



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Baustoffe  
Institute for Building Materials

Förderung der Wald- und Holzforschung

FORSCHUNGSPROJEKT Nr. 2-71114-07  
**VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN ZUM  
OPTIMIERTEN WÄRMESCHUTZ IN  
UNTERSCHIEDLICHEN HOLZBAUSYSTEMEN**

**Abschlussbericht**

Oktober 2008

Bearbeitungszeitraum: 2/2007 – 10/2008

Mitarbeit:

Fritz Bächle, Walter Sonderegger  
ETH Zürich, Institut für Baustoffe  
(Versuchsaufbau und erste Messungen)

Dr. Rudolph Plagge  
TU Dresden, Institut für Bauklimatik  
(Modellierung mit Software Delphin)

**Prof. Dr. Peter NIEMZ**  
Institut für Baustoffe  
Leiter Arbeitsgruppe Holzphysik

**Dr. Matus JOSCAK**  
Institut für Baustoffe  
Arbeitsgruppe Holzphysik

## Inhalt

<b>1. Projektbeschreibung</b>	<b>3</b>
<b>2. Versuchsmethode</b>	<b>4</b>
<b>3. Ergebnisse</b>	<b>8</b>
3.1. Verlauf der Temperaturen	8
3.2. Verlauf der relativen Luftfeuchte	12
3.3. U-Wert	14
<b>4. Simulation</b>	<b>16</b>
4.1. Eingänge für die Simulation	16
4.2. Vergleich der Ergebnisse	18
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>26</b>
<b>6. Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>
<b>Anhang 1: Planzeichnung - Massivholzkonstruktion</b>	<b>29</b>
<b>Anhang 2: Planzeichnung - System Schuler</b>	<b>30</b>
<b>Anhang 3: Planzeichnung - Ständerkonstruktion</b>	<b>31</b>
<b>Anhang 4: Temperaturverlauf in einzelnen Seiten - Massivholzkonstruktion</b>	<b>32</b>
<b>Anhang 5: Temperaturverlauf in einzelnen Seiten – Schuler System</b>	<b>35</b>
<b>Anhang 6: Temperaturverlauf in einzelnen Seiten – Ständerkonstruktion</b>	<b>38</b>

## 1. Projektbeschreibung

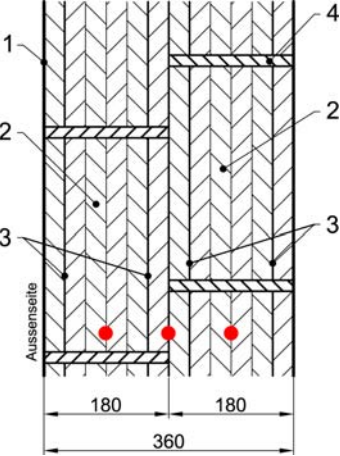
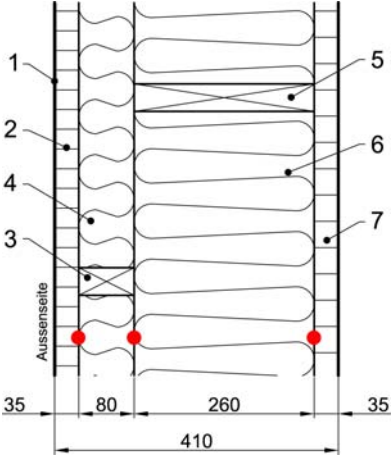
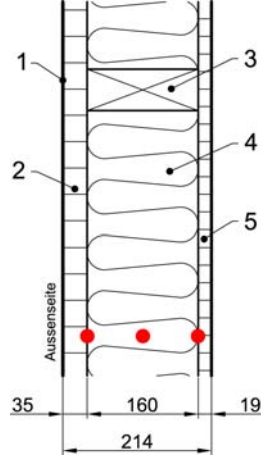
Im Rahmen des Projektes Nr. 2-71114-07 des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des Bundesamtes für Umwelt BAFU erfolgten ab Februar 2007 Messungen zum Thema „Vergleichende Untersuchungen zum optimierten Wärmeschutz in unterschiedlichen Holzbausystemen“.

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung ist entscheidend für eine weitere Optimierung des Wärme- und Feuchtetransportes in Holzbauteilen, insbesondere hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes. Sie sollte wesentlich zu einer weiteren Verbesserung des Images von Holzkonstruktionen beitragen und insbesondere die Frage klären, ob die extrem material- und kostenintensiven, reinen Vollholzwandsysteme auch bauphysikalisch entsprechende Vorteile im Vergleich zu Bauten in Rahmenbauweise oder beim Einsatz von Massivholzplatten/Brettstapelelementen aufweisen [1].

Das Projekt wurde mit dem Projekt „urholz – ein Regio Plus Projekt - System Appenzellerholz, Fa. Nägeli AG“ eng verbunden. Im Dezember 2007 wurden die ersten Zwischenergebnisse im ersten Zwischenbericht dieses Projektes dargestellt [2]. Bis jetzt wurden die Experimente an den Versuchsbauten und die Auswertung der Ergebnisse durchgeführt. In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse dargestellt, die in der nächsten Phase des Projektes „System Appenzellerholz, Fa. Nägeli AG“ noch teilweise erweitert werden.

## 2. Versuchsmethode

Im Februar 2007 wurden drei Versuchsbauten mit unterschiedlichem Wandaufbau durch die Firma Nägeli erstellt (Abb. 1, siehe auch Anhänge 1-3):

Massivholzkonstruktion Dicke 360 mm	System Schuler Dicke 410 mm	Ständerkonstruktion Dicke 214 mm
		
<b>1.</b> Unterdachfolie Tyvek X2 <b>2.</b> Massivholzwand verdübelt (Appenzellerholz): 2 x 180 mm <b>3.</b> Winddichtungsfolie (Wolle, Baumwolle) <b>4.</b> Dübel (Buche) • Position der eingebauten Thermodrähte	<b>1.</b> Unterdachfolie Tyvek X2 <b>2.</b> Isorooft natur (Holzfaserdämmplatte): 35 mm <b>3.</b> Lattung horizontal: 40/80 mm <b>4.</b> Dämmung Saglan SB 22: 80 mm <b>5.</b> Rippenkonstruktion vertikal: 40/260 mm <b>6.</b> Dämmung Saglan SB 22: 260 mm <b>7.</b> Schuler Blockholzplatten: 35 mm • Position der eingebauten Thermodrähte	<b>1.</b> Unterdachfolie Tyvek X2 <b>2.</b> Isorooft natur (Holzfaserdämmplatte): 35 mm <b>3.</b> Ständerkonstruktion: 60/160 mm <b>4.</b> Dämmung Saglan SB 22: 160 mm <b>5.</b> Spanplatte: 19 mm • Position der eingebauten Thermodrähte

**Abb. 1:** Darstellung der Aufbauten der Versuchsbauten

Alle drei Versuchsbauten wurden nach denselben Kriterien konstruiert (Abb. 2):

- Dimensionen: 1.5 m (Länge) x 1.5 m (Breite) x ca. 1.5 m (Höhe)
- Die Wände, die Decke und der Boden haben denselben Aufbau
- Das Dach in Form eines Pultdaches ist leicht geneigt (10 Grad)
- Es werden keine Fenster angebracht (Vermeidung zusätzlicher Einflüsse), jedoch können die Bauten seitlich geöffnet werden zum Auslesen der Daten
- Jeder Versuchsbau hat die Abdeckung aus wasserabweisender und winddichter Folie Tyvek X2 (Ampack AG)



**Abb. 2:** Detaillierter Anblick auf den Versuchsbau

In jedem Versuchsbau wurde im Inneren die rel. Luftfeuchte und Lufttemperatur mit einem freihängenden, kapazitiven Feuchtefühler (Ahlborn Almemo, Typ FHA646-E1) gemessen (Tab. 1, Abb. 3). Der Verlauf der Temperatur in den Wänden (Süd, West, Nord) wurde mit den eingebauten Thermodrähten (Ahlborn NiCr-Ni-Thermodraht, Typ T190-1) ermittelt. Beim Versuchsbau aus Massivholz wurden dazu die Oberflächentemperaturen mit den Oberflächensonden (Ahlborn PT100 4-Leiter) und die Wärmestromdichte mit der Wärmeflussplatte (Ahlborn, Typ FQ90150-1) an der Innenwandoberfläche (Südseite) gemessen. Die Datenerfassung wurde mittels der Datenlogger (Ahlborn Almemo, Typ 2890-9) in jedem Versuchsbau ausgeführt. Einzelne Klimadaten (Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte, Globalstrahlung,...) wurden von der Wetterstation der ETH Höggerberg übernommen.

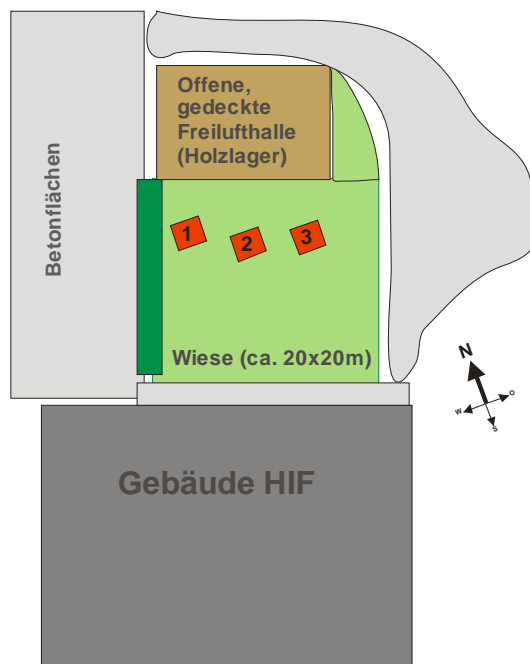


**Tab. 1:** Überblick aller eingesetzten Sensoren

<b>MASSIVHOLZ-KONSTRUKTION</b>	<b>SYSTEM SCHULER</b>	<b>STÄNDER-KONSTRUKTION</b>
<b>Temperaturen</b>		
Südseite Oberfläche – Außen		
Südseite in Wand – Außen	Südseite in Wand – Außen	Südseite in Wand – Außen
Südseite in Wand – Mitte	Südseite in Wand – Mitte	Südseite in Wand – Mitte
Südseite in Wand – Innen	Südseite in Wand – Innen	Südseite in Wand – Innen
Südseite Oberfläche – Innen		
Nordseite in Wand – Außen	Nordseite in Wand – Außen	Nordseite in Wand – Außen
Nordseite in Wand – Mitte	Nordseite in Wand – Mitte	Nordseite in Wand – Mitte
Nordseite in Wand – Innen	Nordseite in Wand – Innen	Nordseite in Wand – Innen
Westseite in Wand – Außen	Westseite in Wand – Außen	Westseite in Wand – Außen
Westseite in Wand – Mitte	Westseite in Wand – Mitte	Westseite in Wand – Mitte
Westseite in Wand – Innen	Westseite in Wand – Innen	Westseite in Wand – Innen
Innenraum	Innenraum	Innenraum
<b>rel. Luftfeuchte</b>		
Innenraum	Innenraum	Innenraum
<b>Wärmestromsensor</b>		
Südseite		

**Abb. 3:** Blick auf das Messgerät und die angeschlossenen Sensoren im Versuchsbau aus Massivholz

Der Standort der Versuchsbauten befindet sich auf dem Gelände der ETH Zürich / Höggerberg (Abb. 4, Abb. 5).



### Versuchsbauten:

1. Massivholzkonstruktion (Appenzellerholz)
2. System Schuler (Massivholzplatte, Wärmedämmung)
3. Ständerkonstruktion

**Abb. 4:** Situationsplan der Versuchsbauten (ETH Zürich / Höggerberg)



**Abb. 5:** Blick auf die Wiese mit den Versuchsbauten



### 3. Ergebnisse

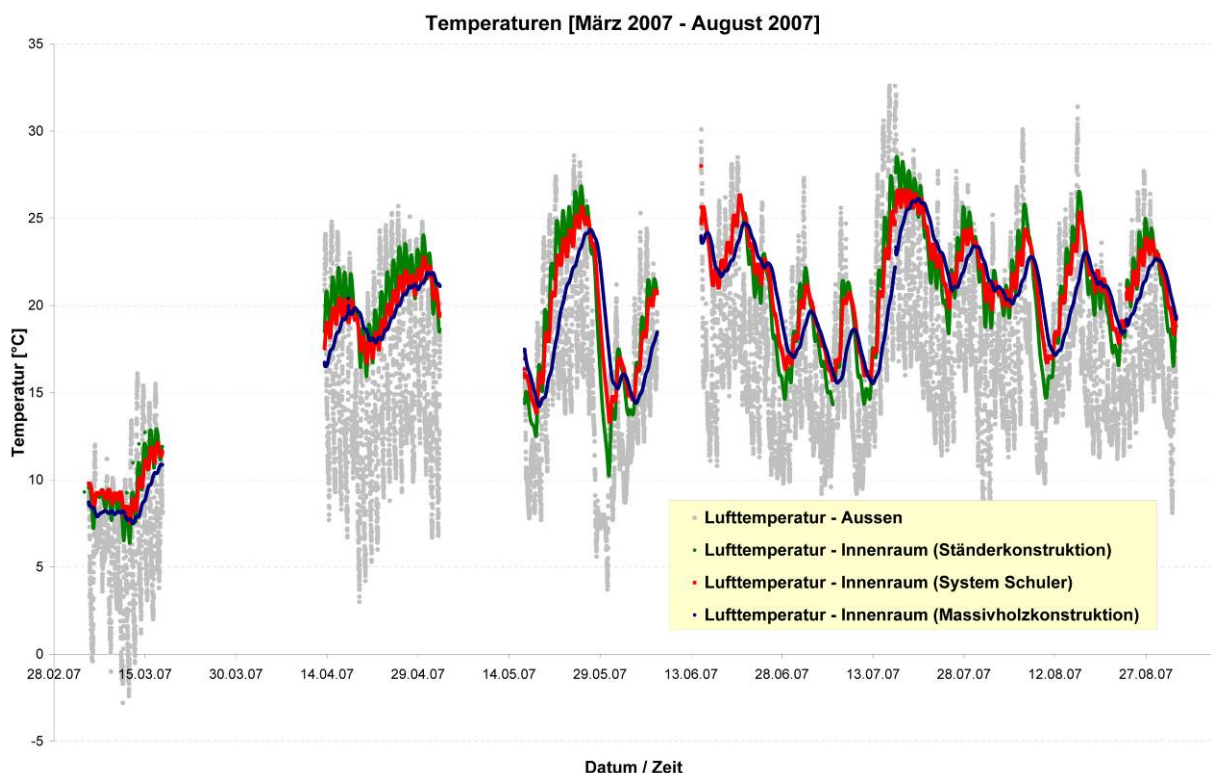
Ende Februar 2007 wurden die bei der Firma Nägeli AG erstellten Versuchsbauten an den Teststandort an der ETH Zürich (Hönggerberg) überführt und bis Juni 2007 verschiedene Testmessungen vorgenommen. Seit Mitte Juni 2007 bis Ende Februar 2008 erfolgten kontinuierliche Messungen an den Versuchsbauten. Die Daten wurden monatlich bis Februar 2008 ausgelesen.

#### 3.1. Verlauf der Temperaturen

Es zeigen sich Unterschiede der Temperatur-Messwerte zwischen den einzelnen Versuchsbauten. Hauptsächlich zwischen dem Versuchsbau aus Massivholz und den anderen zwei Versuchsbauten. Ganz deutlich kann man die Tagesphasenverschiebung und die Phasenverschiebung bei einem Klimawechsel beobachten (Tab. 2, Abb. 6). Die Phasenverschiebungen wurden graphisch aus dem Kurvenverlauf im Monat Juli 2007 bei den höchsten Außentemperaturen abgeschätzt.

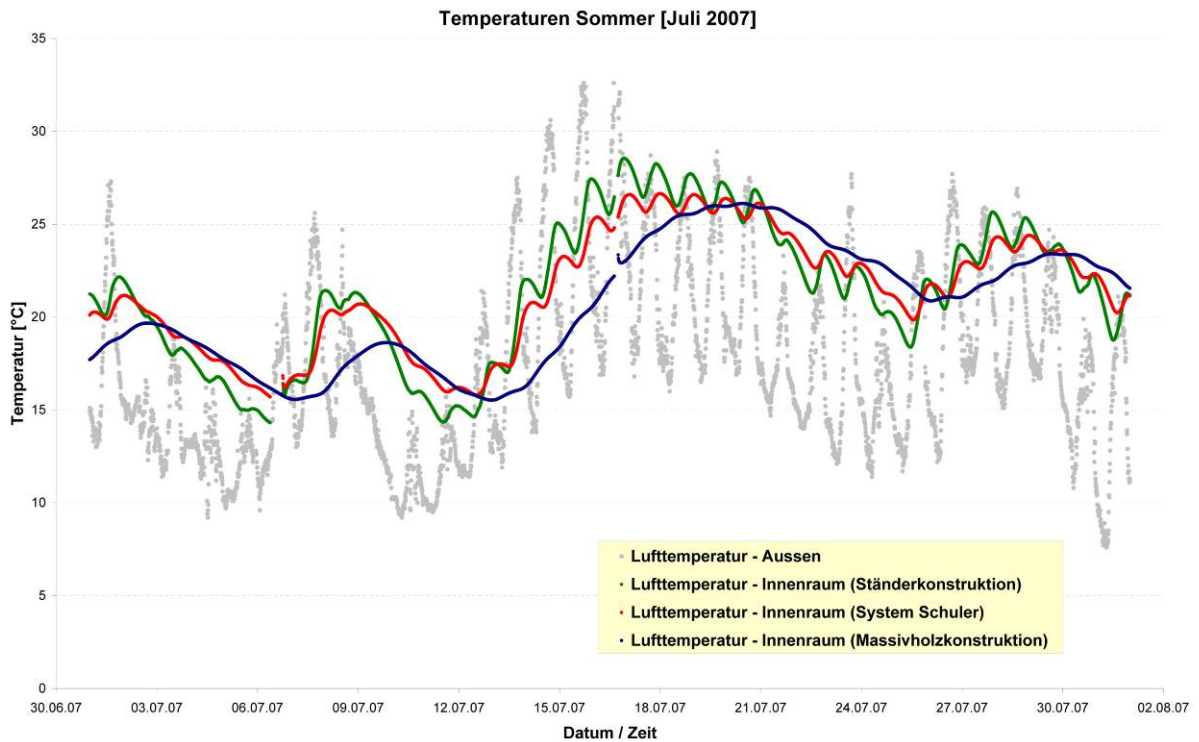
**Tab. 2:** Tagesphasenverschiebung und Phasenverschiebung bei Klimawechsel bei den höchsten Außentemperaturen im Monat Juli 2007

	Tagesphasenverschiebung		Phasenverschiebung beim Klimawechsel	
	Stunden (Mittelwert)	Verhältnis	Stunden (Mittelwert)	Verhältnis
Massivholzkonstruktion	ca. 23 h	3.3	ca. 96 h	3.4
Schuler System	ca. 9,5 h	1.4	ca. 45 h	1.6
Ständerkonstruktion	ca. 7 h	1	ca. 28 h	1

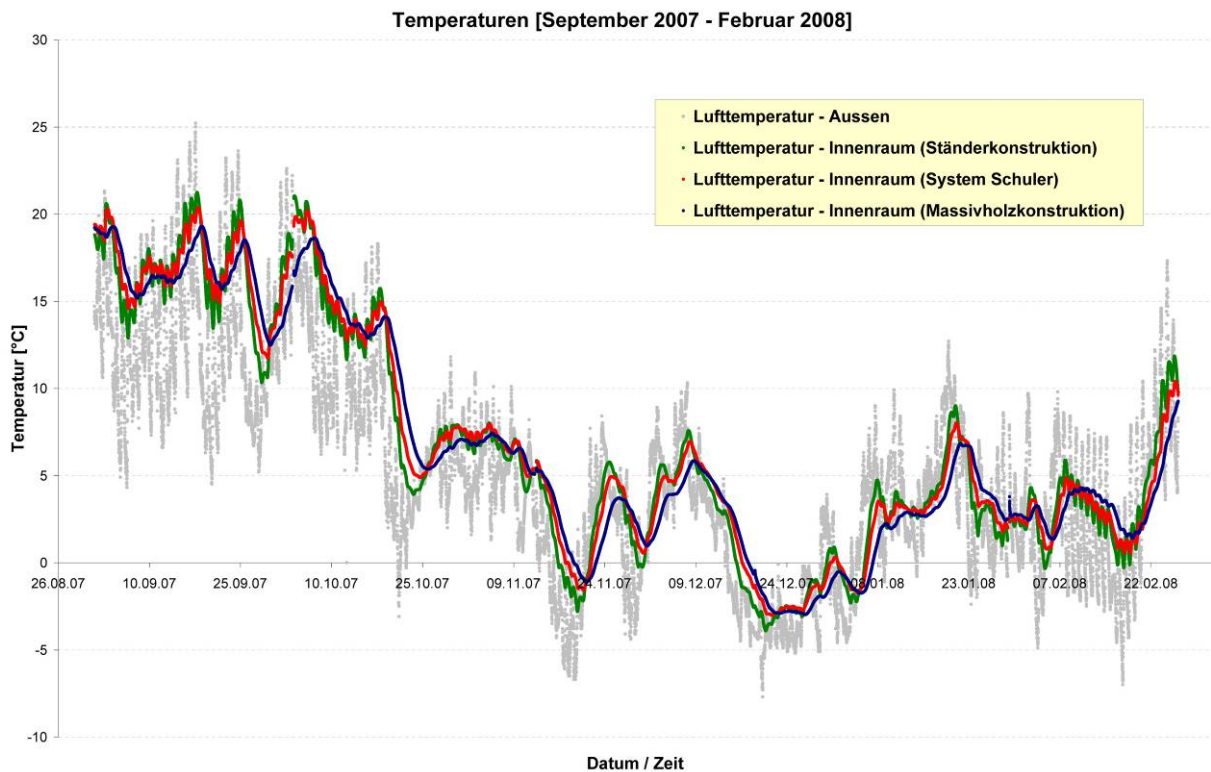


**Abb. 6:** Verlauf der Innentemperaturen in den Versuchsbauten in der Zeit seit März 2007 bis August 2007

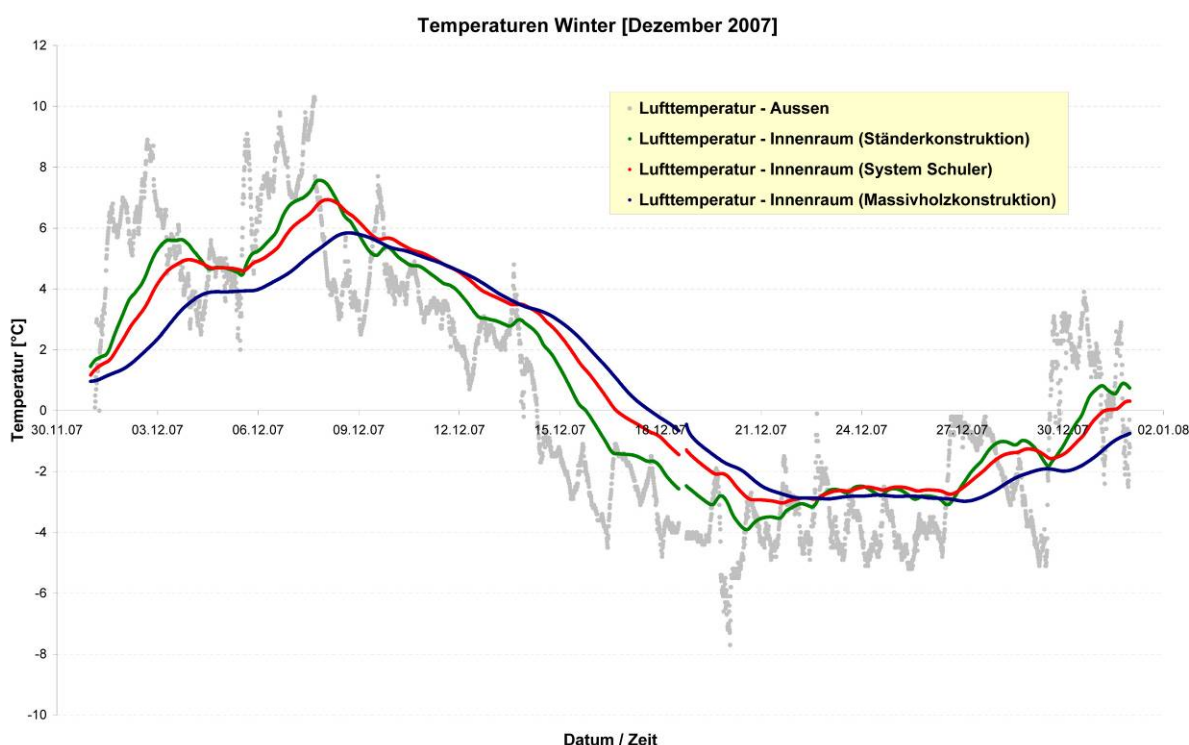




**Abb. 7:** Detaillierter Verlauf der Innentemperaturen in den Versuchsbauten für den Monat Juli 2007



**Abb. 8:** Verlauf der Innentemperaturen in den Versuchsbauten in der Zeit seit September 2007 bis Februar 2008



**Abb. 9:** Detaillierter Verlauf der Innentemperaturen in den Versuchsbauten für den Monat Dezember 2007

Die Diagramme zeigen eine stark reduzierte Tagesschwankung (Abb. 6-9 und Tab. 3) der Massivholzkonstruktion bei den höchsten Temperaturen. Dies deutet auf bessere Wärmestabilität und sommerlichen Wärmeschutz der Massivholzkonstruktion gegenüber den konventionellen Aufbauten hin. Dies wird auch bestätigt durch die Anzahl der Stunden während deren die Innentemperaturen in der Sommerzeit höher als 25 °C sind (Abb. 10). Bei der Massivholzkonstruktion dauern die Innentemperaturen über 25 °C ungefähr 2,5-mal weniger lang als bei der Ständerkonstruktion und ca. 2,15-mal weniger lang als beim Aufbau System Schuler. Die maximal und minimal erreichten Temperaturen während des ganzen gemessenen Zeitraums sind in der Tabelle 4 dargestellt.

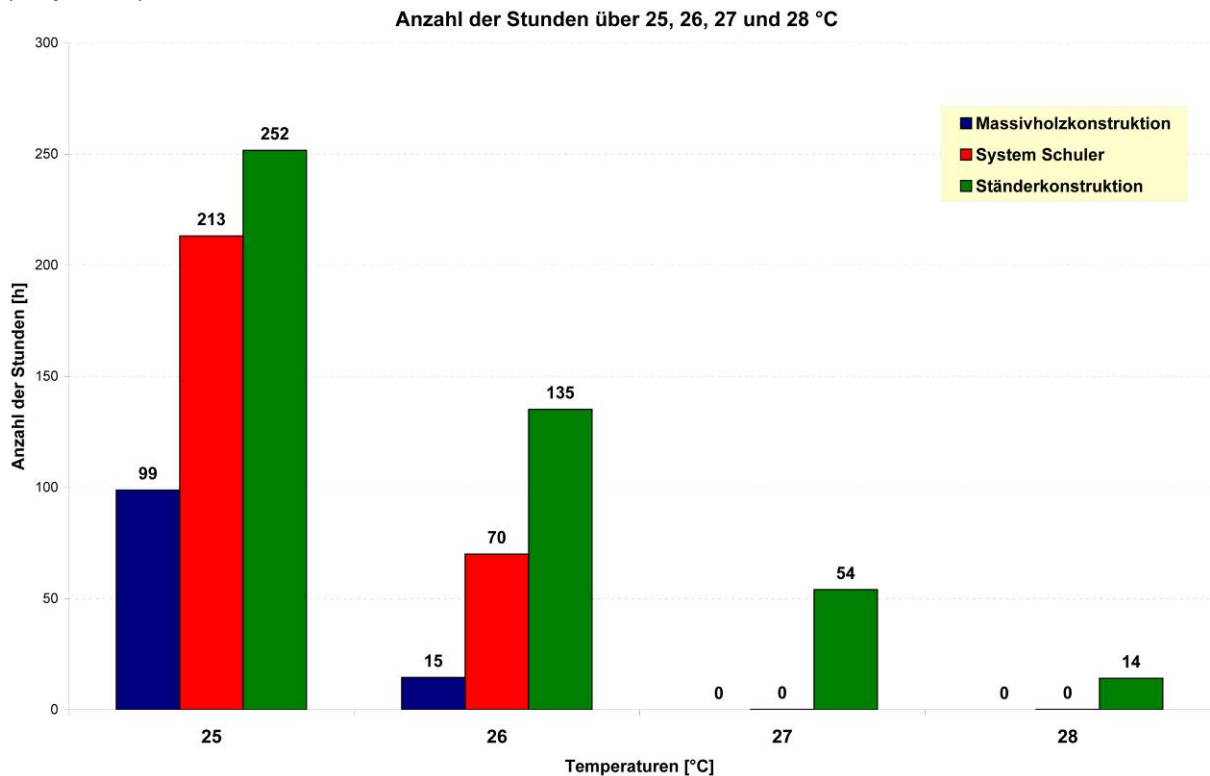
Eine erhöhte Wärmespeicherung beeinflusst andererseits die Innenraumtemperaturen negativ. Diese bleiben in der Winterzeit länger unter 0 Grad Celsius (Abb. 11). Hier zeigen sich die Vorteile der Dämmung, hauptsächlich beim Aufbau System Schuler mit der größten Dämmschicht.

**Tab. 3:** Tagesschwankungen bei den höchsten Außentemperaturen am 19. Juli 2007

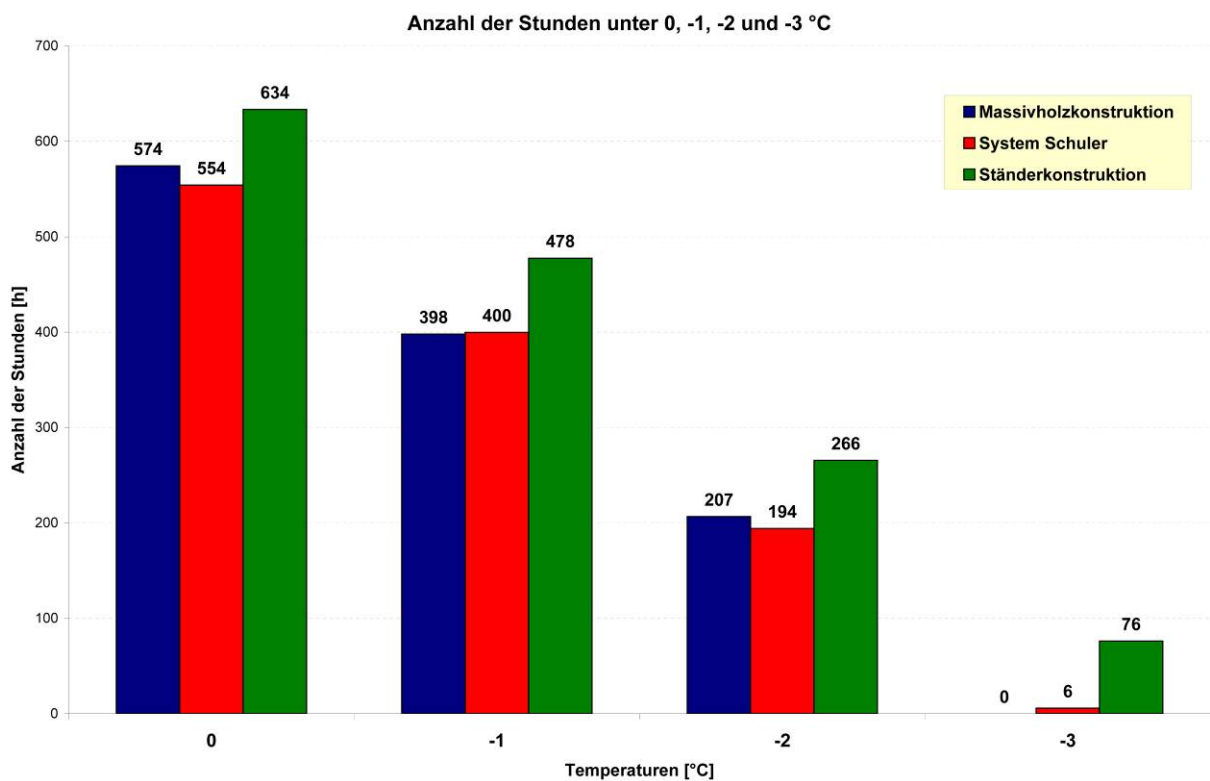
	Tagesschwankungen		
	min. Temperatur [°C]	max. Temperatur [°C]	Differenz [°C]
Außentemperatur	16,5	28,9	<b>12,4</b>
Massivholzkonstruktion	25,96	26,12	<b>0,16</b>
Schuler System	25,59	26,39	<b>0,8</b>
Ständerkonstruktion	25,73	27,27	<b>1,54</b>

Es handelt sich um eine instationäre Messung, deswegen ist eine genauere mathematische Bestimmung der Phasenverschiebung und Tagesschwankungen

nicht möglich. Die Ergebnisse wurden auch mit den Simulationen verglichen (Kapitel 4).



**Abb. 10:** Anzahl der Stunden in den Versuchsbauten, während deren die Innentemperaturen höher als 25, 26, 27 und 28 °C sind.

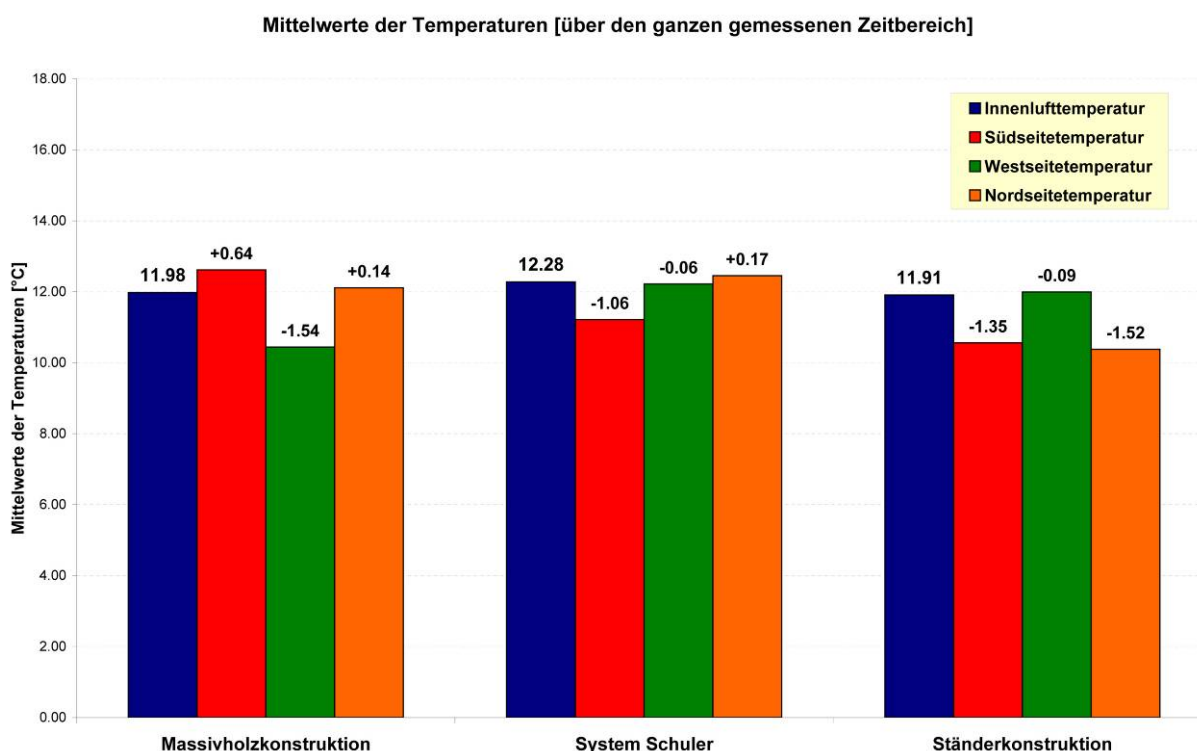


**Abb. 11:** Anzahl der Stunden in den Versuchsbauten, während deren die Innentemperaturen kleiner als 0, -1, -2 und -3 °C sind.

**Tab. 4:** Maximal und minimal erreichte Temperaturen während des ganzen gemessenen Zeitraums

	Massivholz- konstruktion	System Schuler	Ständer- konstruktion
max. Temperatur [°C]	<b>26.12</b>	<b>28.01</b>	<b>28.55</b>
min. Temperatur [°C]	<b>-2.98</b>	<b>-3.03</b>	<b>-3.91</b>

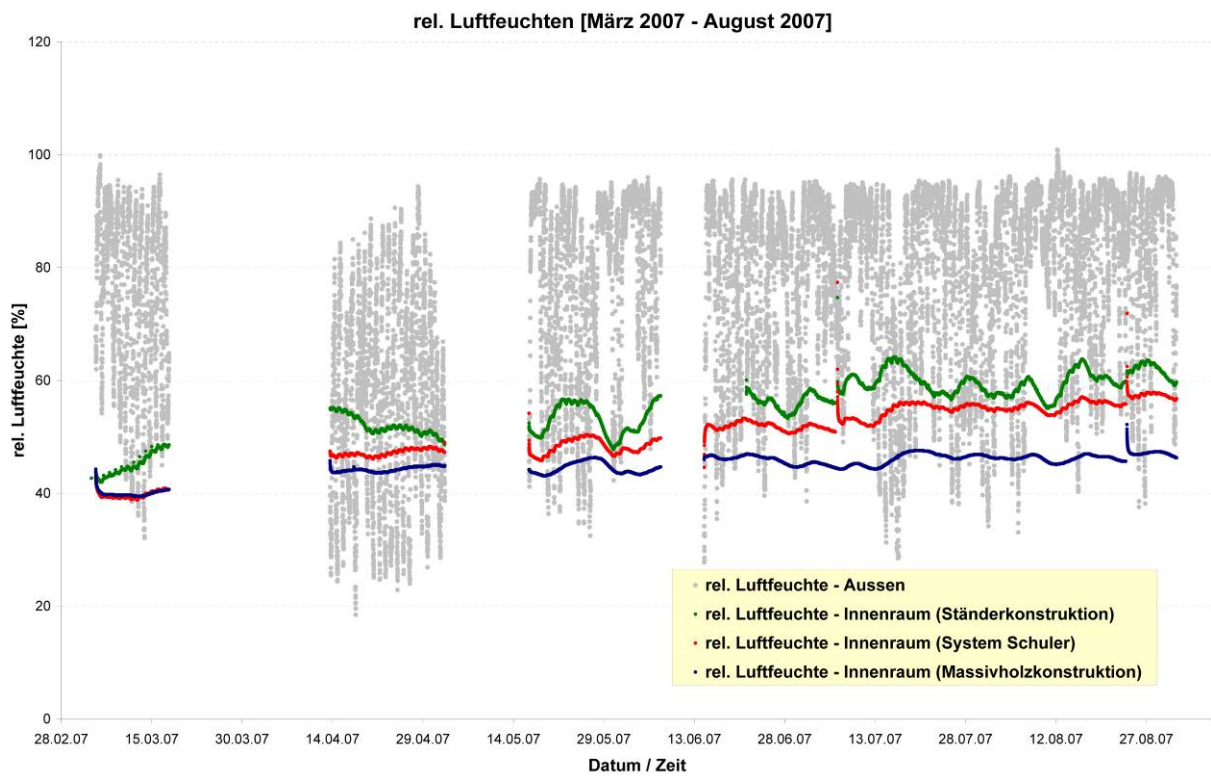
Der Einfluss der Himmelsrichtungen am Temperaturverlauf wurde auf Grund der Mittelwerte über den ganzen gemessenen Zeitbereich dargestellt (Abb. 12). Das Diagramm zeigt die Unterschiede der Seitentemperaturen zur Innenlufttemperatur. Da die Oberflächentemperaturen nicht an jeder Seite gemessen wurden, wurden einzelne Seitentemperaturen anhand der Sensoren in der Wand an der Innenseite bestimmt. Der größte Unterschied (-1.54 °C) wurde bei der Mitteltemperatur an der Westseite der Massivholzkonstruktion festgestellt. Demgegenüber befindet sich beim System Schuler die größte Temperaturdifferenz an der Südseite (-1.06 °C). Bei der Ständerkonstruktion wurden niedrigere Temperaturen an der Süd- (-1.35 °C) und Nordseite (-1.52 °C) festgestellt.

**Abb. 12:** Mittelwerte der Temperaturen über den ganzen gemessenen Zeitbereich in Abhängigkeit der Himmelsrichtungen.

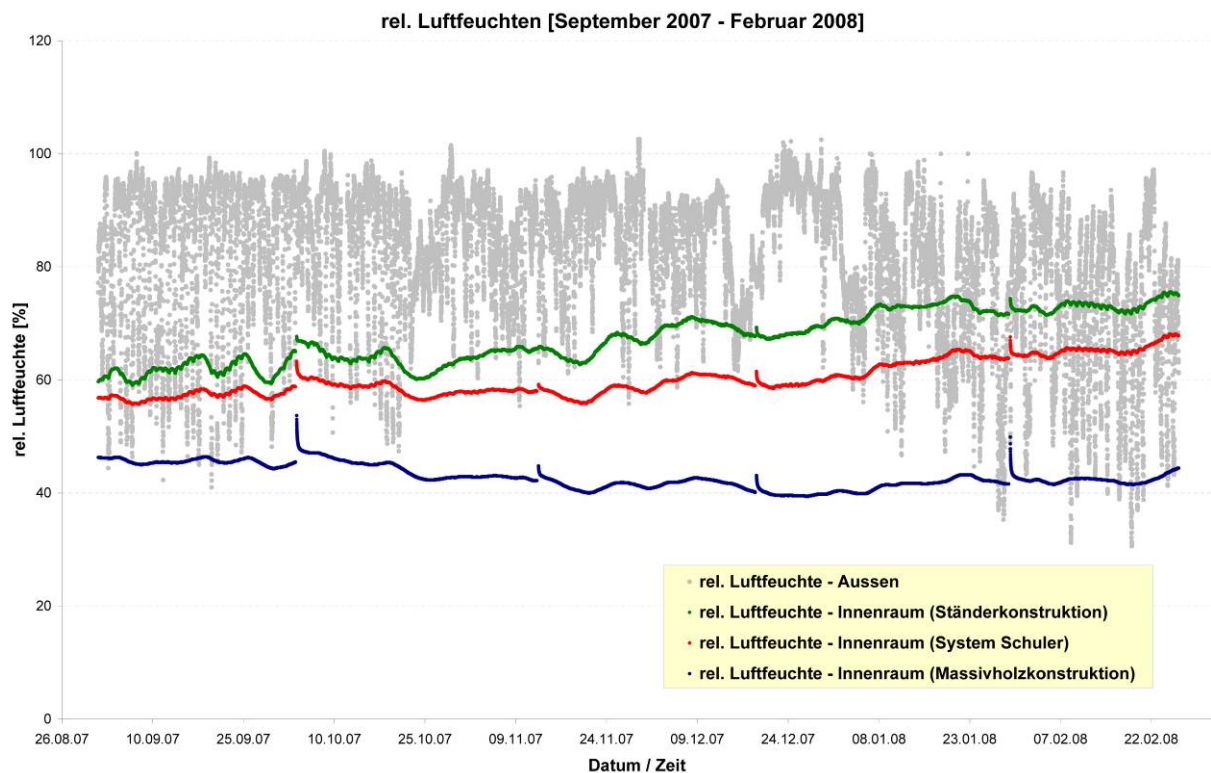
### 3.2. Verlauf der relativen Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte im Innenraum beträgt bei allen Versuchsbauten zu Beginn der Messungen ca. 45 %. Bei der Massivholzkonstruktion schwankt die Luftfeuchte während der ganzen Messdauer um diesen Wert herum (max. **47,6 %** am 20.07.2007, min. **39,4 %** am 27.12.2007, Mittelwert **43,8 %**). Bei den anderen Bauten steigt sie kontinuierlich an (System Schuler auf **ca. 68 %**, Ständerkonstruktion auf **ca. 75,5 %**) (Abb. 13-14).





**Abb. 13:** Verlauf der rel. Luftfeuchten in den Versuchsbauten in der Zeit von März 2007 bis August 2007



**Abb. 14:** Verlauf der rel. Luftfeuchten in den Versuchsbauten in der Zeit von September 2007 bis Februar 2008.

### 3.3. U-Wert

Zum Vergleich mit dem statischen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) wurde bei der Massivholzkonstruktion eine Wärmestromdichtesensorplatte zur Bestimmung des dynamischen U-Wertes an der Südseite installiert.

Der statische U-Wert wurde nach Gleichung (1) berechnet [3].

$$U_s = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a}} = \frac{1}{0.13 + \sum \frac{d_i}{\lambda_i} + 0.04} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (1)$$

wobei R - Wärmedurchgangswiderstand [(m<sup>2</sup>·K)/W]  
 1/α<sub>i</sub> – Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite [(m<sup>2</sup>·K)/W]  
 1/Λ – Wärmedurchlasswiderstand [(m<sup>2</sup>·K)/W]  
 1/α<sub>a</sub> – Wärmeübergangswiderstand auf der Außenseite [(m<sup>2</sup>·K)/W]  
 λ<sub>i</sub> – Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten [W/(m·K)]  
 d<sub>i</sub> – Dicke der einzelnen Schichten [m]

Für die Berechnung wurden folgende Werte der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke eingesetzt:

*Schicht 1:*

Unterdachfolie Tyvex X2: λ<sub>1</sub> = 0.2 W/(m·K) [4], d<sub>1</sub> = 0.0004 m

*Schicht 2 und 3:*

Massivholzwand verdübelt (Appenzellerholz): λ<sub>2,3</sub> = 0.097 W/(m·K) [5], d<sub>2,3</sub> = 0.18 m

Der dynamische U-Wert wurde als Mittelwert der einzelnen Tage nach Gleichung (2) bestimmt.

$$\bar{U}_D = \frac{1}{j} \sum_{t=1}^j U_t \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (2)$$

wobei U<sub>t</sub> – errechnete U-Werte pro einzelner Tag nach Gleichung (3) [W/(m<sup>2</sup>·K)] [6]  
 t – einzelne Tage [-]  
 j – Gesamtzahl der Tage [-]

$$U_t = \frac{\bar{q}_t}{2 \times \bar{T}_{Wit} - \bar{T}_{Lit} - \bar{T}_{Lat}} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (3)$$

wobei q<sub>t</sub> – Wärmestromdichte während eines Tages nach Gleichung (4) [W/m<sup>2</sup>]  
 T<sub>Wit</sub> – Innenwandoberflächentemperaturen während eines Tages nach Gleichung (5) [K]  
 T<sub>Lit</sub> – Innenlufttemperaturen während eines Tages nach Gleichung (6) [K]  
 T<sub>Lat</sub> – Außentemperaturen während eines Tages nach Gleichung (7) [K]

$$\bar{q}_t = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n q_x \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

$$\bar{T}_{Wit} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n T_{Wix} [K] \quad (5)$$

$$\bar{T}_{Lit} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n T_{Lix} [K] \quad (6)$$

$$\bar{T}_{Lat} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n T_{Lax} [K] \quad (7)$$

wobei x – Einzelwerte pro Tag  
n – Anzahl Einzelwerte pro Tag

Die berechneten U-Werte sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dem statischen und dynamischen U-Wert. Es kommt beim dynamischen U-Wert zu einer Reduktion von ca. 27 %. Das dürfte durch die Solarstrahlung und die Orientierung der Seite nach Süden hervorgerufen worden sein.

**Tab. 5:** Errechnete Werte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei Massivholzkonstruktion

statischer U-Wert	dynamischer U-Wert
<b>0.2575 W/(m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>0.1880 W/(m<sup>2</sup>·K)</b>

## 4. Simulation

Analog zu den gemessenen Daten wurde eine Simulation in Software Delphin (Version 5.6.4) durchgeführt. Die Software wurde an der Technischen Universität in Dresden speziell für die Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Stofftransportes in porösen Medien erstellt [7]. Die Simulationsrechnung erfolgte in Zusammenarbeit mit Dr. Plagge, TU Dresden, im Rahmen eines vierwöchigen Gastaufenthaltes des Bearbeiters an der TU Dresden.

Die Simulation soll, die Stimmigkeit zwischen den gemessenen und simulierten Daten und die Eignung des Einsatzes der Software für die Berechnung der einzelnen Aufbauten in der Praxis zeigen. Für diese Zwecke wurden die Simulationen der einzelnen Temperaturen durchgeführt.

Nach der Validierung der Daten wurden die Tagesphasenverschiebungen und Tagesschwankungen für einzelne Aufbauten in periodischem Stand berechnet und mit den gemessenen verglichen.

### 4.1. Eingänge für die Simulation

Aufgrund realer Aufbauten wurden drei verschiedene eindimensionale Modelle modelliert. Einzelne Modelle mit einzelnen Materialkennwerten sind in den Abb. 15-18 dargestellt. Beim Aufbau System Schuler wurde zwischen zwei Dämmschichten eine Kontaktmembrane (M) eingesetzt (Abb. 16). Die Materialkennwerte wurden aus der Materialdatenbank der Software Delphin und aus Angaben der einzelnen Hersteller übernommen [4] [8] [9] [10] [11]. Die Messungen an den Massivholzelementen der Fa. Nägeli erfolgten an der ETH Zürich.

Als Klimabedingungen auf der Aussenseite wurden die Klimadaten von der Wetterstation der ETH Höngerberg (Aussentemperatur, Globalstrahlung) eingesetzt. Auf der Innenseite wurden die gemessenen Innentemperaturen von den einzelnen Versuchsbauten eingesetzt. Für die Simulation wurde die Globalstrahlung aufgeteilt in Diffusstrahlung und Direktstrahlung benötigt. Diese Aufteilung wurde nach einer einfachen Formel berechnet, wobei der Anteil der Diffusstrahlung bei den höchsten Werten der Globalstrahlung auf 10 % und bei der niedersten auf 100 % festgelegt wurde.

Der Absorptionskoeffizient der Versuchsbauhülle für diese kurzwellige Strahlung wurde auf 0,7 und der Reflektionskoeffizient (durch die Erdoberfläche) auf 0,5 eingestellt. Der Wärmeübergangskoeffizient der Aussenseite wurde auf  $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und derjenige der Innenseite auf  $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  festgelegt. Die globale

Bei der Simulation wurden einige Details nicht berücksichtigt. Bei der Massivholzkonstruktion wurden die Dübel bei der Modellierung weggelassen. Ebenfalls wurden die Rippenkonstruktion und die Lattung bei den anderen zwei Versuchsbauten nicht modelliert. Vernachlässigt wurde auch der Einfluss der installierten Geräte in den Versuchsbauten.



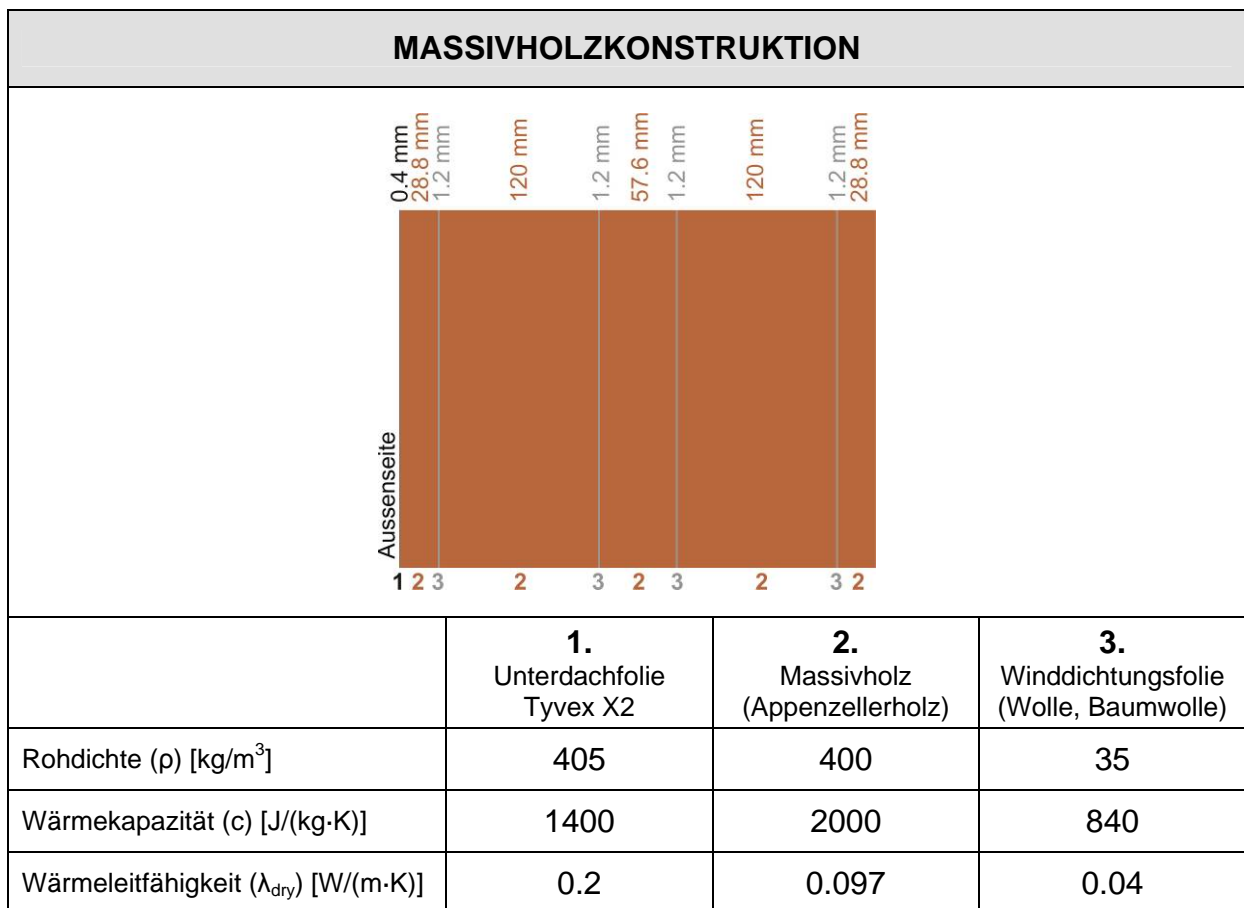


Abb. 15: Modell und Materialkennwerte für die Simulation der Massivholzkonstruktion

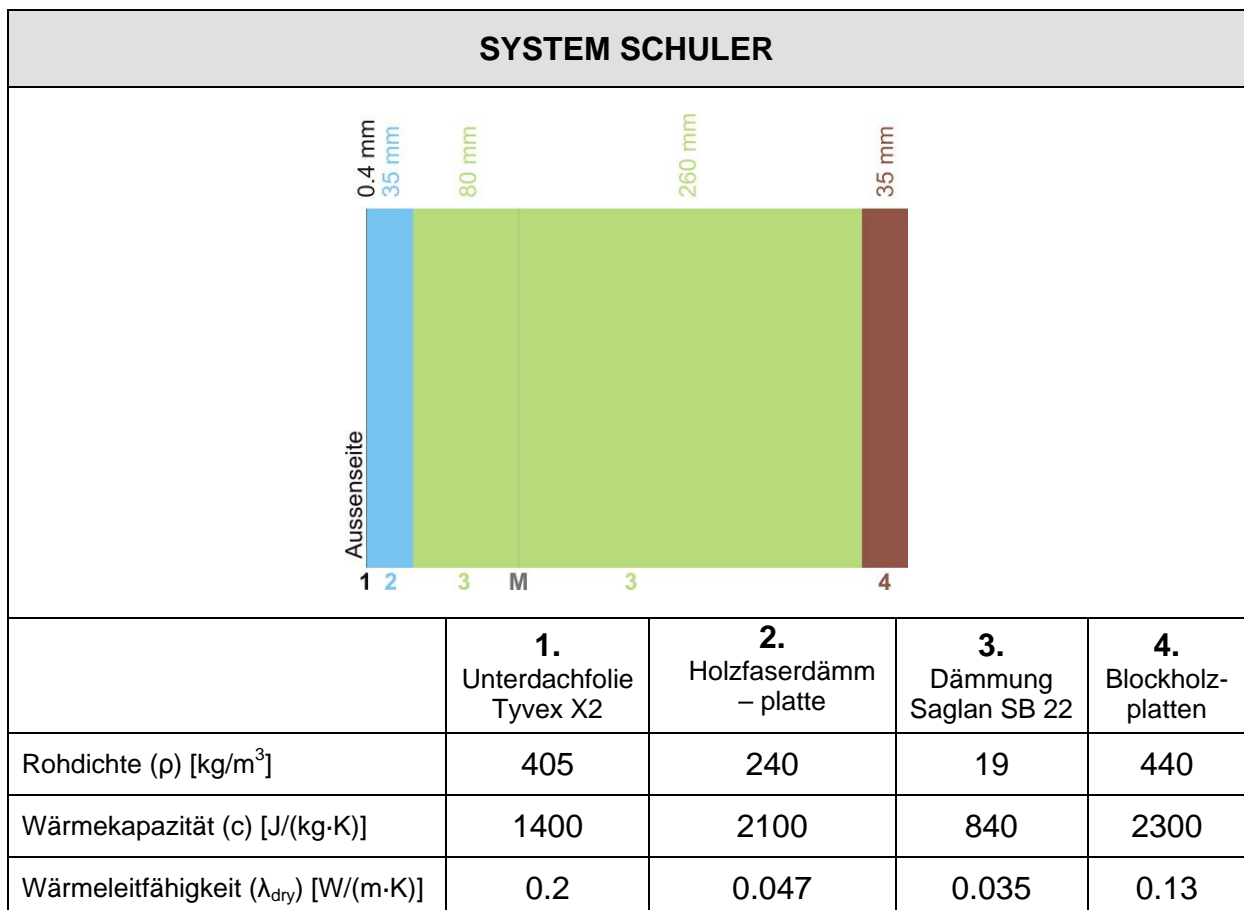
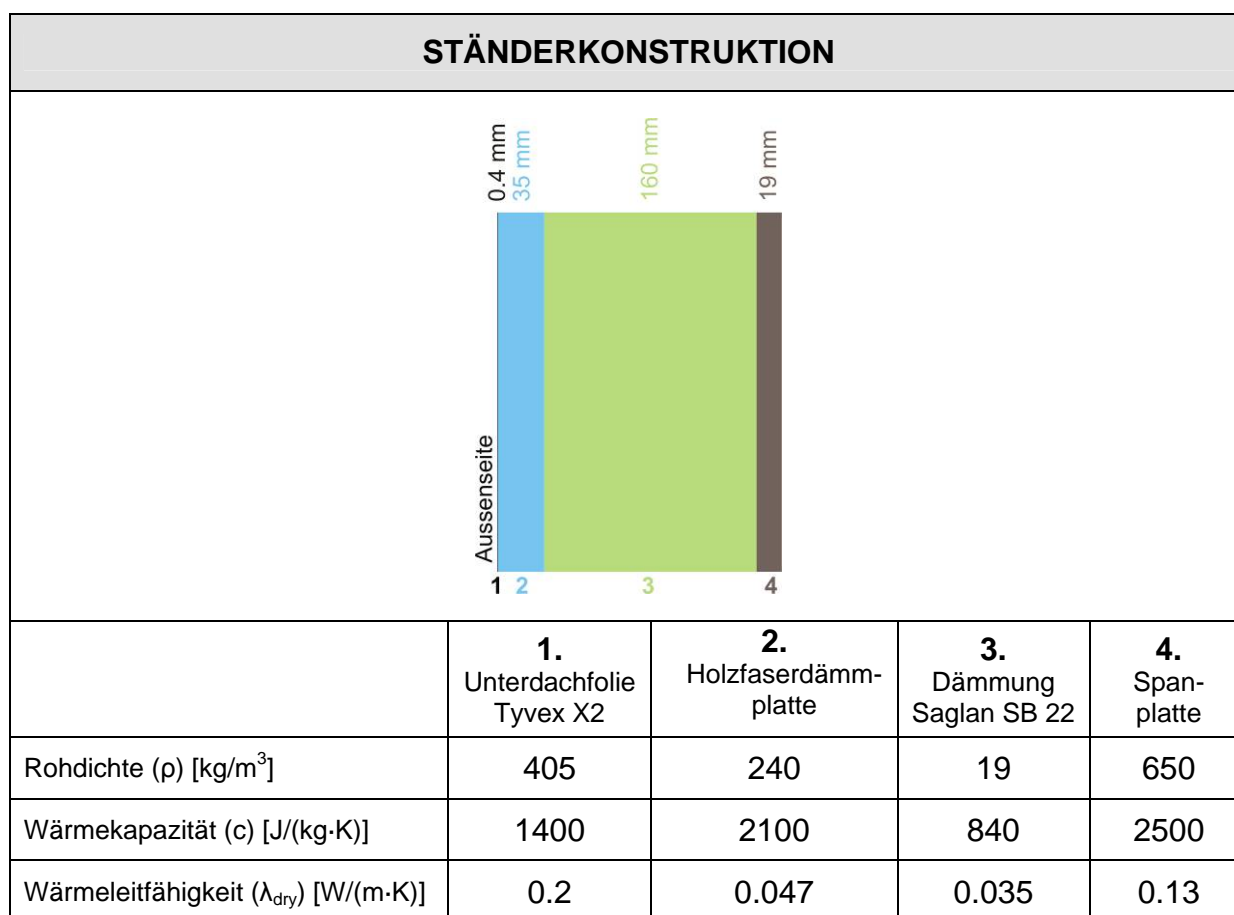


Abb. 16: Modell und Materialkennwerte für die Simulation des Systems Schuler

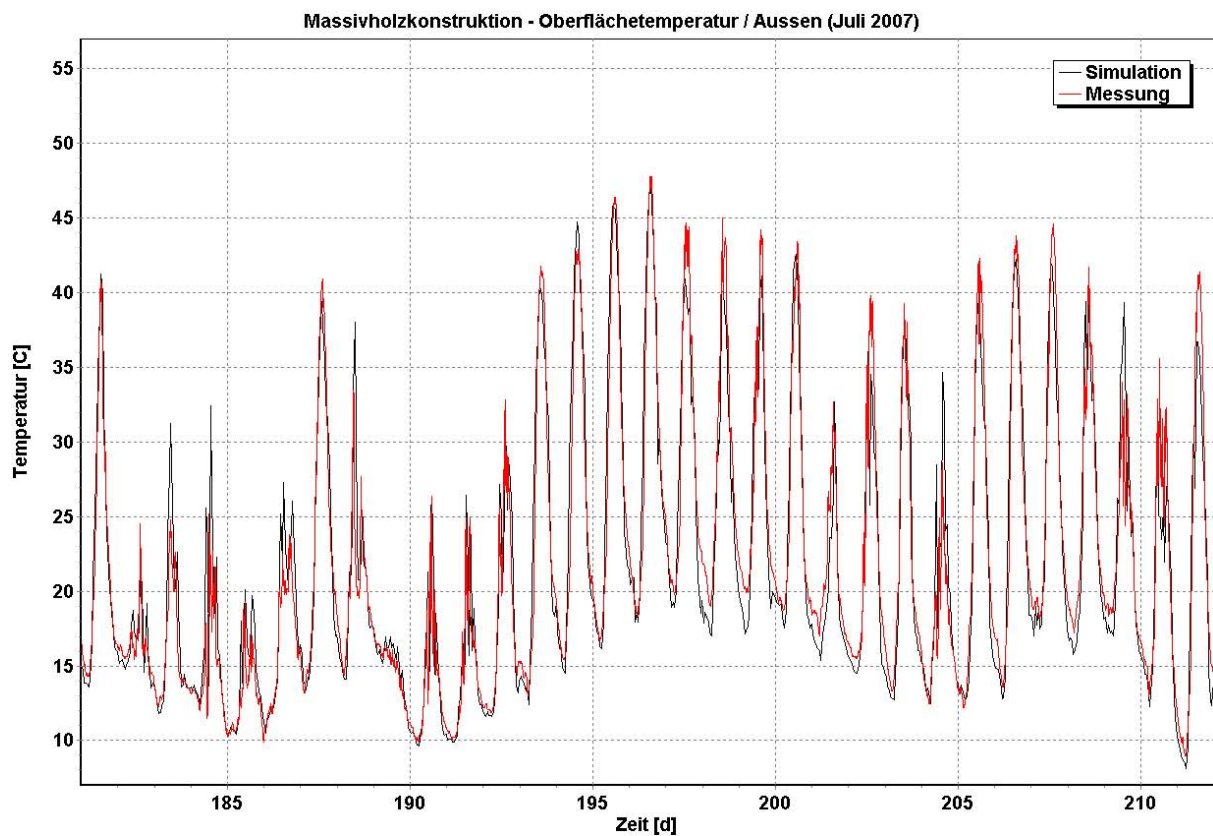


**Abb. 17:** Modell und Materialkennwerte für die Simulation der Ständerkonstruktion

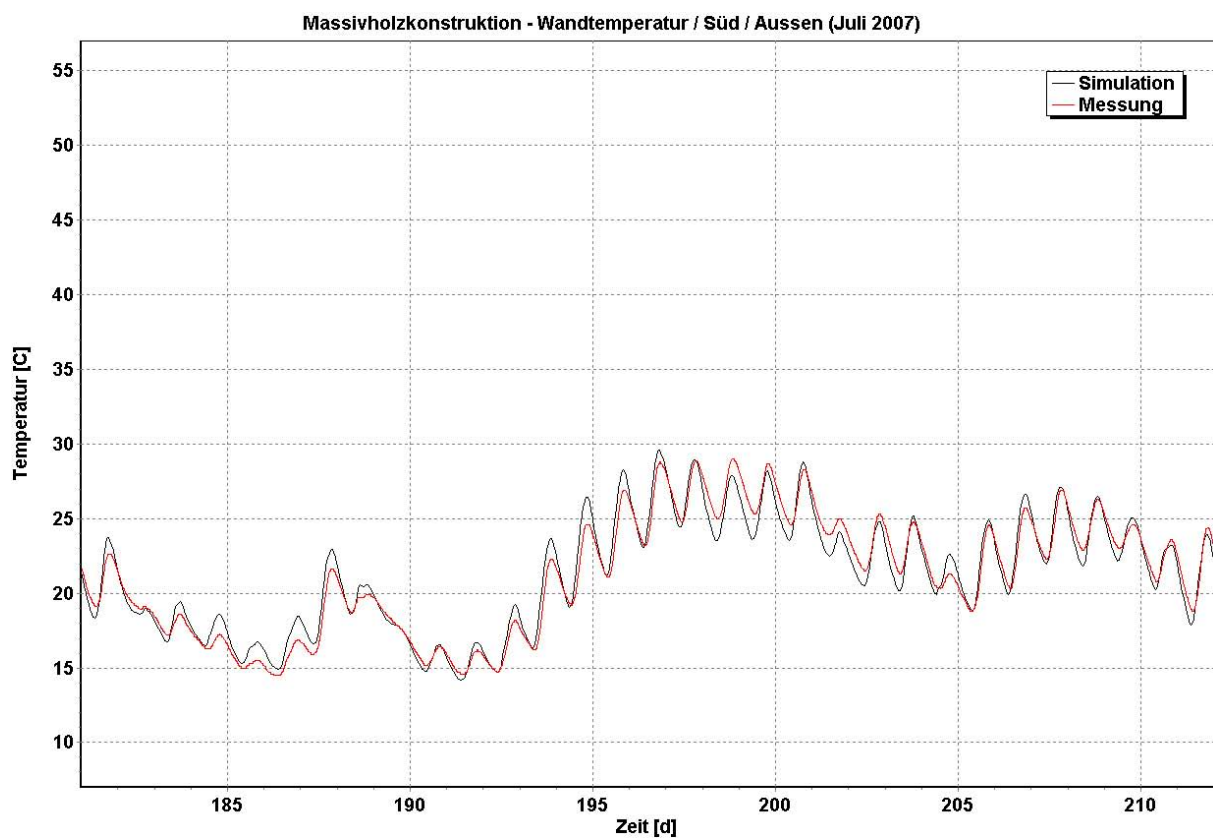
#### 4.2. Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation wurden mit gemessenen Daten verglichen. Für den Vergleich wurde nur der Monat Juli 2007 verwendet. In den Abb. 18-22 sieht man den Übereinstimmungsgrad der Temperaturverläufe an den verschiedenen Positionen in der Südwand der Massivholzkonstruktion. Hier hat sich eine sehr gute Deckungsgleichheit des Temperaturverlaufes gezeigt. Die weiteren Diagramme (Abb. 23-30) zeigen den Vergleich der Innenwandtemperaturen an einzelnen Seiten der drei Versuchsbauten. Hier kann man die Unterschiede (simulierte Daten liegen 1-2 °C über den gemessenen Daten) an einzelnen Seiten beobachten. Es zeigt sich bei den Seiten, wo auch die gemessenen Daten der Innenwandtemperaturen unter den Innenlufttemperaturen in den Versuchsbauten festgestellt wurden (Abb. 12).

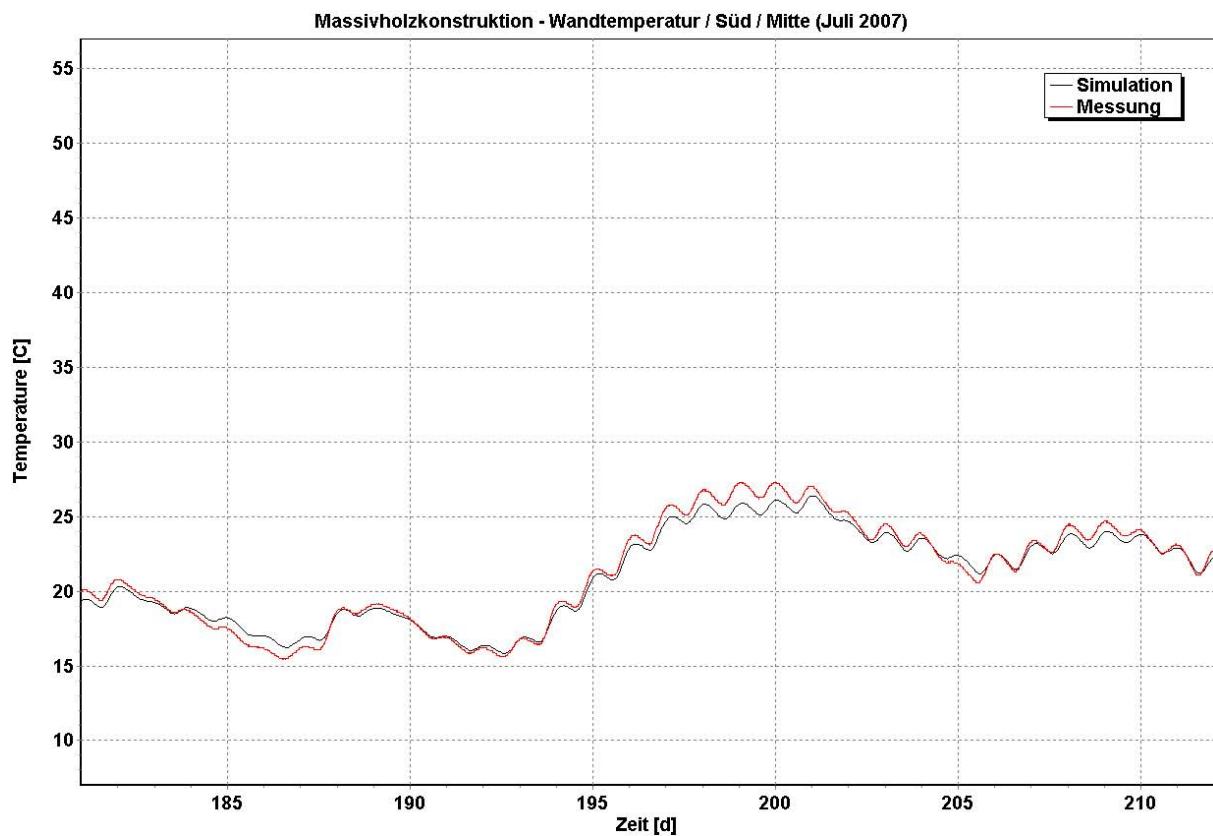
Zusätzlich wurde auch die Simulation bei periodisch eingestellten Klimabedingungen (Mittelwert = 23 °C, Amplitude = 12,4 K, Periode = 1 Tag, Phasenverschiebung = 0 Tag) durchgeführt, um die Tagesphasenverschiebung und Tagesschwankung berechnen zu können. Die Vergleichstabelle (Tab. 6) ist am Ende des Kapitels dargestellt. Die Tagesphasenverschiebung stimmt sehr gut mit den gemessenen Daten überein. Bei den Tagesschwankungen sieht man deutliche Unterschiede. Diese sind höchstwahrscheinlich durch den Einfluss vorheriger Außentemperaturänderungen im instationären Zustand verursacht.



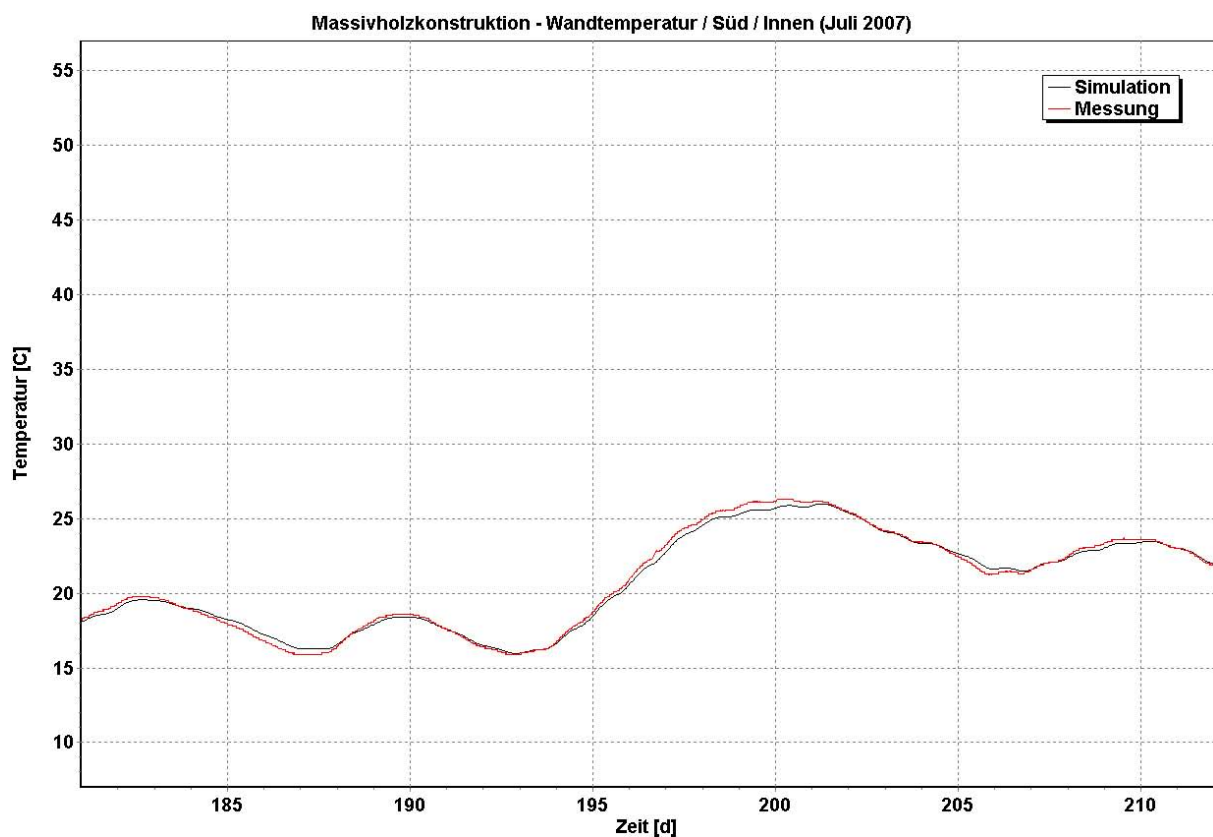
**Abb. 18:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Außenoberfläche der Südseite bei der Massivholzkonstruktion



**Abb. 19:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Außenseite der Südwand bei der Massivholzkonstruktion

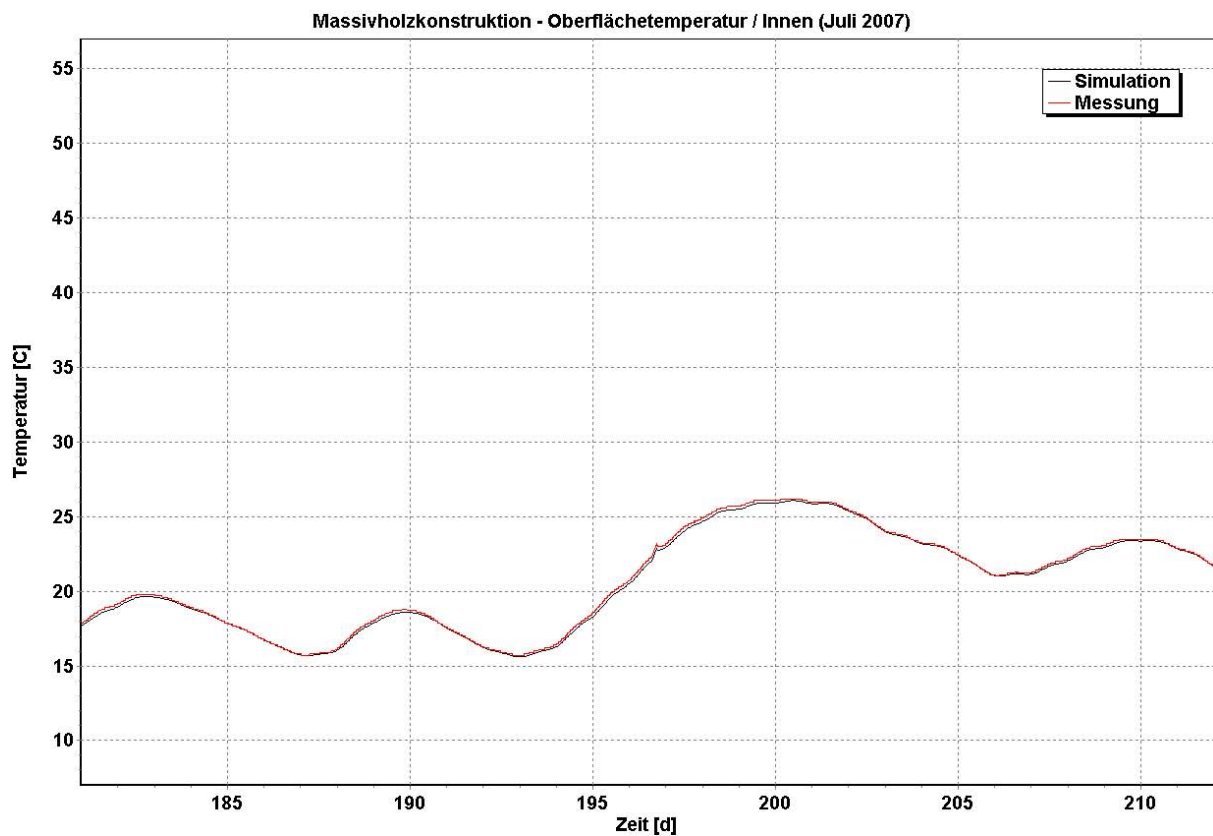


**Abb. 20:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten in der Mitte der Südwand bei der Massivholzkonstruktion

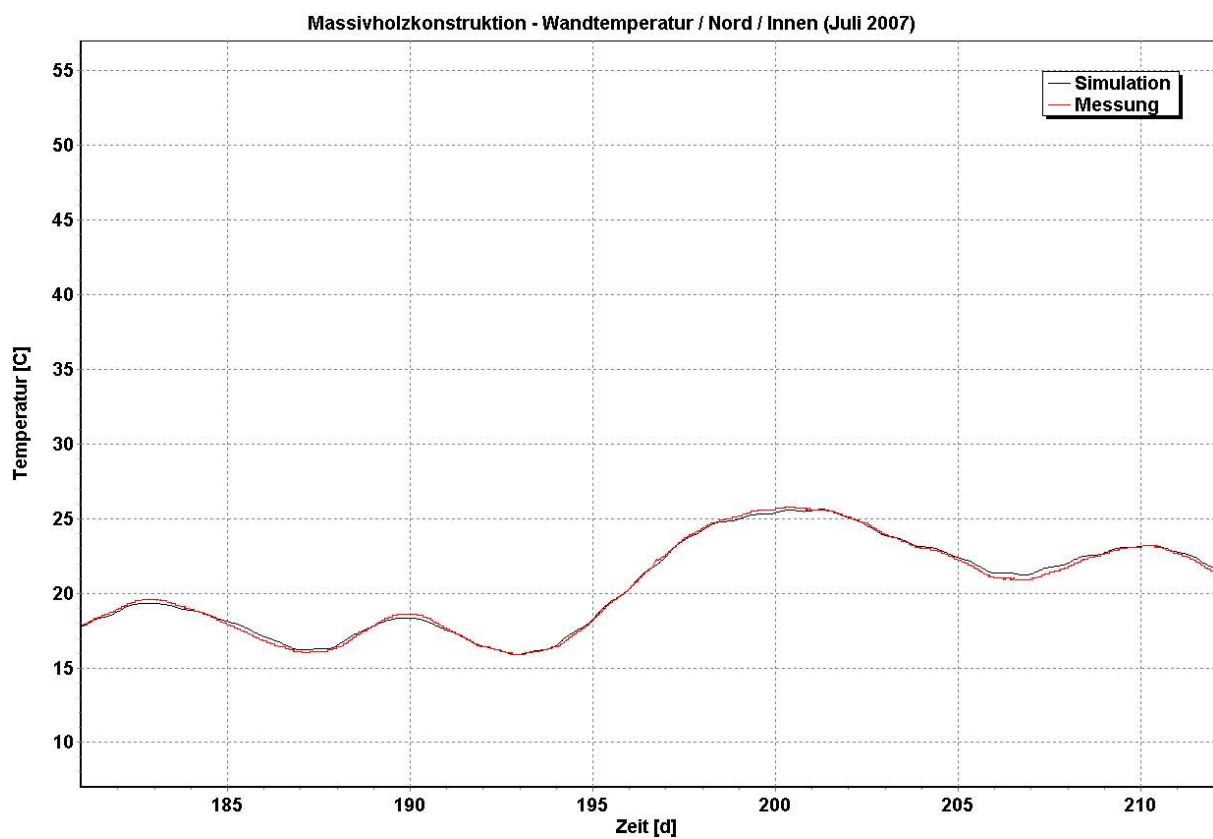


**Abb. 21:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Südwand bei der Massivholzkonstruktion

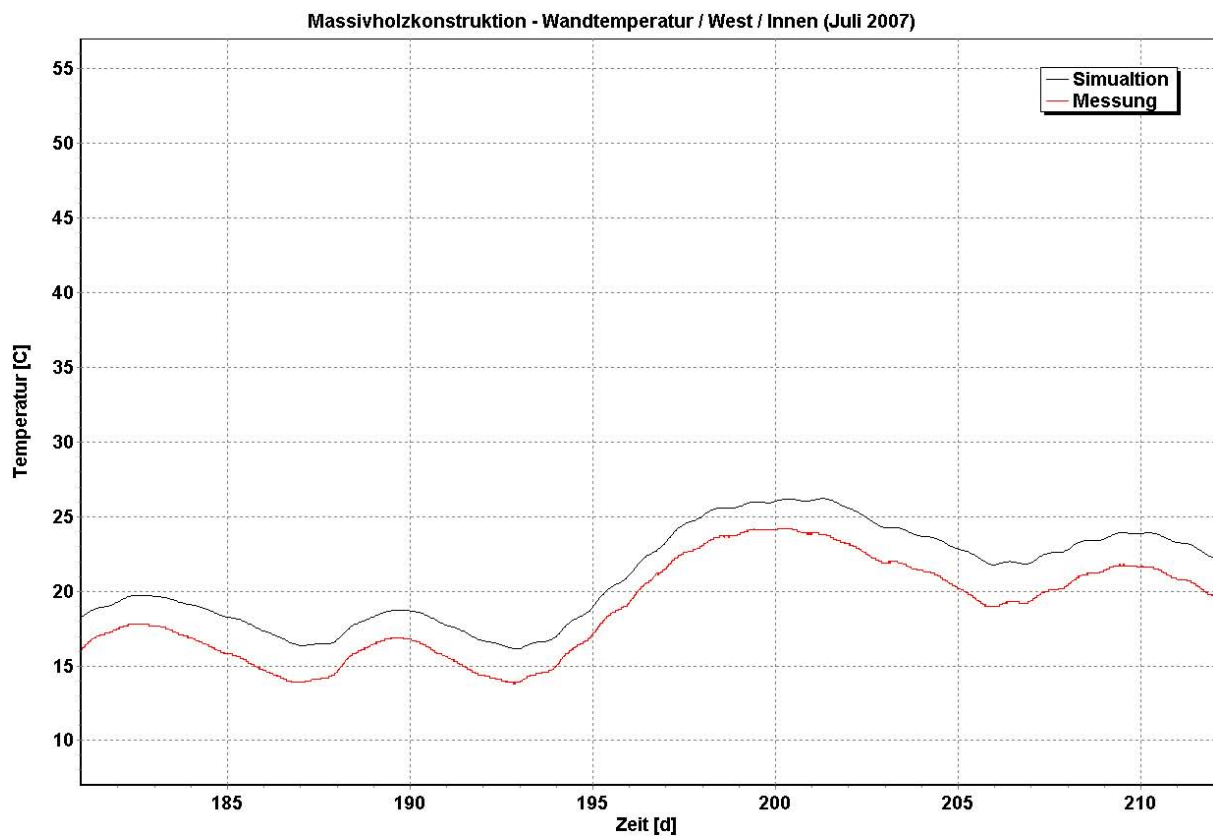




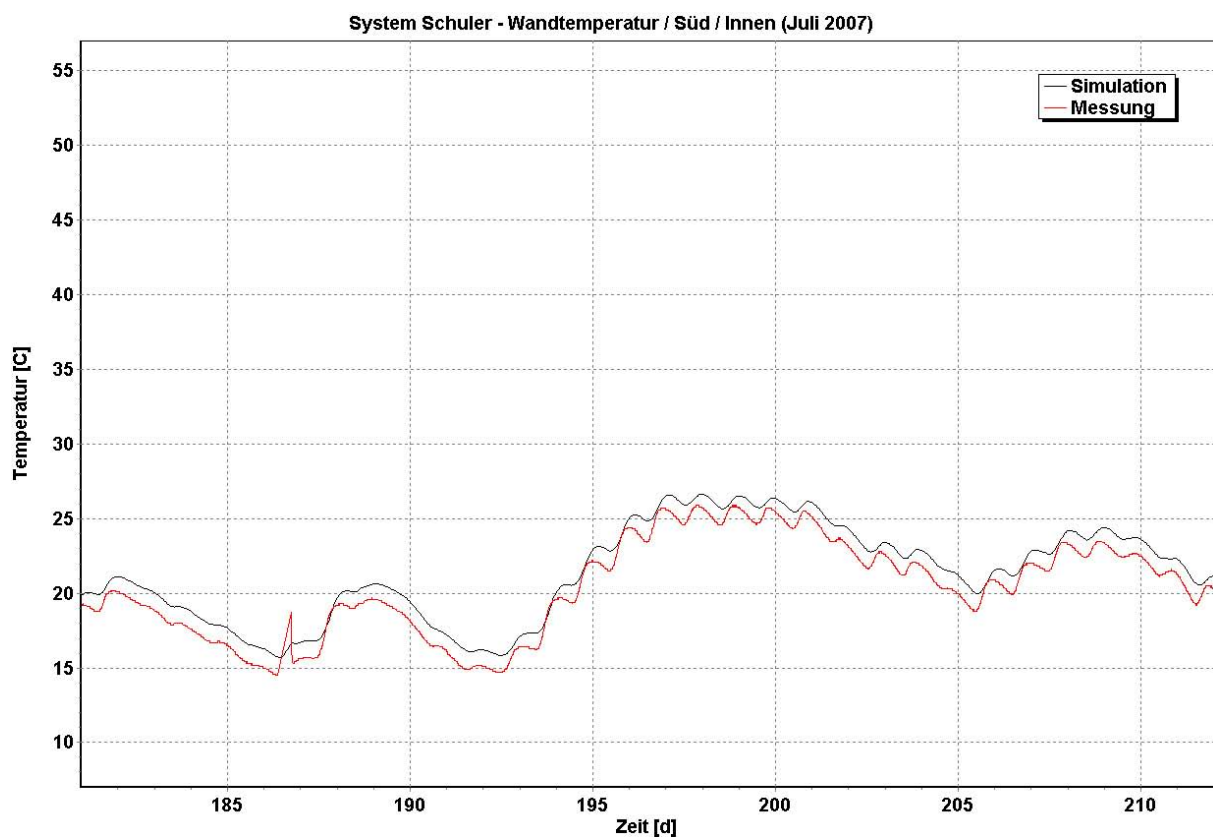
**Abb. 22:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenoberfläche der Südseite bei der Massivholzkonstruktion



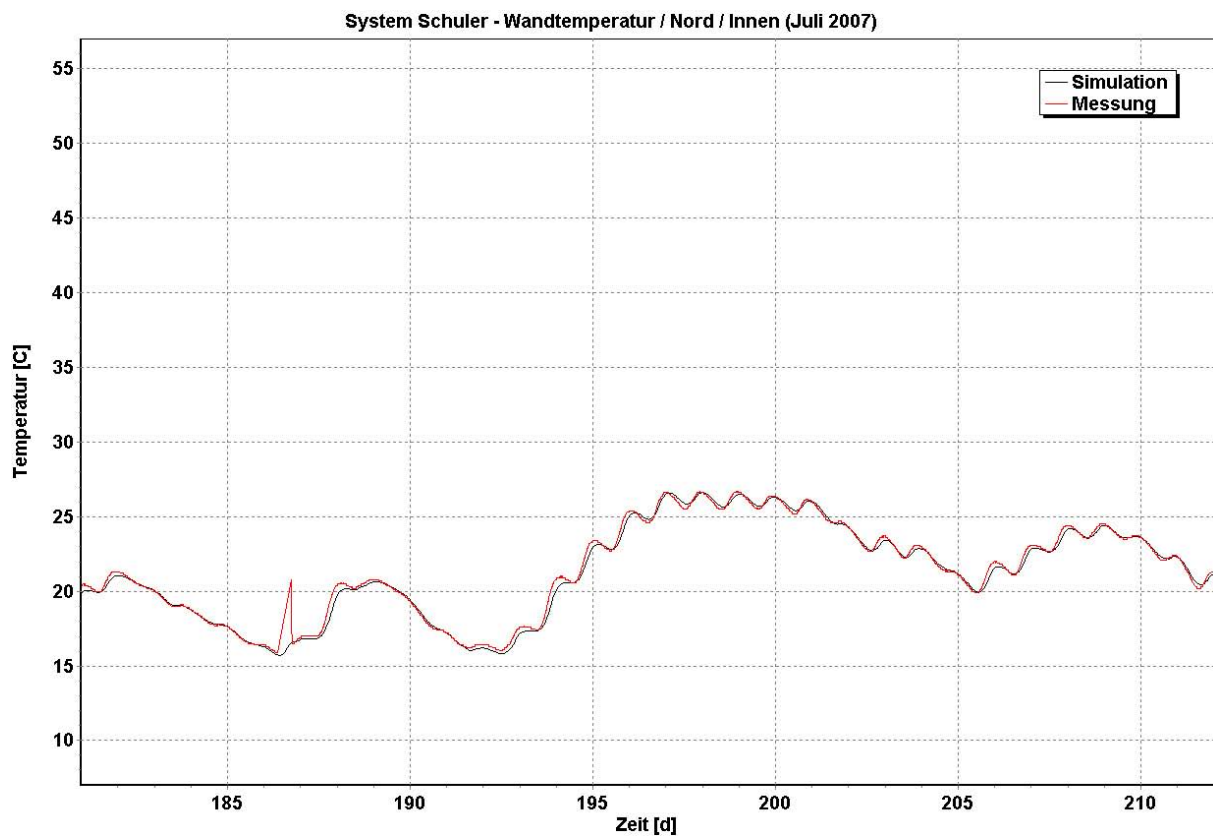
**Abb. 23:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Nordwand bei der Massivholzkonstruktion



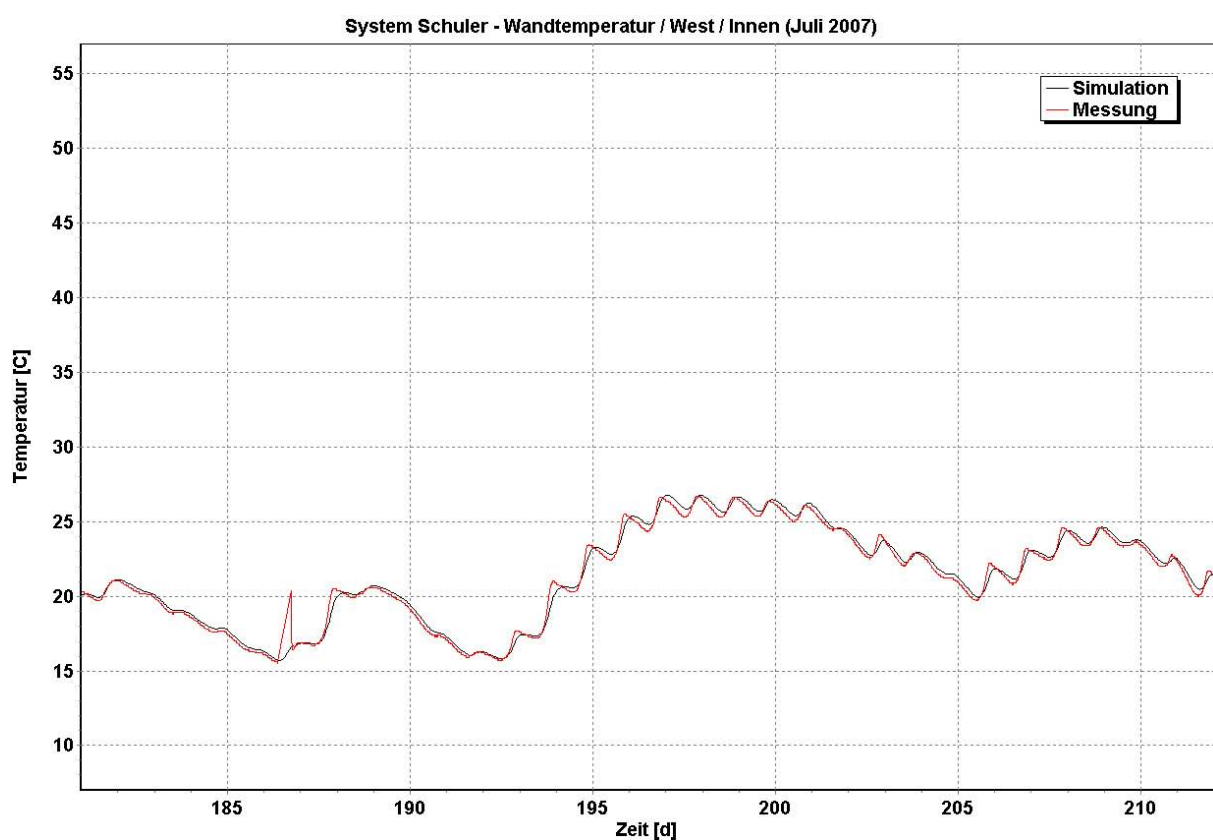
**Abb. 24:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Westwand bei der Massivholzkonstruktion



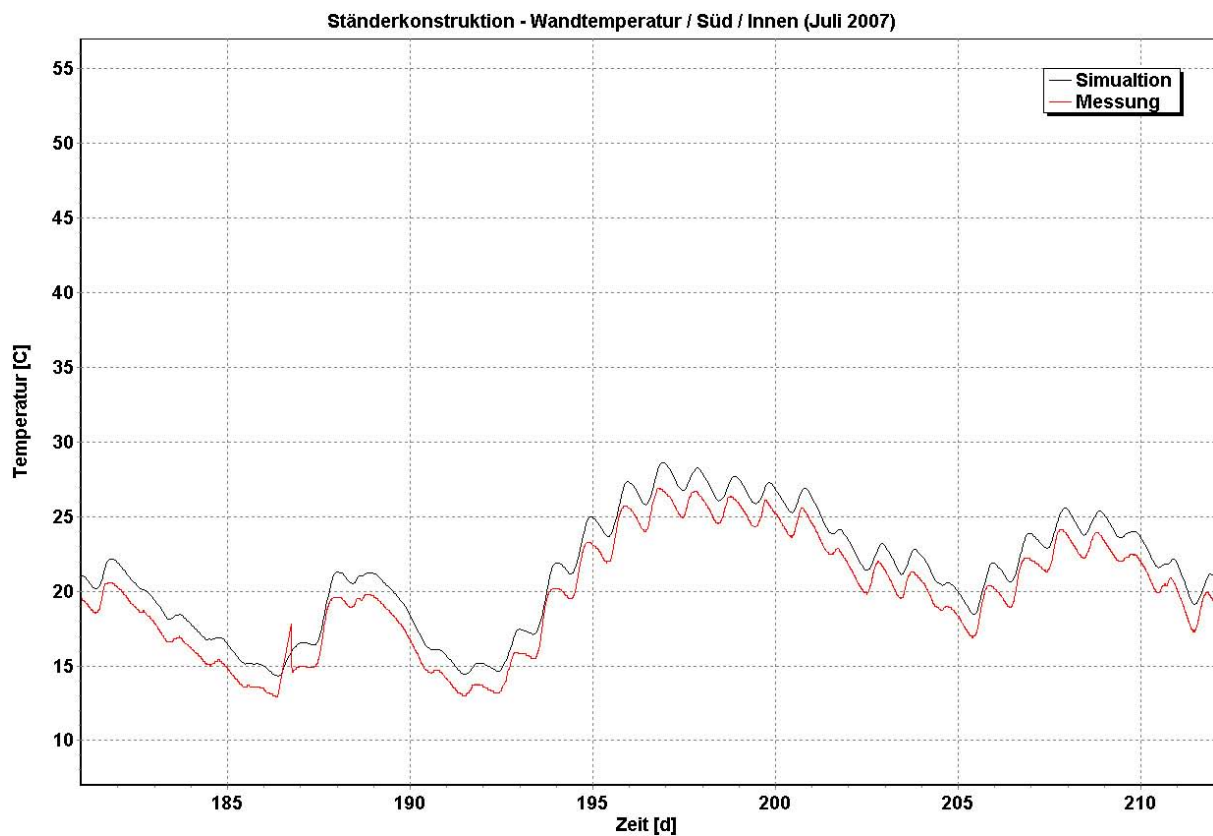
**Abb. 25:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Südwand beim System Schuler



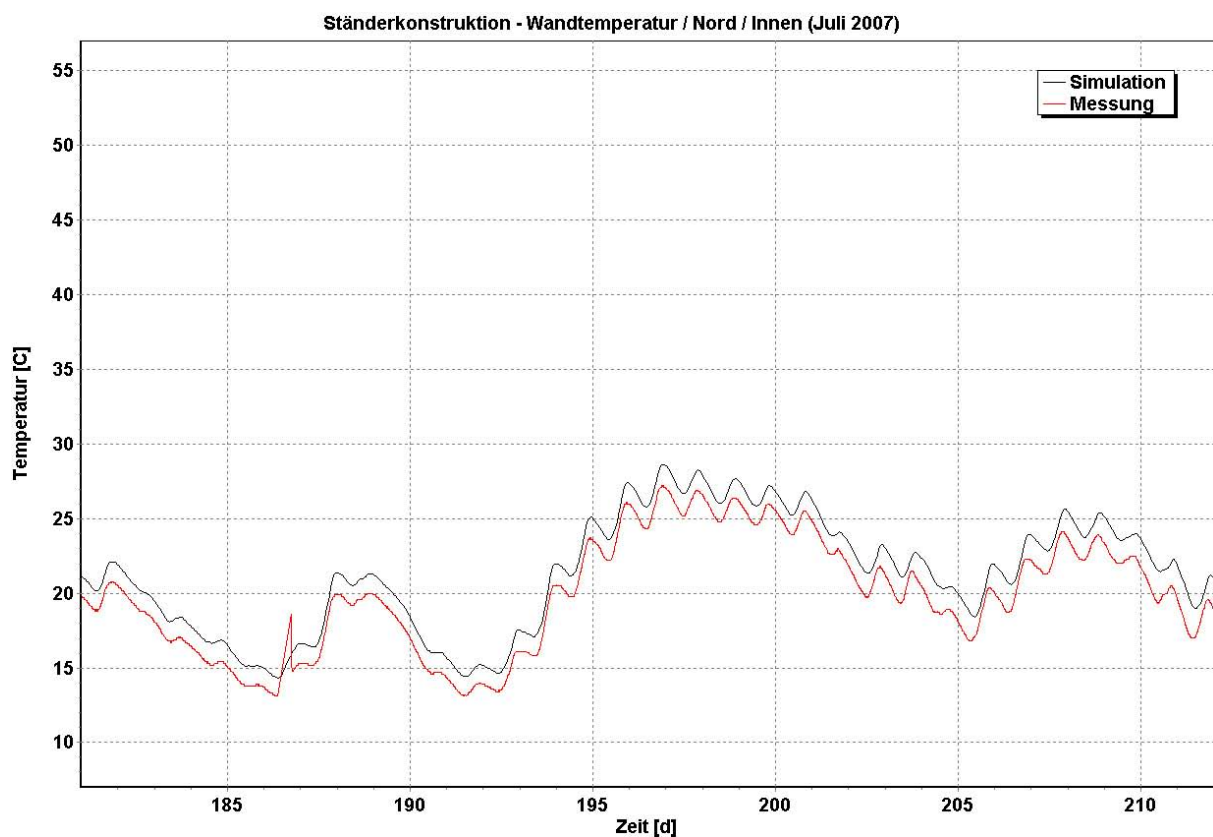
**Abb. 26:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Nordwand beim System Schuler



**Abb. 27:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Westwand beim System Schuler

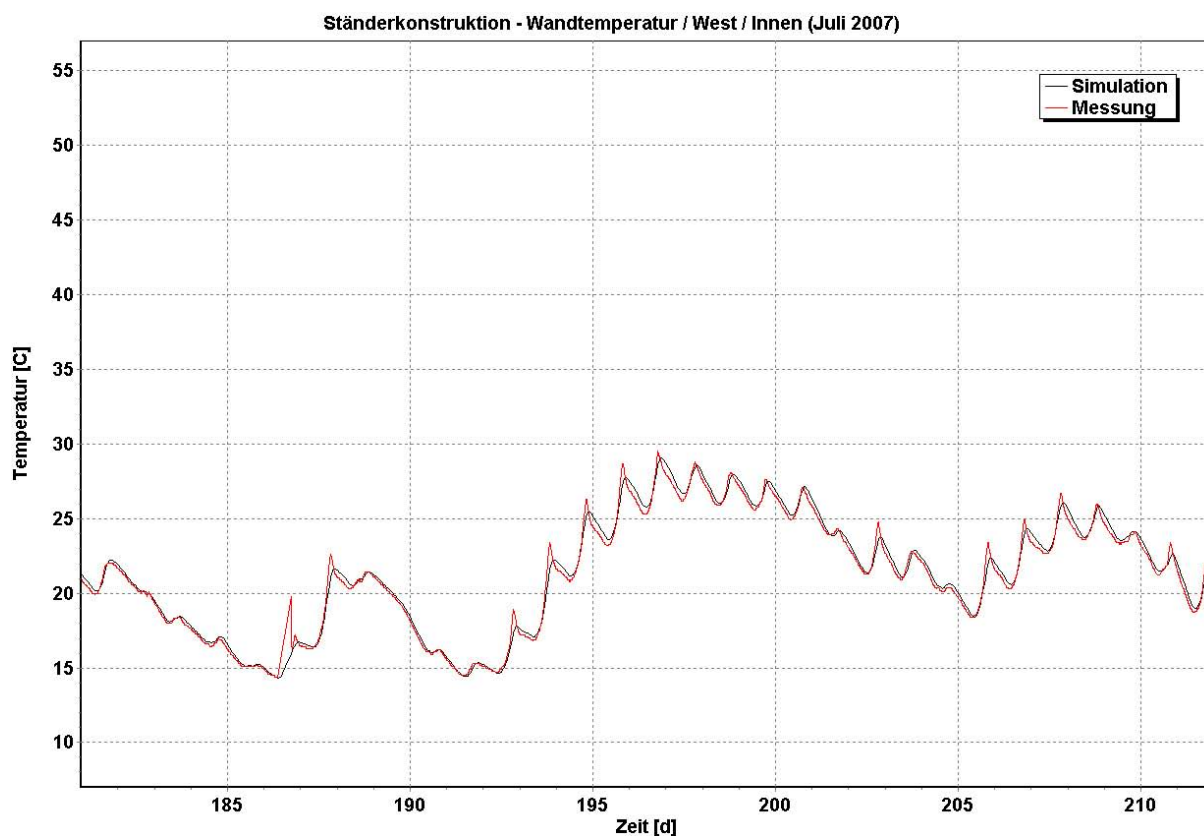


**Abb. 28:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Südwand bei der Ständerkonstruktion



**Abb. 29:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Nordwand bei der Ständerkonstruktion





**Abb. 30:** Vergleich der simulierten mit den gemessenen Daten an der Innenseite der Westwand bei der Ständerkonstruktion

**Tab. 6:** Vergleich der gemessenen (instationärer Zustand) und simulierten (stationärer Zustand) Tagesphasenverschiebungen und Tagesschwankungen

	Tagesphasenverschiebung Stunden [h]		Tagesschwankungen Differenz [°C]	
	Messung	Simulation	Messung	Simulation
Massivholzkonstruktion	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>0,16</b>	<b>0,04</b>
Schuler System	<b>9,5</b>	<b>11</b>	<b>0,8</b>	<b>0,35</b>
Ständerkonstruktion	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>1,54</b>	<b>0,90</b>

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes Nr. 2-71114-07 des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des Bundesamtes für Umwelt BAFU wurden die Messungen an drei Versuchsbauten mit verschiedenen Wandaufbauten (Massivholzkonstruktion, System Schuler und Ständerkonstruktion) durchgeführt. Die Messungen wurden auf Feuchte- und Wärmetransport ausgerichtet. Davon wurden einige bauphysikalischen Eigenschaften wie Phasenverschiebung, Anzahl der Stunden bei höchsten und niedrigsten Temperaturen, der Verlauf der rel. Luftfeuchte sowie auch statische und dynamische Wärmedurchgangskoeffizienten abgeleitet. Mittels der Simulationssoftware Delphin der Technischen Universität in Dresden wurden anschließend die gemessenen Daten validiert.

Die Ergebnisse zeigen folgende mögliche Schlüsse. Während der sommerlichen Periode zeigte die Massivholzkonstruktion einen höheren Wärmeschutz, wobei die Innenlufttemperatur 26,12 °C nicht überschritten hat (System Schuler 28,01 °C, Ständerkonstruktion 28,55 °C). Auch die Wärmestabilität in der winterlichen Periode wirkt sich mit langsamerer Abkühlung im Vergleich zu anderen untersuchten Bausystemen positiv aus. Dagegen erlaubt die gute Wärmespeicherung keine schnelle Erwärmung des Innenraumes bei steigender Außentemperatur. Die niedrigsten Innenlufttemperaturen im Winter sind mit dem System Schuler vergleichbar. Dieses System verhindert Temperaturverluste im Innenraum wegen seiner doppelten Dämmschicht.

Interessant ist der Verlauf der rel. Luftfeuchte in den Versuchsbauten. Während beim System Schuler und der Ständerkonstruktion die rel. Luftfeuchte kontinuierlich ansteigt, liegt diese bei der Massivholzkonstruktion praktisch konstant im Bereich von ca. 40-48 %.

Diese physikalische Eigenschaft der Massivholzkonstruktion zusammen mit ihren Wärmeparametern (Tagesschwankungen, Phasenverschiebung) ist aus Sicht der Bildung einer guten Behaglichkeit im Innenraum von Gebäuden sehr geeignet.

Für die Bestimmung des Heizwärmebedarfs ist der U-Wert ein wichtiger Zeiger. Dieser wurde anhand gemessener Daten im instationären Zustand berechnet. Sein Wert beträgt 0,18 W/m<sup>2</sup>K und ist um ca. 27 % niedriger als bei statischer Berechnung.

Bei der Validierung der gemessenen Daten mittels der Software Delphin zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten. Ein gewisses Problem bleibt bei den Unterschieden aufgrund der Himmelsrichtungen bestehen. Dies könnte durch die relativ kleinen Innenräume der Versuchsbauten oder durch unterschiedliche Positionen der Thermodrähte an den einzelnen Seiten der Versuchsbauten verursacht worden sein. Diese Einflüsse wurden bei der Simulation nicht berücksichtigt. Eine Verbesserung der Übereinstimmung der Ergebnisse könnte eine Berechnung mit detaillierten Klimadaten der Diffusstrahlung und der Direktstrahlung bringen. Trotz vorbenannter Abweichungen ist eine Nutzung der Software Delphin für die Simulation und Bestimmung einzelner bauphysikalischer Parameter bei diesen Aufbauten geeignet.

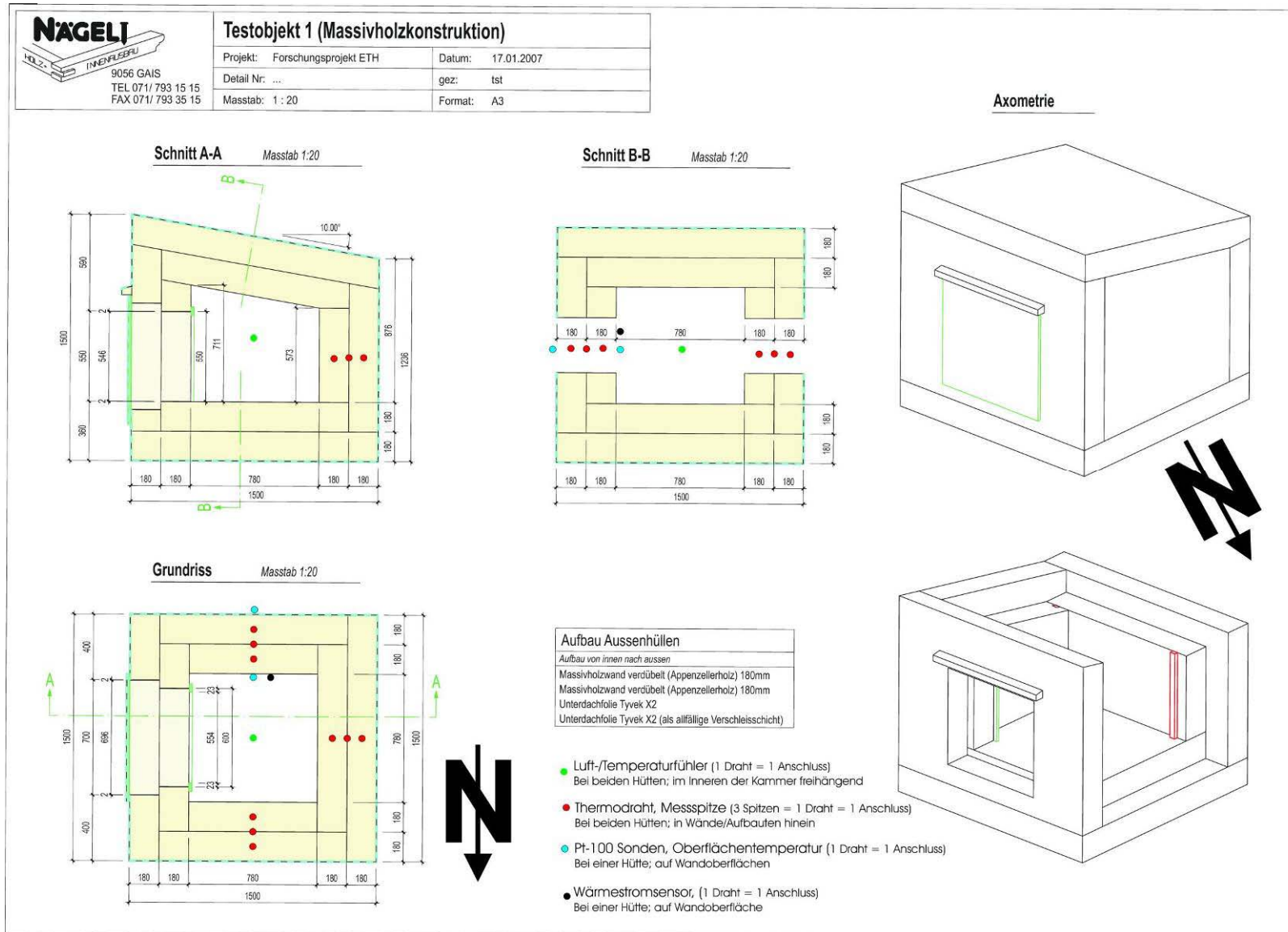
Dieses Forschungsprojekt ist eng mit dem Projekt „urholz – ein Regio Plus Projekt - System Appenzellerholz, Fa. Nägeli AG“ verknüpft, wo die Messungen auch an bewohnten Bauten bei realen Außen- und Innenbedingungen stattfinden. Dabei werden solche Effekte wie die Nutzungsgewohnheiten (Lüften etc.) mit

berücksichtigt. Es wird erwartet, dass die Messungen bei realen Bedingungen die Ergebnisse von Versuchsbauten bestätigen bzw. um neue Aspekte erweitern.

## 6. Literaturverzeichnis

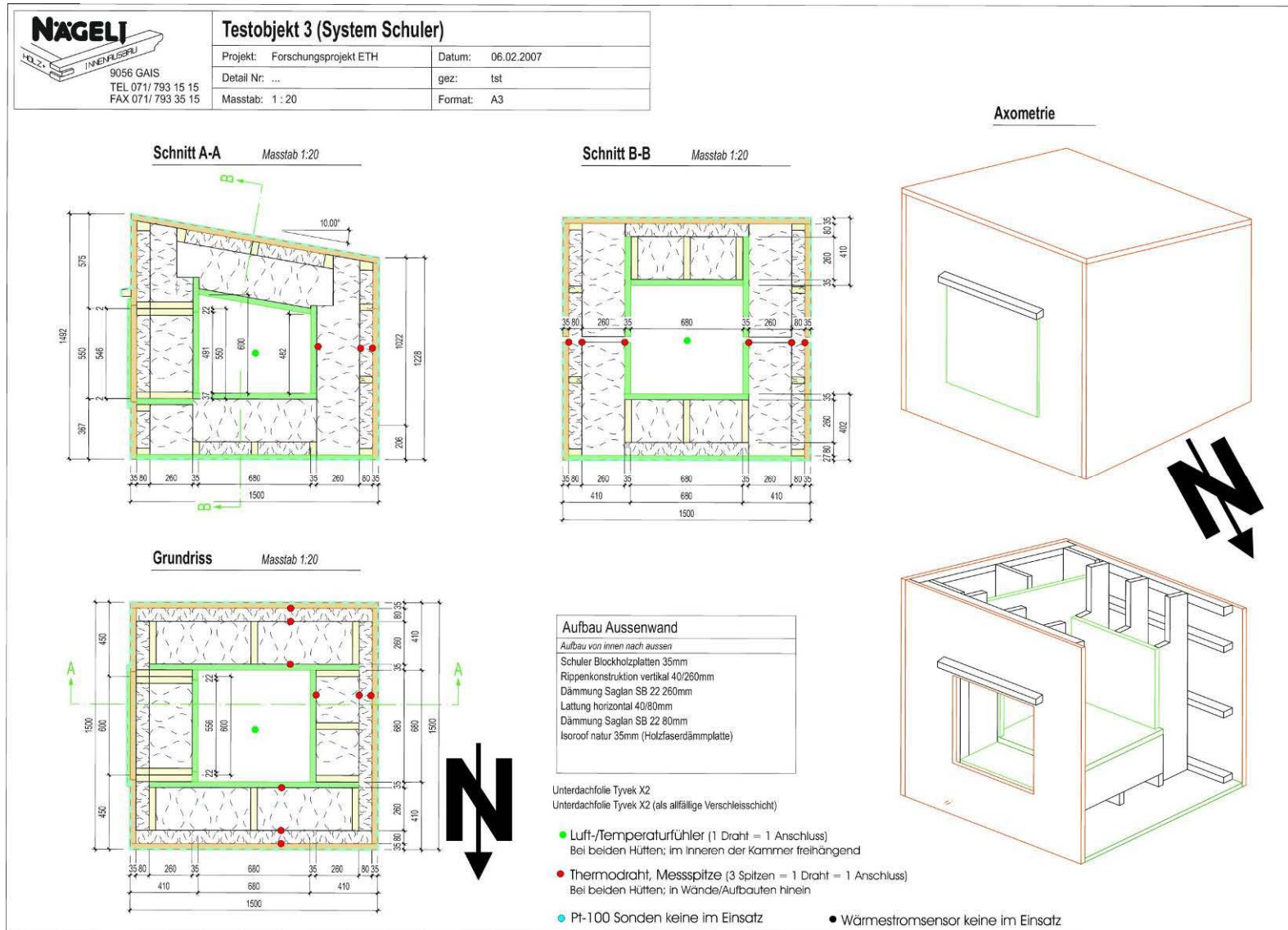
- [1] Niemz P., Hurst A. *Vergleichende Untersuchungen zum optimierten Wärmeschutz in unterschiedlichen Holzbausystemen*: Forschungsgesuch, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, 2007.
- [2] Niemz P., Sonderegger W. *Forschungsprojekt urholz (System Appenzellerholz, Fa. Nägeli AG)*: 1. Zwischenbericht, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, 2007.
- [3] DIN EN ISO 6946: 2008 *Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*.
- [4] Nicolai A., Grunewald J. *Interne Materialdatenbank der Software Delphin* [Software], Version 5.6.4, Dresden: TU Dresden, 2004-2008.
- [5] Sonderegger W. *Interne Messung der Lambdawerte*, Institut für Baustoffe, ETH Zürich. 2007.
- [6] Koschke P., Hüttl W. *ALMEMO – Handbuch*: 6. überarbeitete Auflage, Holzkirchen: Fa. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, 2005.
- [7] *TUD – Software – Delphin / CHAMPS-BES* [on-line], Uwe Mainhold, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 2008 [2008-09-09]. URL: <[http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_architektur/ibk/software/delphin](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_architektur/ibk/software/delphin)>.
- [8] *Produkte Detail – ISOROOF-NATUR-KN* [on-line], Pavatex SA, [2008-09-09]. URL: <[http://www.pavatex.ch/produkte\\_detail.aspx?PROID=21&ProductName=ISOROOF-NATUR-KN](http://www.pavatex.ch/produkte_detail.aspx?PROID=21&ProductName=ISOROOF-NATUR-KN)>
- [9] *Ampack, für ganzheitlichen Schutz der Gebäudehülle* [on-line], Ampack, [2008-09-09]. URL: <[http://www.ampack.ch/ch\\_dt/produkte.php?prod\\_id=4](http://www.ampack.ch/ch_dt/produkte.php?prod_id=4)>
- [10] *Technische Daten von Blockholz* [on-line], Pius-Schuler, [2008-09-09]. URL: <http://www.pius-schuler.ch/blockholz/downloads/downloads/datenblatt.pdf>
- [11] *Sager Dämmstoffe Saglan Glaswolle Pipelane Rohrschalen* [on-line], Sager [2008-09-09]. URL: [http://www.sager.ch/de/produkte\\_preise/produkte1\\_1.htm](http://www.sager.ch/de/produkte_preise/produkte1_1.htm)

## Anhang 1: Planzeichnung - Massivholzkonstruktion

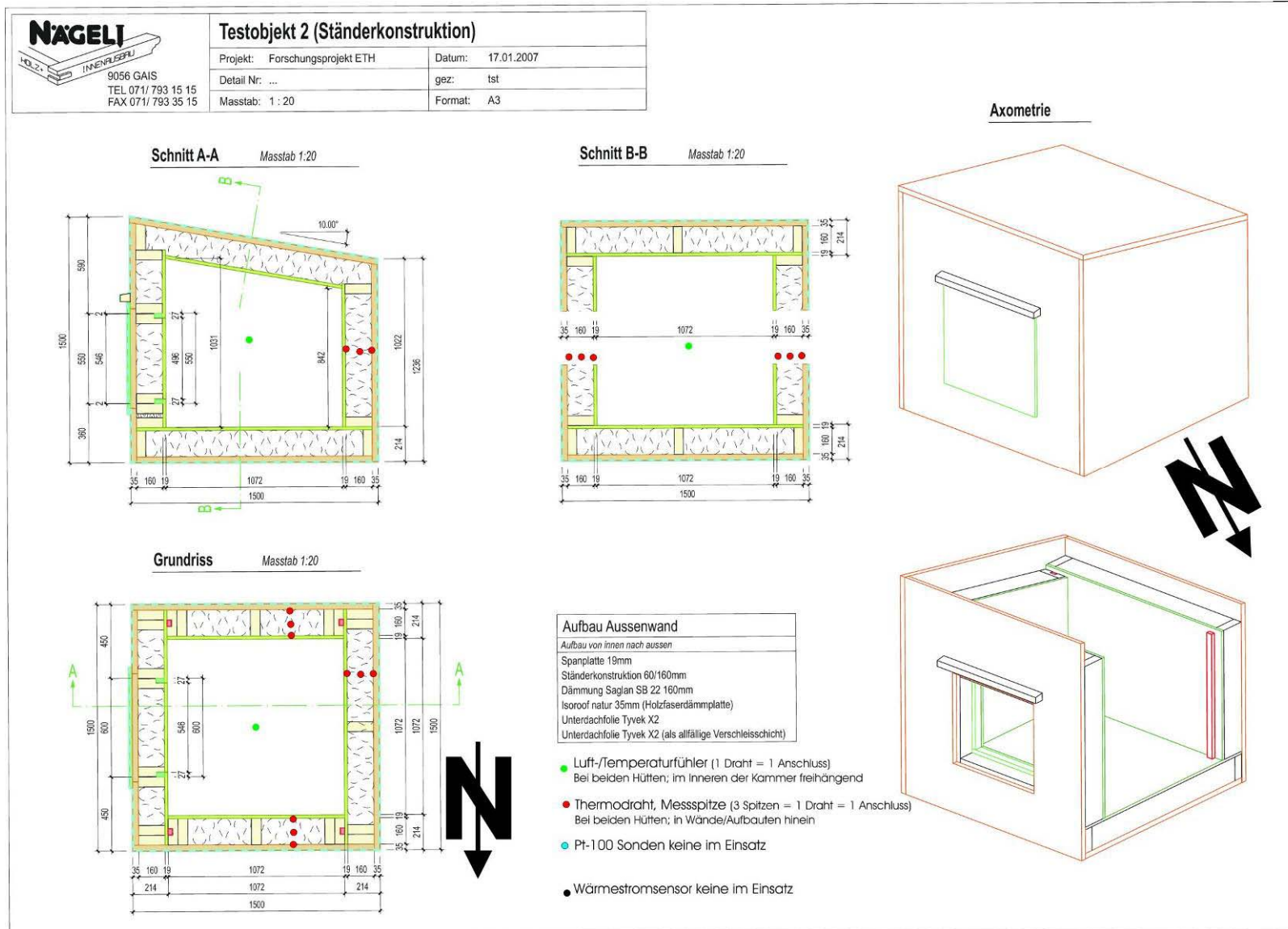


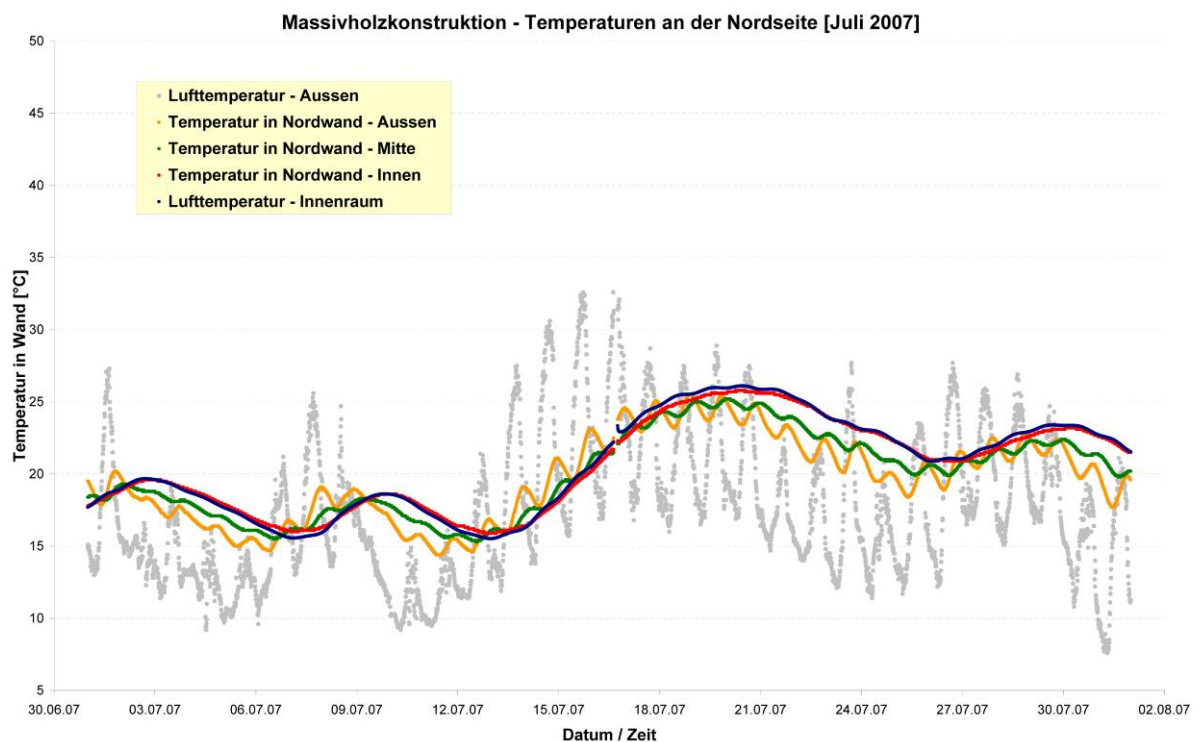
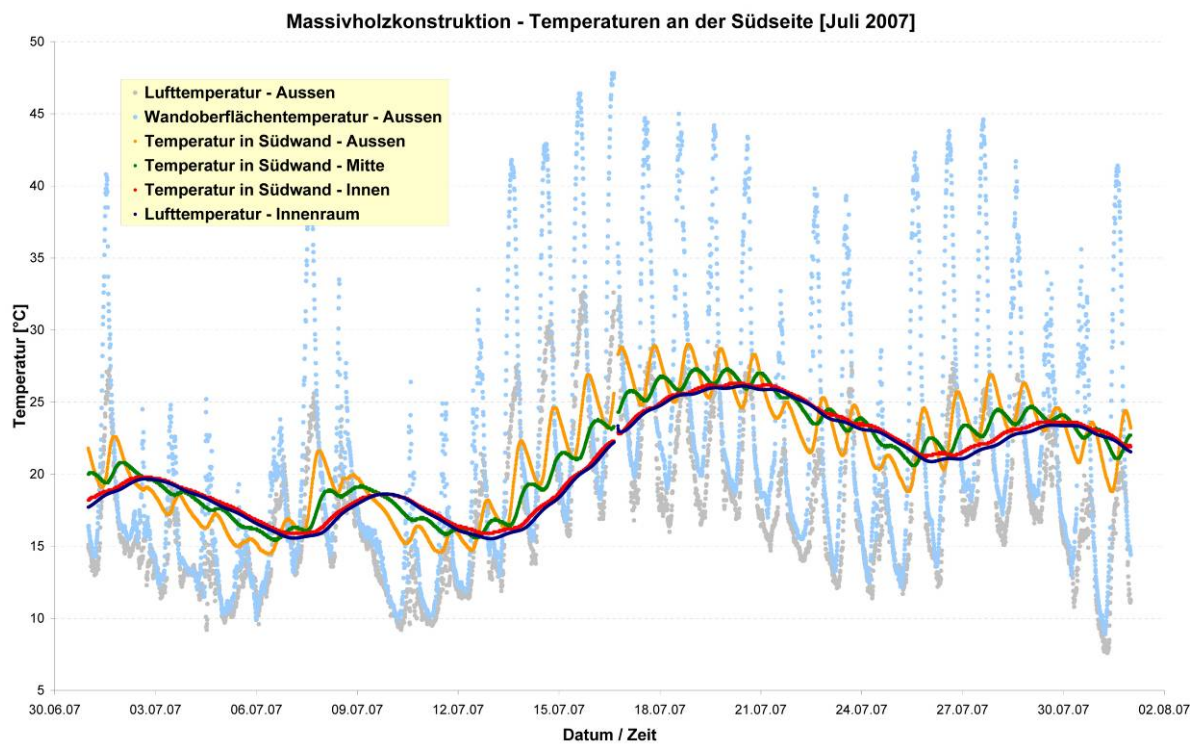


## Anhang 2: Planzeichnung - System Schuler

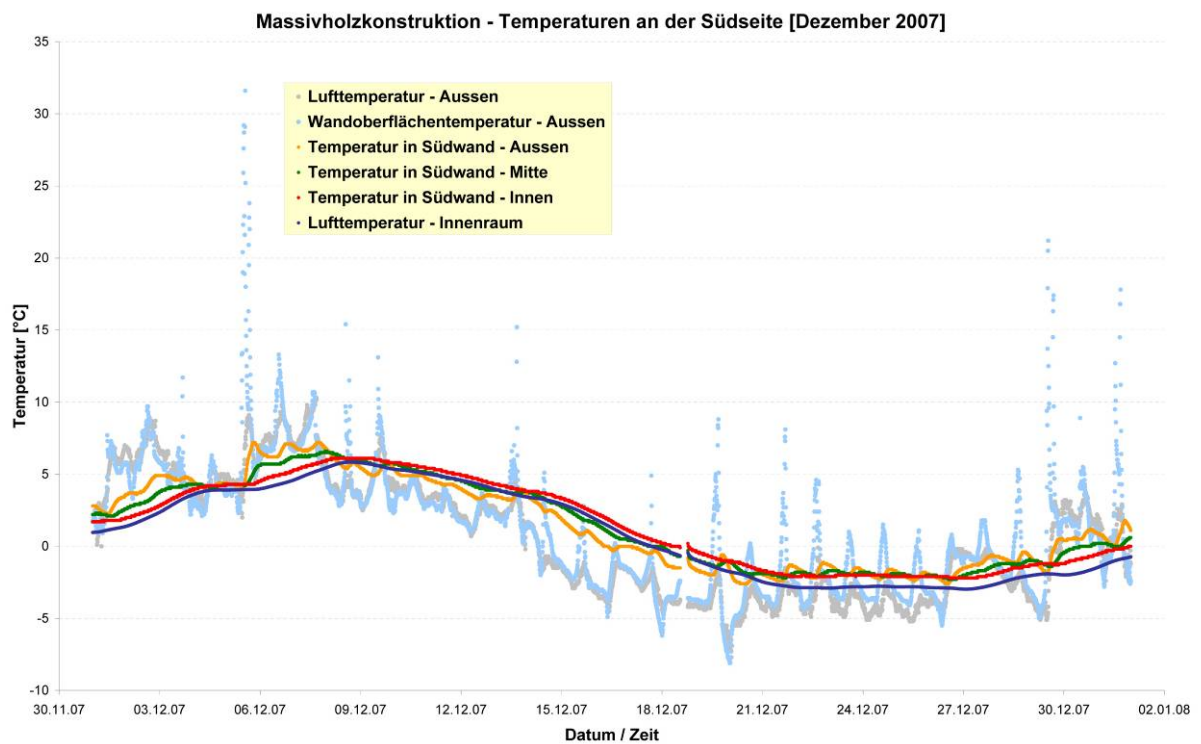
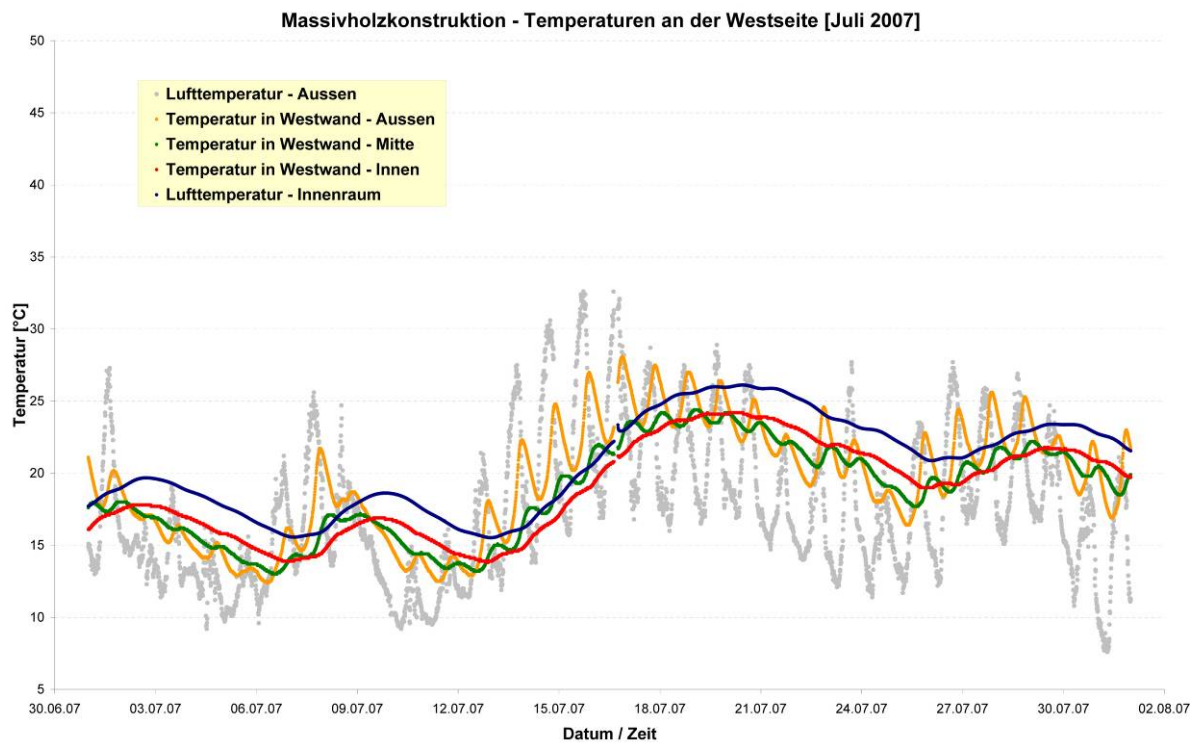


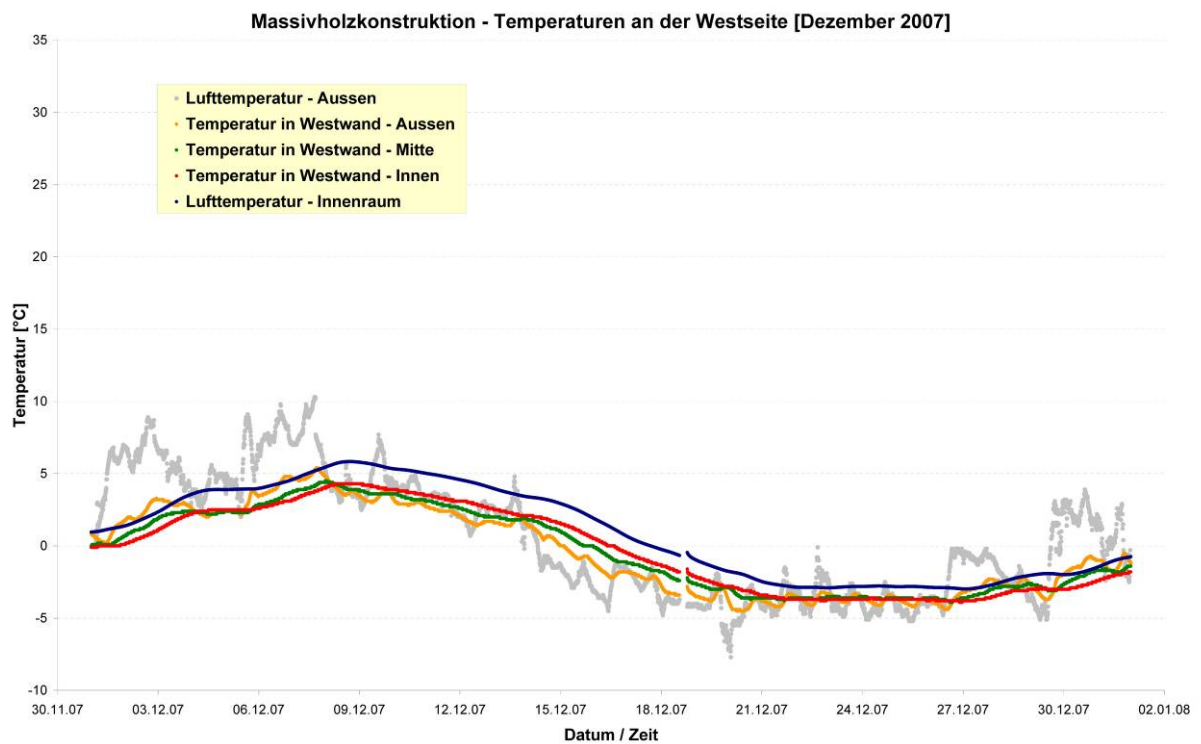
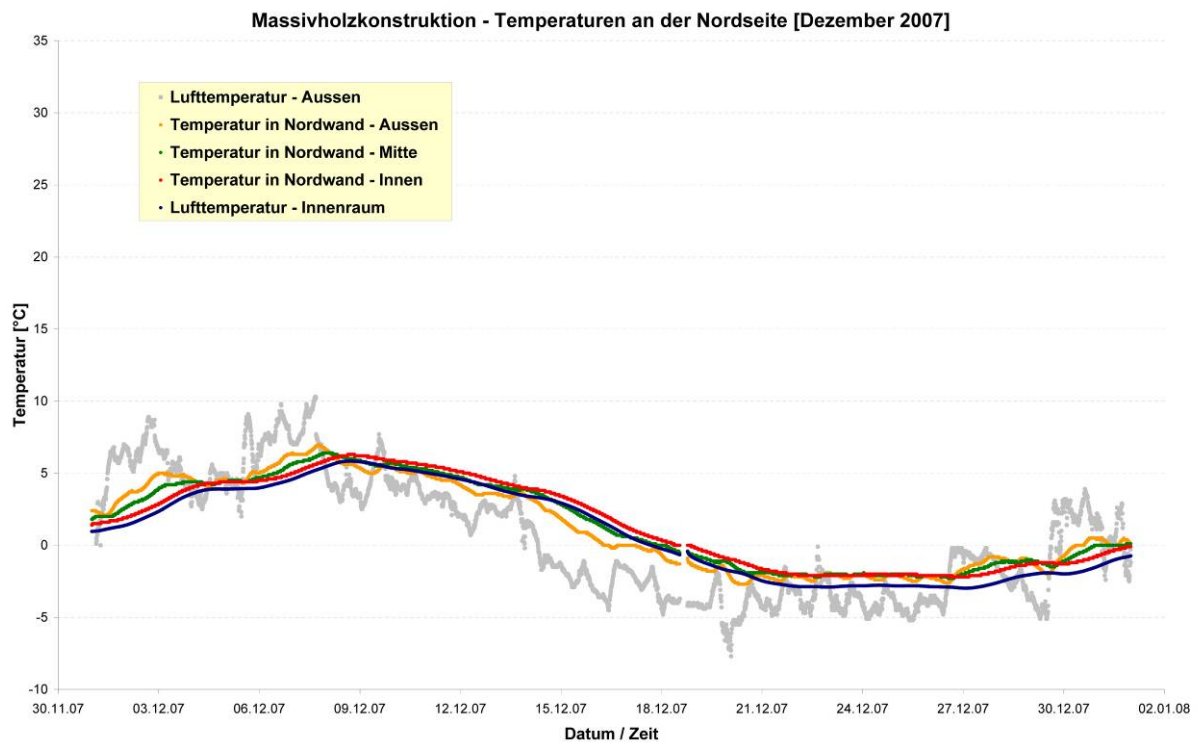
### Anhang 3: Planzeichnung - Ständerkonstruktion



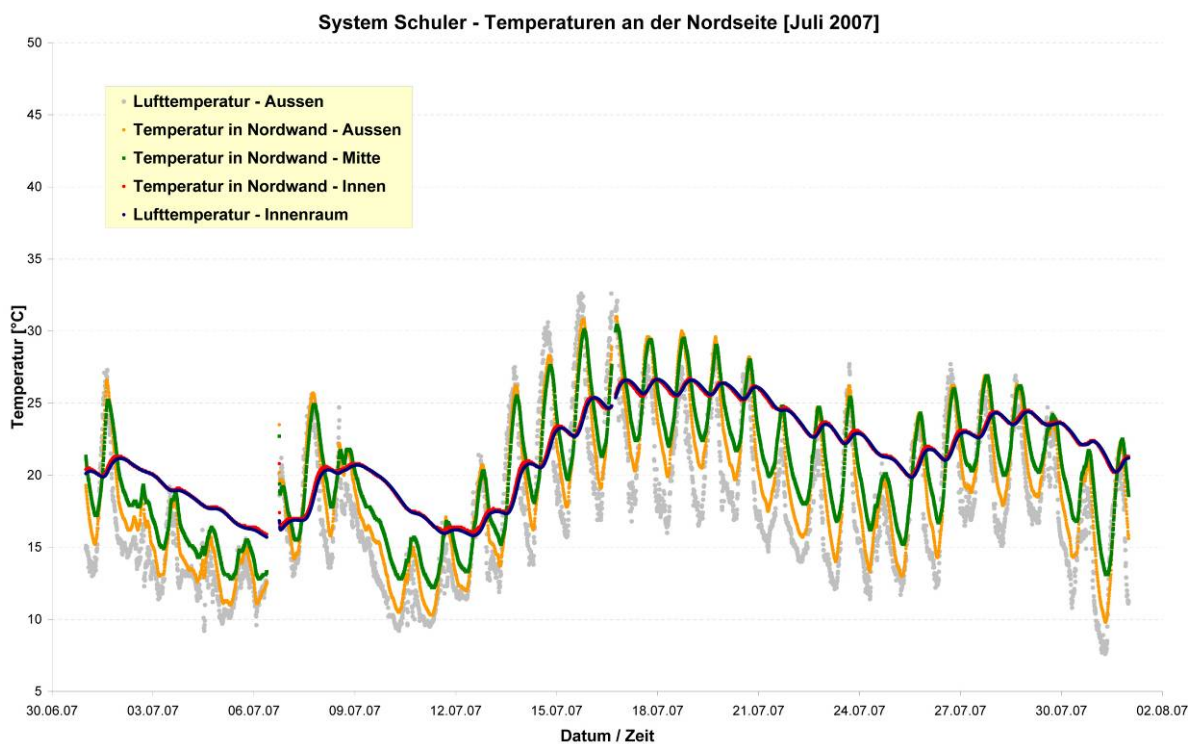
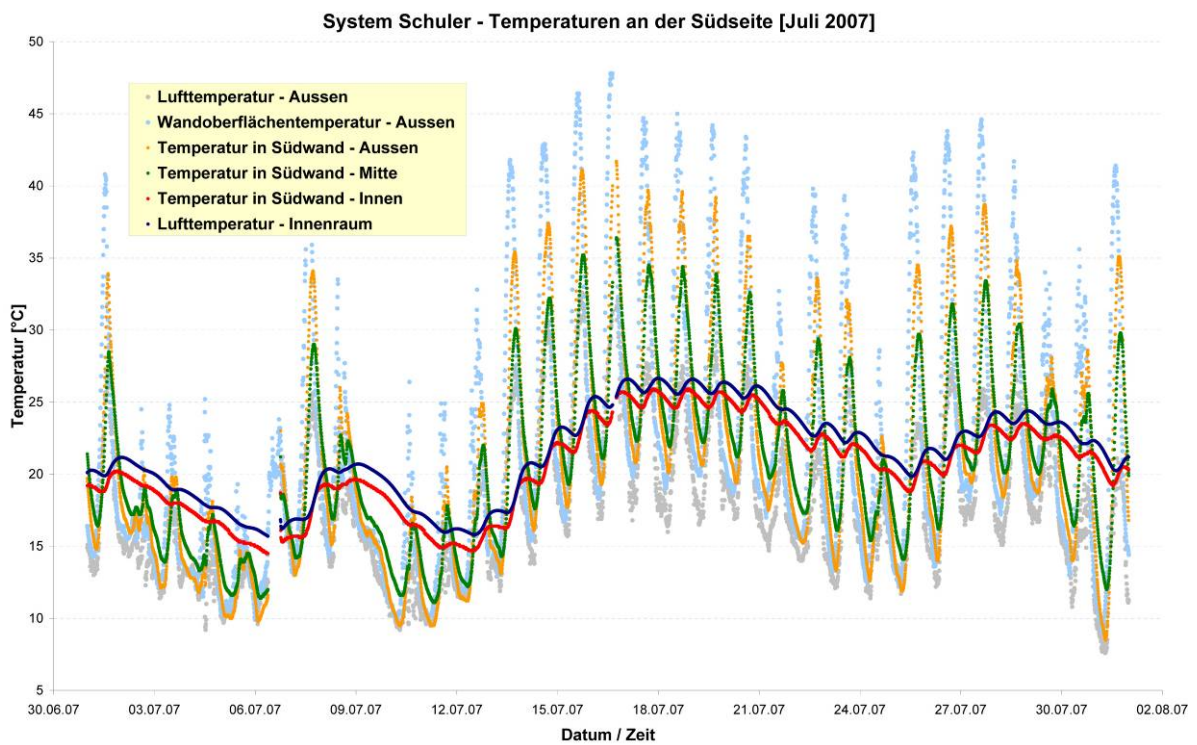
**Anhang 4: Temperaturverlauf in einzelnen Seiten - Massivholzkonstruktion**

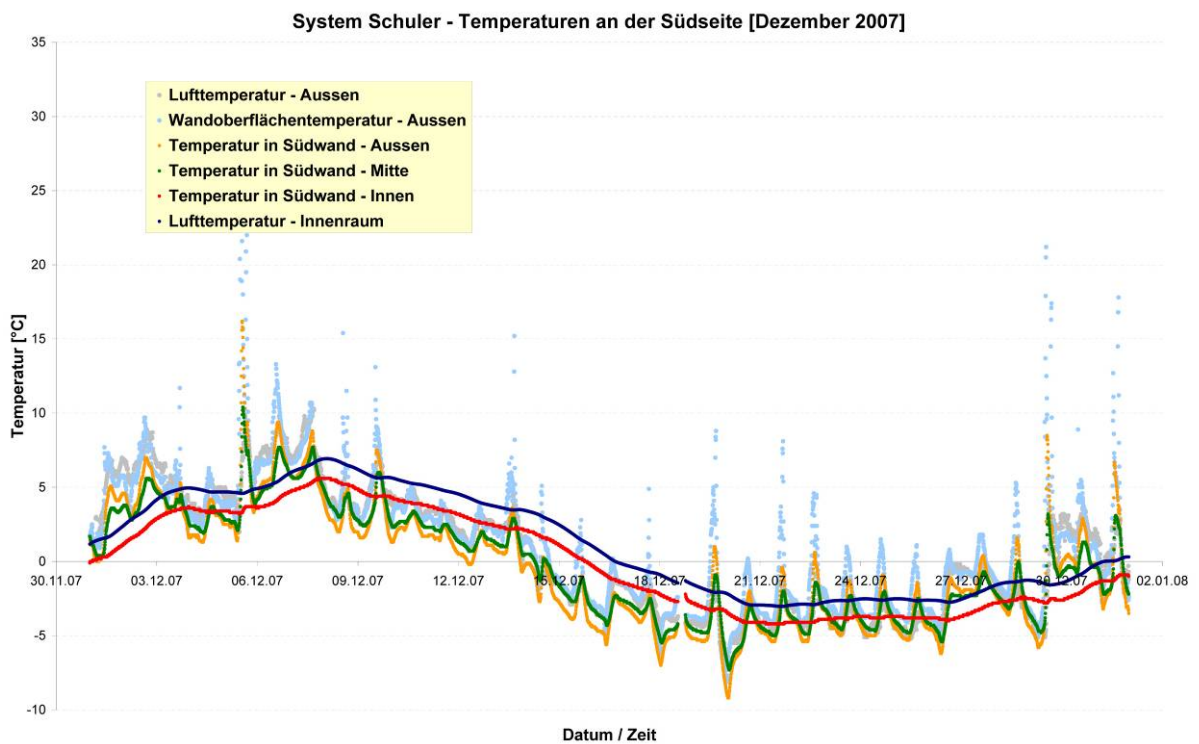
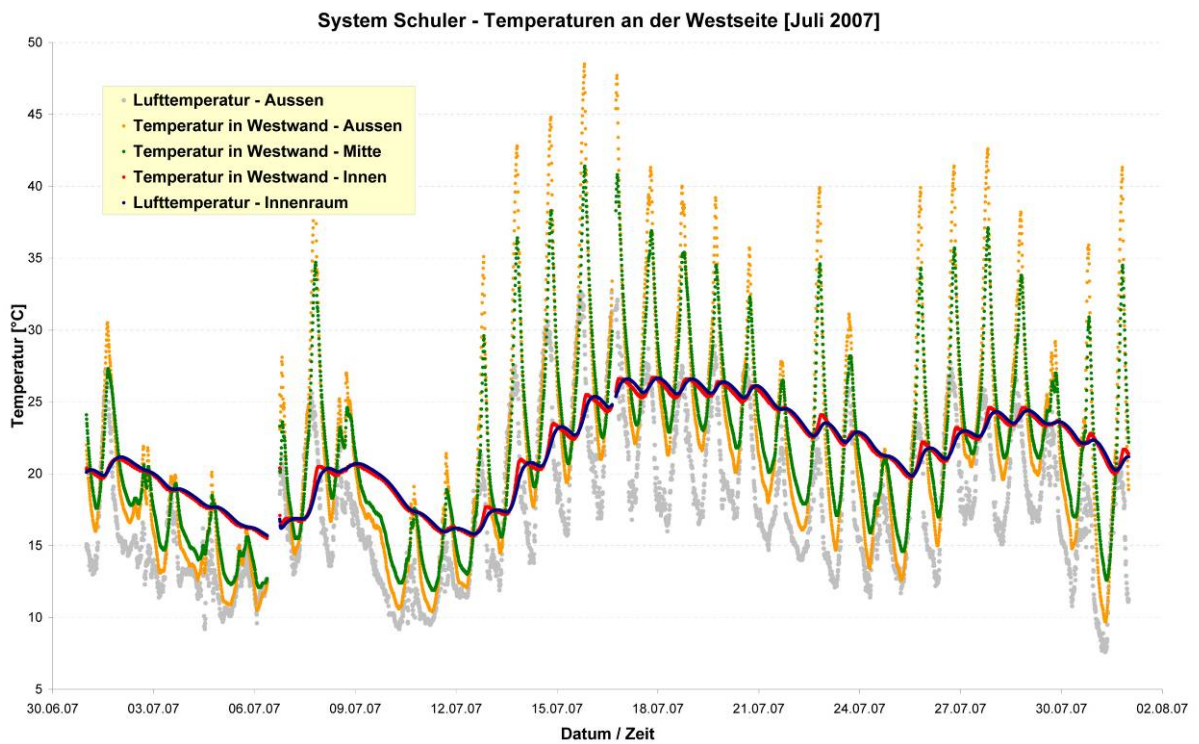


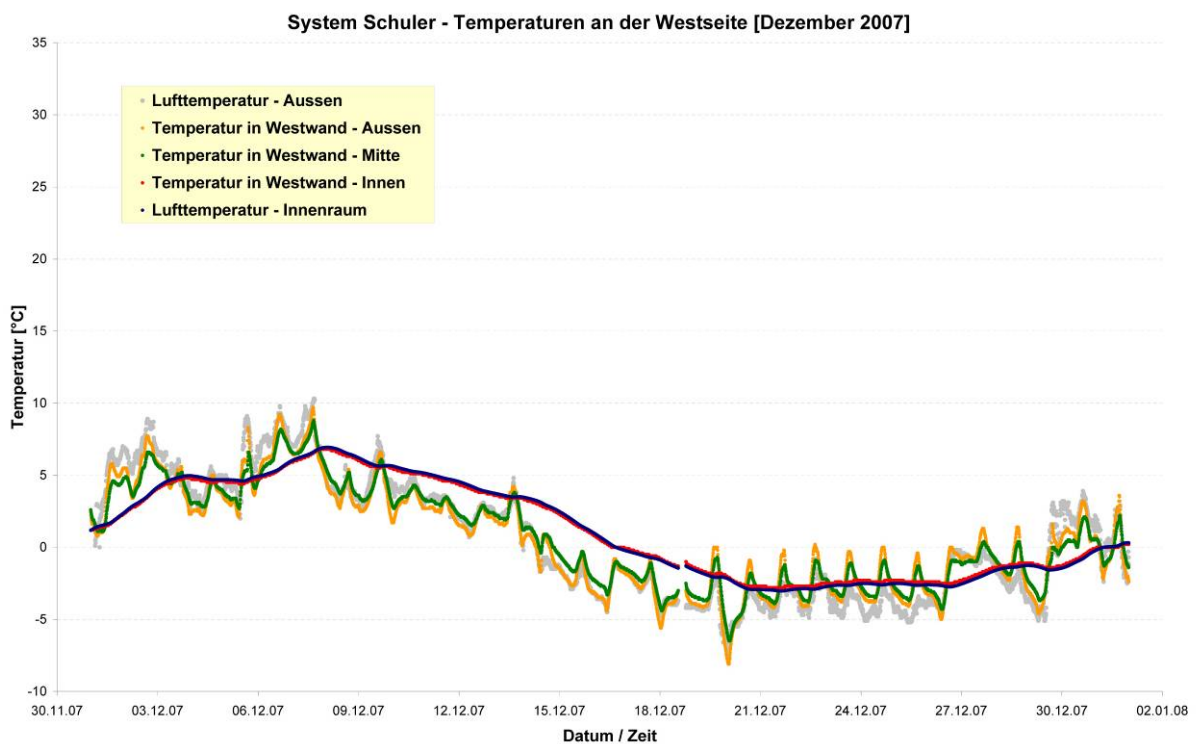
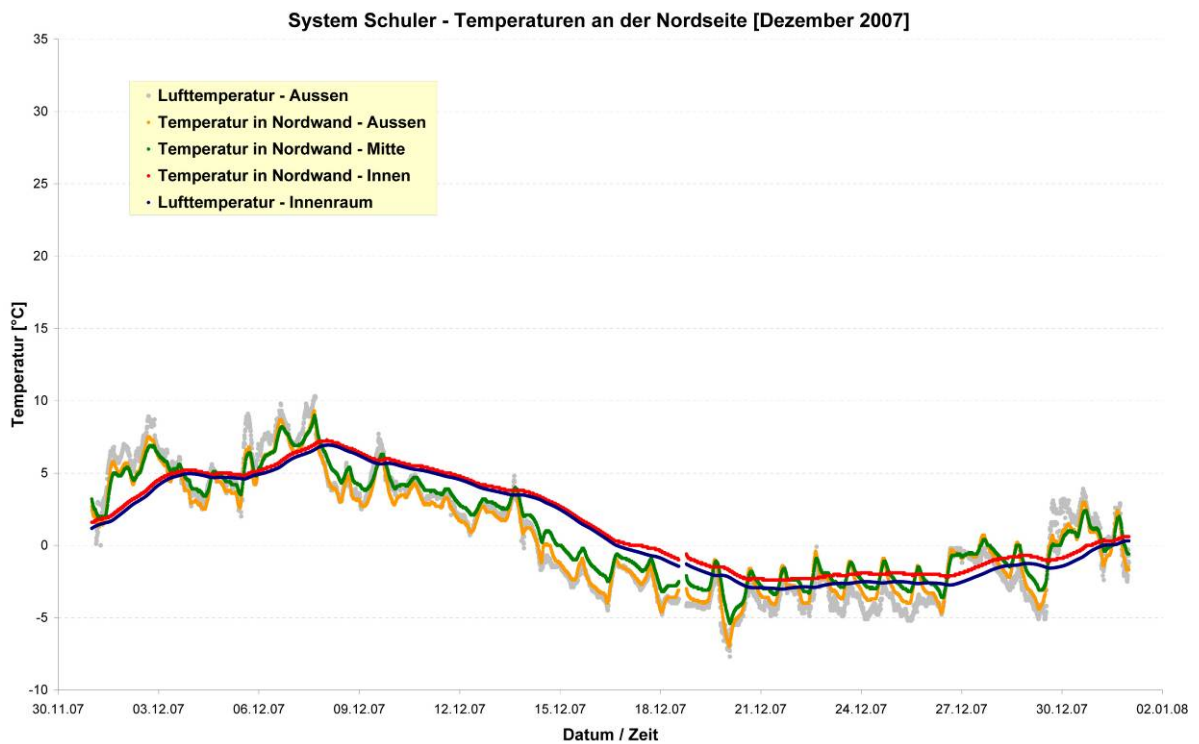






**Anhang 5: Temperaturverlauf in einzelnen Seiten – Schuler System**







**Anhang 6: Temperaturverlauf in einzelnen Seiten – Ständerkonstruktion**