

Institut für Diagnostik
und Konservierung an Denkmalen
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht DD 24/2018

Modellhafte präventive Konservierung von umweltgeschädigten spätmittelalterlichen Außenwandmalereien an der Kirche St. Nikolai in Jena-Lichtenhain durch den Einsatz klimapuffernder ökologischer Bauprodukte in einer Einhausung

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Projekt AZ 32669 / 01-45

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Berichterstellung:

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther, IDK e.V. Dresden

Unter Verwendung von Text- und Bildmaterial der Projektpartner.

Dresden, den 29.03.2018

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351 48435 109
Fax.: 0351 48430 468

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345 472257 21/22/23
Fax.: 0345 472257 29

e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
IBAN.: DE52850503003120115524
BIC: OSDDDE81XXX

Kto-Nr.: 3120 115 524 BLZ: 850 503 00
St-Nr.: 203/140/15097

Ust-ID: DE234216408

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32669	Referat	45	Fördersumme	12.792,50 €
Antragstitel		Modellhafte präventive Konservierung von umweltgeschädigten spätmittelalterlichen Außenwandmalereien an der Kirche St. Nikolai in Jena-Lichtenhain durch den Einsatz klimapuffernder ökologischer Bauprodukte in einer Einhausung			
Stichworte		Wandmalerei, Einhausung, Raumklima, präventive Konservierung, Schadsalze, Baustoffe			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
34 Monate		02.06.2015		31.03.2018	
Zwischenberichte:		08 / 2016			
Bewilligungsempfänger		Evangelisch-Lutherische Kirchengemeinde Jena Stadtkirchenamt Jena Lutherstr. 3 07743 Jena		Tel 03641/573826	
				Fax	
				Projektleitung Kirchmeister Friedrich Bürglen	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther Dr.-Ing. Maria Hoffmann	
Kooperationspartner		Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. Schlossplatz 1 01067 Dresden Bauingenieurbüro GbR Dr.-Ing. Maria Hoffmann und Dipl.-Ing. Franz Wilkowski Brehmstraße 38 07546 Gera			
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Hauptziel dieses Projektes war es, durch eine optimale Ausbildung einer neu zu errichtenden Schutzwand vor der Wandmalerei, diese vor einem weiteren Zerfall zu bewahren. Nur durch diese Abkopplung von dem anliegenden Außenklima können eine langfristige Sicherung des jetzigen Bestandes und eine notwendige Restaurierung der Wandmalerei erfolgen. Um den technischen Aufwand auf ein Minimum zu reduzieren, sollten vor allem klimapuffernde Materialien wie z.B. Holz und Lehm zum Einsatz kommen. Gleichzeitig sollte in diesem Projekt auch der bautechnisch und denkmalpflegerisch korrekte Einsatz einer sensorgesteuerten Raumlüftung ermittelt werden, um eine kontrollierte Durchlüftung dieses abgeschotteten Raumes zu ermöglichen. Diese Form der kontrollierten Raumdurchlüftung ist auch an anderen Objekten einsetztauglich.</p> <p>Grundlegende Zielstellung des vorliegenden Projektes präventiver Konservierung ist die Erarbeitung und Realisierung eines integrierten Konzeptes zur Verhinderung einer weiteren anthropogenen Schädigung der Wandmalerei durch eine nachhaltige Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes im Einhausungsbereich. Daneben stellt auch die Vermeidung bzw. die starke Einschränkung von laufenden Kosten für den Erhalt des Einhausungsbereiches der St. Nikolauskirche in Jena-Lichtenhain ein wichtiges Kriterium dar.</p>					

Ergebnisse und Diskussion

Die gewünschte raumklimatische Stabilisierung vor der Wandmalerei, konnte durch die Errichtung der dauerhaften Einhausung im Herbst 2015 erreicht werden. Durch die durchgeführten raumklimatischen Untersuchungen konnte eine Stabilisierung des raumklimatischen Zustands in der Einhausung eindeutig festgestellt werden. Die erfolgten klimatischen Aufzeichnungen zeigen, dass sich in der Einhausung ein gedämpftes Raumklima im Vergleich zum Außenklima eingestellt hat. Die dämpfende Wirkung der massiven historischen Wandkonstruktion der Kirche und der neuen Fachwerkwand mit feuchtepuffernden Baumaterialien konnte durch diese Form der Einhausung aktiviert werden. Daher ist auch ein Unterschreiten der Taupunkttemperatur an den Wandoberflächen kaum mehr festgestellt worden.

Die Langzeitklimamessungen haben ergeben, dass es derzeit nicht unbedingt notwendig ist eine sensorgesteuerte Raumlüftung für den Einhausungsbereich zu betreiben. Natürlich würden sich dadurch die Raumklimaparameter weiter verbessern lassen, aber solche technischen Einbauten bedingen auch einer regelmäßigen Wartung und Betreuung. Ob dies in Jena-Lichtenhain derzeit so gegeben ist, ist fraglich. Trotzdem kann eine solche sensorgesteuerte Lüftungsanlage empfohlen werden.

Da der bauliche und finanzielle Aufwand für die Installation einer solchen kleinteiligen sensor-gesteuerten Raumlüftung in Jena-Lichtenhain als gering zu bezeichnen ist wird hier trotzdem noch kurz die Funktionsweise beschrieben: Die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Außen- und Innenluft werden von Messfühlern gemessen und an ein sich im Gebäude befindliches Steuergerät übermittelt. Das Steuergerät errechnet automatisch die absolute Luftfeuchte in Gramm je Kubikmeter Luft. Ist die absolute Feuchte innen höher als außen, werden Ventilatoren oder Fensteröffner in einem individuell einstellbaren Algorithmus an- und ausgeschaltet. Während des Lüftungsvorganges kann sich die trockenere Außenluft mit der vorhandenen feuchteren Innenluft vermischen, wodurch Fußboden- und Putzflächen sowie freiliegendes Mauerwerk Feuchte an die Raumluft abgeben können. Durch einen individuell einstellbaren Messzeitraum werden die beiden Luftzustände von Innen- und Außenluft permanent miteinander verglichen und die Lüftung gestartet oder gestoppt. Der mit einem elektrischen Verschluss in der Wand oder dem Fenster eingebaute Ventilator zieht die feuchte Luft aus dem Raum und bläst sie ins Freie. Der Ventilator wird so dimensioniert, dass in einem definierten Zeitraum die Raumluft einmal ausgetauscht wird. Über eine Zuluftöffnung oder ein mit einem elektrischen Fensteröffner gekipptes Fenster strömt wegen des vom Ventilator erzeugten Unterdrucks trockenere Außenluft in den Raum. Die Orte der Zuluft- und der Abluftöffnung sollten weiträumig auseinander liegen, um eine möglichst große Durchmischung der Raumluft zu ermöglichen. Dadurch soll auch verhindert werden, dass sich Raumluftbereiche bilden, die nicht belüftet werden. Mittlerweile können bei guten Steuergeräten zusätzliche Grenzwerte eingestellt werden. Somit ist eine Temperaturbegrenzung für Frostschutz oder ein Mindestwert für die relative Luftfeuchte im Raum möglich damit z. B. sich im Raum befindliche Gegenstände nicht austrocknen. Ferner besteht die Möglichkeit der Datenaufzeichnung, die zu empfehlen ist, um die Wirksamkeit der Durchlüftung über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren und um Änderungen bzw. Anpassungen der Lüftungsanlage zu ermöglichen.

Ein sehr wichtiger Punkt ist bei allen technischen Anlagen die Wartung und Pflege. Hier muss allen Beteiligten bewusst sein, dass die Technik und die Sensorik mindestens einmal im Jahr zu überprüfen sind. Aber auch die erfassten Raumklimadaten müssen ausgewertet und interpretiert werden. Dies kann durch eine eingewiesene Person – entweder durch den Eigentümer, den Nutzer oder externe Fachkräfte – erfolgen. Die Datenauswertung ist von besonderer Bedeutung, denn dadurch lassen sich die Auswirkungen der Raumlüftung klar belegen. Zudem können die eingestellten Parameter dem tatsächlichen und sich ändernden Raumklimazustand angepasst werden.

Des Weiteren muss das Raumklima innerhalb der dauerhaften Einhausung langfristig aufgezeichnet und kontrolliert werden, um etwaige Schäden an den Malereibeständen frühzeitig erkennen und bewerten zu können. Daher wird vom Autor eine angepasste Raumklimamessung mit einer kleinteiligen batteriebetriebenen Messtechnik empfohlen, die sich dem jetzigen Messsystem annähert. Hierzu sollten zeitnah weiterführende Gespräche alle Projektbeteiligten erfolgen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen der Erstellung der neuen dauerhaften Schutzwand vor der Wandmalerei erfolgte auch die Anbringung einer Erklärungstafel zum Forschungsprojekt.

Fazit

Zusammen mit der Neuerrichtung einer Schutzwand und Auswahl feuchtepuffernder Materialien konnte ein ausgeglichener raumklimatischer Zustand im Jahresverlauf erreicht werden, der ein weiteres zyklisches Zerstören der originalen Wandmaleroberfläche unterbindet. Durch diese Vorsorge konnte eine Qualitätssicherung der modellhaften restauratorischen Leistung erreicht werden. Dieses Vorgehen konnte auch übertragbare Konservierungslösungen für andere Objekte mit ähnlichen Fragestellungen (z.B. kleine Dorfkirchen) hervorbringen.

Inhalt

1	Antragsteller und Projektträger.....	4
1.1	Kooperationspartner.....	4
2	Zusammenfassung.....	5
3	Die Wandmalerei in der Dorfkirche St. Nikolaus in Jena-Lichtenhain.....	6
3.1	Einführung.....	6
3.2	Geschichte des Ortes und der Kirche Lichtenhain.....	7
3.3	Die Außenwandmalereien - Inhalt und Erhaltungszustand.....	8
3.4	Einordnung des Objektes in den kunsthistorischen Zusammenhang.....	9
3.5	Umweltrelevanz.....	10
3.6	Zielsetzung des Vorhabens.....	11
3.7	Innovativer Charakter des Projektes.....	12
4	Erstellung einer neuen Schutzwand.....	12
4.1	Einführung - Aus den Empfehlungen zur Fortführung des DBU-Projektes.....	12
4.2	Lösungsschritte zur Stabilisierung des Klimas vor der Außenwandmalerei und bauliche Ausführung einer Einhausung.....	13
5	Ergebnisse der raumklimatischen Langzeituntersuchung.....	20
5.1	Einführung.....	20
5.2	Vorgehensweise und Messkonzept.....	21
5.3	Darstellung der Ergebnisse.....	24
5.4	Luftwechselfmessungen.....	28
6	Fazit und Ausblick.....	33
7	Quellenverzeichnis.....	35
8	Anlagen.....	36

1 Antragsteller und Projektträger

Evangelisch-Lutherische Kirchengemeinde Jena

Stadtkirchenamt Jena

Lutherstr. 3

07743 Jena

Ansprechpartner: Herr Bürglen, Kirchmeister

E-Mail: kirchmeister@gmx.de

Tel. 03641 / 5738 26

1.1 Kooperationspartner

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Schlossplatz 1

01067 Dresden

www.idk-denkmal.de

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther

E-Mail: loether@idk-denkmal.de

Tel.: 0351 / 48430 427

Bauingenieurbüro GbR

Dr.-Ing. Maria Hoffmann und Dipl.-Ing. Franz Wilkowski

Brehmstraße 38

07546 Gera

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Maria Hoffmann

E-Mail: mh@hoffmann-wilkowski.de

Tel.: 0365 / 8329088

2 Zusammenfassung

An der nördlichen Außenwand der mittelalterlichen Dorfkirche St. Nikolaus hat sich zwischen zwei Strebepfeilern eine großflächige Wandmalerei mit Darstellungen von Szenen des Alten und Neuen Testaments zu ca. 70 % erhalten. Die Wandmalerei, zielt mit den Mitteln der bildhaften Darstellung von alt- und neutestamentlichen Szenen auf eine ganzheitliche Beschreibung der Welt für des Lesens Unkundige ab. Auch wenn man davon ausgehen darf, dass Wandmalereien im Außenraum im Gebiet nördlich der Alpen üblich waren, so ist der Bestand in Lichtenhain zumindest in Mitteldeutschland singulär, während sie im Alpenraum, insbesondere Südtirol noch häufiger anzutreffen sind.

Durch das von der DBU bereits im Zeitraum 2007 bis 2011 geförderte Projekt mit dem Titel „Modellhafte Bestandserhaltung stark anthropogen umweltgeschädigter spätmittelalterlicher Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain“ (AZ 24522-45) konnten umfangreiche Voruntersuchungen zum Schädigungsprozess an der Wandmalerei und möglichen Erhaltungsstrategien erarbeitet werden. Es wurde festgestellt, dass ohne eine dauerhafte Abtrennung der Wandmalerei vom anstehenden Außenklima keine Verbesserung zu erreichen ist, sondern eine weitere Verschlechterung des Erhaltungszustandes erwartet werden kann. Die provisorische Abkopplung vom Außenklima hat diese Aussage deutlich belegt und eine Möglichkeit für einen langfristigen Schutz der Wandmalerei aufgezeigt.

Durch eine naturwissenschaftlich begleitete architektonische Erarbeitung einer dauerhaften Abkopplung der Wandmalerei konnte sich das neu geschaffene Raumklima nun stabilisieren und für die Zukunft ein langfristiges Erhaltungskonzept erarbeitet werden.

Im Rahmen des Projektes sollte geklärt werden, ob eine sensorgesteuerte Belüftung und gegebenenfalls Beheizung unabdingbar sind, oder ob die angestrebte Klimastabilisierung und Luftwechselrate auch schon ausschließlich durch bauliche Maßnahmen erreicht werden kann, da erfahrungsgemäß die Kirchengemeinde mit den langandauernden (Jahrzehnte, Jahrhunderte) Wartungsverpflichtungen und Energiekosten einer gesteuerten Belüftung und Beheizung schnell überfordert sind.

Die Einmaligkeit dieser überkommenden Wandmalerei erforderte eine besonders anspruchsvolle Herangehensweise. Die Übertragung einer ingenieurmäßigen Standardlösung für eine solche Bauaufgabe, die es im Denkmalsbereich ohnehin nicht gibt, war aus vielerlei Gründen ausgeschlossen. Stattdessen wurde und wird der Bereich der Außenwandmalerei im Hinblick auf Funktion und Ansprüche untersucht und es wurden angepasste verantwortbare Lösungen für alle Teilbereiche erarbeitet. Die modellhafte Herangehensweise eines verbesserten praktischen Umgangs mit den Umweltschäden aus den nahen Zeiss-Werken ist im ersten DBU-Projekt bereits detailliert dargelegt worden. Es erfolgte eine ausgewogene wissenschaftlich begleitete Nachkontrolle der erreichten Ergebnisse sowie eine Verbreitung der Resultate des präventiven Konservierungsvorgehens.

3 Die Wandmalerei in der Dorfkirche St. Nikolaus in Jena-Lichtenhain

3.1 Einführung

An der mittelalterlichen Dorfkirche St. Nikolaus in Jena-Lichtenhain (Thüringen) befindet sich zwischen zwei Strebepfeilern der nördlichen Außenwand eine einmalige und einzigartige Wandmalerei mit Darstellung von Szenen des Alten und des Neuen Testaments, welche unwiederbringlich zu zerfallen droht (Abb. 1). Der Fundus einer Außenwand-Malerei in Jena-Lichtenhain stellt im mitteldeutschen Raum eine kunsthistorische Einmaligkeit dar. Deutete man zunächst die Anfang des 15. Jahrhunderts datierten Bilderreihen als *Biblia pauperum* (Armenbibel für des Lesens Unkundige), so weisen heutige Forschungen durch die Auswahl der Bilder eher auf einen bußtheologischen Hintergrund.

Wie Edgar Lehmann (1920) treffend feststellte, sind die Lichtenhainer Außenwandmalereien, die „wie ein Fastentuch komponiert“ sind, für uns heute in ihrer ursprünglichen Intention nicht mehr verständlich. Ihre Botschaft verbirgt sich vor uns, weil uns der Schlüssel auch für die Gründe ihrer Entstehung verloren gegangen ist. Das Entschlüsseln der Botschaft stellt auch die Regionalforschung vor eine große Aufgabe und würde entscheidend zur Steigerung des Wertes und der Bedeutung der Malerei beitragen, weil dieses Kunstwerk so einer großen Zahl von Laien in seiner Tiefe geöffnet werden könnte.

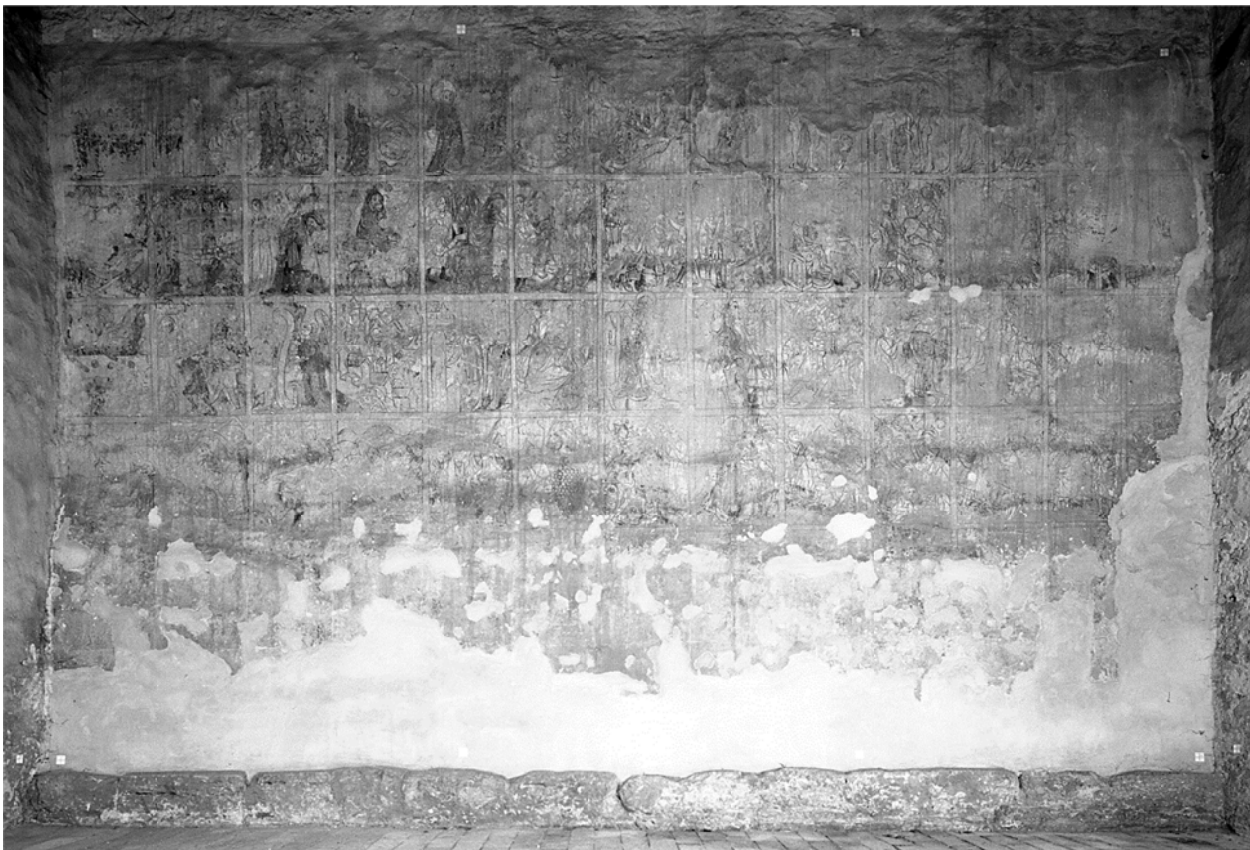


Abb. 1 St. Nikolaus in Jena-Lichtenhain, Wandmalerei

Umso wichtiger stellt sich das Ringen um den Erhalt dieser einzigartigen Außenwandmalerei als kunstgeschichtliches Zeugnis mittelalterlicher Ausdrucksformen im konkreten regionalgeschichtlichen Raum um Jena dar. Die Malereien am Westabschnitt der nördlichen Außenwand, eingrahmt von den beiden angrenzenden Strebepfeilern (Abb. 2), zeigen in 6 Reihen mit je 13 hoch-

formatigen Bildfeldern Szenen des Alten Testaments (die oberen 4 Reihen) und des Neuen Testaments (die unteren zwei Reihen). Der Verfallsprozess, den Klopffleisch schon 1860 beklagte, ist seit den 1920er Jahren trotz einer Einhausung, die seit Beginn des 20. Jahrhunderts bis nach Kriegsende existierte, weiter fortgeschritten. Leider sind die meisten Bilderzählungen kaum noch erkennbar, teilweise sind sie ganz verschwunden.

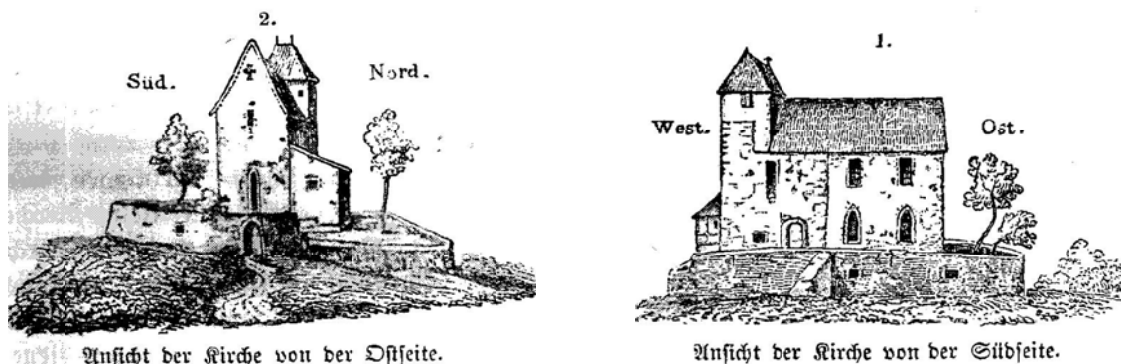


Abb. 2 offene Situation der Wandnische im Jahr 2007

3.2 Geschichte des Ortes und der Kirche Lichtenhain

Die Quellen datieren die Gründung des Dorfes Lichtenhayn auf Ende des 12., Anfang des 13. Jh. Nachgewiesen ist ein Zusammenhang des in Thüringen ansässigen Rittergeschlechts Lichtenhain mit den späteren Lehnsherren, dem aus Mittelfranken stammenden Adelsgeschlecht der Lobdeburger. Ob die Gründung des Ortes bereits durch die Lichtenhainer erfolgte, ist urkundlich nicht nachzuweisen. Das gleiche gilt für die in der Mitte des 12. Jahrhunderts errichtete romanische Kirche, deren Umfassungsmauern noch heute sichtbar erhalten sind. Urkundlich nicht nachgewiesen ist, ob die Kirche eine Dorf- oder eine Patronatskirche des Rittergeschlechts der Lichtenhainer. Entsprechend der Zeitgeschichte (Frömmigkeitsbewegung) wäre eine Stiftung anzunehmen. Allerdings war die Kirche, die ursprünglich der Gottesmutter Maria geweiht war, nie Begräbnisstätte dieses Geschlechts. Später wurde sie zur St. Nikolai-Kirche umgeweiht, Zeitpunkt unbekannt. Daraus wird gegenwärtig gemutmaßt, dass an dieser Stelle eine Handelsstraße vorbeigeführt hat, da der Hl. Nikolaus unter anderem auch der Schutzpatron der Kauf- und Handelsleute ist.

Die Kirche stand und steht auch heute noch räumlich nicht in der Dorfmitte, sondern am Rande einer Anhöhe auf einem Felsvorsprung. F. Klopffleisch dagegen zeichnete sie als eine freistehende auf einer Anhöhe stehende Kirche (Abb. 3) Siehe dazu folgende Abb. 0 2.



Ansicht der Kirche von der Ostseite.

Ansicht der Kirche von der Westseite.

Abb. 3 Ansicht der freistehenden Kirche mit Umgebungsmauer

3.3 Die Außenwandmalereien - Inhalt und Erhaltungszustand

Die Malereien am Westabschnitt der nördlichen Außenwand, eingerahmt von den beiden angrenzenden Strebepfeilern zeigen 6 Reihen mit je 13 hochformatigen Bildfeldern Szenen des Alten Testaments (die oberen 4 Reihen / siehe Abb. 4) und des Neuen Testaments (die unteren zwei Reihen). Geschichten der Schutzheiligen fehlen. Der Verfallsprozess, den Klopffleisch schon 1860 beklagte, ist seit den 20er Jahren des vergangenen Jahrhunderts, trotz einer Einhausung, die seit Beginn des 20. Jahrhunderts, bis nach Kriegsende existierte, fortgeschritten ist. Leider sind die meisten Bilderzählungen kaum noch erkennbar, bzw. sind ganz verschwunden. Ein Beispiel dafür ist die fotografisch dokumentierte Erzählung der Rückkehr der Kundschafter. Die Abb. 5 zeigt den Zustand in den 20er Jahre des 20. Jahrhunderts, zur Kriegszeit 1939-45 und gegenwärtig.

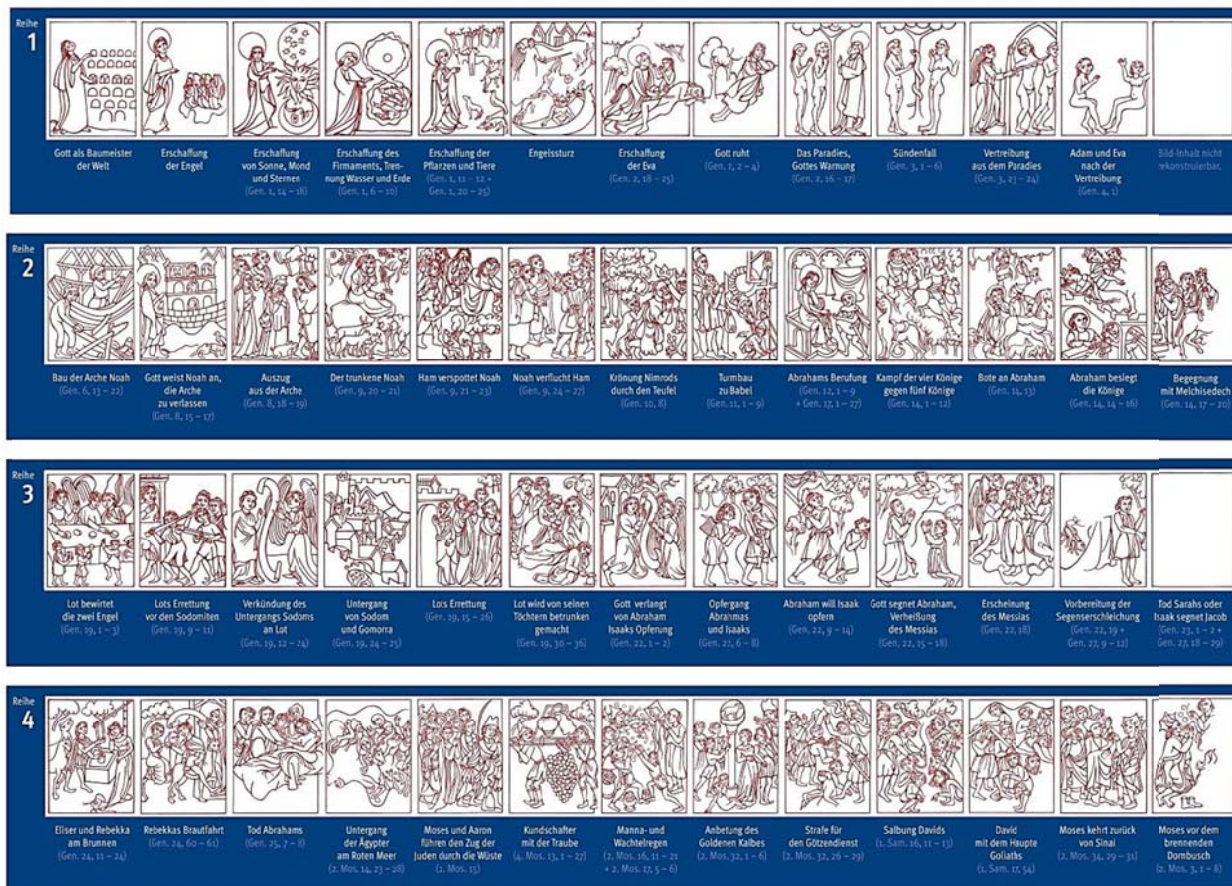


Abb. 4 die oberen vier Reihen der Wandmalerei

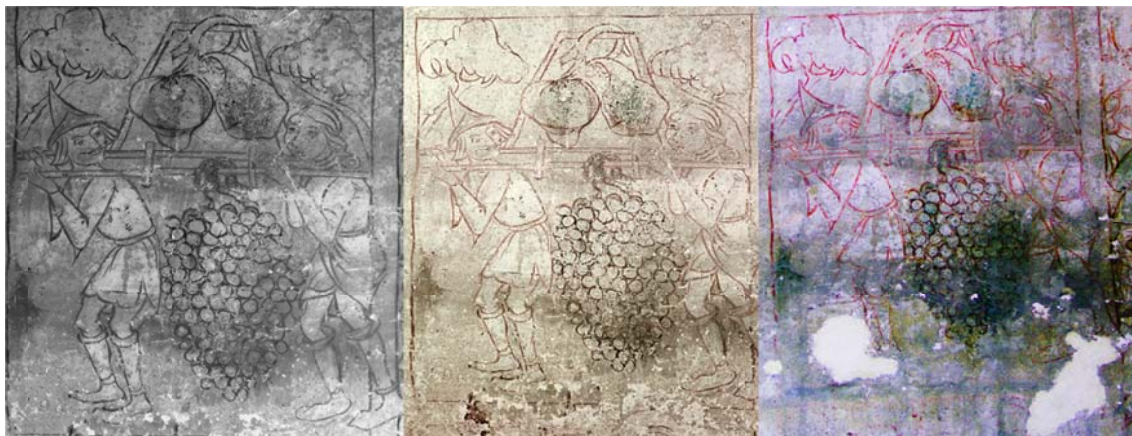


Abb. 5 Kundschafter mit Traube, Verfallsfortschritt

20er Jahre des 20. Jh.

1939-45

2006

3.4 Einordnung des Objektes in den kunsthistorischen Zusammenhang

Ikonomie und Stilanalyse

Ausführliche inhaltliche und ikonographische Beschreibungen enthalten vor allem die Arbeiten von E. Lehmann und zuletzt von D. Stege. V. Leppin bewertet die Beschreibungen von E. Lehmann als nach wie vor gut und nicht bzw. wenig korrekturbedürftig. Neue bzw. andere Aussagen könnten derzeit nicht gemacht werden.

An Hand einer Stilanalyse wurde erhofft, die Zeit der Entstehung der Malereien unabhängig von den Ergebnissen der Baubefundanalyse zu ergründen. Aus den Stilelementen, der Darstellung der Figuren, ihren Haltungen und ihren Kleidungen, schloss F. Klopffleisch auf eine Entstehung der Malereien auf einen Zeitraum zwischen Ende des 13. und Mitte des 14. Jahrhunderts. und bezeichnete sie als Wandbilder „als dem frühgermanischen Stile angehörend“. Danach meinte er sie mit Wandgemälden aus der Zeit von 1250-1350 vergleichen zu können. Als Beispiel dafür führt er das Wandgemälde „Der Marientod“ in der Wiedenkirche in Weida an. In der Tat weist die Darstellung des Marientods gewisse Ähnlichkeiten mit der Darstellung der Figuren in Lichtenhain auf, die sich nach K. Grüger ebenfalls ursprünglich an der Außenwand der Kirche befunden haben sollen.

E. Lehmann datiert die Malereien dagegen mit Bezug auf eine Urkunde von 1419, die allerdings keinen Hinweis auf die Malereien enthält. auf das erste Drittel des 15. Jahrhunderts. Er wie auch schon F. Klopffleisch verweisen wegen der Anordnung der Bildtafeln noch auf Wandgemälde der heutigen St. Veits-Kirche in Stuttgart-Mühlhausen. Diese wurden nach U. Claviez zwischen 1390-1396 begonnen und nach 1428 vollendet. Für eine Stilanalyse könnten auch die Darstellungen des Zittauer Großen Fastentuchs von 1472 herangezogen werden, die aber nur bezüglich seiner schachbrettähnlichen Anordnung der Bildfelder und der dargestellten Szenen gewisse Ähnlichkeiten mit dem Bilderzyklus der Nikolaikirche aufweisen.

Theologische Deutung

V. Leppin schlug eine neue Frömmigkeits- und kulturgeschichtliche Deutung mit Bezug auf die regionalen Bedürfnisse der vorreformatorischen Zeit vor. Er stellte in seinen Thesen vor allem die Aussage von E. Lehmann in Frage, dass der „Zyklus, der um der Belehrung über den Welt-

ablauf bis zur Erlösungstat Christi und um der beispielhaften Ermahnung willen gemalt wurde“. Sein Vorbehalt ist, der Zyklus decke nicht die gesamte Weltgeschichte ab und könne daher auch nicht zu Lehrzwecken verwendet werden. Er kommt aber zu dem Schluss, dass eine religionsgeschichtliche Einordnung auch aufgrund neuer Ergebnisse konkret an den Lichtenhainer Bildern nicht nachzuweisen ist.

In der bisherigen, vorwiegend regionalen Literatur wurden diese Malereien, Fresken genannt, oft als Armenbibel (Biblia Pauperum) bezeichnet. Das ist aber nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand nicht mehr aufrecht zu erhalten. Aus seiner Sicht wird daher angenommen, dass die Wandmalereien vielmehr ein eigenständiges Kunstwerk sein könnten. Sie könnten vielleicht auch der Hintergrund sein für einen vor der Innenwand der „Wandnische“ aufgestellten Altar, dessen Existenz vermutet, aber bisher nicht nachgewiesen werden konnte. Für diese These spricht, dass diese „Wandnische“ entsprechend den Bauuntersuchungen von Weiß und Weise 1505 zusammen mit dem Anbau einer Sakristei entstanden ist und praktisch eine überdachte Außenkapelle bildet.

Baubefundanalyse

Die von Weise und Weiß erfolgten bauhistorischen Voruntersuchungen zeigen einen als Träger der Malereien einheitlichen carbonatischen Putzgrund, der in einem Zug im Rahmen eines im Jahr 1505 erfolgten Erweiterungsbaus (Sakristei) aufgetragen wurde. Daher müssten die Wandmalereien nach ihrer Auffassung auch zu diesem Zeitpunkt entstanden sein. Ein baubefundlicher Vergleich mit den Bildern sowohl in der Wiedenkirche in Weida als auch in der St. Veitskirche in Stuttgart-Mühlhausen zeigt ebenfalls einen einheitlichen Grundputz als Trägermaterial.

Rainer Müller vom TLDA schreibt dazu in einem Artikel im Jahre 2013:

Im Ergebnis dieses Überblicks zur Baugeschichte bleibt festzuhalten, dass die Lichtenhainer Kirche ein auch durch die Vielzahl an architekturhistorisch bedeutsamen Befunden bemerkenswerter Sakralbau ist. Ihre Berühmtheit verdankt sie aber der gotischen Außenwandmalerei. Für deren Entstehung ergibt sich im Ergebnis der bauhistorischen Untersuchung ein Zeitraum zwischen 1309 und 1505; ihre genaue Datierung bleibt eine Aufgabe der Kunstgeschichte, ihre Erhaltung auch künftig eine der Denkmalpflege.

Bedeutung

Trotz der derzeit nicht widerspruchsfreien Datierung gilt die Außenwandmalerei in ihrem Erhaltungszustand am Entstehungsort als Solitär in Europa nördlich der Alpen.

3.5 Umweltrelevanz

Durch die erheblichen Umweltbelastungen durch schwefelhaltigen Kohlenbrand und aus den nahen Zeiss – Werken ist es zu einer erheblichen Schadsalzbelastung der gesamten Wandmaleroberfläche gekommen. Die dem Außenklima direkt ausgesetzte Wandoberfläche wird durch das stark schwankende Außenklima und die dadurch sehr aktiven Schadsalze erheblich geschädigt. Die bisher durchgeführten restauratorischen und bauklimatischen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass eine derzeitige Festigung und Restaurierung der Wandmalerei aus vielerlei Gründen nur unter sehr hohen finanziellen Aufwendungen möglich ist. Parallel dazu muss der Bereich der Wandmalerei durch eine speziell konstruierte Einhausung vor den klimatischen

Einflüssen des Außenklimas dauerhaft geschützt werden. Die in den letzten Jahren durchgeführten Klimamessungen mit und ohne provisorische Einhausung konnten belegen, dass eine dauerhafte Einhausung ein erster und sehr wichtiger Schritt zur langfristigen Sicherung dieser Wandmalereien darstellt. Aus diesen Gründen sollte der Planungsschwerpunkt einer zukünftigen Einhausung auf deren Optimierung und die Nachhaltigkeit bei der Materialauswahl liegen. So sollen Feuchteschwankungen innerhalb der Einhausung durch klimapuffernde Materialien gedämpft werden, um den Einsatz technischer Geräte zur Raumklimaregulierung zu vermeiden.

3.6 Zielsetzung des Vorhabens

Hauptziel dieses Projektes war es, durch eine optimale Ausbildung einer neu zu errichtenden Schutzwand vor der Wandmalerei, diese vor einem weiteren Zerfall zu bewahren. Nur durch diese Abkopplung von dem anliegenden Außenklima können eine langfristige Sicherung des jetzigen Bestandes und eine notwendige Restaurierung der Wandmalerei erfolgen. Um den technischen Aufwand auf ein Minimum zu reduzieren, sollten vor allem klimapuffernde Materialien wie z.B. Holz und Lehm zum Einsatz kommen. Gleichzeitig sollte in diesem Projekt auch der bautechnisch und denkmalpflegerisch korrekte Einsatz einer sensorgesteuerten Raumlüftung ermittelt werden, um eine kontrollierte Durchlüftung dieses abgeschotteten Raumes zu ermöglichen. Diese Form der kontrollierten Raumdurchlüftung ist auch an anderen Objekten einsetztauglich.

Grundlegende Zielstellung des vorliegenden Projektes präventiver Konservierung ist die Erarbeitung und Realisierung eines integrierten Konzeptes zur Verhinderung einer weiteren anthropogenen Schädigung der Wandmalerei durch eine nachhaltige Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes im Einhausungsbereich. Daneben stellt auch die Vermeidung bzw. die starke Einschränkung von laufenden Kosten für den Erhalt des Einhausungsbereiches der St. Nikolauskirche in Jena-Lichtenhain ein wichtiges Kriterium dar.

Ausgehend von dieser grundlegenden Zielstellung ergeben sich für das vorliegende Vorhaben insgesamt folgende Teilziele:

1. Erarbeitung von Planunterlagen für die zu errichtende Einhausung mit dem Schwerpunkt auf klimapuffernde Materialien im Wand- und Fußbodenbereich,
2. Erarbeitung eines architektonisch anspruchsvollen Konzeptes für die Außenansicht der Einhausung in enger Absprache mit dem Landesdenkmalamt, Planung eines Beleuchtungskonzeptes,
3. Erfassung des derzeitigen Ist-Zustandes für den derzeitigen Luftwechsel der provisorischen Einhausung,
4. Errichtung der Einhausung,
5. ggf. Einbau einer kleinteiligen sensorgesteuerten Raumlüftung,
6. Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes in der Einhausung,
7. Erneute Erfassung des Luftwechsel und Anpassung spezieller Lüftungselemente,
8. Feineinstellung der möglicherweise vorhandenen Lüftungsanlage und des Beleuchtungskonzeptes durch ein begleitendes Klimamonitoring.

3.7 Innovativer Charakter des Projektes

Im ländlichen Raum gibt es eine Vielzahl von Gebäuden, in denen im Innenbereich wertvolle Kunstgegenstände und Wandmalereien vorhanden sind. Durch einen kontrollierbaren Einsatz einer kleinteiligen Lüftungssteuerung können in temporär genutzten Gebäuden oder Raumbereichen verbesserte raumklimatische Situationen geschaffen werden. Auch der Einsatz ausgewählter Baumaterialien zu aktiven Feuchtepufferung stellt einen innovativen Ansatz zur präventiven Konservierung dieser Gebäudegruppen dar. Die differenzierte Herangehensweise in Jena-Lichtenhain soll ermöglichen, dass sich die raumklimatische und Lüftungstechnische Situation im Bereich der Einhausung verbessert. Die Ergebnisse werden herausgearbeitet, dokumentiert und sollen eine Vorbildfunktion für die Region übernehmen.

4 Erstellung einer neuen Schutzwand

4.1 Einführung - Aus den Empfehlungen zur Fortführung des DBU-Projektes

In den Jahren 2007 bis 2011 wurden umfangreiche Untersuchungen und Erprobungen zur Rettung der einmaligen und im mitteldeutschen Raum einzigartigen Außenwandmalereien an der Nikolai-Kirche in Jena-Lichtenhain durchgeführt. Die innerhalb des DBU-Projektes erprobten Konservierungsmethoden und -verfahren führten jedoch zu keinem hinreichenden Konservierungserfolg bzw. sind nur als mögliche und erforderliche Zwischenschritte anzusehen. Im Abschlussbericht schreibt Reinhard Weise:

„Darüber hinaus beinhalten die substanziellen, konservatorischen Eingriffe unmittelbare oder – durch schwer kalkulierbare Nebenwirkungen - mittelbare Risiken irreversibler Substanzschädigungen. Somit kommt der Stabilisierung des Nahfeldklimas mittels einer geeigneten Einhausung und gesteuerter Lüftung unbedingte Priorität zu. Voraussetzung hierfür sind die Ermittlung und Erprobung eines für die geschädigte Wandmalerei risikoarmen Klimakorridors mittels geeigneter Mess- und Testverfahren.“

Die Klimamessungen wurden durch das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. für den Jahreszyklus 2010-2011 über das erste DBU-Projekt hinaus fortgeführt. Der Ergebnisbericht vom 23.09.2011 liegt vor. Im Ergebnisbericht schreibt Thomas Löther:

„Die gewünschte raumklimatische Stabilisierung vor der Wandmalerei konnte durch die Abdichtung der provisorischen Einhausung im Dezember 2009 erreicht werden. Durch die durchgeführten raumklimatischen Untersuchungen konnte eine Verbesserung des raumklimatischen Zustandes in der Einhausung eindeutig festgestellt werden. Die erfolgten klimatischen Aufzeichnungen zeigen, dass sich nach der Abdichtung ein gedämpftes Raumklima im Vergleich zum Außenklima eingestellt hat....

Zu bedenken bleibt, dass derzeit eine provisorische Folienabdichtung klimatisch bemessen wird. Falls es in Zukunft zu einer massiven Einhausung kommen wird, werden sich durch diese Ausführungsformen auch leicht andere raumklimatische Zustände einstellen.

Daher ist bei der zukünftigen Konzeption auch eine gewisse technische Unterstützung einzuplanen. So sollte eine kleinteilige Lüftungsanlage, die wenn möglich vorkonditionierte Luft einblasen kann, mit eingeplant werden. Auch eine geringe Wärmestrahlung auf der Wandoberfläche kann die Taupunktunterschreitung verhindern helfen. Diese Wärmebestrahlung erfolgt nur bei der Gefahr einer Taupunktunterschreitung und wird über Sensoren und ein Steuergerät initiiert.

Um höhere Luftfeuchten innerhalb der Einhausung besser abzdämpfen, empfiehlt es sich außerdem, die Materialien des Fußbodens und der Einhausungswand aus feuchtepuffernden Materialien herzustellen.“

4.2 Lösungsschritte zur Stabilisierung des Klimas vor der Außenwandmalerei und bauliche Ausführung einer Einhausung

Auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungsergebnisse sind zur Rettung und Begrenzung der fortlaufenden Schadensentwicklung der stark geschädigten Außenwandmalereien klimastabilisierende Maßnahmen dringend erforderlich. Hierzu ist geplant, mittels weiterer geeigneter Messverfahren die Ermittlung und Erprobung eines risikoarmen Klimakorridors aufzuzeigen.

Nicht zuletzt ist die Errichtung einer stabilen Einhausung erforderlich und geplant. Diese soll die provisorische Folienabdeckung ersetzen und für die nächsten Jahre die einmaligen Außenwandmalereien auf eine baulich ansprechende Art schützen und gleichzeitig zum „Einblicknehmen“ anregen.

Da entsprechend der vorliegenden Untersuchungsergebnisse Baustoffe mit feuchtigkeitsregulierenden Eigenschaften bevorzugt werden sollten, gleichzeitig aber auch die Öffnung zum Anschauen und Betrachten erreicht werden sollte, wurde eine Kombination aus einer mit Leichtlehm gedämmter Holzständerbauweise und integrierten Schaufenster (und natürlich einer Tür für den Zugang zu den Wandmalereien durch Zugangsberechtigte) geplant. Innen an den Schaufenstern sollen sich geneigte Holzpaneele anschließen, auf denen gut sichtbar und wettergeschützt Informationstafeln zur Außenwandmalerei platziert werden. Zur besseren Betrachtung ist eine zeitgesteuerte (Treppenlichtautomat) von außen über einen Druckknopf aktivierbare Beleuchtung mit LED-Reflektorlampen vorgesehen. Damit ist eine UV- und IR-arme ausreichend farbtreue Beleuchtung auch unter den Bedingungen hoher Schalzhäufigkeit und niedriger Temperaturen gewährleistet.

Lehm in ungebrannter Form in Verbindung mit Holz sind die besten Baustoffe zur natürlichen Feuchtigkeitsregulierung. Deshalb wurde von innen auch ein Lehmputz aufgebracht werden. Der vorhandene Dachüberstand wurde mit einer Holzfaserdämmung, die ebenfalls gute feuchtigkeitsausgleichende Eigenschaften aufweist, gedämmt und mittels Holzverschalung und einem Lehmputz geschlossen.

Sämtliche Baumaßnahmen erforderten eine sehr vorsichtige Montagetechnologie, da jede Berührung der stark geschädigten und oft nur noch pulvrig haftenden Malerei zu weiteren unweigerlichen Verlusten führen würde.

Für die geplante sensorgesteuerte Belüftung und die gegebenenfalls erforderliche Beheizung war ein mehrstufiges Vorgehen vorgesehen:

Zunächst wurde die Einhausung errichtet und ein entsprechendes Klima-Monitoring etabliert. Auf gesteuerte Belüftung und Beheizung sollte anfangs verzichtet werden, da in einer Kirchengemeinde oft nicht gesichert ist, dass eine sachgerechte Wartung solch komplizierter technischer Ausrüstungen über Jahrzehnte gewährleistet werden kann.

Erweist sich eine sensorgesteuerte Belüftung als erforderlich, so kann diese ohne Eingriffe in den historischen Baukörper von der Sakristei her über einen vermutlich im 18./19. Jhd. zugefügten Bauwerksteil erfolgen. Zu dieser Zeit ist nämlich nördlich des linken Begrenzungspfeilers der Außenwandmalerei ein nicht kraftschlüssig verbundener Anbau errichtet worden, über dessen Dachraum eine Belüftungsführung in den eingehausten Teil erfolgen kann.

Im Folgenden werden die einzelnen Umsetzungsschritte zur Errichtung der Schutzwand vorge-
stellt (Abb. 6 bis Abb. 15):

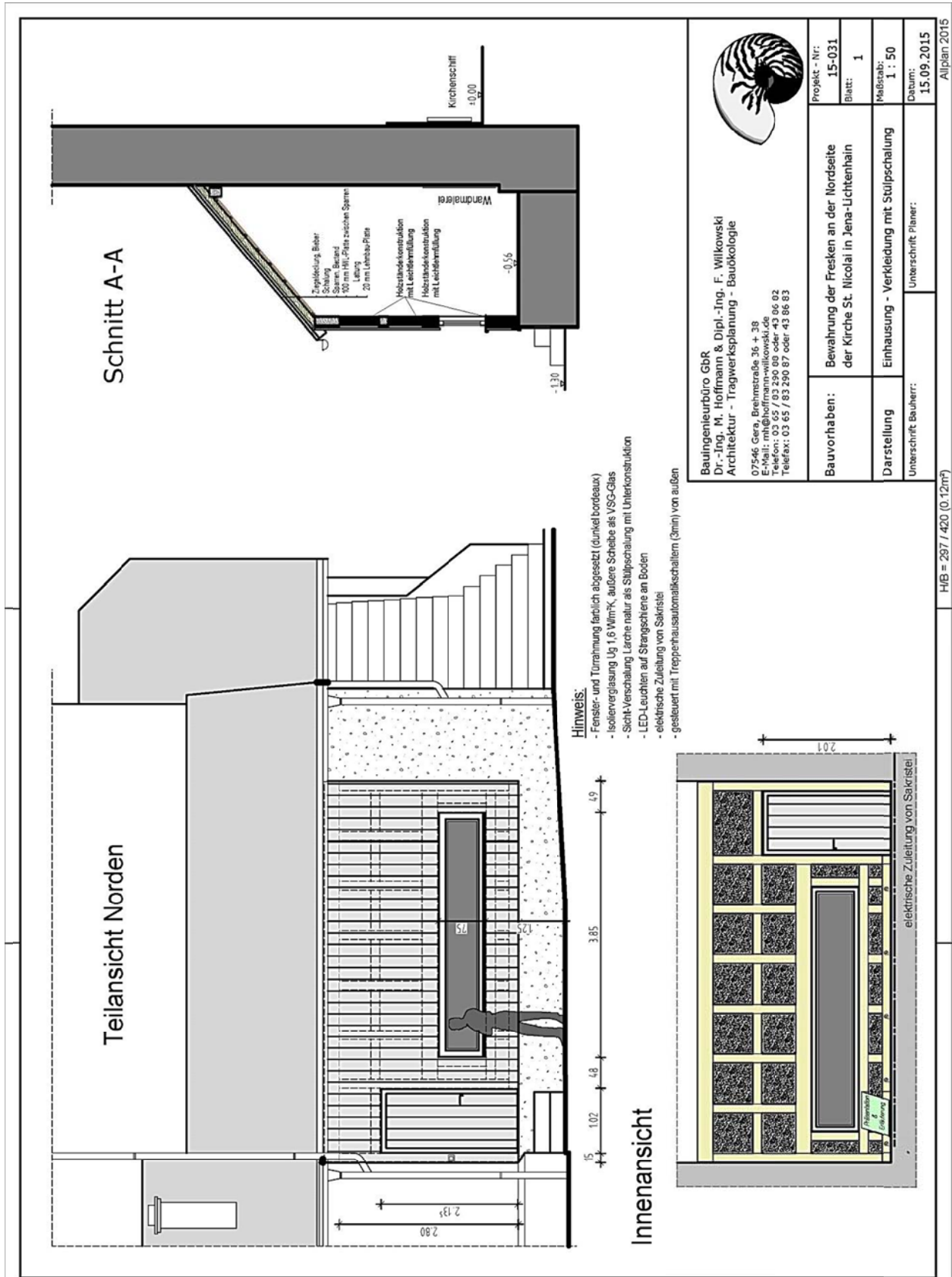


Abb. 6 Konstruktive Ausbildung der neuen Schutzwand



Abb. 7 Sicherung der Wandmalerei durch eine temporäre Schutzwand



Abb. 8 Errichtung einer Fachwerkwand zur Aufnahme der notwendigen Tür- und Fensterkonstruktionen



Abb. 9 Ausmauerung der Gefache mit Lehmsteinen



Abb. 10 Mit Lehmputz geschlossene Gefachflächen im Innenraum



Abb. 11 mit Holzfaserdämmung gedämmter Dachbereich



Abb. 12 mit einem Lehmputz geschlossene Dachunterseite



Abb. 13 Holzverkleidung der Außenfassade



Abb. 14 fertige Schutzwand mit Fensterband und erkennbaren Erläuterungstafeln im Innenraum



Abb. 15 Beleuchtung der Wandmalerei und der Erläuterungstafeln

5 Ergebnisse der raumklimatischen Langzeituntersuchung

5.1 Einführung

An der spätmittelalterlichen Außenwandmalerei der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain wurden objektbezogene Methoden zur dauerhaften Sicherung des Bestandes der national wertvollen Außenwandmalerei erarbeitet. Das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) wurde in das erste DBU-Projekt „Modellhafte Bestandserhaltung stark anthropogen umweltgeschädigter spätmittelalterlicher Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain“ in einer Projektpartnerschaft mit dem IFS integriert. In der Zeit vom September 2007 bis Juni 2011 erfolgte durch das IDK eine umfangreiche Klimamessung zur Bestandserfassung der Wandoberflächen. Nach Beendigung dieses ersten Forschungsprojektes erfolgte 2015 die Beantragung und Bewilligung eines weiteren von der DBU geförderten Projektes mit dem Titel „Präventive Konservierung der Lichtenhainer Außenwandmalereien“. In diesem Abschlussbericht werden die erfassten Klimadaten mit der neuen Schutzeinhausung erläutert und bewertet. Dazu werden die Ergebnisse der Klimamessung für die von September 2007 bis Dezember 2017 vorgestellt. In Abb. 16 bis Abb. 18 sind die baulichen Abfolgen der messtechnisch begleiteten Schutzeinhausungen abgebildet.



Abb. 16 Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain, überdachte Wandmalerei im nicht eingehausten Zustand
Zeitraum: bis 2008



Abb. 17 Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain, überdachte Wandmalerei im temporär eingehausten Zustand
Zeitraum: 2008 - 2015



Abb. 18 Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain, überdachte Wandmalerei im fertig eingehausten Zustand
Zeitraum: ab 2015

5.2 Vorgehensweise und Messkonzept

Die Auswertungen der erfolgten Klimamessungen an der Außenwand der Kirche in Lichtenhain beziehen sich auf den Untersuchungszeitraum vom 06.09.2007 bis zum 06.07.2016. Die Messungen erfolgten in einem Messtakt von einer Viertelstunde. Die Messpunkte der Oberflächentemperaturen an der Außenwand sind in der Abb. 19 eingezeichnet. Gleichzeitig wird vor beiden Wandhälften in einem Abstand von einem Meter vor der Wand das Luftklima gemessen (blaue Markierung). Die Außenklimawerte von Jena-Lichtenhain werden an einem Messpunkt auf der Nordseite der Sakristei unterhalb des Daches aufgezeichnet.

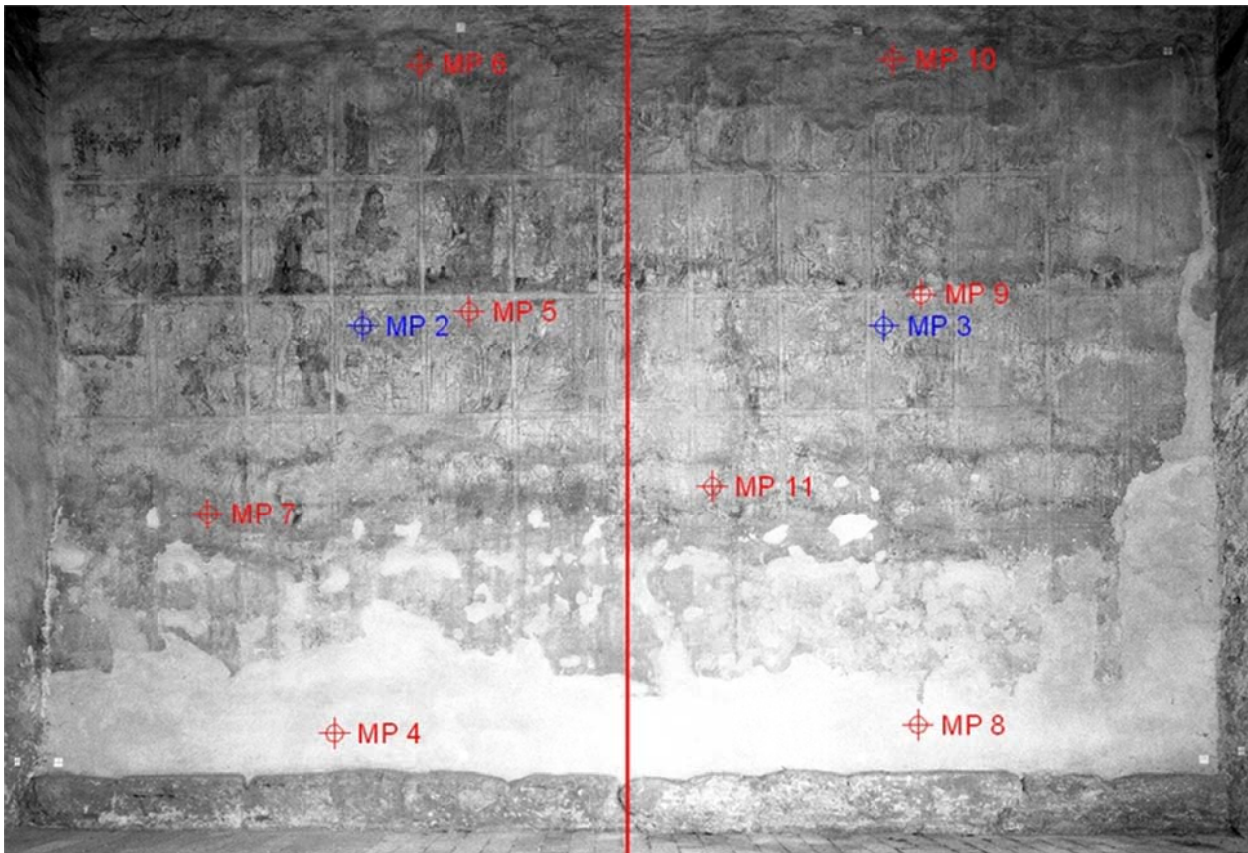


Abb. 19: Messpunkte der Klimamessung an der Untersuchungswandfläche; erkennbar sind die beiden Wandhälften links – Messachse A / rechts – Messachse B
rote Messpunkte stehen für Oberflächentemperaturmesspunkte, blaue Messpunkte stehen für Klimamessungen im Abstand von einem Meter zur Wandoberfläche

Zum Einsatz kommen Datenlogger vom Typ MA2590-4S der Firma Ahlborn Messtechnik GmbH mit Klimafühlern und Oberflächentemperaturfühlern ebenfalls von der Firma Ahlborn Messtechnik GmbH.

Die Genauigkeit der Messfühler beträgt:

Temperaturfühler NTC-Element:

Temperatur: bei 0°C - +70°C ± 0,1 K

Kapazitiver Feuchtefühler:

Temperatur: bei 0°C - +70°C ± 0,1 K

rel. Feuchte: bei 5% - 98% ± 2,0% rel.LF

Folgende Parameter werden durch die Klimamessung ermittelt:

Messachse A (links):

relative Luftfeuchte in ca. 2,20 m Höhe und 1,0 m Abstand zur Wand (MP2)
Lufttemperatur in ca. 2,20 m Höhe und 1,0 m Abstand zur Wand (MP2)
Oberflächentemperatur an der Wandoberfläche in drei Höhen
(Messpunkte MP4, MP5, MP6)
Temperatur in einer Hohlstelle (Messpunkt MP7)
absolute Luftfeuchte vor der Wandoberfläche (berechnet)
relative Luftfeuchte im Übergangsbereich Umgebungsluft – Wandoberfläche
(berechnet für MP4, MP5, MP6)
Taupunkttemperatur der Außenluft

Messachse B (rechts):

relative Luftfeuchte in ca. 2,20 m Höhe und 1,0 m Abstand zur Wand (MP3)
Lufttemperatur in ca. 2,20 m Höhe und 1,0 m Abstand zur Wand (MP3)
Oberflächentemperatur an der Wandoberfläche in drei Höhen
(Messpunkte MP8, MP9, MP10)
Temperatur in einer Hohlstelle (Messpunkt MP11)
absolute Luftfeuchte vor der Wandoberfläche (berechnet)
relative Luftfeuchte im Übergangsbereich Umgebungsluft – Wandoberfläche
(berechnet für MP8, MP9, MP10)
Taupunkttemperatur der Außenluft

Messpunkt C:

relative Luftfeuchte der Außenluft (MP1)
Lufttemperatur der Außenluft (MP1)
absolute Luftfeuchte der Außenluft (berechnet)

Für die folgenden Bewertungen erfolgt die Betrachtung der rechten Messachse, da auf der linken Bildhälfte nahezu identische Messwerte erfasst wurden. Diese Messpunkte dienten somit in den zurückliegenden Jahren vor allem einer Kontrolle und Messwertabsicherung.

5.3 Darstellung der Ergebnisse

Die Messdaten zum Raumklima innerhalb der Einhausung bestehen aus einer Datensammlung von fast 10 Jahren. Um die Aussagen zu den Auswirkungen der einzelnen Einhausungsvarianten darstellen zu können und trotzdem für diesen Abschlussbericht die Anzahl der Diagramme für den Leser überschaubar zu halten, wurden vor allem Diagramme mit Langzeitdarstellungen verwendet. In diesen Diagrammen sind Veränderungen sehr gut ablesbar und Vergleiche zu zurückliegenden Jahreszyklen sind einfacher möglich.

Die Ergebnisse werden in Diagrammform dargestellt und mit Texten erläutert. Die Erläuterungen zu den Diagrammen und zu den abgebildeten Kurven befinden sich in jedem Diagramm in den Kopfzeilen. Die besprochenen Diagramme befinden sich im Anhang des Berichts.

In **Diagramm 1** werden die beiden Klimawerte Außenklima Jena-Lichtenhain und Außenklima vor der Wand (rechtes Wandfeld) über den gesamten bisher erfolgten Messzeitraum miteinander verglichen. Es kann festgestellt werden, dass die relative Luftfeuchte vor der Wandoberfläche (orange Kurve) im Untersuchungszeitraum bis zur Errichtung der Einhausung (14.10.2008) hohe Schwankungen aufweist. Hier konnten Werte von ca. 30 % bis 100 % gemessen werden. Die Schwankungsbreite innerhalb weniger Tage hat eine Differenz von bis zu 60 % erreicht. Beide Klimata sind nahezu identisch (siehe Berichte DD 56/2008 – 1. Jahreszyklus).

Eine erste klimatische Verbesserung erbrachte die Errichtung der Einhausung Stufe I im Oktober 2008 (siehe Bericht DD 70/2009 – 2. Jahreszyklus).

Durch die Abdichtung der Einhausung am 14.12.2009 zur Stufe II konnten die Tagesschwankungen weiter gedämpft werden. Werte der relativen Luftfeuchte von über 90 % konnten in den Untersuchungsjahren 2010 bis 2015 nur noch selten erfasst werden. Die Schwankungen der Lufttemperatur vor dem Wandbild (hellblaue Kurve) konnte durch die Abdichtung weiter von der Außentemperatur abgekoppelt werden. Die nahezu deckungsgleichen Klimawerte des Außenklimas und des Klimas vor der Wandmalerei aus dem Jahreszyklus 2007 / 2008, sind in den Jahren 2010 – 2015 nur noch gedämpft erfassbar (siehe Bericht DD 76/2011).

Im rechten Diagrammbereich ist die Erstellung der dauerhaften Einhausung zu erkennen. Durch die baulichen Arbeiten ist es während und nach der Aufbauphase zu stärkeren Klimaschwankungen vor dem Wandbild gekommen. Auch ist die eingebrachte Baufeuchte durch den Lehmputz gut erkennbar.

Die Zeiträume der verschiedenen Einhausungsphasen sind blau abgegrenzt.

Die Aussagen aus dem Diagramm 1 werden in den beiden folgenden Diagrammen detaillierter dargestellt. In **Diagramm 2** werden die Klimawerte für die erste Einhausungsphase (Zeitausschnitt vom 01.09.2008 – 31.02.2009) aufgezeigt. Erkennbar werden im rechten Diagrammteil die gedämpfteren Klimawerte nach dem Errichten und teilweisen Abdichten der Einhausung.

Nach einer weiteren Abdichtung der Einhausung am 14.12.2009 ist noch einmal eine Verbesserung der Klimawerte in der Einhausung, im Vergleich zum Außenklima, erkennbar. **Diagramm 3** zeigt einen zeitlichen Bereich der zweiten Abdichtungsphase (Zeitausschnitt vom 01.10.2009 – 31.03.2010). Durch eine notwendige Raumbeheizung für die durchgeführten konservatorischen Arbeiten an der Wandmalerei im Dezember 2009 – Januar 2010, werden die möglichen Folgen einer Raumtemperierung (Werte der rel.LF <60 %) auf das Raumklima innerhalb der Einhausung ersichtlich. Nach Beendigung der Arbeiten Ende Januar 2010, werden die Schwankungen des Raumklimas in der Einhausung wieder vom Außenklima beeinflusst, es zeigt sich jedoch ein stark gedämpftes Verhalten auf die Schnelligkeit der Klimaanpassung. Die klimatischen Spitzen der Außenluft werden innerhalb der Einhausung kaum mehr aufgenommen.

In **Diagramm 4** wird der Zeitraum Dezember 2009 bis Dezember 2011 dargestellt. Im Vergleich zu den gemessenen Jahreszyklen 2008 und 2009 ist eine deutliche Verbesserung der raumklimatischen Situation innerhalb der Einhausung erkennbar. In der Einhausung konnten Werte der relativen Luftfeuchte (orange Kurve) von über 90 % in diesen Untersuchungsjahren selten erfasst werden. Die Raumlufttemperatur (hellblaue Kurve) zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Außenlufttemperatur, jedoch werden Tagesschwankungen stark gedämpft.

In **Diagramm 5** werden die Klimawerte für den Übergang zwischen der Einhausungsphase Stufe II und der dauerhaften Einhausung vorgestellt. Erkennbar wird, dass es durch die Baumaßnahmen zu Klimaschwankungen vor der Wandmalerei gekommen ist. Danach ist es zu einer deutlichen Beruhigung der neuen Raumklimasituation gekommen. Durch die verbauten Baustoffe hat sich die raumklimatische Situation weiter stabilisiert.

In **Diagramm 6** wird der Zeitraum Januar 2016 bis Dezember 2017 dargestellt. Im Vergleich zu den gemessenen Jahreszyklen 2008 und 2015 ist eine deutliche Verbesserung der raumklimatischen Situation innerhalb der Einhausung erkennbar. In der Einhausung konnten Werte der relativen Luftfeuchte (orange Kurve) von über 90 % in diesem Untersuchungszeitraum vor allem Anfang 2016 erfasst werden. Dies wird vor allem noch auf eine gewisse Baufeuchte zurückzuführen sein, die nach der „Abdichtung“ der Einhausung nur durch eine geringe natürliche Raumlüftung abgebaut werden kann. Die Raumlufttemperatur (hellblaue Kurve) zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Außenlufttemperatur, jedoch werden Tagesschwankungen nun noch stärker

gedämpft. Dies kann auf die erhöhte bauliche Maße der Fachwerkwand und die damit verbundene thermische Trägheit der Raumluft zurückgeführt werden.

In **Diagramm 7** erfolgt die Darstellung der Außenklimawerte (MP1) und der Oberflächentemperaturen der Messachse der rechten Bildhälfte. Die Zeiträume der verschiedenen Einhausungsphasen sind mit blauen Markierungen hervorgehoben. Deutlich ist die immer weiter verbesserte Dämpfung der Oberflächentemperaturen im Vergleich zur Außenlufttemperatur über den Untersuchungszeitraum erkennbar.

Auch hier erfolgt eine detaillierte Darstellung der beiden Einhausungsphasen in getrennten Diagrammen. **Diagramm 8** zeigt die Phase der abgedichteten Einhausung (01.08.2010 – 31.08.2012) und **Diagramm 9** zeigt die dauerhafte Einhausung (01.01.2016 – 08.12.2017). Auch hier sind die Verbesserungen der Trägheit der Oberflächentemperatur bezüglich der Außenlufttemperatur nach der Erstellung der dauerhaften Einhausung Ende 2015 gut erkennbar.

Die Problematik der Taupunktunterschreitung an der Wandoberfläche für die vier Untersuchungsphasen (1. nicht eingehaust Zustand, 2. eingehauster Zustand ohne Abdichtung, 3. eingehauster Zustand mit Abdichtung, 4. dauerhafte Einhausung) werden in den vier folgenden Diagrammen dargelegt.

In **Diagramm 10** wird der Zustand ohne Einhausung dargestellt. Erkennbar wird, dass es in dieser Untersuchungszeit immer wieder zu einem nahen oder deutlichen Unterschreiten der Taupunkttemperatur der Raumluft (rote Kurve) gekommen ist und dass es auch in den „warmen“ Monaten an einigen Tagen zum Unterschreiten der Taupunkttemperatur in der Raumluft kommt. Somit kann es hier theoretisch zu einem Tauwasserausfall an den Wandoberflächen kommen. Auch nach der Errichtung der Einhausung (**Diagramm 11**) konnte noch keine deutliche Verbesserung erreicht werden. Die messtechnische Erfassung der abgedichteten Einhausung ab dem 14.12.2009 deutete auf eine Verbesserung der Taupunktproblematik hin. In **Diagramm 12** wird diese zeitliche Untersuchungsphase dargestellt. Ein Unterschreiten der Taupunkttemperatur konnte in diesem Zeitraum nicht mehr festgestellt werden. In **Diagramm 13** erfolgt die Darstellung der Messdaten für den Zeitraum der dauerhaften Einhausung. Bis auf den Startzeitraum mit seiner zeitweise noch vorhandenen Baurestfeuchte zeigen die Messdaten aus dem Jahr 2017 auch keine Gefahr eines Tauwasserausfalls. Leider konnten hier keine vollständigen Messreihen erfasst werden, da es zu einem Datenausfall der Oberflächenmessungen gekommen ist. Dennoch zeigen die erfassten Messdaten ausreichend genau die derzeitige Entwicklung auf, die sich auch mit den vorhandenen Raumklimadaten decken.

Um abzuschätzen, ob eine kleinteilige sensorgesteuerte Lüftungsanlage für den Einhausungsbereich notwendig und erfolgreich wäre, erfolgt in **Diagramm 14** und **Diagramm 15** der Ver-

gleich der absoluten Luftfeuchten der Außenluft mit der absoluten Luftfeuchte der Innenluft für den Zeitraum Januar 2013 bis Dezember 2014 für den angedichteten Zustand der temporären Einhausung. Dieser Zustand wurde ja als zielführend zur präventiven Erhaltung der Wandmalerei bewertet. Im Diagramm 15 wird dieser Vergleich der absoluten Luftfeuchten für den Zeitraum der dauerhaften Einhausung dargestellt. In diesem Zustand der Einhausung hat sich die Schwankungsintensität der absoluten Luftfeuchte deutlich stabilisiert. Dies kann auf die feuchtepuffernden Materialien zurückgeführt werden. Trotzdem sind auch in diesem Diagramm Zeiträumen erkennbar, bei denen die absolute Luftfeuchte der Außenluft (rote Kurve) unter der absoluten Luftfeuchte in der Einhausung (grüne Kurve) liegt. Vor allem in Zeiträumen mit einer recht hohen relativen Luftfeuchte in der Einhausung (blaue Kurve) – Wintermonate – wäre der Einsatz einer sensorgesteuerten Lüftungsanlage möglich. In diesen Zeiträumen könnte eine kleinteilige Lüftungsanlage einen positiven Effekt auf das Raumklima ausüben.

Die folgenden Diagramme stellen die Verbesserung der raumklimatischen Situation vor dem Wandbild grafisch da. Dazu werden die Klimagrößen relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur als Streudiagramm¹ dargestellt.

Diagramm 16 stellt den Ausgangszustand ohne Einhausung dar (06.09.2007 – 19.10.2008). Die große Schwankungsbreite der einzelnen Klimaparameter ist gut erkennbar.

Nach der Errichtung der Einhausung (29.10.2008 – 13.12.2009) ist eine erste Verbesserung des klimatischen Dämpfungsverhaltens in dem **Diagramm 17** ablesbar.

Die Abdichtung der Einhausung führte zu einer eindeutigen Verbesserung der klimatischen Dämpfungsverhaltens. Dies wird in dem **Diagramm 18** deutlich (01.01.2013 – 31.12.2014).

Die Ergebnisse für den Zeitraum der dauerhaften Einhausung (01.01.2016 – 08.12.2017) zeigen auch ein sehr gedämpftes Raumklimaverhalten. Die Schwankungsbreite des Ausgangszustandes (2007 – 2008) wird nicht mehr erreicht. Zu bedenken bleibt bei dieser Darstellung mit dem gewählten Messzeitraum, dass hier auch noch die Messwerte mit der recht hohen Baurestfeuchte dargestellt werden.

Um zu vergleichen ob es zu einer anderen Verteilung der Messdatensätze innerhalb der letzten beiden Einhausungszustände (abgedichtete provisorische Einhausung und dauerhafte Einhausung) gekommen ist, wurden für die Werte der relativen Luftfeuchte Histogramme für die statistische Verteilung der Messdatensätze innerhalb der Klimawerte von 0 bis 100 % dargestellt. **Diagramm 20** und **Diagramm 21** zeigen diesen Vergleich. Erkennbar wird, dass es innerhalb dieser beiden Messzeiträume, die beide nahezu jeweils 2 Messjahre umfassen, eine fast identische Verteilung der Messdatensätze festgestellt werden konnte.

¹ Ein Streudiagramm ist die graphische Darstellung von beobachteten Wertepaaren zweier statistischer Merkmale. Diese Wertepaare werden in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen, wodurch sich eine Punktwolke ergibt.

5.4 Luftwechsellmessungen

Einleitung

Um den Luftaustausch innerhalb der überdachten und eingehausten Außenwandmalerei an der Kirche St. Nikolai in Jena- Lichtenhain zu quantifizieren, führte das Institut für Diagnostik und Konservierung in Sachsen und Sachsen- Anhalt e.V. (IDK) am 28.10.2015 und am 05.04.2017 Luftwechsellmessungen durch. Ziel war es den Zustand der dauerhaften Einhausung mit dem klimatisch akzeptablen Zustand der angedichteten Einhausung zu vergleichen, und wenn nötig, Hinweise zu möglichen negativen Veränderungen durch den Aufbau der Fachwerkkonstruktion abzuleiten.

Methodik

Die Untersuchung des Luftwechsels erfolgt nach der Referenzgasmethode mit Hilfe von CO₂. Um den Luftwechsel eines Raumes zu bestimmen, wird eine definierte Menge an Referenzgas in die Raumluft abgegeben. Um die bestmögliche Vermischung des eingebrachten Gases mit der Raumluft zu erreichen, werden Lüfter eingesetzt, die das Gas sofort nach dem Austritt verteilen. Sensoren messen im Minutenabstand die Referenzgas-Konzentration, sowie Lufttemperatur und Luftfeuchte. Der Versuchsaufbau der Messung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 12569. Die Messwerte werden an ein Notebook gesendet und dort verarbeitet. Aus Art und Weise des Referenzgas-Konzentrationsanstiegs und des anschließenden Konzentrationsabfalls erfolgt die Ermittlung des Luftwechsels mit Hilfe einer Modellrechnung. Die Berechnung wird einerseits nach den Vorgaben von DIN EN ISO 12569 ausgeführt und berücksichtigt lediglich die Abkonzentrationsphase des Referenzgases, alternativ dazu kommt ein Berechnungsverfahren zum Einsatz, das Auf- und Abkonzentrationsphase einbezieht. Dadurch wird der praxisrelevante Wert des mittleren Luftwechsels ermittelt.

Ergebnisse

Anhand der erfolgten Luftwechsellmessungen zweier unterschiedlicher Einhausungszustände konnte erkannt werden, dass es durch die Errichtung der dauerhaften Einhausung als Fachwerkkonstruktion zu keiner bisher erkennbaren zu weitführenden „Abdichtung“ des Einhausungsbereiches gekommen ist. Bei der Voruntersuchung konnte eine Luftwechselrate von ca. 0,85 ermittelt werden. Dies bedeutet, dass ca. 85% des Raumvolumens innerhalb einer Stunde mit Außenluft ausgetauscht wurde. Bei der Nachuntersuchung hatte sich dieser Messwert auf ca. 0,63 verändert. Dieser Wert steht für einen derzeit als ausreichend hoch zu bezeichneten Luftwechsel.

Datenblätter des untersuchten Objektes

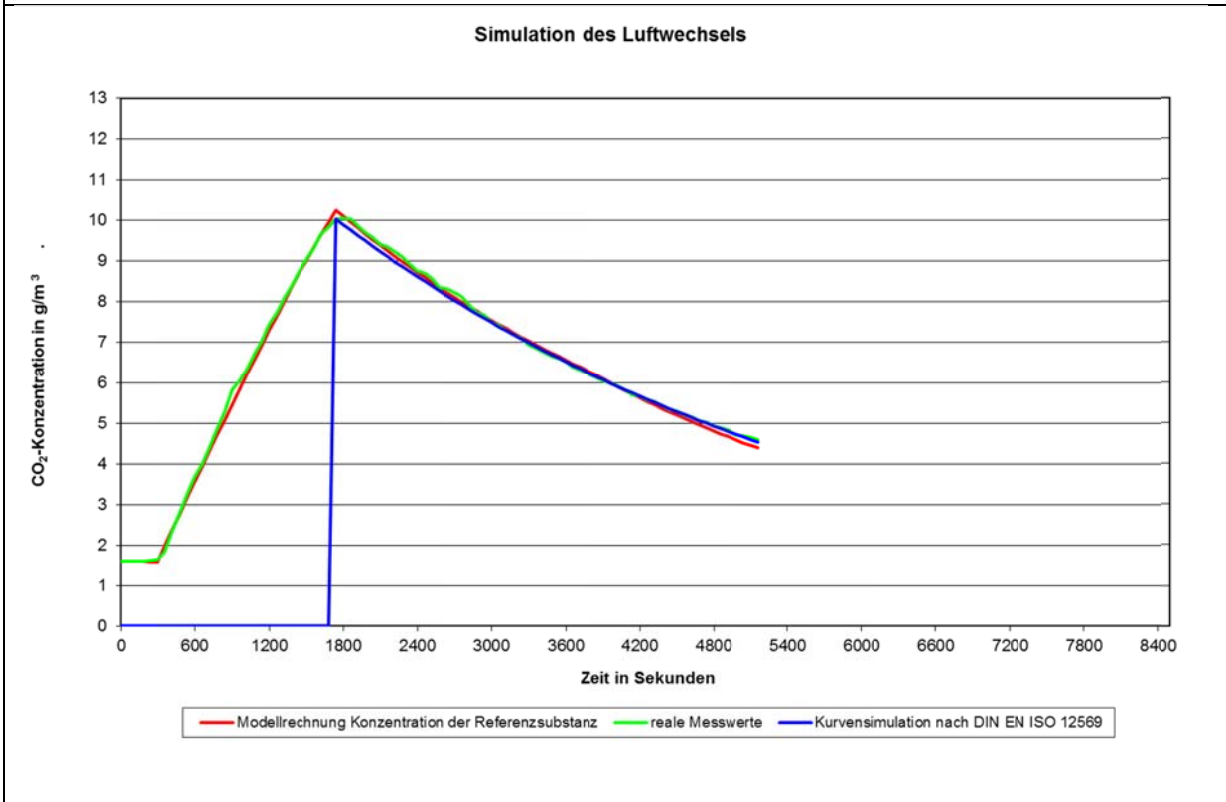
Objektdateien – Voruntersuchung 2015	
Objektname	Kirche St. Nikolai
Objektadresse:	Lützowstraße 07745 Jena OT Lichtenhain
Objektdetail:	Außenwandmalerei (Einhausung)
Datum:	28.10.2015
	

Kenndaten – Eigenschaften des Raumes		
Raumtemperatur [°C]	5,3°C	Besonderheiten: Außenwandmalerei wurde mit Folie und Holzleisten eingehaust (erste Schutzeinhausung)
rel. Feuchte [%]	77%	
Volumen [m³]	48m³	

Kenndaten - Wetterbedingungen			
Lufttemperatur °C (Tagesmittel)	6°C	Windstärke bft (Tagesmittel)	-
rel. Feuchte % (Tagesmittel)	-	max. Windgeschwindigkeit km/h	-

Luftwechselformel/Ergebnisse am Tag der Messung	
Messbeginn:	28.10.2015, 12:34Uhr
Messverfahren:	Tracergasverfahren in Anlehnung an Versuchsaufbau nach DIN EN ISO 12569
Tracergas:	CO ₂
Berechnung der Luftwechselrate:	
nach DIN EN ISO 12569	0,84
unter Berücksichtigung der Auf- und Abkonzentrationsphase des Referenzgases:	0,85

Luftwechselsimulation:



Besonderheiten:

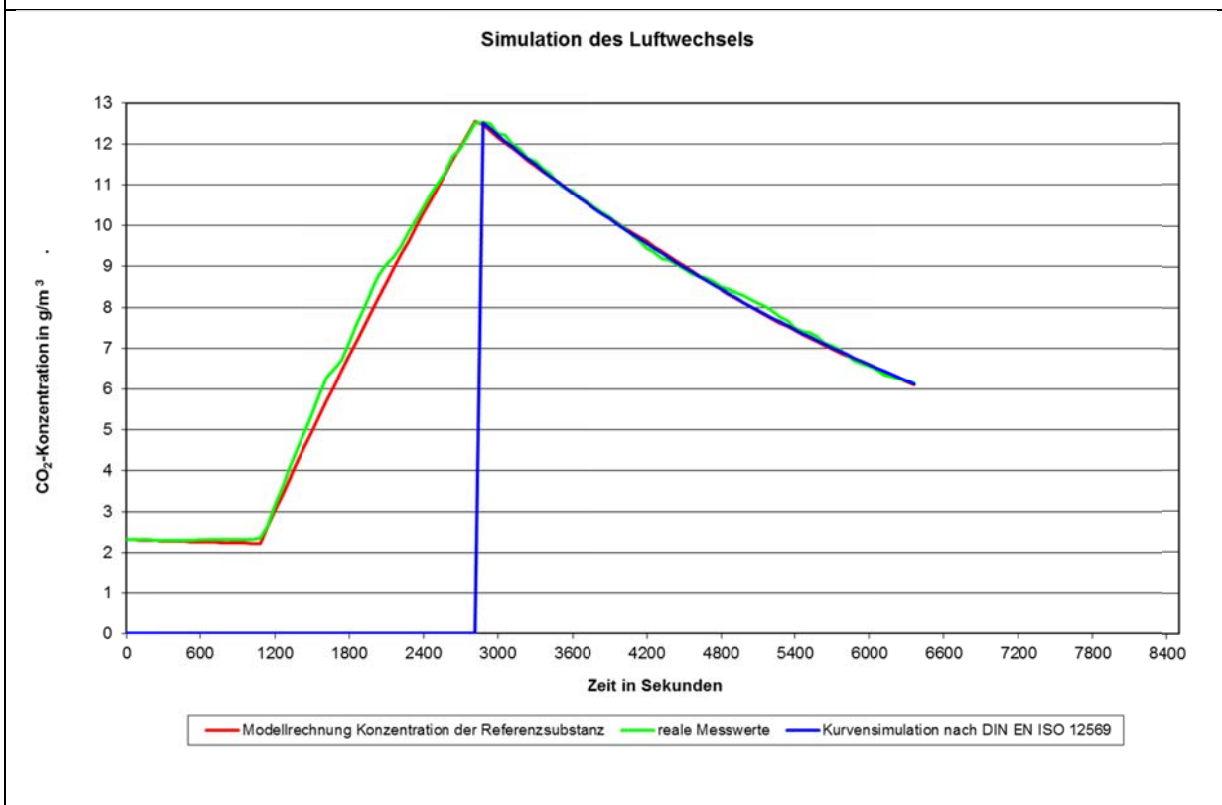
Objektdaten - Nachuntersuchung	
Objektname	Kirche St. Nikolai
Objektadresse:	Lützowstraße 07745 Jena OT Lichtenhain
Objektdetail:	Außenwandmalerei (Einhausung)
Datum:	05.04.2017
	

Kenndaten – Eigenschaften des Raumes		
Raumtemperatur [°C]	9,5°C	Besonderheiten: Einbau einer festen Einhausung mit ausgefachten Ständerwerk und Holzverkleidung
rel. Feuchte [%]	78%	
Volumen [m³]	48m³	

Kenndaten - Wetterbedingungen			
Lufttemperatur °C (Tagesmittel)	12°C	Windstärke bft (Tagesmittel)	-
rel. Feuchte % (Tagesmittel)	72%	max. Windgeschwindigkeit km/h	11 km/h

Luftwechsellmessung/Ergebnisse am Tag der Messung	
Messbeginn:	11:40 Uhr
Messverfahren:	Tracergasverfahren in Anlehnung an Versuchsaufbau nach DIN EN ISO 12569
Tracergas:	CO ₂
Berechnung der Luftwechselrate:	
nach DIN EN ISO 12569	0,74
unter Berücksichtigung der Auf- und Abkonzentrationsphase des Referenzgases:	0,63

Luftwechselsimulation:



Besonderheiten:

6 Fazit und Ausblick

Die gewünschte raumklimatische Stabilisierung vor der Wandmalerei, konnte durch die Errichtung der dauerhaften Einhausung im Herbst 2015 erreicht werden. Durch die durchgeführten raumklimatischen Untersuchungen konnte eine Stabilisierung des raumklimatischen Zustands in der Einhausung eindeutig festgestellt werden. Die erfolgten klimatischen Aufzeichnungen zeigen, dass sich in der Einhausung ein gedämpftes Raumklima im Vergleich zum Außenklima eingestellt hat. Die dämpfende Wirkung der massiven historischen Wandkonstruktion der Kirche und der neuen Fachwerkwand mit feuchtepuffernden Baumaterialien konnte durch diese Form der Einhausung aktiviert werden. Daher ist auch ein Unterschreiten der Taupunkttemperatur an den Wandoberflächen kaum mehr festgestellt worden.

Die Langzeitklimamessungen haben ergeben, dass es derzeit nicht unbedingt notwendig ist eine sensorgesteuerte Raumlüftung für den Einhausungsbereich zu betreiben. Natürlich würden sich dadurch die Raumklimaparameter weiter verbessern lassen, aber solche technischen Einbauten bedingen auch einer regelmäßigen Wartung und Betreuung. Ob dies in Jena-Lichtenhain derzeit so gegeben ist, ist fraglich. Trotzdem kann eine solche sensorgesteuerte Lüftungsanlage empfohlen werden.

Da der bauliche und finanzielle Aufwand für die Installation einer solchen kleinteiligen sensor-gesteuerten Raumlüftung in Jena-Lichtenhain als gering zu bezeichnen ist wird hier trotzdem noch kurz die Funktionsweise beschrieben: Die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Außen- und Innenluft werden von Messfühlern gemessen und an ein sich im Gebäude befindliches Steuergerät übermittelt. Das Steuergerät errechnet automatisch die absolute Luftfeuchte in Gramm je Kubikmeter Luft. Ist die absolute Feuchte innen höher als außen, werden Ventilatoren oder Fensteröffner in einem individuell einstellbaren Algorithmus an- und ausgeschaltet. Während des Lüftungsvorganges kann sich die trockenere Außenluft mit der vorhandenen feuchteren Innenluft vermischen, wodurch Fußboden- und Putzflächen sowie freiliegendes Mauerwerk Feuchte an die Raumluft abgeben können. Durch einen individuell einstellbaren Messzeitraum werden die beiden Luftzustände von Innen- und Außenluft permanent miteinander verglichen und die Lüftung gestartet oder gestoppt. Der mit einem elektrischen Verschluss in der Wand oder dem Fenster eingebaute Ventilator zieht die feuchte Luft aus dem Raum und bläst sie ins Freie. Der Ventilator wird so dimensioniert, dass in einem definierten Zeitraum die Raumluft einmal ausgetauscht wird. Über eine Zuluftöffnung oder ein mit einem elektrischen Fensteröffner gekipptes Fenster strömt wegen des vom Ventilator erzeugten Unterdrucks trockenere Außenluft in den Raum. Die Orte der Zuluft- und der Abluftöffnung sollten weiträumig auseinander liegen, um eine möglichst große Durchmischung der Raumluft zu ermöglichen. Dadurch soll auch verhindert werden, dass sich Raumluftbereiche bilden, die nicht belüftet werden. Mittlerweile können bei guten Steuergeräten zusätzliche Grenzwerte eingestellt werden. Somit ist eine Temperaturbegrenzung für Frostschutz oder ein Mindestwert für die relative Luftfeuchte im Raum möglich damit z. B. sich im Raum befindliche Gegenstände nicht austrocknen. Ferner besteht die Möglichkeit der Daten-aufzeichnung, die zu empfehlen ist, um die Wirksamkeit der Durchlüftung über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren und um Änderungen bzw. Anpassungen der Lüftungsanlage zu ermöglichen.

Ein sehr wichtiger Punkt ist bei allen technischen Anlagen die Wartung und Pflege. Hier muss allen Beteiligten bewusst sein, dass die Technik und die Sensorik mindestens einmal im Jahr zu

überprüfen sind. Aber auch die erfassten Raumklimadaten müssen ausgewertet und interpretiert werden. Dies kann durch eine eingewiesene Person – entweder durch den Eigentümer, den Nutzer oder externe Fachkräfte – erfolgen. Die Datenauswertung ist von besonderer Bedeutung, denn dadurch lassen sich die Auswirkungen der Raumlüftung klar belegen. Zudem können die eingestellten Parameter dem tatsächlichen und sich ändernden Raumklimazustand angepasst werden.

Des Weiteren muss das Raumklima innerhalb der dauerhaften Einhausung langfristig aufgezeichnet und kontrolliert werden, um etwaige Schäden an den Malereibeständen frühzeitig erkennen und bewerten zu können. Daher wird vom Autor eine angepasste Raumklimamessung mit einer kleinteiligen batteriebetriebenen Messtechnik empfohlen, die sich dem jetzigen Messsystem annähert. Hierzu sollten zeitnah weiterführende Gespräche alle Projektbeteiligten erfolgen.

Zusammen mit der Neuerrichtung einer Schutzwand und Auswahl feuchtepuffernder Materialien konnte ein ausgeglichener raumklimatischer Zustand im Jahresverlauf erreicht werden, der ein weiteres zyklisches Zerstören der originalen Wandmaleroberfläche unterbindet. Durch diese Vorsorge konnte eine Qualitätssicherung der modellhaften restauratorischen Leistung erreicht werden. Dieses Vorgehen konnte auch übertragbare Konservierungslösungen für andere Objekte mit ähnlichen Fragestellungen (z.B. kleine Dorfkirchen) hervorbringen.

7 Quellenverzeichnis

ARENDE, K. (1993) Raumklima in großen historischen Räumen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln

Arbeitsheft des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesamtes, Heft 24 / 2009; Thema: Umweltbedingte Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien, Wernersche Verlagsgesellschaft

KALISCH, U. (2006) Bau und Kunstdenkmale unter dem Einfluss wechselnder Klimafaktoren, in: Praxisorientierte Forschung in der Denkmalpflege – 10 Jahre IDK-, Hrsg.: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. 2006, S. 7-22.

LÖTHER, Th. (2007), Zwischenbericht DD 19/2007 St. Nicolai, Jena-Lichtenhain, Nahfeldklimauntersuchung – IR-Untersuchung zur Hohlstellendetektion

LÖTHER, Th. (2008) Zwischenbericht DD 56/2008 St. Nicolai, Jena-Lichtenhain, Nahfeldklimauntersuchung - Jahreszyklus 2007 – 2008

LÖTHER, Th. (2009) Zwischenbericht DD 70/2009 St. Nicolai, Jena-Lichtenhain, Nahfeldklimauntersuchung – 2. Jahreszyklus 2008 – 2009

LÖTHER, Th. (2010) Zwischenbericht DD 64/2010 St. Nicolai, Jena-Lichtenhain, Nahfeldklimauntersuchung – 3. Jahreszyklus 2009 – 2010

LÖTHER, Th. (2011) Zwischenbericht DD 76/2011 St. Nicolai, Jena-Lichtenhain, Nahfeldklimauntersuchung – 4. Jahreszyklus_2010 – 2011

LÖTHER, Th. (2016) Zwischenbericht DD 48/2016 St. Nicolai, Jena-Lichtenhain, Nahfeldklimauntersuchung – 5. Jahreszyklus_2015 - 2016

LÖTHER, Th. (2008) Ziele und Grenzen der Beheizung sakraler Gebäude, Denkmalpflege in Sachsen, Jahrbuch 2008, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Sax-Verlag Beucha, S. 95 -96.

SEGERS-GLOCKE. (1994) Forschungsprojekt Wandmalerei-Schäden, Schlussbericht zu den interdisziplinären Ergebnissen, Hrsg.: Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Hameln

WTA-Merkblatt "Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken" (2009): WTA-Merkblatt E 6-12: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

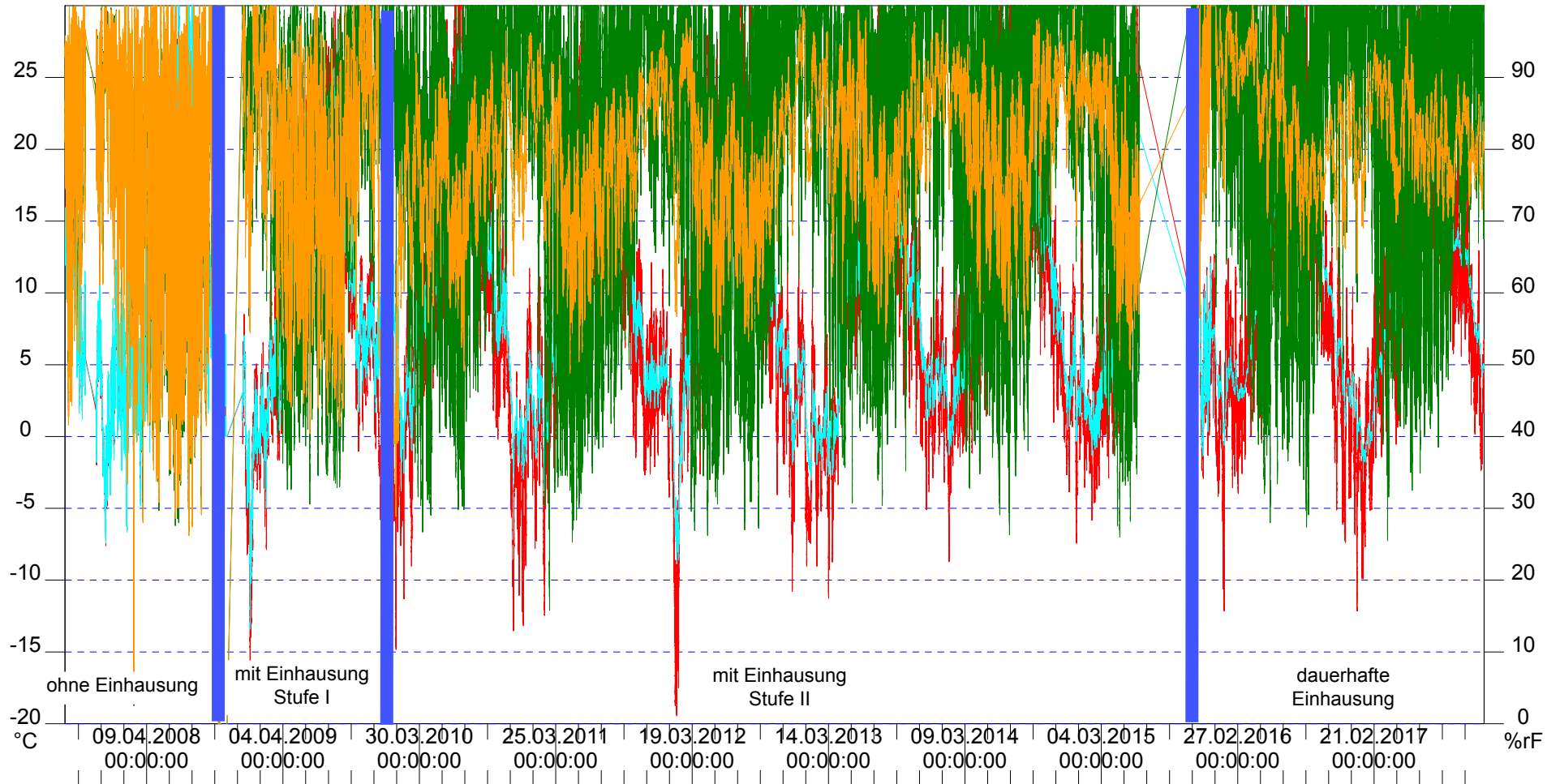
DIN EN ISO 12569, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden – Indikatorgasverfahren

8 Anlagen

21 Diagramme

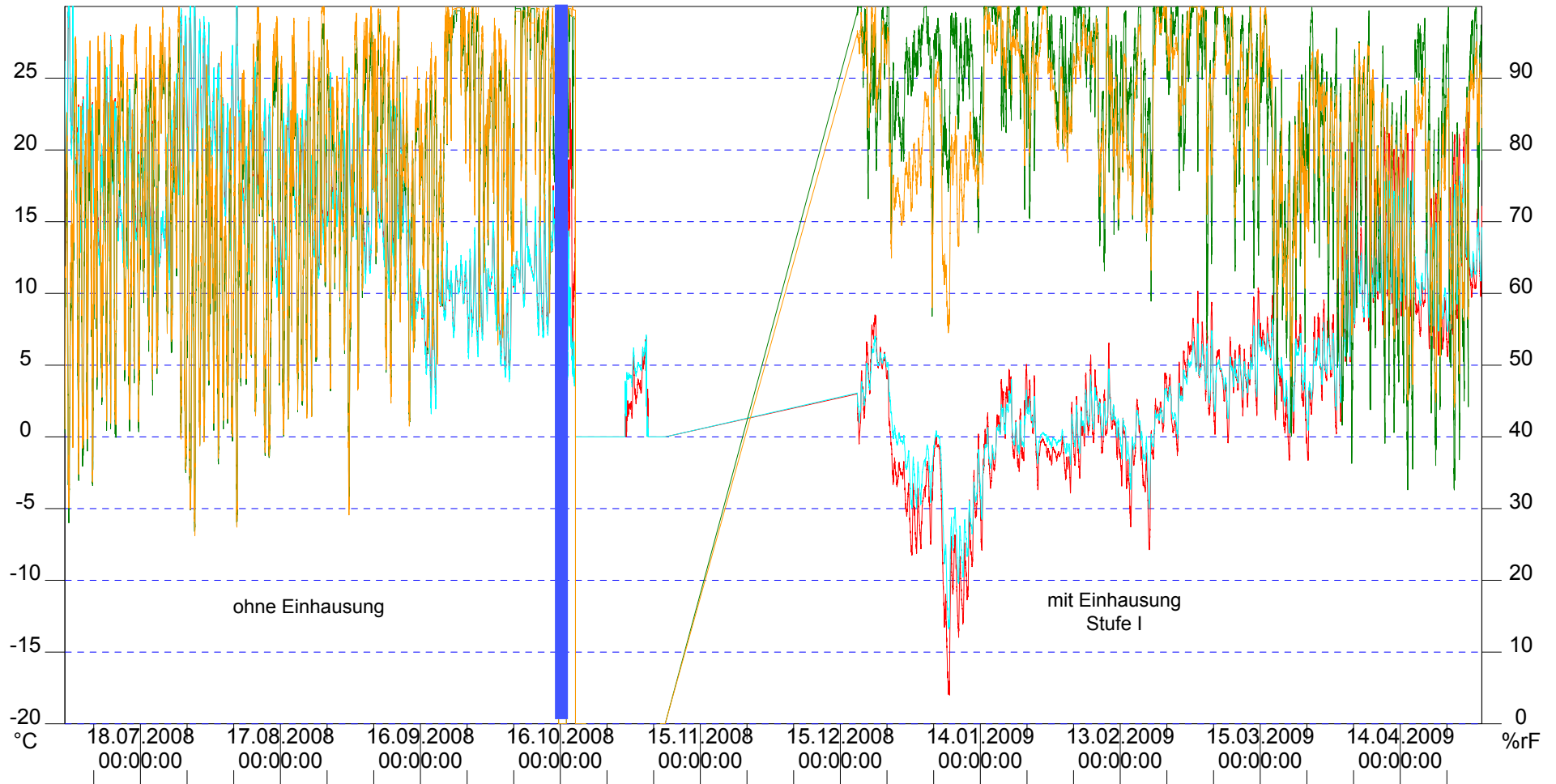


13.03.2018 14:43:16	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Klima_1-2		K:2 °C	-19.45	34.60	9.48
Vergleich: Außenklima und Klima in der Einhausung (06.09.2007 - 08.12.2017)		K:3 °C	-13.40	32.27	10.08
rot	- Lufttemperatur Außenluft	K:6 %rF	0.00	100.00	83.54
dunkelgrün	- rel.LF Außenluft	K:7 %rF	0.00	100.00	80.25
hellblau	- Lufttemperatur 1,00m vor Wand				
orange	- rel.LF 1,00m vor Wand				



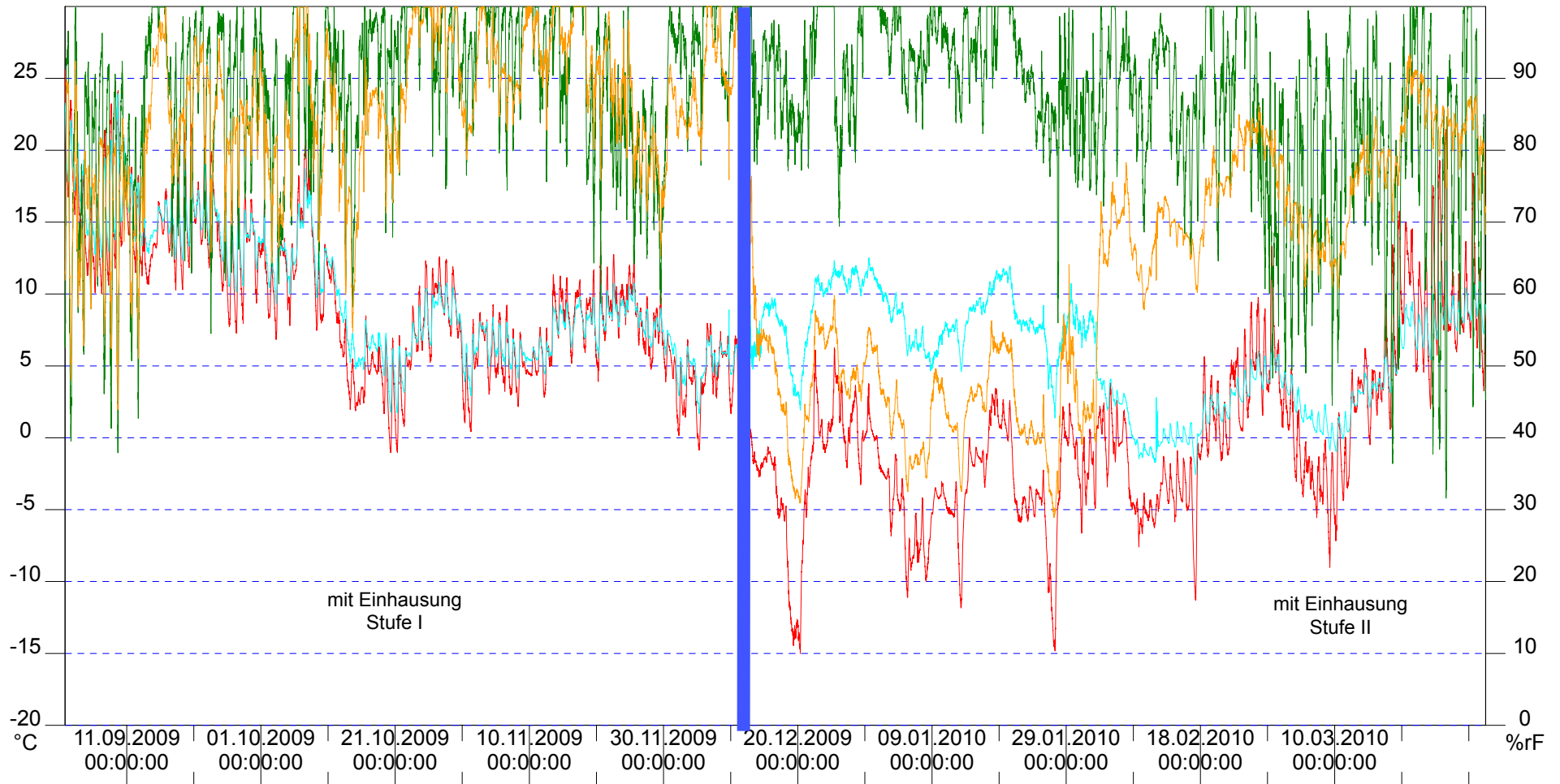


13.03.2018 14:44:44	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\ GesamtKlima_1-2		K:2 °C	-18.00	31.77	8.48
Vergleich: Außenklima und Klima in der Einhausung (01.07.2008 - 30.04.2009)		K:3 °C	-13.40	32.27	8.56
rot	- Lufttemperatur Außenluft	K:6 %rF	0.00	100.00	74.48
dunkelgrün	- rel.LF Außenluft	K:7 %rF	0.00	100.00	74.47
hellblau	- Lufttemperatur 1,00m vor Wand				
orange	- rel.LF 1,00m vor Wand				



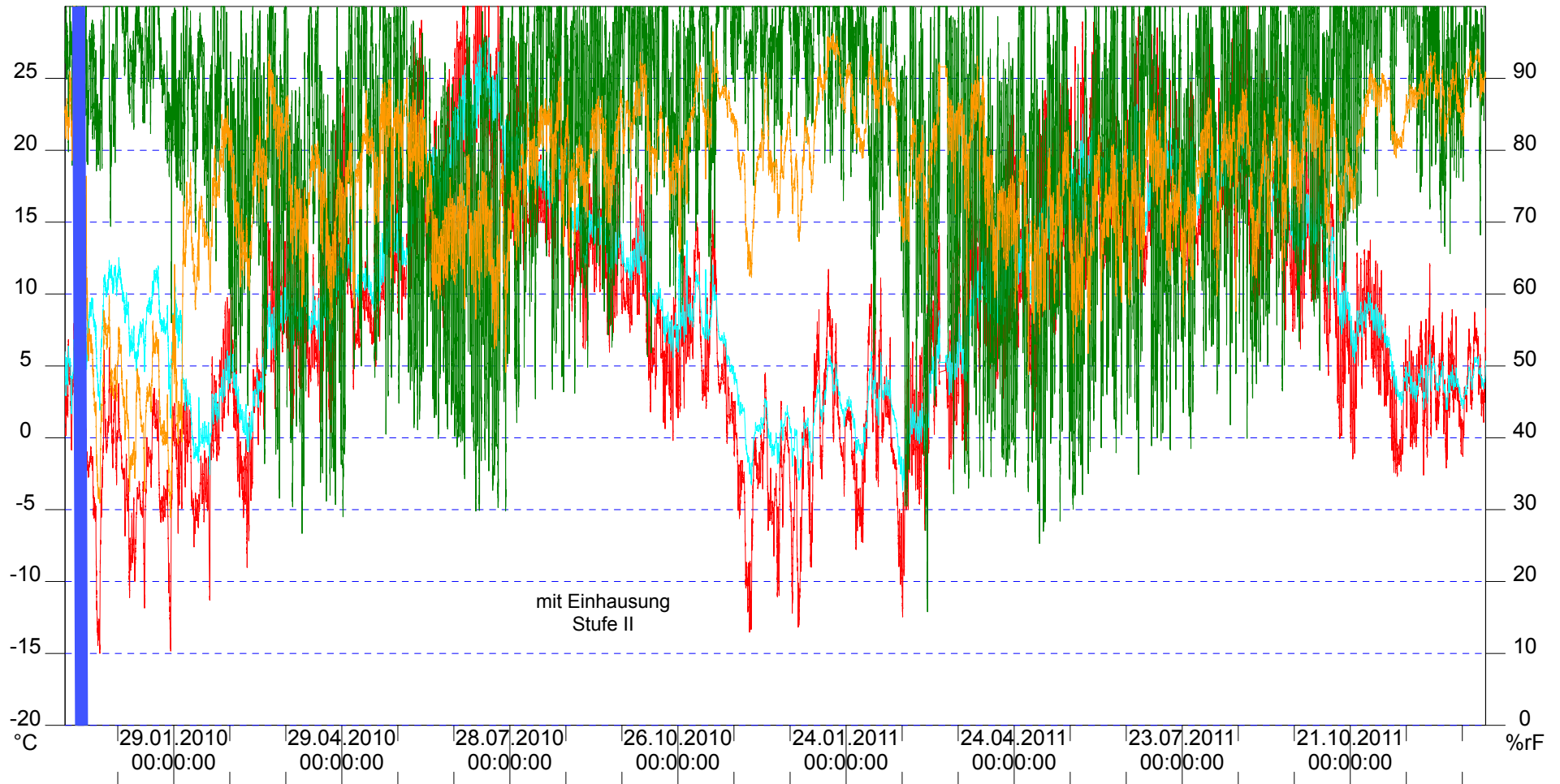


13.03.2018 14:41:28	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\ Gesamt\Klima_1-2		K:2 °C	-15.00	25.60	4.42
Vergleich: Außenklima und Klima in der Einhausung (01.09.2009 - 31.03.2010)		K:3 °C	-2.57	23.94	7.82
rot	- Lufttemperatur Außenluft	K:6 %rF	31.60	100.00	87.72
dunkelgrün	- rel.LF Außenluft	K:7 %rF	28.90	100.00	72.97
hellblau	- Lufttemperatur 1,00m vor Wand				
orange	- rel.LF 1,00m vor Wand				



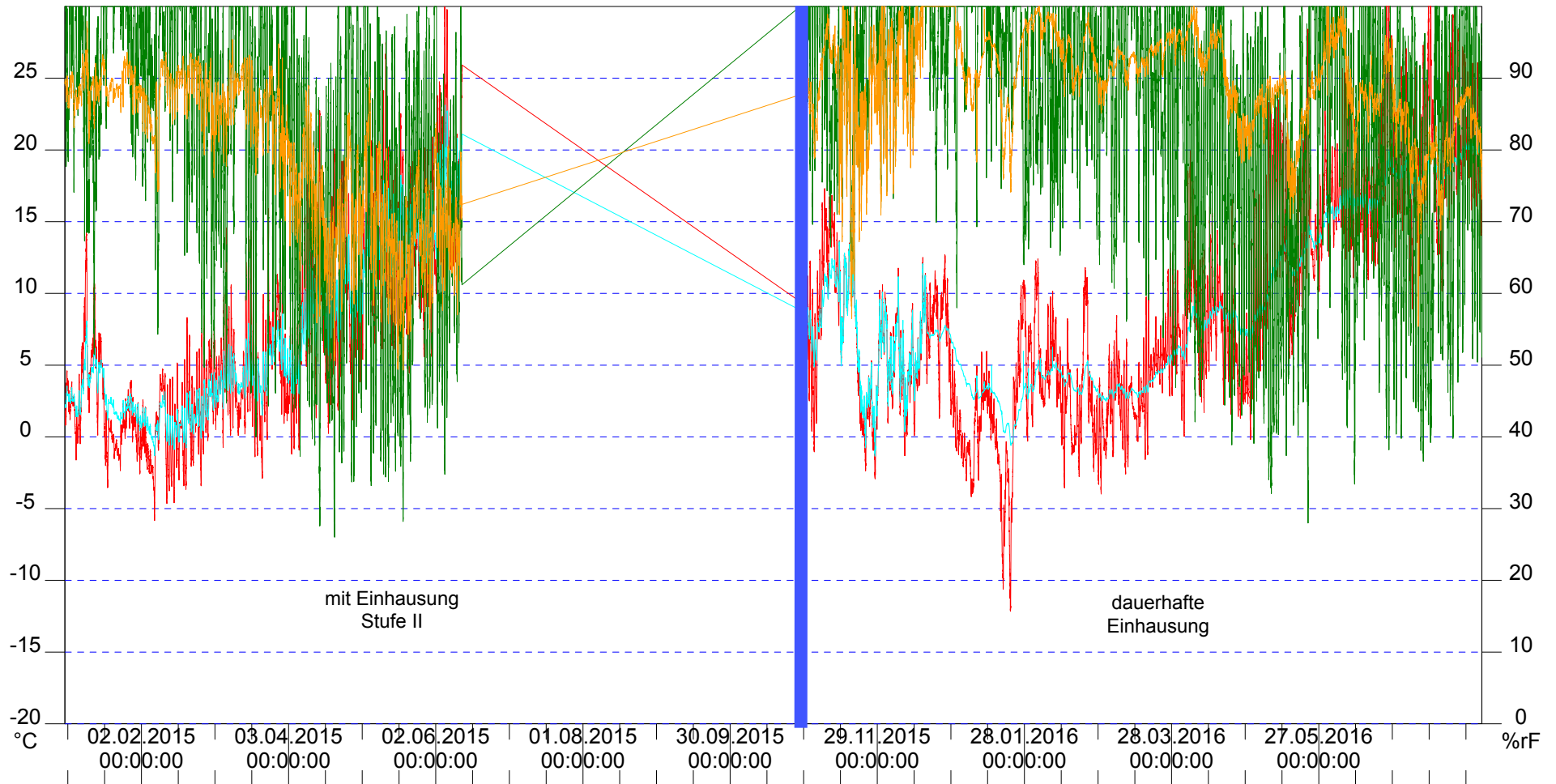


13.03.2018 14:49:04	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\ Gesamt\Klima_1-2		K:2 °C	-15.00	34.60	8.67
Vergleich: Außenklima und Klima in der Einhausung (01.12.2009 - 31.12.2011)		K:3 °C	-3.64	27.82	10.32
rot	- Lufttemperatur Außenluft	K:6 %rF	15.80	100.00	83.70
dunkelgrün	- rel.LF Außenluft	K:7 %rF	28.90	100.00	76.41
hellblau	- Lufttemperatur 1,00m vor Wand				
orange	- rel.LF 1,00m vor Wand				



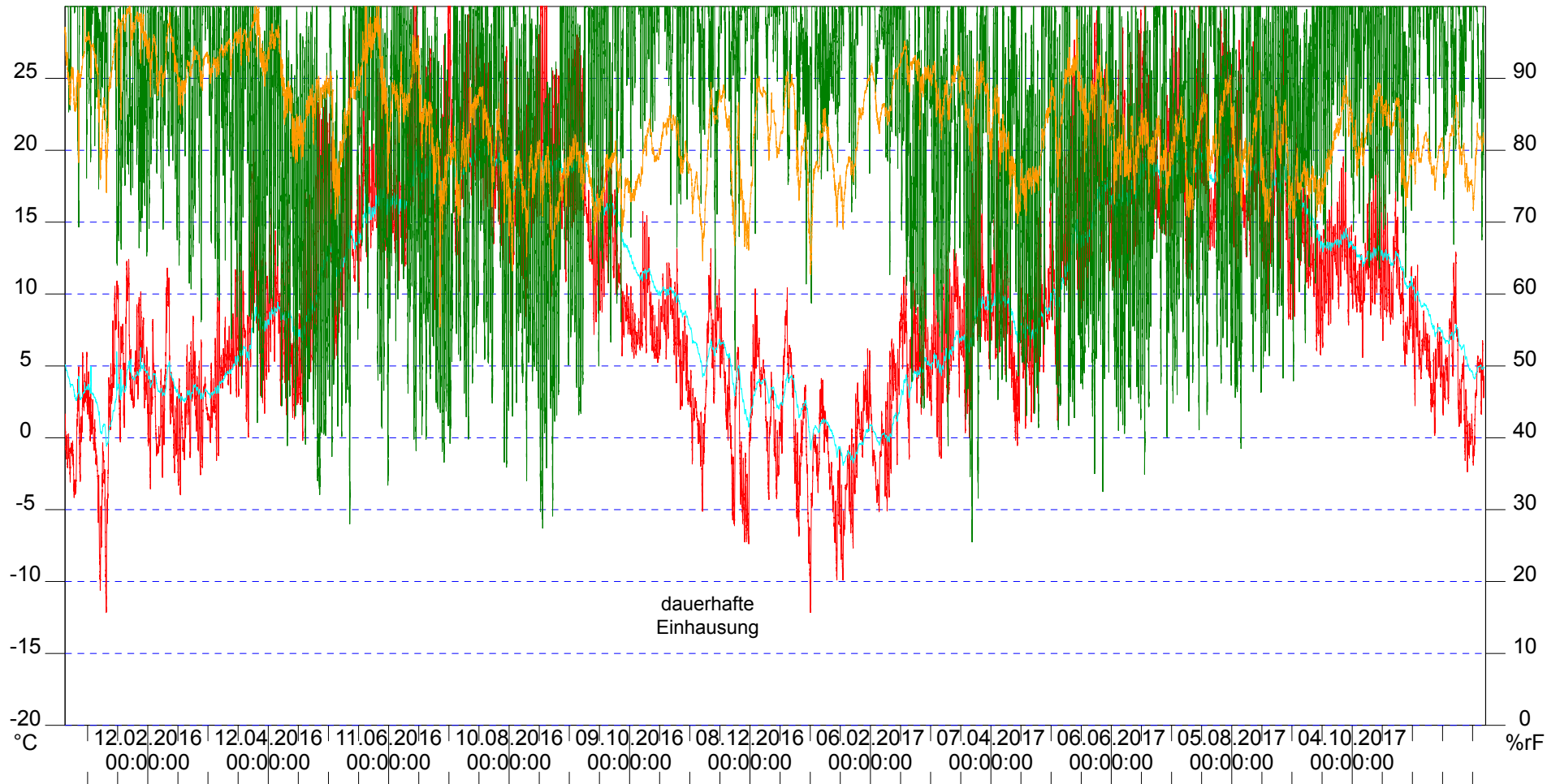


13.03.2018 15:44:51	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\ GesamtKlima_1-2		K:2 °C	-12.16	32.68	8.42
Vergleich: Außenklima und Klima in der Einhausung (01.01.2015 - 31.07.2016)		K:3 °C	-1.34	23.11	8.27
rot	- Lufttemperatur Außenluft	K:6 %rF	26.00	100.00	84.44
dunkelgrün	- rel.LF Außenluft	K:7 %rF	49.30	100.00	86.34
hellblau	- Lufttemperatur 1,00m vor Wand				
orange	- rel.LF 1,00m vor Wand				



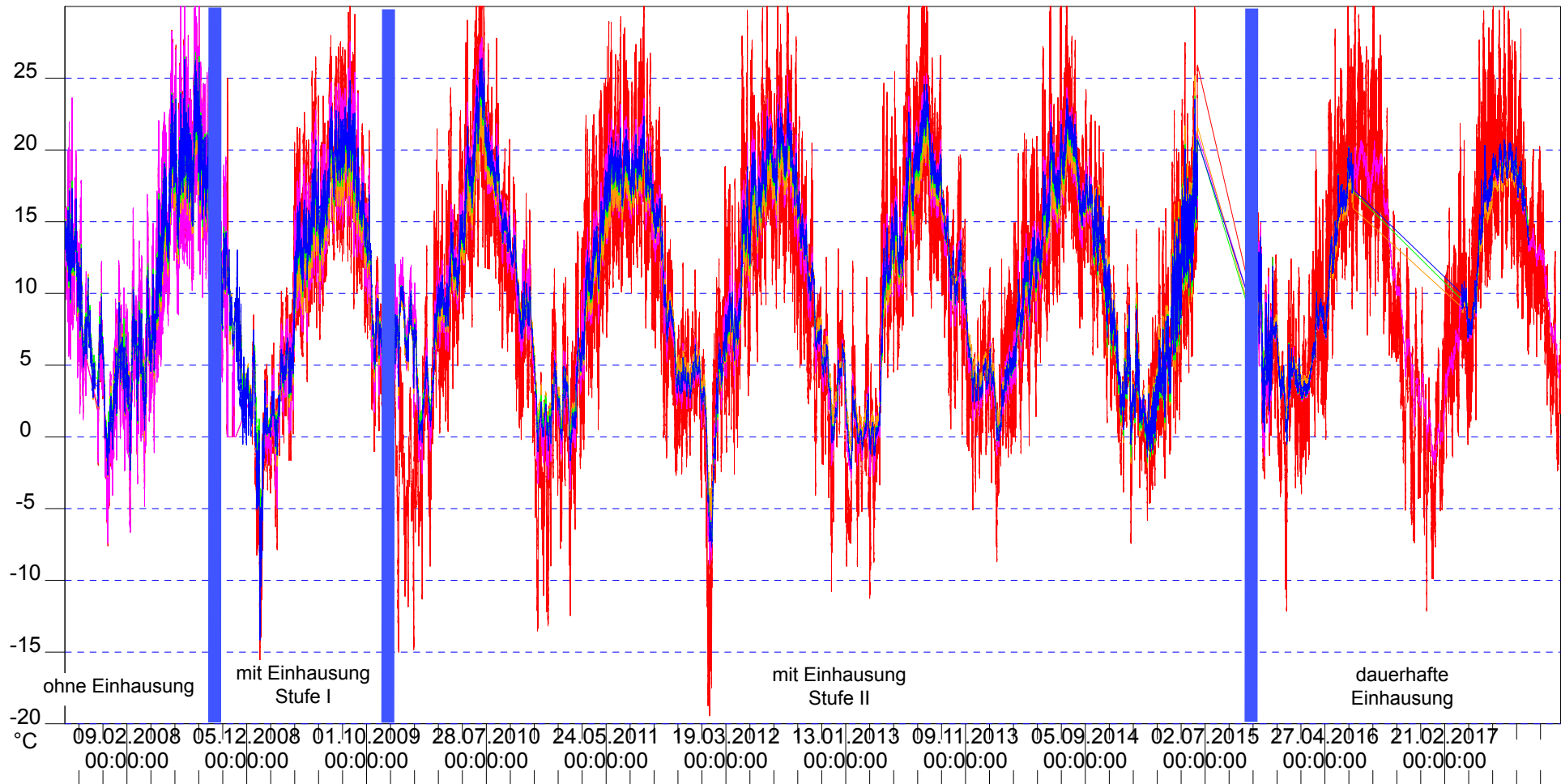


19.03.2018 10:41:53	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\ GesamtKlima_1-2		K:2 °C	-19.45	34.60	9.48
Vergleich: Außenklima und Klima in der Einhausung (01.01.2016 - 08.12.2017)		K:3 °C	-13.40	32.27	10.08
rot	- Lufttemperatur Außenluft	K:6 %rF	0.00	100.00	83.54
dunkelgrün	- rel.LF Außenluft	K:7 %rF	0.00	100.00	80.25
hellblau	- Lufttemperatur 1,00m vor Wand				
orange	- rel.LF 1,00m vor Wand				



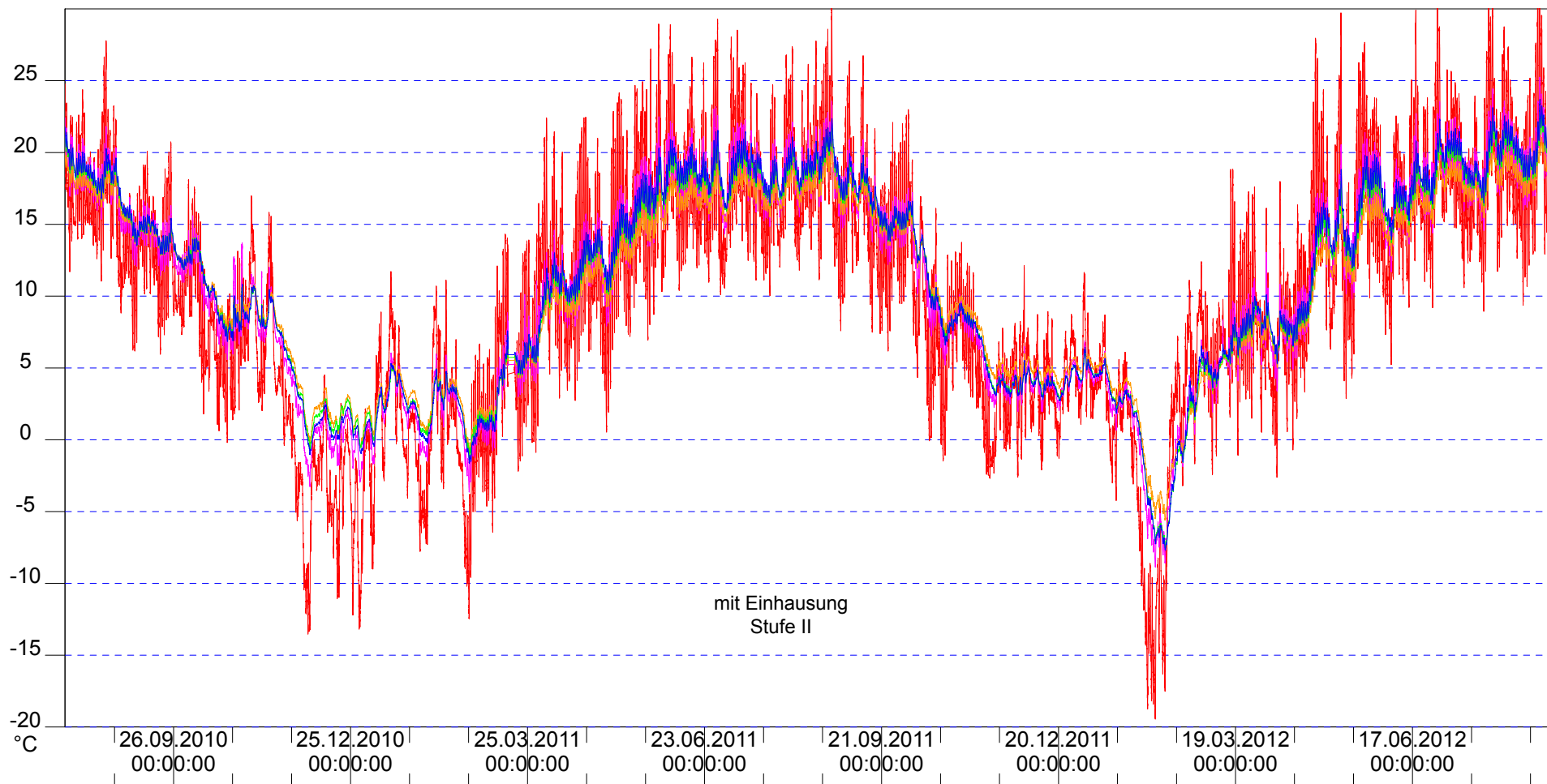


19.03.2018 11:14:02	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:2 °C	-19.45	34.60	9.48
Klima und Oberflächentemp. der Messachse rechts (06.09.2007 - 08.12.2017)		K:3 °C	-13.40	32.27	10.08
rot - Lufttemp. Außenluft	magenta - Lufttemp. 1,00m vor Wand	K:1 °C	-8.83	25.17	10.11
orange - Oberflächentemp. unten	hellgrün - Oberflächentemp. mitte	K:2 °C	-7.54	26.78	10.40
blau - Oberflächentemp. oben		K:6 °C	-14.16	26.39	10.48



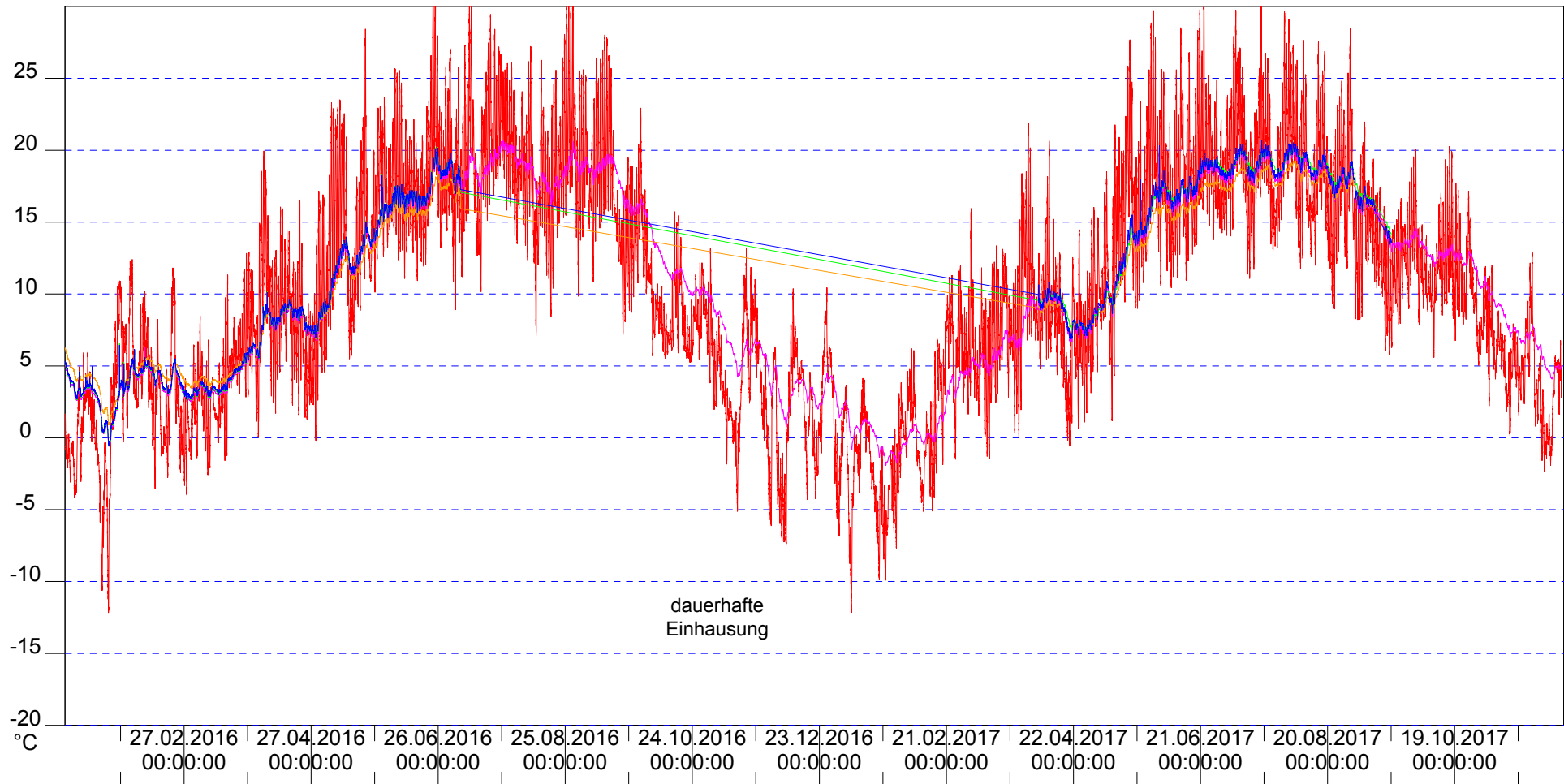


19.03.2018 11:18:21	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:2 °C	-19.45	33.86	9.66
Klima und Oberflächentemp. der Messachse rechts (01.08.2010 - 31.08.2012)		K:3 °C	-8.86	25.25	10.43
rot - Lufttemp. Außenluft	magenta - Lufttemp. 1,00m vor Wand	K:1 °C	-5.59	21.23	10.39
orange - Oberflächentemp. unten	hellgrün - Oberflächentemp. mitte	K:2 °C	-7.54	22.94	10.73
blau - Oberflächentemp. oben		K:6 °C	-7.67	23.70	10.86



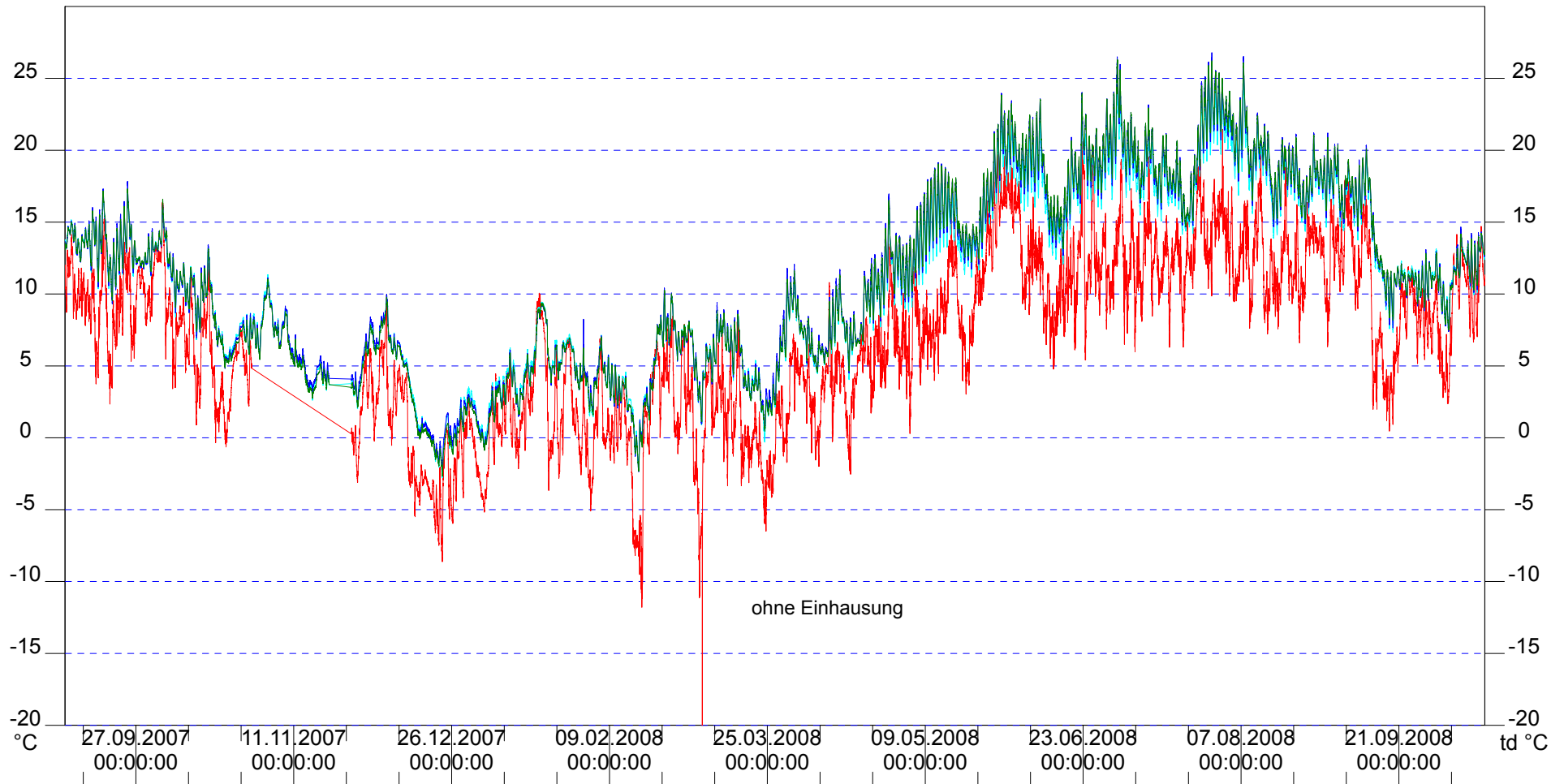


19.03.2018 11:19:51	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:2 °C	-19.45	34.60	9.48
Klima und Oberflächentemp. der Messachse rechts (01.01.2016 - 08.12.2017)		K:3 °C	-13.40	32.27	10.08
rot - Lufttemp. Außenluft	magenta - Lufttemp. 1,00m vor Wand	K:1 °C	-8.83	25.17	10.11
orange - Oberflächentemp. unten	hellgrün - Oberflächentemp. mitte	K:2 °C	-7.54	26.78	10.40
blau - Oberflächentemp. oben		K:6 °C	-14.16	26.39	10.48



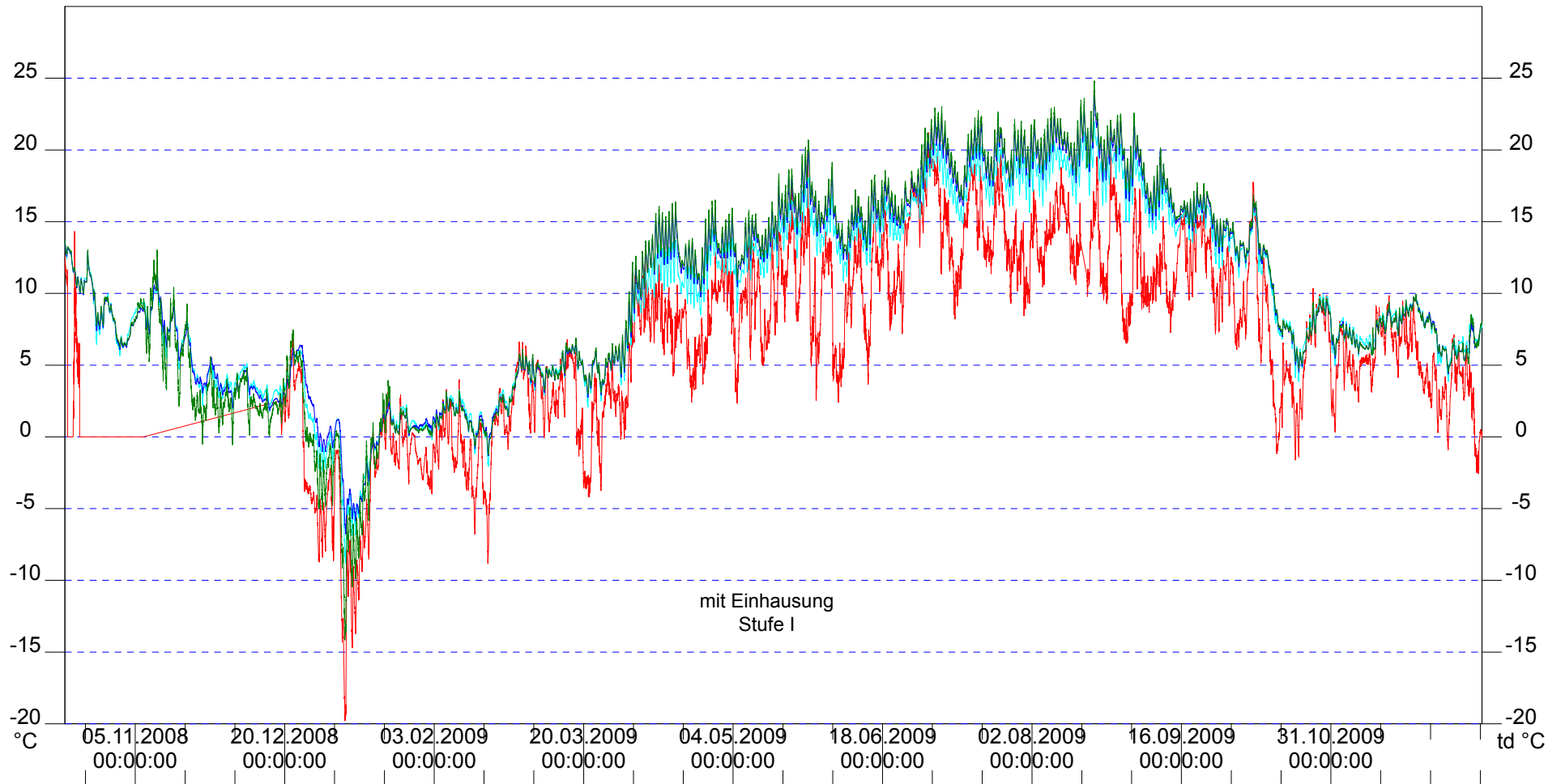


19.03.2018 11:27:49	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:11 td °C	-35.60	21.46	6.76
Vergleich der Oberflächentemperaturen (rechts) und der Taupunkttemp. (in der Einhausung) / 06.09.2007 - 14.10.2008 - ohne Einhausung		K:1 °C	-8.83	25.17	10.11
rot - Taupunkttemp. in der Einhausung		K:2 °C	-7.54	26.78	10.40
hellblau - Oberflächentemp. oben blau - Oberflächentemp. mitte		K:6 °C	-14.16	26.39	10.48
dunkelgrün - Oberflächentemp. unten					



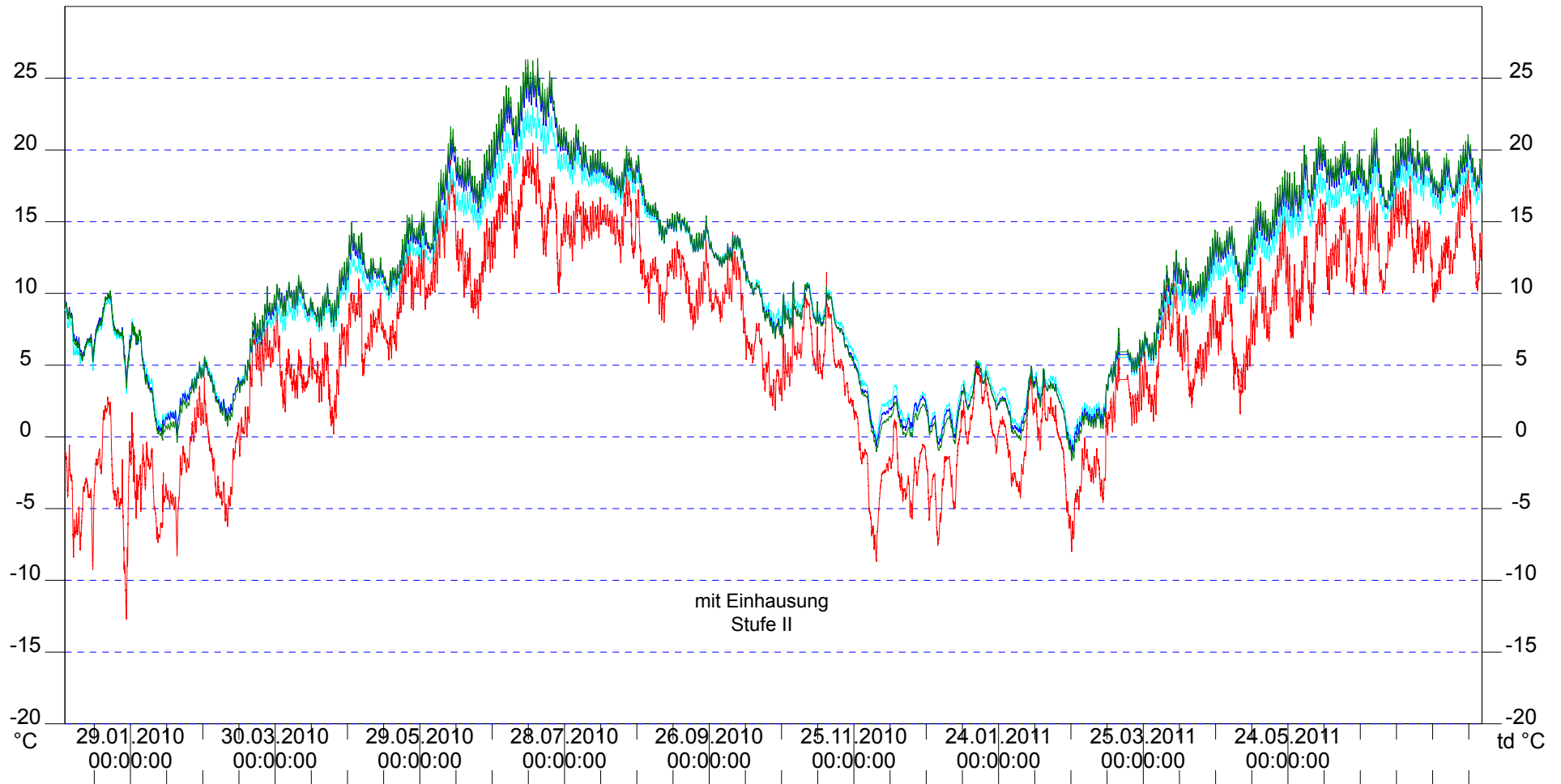


19.03.2018 11:29:07	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:11 td °C	-19.78	21.20	6.45
Vergleich der Oberflächentemperaturen (rechts) und der Taupunkttemp. (in der Einhausung) / 14.10.2008 - 14.12.2009 - ohne Einhausung		K:1 °C	-8.83	21.96	9.54
rot - Taupunkttemp. in der Einhausung		K:2 °C	-6.79	24.13	10.03
hellblau - Oberflächentemp. oben blau - Oberflächentemp. mitte		K:6 °C	-14.16	24.81	10.00
dunkelgrün - Oberflächentemp. unten					





19.03.2018 12:57:58	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:11 td °C	-12.71	20.46	6.24
Vergleich der Oberflächentemperaturen (rechts) und der Taupunkttemp. (in der Einhausung) / 01.01.2010 - 12.08.2011		K:1 °C	-1.06	23.14	10.27
rot - Taupunkttemp. in der Einhausung		K:2 °C	-1.24	25.60	10.77
hellblau - Oberflächentemp. oben blau - Oberflächentemp. mitte		K:6 °C	-1.64	26.39	10.86
dunkelgrün - Oberflächentemp. unten					

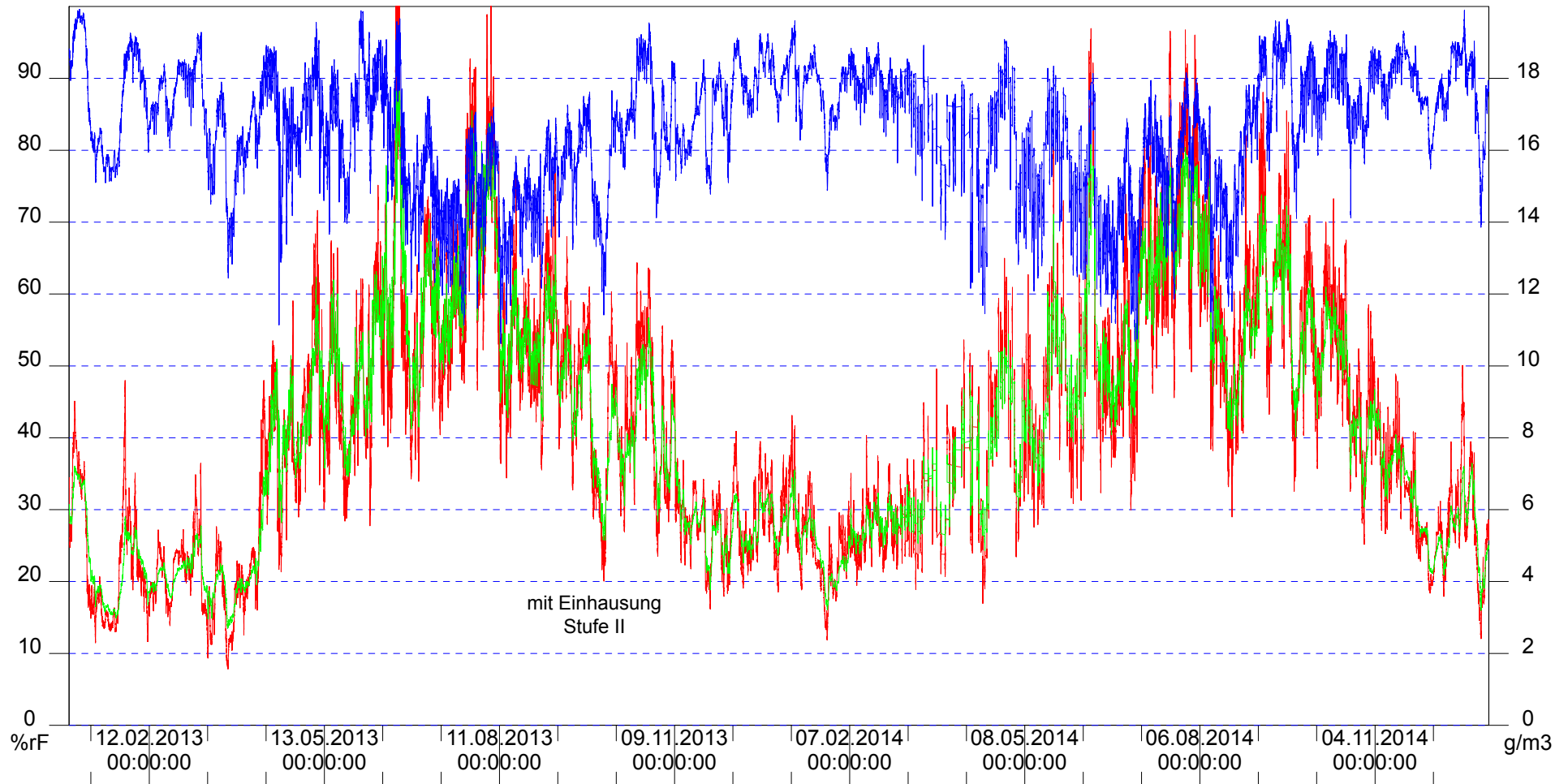




19.03.2018 12:59:36	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:11 td °C	-6.32	19.11	7.86
Vergleich der Oberflächentemperaturen (rechts) und der Taupunkttemp. (in der Einhausung) / 01.01.2016 - 08.12.2017		K:1 °C	-8.83	25.17	10.11
rot - Taupunkttemp. in der Einhausung		K:2 °C	-7.54	26.78	10.40
hellblau - Oberflächentemp. oben blau - Oberflächentemp. mitte		K:6 °C	-14.16	26.39	10.48
dunkelgrün - Oberflächentemp. unten					

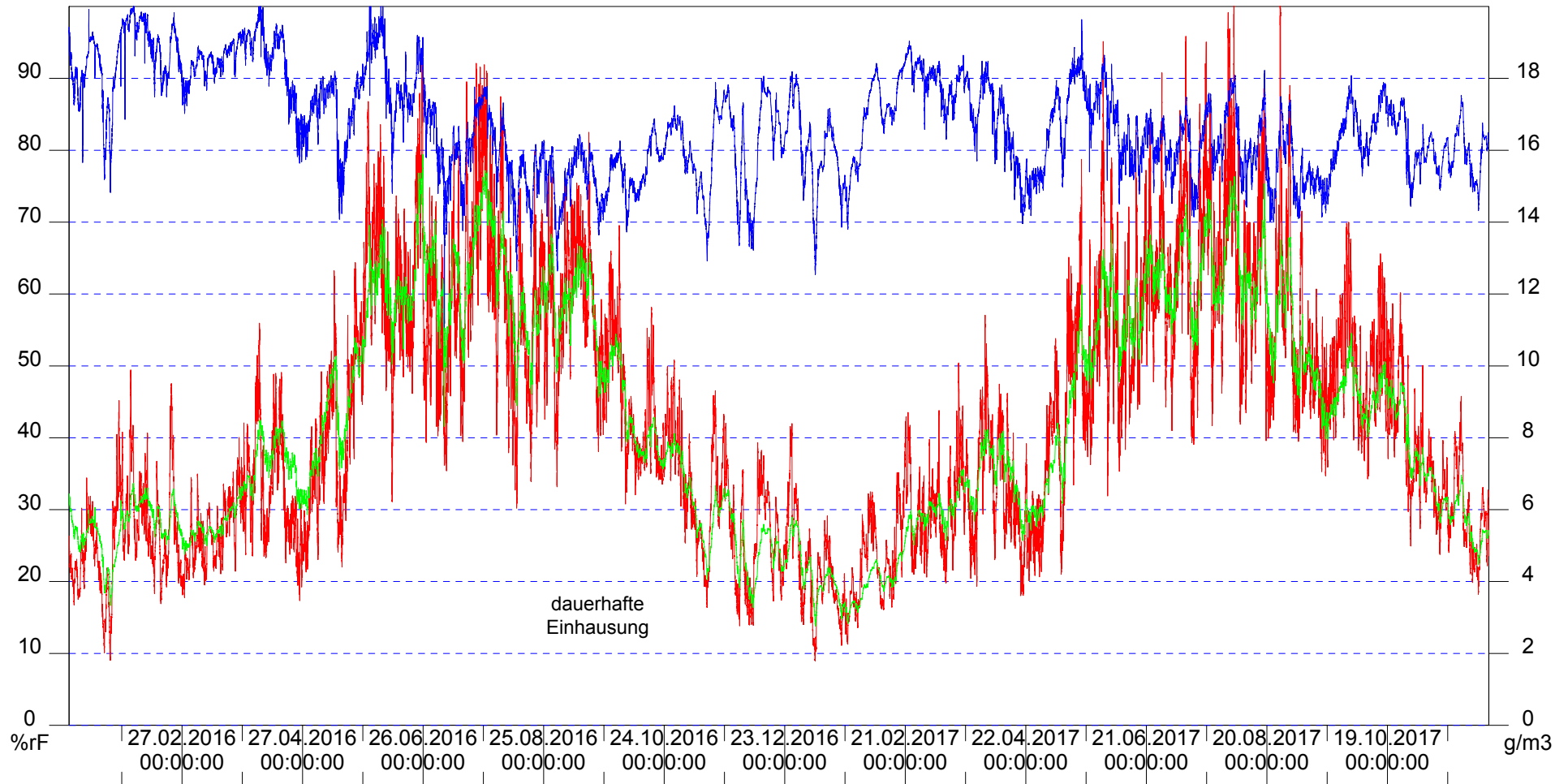


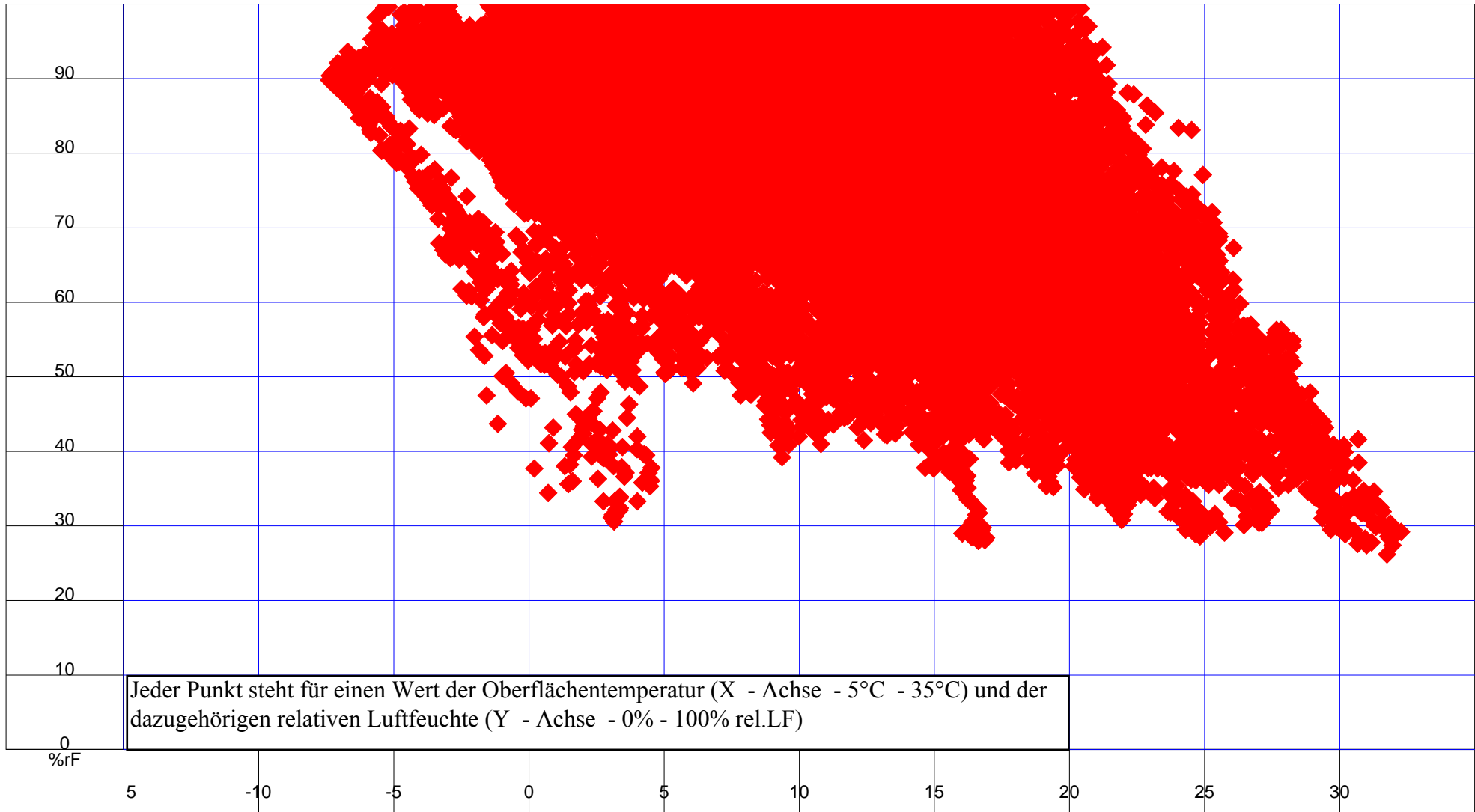
19.03.2018 13:10:33	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:9 g/m ³	1.56	22.24	8.23
Vergleich der abs.LF der Außenluft und des Raumklimas in der Einhausung		K:10 g/m ³	2.70	18.95	8.18
(01.01.2013 - 31.12.2014)		K:7 %rF	53.10	99.60	83.20
rot - abs.LF Außenluft					
grün - abs.LF 1,00m vor Wand					
blau - rel.LF 1,00m vor Wand					

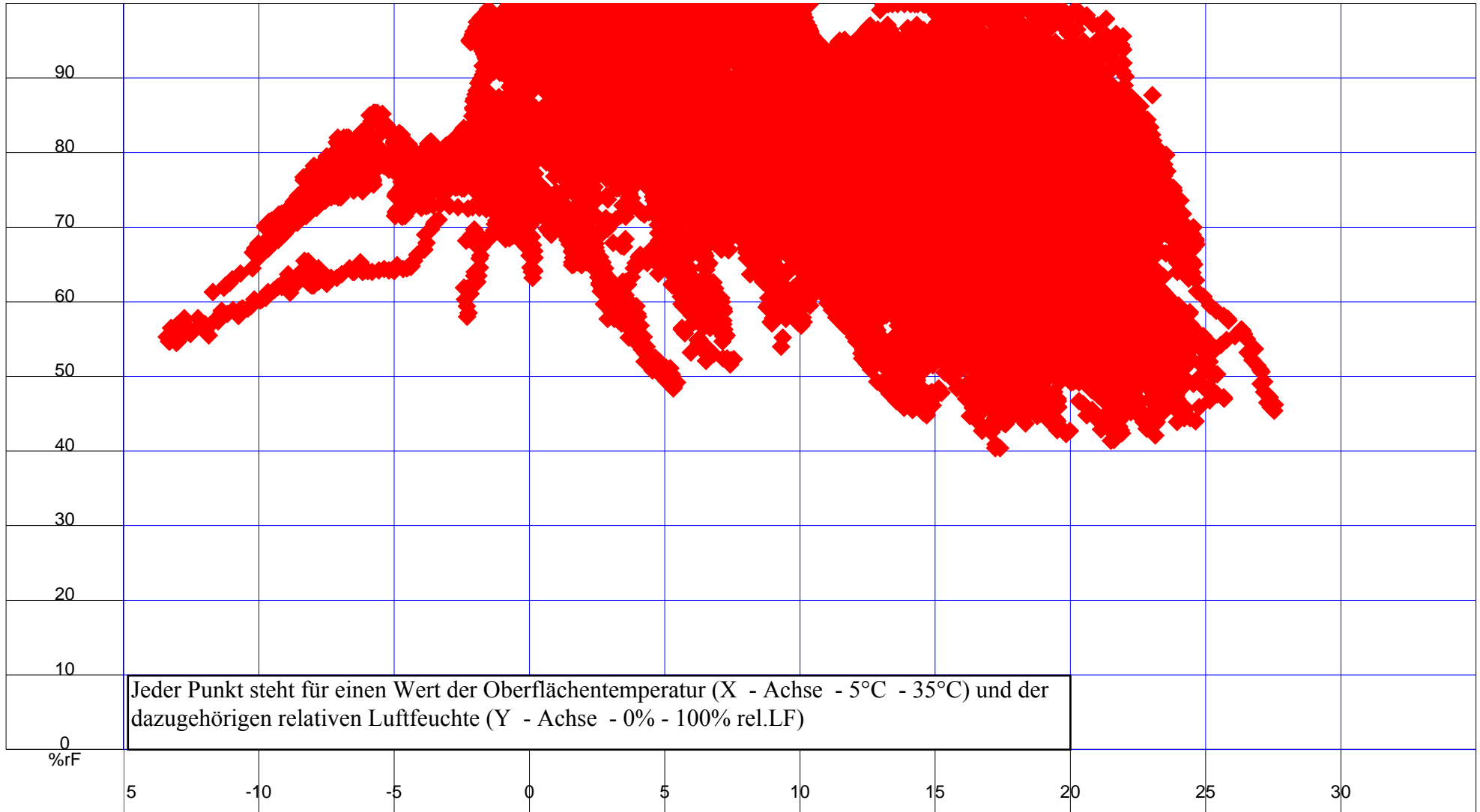


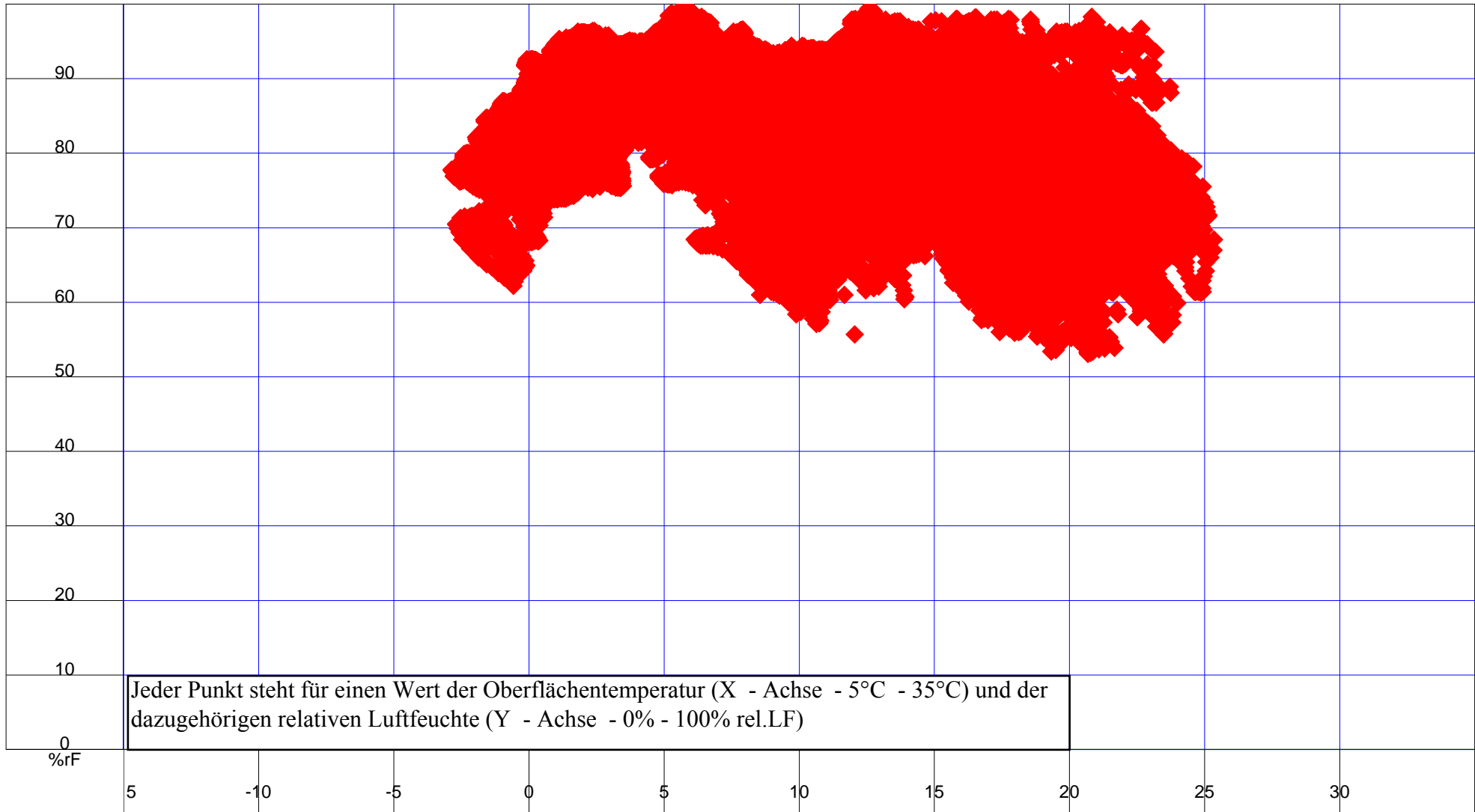


19.03.2018 13:12:13	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Jena-Lichtenhain\Klima\Bearbeitet\Gesamt\Alles.vi2		K:9 g/m ³	1.80	20.20	8.39
Vergleich der abs.LF der Außenluft und des Raumklimas in der Einhausung		K:10 g/m ³	2.77	15.89	8.38
(01.01.2016 - 08.12.2017)		K:7 %rF	55.40	100.00	83.60
rot	- abs.LF Außenluft				
grün	- abs.LF 1,00m vor Wand				
blau	- rel.LF 1,00m vor Wand				





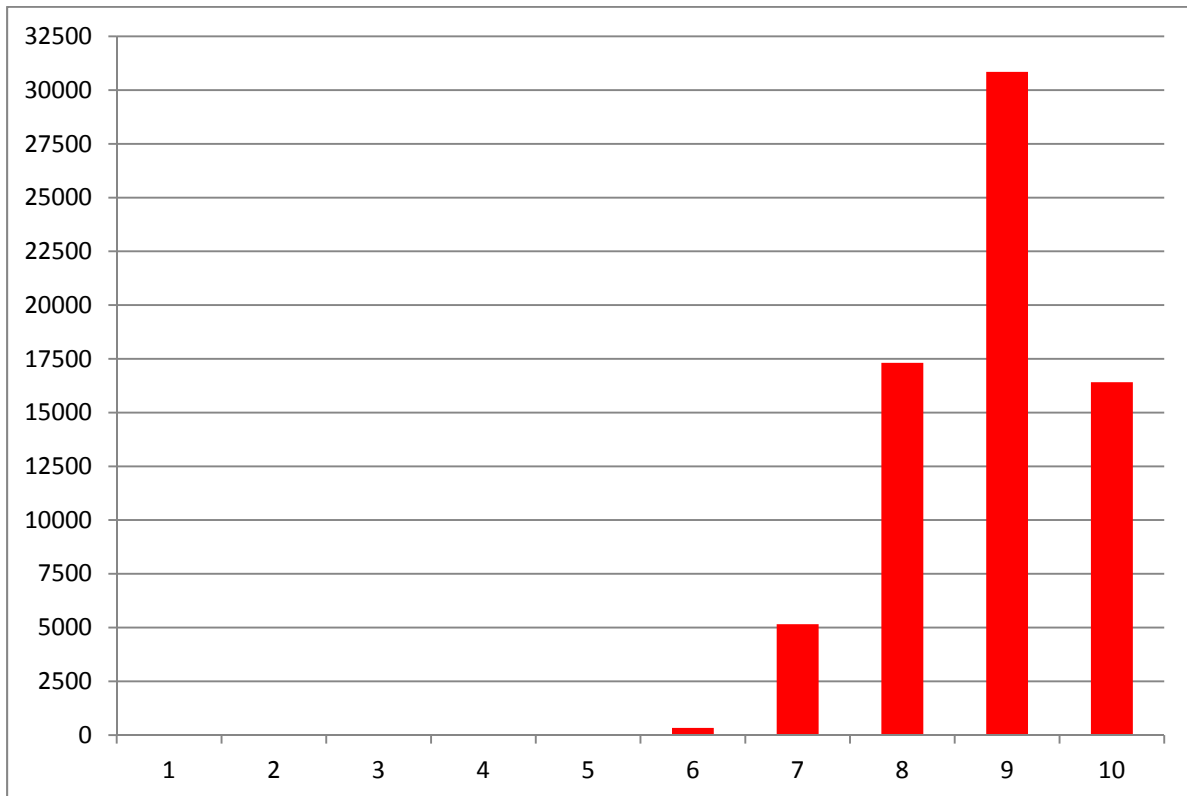






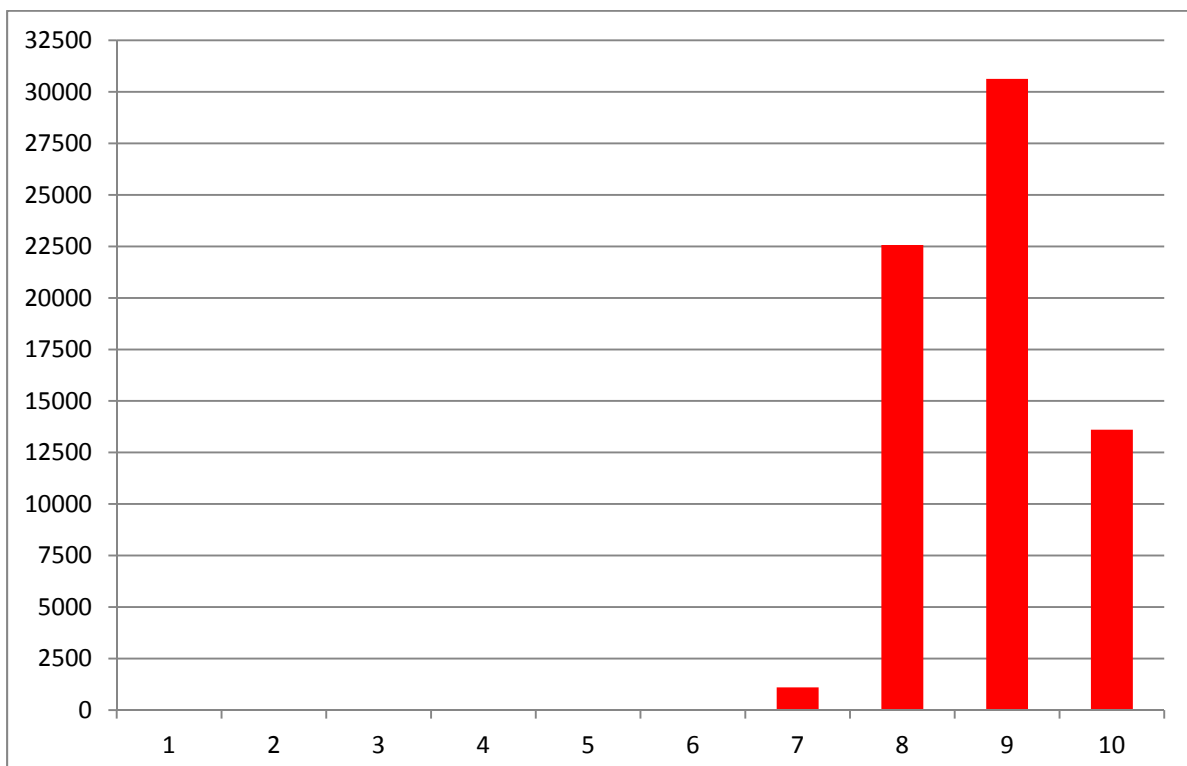
Zustand mit abgedichteter Einhausung Stufe II

Diagramm 20



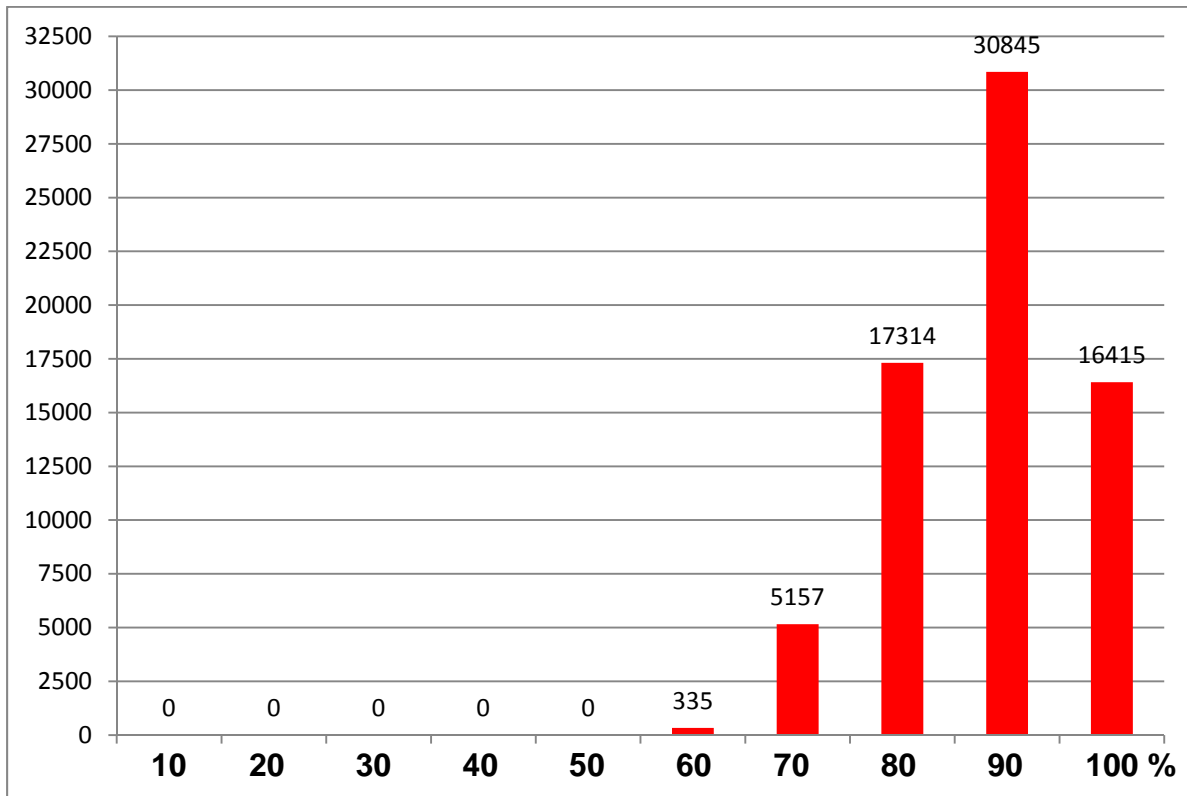
Zustand dauerhafte Einhausung

Diagramm 21



Zustand mit abgedichteter Einhausung Stufe II

Diagramm 20



Zustand dauerhafte Einhausung

Diagramm 21

