

Hansestadt Wismar

**Ermittlung und Validierung von Planungsparametern zur Optimierung von Wärmebedarf, thermischer Behaglichkeit und Regelung für einen energiesparenden und bausubstanzerhaltenden Betrieb temporär genutzter Gebäude mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichenden Feldmessungen am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar**

Hauptteil

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 20841 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Rainer Heimsch  
Janka Fee Hammer, M.A.

Juli 2007

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>20841</b>	Referat	<b>25</b>	Fördersumme	<b>56.500,00 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	--------------------

<b>Antragstitel</b>	<b>Ermittlung und Validierung von Planungsparametern zur Optimierung von Wärmebedarf, thermischer Behaglichkeit und Regelung für einen energie-sparenden und bausubstanzerhaltenden Betrieb temporär genutzter Gebäude mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichenden Feldmessungen am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar</b>
---------------------	--

<b>Stichworte</b>	Ökobau, Baubestandspflege, Bauphysik, Denkmal, Feuchtschutz
-------------------	---

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>2 Jahre u. 9 Monate</b>	<b>25.06.2003</b>	<b>31.03.2006</b>	

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Hansestadt Wismar Am Markt 1 23966 Wismar
------------------------------	---

Tel.: 0 44 02 / 97 20-0
Fax: 0 44 02 / 97 20-22

Projektleitung: Dipl.-Ing. R. Heimsch
--

Bearbeiterin: J. Hammer, M.A.
----------------------------------

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es, am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar Planungsparameter für temporär genutzte Gebäude schwerer Bauart mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichender Feldmessungen zu ermitteln und zu validieren.

Das Forschungsvorhaben sollte dazu beitragen, vorhandene Grundlagen für die Planung, Dimensionierung und Ausschreibung für die ökologische und ökonomische Temperierung von temporär genutzten Gebäuden zu vertiefen und zu allgemein gültigen Richtlinien weiter zu entwickeln. Die Erkenntnisse werden in einen Leitfaden für den Umgang mit historischer Bausubstanz in Planungsprozess und Nutzung einfließen, den der von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt eingesetzte Beirat „Erhalt und Nutzung temporär genutzter Gebäude“ herausgeben soll.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation wurden Wärmeleistung, Energieverbrauch und Raumklima bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten der beiden Baudenkmäler ermittelt. Die Berechnungen für St. Georgen und St. Marien wurden von Prof.-Ing. Zecchin und Dr. De Carli, Universität Padua, geleitet. Prof. Dr.-Ing. Sommer, Fachhochschule Köln, betreute drei Diplomarbeiten über den Wärmebedarf von temporär genutzten Gebäuden schwerer Bauart sowie die dynamische Gebäudesimulation einer Modellkirche.

Parallel zu den theoretischen Berechnungen wurden von Dipl.-Ing. Reinecke, Fa. Theod. Mahr Söhne GmbH, Aachen, sowie dem Ing.-Büro Rainer Heimsch, Rastede, Feldversuche zur Wärmeversorgung und -verteilung unter Berücksichtigung von Temperatur, Luftfeuchte und Temperaturschichtung in beiden Kirchen durchgeführt. Prof. Dr.-Ing. Olesen, Fa. Wirsbo-Velta Norderstedt/Universität Lyngby, führte Versuche und Messungen mit sog. Windabweisern an den Fenstern von St. Marien durch, um deren Wirkung auf Raumklima und Behaglichkeitsempfinden zu ermitteln. Die Ergebnisse flossen in eine von Prof. Dr.-Ing. Olesen betreute Diplomarbeit über die Beheizung von Kirchen ein. Zur quantitativen und qualitativen Verifizierung der Simulationen und der Messungen wurden von Prof. Dr.-Ing. Mainka und Dipl.-Ing. Winkler von der Universität Rostock, Außenstelle Wismar, Thermografien in der St. Marienkirche im stationären und instationären Betrieb durchgeführt und dokumentiert.

Bei den Versuchsreihen waren das Architekturbüro Angelis & Partner, Oldenburg/Wismar, sowie Herr Dipl.-Architekt Ferdinand, Kirchenbauamt der Hansestadt Wismar, beratend tätig. Die wissenschaftliche Begleitung unter denkmalpflegerischen Gesichtspunkten erfolgte durch Prof. Dr. Kiesow, Deutsche Stiftung Denkmalschutz.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Der Wärmebedarf und Energieeinsatz in diesem Gebäudetypus hängt sehr stark von den gewählten Grund- und Nutzungstemperaturen ab. Der Energieeinsatz ist bei einer Grundtemperatur von 10 °C und 16 °C bei der Nutzung am Wochenende um ca. 25% niedriger als bei einer durchgehenden Temperierung bei ca. 14 °C. Die operative (empfundene) Temperatur liegt jedoch wesentlich niedriger, was zu einem deutlichen Absinken der thermischen Behaglichkeit führt.

Die Dämmung von Kirchendecken hat bei den durchgeführten Simulationen zu Energieeinsparungen von 7-10% geführt. Die Oberflächentemperaturen steigen dabei lokal um ca. 10% an, was zu Schäden an empfindlichen Malereien etc. führen kann.

Der Einsatz von „Windabweisern“ trägt deutlich zur Reduzierung von Zugerscheinungen, Ansteigen der operativen Temperatur und damit zur Behaglichkeitssteigerung bei. Dadurch kann die Raumlufttemperatur abgesenkt und als Folge der Energieeinsatz reduziert werden.

Für die Anordnung von Raumfühlern müssen neue Strategien entwickelt werden, da durch die konventionelle Anordnung in der Regel zu hohe Raumlufttemperaturen in der Aufheizphase vorliegen.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das wichtigste Mittel zur Verbreitung der Ergebnisse dieses Projekts und der anderen im Rahmen des Förderschwerpunktes geförderten Projekte ist der geplante Leitfadentext. Das Projekt war Teil des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unterstützten Förderschwerpunktes „Erhaltung temporär genutzter Gebäude“, der zum Ziel hat, einen Leitfadentext für den Umgang mit historischer Bausubstanz in Planungsprozess und Nutzung herauszugeben.

Dr. Michele De Carli hat Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf einem internationalen Workshop zum Thema „Indoor environment quality in museums“ am 07.05.2005 in Rom vorgestellt. Der Titel seines Vortrags lautete „Neuere Entwicklungen bei der Beheizung historischer Kirchen: eine Fallstudie“.

Projektleiter Rainer Heimsch hat mehrfach die Forschungsergebnisse des Projekts vorgetragen. U. a. auf der XXXIII. Fortbildungsveranstaltung der Evangelischen Akademie Loccum am 20. und 21.03.2006 berichtete er über die „Energiesparende Nutzung von Kirchenheizungen unter Berücksichtigung von bauphysikalischen Rahmenbedingungen“.

Die Ergebnisse sollen in das Kirchliche Bauhandbuch über energiesparendes, umweltschonendes Bauen in der Evangelischen Kirche Deutschlands aufgenommen werden.

### **Fazit**

Durch die durchgeführten theoretischen und experimentellen Arbeiten konnten wesentliche Grundlagen für die Temperierung /Beheizung temporär genutzter Gebäude geschaffen werden. Dies gilt sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von Heizungsanlagen in solchen Gebäuden.

Durch die Dämmung von Decken kann zwar der Energieeinsatz reduziert werden, jedoch ist im Einzelfall zu prüfen, ob durch den Anstieg der Oberflächentemperaturen raumseitig ggf. Schäden an Deckenfresken provoziert werden.

Der Einsatz von Windabweisern an einfach verglasten Fenstern führt zu einem Anstieg der operativen Temperatur und damit zu einer Behaglichkeitssteigerung mit der Möglichkeit zur Senkung der Lufttemperatur. Daraus resultieren eine bauphysikalische Entlastung der Gebäude und eine Reduzierung des Energieeinsatzes, was zur Entlastung der Umwelt und zur Senkung der Energiekosten führt.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	4
Verzeichnis der Bilder.....	5
Verzeichnis der Grafiken .....	6
Verzeichnis der Tabellen .....	8
Zusammenfassung .....	9
Einleitung.....	10
Hauptteil .....	12
Arbeitsschritte .....	12
Ergebnisdiskussion .....	16
Abweichung der Ergebnisse .....	50
Probleme .....	50
Ökologische Bewertung .....	50
Technologische Bewertung .....	51
Ökonomische Bewertung .....	51
Umweltentlastung .....	51
Verbreitung der Ergebnisse .....	51
Fazit.....	52
Literaturverzeichnis .....	54
Anhang .....	56

## Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Blick auf die St.-Georgen-Kirche und den St.-Marien-Kirchturm in Wismar	10
Bild 2:	St. Georgen und St. Marien	11
Bild 3:	Aufbau Messeinrichtung Kaltluftabfall an Kirchenfenstern	14
Bild 4:	Aufbau Messeinrichtung Olesen et al. (Ausschnitt)	14
Bild 5:	Versuchsaufbau Temperatur- und Heizlastmessungen Fa. Mahr	15
Bild 6:	Ansicht Messeinrichtungen Fa. Mahr, Olesen, Heimsch	15
Bild 7:	Thermografie in St. Marien (Wand Nord oben, rechte Seite) zu Beginn (links) und 12 Stunden nach Beginn der Aufheizung (rechts)	16
Bild 8:	Windabweiser am Fenster der St.-Marien-Kirche in Wismar	38
Bild 9:	Rauchtest des Kaltluftabfalls entlang des Fensters in der St.-Marien-Kirche	40
Bild 10:	Wand Nord mittig	48
Bild 11:	Wand Ost – Türbereich	48
Bild 12:	Wand Süd oben	48
Bild 13:	Wand Süd, Anschluss zum Gewölbe	49

## Verzeichnis der Grafiken

Grafik 1:	Messpunkte Olesen, Reinecke, Heimsch in St. Marien	13
Grafik 2:	Modell für St. Marien	17
Grafik 3:	Anordnung der Heizungssysteme in St. Marien	17
Grafik 4:	Temperatur (°C) und Luftgeschwindigkeit (m/s) auf Ebene 3 bei kleinster Geschwindigkeit	18
Grafik 5:	Temperatur (°C) und Luftgeschwindigkeit (m/s) auf Ebene 1 bei größter Geschwindigkeit	18
Grafik 6:	Verlauf von Raumlufttemperatur und Luftgeschwindigkeit in der niedrigsten Ventilatorstufe	18
Grafik 7:	Temperaturverhältnis ("temperature ratio") in der Höhe	19
Grafik 8:	Modell mit TRNSYS für eine dicke Wand( 2.15 m). Vergleich mit einem FDM Modell in Punkten N1 (b), N2 (c), N3 (d)	20
Grafik 9:	Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen	21
Grafik 10:	Fehler in den Simulationsrechnungen	21
Grafik 11:	St. Georgen als Gitternetzmodell	22
Grafik 12:	Anordnung der Heizungssysteme in St. Georgen	22
Grafik 13:	Zugluftverteilung bei der ursprüngliche Planung	23
Grafik 14:	Verbesserte Strömungsverhältnisse nach durchgeführter Simulation	23
Grafik 15:	Mittelwerte der Deckentemperatur: A) ohne Dämmung; B) mit Dämmung	25
Grafik 16:	Vergleich der Energieverbräuche ohne und mit Dämmung	26
Grafik 17:	Modellkirche	27
Grafik 18:	Kontrolltemperaturen	28
Grafik 19:	Ergebnisse für ein 100% konvektives Heizsystem, Modelltyp moderne Kirche	29
Grafik 20:	Ergebnisse für ein 100% konvektives Heizsystem, Modelltyp historische Kirche	30
Grafik 21:	Vergleich der Heizlast, berechnet nach DIN 4701, DIN EN 12831 und TAS	30
Grafik 22:	Messpunkte in der St.-Marien-Kirche	32

Grafik 23:	Kennlinien der Luft-, empfundenen und Oberflächentemperaturen vom 23.10. bis 25.10.2003 sowie deren Relation zu Außentemperatur, Sollwert und Betriebsstufe der Wärmestation	33
Grafik 24:	Kennlinien der Luft-, empfundenen und Oberflächentemperaturen sowie Sollwert vom 9.10. bis 6.11.2003	34
Grafik 25:	Kennlinien der empfundenen Temperatur und Lufttemperaturen im stationären Betrieb	34
Grafik 26:	Kennlinien der Luft- und empfundenen Temperaturen im instationären Betrieb	35
Grafik 27:	Relative Feuchtigkeit in der Raummitte (28.11.2003 – 2.2.2004)	35
Grafik 28:	Kennlinien von empfundener, Luft- und Oberflächentemperaturen bei Änderung des Sollwerts	36
Grafik 29:	Position der 15 Messpunkte nahe der Fensterunterkante	38
Grafik 30:	Vergleich der Zuglufttrisikowerte an den 15 Messpunkten nahe der Fensterunterkante.	40
Grafik 31:	Beispiel für die Diagramme zu den äußeren Verhältnissen	43
Grafik 32:	Beispiel der erstellten Diagramme für den Nordraum	44
Grafik 33:	Gasverbrauch Marientürme Wismar (Messwerte), Gesamtsumme 7.000m <sup>3</sup> /a	44
Grafik 34:	Außentemperatur und Außenfeuchte KW 52 2003	45
Grafik 35:	Raumtemperaturverlauf im Nordraum KW 52 2003	46
Grafik 36:	Temperaturverlauf 24.-27.10.2003 [9]	49
Grafik 37:	Aufheizvorgang am 09./10.12.2004	50

## **Verzeichnis der Tabellen**

Tabelle 1:	Aufstellung von Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Standardabweichungen an den 15 Messpunkten nahe der Fensterunterkante sowie Zugluftrisikowerte und deren Veränderungen.	39
Tabelle 2:	Maximale und mittlere Luftgeschwindigkeit entlang des Fensters.	40
Tabelle 3:	Datenauswertung bzgl. Rezirkulation an Mahrcalor-Stationen	47

## Zusammenfassung

Anhand umfangreicher raumklimatischer Messungen und dynamischer Gebäudesimulationen der Wismarer Kirchen St. Marien und St. Georgen sollten die bislang vorliegenden Planungsgrundsätze für temporär genutzte Gebäude, insbesondere Kirchen, bei unterschiedlichen Nutzungen und Betriebsparametern optimiert und soweit möglich verallgemeinert werden.

Operative Raumluf- und Oberflächentemperaturen, relative Raumlufftfeuchten, Außenlufttemperatur und -feuchte sowie der Gasdurchsatz für die Beheizung der drei Kapellen wurden in einem Messintervall von 15 Minuten in mehreren Messzyklen erfasst. Durch ergänzend durchgeführte thermografische Messungen konnten die Ergebnisse überprüft werden. Parallel zu diesen Arbeiten wurde untersucht, ob es durch den Einbau von „Windabweisern“ an einfach verglasten Fenstern möglich ist, auftretende Zugerscheinungen zu reduzieren.

- Ca. 25% weniger Energieaufwand für die Beheizung von temporär genutzten Gebäuden mit Grundtemperierung 10 °C / Nutzungstemperatur 16 °C statt durchgehender Temperierung auf 14 °C. Heizlast steigt je doch an.
- Reduzierung des Energieaufwandes von ca. 7-10% durch Wärmedämmung von Decken (evtl. Schäden an Deckenfresken etc. möglich)
- „Windabweiser“ an Fenstern erhöhen Behaglichkeit, Raumluffttemperatur kann gesenkt werden.
- Konventionelle Anordnung von Messfühlern in Kirchen und ähnlichen Gebäuden sollte überdacht werden.
- Verteilung von Wärmequellen in temporär genutzten Gebäuden muss überdacht werden, wichtig ist Einfluss des Verhältnisses Außenwandflächen / Außenfenstern
- Die dynamischen Gebäudesimulationen an so genannten Standardkirchen mit dem Ziel der Auswirkungen des gewählten Heizsystems auf Energieeinsatz, Behaglichkeit und bauphysikalischen Auswirkungen zeigen erste interessante Ergebnisse und sollten dringend mit fortgeführt werden.
- Die dynamische Gebäudesimulation ist ein wirksames, sinnvolles und insbesondere bei wertvollen historischen Gebäuden künftig mit heranzuziehendes Werkzeug um ein Optimum für die o. g. Untersuchungsziele zu erreichen.

Der Dank für die Unterstützung der umfangreichen Arbeiten gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Fördervorhaben Az: 20841), der Hansestadt Wismar, Bürgermeisterin Frau Dr. R. Wilcken, der Deutschen Stiftung Denkmalschutz, Prof. Dr. G. Kiesow, dem Architekturbüro Angelis und Partner, Wismar/Oldenburger, sowie unseren Kooperationspartnern Prof. Dr.-Ing. R. Zecchin und Dr. M. De Carli, Universität Padua, Prof. Dr.-Ing. K. Sommer, Fachhochschule Köln, Prof. Dr.-Ing. B. W. Olesen, Universität Lyngby/Dänemark (zuvor Fa. Velta/Norderstedt) und Dipl.-Ing. J. Reinecke, Fa. Theod. Mahr Söhne GmbH/Aachen.

## Einleitung



**Bild 1:** Blick auf die St.-Georgen-Kirche und den St.-Marien-Kirchturm in Wismar

### Untersuchungsschwerpunkt

Für die Planung, den Bau und den Betrieb von haustechnischen Anlagen zur substanzhaltenden, nutzungsgerechten und ressourcenschonenden Versorgung denkmalwerter Gebäude schwerer Bauart mit Wärme, Feuchte und erforderlichem Mindestluftwechsel liegen bislang für Fachplaner im Wesentlichen nur wenige empirisch ermittelte bzw. auf individueller Erfahrung beruhende Planungsgrundsätze vor [Pfe75]. Die Anwendung konventioneller Planungsparameter hat vielfach zu Schäden bei Baudenkmalen geführt [Hei02, Hei03].

Am Beispiel der beiden Kirchen St. Marien und St. Georgen in Wismar wurden mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation die erforderliche Wärmeleistung, der Energieverbrauch und das Raumklima bei unterschiedlichen Nutzungstemperaturen ermittelt und anhand von Messungen und Thermografien überprüft und bewertet. Des Weiteren wurde der Einfluss von so genannten Windabweisern an den Fenstern zur Reduzierung des Kaltluftabfalls auf die Behaglichkeit im Kirchenraum untersucht.

## Kurzcharakteristik der untersuchten Gebäude



**Bild 2: St. Georgen und St. Marien**

Die beiden untersuchten Kirchen gehören zur norddeutschen Backsteingotik:

Die Ursprünge von St. Marien reichen bis ins 13. Jahrhundert zurück. Der Kirchenbau, dessen Überreste bis heute erhalten sind, entstand im 14. bis 15. Jahrhundert als siebenschiffige, querschifflose Pfarrkirche. 1945 wurde das Langschiff von St. Marien durch einen Luftangriff stark beschädigt und deshalb 1960 gesprengt. Seitdem steht nur noch der 80 m hohe Turm (Turmkapelle) mit den beiden Seitenschiffansätzen (Nord- und Südkapelle). Die drei Kapellen sind durch eine umlaufende Galerie in ca. 7 m Höhe verbunden. 1994 bis 2002 wurde der St.-Marien-Kirchturm restauriert und dient seitdem als Ausstellungsort. In der Turmkapelle finden auch Veranstaltungen statt.

Im Rahmen der Restaurierungsarbeiten wurde in St. Marien eine Heizungsanlage zur Temperierung der drei Kapellen mit einer Kombination von Fußbodenheizung mit Warmwasser-Warmluftheizung eingebaut. Für die Regelung der Heizungsanlage wurde eine digitale Aufheizautomatik mit integrierter Feuchtevorrangschaltung eingebaut. Über feuchtegesteuerte Abluftventilatoren mit gekoppelten Zuluftjalousien können die einzelnen Kapellen Nord-, Süd- und Turmkapelle separat be- und entlüftet werden.

Der Ursprung St. Georgens liegt ebenfalls im 13. Jahrhundert. Nach mehreren Bauperioden wurde die mächtige gotische Kreuzkirche mit hohen flankierenden Seitenschiffen im Jahr 1594 fertiggestellt. St. Georgen wurde ebenfalls 1945 von Bomben getroffen und stark beschädigt. Nach dem Einsturz des Nordgiebels nach einem Sturm wurde 1990 mit Hilfe von Sponsoren (insbesondere Deutsche Stiftung Denkmalschutz) mit dem Wiederaufbau begonnen, der bis heute noch nicht abgeschlossen ist. St. Georgen

ist mit ca. 65.000 m<sup>3</sup> Volumen die größte Kirche Wismars und wird heute bereits als Ausstellungs- und Veranstaltungsort genutzt. Eine Heizungsanlage basierend auf dem Konzept für St. Marien – gestützt auf die Ergebnisse des laufenden Forschungsvorhabens – ist geplant und entsprechend dem Baufortschritt teilweise realisiert.

## **Hauptteil**

### **Zielstellung der Untersuchungen**

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, basierend auf den Untersuchungen in St. Marien mit umfangreich durchgeführten Messungen und dynamischen Simulationen von St. Marien und St. Georgen die bislang vorliegenden Planungsgrundsätze für Kirchenheizungen bei unterschiedlichsten Nutzungen und Betriebsparametern zu optimieren und soweit möglich zu verallgemeinern.

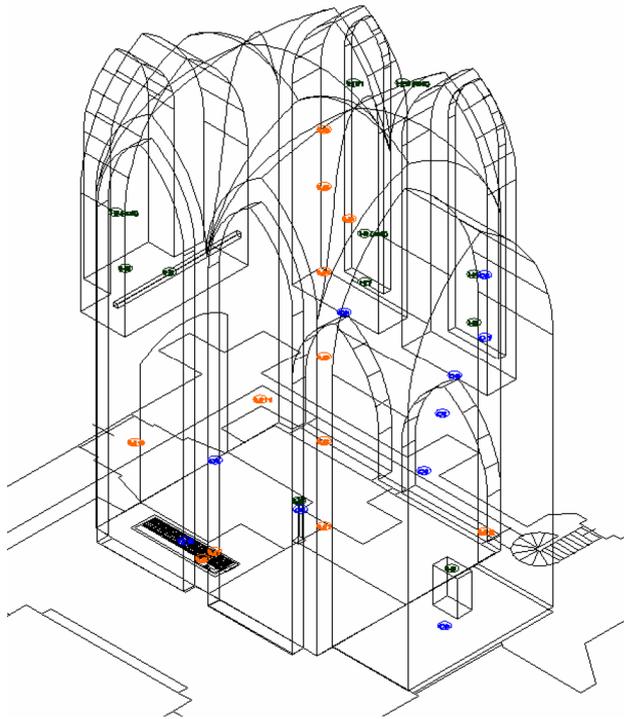
### **Arbeitsschritte**

#### **Untersuchungsmethodik und Aufgabenverteilung**

Zur Erforschung der o. g. Fragestellungen wurden messtechnische Untersuchungen mit raumklimatischen Simulationsrechnungen kombiniert.

Die dynamische Simulation von St. Georgen und St. Marien wurde von Prof. Dr.-Ing. Roberto Zecchin und Dr. Michele De Carli von der Universität Padua gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. Klaus Sommer und studentischen Mitarbeitern von der Fachhochschule in Köln im Rahmen von Diplomarbeiten vorgenommen.

Im Untersuchungszeitraum wurden zeitgleich von Prof. Dr.-Ing. Bjarne W. Olesen von der Universität Lyngby/Dänemark (zuvor Fa. Velta/Norderstedt), Dipl.-Ing. Jürgen Reinecke von der Fa. Mahr/Aachen und Dipl.-Ing. Rainer Heimsch vom Ing.-Büro R. Heimsch/Rastede drei Messzyklen durchgeführt und zwar vom 09.10.2003 bis 07.11.2003, vom 19.11.2003 bis zum 03.12.2003 und vom 26.02.2004 bis 22.03.2004. Erfasst wurden dabei operative Raumluft- und Oberflächentemperaturen, relative Raumluftfeuchte sowie Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte. Der Gasdurchsatz für die Beheizung der drei Kapellen wurde ebenfalls aufgezeichnet. Die Messintervalle lagen bei 15 Minuten. Ergänzend wurden Raumlufttemperaturen und relative Raumluftfeuchten in der Turmkapelle und Südkapelle aufgezeichnet, um Rückschlüsse über die jeweiligen Energieanteile der Einzelkapellen treffen zu können.



**Grafik 1: Messpunkte Olesen, Reinecke, Heimsch in St. Marien**

Um den Einfluss von so genannten Windabweisern [Ole02] zur Reduzierung des Kaltluftabfalls an in der Regel einfach verglasten Kirchenfenstern bewerten zu können, wurden umfangreiche Messungen an den beiden ca. 12 m hohen, baugleichen Fenstern an der Nordseite der Kapelle durchgeführt. An einem Fenster wurden vorausberechnete Windabweiser eingebaut, das zweite Fenster wurde unverändert belassen.

Diese Arbeiten wurden von Prof. Dr.-Ing. Bjarne W. Olesen, früherer Fa. Velta/Norderstedt, jetzt Leiter des International Centre for Indoor Environment and Energy an der Universität Lyngby/Dänemark gemeinsam mit Diplomanden durchgeführt. Er hat außerdem das Raumklima in St. Marien unter Berücksichtigung der Wärmeerzeugung und -verteilung sowie Strömungsmessungen unter besonderer Berücksichtigung der „empfundene“ Temperatur im Raum gemessen.



**Bild 3: Aufbau Messeinrichtung Kaltluftabfall an Kirchenfenstern**



**Bild 4: Aufbau Messeinrichtung Olesen et al. (Ausschnitt)**

Dipl.-Ing. Jürgen Reinecke von der Fa. Mahr/Aachen, war verantwortlich für den Versuchsaufbau und die Erfassung der Messdaten der Wärmezeugung und -verteilung in den drei Turmkapellen von St. Marien.



**Bild 5: Versuchsaufbau Temperatur- und Heizlastmessungen Fa. Mahr**

Die thermographischen Aufnahmen in St. Marien wurden von Dipl.-Ing. Heiko Winkler und Prof. Dr.-Ing. Georg-Wilhelm Mainka, Universität Rostock, Fachbereich Bauingenieurwesen, Außenstelle Wismar durchgeführt und ausgewertet.



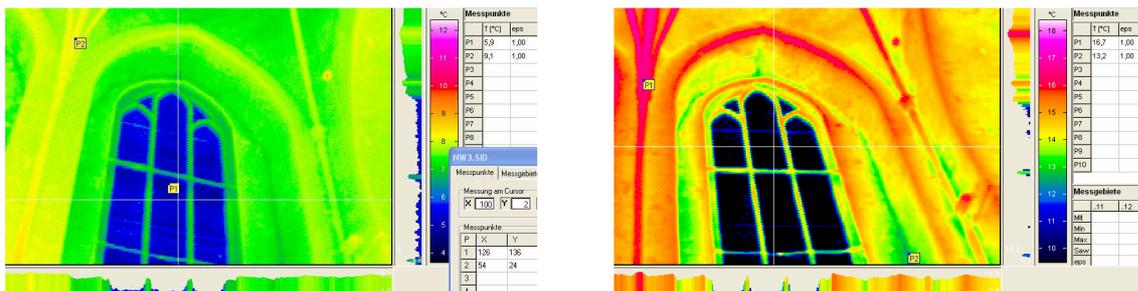
**Bild 6: Ansicht Messeinrichtungen Fa. Mahr, Olesen, Heimsch**

Die Projektsteuerung und -koordination, einschließlich Erstellung des Kurzberichtes und die Zusammenstellung der Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte lag beim Ingenieurbüro Rainer Heimsch VDI/AGÖF (IBH) aus Rastede. Das IBH hat außerdem selbst Klimamessungen (relative Raumlufffeuchte, Raumlufftemperatur, Oberflächentemperaturen) in der Nord-, Turm- und Südkapelle von St. Marien durchgeführt. Schwerpunkt dieser Messungen war u. a. die Erfassung der Temperaturverteilung, insbesondere auch der Temperaturschichtung im Raum zur Beurteilung der Regelgenauigkeit.

Um die ersten Ergebnisse der Simulationsberechnungen von Prof. Dr.-Ing. Roberto Zecchin und Dr. Michele De Carli verifizieren zu können, wurden im Dezember 2004

vom IBH weitere Messungen in St. Marien durchgeführt. Dabei wurden ergänzend umfangreiche Rauchversuche in allen drei Kapellen durchgeführt, um die Ergebnisse der Simulationsberechnungen über den Einfluss des Kaltluftabfalls über die Emporen bei den Fenstern insbesondere hinsichtlich der ausgeworfenen Raumluftströmungen und daraus resultierenden Temperaturfelder bestätigen zu können.

Mittels Infrarot-Thermografien sollten dabei die berechneten Oberflächentemperaturen mit den vorliegenden Temperaturen verglichen werden, um dadurch zusätzliche Erkenntnisse über den realen Heizungsbetrieb in temporär genutzten Gebäuden zu erhalten.



**Bild 7:** Thermografie in St. Marien (Wand Nord oben, rechte Seite) zu Beginn (links) und 12 Stunden nach Beginn der Aufheizung (rechts)

## Ergebnisdiskussion

### Dynamische Simulation von St. Georgen und St. Marien

von Prof. Dr.-Ing. R. Zecchin, Dr. M. De Carli, Universität Padua

In diesem Projekt hat die Universität Padua die folgenden Themen untersucht und ausgewertet [Car05]:

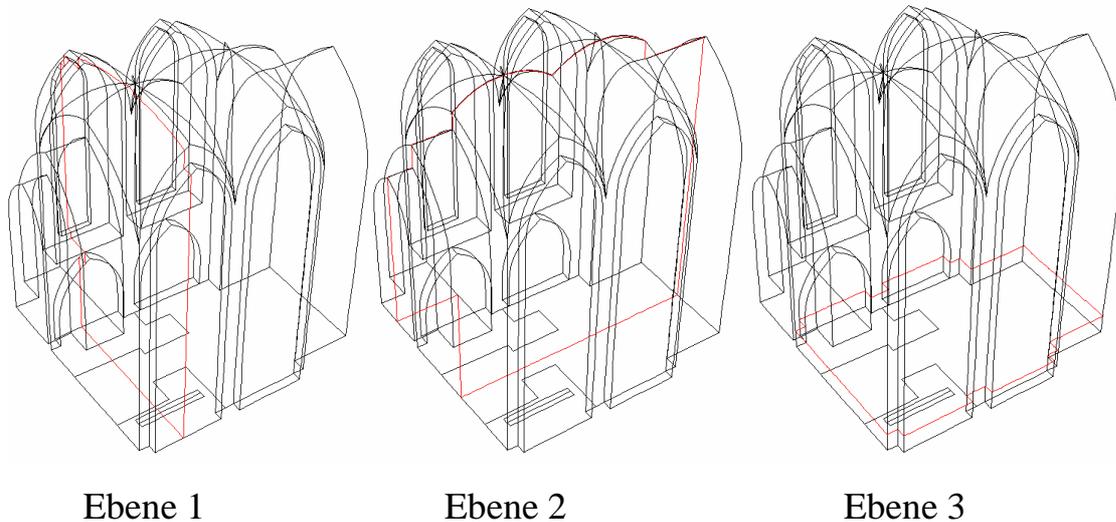
- Vergleich zwischen Messwerten und Simulationsberechnungen in St. Marien
- Simulationsberechnung von St. Georgen zur Ermittlung des Energiebedarfs und Behaglichkeit bei unterschiedlichen Nutzungszeiten unter Berücksichtigung des Einflusses von Wärmedämmung im Dach

Die beiden Aufgabenstellungen wurden mit zwei Simulationsprogrammen untersucht:

- Simulationsrechnungen von Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten mit FLUENT, einem CFD (Computational Fluid Dynamics) Programm;
- Simulationsrechnungen mit TRNSYS, um den Energieverbrauch und die Oberflächentemperaturen mit und ohne Dachdämmung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten zu berechnen

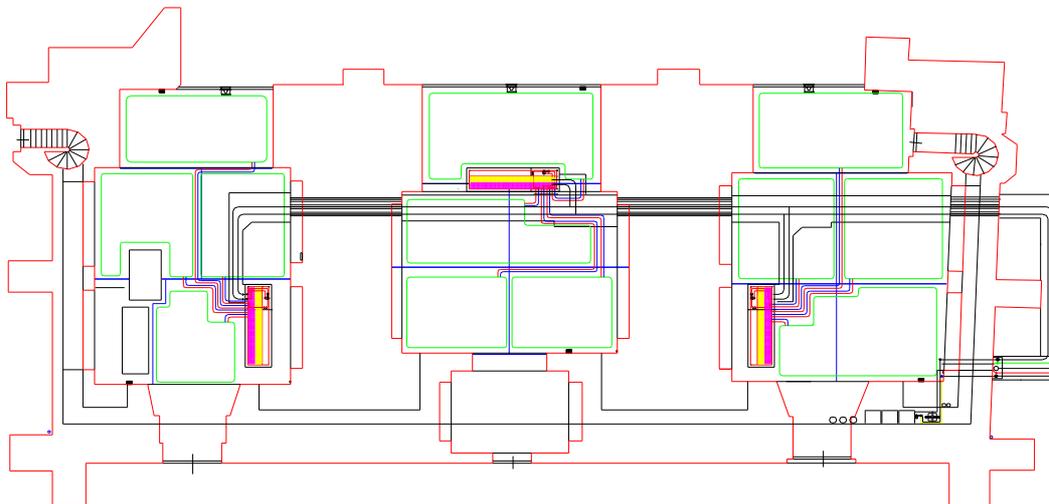
## Simulationsrechnungen mit FLUENT in St. Marien

Grafik 2 zeigt das Modell von St. Marien mit den in der Simulation verwendeten Ebenen.

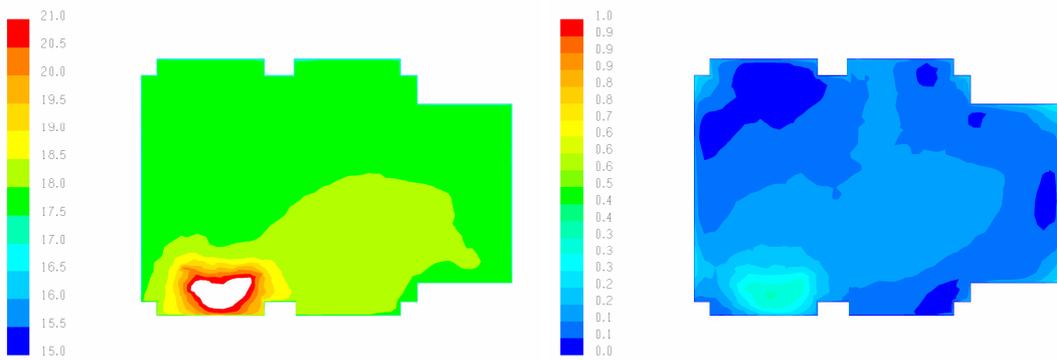


**Grafik 2: Modell für St. Marien**

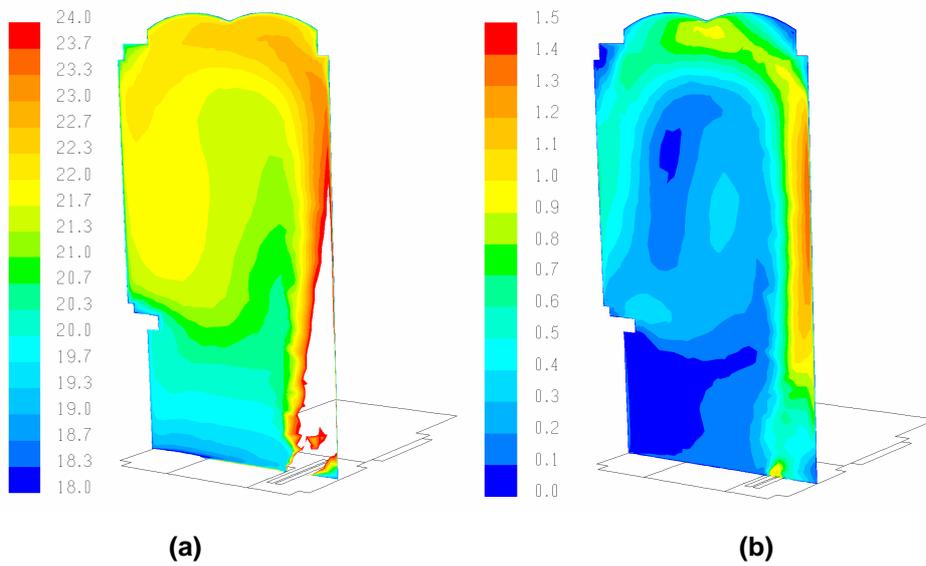
In der Südwestecke der Nordkapelle ist die installierte Warmwasser-/Warmluftstation erkennbar. In der gegenüberliegenden Nordwand sind die Fenster erkennbar, an denen die Messungen über den Einfluss der Windabweiser gemessen wurde.



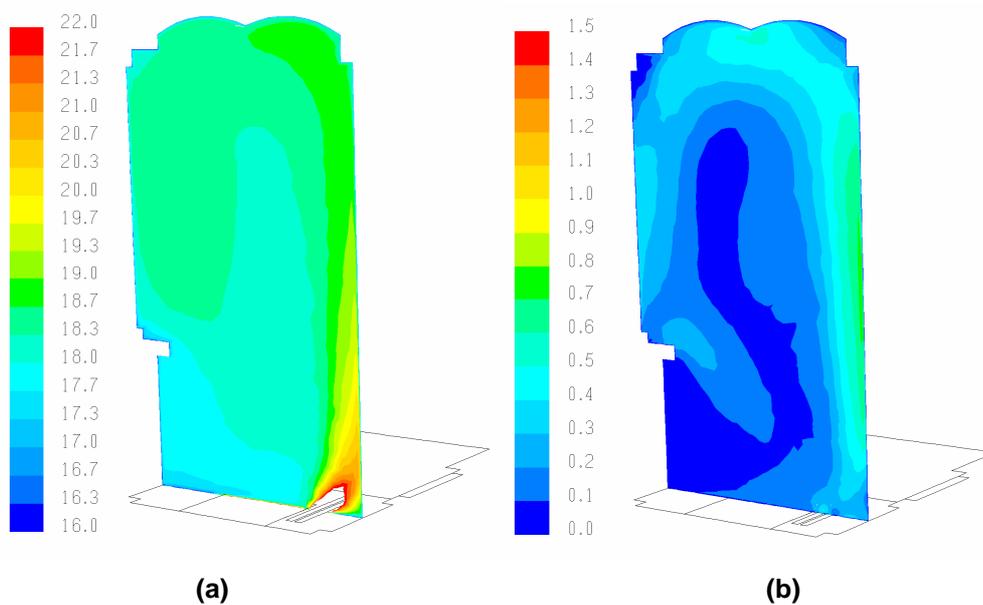
**Grafik 3: Anordnung der Heizungssysteme in St. Marien**



**Grafik 4: Temperatur (°C) und Luftgeschwindigkeit (m/s) auf E bene 3 bei kleinster Geschwindigkeit**



**Grafik 5: Temperatur (°C) und Luftgeschwindigkeit (m/s) auf E bene 1 bei größter Geschwindigkeit**



**Grafik 6: Verlauf von Raumlufttemperatur und Luftgeschwindigkeit in der niedrigsten Ventilatorstufe**

In Grafik 5 und 6 sind die Verläufe der Lufttemperaturen (a) und Luftgeschwindigkeiten (b) dargestellt. Als Bezugsebene wurde die Mittelachse der eingebauten Warmwasser-/Warmluftstation gewählt.

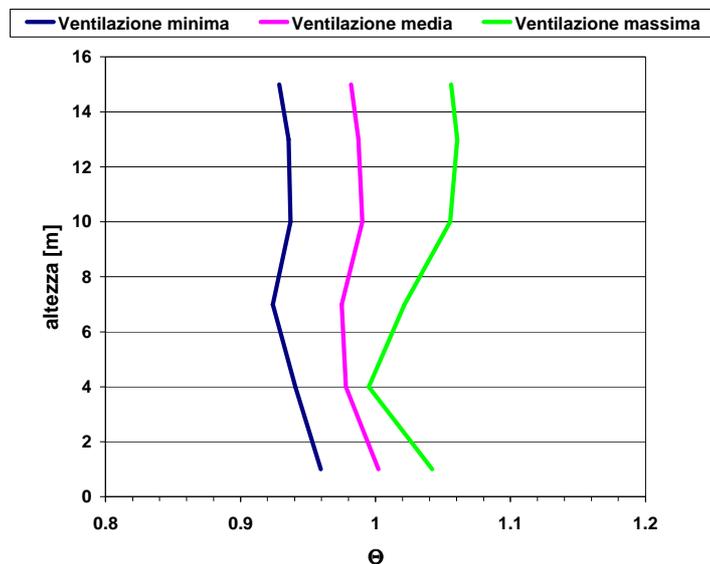
Sehr gut ist dabei zu erkennen, dass die warme Zuluft die vom Gitter mit 15° Neigung dem Raum zugeführt wird, über das Umluftgitter hinwegströmt, sich an die Wand anlegt und sich dann deutlich abgekühlt in den Raum verteilt.

Wichtig für die Bestimmung der ausreichenden Anzahl der Zellen ist die Bewertung der Genauigkeit der Berechnung durch eine Fehlerabschätzung unter Berücksichtigung der Rechenzeit. Das optimierte Gitternetz von St. Marien hat eine Zellenanzahl von 70.000. Hierzu wurden die gemessenen Werte der Temperaturen herangezogen, um einen Vergleich von Messwerten und Rechenwerten durchführen zu können. Ziel dieser Simulationsrechnung in St. Marien ist es, modellhaft die Strömungsverhältnisse und daraus abgeleitet Temperaturverhältnisse für St. Georgen bestimmen zu können.

Als Referenzparameter zur Kontrolle der rechnerischen Genauigkeit wurde ein dimensionsloser Parameter herangezogen, der als „Temperaturverhältnis“ bezeichnet wird und folgendermaßen definiert ist:

$$\Theta = (t_c - t_i) / (t_m - t_i)$$

Dabei ist  $t_c$  die in der Simulation berechnete Lufttemperatur,  $t_m$  die gemessene Raumlufttemperatur und  $t_i$  die Zulufttemperatur, die in diesem Fall mit 50 °C angenommen wurde.



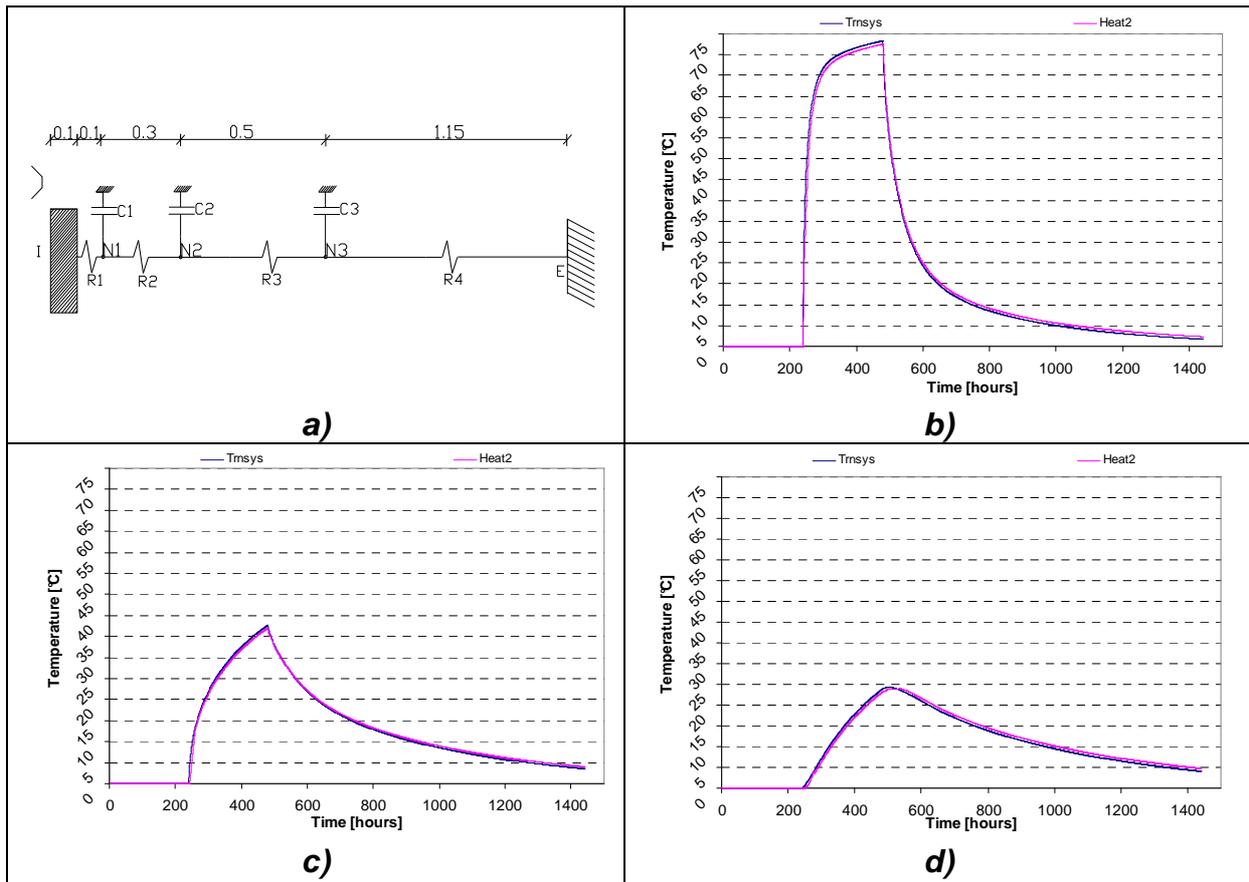
**Grafik 7: Temperaturverhältnis (“temperature ratio”) in der Höhe**

In Grafik 7 ist das Temperaturverhältnis für drei verschiedene Ventilationsstufen dargestellt. Die Abweichung liegt bei maximal 10%. Somit kann das ausgewählte Rechenmodell als ausreichend genau angenommen werden.

## Simulationsrechnungen mit TRNSYS in St. Marien

Um den Einfluss unterschiedlicher Regelstrategien auf den zu erwartenden Energieverbrauch und die Mittelwerte der Raumtemperaturen vergleichen zu können, wurden Simulationsrechnungen mit TRNSYS durchgeführt.

In St. Marien lagen hierfür die gemessenen Außen- und Innentemperaturen vor. Die Modellierung der dicken Wände wurde für TRNSYS mittels einer detaillierten FDM (Finite Difference Model) nachgebildet, wie dies in Grafik 8 a) dargestellt ist.

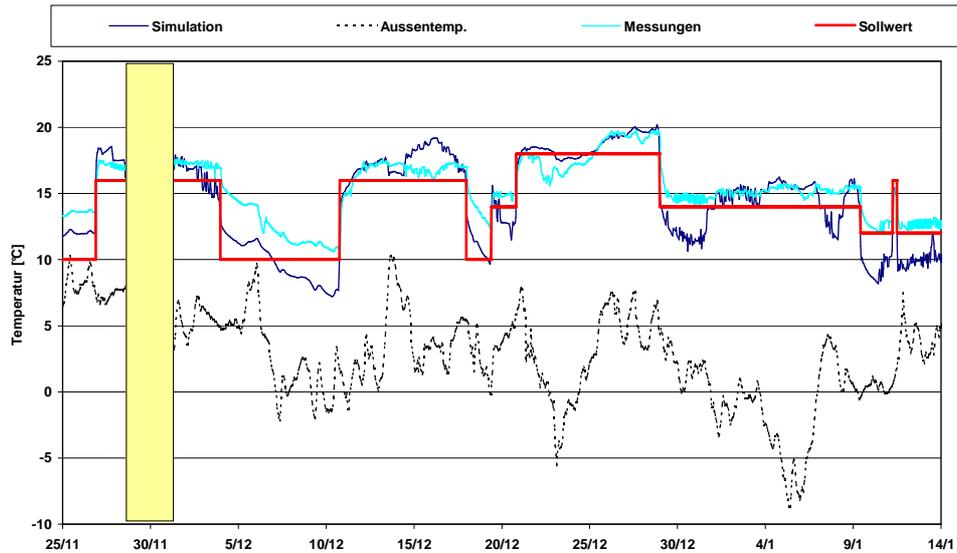


**Grafik 8: Modell mit TRNSYS für eine dicke Wand (2.15 m). Vergleich mit einem FDM Modell in Punkten N1 (b), N2 (c), N3 (d)**

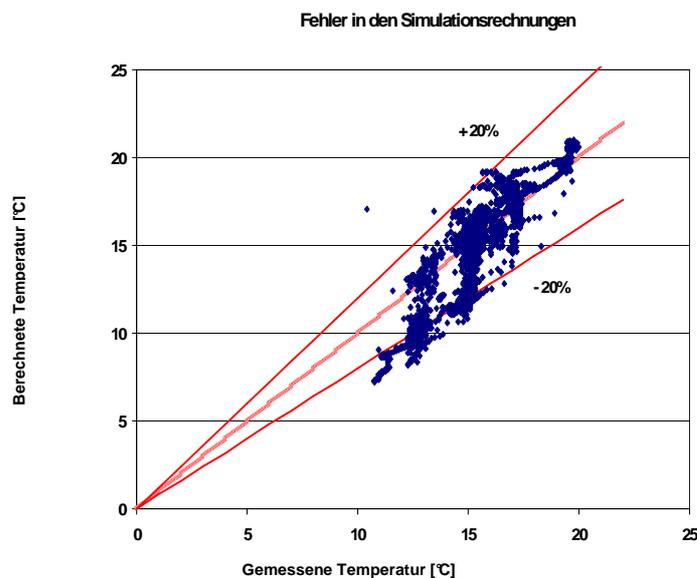
Damit wurde es möglich, die Raumbedingungen in der Kirche nachzubilden. Ein Ergebnisbeispiel ist in Grafik 9 dargestellt.

In Grafik 10 ist der Fehler zwischen Messungen und Simulationen über alle Betriebsbereiche hinweg zu sehen. Zusätzlich zum Verlauf von Messung und Simulation sind die Außentemperatur und die vorgegebenen Nutzungsintervalle aufgetragen.

Sehr gut ist zu erkennen, dass die Simulation die tatsächlichen Verhältnisse der Überhöhung der mittleren Raumtemperatur wiedergibt. Auch dies bestätigt, dass das gewählte Modell als hinreichend genau für die später durchgeführte Simulation in St. Georgen betrachtet und verwendet werden kann.



**Grafik 9: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen**



**Grafik 10: Fehler in den Simulationsrechnungen**

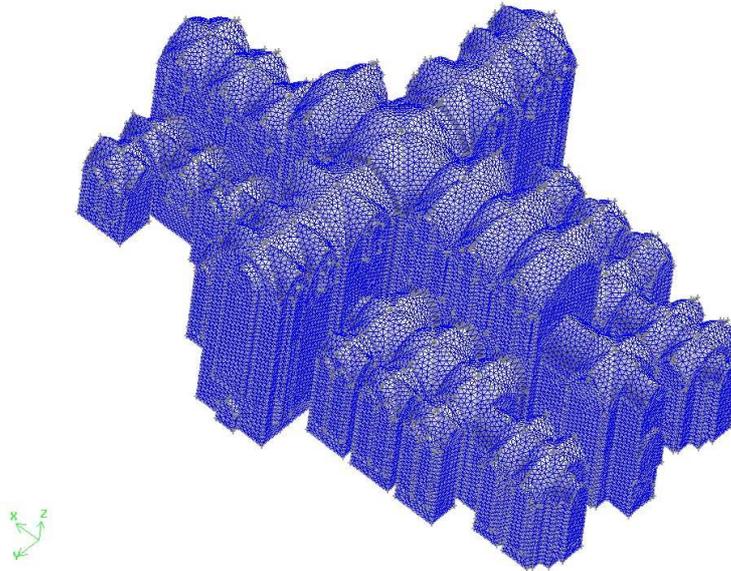
Eine gute Übereinstimmung hat auch der Vergleich des berechneten Energiebedarfs mit dem tatsächlichen Verbrauch ergeben.

In der Messperiode von 08.12. bis 10.03. ergab sich ein Gasverbrauch von 5.225 m<sup>3</sup>. In den Simulationen wurde der Gasverbrauch mit 5.400 m<sup>3</sup> ermittelt. Der Gesamtwirkungsgrad der Wärmeerzeugung und Verteilung wurde dabei mit  $\eta_{ges} = 0,9$  angesetzt.

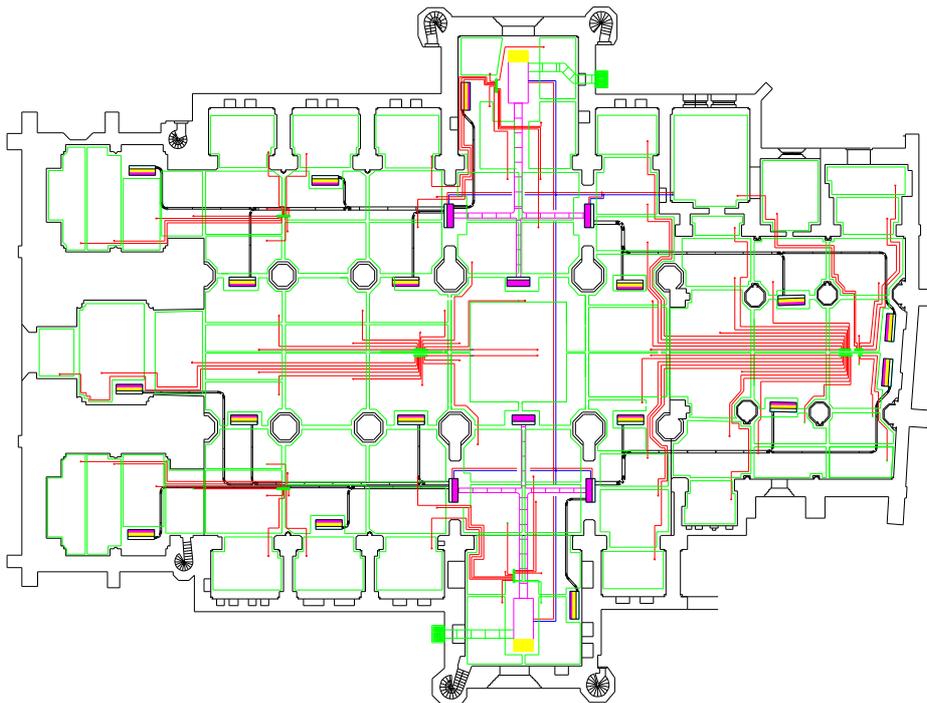
### Simulationsrechnungen mit FLUENT für St. Georgen

Mit Hilfe von CFD Simulationen wurde die Behaglichkeit in St. Georgen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass es unter Verwendung dieser Rechenmethode möglich ist, die gewählte Wärmeverteilung im Raum zu optimieren. Durch den Wechsel der Zu- und

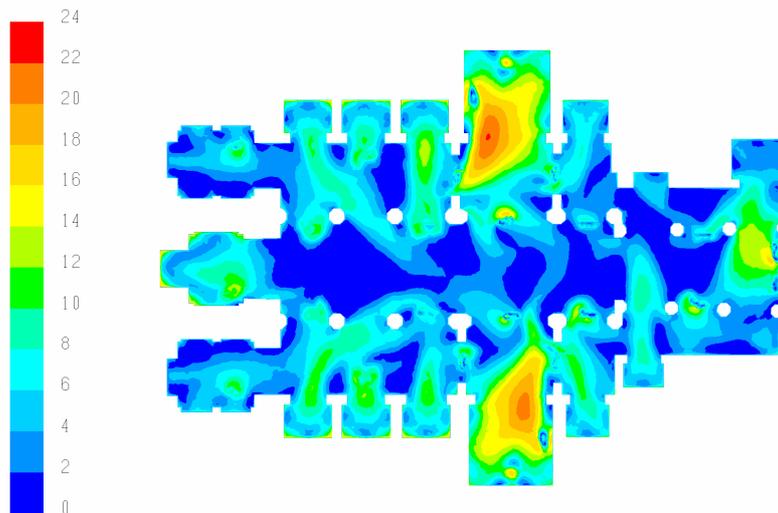
Abluftöffnungen (Grafik 12) konnte die Behaglichkeit deutlich verbessert werden (Zugluftverteilung in Grafik 13 und 14).



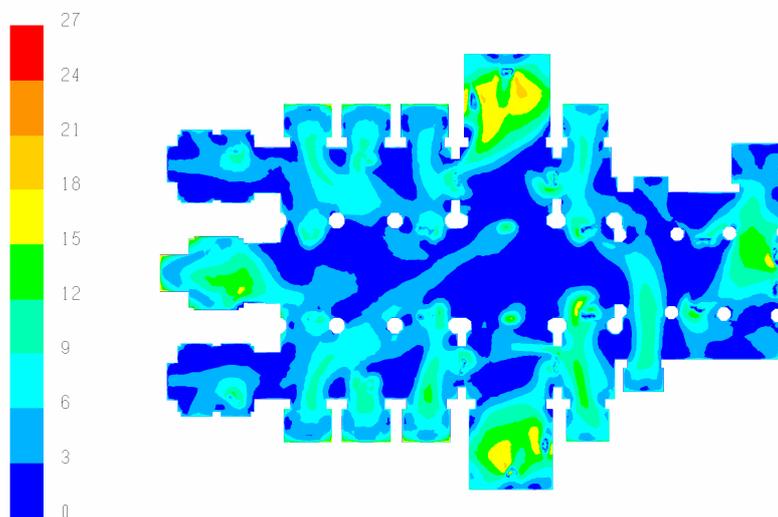
**Grafik 11: St. Georgen als Gitternetzmodell**



**Grafik 12: Anordnung der Heizungssysteme in St. Georgen**



**Grafik 13: Zugluftverteilung bei der ursprünglichen Planung**



**Grafik 14: Verbesserte Strömungsverhältnisse nach durchgeführter Simulation**

### Simulationsrechnungen mit TRNSYS in St. Georgen

Um den Energieverbrauch in St. Georgen zu optimieren, wurden Simulationsrechnungen mit TRNSYS unter Berücksichtigung der Wetter- und Klimadaten von Bremerhaven durchgeführt. Die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung wurde in Abhängigkeit der Außentemperatur gefahren.

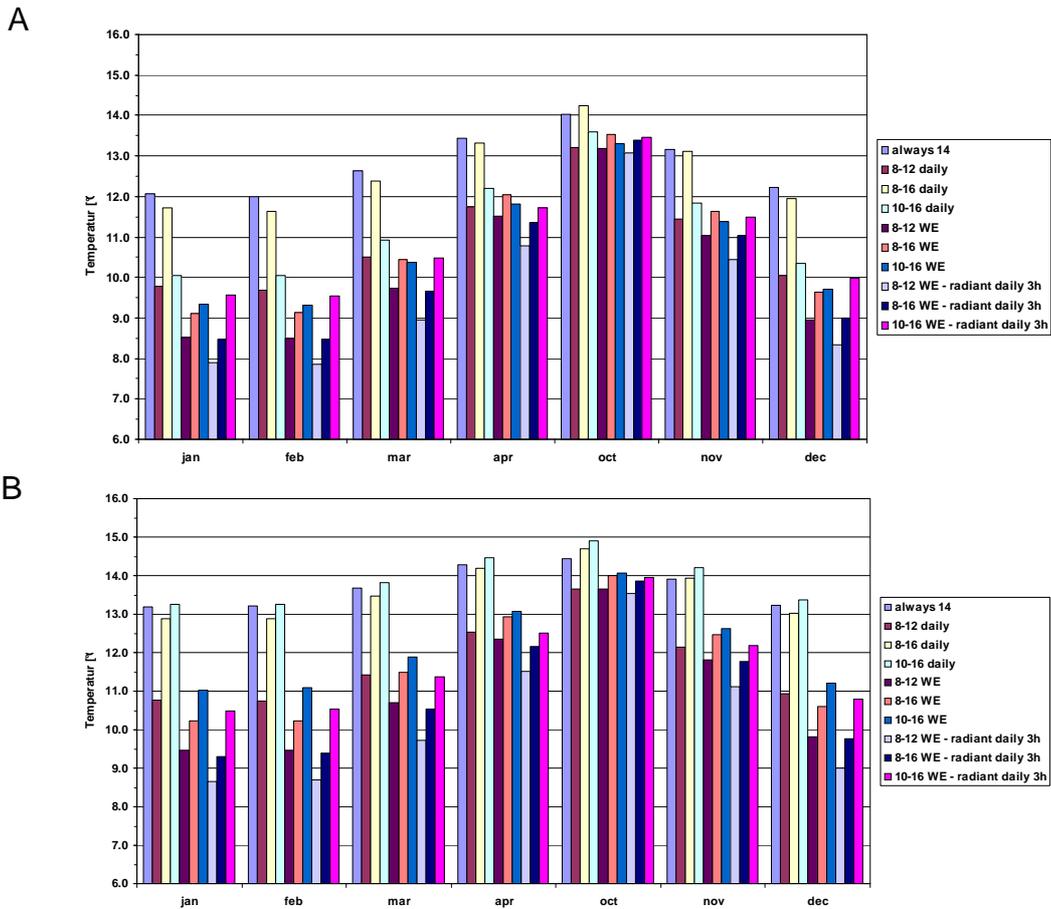
In den Simulationsrechnungen wurden 10 unterschiedliche Nutzungskonzepte berechnet, die häufig im realen Kirchenbetrieb verfolgt werden. Ein zusätzliches Ziel war, die für das Baudenkmal „schonendste“ Betriebsart zu ermitteln. Folgende Nutzungskonzepte wurden gewählt:

- always 14: Nutzungstemperatur 14 °C im Dauerbetrieb; Fußbodenheizung (FBH) im Dauerbetrieb

- 8-12 daily: 8 °C Grundtemperatur; 12 °C Nutzungstemperatur täglich von 8 bis 19 Uhr; Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH im Dauerbetrieb
- 8-16 daily: 8 °C Grundtemperatur; 16 °C Nutzungstemperatur täglich von 9 bis 18 Uhr; Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH im Dauerbetrieb
- 10-16 daily: 10 °C Grundtemperatur; 16 °C Nutzungstemperatur täglich von 9 bis 19 Uhr; Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH im Dauerbetrieb
- 8-12 WE: 8 °C Grundtemperatur (Montag bis Freitag); 12 °C Nutzungstemperatur (Samstag und Sonntag von 8 bis 19 Uhr); Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH im Dauerbetrieb
- 8-16 WE: 8 °C Grundtemperatur (Montag bis Freitag); 16 °C Nutzungstemperatur (Samstag und Sonntag von 8 bis 19 Uhr); Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH im Dauerbetrieb
- 10-16 WE: 10 °C Grundtemperatur (Montag bis Freitag); 16 °C Nutzungstemperatur (Samstag und Sonntag von 8 bis 19 Uhr); Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH im Dauerbetrieb
- 8-12 WE radiant daily 3h: 8 °C Grundtemperatur (Montag bis Freitag); 12 °C Nutzungstemperatur (Samstag und Sonntag von 8 bis 19 Uhr); Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH (Mo-Fr 3 Stunden in Betrieb, Samstag und Sonntag von 4 bis 16 Uhr in Betrieb)
- 8-16 WE radiant daily 3h: 8 °C Grundtemperatur (Montag bis Freitag); 16 °C Nutzungstemperatur (Samstag und Sonntag von 8 bis 19 Uhr); Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH (Mo-Fr 3 Stunden in Betrieb, Samstag und Sonntag von 4 bis 16 Uhr in Betrieb)
- 10-16 WE radiant daily 3h: 10 °C Grundtemperatur (Montag bis Freitag); 16 °C Nutzungstemperatur (Samstag und Sonntag von 8 bis 19 Uhr); Aufheizgeschwindigkeit 1 K/h; FBH (Mo-Fr 3 Stunden in Betrieb, Samstag und Sonntag von 4 bis 16 Uhr in Betrieb)

### **Ergebnisse der Simulation für die Deckentemperatur auf der Rauminnenschale**

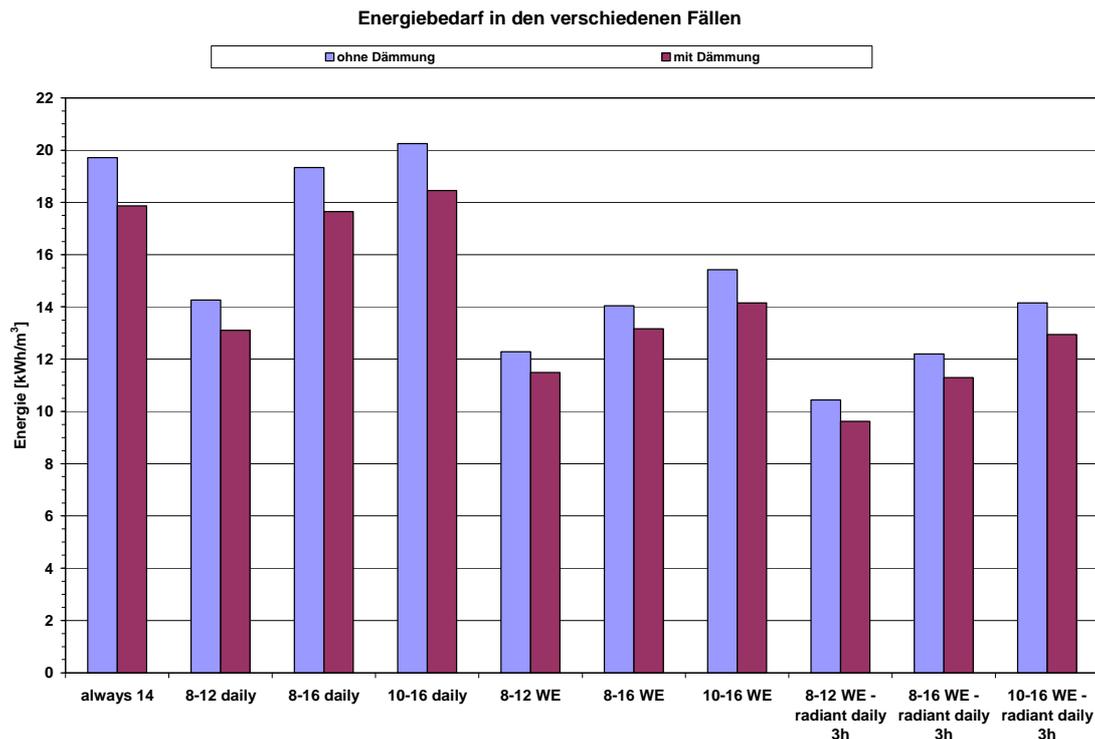
In Grafik 15 sind die Ergebnisse „Mittelwerte der Deckentemperatur ohne (A) und mit Dämmung (B)“ auf der raumseitigen Deckenoberfläche dargestellt.



**Grafik 15: Mittelwerte der Deckentemperatur: A) ohne Dämmung; B) mit Dämmung**

Mit Dämmung sind die Oberflächentemperaturen der Decke erwartungsgemäß höher als ohne Dämmung. So liegt z. B. bei der Beheizungsvariante „Nutzungstemperatur 14 °C im Dauerbetrieb“ die mittlere Temperatur im Januar ohne Dämmung bei 12,1 °C, mit Dämmung bei 13,2 °C. Bei der Variante „8 °C Grundtemperatur (Mo-Fr), 12 °C Nutzungstemperatur (Sa+So)“ liegt die mittlere Temperatur im Januar ohne Dämmung bei 7,9 °C, mit Dämmung bei 8,7 °C. Dies macht einen Unterschied von ca. 10% aus. Der positive Effekt der Dämmung kann in bestimmten Klimasituationen ausreichend sein, um durch die höhere Oberflächentemperatur Taupunktunterschreitungen und daraus abgeleitet Schimmelbildung zu vermeiden.

Der zu erwartende Energiebedarf ist mit Dämmung 7 bis 10% niedriger als ohne Dämmung (Grafik 16). Beispielsweise beträgt der Energieverbrauch bei der Variante „14 °C Dauerbetrieb“ ohne Dämmung 19,7 kWh/m<sup>3</sup> und mit Dämmung 17,9 kWh/m<sup>3</sup>. Bei der Nutzungsvariante „8 °C Grundtemperatur (Mo-Fr), 12 °C Nutzungstemperatur (Sa+So)“ liegt der errechnete Energieverbrauch bei 12,3 kWh/m<sup>3</sup> ohne Dämmung und 11,5 kWh/m<sup>3</sup> mit Dämmung.



**Grafik 16: Vergleich der Energieverbräuche ohne und mit Dämmung**

Es ist jedoch wichtig darauf hinzuweisen, dass Wärmedämmung in Kirchengewölben aufgrund neuerer Untersuchungen nur mit besonders ausgewählten Konstruktionen eingebracht werden darf. Die direkte Gewölbedämmung darf in aller Regel nicht durchgeführt werden.

## **Berechnung und Analyse der Heizlast für St. Marien und St. Georgen**

von Prof. Dr. Sommer et. al., FH Köln

Untersuchungsschwerpunkt war eine Literaturrecherche zum Stand der Heizlastberechnung und der Heizsysteme in Kirchen, die Berechnung und Analyse der Heizlast für St. Marien und St. Georgen mit Hilfe der Handrechenverfahren nach DIN 4701 und DIN EN 12831 sowie mit Hilfe der Computersimulation gemäß TAS (Thermal Analysis Software). Darüber hinaus wird der Jahresheizwärmebedarf für verschiedene Heizstrategien ebenfalls mit Hilfe der Computersimulation (TAS) ermittelt und analysiert [Bär05, Che05, Sch04].

### **Gebäudekonstruktion**

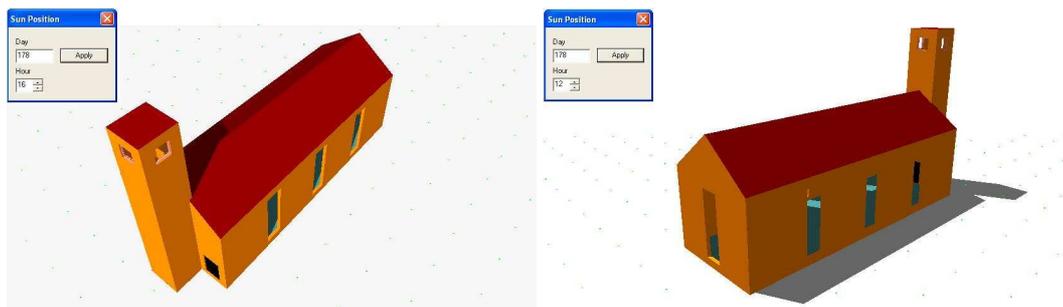
Zur Untersuchung der oben genannten Fragen wurde eine Modellkirche generiert, die in ihren Abmessungen einer typischen Kirche entspricht. Um den deutlichen bauphysikalischen Unterschieden von alten und modernen Kirchen Rechnung zu tragen, wurden zwei Modelltypen differenziert: die historische Bauart wurde durch 1 m dicke Ziegelstein-Außenmauern mit Einscheibenverglasung nachgebildet, die moderne Konstruktion

durch ein zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung sowie durch Dreifachverglasung.

Das betrachtete Modell kann als Gebäude mit folgenden Eigenschaften beschrieben werden:

- Grundfläche (innen): 300 m<sup>2</sup> (10m x 30m)
- Volumen (innen): 3000 m<sup>3</sup>
- Mittlere Raumhöhe: 10 m
- Höhe der Außenwände: 8 m
- Gebäudehöhe: 12 m
- Fensterfläche: 15% der Außenwandfläche, verteilt auf sieben Fenster
- Fensterbreite: 2 m
- Fensterhöhe: 6,8 m
- Außentüren: 2 m x 3 m, 2 Stück

Der vorgelagerte Glockenturm ist mit dem Baukörper der Kirche verbunden und hat eine Höhe von 20 m. Außerdem ist er durch eine Tür (2 m x 3 m) zugänglich. Der Turm wurde nicht beheizt und daher auch nicht in seinem wärmetechnischen Verhalten untersucht.

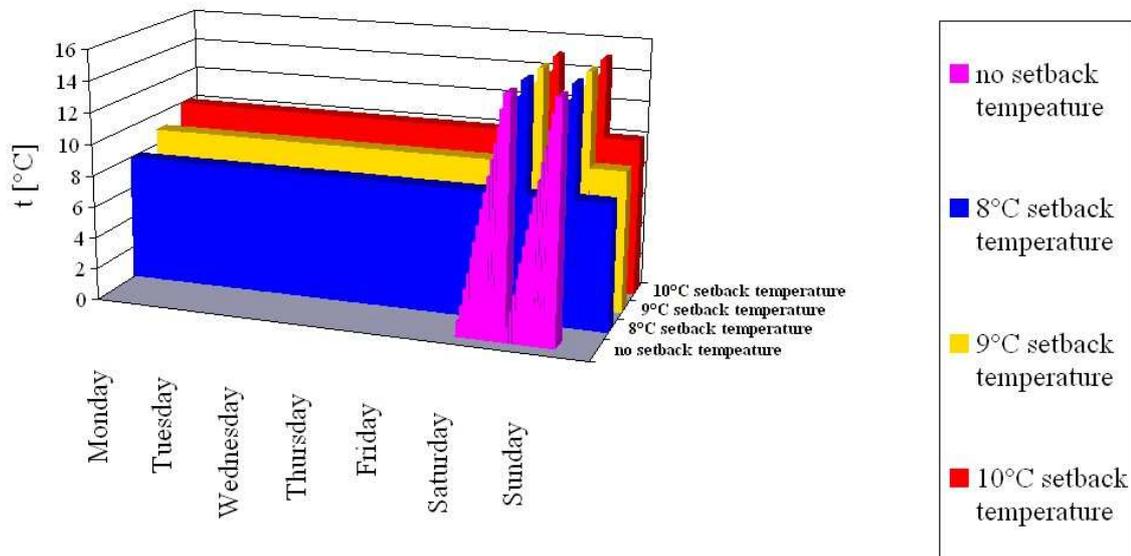


**Grafik 17: Modellkirche**

## Gebäudenutzung

Für die modellhafte Betrachtung der Kirche wurde eine Nutzung für Messen an Samstagen (18 Uhr bis 20 Uhr) und an Sonntagen (10 Uhr bis 12 Uhr) angenommen. Während der Messen soll eine Luft- beziehungsweise operative Temperatur von 15 °C eingehalten werden, in der übrigen Zeit wurden Basistemperaturen von 8 °C, 9 °C oder 10 °C festgelegt. In der Simulation wurde außerdem das Verhalten ohne feste Basis-

temperatur untersucht. Während des Aufheizens soll sich die Temperatur um 1 Kelvin pro Stunde ändern.



**Grafik 18: Kontrolltemperaturen**

### Zielsetzung der Untersuchung

Für die Berechnung der Heizlast soll dem planenden Ingenieur eine Anleitung bereitgestellt werden, wie für eine Kirche unter Berücksichtigung der bauphysikalischen Besonderheiten ein bestmögliches Ergebnis erzielt werden kann.

Untersucht werden die Handrechenverfahren nach DIN 4701 und DIN EN 12831 sowie die dynamische Computersimulation gemäß TAS.

Ebenfalls mit Hilfe der Computersimulation (TAS) soll ermittelt werden, welches die effizienteste Heizstrategie für eine Kirche aus der Sicht des Jahresheizwärmebedarfs darstellt.

### Untersuchungsmethodik

Für die Berechnung der Heizlast auf der Grundlage der Handrechenverfahren werden die in der DIN 4701 und der DIN EN 12831 gegebenen Algorithmen verwendet. Es werden mehrere Berechnungsgänge durchgeführt, die sich durch den Modelltyp „Alt“ oder „modern“, sowie durch die Basistemperaturen unterscheiden.

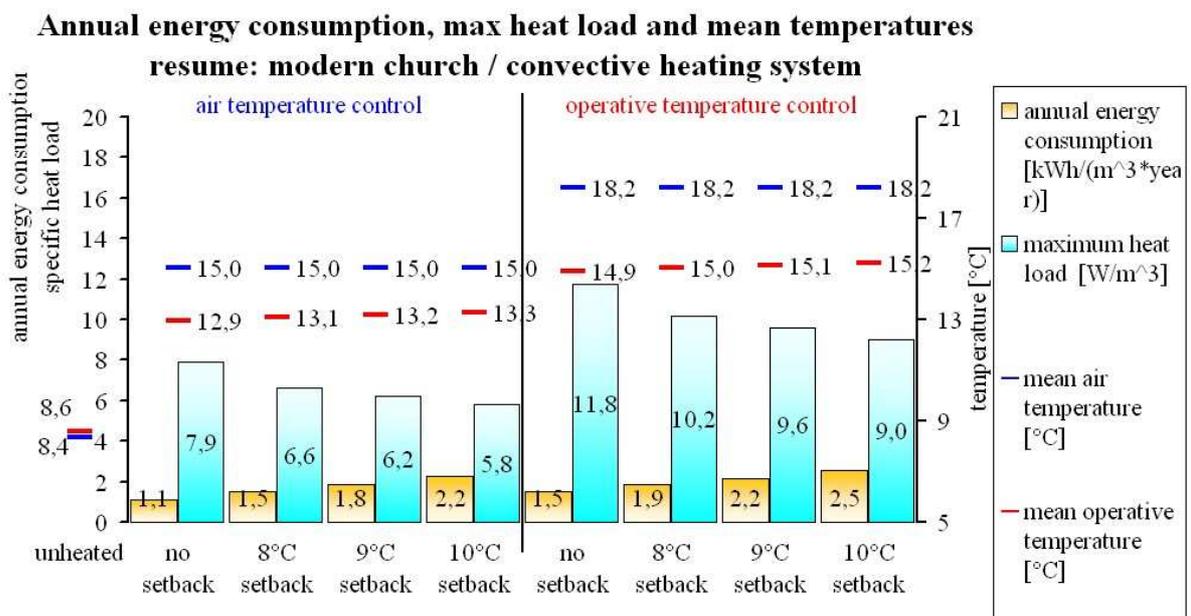
Da die angenommene Nutzung der Kirche nur auf das Wochenende terminiert ist, wird gemäß der DIN 4701 die Heizlast nach dem Sonderfall für selten beheizte Räume berechnet. Hierfür muss der Wärmebedarf zum Aufheizen speichernder Bauteile, der Wärmebedarf der nichtspeichernden Bauteile und der Lüftungswärmebedarf berechnet werden.

Das Berechnungsverfahren nach DIN EN 12831 sieht eine Berechnung des Transmissionswärmeverlustes der gesamten Gebäudehülle und der Lüftungswärmeverluste vor. Zum Ausgleich der Auswirkungen durch unterbrochenen Heizbetrieb wird eine Aufheizleistung nach Norm unter Zuhilfenahme der Tabellenwerte des nationalen Anhangs bestimmt.

## Computersimulation

Die Modellkirche wird in ihrer Geometrie und den Baustoffdaten in das Computermodell übertragen. Nachgebildet wird die angenommene Nutzung mit den festgelegten Zeiten und den geforderten Temperaturen. Die Begrenzung der Temperaturänderung beim Aufheizen der Kirche wird durch einen geeigneten Regelalgorithmus berücksichtigt. Die Software TAS berücksichtigt bei der Regelung der Temperaturen nur die Lufttemperatur.

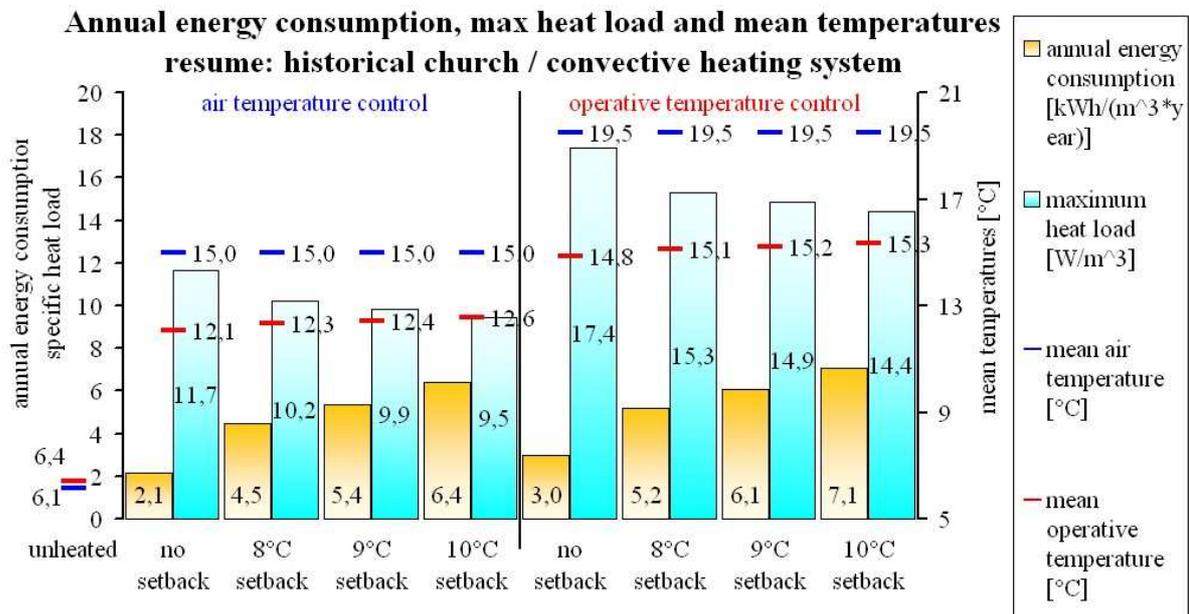
Zugrunde gelegt wird ein 100% konvektiv arbeitendes Heizsystem. Außerdem wird ein 100% strahlendes Heizsystem betrachtet (theoretische Abgrenzung). Auf der Grundlage dieser Vorgaben werden die Variationen der Betriebsweisen mit den verschiedenen Basistemperaturen durchgeführt.



**Grafik 19: Ergebnisse für ein 100% konvektives Heizsystem, Modelltyp moderne Kirche**

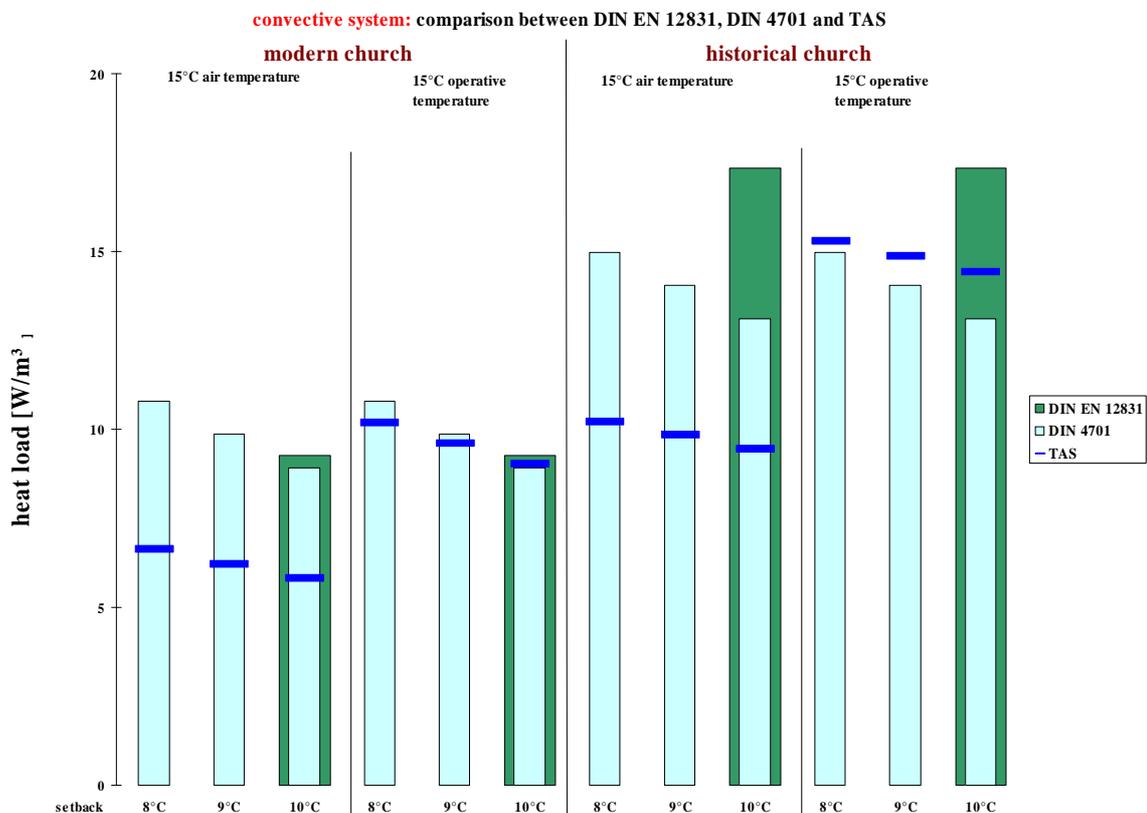
- Für die Varianten mit dem Ziel, eine operative Temperatur von 15°C zu erreichen, liegen die Bedarfswerte der Jahresheizenergie und die benötigte Heizlast höher als für die Fälle mit Lufttemperatur.
- Durch Erhöhung der Basistemperatur wird die benötigte Heizlast gesenkt, jedoch der Heizenergiebedarf erhöht. So führt die Temperaturerhöhung von 1 Kelvin zu circa 25% beziehungsweise zu circa 18% mehr Jahres-Heizenergiebedarf.
- Die Varianten ohne Basistemperaturbegrenzung ergeben einen unerwartet hohen Bedarf an Jahresheizenergie. Begründet werden kann das durch die hohe Zahl an

Stunden, die sich aus der Forderung der Temperaturänderung von nur 1 Kelvin pro Stunde in der Anheizphase ergibt.



**Grafik 20: Ergebnisse für ein 100% konvektives Heizsystem, Modelltyp historische Kirche**

- Im Vergleich mit dem Typ „moderne Kirche“ ergeben sich hier für den Jahresheizenergiebedarf und die Heizlast erwartungsgemäß deutlich höhere Werte.



**Grafik 21: Vergleich der Heizlast, berechnet nach DIN 4701, DIN EN 12831 und TAS**

- Die Berechnungsmethode nach der DIN 4701 ist auf die Modellkirche anwendbar, es gibt keine Einschränkungen.
- Die DIN EN 12831 hingegen kann nur unbefriedigend auf das Modell angewendet werden. Die Berechnung des Sonderfalls für hohe Räume ist in ihrer Anwendbarkeit auf eine Norm-Heizlast von  $60 \text{ W/m}^2$  begrenzt; das Modell für die historische Kirche erreicht aber einen Wert von  $127 \text{ W/m}^2$ .
- Des Weiteren ist das Verfahren zur Berechnung der Aufheizleistung nicht kompatibel zu dem Modell, da in allen Belangen große Differenzen bestehen. Die Nutzungsbeziehungsweise Unterbrechungszeiten stimmen nicht überein, die Innentemperaturen der Kirche sind zu niedrig, die Raumhöhe liegt über dem zulässigen Wert und die Aufheizzeiten sind nicht ausreichend vorgegeben.
- Die Ergebnisse der beiden Normen haben keine großen Differenzen, für die Kirche historischen Typs wurden nach der DIN EN 12831 geringfügig höhere Heizlasten berechnet.
- Verglichen mit den Ergebnissen der Simulation ergeben sich für das konvektive System mit  $15^\circ\text{C}$  operativer Raumtemperatur die geringsten Unterschiede.

## **Folgerungen**

Die Erhöhung der Basis-Heiztemperatur verursacht einen starken Anstieg des Jahres-Heizenergiebedarfs; wobei gleichzeitig die erforderliche Heizlast nur wenig abnimmt. Aus wirtschaftlicher Sicht sollte daher die Basis-Heiztemperatur so gering wie möglich gewählt werden.

Die Erfahrung aus mehrjährig durchgeführten Messungen des IBH zeigt jedoch, dass bei Grundtemperaturen im Bereich zwischen  $6\text{-}8^\circ\text{C}$  und Nutzungstemperaturen im Bereich von  $14\text{-}16^\circ\text{C}$  die empfundenen Temperaturen deutlich zu niedrig liegen, um Behaglichkeit bei den Kirchenbesuchern zu erreichen.

Zur Berechnung der Heizlast kann die aktuelle Normung DIN EN 12831 noch nicht zufrieden stellend angewendet werden.

## **Weiterer Forschungsbedarf**

Optimierung der Aufheizgeschwindigkeit z. B. Abweichung vom Standardwert von max.  $1 \text{ K}$  Temperaturänderung pro Stunde beim Auf- bzw. Abheizen, sowie Ermittlung eines Optimums von Grund-, Nutzungs- und empfundener Temperatur bei für das Baudenkmal optimaler Aufheizgeschwindigkeit

Da das Verfahren nach DIN EN 12831 für die Berechnung der Heizlast von insbesondere älteren denkmalwerten Gebäuden nicht ausreichend ist, aber dies dem aktuellen Stand der anzuwendenden Normung entspricht, sollte versucht werden, hierfür Lösungen zu erarbeiten, um mit dieser Norm auch Kirchen berechnen zu können.

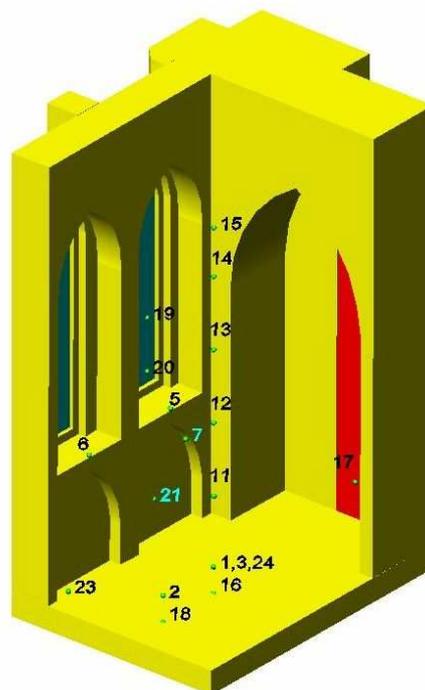
## Experimentelle Messung der thermischen Umgebungsbedingungen in der St.-Marien-Kirche Wismar

von Prof. Dr. B. W. Olesen, Fa. Velta, Norderstedt/Universität Lyngby

Da Besucher von Kirchen häufig Beschwerden über „zu niedrige Temperaturen“, Zugerscheinungen etc. äußern, andererseits von vielen Denkmalpflegern, Orgelbauern und Restauratoren Schäden wegen zu hoher Beheizung von Baudenkmalen mit wertvollen Innenausstattungen bemängelt werden, wurden von Prof. Dr.-Ing. Olesen Messungen zum Vergleich der Kenndaten von empfundener Temperatur, Luft- und Oberflächentemperaturen anhand von Messwerten, die durch Simulation mit handelsüblichen Programmen ermittelt werden, durchgeführt [HG04].

### Messverfahren

Es wurden empfundene Temperatur, Lufttemperatur und Oberflächentemperaturen, Rücklauftemperatur der Fußbodenheizung, relative Feuchtigkeit der Raumluft sowie Luftgeschwindigkeit gemessen. Die Anordnung der Messpunkte ist in Grafik 22 dargestellt.



Grafik 22: Messpunkte in der St.-Marien-Kirche

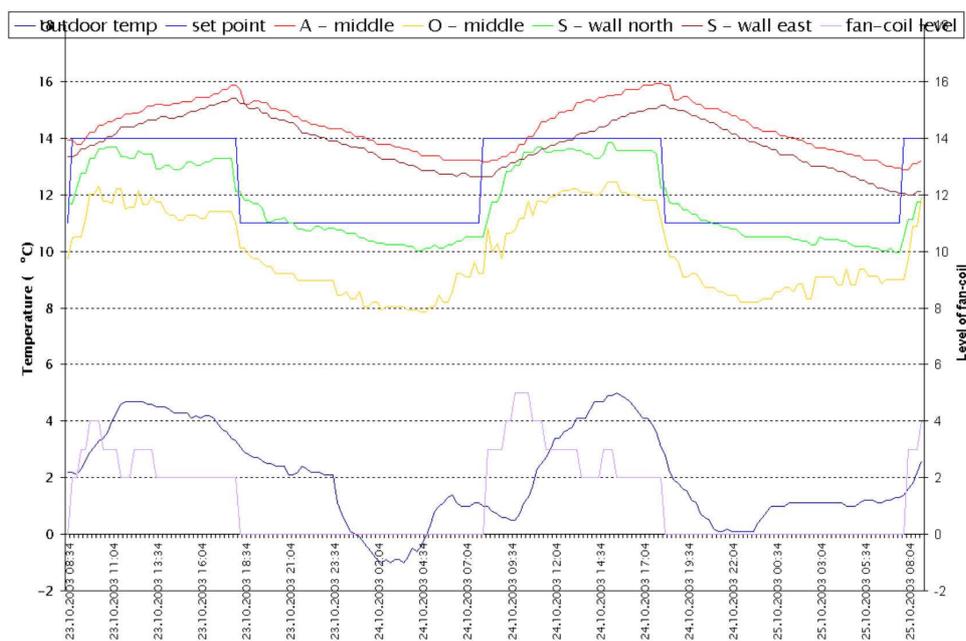
Die Buchstaben S, A und O der Legende bezeichnen Oberflächentemperatur (surface temperature), Lufttemperatur (air temperature) und empfundene Temperaturen (operative temperatures).

## Ergebnisse

Wie in Grafik 24 dargestellt, verläuft die Oberflächentemperatur an der gut isolierten, nachträglich eingebauten Ostwand parallel zur Lufttemperatur in der Raummitte, die ihrerseits je nach Betriebszustand der Anlage steigt oder fällt. Die Oberflächentemperatur an der Nordwand folgt der empfundenen Temperatur in der Raummitte, die ihrerseits ungefähr dem Verlauf der Außentemperatur folgt. Diese verschiedenen Oberflächentemperaturen resultieren aus der unterschiedlichen Bauweise der beiden Wände. Die Ostwand ist gut isoliert, während die Nordwand aus dem originären Mauerwerk besteht.

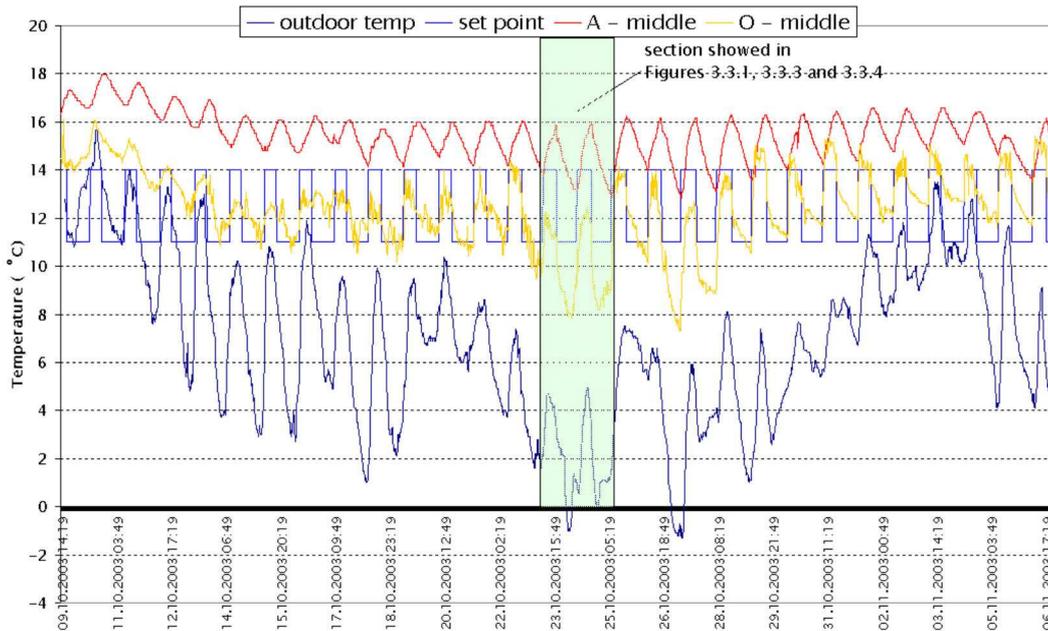
Die empfundene Temperatur liegt relativ niedrig, in einigen Fällen sogar unter der Oberflächentemperatur der Wände. Dies wird von den sehr niedrigen Oberflächentemperaturen der Fenster ausgelöst.

Die Warmwasser-Warmluft-Unterflurstation (Wärmestation) beginnt mit der Aufheizung – entsprechend dem vorgegebenen Messprogramm – mit Änderung des Sollwerts auf 14 °C. Die Wärmestation lief für mehrere Stunden auf der zur Aufheizung notwendigen Leistung und verringerte dann die Leistung, da die Solltemperatur an den Messfühlern der Regeltechnik erreicht war.



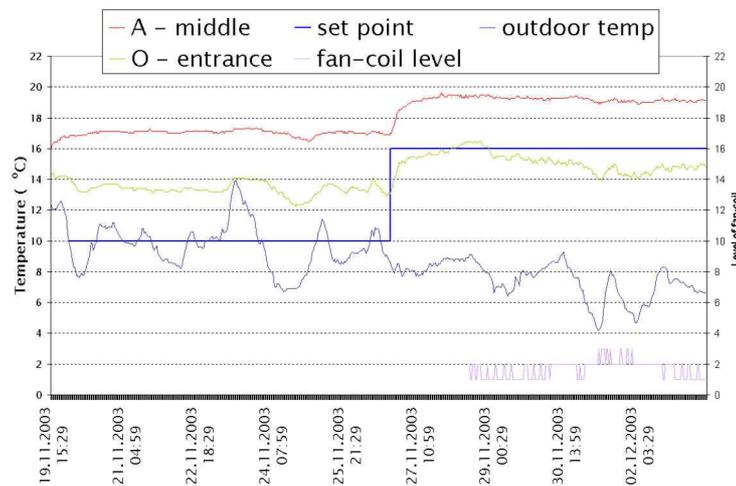
**Grafik 23: Kennlinien der Luft-, empfundenen und Oberflächentemperaturen vom 23.10. bis 25.10.2003 sowie deren Relation zu Außentemperatur, Sollwert und Betriebsstufe der Wärmestation**

Die Abweichungen von Sollwert und empfundener Temperatur lagen zwischen 1 K und 4 K. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fühler für die Steuerung der Wärmestation nicht in der Raummitte, sondern auf der Westwand im Eingangsbereich bzw. auf der gut isolierten Ostwand installiert sind.



**Grafik 24: Kennlinien der Luft-, empfundenen und Oberflächentemperaturen sowie Sollwert vom 9.10. bis 6.11.2003**

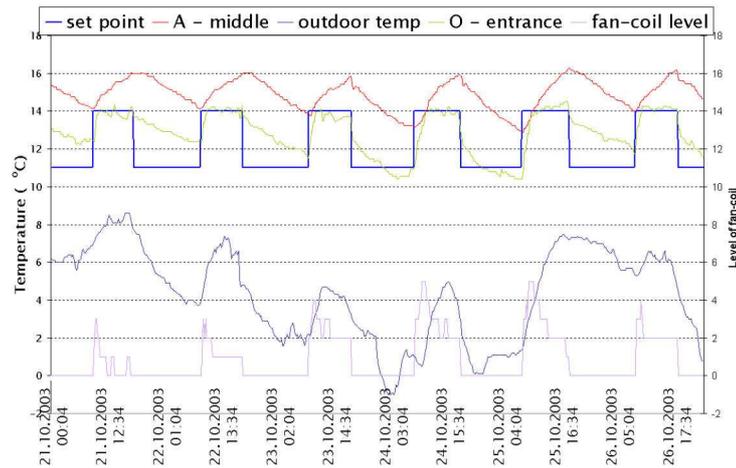
Grafik 25 und 26 zeigen die Kennlinien der empfundenen Temperatur und Lufttemperatur im stationären und instationären Betrieb.



**Grafik 25: Kennlinien der empfundenen Temperatur und Lufttemperaturen im stationären Betrieb**

Im stationären Betrieb liegt die Lufttemperatur stets um etwa 3 K höher als die empfundene Temperatur. Beide Kurven verlaufen stetig. Auch die Betriebsstufe der Wärmestation bewegt sich ungefähr gleichförmig um Stufe 2.

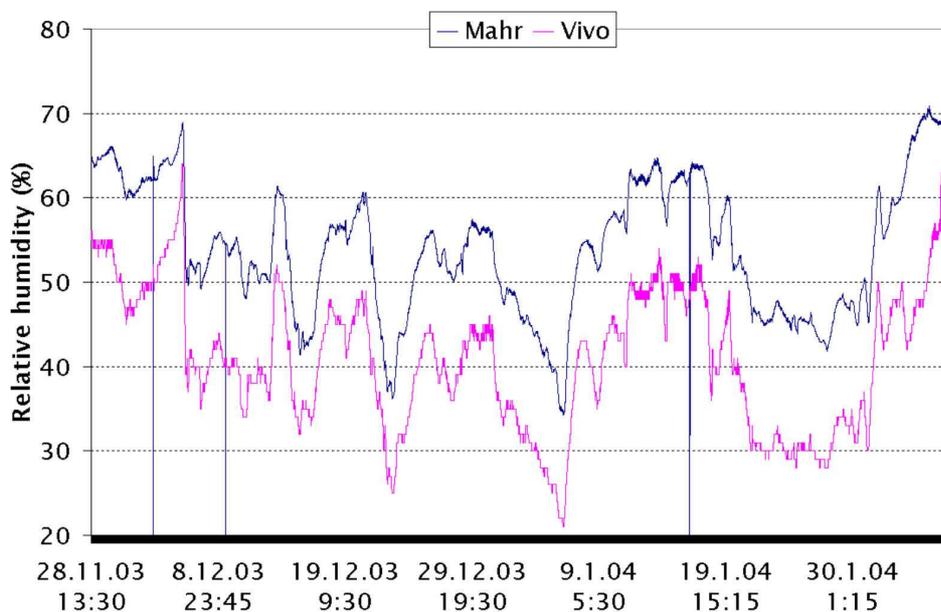
Im instationären Betrieb steigen und fallen die Luft- und empfundenen Temperaturen abhängig vom Sollwert. Die Lufttemperatur in der Raummitte liegt wieder ca. 3 K höher als die empfundene Temperatur im Eingangsbereich. Deutlich erkennbar ist auch die Leistungskurve der Wärmestation. Die Leistung der Wärmestation steigt sprunghaft an, wenn der Sollwert erhöht wird.



**Grafik 26: Kennlinien der Luft- und empfundenen Temperaturen im instationären Betrieb**

Zur Erhaltung der alten Kunstbestände in der Kirche ist es ebenfalls wichtig, die Änderungen der relativen Feuchtigkeit in der Raumluft innerhalb des Sollbereichs zu halten. Die relative Feuchtigkeit sollte je nach Empfindlichkeit der Objekte um höchstens 10% am Tag bzw. 30% pro Jahr schwanken. Generell sollte die relative Feuchtigkeit zwischen 45% und 75% liegen.

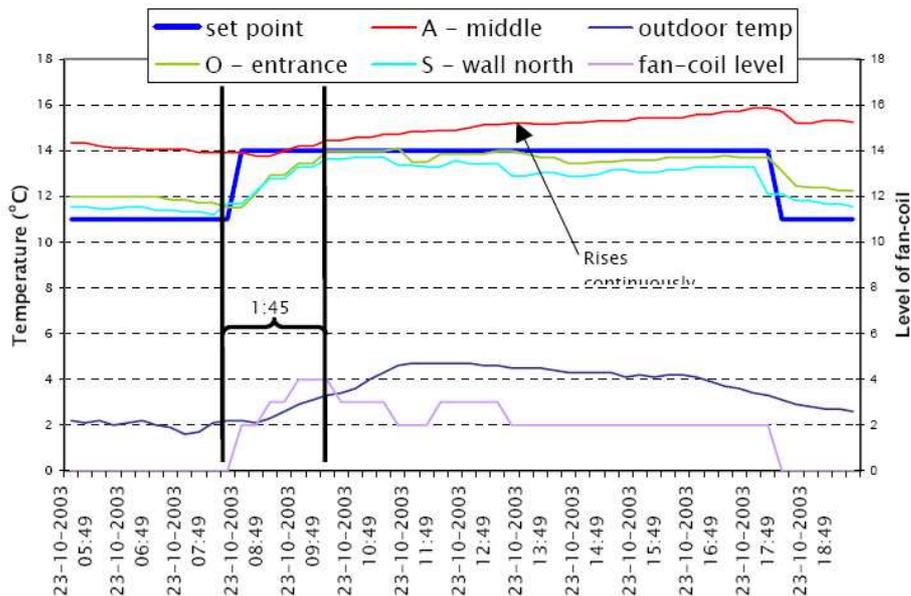
Grafik 27 zeigt, dass die relative Feuchtigkeit in einigen Zeiträumen um mehr als 10% pro Tag schwankt. Die maximale Schwankung beträgt 15% pro Tag. Außerdem wird der Sollbereich nicht eingehalten. Die relative Feuchtigkeit fällt oft unter 45%.



**Grafik 27: Relative Feuchtigkeit in der Raummitte (28.11.2003 – 2.2.2004)**

Grafik 28 zeigt die Kennlinien von empfundener, Luft- und Oberflächentemperaturen bei Änderung des Sollwerts. Die empfundene Temperatur beginnt zu steigen, wenn der Sollwert geändert wird und erreicht diesen nach 1 Stunde und 45 Minuten. Die Oberflä-

chentemperatur der kalten Nordwand steigt ebenfalls an, liegt aber stets um etwa 0,5 K unter der empfundenen Temperatur. Die Lufttemperatur in der Raummitte steigt bei einem Sollwert von 14 °C stetig an.



**Grafik 28: Kennlinien von empfundener, Luft- und Oberflächentemperaturen bei Änderung des Sollwerts**

Das Heizungssystem muss sorgfältig konzipiert werden, damit die Kunstbestände in der Kirche nicht gefährdet werden. Die Änderungsgeschwindigkeit der empfundenen Temperatur muss unter 1 K/h liegen.

In der St.-Marien-Kirche liegt die Änderungsgeschwindigkeit der empfundenen Temperatur im instationären Betrieb deutlich über 1 K/h. In dem in Grafik 28 dargestellten Fall steigt die empfundene Temperatur innerhalb einer Stunde (8:49 - 9:49) um 1,9 K. Wichtig ist es jedoch, darauf hinzuweisen, dass die Lufttemperatur – gemessen an den Fühlern für die Steuerung der Heizungsanlage – die geforderten Werte einhält.

## Messung des Kaltluftabfalls an den Fenstern der St. Marien-Kirche

### Zweck der Messungen

Zum besseren Verständnis der Temperatur- und Luftströmungsverhältnisse in beheizten Räumen müssen die Einflüsse kalter Oberflächen, wie sie typischerweise von Fenstern ausgehen, berücksichtigt werden. Dieses Phänomen zeigt sich besonders in Gebäuden mit kalten Oberflächen (Fenstern), die über geringen thermischen Widerstand verfügen oder besonders hoch gebaut sind [And96, Ole02]. Es wurden die Strömungsgeschwindigkeit und die Temperatur entlang der kalten, einfach verglasten Fenster an der Nordwand der St. Marien-Kirche in Wismar gemessen. Die Messungen wurden sowohl ohne als auch mit Strömungsbarrieren aus Pappe durchgeführt. Für beide Messreihen wurde das Zugluftisiko errechnet und verglichen.

## Messverfahren

Die Fallluft von den Fenstern verursacht eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im beheizten Raum und beeinträchtigt die thermische Behaglichkeit der Kirchenbesucher. Daher gilt es, die Auswirkungen der Fallluft von den Fenstern mit Hilfe von Strömungsbarrieren zu verringern. Diese könnten quer über den Fallluftstrom an den Fenstern angebracht werden. So wird der Luftstrom unterbrochen und die kalte Luft vermischt sich mit der Raumluft. Die Effektivität der Barrieren hängt von deren Breite und ihrem vertikalen Abstand zueinander ab. Zur Berechnung der für eine effektive Abschirmung benötigten Barrierebreite kann folgende Formel herangezogen werden [And96]:

$$\delta = 0,11 * h^{0,7} * ( |t_{\text{raum}} - t_{\text{oberfläche}}| )^{-0,1} \quad [\text{m}] \quad [1]$$

wobei:

$\delta$  = Breite der Barriere

$h$  = vertikaler Abstand zwischen zwei Barrieren [m]

$t_{\text{raum}}$  = Temperatur der Raumluft [K]

$t_{\text{oberfläche}}$  = Temperatur der kalten Oberfläche [K]

Die maximale Luftgeschwindigkeit entlang der kalten Oberfläche kann folgendermaßen errechnet werden [12]:

$$v_{\text{max}} = 0,07 ( |t_{\text{raum}} - t_{\text{oberfläche}}| * h )^{0,5} \quad [\text{m/s}], \quad [2]$$

Die mittlere Luftgeschwindigkeit entlang der kalten Oberfläche ergibt sich aus:

$$v_{\text{mittel}} = 0,0019 ( |t_{\text{raum}} - t_{\text{oberfläche}}| * h )^{0,5} \quad [\text{m/s}]. \quad [3]$$

Aus den Messwerten von Lufttemperatur, mittlerer Luftgeschwindigkeit und Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit wurde das Zugluftrisiko (Draught Rate - DR) abgeleitet. Zugluft führt lokal zu einer unerwünschten Kühlung des Körpers durch eine Luftströmung. Das Zugluftrisiko (DR) wird definiert als vorhergesagter Prozentsatz von Menschen, die sich durch Zugluft in ihrer thermischen Behaglichkeit eingeschränkt fühlen. Es wird nach folgender Formel berechnet (ISO 7730):

$$\text{DR} = (34 - t_a) * (v_a - 0,05)^{0,62} * (3,14 + 0,37 * \text{SD} * v_a) \quad [\%] \quad [4]$$

wobei:  $t_a$  – die lokale Lufttemperatur [°C];

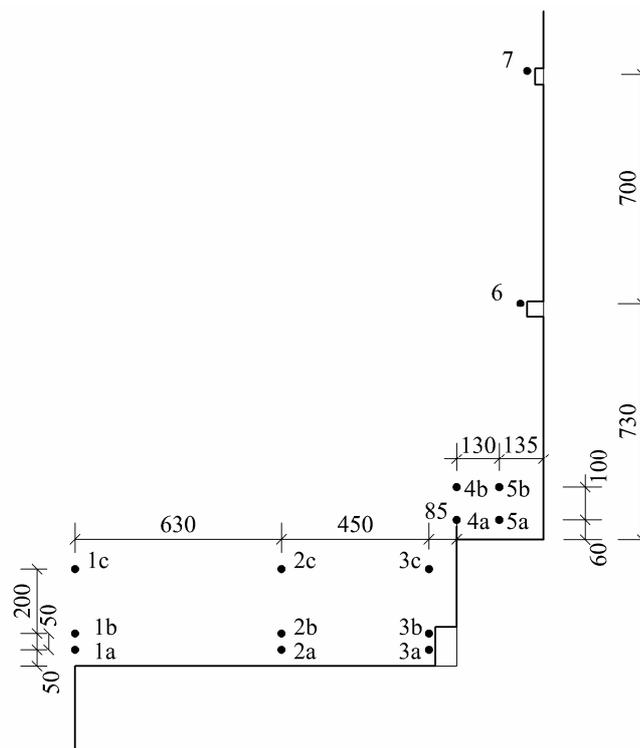
$v_a$  – die lokale mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s];

SD – der lokale Turbulenzgrad [%], definiert als Verhältnis von Standardabweichung der lokalen Luftgeschwindigkeit und lokaler mittlerer Luftgeschwindigkeit.

Zur Messung der Temperaturen und Geschwindigkeiten wurde ein B&K 1213 Indoor Climate Analyser verwendet.

## Messbereich

Die Messungen wurden an dem 8,5 Meter hohen, einfach verglasten Fenster vorgenommen und erfolgten an 15 verschiedenen Positionen nahe an der Unterkante des Fensters (Grafik 29). Nach Abschluss der Messungen an diesen 15 Positionen wurden drei Strömungsbarrieren aus Pappe am Fenster angebracht, das so in vier Abschnitte unterteilt wurde. Die 0,25 m breiten Barrieren wurden in einem Abstand von 2,15 m zueinander montiert (Bild 8). Anschließend wurden die Messungen an den gleichen Positionen wiederholt.



**Grafik 29:** Position der 15 Messpunkte nahe der Fensterunterkante



**Bild 8:** Windabweiser am Fenster der St.-Marien-Kirche in Wismar

## Messergebnisse

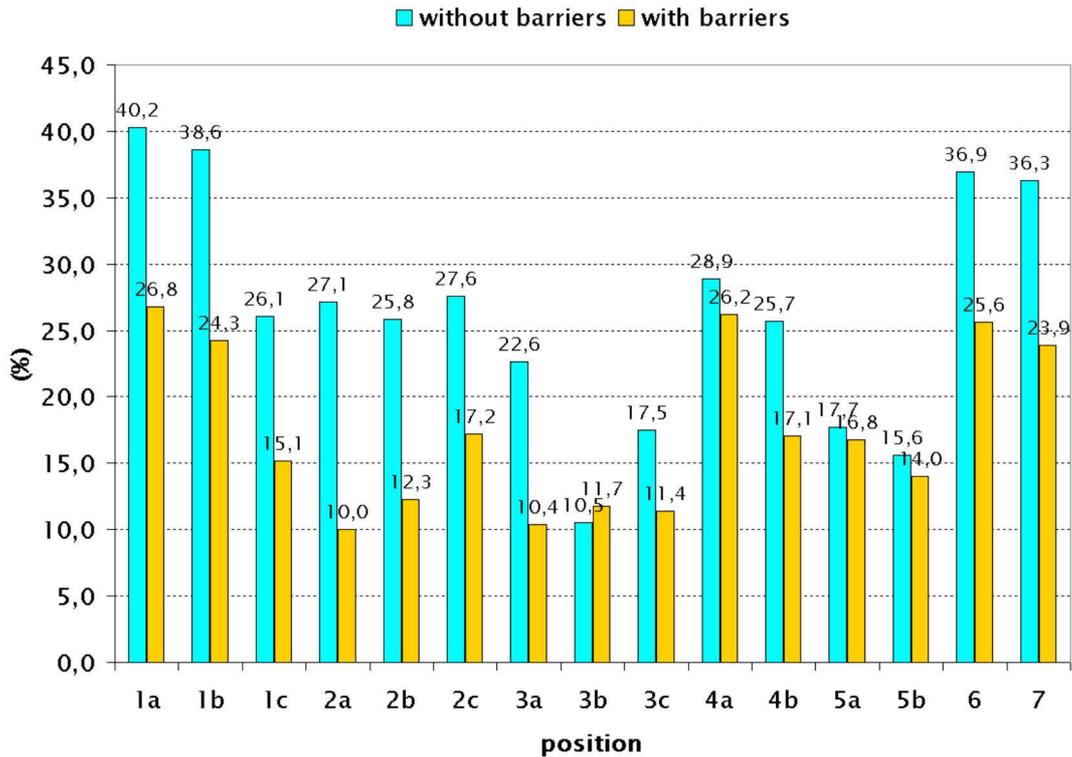
Die Messungen wurden am 25. Februar 2004 vorgenommen. An jedem Messpunkt wurde mindestens drei Minuten lang gemessen.

## Ergebnisse

Die Messergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Tabelle enthält auch Angaben zum Zugluftrisiko für die Ergebnisse der Messungen mit und ohne Pappbarrieren. Diese Risikowerte werden gegenübergestellt. Der Vergleich der Zugluftrisikowerte ist ebenfalls dargestellt.

**Tabelle 1: Aufstellung von Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Standardabweichungen an den 15 Messpunkten nahe der Fensterunterkante sowie Zugluftrisikowerte und deren Veränderungen**

position	without barriers				with barriers				DR difference (%)	change of DR (%)
	temperature (°C)	air velocity (m/s)		DR (%)	temperature (°C)	air velocity (m/s)		DR (%)		
		mean value	standard deviation			mean value	standard deviation			
1a	12,9	0,49	0,09	40,2	14	0,3	0,06	26,8	-13,5	-33,5
1b	13,5	0,48	0,11	38,6	14,4	0,27	0,07	24,3	-14,4	-37,2
1c	14,6	0,3	0,09	26,1	15,2	0,16	0,07	15,1	-10,9	-41,9
2a	12,8	0,28	0,12	27,1	13,7	0,1	0,06	10,0	-17,1	-63,1
2b	13,2	0,27	0,1	25,8	13,9	0,12	0,08	12,3	-13,6	-52,6
2c	14	0,31	0,11	27,6	13,8	0,17	0,09	17,2	-10,4	-37,6
3a	9,9	0,19	0,1	22,6	12,9	0,1	0,06	10,4	-12,2	-54,0
3b	12,7	0,1	0,08	10,5	12,8	0,11	0,07	11,7	1,2	11,3
3c	12,4	0,16	0,11	17,5	13,4	0,11	0,05	11,4	-6,1	-35,0
4a	13,5	0,32	0,09	28,9	12,8	0,27	0,06	26,2	-2,7	-9,2
4b	13,9	0,28	0,1	25,7	13,9	0,17	0,07	17,1	-8,6	-33,4
5a	13,2	0,17	0,07	17,7	13,1	0,16	0,05	16,8	-0,9	-5,0
5b	13,5	0,15	0,07	15,6	14,3	0,14	0,05	14,0	-1,6	-10,2
6	14,2	0,47	0,14	36,9	14,5	0,29	0,12	25,6	-11,3	-30,5
7	14,2	0,46	0,12	36,3	14,8	0,27	0,12	23,9	-12,4	-34,1



**Grafik 30: Vergleich der Zuglufttrisikowerte an den 15 Messpunkten nahe der Fensterunterkante**

Tabelle 2 zeigt die maximale Luftgeschwindigkeit entlang der kalten Oberfläche (Fenster) und die mittlere Luftgeschwindigkeit entlang der kalten Oberfläche mit und ohne Pappbarrieren.

**Tabelle 2: Maximale und mittlere Luftgeschwindigkeit entlang des Fensters.**

	without barriers	using barriers with distance of 2.15m
The maximum air velocity along the cold surface (m/s)	0,645	0,325
Mean air velocity along the cold surface (m/s)	0,018	0,009

Es wurde außerdem ein Rauchtest mit einem Rauchrohr durchgeführt. Die Strömung der kalten Luft ist in Bild 9 zu sehen.



**Bild 9: Rauchtest des Kaltluftabfalls entlang des Fensters in der St.-Marien-Kirche**

## **Folgerungen**

Die Messergebnisse zeigen einen Rückgang der Luftgeschwindigkeit durch den Einsatz von "Windschilden".

Es sollte aufgrund zwischenzeitlich vorgenommener weiterer Untersuchungen, die auf den vorliegenden Arbeiten aufbauen, der Einfluss von zusätzlich angebrachten Wärmequellen an der Fensterbank auf experimenteller Basis untersucht werden.

## **Erfassung und Auswertung der Betriebsparameter**

von Dipl.-Ing. J. Reinecke, Fa. Theod. Mahr & Söhne, Aachen

### **Anlagentechnik (Heizungsanlage)**

In der Innenstadt von Wismar liegt die Marienkirche, von der nur noch die Turmräume erhalten sind. Diese wurden in den vergangenen Jahren saniert und für Ausstellungszwecke hergerichtet. In diesem Zuge wurde eine Warmwasser-Warmluft-Heizung kombiniert mit einer Warmwasser-Fußbodenheizung in den drei Turmräumen installiert.

In jedem Turmraum ist je eine Mahrcalor®-Wärmestation Type SC 50 installiert. Hinzu kommt eine Warmwasser Fußbodenheizung, welche –soweit möglich- den Boden vollflächig bedeckt.

Als Regelung ist hier die mikroprozessorgesteuerte Regelung Type TFR-2 der Fa. MAHR im Einsatz.

In den Räumen ist somit die Kombination aus einer Luftheizungsanlage mit einer flächigen Strahlungsheizung, der Fußbodenheizung, installiert.

### **Messtechnik**

Die installierte Regelungstechnik bietet die Möglichkeit die angeschlossenen Messfühler und weitere interne Daten über eine Datenerfassung mitzuprotokollieren. Daneben wurde zu reinen Messzwecken eine zweite TFR-2 im Nordraum aufgebaut.

An beide Messwerterfassungssysteme können je bis zu 12 Fühler angeschlossen werden.

Zusätzlich wurde am Gaszähler ein Datenlogger installiert, welcher den Gasverbrauch in 15 Minuten Intervallen erfasste.

### **Lage der Mess-Sensoren**

Die Lage der Messfühler wurde auf einem Grundrissplan eingezeichnet, welcher allen Projektbeteiligten zur Verfügung steht und die genaue Lage der Sensoren verdeutlicht.

## **Betriebsparameter während der Messperiode**

Um für die weiteren Auswertungen möglichst zweckmäßige Daten zu sammeln, wurden verschiedene Temperaturen in wechselnder Abfolge in den Räumen realisiert.

Zu Beginn der Aufzeichnungen wurde zunächst der normale Betrieb der Heizungsanlage aufgezeichnet. Hier waren tägliche Nutzungszeiten in allen drei Turmräumen meist von 10-18 Uhr gewünscht und an der Regelungstechnik einprogrammiert. Während der Nicht-Nutzungszeiten waren hier 11°C und während der Nutzungszeiten 14°C eingestellt. Im Mittelraum lag das gewünschte Temperaturniveau während der Nutzung mit 16°C höher und die eingestellte Grundtemperatur mit 10°C niedriger.

Dieser Tageszyklus wurde Mitte November 2003 für den Nordraum durch einen Wochenzyklus abgelöst, bei dem zwischen 10°C und 16°C gewechselt wurde.

In den beiden anderen Räumen wurde für den Rest der Aufzeichnungen nur eine Grundtemperatur von 10°C gehalten.

Nach dem Wochenzyklus folgten im Nordraum eine Periode mit hohen Temperaturen von 18°C und eine weitere Periode von 11 Tagen mit konstant 14°C.

Zum Abschluss der Messungen wurde ein für evangelische Kirchen üblicher Wochenzyklus mit zwei Nutzungszeiten in der Woche einprogrammiert. Hierbei war eine Grundtemperatur von 12°C außerhalb der Nutzungszeiten zu halten und zur Nutzung sollte der Nordraum auf 16°C erwärmt werden.

## **Messergebnisse**

Insgesamt liegen Messdaten der TFR-2 Erfassungssysteme vom 09.10.2003 17:00 bis 24.03.2004 07:45 vor.

Danach wurde über die fest installierte Regelungstechnik im Zeitraum vom 24.03.2004 07:45 bis 22.09.2004 10:56 weiter erfasst.

An der mobilen TFR-2 wurden in dieser Zeit 138.727 einzelne Datenpunkte aufgezeichnet und für weitere Auswertungen zur Verfügung gestellt.

Der längere Zeitraum der Messdauer an der fest installierten TFR-2 ergibt sogar 653.904 einzelne Datenpunkte welche aufbereitet und zur Verfügung gestellt wurden.

Die Messergebnisse der Gasverbrauchserfassung reichen vom 08.12.2003 15:30 bis 10.12.2004 10:27.

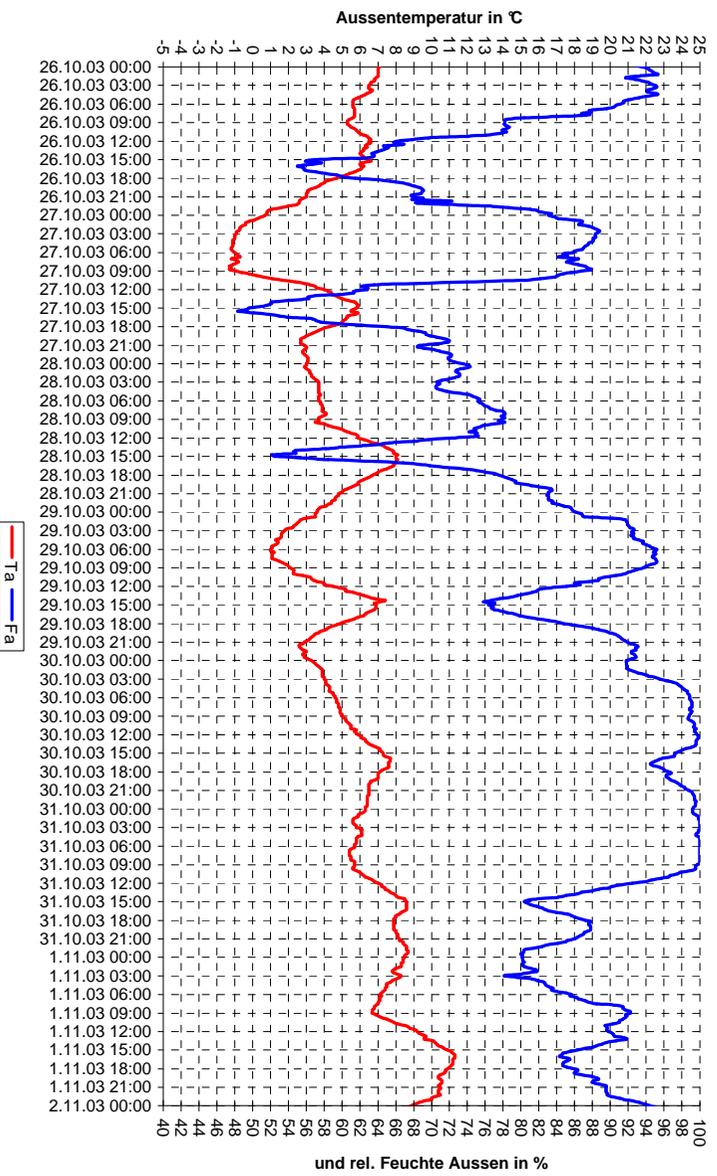
Wie bei allen Messdaten wurden hier alle 15-Minuten Werte erfasst. Es ergeben sich alleine für die Gasverbrauchsmessung 35.896 Zwischenwerte.

Insgesamt stehen somit 828.527 einzelne Messergebnisse zur Verfügung.

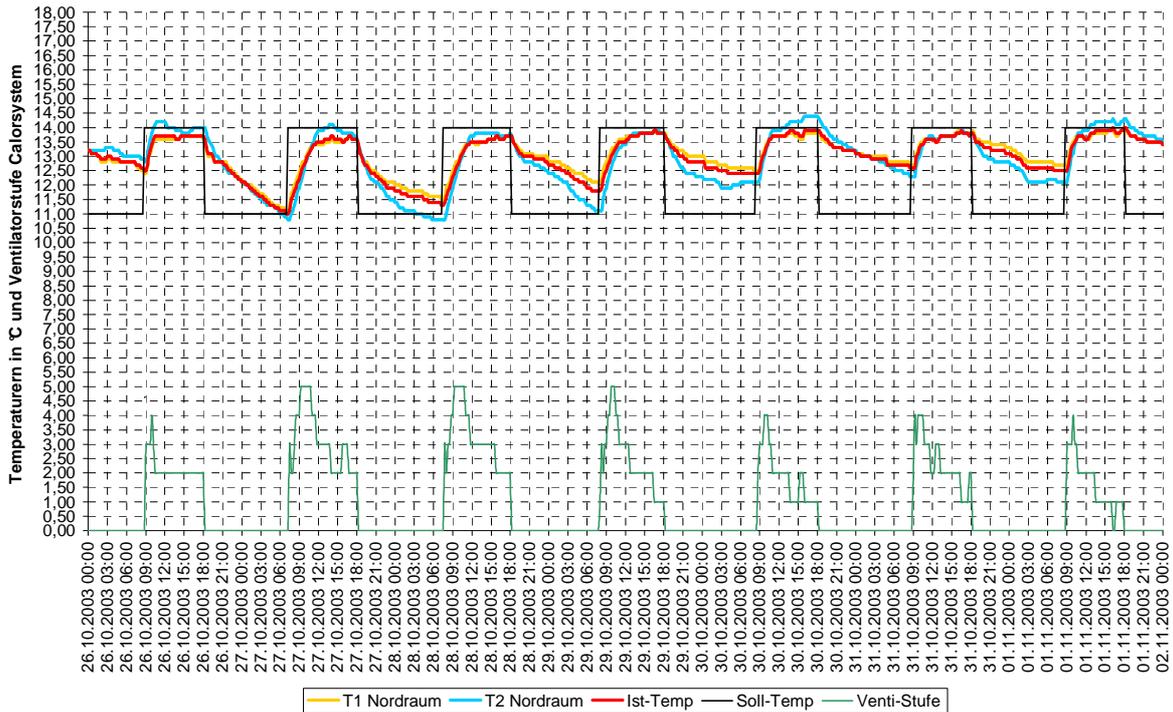
Die aufgenommenen Daten wurden vom spezifischen Datenformat der verwendeten Messwertfassungen in ein allgemein lesbares Datenformat übertragen und allen Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt.

Die Messwerte zur Außentemperatur und zur Außenfeuchte gehen hierbei als wichtige Grundlage in die Simulationsrechnungen ein. Die weiteren Daten dienen der Überprüfung der erstellten Computersimulations-Modelle.

Die wichtigsten Daten wurden darüber hinaus in Übersichtsdiagrammen aufgearbeitet und standen daher unmittelbar für weitere Überlegungen und Entscheidungen bei den Besprechungen zur Verfügung.

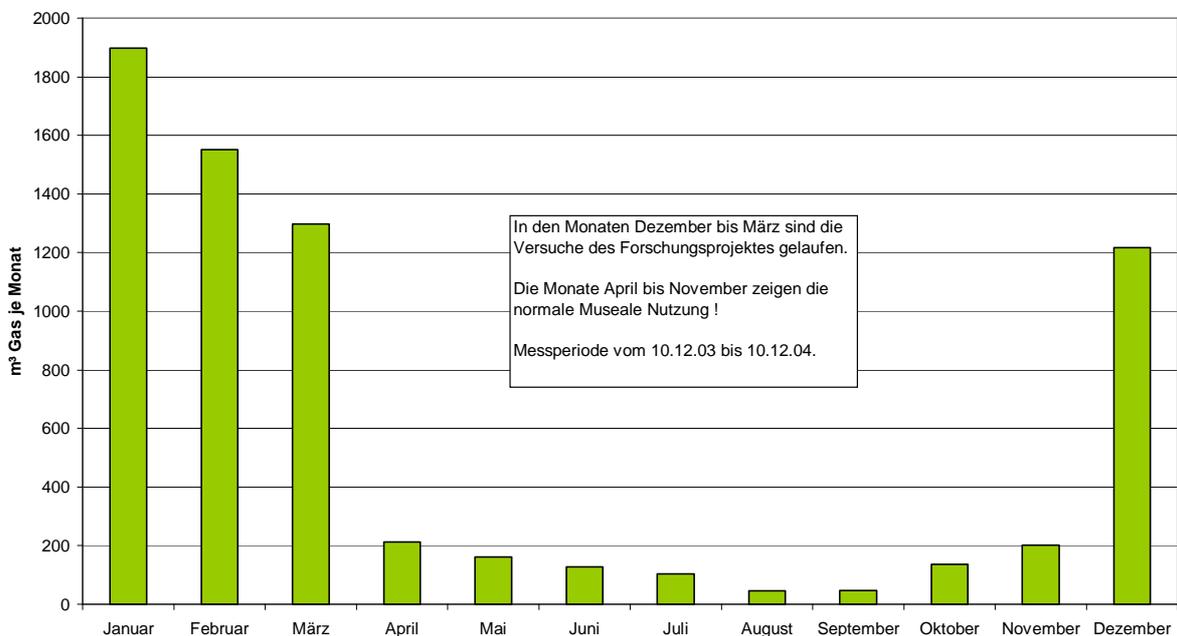


Grafik 31: Beispiel für die Diagramme zu den äußeren Verhältnissen



**Grafik 32: Beispiel der erstellten Diagramme für den Nordraum**

Für den Gasverbrauch wurde eine Monatsauswertung erstellt, deren Werte in das folgende Diagramm eingeflossen sind.



**Grafik 33: Gasverbrauch Marientürme Wismar (Messwerte), Gesamtsumme 7.000m³/a**

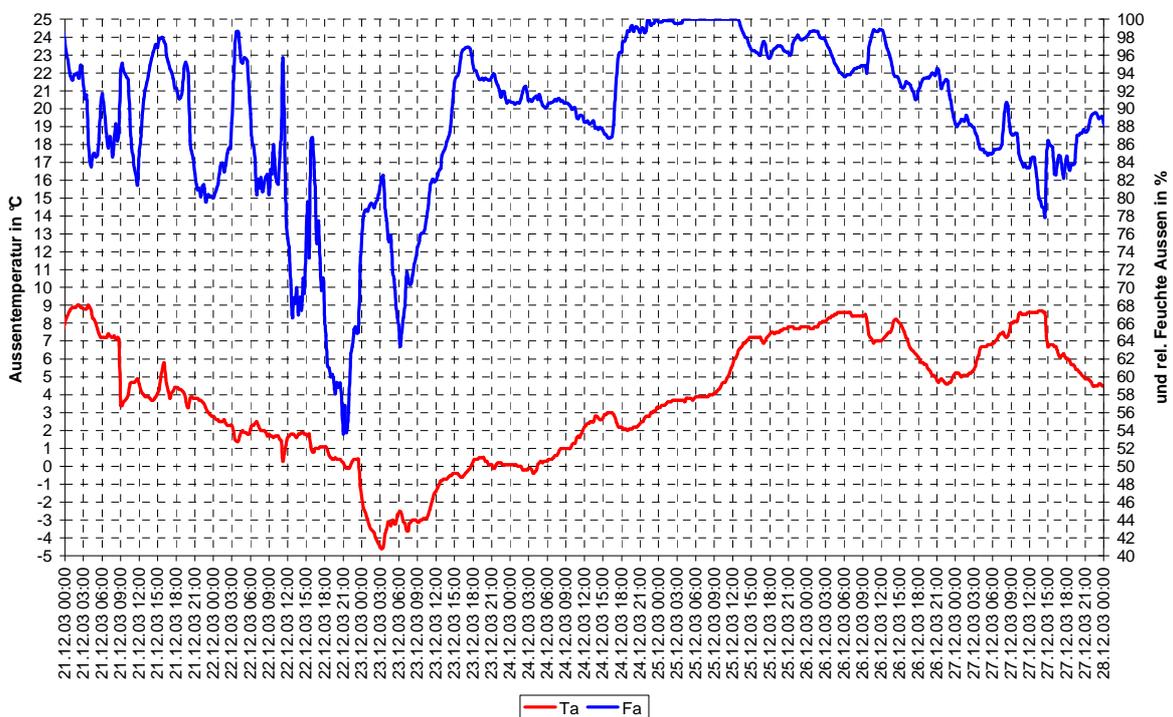
Nach den Messungen am Gaszähler ergab sich über den Zeitraum eines Jahres vom 10.12.03 bis zum 10.12.04 ein Gasverbrauch an den Marientürmen von 7.000 m³ Gas. Aus den aufgenommenen Daten sind Rückschlüsse auch auf den aktuellen Wärmebe-

darf des Nordraumes möglich. Dies ist sehr interessant, da im Forschungsprojekt mit verschiedenen Modellen der Wärmebedarf des Raumes ermittelt wurde.

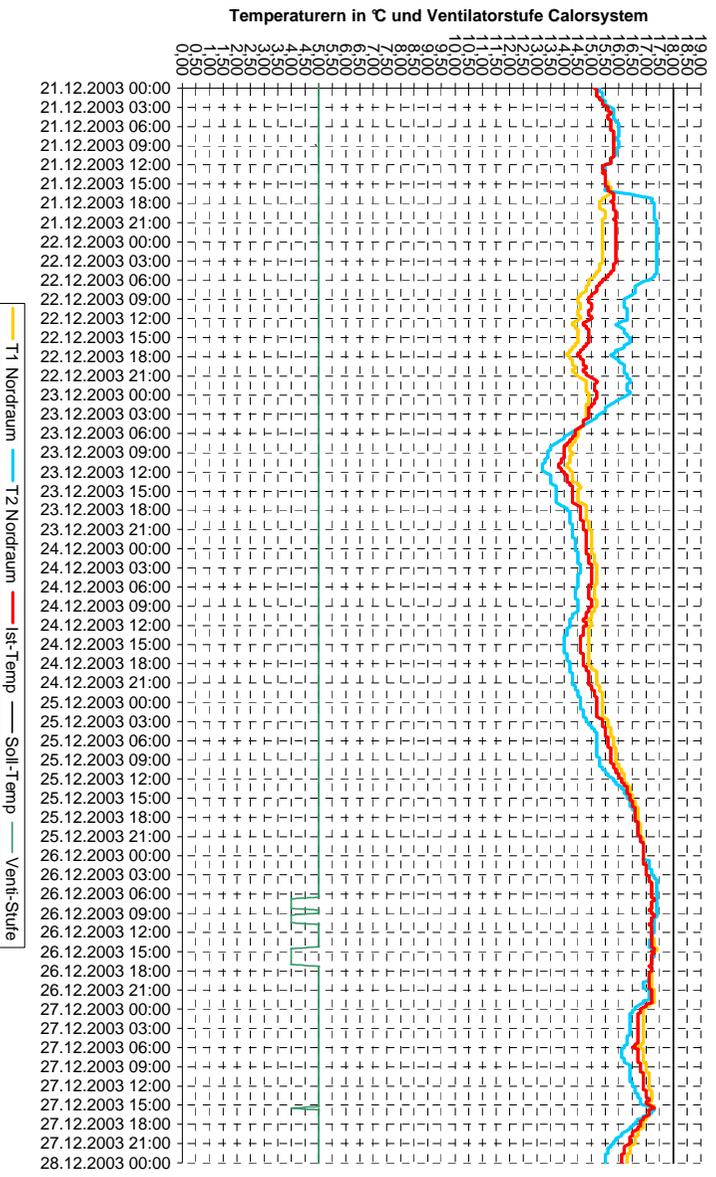
Am 23.12.2003 herrschten von 3 Uhr Morgens bis 12 Uhr mittags Außentemperaturen um - 4°C. Die Solltemperatur war zu diesem Zeitpunkt mit 18°C sehr hoch eingestellt und konnte nicht erreicht werden. Obwohl die Heizungsanlage bei voller Leistung arbeitete konnte die Raumtemperatur nicht gehalten werden und sank von 14,5 auf 14°C ab. Daraus lässt sich Schlussfolgern, dass mit der installierten Heizungstechnik unter diesen Bedingungen gerade mal die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste des Raumes ausgeglichen werden konnten. Die Warmluftheizung lief zu dieser Zeit in der höchsten Betriebsstufe und brachte somit 31,3 kW Heizleistung in den Raum. Hinzu kommt noch die Fußbodenheizung mit ca. 4 kW Heizleistung.

Der aktuelle Wärmebedarf des Raumes war zu diesem Zeitpunkt somit ca. 35,3 kW. Die Diagramme auf der folgenden Seite zeigen diesen Zeitraum.

Die Erklärung für dieses Betriebsverhalten liegt in der Auslegung der Heizungsanlage. Zugrunde gelegt wurde auf der Basis der Auswertung langjährig durchgeführter Klimawerte eine rechnerische Außentemperatur von  $t_a = - 2 \text{ °C}$  und eine gewünschte Raumtemperatur von  $15 \text{ °C}$ . Die Messdaten zeigen daher, dass die Anlagenbemessung wehr exakt auf den tatsächlichen Wärmebedarf des Raumes zugeschnitten wurde.



**Grafik 34: Außentemperatur und Außenfeuchte KW 52 2003**



**Grafik 35: Raumtemperaturverlauf im Nordraum KW 52 2003**

Ergänzend wurden die Daten genutzt, um die Rezirkulation an den Wärmestationen zu überprüfen, da hier eine Minderleistung des Heizungssystems begründet sein könnte.

Hierfür wurden die Temperaturmesswerte der Raumtemperatur in Relation zum Messwert der Umlufttemperatur gesetzt und dies auf die Betriebsstufen (0=Aus) zurückgeführt. Untersucht wird somit, inwieweit die Umlufttemperatur im Heizgerät von der Raumlufttemperatur abweicht. Ist die Umlufttemperatur deutlich höher als die Raumtemperatur so wäre dies auf angesaugte Warmluft also Rezirkulation am Gerät zurückzuführen.

Die erzielten Ergebnisse dieser Datenauswertung zeigt Tabelle 3.

**Tabelle 3: Datenauswertung bzgl. Rezirkulation an Mahrcalor-Stationen**

**Überprüfung von Rezirkulationseinflüssen an Mahrcalor-Wärmestationen  
Verification of recirculation effects at Mahrcalor Heatstations**

**Auswertung bezogen auf die Raumfühler der Regelungstechnik  
Analysis with regard to the two temperatursensors of the control system**

Leistungsminderung (reduce of heatoutput)					
15%	10%	11%	9%	8%	8%
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5

**Auswertung bezogen auf den Raumfühler in 1m Höhe in der Raummitte  
Analysis with regard to the temperatursensors in the middle of the room in 1m height**

Leistungsminderung (reduce of heatoutput)					
15%	9%	7%	4%	3%	2%
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5

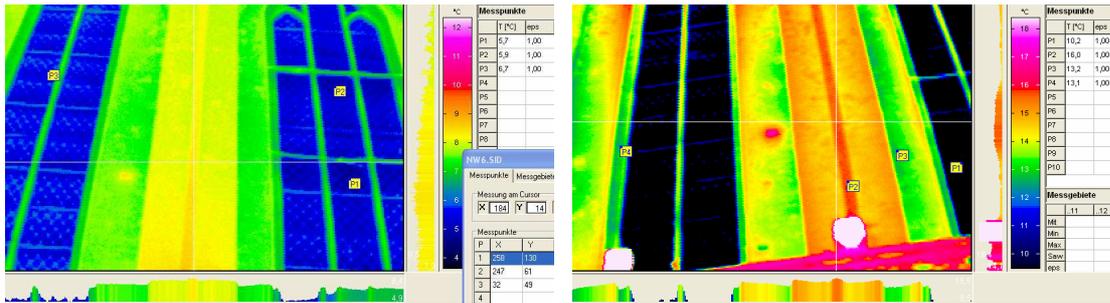
Es zeigt sich, dass der Temperaturunterschied zwischen Raum- und Umlufttemperatur gerade in den größeren Stufen sehr gering ausfällt. Bezogen auf die Raumfühler der Regelungstechnik, ergibt sich eine theoretische Leistungsminderung von 8-10%. Diese Fühler unterliegen aber durch die Montage an der Wand immer auch einem Wandeinfluss und messen daher geringere Werte als frei im Raum angebrachte Fühler. Der bessere Vergleich ist somit im unteren Teil der Tabelle aufgeführt, in dem die Umlufttemperatur mit dem nächsten, frei in der Luft hängenden Raumtemperaturfühler verglichen wird.

Hier liegen die aus dieser Berechnung ermittelten Leistungseinbußen nur noch bei 2% in der großen Stufe, welche die maximale Leistung erbringt.

**Messungen der Raumlufthtemperaturen unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturschichtung**

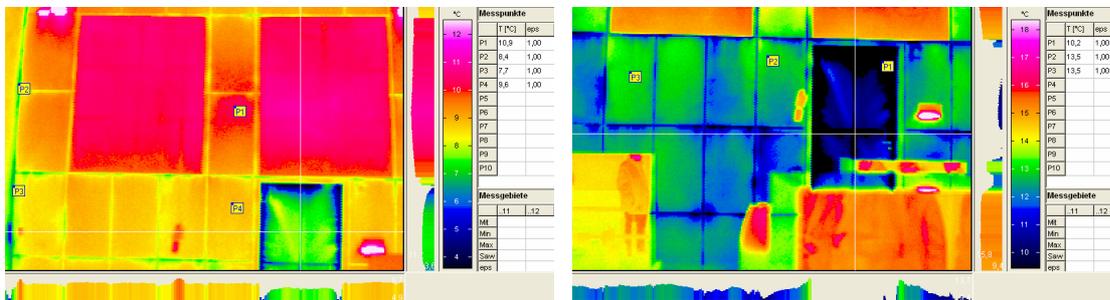
von Dipl.-Ing. R. Heimsch, Ingenieurbüro Rainer Heimsch, Rastede

Um die gemessenen und berechneten Temperatur- und Strömungsverläufe in der Kirche zusätzlich bestätigen zu können, wurden umfangreiche Thermografie-Aufnahmen [MW04-1, MW04-2] sowie zusätzliche Temperaturmessungen zur Überprüfung der Temperaturverteilung und -schichtung im Raum durchgeführt. Die folgenden thermografischen Aufnahmen zeigen jeweils links einen Ausschnitt der Nordkapelle unmittelbar nach Beginn der Aufheizung und rechts zum Vergleich (ungefähr) denselben Ausschnitt nach ca. 12 Stunden Aufheizbetrieb (Achtung: Temperatur-/Farbskala ist unterschiedlich!).



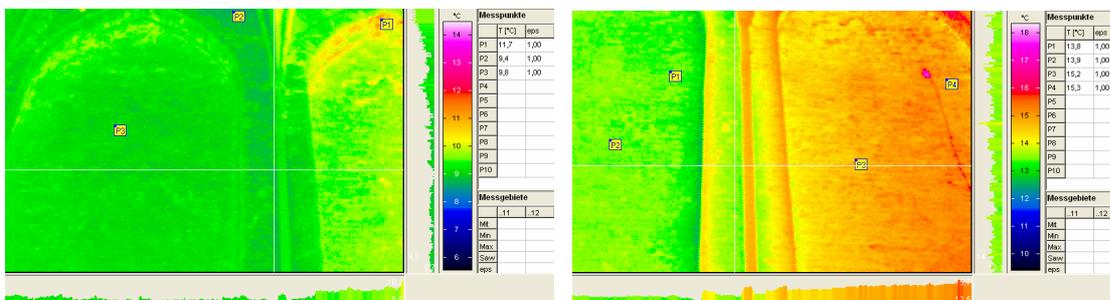
**Bild 10: Wand Nord mittig**

In Bild 10 wird deutlich, wie stark die in den Raum hineinragenden Rippen zwischen den Fenstern von der Raumlufttemperatur beeinflusst werden.



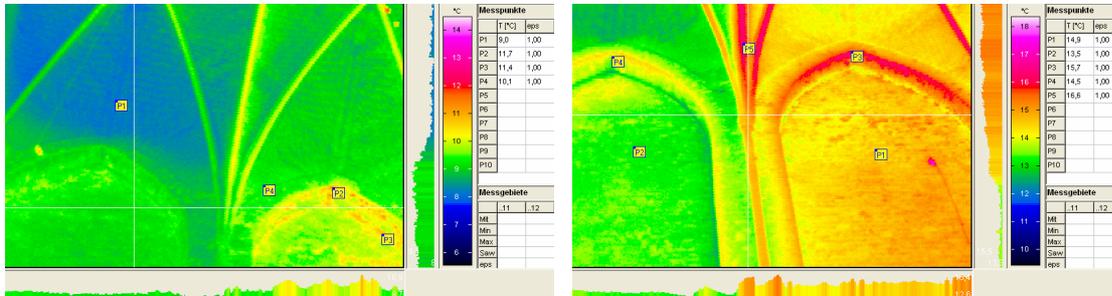
**Bild 11: Wand Ost – Türbereich**

Bild 11 (links) zeigt zwei Schautafeln, die an der Ostwand befestigt sind und deutlich höhere Temperaturen aufweisen als die gut isolierte Ostwand selbst. Deutlich zu erkennen ist auch die wesentlich kältere Tür. Vergleicht man die Temperaturen an den Schautafeln mit z. B. der in Bild 12 dargestellten Wand Süd oben, das zeitgleich aufgenommen wurde, kann man feststellen, wie stark z. B. im Raum befindliche wertvolle Kunstgegenstände Temperatureinflüssen ausgesetzt sind. Dies erklärt möglicherweise häufig aufgetretene Schäden an Kunstobjekten in Kirchen mit niedrigen Lufttemperaturen, bei denen üblicherweise keine Schäden zu erwarten wären.



**Bild 12: Wand Süd oben**

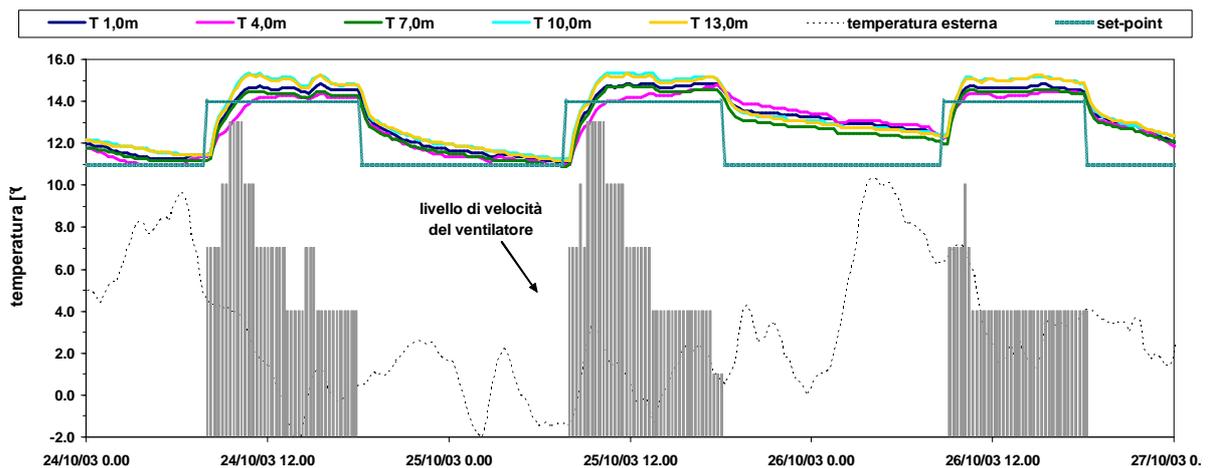
Besonders wichtig ist jedoch die Tatsache hervorzuheben, dass die Erwärmung der Wandoberflächen sehr ungleichmäßig abläuft. Dies bestätigt zusätzlich die Ergebnisse der Simulation und hat wichtige Konsequenzen für die Planung der Anordnung von Wärmequellen in instationär beheizten Gebäuden schwerer Bauart, z. B. Kirchen.



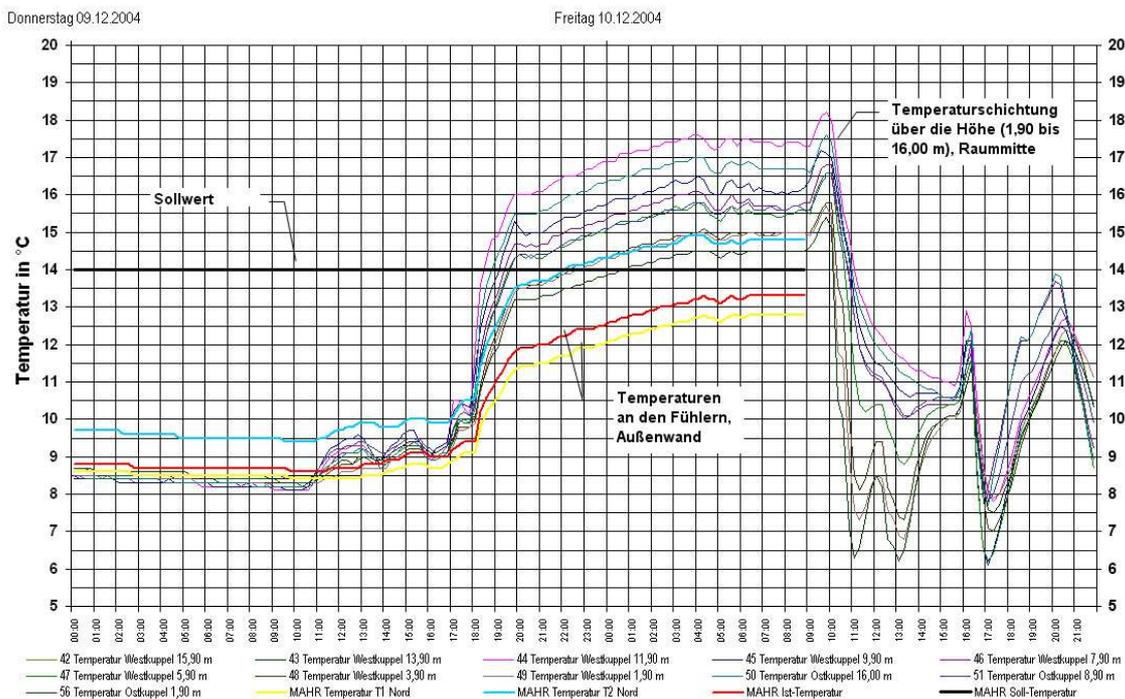
**Bild 13: Wand Süd, Anschluss zum Gewölbe**

Die parallel zu den Thermografie-Aufnahmen durchgeführten Messungen der Raumlufttemperatur und relativen Raumluftfeuchte haben zu zusätzlich wichtigen Erkenntnissen für die Anordnung von Temperaturfühlern geführt.

Die in Grafik 36 und 37 aufgetragenen Temperaturen weisen deutliche Schichtungen über die Höhe der Kirche auf, die von den Temperaturfühlern der Regeltechnik nicht ausreichend erfasst wurden. Dies wird deutlich, wenn man die Temperaturverläufe in Grafik 37 betrachtet, in dem die Messwerte der Fühler aufgetragen sind.



**Grafik 36: Temperaturverlauf 24.-27.10.2003 [Car05]**



**Grafik 37: Aufheizvorgang am 09./10.12.2004**

Während die Temperaturen an den beiden Fühlern, die für die Regelung verantwortlich sind, die vorgegebenen Werte ohne wesentliche Abweichung einzuhalten scheinen, zeigt der Verlauf der Temperaturen über die Raumhöhe in der Raummitte Abweichungen bis zu 4 Kelvin vom Sollwert. Vorgegeben war bei diesem Messzyklus eine Nutzungstemperatur von 14 °C.

### Abweichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der dynamischen Gebäudesimulation und der Thermografien zeigten einen deutlichen Unterschied zu den Ergebnissen der „konventionell“ angebrachten Raumfühler für Temperatur und relative Raumlufffeuchte an. Der Abgleich mit den zusätzlich durchgeführten raumklimatischen Messungen hat gezeigt, dass bei der Anordnung der Raumfühler neue Wege beschritten werden müssen.

### Probleme

Bei der Durchführung der Messungen in St. Marien wurde festgestellt, dass der Einfluss der bauseits vorhandenen erheblichen Undichtigkeiten am Baukörper (Fenster, Türen) die Messungen bei den „Windabweisern“ erheblich beeinflusst hatten. Nach Abdichtung der Leckagen konnten die Messungen positiv abgeschlossen werden.

### Ökologische Bewertung

Die Ergebnisse der dynamischen Gebäudesimulation, gestützt auf die Auswertung der Messungen in St. Marien, haben ergeben, dass für den Betrieb von Heizungsanlagen Parameter für Grund- und Nutzungstemperaturen entwickelt werden konnten, die einen

positiven Einfluss auf die Reduzierung des Energieeinsatzes in temporär genutzten Gebäuden haben. Entsprechendes gilt für die erzielten Ergebnisse bei dem Einsatz von „Windabweisern“ und dem Problemkreis Wärmedämmung von Decken/Dächern.

### **Technologische Bewertung**

Durch den durchgeführten Vergleich der theoretischen und messtechnisch abgeglichenen Heizlast konnte ein optimales Temperaturniveau für den Betrieb und die Nutzung von temporär genutzten Gebäuden ermittelt werden. Dies hat deutliche Auswirkungen auf die künftige Auslegung von Heizungs-/Temperiersystemen.

### **Ökonomische Bewertung**

Mit den erzielten Ergebnissen ist es möglich, künftig Heizsysteme zu bestimmen, die eine deutliche Reduzierung der Heizlast, und damit der durchzuführenden Installationen bewirken. Dies führt neben der Reduzierung der Investitionskosten auch zu deutlich geringeren Eingriffen in die meist historische Bausubstanz.

### **Umweltentlastung**

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben aufgezeigt, dass es durch die gewählten Betriebsparameter zu erheblichen Reduzierungen des Energieeinsatzes und damit zur Reduzierung der Umweltbelastung bei der Beheizung/Temperierung von temporär genutzten Gebäuden bis zu 25% kommen kann.

### **Verbreitung der Ergebnisse**

Das wichtigste Mittel zur Verbreitung der Ergebnisse dieses Projekts und der anderen im Rahmen des Förderschwerpunktes geförderten Projekte ist der geplante Leitfaden. Das Projekt war Teil des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unterstützten Förderschwerpunktes „Erhalt temporär genutzter Gebäude“, der zum Ziel hat, einen Leitfaden für den Umgang mit historischer Bausubstanz in Planungsprozess und Nutzung herauszugeben.

Dr. Michele De Carli hat Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf einem internationalen Workshop zum Thema „Indoor environment quality in museums“ am 07.05.2005 in Rom vorgestellt. Der Titel seines Vortrags lautete „Neuere Entwicklungen bei der Beheizung historischer Kirchen: eine Fallstudie“.

Projektleiter Rainer Heimsch hat mehrfach die Forschungsergebnisse des Projekts vorgetragen. U. a. auf der XXXIII. Fortbildungsveranstaltung der Evangelischen Akademie Loccum am 20. und 21.03.2006 berichtete er über die „Energiesparende Nutzung von Kirchenheizungen unter Berücksichtigung von bauphysikalischen Rahmenbedingungen“.

Die Ergebnisse werden in das Kirchliche Bauhandbuch über energiesparendes, umweltschonendes Bauen in der Evangelischen Kirche Deutschlands aufgenommen.

## Fazit

- Die Ergebnisse der Vergleiche von durchgeführten Messungen und Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass durch die angewandten Rechenverfahren die Planung von Heizungs-/Temperieranlagen in instationär beheizten schweren Gebäuden, z. B. Kirchen, sehr gut unterstützt werden kann. Die Abweichungen zwischen Messergebnissen und Simulationen lagen  $< 10\%$ .
- Die Luftführung/Wärmeverteilung muss bei jeder Kirche in Abhängigkeit von Außenwand zu Fensterflächen im Einzelfall gelöst werden. Durch Simulation kann eine deutliche Reduzierung des Zugluftrisikos (draft risk) erreicht werden.
- Die Dämmung von Decken in historischen Kirchen erbringt eine Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperaturen um ca. 10%. Dies kann im Einzelfall Taupunktunterschreitungen verhindern.
- Die Dämmung von Decken in historischen Kirchen erbringt eine Reduzierung des Energieverbrauchs von 7-10%. Die Bewertung der einzelnen Nutzungsvarianten hat ergeben, dass eine Raumlufttemperatur von 14 °C dauernd günstiger ist als z. B. 10 °C Grundtemperatur und 16 °C Nutzungstemperatur. Bei 10 °C als Grundtemperatur und 16 °C nur am Wochenende ist ca. 25% günstiger als 14 °C dauernd. Die empfundene/operative Temperatur liegt bei 10 °C/16 °C deutlich niedriger als bei 14 °C dauernd.
- Die konventionelle Anordnung der Temperaturfühler führt in der Regel zu zu hohen Lufttemperaturen in der Kirchenmitte. Neue Strategien für die Anordnung, z. B. zusätzliche Fühler in der Raummitte höhenversetzt, müssen entwickelt werden.
- Der Einsatz von Windabweisern an einfach verglasten hohen Fenstern trägt deutlich zur Reduzierung von Zugserscheinungen und damit zur Erhöhung der Behaglichkeit in den Räumen bei. Werden Windabweiser durch zusätzliche Wärmequellen an den Fensterbrüstungen unterstützt, wird dieser Effekt deutlich erhöht.
- Der Wärmebedarf von historischen Kirchen kann nicht mit der neuen DIN EN 12831 berechnet werden. Die Anwendung aus der alten DIN 4701 bringt deutlich bessere Ergebnisse.

## Weiterer Forschungsbedarf

- Zusätzliche Felduntersuchungen für den Einsatz von Windabweisern an Fenstern mit zusätzlichen Wärmequellen zur Reduzierung von Zuglufterscheinungen mit dem Effekt der Energieeinsparung
- Weiterentwicklung der Simulationsmethoden basierend auf der Konkretisierung der Berechnung von Modell- und realen Kirchbauten zur Optimierung der Bestimmung der Heizlast, Raumluftströmungen und Temperaturverteilung

- Zusätzliche Feldversuche mit Einsatz unterschiedlich platzierter Fühler zur Optimierung der Fühleranordnung gestützt auf Simulationsberechnungen, Thermografien und Messungen
- Zusätzliche Felduntersuchungen zur Messung von Energieverbräuchen bei unterschiedlichen Nutzungskonzepten und deren Einfluss auf den Feuchtehaushalt historischer Bauten

## Literaturverzeichnis

- [And96] ANDERSEN, K. T.: *Kuldenedfald fra kolde flader*. SBI-Meddeldelse 112, SBI 1996.
- [Bär05] BÄR, S.: *Heizlastberechnung für Kirchen - Ein Vergleich von Rechenergebnissen ermittelt mit DIN 4701, DIN EN 12831 und der Computersimulation (TAS)*. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 2005.
- [BMU02] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU): *BImSchG (Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge - Bundes-Immissionsschutzgesetz)*. BGBl. I Nr. 71 vom 04.10.2002, S. 3830. Bundesanzeiger Verlag, Berlin.
- [Car05] DE CARLI, M. et. al.: *Neuere Entwicklungen bei der Beheizung historischer Kirchen: eine Fallstudie*. Vortrag auf dem Internationalen Workshop "Indoor environment quality in museums", 07.05.2005 in Rom.
- [Che05] CHERKAOUI, H.: *Historische Entwicklung der Wärmebedarfsberechnung und der Heizsysteme bei Kirchen mit dem Ziel einer Empfehlung für die Kirche St. Georgen zu Wismar*. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 2005.
- [EKD94] KONFERENZ DER BAUAMTSLEITER DER EKD (Herausgeber): *Kirchliches Bauhandbuch. Energiesparendes und umweltschonendes Bauen in der evangelischen Kirche*. Evangelischer Presseverband für Westfalen und Lippe e.V., Bielefeld, 1994/1996/2001/2006.
- [Hei02] HEIMSCH, R.: *Energiesparendes Beheizen und Temperieren von historischen Gebäuden*. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 8. Jahrgang, Heft 4, 2002. Reprint. Aedificatio Verlag, Freiburg.
- [Hei03] HEIMSCH, R.: *Planungsgrundsätze für den Erhalt und die Nutzung von historischen Gebäuden unter besonderer Berücksichtigung von Raumtemperierung und Bauphysik*. Vortrag auf dem 25. Internationalen velta kongress 2003. S. 61-68.
- [HG04] HALLA, B., GAJDOS, A.: *Heating of churches*. Master thesis, Technical University of Denmark, 2004.
- [MW04-1] MAINKA, G.-W., WINKLER, H.: *Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar – unmittelbar nach Beginn der Aufheizung (1. Protokoll)*, 09.12.2004.

- [MW04-2] MAINKA, G.-W., WINKLER, H.: *Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar –nach ca. 12 h Aufheizbetrieb (2. Protokoll)*, 10.12.2004.
- [Ole02] OLESEN, B. W.: *Sind "kalte" Fensterflächen heute überhaupt ein Problem für die Behaglichkeit?* Vortrag auf dem 24. Internationalen velta kongress 2002. S. 81-96.
- [Pfe75] PFEIL, A.: *Kirchenheizung und Denkmalschutz*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1975.
- [Sch04] SCHÜßLER, M.: *Optimierung der Heizlast und Erstellung eines Anlagenkonzepts für die Beheizung einer bestehenden Kirche unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit, thermischer Behaglichkeit und Denkmalschutz*. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 2004.

## Anhang

(Anhänge in gesondertem Band)

A 1	1. Protokoll: Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar – unmittelbar nach Beginn der Aufheizung	6
A 2	2. Protokoll: Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar – nach ca. 12 h Aufheizbetrieb	13
A 3	Grundrisse und Schaltschema St. Georgen sowie Grundriss St. Marien	21
	<ul style="list-style-type: none"><li>- Grundriss Kirche St. Georgen</li><li>- Grundriss Dachgeschoss Heizraum St. Georgen</li><li>- Grundriss Kellergeschoss St. Georgen</li><li>- Schaltschema St. Georgen</li><li>- Grundriss Kirche St. Marien</li></ul>	
A 4	Messorte von Fa. Theod. MAHR Söhne GmbH (M), Prof.-Ing. Olesen (O) und Ingenieurbüro Rainer Heimsch (H) in der Nordkapelle von St. Marien (3 D, Grundriss und Schnitt)	26
A 5	Tabelle Messorte und Messzeiträume des Ingenieurbüros Rainer Heimsch (IBH), Messung 1 bis 4	32
A 6	Messung 1 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	33
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 09.10. - 19.11.2003</li><li>- 24. - 27.10.2003</li><li>- Samstag, 25.10.2003</li></ul>	
A 7	Messung 2 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	37
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 19.11. - 30.12.2003</li><li>- 31.12. - 27.01.2004</li></ul>	
A 8	Messung 3 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	40
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 27.01. - 17.02.2004</li><li>- 17. - 25.02.2004</li></ul>	
A 9	Messung 4 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	43
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt, Nordkapelle)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt, nur Temperaturen einschl. Taupunkttemperaturen)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt, nur Temperaturen)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (nur Feuchten)</li><li>- 08.04. - 06.06.2004 (2. Abschnitt, nur 4-Punkt-Logger)</li></ul>	
A 10	Tabelle Messorte und Messzeiträume des Ingenieurbüros Rainer Heimsch (IBH), Messung 5 und 6	50

A 11	Messung 5 (IBH): Temperatur-Feuchte-Diagramme	51
	- 02. - 08.12.2004	
	- 02. - 10.12.2004	
	- 09. - 10.12.2004	
A 12	Messung 6 (IBH): Temperatur-Feuchte-Diagramme	54
	- 09. - 10.12.2004	
	- 09.12.2004	
	- 09.12.2004 (nur Temperaturen)	
	- 09.12.2004 (nur Zu- und Umluft)	

Hansestadt Wismar

**Ermittlung und Validierung von Planungsparametern zur Optimierung von Wärmebedarf, thermischer Behaglichkeit und Regelung für einen energiesparenden und bausubstanzerhaltenden Betrieb temporär genutzter Gebäude mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichenden Feldmessungen am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar**

Anhang

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 20841 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Rainer Heimsch  
Janka Fee Hammer, M.A.

Juli 2007

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>20841</b>	Referat	<b>25</b>	Fördersumme	<b>56.500,00 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	--------------------

<b>Antragstitel</b>	<b>Ermittlung und Validierung von Planungsparametern zur Optimierung von Wärmebedarf, thermischer Behaglichkeit und Regelung für einen energie-sparenden und bausubstanzerhaltenden Betrieb temporär genutzter Gebäude mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichenden Feldmessungen am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar</b>
---------------------	--

<b>Stichworte</b>	Ökobau, Baubestandspflege , Bauphysik , Denkmal , Feuchtschutz
-------------------	--

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>2 Jahre u. 9 Monate</b>	<b>25.06.2003</b>	<b>31.03.2006</b>	

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Hansestadt Wismar Am Markt 1 23966 Wismar
------------------------------	---

Tel.: 0 44 02 / 97 20-0
Fax: 0 44 02 / 97 20-22

Projektleitung: Dipl.-Ing. R. Heimsch
--

Bearbeiterin: J. Hammer, M.A.
----------------------------------

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es, am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar Planungsparameter für temporär genutzte Gebäude schwerer Bauart mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichender Feldmessungen zu ermitteln und zu validieren.

Das Forschungsvorhaben sollte dazu beitragen, vorhandene Grundlagen für die Planung, Dimensionierung und Ausschreibung für die ökologische und ökonomische Temperierung von temporär genutzten Gebäuden zu vertiefen und zu allgemein gültigen Richtlinien weiter zu entwickeln. Die Erkenntnisse werden in einen Leitfaden für den Umgang mit historischer Bausubstanz in Planungsprozess und Nutzung einfließen, den der von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt eingesetzte Beirat „Erhalt und Nutzung temporär genutzter Gebäude“ herausgeben soll.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation wurden Wärmeleistung, Energieverbrauch und Raumklima bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten der beiden Baudenkmäler ermittelt. Die Berechnungen für St. Georgen und St. Marien wurden von Prof.-Ing. Zecchin und Dr. De Carli, Universität Padua, geleitet. Prof. Dr.-Ing. Sommer, Fachhochschule Köln, betreute drei Diplomarbeiten über den Wärmebedarf von temporär genutzten Gebäuden schwerer Bauart sowie die dynamische Gebäudesimulation einer Modellkirche.

Parallel zu den theoretischen Berechnungen wurden von Dipl.-Ing. Reinecke, Fa. Theod. Mahr Söhne GmbH, Aachen, sowie dem Ing.-Büro Rainer Heimsch, Rastede, Feldversuche zur Wärmeversorgung und -verteilung unter Berücksichtigung von Temperatur, Luftfeuchte und Temperaturschichtung in beiden Kirchen durchgeführt. Prof. Dr.-Ing. Olesen, Fa. Wirsbo-Velta Norderstedt/Universität Lyngby, führte Versuche und Messungen mit sog. Windabweisern an den Fenstern von St. Marien durch, um deren Wirkung auf Raumklima und Behaglichkeitsempfinden zu ermitteln. Die Ergebnisse flossen in eine von Prof. Dr.-Ing. Olesen betreute Diplomarbeit über die Beheizung von Kirchen ein. Zur quantitativen und qualitativen Verifizierung der Simulationen und der Messungen wurden von Prof. Dr.-Ing. Mainka und Dipl.-Ing. Winkler von der Universität Rostock, Außenstelle Wismar, Thermografien in der St. Marienkirche im stationären und instationären Betrieb durchgeführt und dokumentiert.

Bei den Versuchsreihen waren das Architekturbüro Angelis & Partner, Oldenburg/Wismar, sowie Herr Dipl.-Architekt Ferdinand, Kirchenbauamt der Hansestadt Wismar, beratend tätig. Die wissenschaftliche Begleitung unter denkmalpflegerischen Gesichtspunkten erfolgte durch Prof. Dr. Kiesow, Deutsche Stiftung Denkmalschutz.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Der Wärmebedarf und Energieeinsatz in diesem Gebäudetypus hängt sehr stark von den gewählten Grund- und Nutzungstemperaturen ab. Der Energieeinsatz ist bei einer Grundtemperatur von 10 °C und 16 °C bei der Nutzung am Wochenende um ca. 25% niedriger als bei einer durchgehenden Temperierung bei ca. 14 °C. Die operative (empfundene) Temperatur liegt jedoch wesentlich niedriger, was zu einem deutlichen Absinken der thermischen Behaglichkeit führt.

Die Dämmung von Kirchendecken hat bei den durchgeführten Simulationen zu Energieeinsparungen von 7-10% geführt. Die Oberflächentemperaturen steigen dabei lokal um ca. 10% an, was zu Schäden an empfindlichen Malereien etc. führen kann.

Der Einsatz von „Windabweisern“ trägt deutlich zur Reduzierung von Zugerscheinungen, Ansteigen der operativen Temperatur und damit zur Behaglichkeitssteigerung bei. Dadurch kann die Raumlufttemperatur abgesenkt und als Folge der Energieeinsatz reduziert werden.

Für die Anordnung von Raumfühlern müssen neue Strategien entwickelt werden, da durch die konventionelle Anordnung in der Regel zu hohe Raumlufttemperaturen in der Aufheizphase vorliegen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das wichtigste Mittel zur Verbreitung der Ergebnisse dieses Projekts und der anderen im Rahmen des Förderschwerpunktes geförderten Projekte ist der geplante Leitfadentext. Das Projekt war Teil des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unterstützten Förderschwerpunktes „Erhaltung temporär genutzter Gebäude“, der zum Ziel hat, einen Leitfadentext für den Umgang mit historischer Bausubstanz in Planungsprozess und Nutzung herauszugeben.

Dr. Michele De Carli hat Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf einem internationalen Workshop zum Thema „Indoor environment quality in museums“ am 07.05.2005 in Rom vorgestellt. Der Titel seines Vortrags lautete „Neuere Entwicklungen bei der Beheizung historischer Kirchen: eine Fallstudie“.

Projektleiter Rainer Heimsch hat mehrfach die Forschungsergebnisse des Projekts vorgetragen. U. a. auf der XXXIII. Fortbildungsveranstaltung der Evangelischen Akademie Loccum am 20. und 21.03.2006 berichtete er über die „Energiesparende Nutzung von Kirchenheizungen unter Berücksichtigung von bauphysikalischen Rahmenbedingungen“.

Die Ergebnisse sollen in das Kirchliche Bauhandbuch über energiesparendes, umweltschonendes Bauen in der Evangelischen Kirche Deutschlands aufgenommen werden.

## **Fazit**

Durch die durchgeführten theoretischen und experimentellen Arbeiten konnten wesentliche Grundlagen für die Temperierung /Beheizung temporär genutzter Gebäude geschaffen werden. Dies gilt sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von Heizungsanlagen in solchen Gebäuden.

Durch die Dämmung von Decken kann zwar der Energieeinsatz reduziert werden, jedoch ist im Einzelfall zu prüfen, ob durch den Anstieg der Oberflächentemperaturen raumseitig ggf. Schäden an Deckenfresken provoziert werden.

Der Einsatz von Windabweisern an einfach verglasten Fenstern führt zu einem Anstieg der operativen Temperatur und damit zu einer Behaglichkeitssteigerung mit der Möglichkeit zur Senkung der Lufttemperatur. Daraus resultieren eine bauphysikalische Entlastung der Gebäude und eine Reduzierung des Energieeinsatzes, was zur Entlastung der Umwelt und zur Senkung der Energiekosten führt.

## Inhaltsverzeichnis

A 1	1. Protokoll: Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar – unmittelbar nach Beginn der Aufheizung	6
A 2	2. Protokoll: Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar – nach ca. 12 h Aufheizbetrieb	13
A 3	Grundrisse und Schaltschema St. Georgen sowie Grundriss St. Marien	21
	<ul style="list-style-type: none"><li>- Grundriss Kirche St. Georgen</li><li>- Grundriss Dachgeschoss Heizraum St. Georgen</li><li>- Grundriss Kellergeschoss St. Georgen</li><li>- Schaltschema St. Georgen</li><li>- Grundriss Kirche St. Marien</li></ul>	
A 4	Messorte von Fa. Theod. MAHR Söhne GmbH (M), Prof.-Ing. Olesen (O) und Ingenieurbüro Rainer Heimsch (H) in der Nordkapelle von St. Marien (3 D, Grundriss und Schnitt)	26
A 5	Tabelle Messorte und Messzeiträume des Ingenieurbüros Rainer Heimsch (IBH), Messung 1 bis 4	32
A 6	Messung 1 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	33
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 09.10. - 19.11.2003</li><li>- 24. - 27.10.2003</li><li>- Samstag, 25.10.2003</li></ul>	
A 7	Messung 2 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	37
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 19.11. - 30.12.2003</li><li>- 31.12. - 27.01.2004</li></ul>	
A 8	Messung 3 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	40
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 27.01. - 17.02.2004</li><li>- 17. - 25.02.2004</li></ul>	
A 9	Messung 4 (IBH): Messorte und Temperatur-Feuchte-Diagramme	43
	<ul style="list-style-type: none"><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt, Nordkapelle)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt, nur Temperaturen einschl. Taupunkttemperaturen)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (1. Abschnitt, nur Temperaturen)</li><li>- 27.02. - 07.04.2004 (nur Feuchten)</li><li>- 08.04. - 06.06.2004 (2. Abschnitt, nur 4-Punkt-Logger)</li></ul>	
A 10	Tabelle Messorte und Messzeiträume des Ingenieurbüros Rainer Heimsch (IBH), Messung 5 und 6	50

A 11	Messung 5 (IBH): Temperatur-Feuchte-Diagramme	51
	- 02. - 08.12.2004	
	- 02. - 10.12.2004	
	- 09. - 10.12.2004	
A 12	Messung 6 (IBH): Temperatur-Feuchte-Diagramme	54
	- 09. - 10.12.2004	
	- 09.12.2004	
	- 09.12.2004 (nur Temperaturen)	
	- 09.12.2004 (nur Zu- und Umluft)	

**1. Protokoll****Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar****- unmittelbar nach Beginn der Aufheizung-**

Datum der Untersuchung:	09. 12. 2004
Uhrzeit vor Ort:	16.00 bis 20.00 Uhr
Anwesende Personen:	Herr Heimsch, Ing.-Büro Heimsch, Rastede Weitere Mitglieder der Forschungsgruppe kamen im Laufe der Aufnahmen hinzu Herr Winkler, Universität Rostock, Institut für Bauingenieurwesen Baukonstruktionen und Bauphysik
Randbedingungen:	Temperaturen: Außen- und Innenlufttemperaturen wurden zeitgleich zu den Messungen durch Herrn Heimsch aufgenommen.
Infrarotmesstechnik:	Varioscan 20.12 der Firma Jenoptik Technologie GmbH, Jena mit - IR-Detektor: MCT - Arbeitswellenlänge: 8-12 $\mu\text{m}$ - Absolute Temperaturmessgenauigkeit: +/- 1,5 K + 1,5 % des jeweiligen Messbereichsendwertes in Kelvin [K] bei 22 °C +/- 2 K - Umgebungstemperatur innen ca. 9°C mit Emissionsgrad $\varepsilon = 1,00$ (für alle Materialien) - Auflösung: 0,1 K

**Thermografieaufnahmen am 09.12.2004**

- unmittelbar nach Beginn der Aufheizphase-

**- Nordwand -**

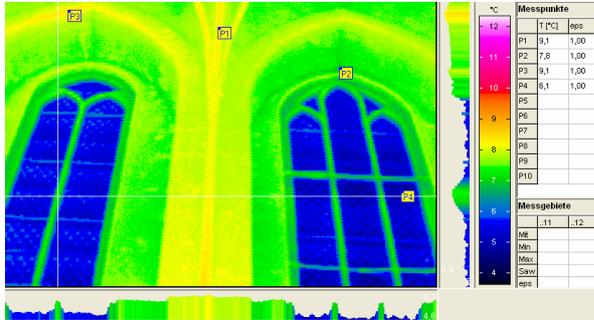


Bild 1: Wand Nord oben

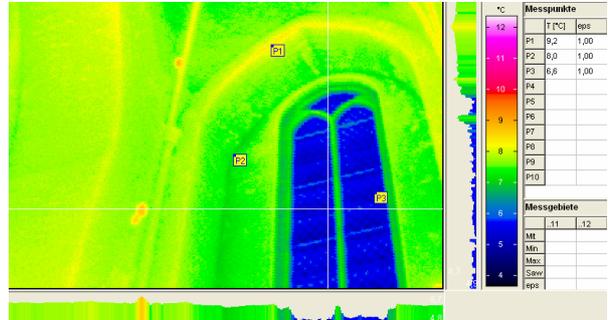


Bild 2: Wand Nord oben – linke Seite

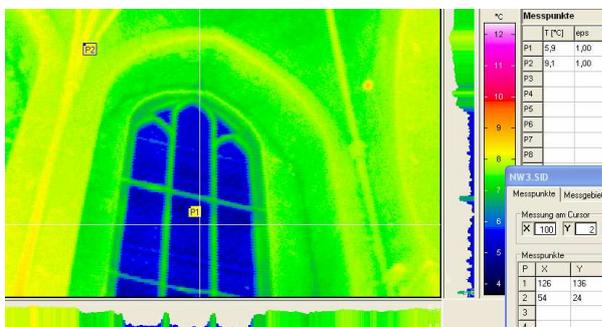


Bild 3: Wand Nord oben – rechte Seite

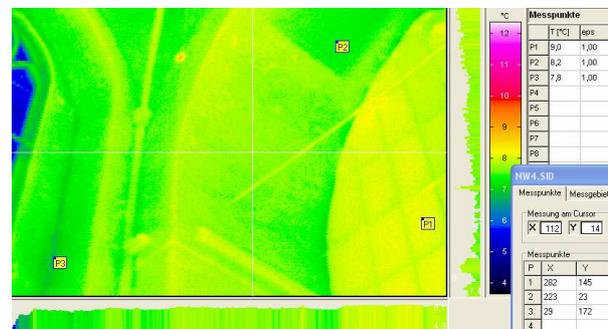


Bild 4: Wand Nord oben – rechte Seite

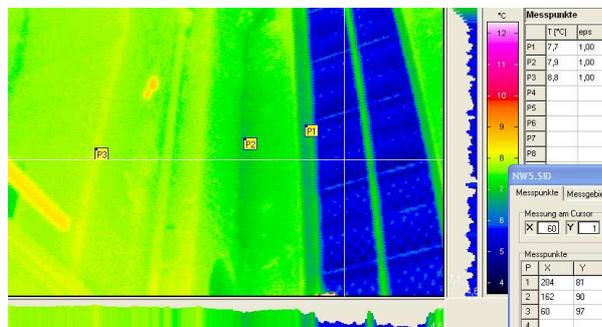


Bild 5: Wand Nord mittig – linke Seite

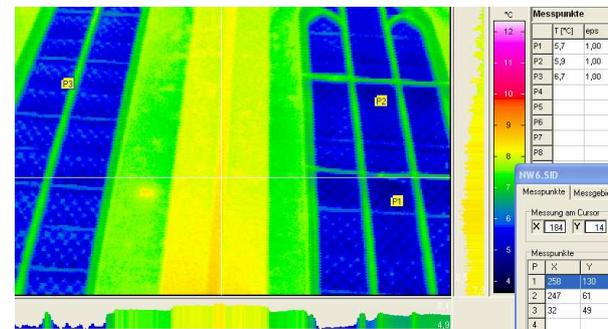


Bild 6: Wand Nord mittig

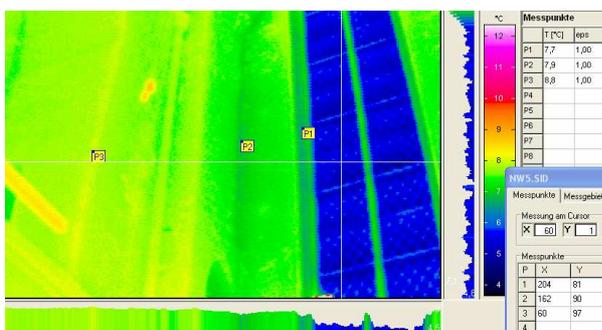


Bild 7: Wand Nord mittig – rechte Seite

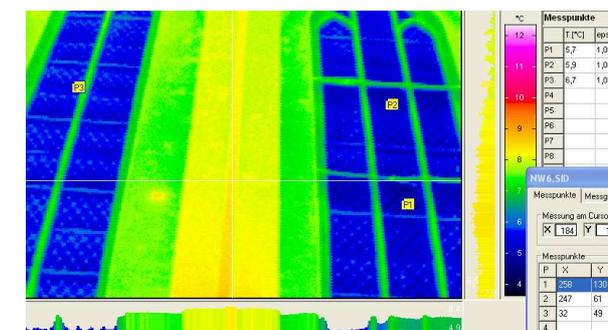


Bild 8: Wand Nord mittig – linke Seite

1. Protokoll 10604

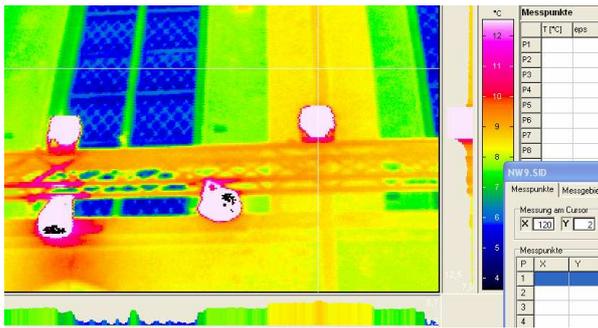


Bild 9: Wand Nord mittig – linkes Fenst.

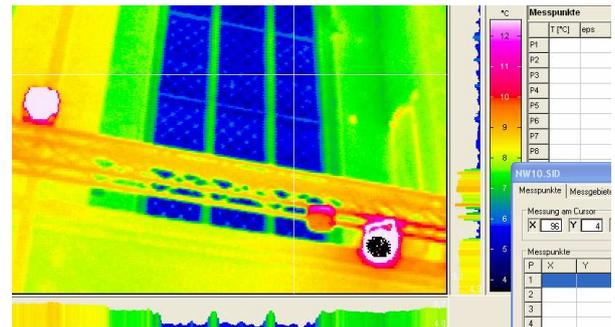


Bild 10: Wand Nord mittig – rechtes Fenst.

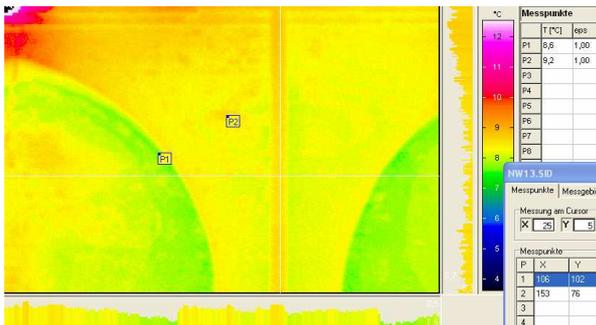


Bild 11: Wand Nord unten – linke Seite

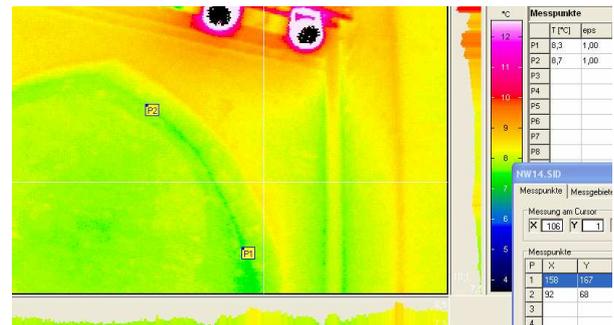


Bild 12: Wand Nord unten – rechte Seite

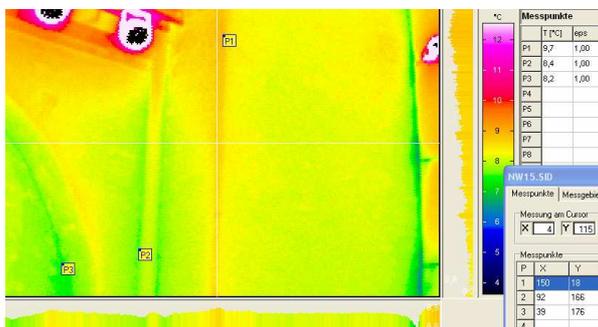


Bild 13: Wand Nord unten – rechte Seite

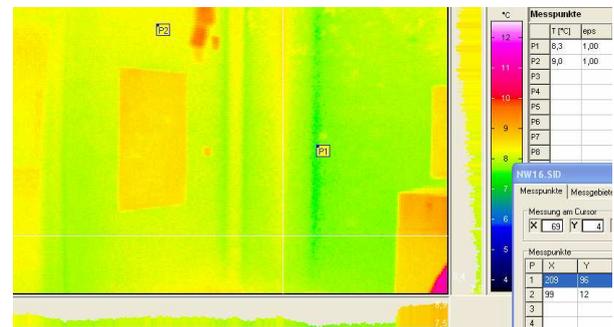


Bild 14: Wand Nord unten – linke Seite

**- Ostwand -**

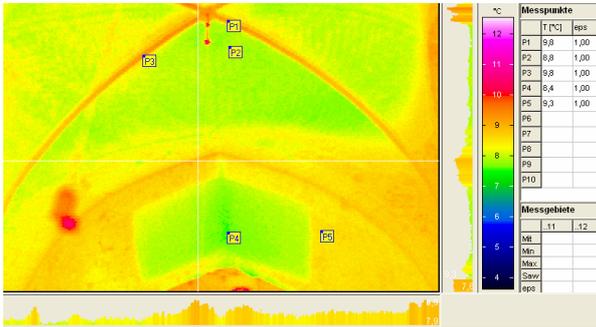


Bild 15: Wand Ost oben – Anschluss Gewölbe

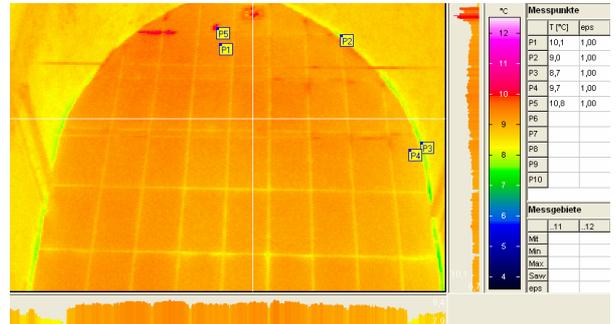


Bild 16: Wand Ost oben

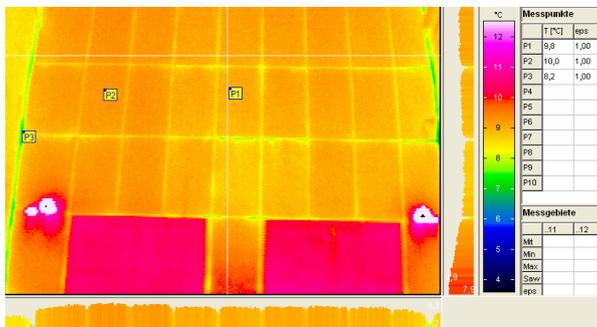


Bild 17: Wand Ost - unterer Bereich

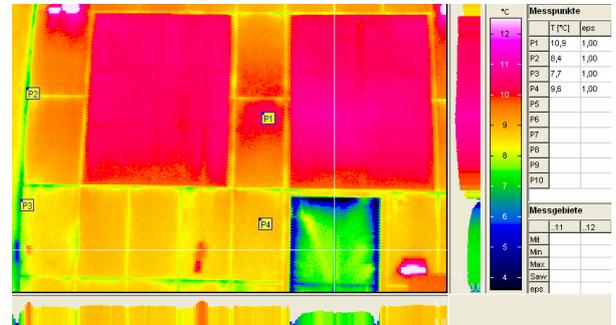


Bild 18: Wand Ost mit Tür

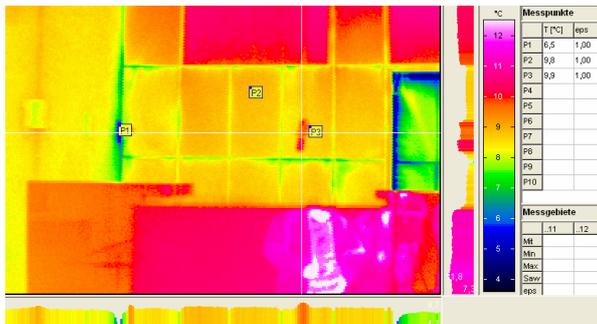


Bild 19: Wand Ost - unterer Bereich

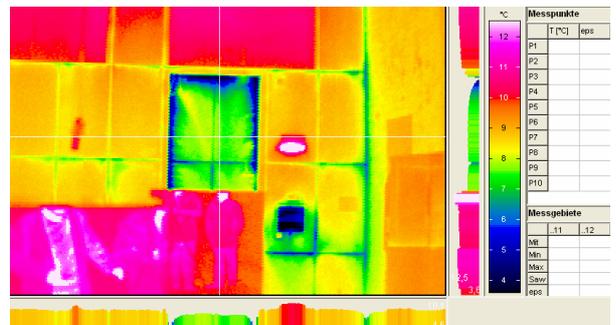


Bild 20: Wand Ost - unterer Bereich

**- Südwand -**

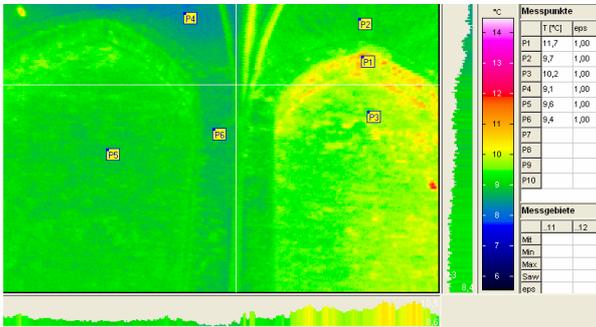


Bild 21: Wand Süd – Anschluss zum Gewölbe

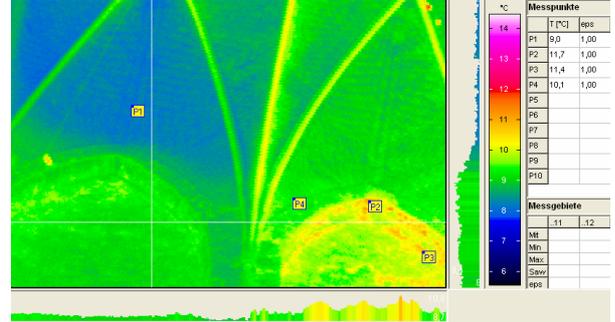


Bild 22: Wand Süd – Anschluss zum Gewölbe

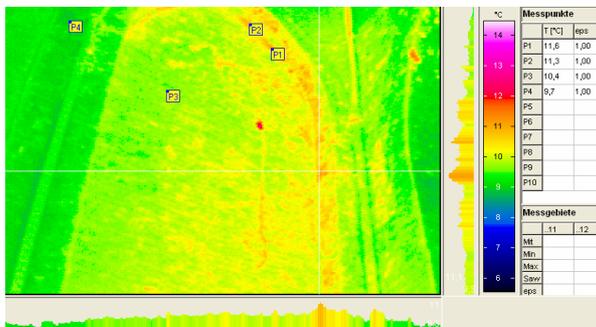


Bild 23: Wand Süd – rechte Seite

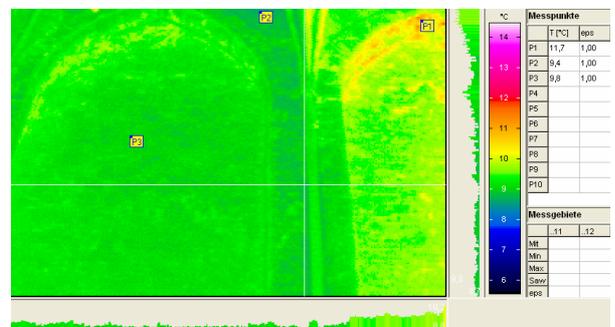


Bild 24: Wand Süd oben

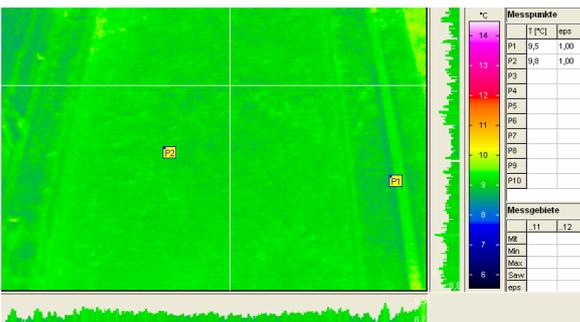


Bild 25: Wand Süd – linke Seite

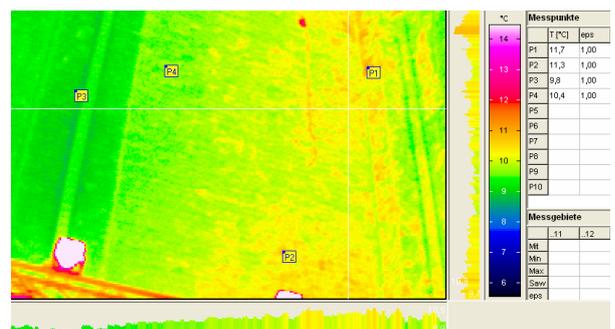


Bild 26: Wand Süd – rechte Seite

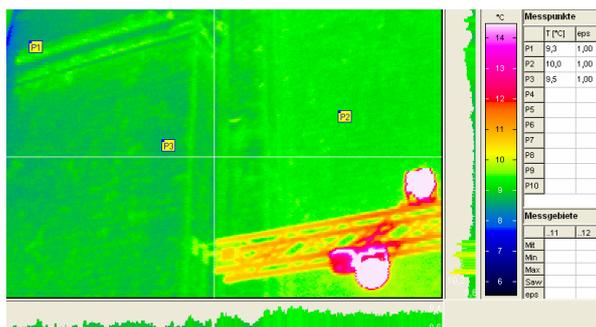


Bild 27: Wand Süd – linke Seite

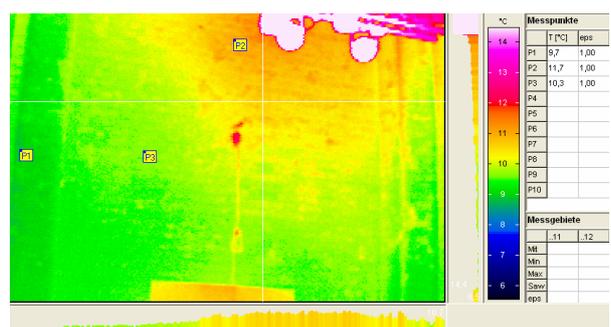


Bild 28: Wand Süd – rechte Seite

**- Westwand -**

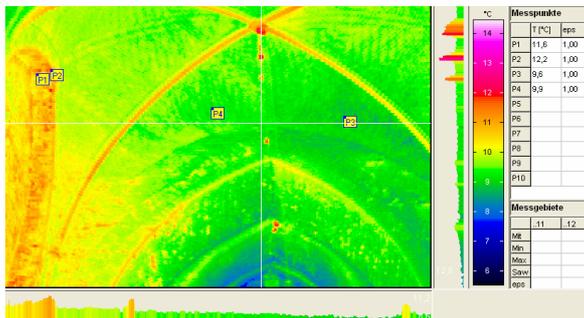


Bild 29: Wand West – Anschluss zum Gewölbe

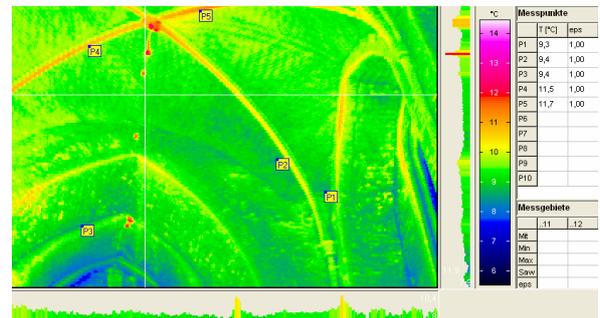


Bild 30: Wand West – Anschluss zum Gewölbe

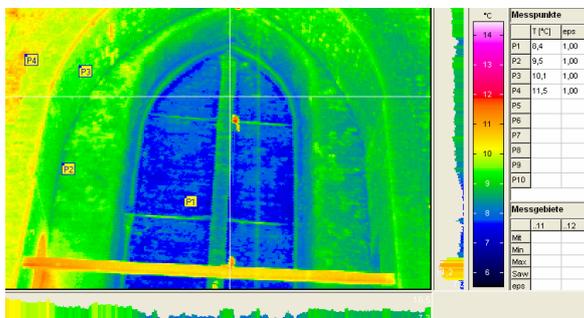


Bild 31: Wand West oben

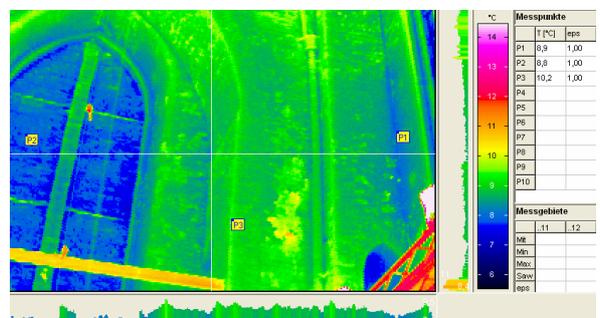


Bild 32: Wand West oben – rechte Seite

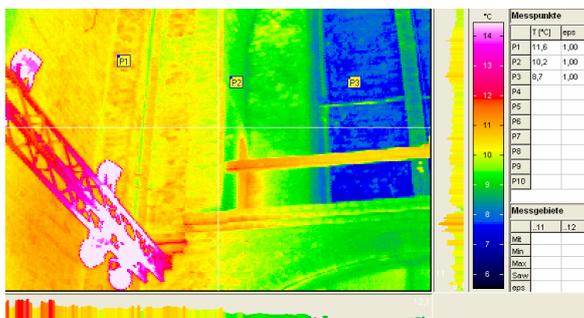


Bild 33: Wand West – linke Seite

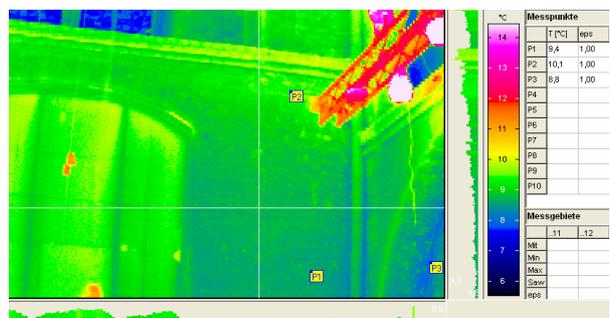


Bild 34: Wand West – rechte Seite

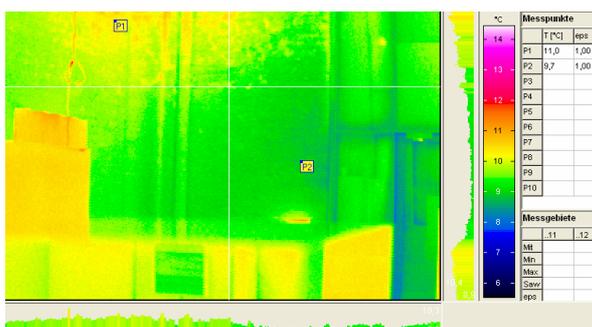


Bild 35: Wand West – linke Seite

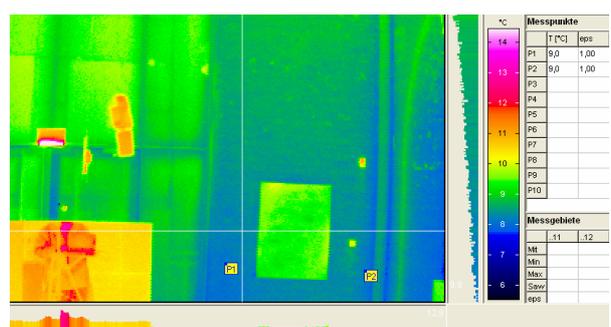


Bild 36: Wand West – rechte Seite

**- Fußboden -**

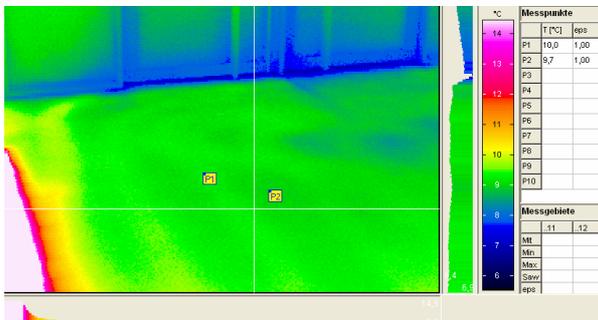


Bild 37: Fußb. Eingangsbereich

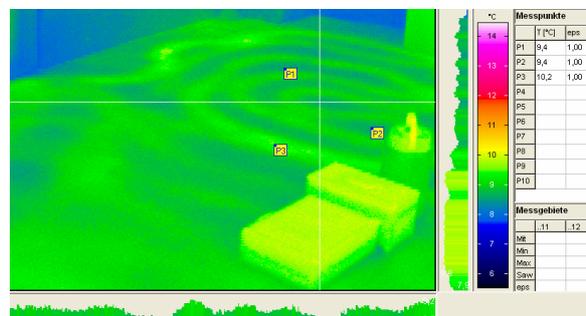


Bild 38: Fußb. Eingangsbereich rechts

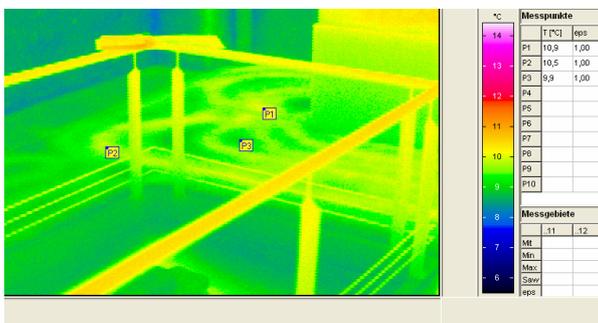


Bild 39: Bereich hinter der Gruft

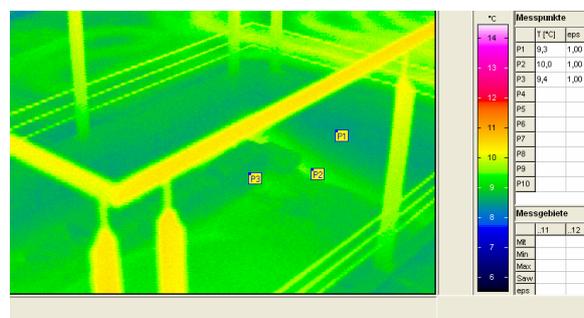


Bild 40: Gruftbereich

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. H. Winkler, 14.12.2004

**2. Protokoll****Thermografie in der Nordkapelle der St. Marien Kirche in Wismar****- nach ca. 12 h Aufheizbetrieb --**

Datum der Untersuchung:	10. 12. 2004
Uhrzeit vor Ort:	08.30 bis ca. 10.00 Uhr
Anwesende Personen:	Herr Heimsch, Ing.-Büro Heimsch, Rastede Weitere Mitglieder der Forschungsgruppe Herr Winkler, Universität Rostock, Institut für Bauingenieurwesen Baukonstruktionen und Bauphysik
Randbedingungen:	Temperaturen: Außen- und Innenlufttemperaturen wurden zeitgleich zu den Messungen durch Herrn Heimsch aufgenommen.
Infrarotmesstechnik:	Varioscan 20.12 der Firma Jenoptik Technologie GmbH, Jena mit - IR-Detektor: MCT - Arbeitswellenlänge: 8-12 $\mu\text{m}$ - Absolute Temperaturmessgenauigkeit: +/- 1,5 K 1,5 % des jeweiligen Messbereichsendwertes in Kelvin [K] bei 22 $^{\circ}\text{C}$ +/- 2 K - Umgebungstemperatur innen ca. 9 $^{\circ}\text{C}$ mit Emissionsgrad $\varepsilon = 1,00$ (für alle Materialien) - Auflösung: 0,1 K

**Thermografieaufnahmen vom 10.12.2004**

- Nach ca. 12 h aufheizen -

**- Nordwand -**

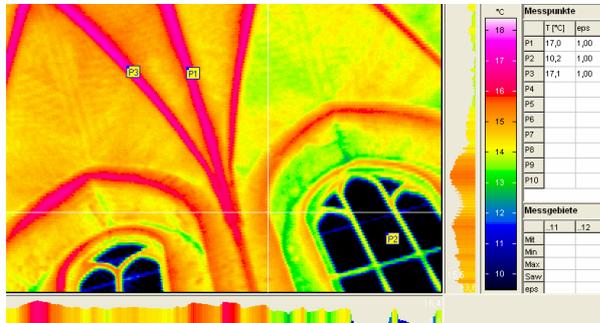


Bild 1: Wand Nord oben

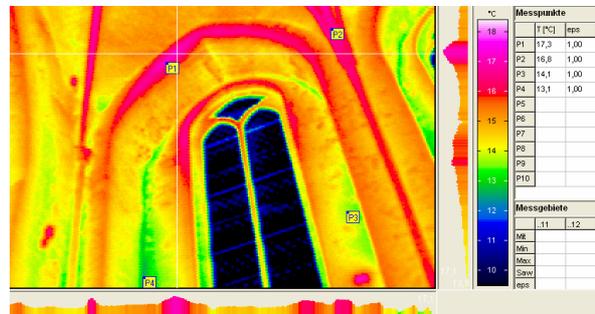


Bild 2: Wand Nord oben – linke Seite

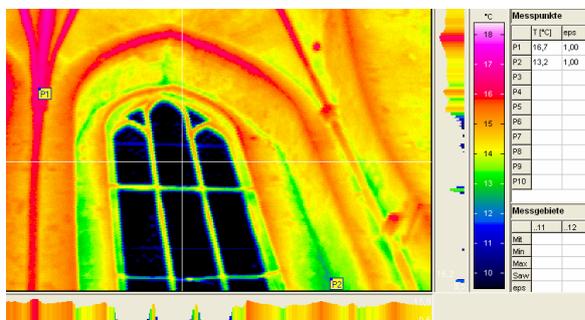


Bild 3: Wand Nord oben – rechte Seite

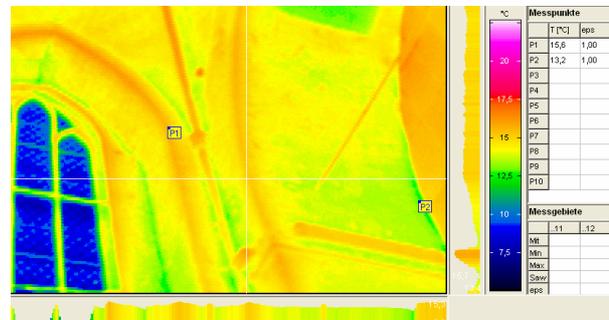


Bild 4: Wand Nord oben – rechte Seite

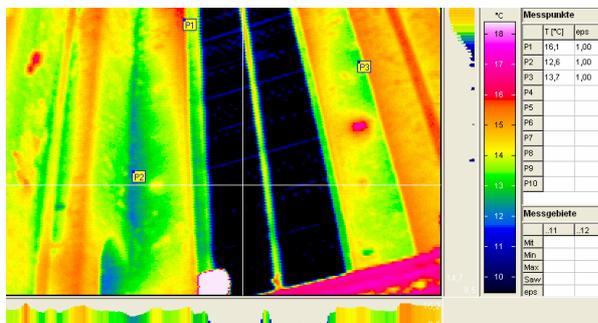


Bild 5: Wand Nord mittig – linke Seite

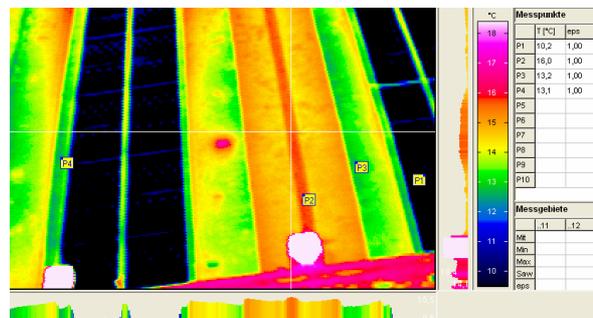


Bild 6: Wand Nord mittig

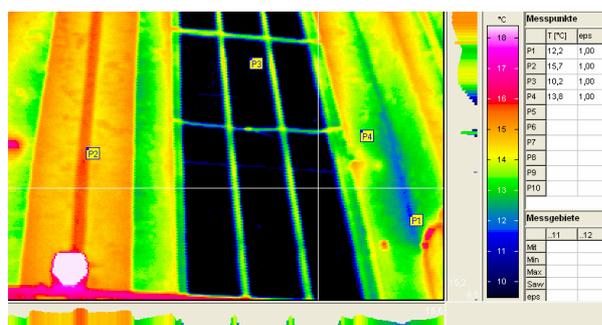


Bild 7: Wand Nord mittig – rechte Seite

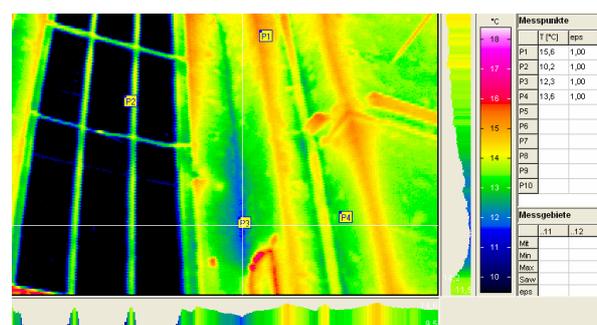


Bild 8: Wand Nord mittig – rechte Seite

2. Protokoll 10604

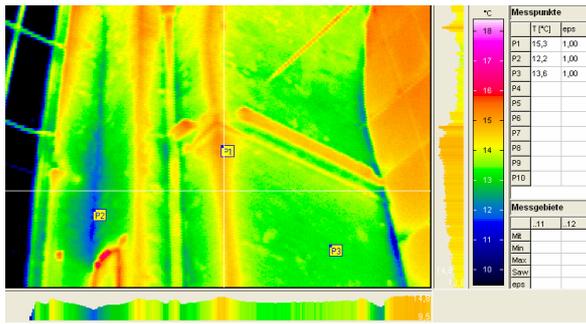


Bild 9: Wand Nord mittig – rechte Seite

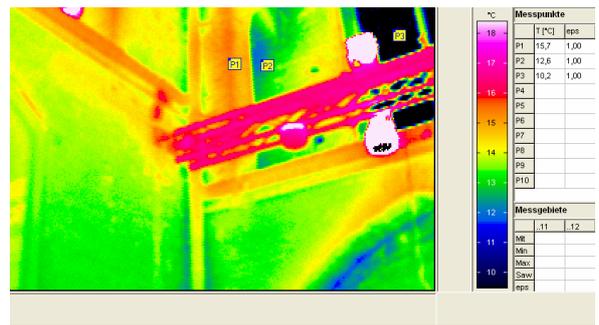


Bild 10: Wand Nord mittig – linke Seite

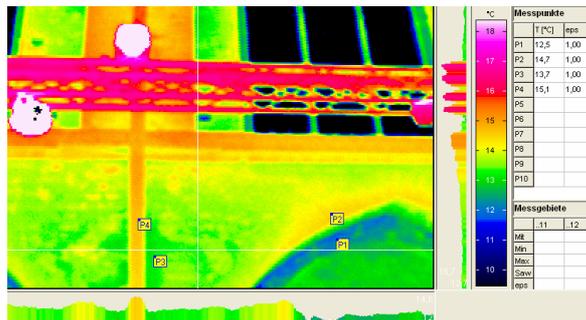


Bild 11: Wand Nord mittig

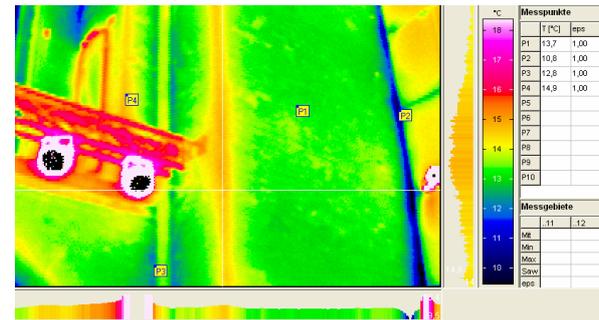


Bild 12: Wand Nord mittig – rechte Seite

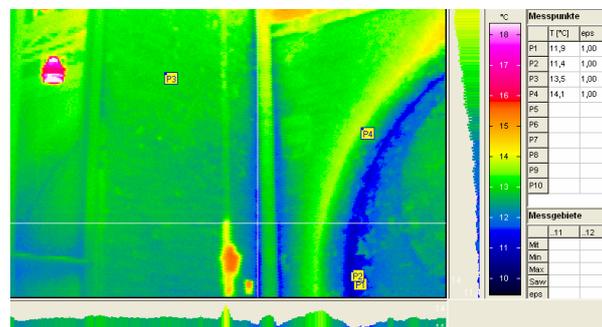


Bild 13: Wand Nord unten – linke Seite

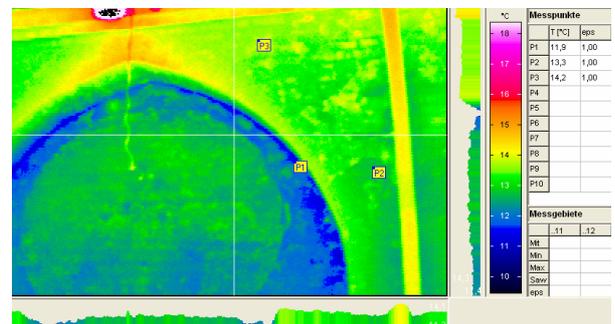


Bild 14: Wand Nord unten – linke Seite

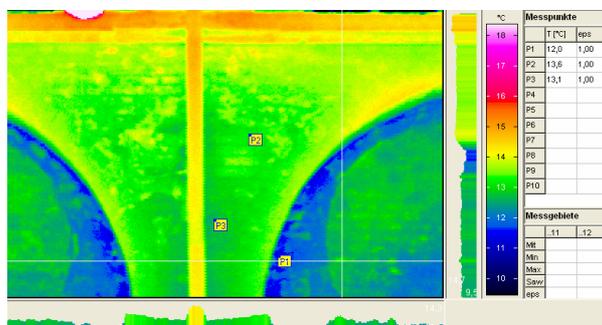


Bild 15: Wand Nord unten

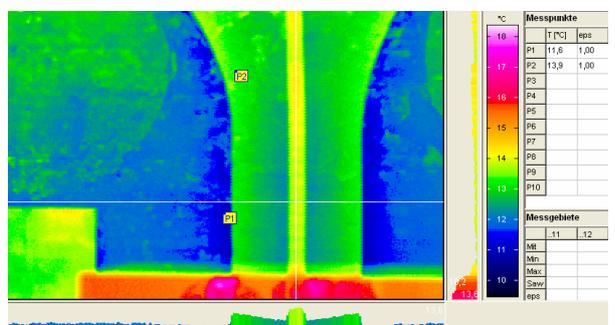


Bild 16: Wand Nord unten

2. Protokoll 10604

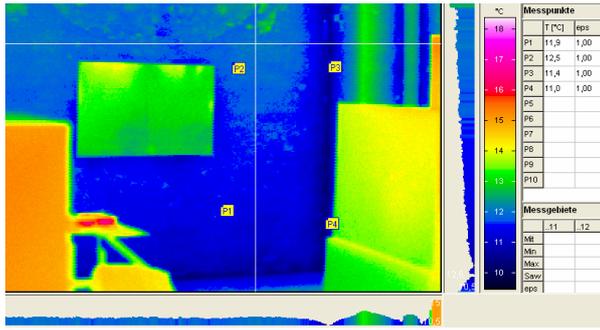


Bild 17: Wand Nord unten – rechte Seite

**- Ostwand -**

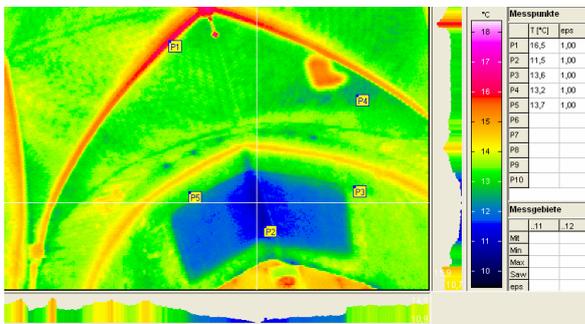


Bild 18: Wand Ost oben – Anschluss Gewölbe

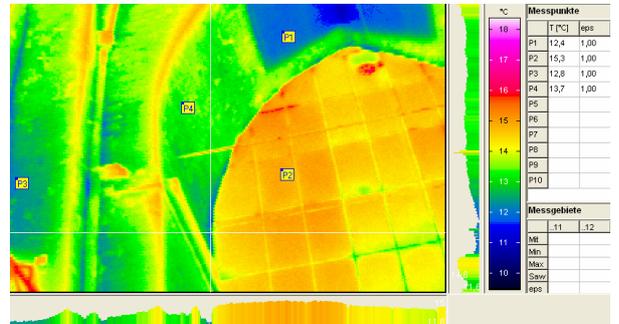


Bild 19: Wand Ost oben

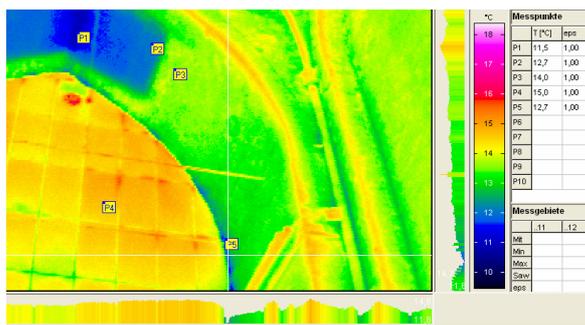


Bild 20: Wand Ost – rechte Seite

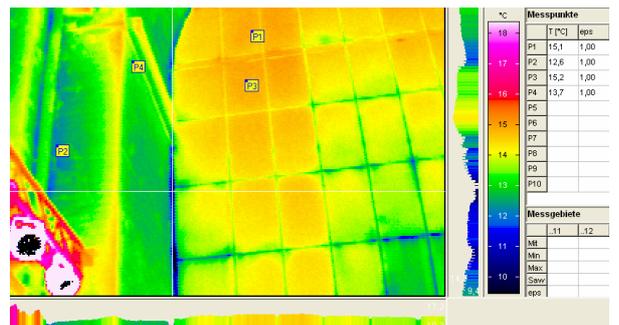


Bild 21: Wand Ost – linke Seite

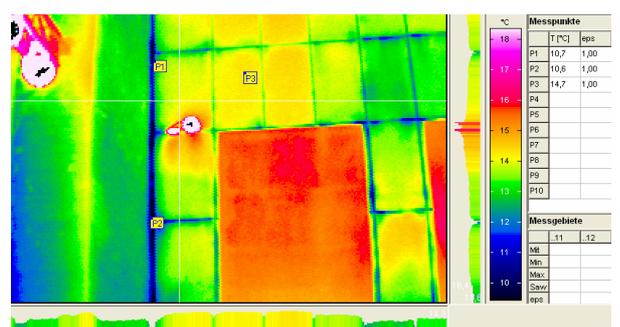
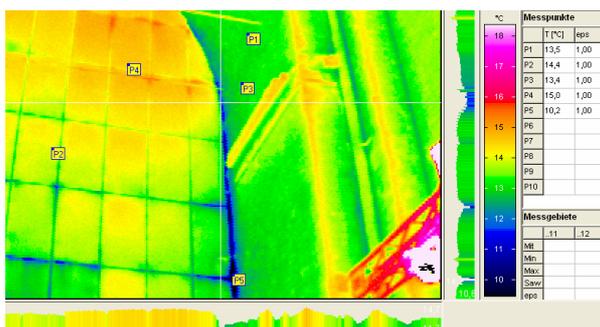


Bild 22: Wand Ost – rechte Seite

Bild 23: Wand Ost – linke Seite

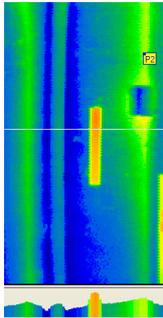
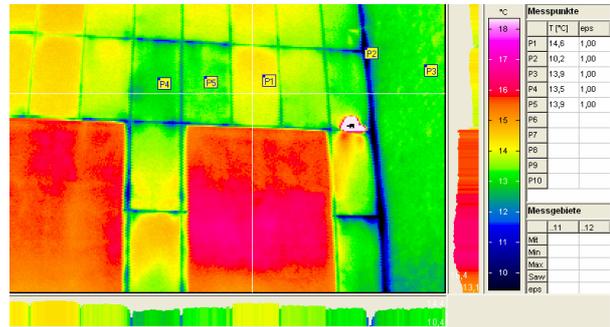


Bild 24: Wand Ost – rechte Seite

Bild 25: Wand Ost – linke Seite

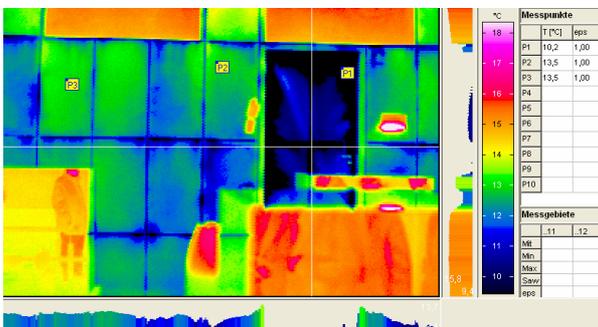


Bild 26: Wand Ost – Türbereich

**- Südwand -**

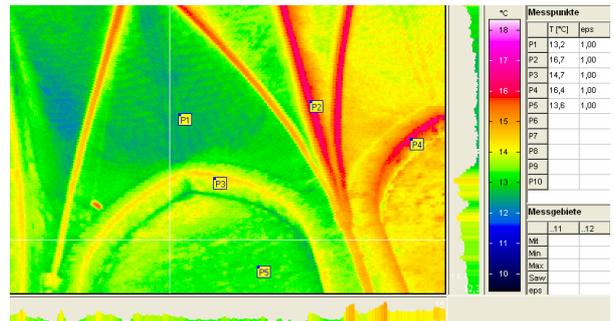
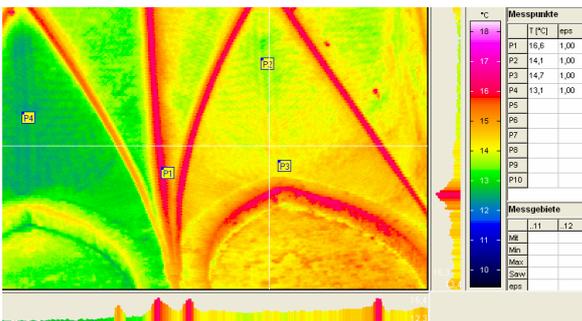


Bild 27: Wand Süd – Anschluss zum Gewölbe

Bild 28: Wand Süd – Anschluss zum Gewölbe

2. Protokoll 10604

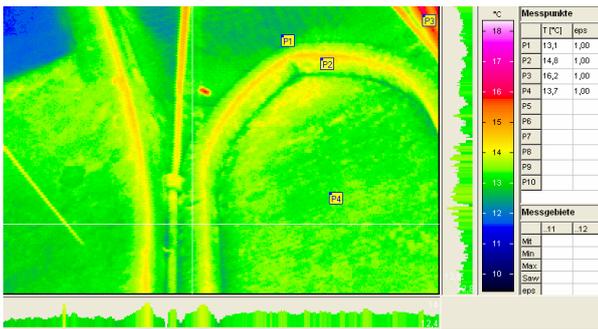


Bild 29: Wand Süd – linke Seite

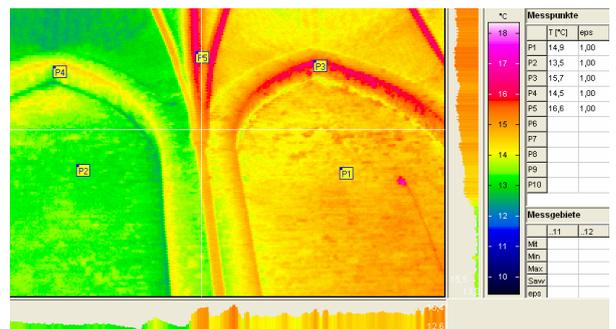


Bild 30: Wand Süd oben

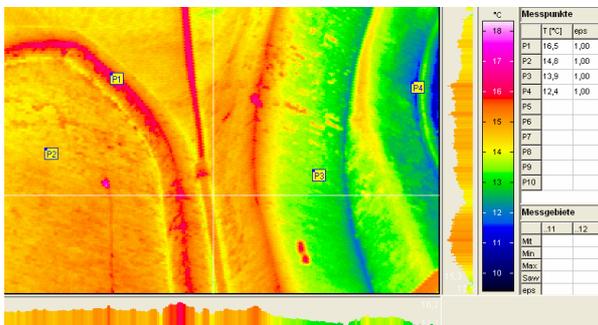


Bild 31: Wand Süd – rechte Seite

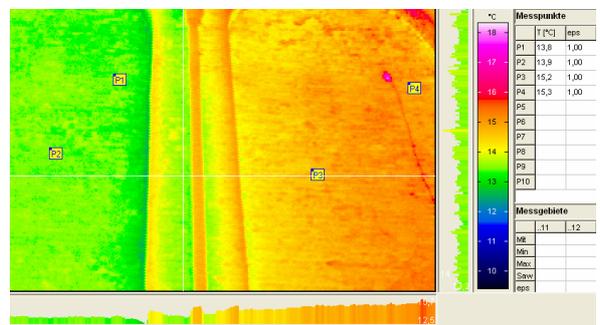


Bild 32: Wand Süd mittig

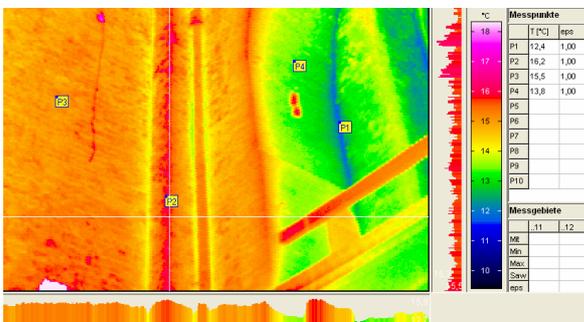


Bild 33: Wand Süd – rechte Seite

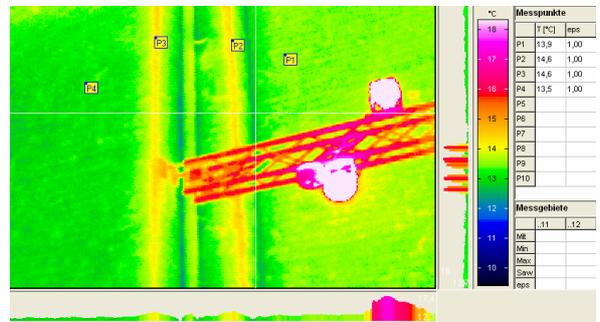


Bild 34: Wand Süd – rechte Seite

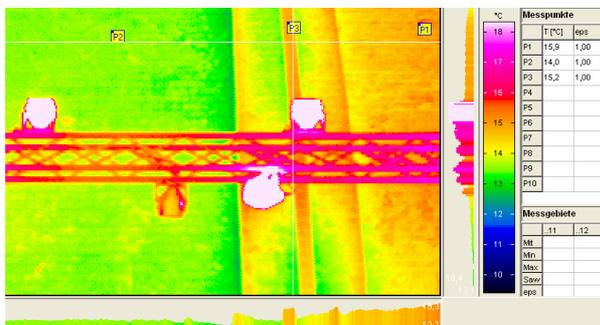


Bild 35: Wand Süd mittig

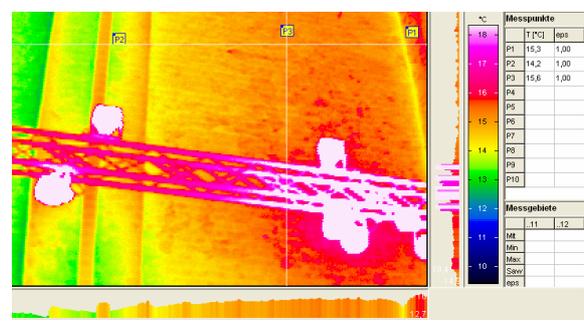


Bild 36: Wand Süd – rechte Seite

2. Protokoll 10604

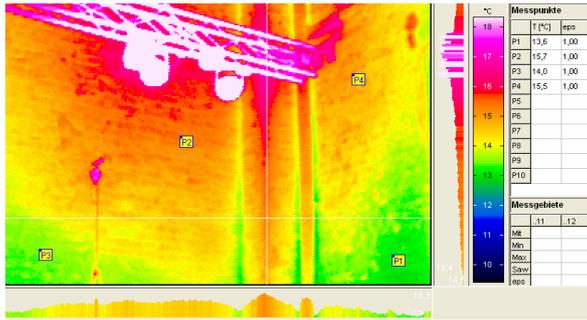


Bild 37: Wand Süd – rechte Seite

**Westwand -**

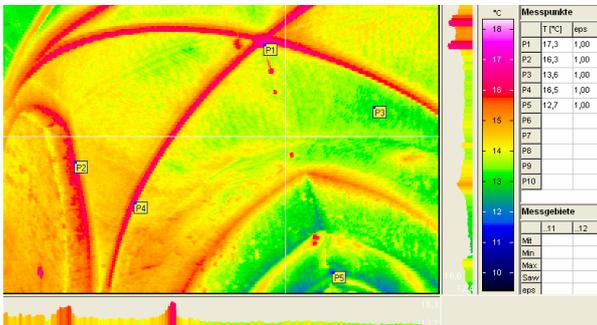


Bild 38: Wand West – Anschluss zum Gewölbe

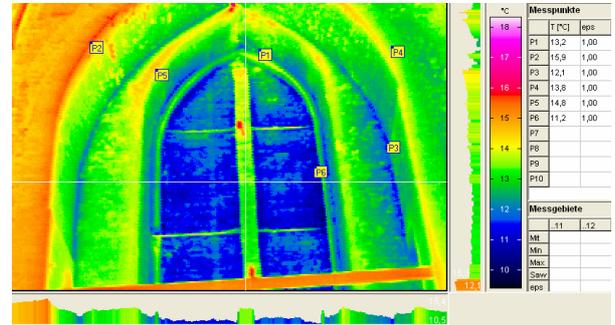


Bild 39: Wand West – oberes Fenst.

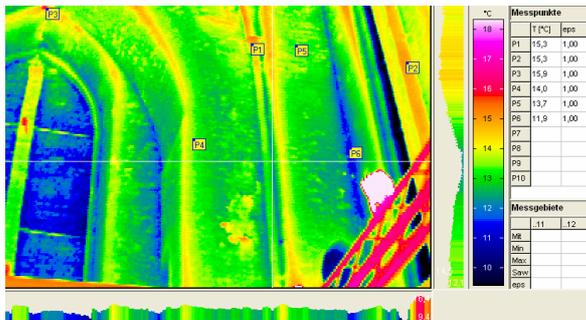


Bild 40: Wand Ost oben – rechte Seite

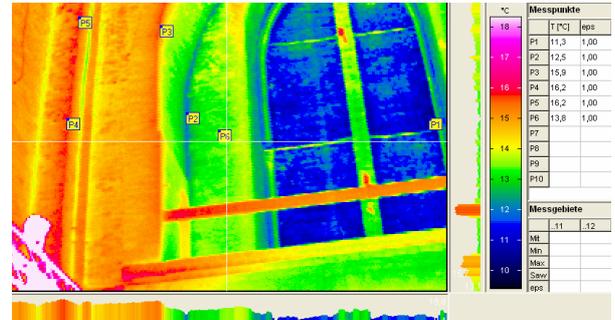


Bild 41: Wand Ost oben – rechte Seite

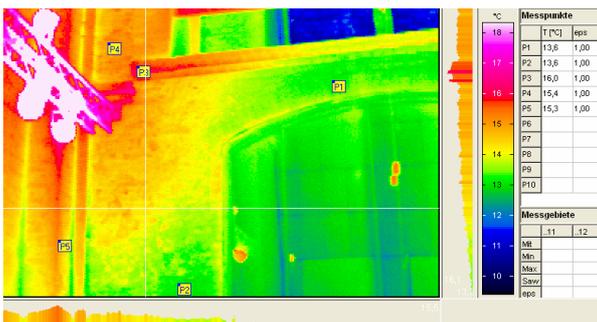


Bild 42: Wand Ost – linke Seite

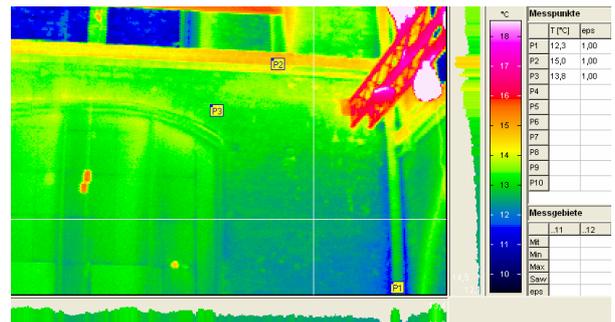


Bild 43: Wand Ost – rechte Seite

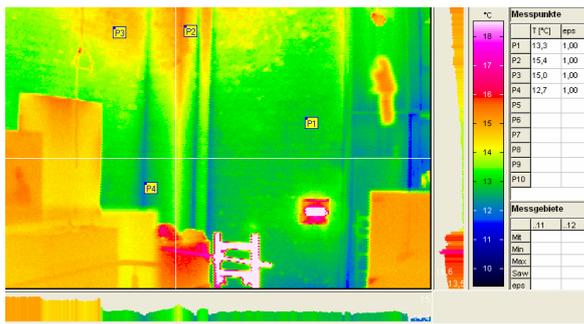


Bild 44: Wand Ost unten – linke Seite

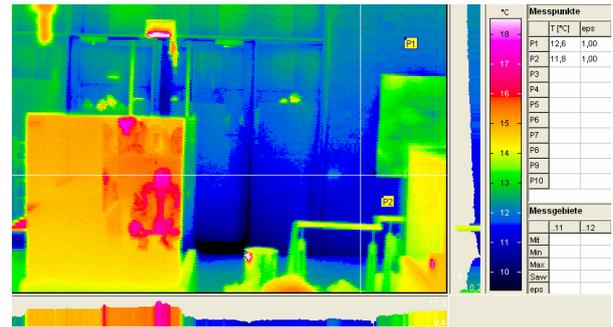


Bild 45: Wand Ost – rechte Seite

**- Fußboden -**

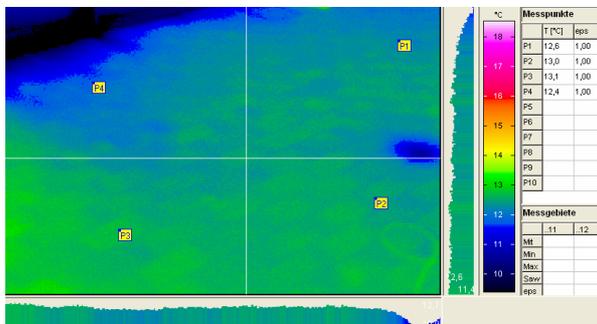


Bild 46: Fußb. Eingangsbereich

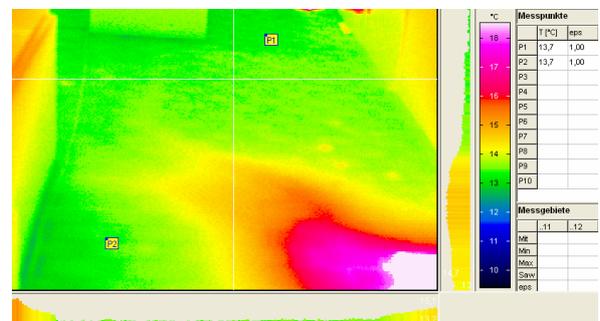


Bild 47: Fußb. Blickrichtung Ost – Bereich der Warmluftausströmung

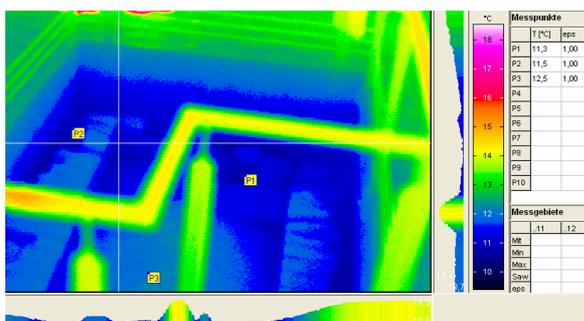


Bild 48: Grufbereich

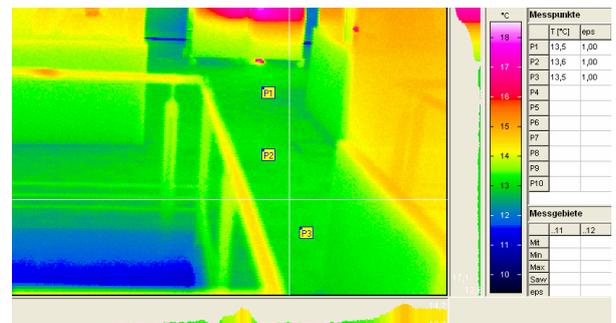


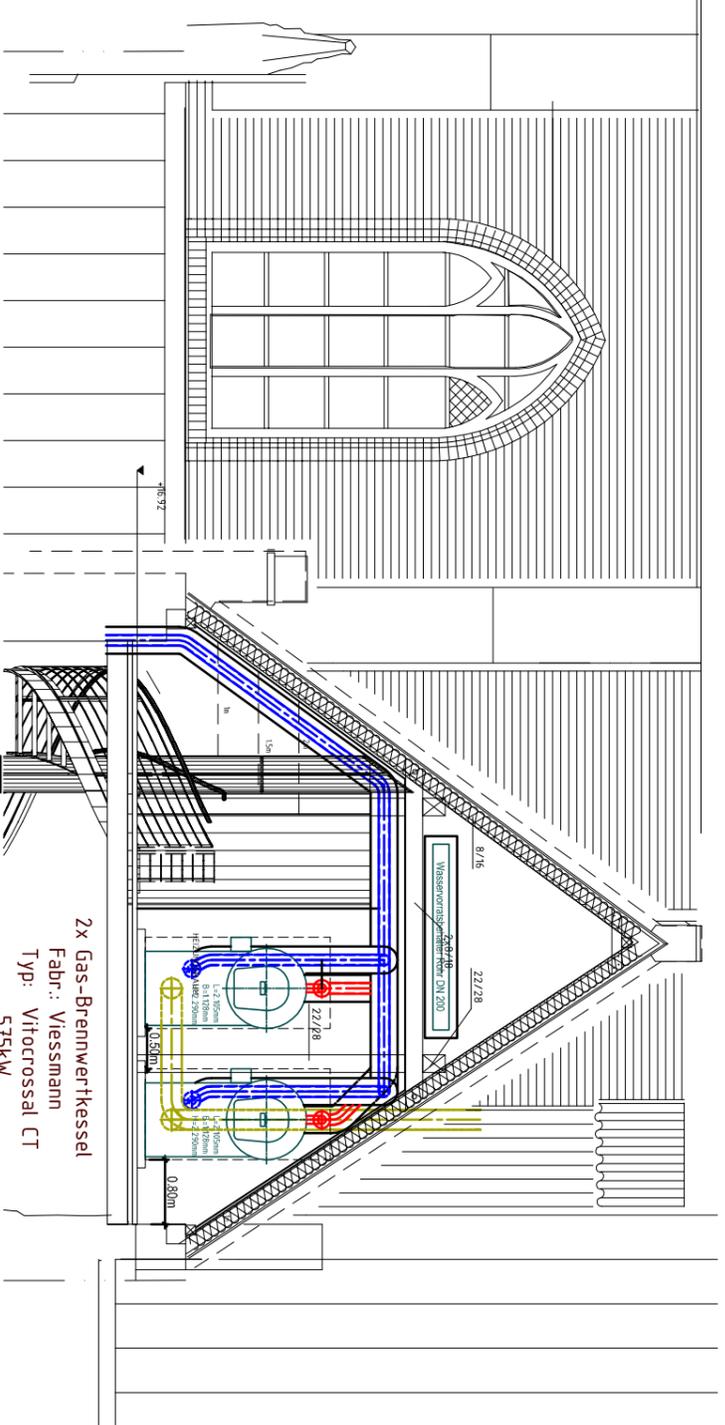
Bild 49: Fußb. Blickrichtung Ost - hinter der Gruft

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. H. Winkler, 15.12.2004



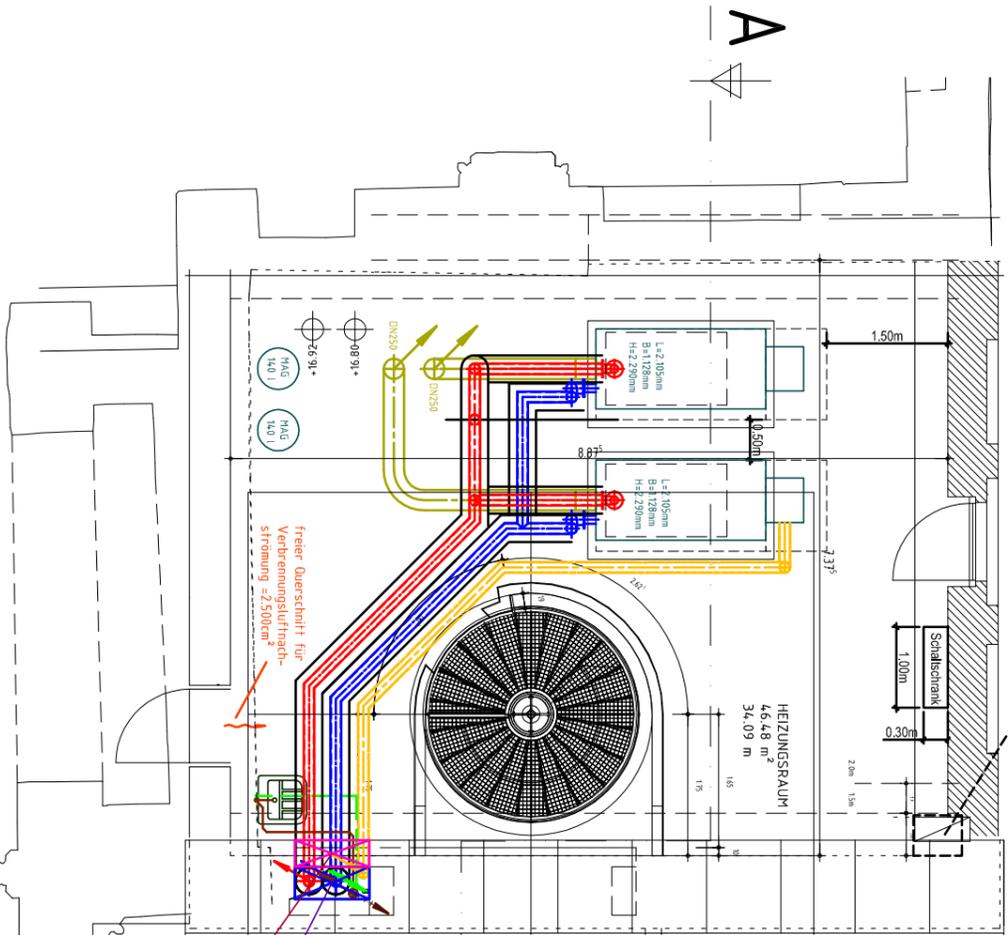
Nr.	Farbzug	Bezeichnung
1	SW	Schmutzwasserleitung
2	TW	Trinkwasserleitung Kalt
3	GL	Gasleitung
4	AG	Abgasleitung
5	VL	Heizungsvorlauf
6	RL	Heizungsrücklauf
7	DVL	Dampf vorlauf



# Schnitt A-A

2x Gas-Brennwertkessel  
 Fabr.: Viessmann  
 Typ: Vitocrossal CT  
 575kW

16-01-2003



HEIZUNGSRAUM  
 4,6,4,8 m<sup>2</sup>  
 34,09 m

SW Ø100/SIWE Ø100  
 2x TW DN12  
 Gas DN125  
 Heizung RL DN125  
 Heizung VL DN125

HS-DD 4,0/91,5  
 HS-WG 92,5/80  
 v. JMD

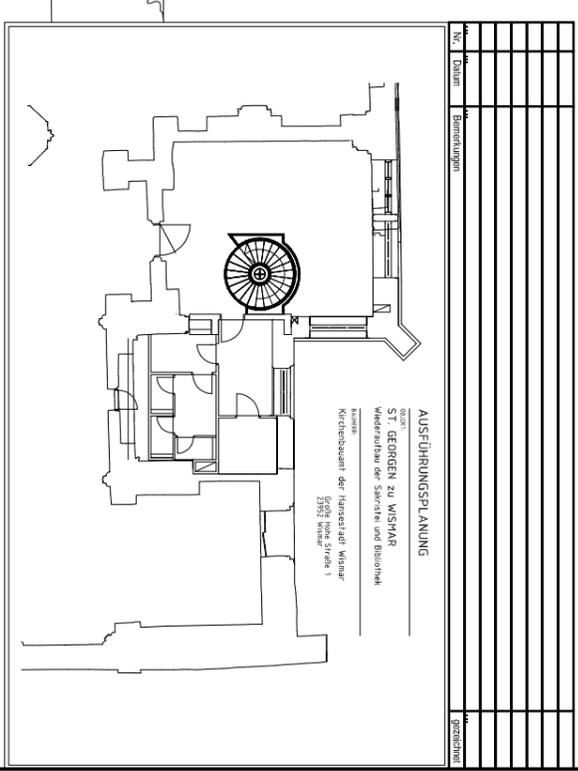
freier Querschnitt für  
 Verbrennungsluftnach-  
 strömung - 2,500cm<sup>2</sup>

## AUSFÜHRUNGSPLANUNG

OBJEKT:  
**ST. GEORGEN ZU WISMAR**  
 Wiederaufbau der Sakristei und Bibliothek

BAUHERR:  
 Kirchenbauamt der Hansestadt Wismar  
 Große Höhe Straße 1  
 23952 Wismar

DARSTELLUNG:  
**DACHGESCHOSS M-1:50 VORABZUG I**



# A

**INGENIEURBÜRO RAINER HEIMSCH VDI/AGÖF**  
 Heizung - Klima - Lüftung - Sanitär - BHKV - Solartechnik - Kirchenheizung  
 Regenerative Energiekonzepte - Contracting - Wärmeleitungs-konzepte

**BHI**  
 Sophienstraße 24  
 26180 Bastele  
 Tel.: 04402 / 2620 + 2026  
 Fax: 04402 / 83462  
 e-mail: zentral@bhiheimsch.de

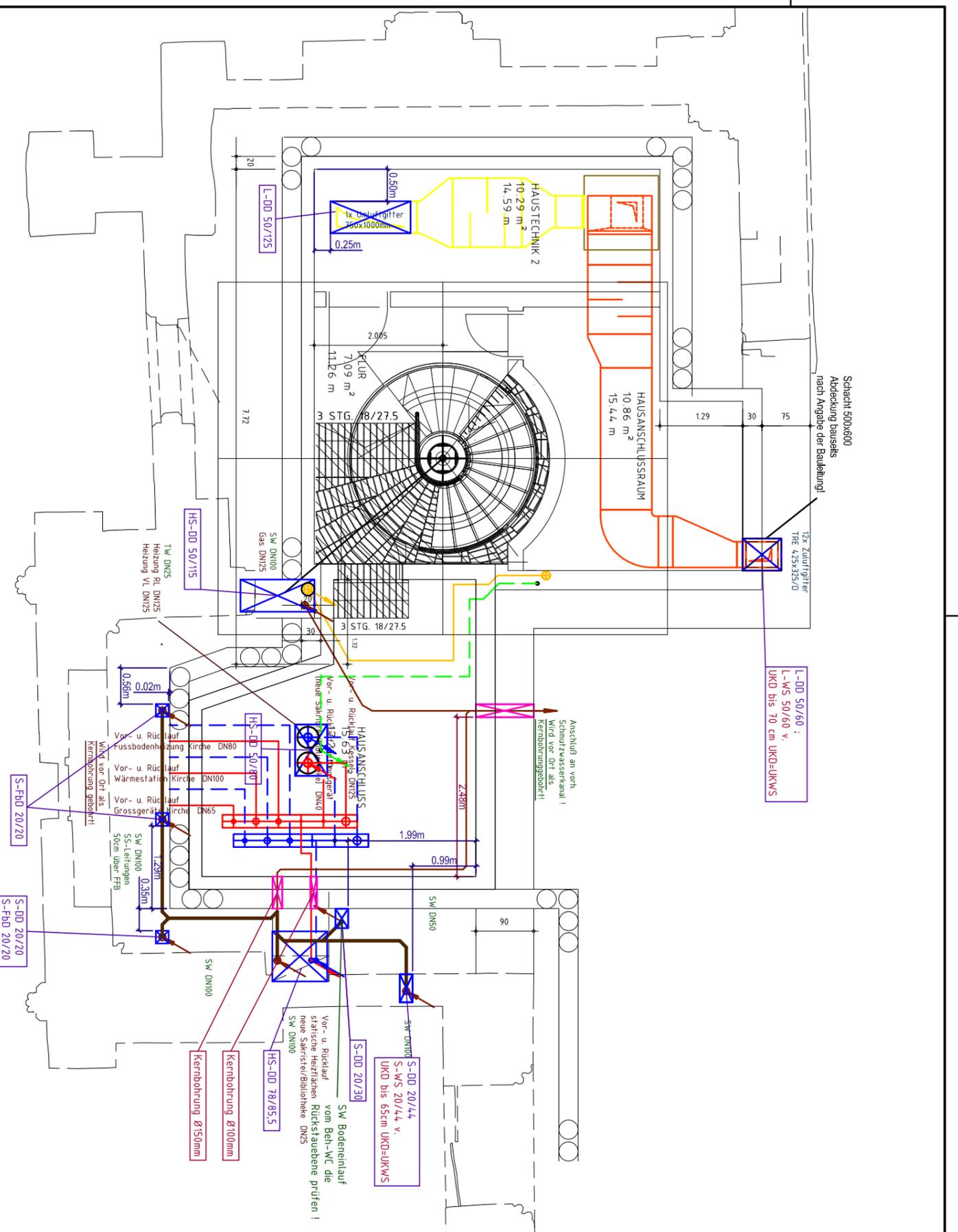
**St. Georgen zu Wismar**  
 Wiederaufbau der Sakristei u. Bibliothek  
 Kirchenbauamt Hansestadt Wismar  
 23952 Wismar

**HEIZUNG-LÜFTUNG-SANITÄR AUSFÜHRUNG**  
 Grundriss DG-Heizraum

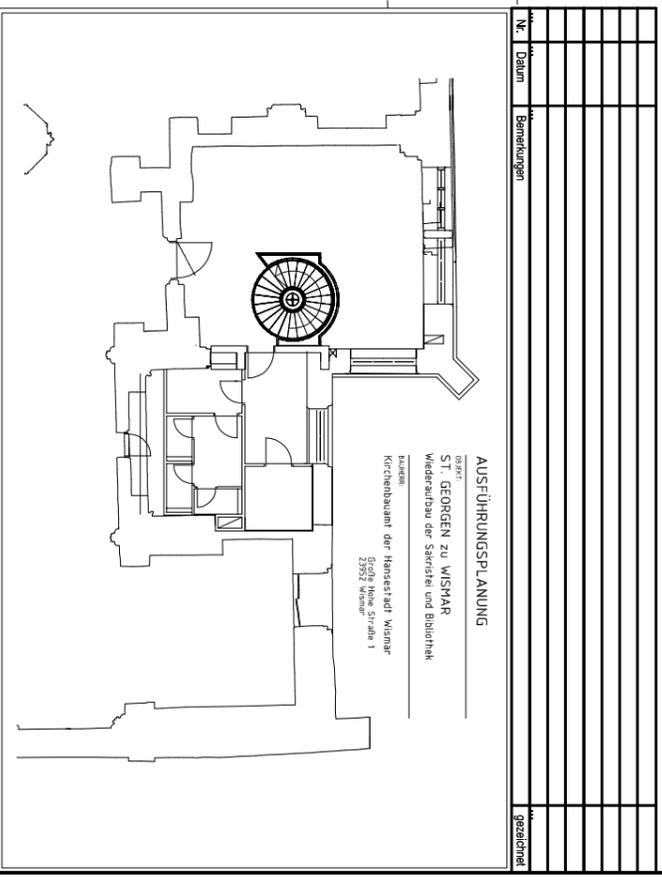
Zustimmung: **HLS-DG-19-95** Datum: 26.02.2003 Maßstab: 1:50  
 Verantwortl. Ingenieur: **SF** Projekt: 19/95

Verfahren	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50
1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50	1:50

HKB= 500x660= 0,33m<sup>2</sup> Datum: HLS-DG-19-95



Nr.	Darstellung	Abkürzung	Bezeichnung
1		GSW	Schmutzwasser-Grundleitung
2		SW	Schmutzwasserleitung
3		SWE	Schmutzwasserentlüftungsleitung
4		TW	Trinkwasserleitung kalt
5		ABL	Lüftung Abluft
6		GL	Gasleitung
7		AG	Abgasleitung
8		VL	Heizungsvorlauf
9		RL	Heizungsrücklauf
10		VL	Heizungsvorlauf unter der Decke
11		RL	Heizungsrücklauf unter der Decke
12			statischer Heizkörper ( Rohrstrahlator )



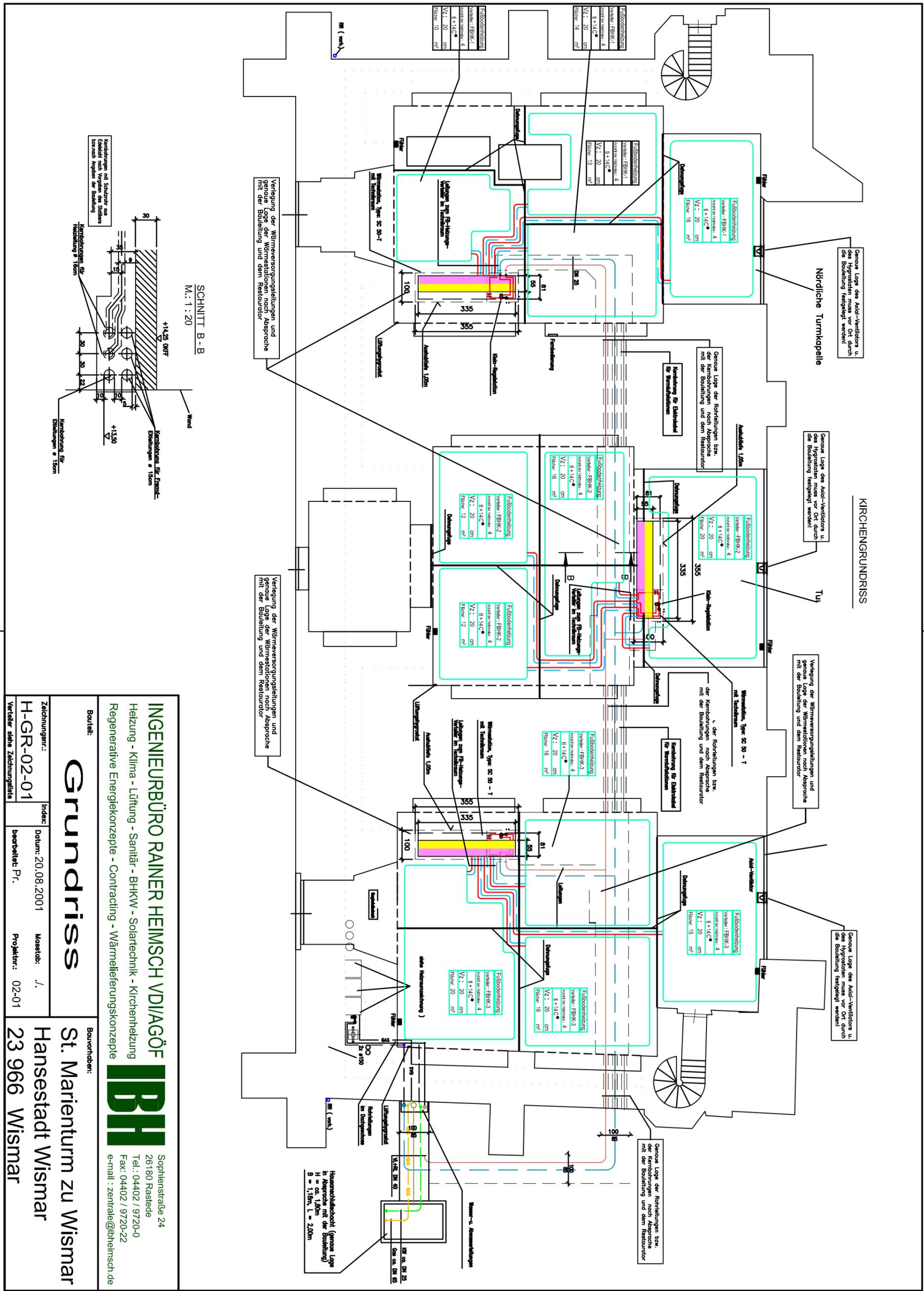
**INGENIEURBÜRO RAINER HEIMSCH VDI4106**  
 Heizung - Klima - Lüftung - Sanitär - BHKW - Solartechnik - Kirchenheizung  
 Regenerative Energiekonzepte - Contracting - Wärmeleitkonzepte  
 Sophienstraße 24  
 26180 Rastede  
 Tel.: 04402 / 9720-0  
 Fax: 04402 / 9720-22  
 e-mail: zentrale@ihhheimsch.de

**St. Georgen zu Wismar**  
 Wiederaufbau der Sakristei u. Bibliothek  
 Kirchenbauamt Hansestadt Wismar  
 23952 Wismar

**HEIZUNG-LÜFTUNG-SANITÄR AUSFÜHRUNG**  
 Grundriss KG

Zustimmung: HJS-KG-19-95  
 Datum: 26.02.2003  
 Maßstab: 1:50  
 Zeichner: SF  
 Projektor: 40-03  
 HB#- 3501-594#- 0.21m²  
 Date: HJS-KG-19-95





KIRCHENGRUNDRISS

SCHNITT B - B  
M: 1 : 20

**INGENIEURBÜRO RAINER HEIMSCH VDI/AGÖF**  
 Heizung - Klima - Lüftung - Sanitär - BHKW - Solartechnik - Kirchenheizung  
 Regenerative Energiekonzepte - Contracting - Wärmelieferungskonzepte



Sophienstraße 24  
 26180 Rastede  
 Tel.: 04402 / 9720-0  
 Fax: 04402 / 9720-22  
 e-mail: zentrale@bheimsch.de

**Grundriss**

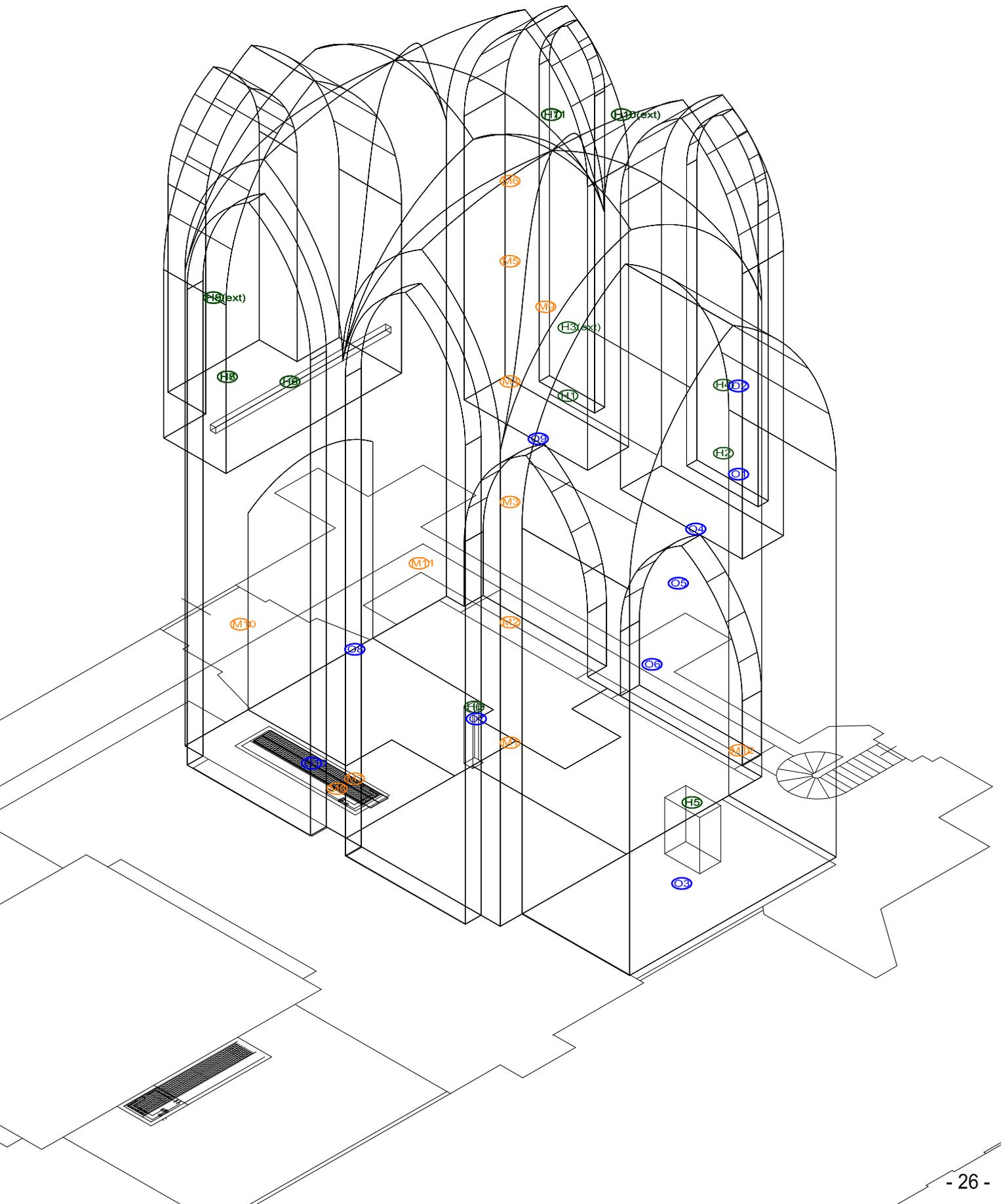
Bauherr:  
**St. Marienkirche zu Wismar**  
 Hansestadt Wismar  
 23 966 Wismar

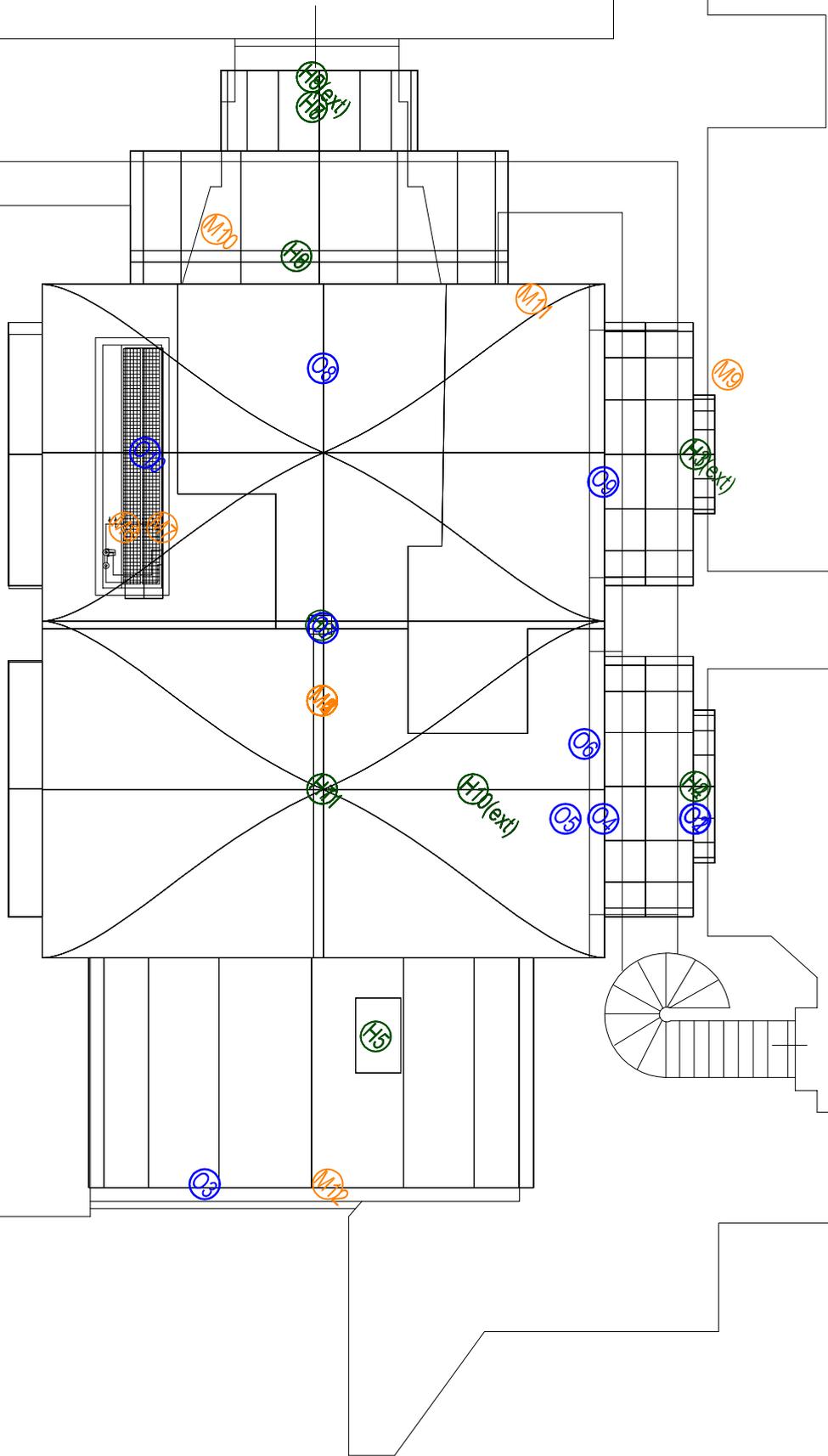
Bauvorbereit:  
**St. Marienkirche zu Wismar**  
 Hansestadt Wismar  
 23 966 Wismar

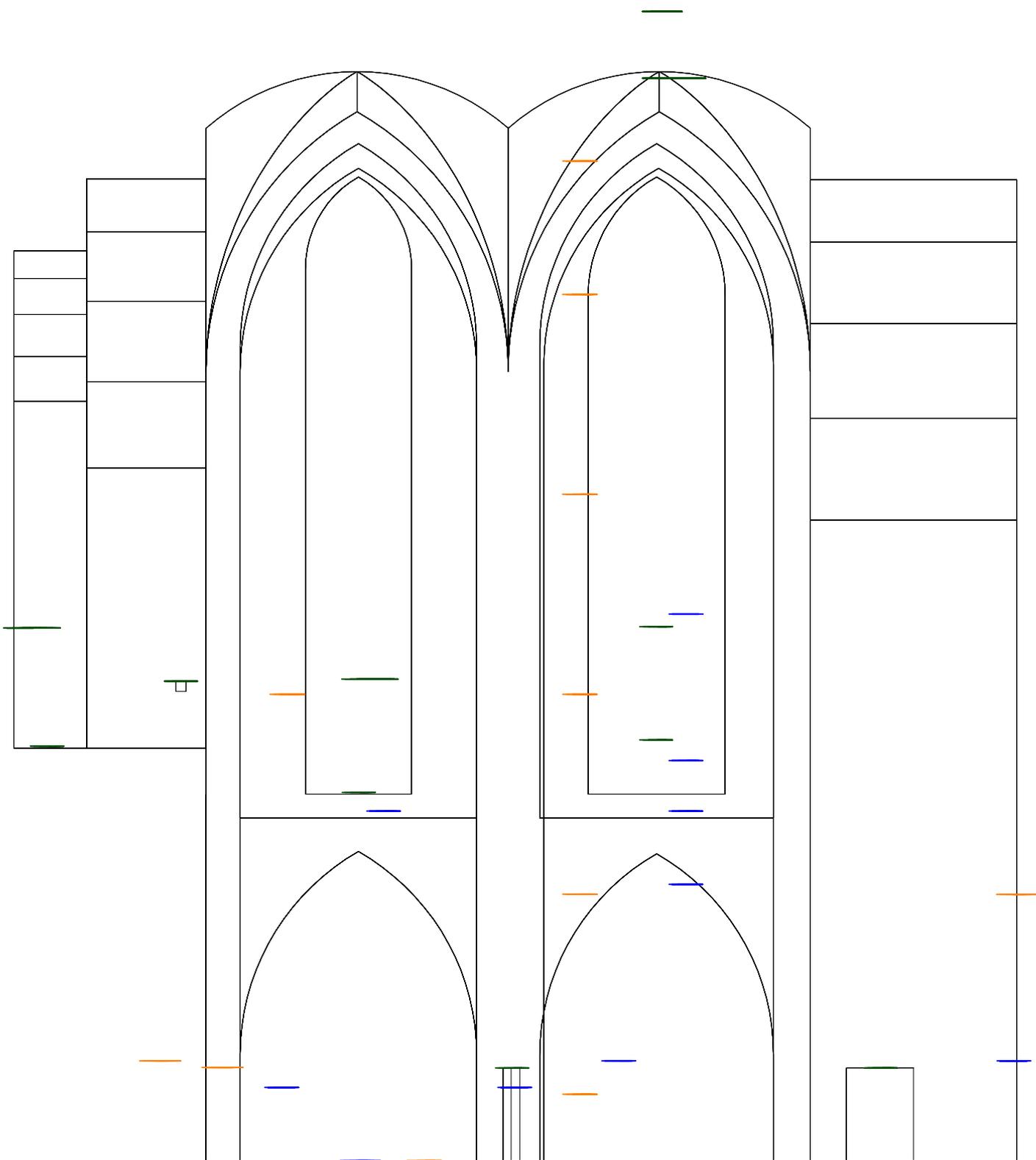
Zeichnungsnr.:  
**H-GR-02-01**

Index:  
 Datum: 20.08.2001  
 bearbeitet: Pr.  
 Projekt: 02-01

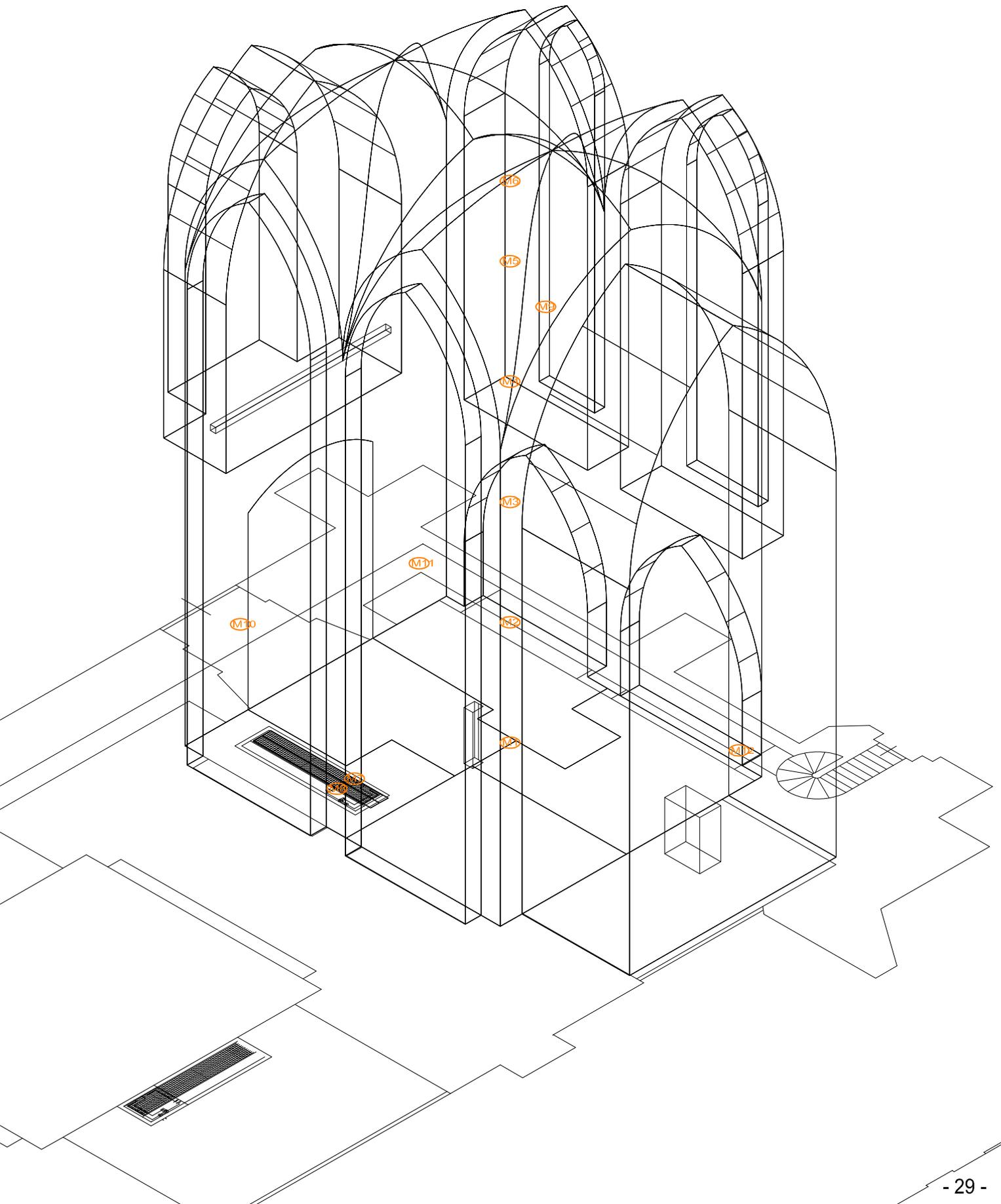
Maßstab: /.  
 Verleiher siehe Zeichnungsliste



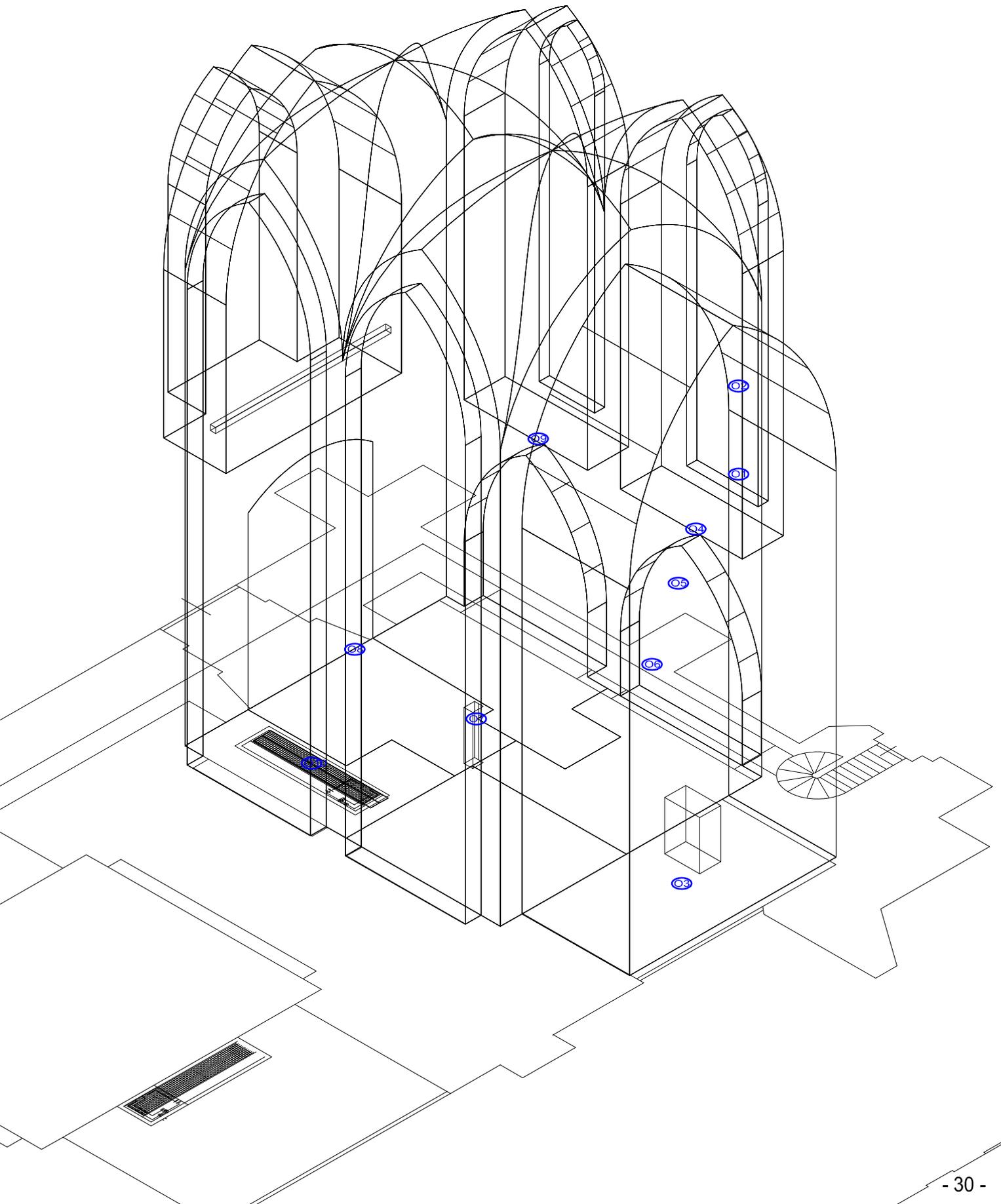


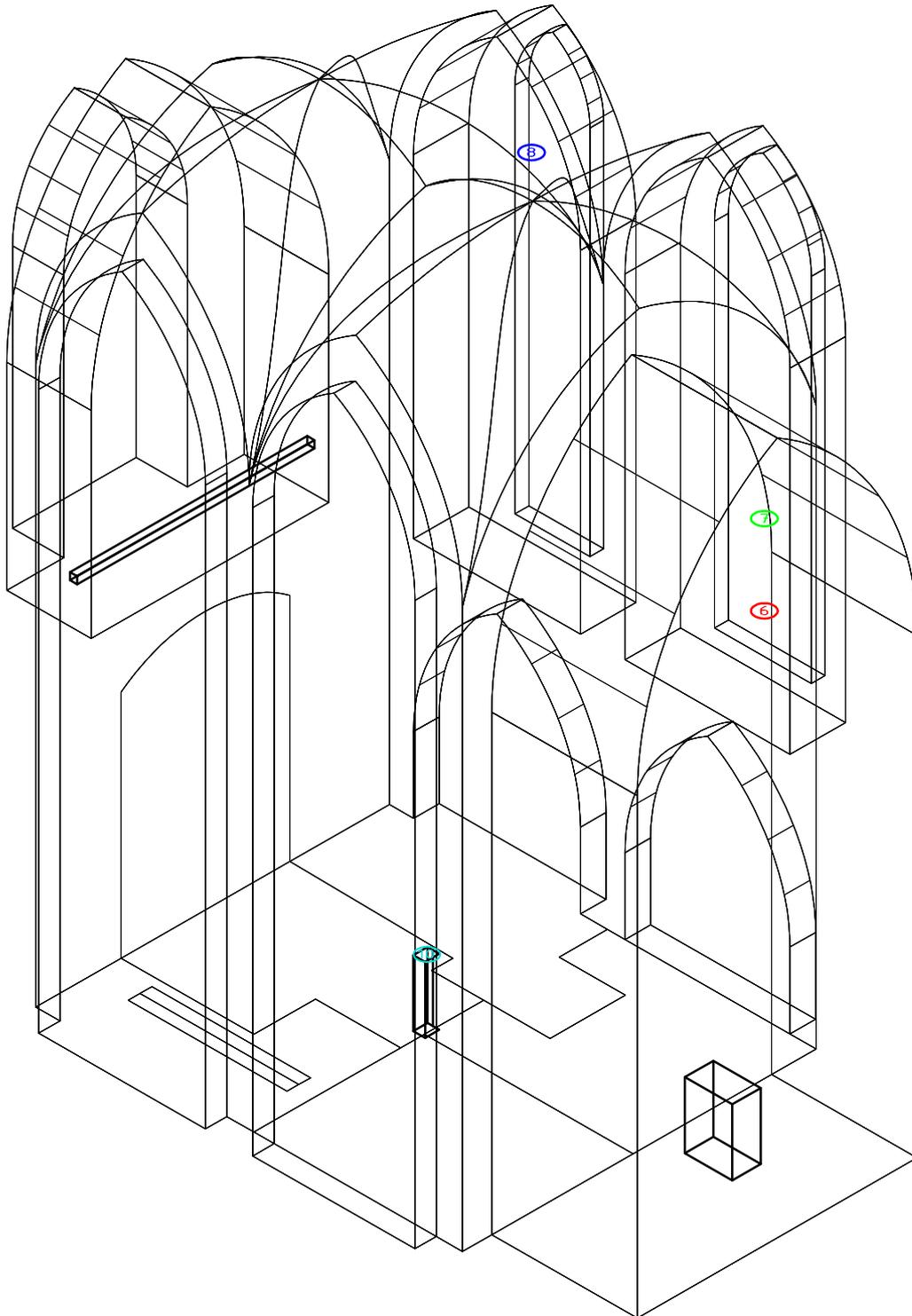


Messorte von Fa. Theod. Mahr Söhne GmbH (M)  
in der Nordkapelle von St. Marien



Messorte von Prof.-Ing. Olesen (O)  
in der Nordkapelle von St. Marien



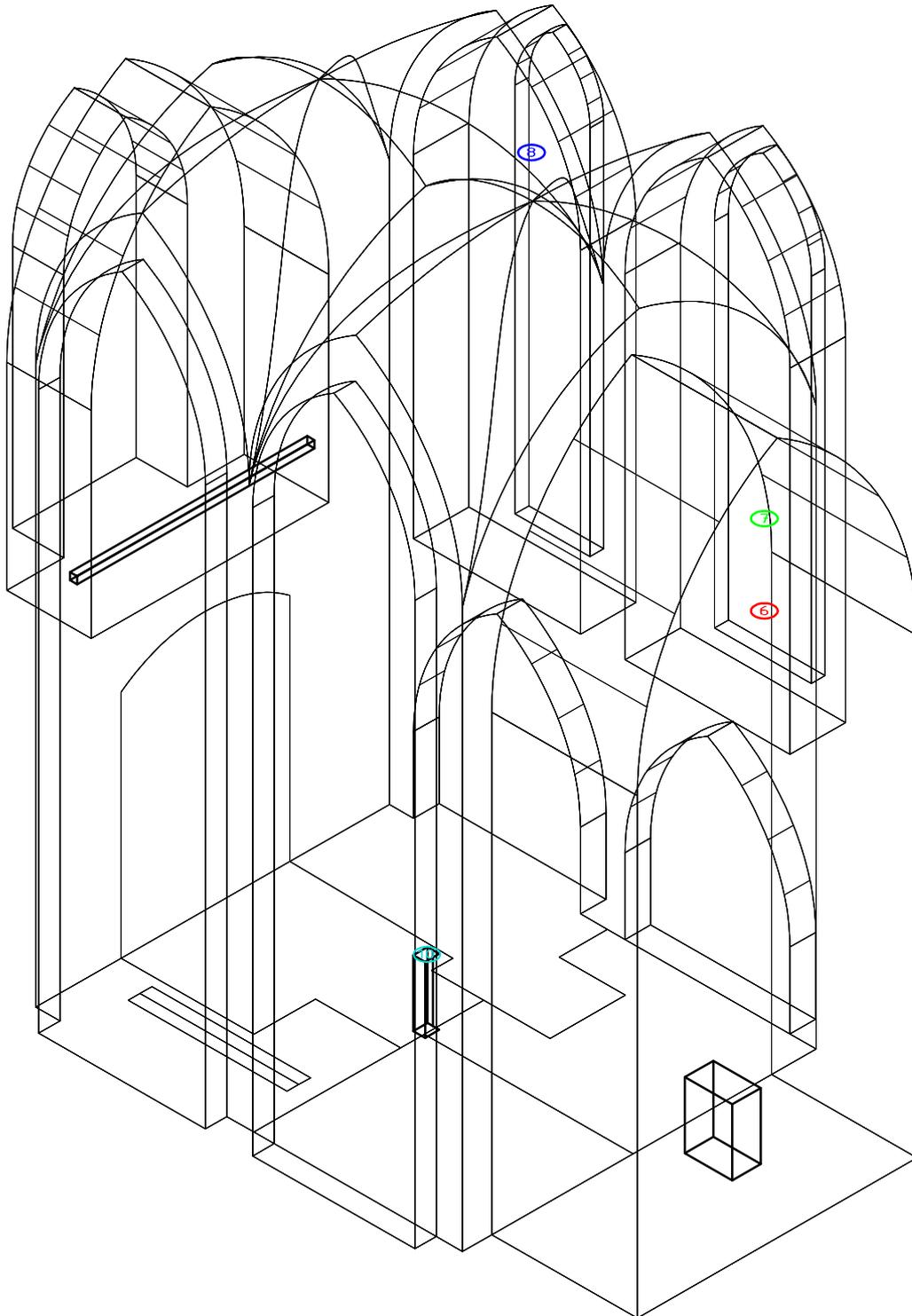


## Messorte und Messzeiträume in St. Marien, Wismar

		1.	2.	3.	4.			
		09.10.-19.11.2003 6 Datenlogger Messtakt 15'	19.11.-30.12.2003 5 Datenlogger Messtakt 30'	31.12.03-27.01.04 2 Datenlogger Messtakt 30'	27.01.-17.02.2004 9 Datenlogger Messtakt 15'	17.02.-25.02.2004 3 Datenlogger Messtakt 15'	27.02.- 07.04.2004 10 Datenlogger Messtakt 30'	08.04.-06.06.2004 4 Datenlogger Messtakt 30'
Nordkapelle	Fenster unten (0,8 m)	6						
	Fenster oben (2,5 m)	7						
	Dachboden	8	40	40	37	37	37	37
	extern: Gewoelbe		40 (ext)	40 (ext)	37 (ext)	37 (ext)	37 (ext)	37 (ext)
	unten (1,4 m)	10			33		33	
	Empore		23		22		22	
	Empore Außenwand West extern: Außenwand West		39	39	52	52	52	52
extern: Außenwand West		39 (ext)	39 (ext)	52 (ext)	52 (ext)	52 (ext)	52 (ext)	
Empore Fenster Nord extern: Fenster						55	55	
						55 (ext)	55 (ext)	
Suedkapelle	Empore	11	32		31		31	
	unten (1,4 m)				25		25	
Turmkapelle	Empore	12	27		29		29	
	unten (0,5 m)				28		28	
	Wand zu Nordkapelle extern: Wand zu Nordkapelle				38	38	38	38
				38 (ext)	38 (ext)	38 (ext)	38 (ext)	

Datenlogger für rel. Luftfeuchte und Temperatur (6, 7, 8, 10, 11, 12, 22, 23, 27, 28, 29, 31, 33)

Datenlogger für rel. Luftfeuchte und Temperatur und mit externem Fühler für Oberflächentemperatur mit Bestimmung der Taupunkttemperatur (37, 38, 39, 40, 52, 55)



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

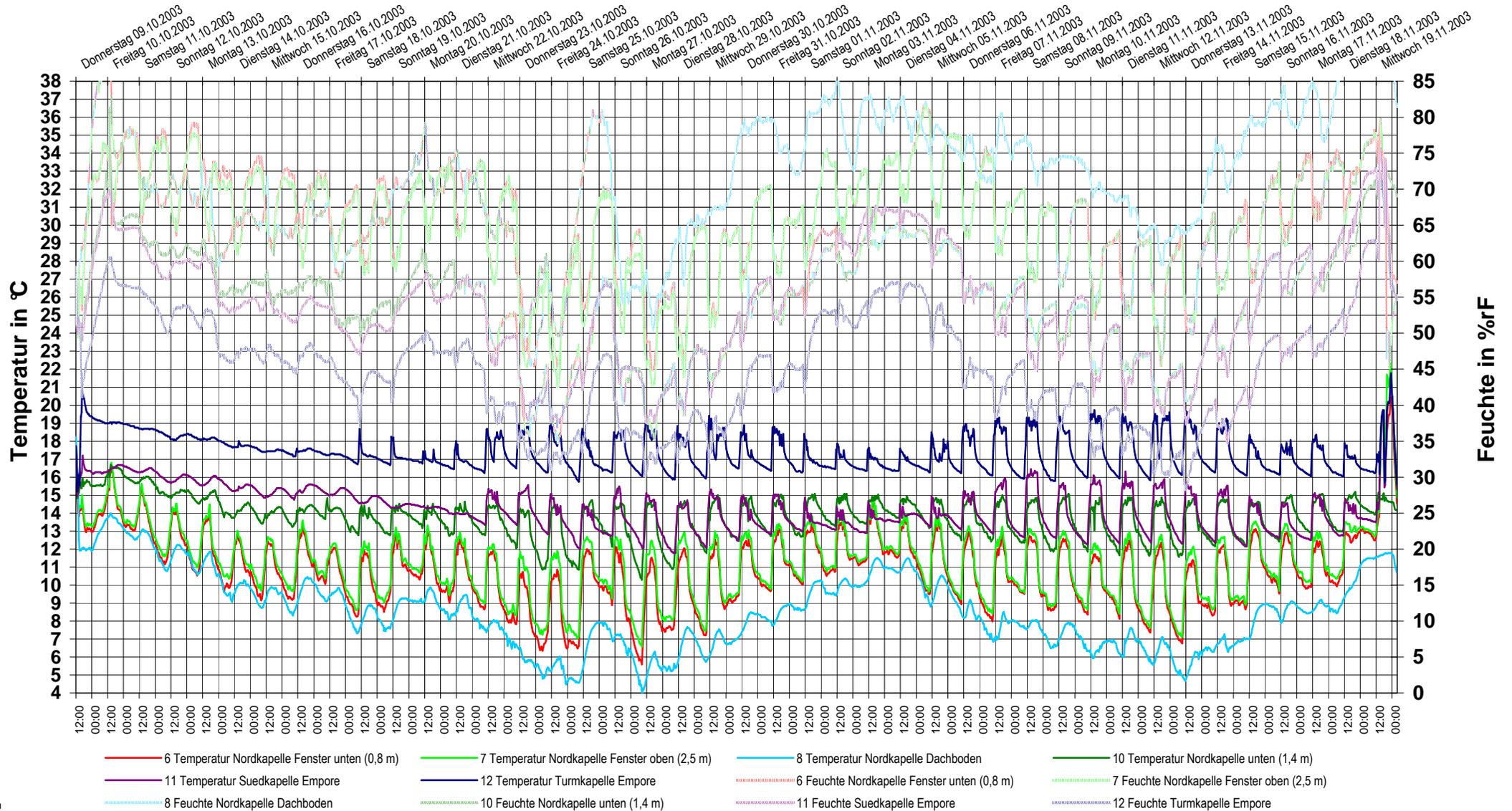
09.10. - 19.11.2003

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

1. Messzeitraum



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF

# Temperatur-Feuchte-Diagramm

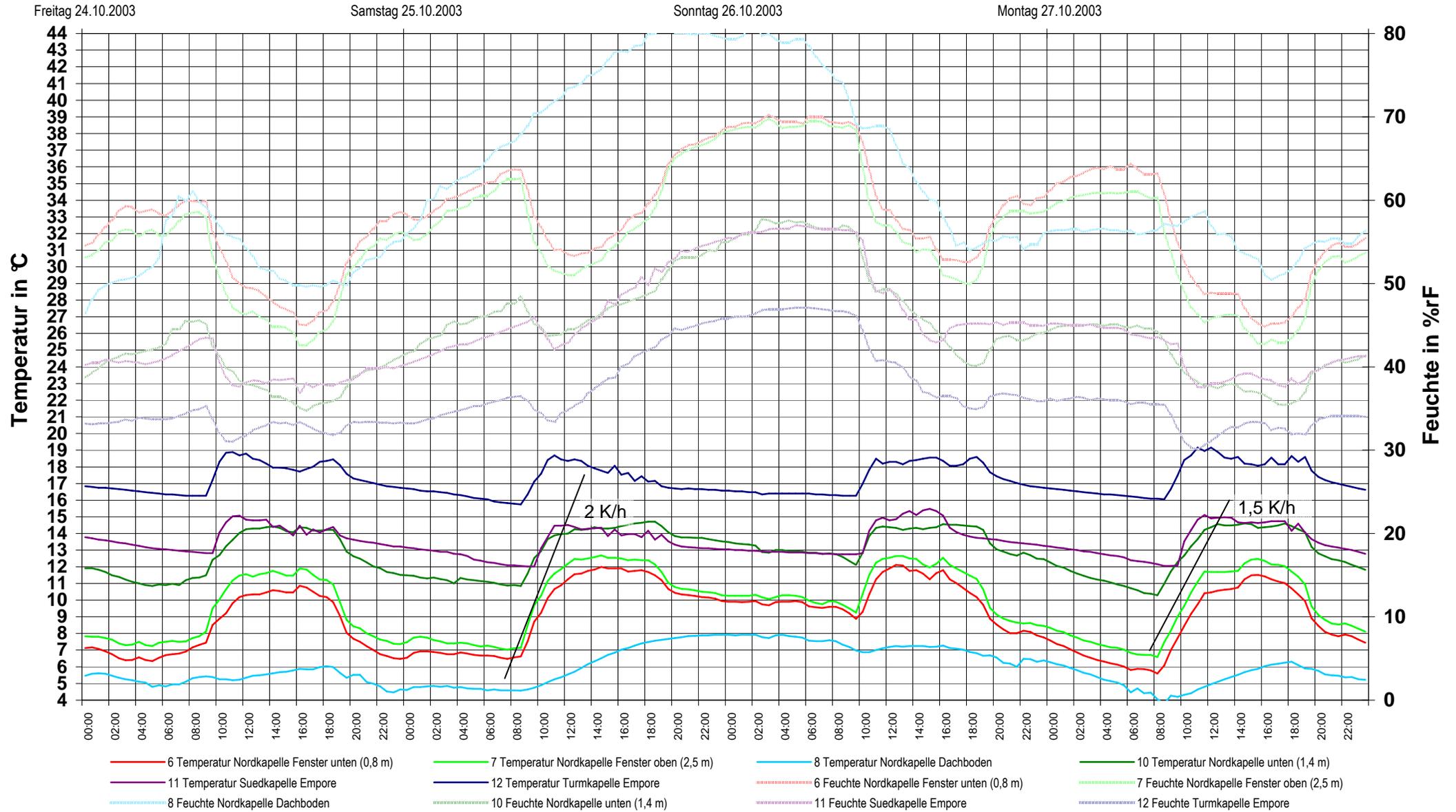
24. - 27.10.2003

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

1. Messzeitraum, Ausschnitt



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF

# Temperatur-Feuchte-Diagramm

## Samstag, 25.10.2003

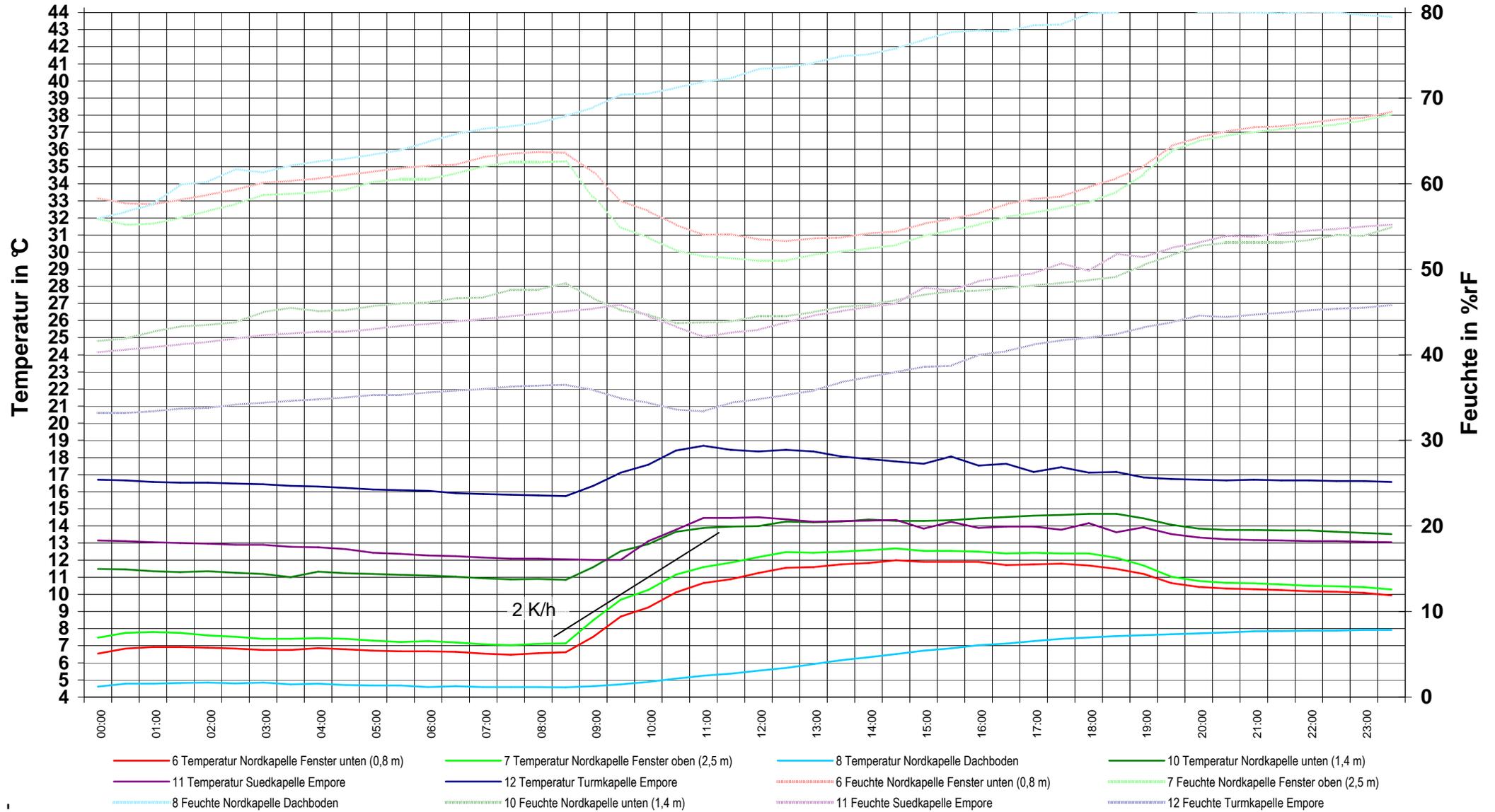
für Bauvorhaben:

47/03

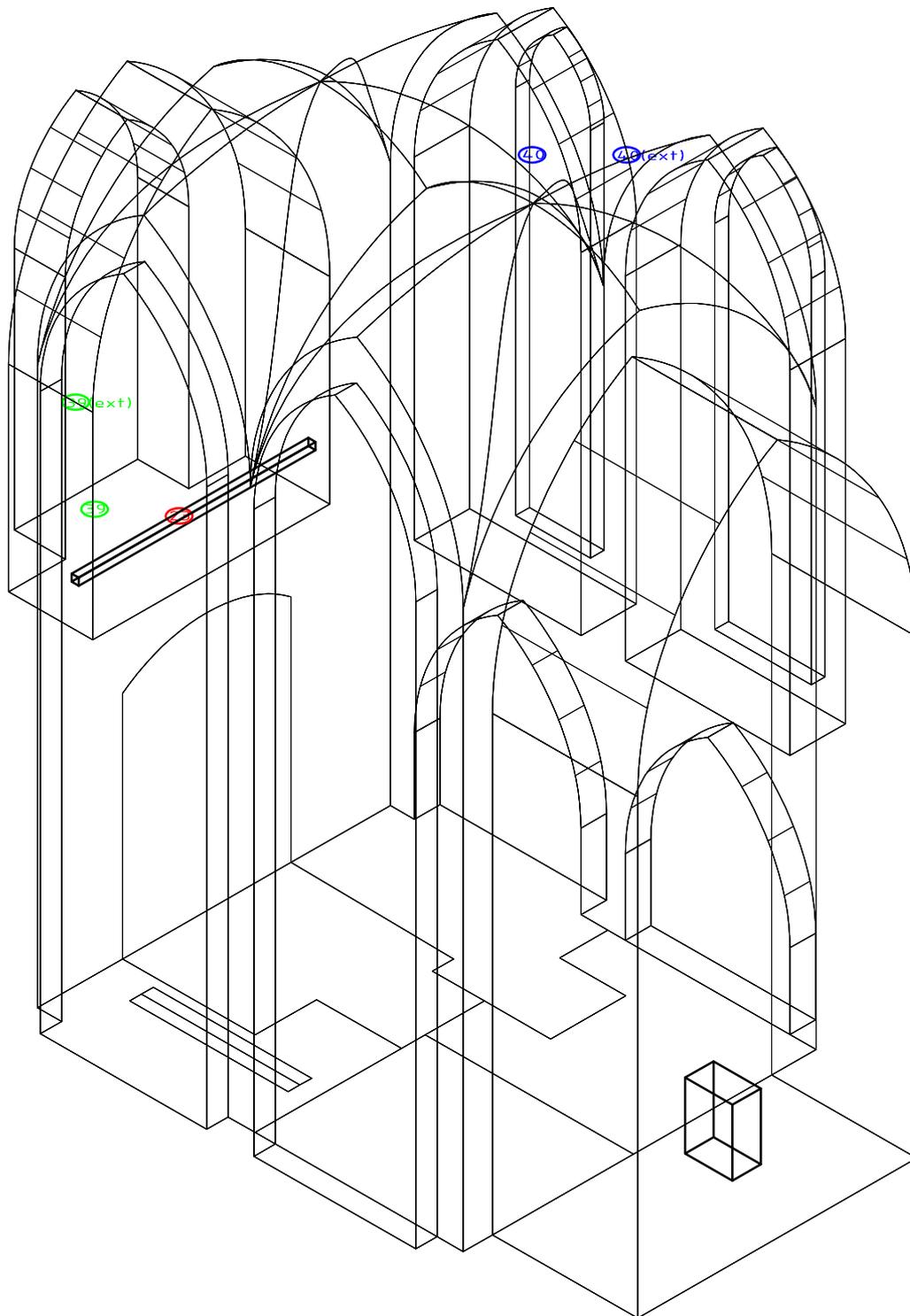
DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

1. Messzeitraum, Ausschnitt

Samstag 25.10.2003



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

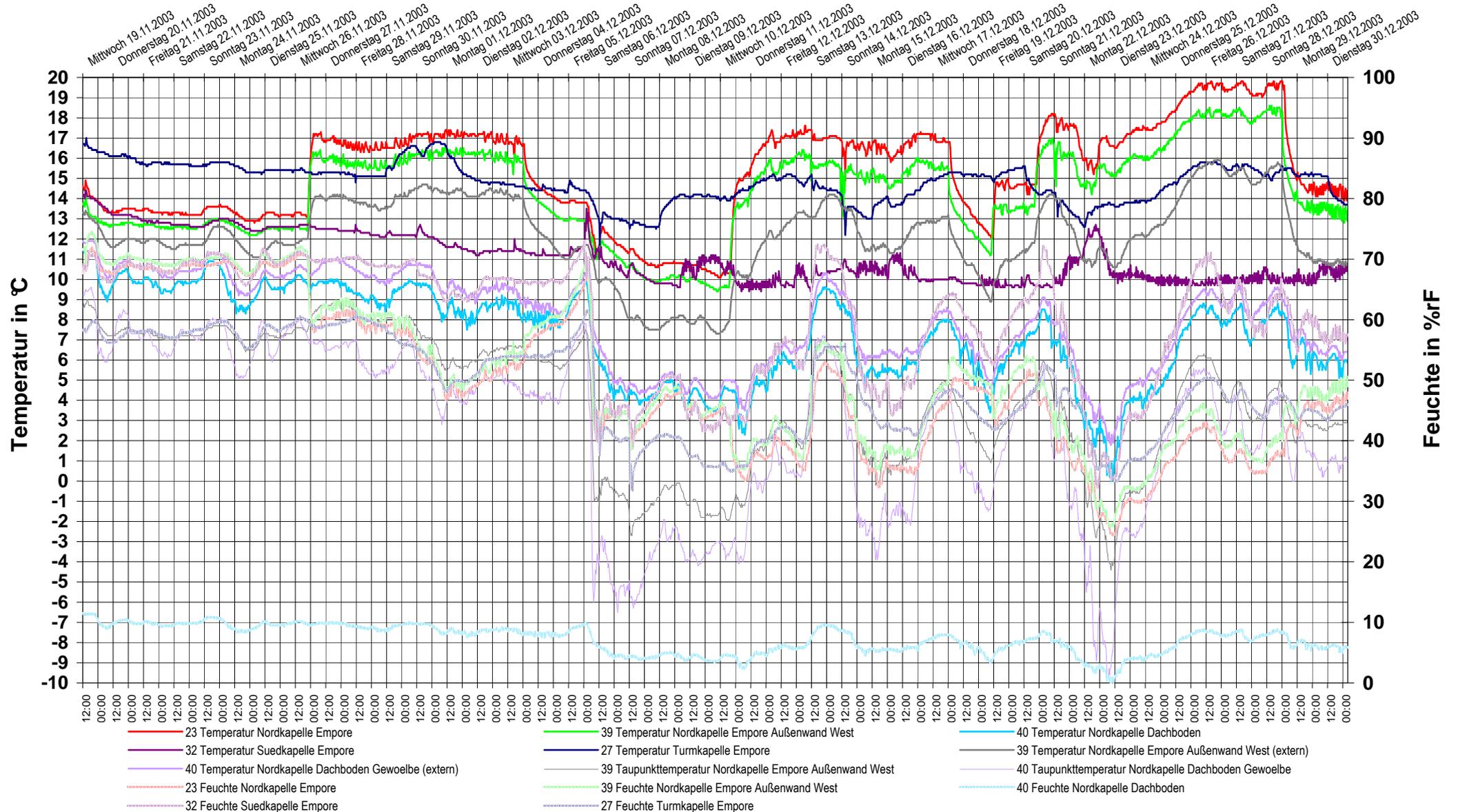
19.11. - 30.12.2003

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

2. Messzeitraum, 1. Abschnitt



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF

# Temperatur-Feuchte-Diagramm

## 31.12.2003 - 27.01.2004

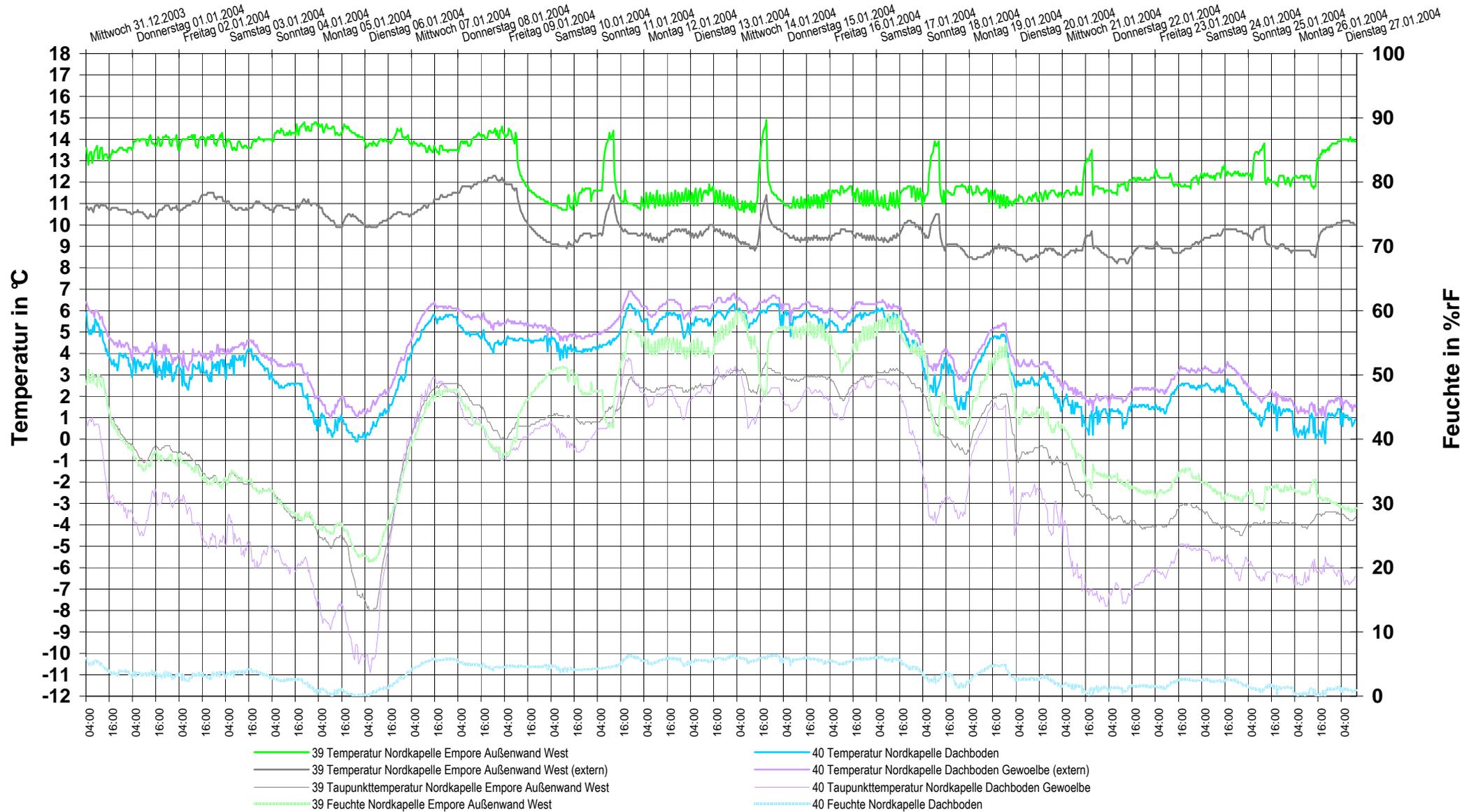
für Bauvorhaben:

47/03

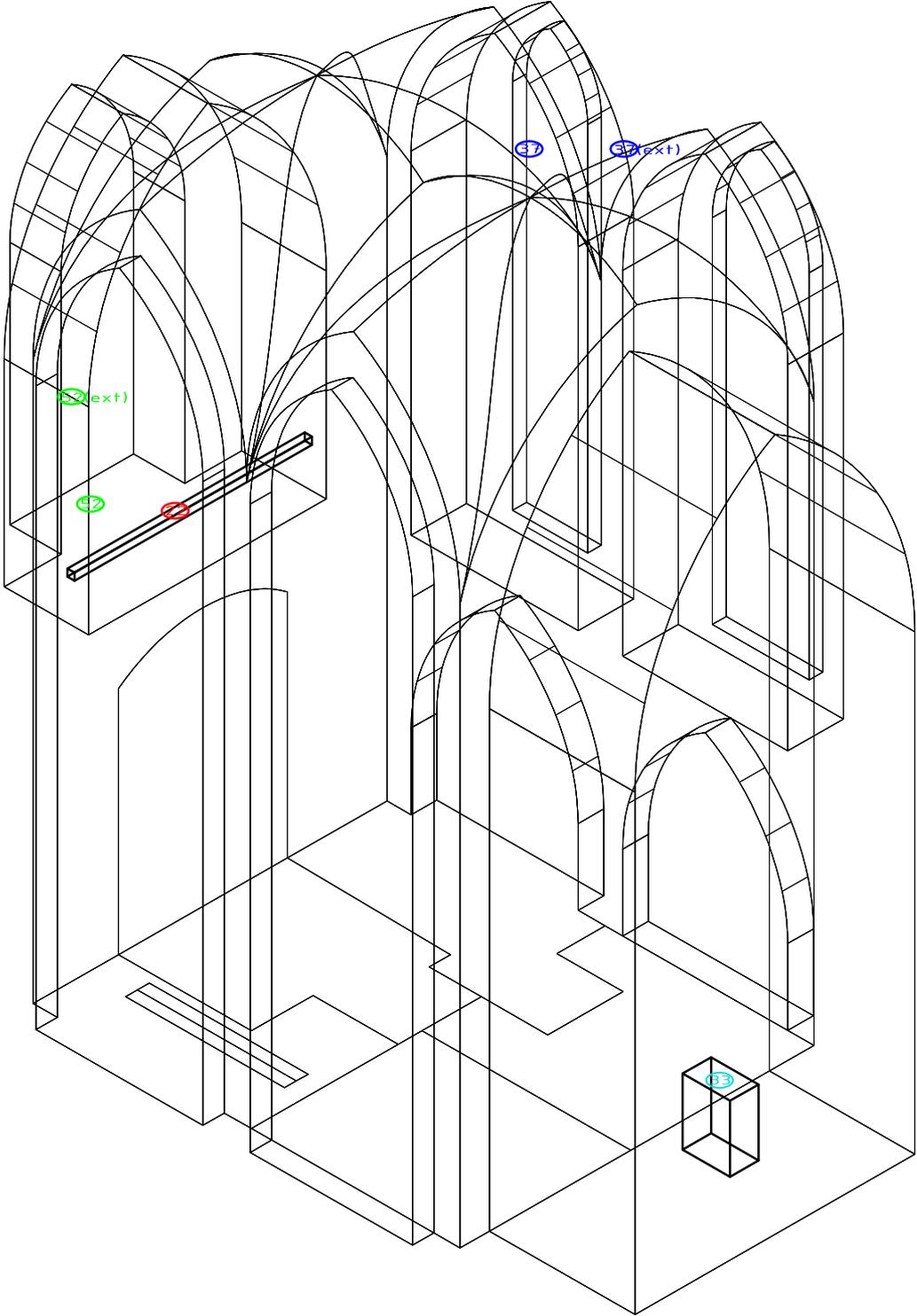
DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

2. Messzeitraum, 2. Abschnitt

(nur 4-Punkt-Logger)



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

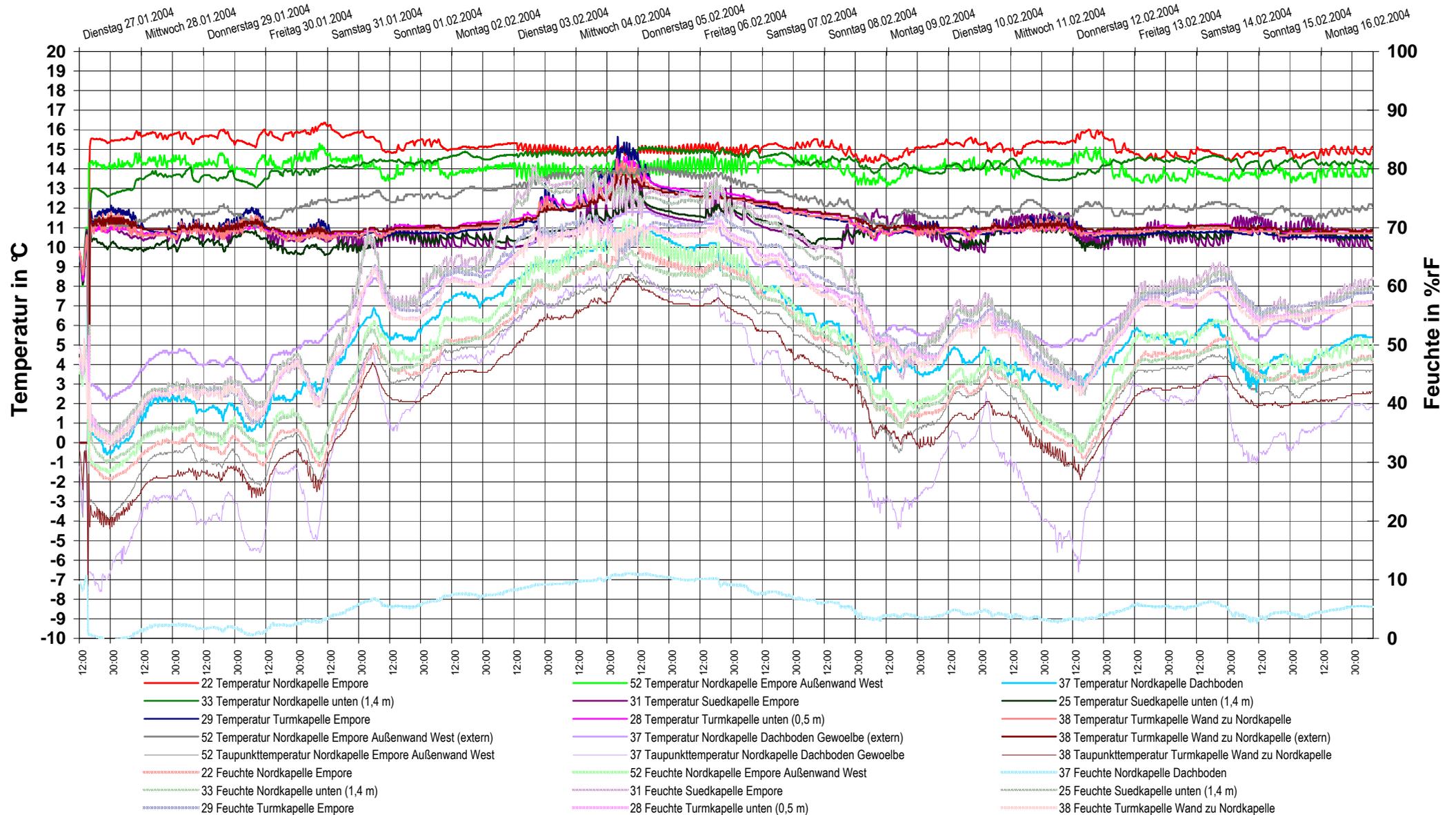
27.01. - 17.02.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

3. Messzeitraum, 1. Abschnitt



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF

# Temperatur-Feuchte-Diagramm

17. - 25.02.2004

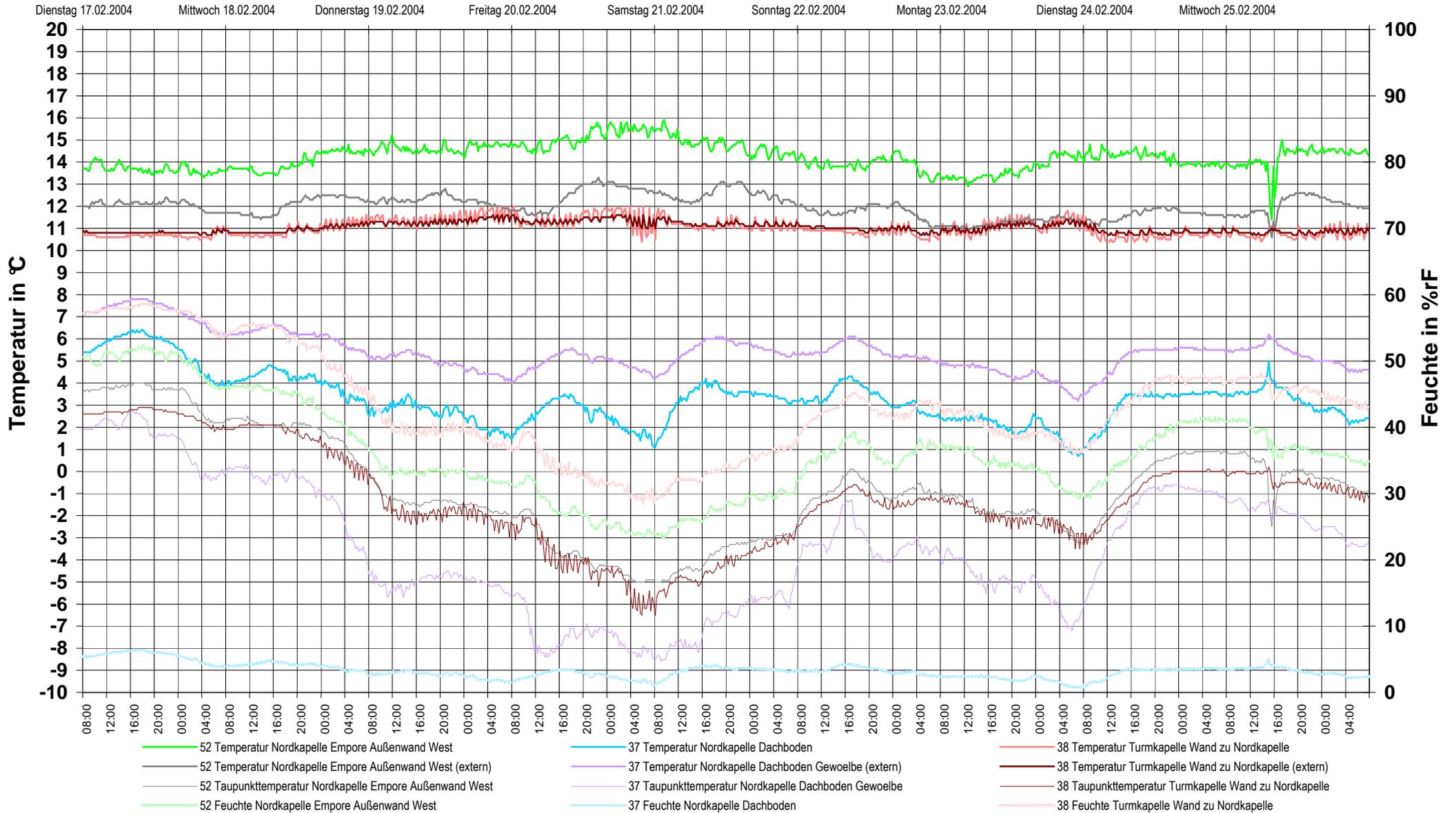
für Bauvorhaben:

47/03

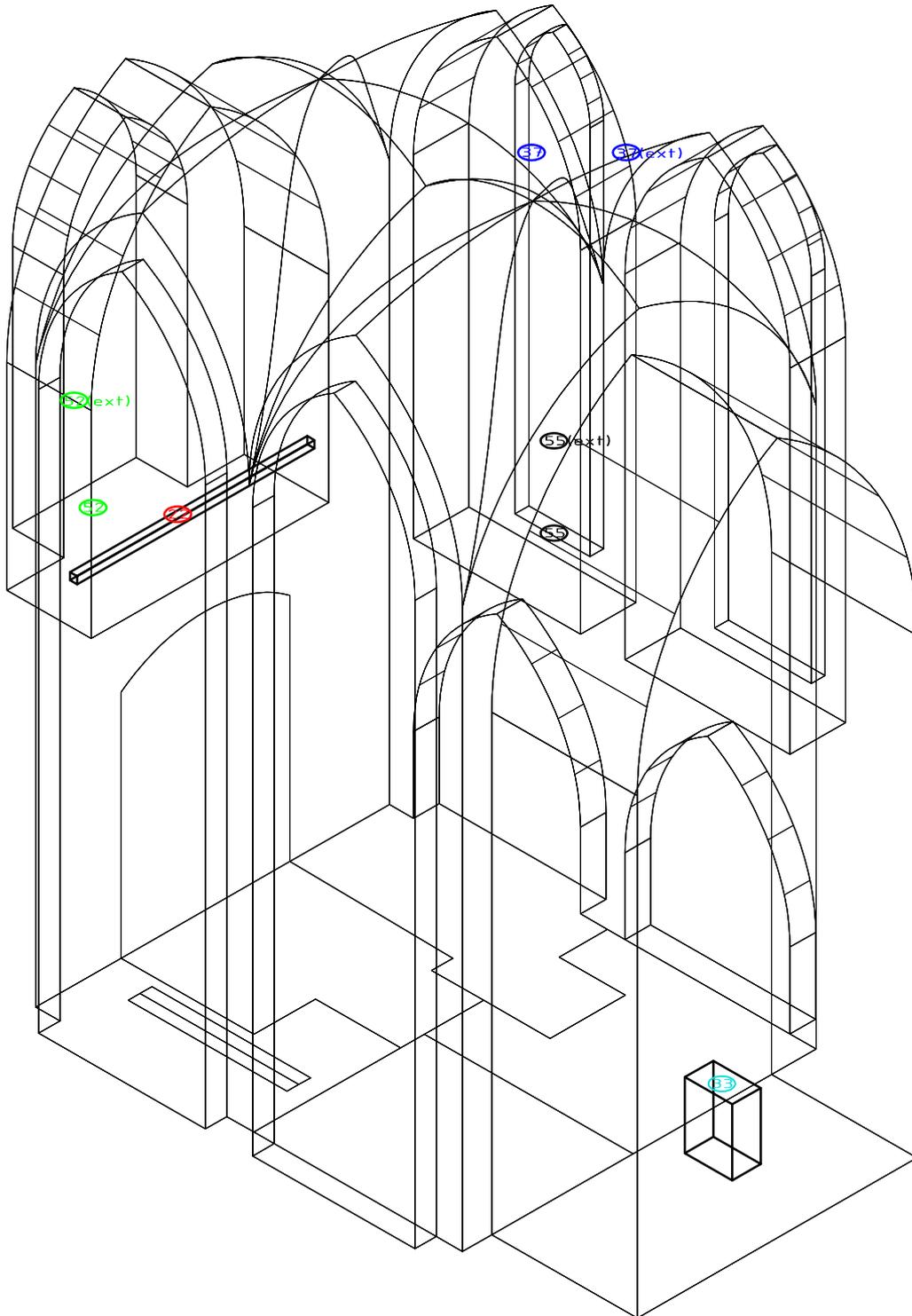
DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

3. Messzeitraum, 2. Abschnitt

(nur 4-Punkt-Logger)



Standardbereich bei Kirchen: Nutzungstemperatur: 12 °C - 16 °C / Nutzungsfeuchte: 55%rF - 75%rF



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

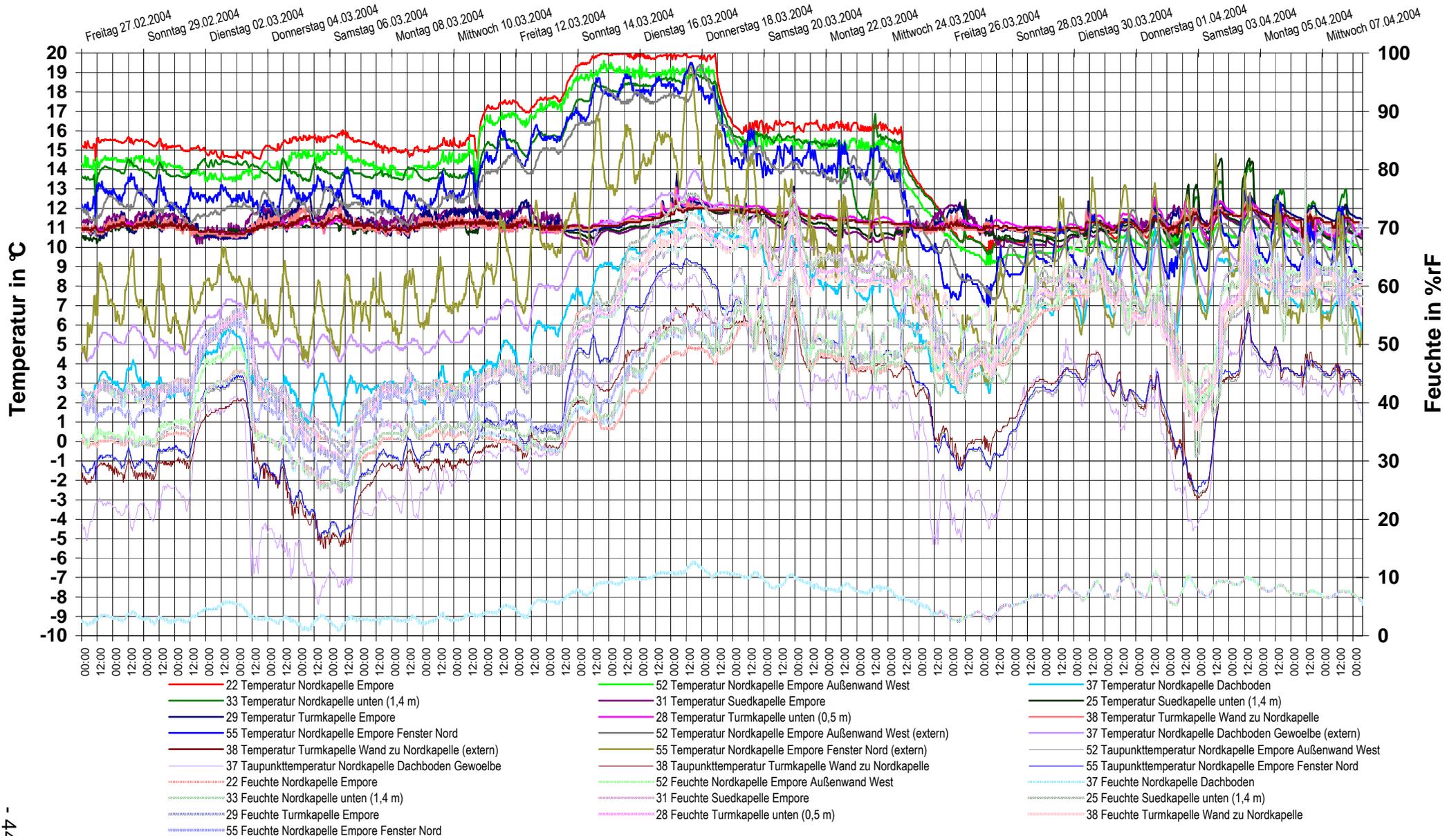
27.02. - 07.04.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

4. Messzeitraum, 1. Abschnitt



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

27.02. - 07.04.2004

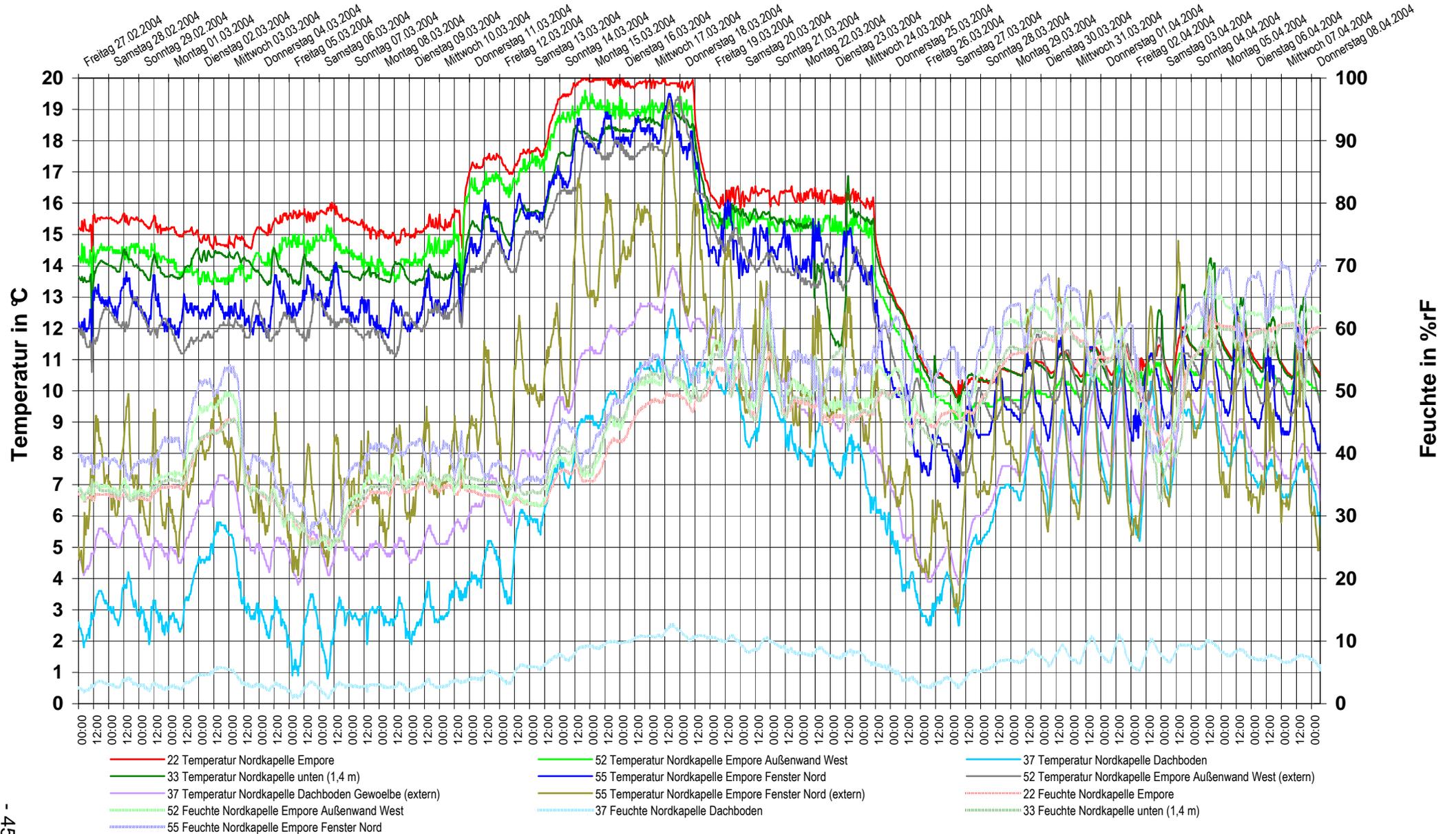
für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

4. Messzeitraum, 1. Abschnitt

Nordkapelle



# Temperatur-Diagramm

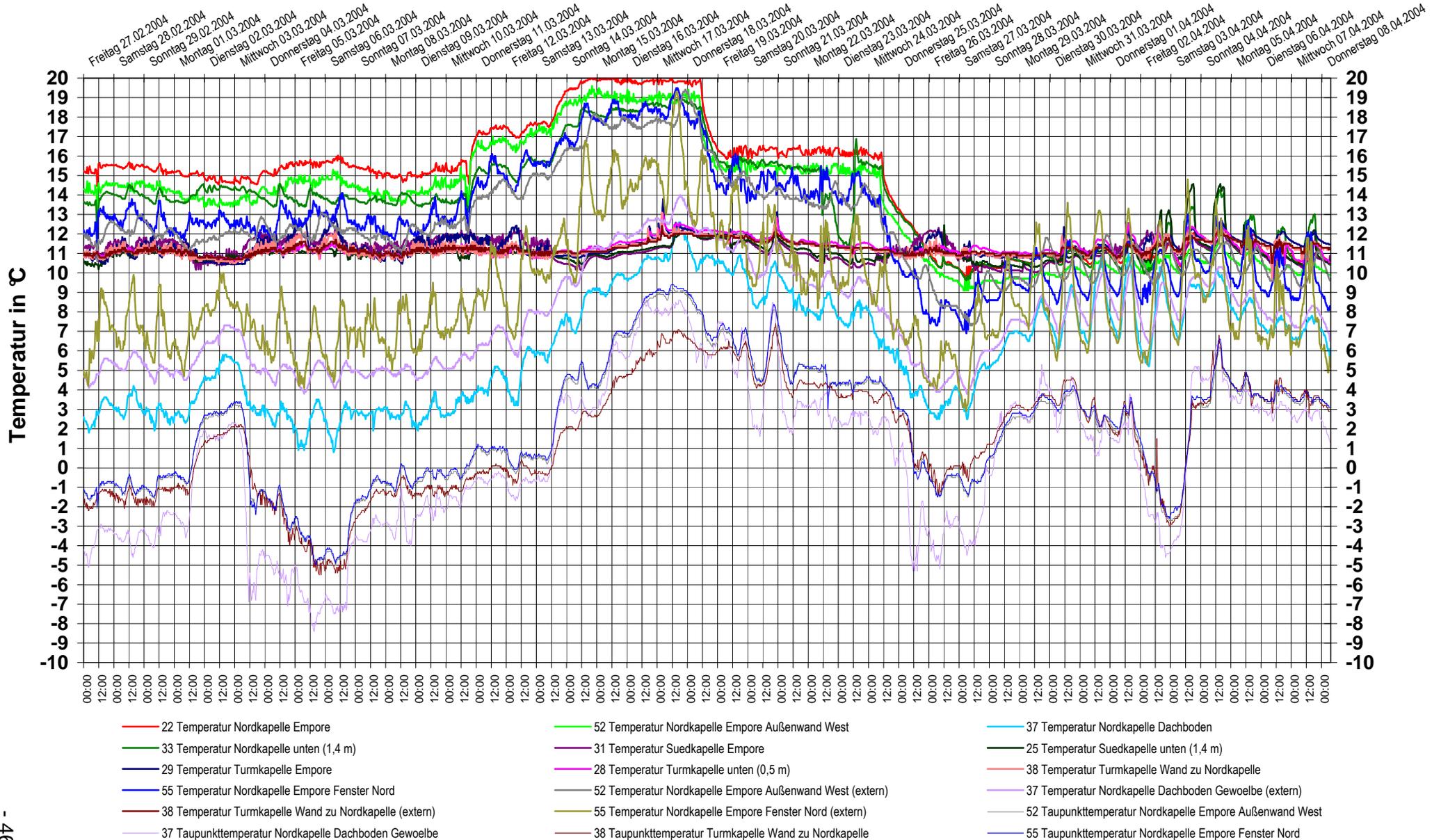
27.02. - 07.04.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

4. Messzeitraum, 1. Abschnitt



# Temperatur-Diagramm

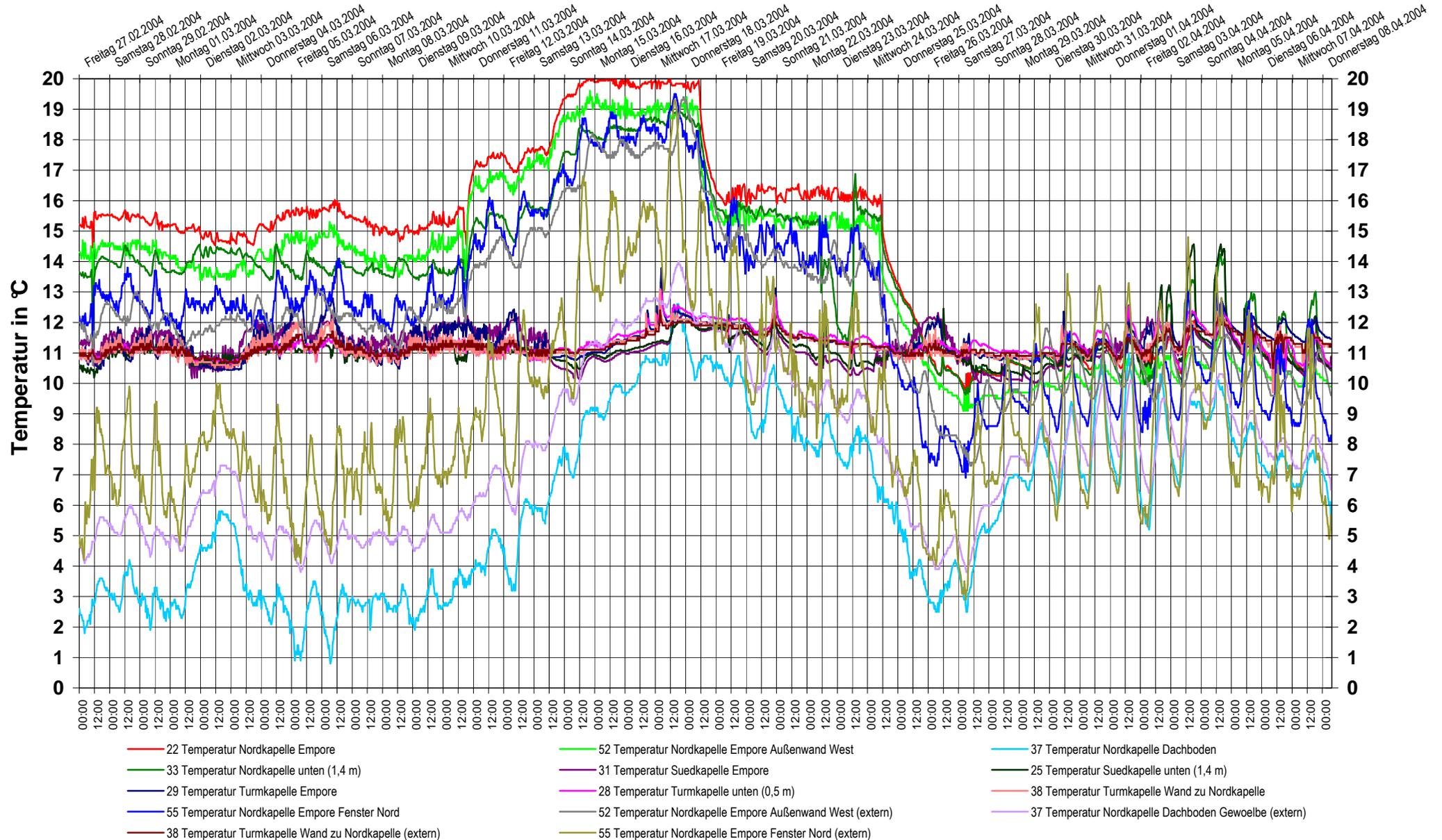
27.02. - 07.04.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

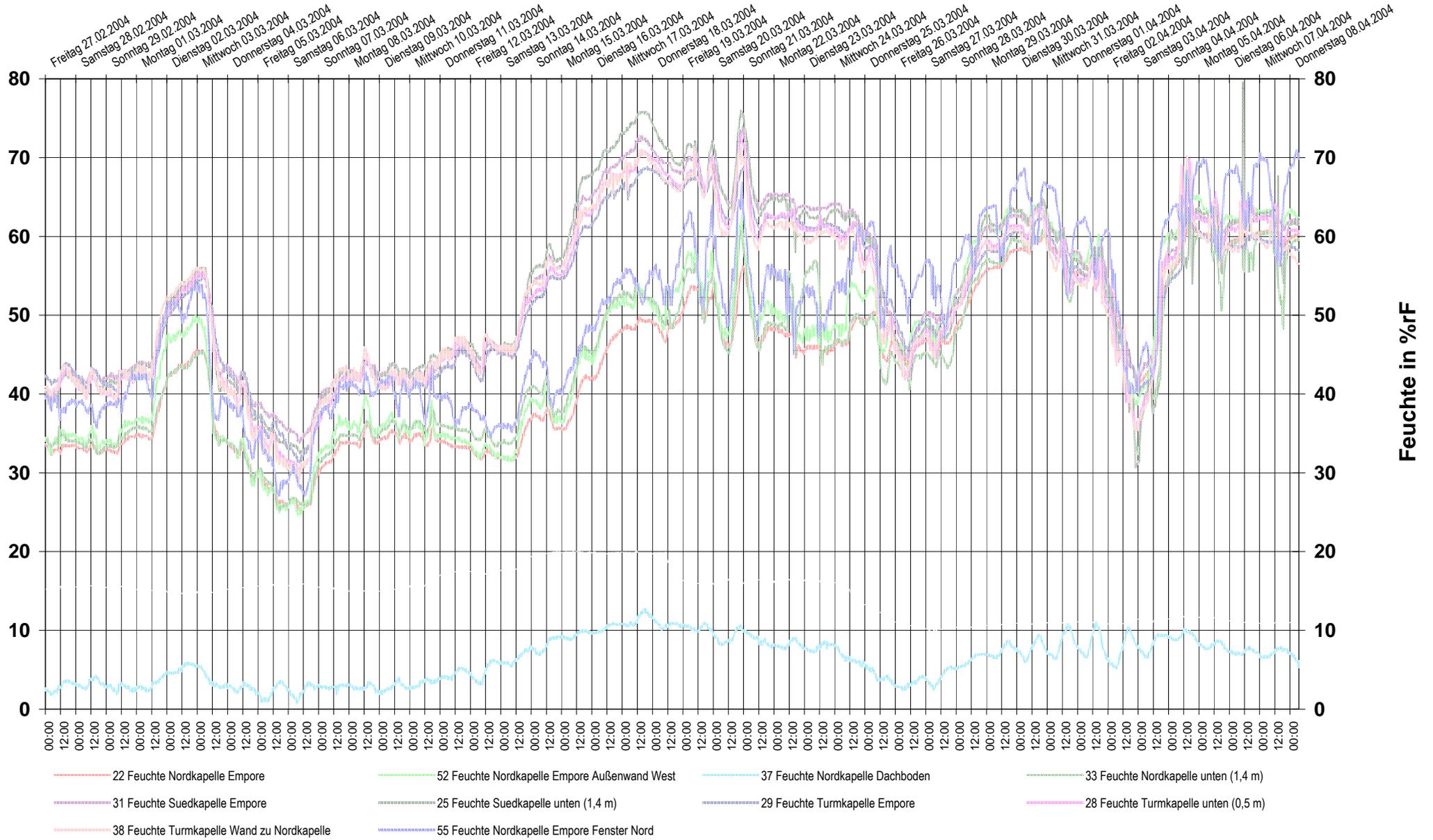
4. Messzeitraum, 1. Abschnitt



# Feuchte-Diagramm

27.02. - 07.04.2004

für Bauvorhaben: **47/03** DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
**St. Marien und St. Georgen in Wismar** 4. Messzeitraum, 1. Abschnitt



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

08.04. - 06.06.2004

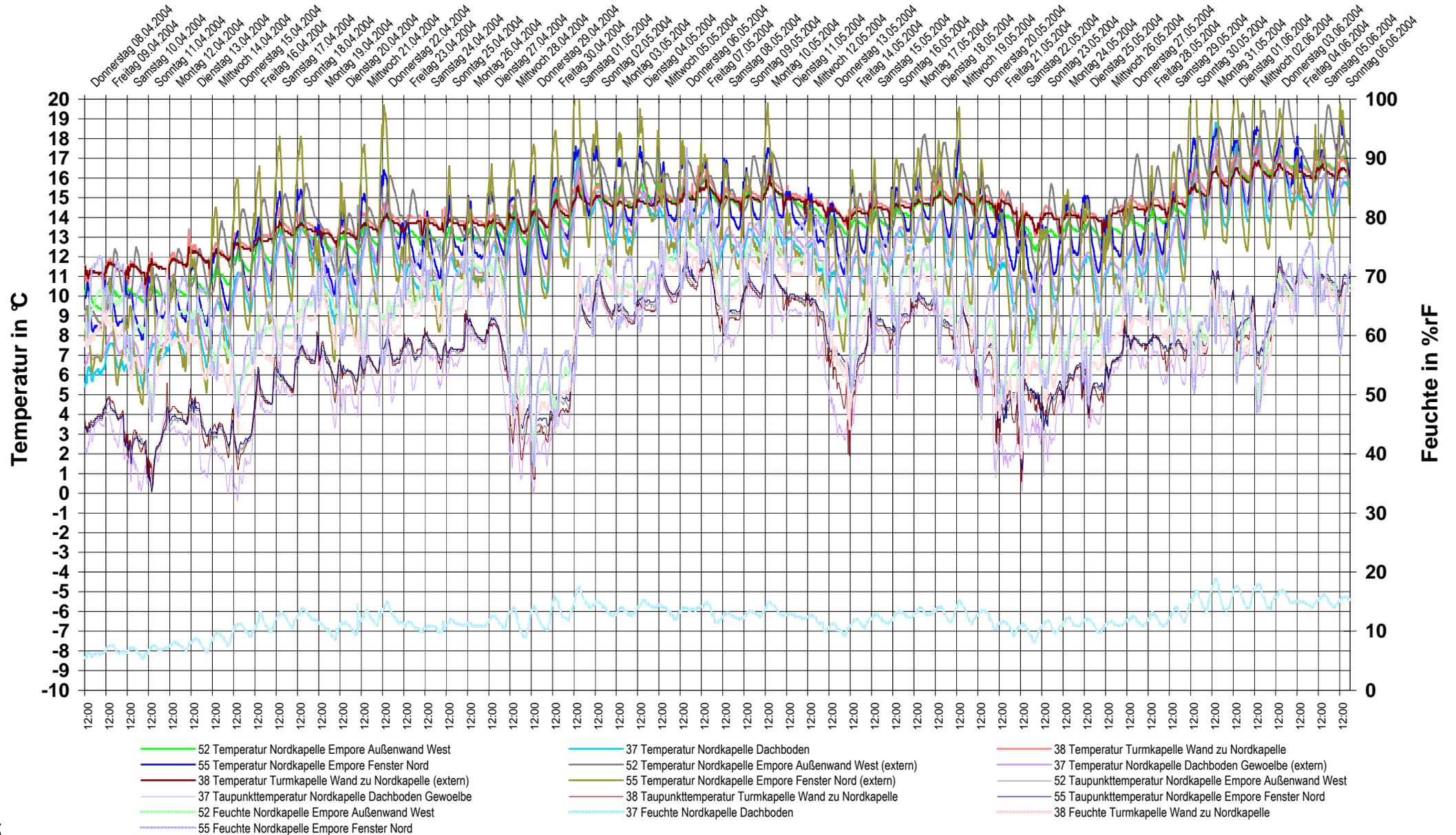
für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

4. Messzeitraum, 2. Abschnitt

(nur 4-Punkt-Logger)



## Messorte und Messzeiträume in St. Marien, Wismar

<b>5.</b>	
02.-10.12.2004	
15 Datenlogger	
Messtakt 15'	

Nordkapelle	Westkuppel, 15,90 m Höhe	<b>42</b>
	Westkuppel, 13,90 m Höhe	<b>43</b>
	Westkuppel, 11,90 m Höhe	<b>44</b>
	Westkuppel, 9,90 m Höhe	<b>45</b>
	Westkuppel, 7,90 m Höhe	<b>46</b>
	Westkuppel, 5,90 m Höhe	<b>47</b>
	Westkuppel, 3,90 m Höhe	<b>48</b>
	Westkuppel, 1,90 m Höhe	<b>49</b>
	Ostkuppel, 16,00 m Höhe	<b>50</b>
	Ostkuppel, 8,90 m Höhe	<b>51</b>
	Ostkuppel, 1,90 m Höhe	<b>56</b>
	Südwand, 4,20 m Höhe	<b>37</b>
	extern: Südwand, 1,80 m Höhe	
	Südwand, 12,20 m Höhe	<b>38</b>
	extern: Südwand, 9,20 m Höhe	
Zuluft im Schacht	<b>41</b>	
extern: Umluft im Schacht		
Dachboden	<b>52</b>	
extern: Gewölbe		

<b>6.</b>	
09.-10.12.2004	
14 Datenlogger	
Messtakt 5'	

Nordkapelle	Galerie Nordseite, Geländer	<b>11</b>
	Galerie Westseite, Geländer	<b>12</b>
Turmkapelle	Galerie Westseite, Geländer	<b>14</b>
Südkapelle	Galerie Westseite, Geländer	<b>15</b>
Nordkapelle	Umluft am Gitter	<b>29</b>
	Umluft, 0,50 m	<b>31</b>
	Umluft, 0,80 m	<b>32</b>
	Umluft, 1,00 m	<b>33</b>
	Zuluft, 0,20 m	<b>34</b>
	Zuluft, 0,45 m	<b>35</b>
	Zuluft, 0,80 m	<b>36</b>
	Galerie Westseite	<b>39</b>
	extern: Galerie Westseite, Wand	
	Galerie Nordseite, Fenster	<b>53</b>
extern: Galerie Nordseite, Fenster		
Galerie Nordseite, Geländer	<b>54</b>	
extern: Nordseite, frei hängend		

# Temperatur-Feuchte-Diagramm

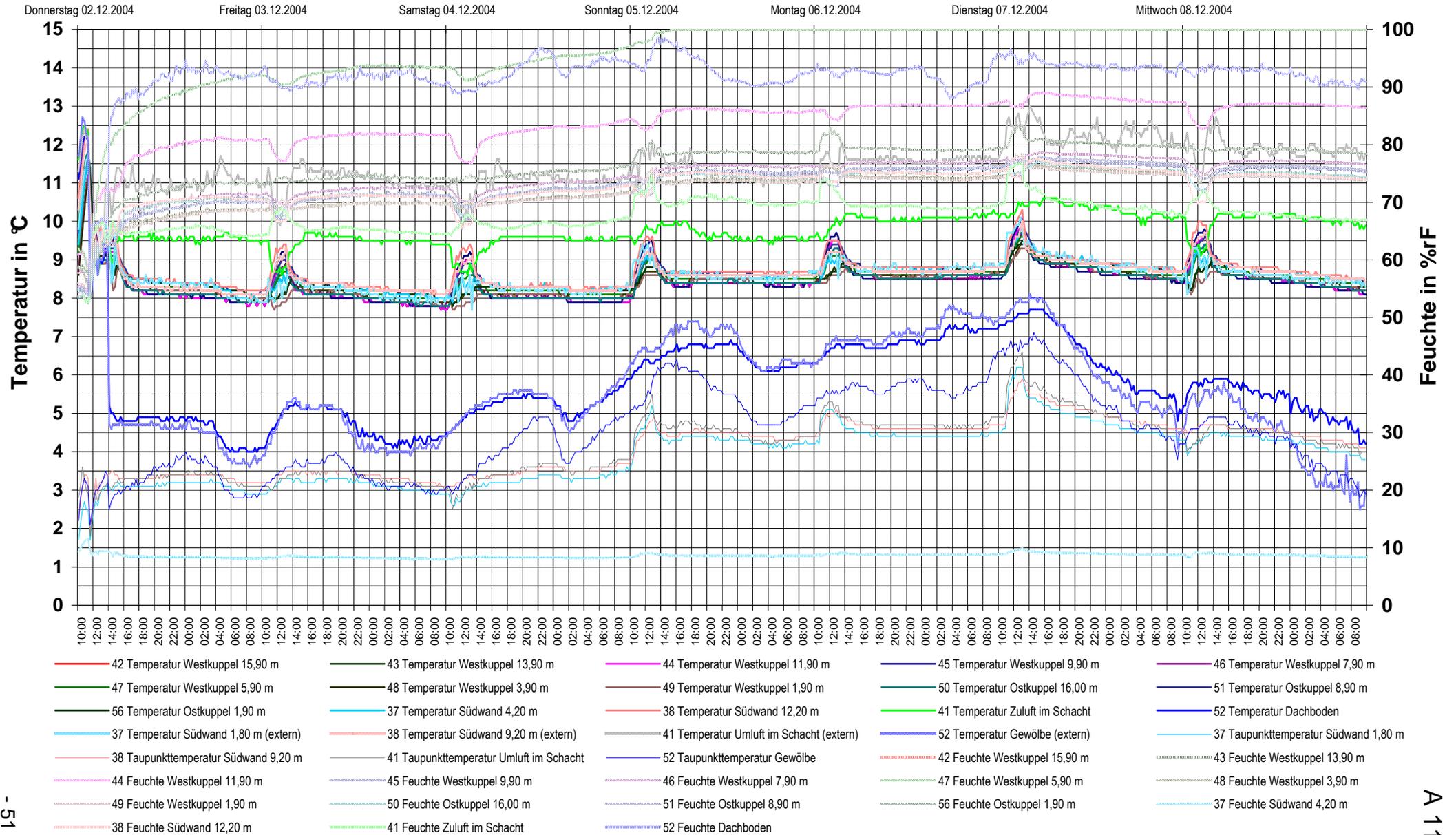
02. - 08.12.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

5. Messzeitraum



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

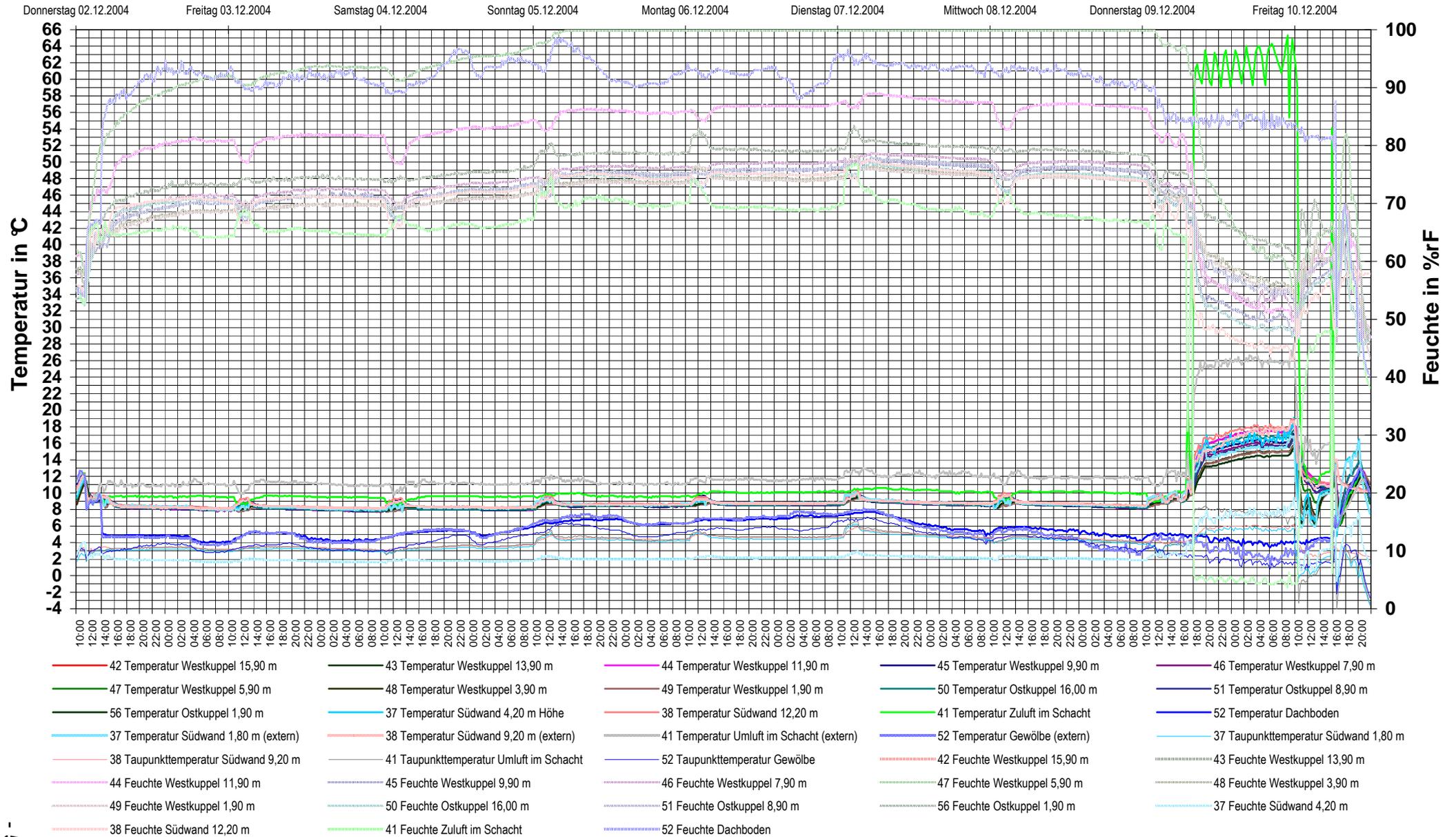
02. - 10.12.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

5. Messzeitraum



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

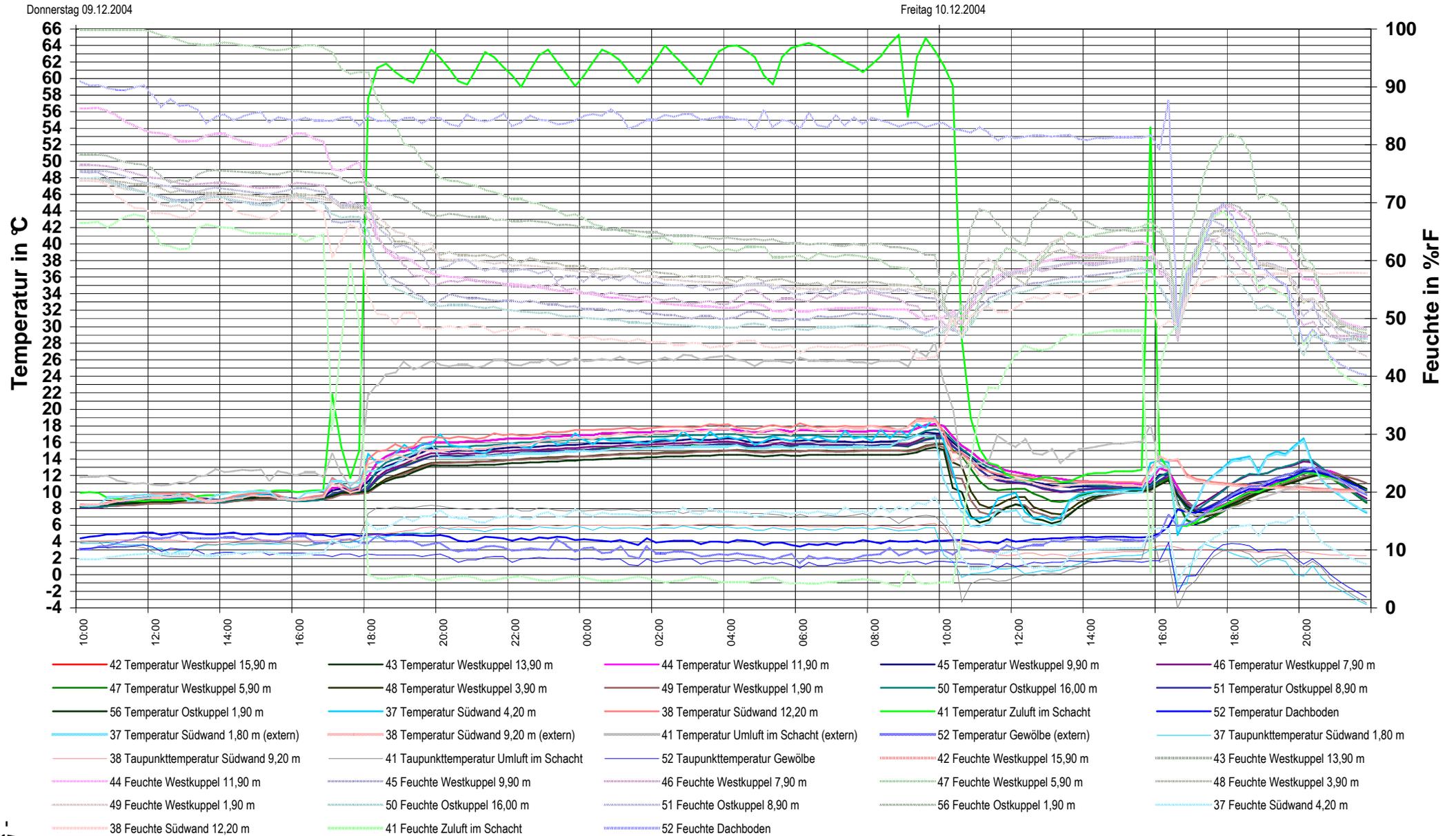
09. - 10.12.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

5. Messzeitraum



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

09. - 10.12.2004

für Bauvorhaben:

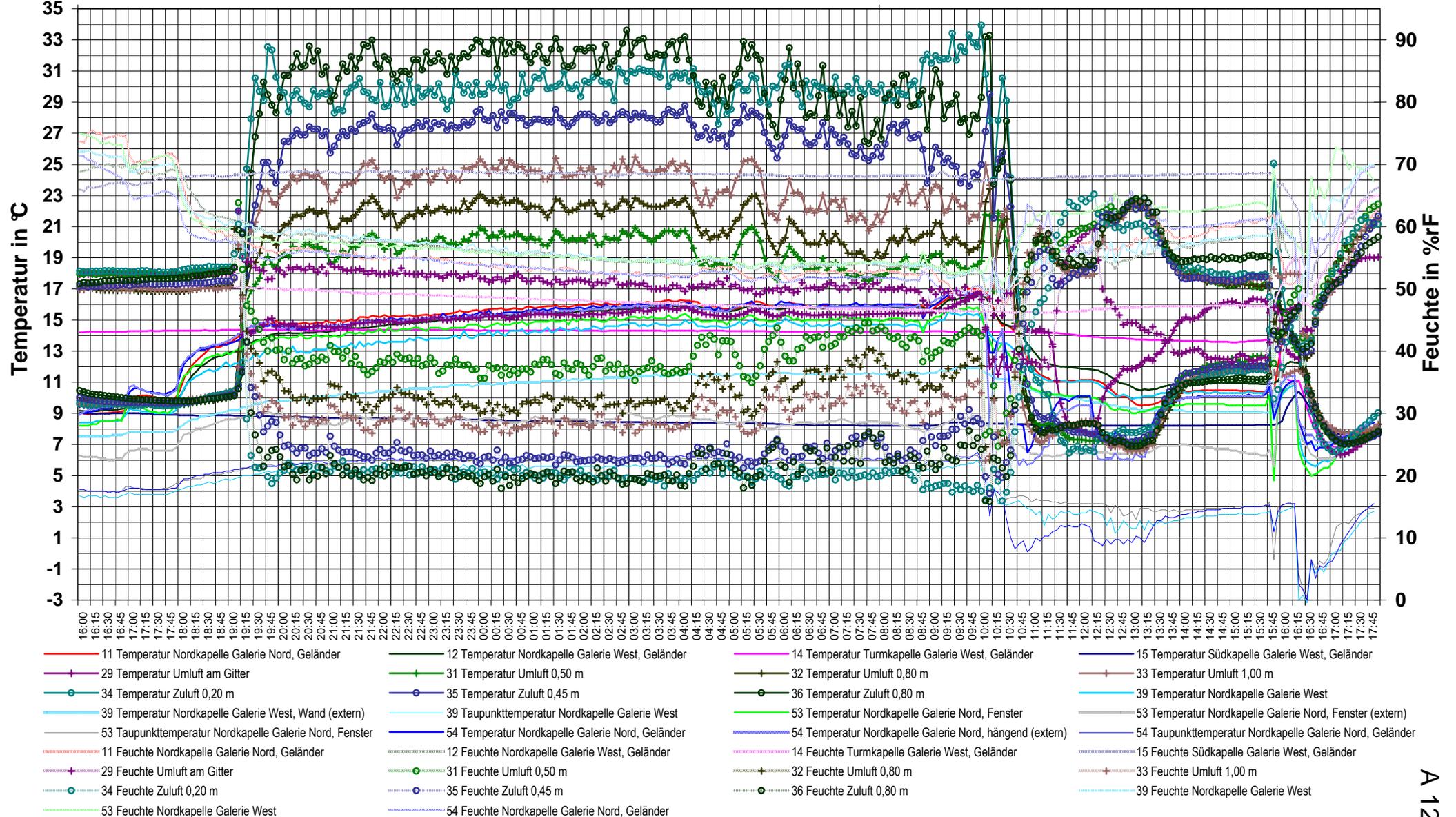
47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

6. Messzeitraum

Donnerstag 09.12.2004

Freitag 10.12.2004



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

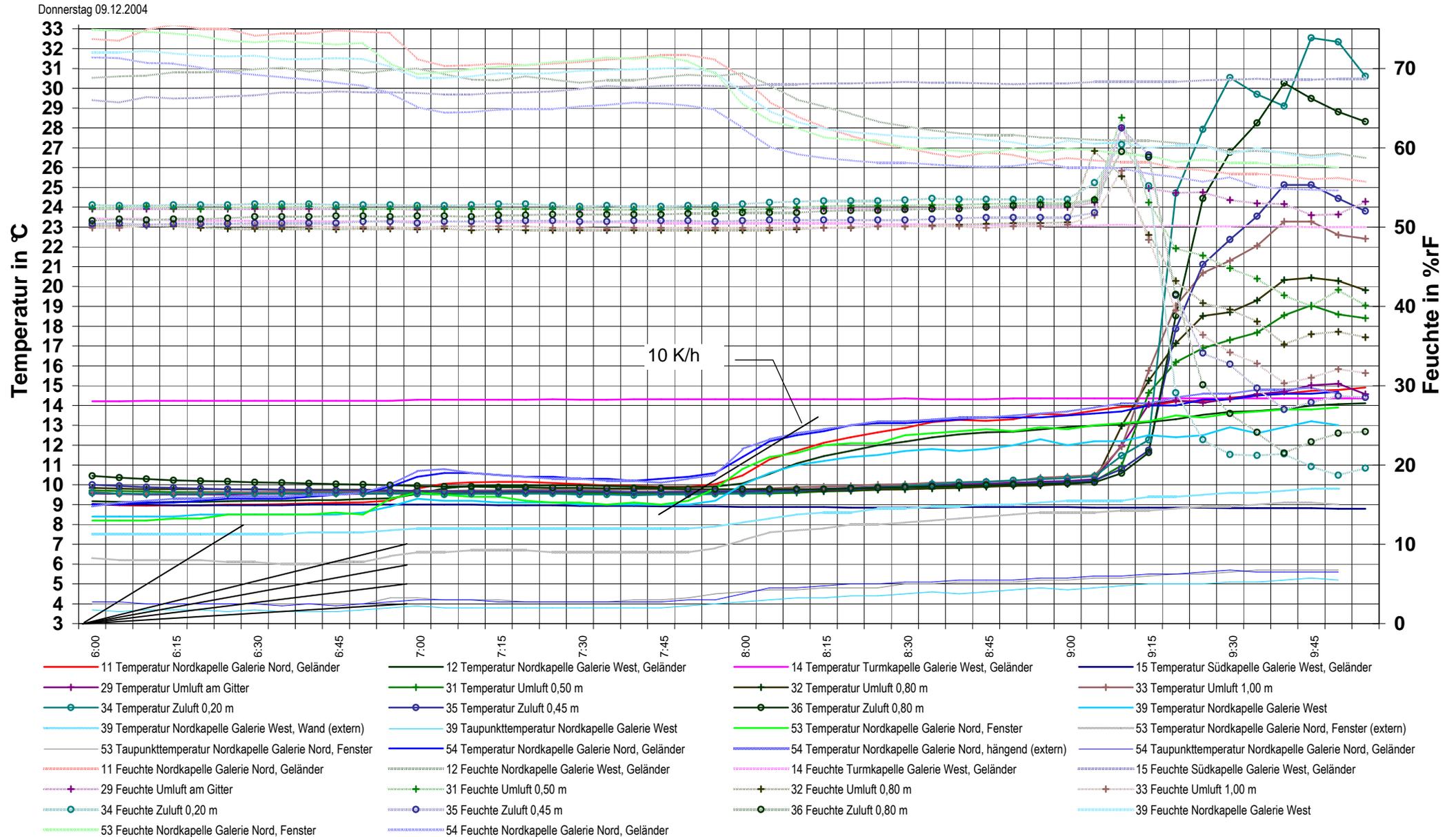
09.12.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

6. Messzeitraum



# Temperatur-Diagramm

09.12.2004

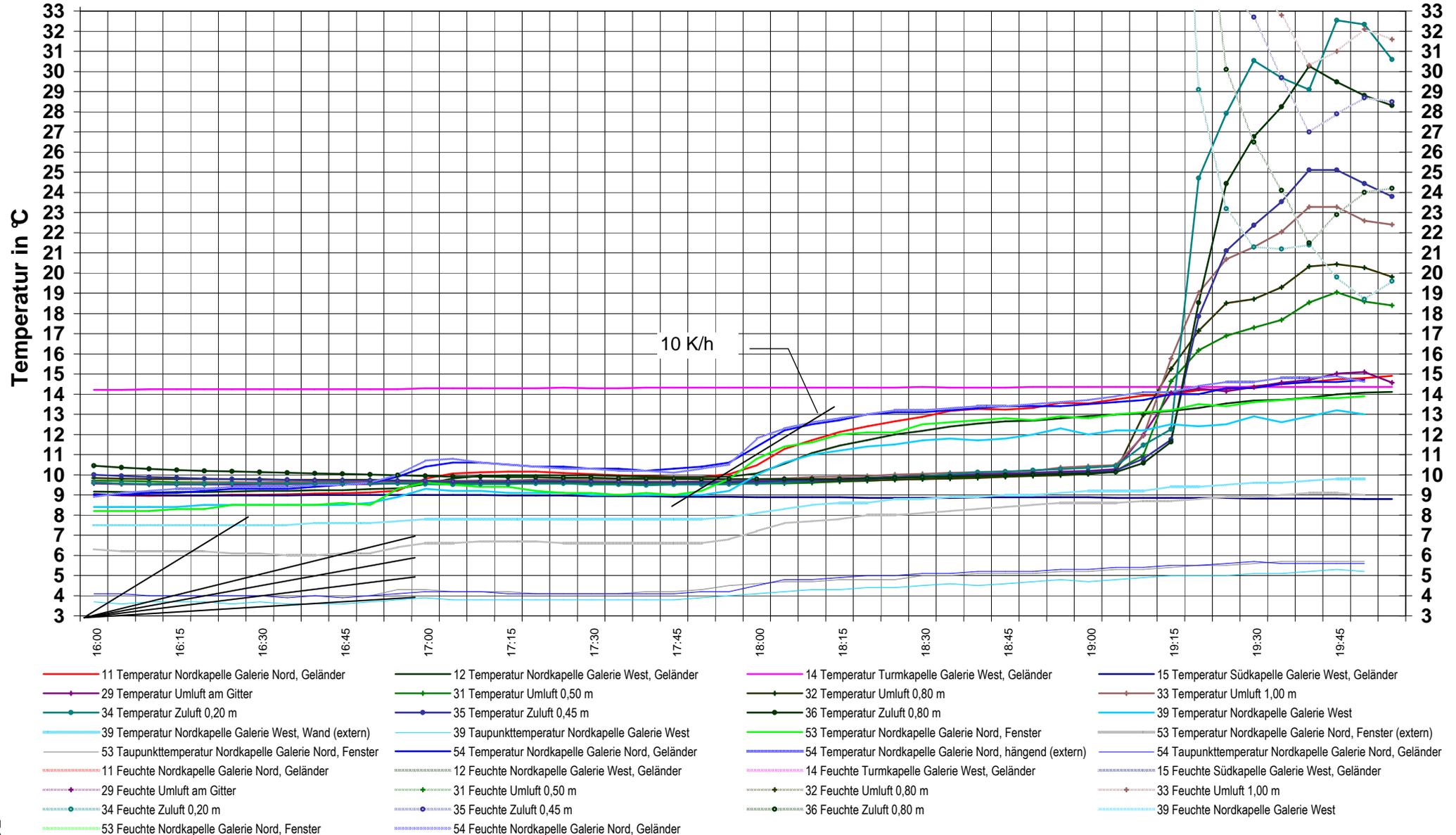
für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

6. Messzeitraum

Donnerstag 09.12.2004



# Temperatur-Feuchte-Diagramm

09.12.2004

für Bauvorhaben:

47/03

DBU-Forschungsvorhaben Az: 20841  
St. Marien und St. Georgen in Wismar

6. Messzeitraum

nur Messstellen Zu- und Umluft

