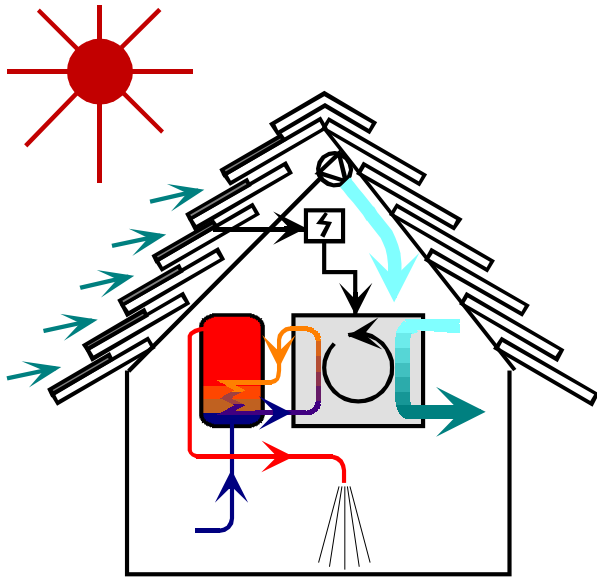


Fig. 38: System für Simulation B

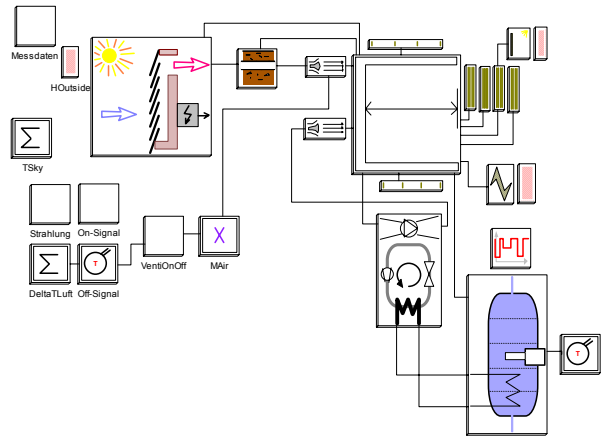


Fig. 39: Schema in IDA ICE für Simulation B

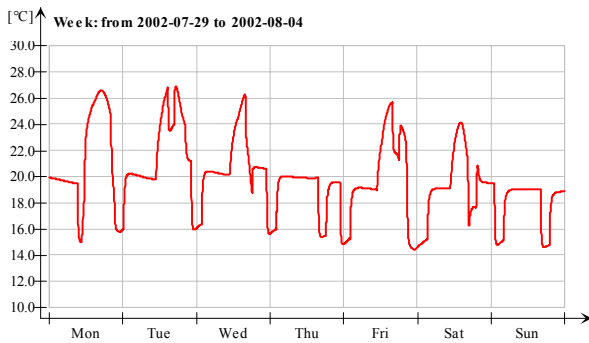


Fig. 40: Raumtemperatur

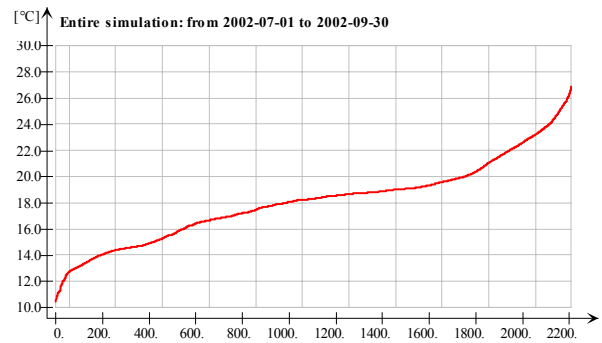


Fig. 41: Raumtemperaturverteilung

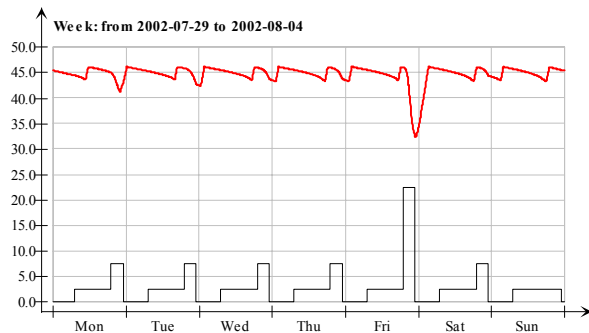


Fig. 42: Warmwasser Temperatur (°C) und Verbrauch (g/s)

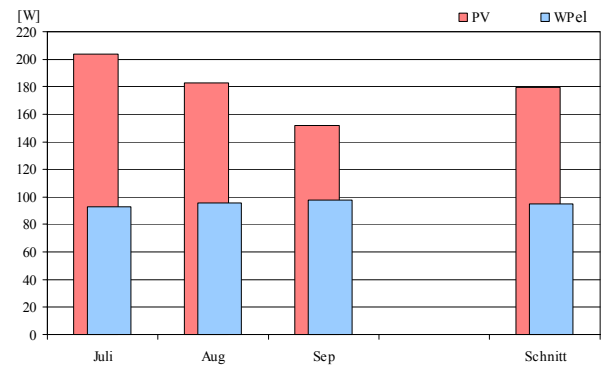


Fig. 43: elektrischer Ertrag der PV und elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe

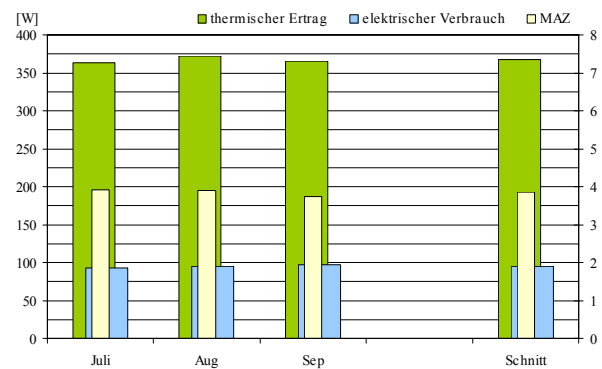


Fig. 44: Monatsarbeitszahl (MAZ) der WP

Monat	PV	WP el	WP th	MAZ
Juli	204	93	364	3.92
August	183	95	372	3.90
September	152	97	365	3.75
Schnitt	180	95	367	3.85

Tab. 9: Elektrischer Ertrag PV (W); elektrischer Verbrauch WP (W); thermischer Ertrag WP (W); Monatsarbeitszahl WP.

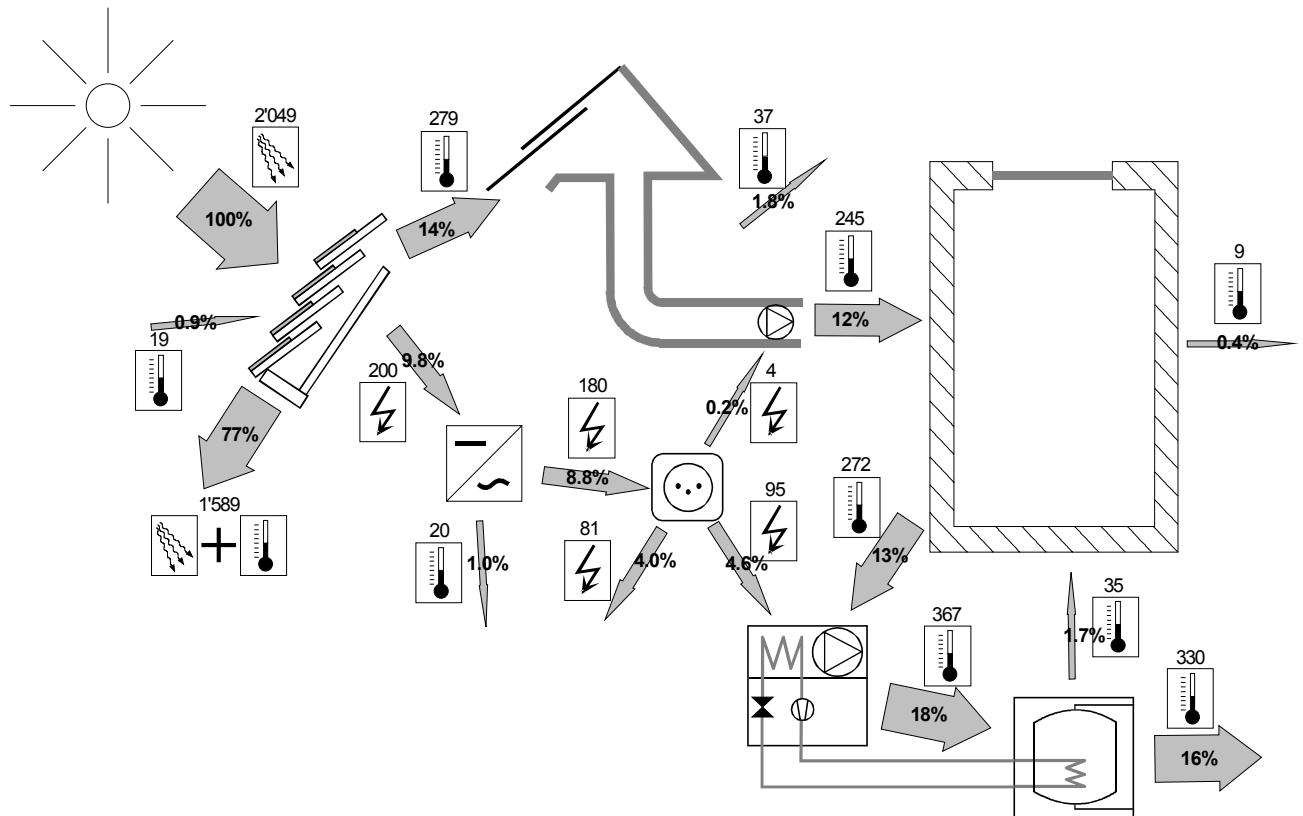


Fig. 45: Bilanz der Energieflüsse des Systems B. Die angegebenen Absolutwerte entsprechen der durchschnittlichen Leistung in W für die ganze Simulationsperiode 1. Juli bis 30. September. Die Prozentwerte beziehen sich auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche.

Bei System B ist das Simulationsmodell für den PV/T-Schiefer über das Erdrohr-Modell mit dem Raummodell verbunden (siehe Fig. 39). Der Massenstrom für die Hinterlüftung ist abhängig von der Sonneneinstrahlung und der PV/T-Austrittstemperatur gesteuert.

Bei der Bastelraumtemperatur (Fig. 40) kommen nebst den Absenkungen während der Betriebszeiten der Wärmepumpe Anstiege während den Betriebszeiten der PV-Hinterlüftung hinzu. Ob die Wärmepumpe wesentlich von der PV-Hinterlüftung profitieren kann, hängt davon ab, ob die Betriebszeiten zufällig übereinstimmen (hier z.B. Dienstags) oder nicht (Montags).

Fig. 41 zeigt eine Komfortverbesserung bei den kalten Stunden, allerdings auch eine leichte Verschlechterung bei den heissen Stunden. Die mittlere Raumtemperatur beträgt 18.1 °C.

Fig. 42 zeigt gegenüber System A keine wesentliche Veränderung im Verlauf der Speichertemperatur.

Tab. 9 und Fig. 43 - Fig. 45 zeigen die Bilanz der verschiedenen Energieflüsse des Systems. Angegeben ist jeweils die über die ganze Simulationsperiode gemittelte Leistung in Watt. Gegenüber System A bringt System B vor allem beim elektrischen Ertrag der PV eine erhebliche Verbesserung. Der kleinere elektrische Verbrauch der Wärmepumpe ist demgegenüber noch unwesentlich.

Simulation C

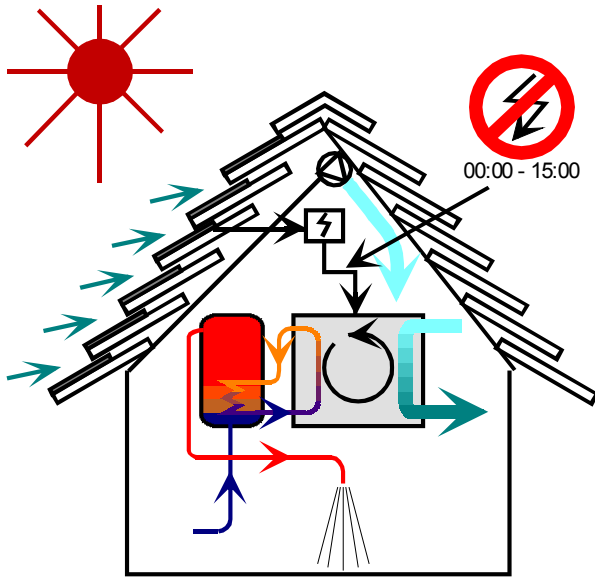


Fig. 46: System für Simulation C

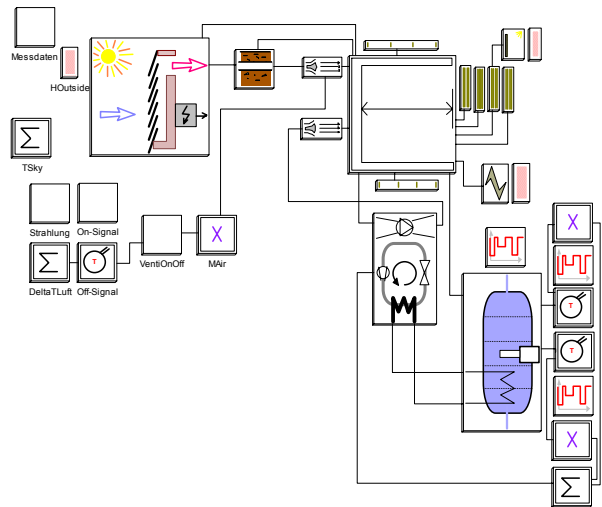


Fig. 47: Schema in IDA ICE für Simulation C

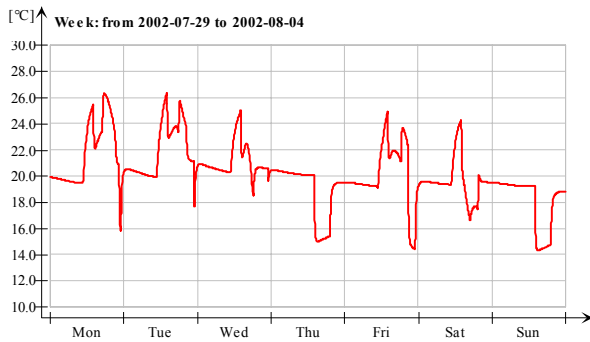


Fig. 48: Raumtemperatur

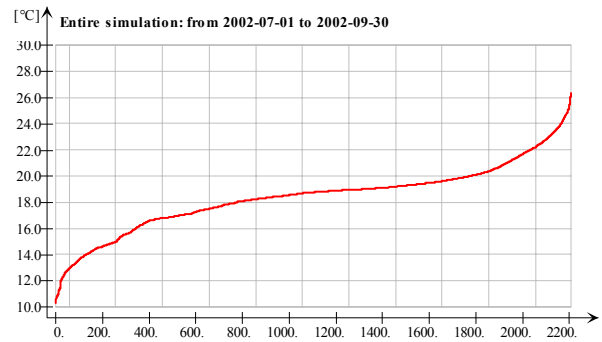


Fig. 49: Raumtemperaturverteilung

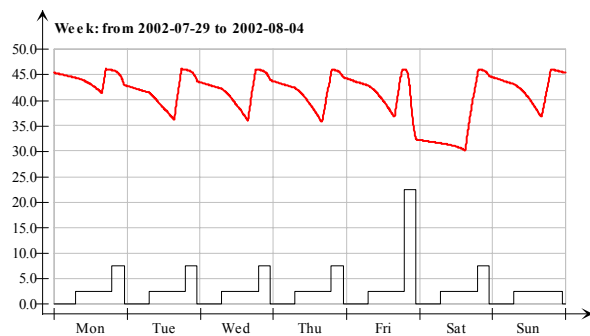


Fig. 50: Warmwasser Temperatur (°C) und Verbrauch (g/s)

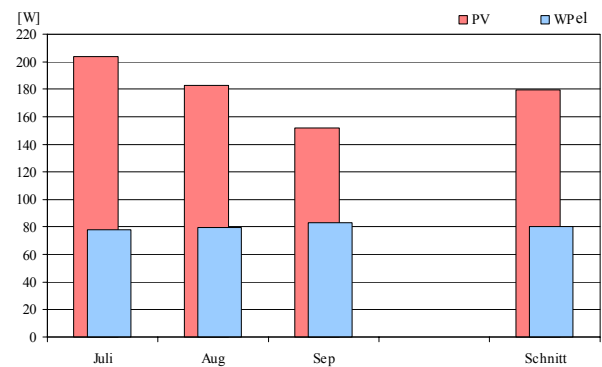


Fig. 51: elektrischer Ertrag der PV und elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe

Monat	PV	WP el	WP th	MAZ
Juli	204	78	332	4.25
August	183	80	338	4.24
September	152	83	333	4.01
Schnitt	180	80	334	4.16

Tab. 10: Elektrischer Ertrag PV (W); elektrischer Verbrauch WP (W); thermischer Ertrag WP (W); Monatsarbeitszahl WP.

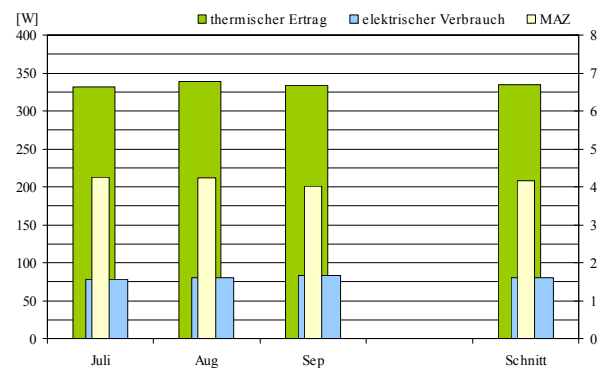


Fig. 52: Monatsarbeitszahl (MAZ) der WP

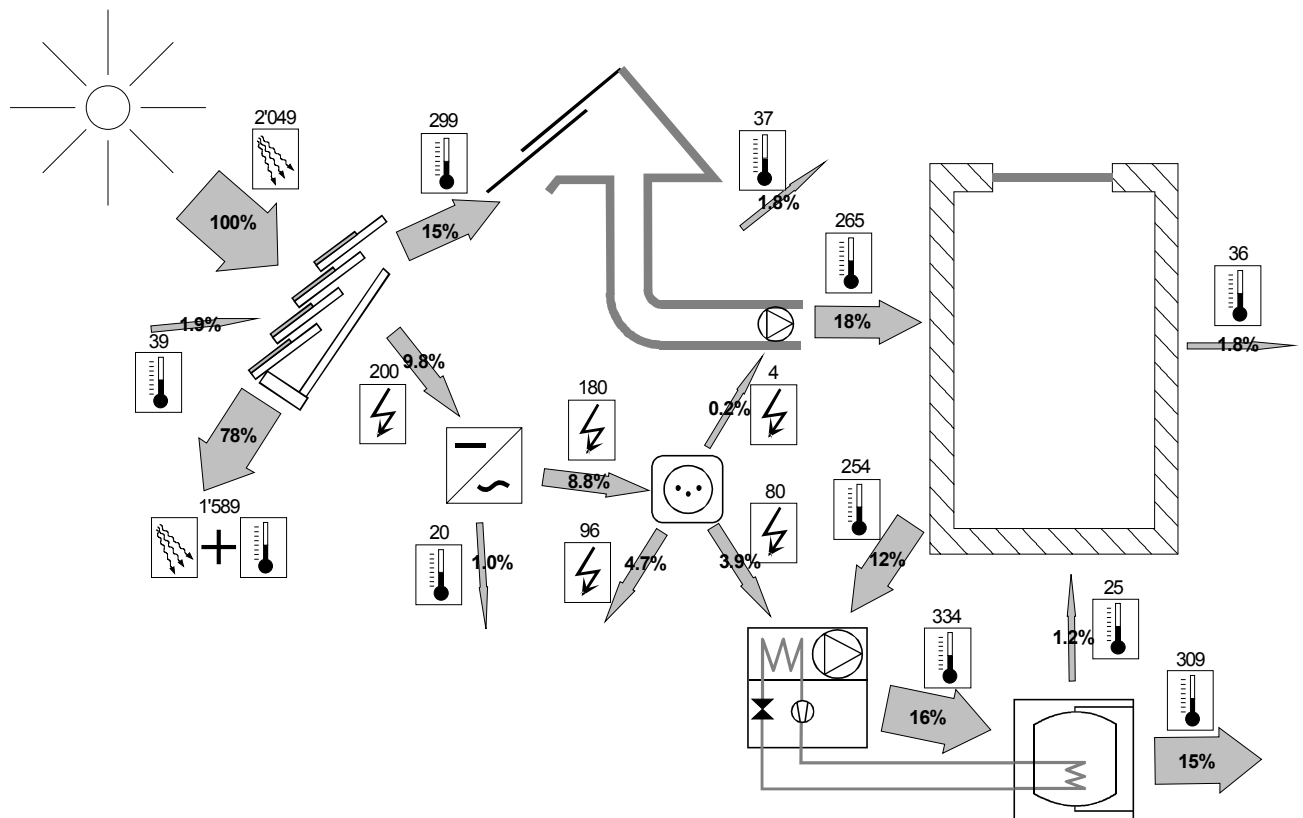


Fig. 53: Bilanz der Energieflüsse des Systems C. Die angegebenen Absolutwerte entsprechen der durchschnittlichen Leistung in W für die ganze Simulationsperiode 1. Juli bis 30. September. Die Prozentwerte beziehen sich auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche.

System C unterscheidet sich vom System B dadurch, dass die Steuerung der Wärmepumpe nicht nur bedarfs-, sondern auch tageszeitabhängig ist. Nach Mitternacht wird mit dem Laden des Speichers bis 15:00 gewartet, wenn bei gutem Wetter die Bastelraumtemperatur dank der PV-Hinterlüftung wesentlich höher ist.

Fig. 48 zeigt deutlich, dass der gleichzeitige Betrieb von Wärmepumpe und PV-Hinterlüftung nun wesentlich häufiger vorkommt als vorher bei System B.

Fig. 49 zeigt demzufolge eine weitere wesentliche Komfortverbesserung sowohl bei den kalten wie auch bei den heißen Stunden. Die mittlere Raumtemperatur beträgt 18.4 °C.

Fig. 50 zeigt aber den Preis, welcher für die Vorteile bezüglich Energieverbrauch und Raumkomfort zu bezahlen ist: Auch an Tagen mit normalem Verbrauch sinkt die Speichertemperatur auf weit unter 40°C.

Tab. 10 und Fig. 51 - Fig. 53 zeigen die Bilanz der verschiedenen Energieflüsse des Systems. Angegeben ist jeweils die über die ganze Simulationsperiode gemittelte Leistung in Watt. Gegenüber System B bringt System C vor allem beim elektrischen Verbrauch der Wärmepumpe eine Verbesserung. Diese Energieeinsparung wird vor allem durch eine bessere Arbeitszahl der Wärmepumpe dank durchschnittlich höherer Lufteintrittstemperatur erreicht.

Simulation D

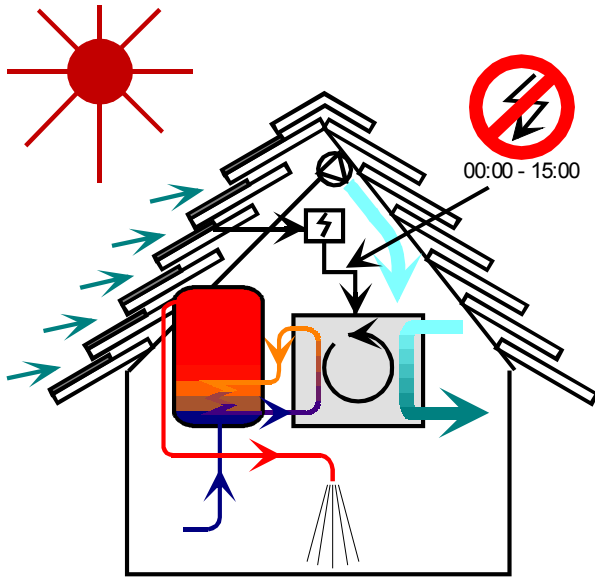


Fig. 54: System für Simulation D

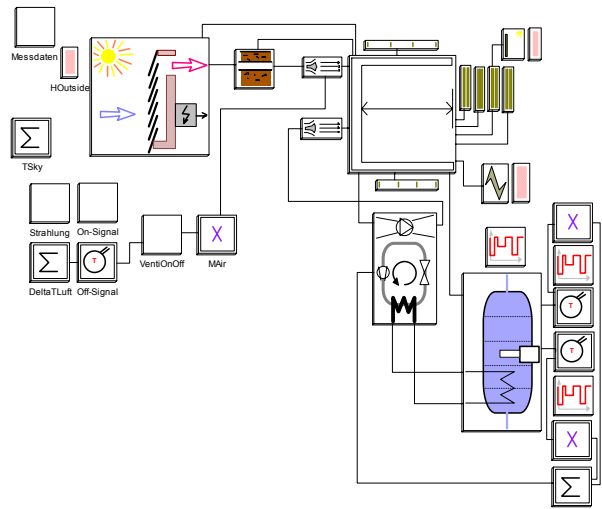


Fig. 55: Schema in IDA ICE für Simulation D

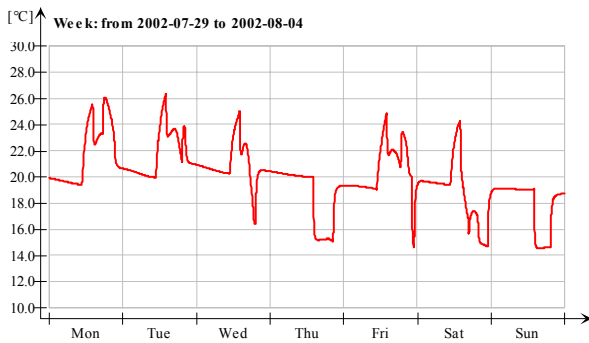


Fig. 56: Raumtemperatur

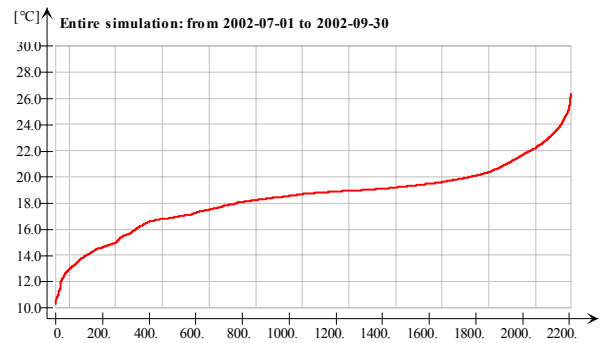


Fig. 57: Raumtemperaturverteilung

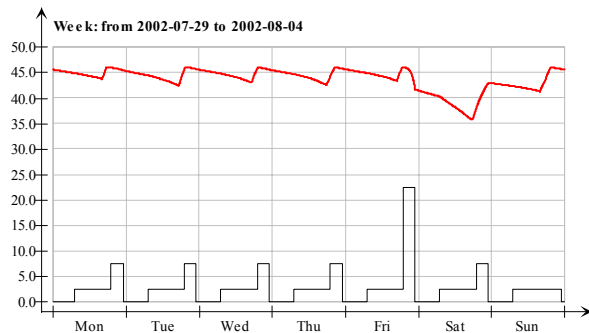


Fig. 58: Warmwasser Temperatur (°C) und Verbrauch (g/s)

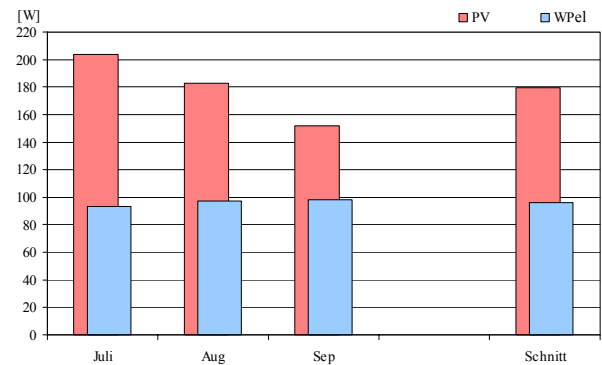


Fig. 59: elektrischer Ertrag der PV und elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe

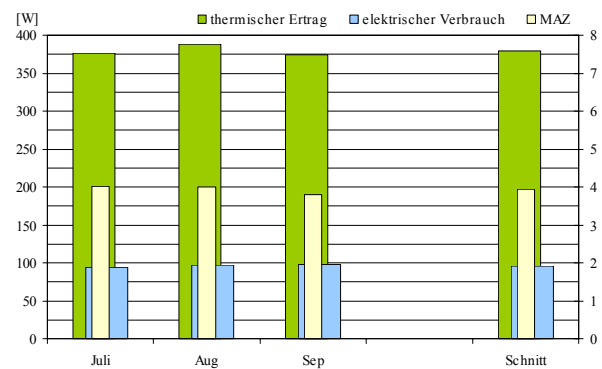


Fig. 60: Monatsarbeitszahl (MAZ) der WP

Monat	PV	WP el	WP th	MAZ
Juli	204	94	377	4.03
August	183	97	388	4.00
September	152	98	374	3.80
Schnitt	180	96	379	3.94

Tab. 11: Elektrischer Ertrag PV (W); elektrischer Verbrauch WP (W); thermischer Ertrag WP (W); Monatsarbeitszahl WP.

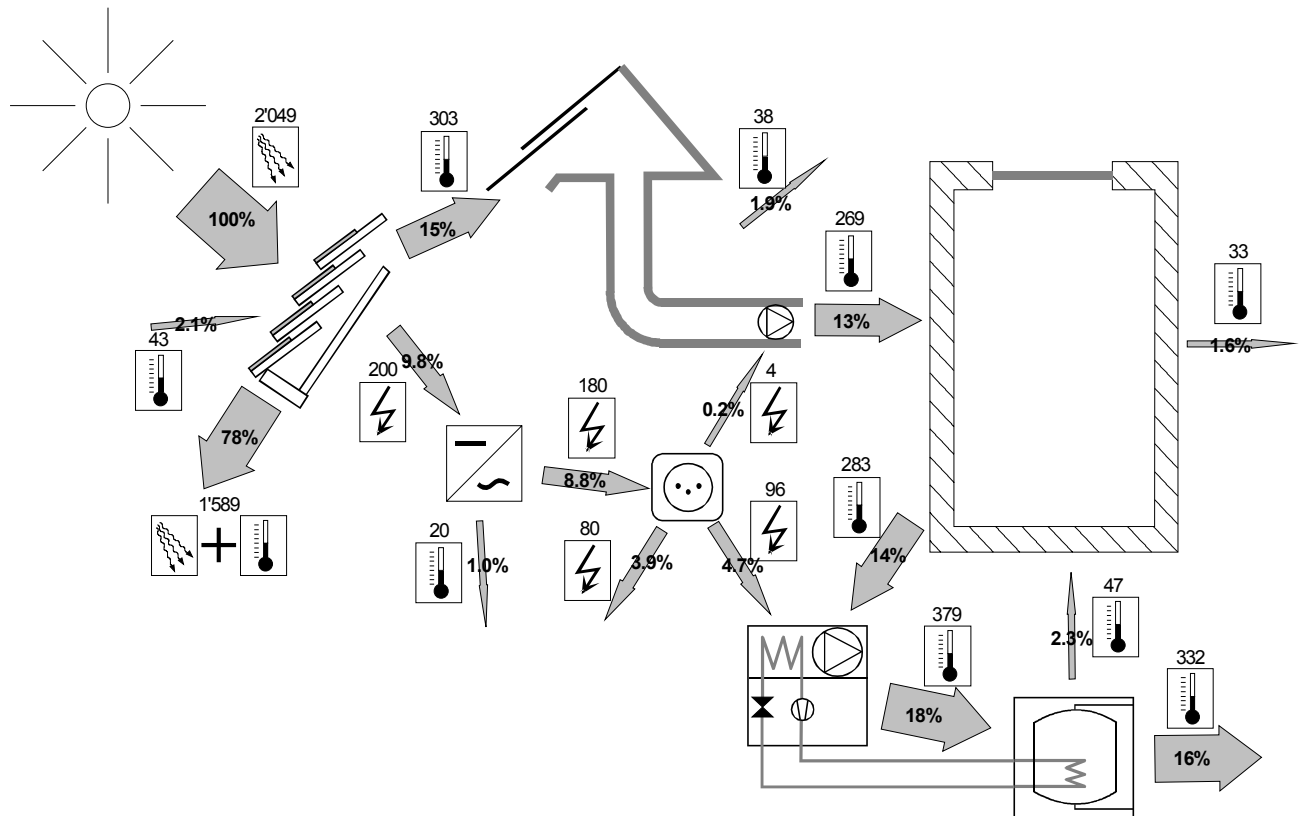


Fig. 61: Bilanz der Energieflüsse des Systems D. Die angegebenen Absolutwerte entsprechen der durchschnittlichen Leistung in W für die ganze Simulationsperiode 1. Juli bis 30. September. Die Prozentwerte beziehen sich auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche.

System D unterscheidet sich von System C lediglich im doppelt so grossen Speichervolumen. Das Simulationsschema (Fig. 55) ist identisch.

Fig. 56 zeigt, dass die Betriebszeiten der Wärmepumpe ausserhalb derjenigen der PV-Hinterlüftung nicht wesentlich verkürzt werden können.

Auch der Raumkomfort (Fig. 57) bleibt gleich wie bei System C. Die mittlere Raumtemperatur beträgt 18.2 °C.

Fig. 58 zeigt aber, dass mit einem grösseren Speicher das Problem des Absinkens der Speichertemperatur nicht nur an Tagen mit normalem Verbrauch, sondern auch an solchen mit hohem Verbrauch (Freitag) gelöst werden kann. Dazu ist jedoch ein Nachladen an solchen Tagen auch nach Mitternacht nötig.

Tab. 11 und Fig. 59 - Fig. 61 zeigen die Bilanz der verschiedenen Energieflüsse des Systems. Angegeben ist jeweils die über die ganze Simulationsperiode gemittelte Leistung in Watt. Leider steigt der elektrische Verbrauch der Wärmepumpe durch den grösseren Speicher wieder auf gleich hohe Werte wie bei System B zurück. Grund dazu sind einerseits die höheren thermischen Verluste des grösseren Speichers und andererseits die verlängerten Betriebszeiten der Wärmepumpe Abends und die dadurch tiefere Arbeitszahl.

Simulation E

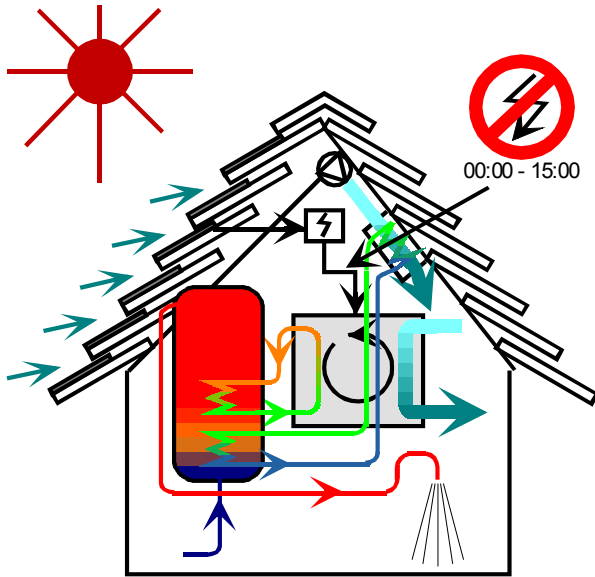


Fig. 62: System für Simulation E

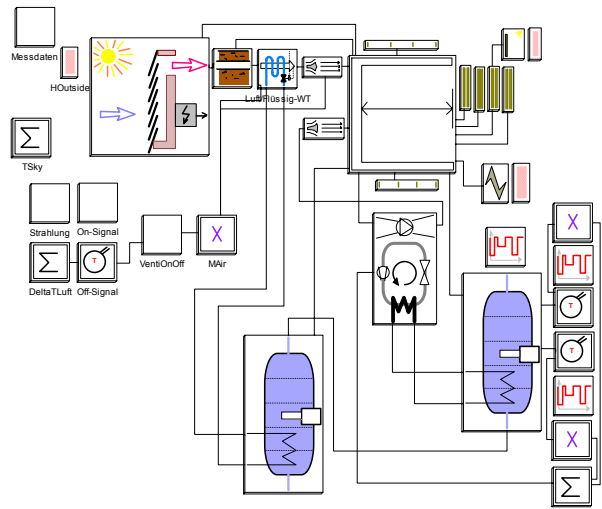


Fig. 63: Schema in IDA ICE für Simulation E

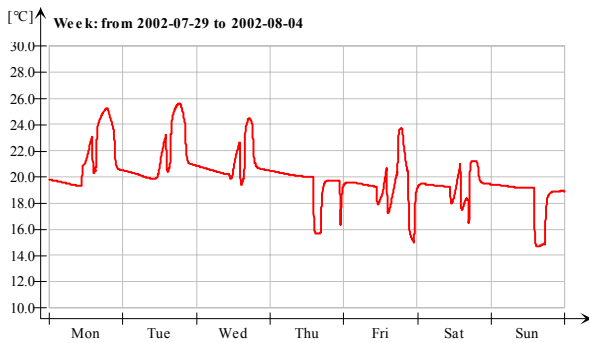


Fig. 64: Raumtemperatur

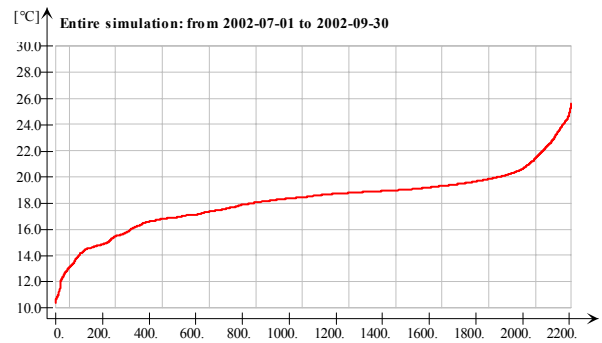


Fig. 65: Raumtemperaturverteilung

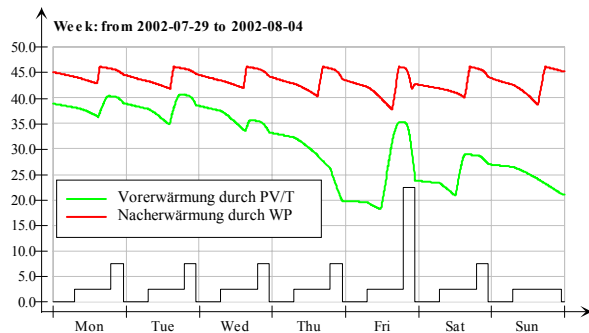


Fig. 66: Warmwasser Temperatur (°C) und Verbrauch (g/s)

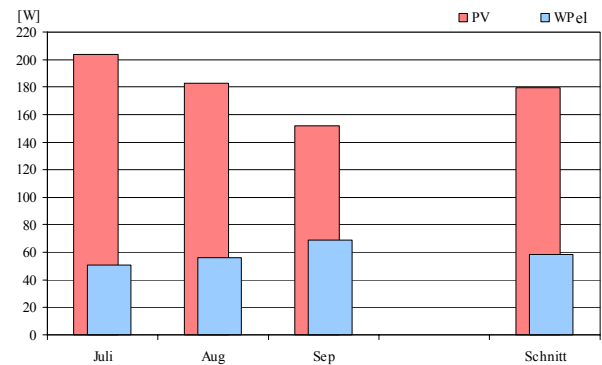


Fig. 67: elektrischer Ertrag der PV und elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe

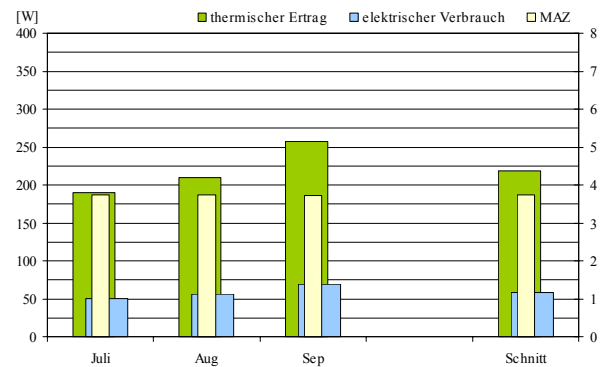


Fig. 68: Monatsarbeitszahl (MAZ) der WP

Monat	PV	WP el	WP th	MAZ
Juli	204	51	191	3.74
August	183	56	210	3.74
September	152	69	257	3.63
Schnitt	180	59	219	3.73

Tab. 12: Elektrischer Ertrag PV (W); elektrischer Verbrauch WP (W); thermischer Ertrag WP (W); Monatsarbeitszahl WP.

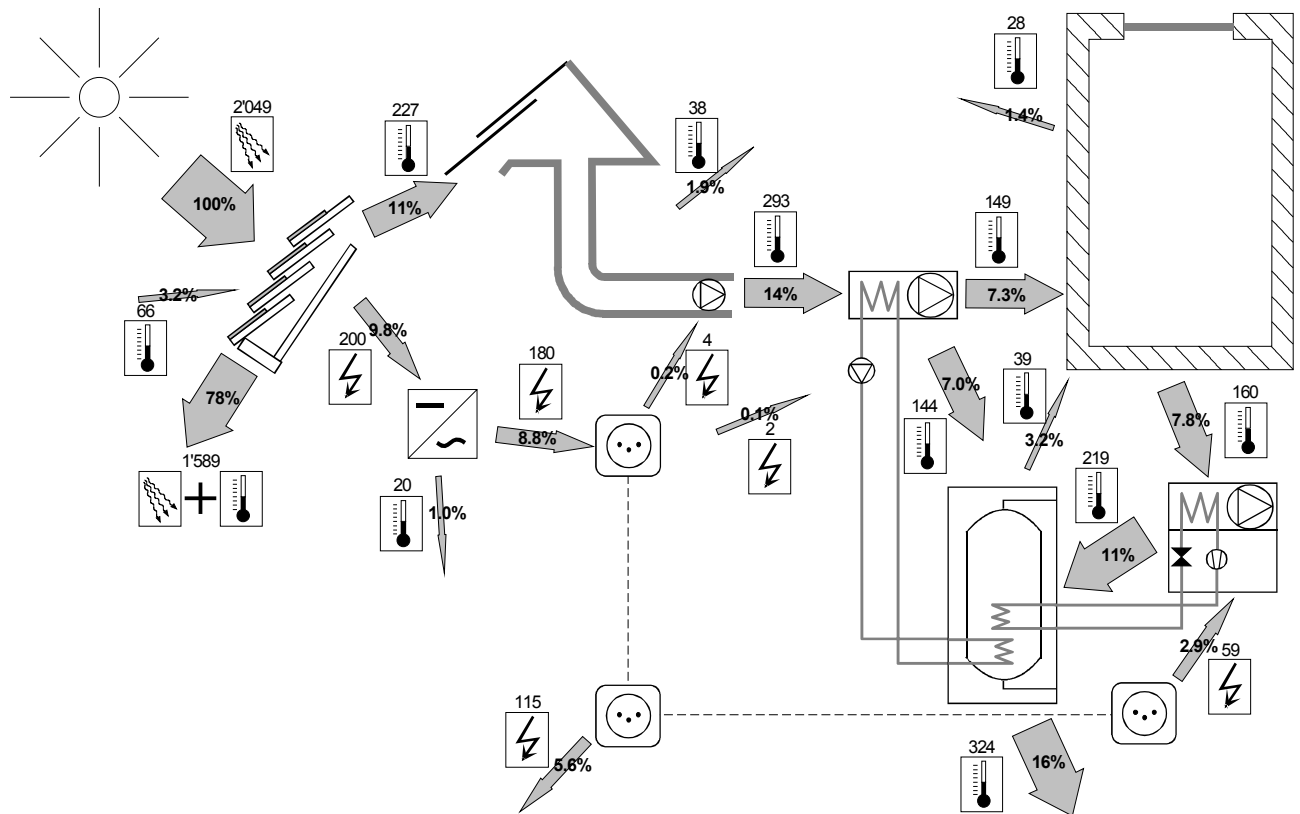


Fig. 69: Bilanz der Energieflüsse des Systems E. Die angegebenen Absolutwerte entsprechen der durchschnittlichen Leistung in W für die ganze Simulationsperiode 1. Juli bis 30. September. Die Prozentwerte beziehen sich auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche.

Bei System E kommt zwischen dem Erdrohr und dem Lufteinlass in den Raum ein Luft-Flüssig-Wärmetauscher hinzu (Fig. 63). Da das Speichermodell nur einen Wärmetauscher beinhaltet, werden zwei Speicher der ursprünglichen Grösse (System A-C) in Serie geschaltet. Zusammen sind die beiden Speicher gleich gross wie derjenige von System D.

In Fig. 64 sind bereits die wesentlich kürzeren Betriebszeiten der Wärmepumpe klar erkennbar.

Fig. 65 zeigt eine weitere Komfortverbesserung gegenüber allen bisherigen Systemen. Die Anzahl zu kalte Stunden wird dadurch gesenkt, dass die Wärmepumpe weniger lang läuft, und die Anzahl zu heisse Stunden dadurch, dass die von der PV-Hinterlüftung erwärmte Luft durch den Wärmetauscher gekühlt wird. Die mittlere Raumtemperatur beträgt 18.2 °C.

Fig. 66 zeigt die Speichertemperatur sowohl nach dem ersten Wärmetauscher (grüne Kurve) wie auch beim Speicheraustritt (rote Kurve). Dabei wird klar ersichtlich, wie stark die direkte Vorerwärmung durch den Wärmetauscher an sonnigen Tagen die Wärmepumpe unterstützen kann. Die Deckung des Warmwasserbedarfs an Tagen mit hohem Verbrauch ist auch hier kein Problem.

Tab. 12 und Fig. 67 - Fig. 69 zeigen die Bilanz der verschiedenen Energieflüsse des Systems. Angegeben ist jeweils die über die ganze Simulationsperiode gemittelte Leistung in Watt. Der elektrische Verbrauch der Wärmepumpe kann durch die direkte Vorerwärmung nochmals erheblich gesenkt werden. Die Arbeitszahl fällt dabei etwas tiefer aus, weil die Wassererwärmung durch die Wärmepumpe durchschnittlich auf einem höheren Temperaturniveau geschieht.

Fazit

Der Hauptgewinn der PV-Hinterlüftung, wie sie momentan in Betrieb ist, liegt im Mehrertrag auf Grund der Zellokühlung (180 statt 156 W Durchschnittsleistung während den 3 Monaten Juli, August September).

Die Einführung der Warmluft in den Bastelraum bringt keine nennenswerte Einsparung im Stromverbrauch der Wärmepumpe. Der Hauptgewinn liegt hier in der Reduktion der Stundenzahl mit zu kühler Bastelraumtemperatur um ungefähr ein Drittel und in der Steigerung der durchschnittlichen Raumlufttemperatur um 2°C auf 18°C. Damit kann Feuchtigkeitsproblemen vorgebeugt werden.

Mit einfachen Mitteln kann mehr Nutzen aus der Anlage gezogen werden, indem die Wärmepumpe mittels Schaltuhr von Mitternacht bis 15:00 ausgeschaltet wird, um zu erzwingen, dass sie vor allem zwischen 15:00 und 16:00 - gleichzeitig mit der PV-Hinterlüftung - in Betrieb ist. Der Stromverbrauch der Wärmepumpe kann so um 20% reduziert und der für andere Verbraucher zur Verfügung stehende Solarstrom um weitere 20% gesteigert werden. Ausserdem wird die Stundenzahl mit zu kühler (wie auch die mit zu warmer) Bastelraumtemperatur weiter gesenkt. Bei hohem Warmwasserverbrauch muss dann aber mit leerem Speicher um die Mittagszeit gerechnet werden. Die Verschiebung des Wärmepumpenbetriebs auf den Mittag macht zwar auch für die direkte Nutzung des selber produzierten Solarstroms Sinn, bringt für den Nutzer aber einen nicht unwesentlichen Tarif-Nachteil.

Ein grösserer Speicher allein vermag zwar das durch die Schaltuhr entstandene Problem des Warmwassermangels am Mittag zu lösen, macht aber gleichzeitig den Vorteil des kleineren Stromverbrauchs der Wärmepumpe wieder rückgängig.

Die mit Abstand beste Lösung bedarf eines etwas grösseren Aufwandes: In einem dem bestehenden Wärmepumpenboiler vorgeschalteten Speicher wird das kalte Wasser mittels Wärmetauscher direkt von der PV/T-Warmluft vorgewärmt. Der Stromgewinn der ganzen Anlage (PV/T und Warmwasseraufbereitung) kann so gegenüber einer nicht hinterlüfteten PV-Anlage verdoppelt werden!

7. 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] Ivan Gattlen, Fabian Meer: "PV/T Luftkollektor als Quelle einer Luft/Wasser Wärmepumpe"; Diplomarbeit Nr. Vd_02_02 an der HTA Luzern, Horw 2002.

Ebenfalls zu erwähnen ist die Diskrepanz zwischen der gemessenen Arbeitszahl (2-3) und der berechneten Arbeitszahl (ca. 4) der Wärmepumpe. Offenbar gelten die Herstellerangaben, welche der Simulation zu Grunde liegen, nicht für den realen Betriebsfall. Es ist leicht einzusehen, dass im gut benutzten Bastelraum, wo die Wärmepumpe einer mit Sägespänen und anderen Stoffen belasteten Luft ausgesetzt ist, relativ schnell altert und nicht mehr gleich gut läuft wie unmittelbar nach der Produktion im Labor.

Qualitativ ändert sich damit an den gemachten Aussagen nichts. Sie gelten weiterhin für eine neue und gut laufende Wärmepumpe. Für die bestehende Wärmepumpe muss der Stromverbrauch um ca. 2/3 höher angenommen werden (siehe Fig. 70 und Fig. 71).

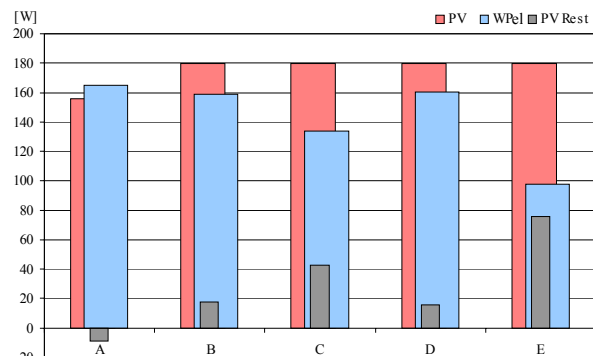


Fig. 70: Elektrische Durchtrittsleistungen (wie Fig. 27, aber mit korrigiertem WP-Verbrauch)

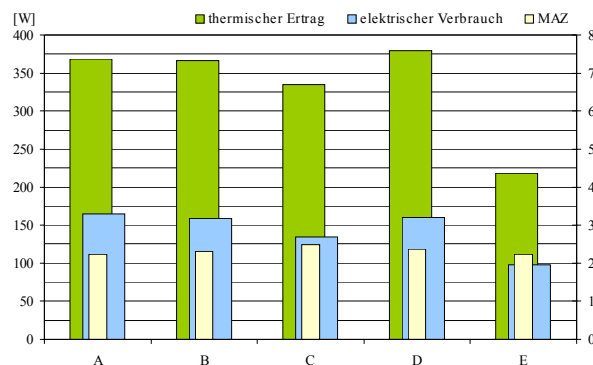
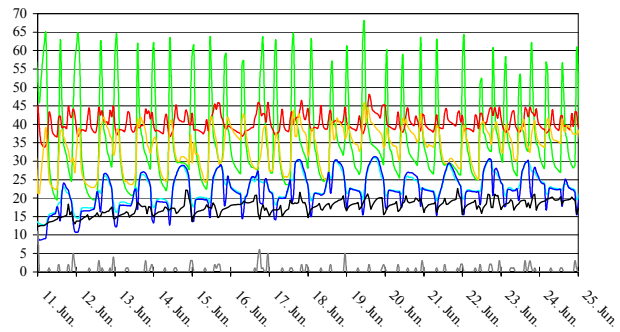
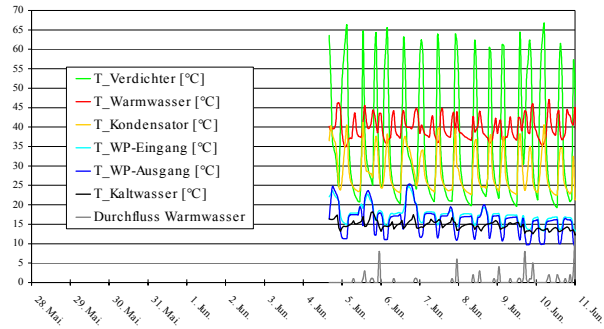


Fig. 71: Durchschnittsleistungen und durchschnittliche Monatsarbeitszahl für die Wärmepumpe (wie Fig. 28, aber mit korrigiertem WP-Verbrauch)

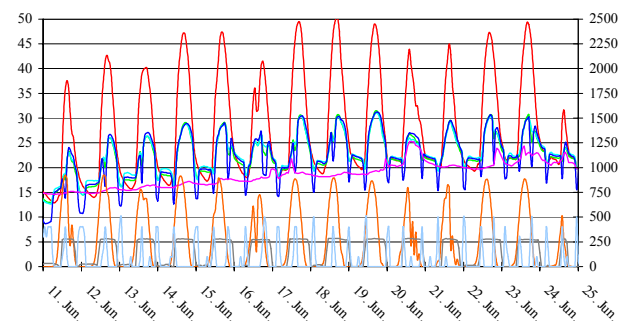
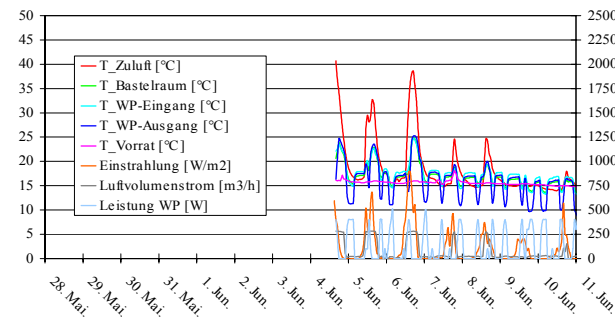
- [4] Sven Kropf:: "PV/T-Schiefer - dynamisches Simulationsmodell"; Zürich 2003.
- [5] Sven Kropf:: "PV/T-Schiefer - Ertragsatlas"; Zürich 2003.
- [6] Sven Kropf:: "PV/T-Schiefer - Anwendungsbeispiele und Fallstudien"; Zürich 2003.

A. Messdaten

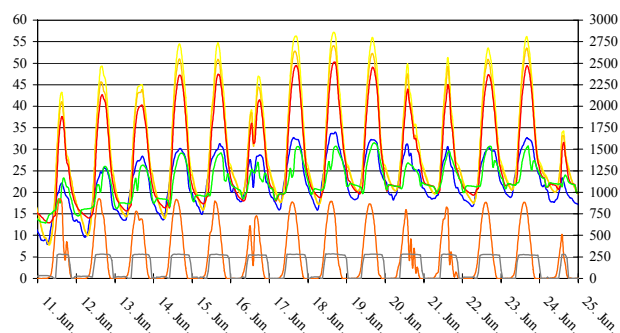
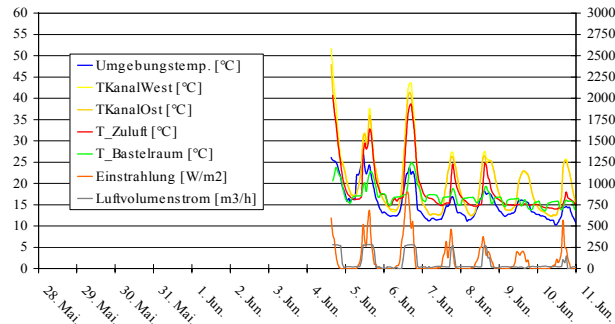
Messdaten Wärmepumpenboiler (Fig. 72)



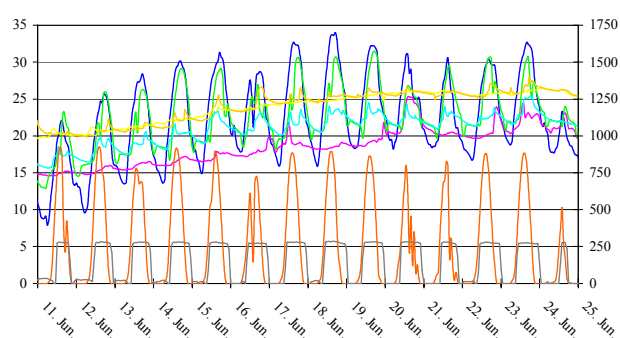
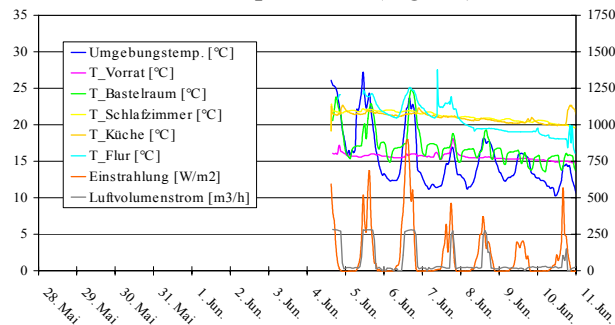
Messdaten Bastelraum (Fig. 73)



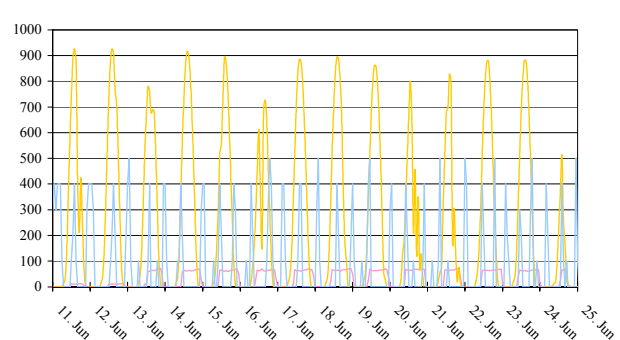
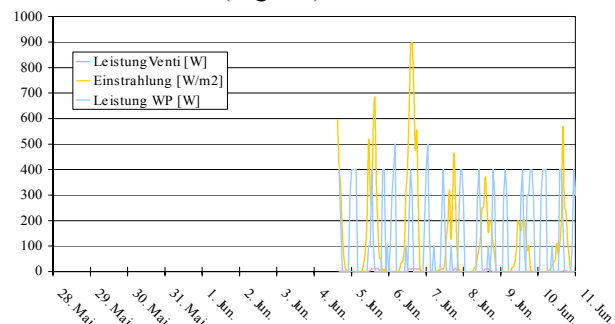
Messdaten Luftkollektor (Fig. 74)



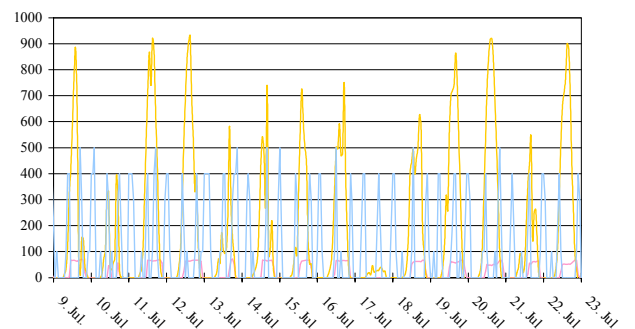
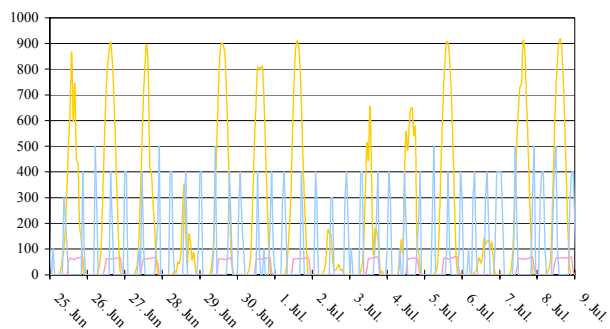
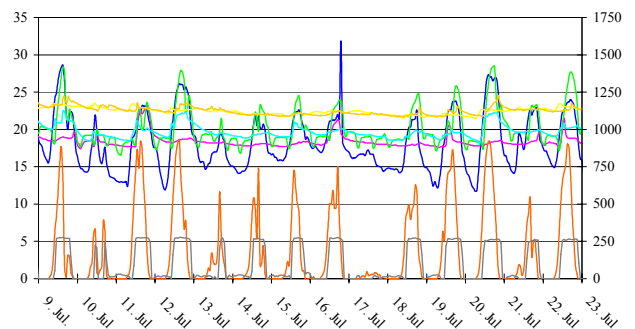
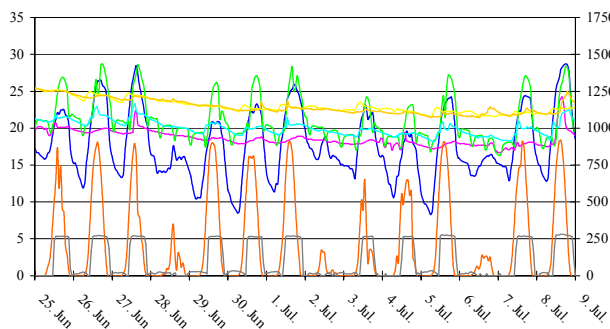
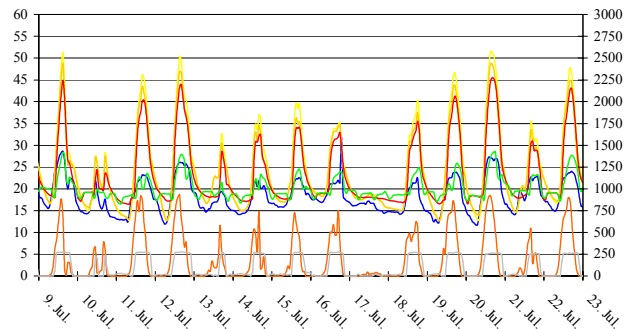
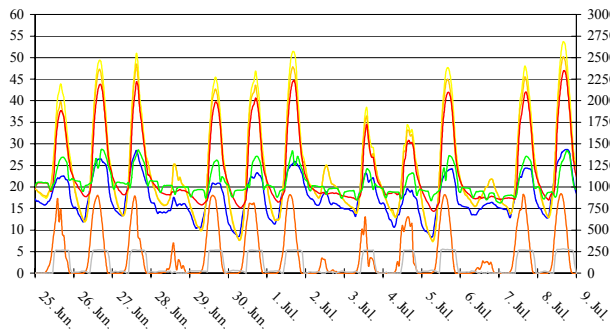
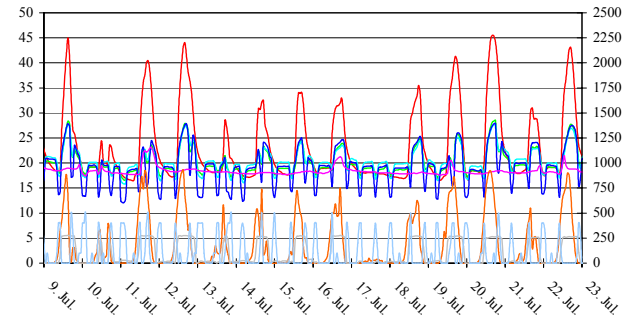
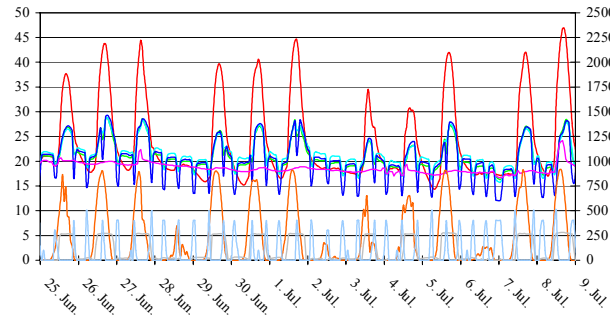
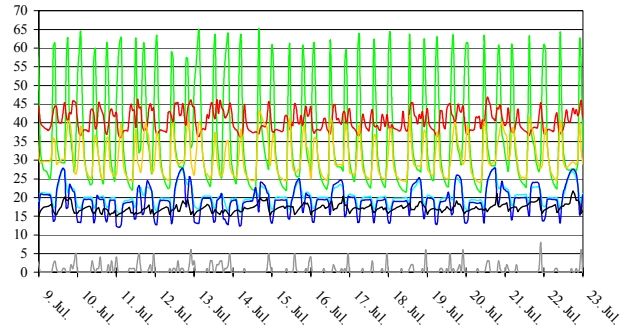
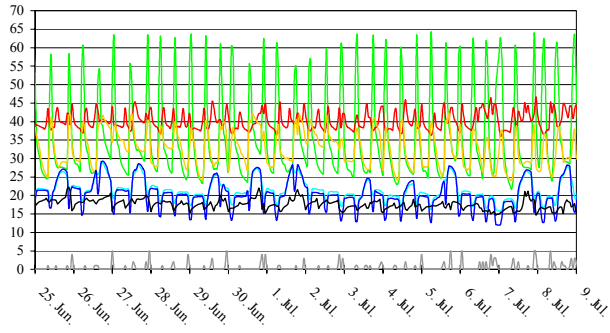
Messdaten Raumtemperaturen (Fig. 75)



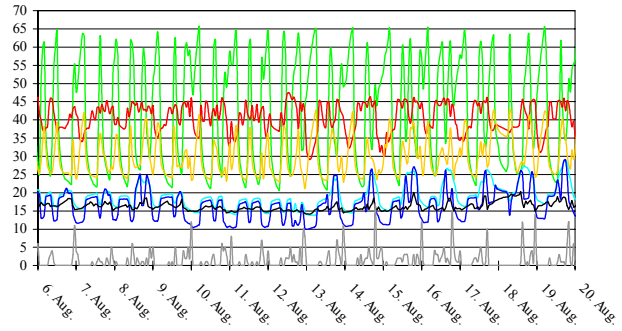
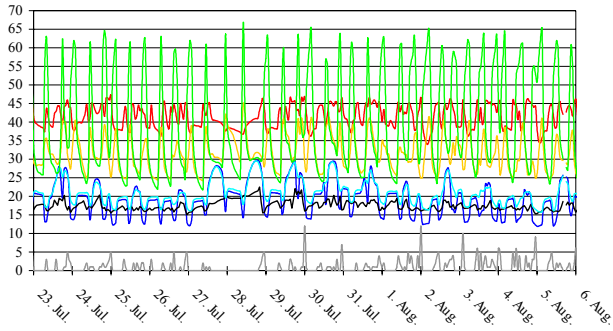
Messdaten Strom (Fig. 76)



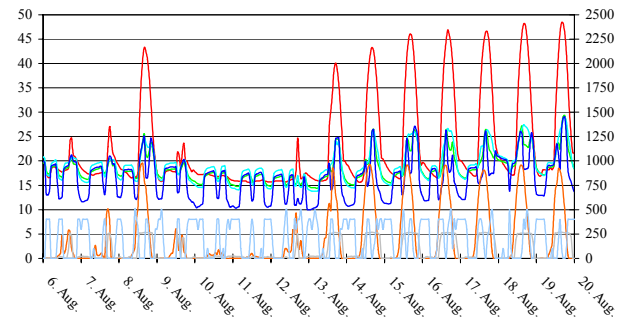
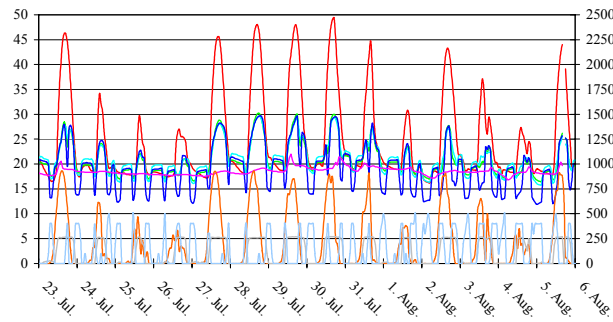
A. Messdaten



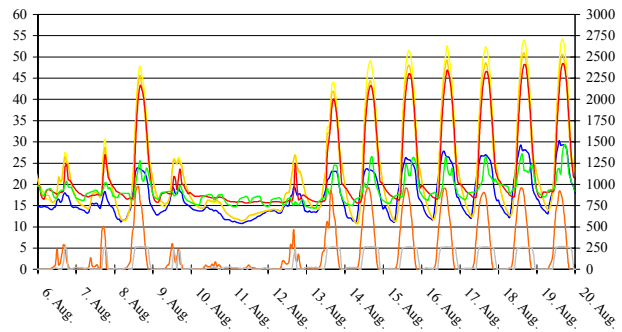
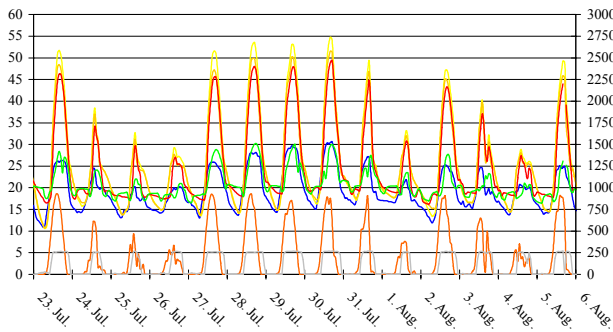
Messdaten Wärmepumpenboiler



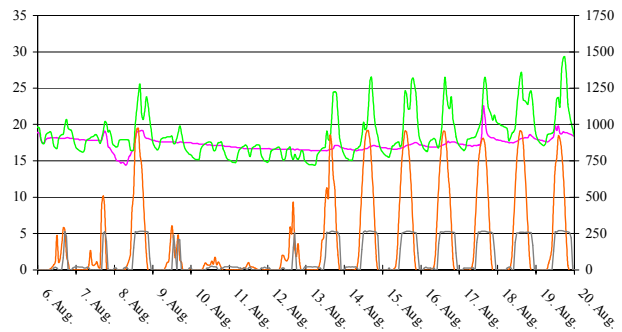
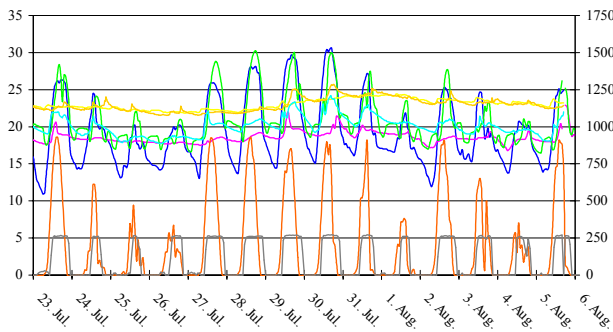
Messdaten Bastelraum



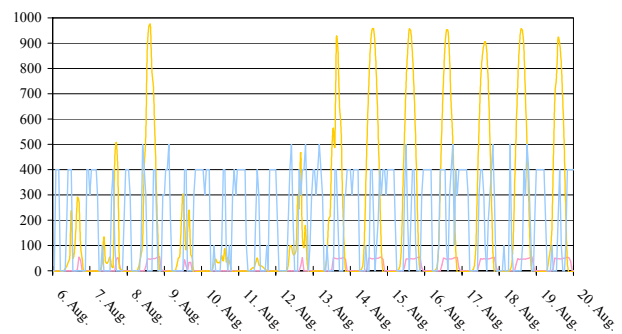
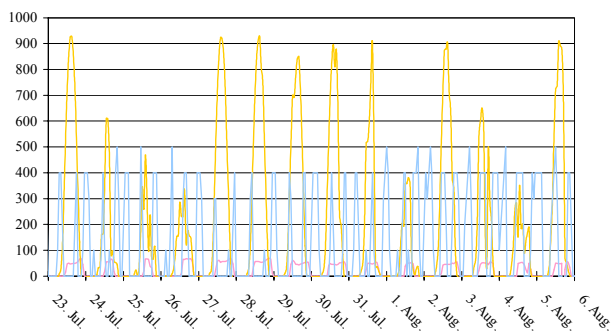
Messdaten Luftkollektor



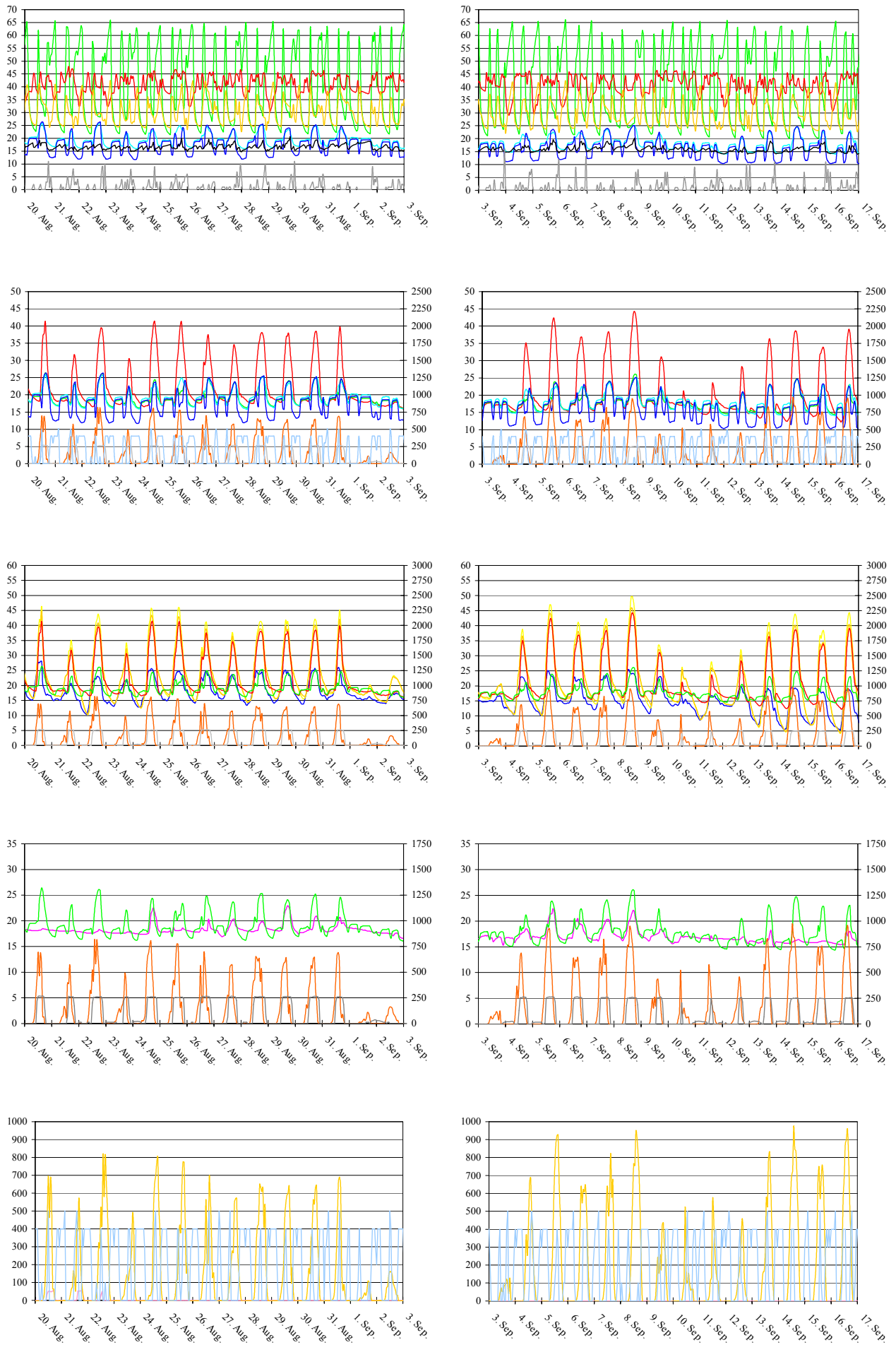
Messdaten Raumtemperaturen



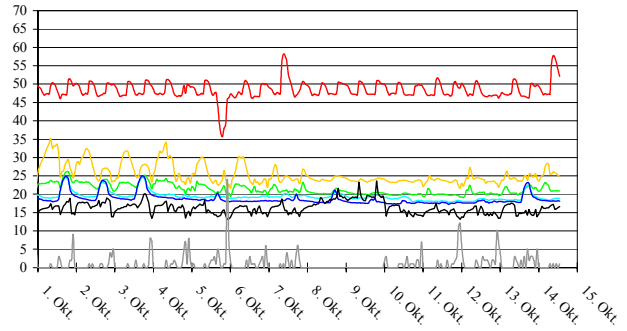
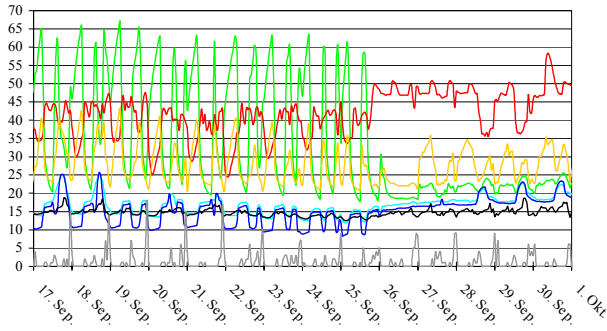
Messdaten Strom



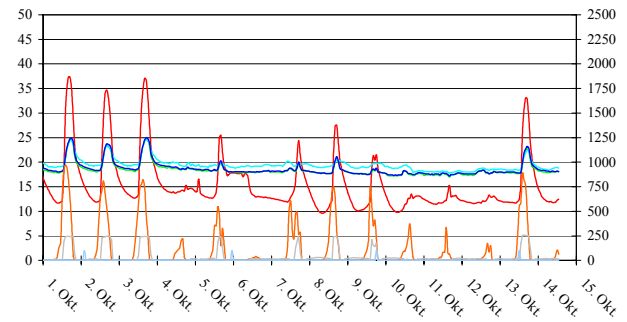
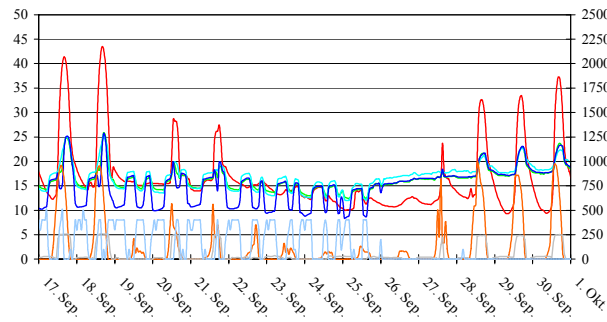
A. Messdaten



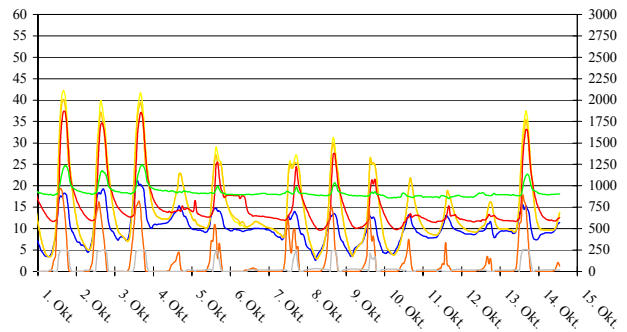
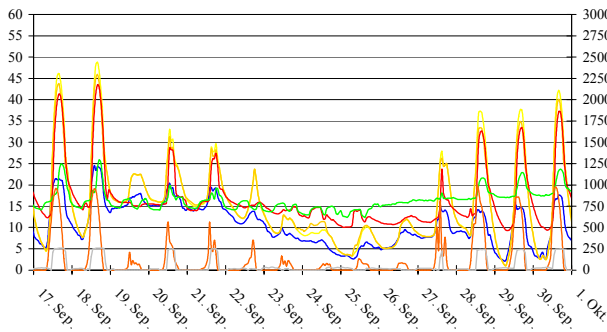
Messdaten Wärmepumpenboiler



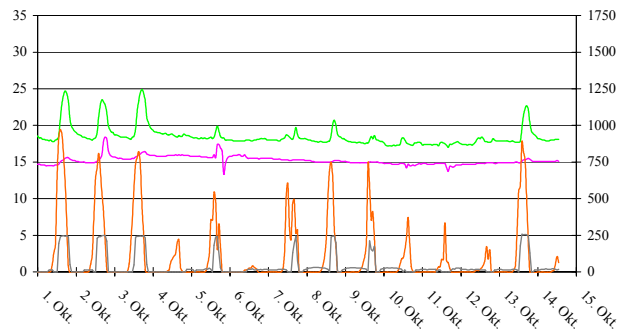
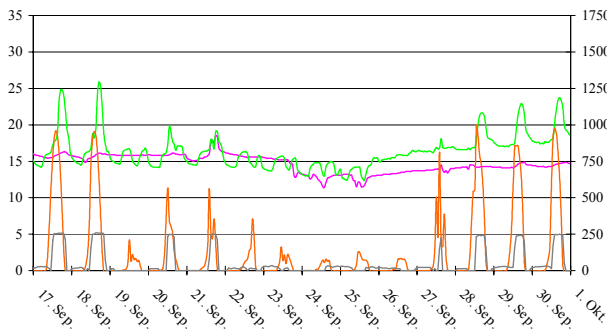
Messdaten Bastelraum



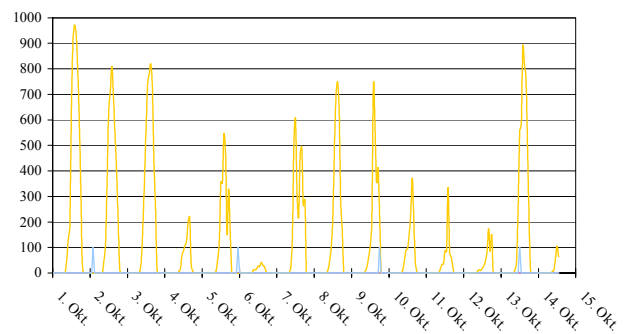
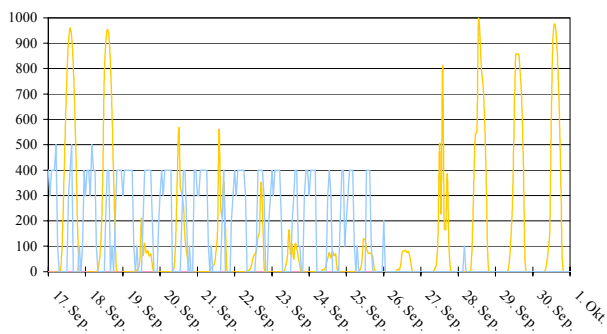
Messdaten Luftkollektor



Messdaten Raumtemperaturen

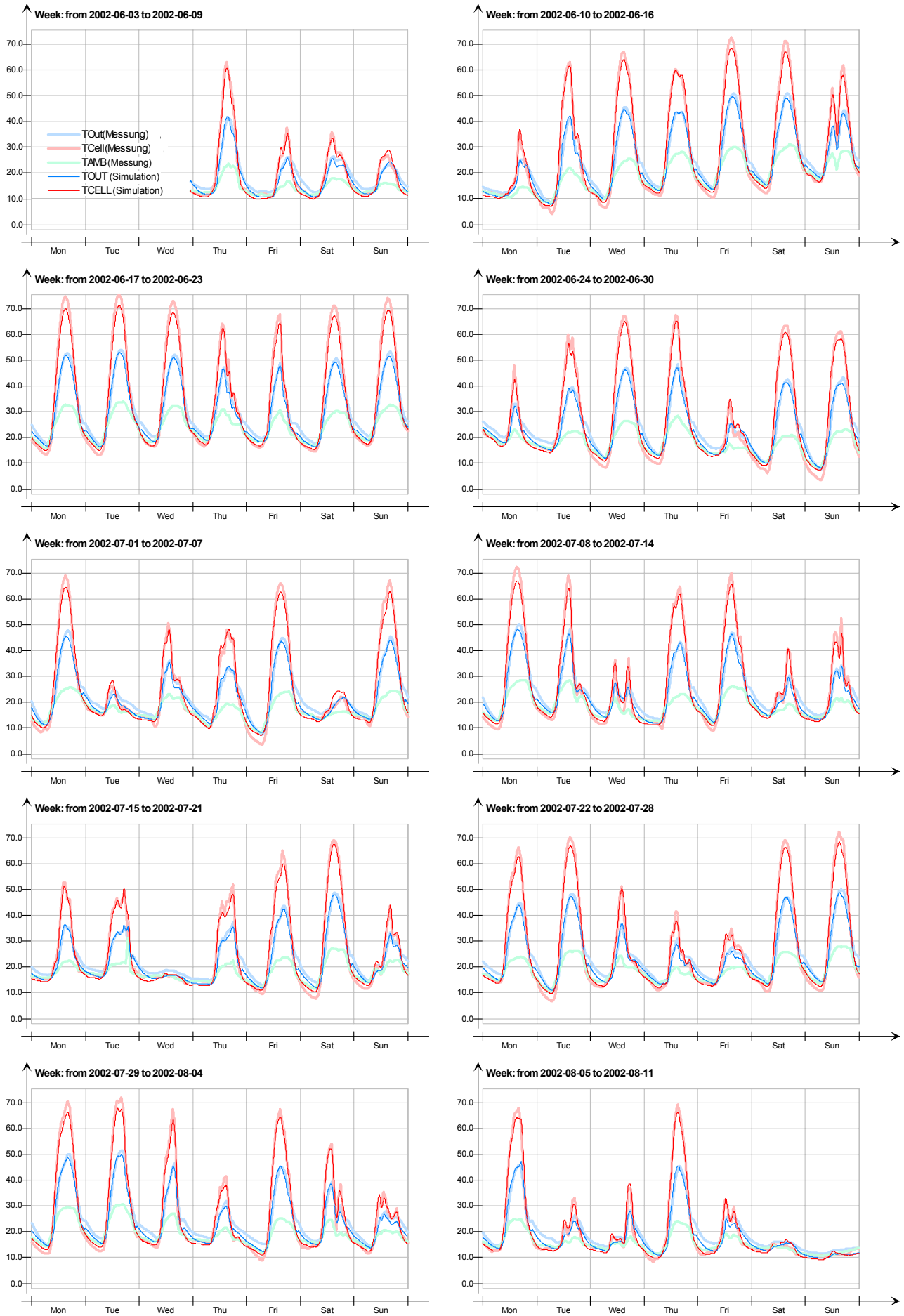


Messdaten Strom



B. Simulationsresultate

B. Simulationsresultate



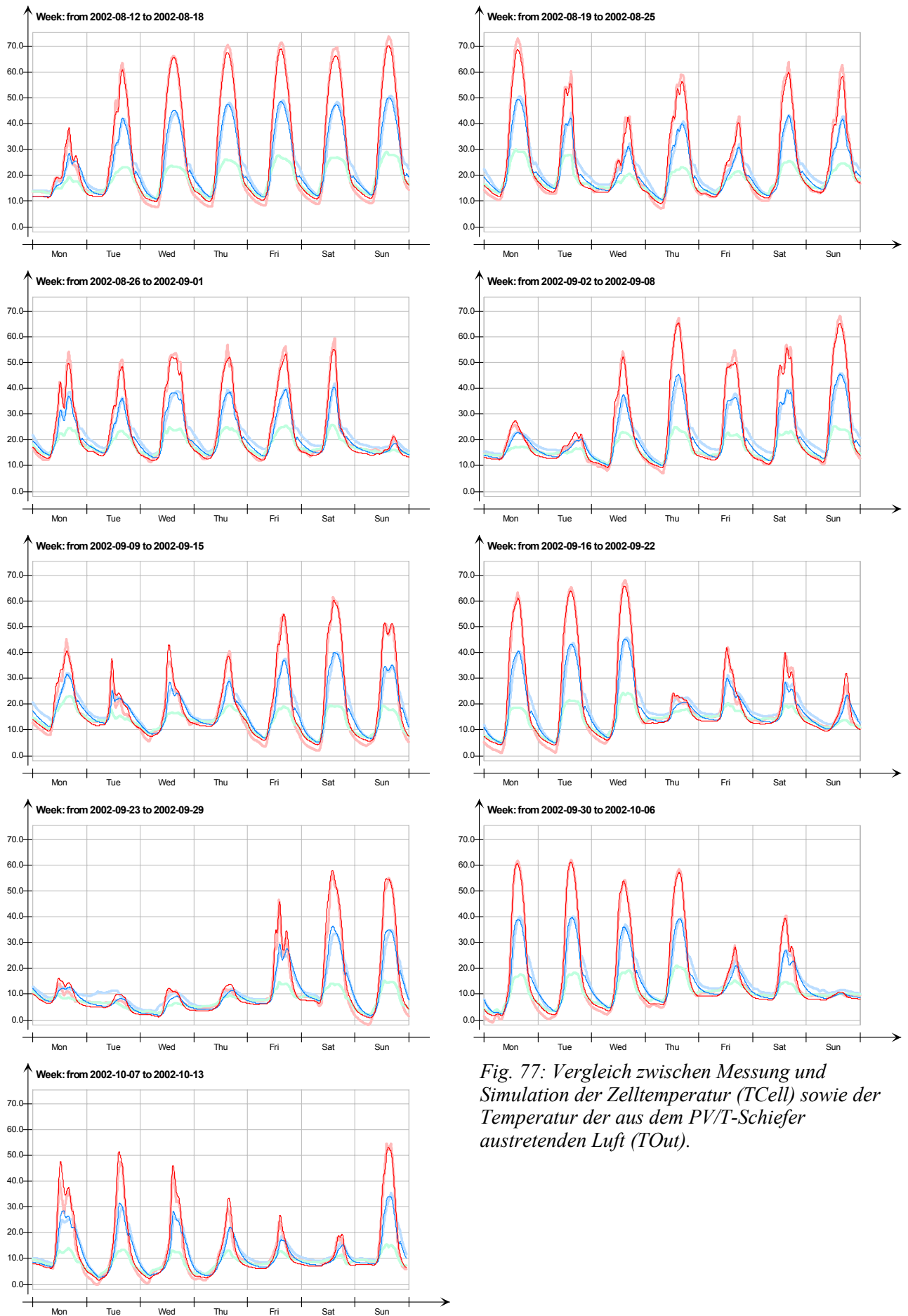
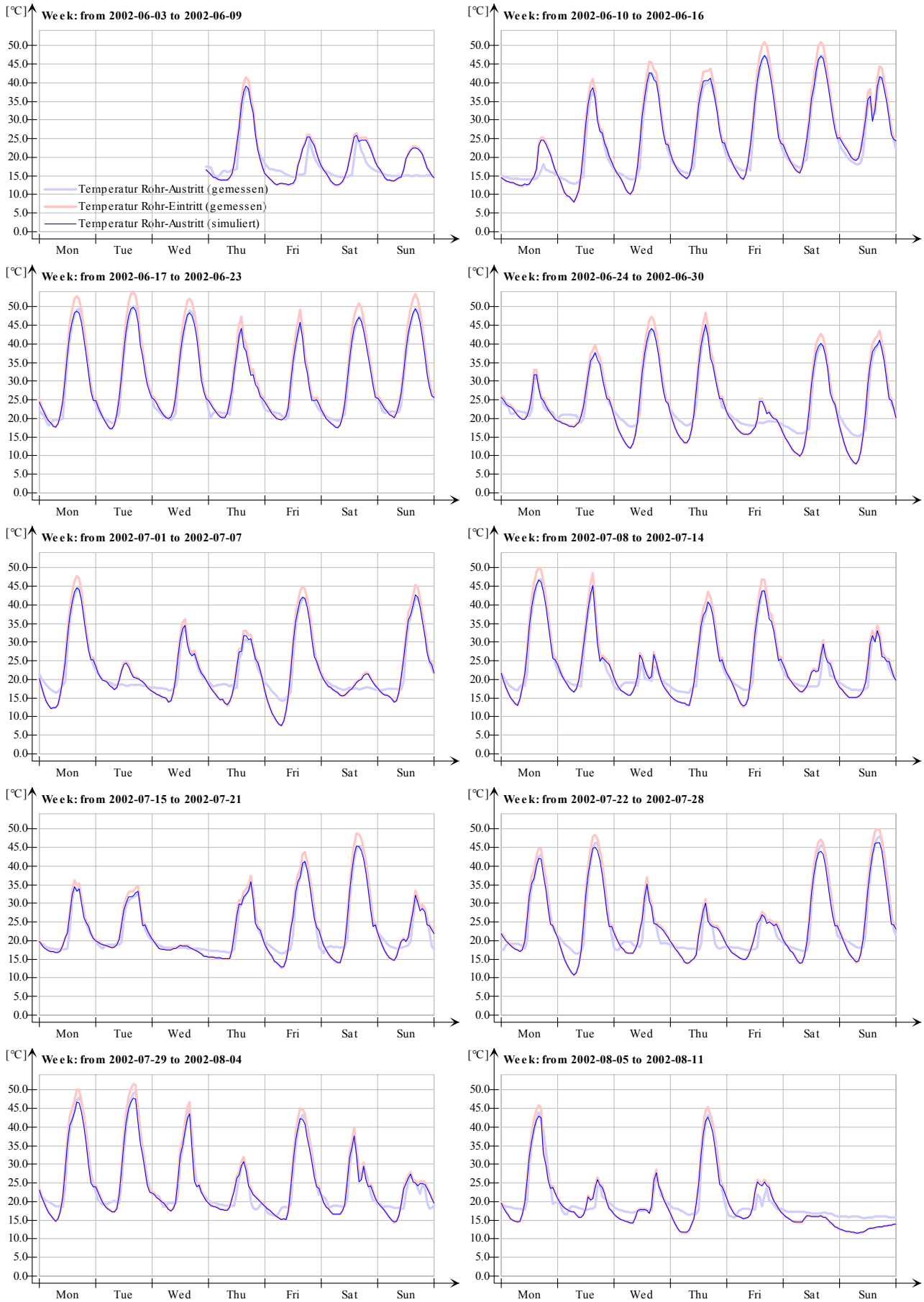


Fig. 77: Vergleich zwischen Messung und Simulation der Zelltemperatur (T_{Cell}) sowie der Temperatur der aus dem PV/T-Schiefer austretenden Luft (T_{Out}).

B. Simulationsresultate



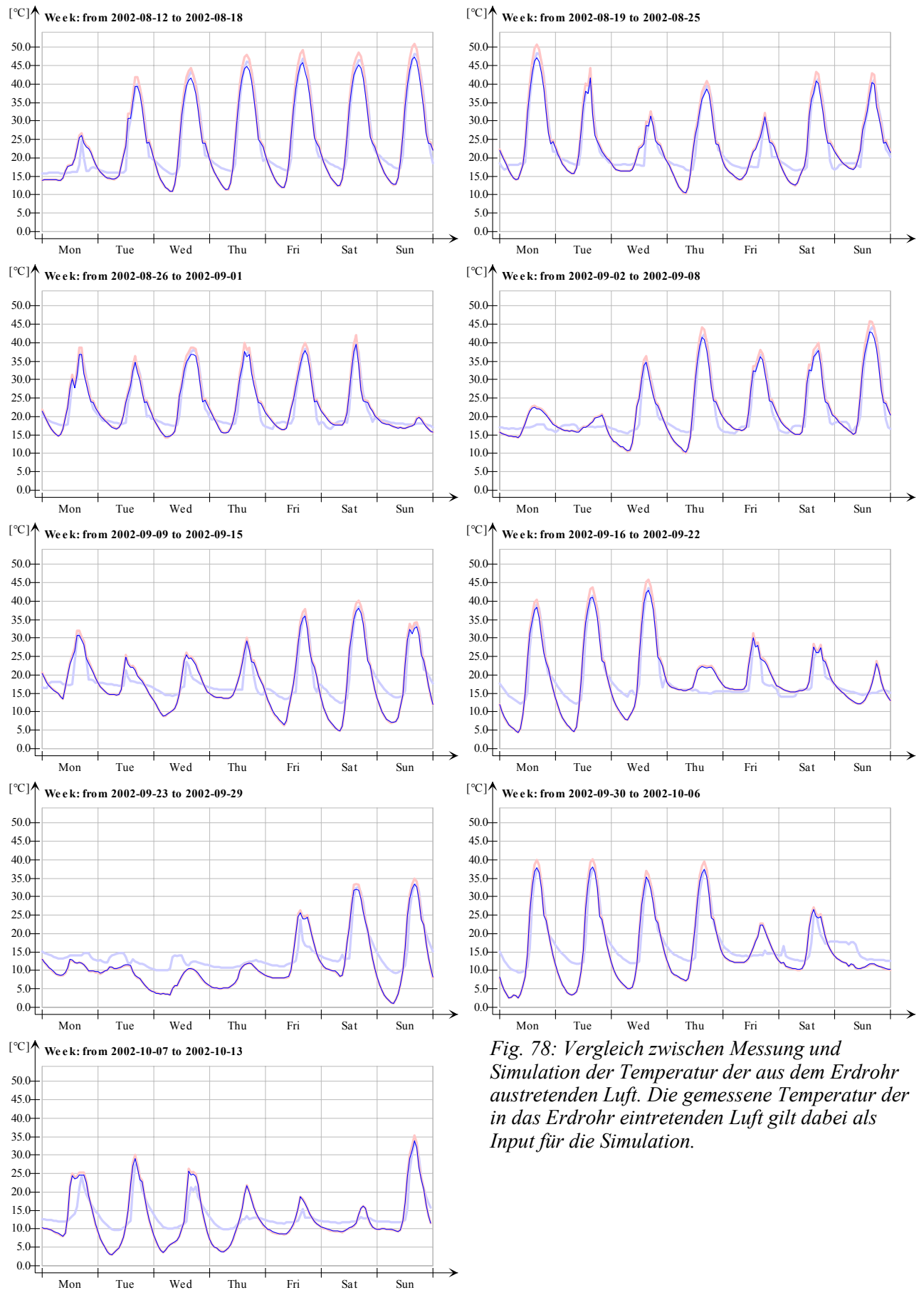
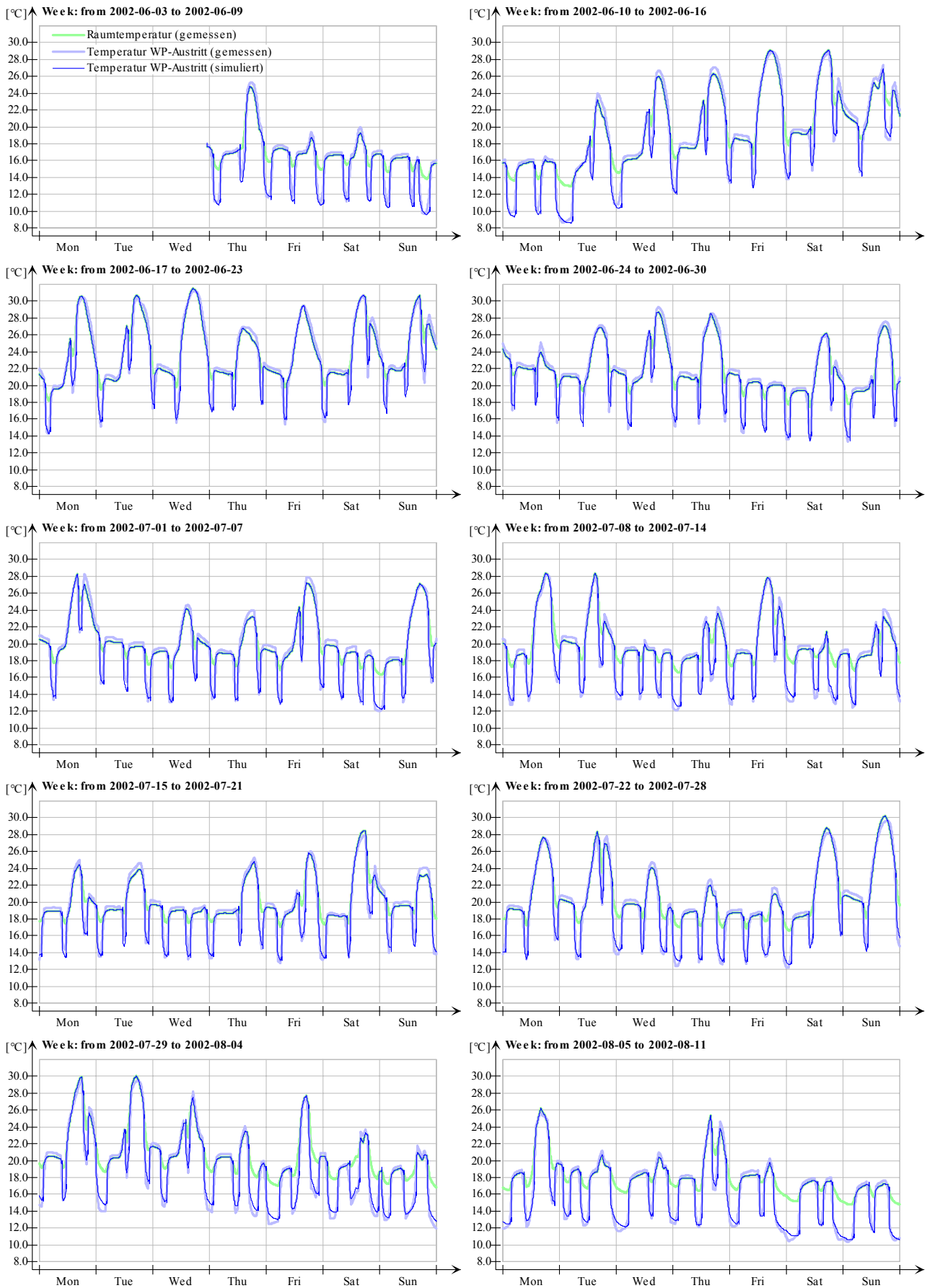


Fig. 78: Vergleich zwischen Messung und Simulation der Temperatur der aus dem Erdrohr austretenden Luft. Die gemessene Temperatur der in das Erdrohr eintretenden Luft gilt dabei als Input für die Simulation.

B. Simulationsresultate



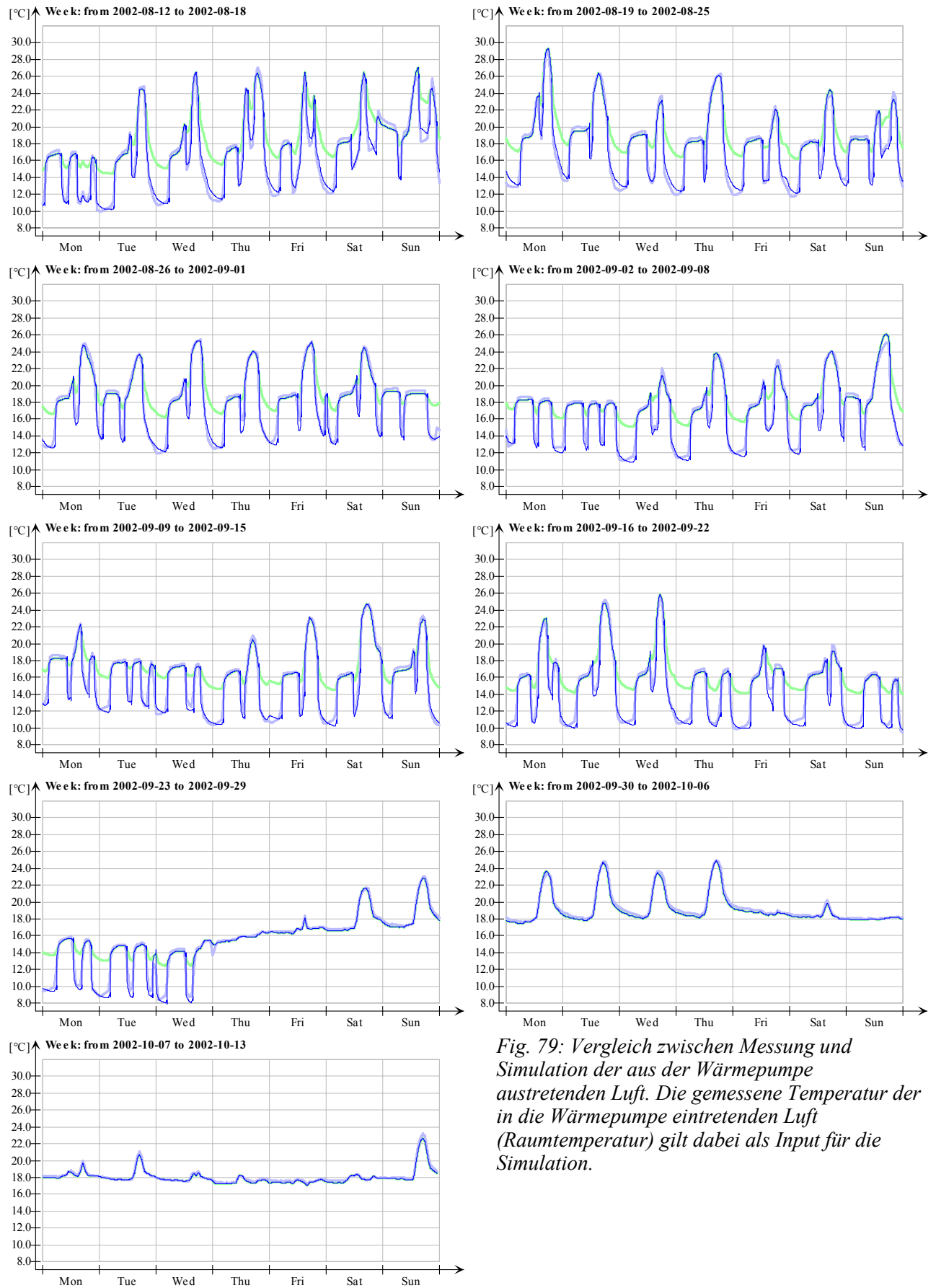
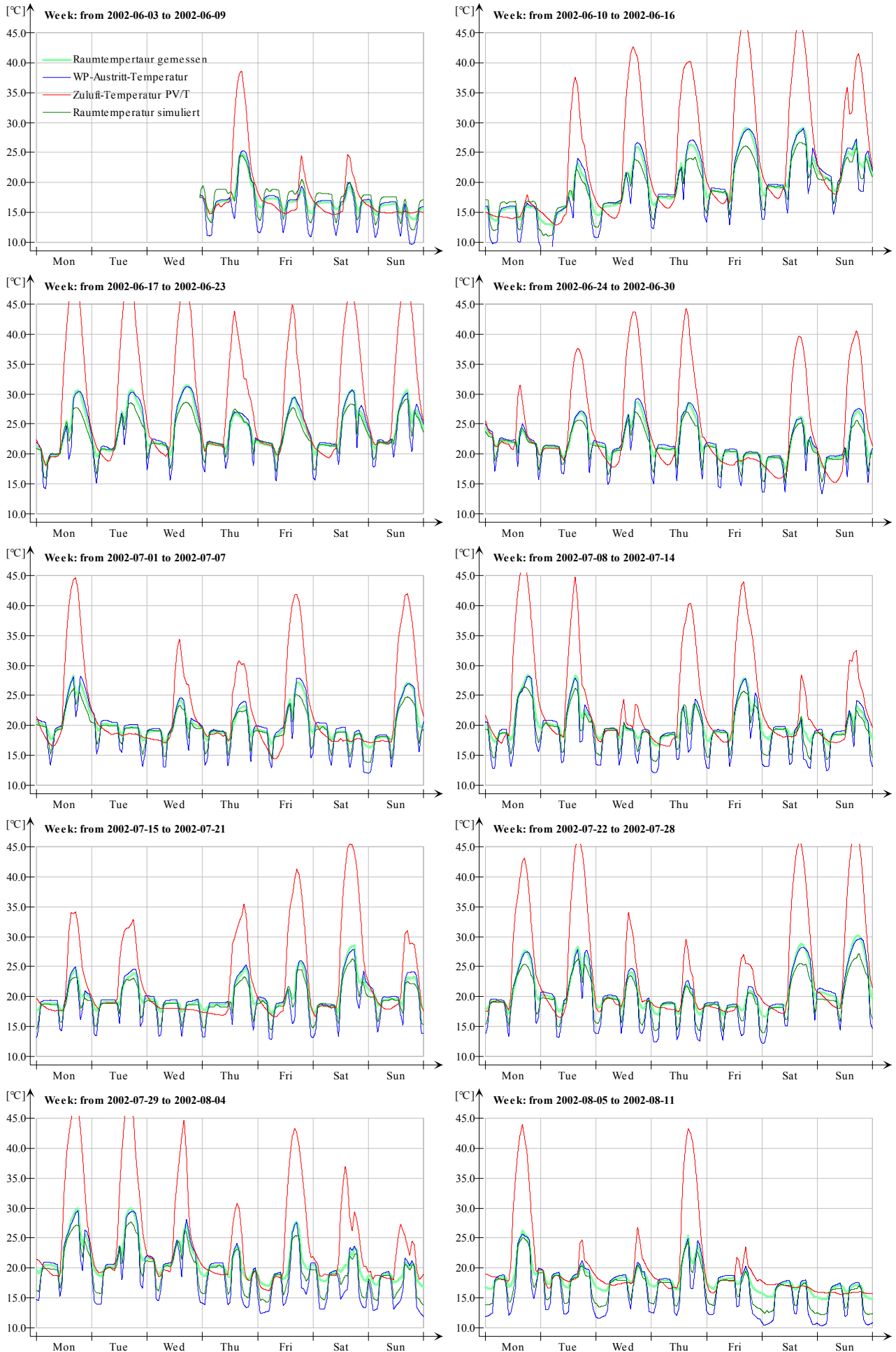


Fig. 79: Vergleich zwischen Messung und Simulation der aus der Wärmepumpe austretenden Luft. Die gemessene Temperatur der in die Wärmepumpe eintretenden Luft (Raumtemperatur) gilt dabei als Input für die Simulation.

B. Simulationsergebnisse



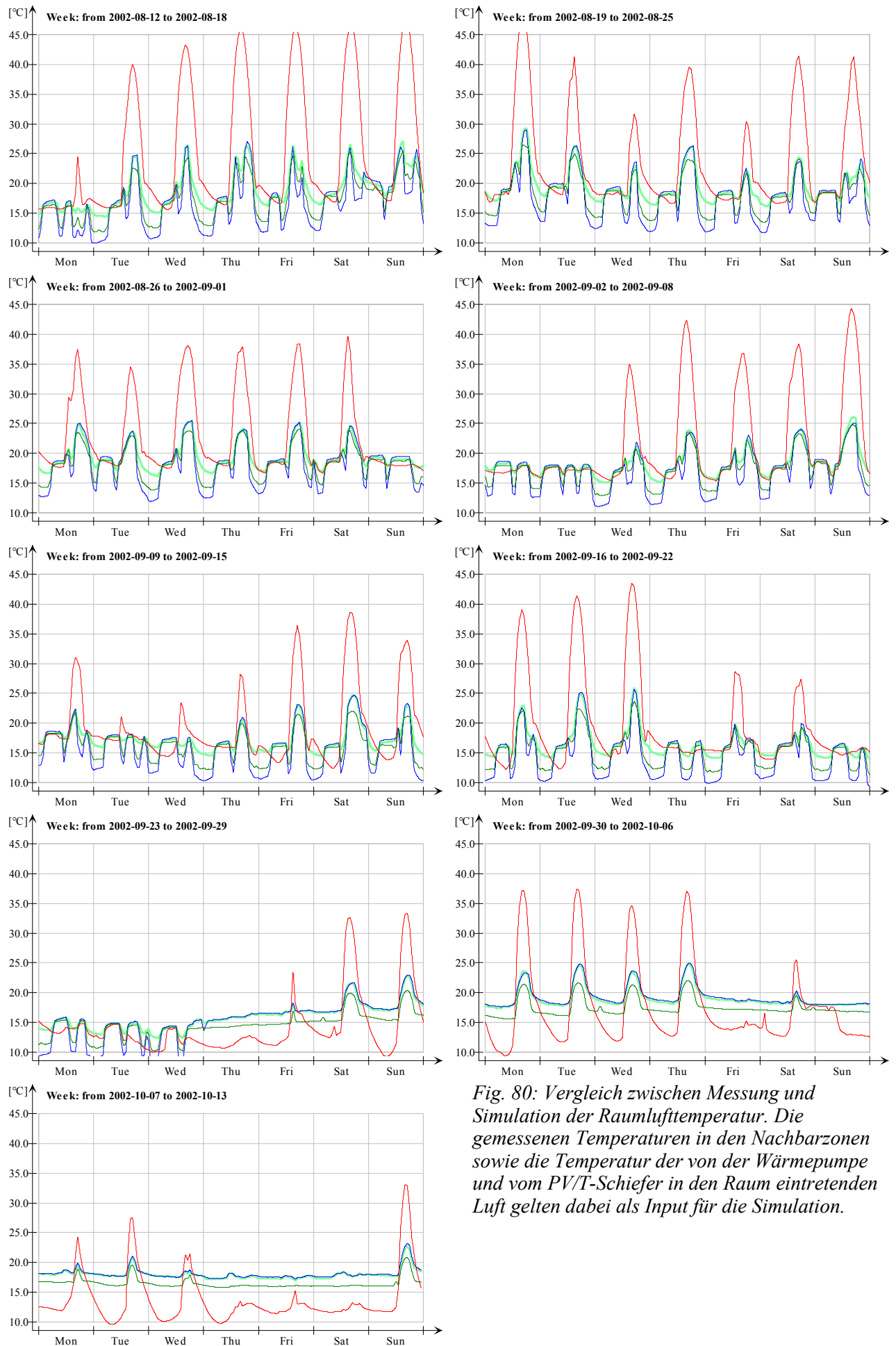
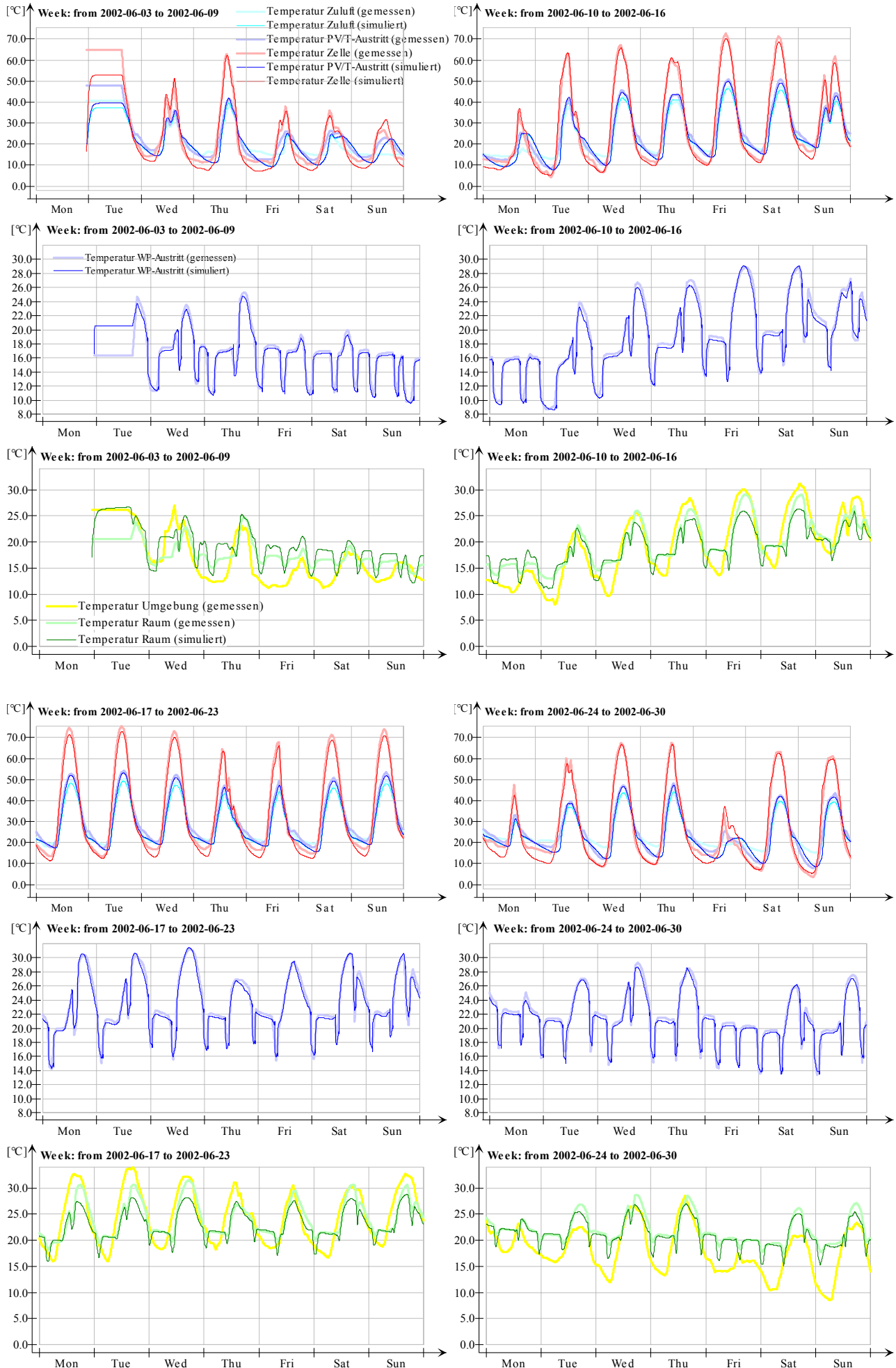
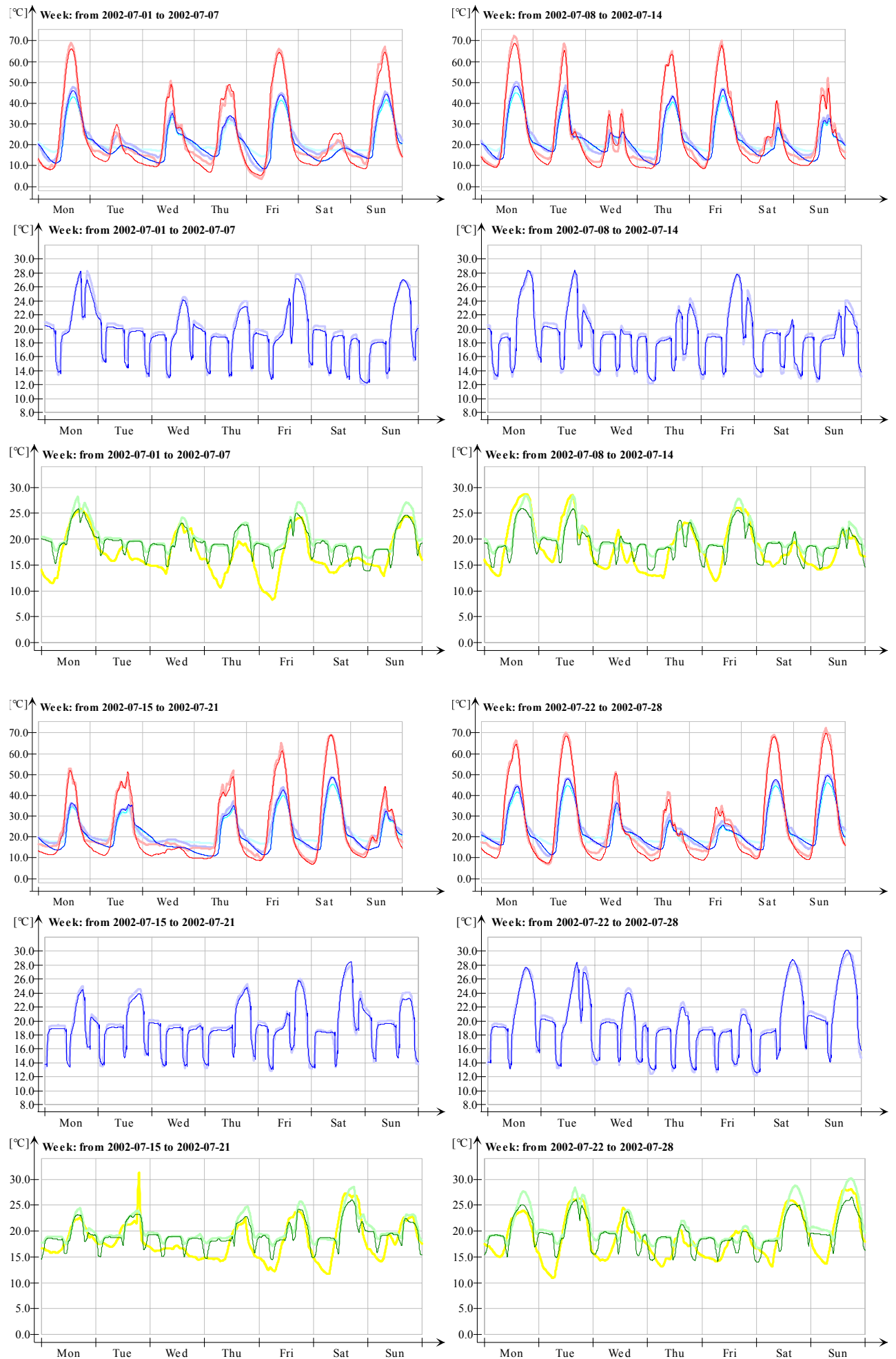


Fig. 80: Vergleich zwischen Messung und Simulation der Raumlufttemperatur. Die gemessenen Temperaturen in den Nachbarzonen sowie die Temperatur der von der Wärmepumpe und vom PV/T-Schiefer in den Raum eintretenden Luft gelten dabei als Input für die Simulation.

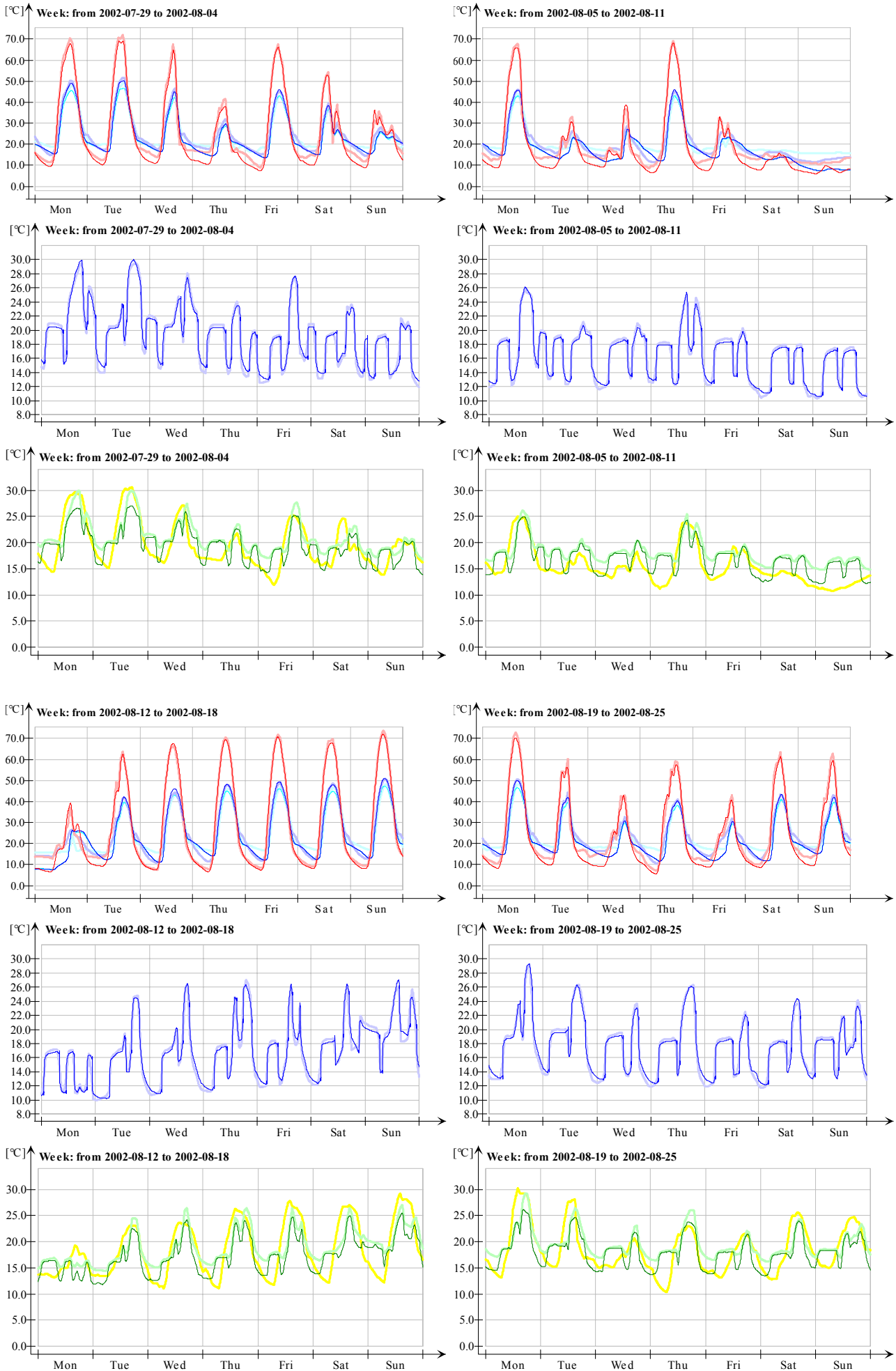
B. Simulationsergebnisse



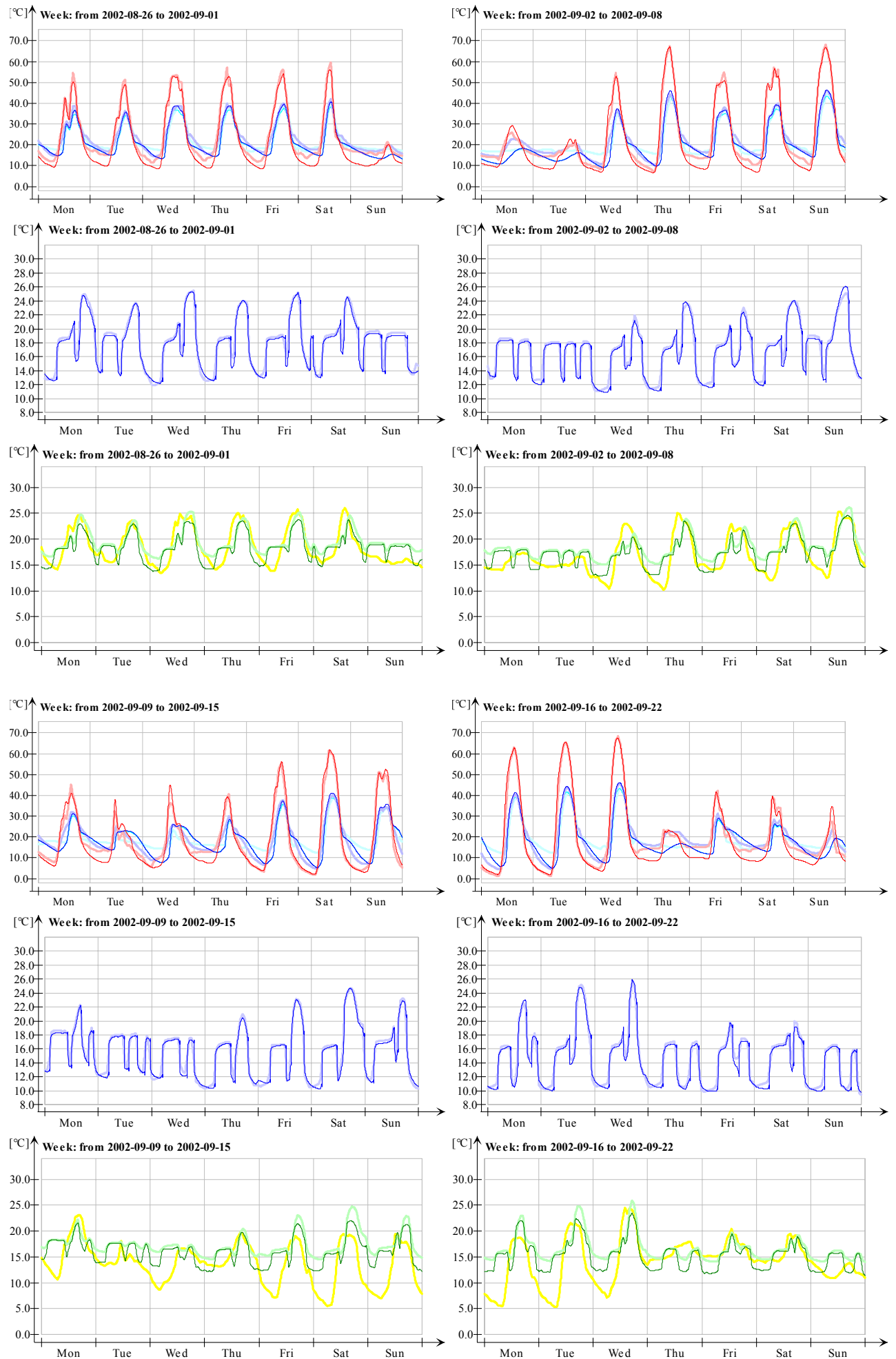
B. Simulationresultate



B. Simulationresultate



B. Simulationsresultate



B. Simulationsresultate

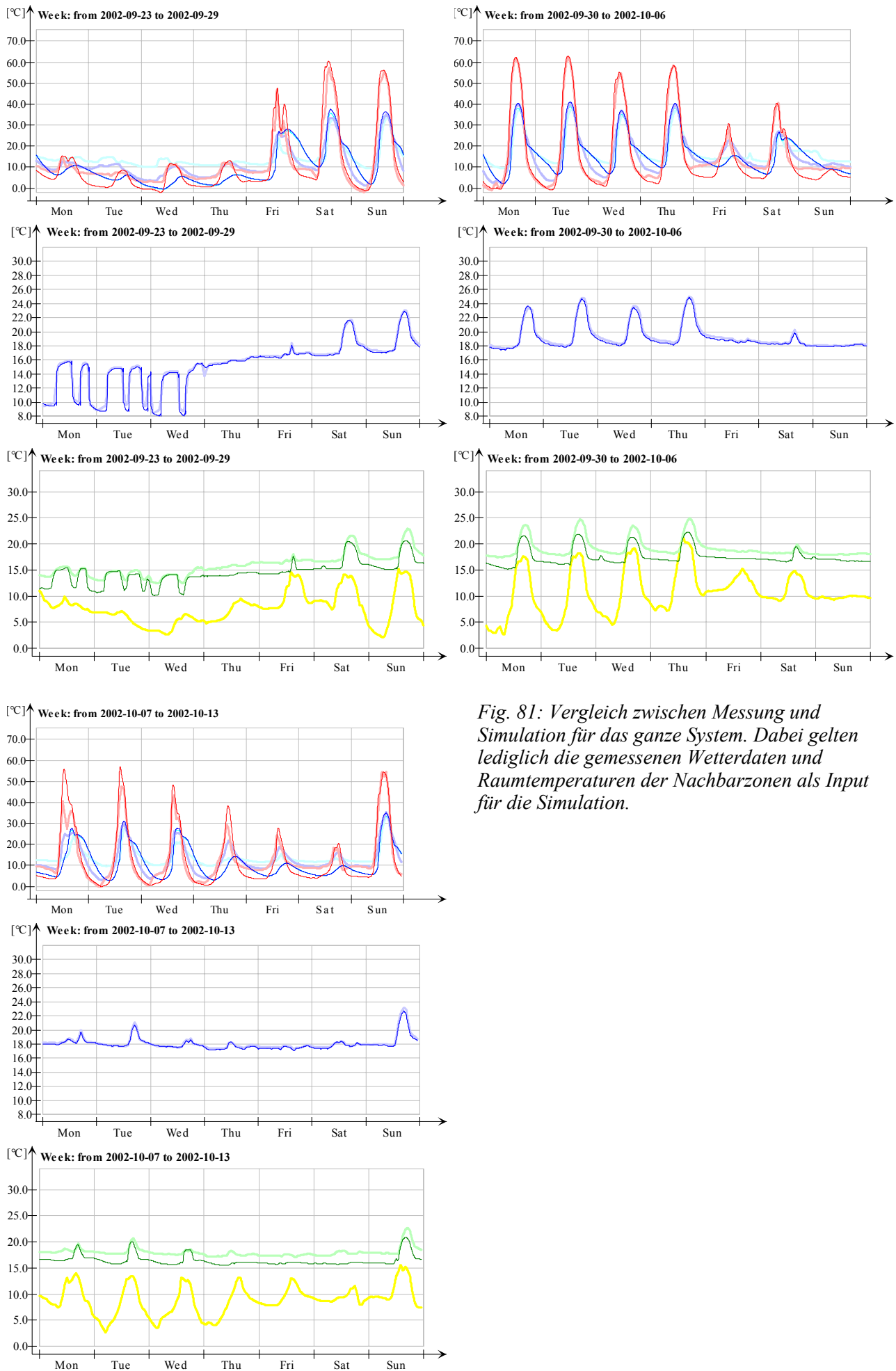


Fig. 81: Vergleich zwischen Messung und Simulation für das ganze System. Dabei gelten lediglich die gemessenen Wetterdaten und Raumtemperaturen der Nachbarzonen als Input für die Simulation.