

Langzeiterfahrung zur Funktion der Dämmschürze

beim Projekt Passivhaus Grundschule Frankfurt-Riedberg



Im Auftrag
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az 26309 – 24/2

Mit Förderung durch
DOW Deutschland



Building Solutions

Autoren: Dipl.-Ing. Søren Peper; Dr. Jürgen Schnieders; Prof. Dr. Wolfgang Feist

**Abschlussbericht
Darmstadt / Februar 2011**



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

Langzeiterfahrung zur Funktion der Dämmschürze beim Projekt Passivhaus Grundschule Frankfurt-Riedberg

Autoren:

Dipl.-Ing. Søren Peper
Dr. Jürgen Schnieders
Prof. Dr. Wolfgang Feist (PHI/UNI Innsbruck)

Unter Mitarbeit von:

Dipl. Ing. Wolfgang Hasper
Dipl.-Energiewirtin Cornelia Baumgärtner
Florian Meffert
Henning Aust

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151 / 82699-0
Fax: 06151 / 82699-11
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt, Februar 2011


Dieser Bericht entstand im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Az 26309 – 24/2.

Unser Dank geht an die DBU und DOW Deutschland für die Unterstützung des Forschungsvorhabens.

Wir danken insbesondere auch dem Schulhausverwalter Hr. Laubenbacher für seine Unterstützung vor Ort.

Dieser Bericht ist beim Passivhaus Institut zu beziehen (www.passiv.de)



06/02			
Az	26309-24/2	Referat	Fördersumme 12.640,00 €
Antragstitel		Langzeiterfahrung zur Funktion der Dämmschürzen beim Projekt Passivhaus Grundschule Riedberg	
Stichworte		Dämmschürze, Bodenplatte, Dämmung, Wärmeglocke, Erdreich, Passivhaus	
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
3 Jahre	07.12.2007	06.12.2010	
Zwischenberichte	Keiner		
Bewilligungsempfänger	Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist Rheinstr. 44/46 64283 Darmstadt	Tel	06151-82699-0
		Fax	06151-82699-11
		Projektleitung Dipl.-Ing. Søren Peper	
		Bearbeiter Dipl.-Ing. Søren Peper	
Kooperationspartner	DOW Deutschland AG mbH Fr. Schröders-Krauss Am Kronberger Hang 4 65824 Schwalbach Postfach 5264 65727 Eschborn		
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens			
<p>Die Begleitforschung an der Passivhaus-Schule Frankfurt-Riedberg (DBU Projekt AZ: 20708) zeigte, dass die Funktion der Schule den Erwartungen entspricht. Ein Teilaspekt war die Überprüfung der Wirkung der Dämmschürzen als eine Gründungsalternative zur Verbesserung einer mäßig gedämmten Bodenplatte. Es zeigte sich, dass das Konzept bei großen Gebäuden wie geplant funktioniert (Endbericht unter www.passiv.de herunterladbar). Der Untersuchungszeitraum von rund 2,5 Jahren ist allerdings in Relation zu den Zeitskalen, auf denen sich die thermischen Vorgänge im Erdreich abspielen, sehr kurz. Erst nach dem thermischen „Aufladen“ des Erdreichs kann von einem eingeschwungenen Zustand ausgegangen werden. Um zu genaueren und sichereren Angaben zu kommen und weitere Planungshinweise ableiten zu können, ist es notwendig, über einen längeren Zeitraum Messdaten zu erfassen. Daher wird die Messung drei Jahre fortgeführt.</p>			
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden			
<p>Durch die dauerhafte Messung der Erdtemperaturen unter und neben dem Gebäude sowie der Erdfeuchte, zwei Wärmeströmen durch die Bodenplatte, den Randbedingungen im Gebäude sowie den Klimadaten werden die realen Bedingungen mit der Dämmschürze erfasst und abgebildet. Ergänzend werden Kalibrier- und Fußbodenoberflächentemperaturmessungen durchgeführt. Die Daten sollen u.a. auch zeigen, ob eine Trocknung des Erdreichs nachzuweisen ist.</p> <p>Nach Abschluss der Messphase werden die Messdaten in ein verfeinertes dynamisches Simulationsmodell eingegeben. Es soll zunächst geprüft werden, ob sich das thermische Verhalten des Erdreichs unter dem Gebäude rechnerisch mit dem verfeinerten Modell mit ausreichender Genauigkeit vorher-sagen lässt. Mit dem Modell sollen dann im Endbericht Planungshinweise für vergleichbare Projekte (Schulen, Bürogebäude, Mehrfamilienhäuser) abgeleitet werden.</p>			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de			



Ergebnisse und Diskussion

Die Temperaturmesswerte und die Simulation zeigen, dass sich erwartungsgemäß unter dem Gebäude eine Wärmeglocke ausbildet, welche die Wärmeverluste durch die Bodenplatte reduziert. Es zeigt sich, dass die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich mit den berechneten Werten gut überein stimmen. Die Messungen sind demnach verträglich mit der Annahme, dass die Berechnung der Wärmeverluste durch das Erdreich realistische Ergebnisse liefert. Auch in den Langzeitmessungen konnten keine Indizien dafür gefunden werden, dass das Konzept nicht dauerhaft wie erwartet funktionieren würde, etwa aufgrund von thermischen Effekten im Erdreich, die in den Rechenverfahren nicht berücksichtigt wären.

Es zeigte sich jedoch, dass die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs für ein realistisches Berechnungsergebnis gegenüber den im Labor gemessenen Werten um ca. 50% höher angesetzt werden muss. Als mögliche Erklärung kommt eine Grundwasserströmung unterhalb der Bodenplatte in Betracht.

Die Temperaturen und Wärmeströme benötigen nach Nutzungsbeginn etwa zwei Jahre, bis ein quasi-stationärer Zustand erreicht ist. Die zusätzlichen Wärmeverluste in den ersten Jahren sind von einer Größenordnung, die – so zeigte auch die Praxiserfahrung im hier untersuchten Objekt – die Funktionsfähigkeit des Gesamtgebäudes nicht beeinflussen.

Aufgrund der Untersuchung können Planungshinweise für zukünftige Bauten gegeben werden. Es ist allerdings zu beachten, dass die Verwendung von Dämmschürzen in Verbindung mit reduziertem Wärmeschutz der Bodenplatte stets gewisse Unsicherheiten beinhaltet: Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs muss gewöhnlich abgeschätzt werden. Die dokumentierten Labormessungen an trockenen und feuchten Erdreichproben zeigen erhebliche Unterschiede zwischen nassen und trockenen Proben, so dass – aufgrund der fehlenden Information über die sich im Gebäudebetrieb einstellende Erdreichfeuchte – selbst nach Messungen von Bodenproben die Wärmeleitfähigkeit nur sehr ungenau bestimmt werden kann. Entsprechende Sicherheiten sind daher vorzusehen. Dies gilt auch für mögliche Grundwasserströmungen, die nur an wenigen Standorten völlig ausgeschlossen werden können.

Eine Sensitivitätsstudie zeigte, dass der Effekt der Dämmschürzen im Wesentlichen vom U-Wert der Bodenplatte und von der Tiefe der Dämmschürzen bestimmt wird. Die Dämmstoffstärke spielt dagegen nur eine geringe Rolle, sinnvoll erscheinen ungefähr 10% der Schürzentiefe. Diese Dimensionierung wurde auch am Riedberg gewählt. Die Reduzierung des Wärmeverlustes pro Meter Perimeterlänge erwies sich als nahezu unabhängig von der Größe der Bodenplatte. Das bedeutet, dass Dämmschürzen aus energetischer Sicht auch bei kleineren Gebäuden anwendbar sind. Für die Planung wird eine Orientierung zur Wirkung von Dämmschürzen bei verschiedenen Tiefen und Bodenplatten-U-Werten gegeben.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Forschungsergebnisse werden auf der 15. intern. Passivhaustagung in Innsbruck vorgestellt und im zugehörigen Tagungsband veröffentlicht. Der gesamte Bericht ist unter www.passiv.de herunter zu laden. Eine weitere Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift (z.B. „Bauphysik“) wird angestrebt.

Fazit

Insgesamt erlauben es die durchgeführten Messungen, die Verwendung von Dämmschürzen als eine von mehreren denkbaren Gründungsalternativen zu empfehlen.

Mit Hilfe der erarbeiteten Planungshilfen kann die Wirkung von unterschiedlichen Dämmschürzen (Dicken, Tiefe, Gebäudeabmessung) vorab abgeschätzt werden.

Das vorhandene Projektierungswerkzeug für Passivhäuser „PHPP“ ermöglicht im „Erdreichblatt“ bereits die Berücksichtigung von Dämmschürzen. Die projektspezifische Auslegung sollte anhand eines einfachen Planungswerkzeuges wie z.B. dem PHPP erfolgen. Das dort verwendete Rechenverfahren für Wärmeverluste durch das Erdreich liegt tendenziell eher auf der sicheren Seite.



1 Inhaltsverzeichnis

PROJEKTKENNBLETT	1
1 INHALTSVERZEICHNIS	3
2 EINLEITUNG	4
3 KURZFASSUNG	5
4 GEBÄUDEKURZVORSTELLUNG	8
4.1 Projektdaten.....	8
4.2 Gebäudebeschreibung	9
4.3 Eckdaten Gebäudehülle und Gründung.....	13
5 ZIELSETZUNGEN UND MESSKONZEPT	16
5.1 Aufbau der Messtechnik	16
5.2 Position und Spezifikation der Messstellen.....	18
5.2.1 Temperaturmessungen	18
5.2.1.1 Messungen im Erdreich.....	20
5.2.1.2 Messungen Wärmestrom	23
5.3 Tabellarische Übersicht der Messgeräte	24
6 MESSDATENAUSWERTUNG UND SIMULATIONEN	25
6.1 Klimadaten.....	25
6.2 Oberflächentemperaturmessung	26
6.2.1 Temporäre Datenloggermessung Fußbodenoberfläche	26
6.2.2 Innenthermographie Fußboden Klassenraum und Flur	28
6.3 Wärmeverluste zum Erdreich.....	37
6.3.1 Konstruktion der Bodenplatte	37
6.3.2 Fragestellung	37
6.3.3 Methode.....	37
6.3.4 Details des Simulationsmodells.....	40
6.3.4.1 Erdreicheigenschaften.....	40
6.3.4.2 Simulierte Zeiträume	43
6.3.4.3 Verwendete Randbedingungen	43
6.3.5 Datenausfälle	46
6.3.6 Auswertung Messungen.....	46
6.3.7 Vergleich von Messung und Simulation.....	51
6.3.7.1 Simulation mit Randbedingungen nach Messung.....	51
6.3.7.2 Simulation mit höherer Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.....	59
6.4 Analyse der Einflussfaktoren auf die Wirkung von Dämmschürzen.....	63
7 FAZIT UND PLANUNGSHINWEISE	68
8 QUELLENANGABEN.....	71
9 ANHANG.....	72



2 Einleitung

Die Passivhaus Schule Frankfurt Riedberg – Baujahr 2004 – wurde bereits in einem vorausgehenden Forschungsvorhaben durch ein umfangreiches Monitoring vom Passivhaus Institut (PHI) untersucht. Darin konnte gezeigt werden, dass die Zielsetzungen des Projektes eingehalten wurden. Es ergaben sich hohe Kennwerte für die Behaglichkeit bei einer Heizenergieeinsparung von 90% gegenüber dem Bestand und eine sehr gute primärenergetische Bewertung. Die Raumluftqualitäten bei Betrieb der Lüftungsanlage - gemessen durch CO₂-Konzentrationen - war durchgängig gut. Die vollständigen Ergebnisse sind in [Peper et al 2007] dokumentiert. Die Ergebnisse aus der grundlegenden Untersuchung zu Passivhaus Schulen [Feist 2006] wurden durch diese Evaluation bestätigt.

Diese vorausgehende Begleitforschung im Auftrag der Stadt Frankfurt a.M. mit Fördermitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) hatte darüber hinaus noch weitere Schwerpunkte, wie die Untersuchung eines Lüftungsgerätes und der energetischen Auswirkungen von Türöffnungsvorgängen am Eingangsbereich.

Auch die - mit der hier vorgelegten Untersuchung - behandelte Fragestellung zur Funktion der Dämmschürzen als Gründungsalternative zur Verbesserung einer nur mäßig gedämmten Bodenplatte wurden im vorausgehenden Projekt bereits untersucht. Es zeigte sich allerdings, dass aufgrund des Untersuchungszeitraumes von ca. 30 Monaten nur eingeschränkt gesicherte Aussagen zu diesen Vorgängen möglich waren. Daher wurde diese isolierte Fragestellung mit diesem Forschungsvorhaben nochmals aufgegriffen, um dieses immer wieder kontrovers diskutierte Thema auf einer ausreichenden Grundlage behandeln zu können. Mit den jetzt insgesamt über ca. 6 Jahre vorliegenden Messdaten können nun gesicherte Aussagen gemacht werden. Diese stehen mit diesem Bericht für Folgeprojekte zur Verfügung.

Mit der Grundschule und Kindertagesstätte am Riedberg in Frankfurt am Main hat die Stadt ihren Kurs Richtung Passivhaus-Standard eingeschlagen: Beschlüsse der Stadtverordnetenversammlung aus dem Jahr 2002 lauteten bereits: „Alle zukünftigen zu bauenden Kindertagesstätten und Schulen werden in Passivhausbauweise gebaut“. Diese Entscheidungen finden sich im Magistratsbericht von 2003 und im Koalitionsvertrag von 2006 wieder. Dabei stehen die Gründe der besseren Raumluftqualität mit niedrigen CO₂-Konzentrationen und die niedrigen Betriebskosten bei erheblich verbessertem Klimaschutz im Vordergrund. Mit dieser und der vorausgehenden Untersuchung des realisierten Gebäudes kann der Erfolg der städtischen Entscheidung in der Umsetzung bestätigt werden.

3 Kurzfassung

Die Passivhaus Grundschule mit Kindertagesstätte Riedberg in Frankfurt a.M. wurde nach nur rund 14 Monaten Bauzeit im November 2004 eröffnet. Das Gebäude mit Zweifeld-Sporthalle wurde nach Entwürfen der Architekten 4a aus Stuttgart gebaut. Die Mehrinvestition für den Passivhausstandard betragen nach [Bretzke 2006] moderate 5,3% gegenüber dem zur Bauzeit gültigen Standard der EnEV. Neben der Planungsberatung und Qualitätssicherung während der Ausführungsphase wurde im Auftrag der Stadt Frankfurt mit Fördermitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) vom Passivhaus Institut eine umfangreiche Begleitforschung (Monitoring) durchgeführt. Die Messdatenerfassung erfolgte über etwa 30 Monate und wurde durch zahlreiche Sondermessungen ergänzt. Das Monitoring zeigte durchgängig sehr gute Ergebnisse. Diese sind im Forschungsbericht [Peper et al 2007] veröffentlicht (Download unter: www.passiv.de).

Die Bodenplatte der Schule weist aus statischen Gründen zahlreiche Wärmebrücken auf. Aus diesem Grund wurde die Bodenplatte nur mäßig gedämmt (U-Wert inkl. Berücksichtigung der Wärmebrücken: $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Der Wärmeschutz wurde aus diesem Grund durch 2 m tiefe Dämmschürzen entlang der Gebäudekante ergänzt.

Um Aussagen zur langfristigen Funktion dieser Dämmschürzen als Gründungsalternative zur Verbesserung einer nur mäßig gedämmten Bodenplatte machen zu können, wurde die Messung zu diesem Teilbereich fortgesetzt. Insgesamt liegen damit zu diesem Untersuchungsbereich durchgehende Messdaten über 6 Jahre vor. Dabei wurden durchgehend insbesondere Erdreichtemperaturen unter und neben dem Gebäude, Wärmeströme durch die Bodenplatte und Randbedingungen wie Raum- und Außentemperaturen gemessen. Die Messdaten wurden laufend aufbereitet und ausgewertet. Zusätzlich wurde mit einer thermografischen Untersuchung u.a. die Einheitlichkeit der Temperaturverteilung der Fußbodenoberfläche geprüft.

Für den Bereich der Bodenplatte, in dem die Messungen durchgeführt wurden, wurde ein zweidimensionales thermisches Modell im Wärmestrom-Berechnungsprogramm HEAT2 aufgebaut. Es erlaubt die zeitabhängige Ermittlung der Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich in Abhängigkeit von den Außen- und Innentemperaturen. Dynamische Simulationsrechnungen mit diesem Modell werden für die Messdatenauswertung eingesetzt.

Bereits die Temperaturmesswerte zeigen, dass sich - wie erwartet - unter dem Gebäude ein Wärmesee („Wärmeglocke“) ausbildet, welcher die Wärmeverluste durch die Bodenplatte reduziert. Es zeigt sich, dass die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich mit den berechneten Werten gut überein stimmen. Die Messungen sind demnach verträglich mit der Annahme, dass die Berechnung der Wärmeverluste durch das Erdreich realistische Ergebnisse liefert. Auch in den Langzeitmessungen konnten keine Indizien dafür gefunden werden, dass das Konzept nicht dauerhaft wie erwartet funktionieren würde, etwa aufgrund von thermischen Effekten im Erdreich, die in den Rechenverfahren nicht berücksichtigt wären.



Es zeigte sich jedoch, dass die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs für ein realistisches Berechnungsergebnis gegenüber den im Labor gemessenen Werten um ca. 50% höher angesetzt werden muss. Als mögliche Erklärung kommt eine Grundwasserströmung unterhalb der Bodenplatte in Betracht.

Die Temperaturen und Wärmeströme benötigen nach Nutzungsbeginn etwa zwei Jahre, bis ein quasistationärer Zustand erreicht ist. Die zusätzlichen Wärmeverluste in den ersten Jahren sind von einer Größenordnung, die – so zeigte auch die Praxiserfahrung im hier untersuchten Objekt – die Funktionsfähigkeit des Gesamtgebäudes nicht beeinflussen.

Abbildung 1 illustriert anhand der Temperaturverteilung unter der Bodenplatte beispielhaft für den 1. Januar 2010 die Funktion der Dämmschürzen, wie sie durch die Messungen bestätigt wird. Die Wärmeglocke unterhalb des Gebäudes zwischen den Dämmschürzen ist deutlich zu erkennen.

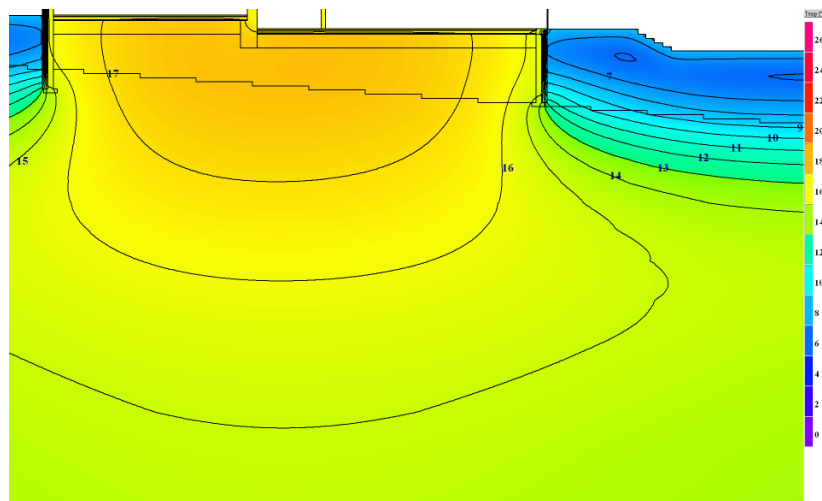


Abbildung 1: Temperaturverteilung im Erdreich am 1. Januar 2010 (Detail von Abbildung 58).

Aufgrund der Untersuchung können Planungshinweise für zukünftige Bauten gegeben werden. Es ist allerdings zu beachten, dass die Verwendung von Dämmschürzen in Verbindung mit reduziertem Wärmeschutz der Bodenplatte stets gewisse Unsicherheiten beinhaltet: Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs muss gewöhnlich abgeschätzt werden. Die dokumentierten Labormessungen an trockenen und feuchten Erdreichproben zeigen erhebliche Unterschiede zwischen nassen und trockenen Proben, so dass – aufgrund der fehlenden Information über die sich im Gebäudebetrieb einstellende Erdreichfeuchte – selbst nach Messungen von Bodenproben die Wärmeleitfähigkeit nur sehr ungenau bestimmt werden kann. Entsprechende Sicherheiten sind daher vorzusehen. Dies gilt auch für mögliche Grundwasserströmungen, die nur an wenigen Standorten völlig ausgeschlossen werden können.

Eine Sensitivitätsstudie zeigte, dass der Effekt der Dämmschürzen im Wesentlichen vom U-Wert der Bodenplatte und von der Tiefe der Dämmschürzen bestimmt wird. Die Dämmstoffstärke spielt dagegen nur eine geringe Rolle, sinnvoll erscheinen ungefähr 10% der Schürzentiefe. Diese Dimensionierung wurde auch am Riedberg gewählt. Die Reduzierung des Wärmeverlustes pro Meter Perimeterlänge erwies sich

als nahezu unabhängig von der Größe der Bodenplatte. Das bedeutet, dass Dämmschürzen aus energetischer Sicht auch bei kleineren Gebäuden anwendbar sind. In Abbildung 2 wird eine erste Orientierung zur Wirkung von Dämmschürzen bei verschiedenen Tiefen und Bodenplatten-U-Werten gegeben.

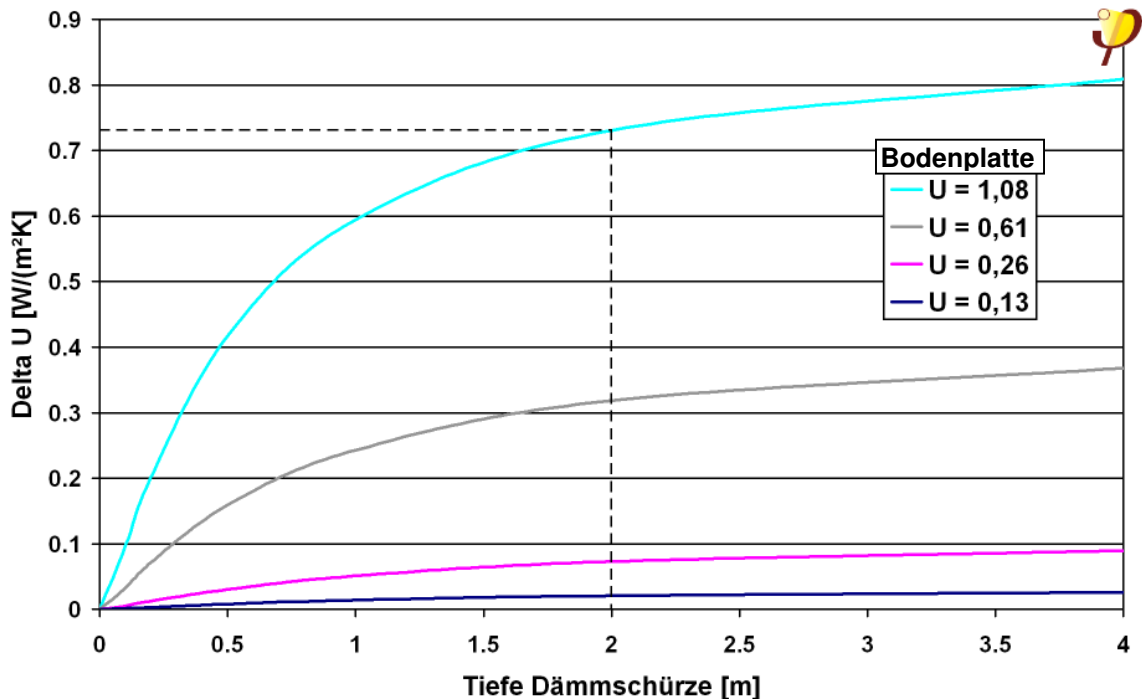


Abbildung 2: Wirkung einer Dämmschürze von 100 mm Stärke für verschiedene Tiefen und U-Werte der Bodenplatte. Ablesebeispiel (gestrichelte Linie): Eine schlecht gedämmte Bodenplatte mit U-Wert 1,08 W/(m²K) lässt sich durch eine 2 m tiefe Dämmschürze thermisch so weit verbessern, als würde man den U-Wert um 0,73 W/(m²K) reduzieren. Details sind in den Erläuterungen zu Abbildung 57 zu finden.

Das Projektierungswerkzeug für Passivhäuser [PHPP 2007] ermöglicht im Erdreichblatt bereits die Berücksichtigung von Dämmschürzen. Die projektspezifische Auslegung sollte anhand eines einfachen Planungswerkzeuges wie z.B. dem PHPP erfolgen. Das dort verwendete Rechenverfahren für Wärmeverluste durch das Erdreich liegt tendenziell eher auf der sicheren Seite (vgl. [Schnieders 2004]).

Insgesamt erlauben es die hier durchgeführten Messungen, die Verwendung von Dämmschürzen als eine von mehreren denkbaren Gründungsalternativen zu empfehlen.



4 Gebäudekurzvorstellung

Diese Gebäudekurzvorstellung soll einen Eindruck vom untersuchten Gebäude geben. Sie ist in aktualisierter und gekürzter Form dem Vorgängerbericht [Peper et al 2007] entnommen. Bei der Schule handelt es sich um ein 3-geschossiges und nur unwesentlich durch andere Bauwerke verschattetes, U-förmiges Gebäude mit einer Kindertagesstätte (KiTa) und Zweifeld-Sporthalle in exponierter Lage am Hang. Das Gebäude befindet sich in Frankfurt am Main.

4.1 Projektdaten

Nach intensiven Beratungen wurde im Frühjahr 2003 von der Stadt Frankfurt beschlossen, den Neubau der Grundschule und Kindertagesstätte im Baugebiet Riedberg in Passivhausbauweise durchzuführen. Die Stadt Frankfurt fasste bereits 2003 den Grundsatzbeschluss, alle zukünftigen Neubauten im Bereich Schulen und Kindertagesstätten im Passivhaus-Standard zu errichten, wenn die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall nachgewiesen werden kann.

Die geplanten Mehrinvestition für eine Ausführung in Passivhausbauweise liegen bei dem Projekt bei ca. 4% gegenüber einer Ausführung gemäß den gültigen Vorschriften. Die Gesamtinvestitionskosten betragen ca. 16,7 Mio. € (die Baukosten (Kostengruppe 300 + 400) allein betragen 11,3 Mio €). Das hinsichtlich Energieeffizienz beispielhafte Bauvorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit einer Förderung von 250 T€ (inkl. wissenschaftliche Begleitung und Messungen) unterstützt.

Tabelle 1: Projektdaten Schule, KiTa und Turnhalle

Nutzungsart	Grundschule und Kindertagesstätte
Nutzer (Planung)	400 Grundschüler in 16 Klassen 100-125 Kinder KiTa 50 Personen Schule, KiTa, Verwaltung
Baubeginn	9/2003
Fertigstellung	10/2004
Fläche (NGF) Schulgebäude und KiTa (Passivhaus-Bauweise)	5707 m ²
Energiebezugsfläche (EBF) (Schulgebäude und KiTa)	5541 m ²
Gebäudenutzfläche A_N (nach EnEV) (Schulgebäude und KiTa)	9037 m ²
Fläche (NGF) Turnhalle (NEH-Bauweise)	ca. 1833 m ²
A/V-Verhältnis	0,35
Bruttovolumen	41.000 m ³
Wärmeversorgung	vollautomatischer Holzpellet-Kessel (2 x 60 kW),
Architekten	Architekten 4a (Stuttgart)

Nach einer Bauzeit von nur 14 Monaten wurde die Schule am 01.11.2004 mit den ersten vier Klassen eröffnet.

Einige zentrale Projektbeteiligte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Projektbeteiligte

Bauherr	Stadt Frankfurt
Projektsteuerung	Hochbauamt Frankfurt
Architekten	Architekten 4 a, Stuttgart
Haustechnik	ICRZ Ing. Cons. Ruth + Zimmermann (HKL)
Wissenschaftliche Begleitung und Messtechnik	Passivhaus Institut, Darmstadt
Förderungen	Land Hessen, DBU

4.2 Gebäudebeschreibung

Die Schule befindet sich im nördlichen Frankfurter Stadtteil Riedberg, welcher sich noch immer in der Aufbauphase befindet. Abbildung 3 zeigt die Lage des Baugebietes im Stadtgebiet von Frankfurt a.M. Das Gebäude ist auf einem nach Südosten abfallenden Hanggrundstück (11 m Gefällehöhe) errichtet. Die U-förmig angeordneten Gebäudetrakte der KiTa (Süd-Flügel) und der Schule (West- und Nord-Flügel) werden von der Sporthalle im Osten abgeschlossen, wodurch eine Hof-situation entsteht.

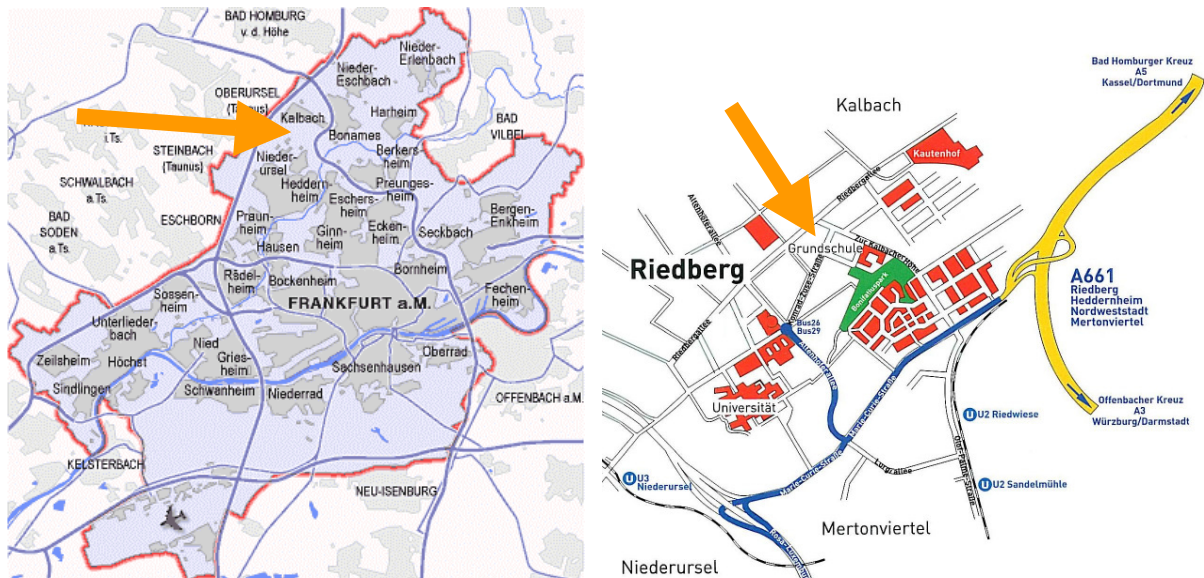


Abbildung 3: Lagekarte der Riedbergschule im Stadtteil Riedberg (Quellen: Links: Vermessungsamt der Stadt Frankfurt. Rechts: Hessenagentur)



Die Anordnung des Gebäudes und der Nutzungsbereiche ist aus dem beschrifteten EG-Grundriss zu entnehmen. Gebäudeschnitte, Ansichten und weitere Grundrisse sind im Anhang dargestellt.

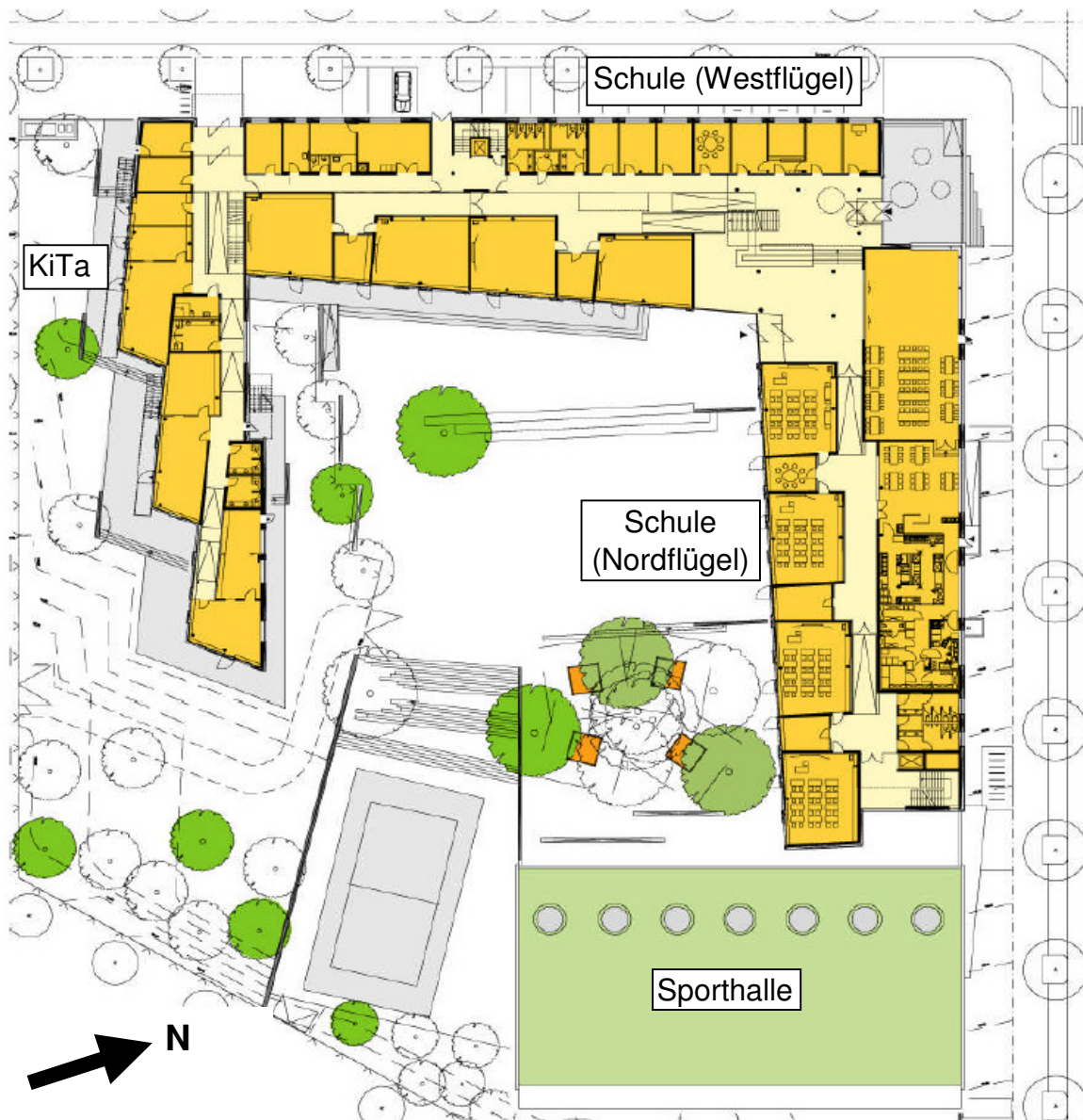


Abbildung 4: Grundriss EG von Schule, KiTa und Sporthalle (Quelle: Architekturbüro 4a)

Um einen Eindruck vom Gebäude zu vermitteln, sind im Folgenden einige Außenansichten dargestellt (Abbildung 5 bis Abbildung 9).



Abbildung 5: Hofansicht von der KiTa in Richtung Norden auf den Schulteil.



Abbildung 6: Winterliche Ansicht vom Haupteingang (Nord-West).



Abbildung 7: Ansicht Nord-West Fassade.



Abbildung 8: Ansicht Nordfassade (ohne Turnhalle)



Abbildung 9: Südfassade der KiTa

Die angrenzende Turnhalle wurde in der Qualität eines guten Niedrigenergiehauses erbaut. Sie ist nicht Gegenstand der Untersuchung und wird hier daher nicht näher beschrieben.

Zwei Innenansichten des Gebäudes sind im Folgenden dargestellt.



Abbildung 10: Flur im 2. OG mit der großzügigen, schrägen Ostverglasung.



Abbildung 11: Typischer Klassenraum (ohne Möblierung).

4.3 Eckdaten Gebäudehülle und Gründung

Die Stahlbetonkonstruktion mit massiven Außenwänden ist mit einer wärmege-
dämmten Vorhangfassade bekleidet. Die Vorhangfassade wurde mit einer Dämm-
stärke von 280 mm Mineralwolle ausgeführt.



Abbildung 12: Aufbau der vorgehängten Fassade mit zweilagigem Dämmstoff.

In Tabelle 3 sind die thermischen Eckdaten der Gebäudehülle zusammengestellt.

Tabelle 3: Übersicht der thermischen Kennwerte der Passivhaus-Gebäudehülle

Bauteil	U-Wert [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
Dach (30 cm Gefälldämmung)	0,11
Außenwand (Vorhangfassade)	0,16
Boden (incl. Wärmebrücken)	0,35
Zusammen mit Frostschürze (20 cm Dämmung, bis 2 m unter Bodenplatte)	Reduktionsfaktor 0,22
Fenster	$U_w = 0,74 / U_g = 0,6 / g = 41\%$

Gründung

Die Bodenplattendämmung hat für ein hochwärmedämmtes Gebäude eine relativ geringe thermische Qualität ($U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$). Die aussteifenden Betonwände und Säulen gehen ohne thermische Trennung bis auf die Bodenplatte, wobei die Dämmung auf der Bodenplatte liegt. Um diese Dämmung zu optimieren und die Wärmebrückeneffekte abzuschwächen, wurden umlaufend 2 m tiefe Dämmschürzen ausgebildet. Zum Einsatz kam XPS-Dämmstoff mit einer Dicke von insgesamt 20 cm (2-lagig, verklebt, Typ „Roofmate SL-X“, Hersteller: DOW) mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,030 \text{ W}/(\text{mK})$ (gemäß DIN 4108, Teil 2). Die Betonteile der Schürzen waren aus statischen Gründen (Lage am Hang) notwendig und konnten so verwendet werden, um den Dämmstoff zu fixieren. Die auftretenden Schubspannungen bei der Hanglage hätten z.B. von einer Schaumglas-Dämmung mit Bitumeneinbettung nicht aufgenommen werden können. Daher wurde die kostengünstigere Lösung mit der Verlängerung der sowieso notwendigen Frostschürzen realisiert. Die Trittschalldämmung wurde um 10 cm Wärmedämmung ergänzt. Die Situation der

realisierten Dämmschürzen ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Wirksamkeit der Lösung wird in Abschnitt 6.3 überprüft.



Abbildung 13: Beton mit Dämmschürze, 20 cm Dämmstoff (zweilagig geklebt), vor Erstellung der Bodenplatte (Oktober 2003).



Abbildung 14: Verlängerung der Dämmschürze im Bereich der KiTa. Die Sauberkeitsschicht ist bereits fertiggestellt.



5 Zielsetzungen und Messkonzept

Mit der Untersuchung sollen Wirkung und Nutzen von Dämmschürzen als eine Gründungsalternative zur Verbesserung einer mäßig gedämmten Bodenplatte bei großen Gebäuden überprüft werden. Die bereits im Vorläuferprojekt über 2,5 Jahre durchgeführte Messung zur Funktion der Dämmschürzen des Schulgebäudes zeigte, dass das Konzept bis zum Ende der Messungen bei großen Gebäuden wie geplant funktioniert.

Der Zeitraum von rund 2,5 Jahren ist allerdings in Relation zu den Zeitskalen, auf denen sich die thermischen Vorgänge im Erdreich abspielen, sehr kurz. Das Erdreich unter dem Gebäude muss zunächst über einige Jahre thermisch „aufgeladen“ werden. Im Bereich des Bauplatzes befand sich vor dem Bau eine unbebaute, landwirtschaftlich genutzte Fläche. Erst nach einem längeren Zeitraum der Gebäudenutzung kann von einem eingeschwungenen Zustand des Erdreiches ausgegangen werden. So zeigte die Messung der relativen Luftfeuchte im Erdreich erst am Ende der vorausgehenden Messperiode erste, sehr geringe Trocknungsanzeichen.

Mit der verlängerten Messung sollen die bei der vorausgehenden Untersuchung notwendigerweise für die dynamische Simulation getroffenen Annahmen besser abgesichert werden. Nur so können genauere und gesicherte Angaben ermittelt werden, um dann weitere Planungshinweise ableiten zu können. Aus diesem Grund wurden über weitere drei Jahre Messdaten erfasst und aufgezeichnet. Damit sind insgesamt durchgehend Daten von sechs Messjahren verfügbar. Mit dieser Datengrundlage sollen die Simulationsrechnungen mit einem überarbeiteten Simulationsmodell und verfeinerten Annahmen durchgeführt werden.

Bei der Untersuchung zu den Dämmschürzen werden folgende wissenschaftliche Fragestellungen untersucht, die für die Anwendbarkeit bei zukünftigen Projekten von Interesse sind:

1. Decken sich die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme mit der Simulation, d.h. lässt sich das thermische Verhalten des Erdreichs unter dem Gebäude rechnerisch mit ausreichender Genauigkeit vorhersagen? Wie muss gegebenenfalls das Simulationsmodell angepasst werden?
2. Kann eine Trocknung des Erdreichs unter der Bodenplatte nachgewiesen werden?
3. Welche Konsequenzen für die Planung vergleichbarer Projekte (Schulen, Bürogebäude, Mehrfamilienhäuser) lassen sich aus den Messungen ableiten?

5.1 Aufbau der Messtechnik

Der Umfang der Messungen im verlängerten Messzeitraum wurde reduziert auf den notwendigen Bereich der Erdreichtemperaturen und der relevanten Randbedingungen (Gebäude, Wetterdaten). Die zuvor verwendeten Sensoren zur

Untersuchung der Energie- und Wasserverbräuche sowie der Raumluftqualität etc. für die zuvor durchgeführte Untersuchung wurden demontiert bzw. die Daten nicht mehr erhoben. Im Klassenraum 0.3 direkt über den Erdreichsensoren wurden weiterhin die Raumluft- und Wandoberflächentemperatur sowie die relative Raumluftfeuchte gemessen. Ebenso wurden die Raumlufttemperaturmessung im Flur vor dem Raum 0.3 und die beiden Wärmestrommessplatten im Fußbodenaufbau von Raum 0.3 weiterbetrieben. Zur Sicherheit wurden auch die Parameter des benachbarten Klassenraumes 0.4 weiter gemessen und aufgezeichnet.

Die Messungen erfolgten über das im Gebäude aufgebaute M-Bus-Messnetz (gem. [DIN EN 1434-3]). Ein sog. „M-Bus-Master“ (Pegelwandler) ist dazu mit dem zentralen Messrechner verbunden. Alle Sensoren des Messnetzes (Raumluft- und Oberflächentemperatur, Erdreichtemperatur, Luftfeuchte und Wärmestrom) sind direkt oder über Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) mit dem M-Bus-Netz verbunden. Die Messstellen werden zeitlich hochaufgelöst in 10-minütigen Intervallen abgefragt und die Daten werden auf dem zentralen PC abgespeichert. Dieser ist mit einer ISDN-Karte zur Datenfernübertragung über das Telefonnetz und regelmäßigen Kontrolle der Messdaten ausgestattet. Der schematische Aufbau des Messnetzes ist in Abbildung 15 dargestellt.

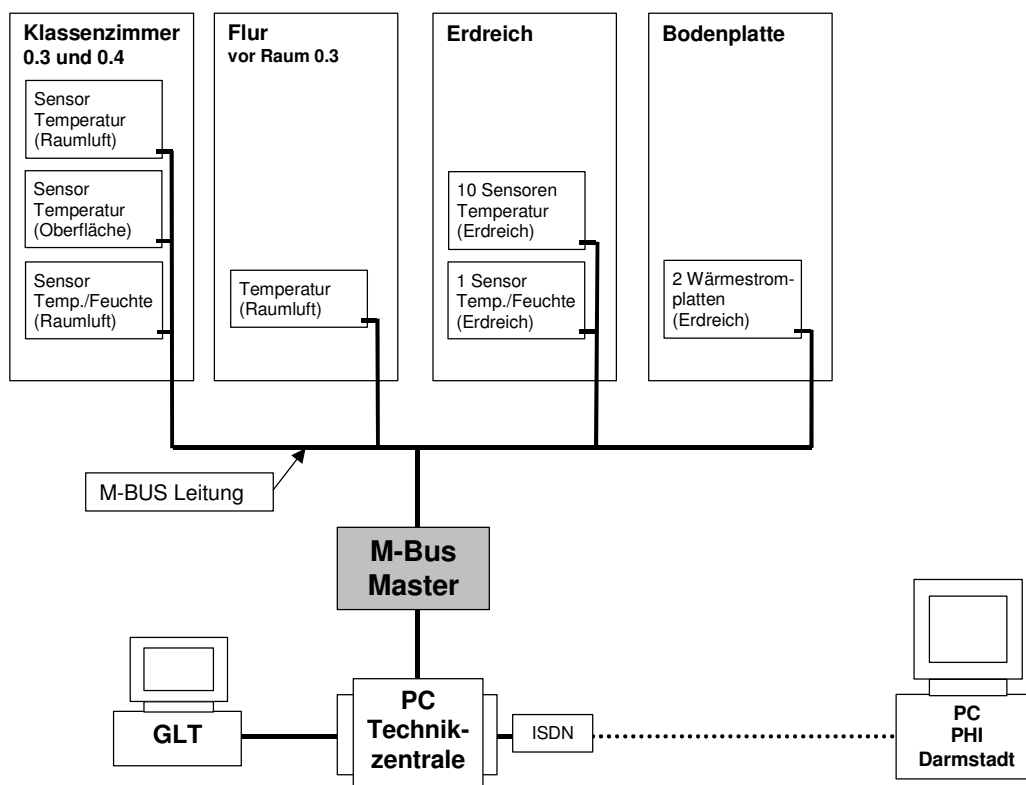


Abbildung 15: Schematische Darstellung des M-Bus-Systems mit der Datenerfassung über die GLT sowie der Fernübertragung zum Passivhaus Institut.

Der Messrechner und der M-Bus-Master sind im Büro des Schulhausverwalters im EG positioniert.



Abbildung 16: Zentraler Messrechner mit Bildschirm und Unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV) im Büro des Schulhausverwalters (rechts unter dem Tisch: GLT-Rechner und PC des Schulhausverwalters).

Da Wetterstation der zentralen Gebäudeleittechnik (GLT) lieferte im verlängerten Zeitraum nur unzuverlässig Wetterdaten. Diese konnten im ergänzten Messzeitraum nicht verwendet werden; es wurden daher Daten der nächstgelegenen Wetterstation des Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) beschafft. Die von der GLT erfassten Wetter- und Verbrauchsdaten wurden aber weiterhin ausgelesen und durch ein lokales Netzwerk vom GLT-Rechner auf den zentralen Messrechner des M-Bus-Systems übertragen.

Die Messung der Erreichverluste war nicht die primäre Aufgabe des vorausgehenden Messprojektes. Andernfalls hätte man beispielsweise die Bodenoberflächentemperaturen in der Nähe der Wärmestrommessplatten direkt gemessen und ebenso die Randbedingungen (Temperaturen) im Treppenhaus des untersuchten Gebäudeschnittes erfasst. Diese Größen mussten jetzt für die Auswertung auf anderem Wege ermittelt oder abgeschätzt werden (Erläuterungen zum Vorgehen siehe weiter unten).

5.2 Position und Spezifikation der Messstellen

Die für die Messungen verwendeten Messeinrichtungen werden in diesem Abschnitt genauer spezifiziert.

5.2.1 Temperaturmessungen

Zur Messung der Raumtemperaturen wurden M-Bus-Temperatur Sensoren eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Sonderentwicklung nach Vorgaben des Passivhaus Instituts. Als Mess-Sensor für die Raumluftmessung werden langzeitstabile Platin-Widerstände (Pt100) der höchsten Genauigkeitsklasse (Klasse: 1/10 DIN) verwendet. Die Temperatursensoren geben alle 6:40 Minuten eine Mittelwerttemperatur aus. Die Elektronik der Sensoren ist in Unterputzdosen montiert und mit

geschlitzten Deckeln (Belüftung) abgedeckt. Die Lage der Temperatursensoren in Raum 0.3 kann dem Grundriss in Anhang A entnommen werden.

Raumlufttemperaturen: Bei den Messstellen für die Raumlufttemperaturen in den beiden Klassenräumen 0.3 und 0.4 befindet sich der Pt100-Sensor im Abstand von ca. 5 cm vor der Wandoberfläche in einem vertikalen Aluminium-Strahlungsschutzrohr. Das Schutzrohr ist an der Ober- und an der Unterseite offen, damit es ungestört von der Raumluft durchströmt werden kann. Um den Sensor vor Beschädigung zu schützen, ist er in 2,9 m Höhe über dem Fußboden an der vertikalen Fläche der Deckenabkofferung positioniert. Die Temperaturmessung im Flur ist nicht mit einem Strahlungsschutzrohr ausgestattet; der Sensor befindet sich unter dem geschlitzten Deckel. Da er niedriger angebracht ist als der Sensor im Klassenraum, würde er sonst nicht ausreichend geschützt sein.

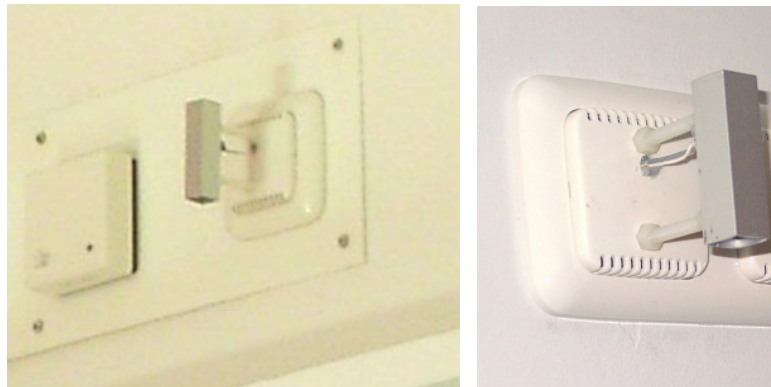


Abbildung 17: LINKS: Sensorplatte in einem Klassenraum an der Stirnseite der Deckenabkofferung mit einem Feuchte- und einem Temperatursensor. RECHTS: Einzelner Temperatursensor mit Strahlungsschutzrohr.



Abbildung 18: Klassenraum mit der Sensorplatte rechts neben dem schlitzförmigen Zuluft-Ventil.



Wandoberflächentemperatur: Zusätzlich sind in den beiden Klassenräumen Unterputz-Pt100-Sensoren für die Messung der Wandoberflächentemperatur eingeputzt worden. Die Oberflächentempersensoren wurden vor dem Verspachteln der Betonwände mit etwas Gips ca. 10 bis 15 cm von der Unterputzdose entfernt oberflächennah aufgebracht. Die beiden Sensoren befinden sich etwa in 2 m Höhe über der Fußbodenoberfläche.

Kalibrierung

Vor der Montage der Temperatursensoren wurden diese im Passivhaus Institut kalibriert (siehe [Peper et al 2007]). Bei Voruntersuchungen dazu hatte sich gezeigt, dass die Messwerte der M-Bus-Module mit Pt100-Widerstand im Strahlungsschutzrohr (Aluminium) einem gewichteten Mittel aus etwa 80 % Lufttemperatur und 20 % Oberflächentemperatur entsprechen. Bei dem Sensor im Flur ohne Schutzrohr ist das Verhältnis gerade umgekehrt. In den Fluren gibt es keine zusätzlichen Oberflächensensoren. Der Messwert stellt eine gute Näherung für die operative Temperatur im Flur dar.

Um die Lufttemperaturmessung im Objekt bei realen Bedingungen zu überprüfen und um Aussagen über die Temperaturschichtung machen zu können, wurden bereits in der vorhergehenden Untersuchung Kontrollmessungen durchgeführt (siehe [Peper et al 2007]). Die für die Fortsetzung der Messung durchgeführten Kalibriermessungen und Methoden zur Bestimmung der Fußbodenoberflächentemperaturen sind weiter unten im Abschnitt zur Messdatenauswertung ausführlich beschrieben.

5.2.1.1 Messungen im Erdreich

Wie bereits in [Peper et al 2007] beschrieben, wurden zur Bestimmung der Wirksamkeit der Dämmschürzen an zehn Punkten Erdreichtemperaturen gemessen. Dazu wurden Erdkabel mit Pt100-Sensoren eingesetzt. Diese wurden am 13.10.2003 und am 17.06.2004 im Bereich unter der späteren Bodenplatte und im Außenbereich in unterschiedlichen Tiefen positioniert und räumlich eingemessen. Außerdem wurde auch eine Messstelle zur Bestimmung der relativen Bodenfeuchte in einem Kunststoffrohr montiert und im Bereich unter der späteren Bodenplatte eingebaut. Damit wird die relative Feuchte im Erdreich als Ausgleichsfeuchte in einem erdreichumschlossenen Lufthohlraum gemessen.

Um die Überdeckung der Erdsensoren durch die später fertiggestellte Pausenhof-Oberfläche (Rasengittersteine und Stufen) zu ermitteln, wurde am 28.06.2006 mit einer Schlauchwaage der Hof-Bereich vermessen (Höhe gegenüber der Oberfläche Fertigfußboden von Raum 0.3).



Abbildung 19: Montage der Erdreichtemperatursensoren 2003 (hier in Nähe der Dämmschürze) unter der späteren Bodenplatte in unterschiedlichen Tiefen.



Abbildung 20: Sensor zur Messung der relativen Feuchte im Erdreich. LINKS: Im Kunststoffschutzrohr montierter Sensor. RECHTS: Montage des Sensors im Bereich unter der späteren Bodenplatte, etwa auf Höhe des untersten Fußpunktes der Dämmschürze.

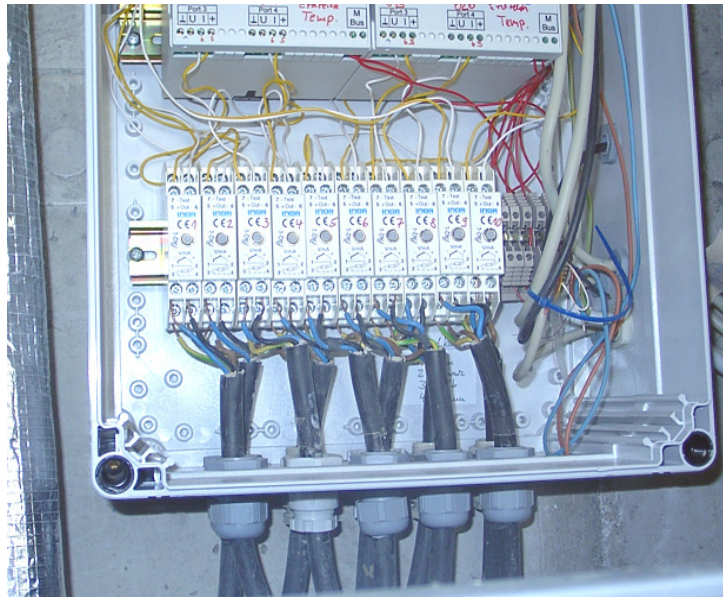


Abbildung 21: Unterer Teil des Schaltkastens in Raum 0.3. der u.a. zur Messung der Erdreichtemperaturen dient (unterste Reihe: Umsetzer für die Pt100-Vierleiter-Messung mit eingeführten Erdkabeln der Pt100-Erdreichsensoren).

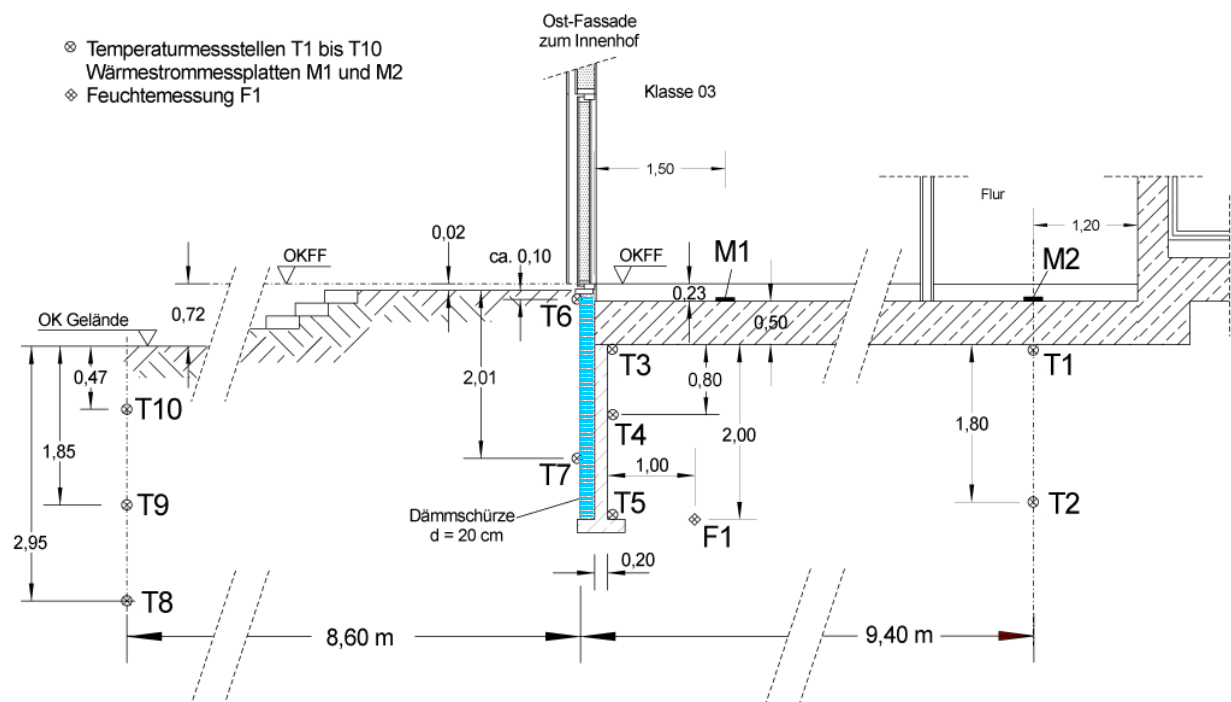


Abbildung 22: Positionen der Erdreichtemperatursensoren und der Feuchtemessstelle im Bereich unter Raum 0.3 und im Hof. Die beiden Wärmestrommessplatten sind ebenfalls markiert. (Zeichnung vom Architekturbüro 4a / Ergänzung: PHI)

Um die Messdaten der Erdreichtemperaturen und Bodenfeuchte in einer Simulation nachvollziehen zu können, werden Daten über die thermischen Bodeneigenschaften benötigt. Aus diesem Grund wurden bereits im Rahmen der vorausgehenden Untersuchung bei der Verlegung der Sensoren zwei Erdreichproben (gewachsener Boden und aufgeschütteter Boden) entnommen. Diese wurden an der Brandenbur-

gischen TU Cottbus am Lehrstuhl für angewandte Physik auf ihre Wärmeleitfähigkeit und ihre spezifische Wärmekapazität bei unterschiedlichen Feuchten untersucht (siehe dazu Abschnitt 6.3.4.1).

5.2.1.2 Messungen Wärmestrom

Zur Messung der Wärmeströme durch die Bodenplatte wurden während der Bauphase 2004 im Raum 0.3 und im thermisch „ungestörten“ Kern des Gebäudes - im Flur vor Raum 0.3 - zwei kalibrierte Wärmestrom-Messplatten (Fa. Phymeas) im Bodenaufbau montiert. Die Wärmestrommessplatten sind über Signalverstärker mit den Digital/Analog-Wandlern im Schaltschrank von Raum 0.3 verbunden.



Abbildung 23: Montage der Wärmestrommessplatten in Raum 0.3 (vor dem Einbringen der Dämmung) und im Bodenaufbau im Flur vor Raum 0.3.



5.3 Tabellarische Übersicht der Messgeräte

Tabelle 4: Zusammenstellung der Messgeräte der Dauermessung mit Angaben zu Messzweck und -ort, Hersteller und Messgenauigkeit.

Messgröße	Messort	Einheit	Spezifikation	Hersteller	Messgenauigkeit
Messungen Klassenräume und Flure					
Lufttemperatur	abgehängte Decke Klassenzimmer	C°	PT 100, Unterputzdose + Alurohr	Fa. DENEK	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Lufttemperatur	Leichtbauwand Flur	C°	PT 100, Unterputzdose	Fa. DENEK	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Oberflächen- temperatur	Betonwand Klassenzimmer	C°	PT 100, Unterputzsensoren	Fa. DENEK	Pt 100 DIN Klasse 1/10 B
Rel. Feuchte, Lufttemperatur	abgehängte Decke Klassenzimmer	% / C°	Hygro-Temp- Sensor KWL3/5	Fa. Galltec	+/- 3% r.F. +/- 1C°
Wärmestrom Bodenplatte	Klassenzimmer, Flur	W/m ²	Wärmefluss- messplatte Typ 7	Fa. Phymas	+/- 5%
Messung Erdreich					
Erdreichtemperatur	Erdreich unter Bodenplatte und Pausenhof	C°	Pt 100/0 RM-Typ RL-13018	Fa. Rössel Messtechnik	Pt 100 DIN Klasse A
Feuchte, Erdreichtemperatur	Erdreich unter Bodenplatte	r.F. / C°	PT 100, Compact Messumformer	Fa. testo	+/- 2% r.F. / Pt 100 DIN Klasse B

6 Messdatenauswertung und Simulationen

In diesem Abschnitt werden die Messdaten bezüglich der Fragestellungen des Projektes zur Funktion der Dämmschürzen ausgewertet. Für die Auswertung werden die Daten, welche im Rahmen dieser Messungen erhoben wurden und die des vorausgehenden Forschungsprojektes verwendet. Aus diesem Grund liegen insgesamt Daten im Zeitraum vom 17. November 2004 bis zum 10. Oktober 2010 vor, also über einen Zeitraum von rund 72 Monaten (6 Jahre).

6.1 Klimadaten

Als Außentemperatur wurden die Messdaten der GLT Wetterstation von der Riedbergschule verwendet. Die Daten werden von der GLT-Anlage des Gebäudes als 30-Minuten bzw. ab dem 03. November 2005 als 60-Minuten Daten abgespeichert. Fehlende Wetterdaten und aufgrund von diversen Datenlücken generell ab dem 01.05.2007 wurden mit Messdaten der Station „Frankfurt Hoechst“ vom Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hulg) ergänzt. Diese Daten sind unter www.hulg.de herunterzuladen. Eine Übersicht über die tagesmittleren Außentemperaturen während der Gesamtzeit der Untersuchung zeigt Abbildung 24.

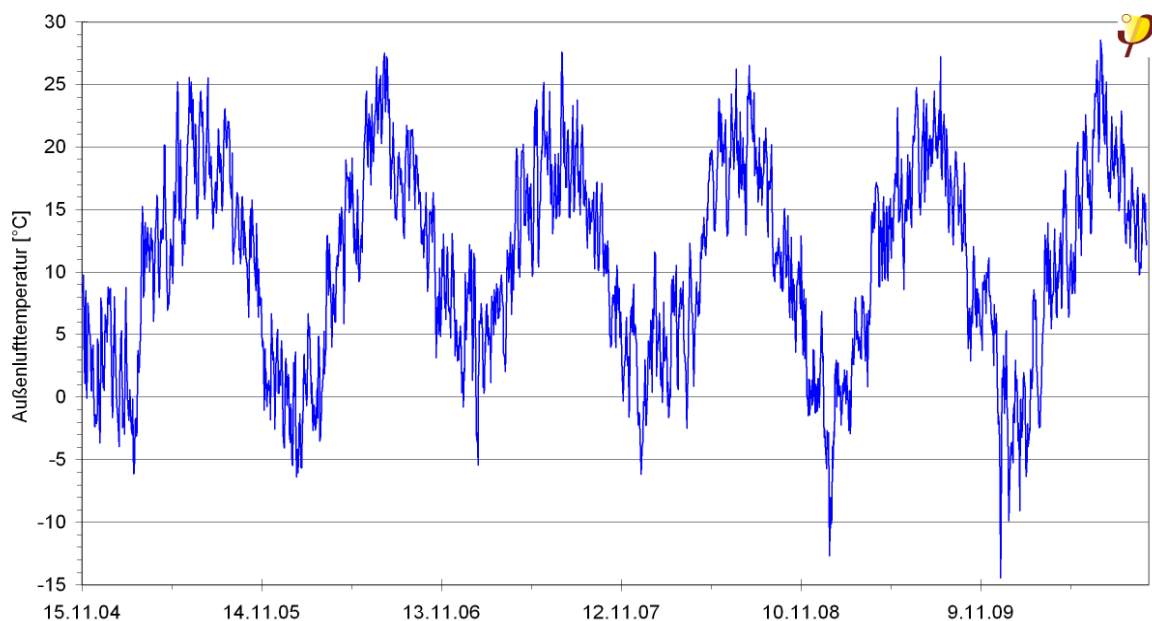


Abbildung 24: Tagesmittlere Außenlufttemperatur vom 16.11.2004 bis zum 10.10.2010 (Messung GLT Wetterstation Riedbergschule ergänzt mit HULG Messdaten).

Es ist deutlich zu erkennen, dass die beiden letzten untersuchten Winterzeiträume die niedrigsten Minimaltemperaturen aufweisen. Im Dezember 2009 werden als Tagesmittelwert fast -15 °C erreicht. Der höchste gemessene Tagesmittelwert im Untersuchungszeitraum ergibt sich am 10. Juni 2010 mit $28,6\text{ °C}$.



6.2 Oberflächentemperaturmessung

Die Fußbodenoberflächentemperatur stellt eine entscheidende Einflussgröße für die Untersuchung der Funktion der Dämmschürzen dar. Bei dem vorgelagerten Forschungsprojekt zur Funktion der Passivhausschule [Peper et al 2007] wurde die Oberflächentemperatur des Fußbodens im Klassenraum vereinfacht anhand der gemessenen Raumlufttemperatur und einer exemplarisch ermittelten Temperaturschichtung ermittelt.

Um noch genauer diese Randbedingungen bestimmen zu können, waren weitere Untersuchungen notwendig. Dazu wurden zum einen vom 18.12.2007 bis zum 07.01.2008 (überwiegend in den hessischen Schulweihnachtsferien 2007/2008) temporäre, direkte Messungen der Oberflächentemperatur in Raum 0.3 mittels Sensoren und einem Datenlogger durchgeführt. Zum anderen wurde am 07.01.2008 die Fußbodenoberfläche in Raum 0.3 und dem Flur davor thermographiert.

6.2.1 Temporäre Datenloggermessung Fußbodenoberfläche

Mit einem zusätzlichen Stand-alone-Datenlogger, welcher mit drei Oberflächensensoren (Pt100 Foliensensoren) ausgestattet wurde, konnten die Fußbodentemperaturen über etwa 20 Tage gemessen und aufgezeichnet werden (Anordnung siehe Abbildung 25). Mit der Messung wurden die Oberflächen unter einem der Schultische in etwa zwei Meter Abstand von der Außenfassade untersucht. Es wurde zur Absicherung redundant mit drei Sensoren gemessen. Außerdem wurde gleichzeitig die Raumlufttemperatur-Dauermessstelle mit Strahlungsschutz in 2,94 m Höhe (M-Bus-Messung) überprüft. Dazu wurde dort ein weiterer Stand-alone-Datenlogger montiert, welcher mit einem Lufttemperatursensor ausgestattet wurde (siehe Abbildung 26).

Mit den Messungen mittels der beiden Datenlogger wurden drei Schultage mit Raumnutzung erfasst; die restlichen Zeiten der Messung lagen in den Schulferien ohne Raumnutzung und mit abgeschalteter oder reduzierter aktiver Beheizung und Lüftung.



Abbildung 25: Aufbau der temporären Oberflächentemperaturmessung auf dem Fußboden im Klassenraum 0.3. Im linken Foto sind die drei Oberflächensensoren dargestellt, welche mit Wärmeleitpaste auf den Fußboden geklebt wurden. Im rechten Bild sind der Datenlogger sowie der Korb, der später zum Schutz über den drei Messpunkten positioniert wurde, zu sehen. Die Sensoren sind hier bereits mit Kreppband fixiert.



Abbildung 26: Dauerhafte M-Bus-Temperaturmessstelle in 2,94 m Höhe im Klassenraum 0.3 während der Vergleichsmessung mit einem Datenlogger.

Die Dauermessung (M-Bus) liefert neben der Raumlufttemperatur auch die Wandoberflächentemperatur (im Putz) neben der Tür zum Flur in ca. 2 m Höhe. Die Messdaten der Datenlogger und der Dauermessung wurden ausgewertet und miteinander verglichen.

Es zeigte sich, dass die Dauermessung der Lufttemperatur gut mit der temporären Vergleichsmessung in dieser Höhe zusammenpasst. Während der Nutzungszeiten sind diese nahezu identisch.

Der Vergleich der drei temporär gemessenen Oberflächentemperaturen auf dem Fußboden zeigt Unterschiede von maximal 0,4, normalerweise ca. 0,10 bis 0,15 K. Diese Größenordnung liegt innerhalb der Messgenauigkeit. Hier kann daher gut der Mittelwert der drei Messungen verwendet werden.



In Abbildung 27 ist erkennbar, dass die Oberflächentemperatur im Wandputz in 2 m Höhe (orange Kurve) recht gut mit den gemessenen Oberflächentemperaturen des Fußbodens korrespondiert. Während der Nutzungszeiten liegt die Wandtemperatur am Morgen etwa 0,4 K höher als die Fußbodentemperatur, am Mittag liegt sie etwa 0,2 K unter der Oberflächentemperatur. Der Temperaturgang im Putz ist etwas gedämpft gegenüber der (quasi massenlosen) Fußbodenoberflächentemperatur (Foliensensor). Die Abweichungen sind so gering, dass als Ergebnis dieser Kalibrierung die dauerhaft gemessene Wand-Oberflächentemperatur in ausreichender Näherung als Fußbodenoberflächentemperatur für die Simulation verwendet werden kann.

Während der Zeiten ohne Nutzung und Beheizung/Lüftung stellt sich im Klassenraum erwartungsgemäß eine Temperatschichtung ein (ausgeprägt im Winter). Dann liegt die Wandoberflächentemperatur zwischen der Fußbodenoberflächentemperatur und der Raumlufttemperatur unter der Decke.

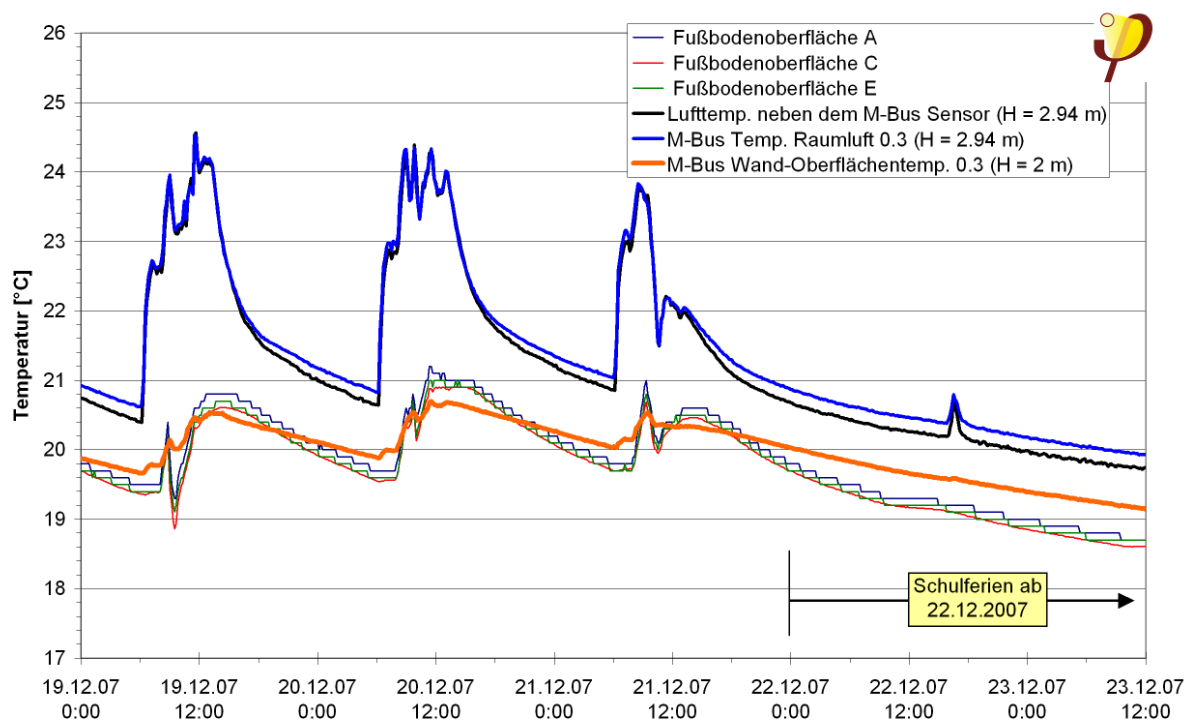


Abbildung 27: Ausschnitt aus den Verläufen der Dauermessung (M-Bus) und den temporären Zusatzmessungen von Oberflächen- und Raumlufttemperaturen in Raum 0.3 im Winter 2007 (10-Minuten Messdaten).

6.2.2 Innenthermographie Fußboden Klassenraum und Flur

Mit der Innenthermographie der Fußbodenoberfläche sollte geklärt werden, ob die mit der Datenloggermessung nur an einem „Punkt“ durchgeführte Oberflächentemperaturmessung für den gesamten Raum angesetzt werden kann, bzw. wie einheitlich die Oberflächentemperatur verteilt ist. Am Tag der Demontage

der Oberflächenmessung in Raum 0.3, dem 07. Januar 2008, wurde mit einer Thermographiekamera die Fußbodenoberfläche untersucht. Dazu wurde das hochauflösende Gerät „VARIOSCAN high resolution“ der Firma Jenoptik (Jena) verwendet. Zur Bearbeitung der Aufnahmen kam das Programm „IRBIS+ V2.2“ der Firma InfraTec GmbH (Dresden) zum Einsatz.

Tabelle 5: Geräteparameter des verwendeten Thermographie-Systems

Geräteparameter des Thermographie-Systems	
Messgerät	VARIOSCAN 3021 ST, Fa. Jenoptik
Spektralbereich (μm)	8 bis 12
Aufnahmesystem	Scansystem
Detektormaterial	HgCdTe
Temperaturaufösung bei 30 °C (K)	$\pm 0,03$
Bildformat (Pixel)	360 x 240

Der Klassenraum ist vollständig möbliert und wird als Klassenraum einer Grundschulklasse verwendet. In Abbildung 28 sind zwei Raumüberblickbilder aus zwei unterschiedlichen Perspektiven dargestellt.



Abbildung 28: Übersichtsfotos vom möblierten Klassenraum 0.3.

Die glatte Fußbodenoberfläche (Linoleum) im Klassenraum und auf dem Flur verfügt über einen relativ hohen Reflektionsgrad, es gibt dadurch starke Spiegelungen sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Spektralbereich. Das bedeutet, dass bei einem Wärmebild nicht die Oberflächentemperatur des Fußbodens festgestellt wird, sondern anteilig auch die Oberflächentemperatur der gespiegelten Objekte (zur Verdeutlichung siehe Abbildung 29). Eine erste thermographische Untersuchung, welche bereits vorausgehend am Aufbau-tag der Sondermessung (18.12.2007) durchgeführt wurde, zeigte stellenweise diese starken Spiegelungen. Aus diesem Grund wurde die Messung am 07.01.2008 wiederholt und dazu auf dem Fußboden partiell dünnes Kreppband aufgeklebt, welches über einen deutlich höheren Emissionsgrad verfügt und sich schnell der Oberflächentemperatur angleicht. Der Einfluss der Spiegelungen wird dadurch stark reduziert. Bei der Auswertung der Thermographiebilder wurden daher mittels der sogenannten „Profilkfunktion“ der Software die Temperaturen nur in den Bereichen mit aufgeklebten Klebebändern



ermittelt. In den unten dargestellten Thermographiebildern sind in diesen Bereichen Linien eingetragen, entlang denen die Temperatur gemessen wurde. Wenn auf dem Thermogramm kein Unterschied zwischen der Temperatur auf dem Klebeband und auf der Fußbodenoberfläche zu erkennen ist, wurde im Thermogramm eine Rechteckfläche markiert („Profilfunktion“) und diese als Mittelwert ausgewertet. Die verwendeten Thermographien mit den zugehörigen Fotos sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt.

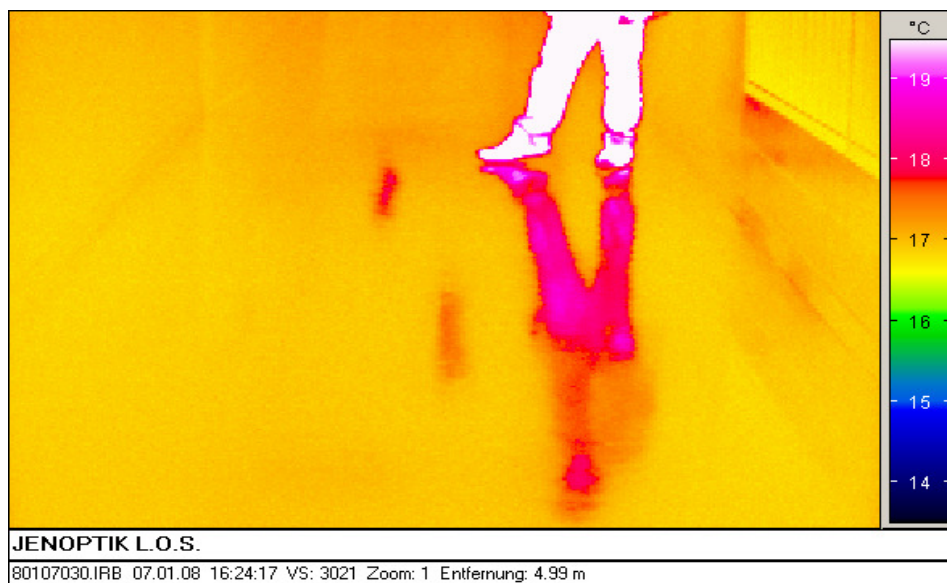
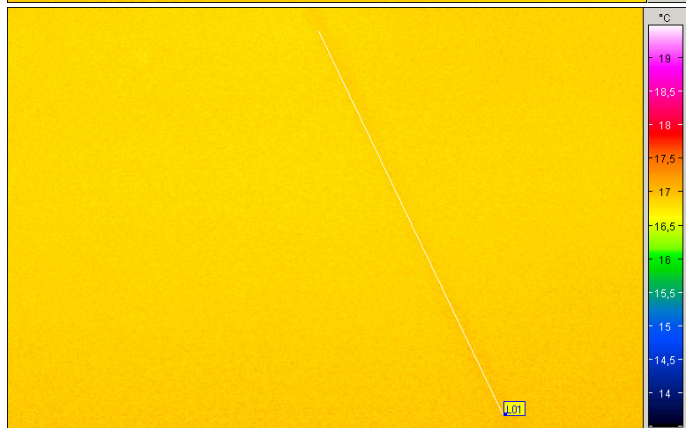
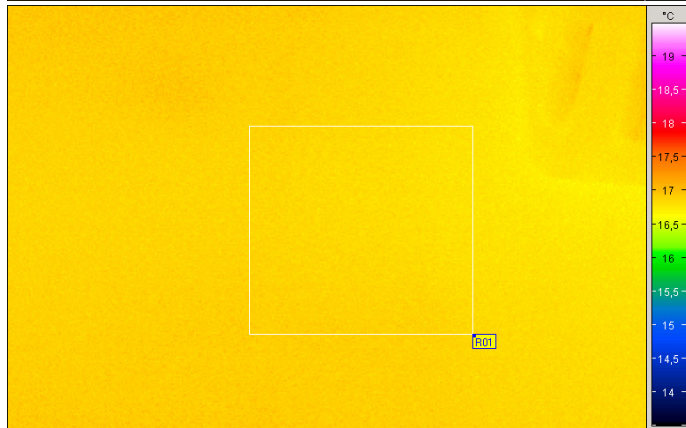
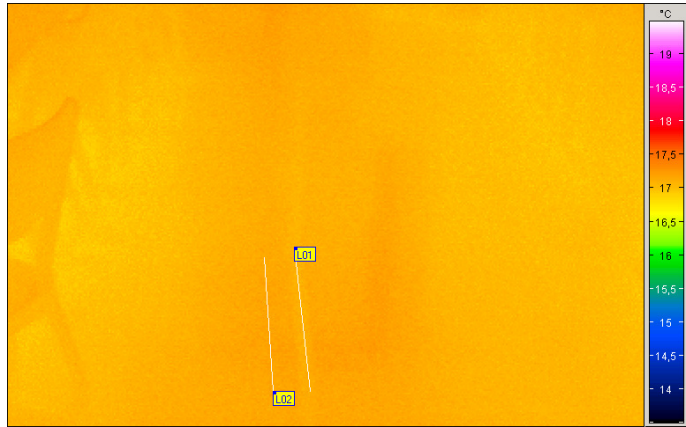


Abbildung 29: Spiegelung einer Person und der Deckenlampen auf der Fußbodenoberfläche im Flur der Riedbergschule in der Thermographieaufnahme mit dem zugehörigen Foto.



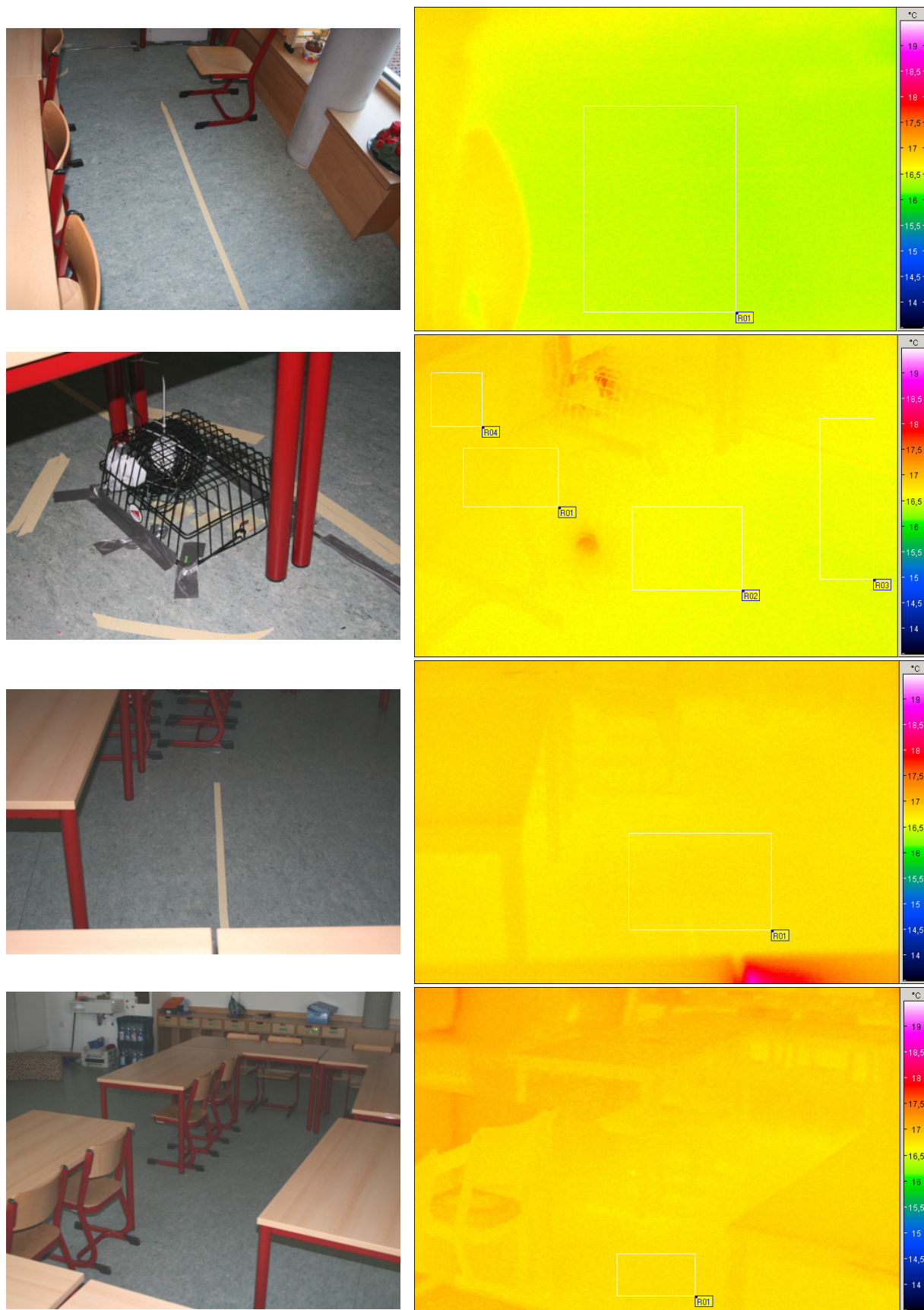


Abbildung 30: Thermographien der Fußbodenoberfläche im Raum 0.3 am 07. Januar 2008 mit den zugehörigen Fotos.



Abbildung 31: Thermographien der Fußbodenoberfläche im Flurbereich vor Raum 0.3 am 07. Januar 2008 mit den zugehörigen Fotos.

Die Auswertung der Thermographien zeigt, dass im Bereich der Außentür des Klassenraumes geringfügig niedrigere Oberflächentemperaturen gemessen wurden. Bei der Untersuchung wurde u.a. festgestellt, dass die Tür nicht vollständig dicht schließt. Außerdem verfügt die Konstruktion der Türbefestigung über zwei Halteschienen auf dem Betonfußboden, die eine deutliche Wärmebrücke darstellen; diese Tatsachen sind für die in der Thermographie erkennbare Temperaturabsenkung mit verantwortlich. Im Flur vor dem untersuchten Raum wurden einheitliche Oberflächentemperaturen gemessen.

Die bei jeder Aufnahme gemessenen Oberflächentemperaturen und die zugehörige Blickrichtung der Kamera sind in Abbildung 32 als Übersicht in den Grundrissplan eingezeichnet und in Tabelle 6 nochmals zusammengestellt.

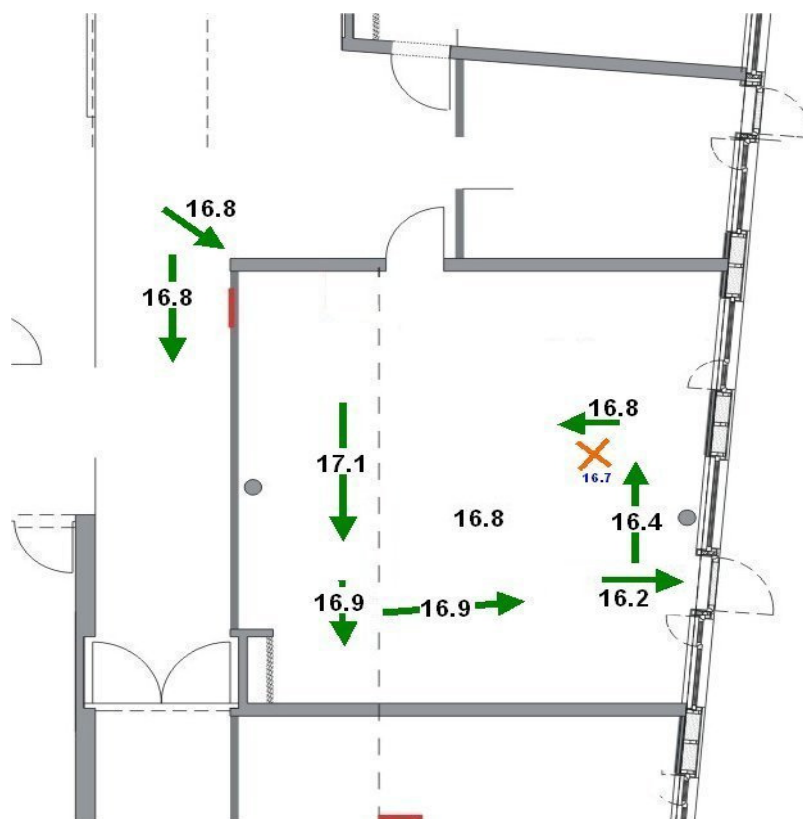


Abbildung 32: Ergebnisse der Oberflächentemperaturmessungen im Raum 0.3 und im Flur davor. Die Pfeile geben die „Blickrichtung“ der Thermographiekamera an, bei den Zahlenwerten handelt es sich um die gemessenen Temperaturwerte in °C. Das orange Kreuz markiert den Bereich der Oberflächenmessung mit dem Datenlogger. Der Temperaturwert unter dem Kreuz stellt den mit der Thermographie festgestellten Messwert im Bereich direkt neben der Datenloggermessung dar.

Tabelle 6: Bodenoberflächentemperaturen aus der Thermographieuntersuchung aus Abbildung 32 und mittels Datenlogger gemessener Oberflächentemperatur (Mittelwert) zur Zeit der Thermographieuntersuchung.

	Oberflächen- temperatur [°C]
Raum 0.3	
	17,1
	16,9
	16,9
	16,1
	16,4
	16,7
	16,8
	16,8
Mittelwert Raum 0.3	16,7

Flur	
	16,8
	16,8
Mittelwert Flur	16,8

Datenloggermessung	
Mittelwert	17,4

Die gemessenen Oberflächentemperaturen im Raum 0.3 weisen nach der Thermographieuntersuchung maximal 1 K Differenz auf. Vom Fassadenbereich zur Flurseite hin steigt die Temperatur um etwa 0,7 K an. Im hinteren Teil des Raumes wurde mit 16,8 °C die gleiche Oberflächentemperatur gemessen wie im Flur vor dem Raum. Der Einfluss des im oberen Bereich warmen Heizkörpers (zu der Zeit bereits abgeschaltet) im Klassenraum sowie des stellenweise etwas wärmeren Deckenbereichs (abgehängte Decke mit Lüftungs- und Heizungsrohren) im hinteren Bereich ist für die Oberflächentemperatur unerheblich (siehe Abbildung 33). Ansonsten würden die Oberflächentemperaturen im Flur und im Klassenraum - bei ähnlicher Raumtemperatur - nicht gleich sein.

Der Mittelwert der Messungen des gesamten Raumes 0.3 stellt mit 16,7 °C genau den Wert dar, der auch im Bereich nur um den Korb mittels Thermographie festgestellt wurde. Es kann damit festgestellt werden, dass es sich - zumindest zu dieser Zeit - um einen für die Gesamtoberfläche des Raumes repräsentativen Oberflächenbereich handelt.

Die Oberflächentemperaturmessung mit den drei Oberflächensensoren per Datenlogger (unter dem Korb) zeigt für den Zeitraum der Thermographie einen Mittelwert von 17,4 °C. Um den Korb werden mit der Thermographie die genannten 16,7 °C



gemessen; die Abweichung beträgt damit 0,7 K. Obwohl zwischen den physikalisch unterschiedlichen Messarten kein Abgleich erfolgte, wurde eine ausreichende Genauigkeit erreicht. Ein Abgleich war auch nicht erforderlich, denn die bezüglich der absoluten Temperatur prinzipiell ungenauere thermographische Messung diene in der Hauptsache der Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Oberflächentemperaturen im Raum und im Flur.

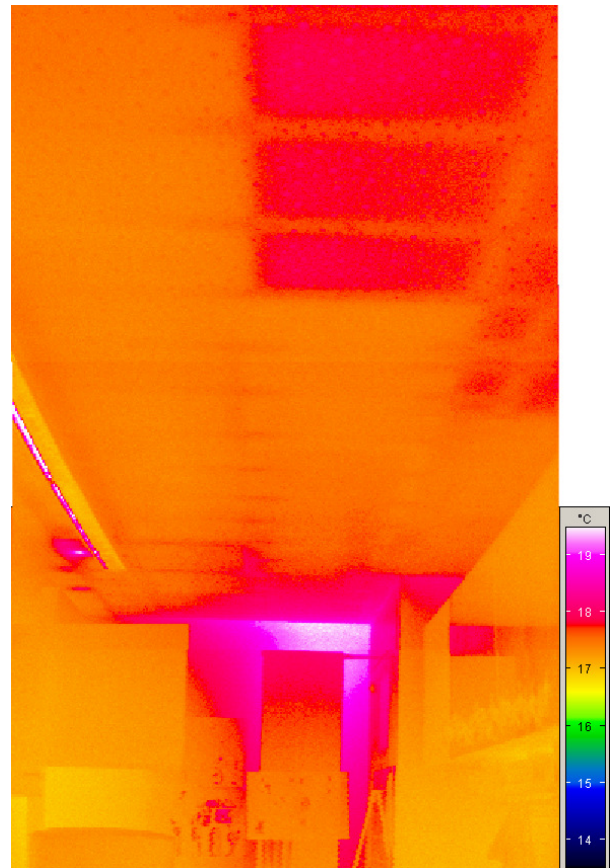


Abbildung 33: Zusammengesetztes Thermographiebild und Foto vom Bereich der Wand mit Heizkörper neben der Tafel und der abgehängten Decke im untersuchten Raum 0.3.

Insgesamt konnte mit dieser Untersuchung gezeigt werden, dass eine recht einheitliche Fußbodenoberflächentemperatur in Klassenraum und Flur vorliegt. Außerdem wurde nachgewiesen, dass die gemessene Wandoberflächentemperatur der M-Bus Dauermessung (2 m Höhe) in ausreichender Näherung der Fußbodenoberflächentemperatur gleicht. Die Wandoberflächentemperatur wird daher für die weitere Auswertung (Simulation) verwendet.

6.3 Wärmeverluste zum Erdreich

6.3.1 Konstruktion der Bodenplatte

Die Riedbergschule wurde an einem Hang errichtet: Der Höhenunterschied der Geländeoberkante zwischen Haupteingang und dem Boden der Turnhalle beträgt ca. 8 Meter. Um den daraus resultierenden seitlichen Erddruck aufzunehmen, war eine geeignete Gründung erforderlich. Eine für eine wärmebrückenfreie Konstruktion wünschenswerte Flachgründung auf Schaumglas oder extrudiertem Polystyrolschaum schied im Laufe des Planungsprozesses aus; eine thermische Trennung der aufgehenden Wände war aufgrund der hohen statischen Belastung durch die großen Deckenspannweiten ebenfalls nicht möglich. Im Verlauf des Planungsprozesses wurde daher entschieden, eine innovative Lösung mit sogenannten Dämmschürzen zu realisieren. Damit sollten die Wärmeverluste durch das Erdreich zumindest so weit reduziert werden, dass der Passivhausstandard erreichbar wurde. Details zu den während der Planung untersuchten Varianten finden sich in [Schnieders 2006].

Der Aufbau der Gründungskonstruktion geht aus dem Schnitt durch die Ebene der Messsensoren in Abbildung 37 hervor. Die in Beton ausgeführte Bodenplatte ist oberseitig mit Polystyrol gedämmt, darüber befinden sich als thermisch wirksame Schichten noch eine Perlite-Ausgleichsschüttung für den Trockenestrich sowie die Trittschalldämmung. Die aufgehenden, massiven Wände durchdringen die Wärmedämmung und führen zu entsprechenden Wärmebrückeneffekten. Entlang der Außenseiten der Bodenplatte verlaufen senkrechte Dämmschürzen von ca. 2 m Tiefe und 20 cm Stärke, die den Weg der Wärme aus dem Gebäude durch das Erdreich nach außen verlängern und so die Temperatur unter der Bodenplatte anheben und die Wärmeverluste entsprechend reduzieren. Ein Foto einer Dämmschürze während der Bauphase zeigt Abbildung 13.

6.3.2 Fragestellung

Das Messprojekt soll die Frage beantworten, ob die gewählte Konstruktion mit einer mäßig gedämmten Bodenplatte, bei der die Dämmwirkung des Erdreichs durch Verwendung einer Dämmschürze verbessert wird, tatsächlich das rechnerisch ermittelte thermische Verhalten zeigt. Damit wird es zum einen möglich, für künftige Projekte die Planungssicherheit zu verbessern, zum anderen kann im hier untersuchten Gebäude festgestellt werden, ob möglicherweise unerwartet hohe Wärmeverluste durch das Erdreich stattfinden.

6.3.3 Methode

In einer repräsentativen Schnittebene durch den Nordwestflügel der Schule wurden während der Bauphase wie oben beschrieben 10 Temperatursensoren und ein Feuchte-/Temperatur-Sensor installiert. Die gewonnenen Daten wurden über einen



Zeitraum von 6 Jahren kontinuierlich aufgezeichnet. Abbildung 34 zeigt den Lageplan für die Sensoren, die Lage der Schnittebene ist in Abbildung 35 dargestellt.

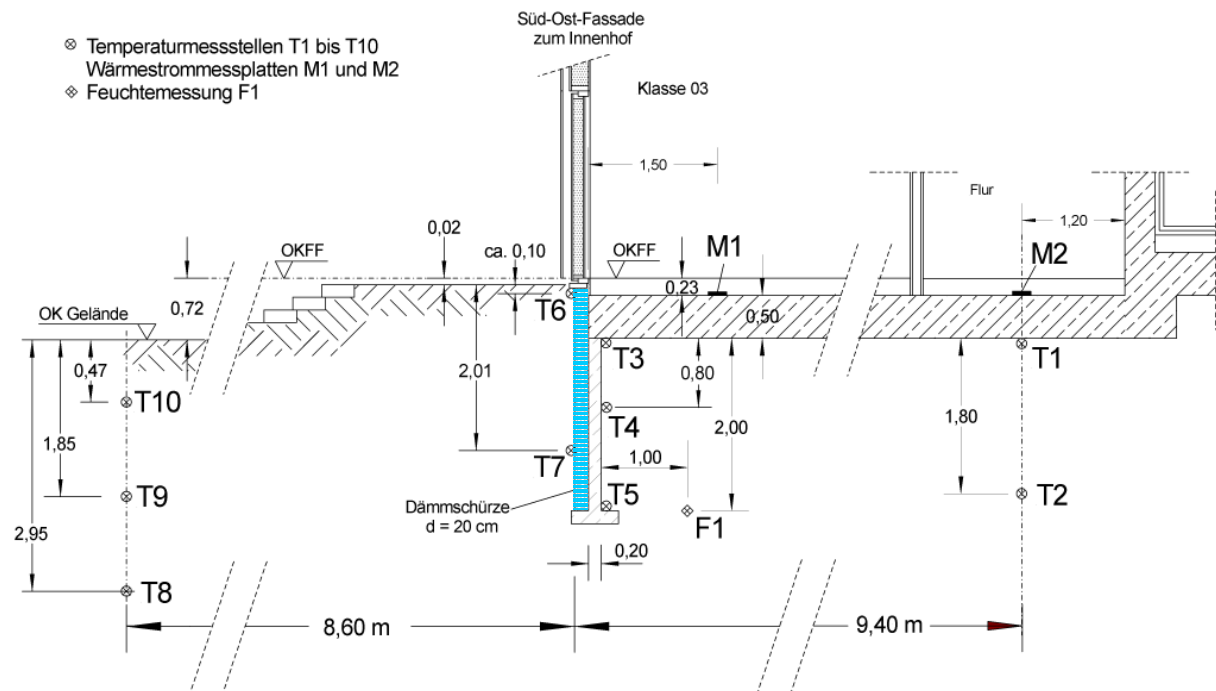


Abbildung 34: Lage der Sensoren (Identisch mit Abbildung 22). Die genaue Lage von T6 konnte nicht vom PHI aufgemessen werden, sie wurde lediglich der Bauleitung vorgegeben. Der Sensor hat unter Umständen eine etwas andere Position.

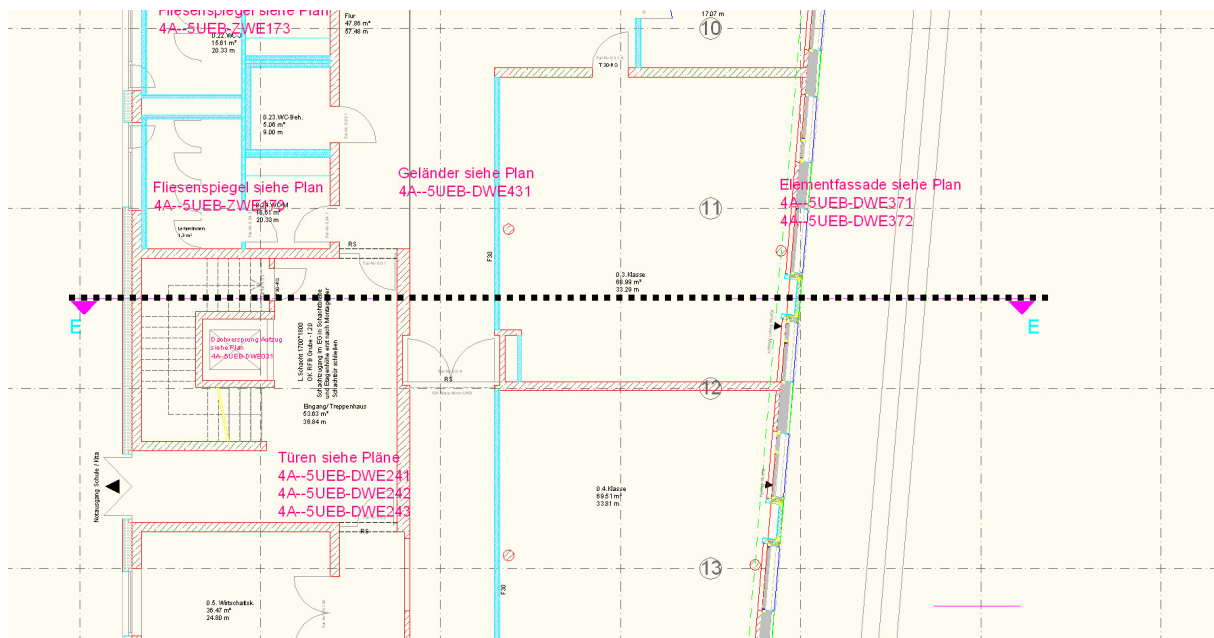
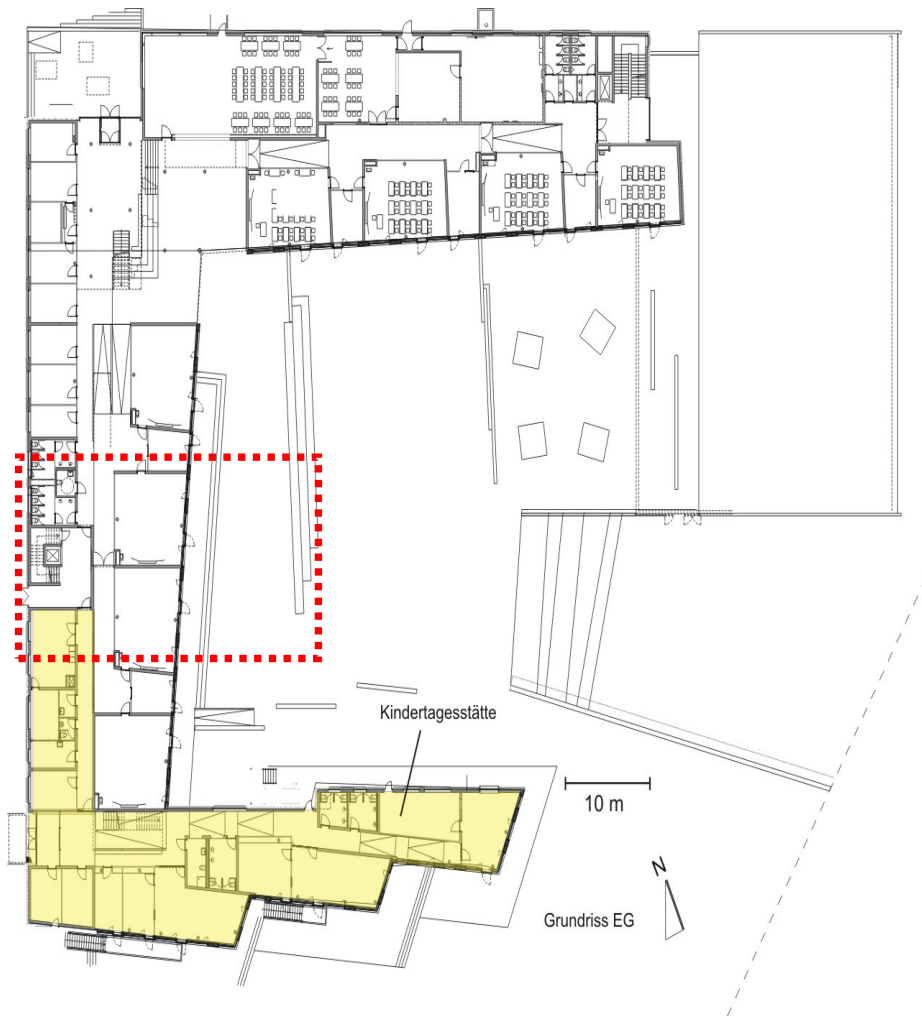


Abbildung 35: Lage der Ebene, in der die Temperatursensoren und Wärmestrommessplatten montiert wurden (Quelle: Architekturbüro 4a /Ergänzungen PHI).

Für den Bereich der Bodenplatte, in dem die Messungen durchgeführt wurden, wurde ein zweidimensionales thermisches Modell im Wärmestrom-Berechnungs-



programm **HEAT2** aufgebaut. Es erlaubt die zeitabhängige Ermittlung der Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich in Abhängigkeit von den Außen- und Innentemperaturen.

Gibt das Modell die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich korrekt wieder, so kann angenommen werden, dass auch weitere Berechnungsergebnisse auf dieser Grundlage der Realität entsprechen werden. Im anderen Fall kann man durch Anpassung von Parametern versuchen, die Messwerte zu reproduzieren und damit Rückschlüsse auf die tatsächlichen Werte der betreffenden Parameter bzw. auf Unsicherheiten in den Modellannahmen ziehen.

6.3.4 Details des Simulationsmodells

Die zur Auswertung der Messungen durchgeführten Simulationsrechnungen basieren auf dem Simulationsmodell, mit dem bereits in [Peper et al 2007] gearbeitet wurde. Das Modell wurde im Zuge der Datenauswertung grundlegend überarbeitet. Die Beschreibung in diesem Abschnitt wurde aus [Peper et al 2007] entnommen und, wo erforderlich, an das veränderte Simulationsmodell angepasst. Abbildung 36 illustriert die Struktur des Simulationsmodells.

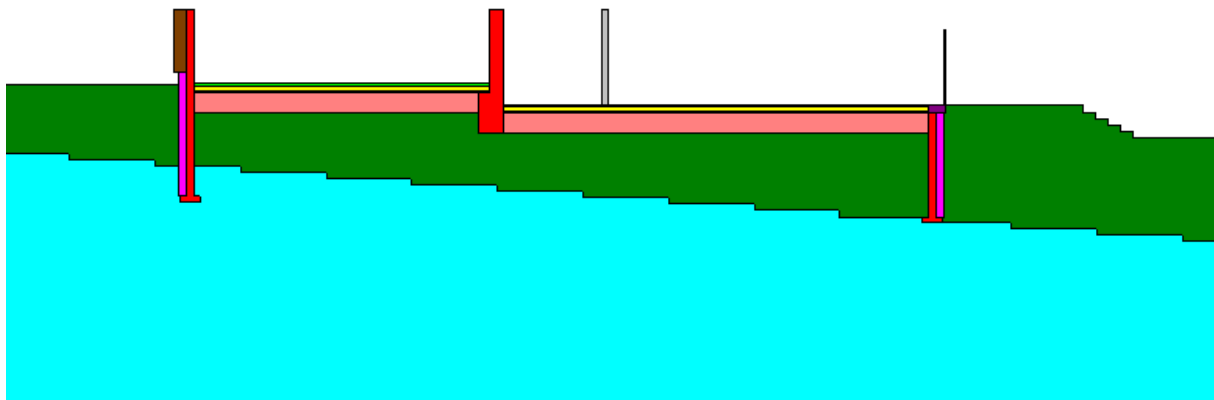


Abbildung 36: Ausschnitt aus dem Simulationsmodell, Ansicht von SSW. Verschiedene Farben bedeuten verschiedene Materialien. Man erkennt die beiden Erdreichtypen, die Betonbauteile (verschiedenartig bewehrt) und die magentafarbenen Dämmschürzen.

6.3.4.1 Erdreicheigenschaften

Unterhalb des untersuchten Gebäudes befinden sich **zwei Arten von Erdreich**: Der bis zu einer Tiefe von ca. 2 m unter der Geländeoberkante anstehende Boden („Typ A“) besteht aus Löß und Lößlehm. Darüber wurde das Gelände mit einem Material aufgefüllt, das grobe Steine bis ca. 5 cm Größe enthält („Typ B“).

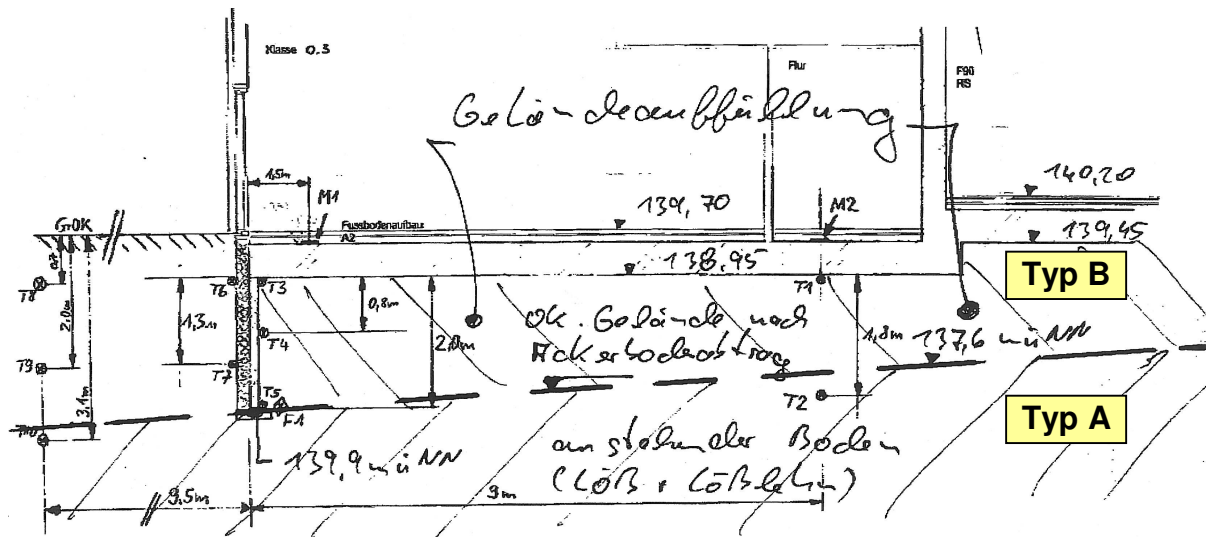


Abbildung 37: Verfüllung unterhalb der Bodenplatte (Skizze: Ingenieurbüro ITUS). Die Bezeichnungen für die Sensoren T8 und T10 sind vertauscht.

Von beiden Bodentypen wurde beim Einbau der Messsensoren jeweils eine Probe entnommen. Am Lehrstuhl für angewandte Physik an der BTU Cottbus wurden 2003 für beide Proben die Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Feuchten sowie die spezifische Wärmekapazität im trockenen Zustand bestimmt. Die Ergebnisse der Bodenuntersuchung sind im Anhang C dokumentiert. Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen. Mit „u“ wird dabei die Materialfeuchte (Wassermasse dividiert durch Masse des trockenen Erdreichs) bezeichnet.

Tabelle 7: Ergebnisse der Untersuchung der beiden Bodenproben „A“ und „B“.

	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	spez. Wärmekapazität bei 10 °C [J/(gK)]
Typ A, trocken	0,228	0,791
Typ A, u=30 %	1,186	1,559**
Typ B, trocken	0,240	0,778
Typ B, u=17 %	1,679*	1,268**

* Die Messung der feuchten Probe konnte aus technischen Gründen nur nach Aussortieren der größeren Steine erfolgen

** Werte errechnet durch PHI

Wie die Tabelle zeigt, hängen insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, aber auch die Wärmekapazität stark von der Erdfeuchte ab.

Um Rückschlüsse auf die in der Auswertung anzusetzenden Bodenfeuchten zu ermöglichen, wurden durch die Uni Cottbus ferner einzelne Punkte der Sorptionsisotherme gemessen. In Verbindung mit der unter dem Gebäude durchgeführten, kontinuierlichen Messung der Wasseraktivität im Erdreich sollten so die thermischen Eigenschaften des Erdreichs während des Messzeitraums ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle:



Tabelle 8: Ergebnisse der Messungen der Sorptionsisotherme der Bodenproben „B“.

Materialfeuchte u, Wassermasse / Masse des trockenen Erdreichs [%]	Rel. Luftfeuchte über der Probe [%]
17,8	100
8,49	100
4,99	100
0,91	79

Die **Auswertung der Feuchtemessungen** im Erdreich (Messstelle F1, vgl. Abbildung 34 auf Seite 38) zeigt, dass die Wasseraktivität im Hohlraum während des gesamten Messzeitraumes bei nahezu 100% liegt. Während der Sommermonate ist ab Herbst 2006 eine minimale Abnahme der Wasseraktivität zu erkennen, die im Laufe der Jahre größer wird und auf periodische Schwankungen der Erdreichfeuchte hindeutet.

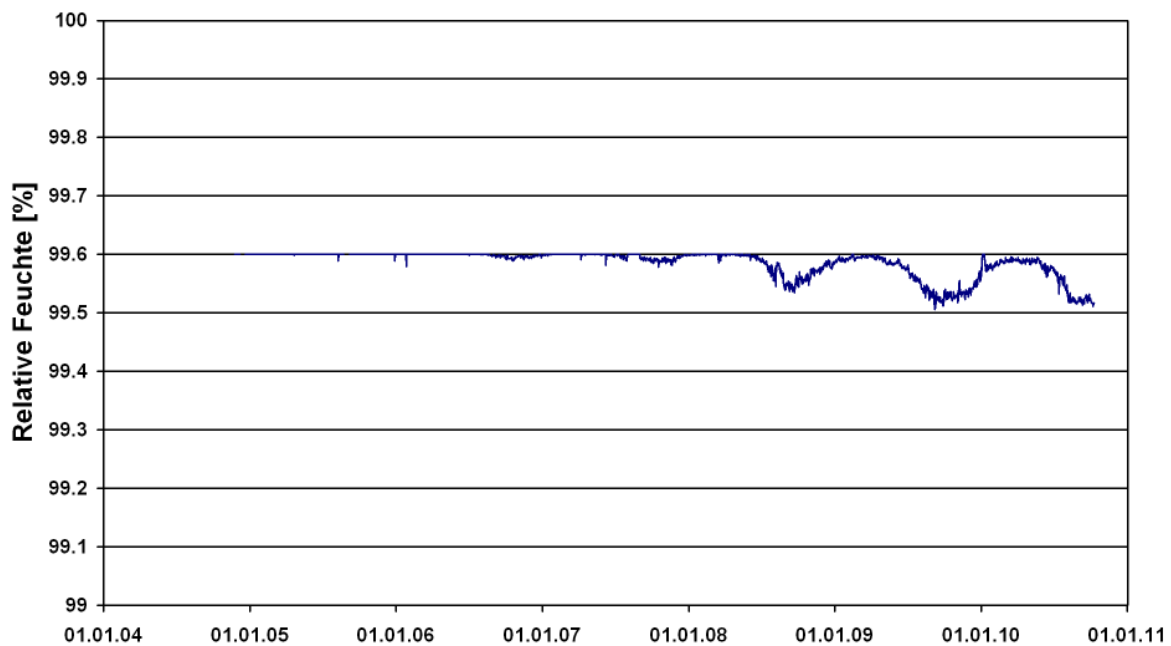


Abbildung 38: Die relative Feuchte in einem Hohlraum unter der Bodenplatte nimmt im Laufe der Jahre allmählich ab, blieb aber im gesamten Messzeitraum oberhalb von 99%.

Die gemessenen Punkte auf der Sorptionsisotherme der Labormessung der Uni Cottbus zeigen bei einer Materialfeuchte von 5% eine Wasseraktivität von 100%, bei 0,9% Materialfeuchte beträgt die Wasseraktivität noch 80%. Die Erdreichfeuchte dürfte folglich während des Sommers im Bereich zwischen diesen beiden Werten gelegen haben. Genauere Aussagen sind aufgrund der Nichtlinearität der Sorptionsisotherme und der Datenlage nicht möglich. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Erdreichs sind folglich nur mit geringer Genauigkeit bekannt. Das erschwert zwar die Auswertung der Messungen, andererseits verdeutlichen diese Ergebnisse, dass die Eigenschaften des Erdreichs für Planungszwecke ebenfalls stets nur als grobe Richtwerte zur Verfügung stehen werden.

Für die Simulation wurden die thermischen Eigenschaften des gesamten Erdreichs zunächst so eingestellt, dass sie den ursprünglich entnommenen, ungetrockneten Proben entsprechen.

6.3.4.2 Simulierte Zeiträume

Bei der Untersuchung von Temperaturverläufen im Erdreich müssen die langen Zeitkonstanten berücksichtigt werden. Da die tatsächliche Temperaturverteilung im Erdreich am Beginn einer Simulationsrechnung höchstens an den Positionen der Temperatursensoren bekannt ist, muss für diesen Zeitpunkt stets eine Temperaturverteilung angenommen werden, die sich von der tatsächlichen Temperaturverteilung unterscheidet. Der Einfluss dieser Anfangsbedingung auf die Simulationsergebnisse klingt exponentiell ab, bei den Temperaturen von Wänden, Dächern etc. typischerweise innerhalb weniger Wochen. Auf Erdreichtemperaturen wirken sich die Anfangsbedingungen dagegen noch mehrere Jahre nach Simulationsbeginn merklich aus.

Um einen möglichst realistischen Anfangszustand zu erhalten, wurden die mittleren Erdreichtemperaturen der Sensoren T8 bis T10 – die sich im weitgehend ungestörten Erdreich befinden – über den Zeitraum vom 11.10.2005 bis zum 10.10.2010 ermittelt. Das gesamte Rechenmodell wurde zu Beginn der Simulation mit dieser Temperatur, 13,3 °C, initialisiert.

Die Simulation des Temperaturverlaufs erfolgte anschließend über einen hinreichend langen Zeitraum vor Beginn der Messungen unter typischen Randbedingungen. Am Standort der Riedbergschule befand sich vor Baubeginn ein Getreideacker, so dass für den Einschwingvorgang ungestörtes Erdreich angenommen werden konnte. Bei Baubeginn der Schule am 23.7.2003 wurde zunächst der Ackerboden abgetragen; die Dämmschürzen wurden ab Oktober 2003 eingebaut und die Zwischenräume wieder mit Erdreich (Typ B) verfüllt. Im August 2004 wurde die Bodenplattendämmung eingebaut. Diese Vorgänge wurden jeweils in der Simulation abgebildet.

Temperaturmessungen waren nicht für den gesamten Zeitraum, der in der Simulation abgebildet werden musste, verfügbar. Wo erforderlich, wurden die Randbedingungen daher durch geeignete Approximationen ersetzt. Vollständige Messdaten zu den Randbedingungen einschließlich der Innentemperaturen liegen seit 17. November 2004 vor, von diesem Zeitpunkt an entsprechen sämtliche verwendeten Randbedingungen den gemessenen Daten.

6.3.4.3 Verwendete Randbedingungen

Erdoberflächen-Temperatur

Die Erdoberflächentemperatur wurde nicht unmittelbar gemessen. Verfügbar waren zum einen Messungen der Außenlufttemperatur, die durch die Gebäudeleittechnik aufgenommen wurden. Ferner standen die Temperaturen der Sensoren T8 bis T10



zur Verfügung, die sich in 8,60 m Entfernung von der Gebäudekante im nahezu ungestörten Erdreich befinden.

Aus diesen Daten wurden Jahresmittelwerte jeweils für den Zeitraum 11.10. bis 10.10. des Folgejahres gebildet. Sie sind im Vergleich in Abbildung 39 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte der „ungestörten“ Erdreichtemperatur deutlich über denen der Außentemperatur liegen. Im ersten Messjahr, 2005, ist die Abweichung etwas geringer, und die Temperaturen T8 bis T10 liegen deutlich weiter auseinander als in den übrigen Jahren.

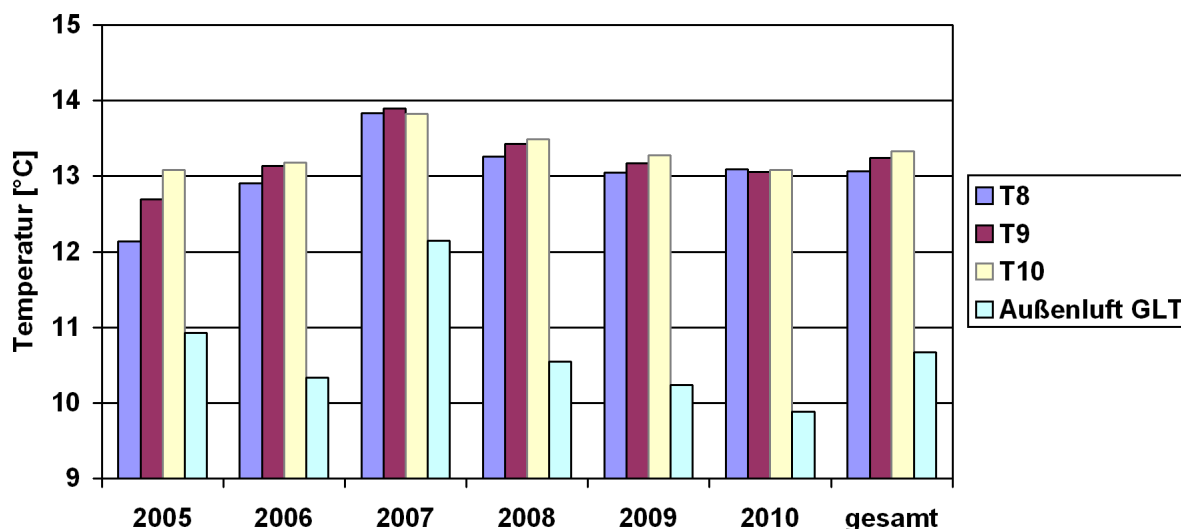


Abbildung 39: Jahresmittelwerte der Temperaturen T8, T9, T10 sowie der gemessenen Außentemperatur (Wetterstation).

Auffallend ist auch, dass die Jahresmittelwerte der Temperaturen eine deutliche Schichtung aufweisen; die oberflächennächste Temperatur T10 ist dabei am höchsten. Der Gebäudeeinfluss würde eher das Gegenteil erwarten lassen (vgl. auch die Simulationsergebnisse z.B. in Abbildung 46): Ein kleiner Teil des Wärmestroms durch die Bodenplatte gelangt in dieser Region wieder an die Oberfläche, die oberflächenfernste Temperatur müsste demnach am höchsten sein. Die Sensoren wurden gezielt so weit entfernt wie möglich von Regen- bzw. Schmutzwasserleitungen eingebaut, derartige Einflüsse kommen als Ursache für die umgekehrte Temperaturschichtung also kaum in Frage.

Sowohl die große Differenz zwischen der Außenlufttemperatur und den Erdreichtemperaturen als auch die Rangfolge der drei Erdreichtemperaturen könnten dadurch entstehen, dass im Innenhof in der Nähe der Fassade ein wärmeres Mikroklima entsteht: Die Temperaturen im nur nach Südosten offenen, dorthin leicht abfallenden Hof dürften überdurchschnittlich hoch sein. Die Solarabsorption auf der relativ dunklen Oberfläche, auf die von der Fassade noch ein gewisser Strahlungsanteil reflektiert wird, kann ebenfalls als überdurchschnittlich angenommen werden, so dass insgesamt ein Netto-Wärmestrom ins Erdreich hinein entsteht. Aus den gemessenen Temperaturen und Wärmeleitfähigkeiten lässt sich die Größenordnung dieses Wärmestroms zu $0,2 \text{ W/m}^2$ abschätzen.



Abbildung 40: Ansicht der Südostfassade zum Innenhof. Die Temperatursensoren T8 bis T10 befinden sich ungefähr im gleichen Abstand vom Gebäude wie das Kamerastativ.

Als Erdoberflächentemperatur wurde für die Simulation eine um 2,7 K vergrößerte Außenlufttemperatur angesetzt. Das entspricht dem Mittelwert der Differenz zwischen Luft- und Erdreichtemperatur in den Messjahren 2006 bis 2010. Mögliche tageszeitliche Schwankungen dieser Differenz sind für die hier untersuchte Fragestellung nicht von Belang.

Innenoberflächentemperatur Klassenraum

Aus den oben dargestellten Messungen und Analysen (siehe Abschnitt 6.2.2) ergibt sich, dass die im Klassenraum gemessene Wandoberflächentemperatur eine gute Näherung für die Temperatur der Bodenoberfläche darstellt. Dieser Wert wurde daher für die Simulation verwendet.

Innenoberflächentemperaturen Flur und Treppenhaus

Im Flur wurden keine Oberflächentemperaturen gemessen. Es liegen aber Messungen der Lufttemperatur vor, die im Mittel um 1,1 K unter den entsprechenden Werten im Klassenraum liegen. Es wurde zu jedem Zeitpunkt angenommen, dass zwischen den Oberflächentemperaturen von Klassenraum und Flur die gleiche Differenz wie zwischen den Lufttemperaturen herrscht.

Für den im Simulationsmodell mit abgebildeten Raum auf der anderen, nordwestlichen Seite des Flurs waren keine Temperaturmessungen verfügbar. Es handelt sich um ein Fluchttreppenhaus, so dass hier ebenfalls eher niedrigere Temperaturen herrschen werden als im Klassenraum. Daher wurde für diesen Bereich die gleiche Oberflächentemperatur angenommen wie im Flur.



6.3.5 Datenausfälle

Bei Feldmessungen über mehrere Jahre kommt es unvermeidlich zu vereinzelt Datenausfällen. Im vorliegenden Fall wurden solche Datenausfälle in der Regel rasch entdeckt, so dass die Perioden mit fehlenden Daten meist nur wenige Tage umfassen.

Eine Ausnahme stellen die Temperaturen für die Messstellen T5, T6 und T7 im Zeitraum vom 11.6.2008 bis zum 28.10.2009 dar. Hier waren Rohdaten vorhanden, die bei den während der Messungen regelmäßig durchgeführten Kontrollen plausibel wirkten. Erst in der zusammenhängenden grafischen Darstellung zeigte sich ein nachträglich nicht mehr korrigierbarer Versatz in den Daten, der letztlich auf einen defekten Analog-Digital-Wandler zurückgeführt werden konnte. Die entsprechenden Daten wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

6.3.6 Auswertung Messungen

In Abbildung 41 bis Abbildung 43 sind die Zeitverläufe aller gemessenen Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich für den gesamten Messzeitraum vom 17.11.2004 bis zum 10.10.2010 dargestellt. Im ersten Jahr nach Bezug sind erwartungsgemäß noch deutliche Veränderungen durch Einschwingvorgänge erkennbar. Ab dem zweiten Jahr, d.h. ab Herbst 2005, kann man dagegen keine eindeutigen Unterschiede zu den folgenden Jahren mehr erkennen.

Die Temperaturverläufe sämtlicher Sensoren sind in den folgenden Abbildungen dargestellt:

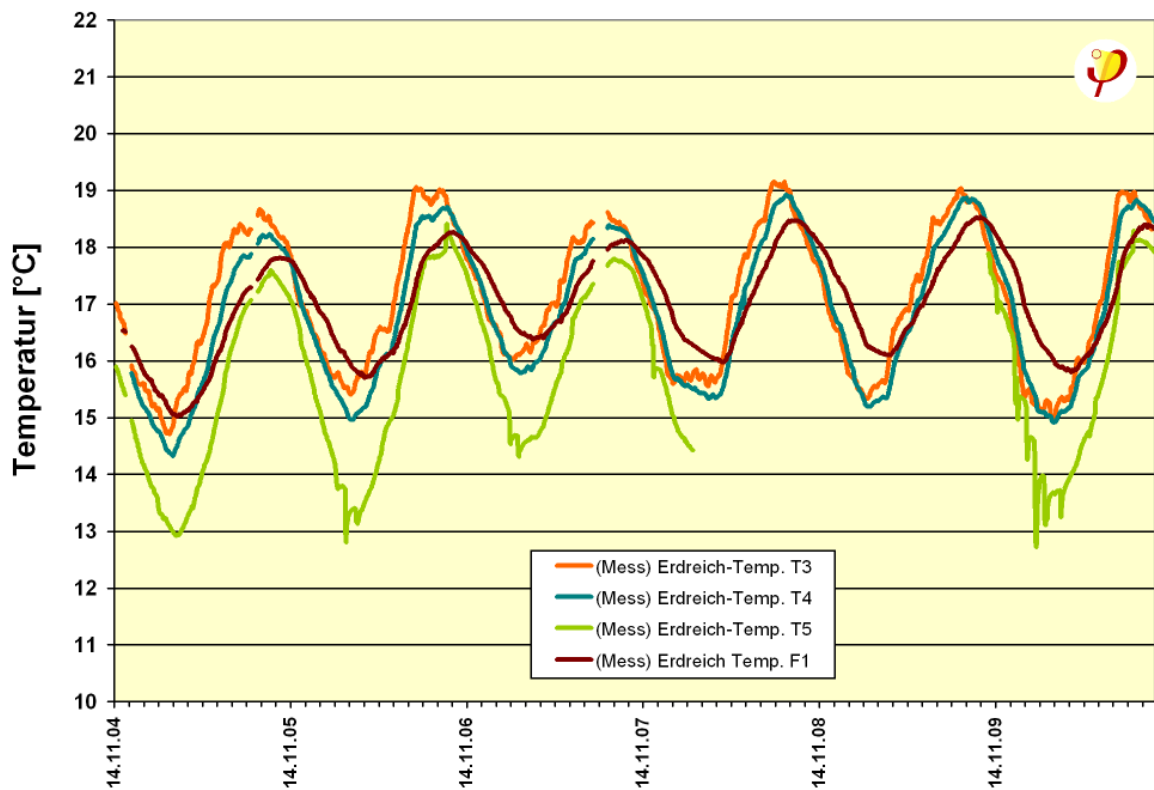
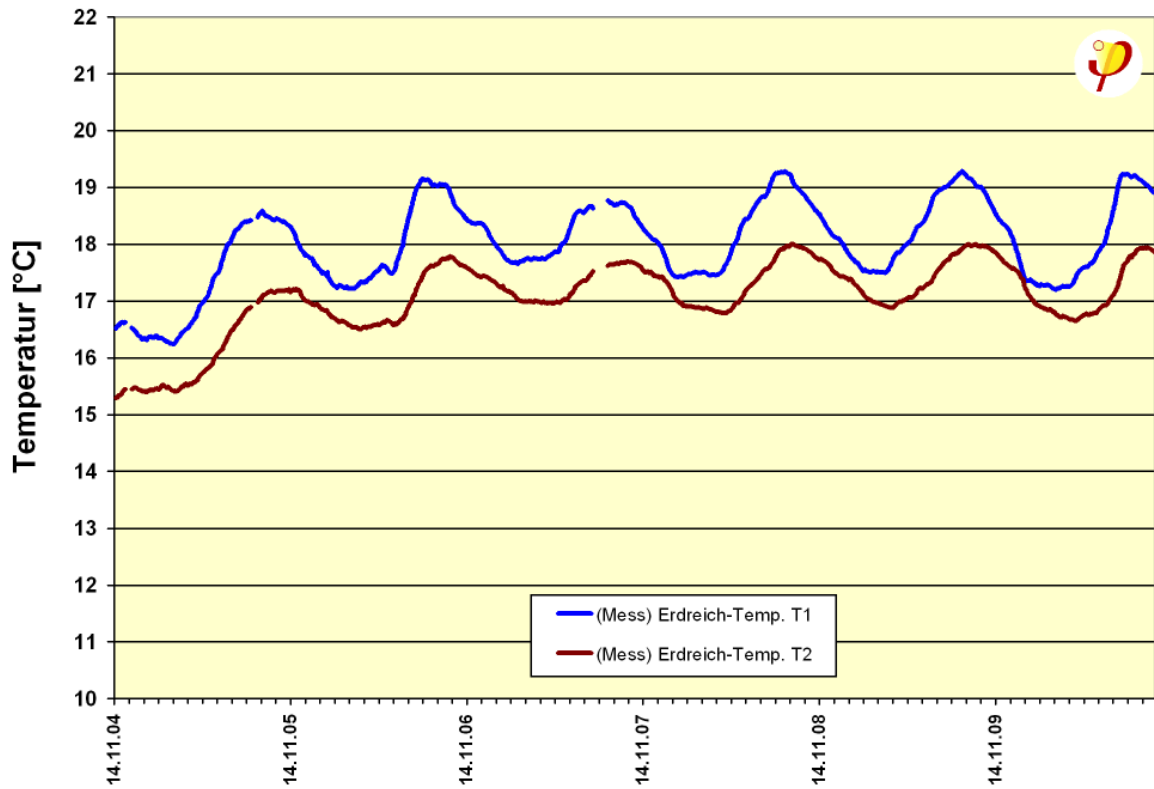


Abbildung 41: Temperaturverläufe an den Messstellen T1 bis T5 und F1 über den gesamten Messzeitraum (Tagesmittelwerte).

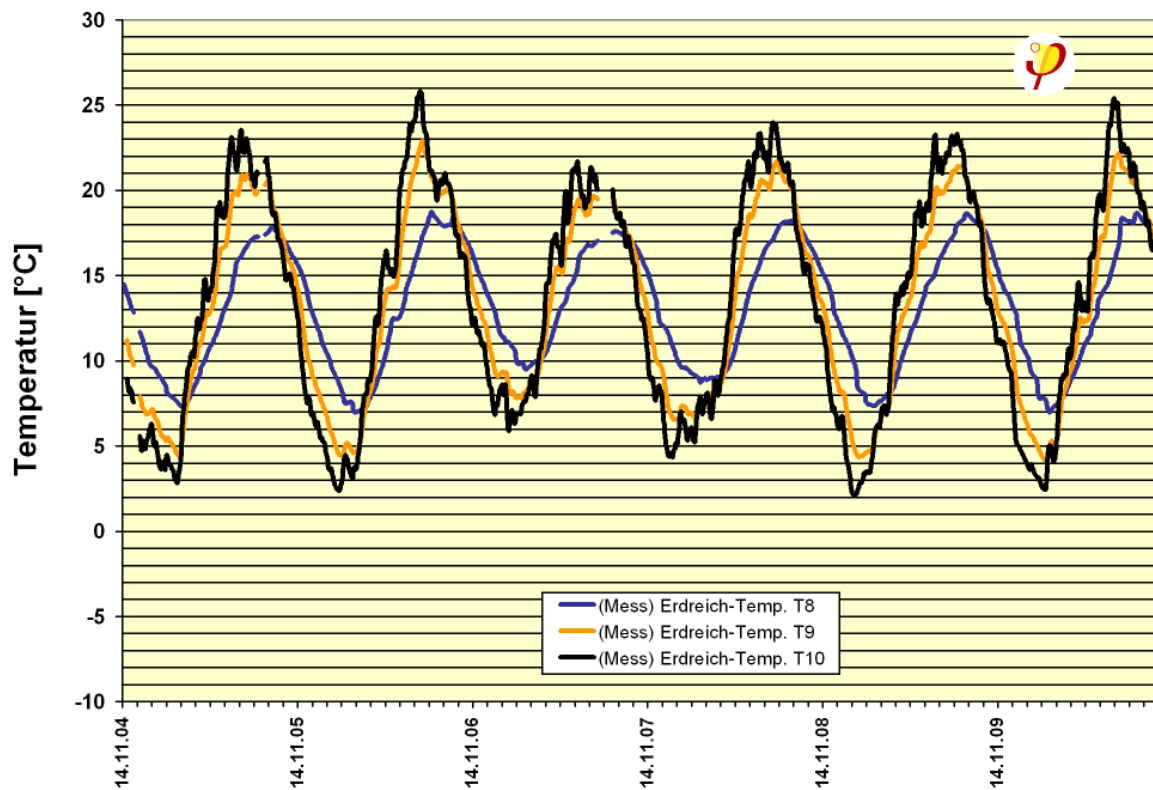
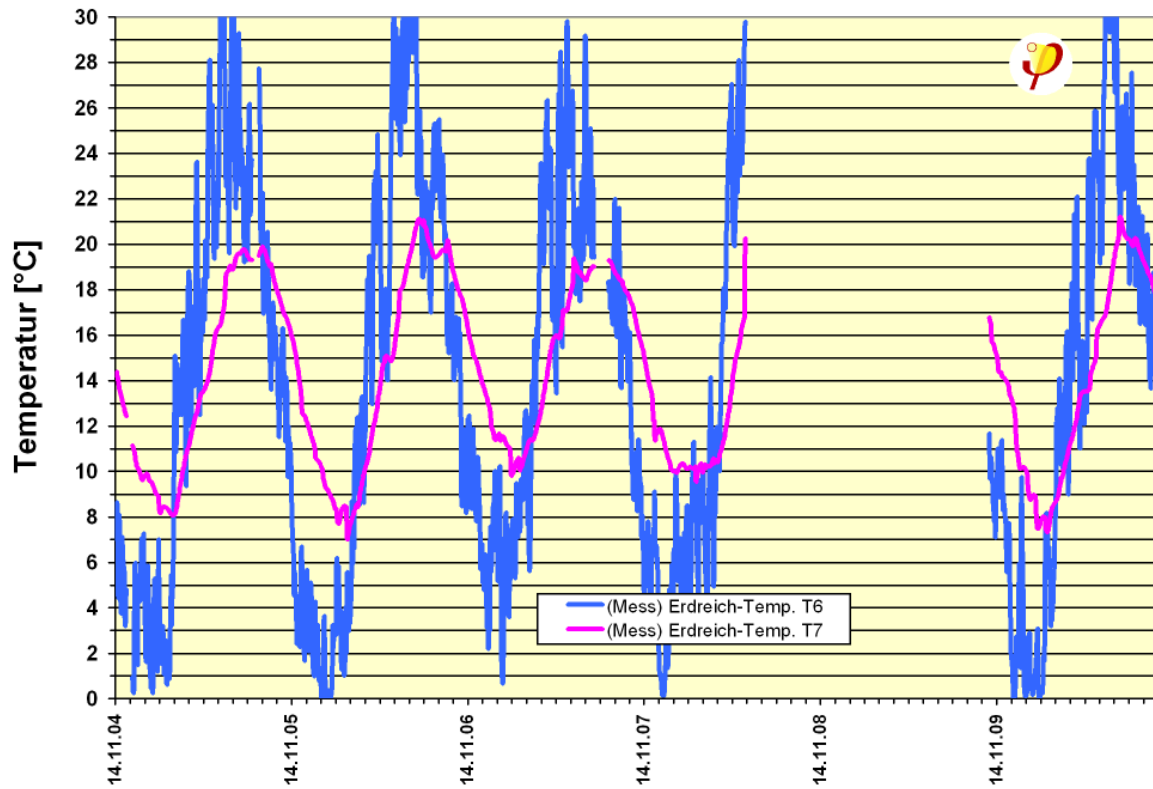


Abbildung 42: Temperaturverläufe an den Messstellen T6 bis T10 über den gesamten Messzeitraum (Tagesmittelwerte).

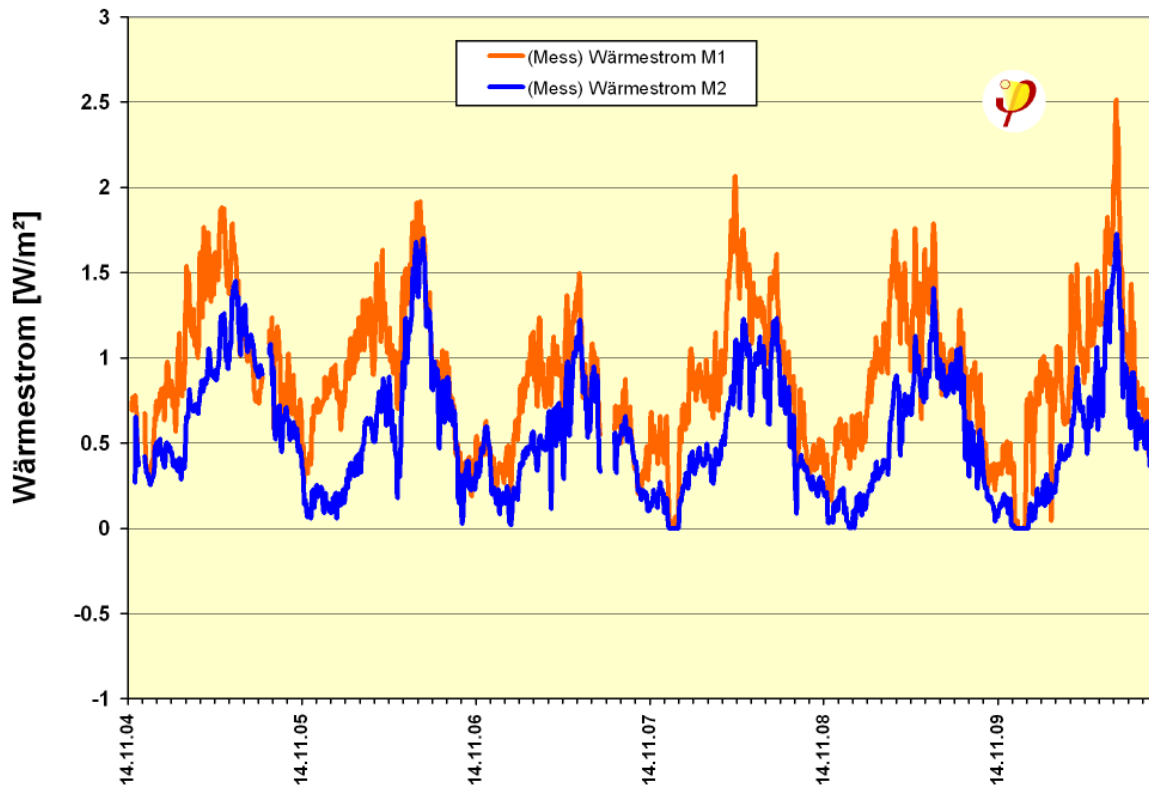


Abbildung 43: Zeitverlauf der Wärmeströme an den Wärmestrommessplatten M1 und M2 über den gesamten Messzeitraum (Tagesmittelwerte).

In den letzten Messjahren sinkt der im Flur gemessene Wärmestrom M2 vereinzelt bis auf 0 ab und bleibt über mehrere Tage auf diesem Wert. Vermutlich ist zu diesen Zeiten das Erdreich unterhalb der Bodenplatte wärmer als die Fußbodenoberfläche im Flur, so dass der Wärmestrom tatsächlich nach oben gerichtet, also negativ ist. Die Wärmestrommessplatten geben jedoch keine negativen Werte aus.

Betrachtet man die Jahresmittelwerte in Abbildung 44, so scheinen sich die Temperaturen auch im zweiten Jahr an einigen Messpunkten noch einzuschwingen. Im dritten bis sechsten Jahr ändern sich die Jahresmittelwerte nicht mehr systematisch; die Temperaturschwankungen von Jahr zu Jahr sind erkennbar größer als etwaige verbliebene Differenzen zum quasistationären Zustand.

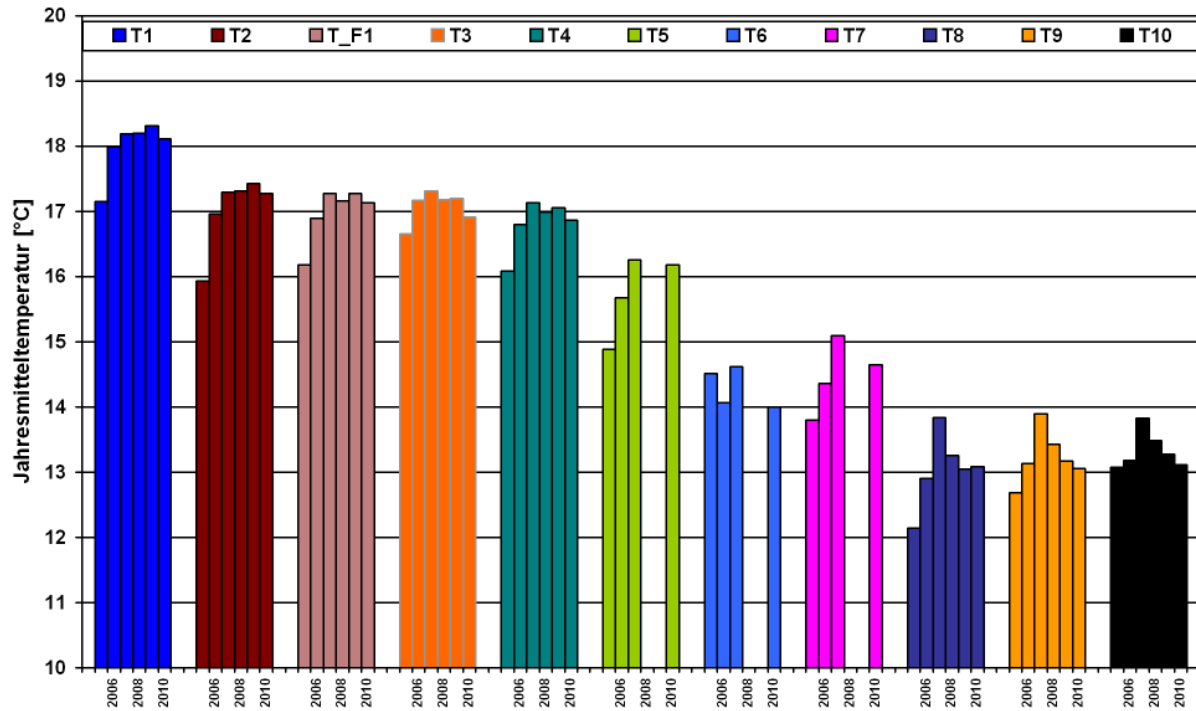


Abbildung 44: Jahresmittelwerte (11.10. des Vorjahres bis 10.10. des jeweiligen Jahres) der gemessenen Temperaturen im Erdreich.

In der direkten grafischen Zuordnung mehrjähriger Temperaturmittel zur Position der Sensoren gemäß Abbildung 45 wird deutlich, dass unter der Bodenplatte deutlich höhere Temperaturen herrschen als im ungestörten Erdreich. Schon an dieser Stelle kann festgehalten werden, dass der Ansatz „Dämmschürze“, also die Erzeugung einer Wärmeglocke unter dem Gebäude, qualitativ überzeugend funktioniert.

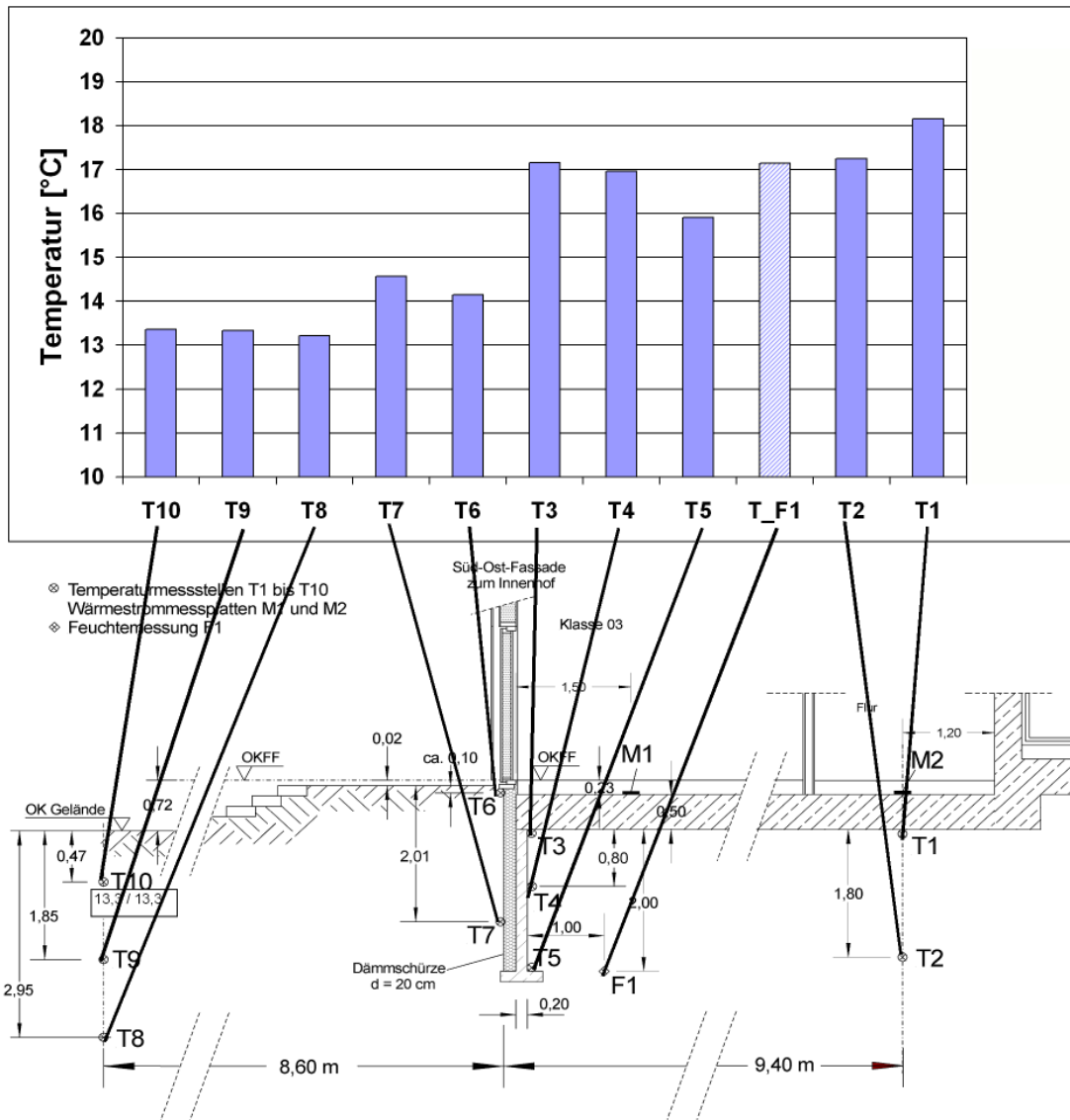


Abbildung 45: Mittlere Temperaturen im Erdreich (Zeitraum 11.10.2006 bis 10.10.2010). Die Temperatur T_F1 am Ort des Feuchtesensors ist mit geringerer Genauigkeit gemessen und dient lediglich zur groben Orientierung. Für T5, T6 und T7 wurden aufgrund des Messdatenausfalls zwei vollständige Jahre entfernt.

6.3.7 Vergleich von Messung und Simulation

6.3.7.1 Simulation mit Randbedingungen nach Messung

Die Simulation wurde zunächst unter den oben in Abschnitt 6.3.4.3 beschriebenen Randbedingungen durchgeführt. Temperaturverläufe und Wärmeströme im Erdreich lassen sich ab einer Tiefe von ca. 1 m sehr gut durch eine Sinusschwingung mit einer Periode von einem Jahr approximieren. Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die zu einem solchen Sinus gehörenden Mittelwerte und Amplituden der Temperaturen im Erdreich sowie der Wärmeströme im Vergleich.



Man erkennt insgesamt bereits hier eine sehr gute Übereinstimmung. Mit 0,6 und 0,8 K sind die größten Abweichungen der Temperaturmittelwerte bei den beiden Sensoren in der Mitte der Bodenplatte vorhanden; hier liefert die Simulation ein zu optimistisches Ergebnis. Abweichungen über 0,3 K gibt es sonst nur noch für die beiden Sensoren T_F1 (mit geringerer Messgenauigkeit) und T6 (mit nicht genau bekannter Position). Die Wärmeströme durch die Bodenplatte werden von der Simulation um 10% (M1) bzw. 21% (M2) zu klein vorhergesagt.

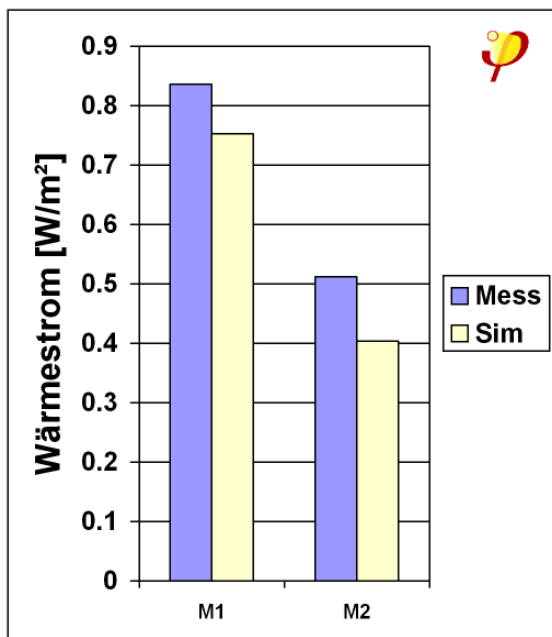
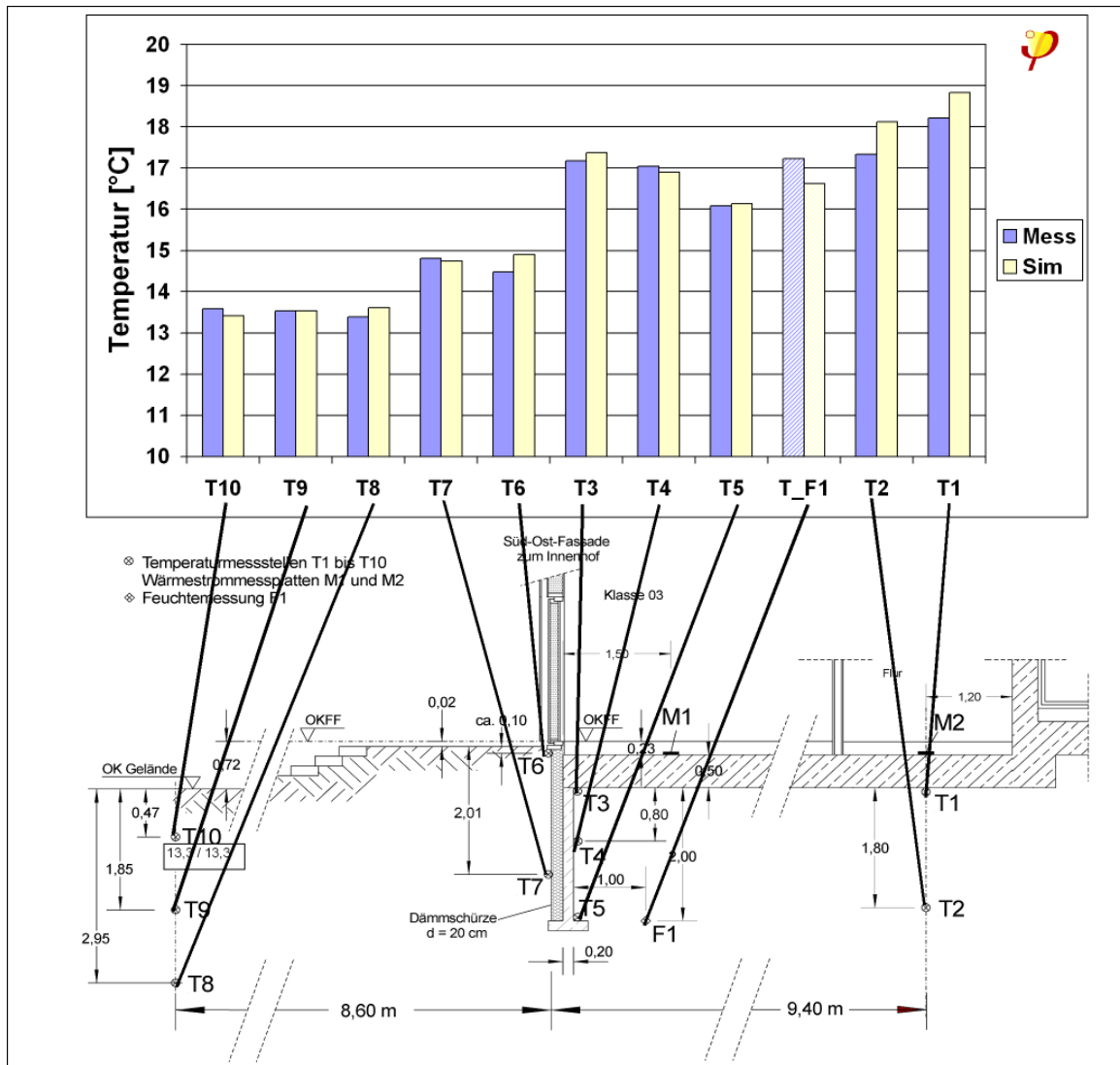


Abbildung 46:
Mittelwerte eines Sinus-Fits
(Zeitraum 11.10.2006 bis
10.10.2010). Die Mittelung erfolgte der Vergleichbarkeit wegen auch für die Simulationsergebnisse nur über diejenigen Zeitpunkte, für die Messdaten vorlagen.

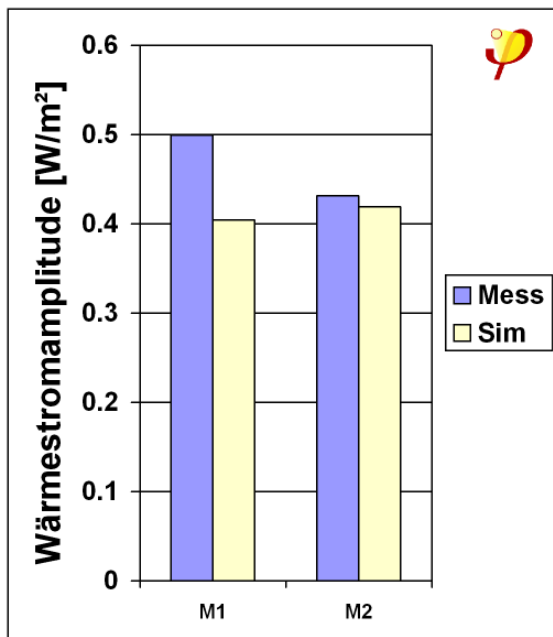
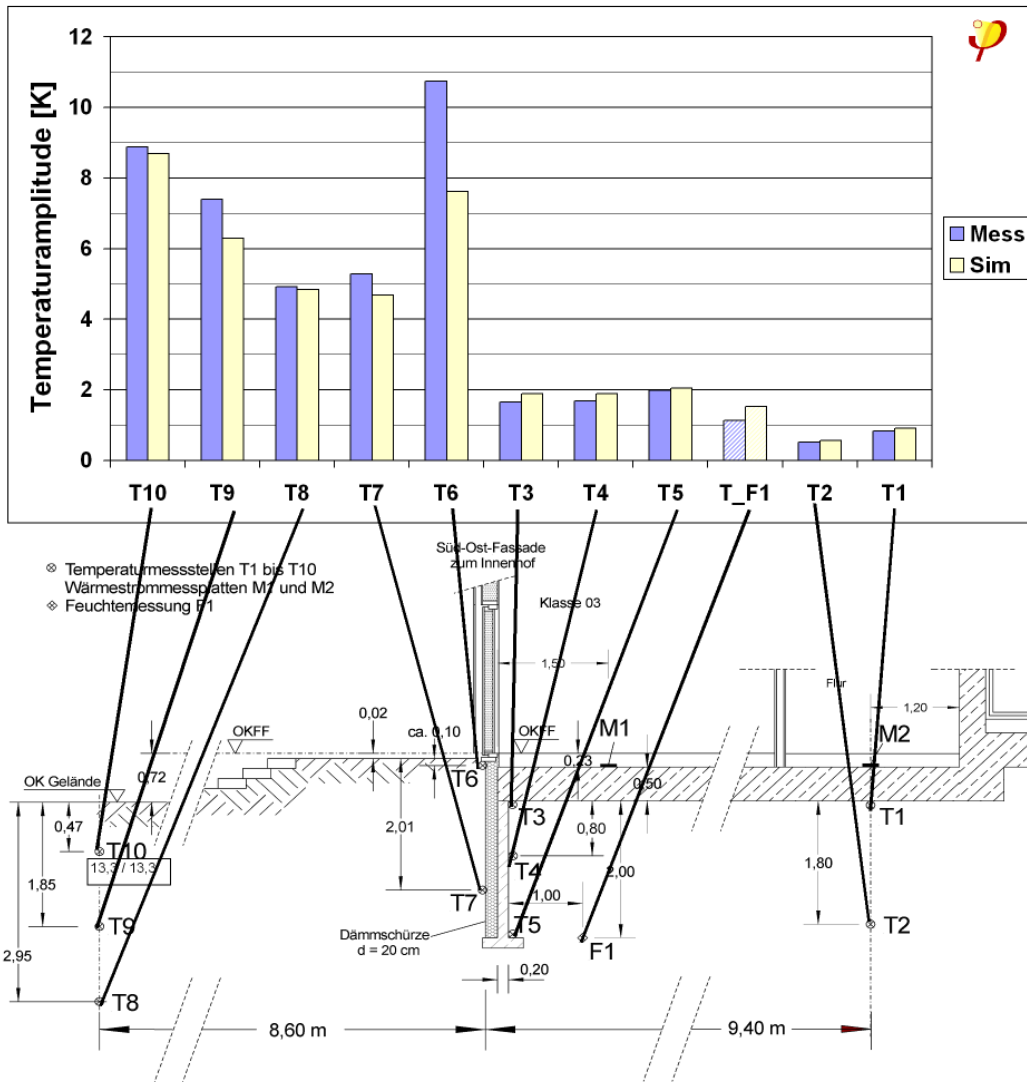


Abbildung 47:
Amplitude eines Sinus-Fits
 (Zeitraum 11.10.2006 bis 10.10.2010). Die Mittelung erfolgte der Vergleichbarkeit wegen auch für die Simulationsergebnisse nur über diejenigen Zeitpunkte, für die Messdaten vorlagen.



Die Temperaturverläufe sämtlicher Sensoren sind im Vergleich mit den simulierten Werten in den folgenden Abbildungen dargestellt:

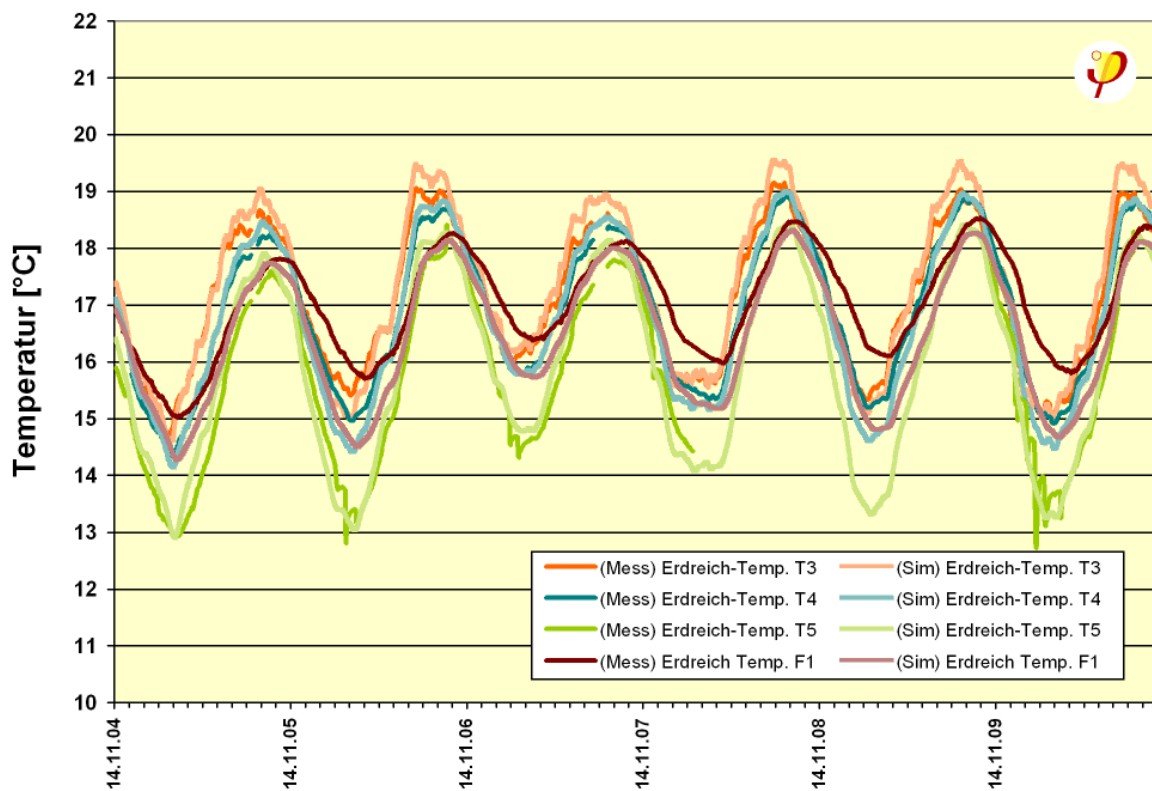
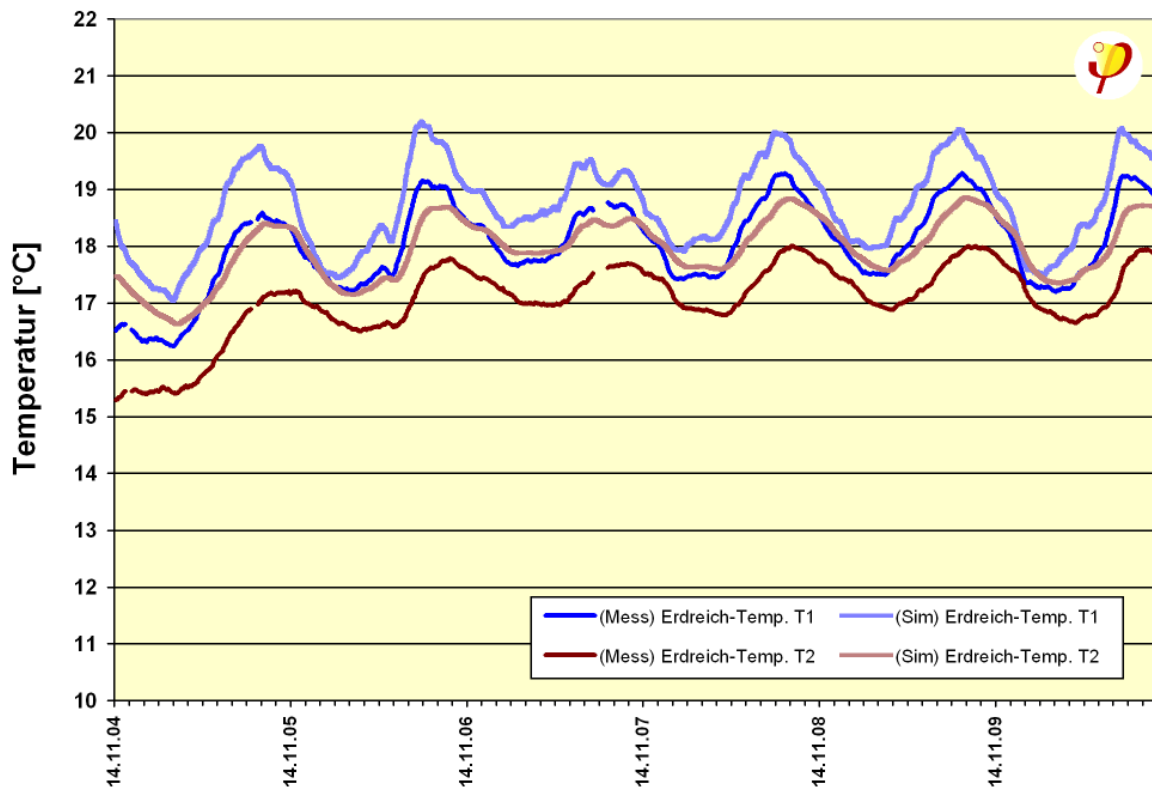


Abbildung 48: Temperaturverläufe in T1 bis T5 und F1 für Messung und Simulation über den gesamten Messzeitraum.

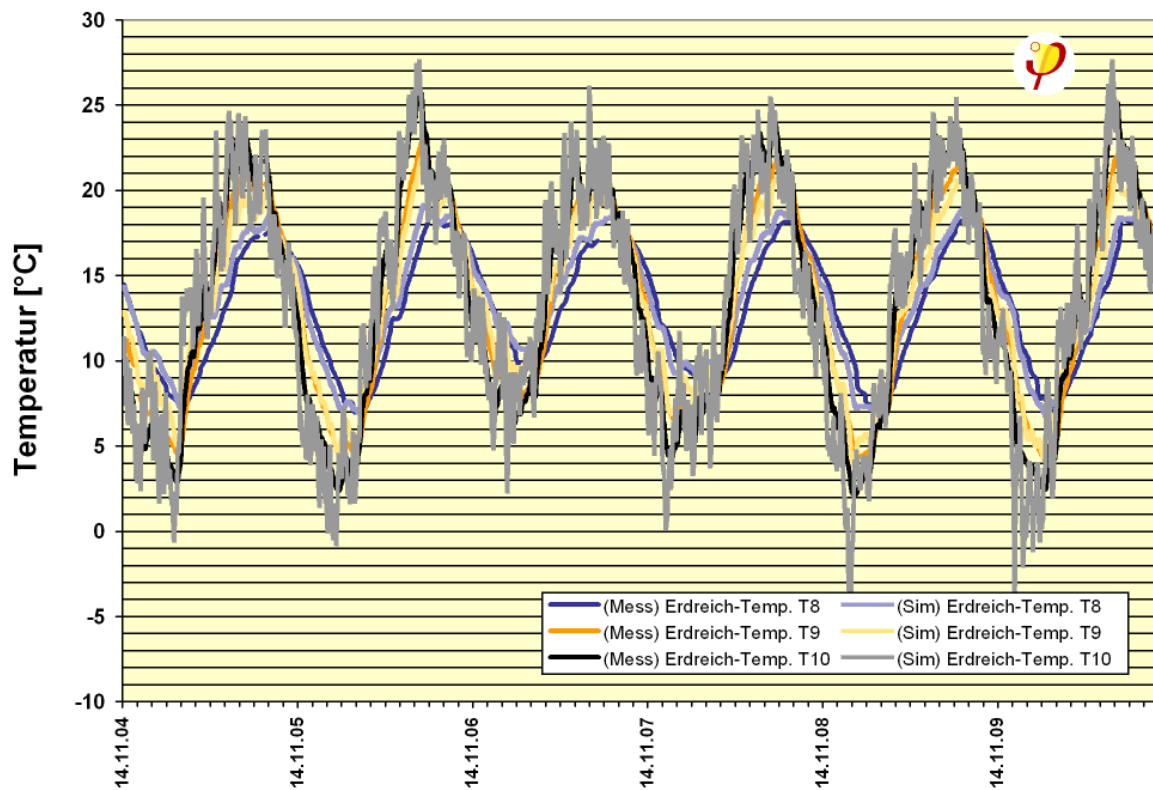
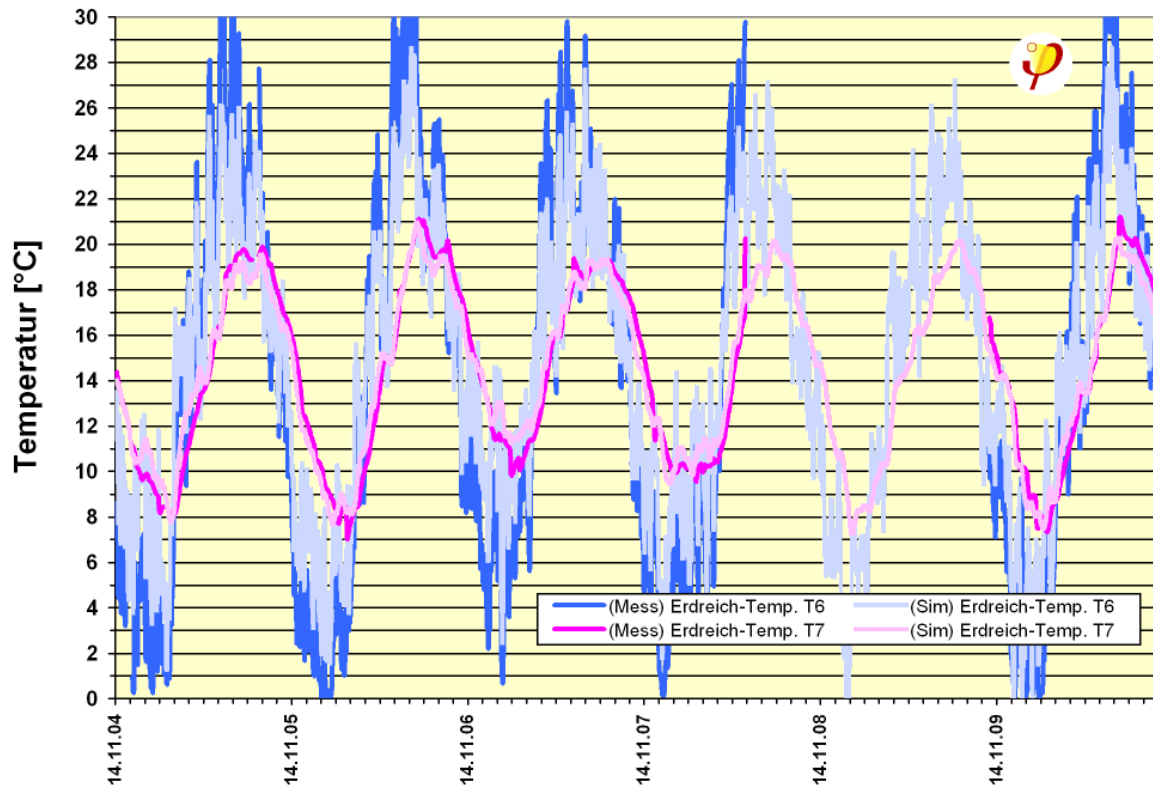


Abbildung 49: Temperaturverläufe in T6 bis T10 für Messung und Simulation über den gesamten Messzeitraum.

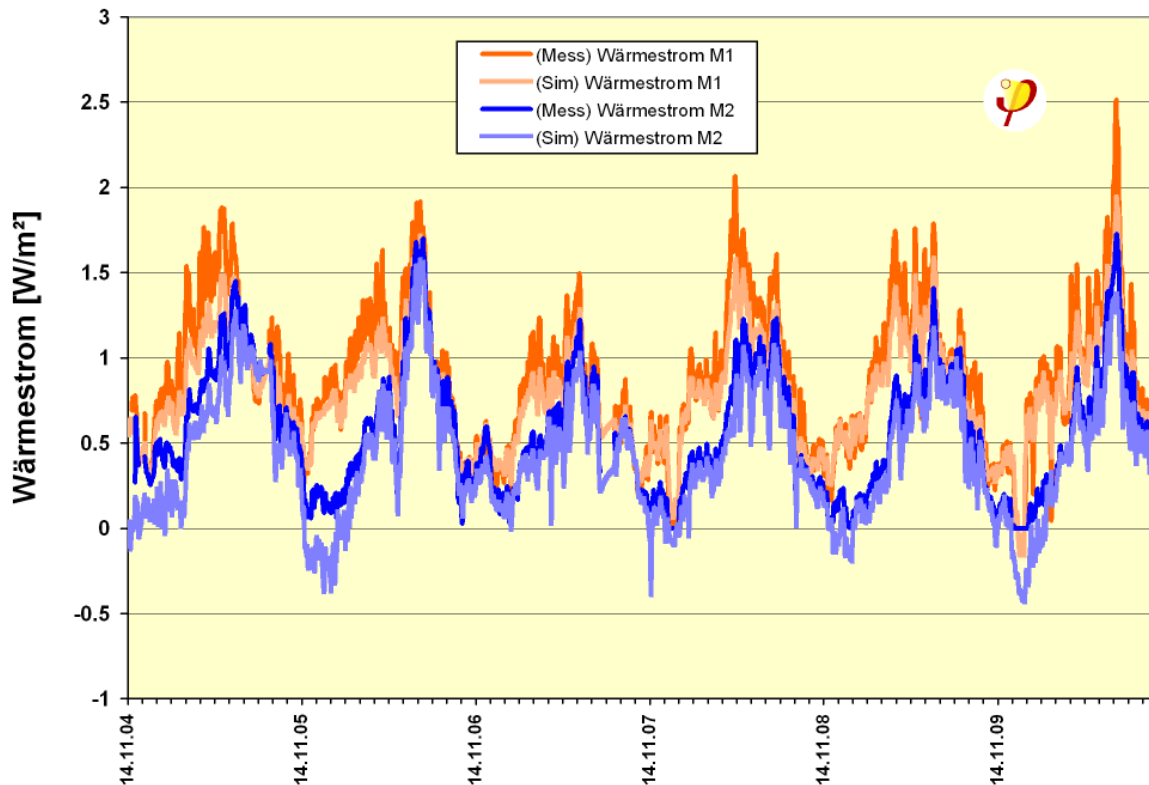


Abbildung 50: Zeitverlauf der Wärmeströme an den Wärmestrommessplatten M1 und M2 für Messung und Simulation über den gesamten Messzeitraum.

Auch hier ist zu erkennen, dass die Simulation die Temperaturen T1 und T2 in der Mitte der Bodenplatte deutlich überschätzt. Die übrigen Temperaturen werden größtenteils recht gut, z.T. bis in die Feinheiten der Verläufe einzelner Wochen (vgl. z.B. T3 und T7), wiedergegeben. Bei den oberflächennahen Sensoren T6 und T10 gibt es in den Messwerten zahlreiche kurzzeitige Schwankungen, die durch die Simulation nicht wiedergegeben werden. Hier könnte es sich beispielsweise um den Einfluss von Solarstrahlung, Sickerwasser oder Schneebedeckung handeln. Diese Einflussgrößen wurden in der Simulation nicht berücksichtigt.

Auch bei den Wärmeströmen spiegelt sich die bereits in Abbildung 46 dargestellte Unterschätzung der Messwerte durch die Simulation in den Zeitverläufen wieder. Schwankungen auf einer Zeitskala von wenigen Tagen werden stellenweise sehr gut wiedergegeben. Die Wärmestrommessplatten liefern keine negativen Wärmeströme, so dass die Datenreihen in den kurzen Zeiträumen, in denen der Wärmestrom von unten nach oben gerichtet ist, stark voneinander abweichen können.

Abbildung 47 zeigt, dass die Amplitude des Wärmestroms lt. Simulation im Flur geringfügig höher ist als im Klassenraum, in der Messung dagegen – wie man es auch erwarten würde – deutlich niedriger. Dies ist zum Teil dadurch zu erklären, dass nach oben gerichtete Wärmeströme in den Messdaten mit dem Wert Null erscheinen (vgl. Abbildung 43). Eine weitere Komponente bildet die Unsicherheit in der Bestimmung der Oberflächentemperaturen im Flur, die für die Simulation aus den Lufttemperaturen abgeleitet werden mussten (vgl. Abschnitt 6.3.4.3). Die Lufttemperaturen im Flur sinken im Winter um ca. 1 K unter diejenigen im Klassenraum ab, da



die Flure nicht beheizt werden und die Luft einem nennenswerten Wärmeentzug durch die stark frequentierten Eingangsbereiche ausgesetzt ist. Im Sommer gibt es fast keine Lufttemperaturdifferenz zwischen Flur und Klassenraum, so dass die in der Simulation angesetzte Temperaturamplitude im Flur größer ausfällt. Real ist sie vermutlich kleiner, weil die Bodenoberflächentemperatur vorwiegend durch die übrigen Oberflächen bestimmt wird, die wiederum stark an die Klassenräume gekoppelt sind. Die Abweichung der simulierten Amplitudenverhältnisse von den gemessenen dürfte also letztlich auf ungenau bekannte Randbedingungen zurückzuführen sein.

In Abbildung 50 fällt im Übrigen auf, dass die größten Wärmeverluste im Sommer auftreten, während die kleinsten Wärmeströme in den Wintermonaten liegen. Das ist anhand von Abbildung 51 leicht zu erklären: Die Temperaturen im Erdreich unter der Bodenplatte sind nahezu konstant, mit einer Schwankungsbreite von weniger als 2 K. Die Raumtemperaturen schwanken dagegen stärker, und sie sind im Winter am niedrigsten. In einigen Jahren wurde die Raumtemperatur während der Weihnachtsferien sogar bis auf ca. 17 °C abgesenkt. Dementsprechend sind auch die Temperaturdifferenzen zwischen Raum und Erdreich im Sommer höher als im Winter.

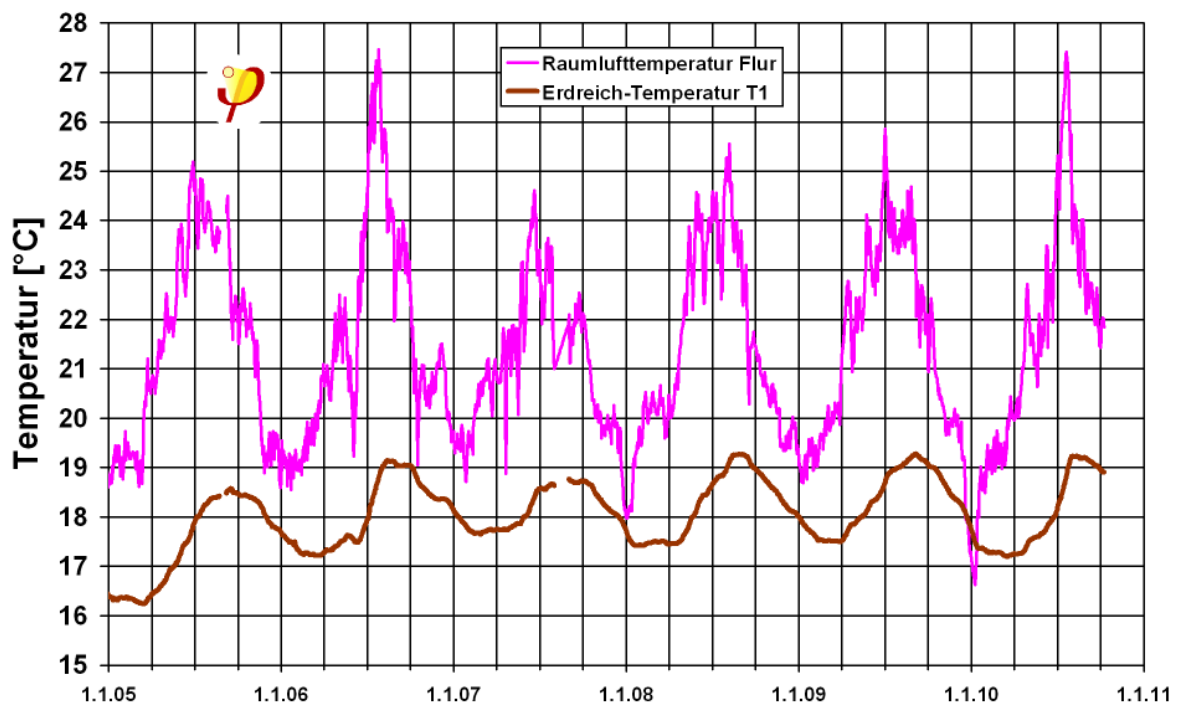


Abbildung 51: Der Zeitverlauf von Innen- und Erdreichtemperatur zeigt, dass die geringsten Temperaturdifferenzen in den Wintermonaten auftreten.



6.3.7.2 Simulation mit höherer Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs

Eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ergibt sich, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs wesentlich höher angenommen wird als im Referenzfall. Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Jahresmittelwerte der Temperaturen und ihre Amplituden, wenn die Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs von den Ausgangswerten 1,186 bzw. 1,679 W/(mK) jeweils um 50% erhöht werden. Die resultierenden Wärmeleitfähigkeiten liegen damit etwa im Bereich des „Normerdreichs“ mit 2 W/(mK), wie es z.B. in ISO 13370 als Standard vorgeschlagen wird.

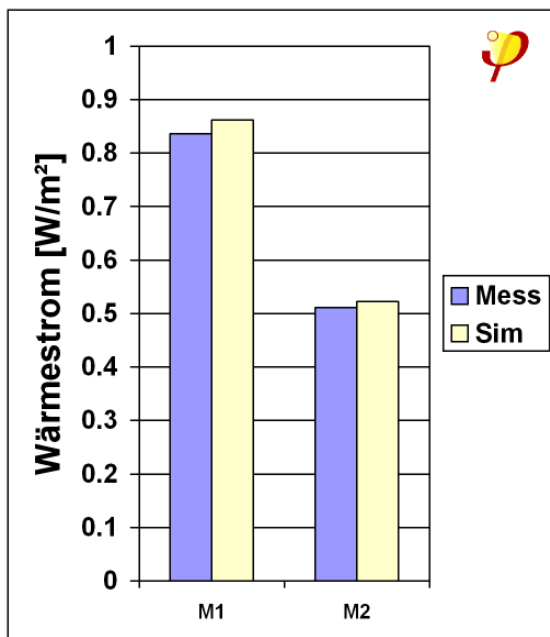
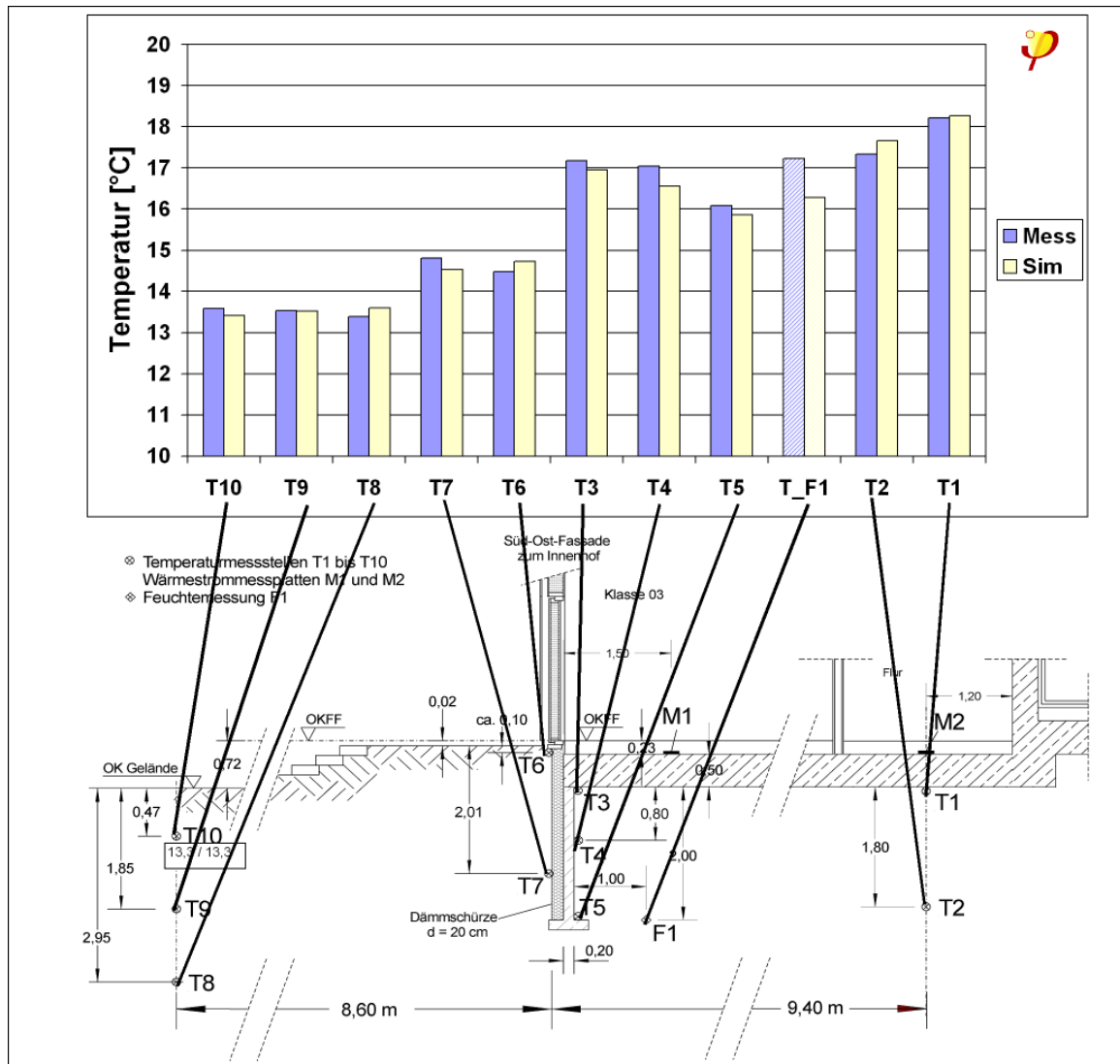


Abbildung 52:
Mittelwerte eines Sinus-Fits für um 50% erhöhte Wärmeleitfähigkeit (Zeitraum 11.10.2006 bis 10.10.2010). Die Mittelung erfolgte der Vergleichbarkeit wegen auch für die Simulationsergebnisse nur über diejenigen Zeitpunkte, für die Messdaten vorlagen.

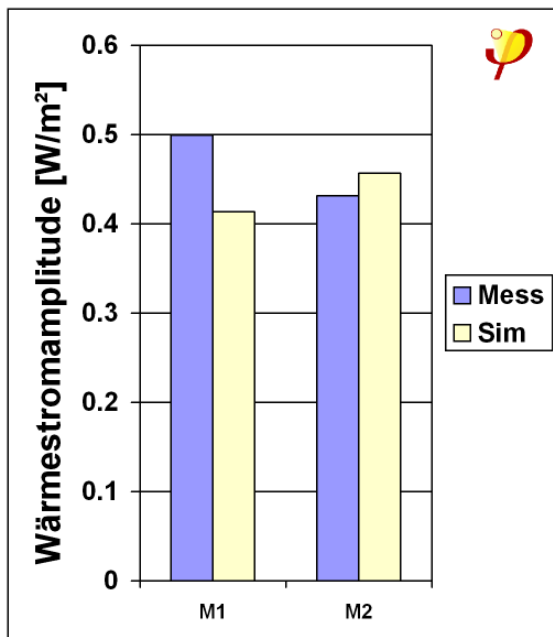
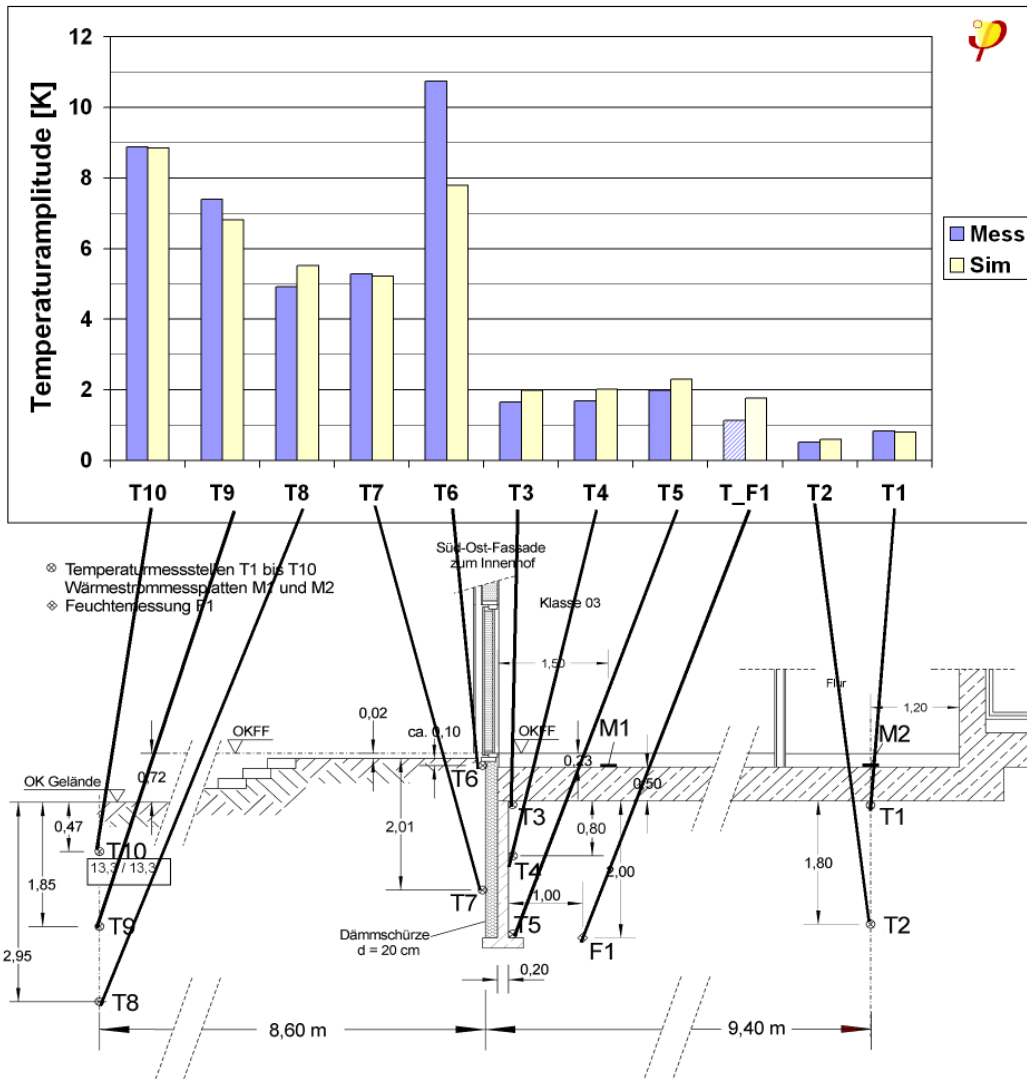


Abbildung 53:
Amplitude eines Sinus-Fits für um 50% erhöhte Wärmeleitfähigkeit (Zeitraum 11.10.2006 bis 10.10.2010). Die Mittelung erfolgte der Vergleichbarkeit wegen auch für die Simulationsergebnisse nur über diejenigen Zeitpunkte, für die Messdaten vorlagen.



Die verbleibenden Abweichungen bei den Jahresmittelwerten liegen – mit Ausnahme der unsicheren Temperatur T_{F1} – unter 0,5 K, gemessene und simulierte Wärmeströme weichen um höchstens 3% voneinander ab. Dabei werden die Temperaturen $T1$ und $T2$ in der Mitte der Bodenplatte eher zu hoch, die Temperaturen $T3$ bis $T5$ in der Nähe der Dämmschürze eher zu niedrig berechnet. Die jahreszeitlichen Amplituden stimmen ebenfalls gut überein, mit typischen Abweichungen von 10%. Hier gibt es lediglich bei der Temperatur $T6$ größere Abweichungen. Dort ist auch die Messunsicherheit am größten: Die Lage dieses Fühlers konnte nicht eingemessen werden, bei den oberflächennahen Fühlern wirkt sich jedoch die genaue Verlegetiefe stark auf die Jahresamplitude aus.

Die Ergebnisse legen folgende Vermutungen nahe: Die effektive Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ist bedeutend (ca. 50%) höher als anhand der Bodenproben gemessen. Der durchschnittliche Wassergehalt müsste dann ebenfalls höher sein als in den gemessenen Bodenproben. Das wäre nicht unplausibel: Das Gelände fällt nach Südosten hin (in den Schnittzeichnungen nach links) ab, und einige hundert Meter vom Schulgelände entfernt liegt der Bonifatiusbrunnen. Von daher könnte durchaus eine Grundwasserströmung vorhanden sein, die einerseits rein durch den höheren Wassergehalt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs erhöht, andererseits die Temperaturblase unter dem Gebäude nach Südosten hin verschiebt. Durch Letzteres würden die Temperaturen $T1$ und $T2$ reduziert und $T3$ bis $T5$ vergrößert.

Da für den Wärmestrom Tiefen bis etwa zur Breite des Gebäudeschnitts, d.h. bis ca. 20 m unter Geländeoberkante, relevant sind, könnte sich unabhängig von etwaigen Grundwasserströmungen auch die Bodenzusammensetzung ändern. Simulationsrechnungen mit noch höherer Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs führten allerdings zu noch niedrigeren Werten von $T3$ bis $T5$, so dass die Hypothese des Grundwassereinflusses plausibler erscheint.

Anhand der Simulationsergebnisse soll auch der Einschwingvorgang nochmals näher betrachtet werden. In Abbildung 54 ist eine kontinuierliche Abnahme der für die Raumheizung relevanten winterlichen Wärmeverluste durch den Boden des Flures zu erkennen. Der Flur befindet sich im Vergleich zu den Punkten „Treppenhaus links“ und „Klasse 0.3“ am weitesten von den Dämmschürzen entfernt. Daher sind hier die Einflüsse der Außentemperaturschwankung nur gering; der „Wärmesee“ dominiert den Wärmestrom. Für den Rest der Bodenplatte und damit für die gesamten Erdreich-Wärmeverluste gilt das nicht, hier überwiegen die zufälligen Schwankungen von Jahr zu Jahr. Praxisrelevant ist allenfalls die oben bereits beschriebene Aufheizung des Erdreichs während der ersten ein bis zwei Jahre. Bedenken, dass ein Gebäude mit Dämmschürzen das Erdreich über mehrere Jahre aufheizen muss und dadurch die Funktionsfähigkeit während der ersten Jahre beeinträchtigt werden könnte, sind demnach zumindest für die hier betrachteten Geometrien gegenstandslos.

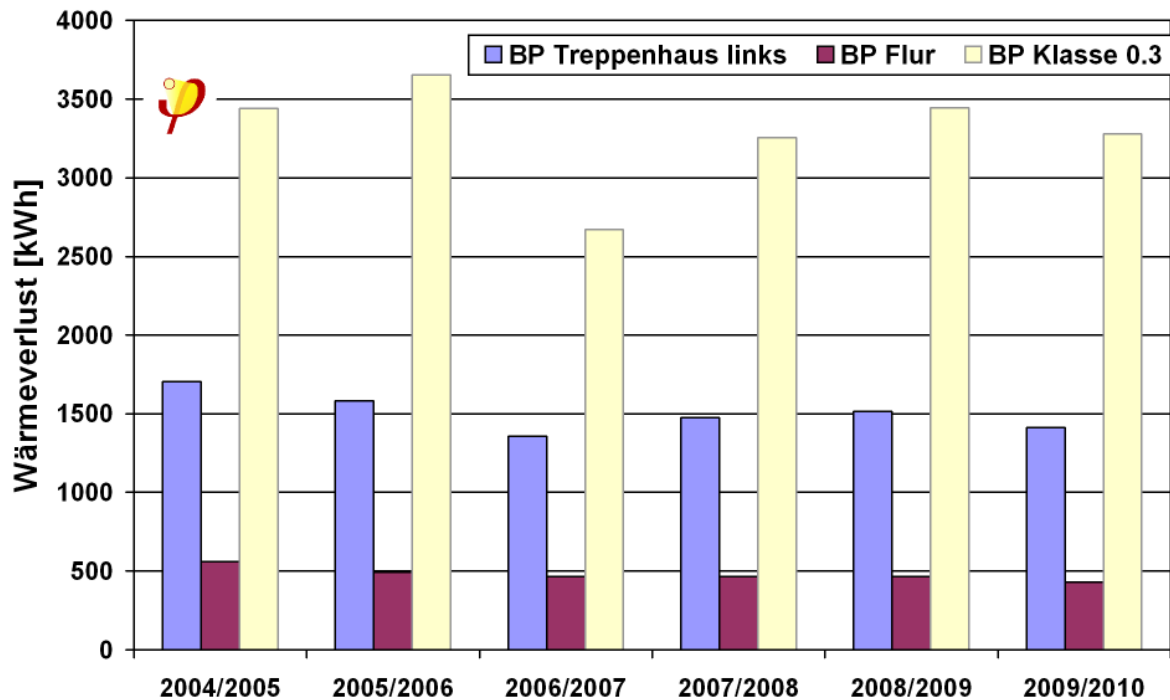


Abbildung 54: Simulationsergebnisse für den Wärmeverlust durch die verschiedenen Teile der Bodenplatte (BP) während der Wintermonate November bis März.

6.4 Analyse der Einflussfaktoren auf die Wirkung von Dämmschürzen

Die Auswirkungen einer Dämmschürze auf die Heizwärmebilanz hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab: der Geometrie und der U-Wert der Bodenplatte, die räumliche Verteilung etwaiger Wärmebrücken in der Bodenplatte, der Dicke, Wärmeleitfähigkeit, Tiefe und Ausrichtung der Dämmschürze, der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Erdreichs, Grundwasserströmungen sowie der Länge der Heizperiode.

Für die Planung wäre es hilfreich, ohne zu komplizierte Rechnung in einfacher Weise vorhersagen zu können, wie die Wärmeverluste bei einer bestimmten Kombination von Dämmschürze und Bodenplatte ausfallen, d.h. beispielsweise, welchem U-Wert einer Bodenplatte ohne Dämmschürze eine bestimmte Konfiguration mit Dämmschürze entsprechen würde.

Aufgrund der vielfältigen genannten Einflüsse scheint es, als könne man eine solche Aussage nur nach detaillierter Rechnung machen. Im Folgenden sollen jedoch immerhin die wesentlichen Einflussgrößen von den unwesentlichen getrennt und eine grobe Orientierungen darüber geschaffen werden, welchen Einfluss eine Dämmschürze haben kann.



Bezüglich der Geometrie hat bereits [Hagentoft 1988] gezeigt, dass die entscheidende Kenngröße zur Charakterisierung der Geometrie das sogenannte **charakteristische Bodenplattenmaß B'** darstellt, d.h. das Verhältnis der Bodenplattenfläche zur halben Perimeterlänge (Bodenplattenumfang). Gebäude mit unterschiedlicher Geometrie, aber identischem B' besitzen pro Meter Perimeterlänge bei ansonsten gleichen Bedingungen nahezu den gleichen Wärmeverlust durch das Erdreich. Diese Aussage konnte in [Schnieders 2004] bestätigt werden; sie gilt um so genauer, je besser die Bodenplatte gedämmt ist.

Für eine erste Orientierung ist es weiterhin ausreichend, die Betrachtungen auf die relevantesten Fälle zu beschränken. Wir gehen daher von senkrechten Dämmschürzen, wie sie im hier untersuchten Fall eingebaut wurden, aus, setzen für das Material der Dämmschürze eine Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ an und verwenden das sogenannte Normerdreich mit Wärmeleitfähigkeit $2 \text{ W}/(\text{mK})$ und Wärmekapazität $2 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$. Dieser Wert ist eher etwas pessimistisch, ein gewisser Grundwassereinfluss kann also bereits als eingerechnet betrachtet werden.

Von Interesse sind hauptsächlich die Gesamtwärmeverluste durch die Bodenplatte im Winter; die zugehörige Heizperiode wird vom 1.10. bis 1.4. angesetzt. Die Außentemperatur wird als Sinusschwingung mit einer Periode von einem Jahr, einem Mittelwert von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Amplitude 10 K angesetzt. Auch für die Innentemperatur wird in Anlehnung an Abbildung 51 eine Sinusschwingung angenommen, der Mittelwert beträgt $22 \text{ }^\circ\text{C}$, die Amplitude 3 K .

Unter diesen Randbedingungen wurden für einen schematisierten Gebäudeschnitt mehrere hundert dynamische Finite-Differenzen-Berechnungen mit dem Programm HEAT2 durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Größen unabhängig voneinander variiert:

- Charakteristisches Bodenplattenmaß B' (6, 20 und 60 m). Für z.B. eine Reihenhauszeile wäre B' die **Gebäudebreite**.
- **Tiefe T** der Dämmschürze in senkrechter Richtung ins Erdreich hinein: 0, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2 und 4 m.
- **Dicke d** der Dämmschürze (Ausdehnung in horizontaler Richtung): 50, 100 und 200 mm (Hier wird nur der Dämmstoff betrachtet).
- **Wärmedurchgangskoeffizient U** der Bodenplatte (inkl. der Wärmebrücken): 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1 und $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

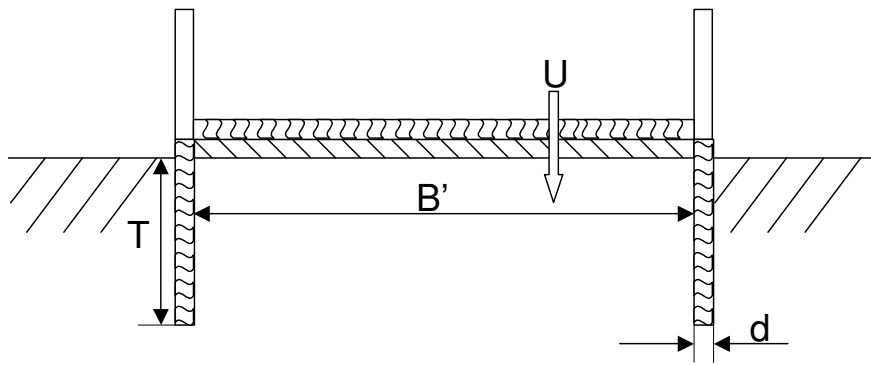


Abbildung 55: Skizze zur Erläuterung der in der Parametervariation verwendeten Größen.

Die errechneten Wärmeverluste pro Meter Perimeterlänge für sämtliche Varianten sind in einem gemeinsamen Diagramm in Abbildung 56 dargestellt.

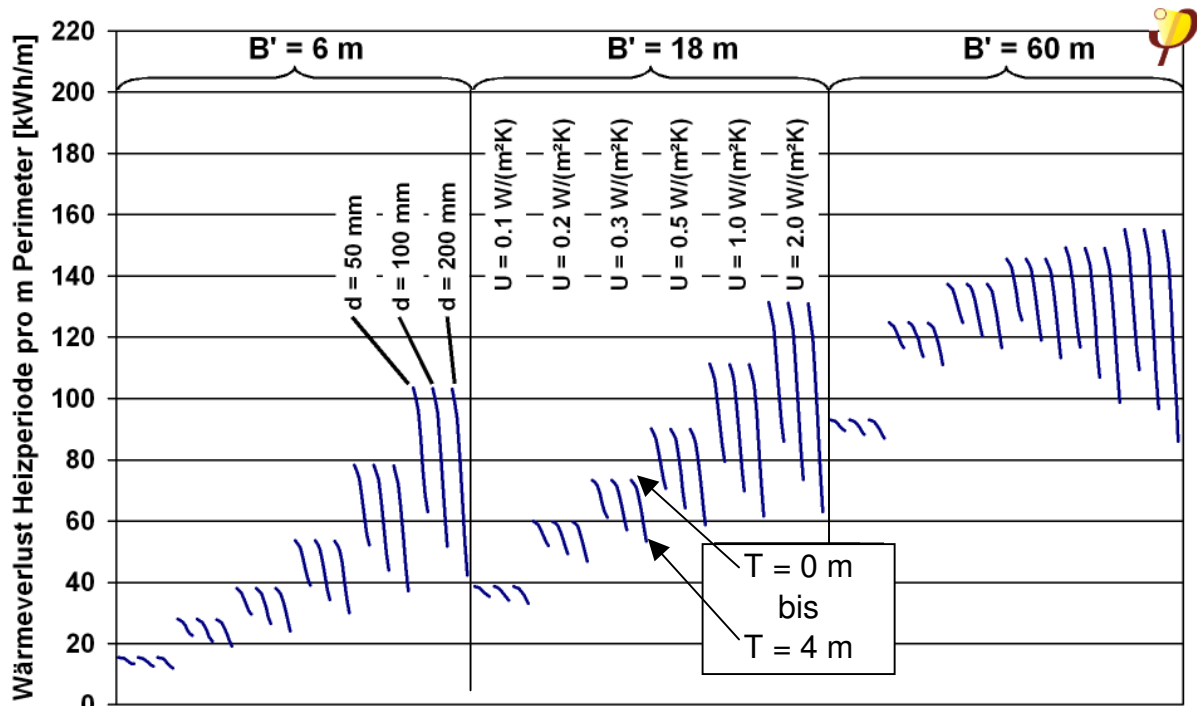


Abbildung 56: Wirkung von Dämmschürzen einer Tiefe T zwischen 0 und 4 m unter verschiedenen Randbedingungen (vgl. Text).

Aus diesen Simulationen lässt sich eine Reihe von wichtigen Aussagen über die durch die Dämmschürze bewirkte Reduktion ΔQ des Wärmeverlustes durch die Bodenplatte ableiten:

- ΔQ hängt kaum vom charakteristischen Bodenplattenmaß B' ab. Das hat insbesondere die Konsequenz, dass man den Einfluss der Dämmschürze in Berechnungen nicht über eine Reihenschaltung von Widerständen abbilden kann. In letzterem Fall müsste nämlich mit wachsendem B' , aufgrund des größeren Gesamt-Wärmeverlustes Q , auch ΔQ größer werden.



- ΔQ hängt in hohem Maße vom U-Wert der Bodenplatte ab. Im Gegensatz zu B' wirkt sich U augenscheinlich kaum auf den Weg des Wärmestroms durch das Erdreich aus, so dass die Dämmschürze bei gegebener Geometrie für Berechnungen näherungsweise als zusätzlicher Widerstand in Reihe angesehen werden könnte.
- ΔQ hängt stark von der Tiefe T der Dämmschürze ab. Es empfiehlt sich daher, die baupraktisch – also ohne zusätzliche Erdarbeiten (Kosten!) – realisierbare Tiefe auszunutzen.
- ΔQ hängt vergleichsweise schwach von der Dicke der Dämmschürze ab. Eine Dicke von 10% der Tiefe, mindestens jedoch 6 cm, erscheint als sinnvolle Dimensionierung. Größere Dämmstoffstärken bringen kaum noch eine Verbesserung, bei geringeren Dämmstoffstärken ist die Kostenersparnis vernachlässigbar.

Diese Ergebnisse erlauben es, den Effekt der Dämmschürzen für die wesentlichen Fälle in einer relativ anschaulichen Grafik zusammenzufassen. Abbildung 57 zeigt für verschiedene Tiefen der Dämmschürzen die zugehörige Reduzierung des Wärmeverlustes in der Heizperiode, ausgedrückt als äquivalente Reduzierung des U-Werts der Bodenplatte.

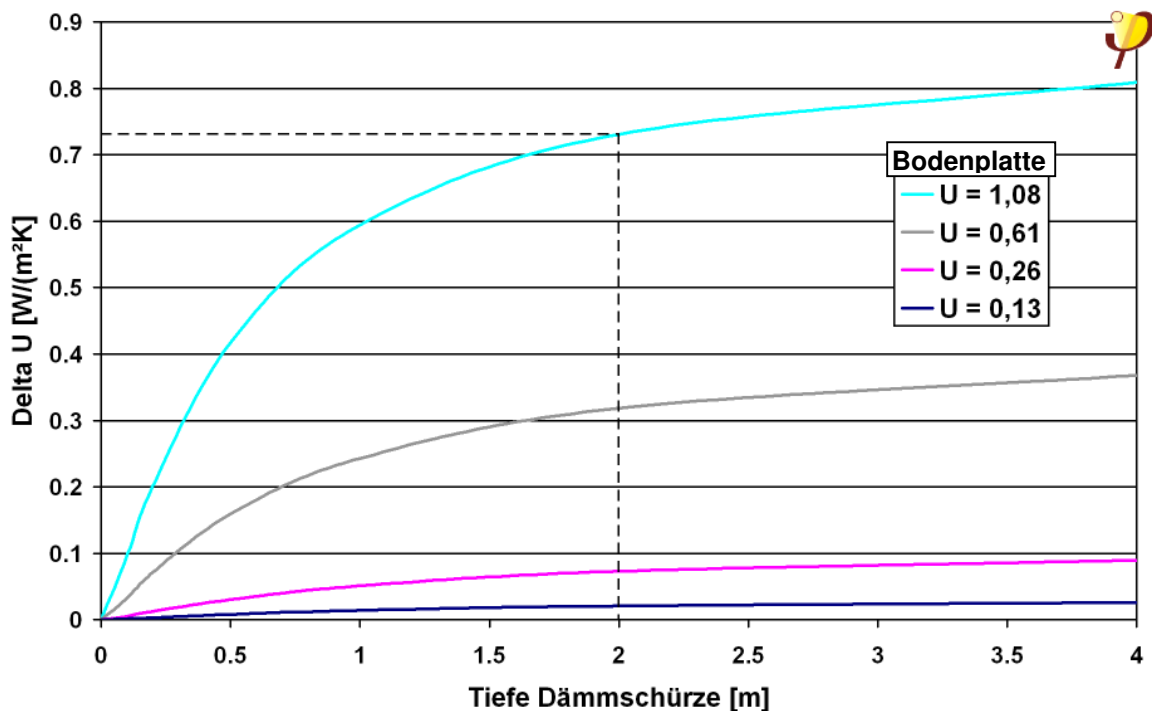


Abbildung 57: Wirkung einer Dämmschürze von 100 mm Stärke für verschiedene Tiefen und U-Werte der Bodenplatte. Ablesebeispiel (gestrichelte Linie): Eine schlecht gedämmte Bodenplatte mit U-Wert 1,08 W/(m²K) lässt sich durch eine 2 m tiefe Dämmschürze thermisch so weit verbessern, als würde man den U-Wert um 0,73 W/(m²K) reduzieren. Randbedingungen für das Diagramm: B' = 20 m, Dämmstärke der Dämmschürze 100 mm.



Eine systematische Prüfung des Gültigkeitsbereichs der in Abbildung 57 dargestellten Zusammenhänge geht über das Ziel dieser Überlegungen hinaus. Einzelne Stichproben deuten darauf hin, dass das Diagramm für alle in der Praxis auftretenden Werte von B' verwendet werden kann, zumindest, um den Planer in einem frühen Stadium bei der Entscheidung zu unterstützen, ob die Verwendung von Dämmschürzen zweckmäßig sein könnte. Eine genauere Berechnung unter Verwendung der tatsächlichen Randbedingungen wird im Zuge der Ausführungsplanung in jedem Falle erforderlich werden.



7 Fazit und Planungshinweise

Die in der Riedbergschule gemessenen Temperaturen und Wärmeströme im Erdreich stimmen mit den berechneten Werten gut überein. Die Messungen sind demnach verträglich mit der Annahme, dass die Berechnung der Wärmeverluste durch das Erdreich realistische Ergebnisse liefert. Auch in den Langzeitmessungen konnten keine Indizien dafür gefunden werden, dass das Konzept nicht dauerhaft wie erwartet funktionieren würde, etwa aufgrund von fließendem Grundwasser oder grundlegenden Fehlern in den Rechenverfahren.

Es zeigte sich jedoch, dass die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs für ein realistisches Berechnungsergebnis gegenüber den im Labor gemessenen Werten um ca. 50% höher angesetzt werden muss. Als mögliche Erklärung kommt eine Grundwasserströmung unterhalb der Bodenplatte in Betracht.

Die Temperaturen und Wärmeströme benötigen nach Nutzungsbeginn etwa zwei Jahre, bis ein quasistationärer Zustand erreicht ist. Die zusätzlichen Wärmeverluste in den ersten Jahren sind von einer Größenordnung, die – so zeigte auch die Praxiserfahrung im hier untersuchten Objekt – die Funktionsfähigkeit des Gesamtgebäudes nicht beeinflussen.

Die Simulation gibt die Messergebnisse gut wieder, falls mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit des Bodens gerechnet wird. Abbildung 58 illustriert anhand der Temperaturverteilung unter der Bodenplatte zu verschiedenen Zeitpunkten die Funktion der Dämmschürzen, wie sie durch die Messungen bestätigt wird. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich unterhalb des Gebäudes zwischen den Dämmschürzen eine Wärmeglocke bildet, die die Wärmeverluste durch die Bodenplatte reduziert. Die erhöhten Wärmeverluste aufgrund der Wärmebrücken im Bereich der aufgehenden Wände führen zu entsprechend erhöhten Temperaturen im Erdreich, die in der Grafik ebenfalls gut zu sehen sind.

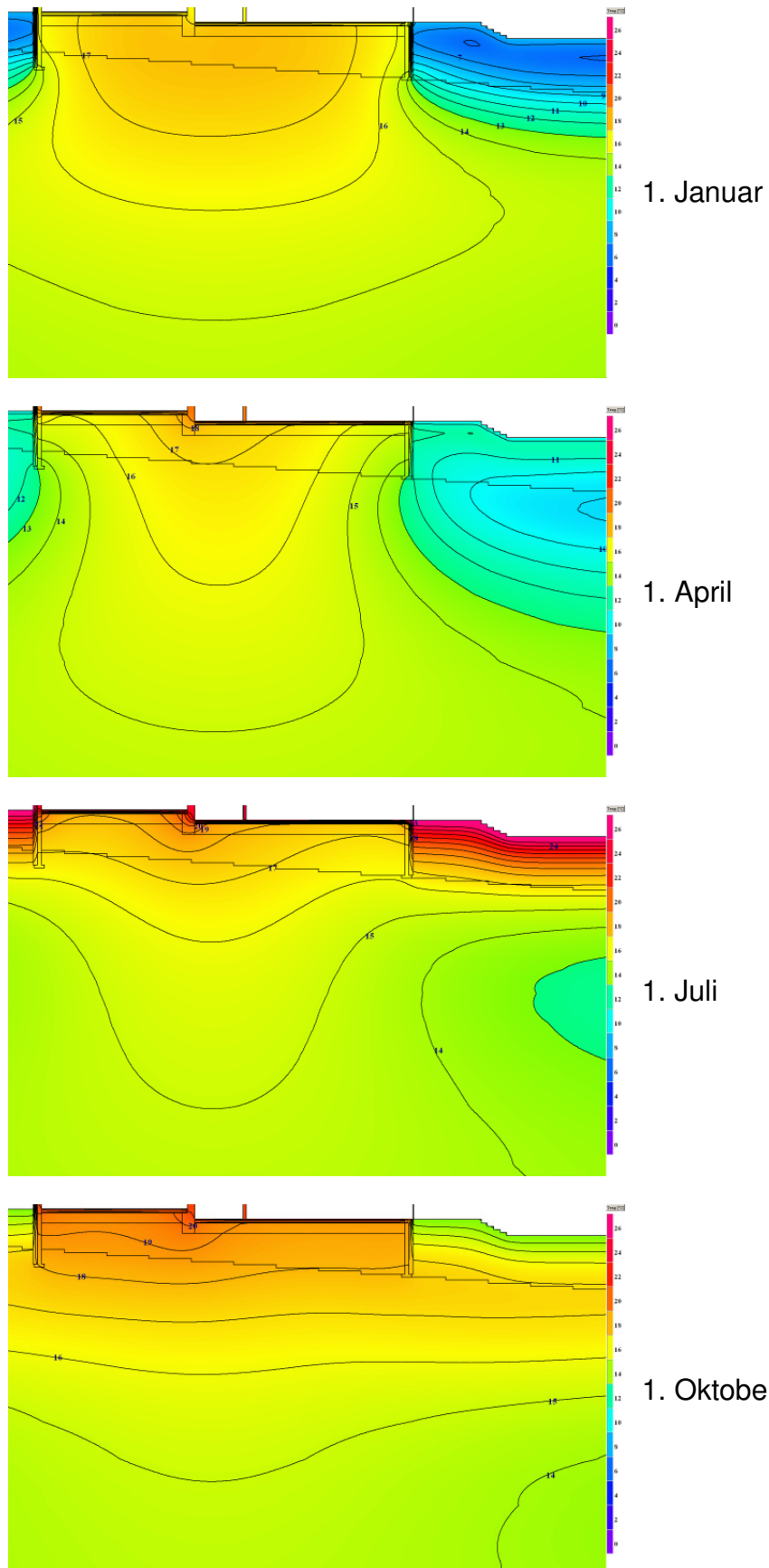


Abbildung 58: Temperaturverteilung im Erdreich am 1. Januar, 1. April, 1. Juli und 1. Oktober 2010. Verwendet wurde das Modell mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.



Für die künftige Planung ähnlicher Konstruktionen ist zu beachten, dass die Verwendung von Dämmschürzen in Verbindung mit reduziertem Wärmeschutz der Bodenplatte stets gewisse Unsicherheiten beinhaltet: Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs muss gewöhnlich abgeschätzt werden. Die oben dokumentierten Labormessungen an trockenen und feuchten Erdreichproben zeigen erhebliche Unterschiede zwischen nassen und trockenen Proben, so dass – aufgrund der fehlenden Information über die sich im Gebäudebetrieb einstellende Erdreichfeuchte – selbst nach Messungen von Bodenproben die Wärmeleitfähigkeit nur sehr ungenau bestimmt werden kann. Entsprechende Sicherheiten sind daher vorzusehen. Dies gilt auch für mögliche Grundwasserströmungen, die nur an wenigen Standorten völlig ausgeschlossen werden können.

Eine Sensitivitätsstudie zeigte, dass der Effekt der Dämmschürzen im Wesentlichen vom U-Wert der Bodenplatte und von der Tiefe der Dämmschürzen bestimmt wird. Die Dämmstoffstärke spielt dagegen nur eine geringe Rolle, sinnvoll erscheinen ungefähr 10 % der Schürzentiefe. Diese Dimensionierung wurde auch am Riedberg gewählt. Die Reduzierung des Wärmeverlustes pro Meter Perimeterlänge erwies sich als nahezu unabhängig von der Größe der Bodenplatte. Das bedeutet, dass Dämmschürzen aus energetischer Sicht auch bei kleineren Gebäuden anwendbar sind. In Abbildung 57 wird eine erste Orientierung zur Wirkung von Dämmschürzen bei verschiedenen Tiefen und Bodenplatten-U-Werten gegeben.

Das Projektierungswerkzeug für Passivhäuser [PHPP 2007] ermöglicht im Erdreichblatt bereits die Berücksichtigung von Dämmschürzen. Die projektspezifische Auslegung sollte anhand eines einfachen Planungswerkzeuges wie z.B. dem PHPP erfolgen. Das dort verwendete Rechenverfahren für Wärmeverluste durch das Erdreich liegt tendenziell eher auf der sicheren Seite (vgl. [Schnieders 2004]).

Insgesamt erlauben es die hier durchgeführten Messungen, die Verwendung von Dämmschürzen als eine von mehreren denkbaren Gründungsalternativen zu empfehlen.

8 Quellenangaben

- [Bretzke 2006] Bretzke, Axel: „Planung und Bau der Passivhaus Grundschule, Kalbacher Höhe 15, Frankfurt a.M.“, Energiemanagement der Stadt Frankfurt a. M. (www.stadt-frankfurt.de/energiemanagement/passiv/passiv.htm), Frankfurt a.M., November 2006
- [DIN EN 1434-3] DIN EN 1434 Teil 3: Wärmezähler, Teil 3: Datenaustausch und Schnittstellen. Deutsche Fassung EN 1434-3:1997, Beuth Verlag, 1997
- [Feist 2006] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Protokollband Passivhaus-Schulen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juli 2006
- [Hagentoft 1988] Hagentoft, Carl-Eric: Heat loss to the ground from a building. Slab on the ground and cellar. Lund Institute of Technology, Division of Building Technology, Report TVBH-1004, Lund, April 1988
- [Peper et al 2007] Peper, Søren, Kah, Oliver; Pfluger, Rainer; Schnieders, Jürgen;: Passivhausschule Frankfurt Riedberg, Messtechnische Untersuchung und Analyse. Darmstadt, Passivhaus Institut, Juli 2007
- [PHPP 2007] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Passivhaus Projektierungs Paket 2007, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. Darmstadt, Passivhaus Institut, 2007
- [Schnieders 2004] Schnieders, Jürgen: Erdreichwärmeverluste im Passivhaus: Gültigkeit der verfügbaren Rechenverfahren; Behandlung von Wärmebrücken; Schürzenlösungen; Einfluss von Erdwärmeübertragern. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 27, Wärmeverluste durch das Erdreich, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2004
- [Schnieders 2006] Schnieders, Jürgen: „Begleitende Beratung bei Planung und Bau der Grundschule und Kindertagesstätte am Riedberg“. Passivhaus Institut, Darmstadt, Dezember 2006



9 Anhang

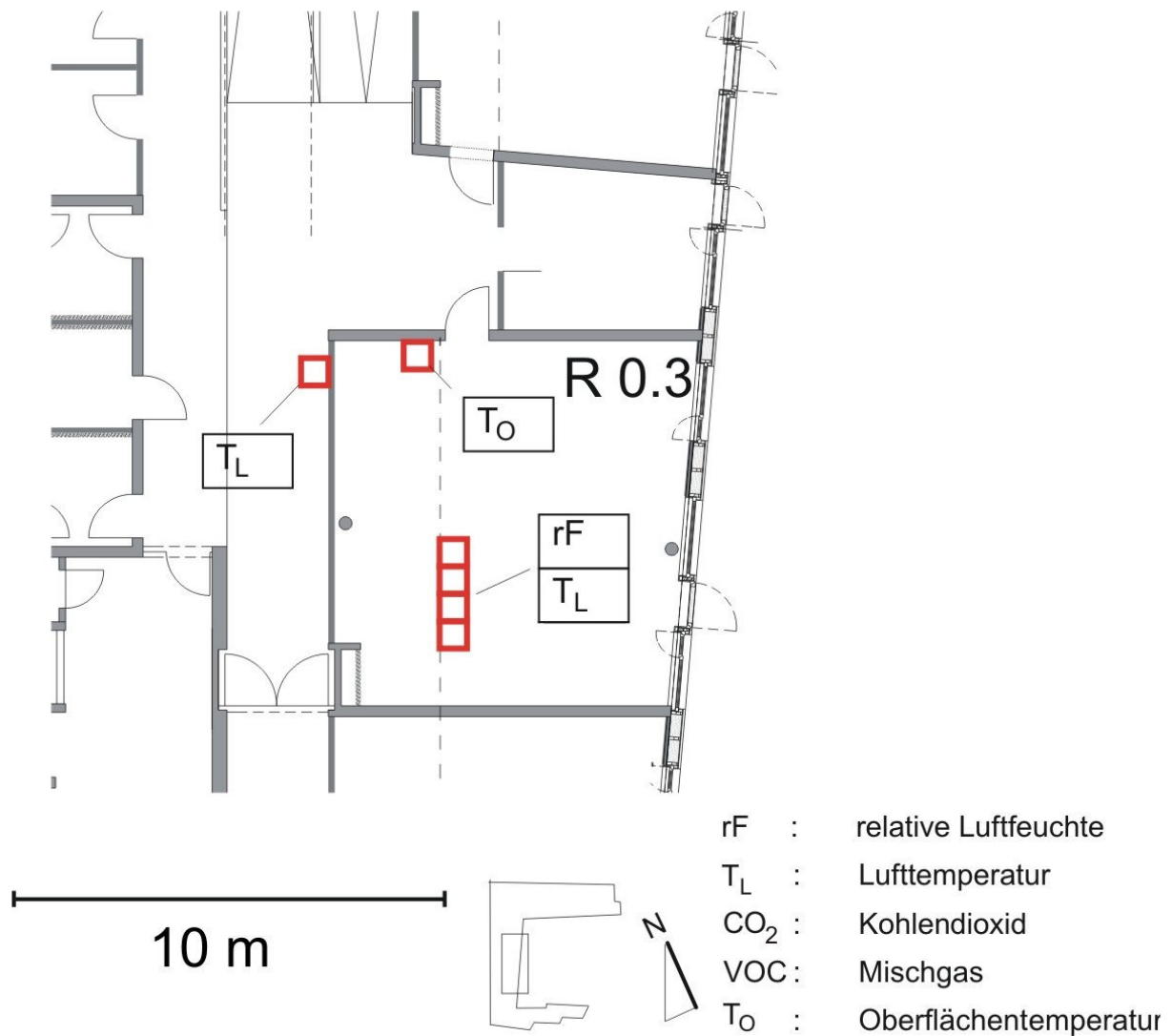
Anhang A: Grundriss EG Raum 0.3 mit den Positionen der Messsensoren
(nach Plänen vom Architekturbüro 4a)

Anhang B: Ansichten/Grundrisse/Schnitte (nach Plänen vom Architekturbüro 4a)

Anhang C: Ergebnisbericht der Bodenprobenmessung der Universität Cottbus

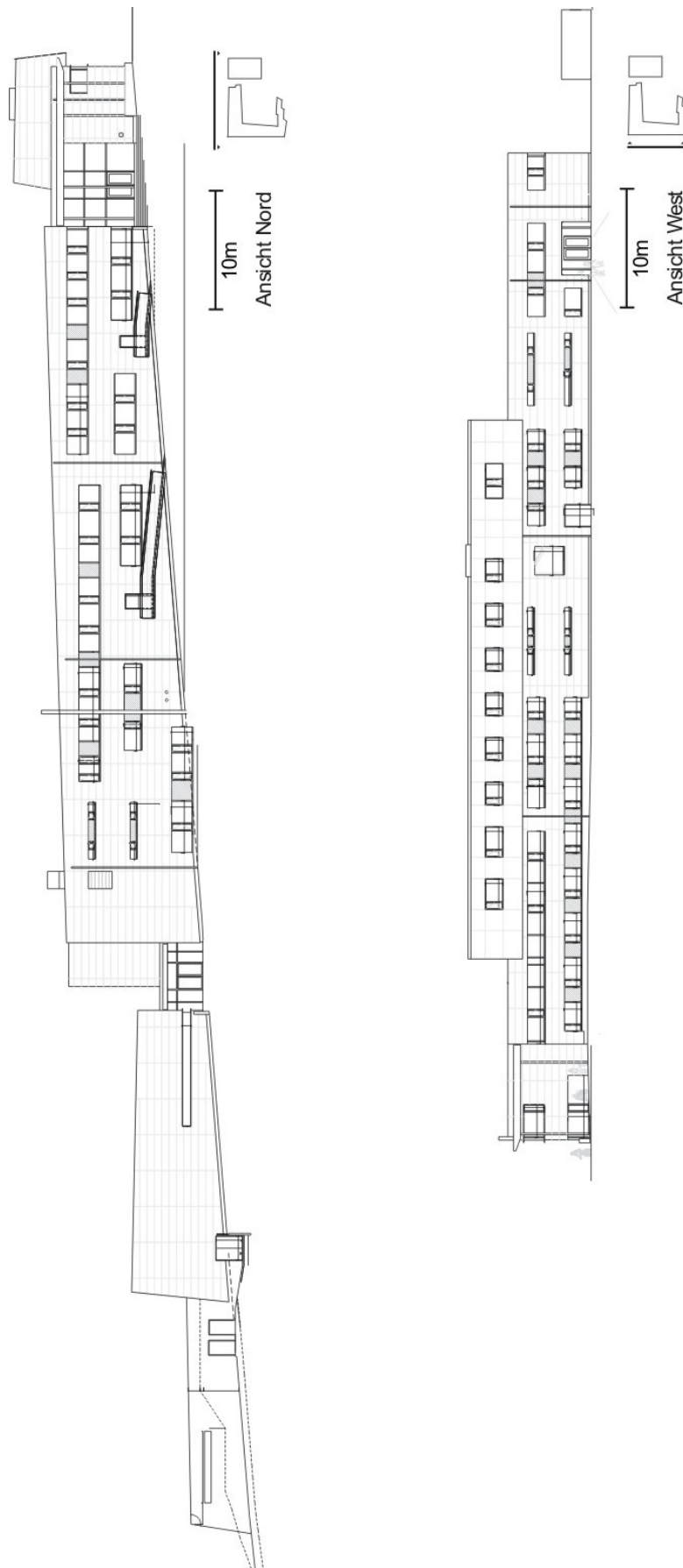
Anhang A

Grundriss Raum 0:3 mit den Positionen der Messsensoren



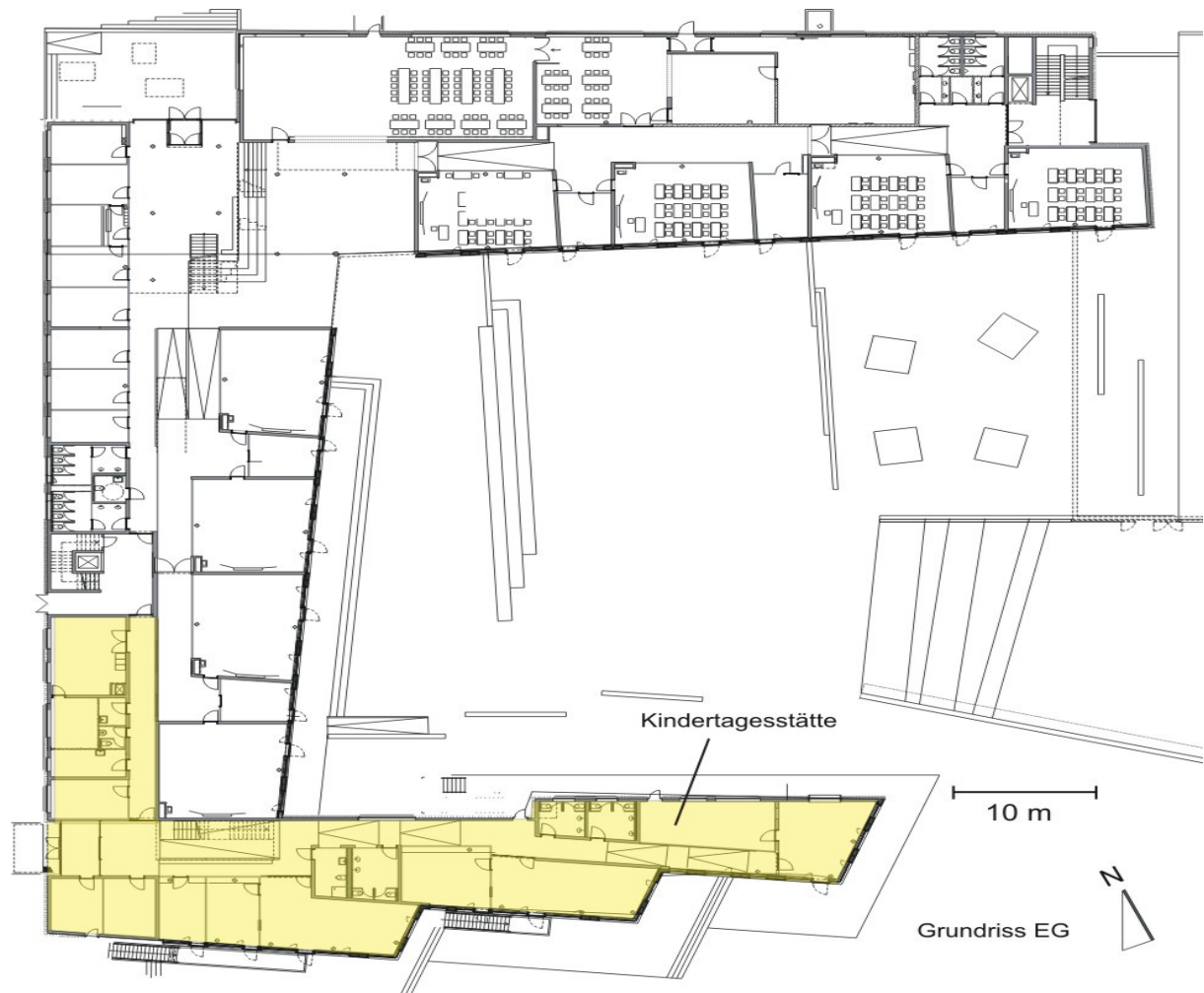


Anhang B: Ansichten Nord und West



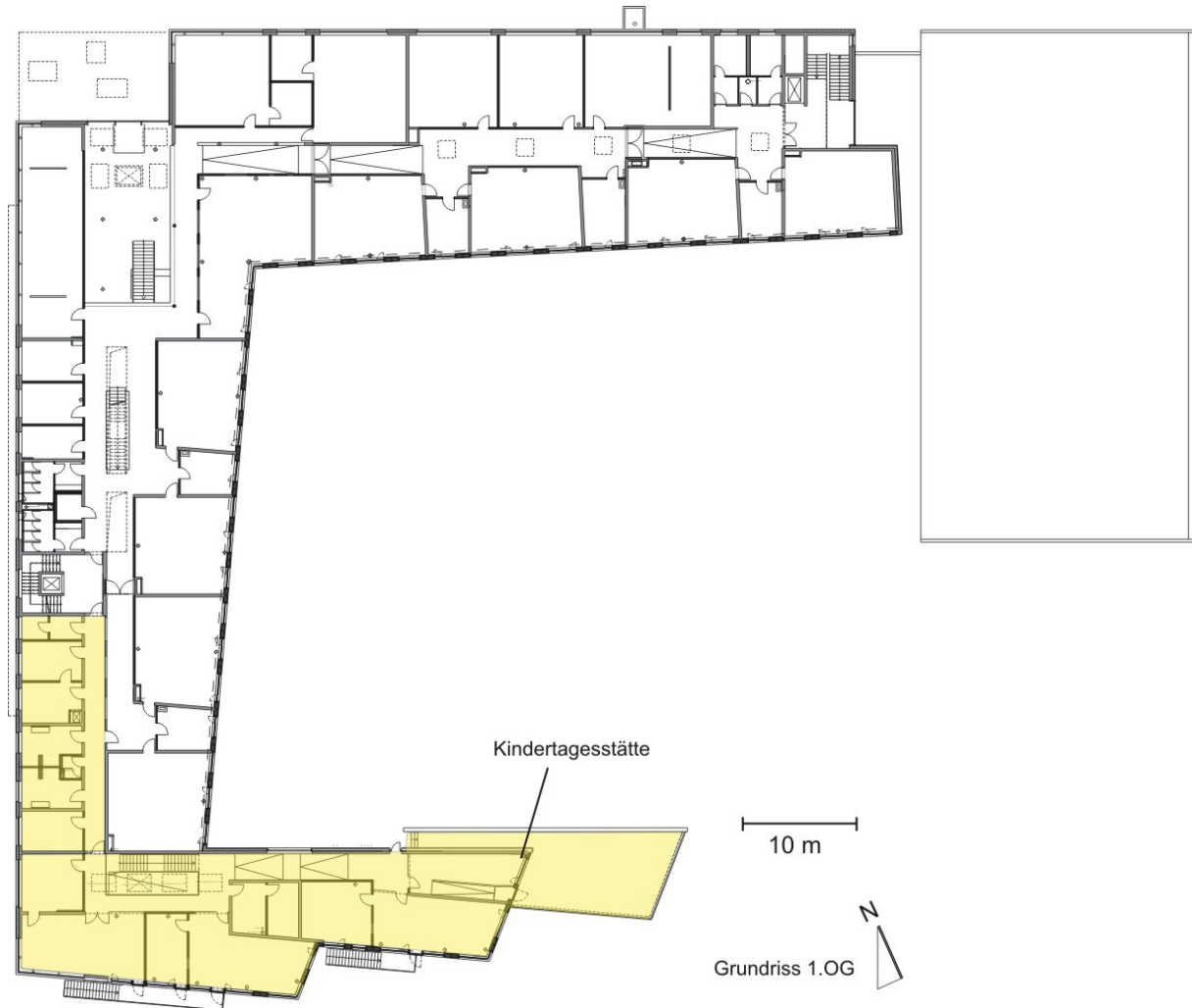


Grundriss EG



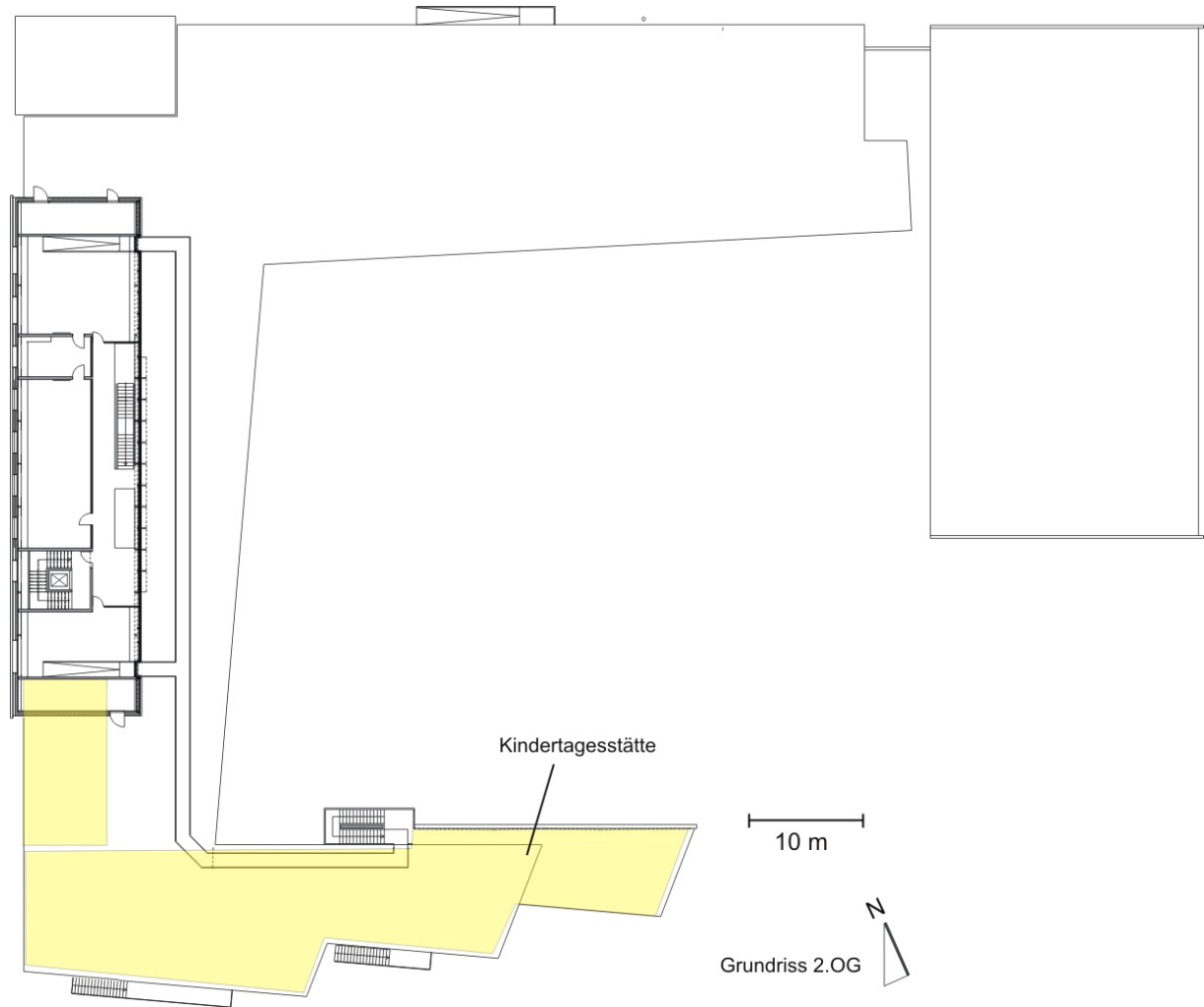


Grundriss 1. OG



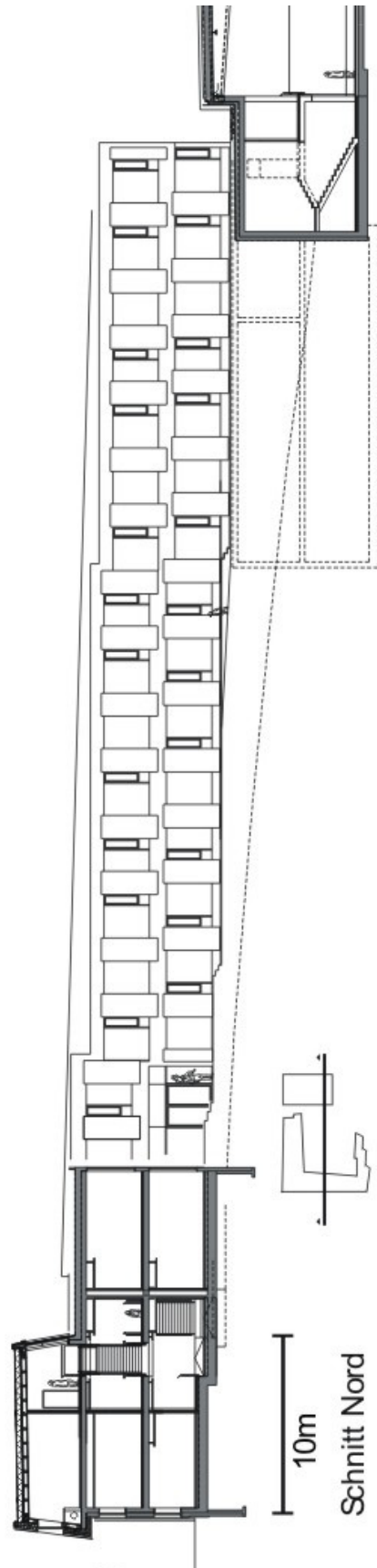
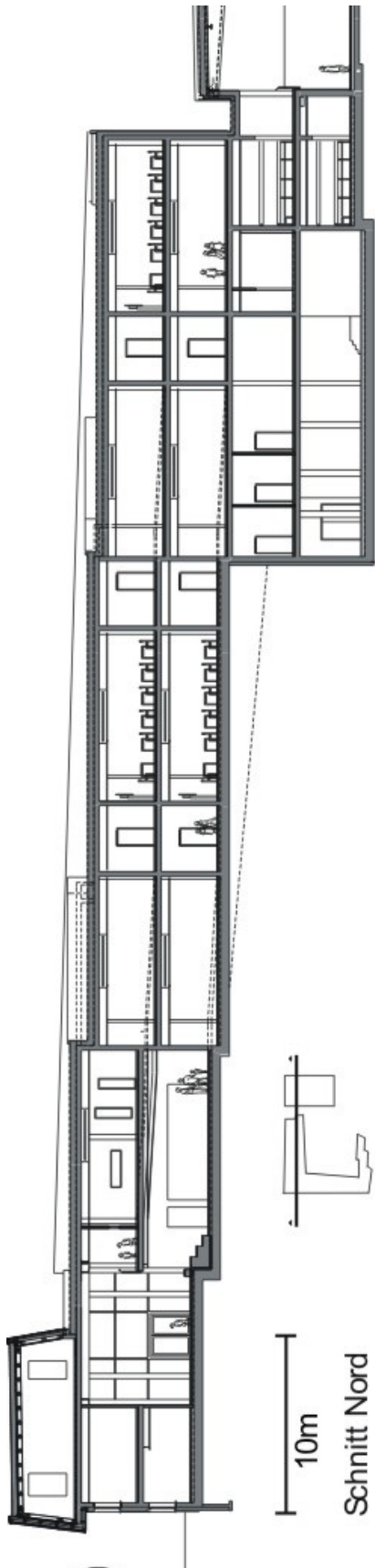


Grundriss 2. OG



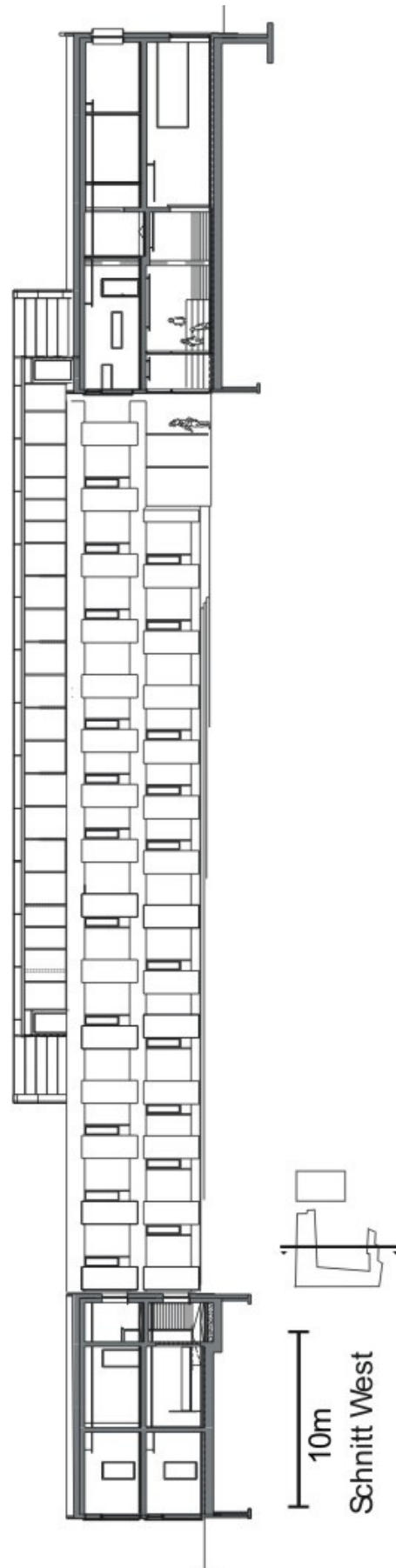
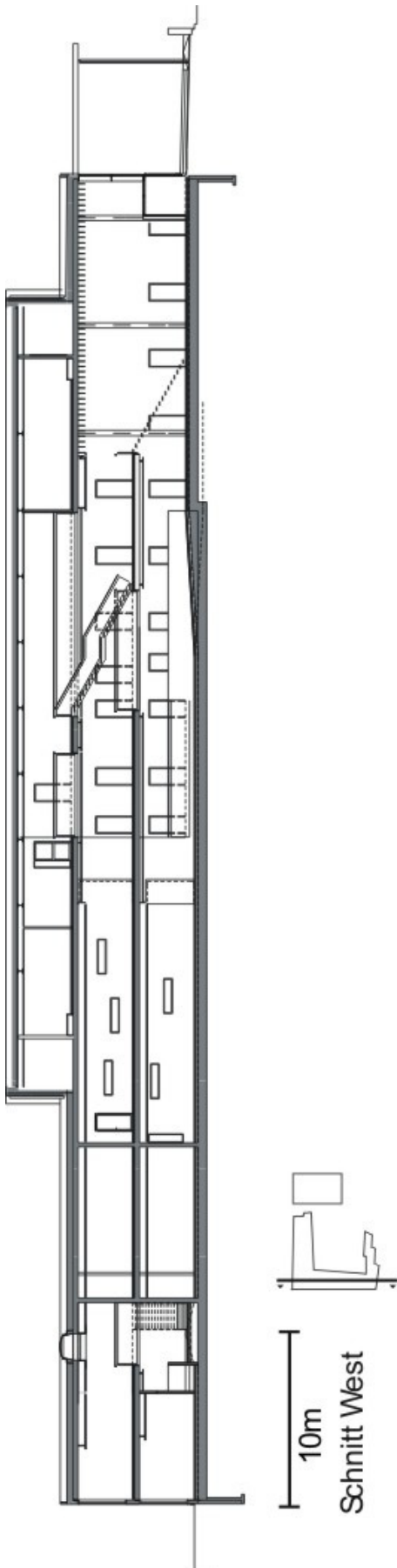


Schnitte Nord



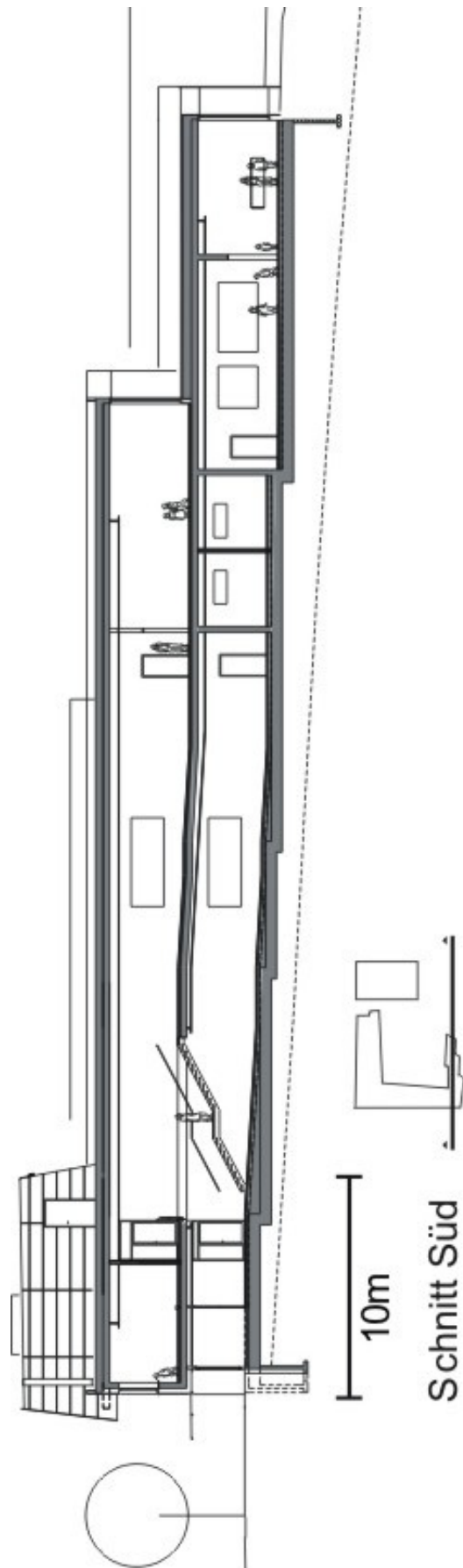


Schnitte West





Schnitt Süd





Anhang C: Ergebnisbericht der Bodenprobenmessung der Universität Cottbus



Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Lehrstuhl für Angewandte Physik
Prof. Dr. habil. H. Rogaß

Cottbus, den 10.11.2003

Messung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität an Bodenproben

Auftraggeber: Passivhaus Institut
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt

1. Probenbezeichnung

Es wurden 2 Chargen von Bodenproben zur Messung geliefert, die folgende Bezeichnung erhalten:

Probenname	Eigenschaften
Probe A/fein	Feinere sandige Probe, Korngröße < 1mm
Probe B/grob	Grobe Bodenprobe mit größeren Steinen bis ca. 5 cm Größe

*gewachsenes Boden
Anforderung*

2. Dichtebestimmung

Probenname	Volumen cm³	Masse g	Trockendichte g/cm³
Probe A/fein	50,63	55,27	1,09
Probe B/grob	4995,57	6090,5	1,22

3. Messung der Wärmeleitfähigkeit

3.1. Versuchsdurchführung und Probenpräparation

Die Messung der Probe A/fein erfolgte an Probenscheiben von 85 mm Durchmesser und ca 20 mm Dicke mit einer Einplattenapparatur nach dem stationären Wärmestrommessplattenverfahren. Hierbei ist die Wärmeleitfähigkeit der Proben bei waagerechter Plattenanordnung und einer Mittentemperatur von 23°C sowie einer Temperaturdifferenz von 10 K bestimmt worden. Vor der Trockenmessung wurde die

Hausanschrift: BTU-Cottbus, Karl-Marx-Str. 17, 03044 Cottbus
☎ (0355) 692315
Fax: (0355) 692103



Probe bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Vor der Messung der Wärmeleitfähigkeit/feucht wurde die Probe vereinbarungsgemäß zusätzlich befeuchtet und in dampfdiffusionsdichte Folie eingeschweißt. Dadurch wird ein Masseverlust während der Wärmeleitfähigkeitsmessung ausgeschlossen. Der stationäre Zustand bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit/feucht wurde nach ca 5 Tagen erreicht.

Die Messung der Probe B/grob erfolgte zunächst im Anlieferungszustand mit einer Einplattenapparatur (stationäres Wärmestrommessplattenverfahren), nachdem die Probe bis zur Massenkonstanz getrocknet wurde. Diese Apparatur wurde speziell für Schüttungen bei Probenabmessungen von 25 cm x 25 cm x 2,2 cm konzipiert. Die Messung wurde in senkrechter Probenlage bei einer Mittentemperatur von 23°C sowie einer Temperaturdifferenz von 10 K ausgeführt.

Da in dieser Apparatur keine Messungen von feuchten Proben möglich sind, wurden aus dieser Probe die größeren Steine aussortiert. Der Masse- und Volumenanteil dieser Steine wurde bestimmt. Von den verbliebenen feinen Anteilen wurden wieder scheibenförmige Proben (Ø 85 mm, Dicke 20 mm) jeweils feucht und trocken gemessen.

3.2. Messergebnisse

Probename	Probenzustand	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m·K	Probengröße
Probe A/fein	trocken	0,228	Ø 85 mm, Dicke 20 mm
	feucht $u_{\text{Masse}} = 29,1 \%$ $u_{\text{Volumen}} = 31,7 \%$	1,186	Ø 85 mm, Dicke 20 mm
Probe B/grob	trocken gemischt	0,240	250 mm x 250 mm x 22mm
	trocken feine Anteile	0,228	Ø 85 mm, Dicke 20 mm
	Feucht feine Anteile $u_{\text{Masse}} = 16,7 \%$ $u_{\text{Volumen}} = 20,1 \%$	1,679	Ø 85 mm, Dicke 20 mm

Massen- und Volumenanteile bei Probe B/grob:

	Probe B, gemischt	Probe B, große Steine	Probe B, feine Anteile
Volumenanteile	100 %	28 %	72 %
Massenanteile	100 %	29 %	71 %
Dichte g/cm ³	1,22	1,27	1,20



3.3. Messfehler

3.3.1 Trockenmessung

Messfehler : 5%.

3.3.1 Feuchtmessung

Es entsteht ein zusätzlicher Fehler durch folgende (unvermeidbare) Effekte während der Wärmeleitfähigkeitsmessung in der Plattenapparatur:

- Latentwärmestrom durch Dampfdiffusion von der warmen zur kalten Plattenseite (führt zu einem höheren Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit)
- Feuchteungleichverteilung über den Querschnitt der Probe (führt zu einem niedrigeren Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit)

Der aus diesen Effekten resultierende Fehler kann ohne genauere Kenntnis der feuchtetechnischen Kennwerte (Sorptionsisotherme, μ -Wert, Feuchteleitkoeffizient) lediglich geschätzt werden: 5%.

4. Messung der spezifischen Wärmekapazität c_p

4.1 Messbedingungen und Versuchsdurchführung

Messgerät : Kalorimeter Setaram Micro DSC II
Temperatur : von 2°C bis 25°C
Probenvolumen: ca. 0,5 cm³

Für die Probe **B**/grob wurden die beiden selektierten Anteile (feine Anteile 71 % – große Steine 29 %) getrennt im Trockenzustand vermessen. Aus diesen Messwerten sowie den prozentualen Masseanteilen wurden die spezifischen Wärmekapazitäten der gemischten Probe berechnet.



4.2 Messergebnisse

<i>Probenbezeichnung.</i>		<i>Temperatur</i>	<i>spezifische Wärmekapazität</i>
		<i>°C</i>	<i>J/g·K</i>
Probe A/fein		4,99	0,773
		10,04	0,791
		15,02	0,800
		20,00	0,808
		24,72	0,818
Probe B/grob	feine Anteile	4,99	0,773
		10,04	0,790
		15,02	0,800
		20,00	0,808
		24,72	0,818
	große Steine	4,99	0,730
		10,03	0,748
		15,02	0,758
		20,00	0,766
		24,72	0,774
	gemischt (berechnete Werte)	4,99	0,761
		10,03	0,778
		15,02	0,788
		20,00	0,796
		24,72	0,805

4.1 Messfehler

Die relative Messunsicherheit beträgt 6 %

Die Messungen des Lehrstuhls für Angewandte Physik der BTU Cottbus erfolgen im Rahmen der universitären Forschung. Sie dienen der Unterstützung bei Produktentwicklungen. Sie sind keine amtlichen Prüfungen im Sinne einer Zulassung und erfolgen nicht mit DIN-zugelassenen Geräten.



BTU Cottbus
Lehrstuhl für Angewandte Physik
Prof. Dr. habil. H. Rogaß

Cottbus, den 10.11.2003

Messung von Einzelwerten der Sorptionsisotherme an einer Bodenprobe

Auftraggeber: Passivhaus Institut
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt

1. Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung geht aus dem folgenden Bild hervor:



Die befeuchtete Bodenprobe steht im Edelstahltopf unterhalb einer Glasglocke. Diese besitzt einen geschliffenen unteren Rand, der auf eine Glasplatte aufgesetzt und mit Vakuumfett abgedichtet wurde. Die Messung der rel. Luftfeuchte über der Bodenprobe erfolgt mit einem Taupunktspiegel (Fa. Protimeter). Der Taupunktsensor wird in der Glasglocke mit diffusionsdichter Paste ("plastic-fermit") abgedichtet. Die Messwerte wurden im Minutentakt aufgezeichnet. Die Lufttemperatur im Labor ist mit einer Klimaanlage auf 23°C geregelt.

Hausanschrift: BTU-Cottbus, Karl-Marx-Str. 17, 03044 Cottbus
☎ (0355) 692315
Fax: (0355) 692103



2. Versuchsausführung

- Trocknung der Probe bei 105°C bis zur Massenkonzanz
- Zugabe einer definierten Wassermenge und Bestimmung der Materialfeuchte
- Mischen der Probe für eine schnellere Feuchtigkeitsverteilung
- Messung der relativen Luftfeuchte über der Probe bis zur Konstanz. Diese Messungen dauerten je ca. 1 Woche.
- Erneute Bestimmung der Materialfeuchte nach der Messung

3. Probe

Es wurde die "Probe B/grob" (siehe Protokoll vom 10.11.2003) mit einer Trockendichte von $1,22 \text{ g/cm}^3$ im für die Messung eingesetzt. Die Trockenmasse betrug 1771 g.

3. Messergebnisse

	Materialfeuchte		Rel.Luftfeuchte
	uMasse in %	uVolumen in % (bei $\rho_{\text{trock}} 1,22 = \text{g/cm}^3$)	%
1. Messung	17,8	21,72	100
2. Messung	8,49	10,36	100
3. Messung	4,99	6,09	100
4. Messung	0,91	1,11	79

Die Messungen des Lehrstuhls für Angewandte Physik der BTU Cottbus erfolgen im Rahmen der universitären Forschung. Sie dienen der Unterstützung bei Produktentwicklungen. Sie sind keine amtlichen Prüfungen im Sinne einer Zulassung und erfolgen nicht mit DIN-zugelassenen Geräten.