



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 11. November 2011

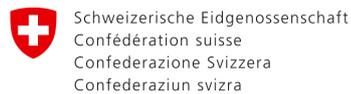
---

# **Energetische Beurteilung von Gebäuden mit Thermografie und der Methode QualiThermo**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Thermografie Verband Schweiz  
8212 Neuhausen  
[www.thech.ch](http://www.thech.ch)



swisswindows AG, Bauphysik  
9016 St. Gallen  
[www.swisswindows.ch](http://www.swisswindows.ch)

**Auftragnehmer:**

QC-Expert AG  
Kriesbachstrasse 42  
8600 Dübendorf  
[www.qc-expert.ch](http://www.qc-expert.ch)



Hochschule Luzern  
Technik & Architektur  
Technikumstrasse 21  
6048 Horw  
[www.hslu.ch/technik-architektur](http://www.hslu.ch/technik-architektur)



Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt  
Abteilung Bautechnologien  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
[www.empa.ch](http://www.empa.ch)

**Autoren:**

Christoph Tanner	Dipl. Arch. FH	Ing. Büro Baucheck-Tanner <a href="mailto:bct@baucheck-tanner.ch">bct@baucheck-tanner.ch</a>
Beat Lehmann	Dipl. Masch. Ing. ETH	Empa, Abt. Bautechnologien <a href="mailto:beat.lehmann@empa.ch">beat.lehmann@empa.ch</a>
Thomas Frank	Dipl. Ing. ETH	Empa, Abt. Bautechnologien <a href="mailto:thomas.frank@empa.ch">thomas.frank@empa.ch</a>

BFE-Bereichsleiter Andreas Eckmanns  
BFE-Programmleiter Dr. Charles Filleux  
BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153660 / 102850

Für Inhalt und Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.  
Quellenangabe: Alle im Bericht enthaltenen Infrarotaufnahmen wurden durch Ch. Tanner erstellt.

## **Dank**

Mein Dank gilt zunächst der Gemeinnützigen Wohnbaugenossenschaft Winterthur als Eigentümerin des Testgebäudes (GWG, Herr Werner Brunner). Dank deren Zustimmung und dank des Einverständnisses der Bewohner Henry & Margrit Müller, die das Projekt interessiert mitverfolgten, war es möglich, den gesamten messtechnischen Teil in Winterthur durchzuführen. Verdankt sei hier auch der Zugriff auf Daten vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.

Auf Grund meiner beruflichen Veränderung wurde das Projekt während seiner Ausführung von der QC-Expert AG zur Hochschule Luzern (Technik & Architektur, ZIG, Prof. U.-P. Menti) übertragen. Permanenter Begleiter blieb jedoch die Empa (Abteilung Bautechnologien, Prof. Dr. J. Carmeliet). Herzlichen Dank allen Personen dieser drei Firmen, die mir mit Rat und Tat zur Verfügung standen.

Besonderen Dank für die engagierte Projektmitarbeit im Rahmen seines IAESTE-Studienaufenthaltes in der Schweiz verdient Borja Vera Collado, civil engineer, an der Polytechnic University of Valencia.

Ein herzlicher Dank für das Vertrauen und die Erteilung des Auftrages geht zudem an die verantwortlichen Herren A. Eckmanns und Dr. Ch. Filleux vom BFE, sowie an die Kofinanzierungspartner Thermografie Verband Schweiz (theCH) und Swissswindows AG.

Zum Schluss ein grosses Dankeschön an meine Mitautoren, die mit grossem Engagement und Fachwissen entscheidend zur Vollendung dieses Schlussberichtes beigetragen haben.

Der Projektleiter:  
Christoph Tanner



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	7
Abstract .....	7
1 Ausgangslage.....	8
1.1 Nutzen der Bauthermografie.....	8
1.2 Einsatz der Bauthermografie von aussen.....	9
1.3 Messtechnischer Hintergrund: Wie entsteht ein IR-Bild? .....	10
1.4 Bedeutung der Skalierung von Gebäude-Thermogrammen.....	12
1.5 Aus den Normen und der Fachliteratur .....	13
2 Ziel des Projekts.....	14
3 Vorgehen.....	15
4 Einflussfaktoren auf Thermografiebilder von Gebäuden .....	16
4.1 Kriterienkatalog .....	16
4.2 Erkenntnisse zu den Kriterien .....	17
4.3 Fallbeispiele zu den Einflussfaktoren .....	18
4.4 Aussen- oder Innenthermografie?.....	22
5 Auswertungsmethode QualiThermo .....	23
5.1 Ziel von QualiThermo / Beispiel .....	23
5.2 Grundlagen und Skalierungsdefinition.....	25
5.3 Umsetzung in einem Excel-Tool .....	27
5.4 Anpassung der Skalierung.....	29
5.5 Die „kritischen“ Meteodaten .....	34
5.6 Dokumentation „Infrarotaufnahmen von Gebäuden“.....	38
6 Messungen und Ergebnisse.....	39
6.1 Beschreibung Testgebäude .....	39
6.2 Messanordnungen.....	41
6.3 Meteodaten .....	43
6.4 Messergebnisse .....	44
7 Thermische Simulationen .....	53
7.1 Dynamische Simulation des Testgebäudes.....	53
7.2 Sensitivitätsanalyse meteorologische Einflussfaktoren.....	58
7.3 Stationäre, stündliche Simulation .....	74
8 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Hinweise für die Praxis .....	79
8.1 Standard-Skalierung von Thermogrammen für energetische Analysen.....	79
8.2 Zusammenfassende Erkenntnisse aus den Sensitivitätsanalysen .....	81
8.3 Meteo-Faktoren Regen / Schnee / Nebel .....	85
8.4 Unsicherheit und Toleranz bei Ableitungen des U-Wertes .....	86
8.5 Zur Berichterstattung .....	88
9 Symbolverzeichnis.....	89

10	Referenzen.....	90
10.1	Literaturverzeichnis .....	90
10.2	Vorträge / Veranstaltungen.....	91
A 1	Wandkonstruktionen und Verglasungen.....	92
A 1.1	Wandkonstruktionen Testgebäude und Referenzwände .....	92
A 1.2	Verglasungen Testgebäude.....	94
A 2	Berechnungsformeln zum stationären Wärmedurchgang .....	96
A 2.1	Opake Bauteile ohne Solareinwirkung .....	96
A 2.2	Opake Bauteile mit Solareinwirkung .....	97
A 2.3	Isolierverglasung mit Strahlungseinwirkung .....	97
A 3	Einfluss der Umgebungsstrahlung und des Emissionsgrades.....	98
A 4	Eingesetzte Infrarotkameras und Messmittel.....	103
A 4.1	Spezifikationen der Wetterstation DAVIS Vantage Pro 2 Plus .....	105

# Zusammenfassung

Bei der Gebäudethermografie werden aus den Farben der Wärmebilder oft individuelle Abschätzungen zu den Wärmeverlusten von Bauteilen und zu Wärmebrücken vorgenommen. Damit solche Interpretationen nachvollziehbar sind, sollten die Thermogramme standardisiert dargestellt werden. Das kann mit der Methode QualiThermo erreicht werden. Dieses Verfahren ist auf rein empirischer Basis entstanden und liefert Vorgaben für die Farbkeilskalierung. Damit wird es in beschränktem Rahmen möglich, Wärmebilder gleichwertig darzustellen, auch wenn bei den Aufnahmen unterschiedliche Meteorbedingungen herrschten.

Ziel des vorliegenden BFE-Projektes war es, die QualiThermo Methode zu überprüfen und weiter zu entwickeln. Dazu wurde ein Testgebäude während der Wintersaison 2009/2010 wärmetechnisch detailliert ausgemessen und abschnittsweise mit zwei IR-Kameras beobachtet. Mit Simulationsberechnungen und anschließenden Sensitivitätsanalysen konnte dann aufgezeigt werden, welche Meteor-Faktoren für die Genauigkeit der Abschätzung von Wärmeverlusten entscheidend sind. Daraus wurden die wesentlichen Erkenntnisse für die Praxis abgeleitet und illustriert.

Das Projekt hat gezeigt, dass wissenschaftliche Untersuchungen und Erfahrungswerte aus der Praxis oft in guter Übereinstimmung sind. Mit QualiThermo steht nun den Praktikern ein wissenschaftlich überprüftes Instrument zur Verfügung, mit welchem korrekte und zielgerichtete Wärmebilder erstellt, ausgewertet und beurteilt werden können.

## Abstract

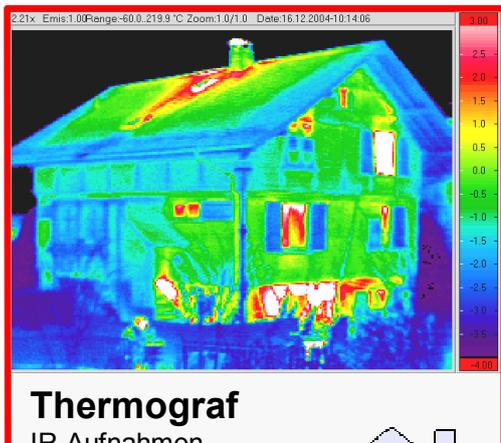
Thermal analyses of buildings are based on colours of thermal images that are often individual estimations of heat-losses of construction elements and thermal bridges.

For such interpretations to be conclusive, thermograms must be presented in a standardized way, which can be done by applying the QualiThermo-method. This process was established on a purely empirical basis, and produces a default color scale. This allows for a basic, yet congruent way of presenting thermal images of buildings, even if such recordings are performed in diverse meteorological conditions.

The BFE-project aims at testing the QualiThermo-method and to further develop it. For this purpose a test building was thermo technically measured in detail and then periodically observed by two infrared cameras, during the winter period of 2009/2010. Subsequent simulations and sensitivity analyses revealed which meteorological factors are responsible for an accurate assessment of heat-losses. Hence relevant conclusions were drawn and illustrated for the practice of this method.

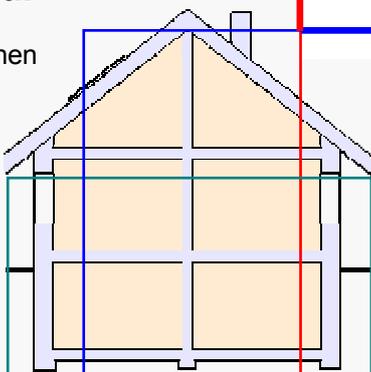
# 1 Ausgangslage

## 1.1 Nutzen der Bauthermografie



### Thermograf

IR-Aufnahmen  
aussen und innen



Das Ziel der Gebäude-Thermografie ist es, interessierten Hauseigentümern mit Wärmebildern – auch Infrarotbilder (IR-Bilder) oder Thermogramme genannt – eine bildliche, qualitative Darstellung des energetischen Zustands ihrer Gebäudefassaden zu geben. Daraus ist ersichtlich, wo die grössten Wärmeverluste auftreten, bzw. wo sich grössere wärmetechnische Schwachstellen befinden (sog. Wärmebrücken) oder wo warme Raumluft durch Leckstellen entweicht.

### Baufachmann

Augenschein und  
Zustandserfassung

(z.B. auch Energieausweis oder GEAK erstellen)



### Spezialist

Messungen und  
Detailabklärungen



**Bild 1-1:** Es gibt verschiedene Methoden für eine energetische Zustandserfassung von Gebäuden.

Die IR-Thermografie deckt nur einen Teil der energetischen Gebäude-Analysemöglichkeiten ab.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass ein Baufachmann mit guten Kenntnissen im Bereich Energie einen Rundgang im Gebäude macht und den Zustand der Gebäudehülle vor Ort überprüft. Das wird heute oft auch im Rahmen eines Energieausweises oder GEAK durchgeführt.

Im Fall eines Altbaus können Infrarotaufnahmen als visuelle Grundlage und Entscheidungshilfe für ein Sanierungskonzept dienen. Im Fall eines Neubaus oder nach einer Sanierung dienen Infrarotaufnahmen als energetische Qualitätskontrolle mit sichtbarem Beleg.

Die genaue Ursache von Wärmeverlusten kann aufgrund von Infrarotbildern nicht immer angegeben werden. Je nach Situation sind zusätzlich Detailuntersuchungen der Gebäudehülle oder Messungen vom Spezialisten in den Innenräumen erforderlich (z.B. Luftdurchlässigkeitsmessung). Die Gebäudethermografie hat aber auch klare Grenzen. Wohl kann man z.B. erkennen, ob eine Aussenwand gedämmt ist oder nicht, aber man kann nicht unterscheiden, ob sie gut oder sehr gut gedämmt ist. Die Begründung zu dieser Aussage und andere praxisrelevante Erkenntnisse liefert der vorliegende Bericht.

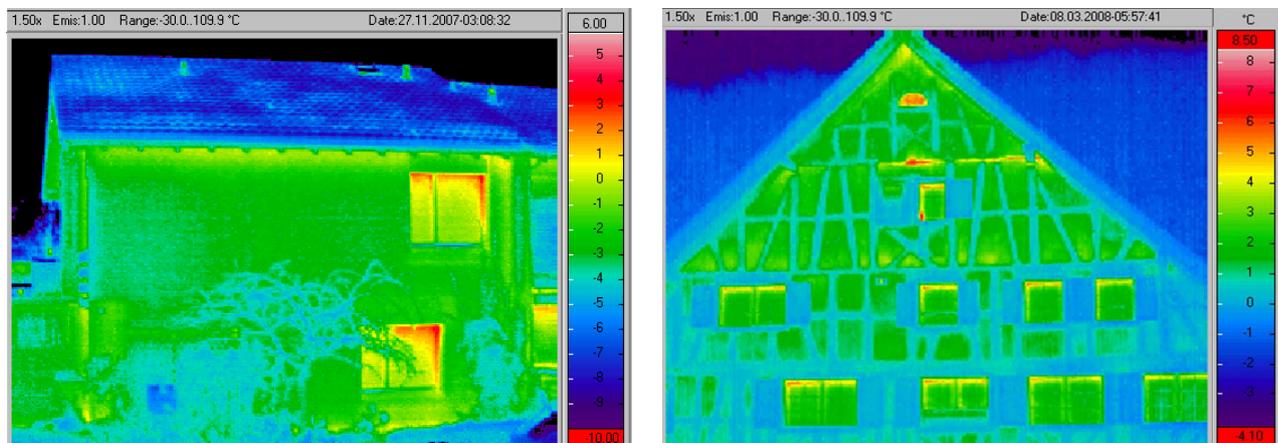
## 1.2 Einsatz der Bauthermografie von aussen

Viele Hauseigentümer sind an Wärmebildern interessiert. Sie wollen den energetischen Zustand ihres Gebäudes *sehen* und damit prüfen, ob das stimmt, was ihnen die Energieexperten sagen und vorrechnen. Die grosse Nachfrage nach Infrarotbildern wird in stark zunehmenden Mass von „Schnell-Thermografen“ abgedeckt. Sie verkaufen schnell erstellte IR-Bilder ohne sich dabei um die entscheidenden Hintergrundinformationen und Randbedingungen zu kümmern. Das führt zunehmend zu Fehlinterpretationen und in der Folge zu Fragen und Klagen, wenn z. B. empfohlen wird, Fenster zu ersetzen, bei denen es sich im Nachhinein herausstellt, dass sie erst ein Jahr alt sind und absolut dem Stand der Technik entsprechen. Selbst Energiefachstellen, Energieverteiler und Gemeindewerke unterstützen manchmal schnelle, günstige Infrarotaktionen, da sie nicht an Qualität, sondern nur an „sanierungsauslösender“ Quantität interessiert sind.

Wesentlich bei Thermografiebildern ist die Frage nach dem Zweck. Sollen energetische Aussagen resultieren (die Wand ist gut oder schlecht gedämmt), so sind die Anforderungen an den Thermografen enorm hoch, denn es müssen viele Punkte bei den Aufnahmen, den Auswertungen und der Interpretation der Bilder beachtet werden, was einen erheblichen Zeitaufwand mit sich bringt. Sollen nur die Temperaturdifferenzen der Oberflächen aufgezeigt werden, um verborgene Konstruktionsdetails (z.B. verputzte Riegel) zu erkennen, so ist das wenig aufwändig und wenig anspruchsvoll. Solche und weitere Bauthermografie-Anwendungen wie z.B. die Suche nach Luftleckagen können unter Ausnutzung der grossen Temperaturamplituden problemlos auch im Sommer durchgeführt werden.

Fakt ist, dass heute sehr viele Gebäude mit wenig Aufwand thermografiert werden, wobei dann sorglos auch energetische, und damit sehr ungenaue und nicht nachvollziehbare Interpretationen abgegeben werden.

Die hier vorgestellten Untersuchungen liefern Erkenntnisse zur Thermografie von aussen, im Wissen, dass sich auch Innenaufnahmen für verschiedene Fragestellungen gut oder sogar besser eignen (vgl. Kap. 4.4).

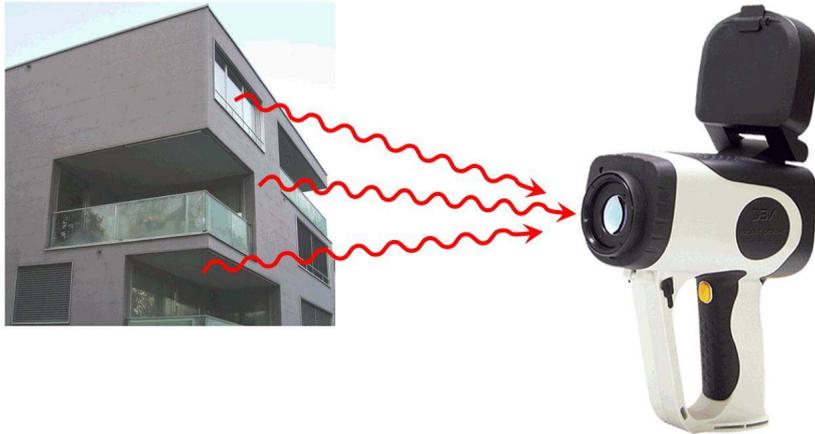


**Bild 1-2:** Die Frage nach dem Zweck des IR-Bildes ist für den Thermografen entscheidend. Eine korrekte, energetische Beurteilung abzugeben (z.B. für das Bild links) ist enorm viel schwieriger und aufwändiger, als wenn es primär um versteckte Konstruktionsteile geht (rechts).

### 1.3 Messtechnischer Hintergrund: Wie entsteht ein IR-Bild?

Ein Wärmebild ist ein Abbild von Oberflächentemperaturen. Eine IR-Kamera misst die dem menschlichen Auge verborgene Wärmeabstrahlung eines Objektes im Infrarotbereich. Die im Baubereich verwendeten IR-Kameras messen die Wärmestrahlung im Bereich 8 bis ca. 13  $\mu\text{m}$  und sollten min. 320 x 240 Bildpunkte erfassen.

Jedem dieser Messpunkte wird dann via Rechenprozess - der Temperatur entsprechend - eine bestimmte Farbe zugeordnet. Diese Zuordnung von Farben (Farbkeil) und Temperaturwerten (Skalierung) muss vom Thermografen definiert werden. Somit lassen sich von der gleichen IR-Aufnahme völlig unterschiedliche Wärmebilder erstellen lassen.



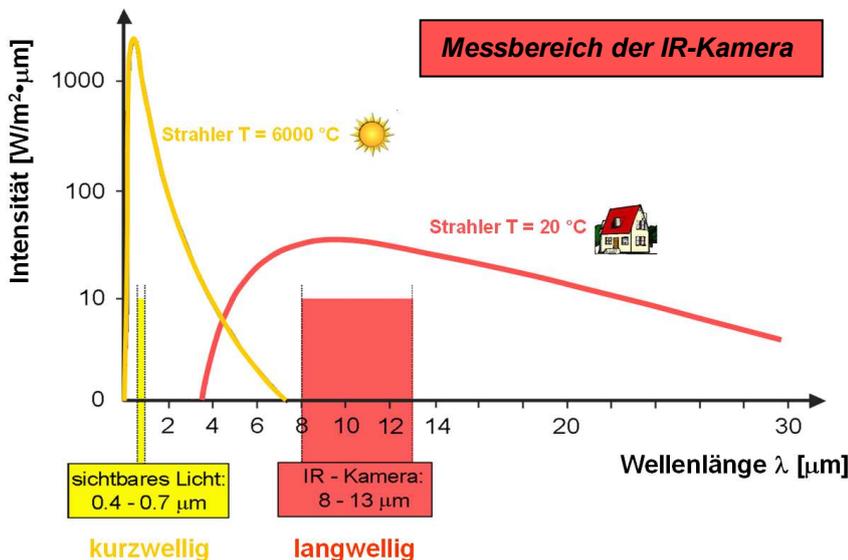
**Bild 1-3:** Alles was wärmer ist als der absolute Nullpunkt (- 273,15 °C) strahlt Wärme ab. Diese Wärmeabstrahlung wird von der IR-Kamera gemessen.

Wellenlängen-Messbereich der Bau-Kameras: 8 bis ca. 13  $\mu\text{m}$ .

36.1	36.1	39.0	33.3	33.9	35.2	36.1	27.4	26.7	27.5	27.3	35.4	35.3	34.8	34.6	32.6	
36.1	36.1	38.9	33.4	33.9	35.3	36.1	27.2	26.5	27.8	27.7	35.3	35.2	35.3	35.2	32.4	
35.9	36.1	38.8	33.6	28.9	29.1	30.1	29.8	30.1	29.8	30.3	30.3	31.1	31.8	35.2	32.4	
35.4	36.0	38.3	33.8	28.9	29.4	30.3			30.1	30.3	30.3	31.3	32.5	35.0	32.4	
35.0	35.9	37.5	34.0	30.0	30.2							33.6	33.8	34.8	32.4	
35.0	35.8	37.0	34.1	30.8										34.2	34.7	32.4
34.7	35.6	36.5	34.1	31.4										35.0	34.5	32.3
34.7	35.6	36.4	34.0	32.6										34.2	34.5	32.4
34.3	35.4	36.2	33.9	32.5										33.8	34.6	32.5
34.1	35.4	36.3	33.9	31.0										33.2	34.5	32.6
33.9	35.4	36.4	33.7	30.9										32.4	34.4	33.0
33.4	35.3	36.1	33.5	29.8										31.8	34.2	33.2
33.5	35.2	35.8	33.2	29.8										31.6	34.0	33.4
33.9	35.2	35.7	33.1	28.7	28.1									31.4	33.8	33.2
33.4	35.2	35.5	33.0	27.8	27.6									31.1	33.7	32.5
33.2	34.9	35.0	33.1	27.4	27.4	27.8								31.3	33.8	31.3
33.8	34.9	35.1	33.1	27.3	27.1	27.5	27.9	28.2					30.8	31.0	33.8	30.2
33.3	34.9	34.8	33.1	26.9	27.0	27.2	27.8	28.3	28.6	28.9	29.3	30.2	30.9	33.7	29.6	
33.2	34.5	34.2	32.8	25.6	27.1	27.3	27.6	28.2	28.7	28.7	29.2	30.0	30.4	33.9	29.3	
33.9	34.4	34.1	32.3	31.4	31.6	31.1	27.1	30.9	31.1	33.6	35.4	34.6	34.6	34.1	29.2	
33.8	34.4	34.1	31.9	30.4	31.7	31.1	27.1	30.6	30.5	32.8	35.2	34.8	34.6	34.3	28.9	

**Bild 1-4:** Vom Thermografen muss - via Rechenprozess - jeder Temperatur eine Farbe zugewiesen werden.

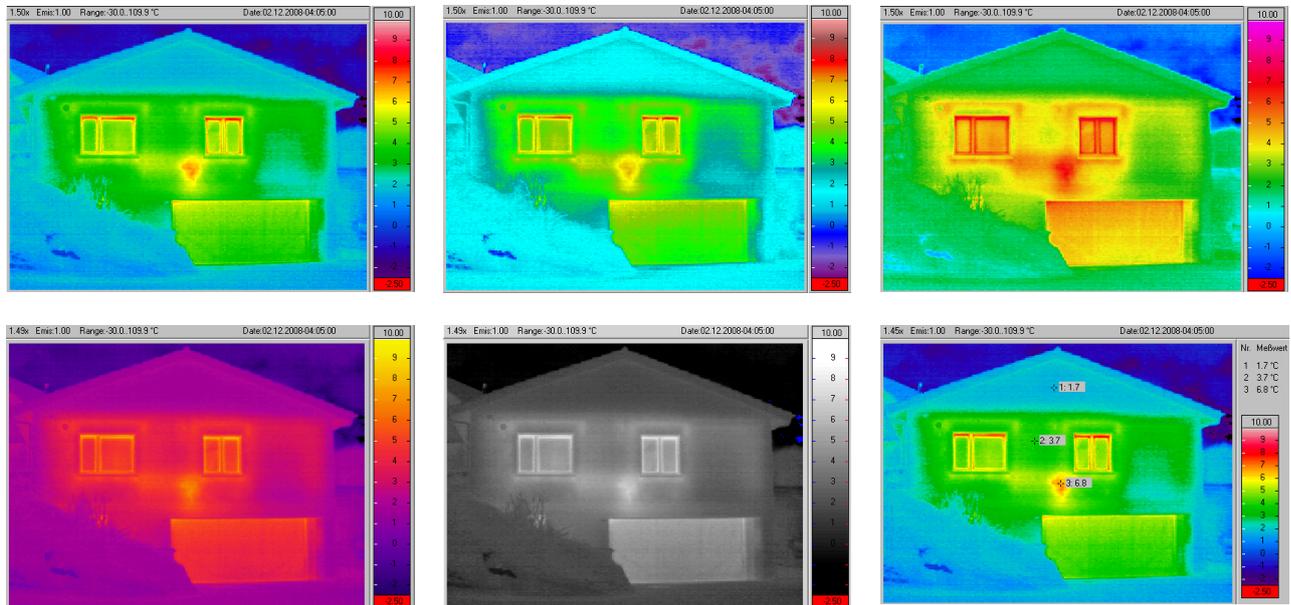
Durch diese Zuordnung lassen sich von der gleichen Aufnahme völlig unterschiedliche Wärmebilder erstellen.



**Bild 1-5:** y-Achse: Maximale Strahlungsintensitäten  $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$  von verschiedenen Strahlungsquellen in Abhängigkeit des Wellenlängenbereiches (x-Achse). Das sichtbare Licht (menschliches Auge) liegt im Wellenlängenbereich 0.4 - 0.7  $\mu\text{m}$  und damit mitten im Bereich der maximalen Intensität der Sonnenstrahlung. IR-Kameras für den Baubereich messen hingegen in der deutlich grösseren Bandbreite 8 - 13  $\mu\text{m}$ , womit die Zone der maximalen Strahlungsintensität von Oberflächen mit Umgebungstemperaturen erfasst wird (z.B. Gebäude).

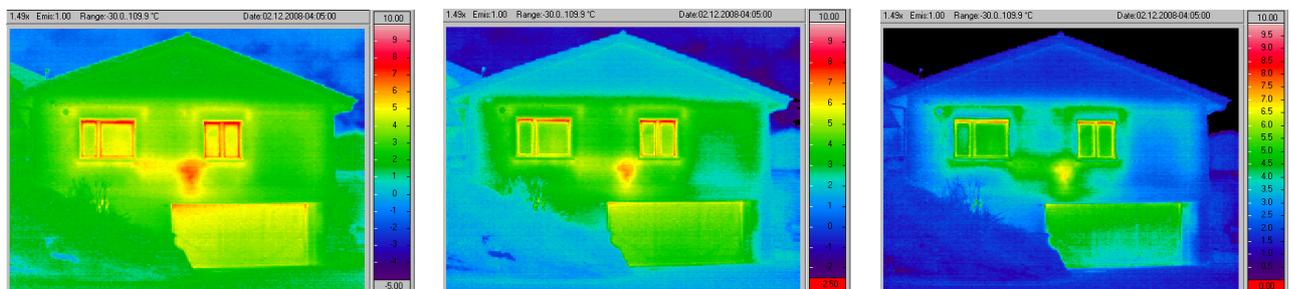
Je nach Zuordnung der Farben und der Einteilung der Skalierung lassen sich **von der gleichen** IR-Aufnahme verschiedene IR-Bilder mit völlig unterschiedlicher Wirkung erzeugen. Je nach Aufgabenstellung kann die Darstellung der IR-Bilder durch den Thermografen also stark beeinflusst werden, so dass eine beliebige, psychologische Wirkung entsteht. Vor diesem Hintergrund stellt sich deshalb die Frage, welches die „richtige“ (sinnvolle und aussagekräftige) Einstellung für die Bauthermografie ist.

### Wirkung unterschiedlicher Farbkeile (mit gleicher Skalierung!)



**Bild 1-6:** Wird der Farbkeil verändert, entstehen unterschiedlich starke Bildwirkungen

### Wirkung unterschiedlicher Skalierungen (mit gleichem Farbkeil !)



**Bereich:** + 10 °C bis - 5 °C

**Bereich:** + 10 °C bis - 2.5 °C

**Bereich:** + 10 °C bis 0 °C



**Bereich:** + 8 °C bis 0 °C

**Bereich:** + 7 °C bis - 1 °C

**Bereich:** + 10 °C bis -10 °C

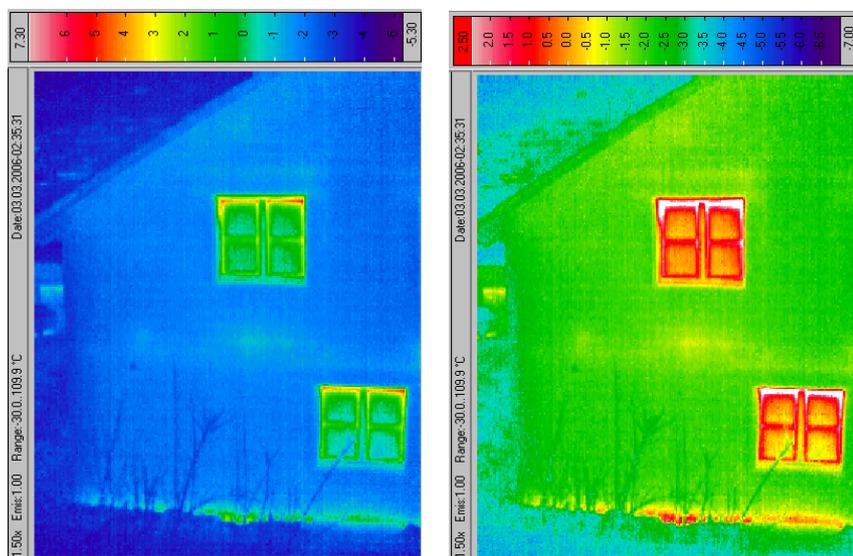
**Bild 1-7:** Durch die Skalierung (Begrenzung der oberen und unteren Temperaturzuordnung) wird die Empfindlichkeit (Sensitivity) verändert. Der Thermograf muss sich für irgendeine Darstellungsform entscheiden! Sinnvollerweise werden für warme Temperaturen rote Farben, für kalte Temperaturen blaue verwendet.

## 1.4 Bedeutung der Skalierung von Gebäude-Thermogrammen

Bei einem Arzt wird ein Röntgenbild aufgenommen, entwickelt und ist dann fertig für die Beurteilung. Nicht so die IR-Aufnahme eines Gebäudes. Diese kann - soll es eine energetische Interpretation geben - nur bei ganz bestimmten Umgebungsbedingungen aufgenommen werden.

### Notwendigkeit zur Standardisierung der Bilddarstellung

Nach den IR-Aufnahmen muss der Thermograf festlegen, wie er die radiometrischen Daten in ein Bild umwandeln will (Bild 1-8). Bis heute gibt es dafür aber keine Normen und Richtlinien, die beschreiben, wie intensiv gewisse Schwachstellen in den Wärmebildern dargestellt werden sollen. Das bedeutet, dass jeder Thermograf die Bildskalierung nach seinen eigenen Empfindungen und Erfahrungen einstellt. Wird eine Fassade von 3 verschiedenen Thermografen aufgenommen, so resultieren 3 verschiedene Wärmebilder und demzufolge wahrscheinlich auch 3 unterschiedliche Bewertungen. Aber damit nicht genug, denn 3 Tage später, bei einer kälteren Aussentemperatur, kämen nochmals 3 Variationen dazu. In vielen Fachartikeln wird erwähnt, dass Wärmebilder nur qualitative Auskünfte geben. Fakt ist aber, dass jedes Bild, den Farben entsprechend, emotional bewertet wird und somit auf Grund der subjektiven Bildeinstellung des Thermografen eine quantitative Beurteilung abgeleitet wird, nach dem Muster rot = schlecht. Mögliche Konsequenz: In einem Bericht erscheinen die Fensterrahmen rot und es wird ein Fensterersatz empfohlen, in einem andern erscheinen sie gelb und werden als akzeptabel beurteilt.



**Bild 1-8:** Zwei Wärmebilder, erzeugt aus einer einzigen IR-Aufnahme. Die Empfindlichkeit (Sensitivity), und die Farbzuteilungen sind beliebig veränderbar. Je nach gewählter Darstellung empfindet man, dass ein Gebäude viel oder wenig Wärmeverluste hat. Die beim Betrachter erzeugte Wirkung ist deshalb stark manipulierbar.

Eine Plausibilitätskontrolle einer Beurteilung kann nur dann gemacht werden, wenn die wesentlichen Randbedingungen zu den Aufnahmen ermittelt und deklariert werden. Dazu gehören Angaben über die Entwicklung der Lufttemperatur vor den Aufnahmen sowie Aussagen zum Bewölkungsgrad, Niederschlag und Windstärke vor Ort. Das Wichtigste aber, was zu jedem IR-Bild gehört, ist der Farbkeil mit der Temperaturzuordnung (Skalierung) sowie das Aufnahmedatum mit Zeitangabe. Aber auch Hinweise zur Exposition des abgebildeten Bauteils, zur Konstruktion und zu den Oberflächenmaterialien gehören dazu. Es muss also einiges an Aufwand betrieben werden, um Fehlbeurteilungen zu verhindern und die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

### Auswertungsmethode QualiThermo

Abhilfe kann hier geschaffen werden, wenn das zentrale Element für die Bildauswertung – die Skalierung des Farbkeils – standardisiert wird. Genau dafür wurde die Auswertungsmethode QualiThermo entwickelt. Ziel dabei war es, die Oberflächentemperaturen eines bestimmten Bauteils in den IR-Bildern auch bei verschiedenen Aussentemperaturen immer möglichst gleich erscheinen zu lassen. So können bei idealen Aufnahmebedingungen auf Grund der Farben Aussagen bezüglich den Energieverlusten vorgenommen werden.

## 1.5 Aus den Normen und der Fachliteratur

Weder in den Normen noch in den Fachbüchern und Ausbildungskursen war die Skalierung der Wärmebilder bisher ein wesentliches Thema. Wie IR-Bilder zu interpretieren sind, wird deshalb u.a. so formuliert:

**EN 13187** [1] (Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen - Infrarot-Verfahren, Mai 1999):

„. . . Die Auswertung von Thermogrammen, die bei instationären Bedingungen gewonnen werden, erfordert einen hohen Grad an Erfahrung und Fachwissen über Bauphysik.“

Es werden aber Referenzbilder, Berechnungen, Laboruntersuchungen oder Erfahrungswerte gefordert, die zum Vergleich eine klar bekannte oder berechnete Situation zeigen sollen.

**Leitfaden Thermografie im Bauwesen** [2] Fraunhofer IRB (N. A. Fouad / T. Richter, 2007):

„. . . Vom Thermografen ist auf Grund seines Fachwissens . . . zu entscheiden, ob die gemessenen Temperaturdifferenzen als normal oder als auffallend zu bewerten sind.“

**Dienstleistung statt bunte Wärmebilder** [3] Positionspapier des deutschen IR-Spezialisten W. Pöllinger:

„Eine vernünftige Temperaturleiste sollte sich nach der **Umgebungstemperatur** und dem **Alter des Gebäudes** richten. Ein Gebäude aus den 60er Jahren wird eine Temperaturspreizung von 15 °C, aus den 80er Jahren von ca. 12 °C und ab 2001 ca. 10 °C benötigen, alles andere ist irreführend. Hochgedämmte Gebäude kommen mit einer kleineren Temperaturspreizung aus.“

Auch in diesen Normen sind keine Hinweise zur Skalierungsproblematik zu finden:

**DIN 54190 / SIA 180.223** (Zerstörungsfreie Prüfung, Thermografische Prüfung, 1. Teil: Allgemeine Grundlagen, 2. Teil: Geräte, 3. Teil: Begriffe)

**Revision ISO 6781** (in Bearbeitung)

Koordination ISO / CEN, ISO 6781 soll später EN 13187 ersetzen.

**EN 473** (2008) / **DIN 54162:2006** Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal - Allgemeine Grundlagen (Stufe 1, 2 und 3)

Durch die grosse Nachfrage am Wärmebildern und den vielen Problemfällen die von „Schnell-Thermografen“ bisher produziert wurden, sind mittlerweile mehrere Thermografie-Experten zur Erkenntnis gekommen, dass ein wesentlicher Schlüssel zur nachvollziehbaren Interpretation bei der Bildskalierung liegt. Es sind deshalb seit dem BFE-Projektstart und den freigegebenen Informationen über die Methode QualiThermo (via [www.thech.ch](http://www.thech.ch)) immer mehr Berichte und Hinweise auf dem Internet zu finden, die das Thema aufgreifen und diskutieren.

## 2 Ziel des Projekts

Das BFE-Projekt „*Energetische Beurteilung von Gebäuden mittels Infrarotbildern*“ soll mittels Messungen und Simulationsberechnungen an realen Bauten die empirisch entstandene Methode QualiThermo wissenschaftlich überprüfen und weiterentwickeln. Dabei werden primär einige kritische Randbedingungen (Meteo-Faktoren) detailliert untersucht. Mittels Sensitivitätsanalysen sollen, soweit möglich, Grenzen definiert werden, unter welchen Bedingungen die Aufnahmen noch akzeptabel sind.

Es ist jedoch klar, dass nicht alle einflussenden Faktoren (vgl. Kriterienkatalog) wissenschaftlich detailliert untersucht werden können. Es wird auch pragmatische Ansätze geben, um innert nützlicher Frist möglichst viele praxisrelevante Erkenntnisse einfließen zu lassen. Damit wird ein Beitrag geleistet, der die seriöse, energetische Beurteilung von Gebäuden mit IR-Aussenaufnahmen unterstützt und verbessert. Marktgerechte Beurteilungen finden dann eine hohe Akzeptanz, wenn sie *nachvollziehbar* sind.

### Zielformulierungen aus dem Projektantrag:

- Beschreibung und Darstellung der Faktoren, die einen Einfluss auf die Qualität der IR-Aufnahmen von Gebäuden haben.
- Standardisierung der Auswertung und Darstellung von Thermografiebildern für energetische Beurteilungen von Gebäuden. Nachvollziehbarkeit der Aussagen gewährleisten.
- Die Vorgehensweise von QC-Expert AG mit der Methode QualiThermo basiert auf Erfahrung und Datenanalysen. Durch Simulation mit 3-D Rechenprogrammen soll geprüft werden, wo die Grenzen der Methode QualiThermo sind, bzw. welche Einflussfaktoren (Wetterbedingungen, Objektstandort, Gebäudekonstruktion etc.) besonders gut berücksichtigt werden müssen.
- Schlüsselwörter: Qualitätsverbesserung energetischer Gebäudebeurteilungen mit Thermografieaufnahmen, Qualitätssicherung bei Wärmebildaufnahmen und -interpretationen, Nachvollziehbarkeit von Wärmebildinterpretationen, Vergleichbarkeit von Wärmebildern im Hinblick auf Gebäudesanierungen, Vermeidung von Fehlinterpretationen durch Drittpersonen.

### U-Wert-Ermittlung

Schon alt ist der Traum, aus einem Thermografiebild die verschiedenen Wärmedurchgänge der sichtbaren Bauteile abzuleiten. Der Traum ist teilweise berechtigt, da mit zunehmend höheren Oberflächentemperaturen auch höhere Wärmeverluste einhergehen. Berücksichtigt man jedoch die bauphysikalischen Grundsätze, die messtechnischen Unsicherheiten, die konstruktive und materialtechnische Vielfalt der Gebäudehülle sowie den Umstand, dass ein Gebäude nie in einem thermisch stationären Zustand ist, so wird bald klar, dass eine Aussage zum Wärmedurchgang aufgrund einer IR-Oberflächentemperatur eine sehr heikle Angelegenheit ist. Wird das nicht erkannt, ist die Gefahr einer Fehlbeurteilung gross.

Aus all diesen Gründen kann die Zielformulierung nicht heissen, dass mit Hilfe von QualiThermo von IR-Aussenaufnahmen U-Werte bestimmt werden. Und trotzdem ist eine „energetische Beurteilung“ letztlich eine quantitative Angabe zu den Wärmeverlusten und damit eine indirekte Aussage zum U-Wert des Bauteils bzw. zum Wärmedurchgang. Dem entsprechend entwickeln sich in Fachkreisen immer wieder heftige Diskussionen. Das vorliegende BFE-Projekt soll dazu Antworten geben, in dem die Ungenauigkeiten aufgezeigt werden, bzw. Hinweise gegeben werden, unter welchen Umständen noch welche Angaben mit welcher Genauigkeit erreicht werden können.

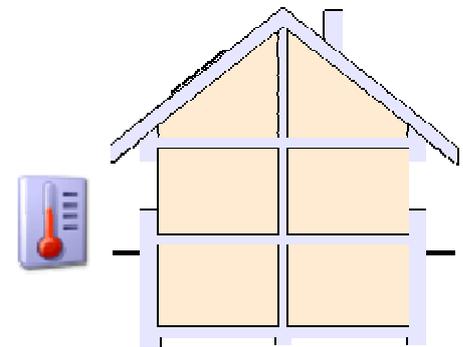
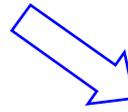
### 3 Vorgehen

Bei der Anwendung der Thermografie am Bau müssen grundsätzlich zwei Problemkreise berücksichtigt und getrennt voneinander analysiert werden:

#### 1. Bestimmung der „wahren“ Oberflächentemperatur.

Bei IR-Aufnahmen unter Berücksichtigung von:

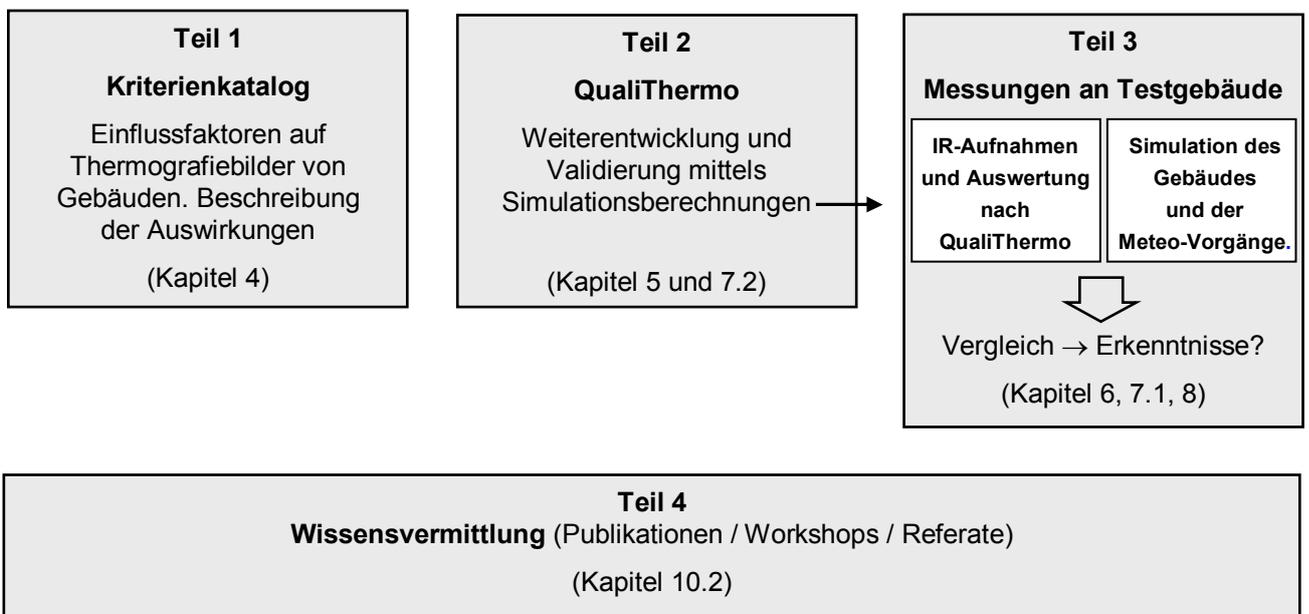
- Umgebungsstrahlung
- Emissionsverhalten der Oberflächen
- Aufnahmewinkel
- Distanz zum Messobjekt (Messfleckgröße)
- spektraler Messbereich der Kamera
- Messunsicherheit und Auflösung der Kamera



#### 2. Interpretation der Oberflächentemperaturen bezüglich Wärmedämmvermögen des Bauteils unter Berücksichtigung aller gegebenen Randbedingungen.

Dazu sind bauphysikalische Kenntnisse zum stationären und instationären Wärmedurchgang erforderlich. Es muss beurteilt werden, ob sich das Bauteil bei den gegebenen Randbedingungen in einem quasistationären Zustand befindet. Dafür muss die thermische Vergangenheit über die letzten 48 Stunden qualitativ bekannt sein. Dazu sind vor allem Meteo-Informationen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windeinwirkung, kurz- und langwellige Strahlungszustände) erforderlich, aber auch Hinweise über den Aufbau der zu beurteilenden Konstruktion.

Die Projektarbeiten wurden deshalb in folgende Schritte aufgeteilt:



## 4 Einflussfaktoren auf Thermografiebilder von Gebäuden

### 4.1 Kriterienkatalog

Erfahrungen aus früheren Jahren zeigen, dass verschiedene Faktoren die Brauchbarkeit und die Interpretationsmöglichkeiten von Wärmebildern stark beeinflussen. Tabelle 4-1 enthält eine Übersicht zu diesen Einflussfaktoren. In der Praxis wird der Thermograf jedoch nur eine beschränkte Anzahl von Faktoren erfassen und in die Auswertung einbeziehen können. Im Folgenden wird deshalb analysiert, welches die wichtigsten Faktoren und deren Auswirkungen sind.

<p><b>Meteo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aktuelle Luft- und Strahlungstemperatur</li> <li>Aktueller Gradient (momentane Temperaturveränderung)</li> <li>Temperaturverlauf (vergangene 48 h)</li> <li>Solarer Strahlungsverlauf (vergangene 48 h)</li> <li>Momentaner Bewölkungsgrad</li> <li>Momentane Temperatur des Himmels</li> <li>Windstärke</li> <li>Windrichtung</li> <li>Luftfeuchtigkeit</li> <li>Niederschläge / Intensität von Schnee, Regen</li> </ul>	<p><b>Kamera/Technik</b></p> <p><b>Leistungsdaten der IR-Kamera</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Anzahl Pixel (Auflösung)</li> <li>Messunsicherheit</li> <li>Drift oder Offset der Kamera (gekühlt/ungekühlt?)</li> <li>Wartung/Kalibrierung</li> <li>Volle Bildschärfe garantiert?</li> </ul> <p><b>Auswertesoftware</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bildwiedergabe mit notwendigen Daten?</li> <li>Individuelle oder automatische Bildgenerierung</li> <li>Verwendung von QualiThermo</li> </ul>
<p><b>Objekt</b></p> <p><b>Gebäudekonstruktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Konstruktionen bekannt (z.B. hinterlüftete Fassaden)?</li> <li>Materialien bekannt (mit/ohne Wärmedämmung)?</li> <li>Emissionsverhalten der Oberflächen?</li> <li>Wärmedurchgang bekannt?</li> <li>Struktur der Fassaden (Verwinkelungen)</li> <li>Gebäudealter</li> <li>Sanierungen / Umbauten</li> <li>EFH - MFH - Industrie - Lager etc.</li> </ul> <p><b>Gebäudeumgebung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hanglage</li> <li>Variable Messdistanzen möglich? (→ Messfleckgrösse!)</li> <li>Störende Vegetation? (Bäume, Hecken, Spalier etc.)</li> <li>Störstrahlung aus Umgebung? (Nachbar, Stadt?)</li> <li>Distanz zu Nachbargebäuden</li> <li>Bewohner informiert und instruiert?</li> </ul> <p><b>Betriebszustand / Nutzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Innentemperaturen (<math>21 \pm 1^\circ\text{C}</math>)?</li> <li>Bewohner anwesend?</li> <li>Beheizung mit Nachtabenkung?</li> <li>Unbeheizte Räume?</li> </ul>	<p><b>Dienstleister, Subjektives</b></p> <p><b>Zweck der IR-Aufnahmen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Visualisierung von Schwachstellen</li> <li>Energetische Beurteilungen</li> <li>Aussen- oder Innenaufnahmen</li> <li>IR „nur“ zur Unterstützung von anderen Messungen</li> </ul> <p><b>Ausbildung / Erfahrung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bauphysik</li> <li>Energieberatung</li> <li>Baukonstruktion</li> <li>Kameratechnik</li> <li>Erfahrung?</li> </ul>

**Tabelle 4-1:** Zusammenstellung der Faktoren, welche eine Auswirkung auf die Brauchbarkeit von IR-Aufnahmen haben.

## 4.2 Erkenntnisse zu den Kriterien

Die Schwierigkeit für den Thermografen besteht darin zu entscheiden, ob er unter den gegebenen Bedingungen sein Auftragsziel akzeptabel erfüllen kann oder nicht. Dafür muss aber zuerst definiert werden, was akzeptabel und was nicht akzeptabel ist. Bezüglich energetischen Betrachtungen heisst das, dass definiert werden muss, wie gross ein Fehler bei der Bestimmung der Oberflächentemperatur sein darf. Da der zulässige Messfehler jedoch wiederum vom Auftragsziel abhängig ist, kann nicht in jedem Fall eine klare Grenze definiert werden. Geht es um energetische Interpretationen, so sind die Ansprüche auf jeden Fall am höchsten.

Grundsätzlich könnte jedes Kriterium detailliert analysiert werden und es liessen sich Grenzen beschreiben, ab wann die Bedingungen nicht mehr akzeptabel sind.

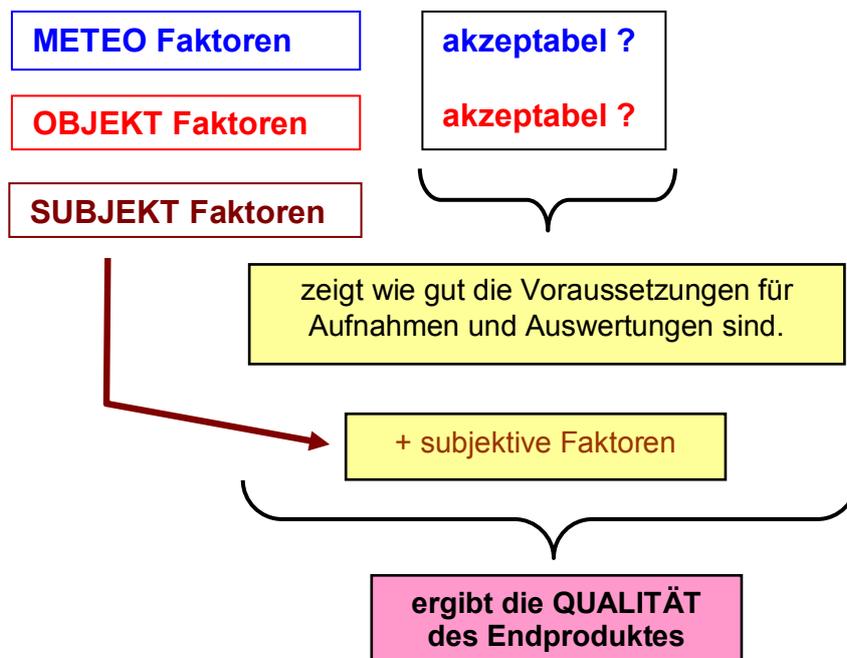
### Beispiel: Gebäudekonstruktion

5	<i>Oberflächen mit hohem Epsilon (<math>&gt; 0.94</math>), Konstruktionen/Bauteile bekannt, grossflächige ebene Fassaden, guter Zugang.</i>
4	<i>Teilweise verwinkelte Fassaden, Konstruktionen nur teilweise bekannt, guter Zugang.</i>
3	<i>Verwinkelte Fassadenbereiche, Oberflächen und Konstruktion unbekannt, kein direkter Zugang.</i>
2	<i>Gebäude mit hohem Glasanteil, unbekannte Konstruktion, evt. Hinterlüftete- oder Doppel-Fassaden, Zugang nicht möglich.</i>
1	<i>Glasbauten, Metallbauten (nicht eloxierte Oberflächen), spitze Aufnahmewinkel.</i>

**Tabelle 4-2:** Versuch einer Klassierung der Gebäudekonstruktion bezüglich Aufnahmebedingungen.  
5 = ideal, 1 = äusserst ungünstig.

Für das praktische Arbeiten muss man sich jedoch auf die wesentlichsten Faktoren beschränken. Da aber untereinander eine Wechselwirkung auftritt, ist es eben genau die Erfahrung, mit welcher der Thermograf entscheiden muss, was im speziellen Fall wesentlich ist und was weniger.

Aus dem Kriterienkatalog lassen sich 3 Hauptgebiete herauskristallisieren:



Informations- und Erklärungsbedarf besteht vor allem in Bezug auf die Auswirkungen der Meteo-Faktoren. Die Untersuchungen im Projekt konzentrieren sich deshalb vor allem darauf.

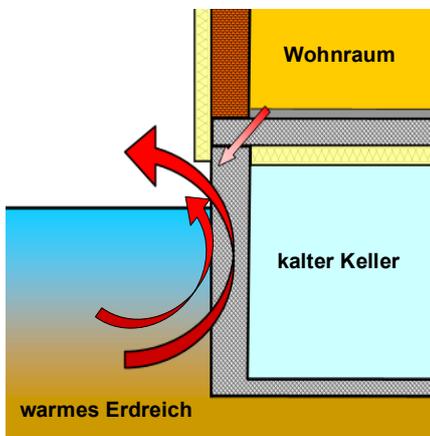
## 4.3 Fallbeispiele zu den Einflussfaktoren

### 4.3.1 Aktuelle Lufttemperatur

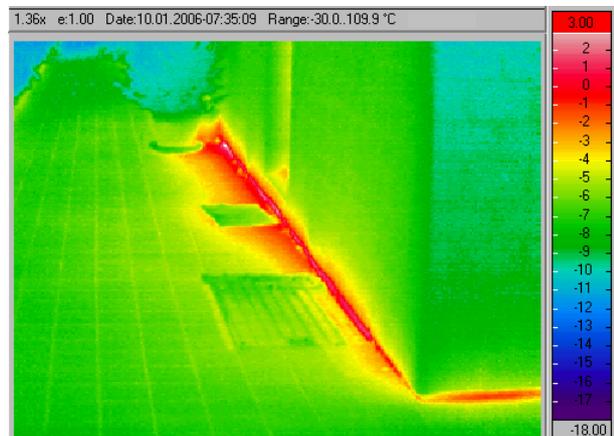
**Frage 1:** Wie wichtig ist die aktuelle Lufttemperatur für IR-Aufnahmen? Gilt hier: Je tiefer desto besser, um eine möglichst grosse Temperaturdifferenz und damit einen möglichst grossen Wärme-  
fluss zu haben?

**Antwort:** Nein, für ideale Gebäudeaufnahmen sind nicht speziell grosse Temperaturdifferenzen notwendig, sondern möglichst lang anhaltende, gleichbleibende Aussentemperaturen im Bereich des Temperatur-Monatsmittels und ein möglichst geringer Strahlungsaustausch.

**Begründung:** Zwar wird mit zunehmender Temperaturdifferenz innen-aussen die fürs IR-Bild entscheidende Differenz zwischen Luft- und Oberflächentemperatur immer grösser und damit besser messbar. Dies ist für heutige IR-Kameras jedoch nicht mehr entscheidend, da sie thermisch hoch auflösend sind. Es ist deshalb viel wichtiger zu erkennen, was bezüglich Wärmeflüssen ablaufen kann, wenn die Aussentemperaturen extrem tief sind. So gibt in diesen Fällen der Gebäudesockel in der Regel übermässig viel Wärme ab, weil das tiefere Erdreich meist noch deutlich wärmer ist (im Bereich des Temperatur-Monatsmittels). Für die Bildinterpretation ist es dann kaum möglich, zu unterscheiden ob diese Wärme vom Erdreich kommt oder von zu warmen Kellerräumen.



**Bild 4-1:** Schnitt-Grafik zum IR-Bild 4-2:  
Je tiefer die Aussentemperatur, desto stärker zeigt sich die Erdwärme.



**Bild 4-2:** Wärmeverluste oder Erdwärme? Ohne zusätzliche Informationen ist das nicht zu beantworten (vgl. Bild links).

### 4.3.2 Temperatur-Vorgeschichte

**Frage 2:** Welche Bedeutung hat der 48 h-Temperaturverlauf für die Interpretation der IR-Bilder ?

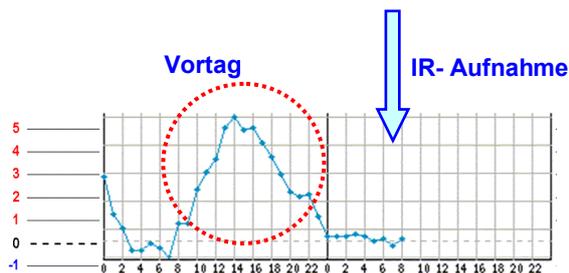
**Antwort / Feststellung:** Die Bilder 4-3 und 4-4 zeigen IR-Aufnahmen eines Treppenhauses aus Beton. Beide Aufnahmen entstanden **vor** Sonnenaufgang, also zu einer optimalen „IR-Aufnahmezeit“. Unterschied: Bei der Aufnahme links wurde der Baukörper am Vortag durch Sonnenschein und „erhöhte“ Lufttemperatur wesentlich mehr aufgeheizt, als beim Aufnahmetag rechts. Es ist sehr deutlich erkennbar, dass infolge der gespeicherten Wärme im Beton die Temperatur auch nach vielen Stunden noch so hoch ist, dass eine energetische Interpretation zum IR-Bild unbrauchbar wird.



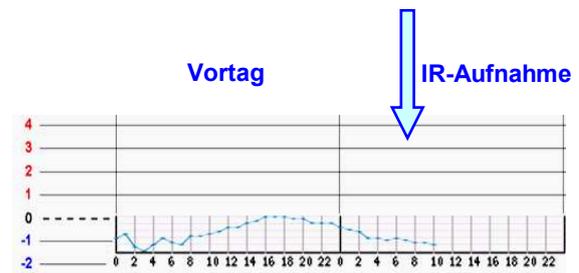
**Bild 4-3:** Betonwände können auch nach vielen Stunden noch weit weg vom quasistationären Zustand sein, vgl. Temperaturgrafik unten.



**Bild 4-4:** Gleiches Gebäude, wie links. Hier jedoch mit guten IR-Randbedingungen auch am Vortag, vgl. Temperaturgrafik unten.



**Bild 4-5:** Temperaturverlauf zu IR-Bild 4-3.



**Bild 4-6:** Temperaturverlauf zu IR-Bild 4-4.

**Auf diese Feststellungen folgt deshalb die Frage 2a:**

Wie lange muss bei Beton- oder Mauerwerk mit den IR-Aufnahmen gewartet werden, um nach einer bestimmten Wärmezufuhr einen genügend grossen Temperaturengleich zu haben, so dass keine Fehlinterpretation entsteht?



**Bild 4-7:** Temperaturverlauf: Wann ist der ideale IR-Aufnahmezeitpunkt?

**Antwort / Begründung:** Entscheidend ist die Wärmespeicherfähigkeit der äusseren Bauteilmaterialien. Beton, der von der Sonne oder von hohen Tagestemperaturen erwärmt wird, hat auch viele Stunden später noch eine zu hohe Temperatur. Bei Mauerwerk ist der Temperaturspiegel nach einigen Stunden schon wesentlich besser. Wo die Grenzen sind, muss in jedem Einzelfall auf Grund der gegebenen Randbedingungen separat betrachtet werden.

Um die Tragweite abschätzen zu können, folgt ein Vergleichsbeispiel unter „Laborbedingungen“: Mit einer einfachen Simulation (mit HELIOS) wurde berechnet, wie sich die Oberflächentemperaturen von 3 verschiedenen Konstruktionen verhalten, wenn die Umgebung (Luft und Strahlungspartner) plötzlich um 10°C abkühlt (Bild 4-8).

Wesentliche Randbedingungen:

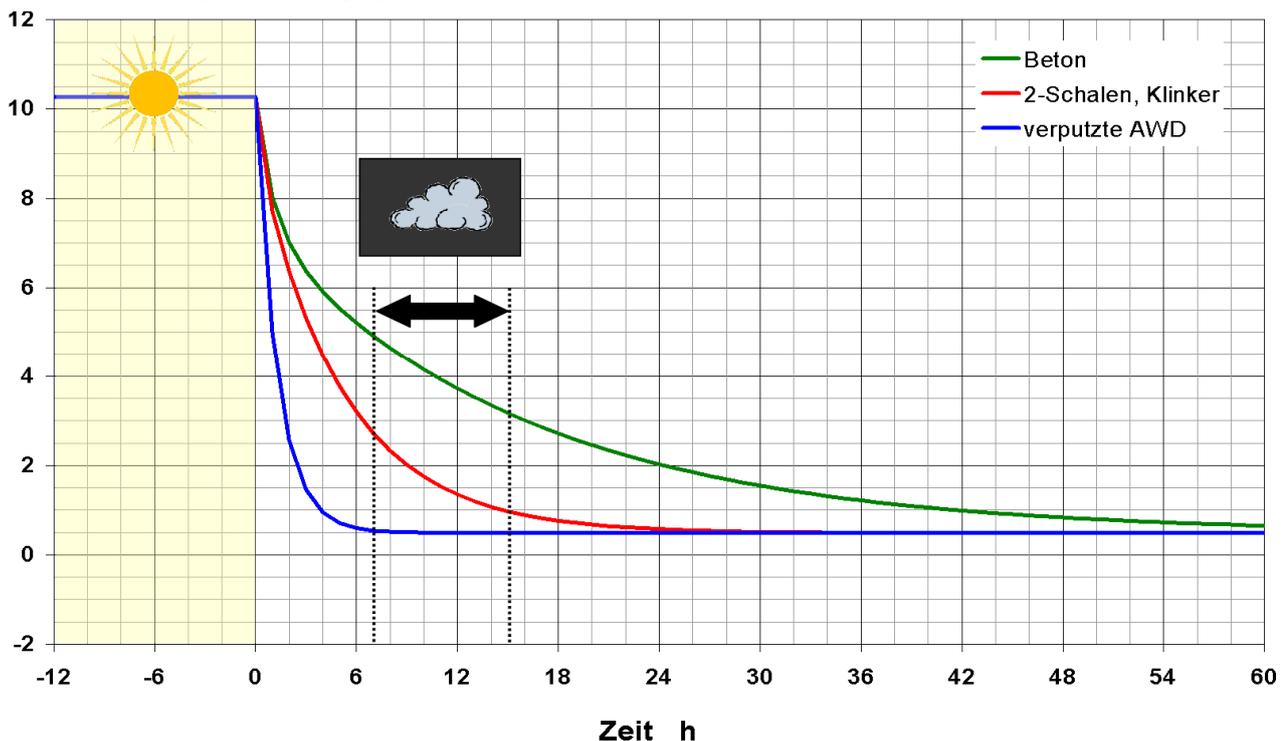
- Alle Konstruktionen haben einen U-Wert von ca. 0.24 [W/m<sup>2</sup>·K]
- Die Innentemperaturen bleiben konstant auf 22°C

- Konstruktion 1: Beton, 20 cm mit Innendämmung
- Konstruktion 2: 2-Schalenmauerwerk, aussen mit 10 cm Klinkerstein, unverputzt
- Konstruktion 3: Mauerwerk mit verputzter Aussenwärmedämmung

Würden 7 - 15 Std. nach Beginn der Abkühlung IR-Aufnahmen gemacht (d.h. in der folgenden Nacht), so wären Beton und Klinker wegen ihrer Temperaturleitfähigkeit noch nicht genügend abgekühlt und ergäben im IR-Bild Temperaturen, die um 1 - 4°C zu hoch sind.

Temperaturleitfähigkeit:  $a = \lambda / (\rho \cdot c)$

**Oberflächentemperatur  $\theta_{se}$  [°C]**



**Bild 4-8:** Resultat einer HELIOS-Berechnung: Temperaturabfallkurven der Oberflächen von drei verschiedenen Wandkonstruktionen, alle mit gleichem U-Wert, bei einem Temperatursprung von 10°C.

Weitere, detaillierte Simulationsberechnungen zu diesem Verhalten werden in Kap. 7.2.4 und 7.2.7 erläutert.

### 4.3.3 Ist Thermografie auch tagsüber möglich?

**Frage 3:** Wieso sollen an einem bewölkten, sonnenfreien Tag keine IR-Aufnahmen, mit dem Ziel für energetische Aussagen, durchgeführt werden?

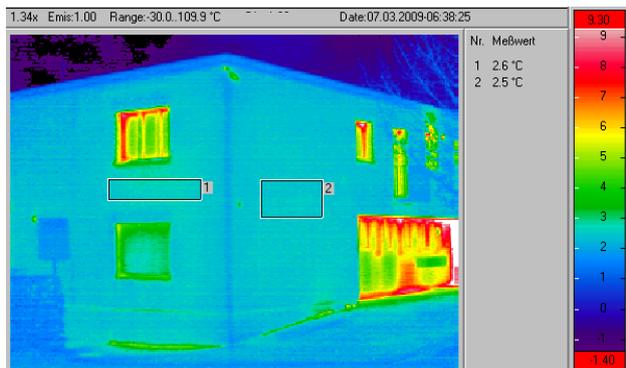
**Antwort:** Weil der diffuse Strahlungsanteil genügt, um leichte und dunkle Oberflächen oder solche mit einer geringen Wärmekapazität (verputzte AWD) schnell erwärmen zu können. Das folgende Beispiel zeigt eine „unerwünschte“ Temperaturdifferenz von 1.5 K.



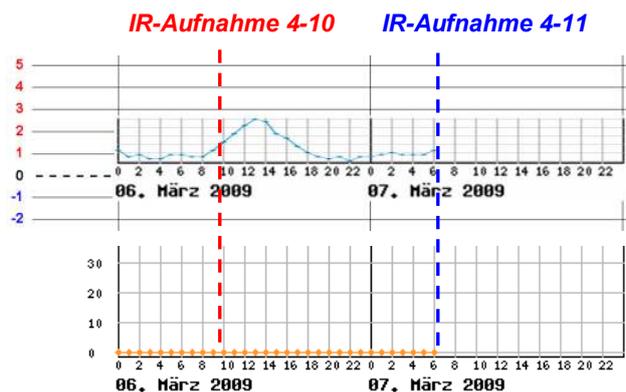
**Bild 4-9:** Gebäude mit verputzter AWD auf Empa Areal. Dämmung: ca. 12 cm EPS mit Dünnputz.



**Bild 4-10:** IR Aufnahme am 06.03.2009, 09:52 h ca. 3 h nach Sonnenaufgang. Es herrscht seit 2 Tagen Hochnebel ohne direkte Sonneneinstrahlung. Diffusstrahlung =  $141 \text{ W/m}^2$   
Temp. Differenz Südost-Nordost Fassade: **1.5 K**



**Bild 4-11:** IR Aufnahme 1 Tag später vor Sonnenaufgang, 06:38 h. Es herrscht seit 3 Tagen Hochnebel ohne Sonneneinstrahlung.  
Temp. Differenz Südost-Nordost Fassade: **0.1 K**



**Bild 4-12:** Temperaturen und Sonnenstrahlung am 6. und 7. März 2009 ab der Meteo-Station Kloten. Kein Sonnenschein, die ganze Region hatte Hochnebel.

#### 4.4 Aussen- oder Innenthermografie?

Das Thema Aussen- oder Innenaufnahmen wird unter Fachleuten kontrovers diskutiert. Eigentlich sind diese Diskussionen überflüssig, da es nicht darum geht, die bessere Methode zu finden, sondern um unter Berücksichtigung des Auftragszieles **und** der finanziellen Möglichkeiten (!) die maximale Information mit der grösstmöglichen Sicherheit erreichen zu können.

Bezüglich dem Argument des günstigeren Übergangskoeffizienten auf der Innenseite sei hier auf die Auswertung der Messungen verwiesen (vgl. Kap. 7.3.1). Es zeigt sich, dass bei guten IR-Meteo-Bedingungen die Wärmeübergänge aussen und innen nahezu gleich sind.

Natürlich sind Innenaufnahmen mit relativ stabileren Temperaturen besser geeignet für Aussagen zum Wärmedurchgang einzelner Bauteile. Aber auch hier sind analog zu aussen alle Randeinflüsse vorsichtig zu prüfen. Unbestritten besser sind immer die Wärmeflussmessungen, bei denen die Thermografie zur Überprüfung der Homogenität des Messortes eingesetzt wird.

Auch zur Unterstützung von Blower Door Messungen sind IR-Einsätze von innen sehr wertvoll, wenn z.B. für die Lecksuche das Differenzbildverfahren (Subtraktion) eingesetzt wird [19].

Aussenthermografie	
Vorteile	Nachteile
Die meisten Wärmebrücken zeigen sich ideal: - punktuelle Wärmebrücken - Radiatoren-Nischen - Deckenstirnen - Fensterleibungen, - u.v.a.	Keine bzw. nur wage Aussagen zur Schimmelpilzproblematik möglich. Wenig Informationen über Keller und Dach.
Grossflächige, übersichtliche Darstellungen, mit wenigen Bildern viel erfassen (ganze Fassade)	Fassaden teilweise durch Vegetation verdeckt. z.T. IR-problematische Konstruktionen und Material
Temperaturentwicklung bekannt (Meteo-Daten)	Viel weniger konstante Temperaturen als innen. Wetterprognosen oft unzutreffend, damit permanentes Risiko bezüglich idealen Bedingungen
Warmluftaustritte oft erkennbar (Austrittsstellen = Risikostellen) (Eintrittsstellen = Behaglichkeitsproblem)	Keine sichtbaren Warmluftaustritte heisst noch nicht, dass es keine Probleme oder gute Luftdichtigkeit gibt!
Aussenaufnahmen = schnell und ohne Störung der Bewohner	Nachteilsätze, nächtliche Gebäuderundgänge im Winter nicht ganz gefahrlos.
Aufwand eher gering, Kosten tief	Keine vollständige, energetische Zustandserfassung, Interpretationen zum Wärmedurchgang heikler als auf der Innenseite.

Innenthermografie	
Vorteile	Nachteile
Innenaufnahmen = Gebäudebegehung und damit Kombination mit Augenschein	Viele Aufnahmen notwendig (sich merken: was ist wo) Aufwand und Kosten höher als aussen
Kritische Wärmebrücken geben Hinweise zur Schimmelpilzproblematik und zu Tauwasser	Es sind nicht alle Wärmebrücken sichtbar, z.B. wegen Möbel, Vorhängen, Teppichen, warmen Radiatoren etc
Informationen von Dach und Keller möglich	IR-Bilder wegen anderen Raumtemperaturen nur bedingt vergleichbar mit Wohnraumbildern.
Im Wohnbereich relativ „stabile“ Raumtemperaturen, viel kleinere Amplituden als aussen.	Effektive Vorgeschichte (meist) nicht erfassbar (z.B. nächtliche Temperaturabsenkung, Lüften, etc.).
Kaltlufteintritte nicht überall sichtbar	Keine Info über Warmluftaustritte Warmluftaustritte = Gefahrenstellen!
Kombination mit Blower Door möglich	Zusatzaufwand, nur in speziellen Fällen sinnvoll
Aufnahmen am Tag möglich, Wetter ist viel weniger entscheidend als bei Aussenaufnahmen!	Störung der Bewohner

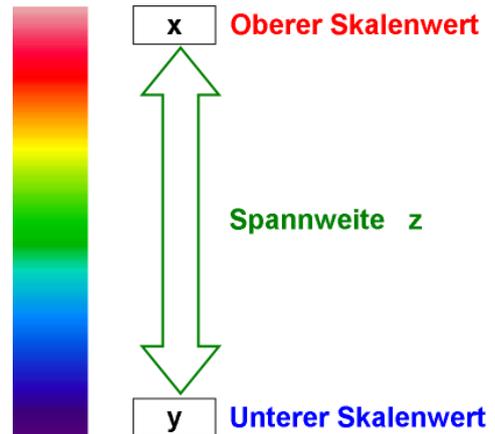
**Tabelle 4-3:** Vor- und Nachteile von Aussen- und Innenthermografie.

## 5 Auswertungsmethode QualiThermo

### 5.1 Ziel von QualiThermo / Beispiel

Jeder Gebäude-Thermograf weiss, dass die Farbkeilskalierung bei Gebäudeaufnahmen ein Schlüsselproblem darstellt. Insbesondere dann, wenn man aus IR-Aussenaufnahmen auch energetische Aussagen ableiten will.

Ein Ansatz für die Problemlösung ist QualiThermo. Mit dieser Methode wird die IR-Bildskalierung standardisiert, indem die Spannweite der Skalierung der Temperaturdifferenz innen-aussen angepasst wird. Damit können auch bei unterschiedlichen Meteobedingungen (Aussentemperatur) immer etwa gleichwertige IR-Bilder erzeugt werden. Die Thermogramme werden dadurch vergleichbar.



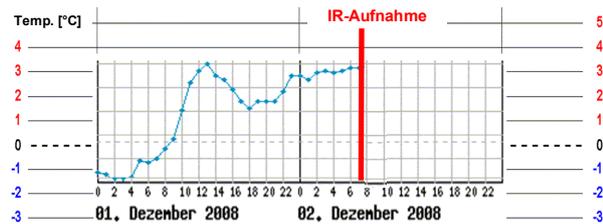
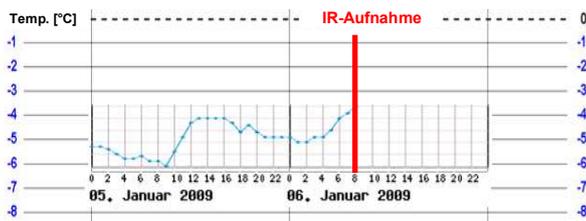
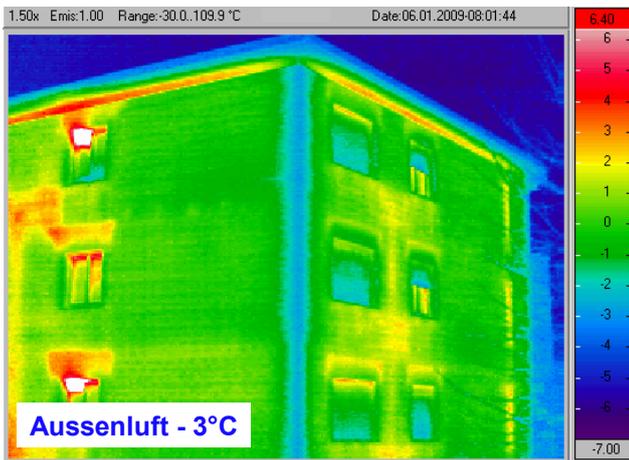
QualiThermo ist kein Wunderding. Es ist lediglich eine Umsetzung der beschriebenen Idee. Für den praktischen Einsatz des Tools ist es aber ganz wesentlich, die Meteeinflüsse detailliert zu kennen, und zu wissen, wie die Meteodaten zweckdienlich erfasst werden.

Das Werkzeug QualiThermo wurde in den Jahren 2007 bis 2009 auf Grund von Erfahrungswerten entwickelt (aktuelle Version: V2.2-2010). Es dient primär für IR-Aussenaufnahmen, kann aber auch bei Innenaufnahmen angewendet werden und sollte somit der Diskussion Aussen- oder/und Innenaufnahmen nicht im Wege stehen.

Der Name „QualiThermo®“ ist markenrechtlich geschützt. (Registereintrag vom 12.03.2009, Nr. 584 146). Dieser Schutz ist nicht eine Patentierung, sondern lediglich ein Qualitätsmerkmal, mit dem garantiert wird, dass ein Anwender die IR-Bildauswertungen gemäss den aktuellen Definitionen von QualiThermo erstellt hat. Damit ist eine beschränkte Vergleichbarkeit der IR-Bilder mit denjenigen anderer Anwender gegeben.

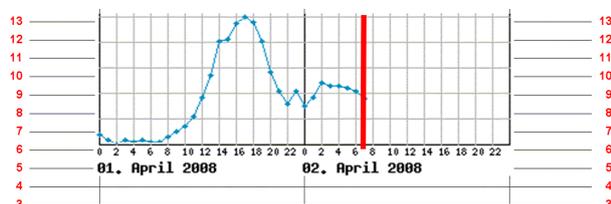
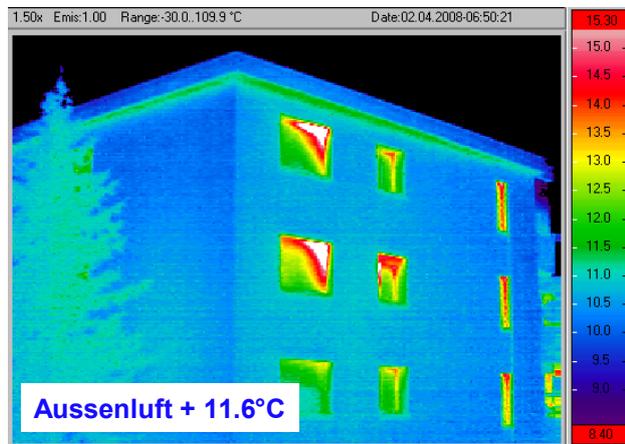
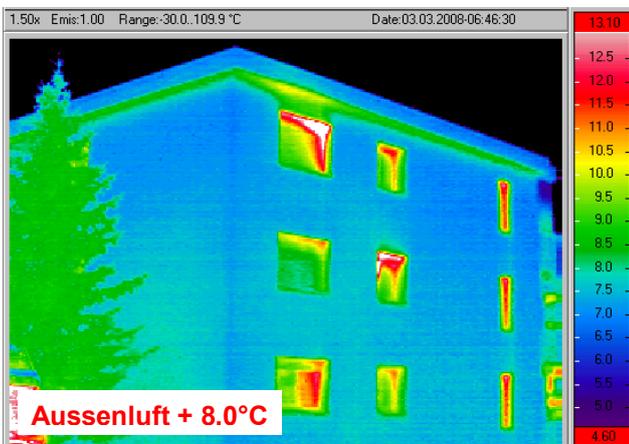
Im Folgenden wird anhand von zwei Beispielen die Anwendung der Methode QualiThermo demonstriert. Die Bilder 5-1 und 5-2 zeigen das gleiche MFH, welches an unterschiedlichen Tagen mit unterschiedlichen Aussentemperaturen aufgenommen wurde. Dank der Skalierung der beiden Thermogramme mit QualiThermo ergeben sich vergleichbare Bilder, was Voraussetzung ist, dass auch deren Bewertung bzw. deren Interpretation gleichwertig erfolgt.

Die Bilder 5-3 und 5-4 zeigen ein weiteres MFH mit einer verputzten Aussenwärmedämmung im selben Quartier. Infolge hoch liegender Bewölkung mit entsprechend tiefen Himmelstemperaturen musste bei diesen IR-Bildern die Skalierungsvorgabe von QualiThermo zusätzlich angepasst werden. Dies erfolgte in beiden Fällen mit der manuellen Skalierungsanpassung. Auch hier resultieren wiederum vergleichbare Wärmebilder (vgl. Kap. 5.4.1).



**Bild 5-1:** Ein altes MFH mit ungedämmtem Backsteinmauerwerk. Bilddarstellung mit QualiThermo Grundeinstellung.

**Bild 5-2:** Gleiches Gebäude wie links, jedoch bei einer anderen Aussentemperatur. Mit der QualiThermo-Skalierung ergeben sich vergleichbare Bilder.



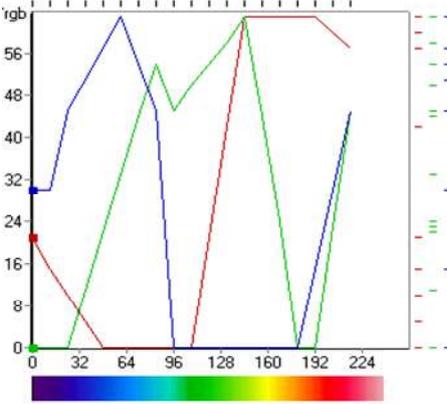
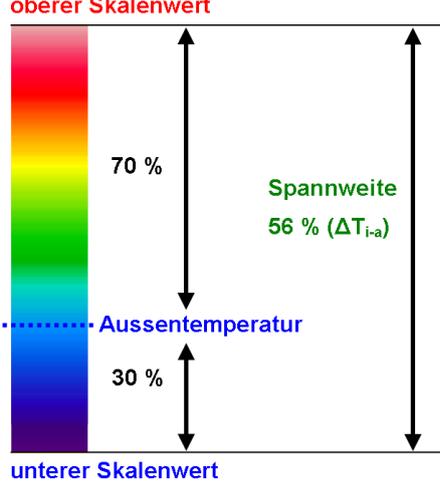
**Bild 5-3:** Ein MFH mit Aussenwärmendämmung. Bilddarstellung mittels QualiThermo, und manueller Skalierungs-Anpassung infolge kaltem Nachthimmel (Anpassung des unteren Skalenwerts:  $C = 1.2^{\circ}C$ ).

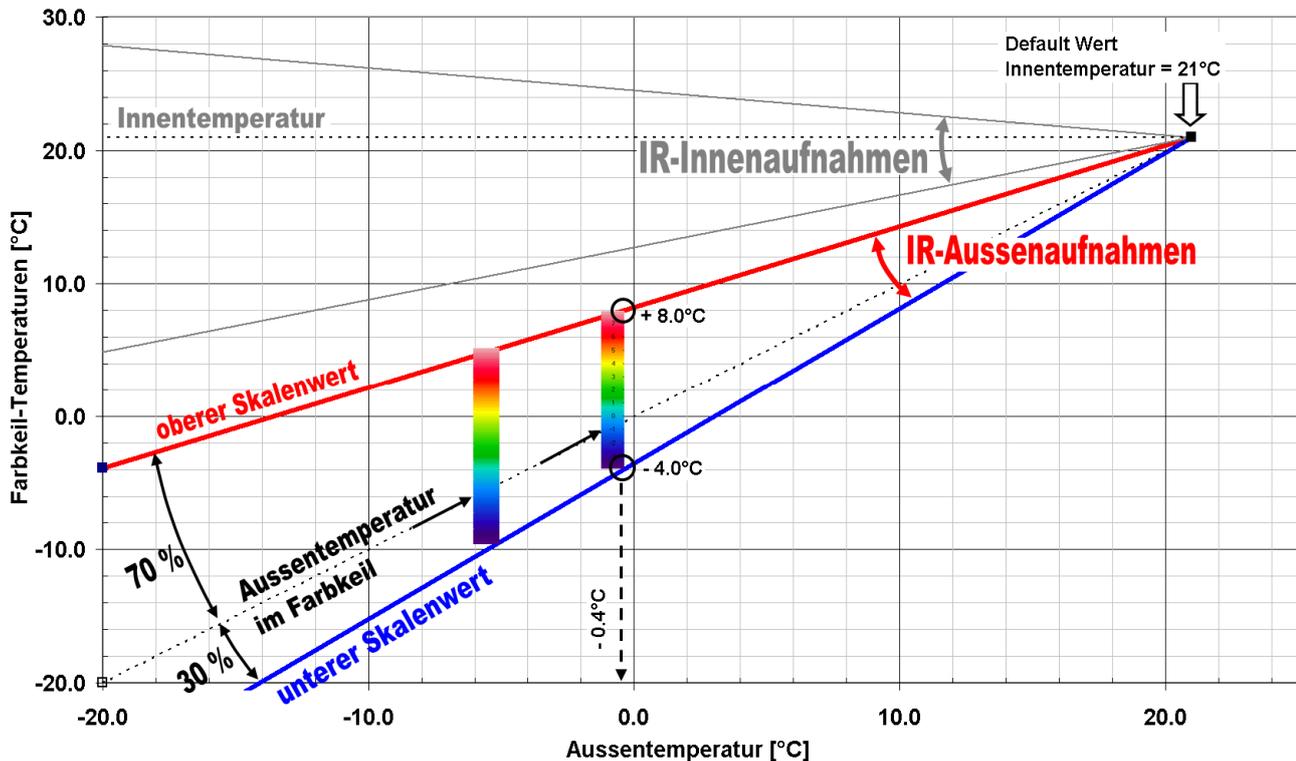
**Bild 5-4:** Gleiches Gebäude wie links, jedoch bei anderer Aussentemperatur. Skalierung ebenfalls mit manueller Anpassung infolge kaltem Nachthimmel (Anpassung des unteren Skalenwerts:  $C = 1.6^{\circ}C$ ).

## 5.2 Grundlagen und Skalierungsdefinition

Um bei verschiedenen Aussentemperatur-Zuständen mit der Methode QualiThermo immer gleich wirkende Bilder eines Gebäudes erzeugen zu können, müssen verschiedene Funktionen definiert werden. Nachstehend ist eine Auflistung aller bestimmenden Elemente. Bild 5-6 zeigt das Grundprinzip des Skalierungsverfahrens von QualiThermo zusätzlich in grafischer Form.

**Achtung:** Alle Angaben basieren auf der Voraussetzung der *quasistationären Bedingungen!*

<p><b>Standard-Farbkeil</b></p> 	<p>Nicht nur die Skalierung, sondern auch die Zusammensetzung des Farbkeils ist eine wesentliche Komponente. Je nach Farbzusammensetzung und Farbübergängen entstehen von der gleichen IR-Aufnahme sehr unterschiedliche Wirkungen für die Betrachter (vgl. Bild 1-6).</p> <p>Der Standard-Farbkeil von QualiThermo basiert auf der IR-Auswertesoftware PicWin-IRIS, Version 7.1 [20]. Dort ist ein „Original“-Farbkeil mit 240 Farben (x-Achse Grafik links) und den entsprechenden RGB-Farbanteilen definiert, welche für PC-Bilder eine max. Intensität bei 64 haben (y-Achse Grafik links).</p> <p><b>Bild 5-5:</b> Zusammensetzung des QualiThermo Standard-Farbkeils.</p>
<p><b>Skalierung</b></p> 	<p>Die Skalierungs-Spannweite muss immer im gleichen Verhältnis zur Temperaturdifferenz innen-aussen stehen.</p> <p>In QualiThermo V2.2-2010 sind folgende Default-Werte bei einer Aussentemperatur von <math>-0.4^{\circ}\text{C}</math> und einer Innentemperatur von <math>+21^{\circ}\text{C}</math> festgelegt worden.</p> <p>oberer Skalenwert = <math>+8.0^{\circ}\text{C}</math>          unterer Skalenwert = <math>-4.0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Die Aussentemperatur soll immer im gleichen, blauen Bereich liegen (psychologische Wirkung: blau = kalt). Deshalb wird die Lage der Aussentemperatur im Standard-Farbkeil bei 30 % über dem unteren Skalenwert festgelegt.</p> <p>Folge: Ein altes ungedämmtes Mauerwerk (U-Wert-Bereich <math>&lt;1.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}</math>) erscheint bei guten Aufnahmebedingungen im grünen Bereich, eine gedämmte Aussenwand (U-Wert-Bereich <math>&lt;0.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}</math>) im hellblauen Bereich.</p>
<p><b>Aussen- und Innentemperatur</b></p>	<p>Als Eingabeparameter wird die aktuelle Aussen- und Innentemperatur benötigt. Bei idealen Aufnahmebedingungen ist die Aussentemperatur praktisch identisch mit der Aussenlufttemperatur.</p> <p>Achtung: Um systematische Fehler zu vermeiden, müssen immer alle Temperaturen mit der (gleichen) IR-Kamera gemessen werden, auch die Aussenlufttemperatur!</p>
<p><b>Anwendung für Innenthermografie</b></p>	<p>QualiThermo kann auch für IR-Innenaufnahmen verwendet werden. Dabei gelten die analogen Definitionen, allerdings bezogen auf die Innenseite.</p> <p>Für IR-Innenaufnahmen sind die Meteo-Daten viel weniger relevant, als für die Aussenaufnahmen. Im Rahmen dieses Projektes wurden dazu keine weiteren Untersuchungen durchgeführt. (vgl. Hinweise Kap. 4.4).</p>
<p><b>Referenz- und Vergleichsbilder in Anlehnung an EN 13187</b></p>	<p>In Ergänzung zur QualiThermo-Methode entstand die Dokumentation „Infrarotaufnahmen von Gebäuden“ (vgl. Kap. 5.6).</p>



**Bild 5-6:** Grafische Darstellung der Skalierungsmethode QualiThermo (grau: für Innenaufnahmen).

Unter idealen Bedingungen, d.h. für einen quasi-stationären Zustand ohne solaren Strahlungseinfluss, können die zu erwartenden Oberflächentemperaturen aussen gemäss der Formel (1) abgeschätzt werden:

$$\theta_{se} = \theta_e + U \cdot R_{se} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (1)$$

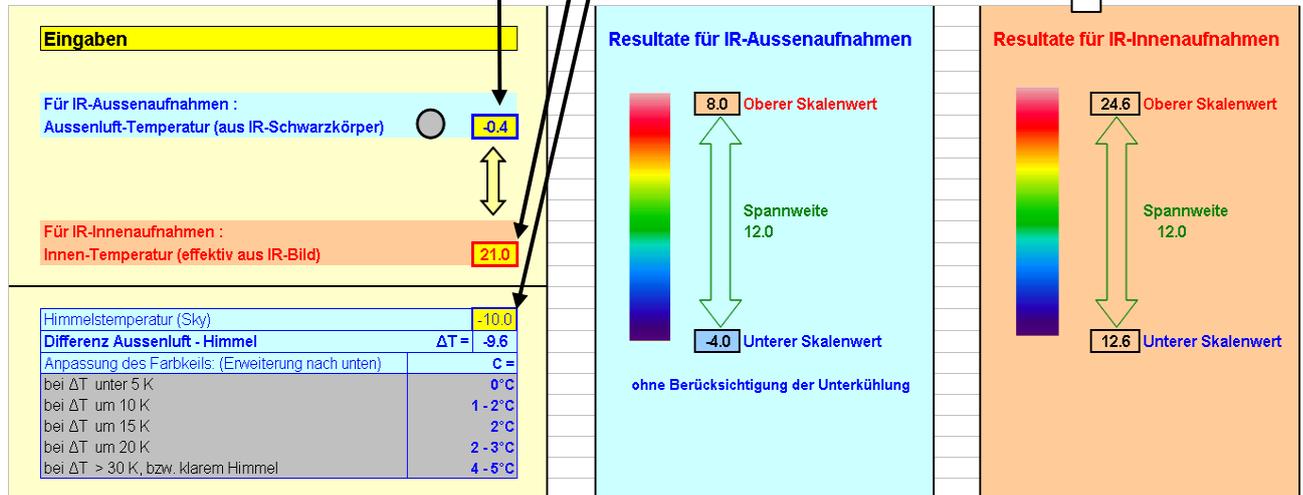
mit:

$\theta_e$	Aussentemperatur (Umgebungstemperatur) (setzt sich aus Luft- und Strahlungstemperatur zusammen, s. Formel (2)).	°C
$\theta_i$	Innentemperatur (Raumtemperatur)	°C
$\theta_{se}$	Aussenoberflächentemperatur	°C
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
$R_{se}$	Wärmeübergangswiderstand aussen	m <sup>2</sup> K/W

Der obere Skalengrenzwert für IR-Aussenaufnahmen in Bild 5-6 basiert in QualiThermo auf der Formel (1) mit einer Festlegung von  $U \cdot R_{se}$  auf einen Defaultwert von 0.393. Damit liegen bei äusseren Wärmeübergangskoeffizienten  $h_e$  von 8 - 12 W/(m<sup>2</sup>K) die Oberflächentemperaturen von Bauteilen mit einem U-Wert von 3.1 - 4.7 W/(m<sup>2</sup>K) an der oberen Skalengrenze.

### 5.3 Umsetzung in einem Excel-Tool

- IR-Lufttemperatur (aussen)
- Innentemperatur
- Himmelstemperatur (aussen)



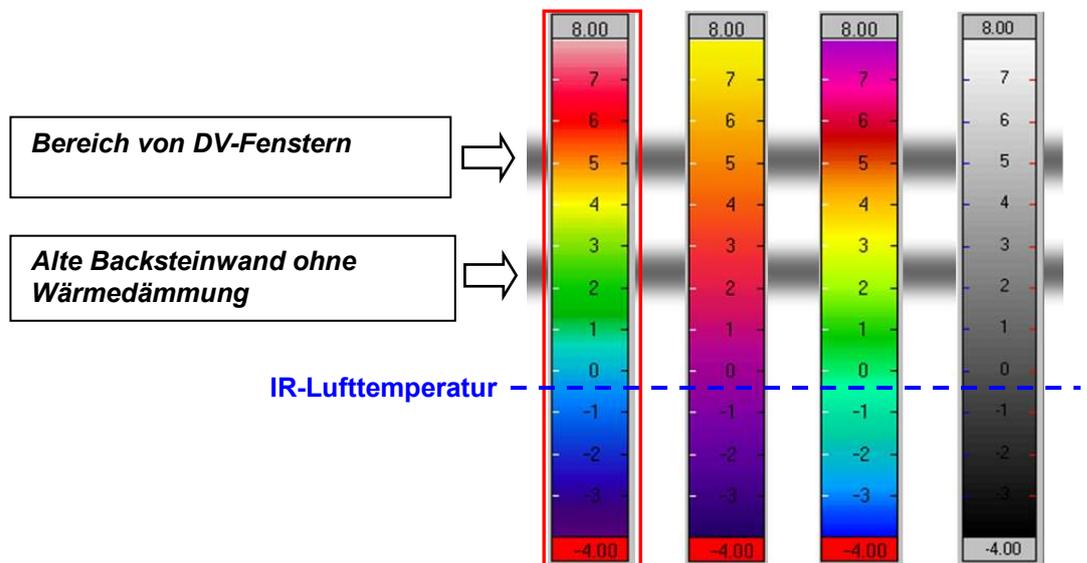
In allen Erläuterungen wird primär auf die IR-Aussenaufnahmen eingegangen.

**Bild 5-7:** Eingaben und Resultate einer QualiThermo-Vorgabe mit der Tool-Version V2.2-2010.

Die notwendigen Eingabewerte sind im Kap. 5.2. beschrieben. Dem Tool sind die Default-Werte: Aussentemperatur  $-0.4^{\circ}\text{C}$  und Innentemperatur  $+21^{\circ}\text{C}$  hinterlegt, was den QualiThermo-Skalierungsvorschlag von  $+8.0^{\circ}\text{C}$  bis  $-4.0^{\circ}\text{C}$  ergibt.

Unter guten IR-Aufnahmebedingungen lassen sich nun mit dieser „standardisierten“ Farbkeilskalierung nachvollziehbare Abschätzungen über die Energieverluste von Bauteilen machen. Details siehe Kap. 8.1; Aussagen zu den Unsicherheiten siehe Kap. 8.4.

Beispiel:



**Bild 5-8:** Die Wirkung von QualiThermo auf verschiedene Farbkeile übertragen.

**Hinweis:** QualiThermo basiert primär auf dem hier verwendeten und beschriebenen „Standard-Farbkeil“ (Kap. 5.2). Werden andere Farbkeile verwendet (vgl. Bild 1-6), so müssen die Bildinterpretationen ebenfalls anhand von Referenzbildern mit dem veränderten Farbkeil erfolgen. (Referenzbilder siehe Kapitel 5.6, Dokumentation „Infrarotaufnahmen von Gebäuden“).

### 5.3.1 Messung der Lufttemperatur mit der IR-Kamera („IR-Lufttemperatur“)

Entsprechend den bauphysikalischen Gegebenheiten sind für die QualiThermo-Skalierungsbestimmungen die Lufttemperaturen aussen und innen entscheidend.

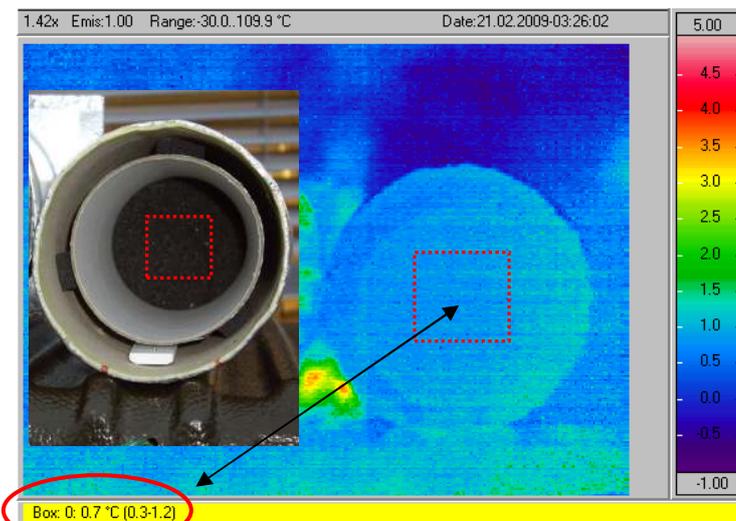
- Für Aussenaufnahmen ist die genaue Aussentemperatur wichtiger als die Innentemperatur.
- Für Innenaufnahmen ist die genaue Innentemperatur wichtiger als die Aussentemperatur.

Für die Bestimmung der Lufttemperatur soll nun nicht ein externes, genaues Messgerät beigezogen werden, sondern die Lufttemperatur ist mittels IR-Kamera zu messen (= „IR-Lufttemperatur“)!

Dies ist notwendig, denn es soll ja die genaue Differenz zwischen der Bauteil-Oberflächentemperatur (aus der IR-Aufnahme) und der Lufttemperatur (eben mit IR gemessen) ermittelt werden. Dies wird nur dann genügend genau, wenn für beide Temperaturmessungen das gleiche Messmittel eingesetzt wird (ein systematischer Messfehler hebt sich so auf).

#### Die „IR-Lufttemperatur“ bei Aussenaufnahmen

Ein praktikabler Weg für die Ermittlung der IR-Aussenlufttemperatur vor Ort: Es wird z.B. auf dem Autodach ein Doppelrohr montiert (Bild 5-9). Doppelt damit der Kern strahlungsgeschützt ist, mit äusserer Alubeschichtung ist das noch besser wirksam. Im inneren Rohr ist eine dünne, aufgehängte Membrane. Wird diese gut mit Luft umspült, nimmt sie schnell die effektive Lufttemperatur an und wird nicht durch Abstrahlung (klarer Nachthimmel) unterkühlt. Nachdem (und/oder auch schon vorher) die IR-Aufnahmen vom Gebäude erstellt sind, wird eine IR-Aufnahme ins Rohr gemacht. Damit lässt sich an der Membrane die aktuelle „IR-Lufttemperatur“ gut ermitteln. Zur Kontrolle / Plausibilität lässt sich das Resultat auch überprüfen, indem man es mit Einzelpunkten auf den IR-Bildern vergleicht, wo Gelände, Gebüsche, geschützte Untersichten etc. zu sehen sind. Nicht zu vergessen ist auch, dass die Kamera frühzeitig eingeschaltet wird (Einlaufphase)!



**Bild 5-9:** Bestimmung der „IR - Lufttemperatur“ mittels Doppelrohr und feiner Membrane.

Für die Bestimmung der Innenlufttemperatur (bei Aussenaufnahmen) hat man oft keine genauen Angaben und kann nachts auch nicht ins Gebäude. Liefert der Hausbewohner keine Daten, kann als Durchschnitts- und Defaultwert für Wohnräume meist + 21°C angenommen werden, entsprechend einem Tagesmittelwert. Mit einer Vorinformation der Bewohner kann hier eine wesentliche Absicherung erreicht werden.

#### Die „IR-Lufttemperatur“ bei Innenaufnahmen

Wird QualiThermo für Innenaufnahmen verwendet, so sollte die Innenraumtemperatur analog der Aussentemperatur möglichst genau bestimmt werden. Dabei reicht es meist, wenn man die Oberflächentemperatur von Möbeln, Innenwänden oder Innentüren etwa in mittlerer Raumhöhe misst und darauf achtet, dass nicht irgendwelche Wärmequellen (Heizung, Beleuchtungskörper, elektrische Geräte) in der Nähe stehen oder Spiegelungen entstehen. Die Genauigkeit der Aussenlufttemperatur ist in diesem Fall weniger wichtig und kann u.U. auch via Datensatz der nächstgelegenen Meteo-Station bestimmt werden.

## 5.4 Anpassung der Skalierung

Eine wichtige Meteo-Grösse, welche auch nachts die Oberflächentemperaturen stark beeinflusst, ist die Strahlungstemperatur der Aussenumgebung. Bei klarem oder nur teilweise bewölktem Nachthimmel kann der Strahlungsaustausch bewirken, dass sich Wandoberflächen mit wenig Masse stark unterkühlen. Noch stärker ist das Phänomen bei Dächern, weil sie viel mehr Himmel „sehen“ als die Fassaden. Dies analog zu den Windschutzscheiben bei Autos, die auch schneller und stärker vereisen, als die fast senkrecht gestellten Seitenscheiben.

Ob sich ein klarer Nachthimmel einstellt, hängt von der Genauigkeit der Meteo-Prognosen ab. Ab und zu lässt sich deshalb nicht verhindern, dass diese ungünstige Situation eintritt, insbesondere in Bergregionen, wo kaum Hochnebel anzutreffen ist.

Will man unter diesen Bedingungen doch noch Bilder generieren, die in beschränktem Rahmen mit den QualiThermo-Standardbildern verglichen werden können, so muss die Skalierung diesen Strahlungsauswirkungen angepasst werden.

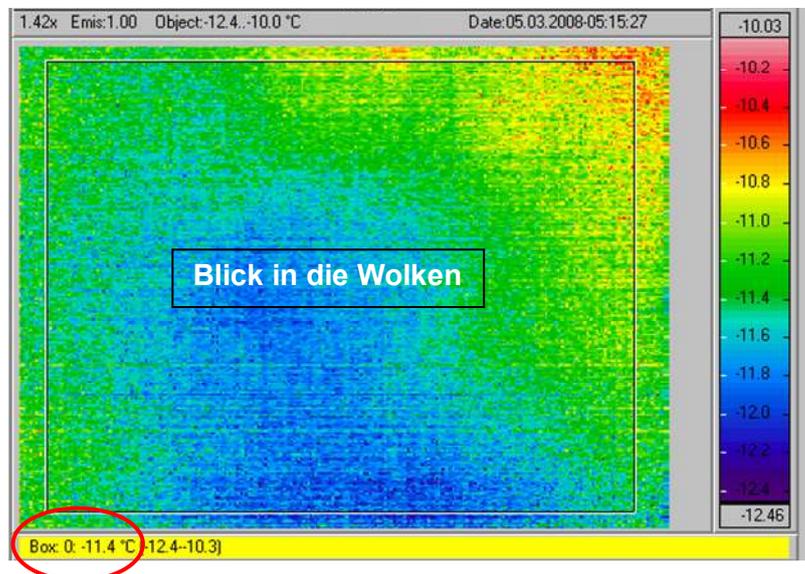
Bei plausibler Begründung können solche Anpassungen auch für andere Ursachen, wie z.B für das träge Verhalten einer Betonkonstruktion, angewendet werden. Grundsätzlich sind jedoch günstige Aufnahmebedingungen anzustreben und Skalierungsanpassungen sollten nur in Ausnahmefällen vorgenommen werden.

Im Folgenden werden zwei Methoden vorgestellt, mit welchen eine Berücksichtigung der Strahlungsvorgänge vorgenommen werden kann.

### 5.4.1 Manuelle Skalierungsanpassung basierend auf Erfahrungswerten

Bei der manuellen Skalierungsanpassung, die in der Version V2.2-2010 bei QualiThermo beschrieben ist, wird neben der Aussenlufttemperatur auch die Himmelstemperatur, bzw. die Wolken-Untersicht mit der IR-Kamera gemessen. Bei bedecktem Himmel repräsentiert ein Blickwinkel von 45 ° einen guten Mittelwert. Mittels IR-Software wird daraus die mittlere Box-Temperatur bestimmt (siehe Bild 5-10). Es kann auch leicht der Mittelwert verschiedener Expositionen bestimmt werden. Bei klarem Himmel sind die Temperaturen jedoch so tief, dass sie von IR-Kameras nicht mehr erfasst werden können („out of range“). Zudem muss beachtet werden, dass der klare Nachthimmel ein stark selektiver Strahler ist, dessen Temperatur nur mit einem breitbandigen IR-Messgerät (Wellenlängenbereich 4.5-40  $\mu\text{m}$ ) korrekt erfasst werden kann.

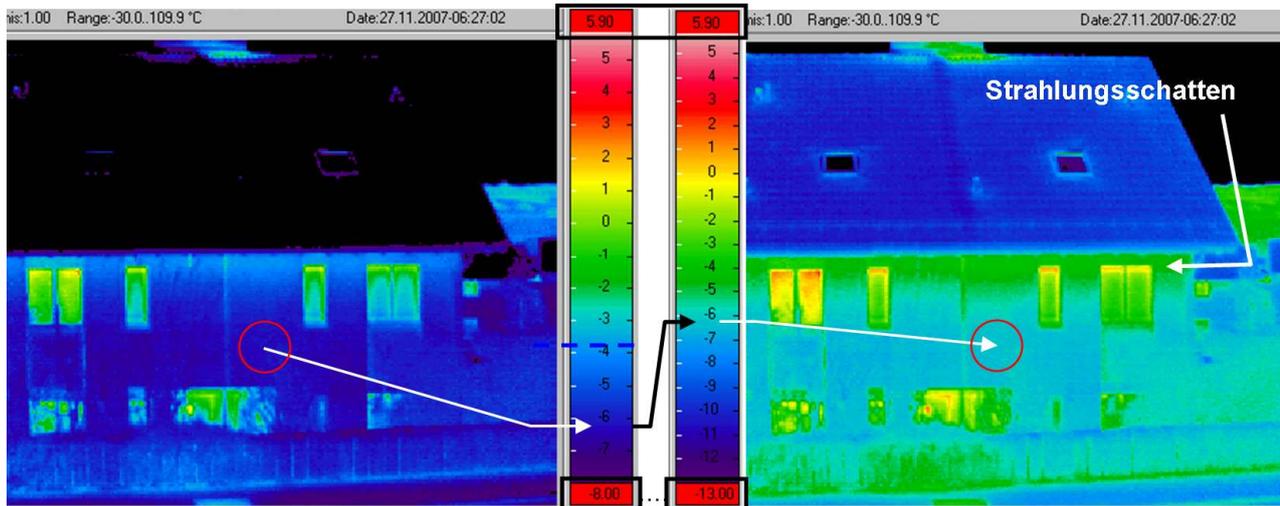
**Bild 5-10:** Bestimmung der mittleren Himmelstemperatur mit der IR-Kamera.



Aus der Differenz zwischen der IR-Lufttemperatur und der mittleren Himmelstemperatur wird in der Folge aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt, wie gross eine Anpassung der Skalierung sein muss (Bild 5-11). Konkret erfolgt diese, indem die Skalierung am unteren Ende um den Anpassungswert C erweitert wird. Aus der Praxis weiss man, dass sich bei klarem, kaltem Nachthimmel Fassadenoberflächen mit wenig Masse (Aussenwärmedämmung, AWD) um bis zu 5°C unterkühlen können. Die maximale Anpassung ist deshalb auf 5°C beschränkt. Ein Beispiel mit maximaler Skalierungs-Erweiterung infolge klarem Himmel zeigt Bild 5-12.

Himmelstemperatur (Sky)	-15.0
Differenz Aussenluft - Himmel	$\Delta T = -6.2$
Anpassung des Farbkeils: (Erweiterung nach unten)	C =
bei $\Delta T$ unter 5 K	0°C
bei $\Delta T$ um 10 K	1 - 2°C
bei $\Delta T$ um 15 K	2°C
bei $\Delta T$ um 20 K	2 - 3°C
bei $\Delta T > 30$ K, bzw. klarem Himmel	4 - 5°C

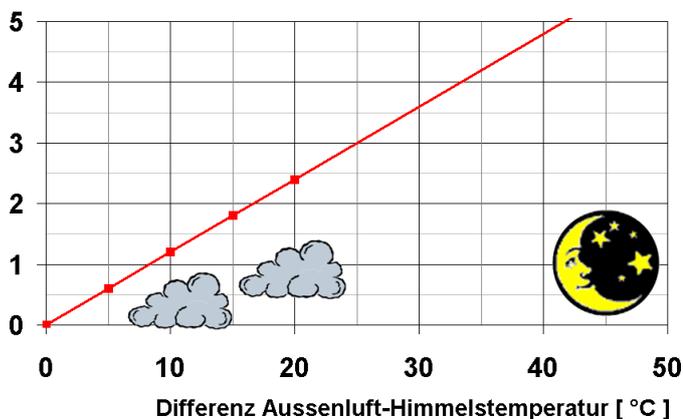
**Bild 5-11:** Manuelle Skalierungsanpassung nach der Methode QualiThermo Version V2.3-2010.



**Bild 5-12.** Einfamilienhaus mit Wärmedämmverbundsystem, thermografiert unter ungünstigen Aufnahmebedingungen (klarer, kalter Nachthimmel, Aussenlufttemperatur: - 3.8°C). Bilddarstellung links mit QualiThermo-Grundeinstellung (Skalierung von + 5.9°C bis - 8.0°C); Bilddarstellung rechts mit unterer Skalierungsanpassung um - 5°C (neue Skalierung von + 5.9°C bis - 13.0°C).

Aufgrund der Sensitivitätsanalysen (siehe Kap. 7.2.6) können neu anstelle der Tabelle in Bild 5-11 auch genauere Werte angegeben werden. Die Anpassungswerte C für einen Durchschnitts-Sichtfaktor Sky von 33% betragen ca. 80 % von 0.15°C pro Grad Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Aussenluft- und Himmelstemperatur:  $C = 0.12 \cdot \Delta T$  (siehe Bild 5-13). Auch hier ergibt sich ein praktisches Maximum des Anpassungswertes von ca. 5°C.

### Anpassung C [°C]



**Bild 5-13:** Manuelle Skalierungsanpassung, neu berechnet.

**Achtung:** Die angepassten IR-Bilder enthalten verschiedene neue Interpretations-Problemstellen. So entstehen z.B. unter den Vordächern und bei den Fensterstürzen sogenannte „Strahlungsschatten“ (Bild 5-12 rechts). Auch gegen den kalten Himmel reflektierende Fenster zeigen sich völlig anders, als bei guten Meteo-Bedingungen (vgl. Dachfenster).

### 5.4.2 Skalierung basierend auf der Aussentemperatur $\theta_e$ (Umgebungstemperatur)

Erfolgt die Bestimmung der Skalengrenzen des Farbkeils auf einer berechneten Aussentemperatur (Umgebungstemperatur)  $\theta_e$ , so kann der Strahlungseinfluss der Aussenumgebung physikalisch detailliert berücksichtigt werden.  $\theta_e$  lässt sich gemäss Formel (2) unter Einbezug der Wärmeübergangsbedingungen für Konvektion und Strahlung, der Lufttemperatur sowie aus der Strahlungstemperatur der Aussenumgebung berechnen.

$$\theta_e = \frac{h_{re} \cdot \theta_{re} + h_{ce} \cdot \theta_{ae}}{h_{re} + h_{ce}} \quad (2)$$

mit:

$\theta_e$	Aussentemperatur (Umgebungstemperatur) (beinhaltend Luft- und Strahlungsanteile)	°C
$\theta_{re}$	Strahlungstemperatur der Aussenumgebung	°C
$\theta_{ae}$	Aussenlufttemperatur	°C
$h_{re}$	Strahlungswärmeübergangskoeffizient aussen	W/(m <sup>2</sup> K)
$h_{ce}$	Konvektionswärmeübergangskoeffizient aussen	W/(m <sup>2</sup> K)

Die Strahlungstemperatur der Aussenumgebung  $\theta_{re}$  wird gemäss Formel (3) bestimmt, wobei die verschiedenen Einflüsse mit sog. Einstrahlzahlen (auch Sichtfaktoren genannt) gewichtet werden:

$$\theta_{re} = \sqrt[4]{(F_{sky} \cdot T_{sky}^4 + F_b \cdot T_b^4 + F_g \cdot T_g^4 - 273.16)} \quad (3)$$

mit:

$F_b$	Einstrahlzahl (Sichtfaktor) zu Nachbarbauten	-
$F_g$	Einstrahlzahl (Sichtfaktor) zum Boden	-
$F_{sky}$	Einstrahlzahl (Sichtfaktor) zum Himmel	-
$T_b$	Absolute Temperatur der Nachbarbauten, Bäume etc.	K
$T_g$	Absolute Temperatur des Bodens	K
$T_{sky}$	Absolute Temperatur des Himmels	K

Für einen klaren, wolkenlosen Himmel (Bewölkungsgrad  $c=0$ ) kann die Himmelstemperatur  $T_{sky}(0)$  basierend auf der Näherungsformel (4) gemäss EN ISO 13791 [17] bestimmt werden:

$$T_{sky}(0) = [9,36 \times 10^{-6} (T_{ae})^6]^{0,25} \quad (4)$$

mit

$T_{ae}$  Aussenlufttemperatur in K

Bei bewölktem Himmel kann die Himmelstemperatur  $T_{sky}(c)$  nach Unsworth [18] mit den Formeln (5) bis (7) in Abhängigkeit eines hemisphärischen Emissionsgrades  $\varepsilon_{sky}(c)$  des Himmels in Funktion der Bewölkung  $c$  und der Aussenlufttemperatur  $T_{ae}$  ermittelt werden:

$$I_{r,sky}(c) = \sigma \cdot T_{sky}^4(c) = \varepsilon_{sky}(c) \cdot \sigma \cdot T_{ae}^4 \quad (5)$$

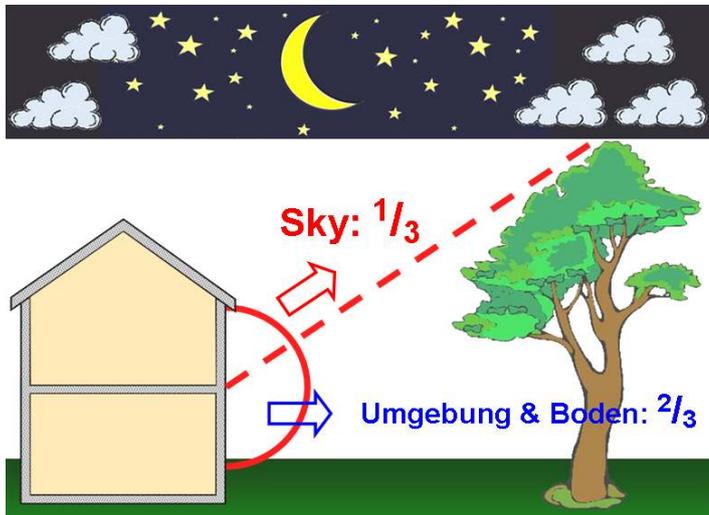
$$\varepsilon_{sky}(c) = (1 - 0.84 \cdot c) \cdot \varepsilon_{sky}(0) + 0.84 \cdot c \quad (6)$$

$$\varepsilon_{sky}(0) = \frac{T_{sky}^4(0)}{T_{ae}^4} \quad (7)$$

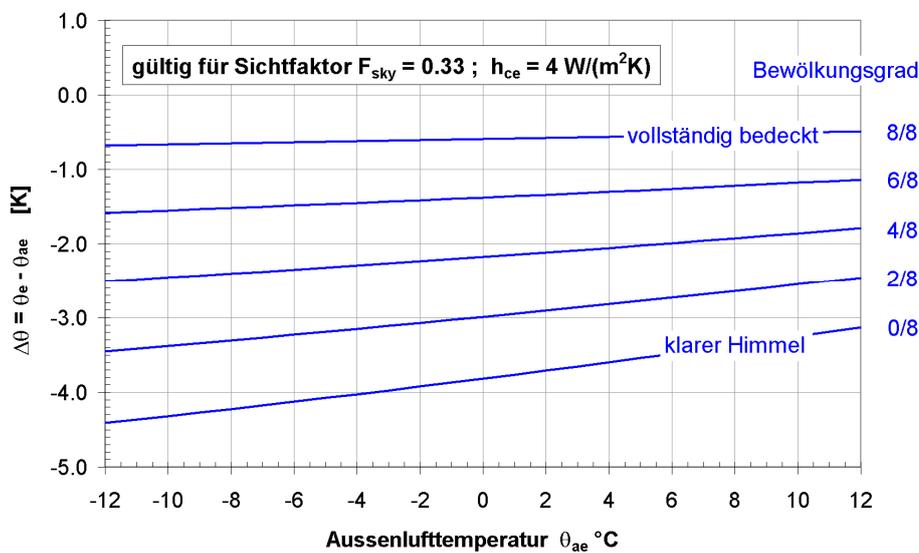
mit

$I_{r,sky}$	IR- Einstrahlung des Himmels auf eine horizontale Fläche in W/m <sup>2</sup>
$c$	Bewölkungsgrad in 1/10
$\varepsilon_{sky}$	Hemisphärischer Emissionsgrad des Himmels
$\sigma$	Stefan Boltzmann Konstante $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )

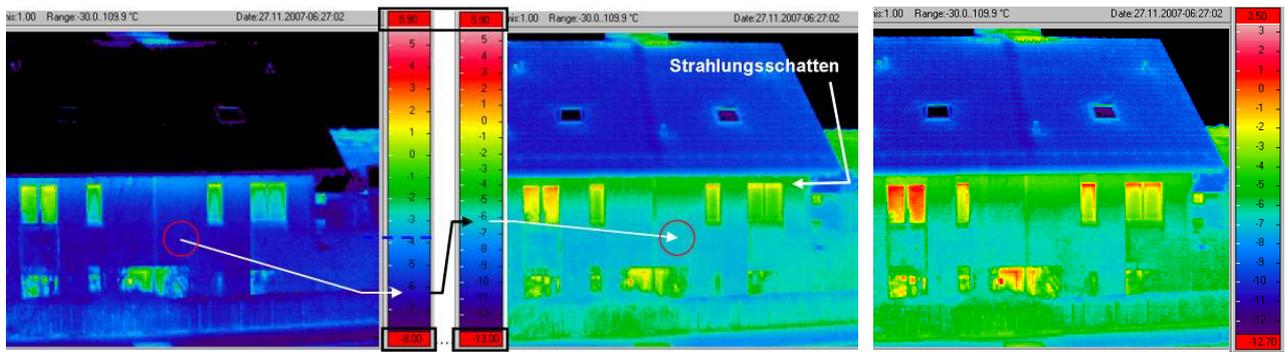
Für die praktische Anwendung in städtischen Gebieten können folgende Sichtfaktoren verwendet werden (Bild 5-14): Himmel  $F_{\text{sky}} = 33\%$ ; Umgebung und Boden ( $F_b + F_g$ ) = 67%. Diese gelten für typische Situationen von vertikalen Wänden, wenn das Objekt von weiteren Gebäuden oder Vegetation umgeben ist. Dabei kann für die Strahlungstemperatur der Nachbarbauten und des Bodens in erster Näherung die Lufttemperatur eingesetzt werden. Für ideale Verhältnisse mit  $h_{\text{ce}} = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und  $h_{\text{re}} = 4.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , kann die berechnete Differenz zwischen Aussentemperatur (Umgebungstemperatur) und Aussenlufttemperatur unter Berücksichtigung der Himmelsstrahlung auch grafisch aus dem Diagramm in Bild 5-15 ermittelt werden.



**Bild 5-14:** Gewichtete Strahlungstemperatur der Aussenumgebung (typische Verhältnisse für vertikale Wände).

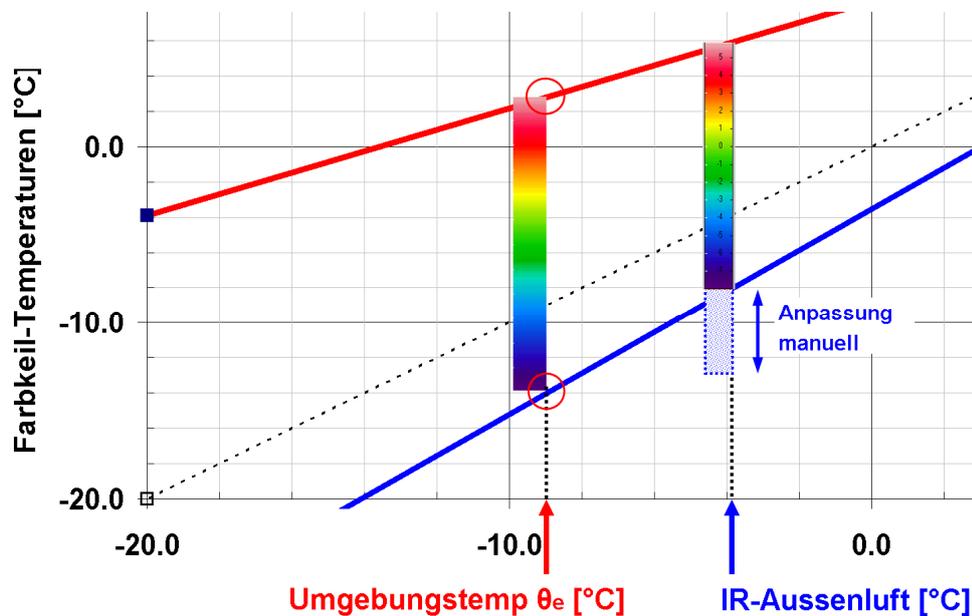


**Bild 5-15:** Berechnete Temperaturdifferenz zwischen Aussentemperatur (Umgebungstemperatur) und Aussenlufttemperatur für windstille Situationen.



**Bild 5-16:** Gleiche Situation wie in Bild 5-12.  
 Links: Thermogramm-Darstellung nach QualiThermo ohne Korrektur  
 Mitte: Mit manueller Anpassung  
 Rechts: Mit berechneter Aussentemperatur (Umgebungstemperatur).

Welche Unterschiede sich durch die „manuelle Methode“ und die Methode mit der berechneten Aussentemperatur (Umgebungstemperatur) ergeben zeigt Bild 5-17.



**Bild 5-17:** links: Skalierungsanpassung nach der Methode der Umgebungstemperatur.  
 rechts: Skalierungsanpassung nach ursprünglicher, manueller Methode auf Grund von Erfahrungswerten.

Es gilt zu beachten, dass mit QualiThermo sehr wohl ein standardisiertes Wärmebild erzeugt wird, dass jedoch für die Herleitung von wahren Oberflächentemperaturen und U-Werten an lokalen Stellen des Bildes zusätzliche Rechenschritte erforderlich- und Annahmen bezüglich der Randbedingungen zu treffen sind.

## 5.5 Die „kritischen“ Meteodaten

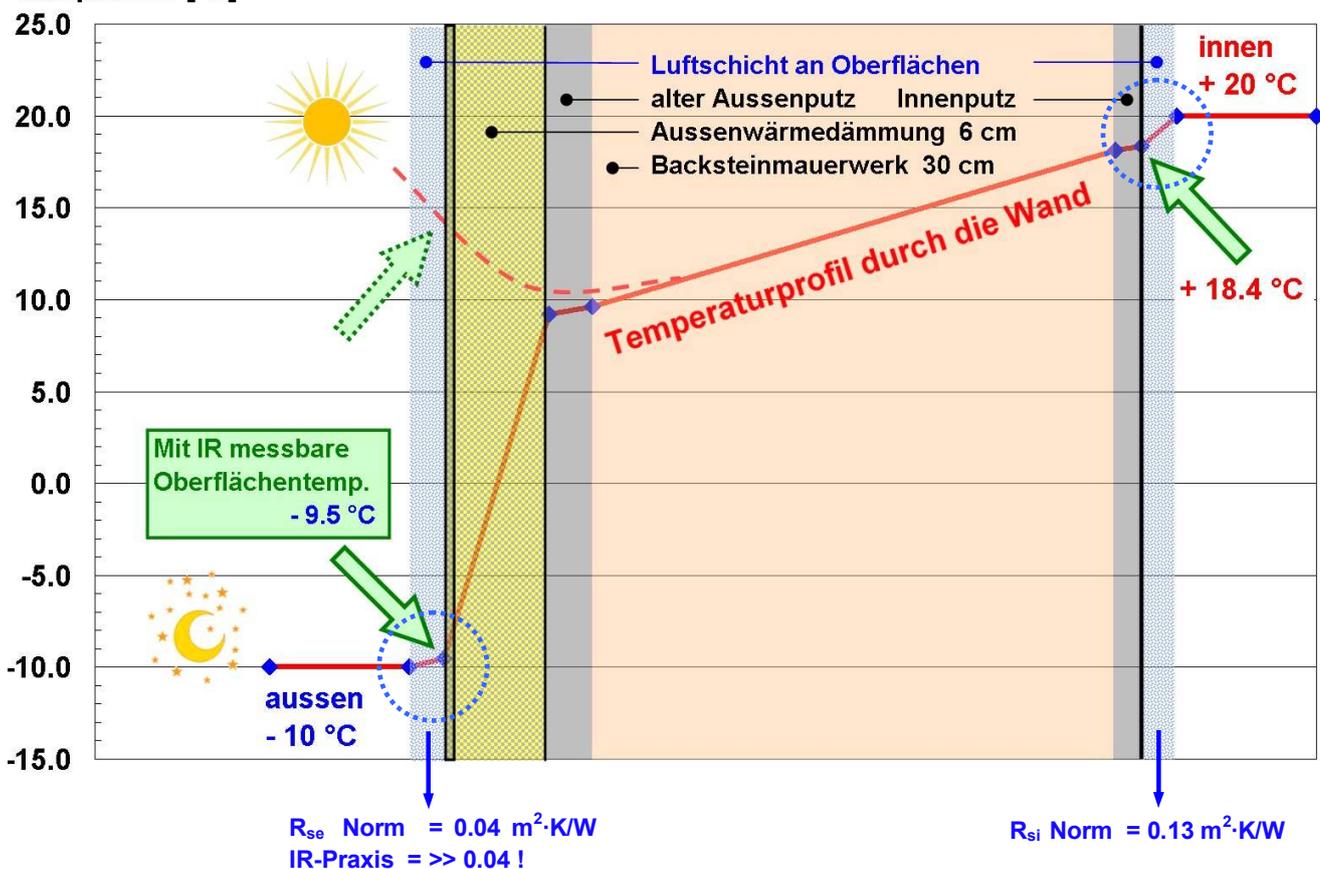
### 5.5.1 Meteoauswirkungen auf den Wandoberflächen

Die Meteobedingungen sorgen für grosse Temperaturschwankungen auf den äusseren Oberflächen der Bauteile (vgl. Bild 5-18). In der Praxis herrschen deshalb **immer** instationäre Verhältnisse. Je nach Konstruktionsart können die Oberflächentemperaturen infolge wechselnder Meteo-Bedingungen sehr schnell ändern (z.B. bei verputzten Aussenwärmedämmungen) oder über längere Zeiträume Wärme eines früheren Wärmeinputs wieder abgeben (z.B. bei Betonwand).

Will man trotzdem hochwertige IR-Aussenaufnahmen erstellen, so braucht es „quasistationäre“ Meteo-Bedingungen. Die Beurteilung, wann diese gegeben sind, bzw. welche Meteo-Parameter welche Einflüsse auf die IR-Aufnahmen haben, war eines der Hauptziele dieses Projekts. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt analysiert.

Beispiel unten: Meteo-Einflüsse auf das Temperaturprofil einer Wand mit 6 cm Aussenwärmedämmung ( $U\text{-Wert} = 0,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ). Diese erfüllt gerade noch die Werte der Norm SIA 180 (1999) (Heutige Dämmstärken liegen bei 15-20 cm und  $U\text{-Werten}$  von  $\leq 0.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ).

#### Temperatur [°C]



**Bild 5-18:** Temperatureinflüsse auf ein Bauteil.

 Bedeutung und effektive Grösse der Wärmeübergänge siehe Kap. 7.1.4.

## 5.5.2 Die Schlüsselgrößen der Meteofaktoren

Werden energetische Interpretationen von IR-Bildern abgeleitet, so kann das nur dann mit genügend Sicherheit getan werden, wenn u.a. die Meteorbedingungen vor- und während den Aufnahmen gut waren. (vgl. Kapitel 4.1 „Kriterienkatalog“).

Da ein reales Gebäude jedoch immer einer Temperaturdynamik unterworfen ist, gilt es zu beachten, dass mindestens die wesentlichsten Faktoren „unter Kontrolle“ sind.

Dafür sind folgende Meteordaten für die Berichterstattung und Nachvollziehbarkeit vor den Aufnahmen zu überprüfen und nach den Aufnahmen festzuhalten/speichern:

- **Aktuelle Lufttemperatur**
- Aktueller Gradient (momentane Temperaturveränderung)
- **Temperaturverlauf (vergangene 48 h)**
- **Strahlungsinput vom Vortag**
- **Momentaner Bewölkungsgrad / Momentane Himmelstemperatur**
- **Windstärke**
- Windrichtung
- Luftfeuchtigkeit
- Niederschläge / Intensität von Schnee, Regen  
(*leichter Regen für IR-Aufnahmen ist OK, solange die Fassaden nicht nass werden!*).

Liegt keine klare Information über die fett gedruckten Faktoren vor, so ist eine IR-Bildinterpretation kaum nachvollziehbar.

### Hinweis zum Emissionswert ( $\epsilon$ ):

Da im Gebäudebereich meist **viele verschiedene Materialien**, unter verschiedenen Betrachtungswinkeln sichtbar sind und die Umgebungs- und Hintergrundtemperaturen stark variieren (vor allem bei Aussenaufnahmen!), wird empfohlen, bei den IR-Aufnahmen zur Vereinfachung bewusst die  $\epsilon$ -Grundeinstellung bei 1.00 zu belassen.

Gründe:

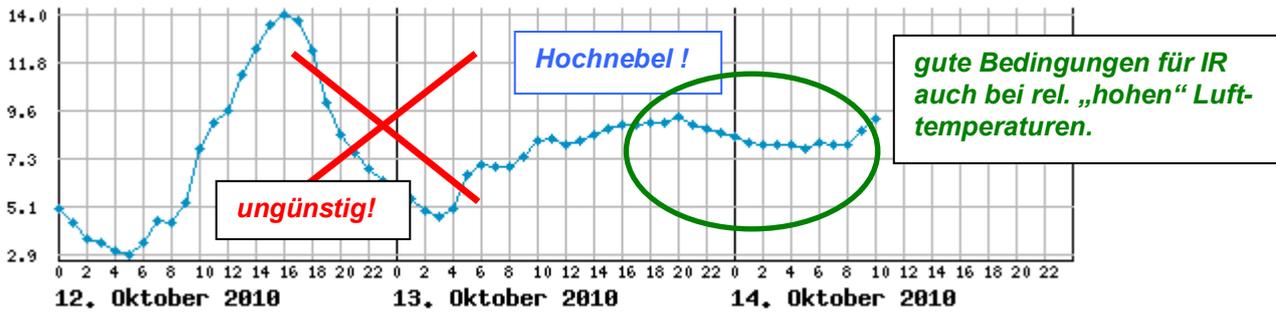
- Im Bereich der kommerziellen Bauthermografie ist es kaum möglich, in allen IR-Bildern eine  $\epsilon$ -Anpassung bei den verschiedenen Materialoberflächen vorzunehmen.
- Für spezielle Fragestellungen sind auch nachträglich via Software  $\epsilon$ -Anpassungen möglich.
- Bei vielen IR-Aufnahmen geht es im Wesentlichen um die Temperatur**differenzen** womit ein systematischer Fehler (eine immer gleiche Abweichung) nicht mehr von Bedeutung ist.
- Auch bei der Beurteilung von energetischen Fragen, wo genaue Temperaturen gefragt sind, kann die  $\epsilon$ -Grundeinstellung bei 1.00 belassen werden. Hier entfällt ein systematischer Fehler ebenfalls, wenn Vergleiche mit Referenzbildern (mit bekannten Daten) gemacht werden, welche auch mit der Einstellung 1.00 aufgenommen wurden.

Weitere Informationen siehe Anhang A3.

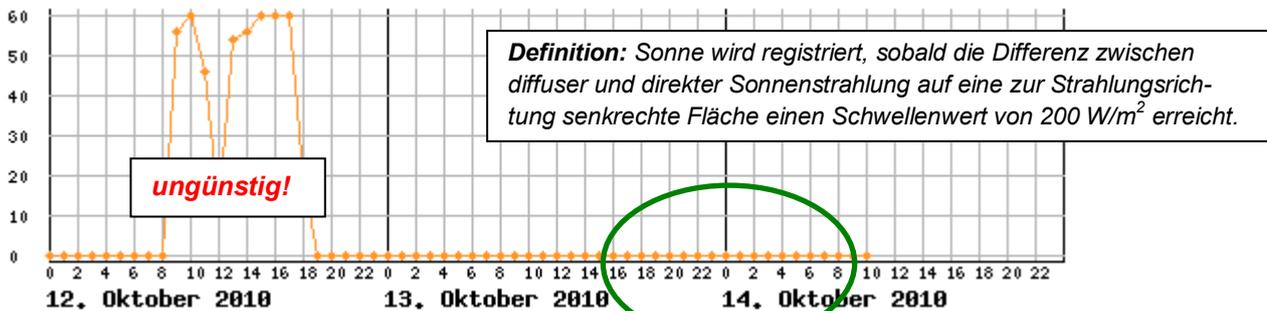
### 5.5.3 Die praktische Beurteilung der „kritischen“ Meteofaktoren

Wie erwähnt ist der Nachweis der Meteodaten eine Schlüsselgrösse für die Qualität der IR-Aufnahmen und für deren Beurteilung. Meteodaten, bzw. Grafiken sind via Internet für verschiedene Stationen verfügbar: [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/wetter/aktuelles\\_wetter.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/wetter/aktuelles_wetter.html)  
 Im Folgenden ein Beispiel für die Erfassung und Aufbereitung für einen Thermografie-Bericht. So wurden auch bisher schon empirisch die Auswirkungen der Meteo-Faktoren beurteilt.

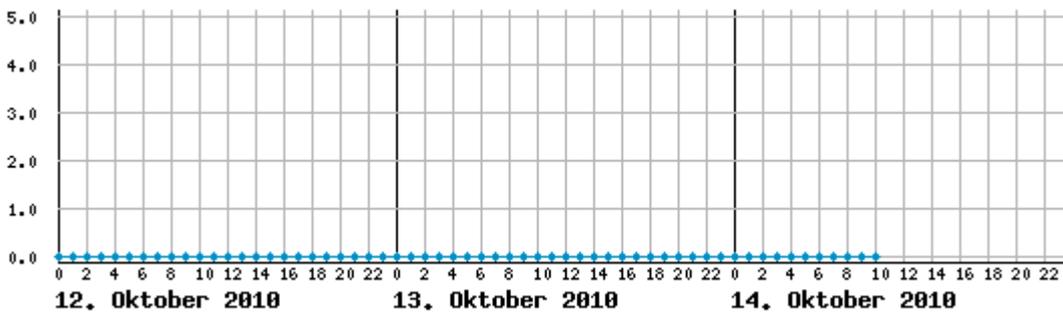
**Temperatur [°C]** Zürich / Affoltern, Stationshöhe: 443 m ü.M.



**Sonnenscheindauer [min]** Zürich / Affoltern, Stationshöhe: 443 m ü.M.

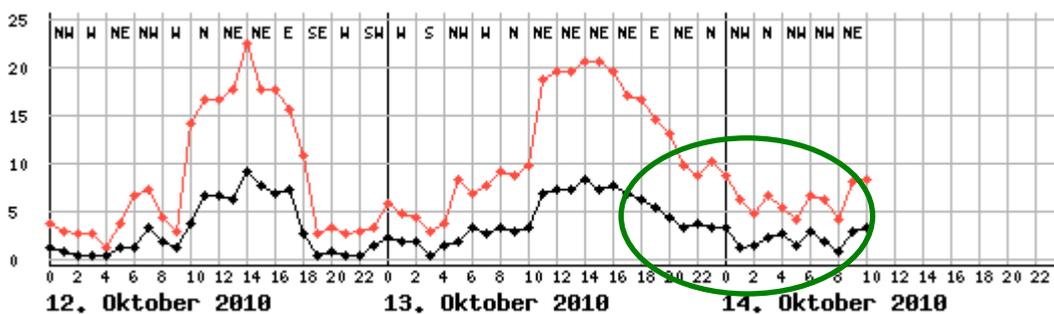


**Niederschlag [mm]** Zürich / Affoltern, Stationshöhe: 443 m ü.M.



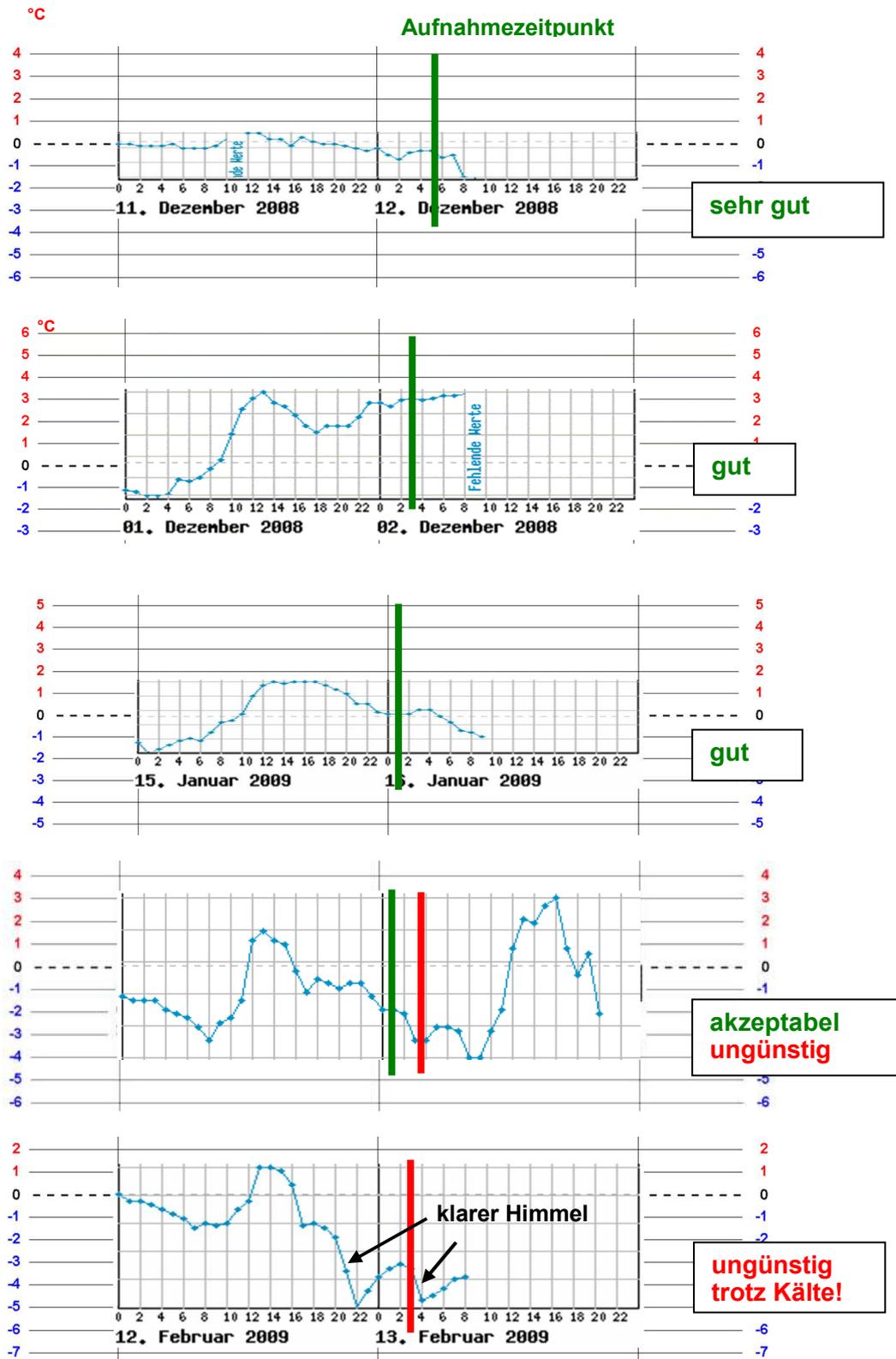
**Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Böenspitzen [° | km/h | km/h]**

Zürich / Affoltern, Stationshöhe: 443 m ü.M.



**Bild 5-19:** Im Internet sind sehr gute Meteo-Informationen verfügbar. Aber sie müssen rechtzeitig abgeholt werden. Messwerte der diffusen Einstrahlung sind für die Meteoschweiz Stationen leider nicht frei verfügbar.

Weitere Beispiele aus realen Situationen. Die Temperaturdiagramme wurden hier so aufbereitet, dass die Skalierung der y-Achse immer gleich empfindlich ist. Genau wie bei den IR-Bildern ist das auch hier notwendig, wenn man im optischen Schnellverfahren die Temperatur-Vorgeschichte begutachten will. Der Kommentar basiert hier nur auf den Erfahrungswerten.



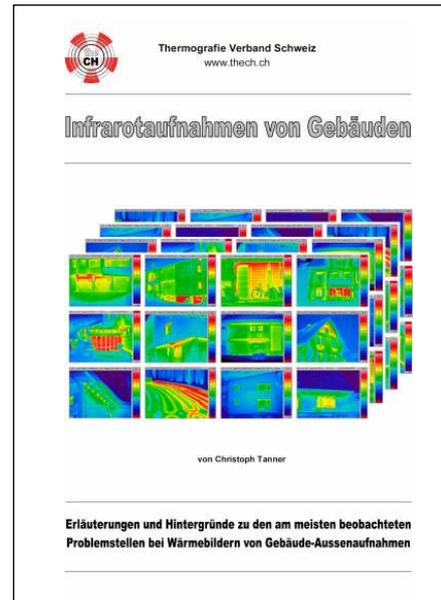
**Bild 5-20:** Empirische Bewertung der Temperaturen vor- und während den IR-Aufnahmen.

## 5.6 Dokumentation „Infrarotaufnahmen von Gebäuden“

Wie man am besten qualitativ hochwertige IR-Aufnahmen erstellt und welches Grundwissen notwendig ist, um diese richtig analysieren und beurteilen zu können, sind Themen die auch im Thermografie Verband Schweiz (www.theCH.ch) immer wieder diskutiert werden. Der Verband vertreibt neben dem Tool QualiThermo auch die Dokumentation „Infrarotaufnahmen von Gebäuden“.

Die Dokumentation ist eine Ergänzung zum Tool QualiThermo. Sie entstand auf Grund langjähriger Erfahrung des Autors im Bereich der Gebäudethermografie und der Forderung in der EN 13187, dass für die Beurteilung bei Thermografieaufnahmen von Gebäuden auch Referenzaufnahmen (bzw. Vergleichsbilder) herangezogen werden sollten. Die Dokumentation wurde mit der 3. Auflage (11/2009) nochmals erweitert und in eine neutrale Form gebracht. So steht sie nun ausschliesslich dem Thermografie Verband Schweiz zur Weiterverbreitung zur Verfügung.

Inhalt: In den 14 Kapiteln auf 63 Farbseiten werden repräsentativ alle wesentlichen, thermischen Schwachstellen aufgezeigt, die bei Wohnbauten mit Thermografie von aussen erkannt werden können. Diverse Grafiken zeigen dazu die Problemstellen, und es werden Ursachen und die Hintergründe erläutert. Der Anhang liefert allgemeine IR-Theorie und Wissenswertes zur Bauthermografie.



**Bild 5-21:** theCH-Dokumentation „Infrarotaufnahmen von Gebäuden“.

## 6 Messungen und Ergebnisse

Das thermische Verhalten des Testgebäudes wurde einerseits mit konventionellen Messfühlern (Thermoelemente und Wärmeflussensoren) ausgemessen und andererseits mit IR-Serie-Aufnahmen erfasst. Die Ergebnisse sowie der Vergleich der mit verschiedenen Methoden ermittelten Messdaten werden im Folgenden aufgezeigt.

### 6.1 Beschreibung Testgebäude

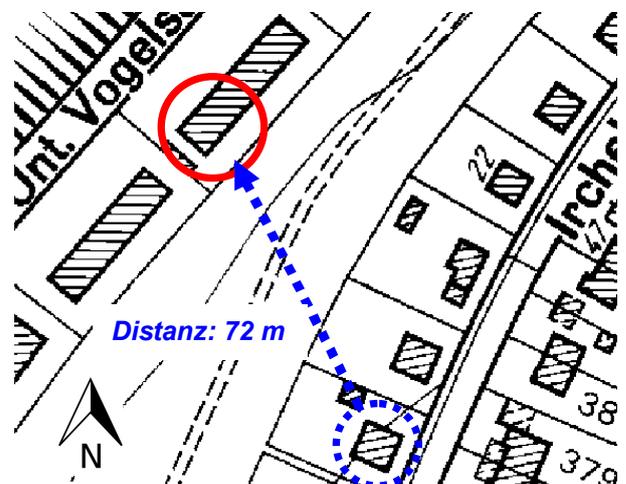
Für die Messungen wurde ein Mehrfamilienhaus (MFH) gewählt, das 1939 erbaut und 1982 wärmetechnisch teilsaniert wurde. Damals waren verputzte Aussenwärmedämmungen (AWD) noch etwas Neues. So wurde an diesem Gebäude nur teilweise AWD angebracht. Diese Situation ist für das BFE-Projekt geradezu ideal, denn es können hier unter gleichen Bedingungen 2 unterschiedliche Konstruktionen beobachtet werden.



**Bild 6-1:** MFH Testgebäude: Alle Messungen wurden bei der Wohnung im 1.OG durchgeführt. Links die Südwest- rechts die Südostfassade.



**Bild 6-2:** Vogelschau des Testgebäudes und Blickrichtung der IR-Kamera vom Aufnahmestandort aus.



**Bild 6-3:** Situationsplan mit Lage des Testgebäudes (rot) und Standort der IR-Kamera (blau).



**Bild 6-4:** Aussenfassade analog Bild 6-1, mit Lage der Messstellen.



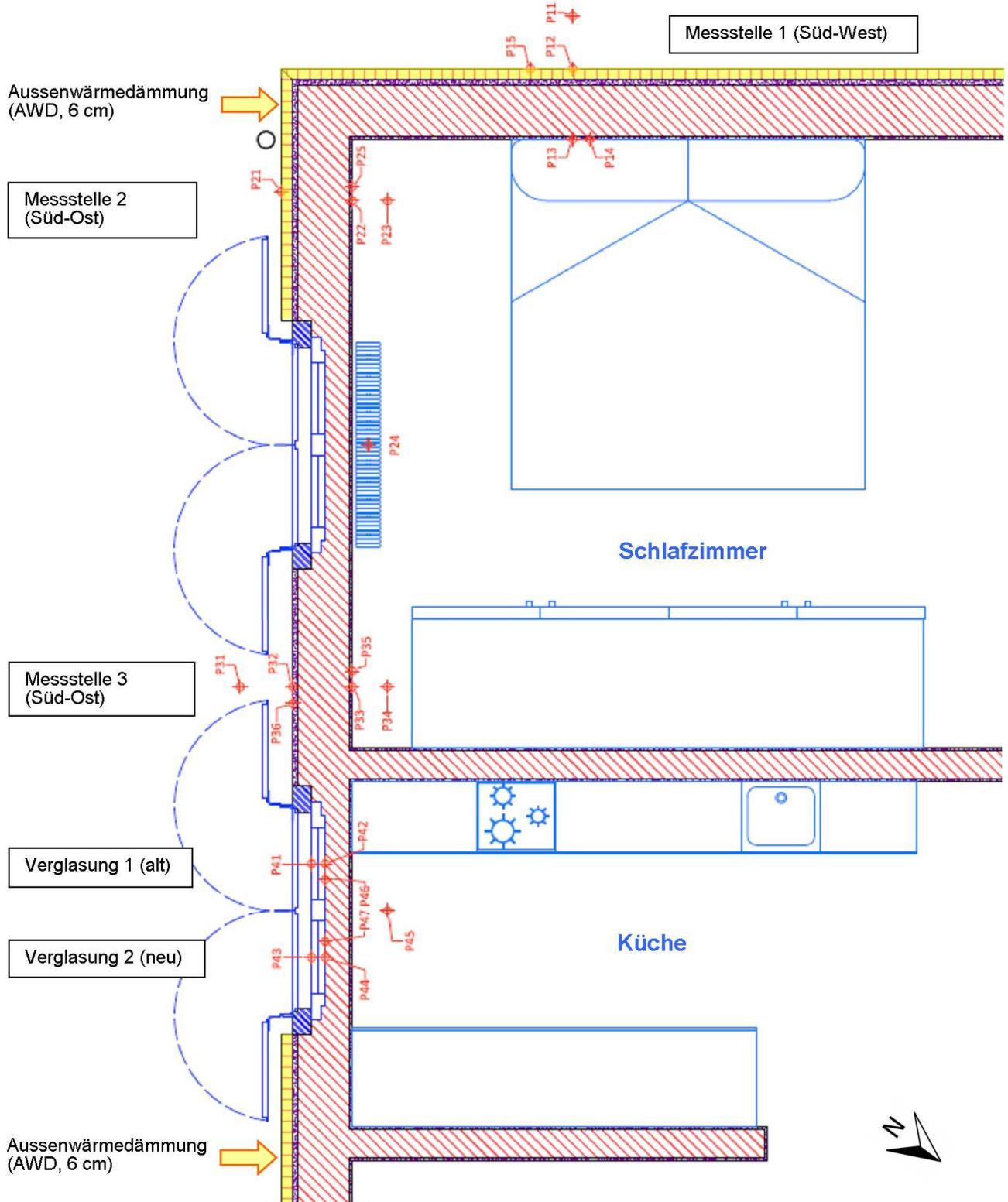
**Bild 6-5:** Innenansicht des Küchenfensters mit den Messstellen auf den Verglasungen.



**Bild 6-6:** Innenansicht Schlafzimmer mit den Messstellen.

## 6.2 Messanordnungen

Die Messfühler wurden am 16.12.2009 an der Süd-West- und an der Süd-Ostfassade gemäss Bild 6-7 angeordnet, die Bezeichnungen der Messpunkte und Messgrössen sind in Tabelle 6-1 erläutert. Die Messdaten wurden in 5-Minuten Intervallen mit einem Datenlogger *Squirrel Eltek 1000* aufgezeichnet. Die Installation der Messfühler an den Verglasungen erfolgte am 03.01.2010. Die verwendeten Messmittel sind in Anhang A4 beschrieben.



**Bild 6-7:** Lage und Kennzeichnung der installierten Messfühler an der Süd-West- und Süd-Ost-Fassade. Für den Zeitraum der Messungen wurden die Jalousieläden in der Küche entfernt (vgl. Foto 6-4).

Nr.	Ort	Messgrösse	Symbol	Messeinheit
P11	Aussenwand 1 (SW)	Aussenlufttemperatur	$\theta_{ae}$	°C
P12	Aussenwand 1 (SW)	Oberflächentemperatur aussen	$\theta_{se}$	°C
P13	Aussenwand 1 (SW)	Oberflächentemperatur innen	$\theta_{si}$	°C
P14	Aussenwand 1 (SW)	Wärmestromdichte innen	$q_i$	W/m <sup>2</sup>
P15	Aussenwand 1 (SW)	Solarstrahlungsintensität vertikal	$I_{s,V}$	W/m <sup>2</sup>
P21	Aussenwand 2 (SO)	Oberflächentemperatur aussen	$\theta_{se}$	°C
P22	Aussenwand 2 (SO)	Oberflächentemperatur innen	$\theta_{si}$	°C
P23	Aussenwand 2 (SO)	Raumlufttemperatur	$\theta_{ai}$	°C
P24	Aussenwand 2 (SO)	Oberflächentemperatur Radiator	$\theta_{s,Heizung}$	°C
P25	Aussenwand 2 (SO)	Wärmestromdichte innen	$q_i$	W/m <sup>2</sup>
P31	Aussenwand 3 (SO)	Aussenlufttemperatur	$\theta_{ae}$	°C
P32	Aussenwand 3 (SO)	Oberflächentemperatur aussen	$\theta_{se}$	°C
P33	Aussenwand 3 (SO)	Oberflächentemperatur innen	$\theta_{si}$	°C
P34	Aussenwand 3 (SO)	Raumlufttemperatur	$\theta_{ai}$	°C
P35	Aussenwand 3 (SO)	Wärmestromdichte innen	$q_i$	W/m <sup>2</sup>
P36	Aussenwand 3 (SO)	Solarstrahlungsintensität	$I_{s,V}$	W/m <sup>2</sup>
P41	Verglasung 1 (SO)	Oberflächentemperatur aussen	$\theta_{se}$	°C
P42	Verglasung 1 (SO)	Oberflächentemperatur innen	$\theta_{si}$	°C
P43	Verglasung 2 (SO)	Oberflächentemperatur aussen	$\theta_{se}$	°C
P44	Verglasung 2 (SO)	Oberflächentemperatur innen	$\theta_{si}$	°C
P45	Aussenwand (SO)	Raumlufttemperatur	$\theta_{ai}$	°C
P46	Verglasung 1 (SO)	Wärmestromdichte innen	$q_i$	W/m <sup>2</sup>
P47	Verglasung 2 (SO)	Wärmestromdichte innen	$q_i$	W/m <sup>2</sup>

**Tabelle 6-1:** Liste der am Testgebäude montierten Messfühler.

Mit der IR-Kamera TH3102 wurden die Messpunkte P12, P21, P32, P41 und P43 über verschiedene ausgewählte Zeiträume im 5-Minutenintervall als Bild digital (Pixel für Pixel) aufgezeichnet.

### 6.3 Meteodaten

Vor Ort wurde eine mobile Wetterstation vom Typ DAVIS Vantage Pro 2 Plus eingerichtet (Einsatzstandort siehe Bild 6-1), welche eine drahtlose Übermittlung der Messdaten erlaubt. Die Spezifikationen der Messanlage sind im Anhang A 4.1 zusammengestellt. Von der Vielzahl der erfassten Messgrößen wurden für die Auswertung nur die in Tabelle 6-2 angegebenen Daten verwendet.

Für die Beurteilung der IR-Strahlung des Himmels und des Bodens wurden Messdaten der nächstgelegenen Messstation Aadorf / Tänikon (geogr. Breite 47.29 / geogr. Länge 08.54) von Meteo Schweiz verwendet. Die Werte sind als 10-Minuten und als Stundenmittel verfügbar. Der Standort von Aadorf / Tänikon liegt knapp 14 km östlich vom Messobjekt auf 536 m.ü.M., d.h. ca. 80 m höher als die DAVIS-Meteostation. Mit Hilfe der gemessenen Lufttemperatur und der Himmelstemperatur kann näherungsweise eine Strahlungstemperatur  $T_{re}$  der Umgebung abgeschätzt werden. Nähere Details zu den verwendeten Berechnungsformeln und zur Wirkung der langwelligen Umgebungsstrahlung auf die Ergebnisse von Thermografieaufnahmen sind im Anhang A2 zusammengestellt und erläutert.

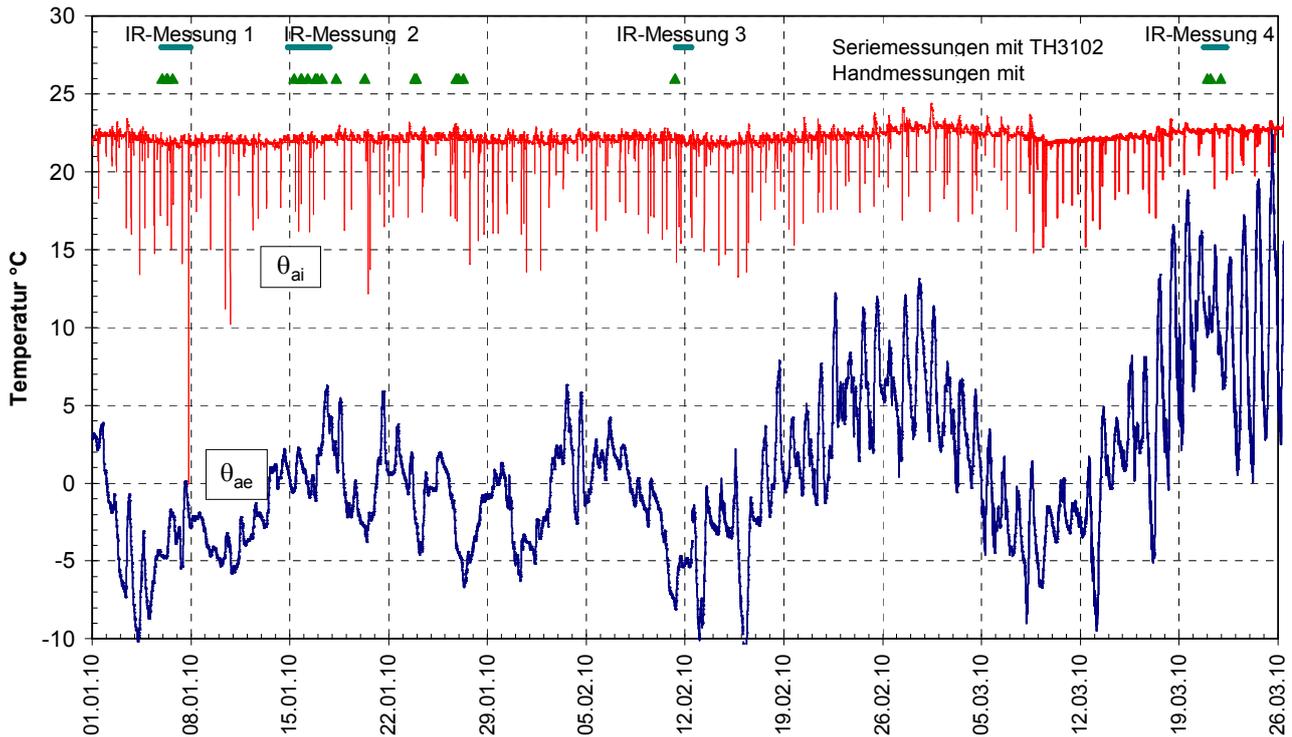
Nr.	Ort	Messgrösse	Symbol	Messeinheit
W1	Wetterstation DAVIS	Aussenlufttemperatur	$\theta_{ae}$	°C
W2	Wetterstation DAVIS	Rel. Feuchte der Aussenluft	$\varphi_e$	%
W3	Wetterstation DAVIS	Windgeschwindigkeit	$v_w$	m/s
W4	Wetterstation DAVIS	Windrichtung	$\gamma$	°C
W5	Wetterstation DAVIS	Solarstrahlung horizontal	$I_{s,H}$	W/m <sup>2</sup>
W6	Tänikon MeteoSchweiz	IR-Strahlung horizontal	$I_{r,H}$	W/m <sup>2</sup>
W7	Tänikon MeteoSchweiz	Lufttemperatur 5 cm über Boden	$\theta_{ag}$	°C
W8	Tänikon MeteoSchweiz	Lufttemperatur 2m über Boden	$\theta_{ae}$	°C

**Tabelle 6-2:** Liste der gemessenen und verwendeten Wetterdaten.

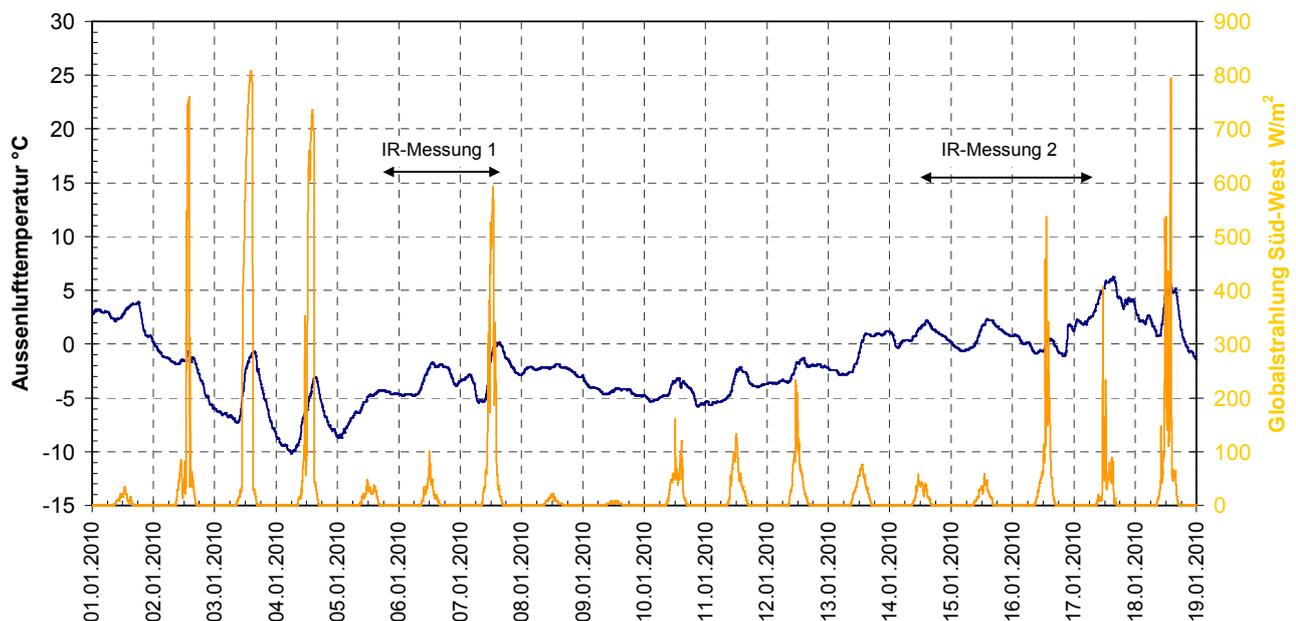
## 6.4 Messergebnisse

### 6.4.1 Klimabedingungen

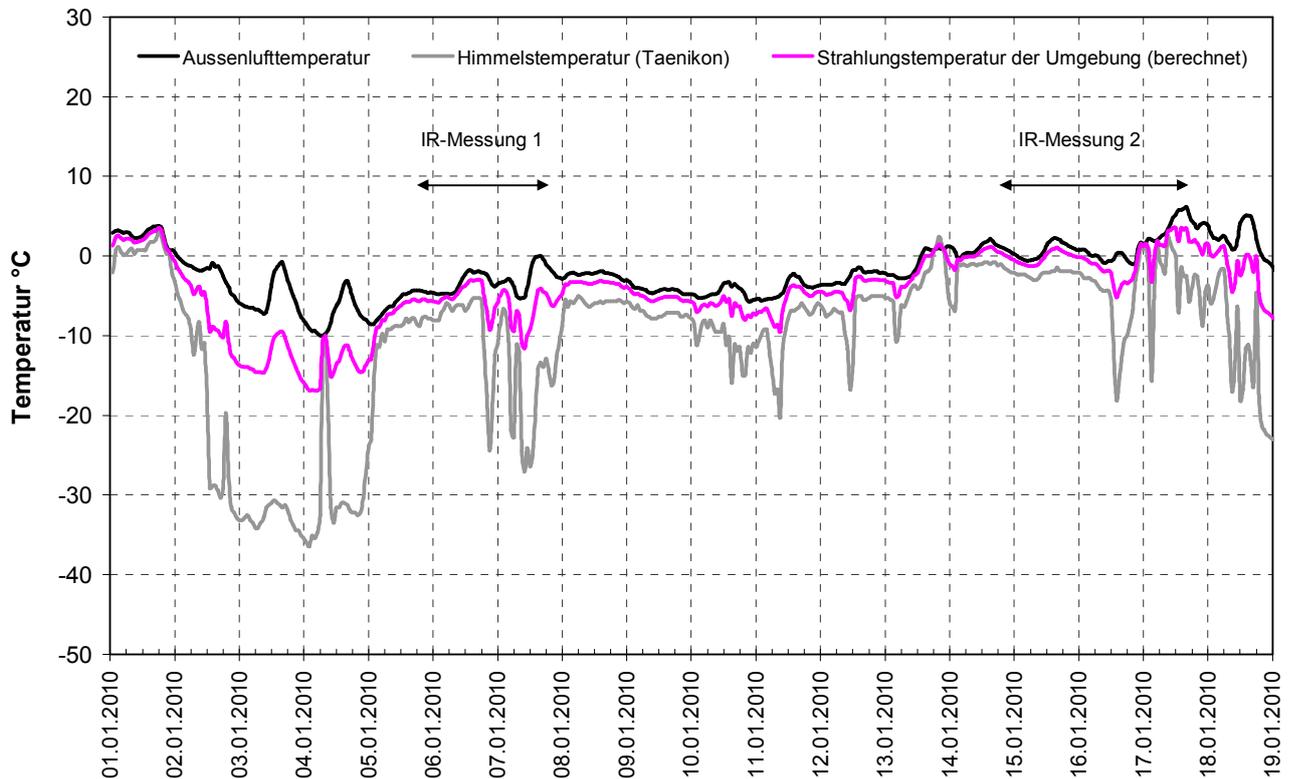
Bild 6-8 gibt einen Überblick über die Aussenlufttemperaturen und die Raumlufthtemperaturen der Messperiode Januar bis Ende März 2010. Bei den Raumlufthtemperaturen sind deutlich die durch Stosslüftungen bedingten Temperatureinbrüche erkennbar, was sich auch auf die Wärmestrommessungen auswirkt. Die verschiedenen Messkampagnen mit den beiden Thermografiekameras TH3102 und TH7700 sind grün markiert. Für die nachfolgende detaillierte Auswertung der Daten wurden die Periode vom 1. - 19. Januar 2010 mit der IR-Messung 1 und der IR-Messung 2 ausgewählt. In Bild 6-9 sind die Aussenlufttemperatur und die Globalstrahlung an der Süd-West Fassade dargestellt. In Bild 6-10 ist die Strahlungstemperatur der Umgebung, berechnet aus der Himmels-temperatur und der Aussenlufttemperatur dargestellt, woraus ersichtlich wird, wann ein wolkenloser Himmel vorhanden war, welcher zu einer Strahlungssenke geführt hat.



**Bild 6-8:** Raumlufth- und Aussenlufttemperaturverläufe während der ganzen Messperiode 1.10. - 26.03.2010.

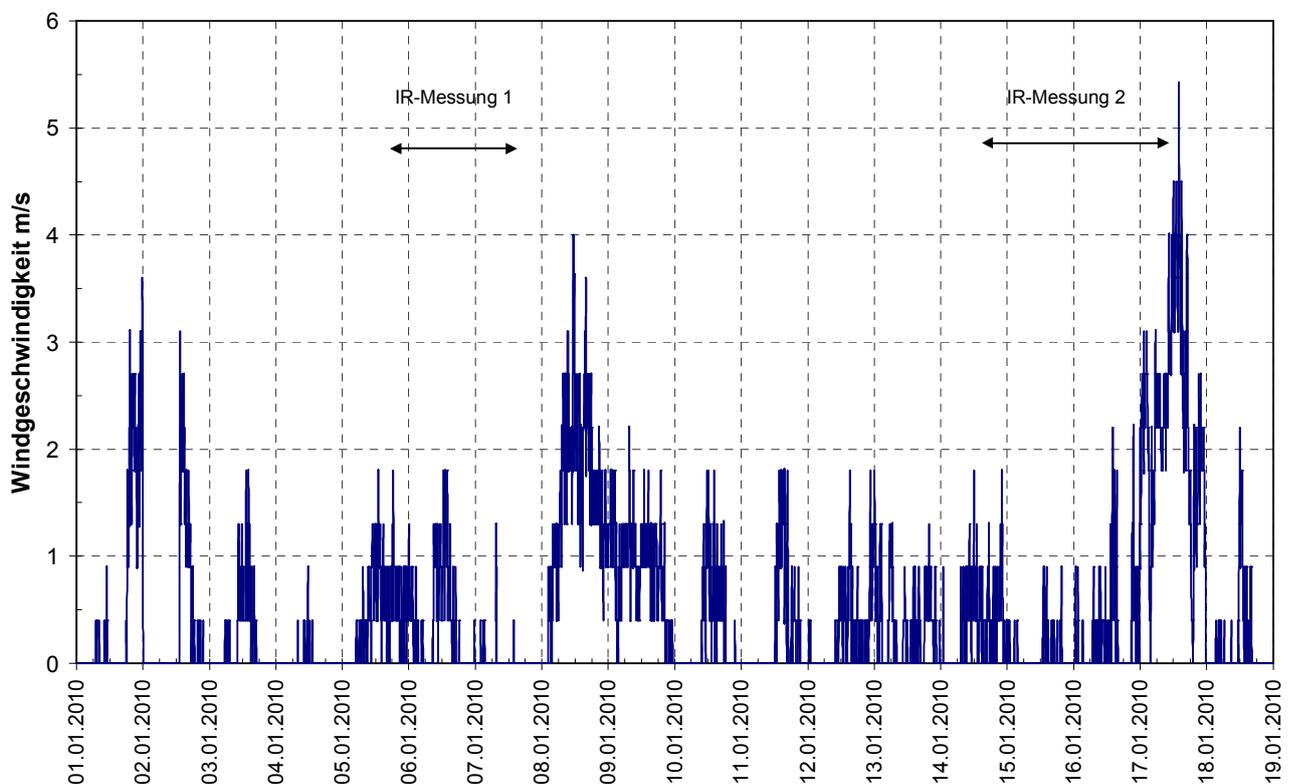


**Bild 6-9:** Verlauf der Aussenlufttemperatur und Globalstrahlung in der ausgewählten Januar-Messperiode.



**Bild 6-10:** Verlauf der Aussenluft-, Himmels- und Strahlungstemperatur der Umgebung in der ausgewählten Januar-Messperiode (Berechnung gemäss Formel (A-5a) mit  $F_{sky} = 0.32$ ,  $F_g = 0.68$ ).

Der Verlauf der Windgeschwindigkeit vor Ort geht aus Bild 6-11 hervor. Geschwindigkeiten unter 2 m/s können als gering eingestuft werden.

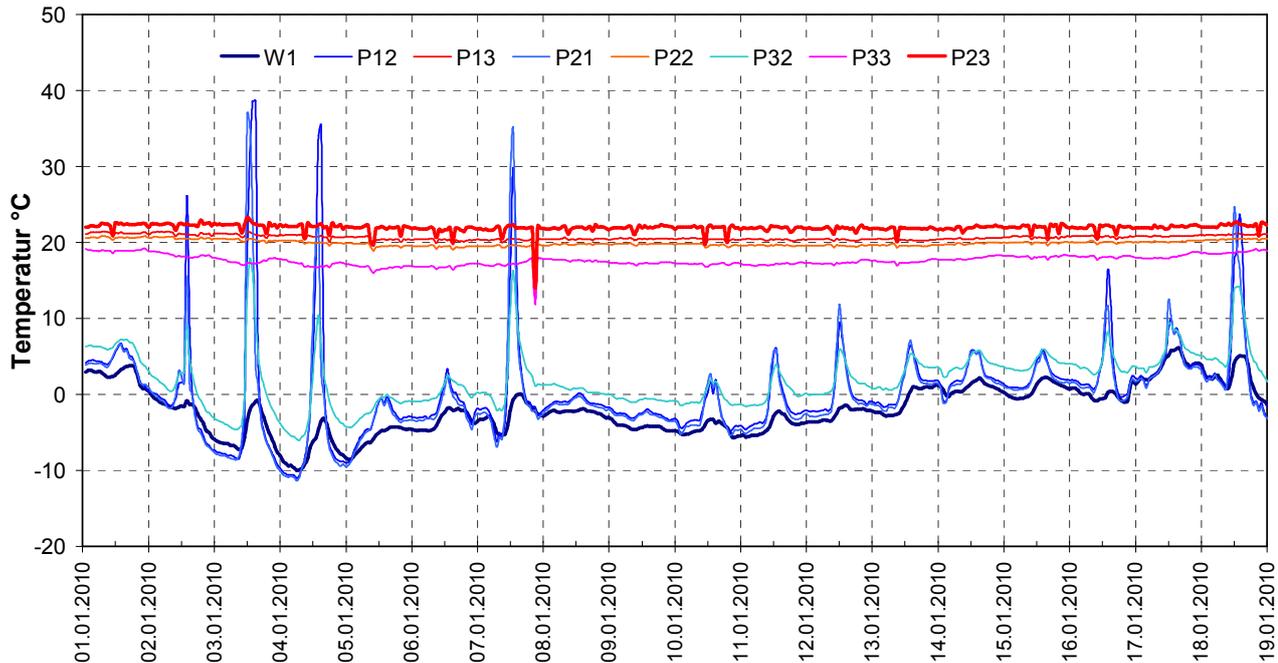


**Bild 6-11:** Verlauf der Windgeschwindigkeit in der ausgewählten Januar-Messperiode.

## 6.4.2 Temperaturmessungen mit Thermoelementen

### Wände

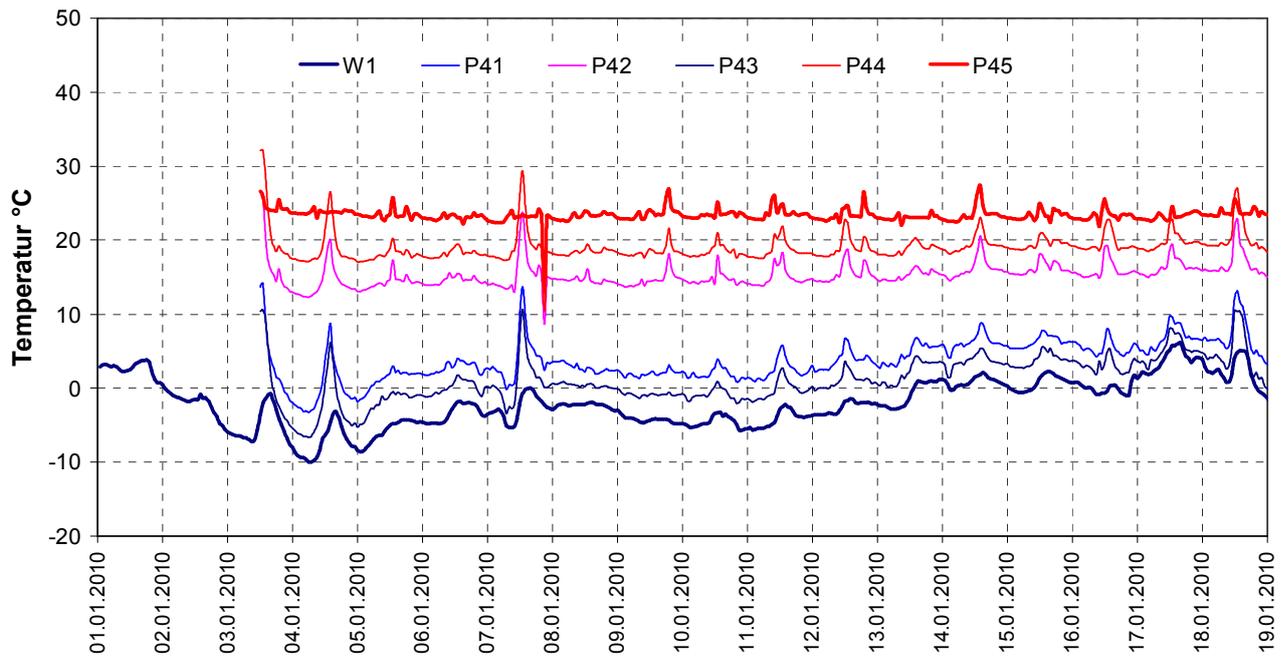
Bild 6-12 zeigt den Verlauf der gemessenen Oberflächentemperaturen an der Innen- und Aussen-seite der drei Aussenwand-Messstellen sowie die Aussen- (W1) und die Innenlufttemperatur (P23). Die Oberflächentemperaturen der Wandabschnitte mit AWD weisen praktisch dieselben Werte auf, während die ungedämmte Wandpartie (Messstelle 3) deutlich höhere Aussen- bzw. tiefere Innenoberflächentemperaturen aufweist. Die Wände mit AWD zeigen zudem, dass sie nachts teilweise unter die Aussenlufttemperatur fallen sowie unter Sonneneinstrahlung sich rasch und stark erwärmen. Beim Verbandmauerwerk ohne AWD hingegen liegen die Aussenoberflächentemperaturen immer über der Aussenlufttemperatur.



**Bild 6-12:** Verlauf der Temperaturen an den Wänden 1-3 in der ausgewählten Januar-Messperiode.

### Verglasungen

In Bild 6-13 sind die Oberflächentemperaturen der beiden Verglasungen sowie die Aussen- (W1) und Innenlufttemperatur (P45) dargestellt. Das 2-IV Wärmeschutzglas unterscheidet sich deutlich von der normalen 2-fach Verglasung, die Oberflächentemperaturen beim Wärmeschutzglas liegen aussen ca. 2°C tiefer und innen ca. 4°C höher als beim Normalglas. Die Auswirkung der Sonneneinstrahlung auf die Glasoberflächentemperaturen fallen geringer aus im Vergleich zu den Wänden, dies ist den tieferen Absorptionswerten der Glasscheiben zuzuschreiben, welche im Bereich von nur 5 -14% liegen (Details hierzu sind in den Datenblättern der Verglasungen im Anhang A 1.2 zusammengestellt).



**Bild 6-13:** Verlauf der Temperaturen an den Verglasungen 1 + 2 in der ausgewählten Januar-Messperiode.

### 6.4.3 Wärmestrommessungen

Mit kleinen Wärmeflussplatten (Details hierzu siehe Anhang A4) wurden an den Innenoberflächen der Wände und der Verglasungen die Wärmestromdichten  $q$  gemessen. Zusammen mit den gemessenen Oberflächentemperaturen kann daraus der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{\text{tot}}$  des Bauteils gemäss Formel (A-1b) rechnerisch bestimmt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass im so ermittelten Wärmedurchlasswiderstand  $R_{\text{tot}}$  auch der thermische Widerstand des Wärmeflussfühlers  $R_{\text{HFM}}$  enthalten ist. Dieser wird durch die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit des Sensors und die Güte des Kontaktes mit der zu messenden Oberfläche bestimmt. Wird bei der Auswertung die Mittelwertmethode verwendet, so muss die Messdauer entsprechend der Wärmespeicherkapazität des Bauteiles festgelegt werden. Für die Wandmessungen wurde eine Messdauer von 30 Tagen gewählt, für die Verglasungen genügt eine Ausmittlung über eine Nachtperiode von 6 Stunden.

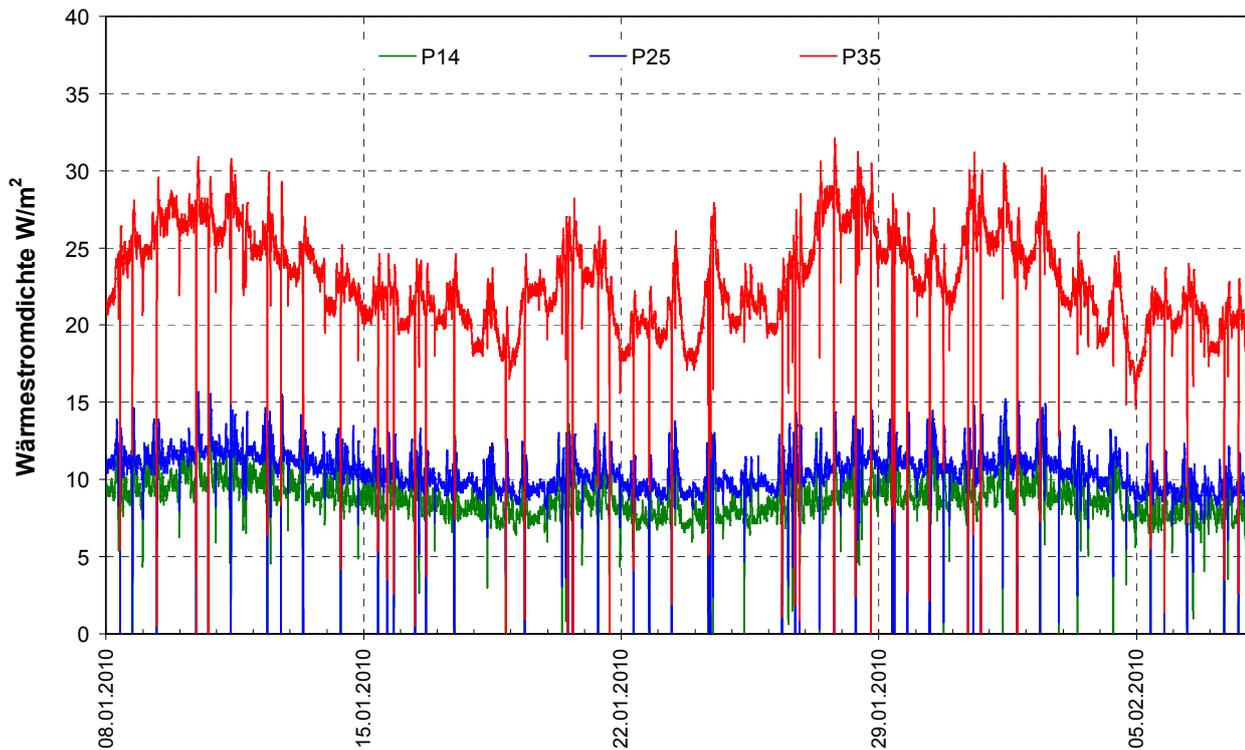
Bedingt durch die Fenster-Stosslüftungen der Bewohner von 5-15 Minuten Dauer im Schlafzimmer und in der Küche, weisen die Signale der Wärmeflussensoren kurzfristig negative Werte auf, d.h. die Wärmestromrichtung ändert sich. Dies führt nur zu einer geringfügigen Verschlechterung der Messbedingungen bei den Wänden und wird durch die lange Messdauer kompensiert, bei den Verglasungen werden diese Daten nicht in die Auswertung einbezogen.

#### Wände

Die Wärmestromverhältnisse an den Wänden (Messstelle 1 - 3) sind in Bild 6-14 dargestellt. Die Auswertung der Daten über die Periode vom 8.1. - 8.2.2010 ergaben folgende Werte:

- Wand Messstelle 1 mit AWD (Süd-West):  $R_{\text{tot}} = 2.23 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- Wand Messstelle 2 mit AWD (Süd-Ost):  $R_{\text{tot}} = 1.82 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- Wand Messstelle 3 ohne AWD (Süd-Ost):  $R_{\text{tot}} = 0.66 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Von diesen Werten müsste der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{\text{HFM}}$  des Sensors abgezogen werden.

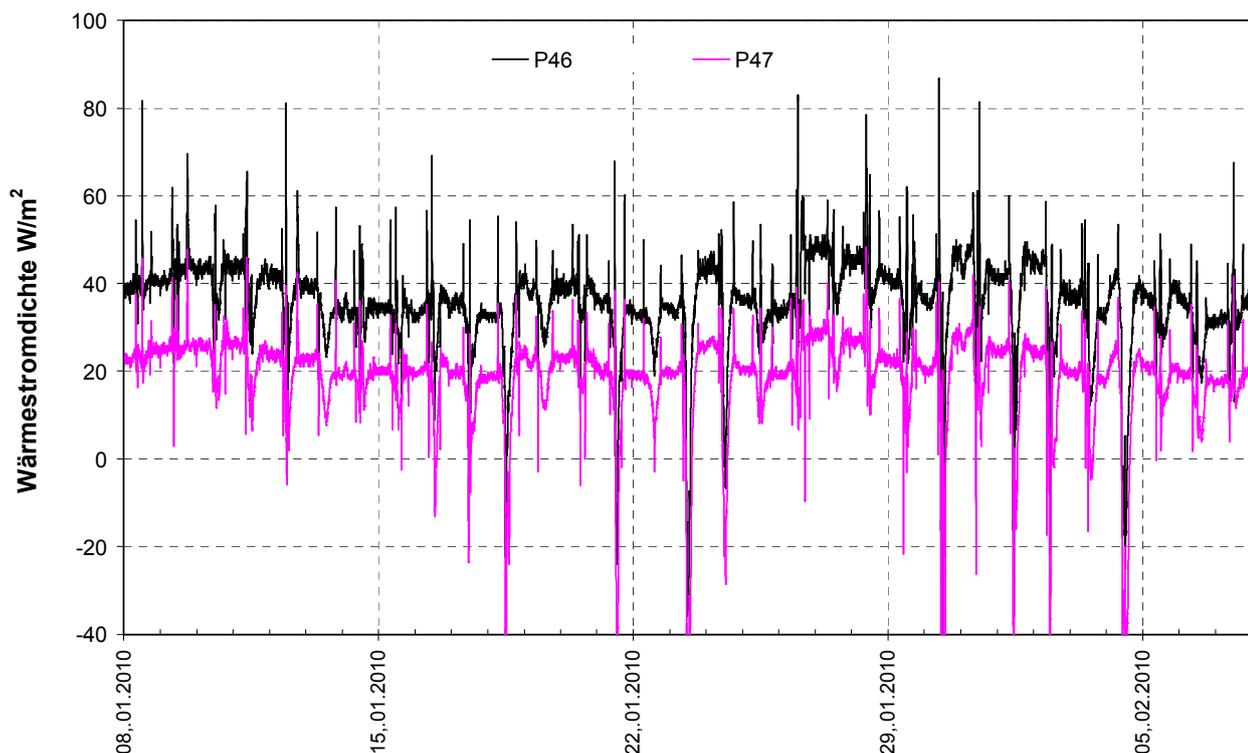


**Bild 6-14:** Verlauf der Wärmestromdichte an den Wänden der Messstellen 1 - 3 über einen Monat (8.1.- 8.2.2010).

## Verglasungen

Die Wärmestromdichten an den beiden Verglasungen sind in Bild 6-15 dargestellt. Die Auswertung der Nachtstunden von 22 h bis 05 h ergibt folgendes Bild:

- Verglasung 1 (Normalglas alt):  $R_{\text{tot}} = 0.30 \text{ m}^2 \cdot \text{KW}$
- Verglasung 2 (Wärmeschutzglas neu):  $R_{\text{tot}} = 0.76 \text{ m}^2 \cdot \text{KW}$



**Bild 6-15:** Verlauf der Wärmestromdichte an den Verglasungen 1 und 2 über einen Monat (8.1.- 8.2.2010).

## 6.4.4 IR-Messungen

### IR-Bilderserie

Alle IR-Serieaufnahmen wurden mit dem gekühlten Scanner TH3102 ab Stativ erstellt. Distanz zum Testgebäude: 72 m (vgl. Bild 6-3). Angaben zur IR-Kamera siehe Anhang A4. Wegen der eher grossen Distanz wurden die Bilder mit einer optischen Zoomeinstellung aufgenommen, was bezüglich Tiefenschärfe etwas nachteilig ist.

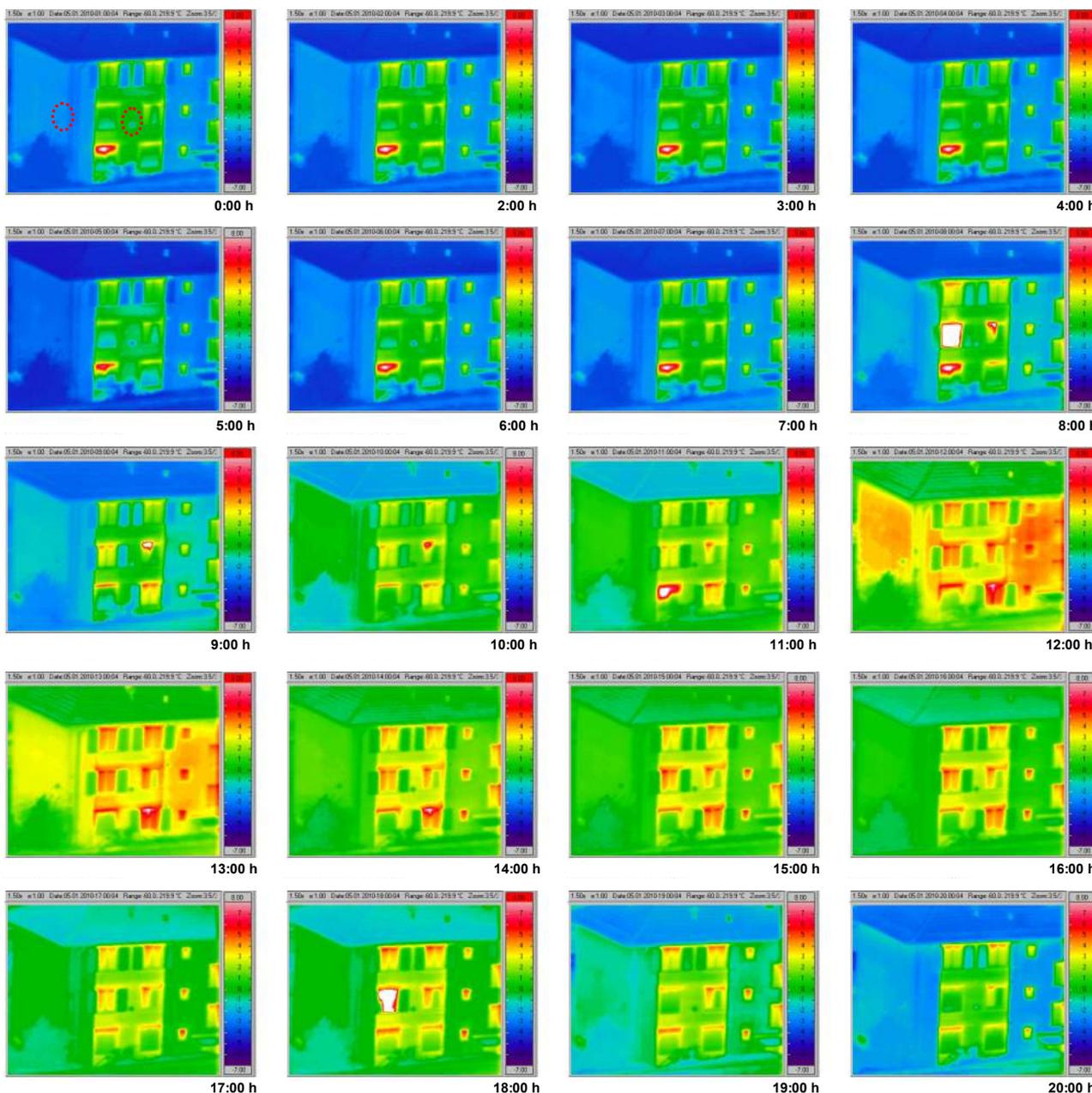
Ein Auszug einer IR-Serie zeigt Bild 6-17. Der Tag (inkl. Vortag) war ein kalter Hochnebeltag ohne Sonneneinstrahlung. Dargestellt sind die stündlichen Aufnahmen von 00:00 Uhr bis 20:00 Uhr. Die effektiven Bildintervalle sind im 5-Min. Takt aufgenommen (verfügbar in den Akten).

Aus den IR-Bildern kann jeder beliebige Punkt ausgewählt und als Datenreihe über den Verlauf der Zeit mit den Messdaten der Thermoelemente verglichen werden (siehe Bild 6-18).



**Bild 6-16:** Foto des Testgebäudes (Grossbild siehe Bild 6-1).

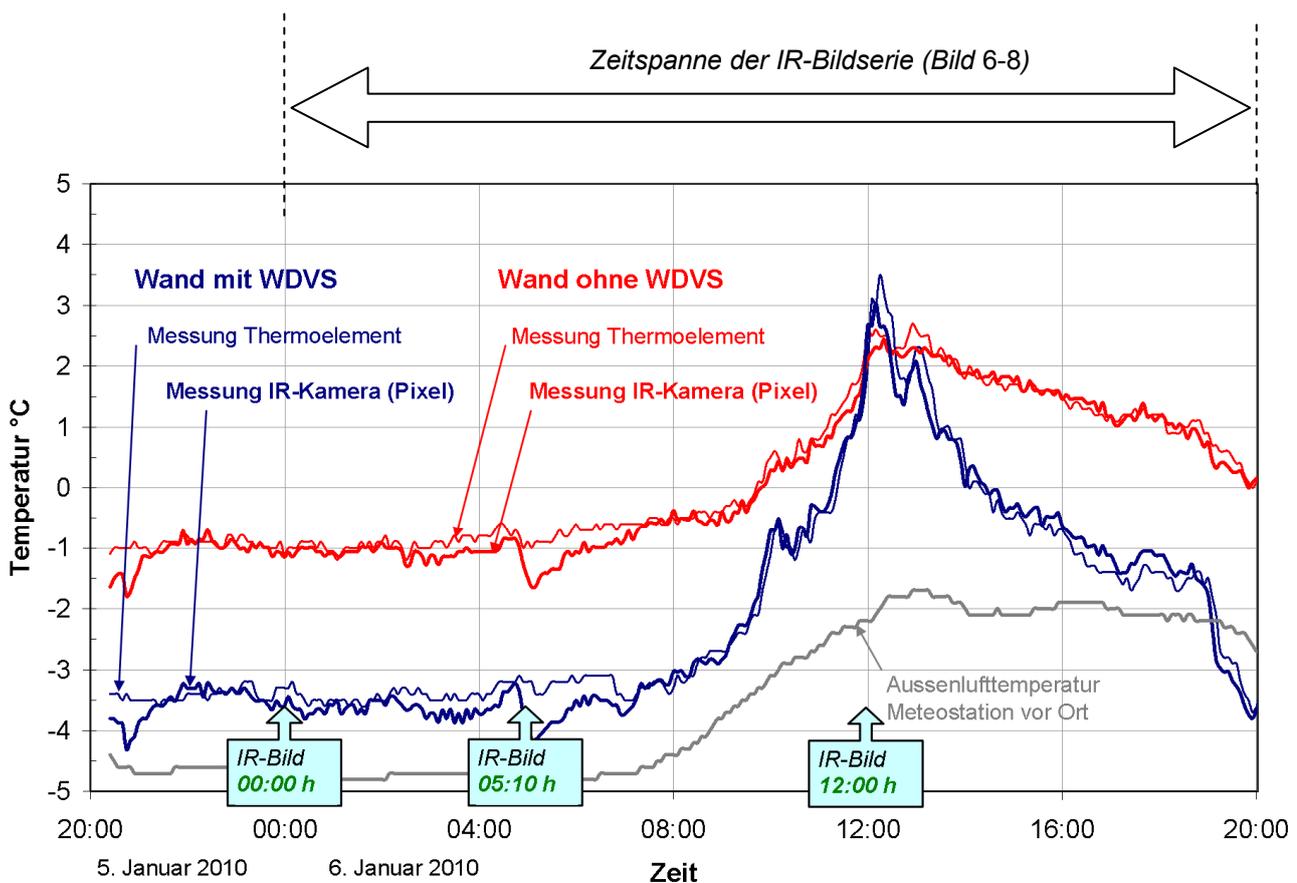
**Bild 6-17:** Beispiel einer IR-Bildserie vom 6.1.2010.  
○ Messpunkte: Links mit, rechts ohne AWD.



## Vergleich IR-Messungen (TH3102) - Thermoelemente

Alle Serie-Aufnahmen am Testgebäude wurden mit der gekühlten Scanner-Kamera TH3102 aufgenommen (vgl. Anhang A4). Die Genauigkeit des Scanners, vor allem in Bezug auf langzeitige Intervall-Aufnahmen ohne zwischenzeitliche Abgleichmöglichkeit, ist sehr viel besser als bei einem Microbolometer. Tests dazu siehe folgendes Kapitel „Drift der IR-Kameras“. Im Labor zeigte sich, dass der Scanner TH3102 um ca. 1°C zu warm misst.

Um die wahren Oberflächentemperaturen am Testgebäude zu erhalten, wurden die Rohdaten der IR-Messungen um den im Laborversuch nachgewiesenen Offset von 1°C korrigiert sowie bezüglich des Einflusses der an der Oberfläche reflektierten Strahlung der Umgebung bei einem Emissionsgrad der Wand von 0.95 rechnerisch angepasst. Als Strahlungstemperatur der Umgebung wurde als erste Näherung die gemessene Aussenlufttemperatur verwendet.

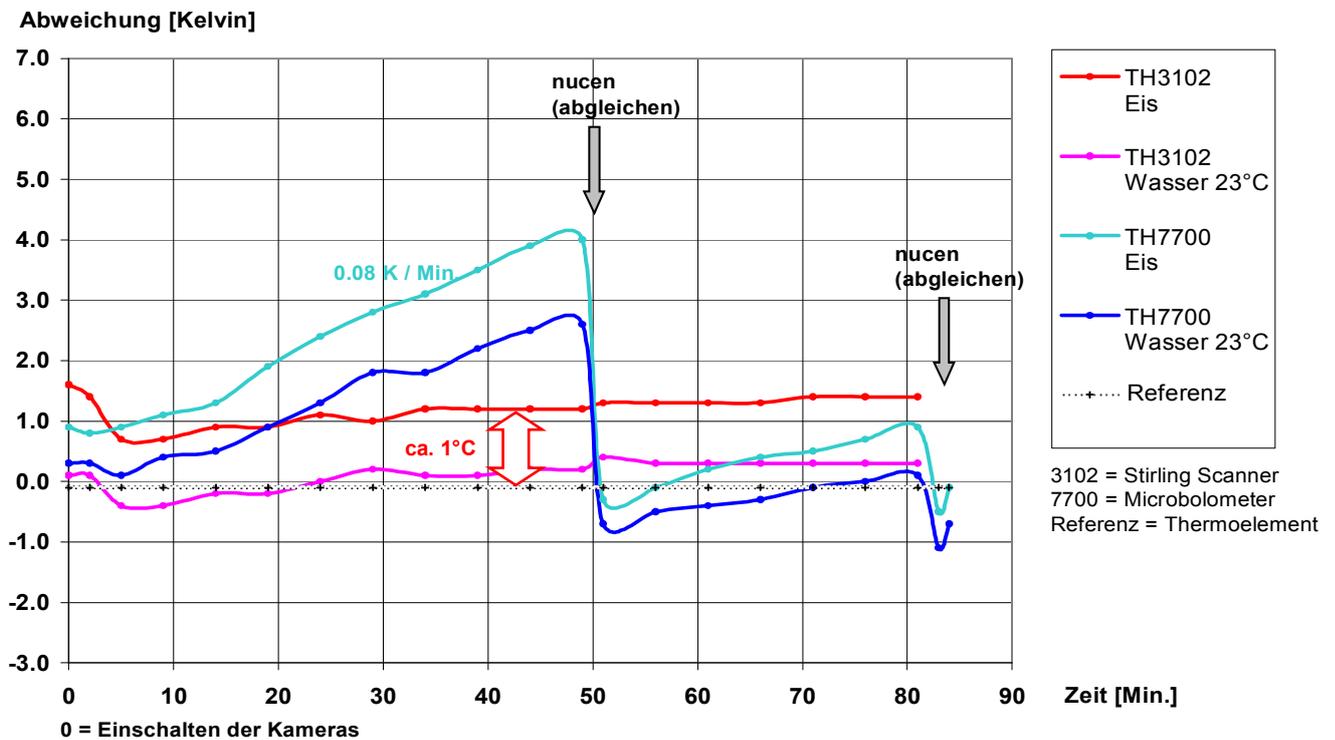


**Bild 6-18:** Vergleich der IR-Daten mit den Messungen der Thermoelemente an den Aussenwänden bei den Messstellen 2 (Messpunkt P21) und Messstelle 3 (Messpunkt P32).

### 6.4.5 Drift der IR-Kameras

Je nach IR-Kameratyp entsteht im Laufe der Zeit (während den Aufnahmen) ein Driften, das Temperaturabweichungen zur Folge hat. Bei den Microbolometern stellen sich 2 wesentliche Abweichungen ein: 1. Wegdriften des gesamten Temperaturfeldes von einer Referenz, 2. Instabilität innerhalb der Einzelbilder. Beides kann zwar jeweils durch eine Kalibrierung (bzw. nucen) ausgeglichen werden, was jedoch nicht automatisch vor jeder Aufnahme ausgeführt wird. Die (älteren) Scanner-Kameras sind diesbezüglich wesentlich besser und haben durch den gekühlten Detektor eine viel höhere Stabilität.

Das Drift-Verhalten der im Projekt verwendeten IR-Kameras wurde unter Laborbedingungen untersucht (vgl. Bilder 6-20 bis 6-23).



**Bild 6-19:** Driften der verwendeten IR-Kameras im Lauf der Zeit. Dargestellt ist die Abweichung gegenüber einer Referenztemperatur, welche einmal im Eis, einmal im Wasser mit Raumtemperatur gemessen wurde.

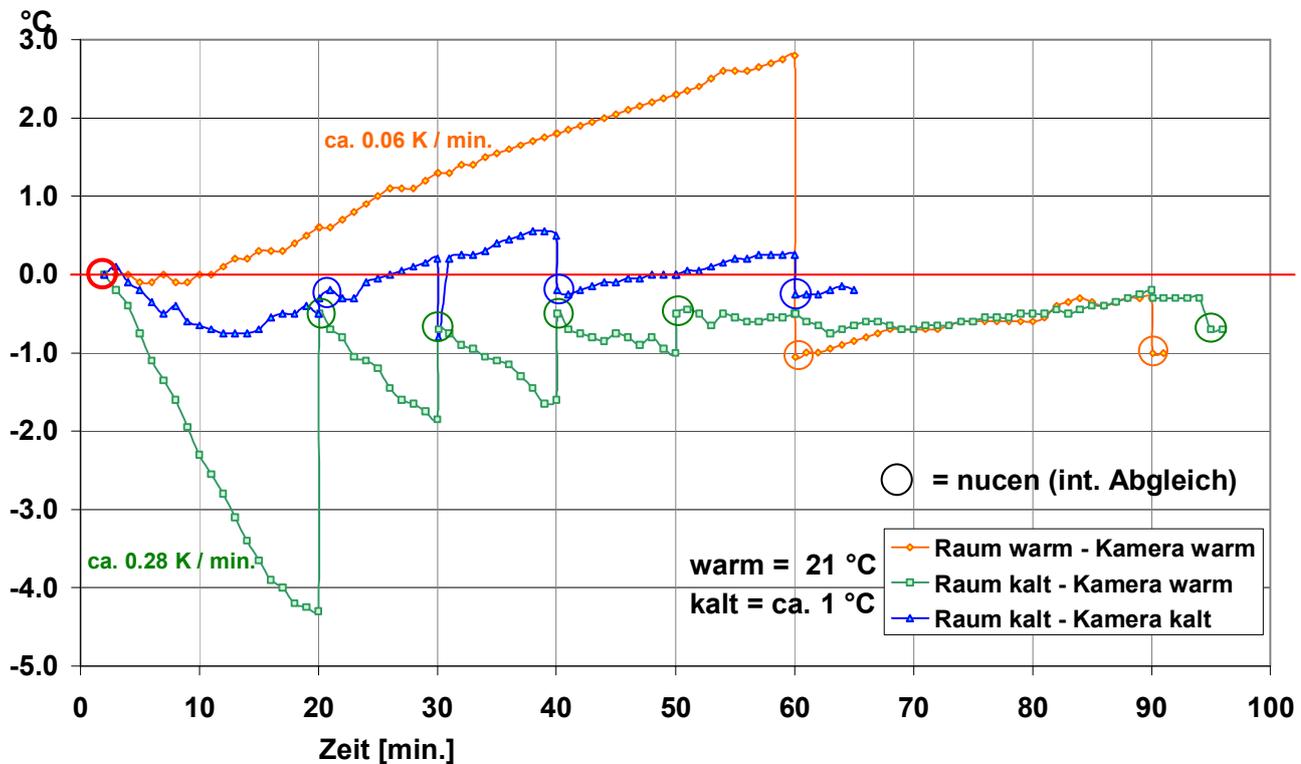


**Bild 6-20:** IR Bild (Mikobolometer). Hier ist die Instabilität innerhalb des Bildes gut erkennbar (nach 50 Min. ohne Abgleichen). Die Wandtemperaturen waren zu Messbeginn gleich!  $\leftrightarrow$

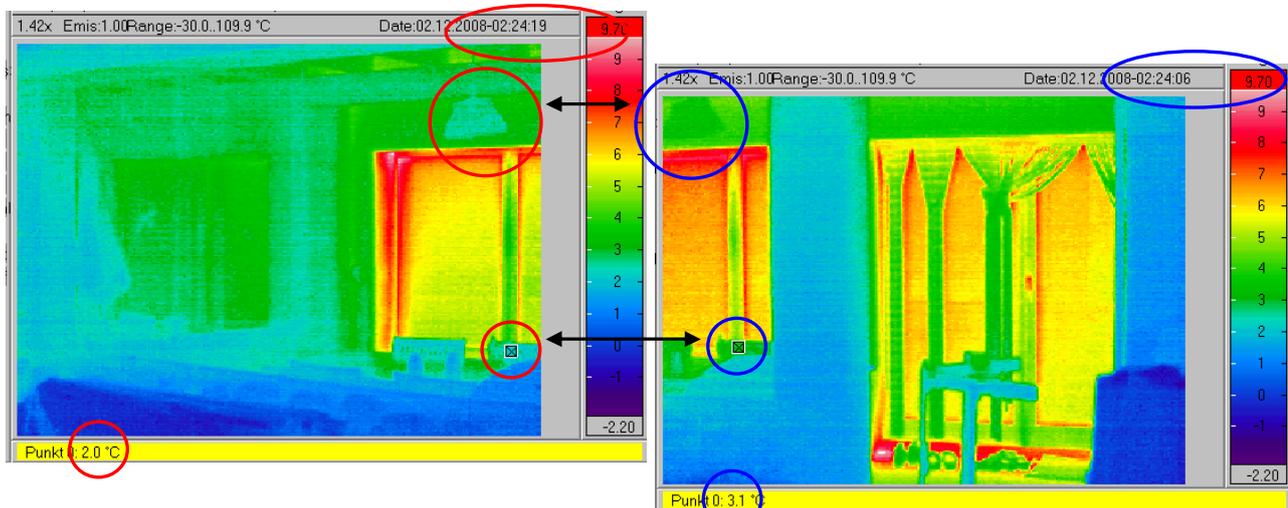


**Bild 6-21:** Foto des Driftversuches: Links unten der Scanner TH 3102, rechts die IR-Kamera TH7700 mit dem Mikrobolometer (Details siehe Anhang A4) Oben rechts: Kontrolle mit Thermoelement-Logger.

Der Labortest zeigt deutlich die höhere Stabilität des IR-Scanners. Gegenüber Eiswasser beträgt die Abweichung ca. 1°C (Bild 6-20). Für die Bauthermografie werden heute jedoch meist die viel kleineren und handlicheren Microbolometer verwendet. Wie aber steht es um deren Driftverhalten, wenn die Kamera – so wie in der Praxis – den Temperaturdifferenzen innen-aussen ausgesetzt wird (Kamera im warmen Auto - Aussenaufnahmen - warmes Auto, etc.)? Der folgende Test zeigt, wie stark unter diesen Bedingungen die verwendete TH7700 driftet.



**Bild 6-22:** Drift-Versuch mit dem Mikrobolometer TH7700 im Winter, mit verschiedenen Temperaturwechseln für die Kamera zwischen warm und kalt.



**Bild 6-23:** Auswirkung des Drifts in der Praxis: Wird nicht vor jeder IR-Aufnahme ein Abgleich gemacht, so können bei Bildzusammensetzungen erhebliche Differenzen entstehen. In den Bildern oben über 1 K!

### Schlussfolgerungen aus den Versuchen für die Praxis:

- Gekühlte Scanner sind wesentlich stabiler, was für die Bauthermografie von Vorteil wäre. Allerdings sind solche Geräte nicht sehr handlich.
- Werden Microbolometer verwendet, ist regelmässiges nucen (shuttern) vor jeder Aufnahme und gelegentliches Kalibrieren eine absolute Notwendigkeit.

## 7 Thermische Simulationen

### 7.1 Dynamische Simulation des Testgebäudes

Mit der dynamischen Simulation des Testgebäudes werden die nachstehenden Ziele verfolgt:

- Erarbeitung eines Simulationsmodells des Testgebäudes und Implementation der gemessenen Klimarandbedingungen.
- Validierung des Berechnungsmodells durch Vergleich von gemessenen und berechneten Daten, und damit Nachweis, dass eine realitätsgetreue Nachbildung der thermischen Vorgänge erfolgt, insbesondere an der Aussenwandoberfläche.
- Ermittlung von praxisnahen Funktionen für den konvektiven Wärmeübergang an Aussenoberflächen.

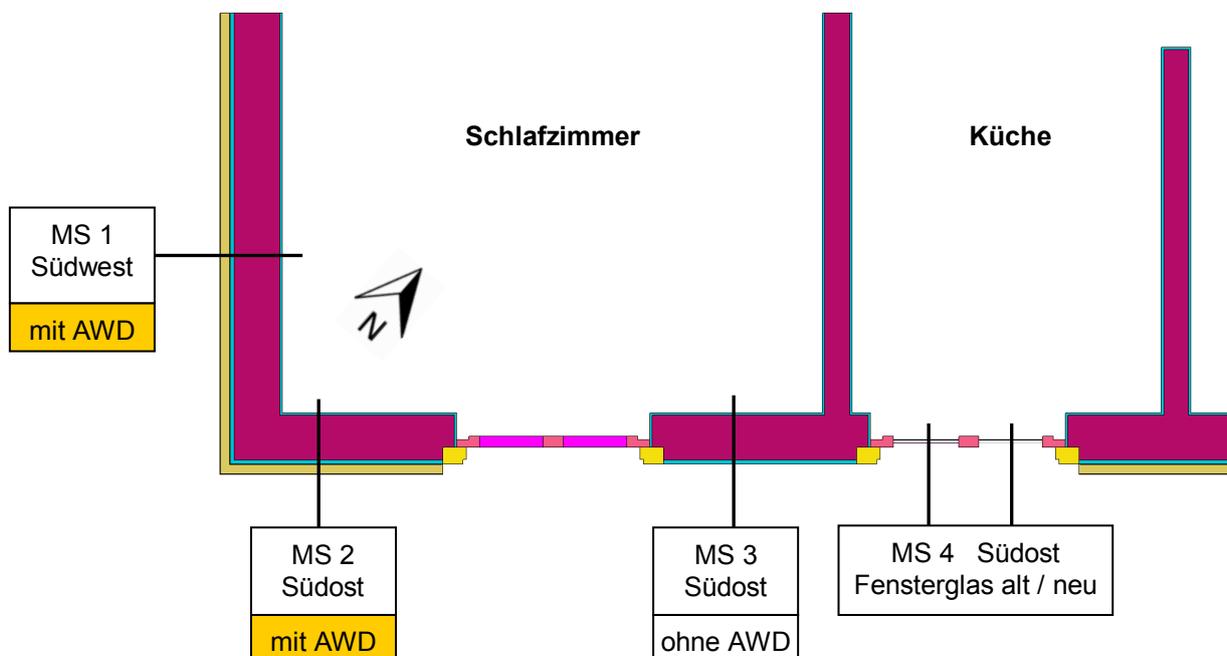
Die Modellierung und Simulation erfolgte mit dem Programm VOLTRA [5]. Dieses erlaubt die dynamische Simulation von 3D-Objekten mit instationären Randbedingungen. Die detaillierte Berechnung des Strahlungsaustausches sowie des konvektiven Wärmeübergangs erfolgt mit dem Programm-Modul RADCON.

Das entwickelte Modell wird in angepasster Form auch für die Sensitivitätsanalysen im Kapitel 7.2 eingesetzt.

#### 7.1.1 Simulationsmodell

Bild 7-1 enthält das Modell des Wohnungsgrundrisses des Testgebäudes. Darin sind die Messstellen eingezeichnet, für welche die Vergleiche zwischen den gemessenen und den berechneten Daten angestellt werden. Weitere Informationen zum Testgebäude siehe Kapitel 6.1.

Die Wandaufbauten sowie die Verglasungen der Fenster entsprechen exakt den in den Anhängen A 1.1 und A 1.2 beschriebenen Materialisierungen (Wandkonstruktionen 1 und 2; Verglasungen alt/neu). Die Wände der Messstellen 1 und 2 sind identisch mit 6 cm EPS isoliert, die Wand 3 entspricht dem unveränderten Altbau-Verbandmauerwerk von 1939. Die Messstelle 4 enthält auf der linken Seite (Blick von aussen) die alte Verglasung mit einem U-Wert von  $2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , im Fenster rechts wurde die neue Verglasung mit einem U-Wert von  $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingebaut. Für die genaue Modellierung der Fenster wurden sowohl die Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften der Gläser, als auch die Gasfüllungen modelliert.



**Bild 7-1:** Simulationsmodell des Wohnungsgrundrisses mit eingezeichneten Messstellen MS 1 - MS 4. MS 1 + 2 mit Aussenwärmedämmung (AWD).

Der konvektive Wärmeübergang sowie der Strahlungsaustausch haben einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Oberflächentemperaturen an der Aussenwand. Entsprechend wichtig ist deren realitätsnahe Modellierung in der Simulation. Die Strahlungswärme-Übergangskoeffizienten aussen ( $h_{re}$ ) werden aus den aktuellen Oberflächentemperaturen pro Wand und der mittleren IR-Umgebungstemperatur dynamisch berechnet. Für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ( $h_{ce}$ ) wurden aus den Messdaten (MS 4) windabhängige Korrelationen abgeleitet. Die resultierenden Ansätze lauten für

- opake Wände und „Fenster neu“:  $h_{ce} = 3 + 2 \cdot v_{Wind} \quad [W/(m^2 K)] \quad (7-1)$

- „Fenster alt“:  $h_{ce} = 5 + 2 \cdot v_{Wind} \quad [W/(m^2 K)] \quad (7-2)$

Infolge des höheren Wärmedurchgangs beim „Fenster alt“ und der dadurch bedingten grösseren Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Aussenlufttemperatur, ist der Anteil der natürlichen Konvektion im Wärmeübergangskoeffizient (Konstantwert) höher als bei den übrigen Bauteilen mit besserem Isolationswert.

Entsprechend der Norm EN ISO 6946 wurde für die Raumseite ein (Gesamt-) Wärmeübergangskoeffizient von  $h_i = 7.7 \quad [W/(m^2 K)]$  angesetzt.

### 7.1.2 Randbedingungen

Als Randbedingungen für das Modell dienen primär die am Testgebäude gemessenen meteorologischen Bedingungen oder daraus abgeleitete Grössen. Als Simulationsperiode wurde der Zeitraum vom 1. - 26. Januar 2010 ausgewählt, in welchem auch zwei Messperioden mit IR-Serieaufnahmen stattfanden. Die folgenden Grössen werden im Modell verwendet:

$\theta_{ae}$  Aussenlufttemperatur pro Fassade, Messstellen 1 und 3

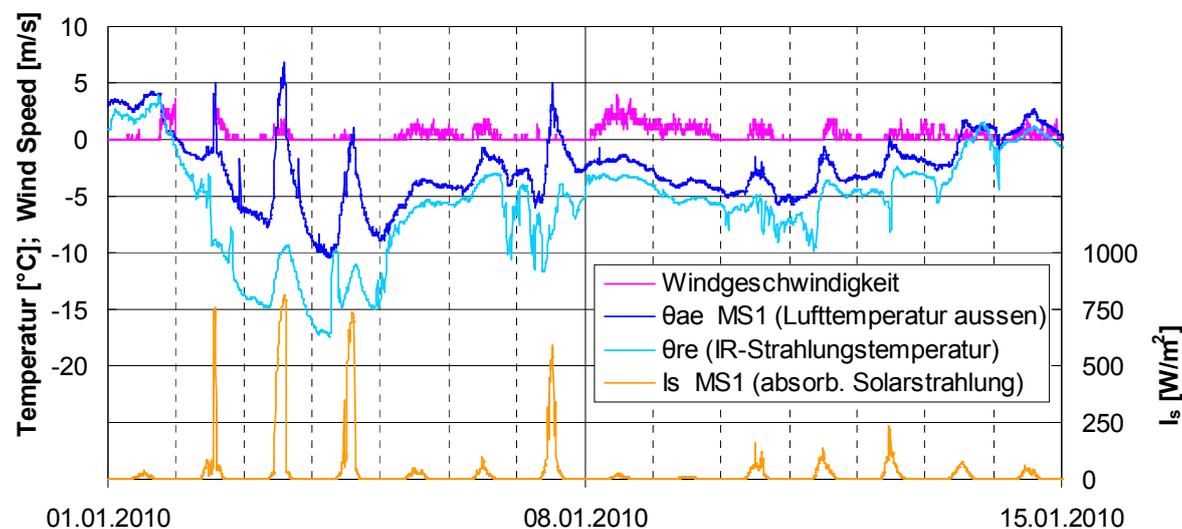
$\theta_{re}$  Mittlere IR-Strahlungstemperatur von Himmel und Umgebung. Die beiden Anteile werden entsprechend ihren Raumwinkelfaktoren gewichtet. Der Sichtfaktor zum Himmel beträgt für beide Fassadenorientierungen SE und SW ca. 32%. Die Himmelstemperatur wird aus IR-Messdaten der nächstgelegenen Meteo-Station Tänikon bei Aadorf berechnet. Als Umgebungstemperatur wird die, mit der eigenen Meteo-Station gemessene Aussenlufttemperatur eingesetzt.

$I_s$  Absorbierte Solareinstrahlung pro Fassade und Wandtyp.  
Opake Wände: 60% der gemessenen Einstrahlung pro Orientierung.  
Fenster: Absorption pro Glasscheibe entsprechend den jeweiligen Absorptionsfaktoren.

$v_{Wind}$  Mit der eigenen Meteo-Station gemessene Windgeschwindigkeit 1.5 m ab Boden.

$\theta_{ai}$  Die Randbedingung für die Raumseite wurde ebenfalls aus den Messdaten bestimmt. Die mittlere Raumlufttemperatur über den Simulationszeitraum betrug 21.9 °C.

Der Verlauf der meteorologischen Randbedingungen ist beispielhaft aus Bild 7-2 ersichtlich.



**Bild 7-2:** Verlauf der meteorologischen Randbedingungen in der ersten Hälfte des Januar 2010. Aussenlufttemperatur und Solareinstrahlung von MS 1.

### 7.1.3 Resultate Vergleich Simulation – Messdaten

Für den Vergleich mit den Messdaten wurden im Simulationsmodell Outputs für alle Messstellen definiert. Interessante Outputgrößen sind primär die Aussenoberflächentemperaturen, aber auch die resultierenden Wärmeflüsse und Wärmeübergangskoeffizienten der Aussenwände. In den nachfolgenden Grafiken werden die berechneten Oberflächentemperaturen den mit Thermoelementen und der IR-Kamera gemessenen Werten gegenüber gestellt und die Abweichungen analysiert.

Wie aus den Bildern Bild 7-3 bis Bild 7-6 ersichtlich ist, wird bei allen Fassadentypen und -orientierungen im Allgemeinen eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse ( $Sim_i$ ,  $i=1-4$ ) mit den gemessenen Werten ( $MS_i$ ,  $i=1-4$ ) erreicht. Diese Genauigkeit gründet auf einer sehr detaillierten Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen pro Messstelle. Die Simulationsberechnungen haben gezeigt, dass insbesondere die Einflussfaktoren

- Windgeschwindigkeit (und damit der konvektive Wärmeübergang)
- Strahlungstemperatur ( $\theta_{re}$ ) der gesamten Umgebung
- solar absorbierte Wärmegewinne

von entscheidender Bedeutung sind. Die verbleibenden Abweichungen können deshalb hauptsächlich auf die ungenaue Kenntnis der oben genannten Faktoren zurückgeführt werden. Beispiele dafür sind der nur bedingt taugliche Ansatz für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten während Phasen mit hoher Solareinstrahlung und den dadurch bedingten sehr hohen Oberflächentemperaturen (Bild 7-3; 2. bis 4. und 7. Januar) oder Abweichungen infolge der nicht lokal gemessenen IR-Strahlung und dadurch ungenauer Umgebungstemperatur (Bild 7-3; 6./7. und 11. Januar).

Die Differenzen der Simulationsergebnisse gegenüber den Thermografie-Messungen sind grösser als im Vergleich zu den Thermoelement-Messungen (vgl. Bild 7-7). Trotzdem resultiert auch diesbezüglich eine gute qualitative Übereinstimmung. Eine genauere Analyse der Thermografiemessungen erfolgte in Kapitel 6.4.4.

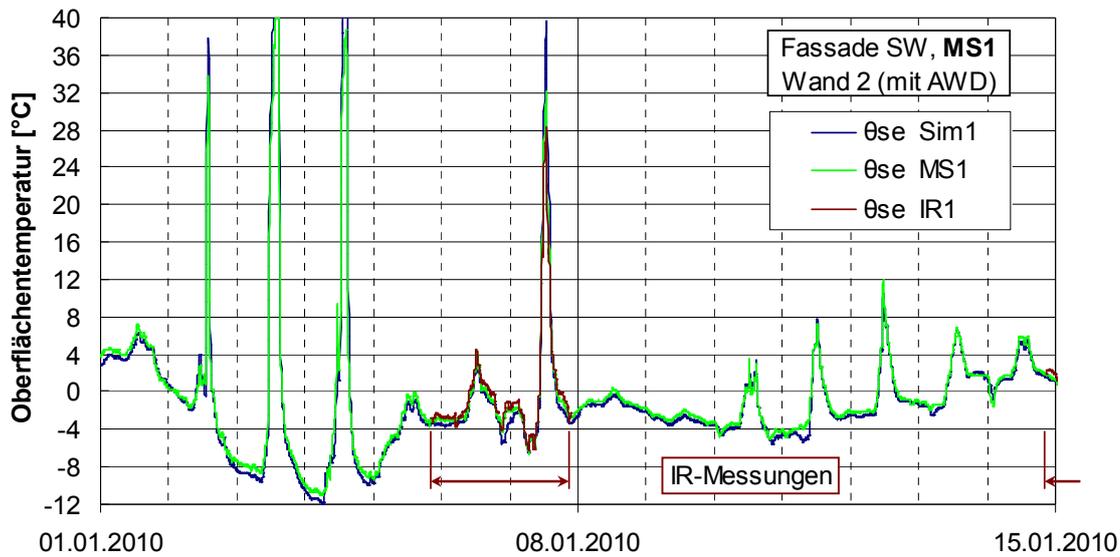
### 7.1.4 Erkenntnisse aus dem Vergleich Simulation – Messdaten

Das Simulationsmodell erlaubt eine realitätsgetreue Modellierung der thermischen Vorgänge in den betrachteten Wandaufbauten und an deren Oberflächen. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messungen ist das Modell validiert und kann deshalb für die Sensitivitätsanalysen (Kapitel 7.2) verwendet werden.

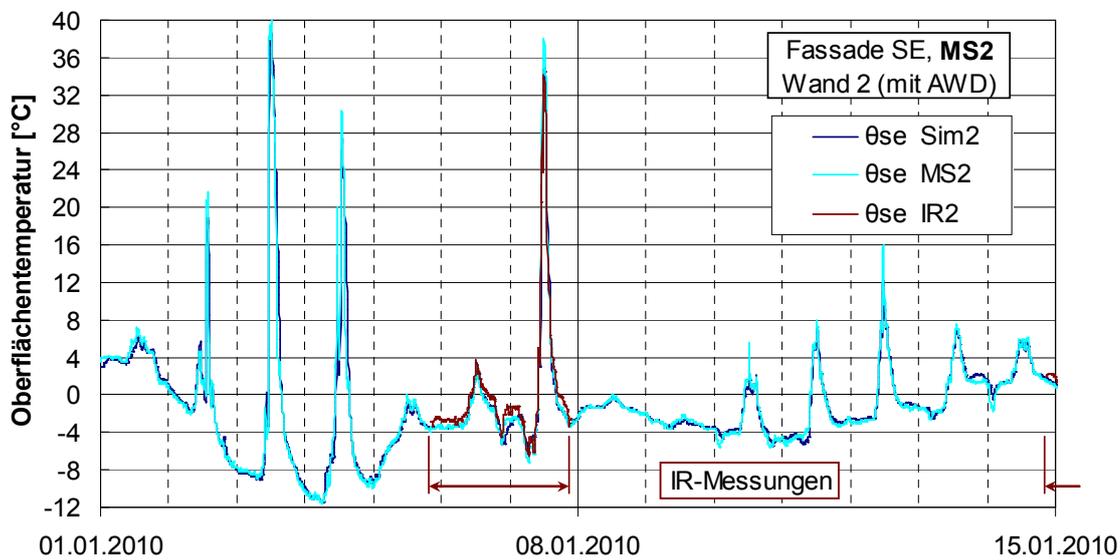
Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse konnte nur durch Verwendung spezifischer Ansätze für den windabhängigen konvektiven Wärmeübergang an Aussenoberflächen erreicht werden (Formeln (7-1) und (7-2)). Daraus können die folgenden Aussagen abgeleitet werden:

- Die Ansätze für den konvektiven äusseren Wärmeübergang sind auch ohne Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur genügend genau. Eine iterative Berechnung erübrigt sich deshalb.
- Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von der Fassadenart (opake Wand oder Verglasung) sowie von deren U-Wert (hoch oder tief).
- Lokale auf den Wärmeübergangskoeffizienten und damit auf die Oberflächentemperatur Gegebenheiten, wie Anströmung des Gebäudes oder windgeschützte Lage, können einen bedeutenden Einfluss haben.
- Die resultierenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten sind auch bei den maximal gemessenen Windgeschwindigkeiten (ca. 4 m/s = 11 W/m<sup>2</sup>K) deutlich tiefer, als deren Anteil (ca. 20 W/m<sup>2</sup>K) im Standard-Wärmeübergangskoeffizient (25 W/m<sup>2</sup>K), welcher in der Berechnung von Norm U-Werten verwendet wird.

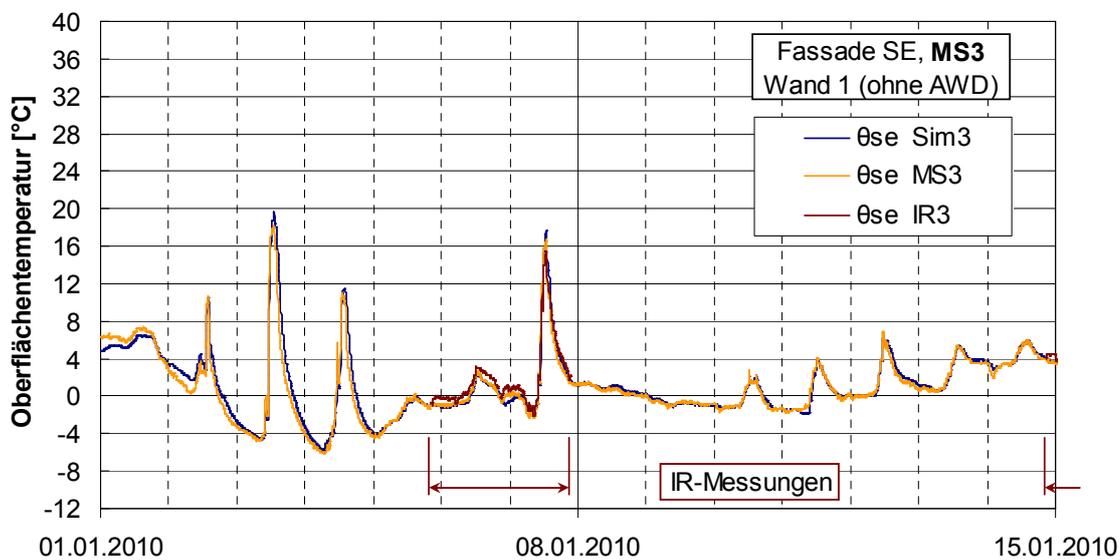
Die gemessenen Randbedingungen aus der Messperiode können auch für die Sensitivitätsanalysen eingesetzt werden und erlauben so eine realitätsgetreue Untersuchung der verschiedenen Einflussfaktoren.



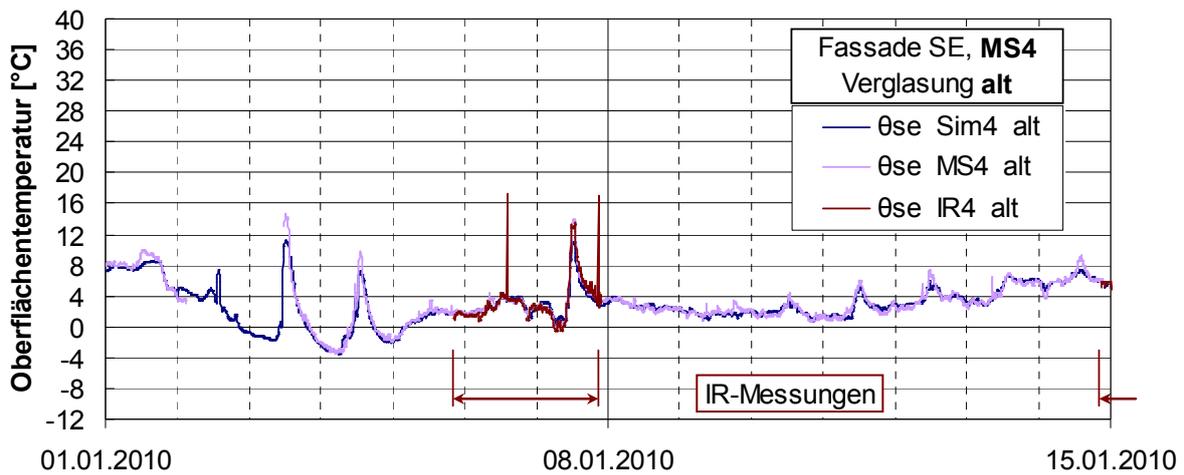
**Bild 7-3:** Vergleich Simulation – Messung für die Messstelle 1.



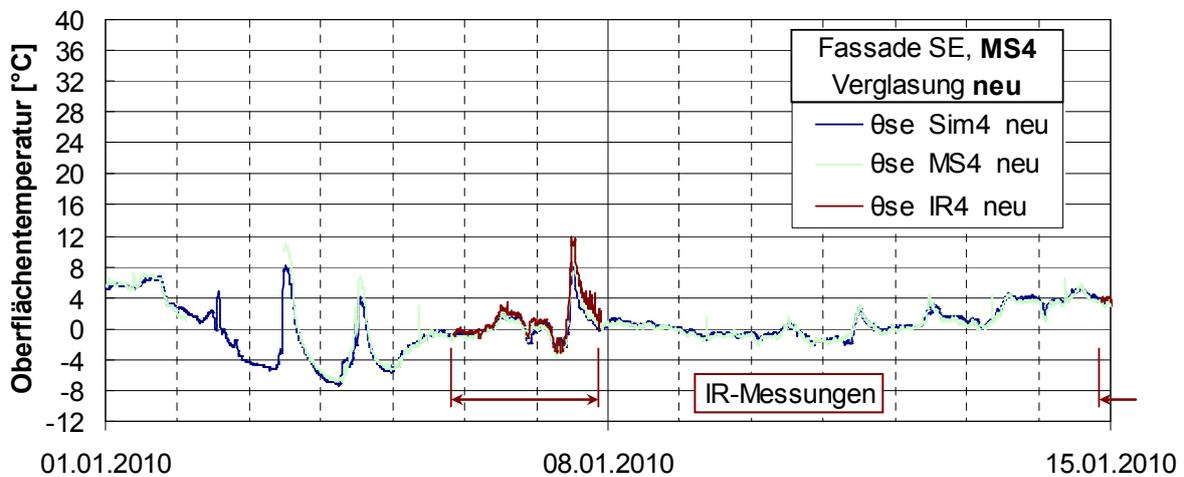
**Bild 7-4:** Vergleich Simulation – Messung für die Messstelle 2.



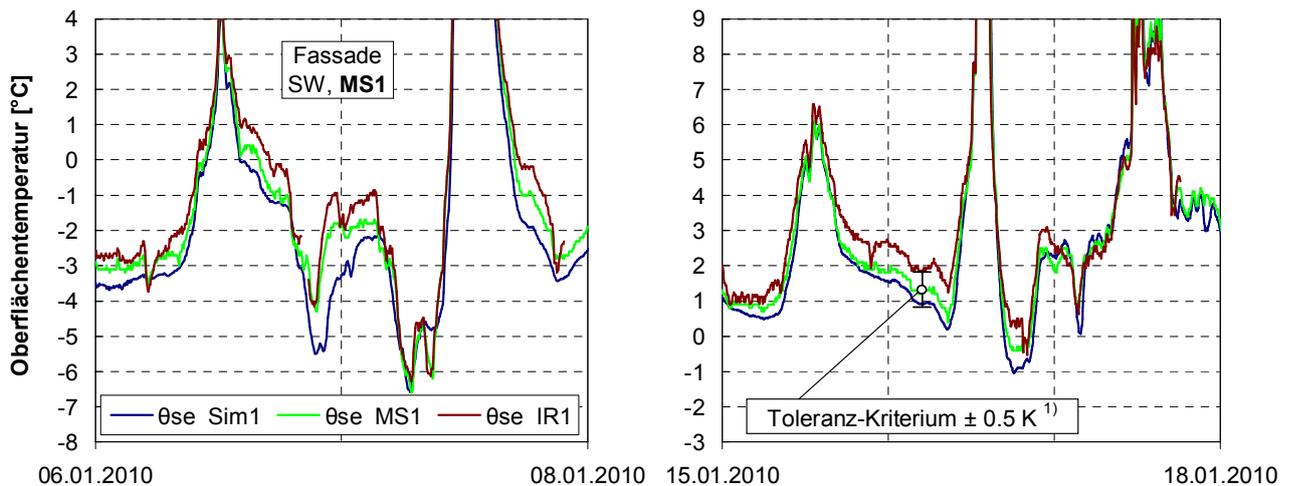
**Bild 7-5:** Vergleich Simulation – Messung für die Messstelle 3.



**Bild 7-6a:** Vergleich Simulation – Messung für die Messstelle 4, **Verglasung alt.**



**Bild 7-6b:** Vergleich Simulation – Messung für die Messstelle 4, **Verglasung neu.**



**Bild 7-7:** Vergleich Simulation – Messung für die Messstelle 1. Detailperioden mit Thermografie-Messungen 6.-7. und 15.-17. Januar 2010.

1) Toleranz-Kriterium für die Sensitivitätsanalysen siehe Kapitel 7.2.3.  
Messunsicherheit der IR-Messungen siehe Kapitel 6.4.5.

## 7.2 Sensitivitätsanalyse meteorologische Einflussfaktoren

### 7.2.1 Methodik

Zuverlässige Aussagen über die thermischen Eigenschaften einer Wand, die auf Thermografie-Messungen basieren, sind grundsätzlich nur möglich, wenn die Messung des Objektes im stationären Zustand erfolgt. In der Praxis ist diese Bedingung jedoch höchst selten genügend genau erfüllt. Das Ziel der Sensitivitätsanalysen ist es deshalb, den Einfluss einzelner Störfaktoren auf das Gleichgewicht einer Wand aufzuzeigen und Bedingungen zu ermitteln, unter welchen sich quasi-stationäre Verhältnisse – und damit praktikable Voraussetzungen für Thermografieaufnahmen – einstellen.

Das thermische Verhalten der Oberflächen von zu untersuchenden Bauteilen wird neben den Me-teo- und Innenraumbedingungen hauptsächlich durch die folgenden Parameter beeinflusst:

- Konstruktionsaufbau
- Wärmedurchgangswiderstand
- thermische Speichermasse.

Die Untersuchungen zu den meteorologischen Einflussfaktoren werden deshalb an sechs verschiedenen Konstruktionen von Aussenwänden durchgeführt. Als Referenzfall dient das Testgebäude inklusive Wetter-Randbedingungen der Messperiode vom Januar 2010.

Mittels gezieltem „Ein-„ oder „Ausschalten“ einzelner meteorologischer Einflussfaktoren in der Eingabe der Simulationen werden die berechneten Veränderungen der Oberflächentemperaturen aufgezeigt. Damit lassen sich pro Wandkonstruktion Bedingungen und Zeitfenster ableiten, unter welchen akzeptable Bedingungen für IR-Aufnahmen vorherrschen. Zudem kann die Relevanz jedes Einflussfaktors bezüglich des Wärmedurchgangs analysiert werden.

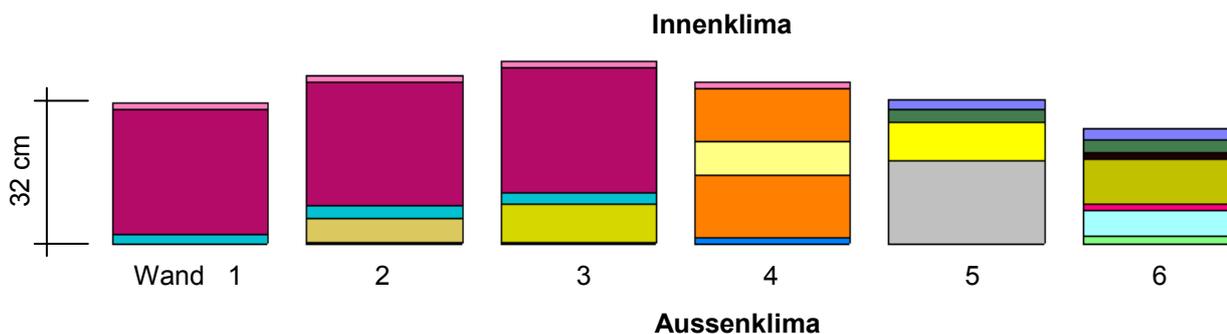
### 7.2.2 Betrachtete Wandkonstruktionen und Simulationsmodell

Um praxisrelevante Aussagen machen zu können, wurden für die Untersuchungen sechs im Gebäudebestand häufig anzutreffende Wandkonstruktionen als Referenz-Wandaufbauten ausgewählt. Anhang A1.2 enthält eine Auflistung der betrachteten Wandtypen.

Nr.	Wandtyp	Wärmedämmung	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Materialisierung Aussenoberfläche
1	Backsteinmauerwerk 32 cm	Keine	1.18	Aussenputz, d = 25 mm
2	Backsteinmauerwerk 32 cm, gedämmt	6 cm AWD (EPS)	0.44	Aussenputz, d = 5 mm
3	Backsteinmauerwerk 32 cm, gedämmt	9 cm AWD (EPS)	0.30	Aussenputz, d = 5 mm
4	Zweischalenmauerwerk, gedämmt	8 cm Steinwolle	0.30	Aussenputz, d = 15 mm
5	Betonwand mit Innenwärmedämmung	9 cm Steinwolle	0.30	Beton, (d = 200 mm)
6	Hinterlüftete Holzständerwand	15 cm Mineralwolle	0.30	Holzschalung, d = 20 mm

**Tabelle 7-1:** Wandkonstruktionen für die Sensitivitätsanalysen.

Um gleiche Voraussetzungen zu schaffen, erfolgt die Betrachtung für alle Wandkonstruktionen an einem eindimensionalen Wandaufbau. Das Simulationsmodell mit den sechs Wandaufbauten ist aus Bild 7-8 ersichtlich.



**Bild 7-8:** Horizontalschnitte der Wandkonstruktionen im Simulationsmodell.

Die detaillierten Schichtaufbauten und Materialkennwerte der Wandkonstruktionen sind im Anhang A 1.1 dokumentiert.

Die Randbedingungen wurden grundsätzlich analog wie beim Testgebäude definiert. Als Gebäudeausrichtung wurde die Orientierung Südwest gewählt, da diese bezüglich Solargewinnen im Winter, und demzufolge für die Beurteilung von Thermografieaufnahmen aus der Folgenacht, als kritisch einzustufen ist. Eine Einschätzung zum Verhalten anderer Orientierungen findet sich am Ende des Kapitels 7.2.4.

Als Aussenklima dienen die Messwerte der Meteo-Station beim Testgebäude vom Januar 2010. Dabei wurden einzelne Wetterkomponenten je nach Bedarf gezielt modifiziert. Für den konvektiven Wärmeübergang aussen wird der aus den Messungen ermittelte Ansatz für opake Wände ( $h_{ce} = 3 + 2 \cdot v_{Wind}$ ) verwendet.

Die Innenraumbedingungen wurden auf  $\theta_i = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $h_i = 7.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  festgesetzt.

### 7.2.3 Toleranzkriterium

Für die Beurteilung der Ergebnisse muss ein Toleranzkriterium festgesetzt werden. Damit wird definiert, ab welcher Temperaturabweichung im Vergleich zum stationären Fall ein meteorologischer Störeinfluss auf der Wandoberfläche (z.B. Wind oder Solarstrahlung) für die Beurteilung nicht mehr relevant ist. Eine sinnvolle Festsetzung der Toleranzgrenze beinhaltet auch die Unsicherheit der Messmittel.

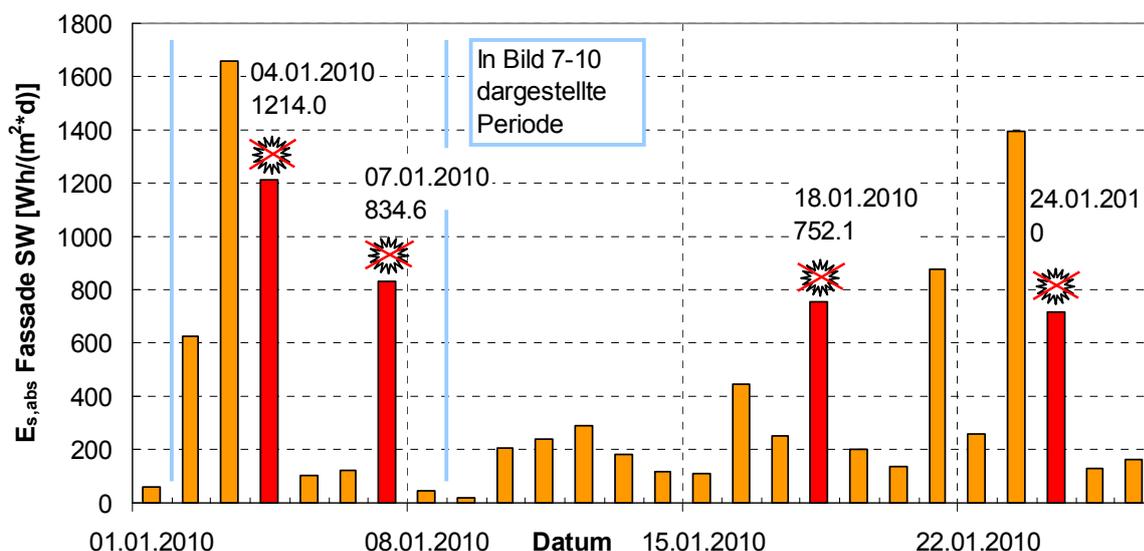
Je nach Aufgabenstellung, Konstruktionsart, Temperaturdifferenz über die Konstruktion und Messmittel müsste diese Toleranz unterschiedlich angesetzt werden. Damit würde analog einer bestimmten, zulässigen Messunsicherheit eine Bandbreite für akzeptable Resultate geschaffen. Für den praktischen Einsatz müsste gelten: Je höher der Wärmedurchgangswiderstand einer Wand, desto tiefer die Toleranzgrenze. Dies würde jedoch den Rahmen der Auswertungsmöglichkeiten sprengen. Die Toleranzgrenze bezüglich der oben genannten Faktoren wurde deshalb für die folgenden Untersuchungen auf  $\pm 0.5$  Kelvin festgelegt.

Dies erfolgte unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Bestimmung von „wahren“ Temperaturen mit heutigen Thermographiesystemen (z.B. Driften der Kamera, vgl. Kapitel 6.4.5).

### 7.2.4 Sensitivität bezüglich Solarstrahlung am Vortag

Hier wird untersucht, welchen Einfluss die Intensität und die Dauer der Solareinstrahlung des Vortages auf die Oberflächentemperaturen der verschiedenen Wandaufbauten haben.

In Bild 7-9 sind die auf einer opaken SW-Wand pro Tag absorbierten Solarstrahlungsenergien dargestellt (Absorptionsfaktor 60%). Entgegen dem Referenzfall, bei welchem alle Solarereignisse berücksichtigt sind, wird für die folgenden Analysen der Sensitivität die Solarstrahlung einzelner Tage aus dem Profil **gelöscht**. Die ausgewählten Tage sind mit einem Sonnen-Symbol markiert.



**Bild 7-9:** Absorbierte Solarstrahlungsenergien pro Tag für SW-Wände. Markierte Ereignisse wurden für die Analysen absichtlich aus dem Solarprofil gelöscht.

Bild 7-10 enthält die Oberflächentemperaturen der Simulation mit gelöschten Solarereignissen ( $\theta_{se\_Sol0}$ ) im Vergleich zur Referenz ( $\theta_{se\_Ref}$ ). An den Kurven  $d\theta_i$  lässt sich die solar induzierte Abweichung der Oberflächentemperatur sowie der Verlauf und die Dauer des damit verbundenen Abklingvorgangs ablesen. Der Übersichtlichkeit halber ist nur die Periode zwischen dem 2. und 9. Januar 2010 mit gelöschten Solarereignissen am 4. und 7. Januar dargestellt.

Allgemein lässt sich erkennen, dass die Erhöhung der Oberflächentemperatur infolge Solareinfluss je nach Wandaufbau bis 30°C und mehr erreicht (z.B. 3. und 5. 1. 2010). Die Abklingzeiten dieser Störungen sind abhängig von der an der Oberfläche vorhandenen thermischen Masse. Je massiver eine Wand ist, desto mehr Solarenergie wird in die oberflächennahen Schichten eingespeichert und umso länger ist der Solareinfluss auch nach Sonnenuntergang noch nachweisbar. So dauert es beispielweise im Falle der Betonwand (W5) bis am übernächsten Tag, bis die Störung vom 05.01.2010 unter das Toleranzkriterium abgeklungen ist. Um quantitative Aussagen über diese Speichereffekte machen zu können, wurde die solar induzierte Abweichung der Oberflächentemperatur bei Sonnenuntergang sowie die Zeitdauer des Abklingvorgangs bis zum Erreichen des Toleranzkriteriums von 0.5 K ausgewertet (Bild 7-11).

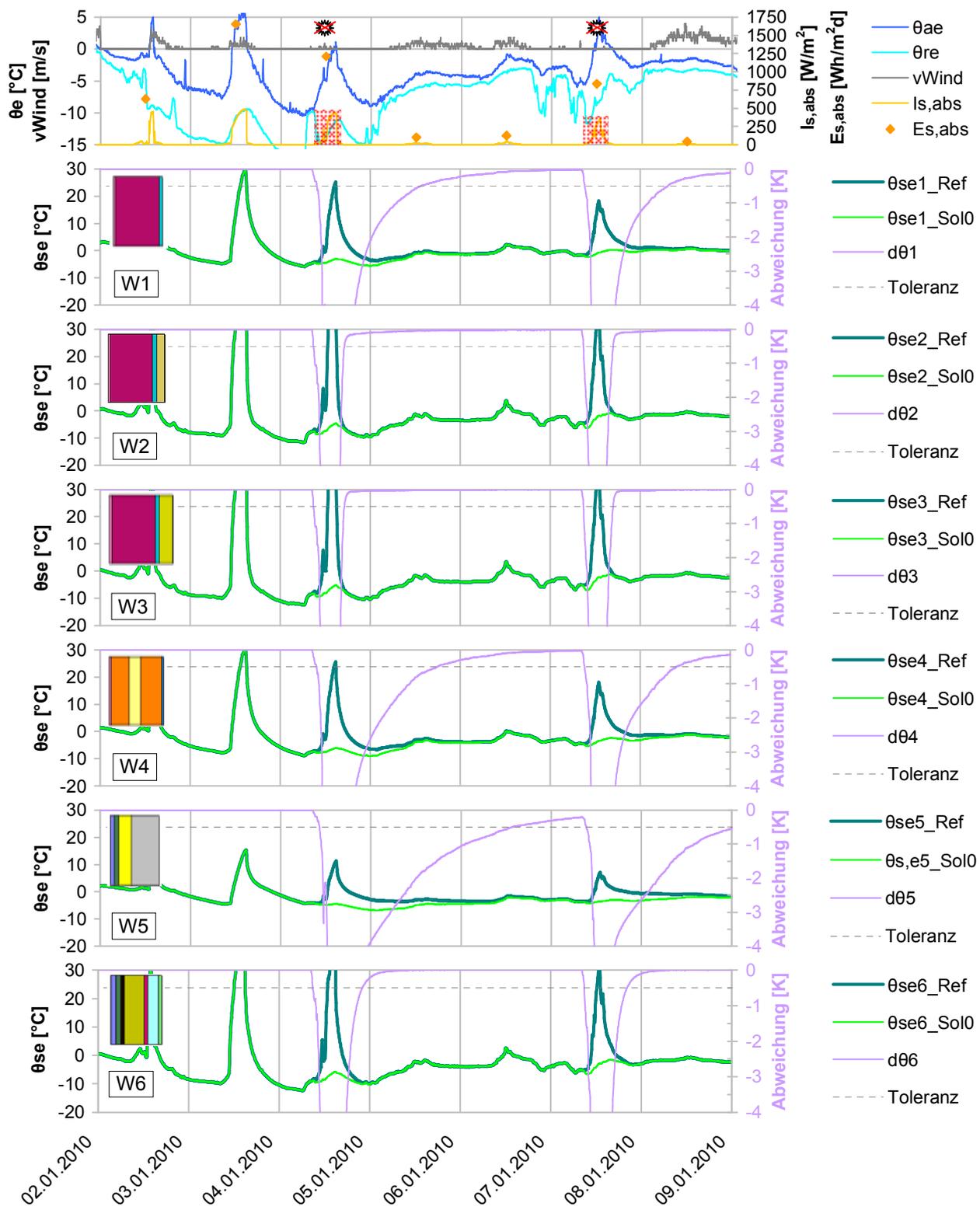
Daraus lassen sich die folgenden **Erkenntnisse bezüglich „Solarstrahlung am Vortag“** ableiten:

Solar induzierte Temperaturabweichungen:

- Die Abweichung der Oberflächentemperatur  $\theta_{se}$  ohne Solareinfluss betragen bei Sonnenuntergang für die Wände mit Aussenisolation (W2 und W3) je ca. -1 K.
- Bei den übrigen Wandkonstruktionen sind diese Werte abhängig vom Wandaufbau und von der während des Solarereignisses total absorbierten Energie. Gegenüber dem Zustand mit Solareinwirkung sind die Oberflächentemperaturen für diese Wände um 3 bis 9 K tiefer.

Zeitdauer bis zum Abklingen des Solareinflusses:

- Die Zeitdauer bis zum Abklingen des Solareinflusses auf einen Restwert von 0.5 K auf der Oberfläche (Toleranzkriterium) ist ebenfalls stark konstruktionsabhängig.
- Bei den Wänden mit Aussenisolation (W2 und W3) wird während eines Solarereignisses nur sehr wenig Energie gespeichert. Entsprechend dauert es weniger als eine Stunde, bis die Störung der Oberflächentemperatur unter den Toleranzwert abgeklungen ist.
- Auch bei W6 dauert dieser Vorgang maximal 5 Stunden. Bei Sonnenuntergängen im Januar um 17 Uhr, können solche Wände also bereits in der Folgenacht (ab 24 Uhr) thermografiert werden.
- Mit Abklingzeiten von 15-25 Stunden bei den Wänden W1 und W4 gilt dies nicht mehr, und es muss mindestens ein Folgetag ohne nennenswerte Solareinwirkung abgewartet werden.
- Bei der massiven Betonwand (W5) dauert der Abklingvorgang nochmals länger und erreicht Werte zwischen 33 und 45 Stunden. Bei „kleinen“ Solarereignissen mit absorbierten Energien bis ca. 900 Wh/m<sup>2</sup>d würde demnach ein solarfreier Tag knapp ausreichen, um am Ende der zweiten Folgenacht akzeptable Bedingungen für Thermografieaufnahmen vorzufinden. Bei höheren Einstrahlungsenergien hingegen sind mindestens zwei Folgetage ohne Sonne abzuwarten.

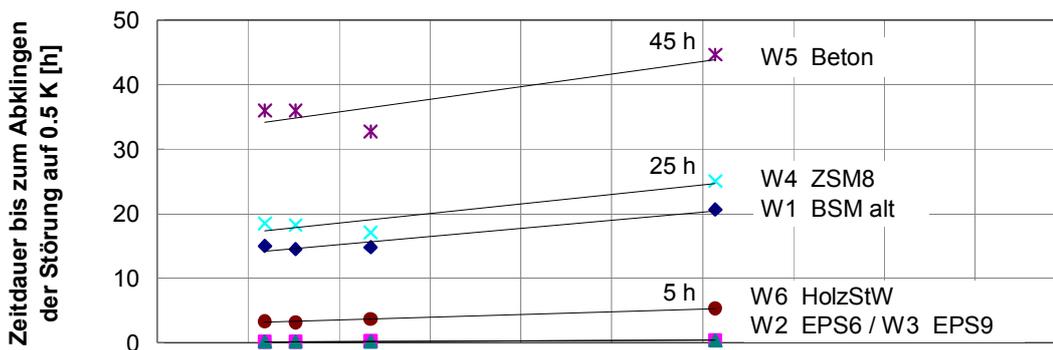
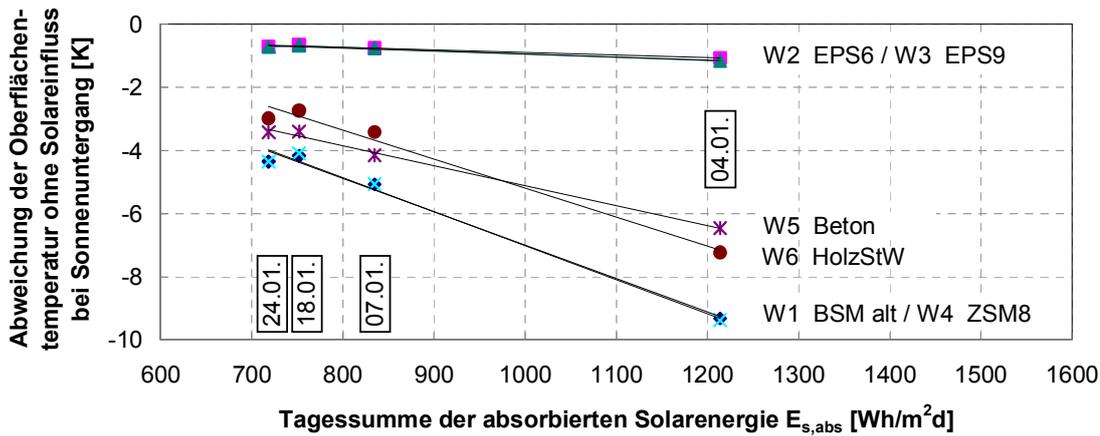


**Bild 7-10: Sensitivität Solarstrahlung.**

**Erläuterung zu Bild 7-10.**

Gilt analog auch für nachfolgende Bilder.

— θ <sub>ae</sub>	Aussenlufttemperatur	} y-Achse links
— θ <sub>re</sub>	IR-Umgebungstemperatur	
— vWind	Windgeschwindigkeit	
— ls,abs	absorbierte Solarstrahlung	} y-Achse rechts
◆ Es,abs	Tagessumme absorbierte Solarenergie	
— θ <sub>se1_Ref</sub>	Oberflächentemperatur Referenz	} y-Achse links
— θ <sub>se1_Sol0</sub>	Oberflächentemperatur mit gelöschten Solar-Ereignissen	
— dθ1	Differenz zwischen den Oberflächentemperaturen	} y-Achse rechts
--- Toleranz	Toleranzgrenze (± 0.5 Kelvin)	



**Bild 7-11:** Quantitative Analyse des Solareinflusses auf die verschiedenen Wandkonstruktionen. Selektierte Solarereignisse gemäss Bild 7-9.

### Einschätzung zum Verhalten von Wänden mit anderen Orientierungen

Alle vorangehenden Untersuchungen wurden für die Fassadenorientierung Südwest durchgeführt. Solange sich die absorbierten Solarstrahlungs-Energien für Wände mit anderen Ausrichtungen in der gleichen Grössenordnung bewegen, gelten grundsätzlich die gleichen Aussagen und Erkenntnisse.

Wie statistische Auswertungen für die Wintermonate zeigen, ist dies insbesondere für die Orientierung Südost der Fall.

Weil Wände mit Nord-Ausrichtung viel tiefere Solargewinne aufweisen, sind sie bezüglich Solareinfluss deutlich unkritischer als die Orientierung Südwest.

Demgegenüber wird bei Wänden mit Süd-Ausrichtung während diesen Monaten im Durchschnitt etwa 20% mehr Solarenergie eingestrahlt. Entsprechend erhöhen sich die Abklingzeiten der solaren Störungen. Süd-Wände sind deshalb tendenziell kritischer einzustufen als Südwest-Wände. Allerdings wird dieser Effekt teilweise dadurch kompensiert, dass die Energie im Tagesverlauf früher eingestrahlt wird und der Abklingvorgang folglich früher einsetzt.

### Bemerkung zu den verwendeten Solarstrahlungsdaten

In den Simulationen zur Beurteilung des Solareinflusses wurde die an der Fassade des Testgebäudes gemessene Solareinstrahlung verwendet. Auch die Auswertungen basieren auf den daraus ermittelten Solarstrahlungsenergien.

In der Praxis stehen solch detaillierte Daten in der Regel nicht zur Verfügung. Die auf einer Fassade absorbierte Solarenergie  $E_{s,abs}$  muss deshalb aus anderen Daten abgeschätzt werden.

Eine Möglichkeit ist die Berechnung aus gemessenen Werten der horizontalen Globalstrahlung. In den meisten Fällen wird jedoch lediglich ein Sonnendiagramm mit der Sonnenscheindauer der letzten 2-3 Tage verfügbar sein (vgl. Kapitel 5.5.3). Weil daraus keine Intensitäten hervorgehen und tiefe Werte der Diffusstrahlung nicht erfasst sind, erlauben diese Daten nur eine ganz grobe Abschätzung der Solarstrahlungsenergien. Entsprechend konservativ ist bei der Einschätzung der Situation nach Tagen mit Solareinstrahlung vorzugehen.

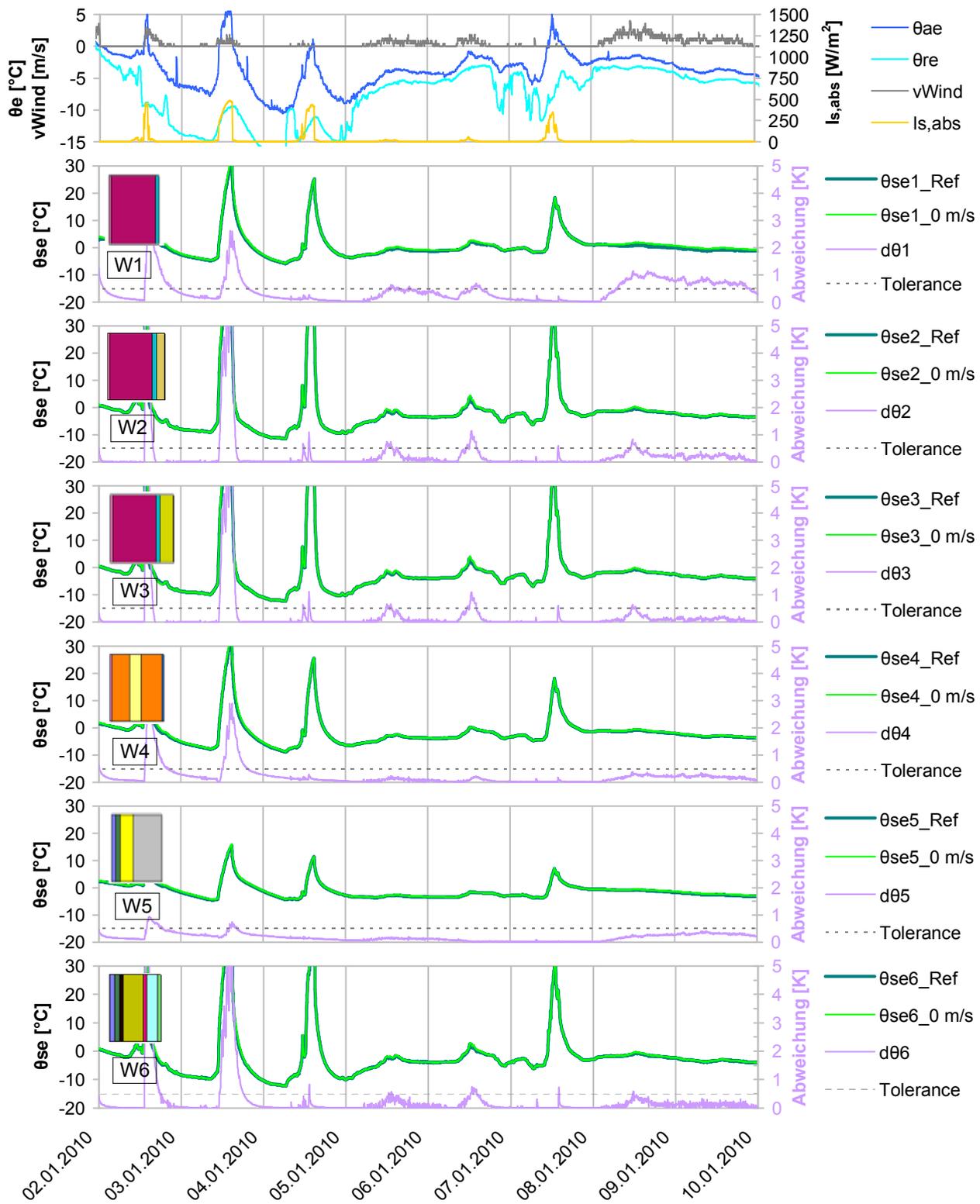
### 7.2.5 Sensitivität bezüglich Windgeschwindigkeit

Durch die Veränderung des konvektiven Wärmeübergangs hat der Wind einen direkten Einfluss auf den Wärmefluss und damit auf die Oberflächentemperatur einer Wand. Für die Untersuchung dieses Einflusses werden im Folgenden die Simulationsresultate der **Variante ohne Wind** der **Variante mit real gemessenem Wind** gegenübergestellt. Wie aus Bild 7-12 ersichtlich ist, sind die Oberflächentemperaturen ohne Windeinfluss ( $\theta_{se,0}$  m/s) tendenziell höher als mit ( $\theta_{se,Ref}$ ). Dies ist auf die geringere Auskühlung gegenüber der Umgebungslufttemperatur infolge eines höheren Wärmeübergangswiderstandes zurückzuführen.

Der grösste Einfluss des Windes für alle Wandkonstruktionen ist in Kombination mit gleichzeitiger Solareinstrahlung festzustellen (02./03. Januar 2010). Weil die Abweichungen im Vergleich zum Solareinfluss deutlich kleiner ausfallen und der Windeinfluss den Abbau der Störungen zusätzlich beschleunigt, unterschreiten solche Abweichungen ausnahmslos vor Mitternacht die Toleranzgrenze. Demgegenüber können lang anhaltende Winde wie am 08./09. Januar 2010 infolge von Speichereffekten systematische Abweichungen zur Folge haben (W1).

#### Erkenntnisse bezüglich „Windgeschwindigkeit“

- Pulsierende Winde mit Spitzen bis ca. 2 m/s sind auch während Thermografiemessungen unkritisch.
- Störungen infolge von Windeinfluss klingen relativ schnell ab. Dadurch lassen sich die Wartezeiten, wenn überhaupt notwendig, auf wenige Stunden beschränken (maximal 6 Stunden). Das Ende lang anhaltender Windperioden ist allerdings auf jeden Fall abzuwarten.
- Die Systeme mit Aussenwärmedämmung (W2, W3, W6) reagieren empfindlicher respektive schneller. Sie sind deshalb auch schneller wieder innerhalb der Toleranzgrenze.



**Bild 7-12:** Sensitivität Windeinfluss. Erläuterungen zu den Bezeichnungen siehe bei Bild 7-10.

## 7.2.6 Sensitivität bezüglich Himmelstemperatur und Sichtfaktor Himmel

Erfahrungsgemäss sind ideale Verhältnisse für Thermografiemessungen mit bedecktem Himmel und einer Umgebungstemperatur nahe an der Aussenlufttemperatur selten anzutreffen. Im Folgenden wird deshalb untersucht, wie die aktuelle Himmelstemperatur und der Sichtfaktor zum Himmel die Oberflächentemperatur einer Wand beeinflussen. Für diese Sensitivitätsanalysen werden zwei hauptsächliche Strahlungspartner einer Wand betrachtet:

- der Himmel
- die Umgebung.

Die Umgebung umfasst die Einflüsse von Boden und Nachbargebäuden. Dabei wird angenommen, dass deren Temperatur in guter Näherung der Aussenlufttemperatur entspricht.

Ausgehend vom Idealzustand mit identischer Luft- und Himmelstemperatur als Referenzfall, werden fünf Varianten mit abgesenkter Himmelstemperatur untersucht. Die gewählten Temperaturdifferenzen zwischen  $\theta_{\text{sky}}$  und  $\theta_{\text{ae}}$  betragen -5, -10, -15, -20, -50 K. Dieser Wertebereich deckt Situationen mit vollständig bedecktem Himmel bis zu klarem Himmel ab (Anmerkung: Je nach Höhenlage der Bewölkung ergibt sich eine kleinere oder grössere Differenz zur Lufttemperatur). Das dynamische Verhalten der Wände bei aufklarendem Himmel wird in den Simulationen durch einen virtuellen Sprung der Himmelstemperatur am 09.01.2010 um 00:00 auf die oben beschriebenen Werte nachgebildet.

Um auch verschiedene Expositionen von Oberflächen zu berücksichtigen, wird zusätzlich der Sichtfaktor zum Himmel variiert:  $F_{\text{sky}} = 32\%$  dient als Beispiel für eine Wand mit erhöhtem Horizont wie im Testgebäude, und  $F_{\text{sky}} = 50\%$  ist typisch für freistehende Gebäude mit ebenem Horizont.

In den folgenden Auswertungen wird die Differenz der Oberflächentemperaturen mit Himmelseinfluss im Vergleich zur Referenzsituation mit  $\theta_{\text{sky}} = \theta_{\text{ae}}$  untersucht.

Achtung: Die dargestellten „**Abkühlungen**“ sind Differenzen zwischen Oberflächentemperaturen. Im Gegensatz dazu (hier nicht betrachtet) sind die sogenannten „Unterkühlungen“ in der Praxis die Differenzen zwischen der Oberflächentemperatur einer Wand und der Aussenlufttemperatur.

Aus den Resultaten der Sensitivitätsanalysen lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

Die Abkühlung der Oberflächentemperatur infolge Abstrahlung an den Himmel ist im Wesentlichen von vier Faktoren abhängig:

- Differenz zwischen Aussenlufttemperatur und Himmelstemperatur
- Sichtfaktor  $F_{\text{sky}}$  einer Wand zum Himmel
- Windgeschwindigkeit
- Wandtyp: U-Wert und thermische Masse der Wandoberfläche

Die Oberflächentemperaturen zeigen dabei ein ausgesprochen dynamisches Verhalten (Bild 7-13 und Bild 7-14):

- Bei leichten Aussenwandkonstruktionen (Aussenwärmedämmung, hinterlüftete Fassaden; W2, W3, W6) erfolgt die Abkühlung der Oberflächentemperatur sehr schnell. Solche Wände erreichen bei Exposition mit einer tieferen Himmelstemperatur (entspricht in Realität dem Aufklaren des Himmels) bereits innerhalb der ersten Stunde ca. 80% der Abkühlung, welche im quasistationären Fall auftritt.
- Im Gegensatz dazu dauert diese Abkühlung bei schweren Aussenwandkonstruktionen (W1, W4, W5) mehrere Stunden oder sogar Tage.
- Bei allen Wandtypen wird ein quasistationärer Zustand frühestens einen Tag nach einer dauerhaften Exposition mit einer tieferen Himmelstemperatur erreicht.
- Infolge Beeinflussung des konvektiven Wärmeübergangs ist ein deutlicher Windeinfluss auf die Abkühlungen feststellbar, d.h. Wind verlangsamt die Abkühlung erheblich.

Bild 7-15 und Tabelle 7-2 enthalten eine Zusammenfassung der maximalen Abkühlungen im quasistationären Zustand während windstillen Phasen. Weil die Wände W2 – W6 gleiche oder ähnliche U-Werte aufweisen, sind auch deren Abkühlungen bei identischem Sichtfaktor  $F_{\text{sky}}$  gleich.

Wände mit höherem Sichtfaktor zum Himmel ( $F_{\text{sky}} = 50\%$ ) zeigen prinzipiell ein gleiches Verhalten wie die Basis-Variante mit  $F_{\text{sky}} = 32\%$ . Die Abkühlungen erhöhen sich jedoch ungefähr im Verhältnis der Sichtfaktoren (Tabelle 7-2).

Aufgrund der oben dargestellten dynamischen Effekte kann bezüglich der Skalierungsanpassung in der QualiThermo-Methode (vgl. Kapitel 5.4.3 betreffend Berücksichtigung der Differenz zwischen Aussenluft- und Himmelstemperatur) keine allgemein gültige Aussage gemacht werden. Stattdessen wird als Anhaltspunkt zur Bestimmung von in der Praxis auftretenden Abkühlungen folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Leichte Aussenwandoberflächen:  
80% der aus den Sensitivitätsanalysen ermittelten, quasistationären Abkühlungen gemäss Bild 7-15. Begründung: Berücksichtigung nur der sich schnell einstellenden, anfänglichen Abkühlung.
- Massive Aussenwandoberflächen:  
Analog zu „Leichte Aussenwandoberflächen“ unter zusätzlicher Abschätzung eines Reduktionsfaktors (aus Bild 7-13) zur Berücksichtigung der Dauer der Exposition.

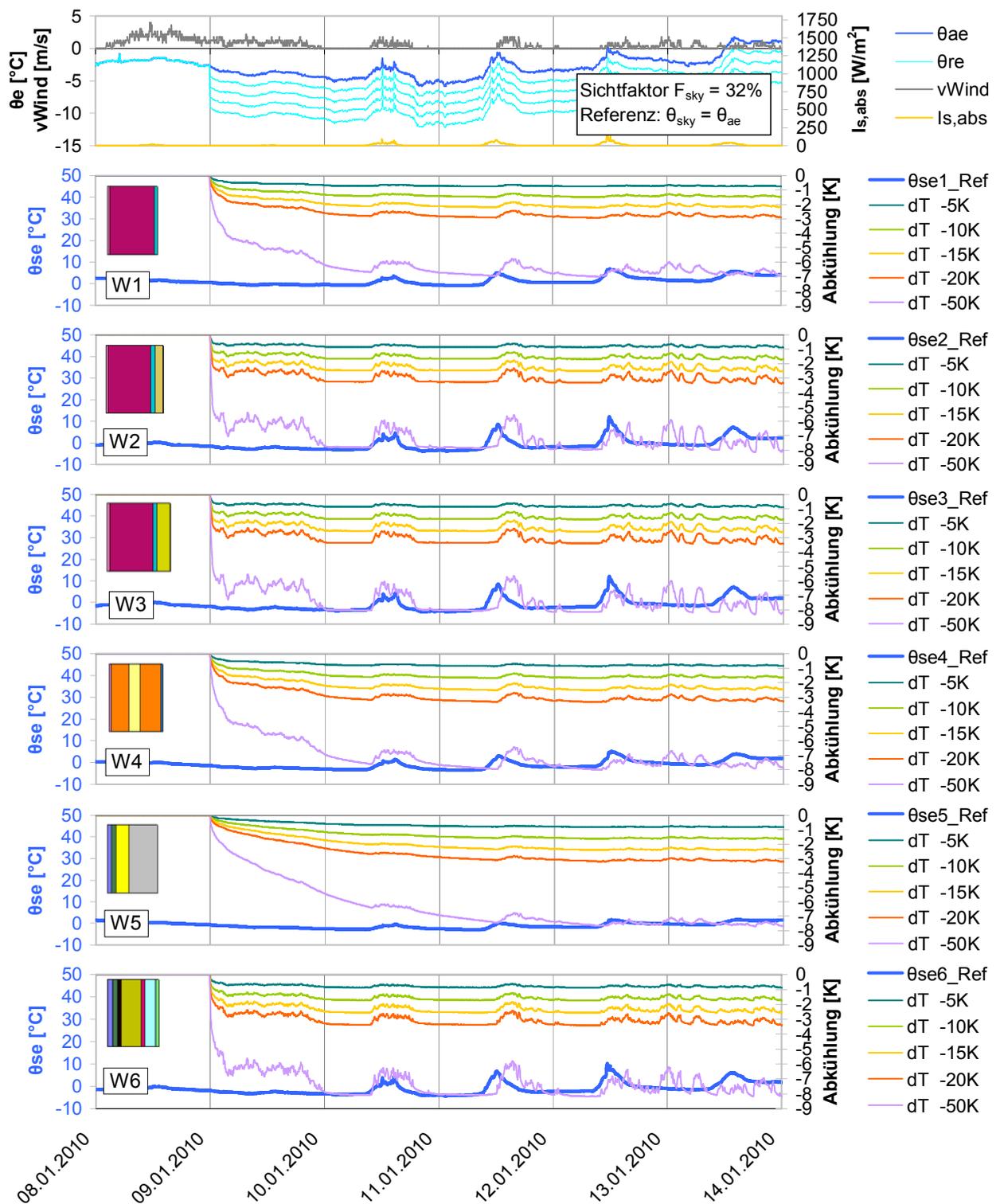
Dieses Vorgehen trägt dem Umstand Rechnung, dass sich eine Wand in der Praxis in den seltensten Fällen in einem quasistationären Zustand befindet und demzufolge die Abkühlungen nie maximal sind.

Ablesebeispiel zu Bild 7-15:

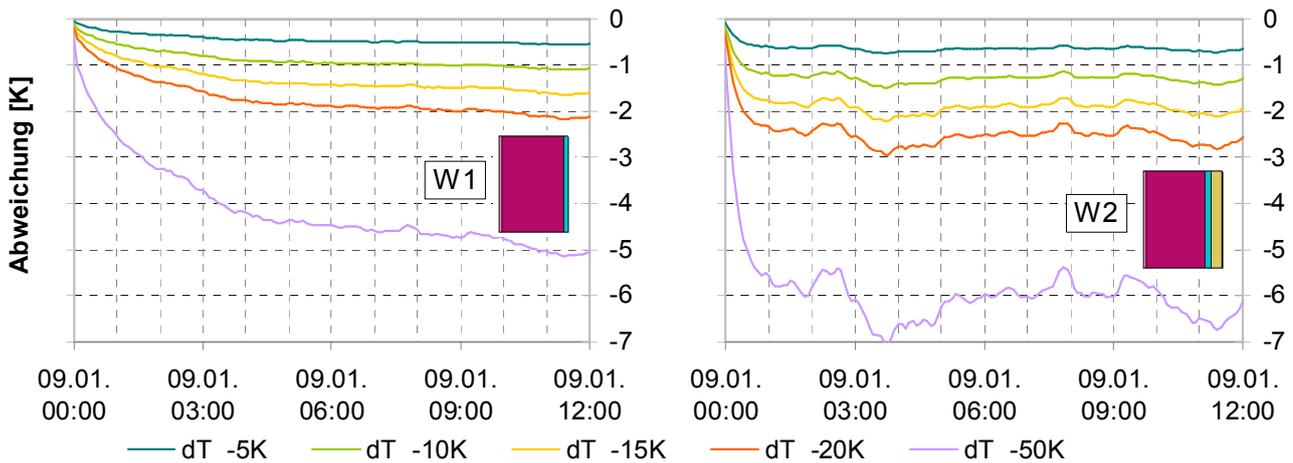
Eine leichte Aussenwandoberfläche mit einem Sichtfaktor  $F_{\text{sky}}$  von 32% weist bei einer Differenz zwischen Himmels- und Lufttemperatur von -20 K eine maximale Abkühlung von ca. 3 K auf. Eine in der Praxis typischerweise anzutreffende Abkühlung dürfte gemäss obiger Faustformel etwa 80%, also ca. 2.4 K betragen.

### Erkenntnisse zu „Himmelstemperatur und Sichtfaktor Himmel“

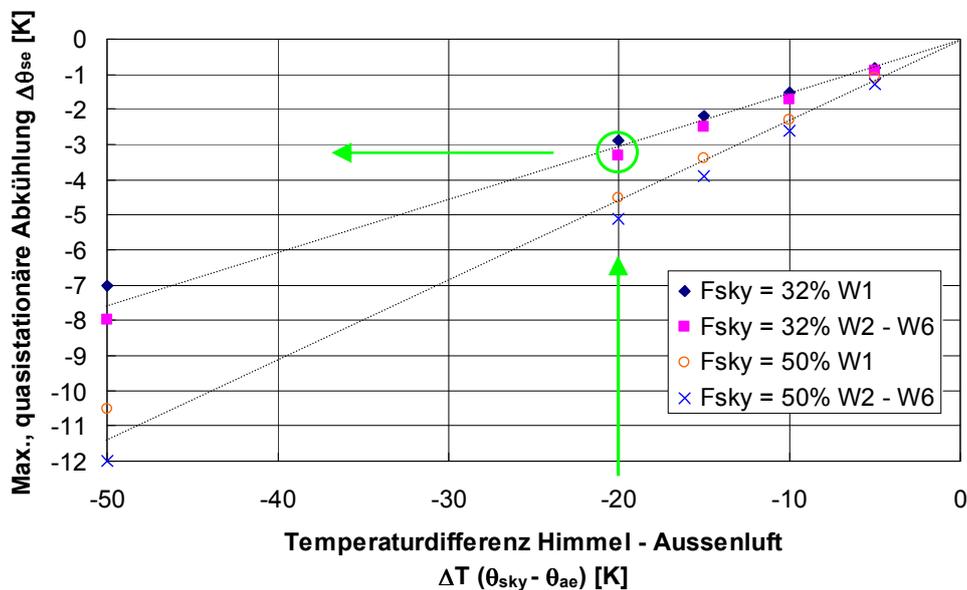
- Bei aufklarendem Himmel mit entsprechend abgesenkter Himmelstemperatur zeigen Aussenwände ein dynamisches Verhalten:  
Leichte Aussenwandoberflächen reagieren sehr schnell. Je nach Randbedingungen können solche Wände innerhalb einer Stunde um mehrere Kelvin abkühlen.  
Massive Aussenwandoberflächen reagieren träge. Das Ausmass der Abkühlung ist massgeblich von der Dauer der Exposition mit einer tieferen Himmelstemperatur und der thermischen Speichermasse an der Oberfläche abhängig.
- Wie stark eine Wand abkühlt, ist abhängig von der Himmelstemperatur, dem Sichtfaktor  $F_{\text{sky}}$  zum Himmel, der Windgeschwindigkeit und dem Wandtyp (thermische Masse an der Aussenwand-Oberfläche).
- Die maximalen, aus den Simulationsberechnungen ermittelten, Abkühlungen bei klarem Himmel betragen 7-8 K ( $F_{\text{sky}} = 32\%$ ) und 11-12 K ( $F_{\text{sky}} = 50\%$ ). Dies ist etwas mehr als Erfahrungswerte aus der Praxis zeigen. Ein Grund dafür ist, dass der in der Simulation herbeigeführte quasistationäre Zustand unter üblichen IR-Aufnahmebedingungen in der Regel nicht anzutreffen ist, denn im praktischen Fall sinkt mit der Strahlungstemperatur auch die Lufttemperatur ab (Faktor „Gradient“, Kap. 7.2.8). Dadurch sind die Oberflächen bei sinkenden Gradient „zu warm“ und wirken damit den oben berechneten Werten entgegen.



**Bild 7-13:** Sensitivität bezüglich Himmelstemperatur  $\theta_{sky}$  bei einem Sichtfaktor  $F_{sky}$  von 32%. Abkühlung der Oberflächentemperatur im Vergleich zum Referenzfall mit  $\theta_{sky} = \theta_{ae}$ . Erläuterungen zu den Bezeichnungen siehe bei Bild 7-10.



**Bild 7-14:** Sensitivität bezüglich IR-Umgebungstemperatur und Sichtfaktor Himmel. Dynamischer Verlauf in den ersten 12 Stunden nach Absenkung der Himmelstemperatur. Wände W1 und W2 mit  $F_{sky} = 32\%$ .



**Bild 7-15:** Sensitivität bezüglich IR-Umgebungstemperatur und Sichtfaktor Himmel. Maximale Abkühlungen der Oberflächentemperatur unter quasistationären Verhältnissen bei Windstille.

Abkühlung [K]	$F_{sky} = 32\%$		$F_{sky} = 50\%$	
	W1	W2 - W6	W1	W2 - W6
$\theta_{sky} - \theta_{ae}$ [K]				
-5	-0.8	-0.9	-1.1	-1.3
-10	-1.5	-1.7	-2.3	-2.6
-15	-2.2	-2.5	-3.4	-3.9
-20	-2.9	-3.3	-4.5	-5.1
-50	-7.0	-8.0	-10.5	-12.0

**Tabelle 7-2:** Zahlenwerte zu Bild 7-15. Maximale Abkühlung der Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von Himmelstemperatur, Sichtfaktor zum Himmel und Wandaufbau.

## 7.2.7 Sensitivität bezüglich Vorgeschichte Aussentemperaturverlauf

Gemäss Bild 4-5 hat die vergangene Temperaturentwicklung einen Einfluss auf die Bestimmung des idealen Aufnahmezeitpunktes für IR-Bilder. Bei der Sensitivitätsanalyse bezüglich Aussentemperaturverlauf geht es deshalb um die Frage, wie stark und wie lange die Oberflächentemperatur einer Wand durch die **zurückliegende** Temperaturentwicklung beeinflusst wird (Praxisbeispiel siehe Kapitel 4.3.2).

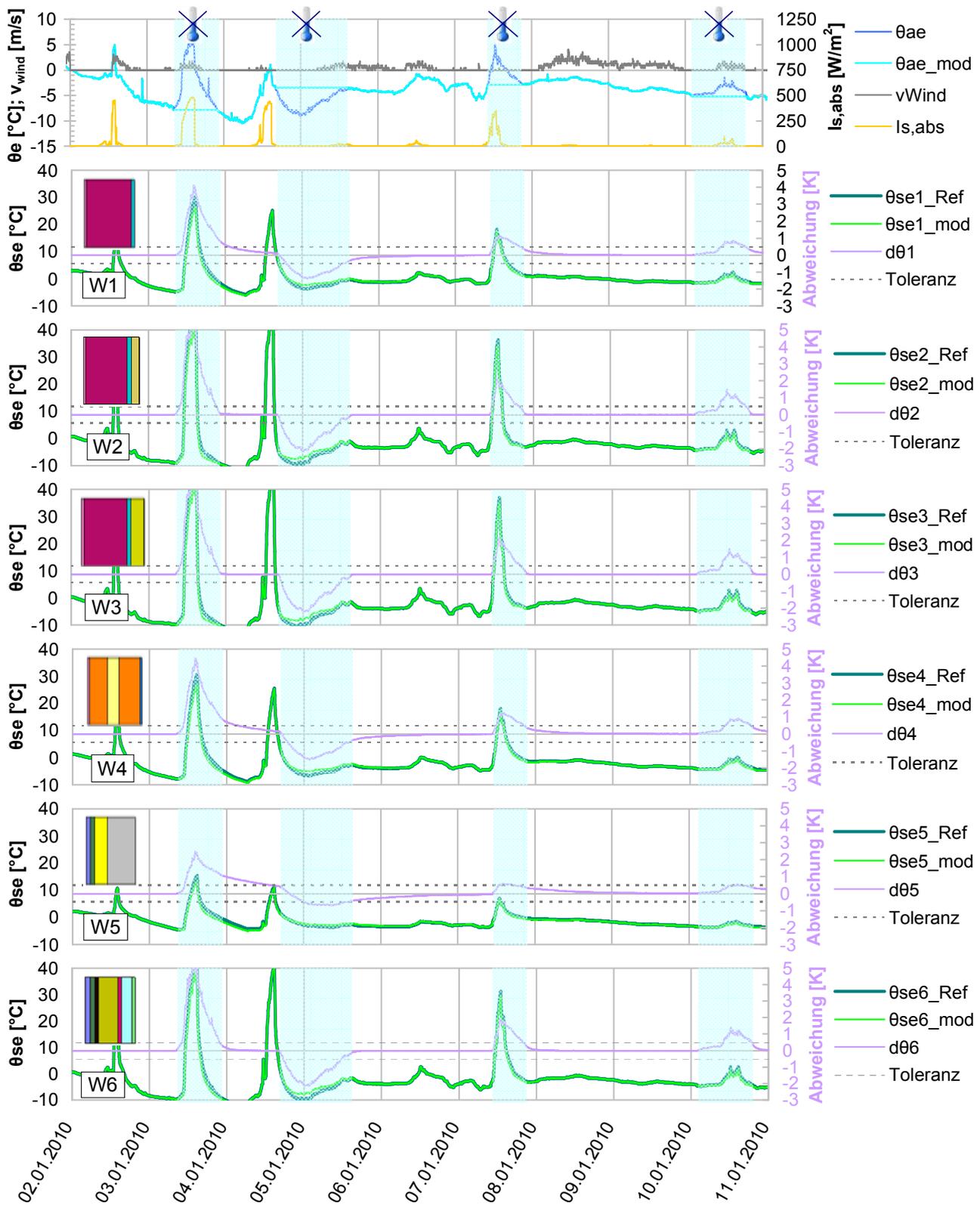
In den Simulationsberechnungen wird dem Referenzfall (mit originaler Aussentemperatur) zum Vergleich eine Variante gegenübergestellt, bei welcher einzelne „Peaks“ aus dem Aussentemperaturverlauf eliminiert wurden. In Bild 7-16 sind die gewählten Perioden anhand der hinterlegten Flächen erkennbar. Im Falle der Variante wird die Aussenlufttemperatur in den betrachteten Zeiträumen konstant gehalten.

Bei den Wänden mit „leichten“ Oberflächen (W2, W3, W6) ist erkennbar, dass die durch den Aussentemperaturverlauf bedingten Störungen gleichzeitig mit den Aussentemperatur-Peaks auf unterkritische Werte abklingen. Solche Wände können deshalb ohne Wartezeiten thermografiert werden, sobald ein mehr oder weniger stabiler Aussentemperaturzustand erreicht wird.

Für die Wände mit „massiven“ Oberflächen (W1, W4, W5) gelten die gleichen Aussagen prinzipiell auch, solange die Amplitude des Aussentemperaturverlaufs Werte von ca. 8 °C (wie z.B. am 07.01.2010) nicht überschreitet. Bei grösseren Tagesamplituden (z.B. 15 K am 03.01.2010) müsste prinzipiell einige Stunden abgewartet werden, bis die Störung abgeklungen ist. Allerdings treten solch hohe Aussentemperatur-Peaks meist in Zusammenhang mit intensiver Solarstrahlung auf, die ihrerseits restriktivere Wartezeiten zur Folge hat.

### Erkenntnisse bezüglich „Vorgeschichte Aussentemperaturverlauf“

- Die **alleine** durch den Aussentemperaturverlauf bedingten Energiespeichereffekte in Aussenwandoberflächen sind bei moderaten Tagesschwankungen (Amplituden bis ca. 8°C) gering. In solchen Fällen klingen die Störungen der Oberflächentemperaturen gleichzeitig mit der Aussentemperatur ab. Weil die Einflüsse anderer Effekte (z. B. von diffuser Solarstrahlung) nicht vom Einfluss des Aussentemperaturverlaufs unterscheidbar sind, ist in der Praxis tendenziell ein tieferer Grenzwert für unkritische Aussentemperatur-Amplituden festzulegen.  
Höhere Tagesschwankungen der Aussentemperatur treten in der Regel nur in Zusammenhang mit intensiver Solarstrahlung auf. Weil in diesen Fällen viel höhere Energiemengen im Spiel sind, ist der Einfluss des Aussentemperaturverlaufs dann von untergeordneter Bedeutung.
- Sofern nicht andere, restriktivere Kriterien (wie z.B. infolge von Solarstrahlung am Vortag) abgewartet werden müssen, können deshalb alle Wandtypen thermografiert werden, sobald ein einigermaßen stabiler Aussentemperaturzustand erreicht ist und allenfalls eine Sicherheits-Wartezeit von 1-2 Stunden abgewartet wurde.



**Bild 7-16:** Sensitivität bezüglich Aussentemperaturverlauf. Erläuterungen zu den Bezeichnungen siehe bei Bild 7-10.

## 7.2.8 Sensitivität bezüglich Aussenlufttemperatur-Gradient

Steigende oder sinkende Aussenlufttemperaturen (Ursachen: z.B. eintreffende Warm- oder Kaltfront) **während** einer Thermografiemessung verfälschen die Aussagekraft der Resultate. Für die Untersuchung des Einflusses eines anliegenden Aussentemperaturgradienten wurden deshalb während ausgewählter Zeitintervalle (schraffierte Bereiche in Bild 7-17) die Gradienten aus dem Aussentemperaturprofil entfernt und die resultierende Oberflächentemperaturentwicklung dem Referenzfall gegenüber gestellt.

Aus der Analyse des Aussentemperaturverlaufs lassen sich die auftretenden Gradienten (ohne nennenswerten Solareinfluss) grob in drei Kategorien einteilen:

- gering 0.00 – 0.15 K/h
- mittel 0.15 – 0.30 K/h
- hoch 0.30 – 0.50 K/h

Wie aus Bild 7-17 zu erkennen ist, hängt die resultierende Abkühlung respektive Erwärmung der Oberflächentemperatur von der Stärke des anliegenden Gradienten sowie der Dauer der Exposition ab.

Wie stark sich eine Änderung der Aussenlufttemperatur auf die Oberflächentemperatur überträgt, ist aus Bild 7-18 ersichtlich. Im linken Diagramm können die absoluten Gradienten der Oberflächentemperatur abgelesen werden, im rechten Diagramm sind die gleichen Daten in relativer Form dargestellt. Bei einem Aussentemperaturgradient von beispielsweise 0.4 K/h resultiert für die Wandkonstruktion W2 eine Oberflächentemperaturänderung von 0.2 °C/h (Diagramm links). Dies bedeutet, dass ca. 50% des anliegenden Aussentemperaturgradienten auf die Oberflächentemperatur „übertragen“ wird (Diagramm rechts).

Abgesehen von den „Ausreissern“ (kurzes Ereignis Nr. 5 mit geringem Gradient respektive sehr langes Ereignis Nr. 2), ist die Übertragung des Aussentemperaturgradienten auf die Oberflächentemperatur nur geringfügig vom Gradienten selber abhängig (Bild 7-18, rechts). Es lassen sich deshalb die folgenden groben Richtwerte für die maximal zu erwartenden Übertragungsfaktoren angeben:

$\text{Übertragungsfaktor} = \frac{\text{Oberflächentemperatur} - \text{Gradient}}{\text{Aussentemperatur} - \text{Gradient}}$	$\frac{\Delta\theta_{se}}{\Delta\theta_{ae}}$
Wände mit leichter Oberfläche (W2, W3, W6)	50 %
Wände mit mittelschwerer Oberfläche (W1, W4)	35 %
Wände mit schwerer Oberfläche (W5)	20 %

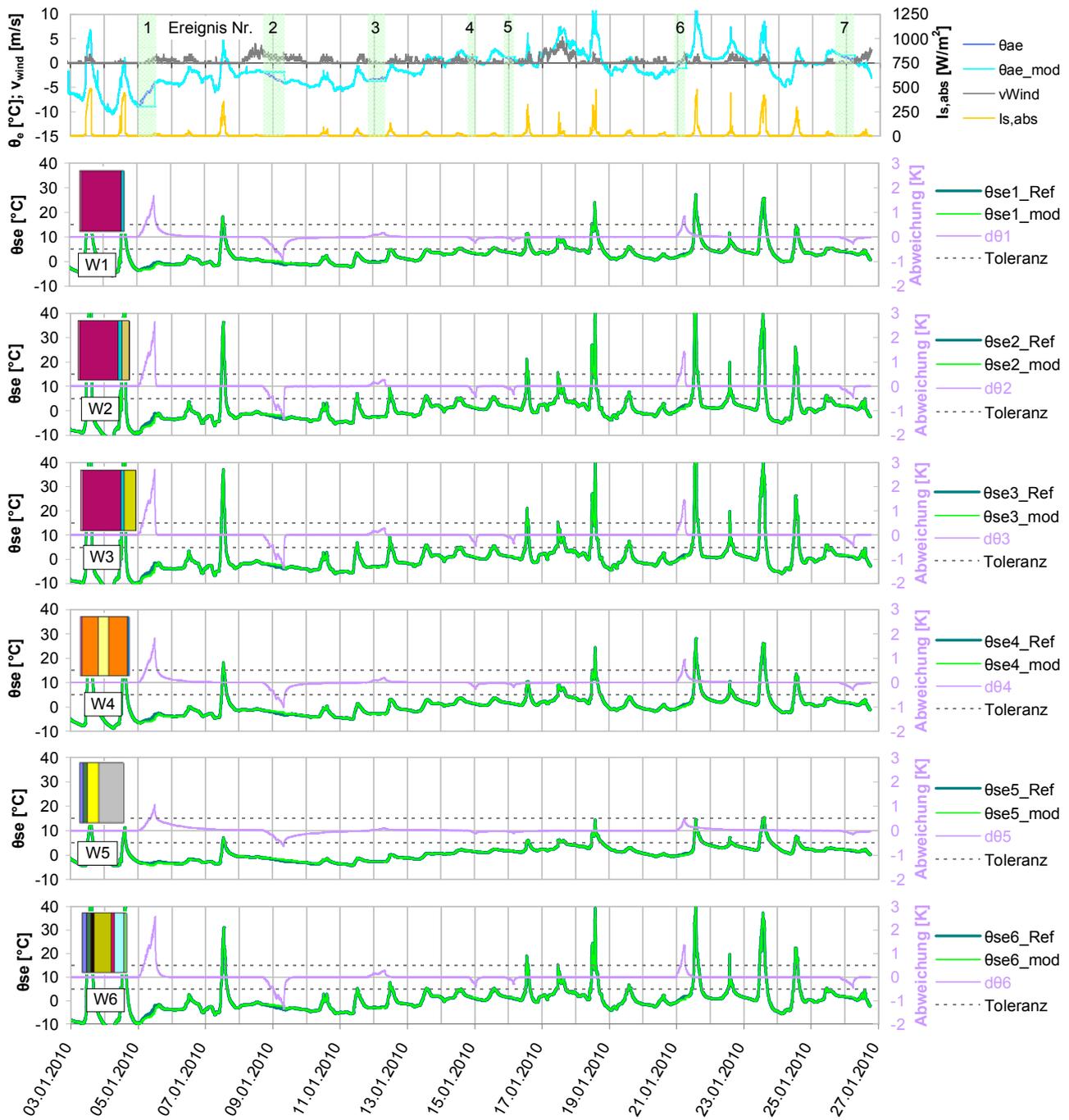
**Tabelle 7-3:** Übertragungsfaktoren des Aussentemperatur-Gradienten auf die Oberflächentemperaturen.

Die Übertragungsfaktoren können zur Beurteilung einer laufenden Temperaturentwicklung verwendet werden. Ob die Aussentemperaturbedingungen in einem konkreten Fall als genügend stabil bezeichnet werden können oder nicht, wird anhand des folgenden Beispiels veranschaulicht.

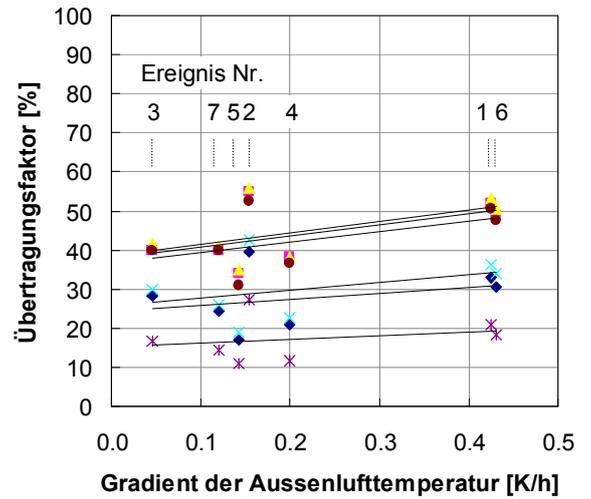
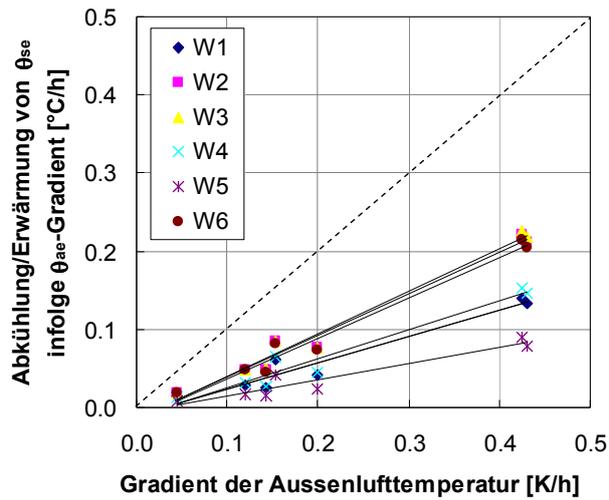
Annahmen:

- Toleranz der Genauigkeit der Oberflächentemperatur-Bestimmung 0.5 K
- Anliegender Aussentemperaturgradient 0.25 K/h
- Leichte Wand, deshalb massgebender Übertragungsfaktor 50%

Aufgrund dieser Randbedingungen wird sich ein Oberflächentemperaturgradient von 50 % \* 0.25 K/h = 0.125 °C/h einstellen. Dies bedeutet, dass die instationäre Oberflächentemperatur-Abweichung ab 4 Stunden nach Einsetzen des Aussentemperatur-Gradienten grösser ist als der festgelegte Toleranzwert.



**Bild 7-17:** Sensitivität bezüglich schnelle Änderungen der Aussenlufttemperatur. Erläuterungen zu den Bezeichnungen siehe bei Bild 7-10.



**Bild 7-18:** Übertragung des Aussenlufttemperaturgradienten auf die Oberflächentemperatur. Links absolute Werte, rechts relativ zum Aussenlufttemperaturgradient.

### Erkenntnisse bezüglich „Aussenlufttemperatur-Gradient“

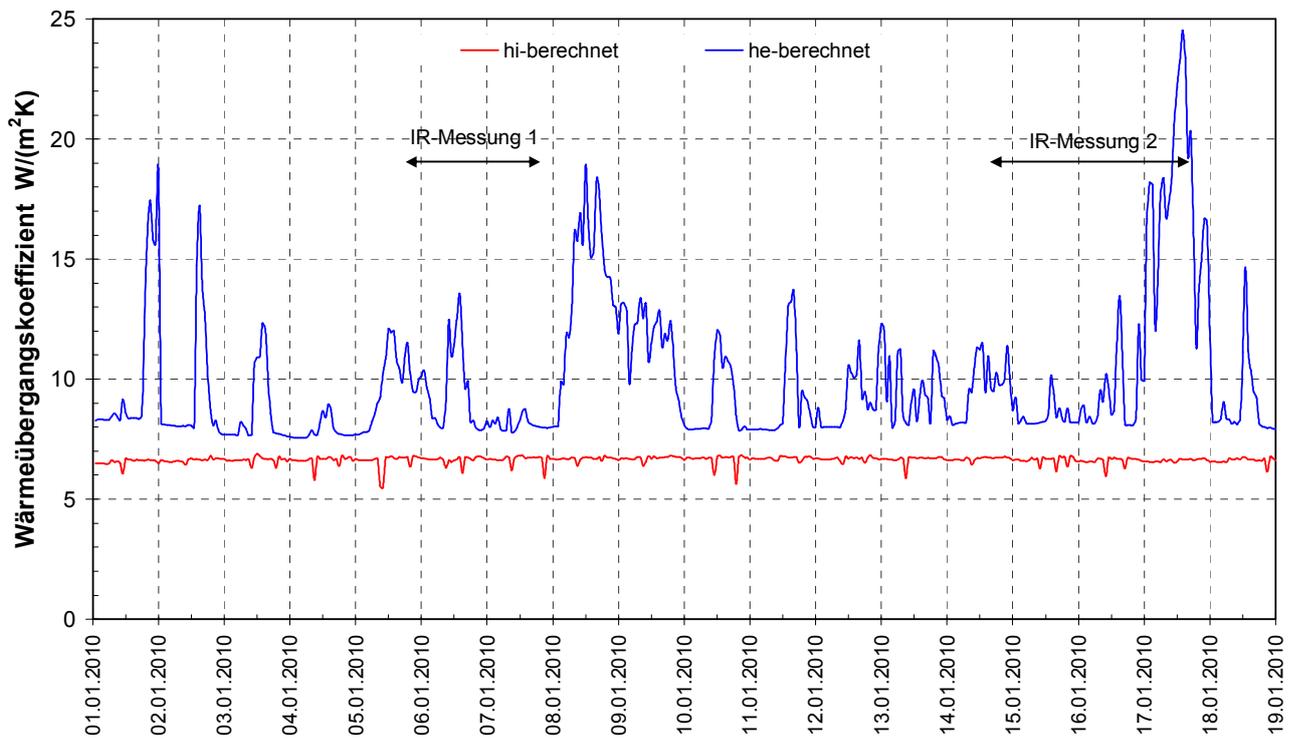
- Die Übertragung des Aussenlufttemperatur-Gradienten auf die Oberflächentemperatur ist vom Wandtyp, von der Stärke des Gradienten sowie von der Dauer der Exposition abhängig.
- Richtwerte für die Übertragungsfaktoren:
  - leichte Aussenwandoberflächen (W2, W3, W6): 50%
  - mittelschwere Aussenwandoberflächen (W1, W4): 35%
  - schwere Aussenwandoberflächen (W5): 20%
- Aus dem Übertragungsfaktor und der Dauer der Exposition lässt sich abschätzen, wie schnell und wie stark sich die Oberflächentemperatur einer Wand bei anliegendem Aussenlufttemperatur-Gradient verändert.

### 7.3 Stationäre, stündliche Simulation

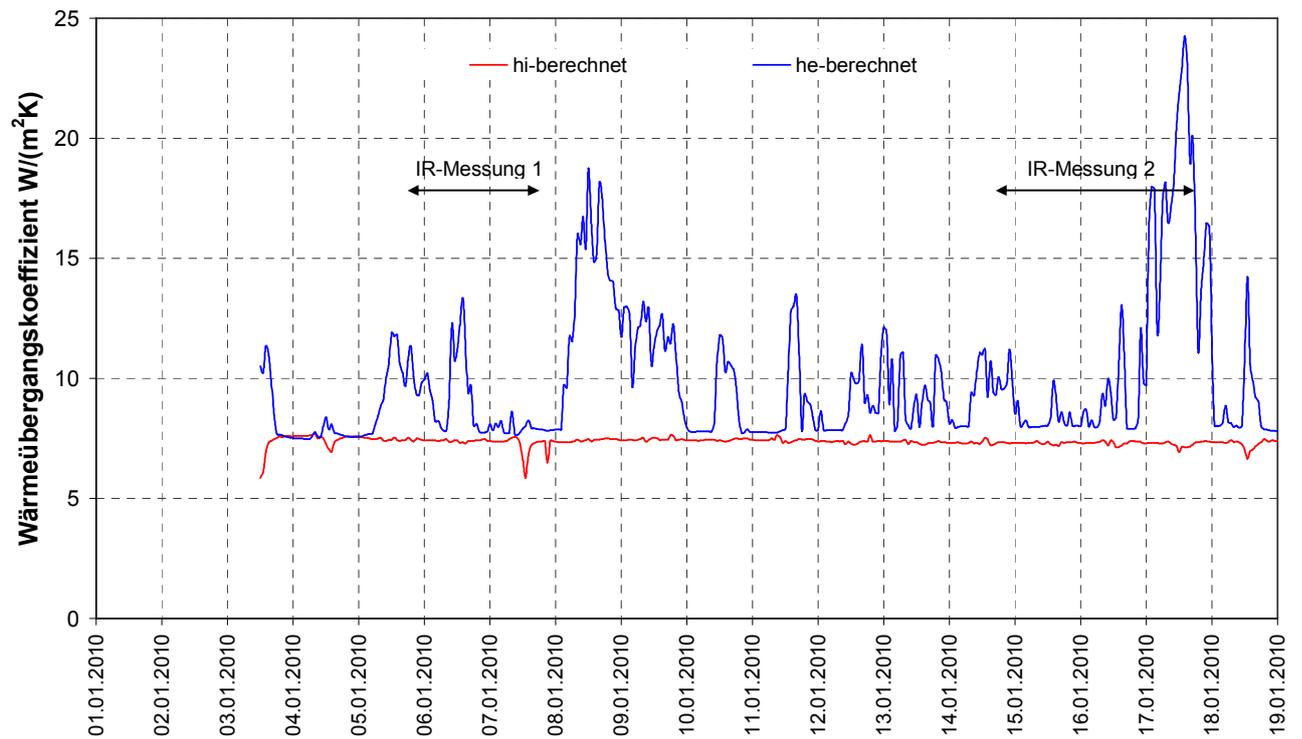
Um quantitative Aussagen zum Wärmedämmvermögen eines Bauteiles auf Grund von Thermografiebildern machen zu können, d. h. eine Abschätzung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  vorzunehmen, müssen die in der Norm EN ISO 6946 [6] verwendeten Definitionen und Berechnungsgrundlagen verwendet werden. Im Anhang A2 (des vorliegenden Berichtes) sind die erforderlichen Berechnungsformeln zusammengestellt. Diese berücksichtigen den Einfluss der klimatischen Randbedingungen Wind, Lufttemperatur, Strahlungstemperatur und Sonneneinwirkung. Der Thermograf kann damit eine Bestimmung der zu erwartenden Oberflächentemperatur bei einem angenommenen  $U$ -Wert vornehmen und diese mit der gemessenen Temperatur vergleichen. Bei massiven Bauteilen muss der Thermograf in der Lage sein, die Wirkung der Masse auf die Temperaturentwicklung abzuschätzen und den Anwendungsbereich der stationären Wärmetransportgleichung einzugrenzen.

#### 7.3.1 Berechnung der Wärmeübergangsbedingungen

In Bild 7-19 ist der berechnete Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten an der Innen- und Aussenseite der Wände dargestellt. Während an der Innenseite praktisch konstante Bedingungen herrschen, ist an der Aussenseite infolge Windeinwirkung ein grosser Schwankungsbereich zu erkennen. Es sind jedoch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten einzelne Perioden mit stabilen Verhältnissen vorhanden. In Bild 7-20 ist der Verlauf des berechneten Wärmeübergangskoeffizienten an der Innen- und Aussenseite der Verglasungen dargestellt. Das Niveau des Wärmeübergangskoeffizienten auf der Innenseite liegt etwas höher, da die Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Innenoberfläche grösser sind.



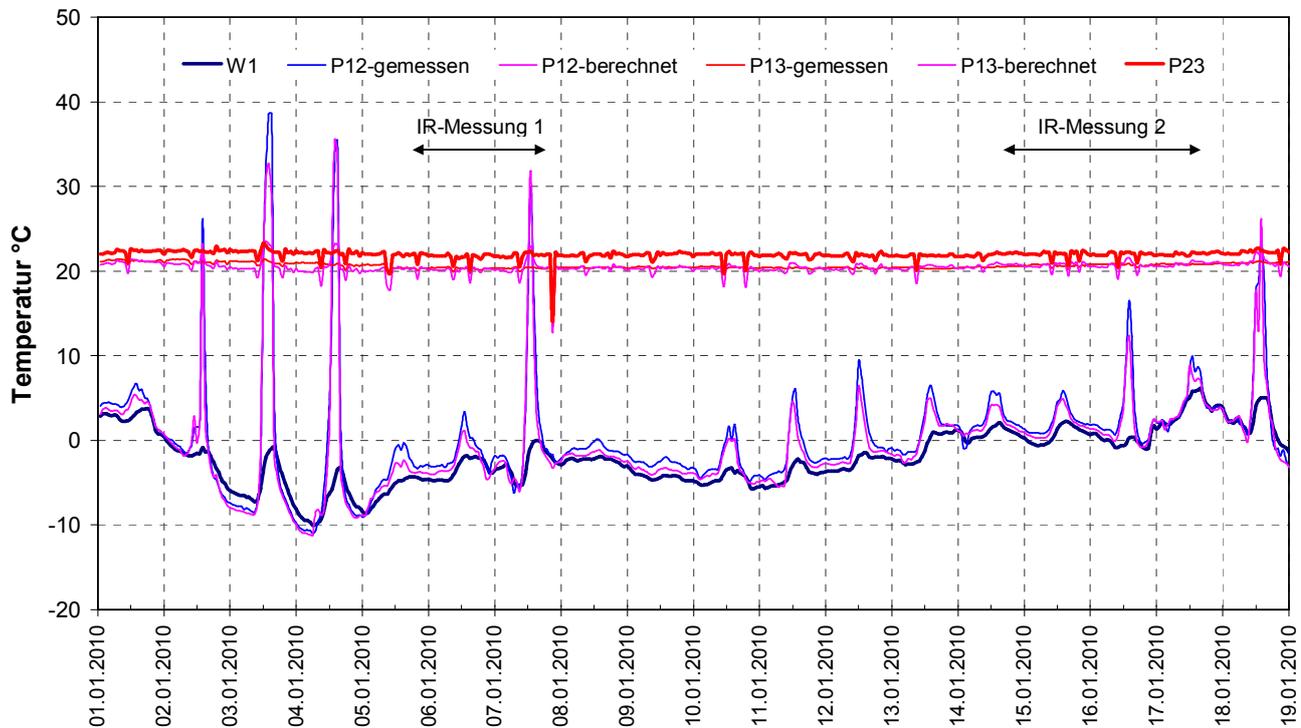
**Bild 7-19:** Verlauf der berechneten Wärmeübergangskoeffizienten an den Wänden innen und aussen.



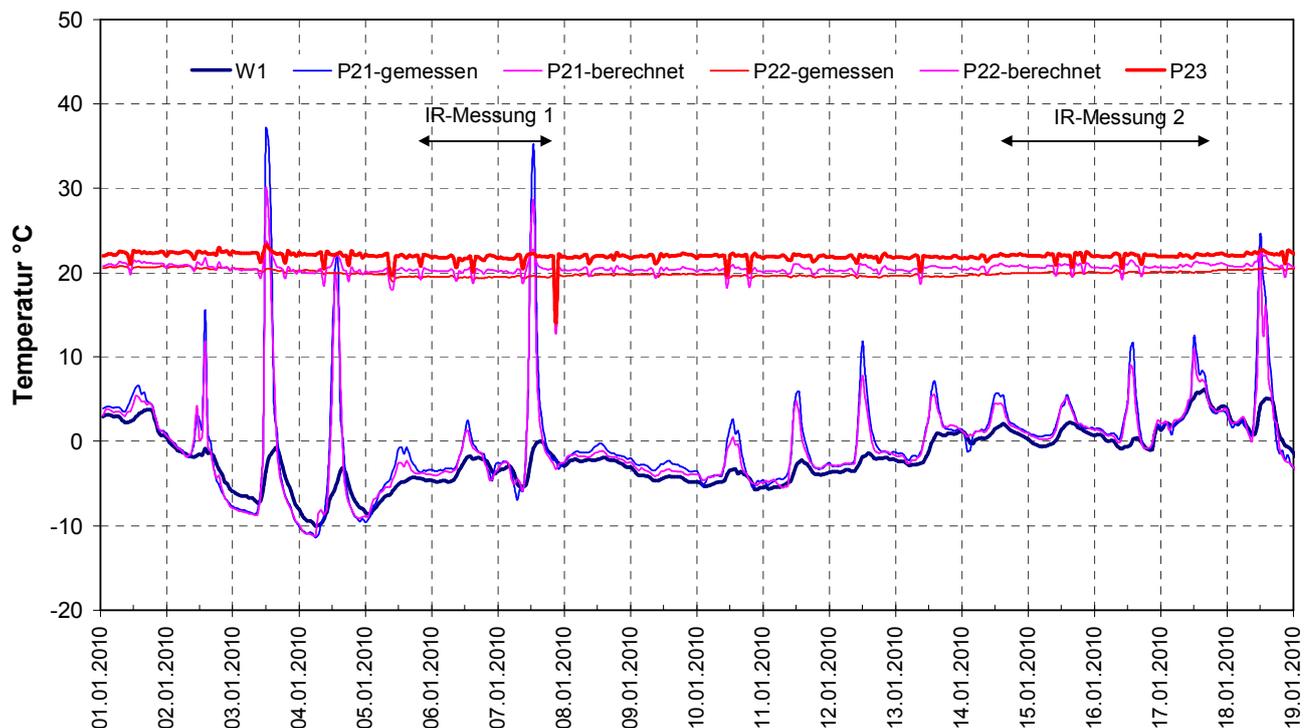
**Bild 7-20:** Verlauf der berechneten Wärmeübergangskoeffizienten an den Verglasungen innen und aussen.

### 7.3.2 Vergleich der erwarteten und gemessenen Oberflächentemperaturen

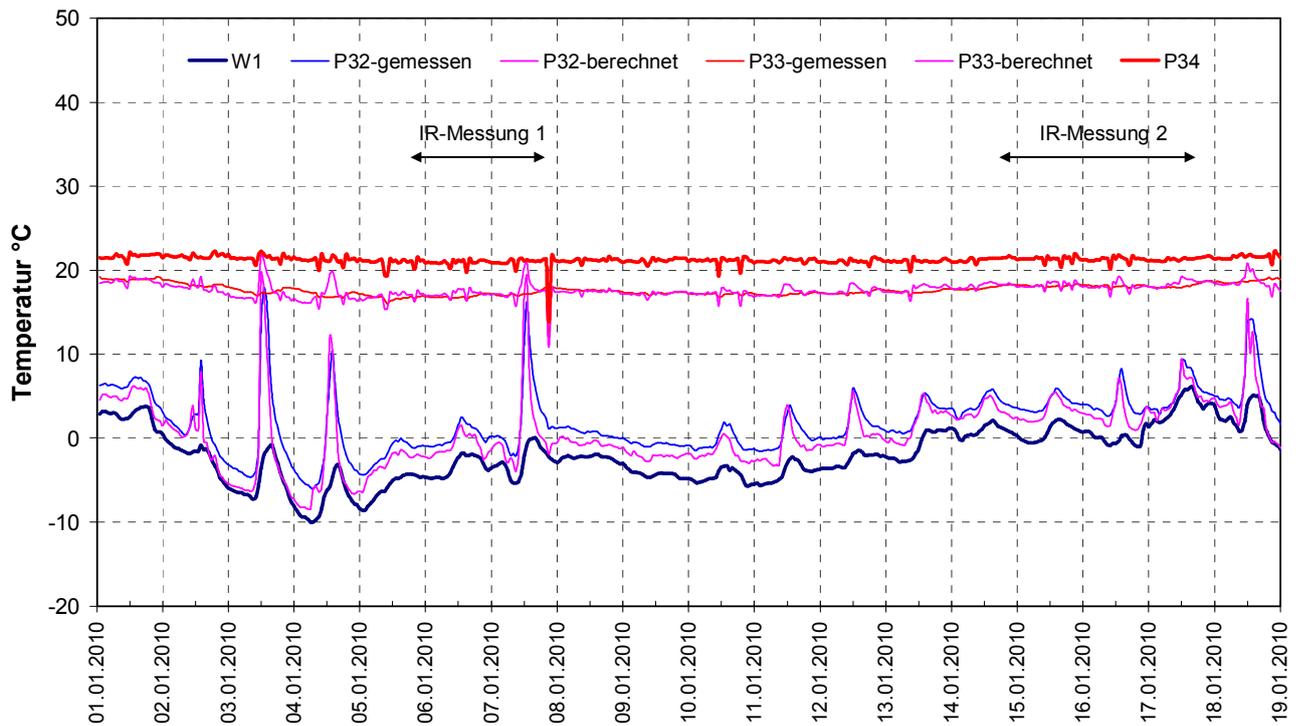
Die nachfolgenden Bilder 7-21 bis 7-25 zeigen den Verlauf der berechneten und der gemessenen Oberflächentemperaturen an den 3 Wandquerschnitten und an den beiden Verglasungen, jeweils zusammen mit der Innen- und der Aussenlufttemperatur (W1).



**Bild 7-21:** Vergleich der berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen der Wand 1.

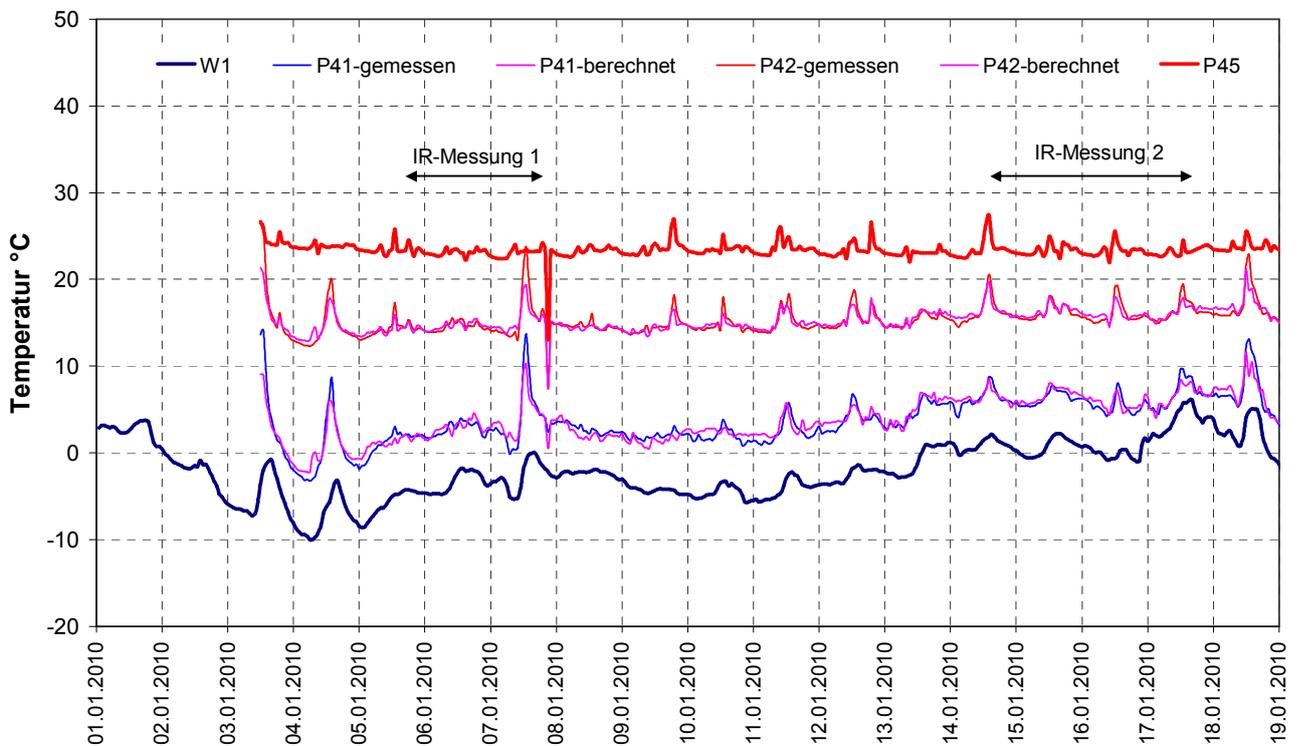


**Bild 7-22:** Vergleich der berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen der Wand 2.

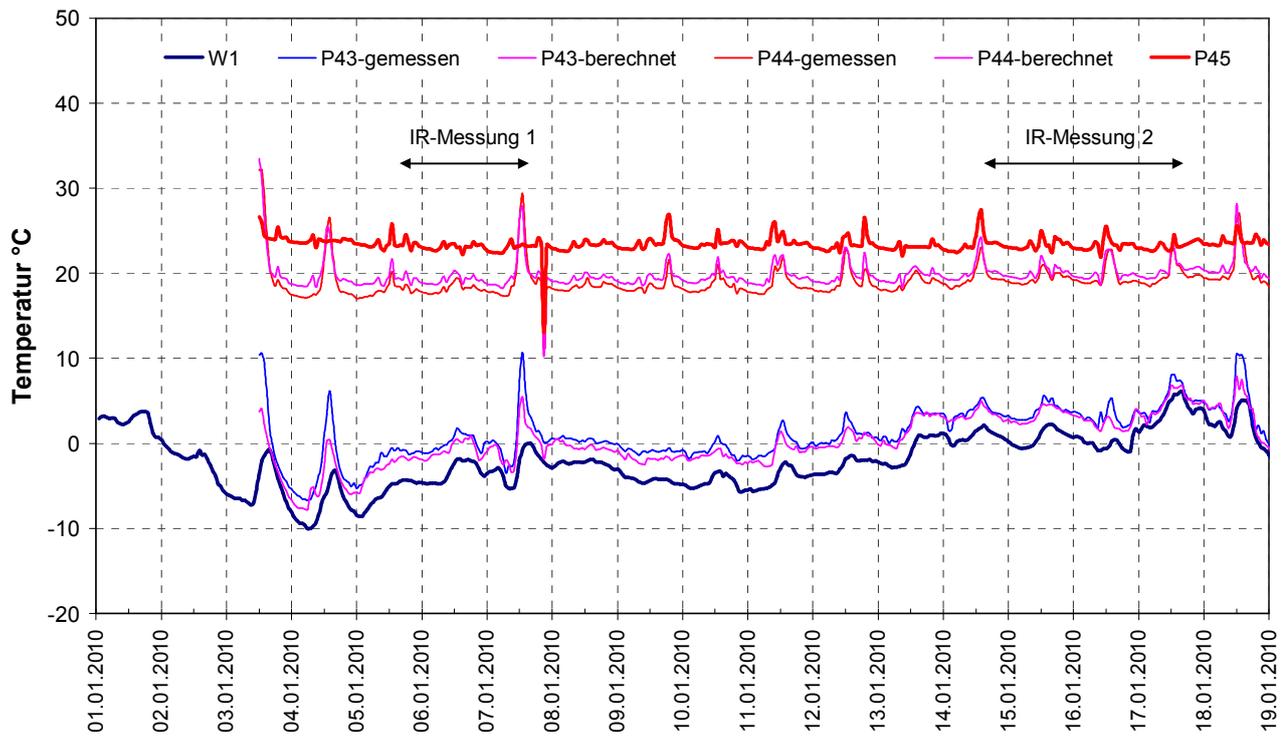


**Bild 7-23:** Vergleich der berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen der Wand 3.

Bei Wand 3, dem Verbandmauerwerk, ist deutlich der Einfluss der Masse auf die Temperaturentwicklung auf der Aussenseite erkennbar, die Trägheit der Wand verhindert eine rasche Temperaturänderung an der Oberfläche.



**Bild 7-24:** Vergleich der berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen der Verglasung 1.

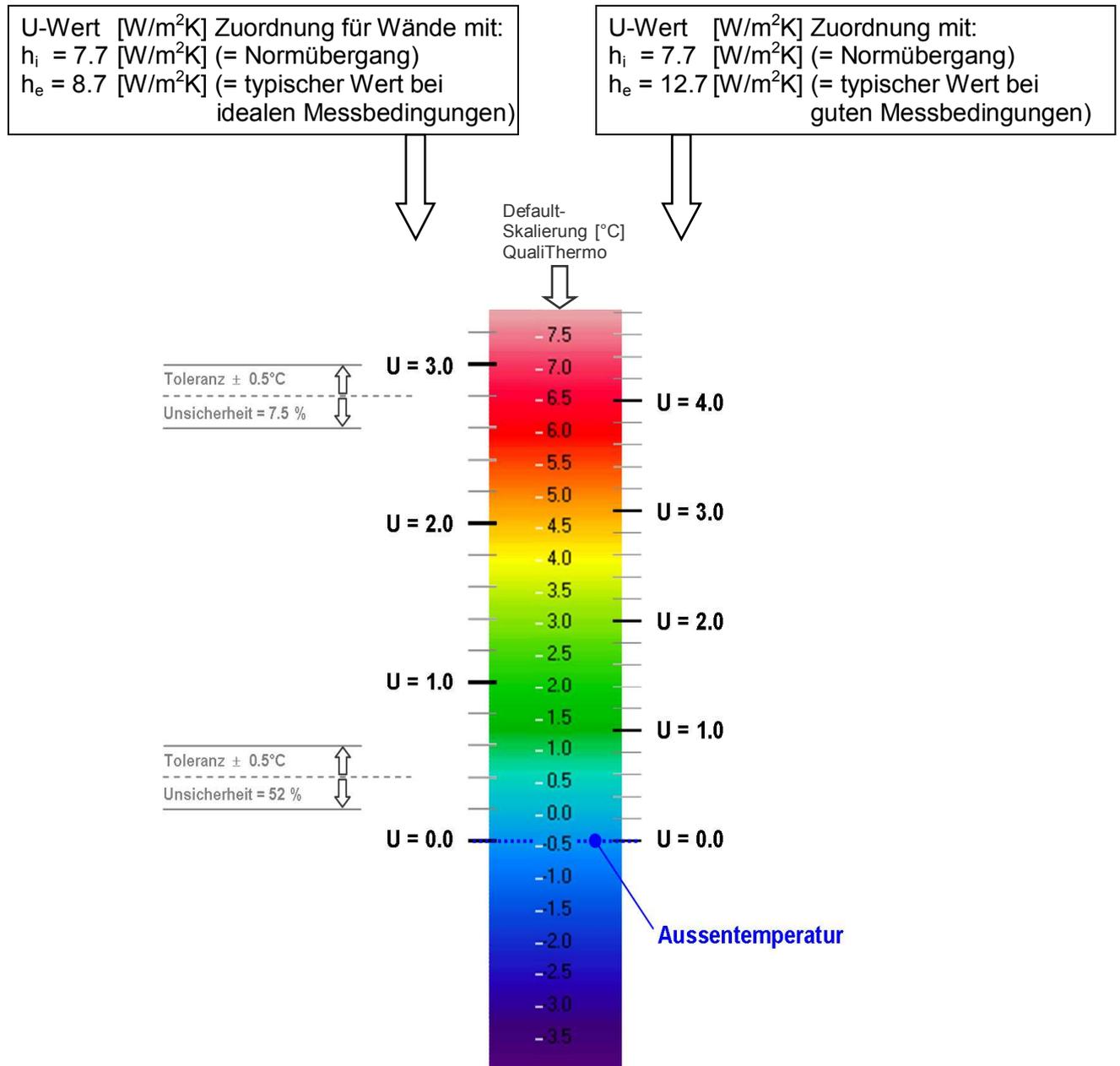


**Bild 7-25:** Vergleich der berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen der Verglasung 2.

## 8 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Hinweise für die Praxis

### 8.1 Standard-Skalierung von Thermogrammen für energetische Analysen

Bei guten IR-Aufnahmebedingungen, können mittels der Methode QualiThermo aus Thermogrammen Abschätzungen zum Wärmedurchgang abgeleitet werden (Bild 8-1). Gute IR-Randbedingungen herrschen dann, wenn die verschiedenen Meteo-Faktoren in Bezug auf die zu beurteilende Konstruktion nur eine geringe Abweichung der Oberflächentemperatur (vgl. Kap. 8.4) bezüglich des stationären Zustandes ergeben.



**Bild 8-1:** Mit QualiThermo resultierende U-Wert-Farbzugeordnungen bei stationären Bedingungen.

**Achtung:** Diese Darstellung sollte im praktischen Fall (im Prüfbericht) so nicht verwendet werden, da sie für den Einzelfall nie genügend genau zutrifft und zu falschen Genauigkeiten verleitet, da die ganzen instationären Verhaltensweisen nicht enthalten sind.

Für einen Vergleich mit Norm U-Werten ( $h_e = 25.0 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ) sind die aus den Farben ermittelten U-Werte auf Normbedingungen umzurechnen.

Die Betrachtung von Bild 8-1 gilt nur für Oberflächen mit hohem Emissionsgrad wie z.B. verputzte Wände. Hinweis zu Gläsern und Wärmebrücken siehe bei Bild 8-2.

## Interpretationsschlüssel für Bauteile und Schwachstellen

Einen verallgemeinerten Interpretationsschlüssel für IR-Bilder zeigt Bild 8-2.

**Aussenwände:** Ungedämmte Wände sind meist grün (U-Wert-Bereich = ca.  $1.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Solche Wärmeverluste können mit „*erheblich*“ bezeichnet werden.

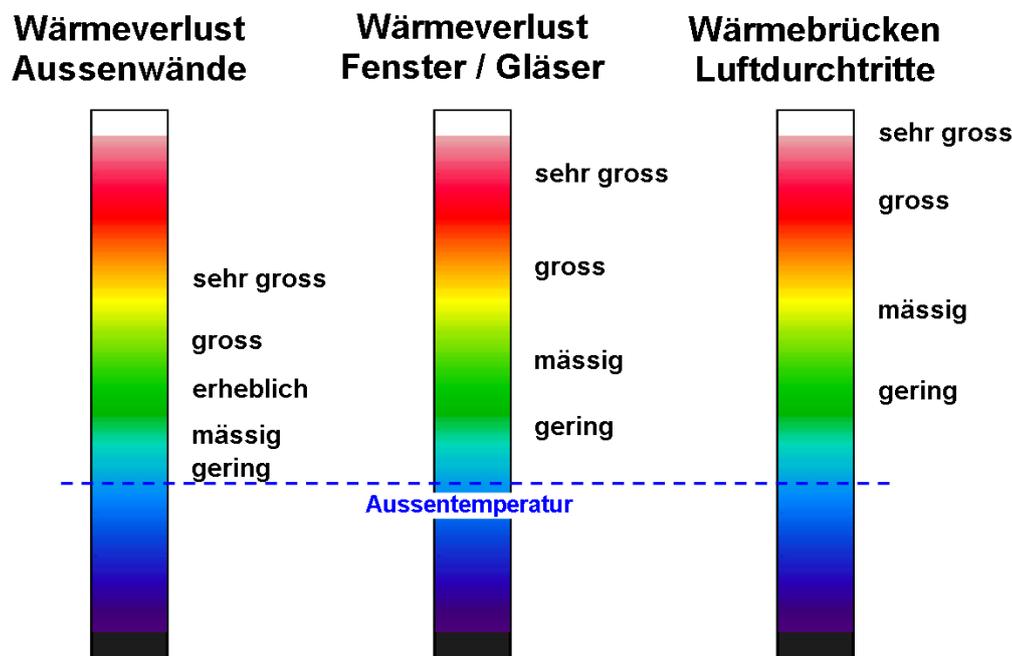
Neuere, gedämmte Wände sind meist blau (U-Wert-Bereich  $< \text{ca. } 0.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Solche Wärmeverluste können mit „*mässig oder gering*“ bezeichnet werden. Zusatzinformationen über Dämmstärken oder Hinweise über Konstruktionsdetails und Erstellungs- bzw. Sanierungsjahr ermöglichen in diesen Fällen bessere Einordnungen.

**Vorsicht bei Gläsern!** Bei Fensterscheiben ist die mit IR gemessene Temperatur für die U-Wertskala tendenziell zu tief, weil sich die meist kühlere Umgebungstemperatur im Glas mit ca. 16 % spiegelt (Epsilon Glas = 0.84). Diese Problematik könnte verhindert werden, wenn Gläser mit einer kurzwelligigen IR-Kamera gemessen würden (Strahlungsbereich 3-5  $\mu\text{m}$ , vgl. Bild A-7, Floatglas).

In älteren Gebäuden sind zudem die Heizelemente oft unter den Fenstern angebracht, womit im Schaltzyklus der Heizung viel warme Luft zu den inneren Glasoberflächen aufsteigt.

Bei **Wärmebrücken** kann nicht einfach ein U-Wert aus der Grafik 8-1 abgelesen werden, da bei solchen Stellen die Innentemperaturen normalerweise höher oder tiefer sind und/oder die inneren Übergänge nicht den Normalbedingungen entsprechen.

Die Aussagen im Interpretationsschlüssel sind relativ, also bezogen auf das Potenzial des Bauteils anzusehen. Bei Abschätzungen zum Gesamtenergieverlust eines Gebäudes sind daher auch die Flächenanteile zu beachten. „*Erhebliche*“ Wärmeverluste der Wände können viel höhere Energieverluste zur Folge haben, als eine einzelne Haustür oder eine Wärmebrücke mit „*grossen*“ Verlusten.



**Bild 8-2:** Möglicher Interpretationsschlüssel für standardisierte Wärmebilder bei guten Aufnahmebedingungen.

## 8.2 Zusammenfassende Erkenntnisse aus den Sensitivitätsanalysen

Die folgende Zusammenstellung enthält eine Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Sensitivitätsanalysen, bzw. eine Repetition, Komprimierung und Erläuterung der wichtigsten Resultate für den praktischen Einsatz. Es ist jedoch unbedingt zu beachten, dass sich die Meteo-Faktoren sowie die Gebäudelage und die Gebäudekonstruktion gegenseitig beeinflussen. Damit ist es möglich, dass eine meteo-spezifische Aussage (für einen isolierten Meteo-Vorgang) im konkreten Fall wegen anderen, gewichtigeren Faktoren nicht mehr gilt!

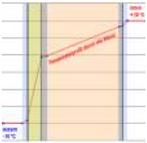
**Es ist Sache des Thermografen, diese Wechselwirkungen und die Prioritäten zu erkennen!**

Im Folgenden werden die 6 untersuchten Wandtypen (W1 bis W6, vgl. Anh. A1.1) sprachlich nur noch in 3 Klassen eingeteilt:

1. Wände mit aussenseitig wenig thermisch wirksamer Masse (mit AWD, z.B. W2 / W3 / W6)
2. Wände mit aussenseitig thermisch wirksamer Masse (gemauerte Konstruktionen z.B. W1 / W4)
3. Wände mit aussenseitig viel thermisch wirksamer Masse (mit Beton, z.B. W5)

Meteo-Vorgang	Erkenntnisse zu den Auswirkungen
<p>Solarstrahlung am Vortag (aus Kap. 7.2.4)</p> 	<div data-bbox="411 734 1474 922"> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Zeitdauer bis zum Abklingen eines <b>Solareinflusses</b> auf einen Restwert von 0.5°C auf der Oberfläche (Toleranzkriterium) ist stark konstruktionsabhängig.</li> <li>▪ Bei den Wänden der Klasse 1 wird während eines Solareignisses nur sehr wenig Energie gespeichert. Es dauert nur wenige Stunden, bis die Oberflächentemperatur in Folge einer „Sonnenstörung“ unter den Toleranzwert 0.5°C abgeklungen ist.</li> <li>▪ Für Wände der Klasse 2 gilt: Es muss mindestens ein Folgetag ohne nennenswerte Solareinwirkung abgewartet werden, bevor sie thermografiert werden können.</li> <li>▪ Für Wände der Klasse 3 gilt: Es müssen mindestens zwei Folgetage ohne nennenswerte Solareinwirkung abgewartet werden, bevor sie thermografiert werden können.</li> </ul> <div data-bbox="411 1294 1474 1662"> </div> <p><b>Bild 8-3: IR-Einsatzzeiten für spezifische Konstruktionen</b></p> <p><b>Wände mit anderen Orientierungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Aussagen oben sind abgeleitet für Wände mit Südwest Orientierung. Wände mit Nord-Ausrichtung sind bezüglich Solareinfluss deutlich unkritischer. Wände mit Süd-Ausrichtung erhalten jedoch ca. 20% mehr Solarstrahlung. Dem entsprechend erhöhen sich die Abklingzeiten der solaren Störungen. Allerdings wird dieser Effekt teilweise dadurch kompensiert, dass die Energie im Tagesverlauf früher eingestrahlt wird und der Abklingvorgang folglich früher einsetzt.</li> <li>▪ Weil aus den Sonnendiagrammen (Meteoschweiz) keine Strahlungsintensitäten hervorgehen, ist bei der Einschätzung der Situation Vorsicht angebracht und es sind unbedingt auch die Temperaturdaten zu beobachten.</li> </ul>

Windgeschwindigkeit  
(aus Kap. 7.2.5)



- Leicht pulsierende Winde mit Spitzen bis ca. 2 m/s sind auch während Thermografmessungen unkritisch.
- Störungen infolge von Windeinfluss klingen relativ schnell ab. Wartezeiten je nach Situation bis max. 6 Stunden. Das Ende lang anhaltender Windperioden ist auf jeden Fall abzuwarten.
- Die Wände der Klasse 1 reagieren deutlich schneller. Sie sind deshalb auch schneller wieder innerhalb der Toleranzgrenze (< 1 Std.).

**Hinweise zu den Wärmeübergängen:**

- Für die Berechnung von Norm U-Werten wird ein äusserer Standard - Wärmeübergangskoeffizient von 25 W/m<sup>2</sup>K eingesetzt. Dieser setzt sich aus einem konvektiven (ca. 20 W/m<sup>2</sup>K) und einem radiativen Anteil (ca. 5 W/m<sup>2</sup>K) zusammen.
- Die aus den Messungen am Testgebäude ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten betragen unter guten IR-Meteo-Bedingungen 8 - 9 W/m<sup>2</sup>K und sind damit deutlich tiefer, als der Standard-Wärmeübergangskoeffizient. Unter ungünstigen Bedingungen erhöht sich vor allem der konvektive Anteil.

Himmels-  
temperatur und  
Sichtfaktor Sky  
(aus Kap. 7.2.6)



**Entscheidend mitwirkende Faktoren:**

Bei aufklarendem Himmel mit entsprechend abgesenkter Strahlungstemperatur zeigen Aussenwände ein sehr dynamisches Verhalten:

Aussenwände der Klasse 1 reagieren sehr schnell. (Abkühlung innerhalb 1 Std. um mehrere °C)!

Aussenwände der Klasse 2 und 3 reagieren träge. Das Ausmass der Abkühlung ist massgeblich abhängig von:

- der Dauer und der Intensität der tieferen Himmelstemperatur
- dem Sichtfaktor (Sky)
- der thermischen Speichermasse an der Oberfläche.

Die maximalen, aus den Simulationsberechnungen ermittelten Abkühlungen bei klarem Himmel betragen 7 - 8°C bei Sichtfaktor = 32% und 11 - 12°C bei Sichtfaktor = 50 %.

Weil quasistationäre Werte nicht erreicht werden, sind in der Praxis nur etwa 80 % der angegebenen Abkühlungen anzutreffen (vgl. unten).

Berücksichtigung in  
QualiThermo

**Manuelle Skalierungsanpassung**

Absenkung der unteren Skalengrenze

um den Faktor C. Unterkühlung  
C = 80 % von 0.15°C / °C ΔT

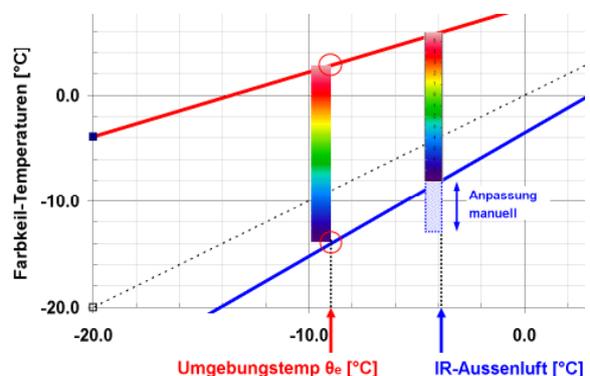
d.h.  $C = 0.12 \cdot \Delta T$

(ΔT = Differenz zwischen  
Luft- und Himmelstemperatur)

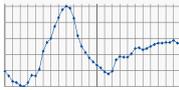
Praktisches Maximum für C: ca. 5°C.

**Skalierung basierend auf  
der Umgebungstemperatur  $\theta_e$**

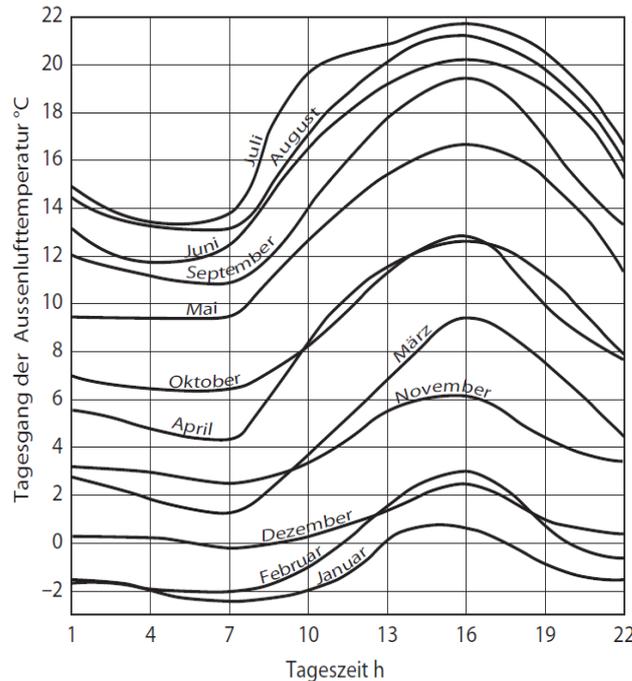
Mit berechneter oder gemessener  
Himmelstemperatur, siehe Kap. 5.4.2.



Vorgeschichte  
Aussentemperaturverlauf



- Die **alleine durch den Aussentemperaturverlauf** bedingten Energiespeichereffekte in Aussenwandoberflächen sind bei moderaten Tagesschwankungen (Amplituden bis ca. 8°C) gering. In solchen Fällen klingen die Störungen der Oberflächentemperaturen gleichzeitig mit der Aussentemperatur ab.
- Weil andere Effekte (z. B. diffuse und direkte Solarstrahlung) in den meisten Fällen den Aussentemperaturverlauf stark beeinflussen, ist in der Praxis für unkritische Aussentemperatur-Amplituden ein deutlich niedrigerer Wert anzustreben. Ein noch akzeptabler Praxiswert liegt bei ca. 5 K, Idealwerte liegen bei 2 - 3 K.

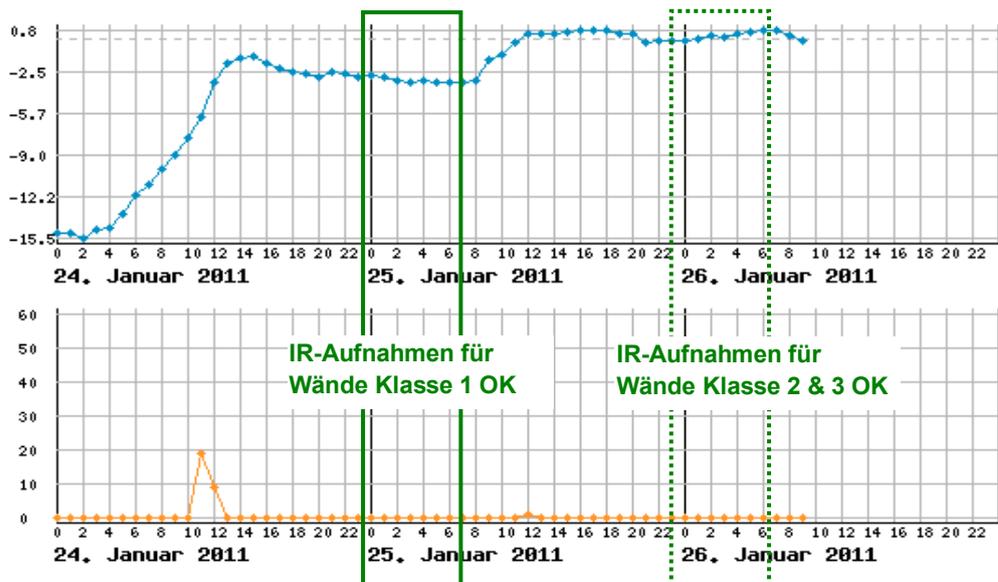


**Bild 8-4:** Monatsmittel der Tagesgänge (Amplituden) von Zürich [7].

Diese Mittelwerte sind gegenüber den einzelnen Tageswerten stark gedämpft!

Jan.	3.2°C
Feb.	4.6°C
März	8.0°C
April	8.3°C
Mai	7.4°C
Juni	8.4°C
Juli	8.3°C
Aug.	8.2°C
Sept.	8.6°C
Okt.	7.6°C
Nov.	3.8°C
Dez.	2.6°C

- Fallbeispiel Aussentemperaturverlauf: Am 24.1.2011 stiegen die Temperaturen infolge einer Warmfront stark an (vgl. Bild 8.5). Gleichzeitig stellte sich starke Bewölkung ein. Der Solareintrag am 24.1. ist jedoch marginal. Trotz dem starken Temperaturanstieg ( $\Delta T$  13 bis 14 K) können in der Folgenacht Wände der Kategorie 1 thermografiert werden. Bei Wänden mit thermischer Masse an der Oberfläche sollte jedoch noch ein Tag abgewartet werden.



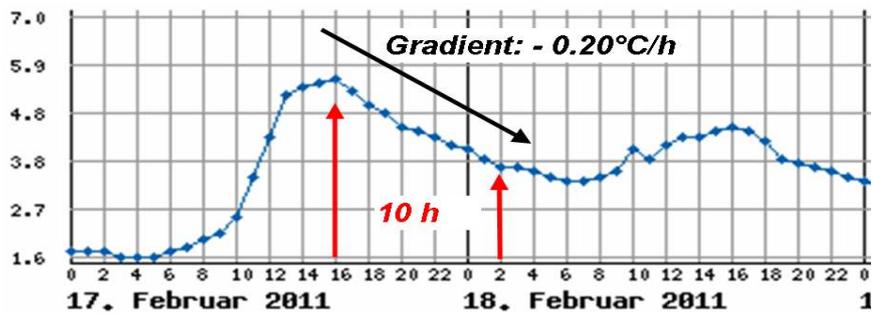
**Bild 8-5:** Aussentemperatur und Sonnenscheindauer (unten) der Station Ebnat-Kappel.

Aktueller Aussenlufttemperatur-Gradient  
(aus Kap. 7.2.7)



- Die Übertragung des Aussenlufttemperatur-Gradienten auf die Oberflächentemperatur ist vom Wandtyp, von der Stärke des Gradienten sowie von der Dauer der Exposition abhängig.
- Richtwerte für die Übertragungsfaktoren:
 

- leichte Aussenwandoberflächen (W2, W3, W6):	50%
- mittelschwere Aussenwandoberflächen (W1, W4):	35%
- schwere Aussenwandoberflächen (W5):	20%
- Aus dem Übertragungsfaktor und der Dauer der Exposition lässt sich abschätzen, wie schnell und wie stark sich die Oberflächentemperatur einer Wand bei anliegendem Aussenlufttemperatur-Gradient verändert.  
 Beispiel: AWD, Gradient =  $-0.20^{\circ}\text{C/h}$ , nach 10 Stunden Einwirkung:  
 Die Wandoberfläche verändert sich um ca. 50% von  $-0.20^{\circ}\text{C/h} \times 10 \text{ h} = -1.0^{\circ}\text{C}$



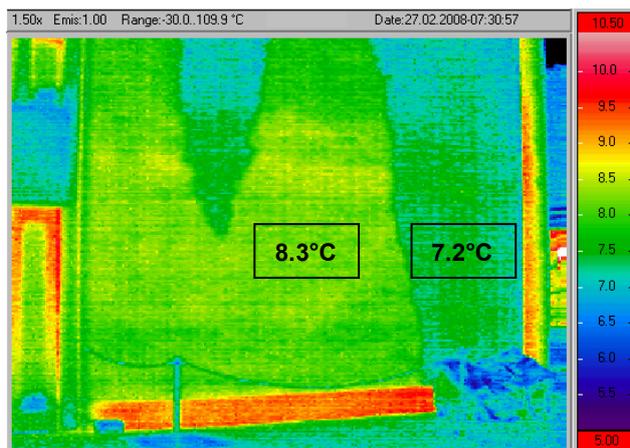
**Bild 8-6:** Aktueller Temperatur-Gradient: Während einer IR-Aufnahmenacht können die Temperaturen nicht nur stark absinken (meist infolge Abstrahlung), sondern auch ansteigen.

### 8.3 Meteo-Faktoren Regen / Schnee / Nebel

Im vorliegenden Projekt konnten längst nicht alle verfügbaren Daten ausgewertet werden. So musste auch darauf verzichtet werden, die Situationen mit Regen, Schnee und Nebel detailliert zu analysieren. Es liegen aber diesbezügliche viele praktische Erfahrungen vor, aus denen u.a. die folgenden Schlüsse gezogen werden können:

**Nebel, Schnee und Regen** können je nach Intensität und Distanz zum Objekt die IR-Messresultate beeinträchtigen. Ist die Niederschlagsintensität jedoch gering und die Distanz zum Objekt „normal“ (bis ca. 30 m), so sind solche Bedingungen für nächtliche IR-Aufnahmen nahezu ideal, da dann die Aussenluft und der Himmel (Sky) praktisch identische Temperaturen aufweisen. Bei grösseren Distanzen zum Objekt wird sich jedoch die beobachtete Objekt-Oberflächentemperatur der Regen- bzw. Schneetemperatur annähern und damit die gewünschte Temperatur verfälschen.

**Feuchtigkeit auf der Oberfläche.** Natürlich sollten die Objektflächen nicht nass oder schneebedeckt sein. Während Oberflächenfeuchte normalerweise keinen relevanten Einfluss auf die Wärmedämmwirkung einer Konstruktion hat, kann sie in Bezug auf Thermografiemessungen von Bedeutung sein. Die Bilder 8-7 und 8-8 zeigen dies beispielhaft auf: Das rechte Bild zeigt eine Backsteinfassade mit einem herunter laufenden Wasserfilm. Dieses Oberflächenwasser ist ca. 1°C kühler als die trockene Wandoberfläche. Grund: Einerseits kühlt Regenwasser die (relativ) warme Fassade ab und andererseits erzeugt verdunstendes Wasser eine Kühlwirkung. Bei einer unterkühlten Fassadenoberfläche (nächtliche Abstrahlung einer AWD) kann in seltenen Fällen jedoch auch das gegenteilige Phänomen auftreten, so dass die Fassade durch einsetzenden Regen erwärmt wird.



**Bild 8-7:** IR Bild einer teilweise nassen Sichtbackstein-Fassade mit 2 Box-Temperaturwerten.



**Bild 8-8:** Gebäudefoto zum IR-Bild links.

**Schneebedeckte Bauteile.** Bei vollflächig schneebedeckten Bauteilen sind keine energetischen Interpretationen von IR-Bildern möglich.

Eine Schneedecke wirkt wie eine zusätzliche Dämmschicht. Die Schneeoberfläche, mit einer extrem kleinen thermischen Masse, reagiert sehr schnell und stark auf die Meteo-Bedingungen [8]. Sie weicht damit deutlich von der Oberflächentemperatur des darunterliegenden Bauteils ab.

Dies gilt auch für Fälle wie in Bild 8-9, bei denen sich aufgrund einer starken Wärmebrückenwirkung ein „natürliches Wärmebild“ abzeichnet, das mit IR nicht sichtbar ist. Es kann nur entstehen durch die Langzeitwirkung des Wärmestromes.



**Bild 8-9:** Ein Kontrast: Bei schneebedeckten Bauteilen sind keine energetischen Beurteilungen von IR-Bildern möglich, hier zeigt sich aber infolge einer Wärmebrücke ein „natürliches Wärmebild“.

## 8.4 Unsicherheit und Toleranz bei Ableitungen des U-Wertes

Bei der energetischen Beurteilung von Bauteilen basierend auf Oberflächentemperaturen aus Thermografiemessungen, hat die Unsicherheit der Messungen sowie die Interpretation der Oberflächentemperaturen einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit der Aussage zum mutmasslichen U-Wert einer Wand.

Die Genauigkeit, mit welcher U-Werte ermittelt werden können, kann auf Grund einer Analyse für den stationären Fall abgeschätzt werden. Gemäss den Formeln (A-1a) und (A-2a) lässt sich der U-Wert wie folgt aus den gemessenen Temperaturen berechnen:

$$U = \frac{h_e \cdot (\theta_{se} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (8-1)$$

Bei einer definierten Toleranz  $\Delta\theta_{se}$  der Oberflächentemperatur und bei einem bekannten Wärmeübergangskoeffizienten aussen beträgt die Unsicherheit des abgeschätzten U-Wertes:

$$\Delta U = \frac{h_e \cdot (\Delta\theta_{se} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (8-2)$$

Für den praktischen Fall werden wegen den unterschiedlichen IR-Aufnahmebedingungen drei Toleranzstufen betrachtet: Für die Sensitivitätsanalysen wurde die mittlere Toleranzgrenze von 0.5 K verwendet (vgl. Kapitel 7.2.3).

- für ausgezeichnete Aufnahmebedingungen  $\Delta\theta_{se} = \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$
- für gute Aufnahmebedingungen  $\Delta\theta_{se} = \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
- für mässige Aufnahmebedingungen  $\Delta\theta_{se} = \pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$

Hinweis: Die Messunsicherheit der IR-Kamera muss sinnvollerweise innerhalb der Toleranzgrenze liegen. Dies wird dadurch erreicht, indem bei QualiThermo die zu bestimmende Lufttemperatur ebenfalls mit der IR-Kamera gemessen wird, womit ein entscheidender, systematischer Fehler eliminiert wird (vgl. Kap. 5.4.1).

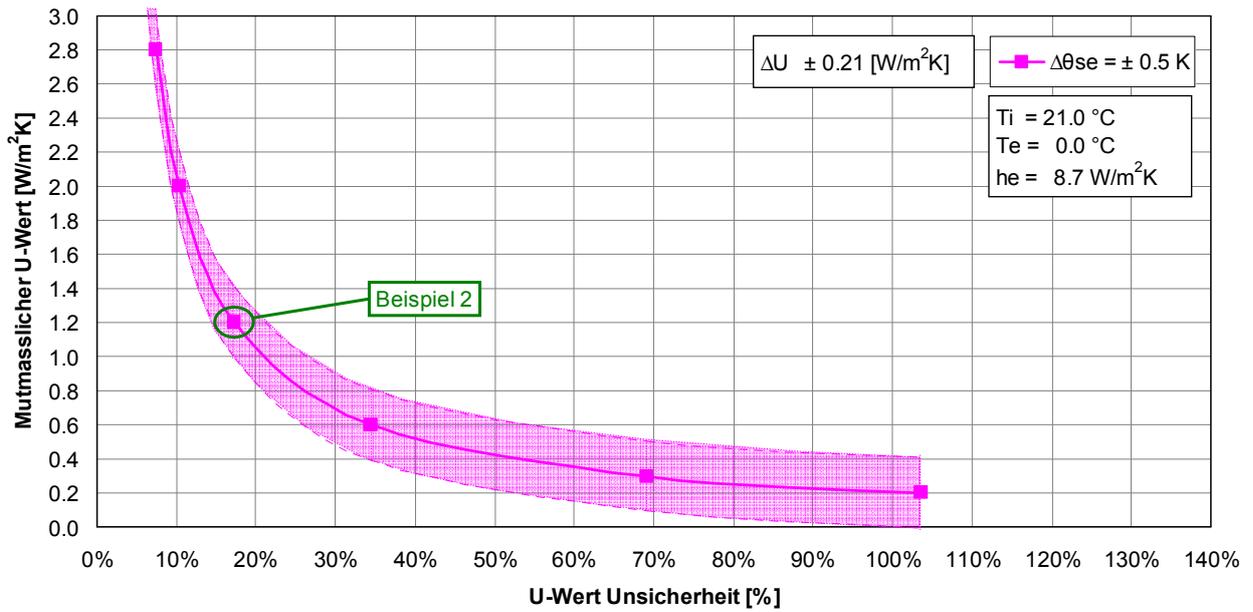
Eine Grafische Darstellung mit Bezug zur relativen Genauigkeit des U-Wertes ist in den Bildern 8-10 und 8-11 dargestellt.

Grundsätzlich lässt sich daraus erkennen, dass die Aussage umso unsicherer ist, je besser ein Bauteil gedämmt ist. Dies soll anhand von drei Beispielen erläutert werden:

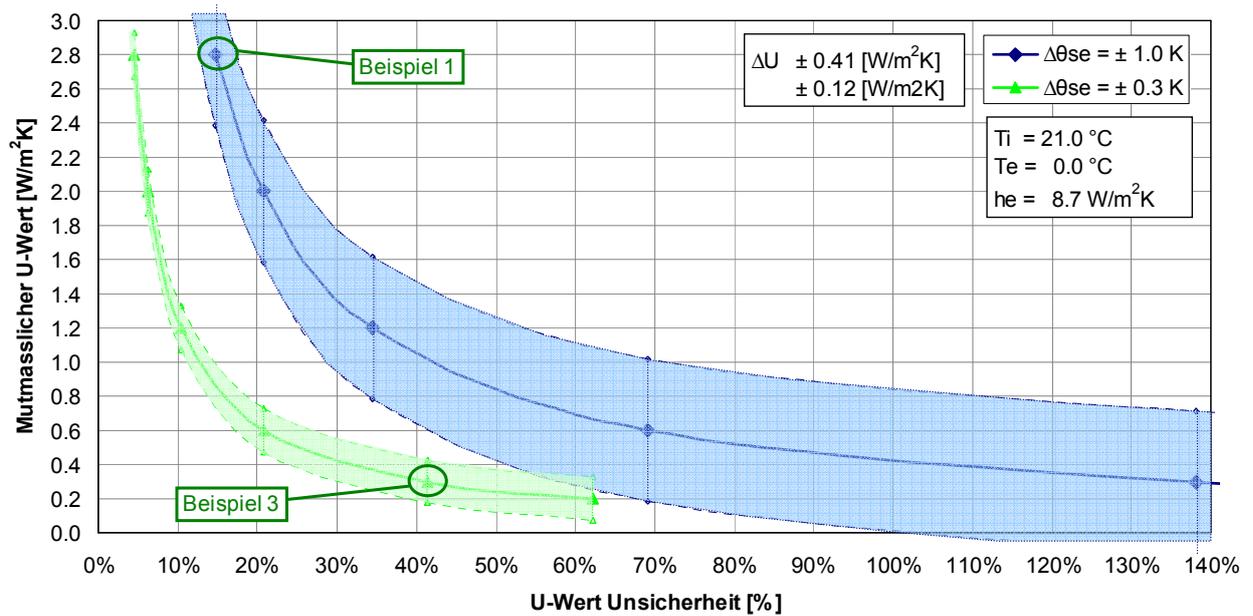
**Beispiel 1:** Bei alten Fenstern ( $U = 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) kann der U-Wert auch unter ungünstigen Meteobedingungen ( $\Delta\theta_{se} = 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) noch mit einer Genauigkeit von ca. 15 % bestimmt werden. Die Aussage ist deshalb sicher.

**Beispiel 2:** Bei günstigen Bedingungen ( $\Delta\theta_{se} = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ist meist noch klar erkennbar, ob es sich um eine alte, ungedämmte Aussenwand handelt (z.B. 32 cm Backstein,  $U=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Bei ungünstigen Randbedingungen ( $\Delta\theta_{se} = 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wird diese Aussage jedoch unsicher ( $\pm 35 \%$ ).

**Beispiel 3:** Bei gut gedämmten Wänden ( $U < 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ist die Oberflächentemperatur so nahe an der Aussentemperatur und wird von den Meteo-Bedingungen so stark beeinflusst, dass aufgrund der IR-Temperaturen keine zuverlässigen Aussagen über den U-Wert gemacht werden können. Denn bereits bei normalen bis guten Aufnahmebedingungen ( $\Delta\theta_{se} = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) beträgt die Unsicherheit des U-Wertes min. 70%. Diese verdoppelt sich sogar auf min. 140 % im Falle von mässigen Aufnahmebedingungen ( $\Delta\theta_{se} = 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Bild 8-10:** Unsicherheit der U-Wert-Bestimmung aus IR-Messdaten.  
Variante mit Messunsicherheit  $\Delta\theta_{se} = 0.5^\circ\text{C}$



**Bild 8-11:** Unsicherheit der U-Wert-Bestimmung aus IR-Messdaten.  
Varianten mit Messunsicherheit  $\Delta\theta_{se} = 0.3^\circ\text{C}$  und  $\Delta\theta_{se} = 1.0^\circ\text{C}$ .

Eine weitere Visualisierung der Unsicherheit ergibt sich, wenn die Toleranzwerte in Bezug zum skalierten Farbkeil betrachtet werden (vgl. Bild 8-1).

## 8.5 Zur Berichterstattung

Die Art der Berichterstattung ist entscheidend, ob ein Auftrag nachvollziehbar abgewickelt wurde und ob die Interpretationen der IR-Bilder plausibel sind oder nicht.

Was alles in einen IR-Bericht gehört, ist z.B. in den Qualitätsstandards Bau [4] erläutert.

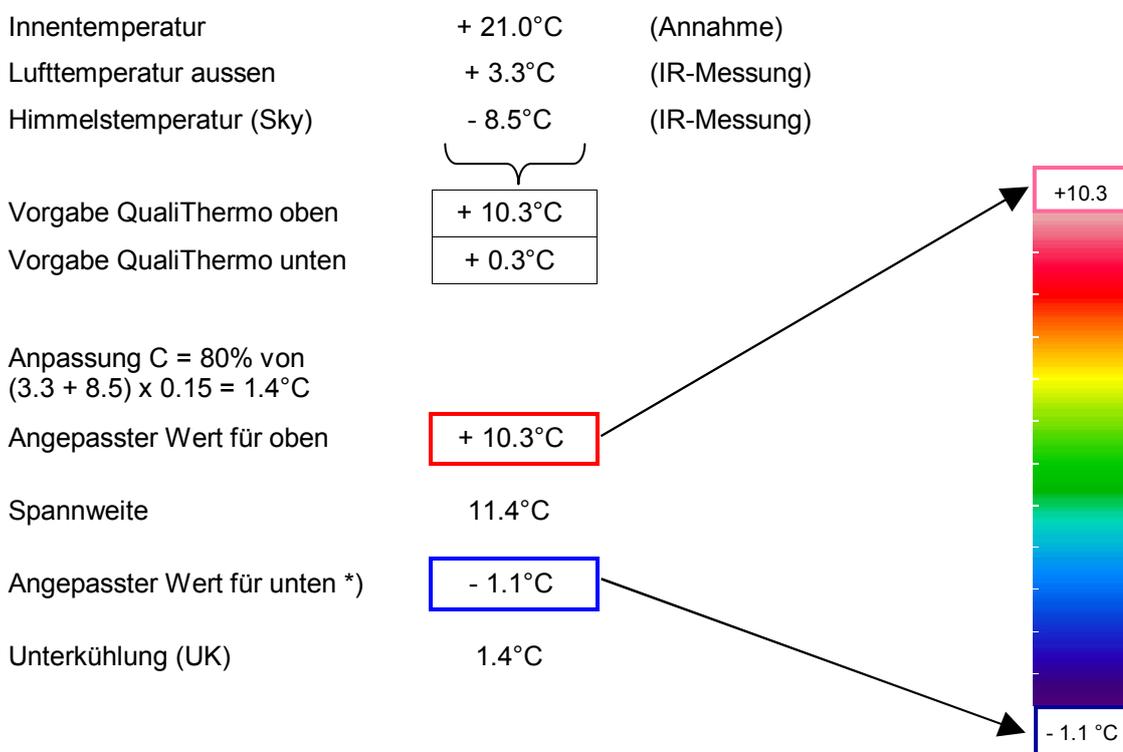
Empfehlung: Bei Aussenaufnahmen eines Gebäudes sollte mindestens eine IR-Bildserie mit der *gleichen Farbkeilskalierung* dargestellt werden. Nur so kann der Betrachter verschiedene Auswirkungen visuell miteinander vergleichen. Will man etwas speziell hervorheben oder sind energetische Ableitungen nicht relevant, so kann eine zusätzlich Bilddarstellung mit einer anderen Empfindlichkeit sinnvoll sein.

Werden bei der Skalierung Abweichungen von den QualiThermo-Vorgaben gemacht (was ab und zu sinnvoll oder notwendig ist), so ist dies dann korrekt, wenn dafür eine kurze, plausible Erklärung abgegeben wird

### Beispiel für eine Anpassung mit manueller Skalierung

IR-Farbskalierungseinstellungen nach der Methode QualiThermo (Version V2.2-2010).

Obere und untere Temperatureinstellung für eine vergleichbare Darstellung der IR-Bilder.



**Bild 8-12:** Nachvollziehbare Deklaration für Farbkeil, Skalierung und Anpassungen.

\*) Anpassung des Farbkeils, hier in Folge der gemessenen, tiefen Himmelstemperatur (Sky).

Je nach Meteobedingungen, Gebäudekonstruktion und Nutzungszustand ist eine Anpassung der Skalierung sinnvoll. Am meisten vorkommend bei klarem Nachthimmel (Unterkühlung → Untergrenze wird tiefer gesetzt, vgl. Kap 7.2.6).

## 9 Symbolverzeichnis

Symbol	Begriff	Einheit
A	Fläche	m <sup>2</sup>
E <sub>s,abs</sub>	Absorbierte Solarstrahlungsenergie	Wh/m <sup>2</sup>
F <sub>b</sub>	Einstrahlzahl zu Nachbarbauten	-
F <sub>g</sub>	Einstrahlzahl zum Boden	-
F <sub>sky</sub>	Einstrahlzahl zum Himmel	-
I <sub>r,sky</sub>	IR-Einstrahlungsintensität des Himmels auf eine horizontale Fläche	W/m <sup>2</sup>
I <sub>s,H</sub> , I <sub>s,V</sub>	Solarstrahlungsintensität horizontal oder vertikal	W/m <sup>2</sup>
R <sub>HFM</sub>	Wärmedurchlasswiderstand des Wärmeflussfühlers	m <sup>2</sup> KW
R <sub>se</sub>	Wärmeübergangswiderstand aussen	m <sup>2</sup> KW
R <sub>si</sub>	Wärmeübergangswiderstand innen	m <sup>2</sup> KW
R <sub>tot</sub>	Wärmedurchlasswiderstand aller Schichten	m <sup>2</sup> KW
T <sub>b</sub>	Absolute Temperatur der Nachbarbauten	K
T <sub>e</sub>	Absolute Aussentemperatur (Umgebungstemperatur)	K
T <sub>g</sub>	Absolute Temperatur des Bodens	K
T <sub>me</sub>	Absolute Mitteltemperatur aussen	K
T <sub>mea</sub>	Absolute gemessene Temperatur	K
T <sub>mi</sub>	Absolute Mitteltemperatur innen	K
T <sub>re</sub>	Absolute, gewichtete Strahlungstemperatur der Aussenumgebung (T <sub>sky</sub> , T <sub>b</sub> , T <sub>g</sub> )	K
T <sub>se</sub>	Absolute Aussenoberflächentemperatur	K
T <sub>sky</sub>	Absolute Temperatur des Himmels	K
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
c	Bewölkungsgrad	1/10
d	Schichtdicke	m
h <sub>e</sub>	Gesamtwärmeübergangskoeffizient aussen	W/(m <sup>2</sup> K)
h <sub>i</sub>	Gesamtwärmeübergangskoeffizient innen	W/(m <sup>2</sup> K)
h <sub>ce</sub>	Konvektionswärmeübergangskoeffizient aussen	W/(m <sup>2</sup> K)
h <sub>ci</sub>	Konvektionswärmeübergangskoeffizient innen	W/(m <sup>2</sup> K)
h <sub>re</sub>	Strahlungswärmeübergangskoeffizient aussen	W/(m <sup>2</sup> K)
h <sub>ri</sub>	Strahlungswärmeübergangskoeffizient innen	W/(m <sup>2</sup> K)
q, q <sub>i</sub> , q <sub>e</sub>	Wärmestromdichte, innen oder aussen	W/m <sup>2</sup>
v, vWind	Windgeschwindigkeit	m/s
α <sub>s</sub>	Absorptionsgrad der Wandoberfläche	-
α <sub>1</sub> , α <sub>2</sub>	Absorptionsgrad der Aussenscheibe, der Innenscheibe	-
θ <sub>ae</sub>	Aussenlufttemperatur	°C
θ <sub>ai</sub>	Raumlufttemperatur	°C
θ <sub>e</sub>	Aussentemperatur (Umgebungstemperatur)	°C
θ <sub>i</sub>	Innentemperatur (Raumtemperatur)	°C
θ <sub>re</sub>	Gewichtete Strahlungstemperatur der Aussenumgebung (T <sub>sky</sub> , T <sub>b</sub> , T <sub>g</sub> )	°C
θ <sub>e</sub> *	Kombinierte Strahlungslufttemperatur (Luft, Solar, IR)	°C
θ <sub>se</sub>	Aussenoberflächentemperatur	°C
θ <sub>si</sub>	Innenoberflächentemperatur	°C
θ <sub>sky</sub>	Temperatur des Himmels	°C
ΔI <sub>r</sub>	Langwelliger Zusatzstrahlungsverlust (IR-Senke)	W/m <sup>2</sup>
ε	Hemisphärischer Emissionsgrad der Oberfläche	-
ε <sub>sky</sub> (C)	Hemisphärischer Emissionsgrad des Himmels in Funktion der Bewölkung	-
ε(φ)	Gerichteter Emissionsgrad der Oberfläche	-
ε <sub>sky</sub> (φ)	Gerichteter Emissionsgrad des Himmels in Funktion des Zenith-Winkels	-
φ	Zenith-Winkel	Grad
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
Λ	Wärmedurchlasskoeffizient des Bauteils	W/(m <sup>2</sup> K)
Λ'	Wärmedurchlasskoeffizient inkl. Wärmeübergang innen	W/(m <sup>2</sup> K)
Λ''	Wärmedurchlasskoeffizient inkl. Wärmeübergang aussen	W/(m <sup>2</sup> K)
Λ <sub>g</sub>	Wärmedurchlasskoeffizient der Verglasung	W/(m <sup>2</sup> K)
σ	Stefan-Bolzmann Konstante: 5.67 · 10 <sup>-8</sup>	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )

## 10 Referenzen

### 10.1 Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Norm EN 13187:1998, *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Qualitativer Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen - Infrarot-Verfahren* (ISO 6781:1983 modifiziert), CEN Brüssel 1998.
- [2] N.A. Fouad, T. Richter, *Leitfaden Thermografie im Bauwesen*, IRB-Verlag, 2007.
- [3] W. Pöllinger, *Dienstleistung statt bunte Wärmebilder*, www.thermografie-poellinger.com.
- [4] theCH, *QS Bau, Qualitätsstandard Bau*, www.thech.ch, 21.01.2010.
- [5] Physibel, *VOLTRA – Computer program to calculate 3D & 2D transient heat transfer using the energy balance technique*, Version 6.1w, Physibel Software, Maldegem, Belgien, 2008
- [6] Europäische Norm EN ISO 6946:2007, *Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*, CEN Brüssel 2007.
- [7] Ch. Zürcher, Th. Frank, *Bauphysik Bau und Energie*, ISBN 978-3-7281-3054-9, vdf-Verlag, Zürich, 2010.
- [8] Ch. Tanner, *Einsatzmöglichkeiten der Thermografie im Gebirge*, Empa / SLF, 1998
- [9] Th. Frank, *Glasdatenbank GLAD Expertenversion*, Empa Dübendorf 2006
- [10] R.J Goldstein, *Application of aerial infrared thermography to the measurement of building heat loss*, ASHRAE Transactions 84: pp. 207-226, 1978.
- [11] Ch. Zürcher, Th. Frank et al., *The influence of thermal and solar radiation on the energy consumption of buildings*, Infrared Physics, Vol.22, pp. 277-291, 1982.
- [12] Ch. Tanner, *Spiegelungen von verschiedenen Oberflächen (Flaschenexperiment)*, Winterthur, 2009.
- [13] W.G. Rees, S.P. James, *Angular variation of the infrared emissivity of ice and water surfaces*, Int. Journal Remote Sensing, Vol. 13, No. 15, pp. 2873-2886, 1992.
- [14] J.A. Sobrino, J. Cuenca, *Angular variation of thermal infrared emissivity for some natural surfaces from experimental measurements*, Applied Optics Vol. 38, No. 18, pp. 3931-3936, 1999.
- [15] J. Cuenca, J.A. Sobrino, *Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity*, Applied Optics Vol. 43, No.23, pp. 4598-4602, 2004.
- [16] Ch. Tanner, *Infrarotaufnahmen mit verschiedenen Blickwinkeln zur Wasseroberfläche*, interner Bericht QC-Expert, Dübendorf 2007.
- [17] *EN ISO 13791 "Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren"*, CEN Brüssel 2004
- [18] *M.H. Unsworth et al*, Longwave radiation at the ground-Angular distribution of incoming radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol.101, No. 427, pp. 13-24, 1975
- [19] Ch. Tanner, *Infrarotaufnahmen von Gebäuden*, www.thech.ch, 2009.
- [20] *PicWIN-IRIS Version 7.1*, ebs-thermography München, Deutschland

### Weitere, nicht referenzierte Literaturquellen

- [21] S. Datcu et al., *Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography*, Infrared Physics & Technology Vol 46, pp. 451-467, 2005.
- [22] N.P. Avdelidis, A. Moropoulou, *Emissivity considerations in building thermography*, Energy and buildings Vol. 35, pp. 663-667, 2003.
- [23] B. Pettersson, B. Axen, *Thermography - Testing of the thermal insulation and airtightness of buildings*, Swedish Council for Building Research, 1980.
- [24] M. Vollmer, K-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications*, WILEY-VCH Verlag, 2010.
- [25] A. Hoyano et al., *Analysis of sensible heat flux from exterior surfac of buildings using time sequential thermography*, Atmospheric Environment Vol. 33, pp. 3941-3951, 1999.
- [26] R. Albatini, A. M. Tonelli, *Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*, Energy and buildings Vol. 42, pp. 2177-2183, 2010
- [27] A. Hagishima, J. Tanimoto, *Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces*, Building and Environment Vol. 38, pp. 873-881, 2003.
- [28] J.A. Palyvos, *A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems modeling*, Applied thermal Engineering Vol. 28, pp. 801-808, 2008.
- [29] N. Schuster, V.G. Kolobrodov, *Infrarotthermographie*, ISBN 3-527-40509-7, WILEY-VCH, 2004
- [30] Ch. Tanner, *Coole Bilder - heiss umstritten*, www.thech.ch, 2008
- [31] Ch. Tanner, *IR-Gebäudeaufnahmen*, www.thech.ch, 2010.

## 10.2 Vorträge / Veranstaltungen

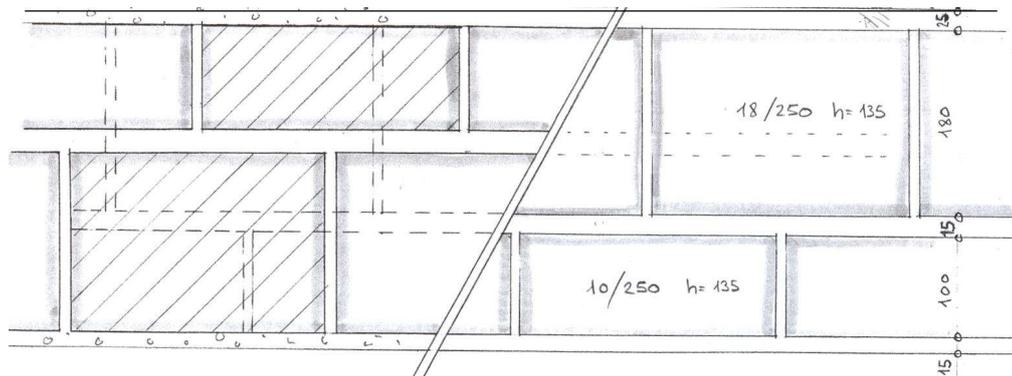
- 31.03.2009     **Empa Akademie; Dübendorf**  
*Informationstagung Gebäudethermografie*  
Referenten: Stefan Wiederkehr, Milo Halmó, Thomas Frank, Hans Bertschinger, Christoph Tanner)
- 03.09.2010     **16. Status-Seminar, ETHZ**  
*„Energetische Beurteilung von Gebäuden mittels IR-Bildern“*  
Referent: Christoph Tanner
- 12.11.2010     **Schweizer Hausbau- und Energie-Messe, Bern**  
*„Infrarotbilder von Gebäuden“*  
Referent: Christoph Tanner
- 08.06.2011     **Fachtagung Gebäudehülle Schweiz, Olten**  
*„Wärmebilder der Gebäudehülle richtig interpretieren“*  
Referent: Christoph Tanner
- 2012            **Workshop Thermografieverband Schweiz (in Planung)**

# A 1 Wandkonstruktionen und Verglasungen

## A 1.1 Wandkonstruktionen Testgebäude und Referenzwände

### 1 Altbau Baujahr 1939 (30 cm Backsteinmauerwerk)

$U = 1.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$



2.5 cm Verputz aussen

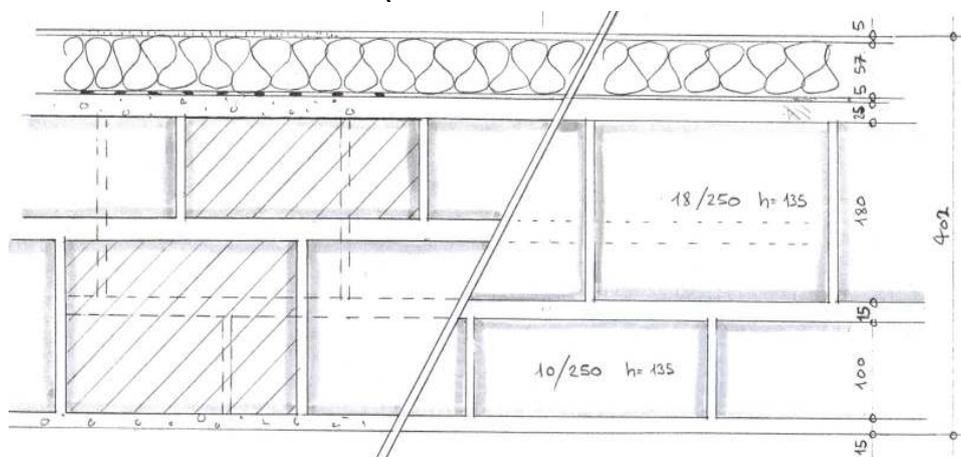
29.5 cm Backsteinmauerwerk BN 18 / 10

1.5 cm Verputz innen

 <b>W1</b>	Schichtbezeichnung	d m	$\lambda$ W/(m·K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg·K)	R m <sup>2</sup> ·K/W
	Verputz aussen	0.025	0.870	1800	1000	0.029
	Backsteinmauerwerk BN 18 / 10	0.295	0.470	1200	940	0.628
	Verputz innen	0.015	0.700	1400	1000	0.021
	Messung mit HFM: $R_{\text{tot}} = 0.66 \pm 0.06 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	(0.335)	$R_{\text{tot}} = 0.678$			

### 2 1982 sanierter Altbau (30 cm Backsteinmauerwerk mit 6 cm AWD)

$U = 0.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$



0.5 cm Dünnputz aussen

5.7 cm WD Polystyrol  
0.5 cm Klebschicht und  
2.5 cm alter Verputz

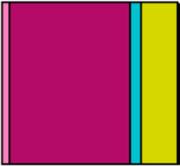
29.5 cm Backsteinmauerwerk BN 18 / 10

1.5 cm Verputz innen

 <b>W2</b>	Schichtbezeichnung	d m	$\lambda$ W/(m·K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg·K)	R m <sup>2</sup> ·K/W
	Dünnputz aussen	0.005	0.870	1800	1000	0.006
	Wärmedämmung Polystyrol	0.057	0.040	20	1450	1.425
	Klebschicht und alter Verputz aussen	0.030	0.870	1800	1000	0.034
	Backsteinmauerwerk BN 18 / 10	0.295	0.470	1200	940	0.628
	Verputz innen	0.015	0.700	1400	1000	0.021
Messung mit HFM: $R_{\text{tot}} = 2.01 \pm 0.21 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	(0.402)	$R_{\text{tot}} = 2.114$				

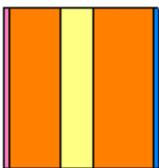
### 3 Backsteinmauerwerk 30 cm alt mit 9 cm AWD

$$U = 0.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

 W3	Schichtbezeichnung	d m	$\lambda$ W/(m·K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg·K)	R m <sup>2</sup> ·K/W
	Dünnputz aussen	0.005	0.870	1800	1000	0.006
	Wärmedämmung Polystyrol	0.090	0.036	20	1450	2.500
	Klebschicht und alter Verputz aussen	0.030	0.870	1800	1000	0.034
	Backsteinmauerwerk BN 18 / 10	0.295	0.470	1200	940	0.628
	Verputz innen	0.015	0.700	1400	1000	0.021
$R_{s,tot} = 0.165 \text{ m}^2\text{K/W}$		(0.435)			$R_{tot} = 3.189$	

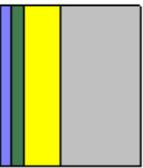
### 4 Zweischalenmauerwerk mit 8 cm WD

$$U = 0.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

 W4	Schichtbezeichnung	d m	$\lambda$ W/(m·K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg·K)	R m <sup>2</sup> ·K/W
	Verputz aussen	0.015	0.870	1800	1000	0.017
	Modulbackstein	0.150	0.370	1100	940	0.405
	Wärmedämmung Steinwolle	0.080	0.034	60	1030	2.353
	Modulbackstein	0.125	0.370	1100	940	0.338
	Verputz innen	0.015	0.700	1400	1000	0.021
$R_{s,tot} = 0.165 \text{ m}^2\text{K/W}$		(0.385)			$R_{tot} = 3.134$	

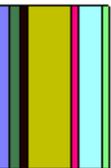
### 5 Betonwand mit 9 cm Innendämmung

$$U = 0.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

 W5	Schichtbezeichnung	d m	$\lambda$ W/(m·K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg·K)	R m <sup>2</sup> ·K/W
	Sichtbeton	0.200	2.300	2300	1000	0.087
	Innenwärmedämmung	0.09	0.032	30	1450	2.813
	Lattenrost	0.030				0.180
	Gipsfaserplatte	0.025	0.320	1150	1000	0.078
$R_{s,tot} = 0.165 \text{ m}^2\text{K/W}$		(0.345)			$R_{tot} = 3.158$	

### 6 Holzständerwand mit 11 cm Innendämmung

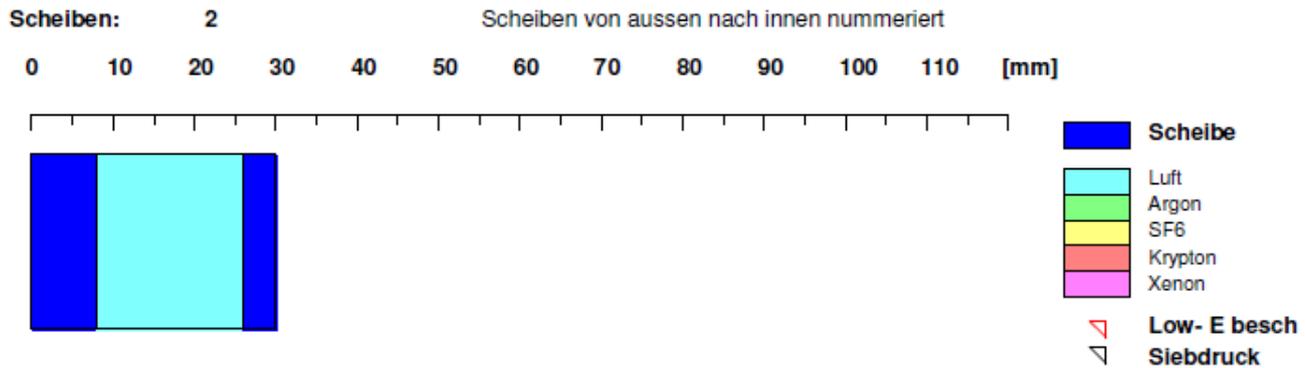
$$U = 0.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

 W6	Schichtbezeichnung	d m	$\lambda$ W/(m·K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg·K)	R m <sup>2</sup> ·K/W
	Holzschalung	0.020	0.130	500	1600	0.154
	Hinterlüftung	0.060	-	-	-	0.080
	Holzfaserplatte	0.015	0.070	250	1700	0.214
	Mineralwolle / 8% Holzständer	0.11	0.047	70	1100	2.340
	OSB-Platte	0.015	0.130	600	1700	0.115
	Installationshohlraum	0.030	-	-	-	0.180
	Gipsfaserplatte	0.025	0.32	1150	1000	0.078
$R_{s,tot} = 0.165 \text{ m}^2\text{K/W}$		(0.275)			$R_{tot} = 3.161$	

## A 1.2 Verglasungen Testgebäude

### Verglasung Alt: 2 IV 8-18-4

Verglasungsaufbau und mit GLAD [9] berechnete Kennwerte.



Scheibe		Hersteller	d [mm]	lambda [W/mK]	normales Epsilon	
Nr	Scheiben id				aussen [%]	innen [%]
1	FLOAT 08 mm	SZFF/SIGaB	8	1	89	89
2	FLOAT 04 mm	Standart	4	1	89	89

SZR		Bemerkung	d [mm]	Luft [%]	Ar [%]	SF6 [%]	Kr [%]	Xe [%]
Nr	Gas_id							
1	Luft	100% Luft	18	100	0	0	0	0

Scheiben id	t_sol	r_sol	r'_sol	t_vis	r_vis	r'_vis	t_uv	Norm * unbeschichtet
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
FLOAT 04 mm	85	8	8	90	8	8	68	EN
FLOAT 08 mm	79	8	8	88	8	8	53	EN

### Kennwerte berechnet nach: Ug(EN673), g(EN410)

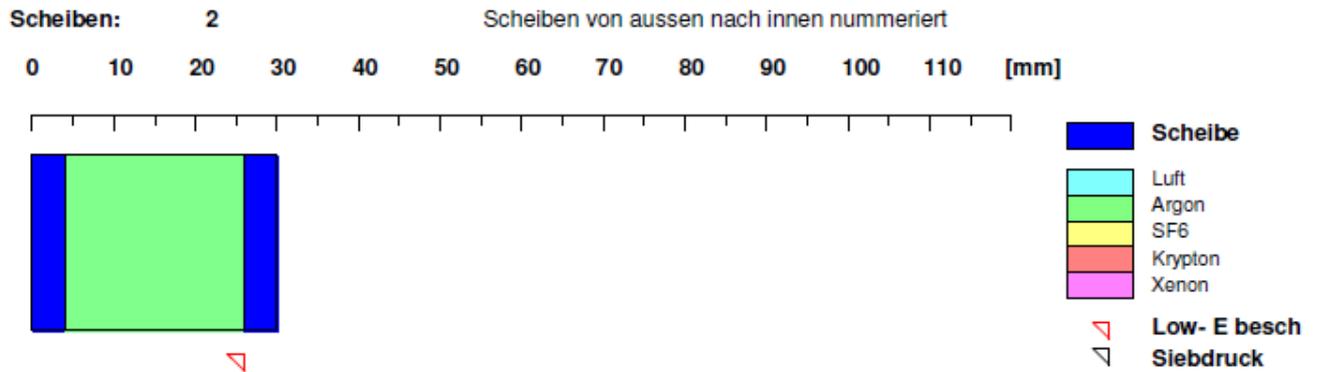
Scheiben von aussen nach innen

Ug :	2.7 [W/m2K]	Solar	Licht	Uv	
g :	73 [%]    ql: 4.7 [%]	Transmission:	68 [%]	80 [%]	40 [%]
b (g/0.8):	91 [%]    S (LT/g): 1.1	Reflexion aussen:	13 [%]	15 [%]	9.5 [%]
		Absorption:	18 [%]	4.6 [%]	51 [%]
		Reflexion innen:	14 [%]	15 [%]	11 [%]

Scheibe, Folie	R	Abs	SZR	L	R
No.	[m2K/W]	[%]	Nr	[W/m2K]	[m2K/W]
1	0.008	14	1	5.34	0.187
2	0.004	5			

## Verglasung Neu: 2 IV 4-22-4 (Wärmschutzverglasung)

Verglasungsaufbau und mit GLAD [9] berechnete Kennwerte.



Scheibe Nr	Scheiben id	Hersteller	d [mm]	lambda [W/mK]	normales Epsilon	
					aussen [%]	innen [%]
1	FLOAT 04 mm	Standart	4	1	89	89
2	PLTFutN4stg	WIS Saint Gobain Glass	4	1	3.3	89.4

SZR Nr	Gas_id	Bemerkung	d [mm]	Luft [%]	Ar [%]	SF6 [%]	Kr [%]	Xe [%]
1	Argon 90%	90% Argon / 10% Luft	22	10	90	0	0	0

Scheiben id	t_sol [%]	r_sol [%]	r'_sol [%]	t_vis [%]	r_vis [%]	r'_vis [%]	t_uv [%]	Norm ' unbeschichtet
	FLOAT 04 mm	85	8	8	90	8	8	
PLTFutN4stg	61	24	20	88	5	6	41	EN

### Kennwerte berechnet nach: Ug(EN673), g(EN410)

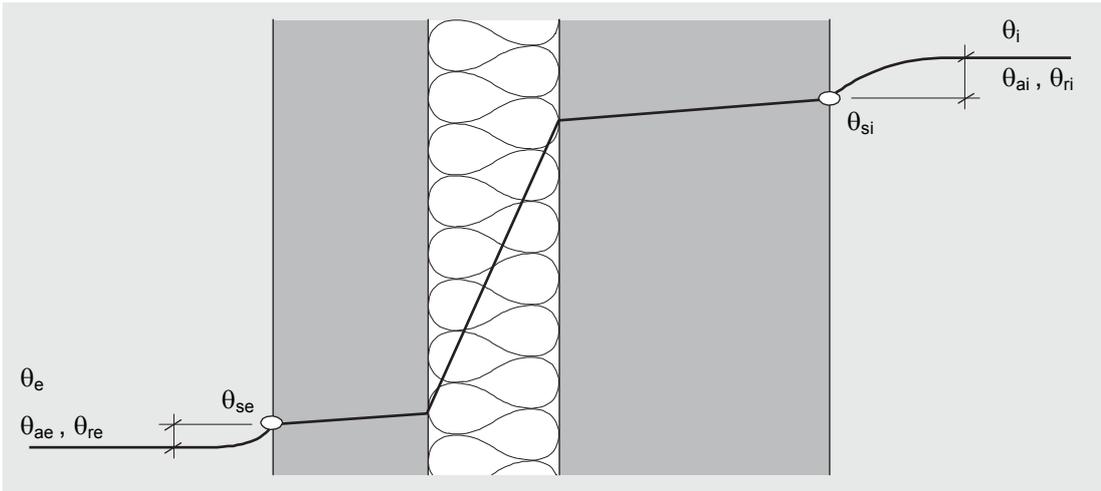
Scheiben von aussen nach innen

Ug :	1.2 [W/m2K]	Solar	Licht	Uv	
g :	64 [%]    qi: 11 [%]	<b>Transmission:</b>	54 [%]	79 [%]	33 [%]
b (g/0.8):	81 [%]    S (LT/g): 1.2	<b>Reflexion aussen:</b>	25 [%]	12 [%]	15 [%]
		<b>Absorption:</b>	21 [%]	8.4 [%]	52 [%]
		<b>Reflexion innen:</b>	23 [%]	12 [%]	10 [%]

allg. Farbw.index: (D65) 97 [%]

Scheibe, Folie No.	R [m2K/W]	Abs [%]	SZR Nr	L [W/m2K]	R [m2K/W]
1	0.004	9	1	1.48	0.676
2	0.004	12			

## A 2 Berechnungsformeln zum stationären Wärmedurchgang



**Bild A-1:** Temperaturverteilung an einem mehrschichtigen Bauteil bei stationärem Wärmedurchgang.

### A 2.1 Opake Bauteile ohne Solareinwirkung

$$q_e = q = q_i: \quad q_e = h_e \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \quad q = \Lambda \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{R_{tot}} \quad q_i = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \quad (\text{A-1a, 1b, 1c})$$

$$q: \quad q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) = \Lambda' \cdot (\theta_i - \theta_{se}) \quad \text{mit} \quad \Lambda' = \frac{1}{R_{tot} + R_{si}} \quad (\text{A-2a, 2b, 2c})$$

$$U: \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{R_{se} + R_{tot} + R_{si}} = \frac{1}{R_{se} + 1/\Lambda'} \quad (\text{A-3a, 3b, 3c})$$

$$\theta_e, \theta_i: \quad \theta_e = \frac{h_{re} \cdot \theta_{re} + h_{ce} \cdot \theta_{ae}}{h_{re} + h_{ce}} \quad \theta_i = \frac{h_{ri} \cdot \theta_{ri} + h_{ci} \cdot \theta_{ai}}{h_{ri} + h_{ci}} \quad (\text{A-4a, 4b})$$

$$\theta_{re}: \quad \theta_{re} = \sqrt[4]{(F_{sky} \cdot T_{sky}^4 + F_b \cdot T_b^4 + F_g \cdot T_g^4) - 273.16} \quad (\text{A-5a})$$

$$\theta_{ri}: \quad \theta_{ri} \cong \frac{\sum A_{i,j} \cdot \theta_{si,j}}{\sum A_{i,j}} \quad (\text{A-5b})$$

$$R_{se}: \quad R_{se} = \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_{re} + h_{ce}} = \frac{1}{\varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_{me}^3 + (4 + 4 \cdot v)} \quad (\text{A-6a, 6b, 6c})$$

$$R_{si}: \quad R_{si} = \frac{1}{h_i} = \frac{1}{h_{ri} + h_{ci}} = \frac{1}{\varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_{mi}^3 + 1.31 \cdot \sqrt[3]{\Delta\theta}} \quad (\text{A-7a, 7b, 7c})$$

$$\theta_{se}: \quad \theta_{se} = \theta_e + U \cdot R_{se} \cdot (\theta_i - \theta_e) = \frac{\Lambda' \cdot \theta_i + h_e \cdot \theta_e}{h_e + \Lambda'} \quad (\text{A-8a, 8b})$$

$$\theta_{si}: \quad \theta_{si} = \theta_i - U \cdot R_{si} \cdot (\theta_i - \theta_e) = \frac{\Lambda'' \cdot \theta_e + h_i \cdot \theta_i}{h_i + \Lambda''} \quad (\text{A-9a})$$

$$\Lambda', \Lambda'' \quad \Lambda' = \frac{1}{R_{tot} + R_{si}} \quad \Lambda'' = \frac{1}{R_{tot} + R_{se}} \quad (\text{A-9b, 9c})$$

## A 2.2 Opake Bauteile mit Solareinwirkung

$$\theta_{se}: \quad \theta_{se} = \frac{\alpha_s \cdot I_s + \Lambda' \cdot \theta_i + h_{re} \cdot \theta_{re} + h_{ce} \cdot \theta_{ae}}{\Lambda' + h_{re} + h_{ce}} = \frac{\alpha_s \cdot I_s + \Lambda' \cdot \theta_i + h_e \cdot \theta_e}{\Lambda' + h_e} \quad (\text{A-10a, 10b})$$

$$\theta_{se}: \quad \theta_{se} = \theta_e^* + U \cdot R_{se} \cdot (\theta_i - \theta_e^*) = \frac{\Lambda' \cdot \theta_i + h_e \cdot \theta_e^*}{h_e + \Lambda'} \quad (\text{A-11a, 11b})$$

$$\theta_{si}: \quad \theta_{si} = \frac{h_i \cdot \theta_i + \Lambda \cdot \theta_{se}}{h_i + \Lambda} \quad \text{oder} \quad \theta_{si} = \theta_i - U \cdot R_{si} \cdot (\theta_i - \theta_e^*) \quad (\text{A-12a, 12b})$$

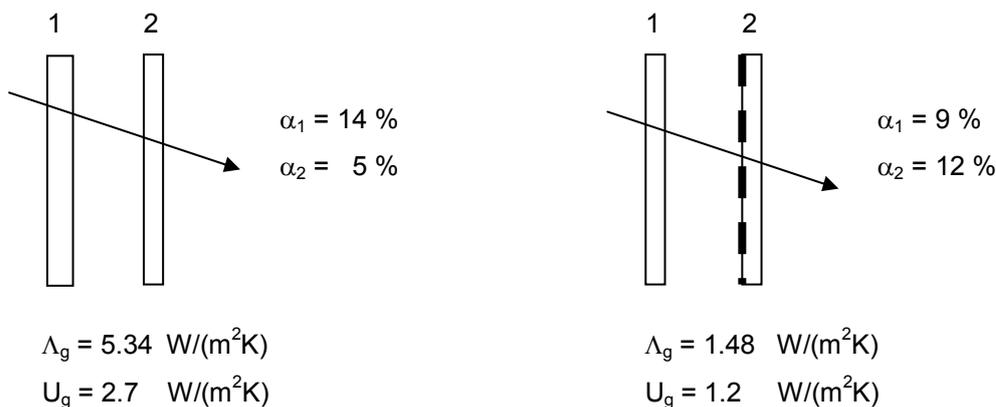
$$\theta_e^*: \quad \theta_e^* = \theta_e + \frac{\alpha_s \cdot I_s}{h_e} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta I_r}{h_e} \quad (\text{A-13})$$

$$\Delta I_r: \quad \Delta I_r = \sigma \cdot (T_e^4 - F_{sky} \cdot T_{sky}^4 - F_b \cdot T_b^4 - F_g \cdot T_g^4) \quad (\text{A-14})$$

## A 2.3 Isolierverglasung mit Strahlungseinwirkung

Normalverglasung 2IV (8-18-4)

Wärmeschutzverglasung 2IV (4-22-4) mit Argon



**Bild A-2:** Wärmedurchgangseigenschaften der beiden Verglasungen.

Wärmestrombilanzgleichungen an den Aussen- und Innenscheiben:

$$\theta_{se} \cdot (h_e + \Lambda_g) + \theta_{si} \cdot (-\Lambda_g) = \alpha_1 \cdot I_s - \varepsilon \cdot \Delta I_r + h_e \cdot \theta_e \quad (\text{A-15a, 15b})$$

$$\theta_{se} \cdot (-\Lambda_g) + \theta_{si} \cdot (\Lambda_g + h_i) = \alpha_2 \cdot I_s + h_i \cdot \theta_i$$

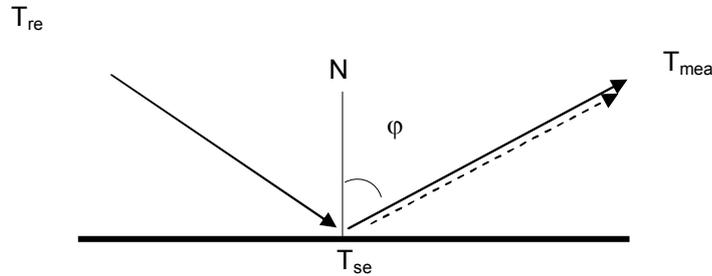
Matrixdarstellung: 
$$\begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A-16})$$

$$\theta_{se}: \quad \theta_{se} = \frac{\left( B_1 - \frac{B_2 \cdot A_{12}}{A_{22}} \right)}{\left( A_{11} - \frac{A_{21} \cdot A_{12}}{A_{22}} \right)} \quad (\text{A-17})$$

$$\theta_{si}: \quad \theta_{si} = \frac{B_2 - \theta_{se} \cdot A_{21}}{A_{22}} \quad (\text{A-18})$$

### A 3 Einfluss der Umgebungsstrahlung und des Emissionsgrades

Um mittels Thermografie die korrekte Oberflächentemperatur eines Objektes bestimmen zu können, muss der Einfluss der Umgebungsstrahlung berücksichtigt werden. Wie Bild A-3 zeigt, beinhaltet das vom Sensor der IR-Kamera erfasste Signal auch die an der Oberfläche reflektierte Strahlung der Umgebung (Boden, Himmel, Nachbargebäude, etc.). Die Ermittlung der wahren Oberflächentemperatur  $T_{se}$  muss deshalb gemäss nachfolgenden Formeln durchgeführt werden.



**Bild A-3:** Einfluss der Umgebungsstrahlung  $T_{re}$  auf die gemessene Temperatur  $T_{mea}$ .

$$T_{mea}^n = \varepsilon(\varphi) \cdot T_{se}^n + (1 - \varepsilon(\varphi)) \cdot T_{re}^n \quad (A-19)$$

$$T_{se} = \sqrt[n]{\frac{T_{mea}^n - (1 - \varepsilon(\varphi)) \cdot T_{re}^n}{\varepsilon(\varphi)}} \quad (A-20)$$

$$T_{se} = \frac{T_{mea}}{\sqrt[n]{\varepsilon(\varphi)}} \cdot \sqrt[n]{1 - (1 - \varepsilon(\varphi)) \cdot \left(\frac{T_{re}}{T_{mea}}\right)^n} \quad (A-21)$$

$$T_{re} = \sqrt[4]{(F_{sky} \cdot T_{sky}^4 + F_b \cdot T_b^4 + F_g \cdot T_g^4)} \quad (A-22)$$

Gerichtete Einstrahlung bei klarem Himmel:

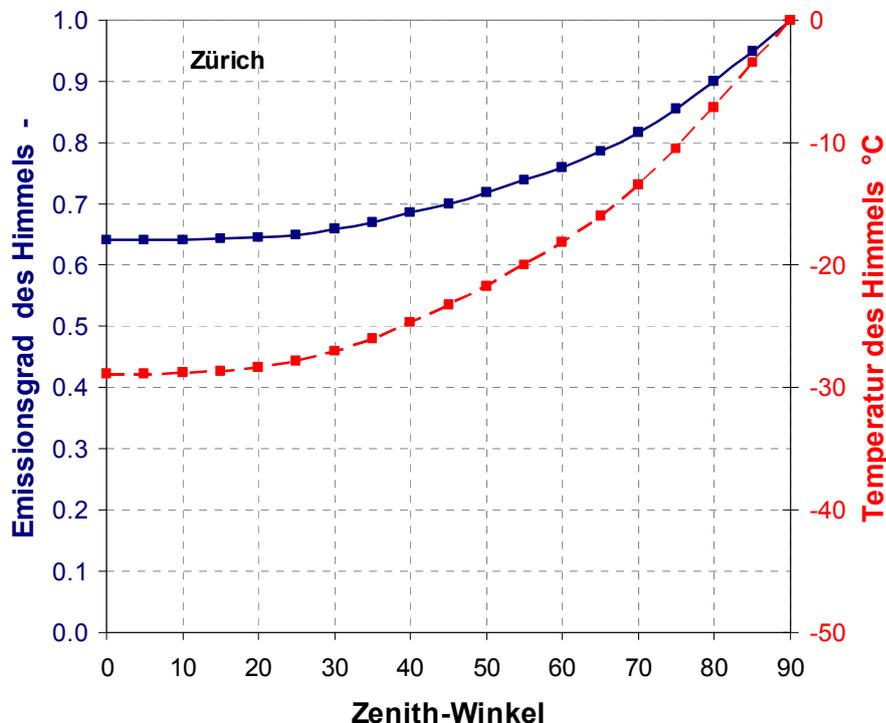
$$I_{r,sky}(\varphi) = \varepsilon_{sky}(\varphi) \cdot \sigma \cdot T_{ae}^4 = \sigma \cdot T_{sky}^4(\varphi) \quad (A-23)$$

Hemisphärische Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei bewölktem Himmel:

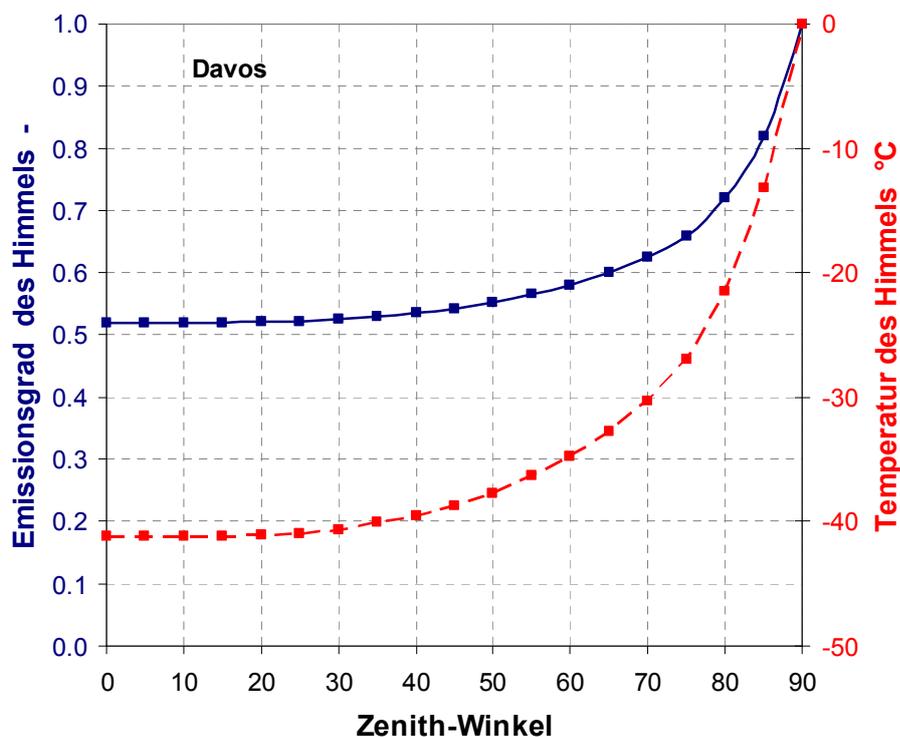
$$I_{r,sky}(c) = \varepsilon_{sky}(c) \cdot \sigma \cdot T_{ae}^4 = \sigma \cdot T_{sky}^4(c) \quad (A-24)$$

- $T_{ae}$  Aussenlufttemperatur in K
- $T_{se}$  Wahre Oberflächentemperatur des Messobjektes in K
- $T_{mea}$  Gemessene Temperatur mit der Infrarotkamera in K
- $T_{re}$  Strahlungstemperatur der Umgebung in K
- $F_{sky}$  Einstrahlzahl zum Himmel
- $F_b$  Einstrahlzahl zu Nachbarbauten
- $F_g$  Einstrahlzahl zum Boden
- $\Delta T$  Temperaturabweichung  $\Delta T = T_{mea} - T_{se}$
- $\varepsilon(\varphi)$  Winkelabhängiger Emissionsgrad der Oberfläche
- $\varepsilon_{sky}(\varphi)$  Gerichteter Emissionsgrad des Himmels in Abhängigkeit des Zenith-Winkels  $\varphi$
- $\varepsilon_{sky}(c)$  Emissionsgrad des Himmels in Abhängigkeit der Bewölkung
- $\varphi$  Winkel der Flächennormale der Oberfläche zum Empfänger IR-Kamera (Zenith-Winkel)
- $n$  Exponent der Stefan Boltzmann Gleichung (für das ganze IR-Spektralband  $n=4$ , für ein schmales Spektralband von 8-14  $\mu m$  ist nach Goldstein [10]  $n \approx 5$  .

Bei klarem Himmel muss der IR-Strahlung des Himmels  $I_{r,sky}$  besondere Beachtung zugemessen werden. Der kalte Himmel kann gemäss Formel (A-23) entweder mit einer Himmelstemperatur  $T_{sky}$  bzw.  $\theta_{sky}$  oder mit einem Emissionsgrad  $\varepsilon_{sky}$  des Himmels beschrieben werden. In den Bildern A-4 und A-5 sind die bei klarem Himmel und einer Aussenlufttemperatur von  $\theta_{ae}=0^\circ\text{C}$  gemessenen Emissionsgrade bzw. Himmelstemperaturen an den Standorten Zürich und Davos [11] in Abhängigkeit des Zenithwinkels dargestellt.

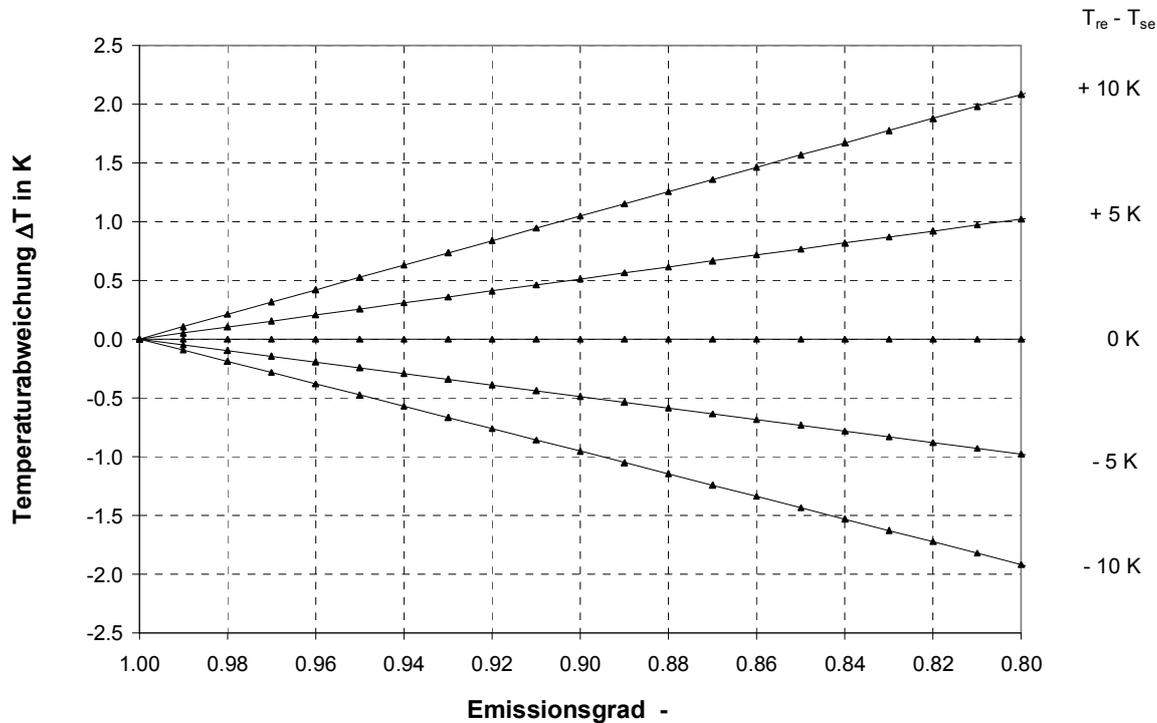


**Bild A-4:** Emissionsgrad  $\varepsilon_{sky}(\varphi)$  bzw. Temperatur des klaren Himmels  $\theta_{sky}(\varphi)$  bei  $\theta_{ae}=0^\circ\text{C}$  in Zürich [11].

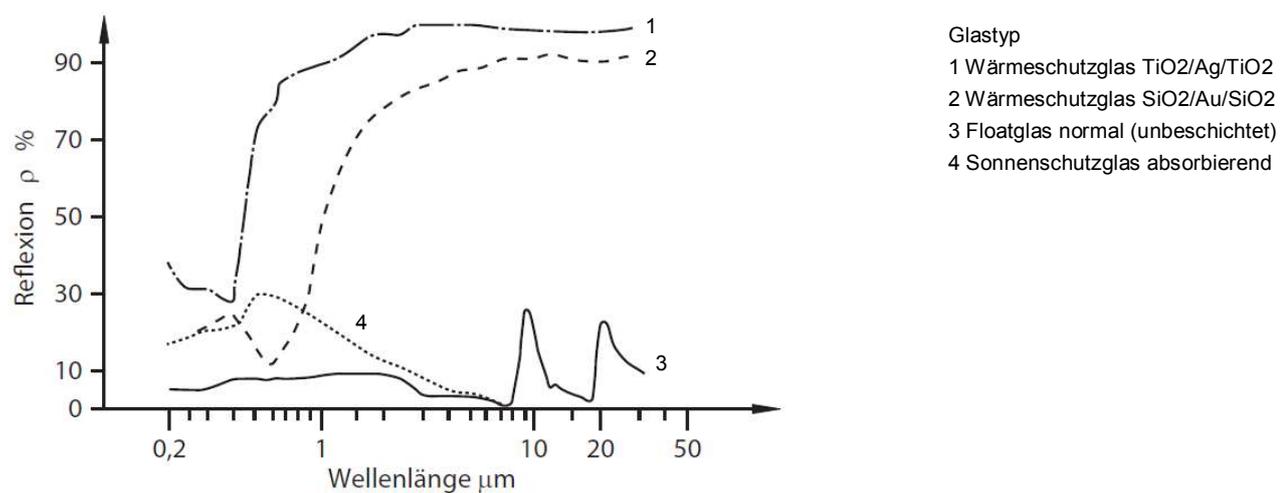


**Bild A-5:** Emissionsgrad  $\varepsilon_{sky}(\varphi)$  bzw. Temperatur des klaren Himmels  $\theta_{sky}(\varphi)$  bei  $\theta_{ae}=0^\circ\text{C}$  in Davos [11].

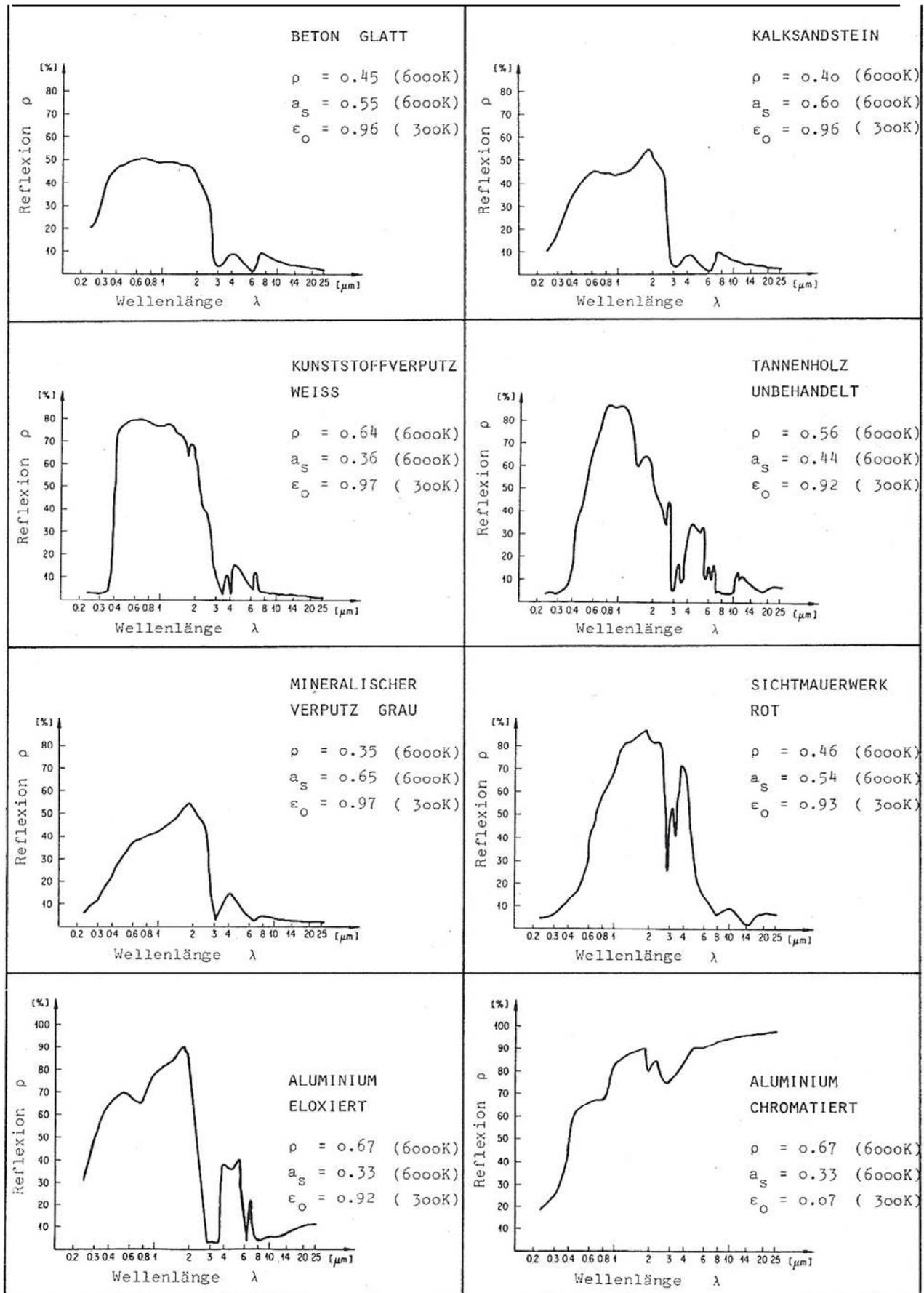
In Bild A-6 ist die mögliche Temperaturabweichung der gemessenen zur wahren Oberflächen-temperatur in Abhängigkeit des Emissionsgrades der Oberfläche und der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungsstrahlungstemperatur und der wahren Oberflächentemperatur angegeben. Beim Emissionsgrad der Oberfläche muss zudem berücksichtigt werden, in welchem Wellenlängenbereich der IR-Kamerasensor misst. Üblicherweise sind dies die beiden Wellenlängenbänder 3-5  $\mu\text{m}$  oder 8-14  $\mu\text{m}$ . Das spektrale Reflexionsverhalten von Baustoffoberflächen kann in diesen beiden Bereichen unterschiedlich sein, wie dies aus Bild A-7 für Gläser mit unterschiedlichen Beschichtungen und in Bild A-8 für typische Baustoffe ersichtlich ist.



**Bild A-6:** Temperaturabweichung in Funktion des Emissionsgrades und der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungsstrahlung und der betrachteten Oberfläche.

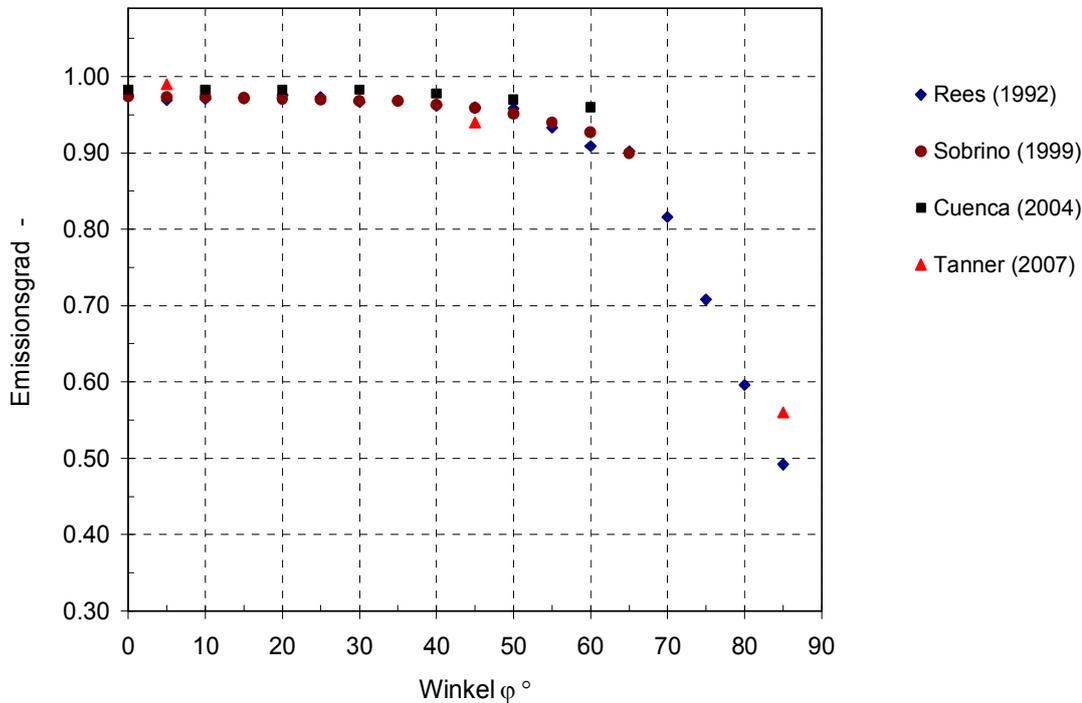


**Bild A-7:** Spektrales Reflexionsverhalten von Glasoberflächen mit unterschiedlichen Beschichtungen [7].

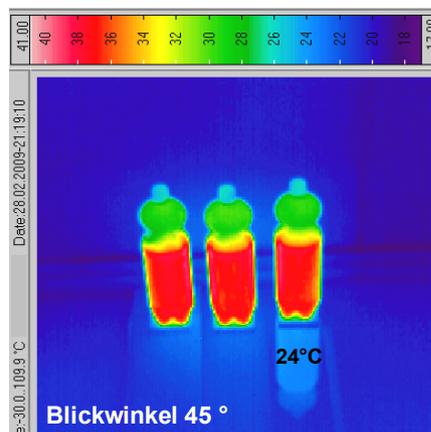
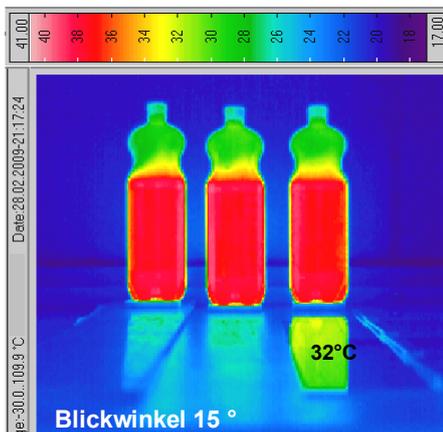


**Bild A-8:** Spektrales Reflexionsverhalten von Baustoffoberflächen [11].

Der Emissionsgrad ist zudem winkelabhängig wie dies aus Messungen am Beispiel von Wasseroberflächen in Bild A-9 ersichtlich ist. Bei schrägem Einfallswinkel wird der Emissionsgrad kleiner, d.h. der Reflexionsgrad nimmt zu. Bild A-10 zeigt das IR-Reflexionsvermögen bei 8-14  $\mu\text{m}$  von Karton, Pavatex und Glas am Beispiel von drei PET-Flaschen, welche mit Wasser von 40°C gefüllt sind und unter einem Blickwinkel von 45° mit der IR-Kamera bei einer Raumtemperatur von 20°C betrachtet werden (Flaschenexperiment [12]).



**Bild A-9:** Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades am Beispiel von Wasseroberflächen ([13] - [16]).



**Bild A-10:** Flaschenexperiment zu den Reflexionseigenschaften von am Boden liegendem:  
 - Karton (links)  
 - Pavatex (Mitte) und  
 - Glas (rechts) [12].



**Bild A-11:** Fotos zu den IR-Bildern. Glas spiegelt auch im sichtbaren Bereich, je kleiner der Winkel, desto stärker die Spiegelung.

## A 4 Eingesetzte Infrarotkameras und Messmittel



**Bild A-12: IR-Kameratyp 1: nec TH 3102**  
(Bild: Aufnahmegerät und Kamerakopf auf Stativ)

- Detektor: mit Stirling Cooler
- Wellenlänge: 8 bis 14  $\mu\text{m}$
- Pixel: 256 x 207 Pixel
- Messunsicherheit  $\pm 1.2\text{ }^\circ\text{C}$  bei Range 1
- Auflösung  $\pm 0.08\text{ }^\circ\text{C}$  bei Range 1

**Einstellungen (Umgebungskompensation):**

- keine Einstellung möglich  
(weitere Informationen siehe IR-Bildkopf)



**Bild A-13: IR-Kameratyp 2: nec TH 7700**

- Detektor: UFPA (ungekühlt)  
(Microbolometer)
- Wellenlänge: 8 bis 13  $\mu\text{m}$
- Pixel: 320 x 240 Pixel
- Messunsicherheit  $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  bzw.  $\pm 2\%$  des MW
- Auflösung  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$  bei 30  $^\circ\text{C}$

**Einstellungen (Umgebungskompensation):**

- Umgebungstemperatur 0  $^\circ\text{C}$
- r. F. 80% auf 15m  
(weitere Informationen siehe IR-Bildkopf)

**Info über PicWin-IRIS**

PicWin-IRIS Version: 7.1 26.01.2004 (Build 952)

**Bild A-14: Auswertungssoftware**  
PicWin-IRIS (ebs), Version 7.1 [20]

**Auswertungsverfahren**

Programm QualiThermo, Version V2.2-2009

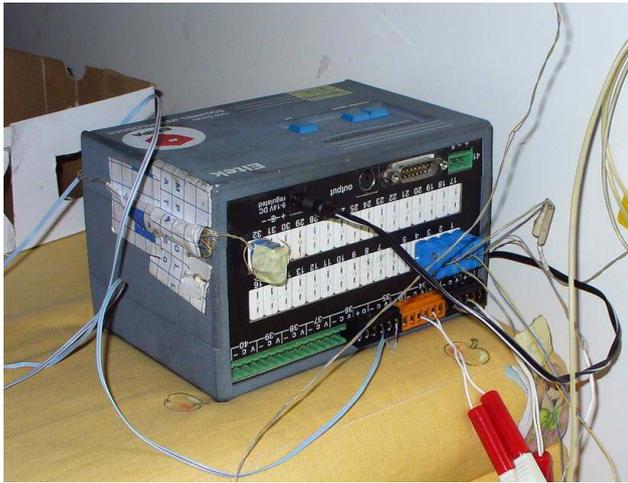


**Bild A-15: Wetterstation DAVIS Vantage Pro 2 Plus wireless**

Wind-, Strahlungs-, Niederschlags- und belüfteter Temperatur- und Feuchtesensor.

Weitere Spezifikationen siehe Anhang A 4.1.





**Bild A-16: Datenlogger**

Squirrel, Eltek, 1000 series

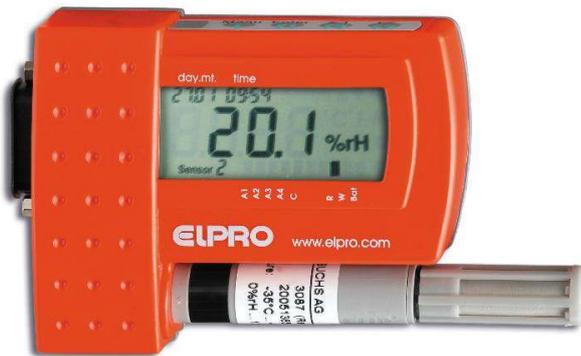
- Messung von Temperaturen mit Thermoelementen (Cu/Co).
- Messung von mV für WFM
- eingestellte Log-Intervalle: 5 min.
- Auflösung Thermoelemente  $K \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$



**Bild A-17: Wärmeflussensoren TNO**  
(aus Empa Abt. 118)

Ø grosse 50 mm  
Ø kleine 25 mm

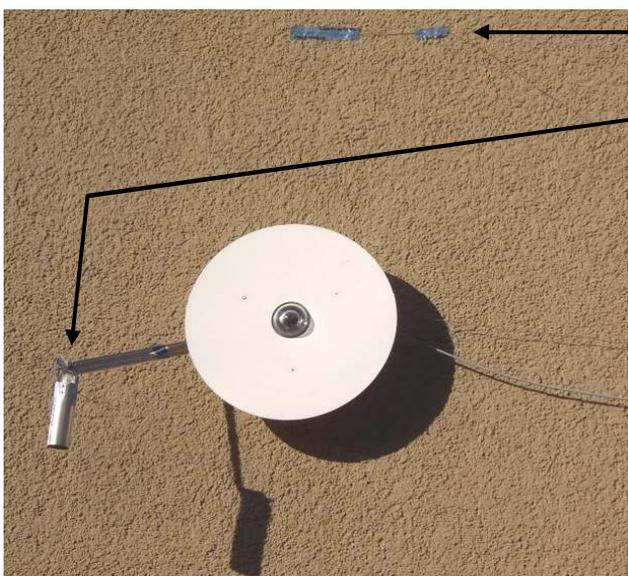
Kalibrierdaten siehe Akten



**Bild A-18: Logger für Temp. und Feuchtigkeit**

ECOLOG, Elpro

- eingestellte Log-Intervalle: 5 min.



Thermoelemente zu Datenlogger  
(für Oberflächentemperatur)

Thermoelement mit Strahlungsschutz  
(für Lufttemperatur)

**Bild A-19: Solarimeter CM5 785059 und 784699**  
(aus Empa Abt. 118)

Referenzgerät Log Nr. 1.6.12

Kipp&Zonen CM22

Ausrichtung  $90^\circ$

Messbereich: gesamtes Strahlungsspektrum

Kalibrierdaten siehe Akten

## A 4.1 Spezifikationen der Wetterstation DAVIS Vantage Pro 2 Plus

Variable	Erforderliche Sensoren	Auflösung	Übertragungsbereich	Nenngenauigkeit (±)
Barometrischer Druck*	In der Konsole enthalten	0,01 Zoll Hg; 0,1 mm Hg; 0,1 hPa; 0,1 mb	26 bis 32 Zoll Hg; 660 bis 810 mm Hg; 880 bis 1080 hPa; 880 bis 1080 mb	0,03 Zoll Hg; 0,8 mm Hg; 1,0 hPa; 1,0 mb
Luftdrucktrendpfeil (3 Stunden)		Änderungsraten Schnell: ≥ 0,06 Zoll Hg; 1,5 mm Hg; 2 hPa; 2 mb Langsam: ≥ 0,02 Zoll Hg; 0,5 mm Hg; 0,7 hPa; 0,7 mb	5 Pfeilpositionen: Schnell ansteigend Langsam ansteigend Konstant Langsam fallend Schnell fallend	
Evapotranspiration (ET)	Integrierte Sensoreinheit oder Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation und Sonneneinstrahlungssensor	0,25 mm; 0,01 Zoll	Tag: 999,9 mm; 99,99 Zoll; Monat und Jahr: 1.999,9 mm; 199,99 Zoll	mehr als 5 % oder 0,25 mm; 0,01 Zoll
Innenluftfeuchtigkeit	In der Konsole enthalten	1 %	10 - 90 %	5 % RL
Außenluftfeuchtigkeit	Integrierte Sensoreinheit oder Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation	1 %	0 bis 100 %	3 % RL; 4 % über 90 %
Zusätzliche Luftfeuchtigkeit	Integrierte Sensoreinheit oder Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation	1 %	0 bis 100 %	3 % RL; 4 % über 90 %
Taupunkt (insgesamt)	Integrierte Sensoreinheit oder Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation	1°F; 1°C	-105° - +130°F; -76° - +54°C	3°F; 1,5°C
Blattfeuchte	Blatt- und Bodenfeuchtestation	1	0 - 15	0,5
Bodenfeuchte	Blatt- und Bodenfeuchtestation oder Bodenfeuchtestation	1 cb	0 - 200 cb	
Tages- und Stummniederschlag	Niederschlagsmesser	0,25 mm; 0,01 Zoll	bis 999,9 mm; 99,99 Zoll	mehr als 4 % oder 1 Entleerung
Monats- und Jahresniederschlag		0,25 mm; 0,01 Zoll (1 mm insgesamt über 2000 mm)	bis 19.999 mm; 199,99 Zoll	mehr als 4 % oder 1 Entleerung
Niederschlagsrate		0,25 mm; 0,01 Zoll	bis 1999,9 mm/h; 100 Zoll/h	mehr als 5 % oder 1 mm/h; 0,04 Zoll/h
Sonneneinstrahlung	Sonneneinstrahlungssensor	1 W/m <sup>2</sup>	0 bis 1800 W/m <sup>2</sup>	5 % des max. Anzeigewerts
Innentemperatur	In der Konsole enthalten	0,1°F; 0,1°C	+32° - +140°F; 0 - +60°C	1°F; 0,5°C
Außenemperatur***	Integrierte Sensoreinheit, Temperaturstation oder Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation	0,1°F; 0,1°C	-40° - +150°F; -40° - +65°C	1°F; 0,5°C
Zusatztemperatur	Integrierte Sensoreinheit, Temperaturstation, Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation, Blatt-/Bodenfeuchtestation oder Bodenfeuchtestation	1°F; 1°C	-40° - +150°F; -40° - +65°C	1°F; (0,5°C)
Hitzeindex	Integrierte Sensoreinheit oder Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsstation	1°F; 1°C	-40° - +135°F; -40° - +57°C	3°F; (1,5°C)
THSW	Integrierte Sensoreinheit und Sonneneinstrahlung	1°F; 1°C	-90° - +135°F; -68° - +64°C	4°F; (2°C)
Zeit	In der Konsole enthalten	1 min	24 Stunden	8 Sek./Monat
Datum		1 Tag	Monat/Tag	8 Sek./Monat
UV-Index	UV-Strahlung	0,1 Index	0 bis 16	5 % des max. Anzeigewerts
UV-Dosis		0,1 MED < 20, 1 MED > 20	0 bis 199 MEDs	5 %
Windrichtung	Anemometer	1°	0 bis 360°	7°
Kompassrose		22,5°	16 Kompasspunkte	0,3 Kompasspunkte
Windgeschwindigkeit (große Schalen)		1 mph; 1 kt; 0,5 m/s; 1 km/h	2 bis 150 mph; 2 bis 130 kts; 3 bis 241 km/h; 1 bis 68 m/s	größer als 2 mph/kts; 1 m/s; 3 km/h oder 5 %
Windgeschwindigkeit (kleine Schalen)	1 mph; 1 kt; 0,5 m/s; 1 km/h	3 bis 175 mph; 3 bis 150 kts; 1,5 bis 79 m/s; 5 bis 282 km/h	größer als 3 mph; 3 kts; 1 m/s; 5 km/h oder 5 %	
Windchill	Integrierte Sensoreinheit	1°F; 1°C	-120° bis +130°F -84° bis +54°C	2°F; 1°C

**Tabelle A-1:** Spezifikation der Wetterstation DAVIS Vantage Pro 2 Plus (Quelle: [www.davisnet.com](http://www.davisnet.com)).

Der Datentransfer von der Wetterstations-Konsole zu einem Notebook erfolgte über eine USB-Schnittstelle mit der Software Weather-Link.