

Förderprojekt 31440/01 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

**Praxisorientierte Versuche zur modellhaften
Dekontaminierung aufgrund anthropogenen Handelns
bedingter Schimmelbesiedlungen auf Putzen,
Wandmalereien und Naturstein in der Crodel-Halle
der Moritzburg in Halle**

Abschlussbericht

Erstellt durch:

Ralf Lindemann, Kulturstiftung Sachsen-Anhalt

**Henning Kersten, Uwe Kalisch, Matthias Zötzl, Institut für Diagnostik und Konservierung in
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.**

Karin Petersen, Hochschule HAWK Hildesheim/Holzminde/n/Göttingen

Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung einer starken Schimmelbesiedlung auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodelhalle der Moritzburg, Halle

Anlass und Zielsetzung des Projekts

Ralf Lindemann, Kulturstiftung Sachsen-Anhalt

Die Hallesche Moritzburg gehört zu den eindrucksvollsten spätmittelalterlichen Burganlagen Mitteldeutschlands. Sie wurde um 1500 als prunkvolle und zugleich wehrhafte Residenz der Magdeburger Erzbischöfe errichtet.

Die Moritzburg durchlebte eine wechselvolle Nutzungsgeschichte. Im Jahr 1904 zog das Städtische Museum für Kunst und Kunstgewerbe in die Burganlage ein. Daraus entwickelte sich das heutige Kunstmuseum des Landes Sachsen-Anhalt.

Um 1900 baute die Hallesche Universität verschiedene Räumlichkeiten für die sportliche Ausbildung aus. Charles Crodell malte 1931 im damaligen Gymnastiksaal sein Wandbild „Wettlauf der Atalante und das Hippomenes“. Die Malerei wurde 1933 als „Entartete Kunst“ diffamiert und 1936 übertüncht. Der heutige Name der Crodelhalle geht auf diese Malerei zurück

In den Jahren 2005 bis 2008 baute die damals zuständige Stiftung Moritzburg den West- und den Nordflügel zum Kunstmuseum des Landes Sachsen-Anhalt aus.

Mit dem Bau des neuen Dachtragwerkes bestand die Notwendigkeit der statischen Ertüchtigung des Mauerwerkes des Westflügels. Durch gespülte Bohrungen kam es zu einem massiven Feuchteintrag, der in den Gewölben der Crodelhalle zu einem starken mikrobiellen Befall führte. Daraufhin wurde der Raum versiegelt und war nicht mehr nutzbar, es bestanden erhebliche Gesundheitsgefahren.

Nach dem Wechsel der Zuständigkeit zur heutigen Kulturstiftung Sachsen-Anhalt sollte die Crodelhalle wieder in die Nutzung durch das Kunstmuseum integriert werden. Eine Sanierung des Raumes und die Restaurierung des Crodelschen Wandbildes sind aber erst nach einer erfolgreichen Dekontamination möglich.

Aus diesem Grund wurde ein Forschungsprojekt aufgelegt, in dem die Schadenssituation erfasst und nach geeigneten Methoden zur dauerhaften Dekontamination gesucht werden sollte. Die Methoden sollten die Raumboflächen nicht mit Giften belasten und problemlos wiederholbar sein. Außerdem sollte ein für das erneute Schimmelwachstum ungünstiges Raumklima eingestellt werden und Feuchttransporte in Wände, Decken und Böden unterbunden werden.

Ziel war es, Handlungsempfehlungen für die künftige Sanierung des Raumes und die Restaurierung des Crodelschen Wandbildes zu geben.

Die Kulturstiftung Sachsen-Anhalt dankt an dieser Stelle der deutschen Bundestiftung Umwelt für die großzügige finanzielle Unterstützung des Projektes.

Ebenso zu danken ist den Kooperationspartnern

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

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt und

Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst
Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen

für die erfolgreiche, konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Inhalt

1.	Mauerwerks- und Raumklimauntersuchungen	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Probenahme	3
1.3	Methodik	4
1.4	Ergebnisse	7
1.4.1	Feuchte- und Salzanalysen	7
1.4.2	Mörtelanalysen	19
1.4.3	Kamerabefahrung	24
1.4.4	Aktive Infrarot-Thermographie.....	25
1.4.5	Raumklimauntersuchungen.....	29
1.5	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, Empfehlungen	33
2.	Mikrobiologische Untersuchungen und Erhaltungsstrategien	35
2.1	Einleitung	35
2.2	Projektziele und Fragestellungen	36
2.3	Zur mikrobiellen Belastung in der Crodelhalle	36
2.4	Versuche zur Desinfektion	40
2.4.1	Mikrowellenanwendung.....	40
2.4.2	UV-C Bestrahlung.....	43
2.4.3	Ionisierte Luft.....	44
2.4.4	Anwendung von p-Chloro-meta-Kresol	48
2.5	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse	49
3.	Anlage und Bewertung von Putzmusterflächen, Putzempfehlungen	51
3.1	Einleitung	51
3.2	Ergebnisse der Voruntersuchungen	51
3.3	Putzmuster.....	52
3.3.1	Auswahlkriterien.....	52
3.3.2	Empfehlungen für Putzmuster.....	52
3.3.3	Vorbereitung der Musterflächen.....	53
3.3.4	Anlage der Musterflächen	53
3.4	Nachuntersuchungen an Putzmusterflächen	54
3.4.1	Probenahme	54
3.4.2	Methodik und Analytik	55
3.4.3	Ergebnisse.....	56
3.5	Bewertung der Musterflächen und Putzempfehlungen.....	30
4.	Weiterführende Literatur	62
5.	Anhang.....	64

1. Mauerwerks- und Raumklimauntersuchungen

Henning Kersten, Uwe Kalisch, Jeannine Meinhardt

1.1 Einleitung

In enger Zusammenarbeit zwischen der Stiftung Dome und Schlösser in Sachsen-Anhalt, dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie in Sachsen-Anhalt und dem IDK wurde im Jahr 2013 ein Projekt mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Titel "Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung aufgrund anthropogenen Handelns bedingter Schimmelbesiedlungen auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodell-Halle der Moritzburg in Halle" konzipiert und beantragt. Dieses Projekt setzt sich das Ziel, naturwissenschaftliche Grundlagen für eine nachhaltige, umweltverträgliche Sanierung der durch starken Schimmelbefall kontaminierten Crodell-Halle zu erarbeiten. Das Projekt wurde 2013 unter dem Aktenzeichen 31440/01 bewilligt. Die Untersuchungen am Objekt werden vom IDK in Zusammenarbeit mit der HAWK Hildesheim ausgeführt. Die physikalisch-chemischen Untersuchungen von Mauerwerk, Putz und Anstrich sowie Klimamessungen wurden seit Anfang 2014 vom IDK ausgeführt.

Um den Istzustand der Crodellhalle zu erfassen und Ursachen für den starken Schimmelbefall zu ermitteln, wurden von Beginn des Projektes an zahlreiche Untersuchungen an Mauerwerk, Putz- und Farbschicht vorgenommen. Von zentralem Interesse waren die aktuelle Feuchte- und Salzbelastung des Putzes und des Mauerwerks nach dem starken Feuchteeintrag durch die Baumaßnahmen im Jahre 2008. Weiterhin erfolgte die permanente Erfassung des Raumklimas an verschiedenen Messpunkten um die klimatischen Rahmenbedingungen für das Schimmelwachstum zu beobachten. Die Materialuntersuchungen an der Gemäldewand mittels aktiver Infrarotthermografie und einer Endoskopkamera sollten eine erste Grundlage für die geplante Freilegung und Restaurierung der Wandmalerei von Charles Crodell bilden.

1.2 Probenahme

Die Wände bestehen aus Mischmauerwerk, die Pfeiler in der Raummitte aus Sandstein. Zur Entnahme von Bohrmehl in den Wänden wurden an kleineren Bereichen Putz abgenommen, um die Probenahme in einer Fuge zu gewährleisten. In den Gewölben wurde Ziegelmauerwerk erbohrt. Die Putzstärke betrug an den Wänden ca. 2cm an den Decken 3cm.

Insgesamt wurden 9 Musterflächen mit einer Größe von 1,5x1,5 m festgelegt. Es wurden 12 Tiefenprofile erbohrt. Die Tiefenprofile umfassen insgesamt 64 Feuchtebestimmungen, 64 Bestimmungen der Summe der Löslichen Bestandteile und 29 Einzelsalzbestimmungen. Außerdem erfolgte die Entnahme von 2 Putz- und 2 Mörtelproben zur Mörtelanalyse und 2 Farbproben zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionseigenschaften.

Die Auswahl der Musterflächen erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

MFL 01: Nordwand, Bereich in dem bereits im Jahr 2006 Feuchteuntersuchungen erfolgt sind

MFL 02: Westwand, intakter Bereich

MFL 03: Westwand, schadhafter Bereich

MFL 04: Südwand, glänzender Bereich des Anstriches

MFL 05 und 06: Ostwand, schadhafte, augenscheinlich feuchte Bereiche

MFL 07 und 08: Fußboden, augenscheinlich trockener und feuchter Bereich

MFL 09: Decke, Übergang zwischen starker Schimmelbelastung und augenscheinlich unbelasteten Flächen

Zusätzlich wurde im Gewölbe oberhalb eines Pfeilers und im Pfeiler selbst jeweils ein Tiefenprofil erbohrt.

Außerdem erfolgte eine Kamerabefahrung des Zwischenraums hinter dem Crodel-Gemälde und die Untersuchung der Gemälde-Wand mittels aktiver IR-Thermographie.

Von Frühjahr 2014 bis zum Projektende wurden an verschiedenen Stellen in der Crodel-Halle kontinuierliche Klimamessungen durchgeführt.

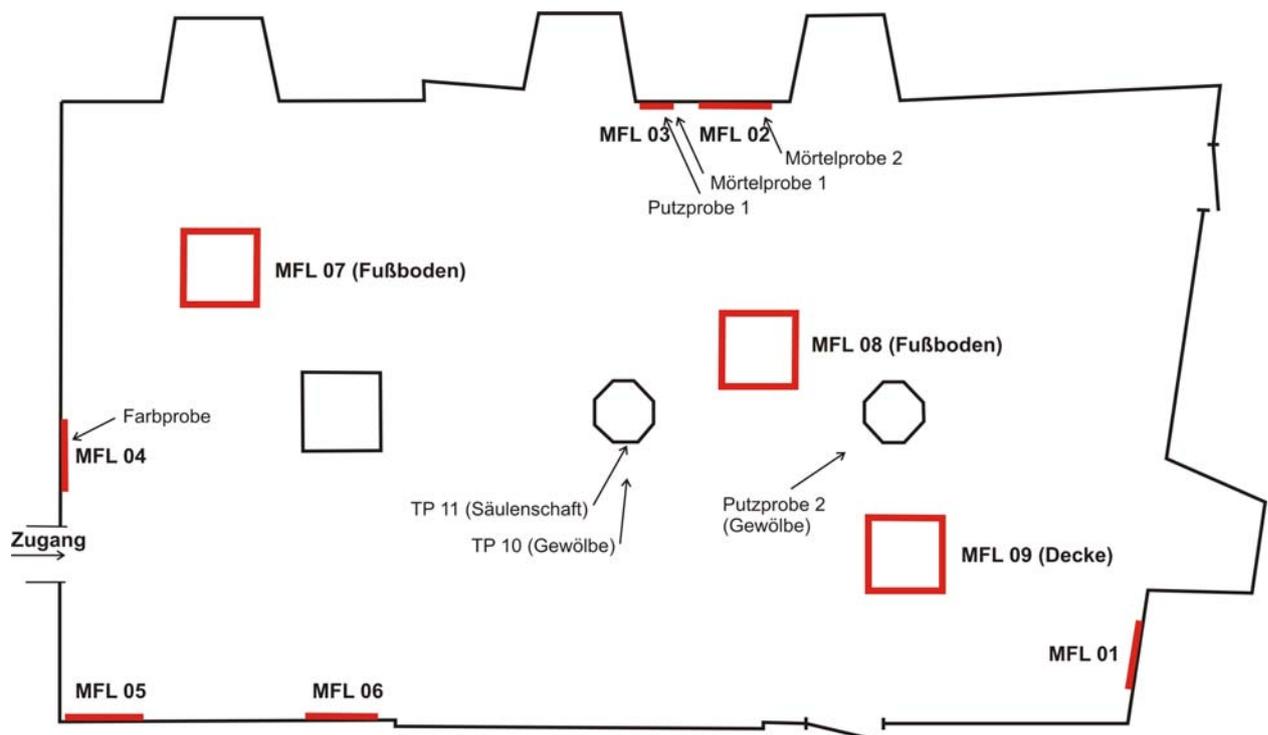


Abb. 1: Schematischer Grundriss der Crodelhalle mit Lage der Musterflächen und weiterer Probenahmepunkte

1.3 Methodik

Feuchtebestimmung mit der Darrmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der für die Salzanalytik vorgesehenen Bohrmehlproben wurde durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt.

Quantitative Salzanalyse

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von zwei der Bohrmehlproben eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle (3) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (2) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den

ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 1: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	gering			mittel			hoch		
		<0,5	<0,1	>0,024	0,5-1,5	0,1-0,5	>0,077	>1,5	>0,5	<0,77
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5-1,5	0,1-0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1-0,3	0,05-0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
Chlorid [M.-%]	< 0,008	<0,2	<0,05	>0,008 <0,026	0,2-0,5	0,05-0,5	>0,026 <0,08	>0,5	>0,5	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben des Tiefenprofils (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entspr. Tabelle 1.

Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d ist ein Maß für den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Bauteils. Sie beschreibt, den wievielfachen Widerstand eine Baustoffschicht der Dicke d der Diffusion entgegengesetzt als eine gleich dicke Luftschicht.

$$s_d = \mu \cdot d$$

Tab. 2: Klassen der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte (V), (Rusam, 2011)

Klasse	Anforderung	
	$g/m^2 \cdot d$	s_d -Wert
V_0	keine Anforderung	
V_1 hoch	> 150	< 0,14m
V_2 mittel	≤ 150	$\geq 0,14m$
	> 15	< 1,4m
V_3 niedrig	≤ 15	$\geq 1,4m$

Dazu wurde eine aus der Farbschicht präparierte Scheibe auf der Öffnung eines Kunststoffbechers mit Hilfe von Sanitärkitt dichtend befestigt. Durch eine wiederverschließbare Öffnung an der Seite des Bechers erfolgte die Befüllung des Gefäßes mit einigen ml Wasser. Der Becher mit aufgekitteter Farbprobe wurde leer und nach dem Befüllen gewogen. Anschließend wurde die Versuchsanordnung in einen Klimaschrank mit konstanter Luftfeuchte und Temperatur gegeben und nach mehreren Wochen erneut gewogen. Um sicherzugehen, dass eine eventuelle Gewichtsabnahme des Kitts durch Verdunsten von Lösungsmitteln keinen Einfluss auf das Messergebnis hat, wurde ein Stück Sanitärkitt mit entsprechender Oberfläche als Blindprobe beigegeben.



Abb. 2: Versuchsanordnung im Klimaschrank zur Bestimmung der Diffusionseigenschaften des Anstriches

Aktive IR-Thermographie

Für die infrarot-thermographischen Untersuchungen wurde eine VARIOSCAN 3021 ST der Firma InfraTec eingesetzt. Die Kamera arbeitet im Wellenlängenbereich zwischen 8 - 12 μm . Die Auswertung erfolgte mit einer Software derselben Firma („IRBIS-professional V3.2“). Die vom Körper ausgesendete elektromagnetische Strahlung wird von der Kamera zweidimensional hochauflösend bestimmt und von einer Software in einen Farbcode übertragen. Die Auswertung der Messaufnahmen erfolgt zumeist im sogenannten Differenzbild. Dabei werden die Temperaturwerte eines Messbildes für jeden Pixel subtrahiert. Das Bild zeigt somit ausschließlich die Temperaturdifferenz relativ zum Ausgangsbild. Damit werden leichte Temperaturdifferenzen in der Absoluttemperatur ignoriert.

Die gemessene Strahlung setzt sich zusammen aus Emission, Transmission und der Reflektion der Strahlung des Messobjektes. Im Fall der Untersuchung von Wandmalereien im Innenraum können verschiedene Parameter, die die Messung beeinflussen könnten, unberücksichtigt bleiben. Aufgrund der geringen Distanz der Messanordnung in normaler Atmosphäre, in der die Infrarotstrahlung in großen Bereichen des infraroten Spektrums nahezu unbeeinflusst bleibt, sind Signalabschwächungen in der Messstrecke nicht zu erwarten. Aus der Umgebung in die Messstrecke eintretende Strahlung ist vernachlässigbar.

Bei der in diesem Fall angewendeten aktiven Thermographie wird Energie in das zu untersuchende Objekt eingebracht, um messbare Temperaturdifferenzen zu erhalten. Die Geschwindigkeit der Wanderung der Wärmefront hängt von verschiedenen thermischen Materialeigenschaften wie Dichte, Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit, Struktur und unter der Oberfläche befindlichen Störstellen ab. Zur aktiven Induzierung eines Temperaturgradienten kamen zwei Infrarotstrahler mit je 2x 1500 Watt zum Einsatz. Die beiden Strahler wurden senkrecht zur Untersuchungsfläche so positioniert, dass eine annähernd homogene Erwärmung der beiden Testfelder erreicht werden konnte. Nach dem Abschalten der Heizeinheiten wurden sie aus dem Untersuchungsbereich gebracht und es erfolgten die Thermographieaufnahmen.

1.4 Ergebnisse

1.4.1 Feuchte- und Salzanalysen

Musterfläche 1:

Die in und oberhalb der Musterfläche 1 analysierten Feuchtwerte können allesamt als unkritisch angesehen werden. Im Vergleich mit den Messungen vom August 2006, ist keine Veränderung der Feuchtesituation erkennbar. Die Einzelsalzanalysen ergeben z.T. relevante Gehalte an Sulfaten, Chloriden und auch Nitraten. In größeren Tiefen sind hohe Gehalte an Nitraten auffällig.



Abb. 3: Musterfläche 1 an der Nordwand der Crodelhalle

Tab. 3: Tiefenprofile 1 und 2, MFL 01: Höhe: 1,15 und 2,25m

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_BL1_TP1/1	0-1	2,73	0,64
MFL_BL1_TP1/2	1-2	1,77	0,50
MFL_BL1_TP1/3	2-3	1,96	0,47
MFL_BL1_TP1/4	3-5	1,83	0,92
MFL_BL1_TP1/5	5-10	2,26	1,16
MFL_BL1_TP1/6	20-37	1,55	1,04
MFL_BL2_TP2/1	0-1	1,77	0,77
MFL_BL2_TP2/2	1-2	1,05	0,60
MFL_BL2_TP2/3	2-3	1,86	0,53
MFL_BL2_TP2/4	3-5	2,48	1,04
MFL_BL2_TP2/5	5-10	2,86	1,97
MFL_BL2_TP2/6	20-30	1,44	0,96

Tab. 4: Tiefenprofil 5, Höhe 2,50m (Probenahme August 2006, vor und nach gespülten Bohrungen)

Probe	Tiefe [cm]	Feuchte Vor- messungen [M.%]	Feuchte Nach- messungen [M.%]
MB_NF_TP5_1	0-5	1,32	1,27
MB_NF_TP5_2	5-10	1,47	1,38
MB_NF_TP5_3	10-15	0,91	1,01
MB_NF_TP5_4	15-20	0,63	0,73
MB_NF_TP5_5	20-25	0,71	0,59
MB_NF_TP5_6	25-30	0,46	0,63
MB_NF_TP5_7	30-35	0,50	0,61

Tab. 5: Tiefenprofil 1, MFL 01: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_BL1_TP1/1 0-1	0,363 0,005	0,053 0,001	0,152 0,004	0,048 0,002	0,595 0,030	0,096 0,002	0,212 0,003
MFL_BL1_TP1/3 2-3	0,277 0,004	0,037 0,001	0,115 0,003	0,028 0,001	0,496 0,023	0,071 0,002	0,181 0,002
MFL_BL1_TP1/5 5-10	0,316 0,004	0,075 0,001	0,201 0,016	0,050 0,002	0,476 0,023	0,198 0,008	0,684 0,002
MFL_BL1_TP1/6 20-37	0,155 0,004	0,070 0,001	0,238 0,016	0,048 0,002	0,295 0,005	0,193 0,008	0,654 0,002

Tab. 6: Tiefenprofil 2, MFL 01: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_BL2_TP2/1 0-1	0,208 0,005	0,039 0,001	0,208 0,004	0,034 0,001	0,449 0,006	0,068 0,002	0,241 0,003
MFL_BL2_TP2/3 2-3	0,267 0,006	0,031 0,001	0,183 0,005	0,028 0,001	0,481 0,007	0,060 0,002	0,225 0,003
MFL_BL2_TP2/5 5-10	0,280 0,004	0,085 0,001	0,500 0,016	0,067 0,003	0,475 0,023	0,168 0,008	1,398 0,011
MFL_BL2_TP2/6 20-30	0,160 0,004	0,045 0,001	0,275 0,016	0,051 0,002	0,245 0,004	0,124 0,001	0,660 0,011

Musterfläche 2:

Bei der Musterfläche 2 handelt es sich um einen augenscheinlich intakten, ungeschädigten Wandbereich. Die in Musterfläche 2 analysierten Feuchtwerte können ebenfalls als unkritisch angesehen werden.

Hier sind neben leicht erhöhten Sulfatgehalten an der Oberfläche, keine relevanten Salzbelastungen nachweisbar. Im Bereich der Musterfläche 2 wurden weiterhin eine Putz- und eine Setzmörtelprobe zur weiteren Analyse entnommen.



Abb. 4: Musterfläche 2 an der Westwand der Crodellhalle, der Pfeil lokalisiert den Punkt der Probenahme

Tab. 7: Tiefenprofil 1, MFL 02

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_02_1	0-1	1,78	0,49
MFL_02_2	1-2	0,49	0,49
MFL_02_3	2-3	0,78	0,64
MFL_02_4	3-5	0,53	0,84
MFL_02_5	5-10	0,39	0,86
MFL_02_6	20-30	0,40	1,08

Tab. 8: Tiefenprofil 1, MFL 02: Quantitative Salzanalyse aus den Tiefen 0-1 und 2-3cm

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_02_1 0-1	0,296 0,004	0,005 0,001	0,082 0,003	0,019 0,001	0,529 0,024	0,045 0,002	0,058 0,002
MFL_02_3 2-3	0,061 0,005	0,034 0,001	0,067 0,004	0,021 0,001	0,128 0,006	0,098 0,002	0,098 0,003

Musterfläche 3:

Die in Musterfläche 3 umfasst einen augenscheinlich schadhafte Bereich an der Westwand der Crodellhalle. Ein Feuchteintrag hat dort zum derzeitigen Schadensbild geführt. Die analysierten Feuchtwerte

liegen hier auch etwas höher als in den Musterflächen 1 und 2. Sie können jedoch ebenfalls als unkritisch angesehen werden. Allerdings wurden durch den Feuchteintrag bauschädliche Salze transportiert und angereichert. Neben relevanten Sulfatgehalten sind in Musterfläche 3 sowohl an der Oberfläche, als auch in das Mauerwerk hinein, relevante Nitratgehalte vorhanden. Hier wurden ebenfalls eine Putz- und eine Setzmörtelprobe entnommen.



Abb. 5: Musterfläche 3 an der Westwand der Crodellhalle, der Pfeil lokalisiert den Punkt der Probennahme

Tab. 9: Tiefenprofil 1, MFL 03

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_03_1	0-1	0,87	1,14
MFL_03_2	1-3	0,89	1,29
MFL_03_4	3-5	2,61	1,79
MFL_03_5	5-10	3,51	2,07
MFL_03_6	20-30	1,81	2,16

Tab. 10: Tiefenprofil 1, MFL 03: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_03_1 0-1	0,067 0,005	0,018 0,001	0,245 0,020	0,039 0,002	0,159 0,006	0,076 0,002	0,119 0,003
MFL_03_4 3-5	0,295 0,004	0,025 0,001	0,751 0,016	0,070 0,003	0,601 0,023	0,090 0,002	0,156 0,002
MFL_03_5 5-10	0,420 0,004	0,030 0,001	0,305 0,016	0,066 0,003	0,625 0,023	0,095 0,002	0,123 0,002
MFL_03_6 20-30	0,253 0,008	0,021 0,001	0,500 0,034	0,039 0,002	0,685 0,009	0,130 0,003	0,153 0,005

Musterfläche 4:

In der Musterfläche 4 weist die Wandfarbe einen deutlichen Glanz auf. Oberhalb der Musterfläche ist die Oberfläche hingegen stumpf. In den glänzenden Bereichen ist das Bindemittel der Farbe an die Oberfläche getreten. Dies kann durch Feuchteinwirkung geschehen sein. Um abzuklären, ob an dieser Wand temporär Kondensation auftritt, wurde auf Musterfläche 4 ein Klimamessgerät mit Oberflächenfühler installiert.



Abb. 6: Musterfläche 4 an der Südwand der Crodellhalle, direkt neben dem provisorischen Zugang



Abb. 7: Musterfläche 4: gut ist die glänzende Oberfläche des Anstriches zu erkennen

Um zu ermitteln, ob die in der Crodellhalle verwendeten Anstriche eine Trocknung feuchter Wandbereiche behindern, wurde eine aus Musterfläche 4 entnommene Farbprobe auf ihre Diffusionseigenschaften hin untersucht.

Anhand der Messergebnisse erfolgte anschließend die Ermittlung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (s_d) durch Berechnung.

Der ermittelte s_d -Wert beträgt **1,31**.

Damit ist die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte (V) als mittel bis niedrig einzustufen. Demzufolge weist der Anstrich der Crodellhalle deutlich diffusionshemmende Eigenschaften auf und behindert so die Trocknung feuchtebelasteter Wandbereiche.

Musterfläche 5:

Die Musterfläche 5 liegt an der Ostwand, direkt an der Ecke zur Südwand. Dieser Wandbereich ist von der höher gelegenen Hofseite aus direkt erdberührt. Hier sind sämtliche Feuchtwerte deutlich erhöht. Im rechten und unteren Bereich von Musterfläche 5 ist eine Vergrünung durch den Feuchteeintrag erkennbar. Der Anstrich löst sich teilweise ab und im Putz treten Hohlstellen auf. Das sehr nahe der Ecke geplante Tiefenprofil musste aus diesem Grund eher in die Mitte der Musterfläche verschoben werden. Weiterhin sind auf der Oberfläche Salzausblühungen zu beobachten. Neben deutlicher Feuchtebelastung ist das Auftreten bauschädlicher Salze an der Oberfläche zu beobachten. Hier treten relevante Konzentrationen von Sulfat und Nitrat auf. Aufgrund der höheren Magnesiumgehalte in dieser Probe ist auch das Vorkommen leicht löslicher Magnesiumsalze möglich.



Abb. 8: Musterfläche 5 an der Ostwand der Crodellhalle, der Pfeil lokalisiert den Punkt der Probennahme



Abb. 9: Musterfläche 5 an der Ostwand der Crodelhalle: Salzausblühungen und Farbablösungen

Tab. 11: Tiefenprofil 1, MFL 05

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_05_1	0-1	2,23	7,46
MFL_05_2	1-2	0,81	7,45
MFL_05_3	2-3	<0,12	7,56
MFL_05_4	3-5	0,20	5,30
MFL_05_5	5-10	0,24	5,61
MFL_05_6	10-20	0,21	6,26
MFL_05_7	20-27	0,22	7,22

Tab. 12: Tiefenprofil 1, MFL 05: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_05_1	0,358	0,104	0,179	0,026	0,981	0,119	0,178
0-1	0,009	0,002	0,007	0,001	0,052	0,003	0,005

Musterfläche 6:

Der für Musterfläche 5 beschriebene Zustand, trifft auch auf Musterfläche 6 zu. Auch hier führt die direkte Erdberührung des Wandbereiches zu einer Auffeuchtung. Hier treten sogar leicht kritische Feuchtwerte von über 8 M.% auf. Während an der Oberfläche besonders hohe Konzentrationen von Nitrat auftreten, sind weiter in der Tiefe alle untersuchten Schadsalze in relevanten Konzentrationen vorhanden. Der Nachweis höherer Kaliumkonzentrationen legt das Vorhandensein leicht löslicher Schadsalze wie Kaliumnitrat oder Kaliumsulfat nahe.



Abb. 10: Musterfläche 6 an der Ostwand der Crodellhalle, der Pfeil lokalisiert den Punkt der Probennahme

Tab. 13: Tiefenprofil 1 und Oberflächenprobe über Hohlstelle, MFL 06

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_06_1	0-1	3,81	6,70
MFL_06_2	1-2	3,13	7,63
MFL_06_3	2-3	2,21	8,39
MFL_06_4	3-5	1,23	8,40
MFL_06_5	5-10	0,24	7,56
MFL_06_6	10-20	<0,12	2,31
MFL_06_7	20-30	<0,12	5,83
MFL_06_xx	1-2	6,45	5,87

Tab. 14: Tiefenprofil 1, MFL 06: Quantitative Salzanalyse aus den Tiefen 0-1 und 2-3cm

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_06_1 0-1	0,412 0,007	0,082 0,001	0,617 0,027	0,126 0,005	0,947 0,037	0,194 0,002	0,308 0,004
MFL_06_3 2-3	0,276 0,008	0,031 0,001	0,614 0,033	0,063 0,003	0,768 0,046	0,201 0,003	0,216 0,005
MFL_06_4 3-5	0,160 0,005	0,023 0,001	0,385 0,019	0,025 0,001	0,427 0,026	0,076 0,002	0,108 0,003

Musterflächen 7 und 8:

Die Musterflächen 7 und 8 wurden auf dem Fußboden der Crodellhalle angelegt. Bei der obersten Schicht des offenliegenden Bodens handelt es sich um einen Fußbodenbelag aus organischen Zuschlägen und einem, zumindest zum Teil, mineralischen Bindemittel. Dabei befindet sich MFL 07 in einem augenscheinlich trockenen, MFL 08 dagegen in einem feucht erscheinenden Bereich. Eine vorherige Differenzierung der Feuchte mit Hilfe eines Holzfeuchtemessgerätes gelang nicht, da das Gerät in allen Bereichen sehr hohe Feuchten anzeigte. Die Analysen der Bohrmehlproben bestätigten das. Die oberste Schicht des Fußbodens weist in allen Bereichen ähnliche, sehr hohe Feuchten auf. Die Summe der löslichen Bestandteile ist ebenfalls extrem hoch. Nur ein Bruchteil dieser Menge wird durch die analysierten Salze abgedeckt. Hier treten besonders hohe Konzentrationen von Chloriden auf. Denkbar ist, dass neben den analysierten, anorganischen Salzen auch organische Verbindungen in Lösung gegangen sind. Ebenfalls denkbar ist die Anwesenheit bestimmter Hydrate. Ab einer Tiefe von ca. 3cm ist das Bohrmehl deutlich trockener. Von etwa 15 bis 30 cm wurde Ziegel erbohrt, darunter bis 40cm Tiefe graueschwärzliches Bohrmehl.

Tab. 15: Tiefenprofil 1, MFL 07

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_07_FB_tr_1	0-2	24,58	23,91
MFL_07_FB_tr_2	2-5	5,73	4,65

Tab. 16: Tiefenprofil 1, MFL 08

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_08_FB_fe_1	0-2	28,58	22,72
MFL_08_FB_fe_2	2-5	6,39	4,65
MFL_08_FB_fe_3	20-35	1,20	1,05
MFL_08_FB_fe_4	35-40	2,81	1,94

Tab. 17: Tiefenprofile 1, MFL 07 und 08: Quantitative Salzanalyse jeweils aus der Tiefe 0-2cm

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_07_FB_tr_1 0-2	0,380 0,025	1,996 0,004	0,745 0,021	0,081 0,003	1,014 0,029	3,565 0,048	0,084 0,014
MFL_08_FB_fe_1 0-2	0,367 0,033	1,672 0,006	0,449 0,027	0,087 0,003	0,693 0,037	4,465 0,061	0,108 0,018

Musterfläche 9:

Die Musterfläche 9 befindet sich an der Decke zwischen dem nördlichsten Pfeiler und der Ostwand. Sie umfasst den Übergang zwischen starker Schimmelbelastung und augenscheinlich unbelasteten Flächen. Eine aktuelle Feuchtebelastung liegt nicht vor. Das Tiefenprofil 1 im stark schimmelbelasteten Bereich weist sehr geringe Feuchten auf. Das Tiefenprofil 2 im augenscheinlich unbelasteten Bereich weist in der Tiefe (zum Pfeiler hin) leicht erhöhte, jedoch noch unkritische Feuchten auf. An dieser Stelle konnte sich die ehemals eingetragene Feuchte länger halten, da das Gewölbe hier mächtiger ist als bei dem scheidelnäher liegenden Tiefenprofil 1. Als Schadsalze treten in diesem Bereich lediglich relevante Mengen an Sulfat auf.



Abb. 11: Musterfläche 9 an der Decke der Crodellhalle, die Pfeile lokalisieren die Tiefenprofile im belasteten und unbelasteten Bereich

Tab. 18: Tiefenprofil 1 (belastet), MFL 09

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_09_b_1	0-1	2,15	0,44
MFL_09_b_2	1-2	1,87	0,43
MFL_09_b_3	2-5	2,66	0,57
MFL_09_b_4	5-10	0,28	0,49
MFL_09_b_5	20-30	0,15	0,35

Tab. 19: Tiefenprofil 1 (belastet), MFL 09: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_09_b_1 0-1	0,379 0,006	0,039 0,001	0,016 0,001	0,007 0,000	0,790 0,036	0,036 0,002	0,017 0,003
MFL_09_b_3 2-5	0,587 0,004	0,030 0,001	0,018 0,001	0,008 0,000	1,355 0,023	0,031 0,002	0,018 0,002

Tab. 20: Tiefenprofil 2 (unbelastet), MFL 09

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_09_ub_1	0-1	1,10	0,36
MFL_09_ub_2	1-2	1,95	0,39
MFL_09_ub_3	2-5	0,37	0,05
MFL_09_ub_4	5-10	0,59	1,89
MFL_09_ub_5	20-30	0,31	2,32

Tab. 21: Tiefenprofil 2 (unbelastet), MFL 09: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_09_ub_1 0-1	0,161 0,004	0,033 0,001	0,012 0,001	0,006 0,000	0,372 0,005	0,037 0,002	0,020 0,002

Tiefenprofile 10 und 11:

Die Tiefenprofile 10 und 11 wurden an bzw. oberhalb der mittleren Säule entnommen. Am Tiefenprofil 10 (sowie auch am unbelasteten Tiefenprofil in MFL 09) wird deutlich, dass in den massigen Gewölben eine Akkumulation von Feuchte stattgefunden haben muss. Hier wurden etwas erhöhte - wenn auch unkritische - Feuchten detektiert. Im Gegensatz dazu konnten die dünneren Scheitelbereiche der Gewölbe schneller abtrocknen und sind deutlich trockener (belastetes Tiefenprofil in MFL 09). Ebenfalls trockener ist der Schaft der Säule. An der Oberfläche des Gewölbes erfolgte durch den Feuchteeintrag eine Aufkonzentration von Schadsalzen. Neben relevanten Nitratkonzentrationen ist eine sehr hohe Konzentration von Sulfat vorhanden. Bei Tiefenprofil 10 treten an der Oberfläche auch deutlich höhere Magnesiumgehalte auf.

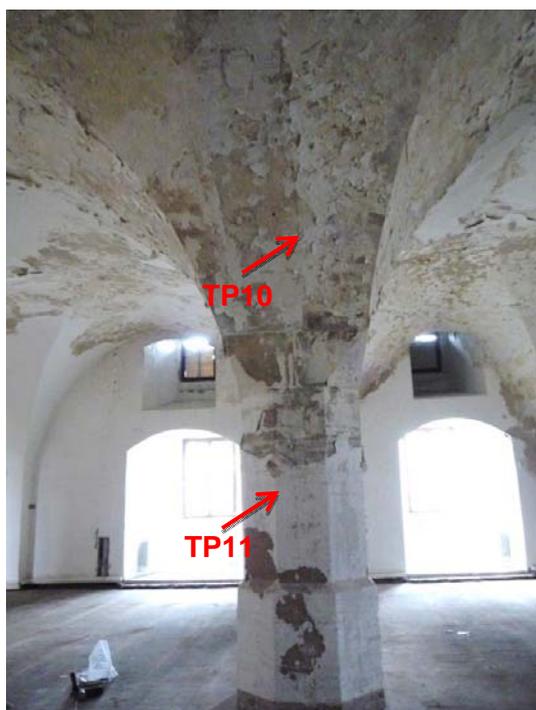


Abb. 12: Tiefenprofile 10 und 11 am Gewölbe und am Pfeilerschaft, Ostseite bzw. Südostseite

Tab. 22: Tiefenprofil 10

Probe	Tiefe [cm]	Σ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_10_1	0-1	4,99	1,77
MFL_10_2	1-2	2,04	2,27
MFL_10_3	2-5	0,55	3,08
MFL_10_4	5-10	0,34	2,51
MFL_10_5	20-30	<0,12	1,38

Tab. 23: Tiefenprofil 10: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_10_1 0-1	0,764 0,005	0,181 0,001	0,054 0,004	0,026 0,001	2,682 0,151	0,022 0,002	0,115 0,003
MFL_10_2 1-2	0,345 0,005	0,053 0,001	0,050 0,004	0,022 0,001	0,663 0,023	0,027 0,002	0,108 0,002

Tab. 24: Tiefenprofil 11

Probe	Tiefe [cm]	∑ wasser- lösl. Be- standteile [M.%]	Feuchte [M.%]
MFL_11_1	0-1	4,62	1,08
MFL_11_2	1-2	1,43	0,94
MFL_11_3	2-5	0,89	0,69
MFL_11_4	5-10	1,08	0,92
MFL_11_5	20-30	0,48	0,98

Tab. 25: Tiefenprofil 11: Quantitative Salzanalyse

Probe / Tiefe [cm]	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca ²⁺ [+/-]	Mg ²⁺ [+/-]	K ⁺ [+/-]	Na ⁺ [+/-]	SO ₄ ²⁻ [+/-]	Cl ⁻ [+/-]	NO ₃ ⁻ [+/-]
MFL_11_1 0-1	0,785 0,007	0,089 0,001	0,057 0,001	0,031 0,001	1,962 0,040	0,069 0,003	0,290 0,004
MFL_11_2 0-2	0,480 0,020	0,051 0,004	0,040 0,003	0,010 0,000	0,581 0,023	0,063 0,008	0,222 0,011
MFL_11_3 2-5	0,104 0,006	0,048 0,001	0,035 0,001	0,015 0,001	0,166 0,006	0,050 0,002	0,152 0,003
MFL_11_4 5-10	0,157 0,004	0,036 0,001	0,033 0,001	0,015 0,001	0,381 0,023	0,046 0,002	0,152 0,002

1.4.2 Mörtelanalysen

Putzproben

Neben den zahlreichen Bohrmehlproben wurden in der Crodellhalle auch 2 Putzproben entnommen. Die Proben stammen aus dem schadhaften Bereich in Musterfläche 3 (CRO_P1) und von der südöstlichen Rippe des Gewölbes oberhalb des nördlichsten Pfeilers (CRO_P2) - einem Bereich der völlig intakt scheint.

Die beiden Putzproben sind sich relativ ähnlich. Es handelt sich um einen Kalkputz mit geringem hydraulischem Anteil. Probe 1 weist einen leichten Sulfatgehalt und einen deutlichen Mg-Gehalt auf. Das Verhältnis zwischen Bindemittel und Zuschlägen liegt bei Probe 1 bei ca. 5:1. Das würde für einen relativ mageren Putz sprechen. Bei Probe 2 liegt das Verhältnis bei ca. 4:1.

Problematisch erscheinen die erhöhten Mg-Gehalte in Verbindung mit einer Feuchtebelastung. Im Zusammenspiel mit Sulfat kann sich beispielsweise leicht lösliches MgSO₄ bilden. Weiterhin wurde von den Zuschlägen der Putzprobe CRO_P2 eine Siebanalyse angefertigt um bei einer Sanierung der Crodellhalle den Putz entsprechend anpassen zu können.



Abb. 13: Probenahme am nördlichen Pfeiler

Tab. 26: Mörtelanalyse: Ergebnisse der chemischen Analyse

Probe Nr.:	Glühverlust bei 1100°C Ma%	HCL-unlös. + lös. SiO ₂ Ma%	HCL-unlös. Ma%	HCL-lös. SiO ₂ Ma%	Me ₂ O ₃ Ma%	CaO Ma%	MgO Ma%	CO ₂ Ma%	SO ₃ Ma%
CRO_P1	6,72	82,83	82,76	0,08	1,72	6,94	0,98	5,64	0,43
CRO_P2	7,65	81,53	80,48	1,05	0,61	8,24	0,74	5,82	0,18

Tab. 27: Mörtelanalyse: Berechnung der salzsäurelöslichen Bestandteile und des Glühverlustes auf die Summe aller salzsäurelöslichen Probenbestandteile

Probe Nr.:	Glühverlust bei 1100°C Ma%	HCL-lös. SiO ₂ Ma%	Me ₂ O ₃ Ma%	CaO Ma%	MgO Ma%	CO ₂ Ma%	SO ₃ Ma%	CaO / SiO ₂ Ma%	CaO freies Ma%
CRO_P1	38,98	0,46	9,98	40,26	5,68	32,71	2,49	87,52	4,84
CRO_P2	39,19	5,38	3,13	42,21	3,78	29,82	0,92	7,85	8,91

Tab. 28: Mörtelanalyse: Thermische Zersetzung der Proben in Ma %

Probe	Temperaturstufen in °C							
	Angaben der Probenwerte in Ma %							
Nr.:	150	300	450	600	700	800	900	1050
CRO_P1	0,29	0,38	0,57	1,00	3,47	1,40	0,07	0,05
CRO_P2	0,33	0,44	0,44	0,71	3,13	2,62	0,08	0,06

Tab. 29: Mörtelanalyse: Thermische Zersetzung der Proben in Ma % bezogen auf den Bindemittelgehalt der Proben

Probe	Temperaturstufen in °C							
	Angaben der Probenwerte in Ma %							
Nr.:	150	300	450	600	700	800	900	1050
CRO_P1	1,68	2,20	3,31	5,80	20,13	8,12	0,41	0,29
CRO_P2	1,69	2,25	2,25	3,64	16,03	13,42	0,41	0,31

Tab. 30: Siebanalyse: Korngrößenanalyse

Probe Nr.:	Korngrößenanalyse									
	in mm									
	< 0,1	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	> 32,0
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0		
CRO_P2	1,55	16,87	35,83	25,67	9,07	6,09	2,56	2,36		

Tab. 31: Siebanalyse: Berechnung der Sieblinie

Probe Nr.:	Siebdurchgang									
	in mm									
	0,1	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0	>32,0
CRO_P2	1,55	18,42	54,25	79,92	88,99	95,08	97,94	100		

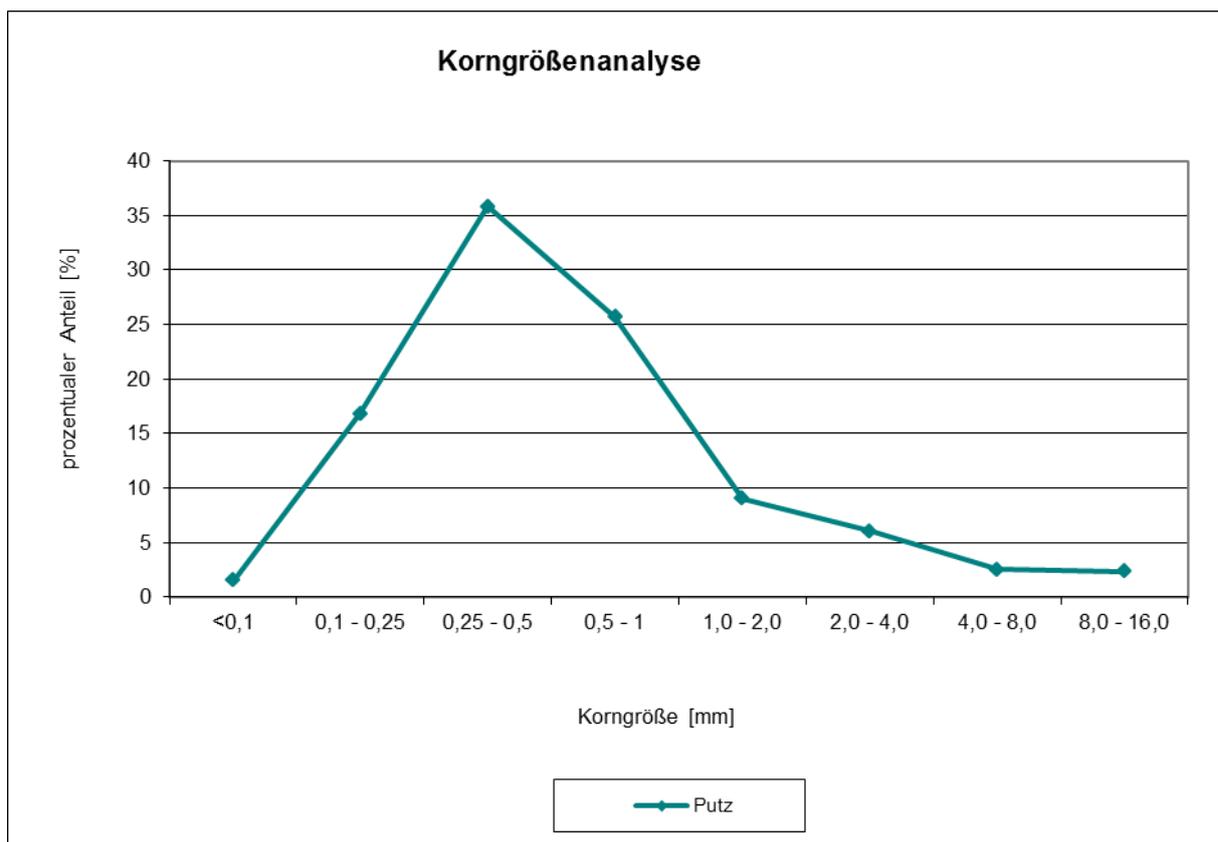


Abb. 14: Korngrößenanalyse der Putzprobe CRO_P2

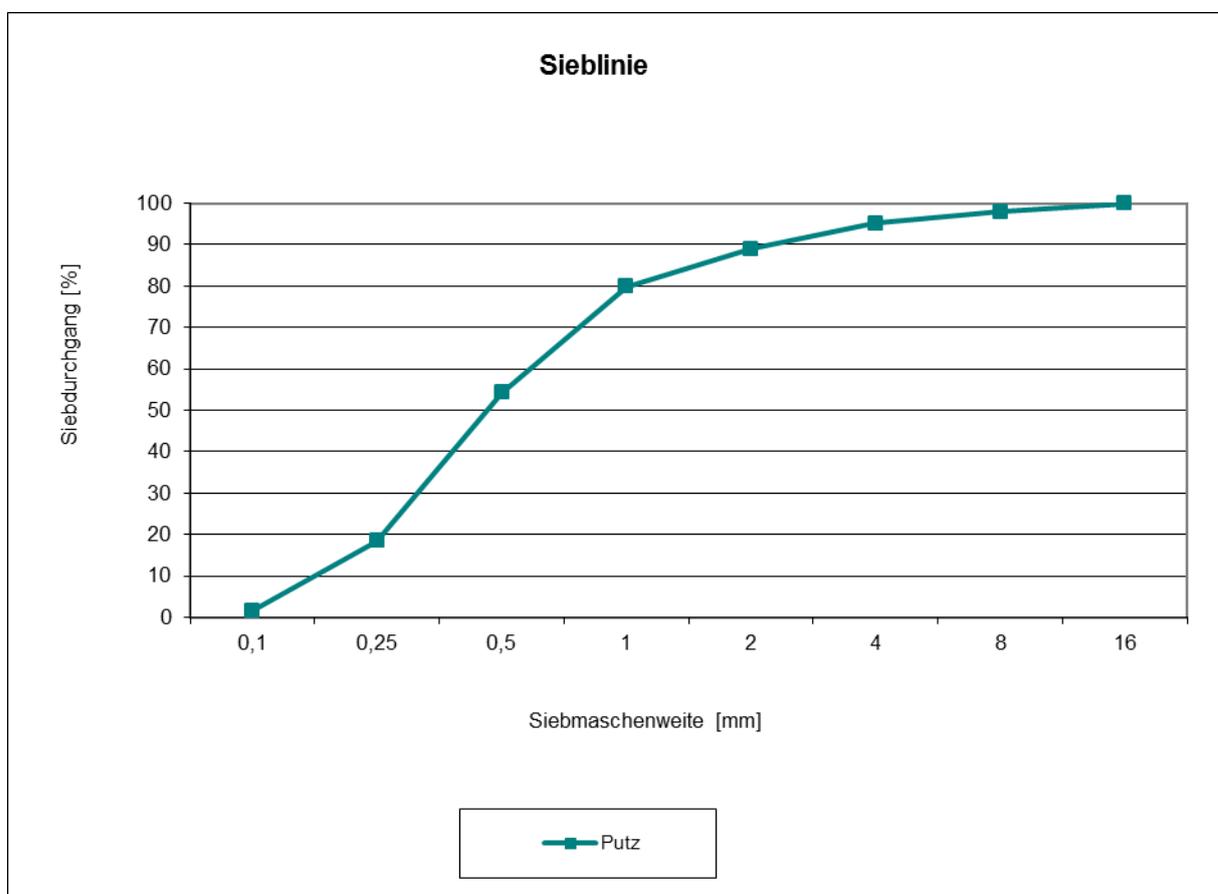


Abb. 15: Sieblinie der Putzprobe CRO_P2

Mörtelproben

Die Entnahme der Setzmörtel erfolgte aus Musterfläche 3 (schadhaft, HAL_MB_CH_M1) und Musterfläche 2 (intakt, HAL_MB_CH_M2). Hier ist der hohe Mg-Anteil der nicht feuchtebelasteten Probe besonders auffällig. Im Gegensatz dazu ist der Mg-Anteil in der schadhaften Probe geringer.

Tab. 32: Mörtelanalyse: Ergebnisse der chemischen Analyse

Probe Nr.:	Glühverlust bei 1100°C Ma%	HCL-unlös. + lösl. SiO ₂ Ma%	HCL-unlös. Ma%	HCL-lösl. SiO ₂ Ma%	Me ₂ O ₃ Ma%	CaO Ma%	MgO Ma%	CO ₂ Ma%	SO ₃ Ma%
HAL_MB_CH_M1	15,21	63,85	62,82	1,03	2,44	16,75	0,32	11,93	0,97
HAL_MB_CH_M2	10,89	76,40	74,97	1,43	3,47	6,74	3,21	6,68	0,27

Tab. 33: Mörtelanalyse: Berechnung der salzsäurelöslichen Bestandteile und des Glühverlustes auf die Summe aller salzsäurelöslichen Probenbestandteile

Probe Nr.:	Glühverlust bei 1100°C Ma%	HCL-lösl. SiO ₂ Ma%	Me ₂ O ₃ Ma%	CaO Ma%	MgO Ma%	CO ₂ Ma%	SO ₃ Ma%	CaO / SiO ₂ Ma%	CaO freies Ma%
HAL_MB_CH_M1	40,91	2,77	6,56	45,05	0,86	32,09	2,61	16,26	3,59
HAL_MB_CH_M2	43,51	5,71	13,86	26,93	12,82	26,69	1,08	4,72	10,15

Tab. 34: Mörtelanalyse: Thermische Zersetzung der Proben in Ma %

Probe Nr.:	Temperaturstufen in °C Angaben der Probenwerte in Ma %							
	150	300	450	600	700	800	900	1050
HAL_MB_CH_M1	0,64	1,03	0,89	1,49	3,81	6,75	0,10	0,10
HAL_MB_CH_M2	0,85	1,02	2,46	1,58	3,19	0,52	0,12	0,09

Tab. 35: Mörtelanalyse: Thermische Zersetzung der Proben in Ma % bezogen auf den Bindemittelgehalt der Proben

Probe	Temperaturstufen in °C							
	Angaben der Probenwerte in Ma %							
Nr.:	150	300	450	600	700	800	900	1050
HAL_MB _CH_M1	1,72	2,77	2,39	4,01	10,25	18,15	0,27	0,27
HAL_MB _CH_M2	3,40	4,08	9,83	6,31	12,74	2,08	0,48	0,36

1.4.3 Kamerabefahrung

Zur Begutachtung des Zwischenraums zwischen der Ostwand und der vorgestellten Wand, auf der sich das Gemälde von Charles Crodel befindet, erfolgte eine Kamerabefahrung. Es wurde gezeigt, dass es sich bei der vorgestellten Wand um eine Ziegelwand handelt, die durch zahlreiche korrodierte Eisen mit der dahinterliegenden Wand verbunden ist. Der Zwischenraum zwischen den Wänden ist durchgehend. Im Sockelbereich befinden sich Lüftungsöffnungen, die jedoch durch große Mengen feinen Staubes vollständig verschlossen waren, so dass eine Hinterlüftung der Gemäldewand nicht mehr gegeben war. Hier ist eine besonders hohe Schimmelbelastung zu beobachten.



Abb. 16: Vorgestellte Wand auf der sich das Crodel-Gemälde befindet; die Pfeile markieren die Lüftungsöffnungen im Sockelbereich



Abb. 17: Blick hinter die Vorgestellte Wand, auf der sich das Crodell-Gemälde befindet, von oben nach unten; ganz rechts unterhalb der Bildmitte ist eine Lichtquelle zu sehen, die durch eine Belüftungsöffnung im Sockelbereich in den Zwischenraum geschoben wurde. Links daneben befindet sich ein LED-Streifen, der als zusätzliche Lichtquelle von oben herabgelassen wurde. Im Vordergrund links und nahe des LED-Streifens sind korrodierte Abstand-Eisen zu sehen.

1.4.4 Aktive Infrarot-Thermographie

Am 04. Februar 2015 wurden an der Ostwand der Crodalhalle, im Bereich der Malerei von Charles Crodel, Untersuchungen mit Hilfe der aktiven IR-Thermographie ausgeführt. Ziel war, zum einen Heterogenitäten, etwa Hohlstellen, in dem Putz sichtbar zu machen und zum anderen, eventuell Aussagen zu den Rückverankerungen der vorgestellten Wand zu erlangen.

Zu dem Zweck wurde zunächst eine Gesamtaufnahme des Untersuchungsbereiches (siehe Abb. 18, 19) gemacht, ohne zuvor erfolgte thermische Anregung.



Abb. 18: Untersuchungsbereich an der Ostwand der Crodalhalle

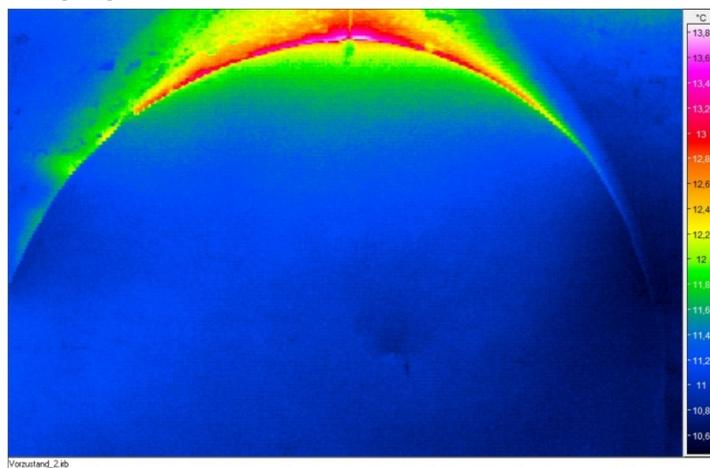


Abb. 19: Untersuchungsbereich im IR-Bild ohne zuvor erfolgte thermische Anregung

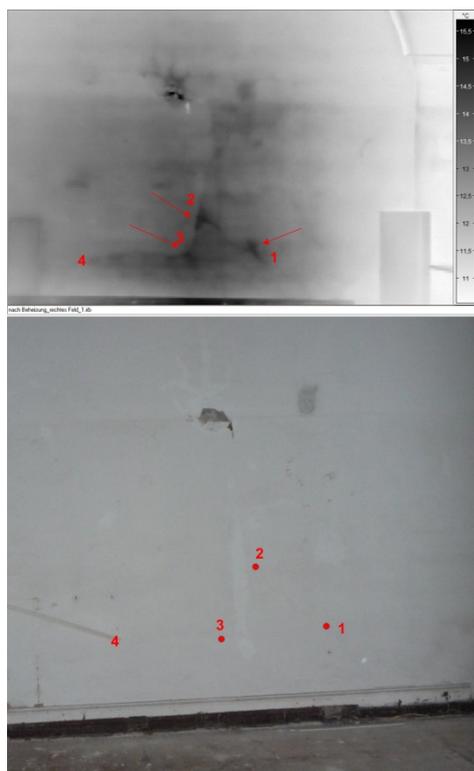


Abb. 26: Messfeld 2, Hohlstelle im unteren Bereich in Form eines Vogels. Die deutlich abgelösten Stellen sind mit Zahlen markiert, die auch auf dem Putz gekennzeichnet sind.

1.4.5 Raumklimauntersuchungen

In der Crodellhalle erfolgen seit dem 13.03.2014 Raumklimaaufzeichnungen in der Raummitte in unterschiedliche Raumhöhen. Ab dem 24.06.2014 wurde der Umfang der Raumklimamessungen auf folgende 4 Messpunkte erweitert.

- Messpunkt 1 Erfassung der relativen Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur in 2,50 m Höhe sowie ca. 20 cm über dem Fußboden (Abb. 28 links).
- Messpunkt 2 Erfassung der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur hinter der vorgestellten Wand, auf der sich die Malerei von Crodell befindet. Die Messung erfolgt zum einen im unteren Drittel und zum anderen im oberen Drittel der Wandhöhe.
- Messpunkt 3 Erfassung der relativen Raumluftfeuchte, der Raumlufttemperatur sowie der Oberflächentemperatur vor der Südwand in einem Bereich mit glänzender Putzoberfläche (Abb. 28 Mitte)
- Messpunkt 4 Erfassung der relativen Ausgleichsfeuchte und Temperatur in zwei unterschiedlich hohen abgedichteten Bohrlöchern über dem Fußboden (Abb. 28 rechts).

Die Raumklimaaufzeichnungen belegen, dass sich die relative Raumluftfeuchte seit dem Messbeginn bis zum Dezember 2016 auf durchgängig hohem Niveau über 80 % rel. Feuchte bewegte. Die Werte der relativen Luftfeuchte in ca. 2,50m Höhe liegen im Vergleich der Raumhöhen sogar noch höher bei Werten von fast durchgängig über 90% rel. Feuchte. Die Raumlufttemperaturen folgen sehr stark gedämpft der Jahreszeitlichen Temperaturgang und bewegten sich im Aufzeichnungszeitraum liegen zwischen 10°C und 20°C. Signifikante Temperaturunterschiede zwischen den beiden Messhöhen waren nicht feststell-

bar. Daraus war abzuleiten, dass auch die absolute Luftfeuchte im oberen Teil des Raumes höher ist als im Fußbodenbereich (siehe Abb. 27).

IDK	Diagramm 2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F. oben	60.50	97.10	91.25
Halle Moritzburg Crodellhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	10.90	21.10	15.53
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	58.70	88.70	82.66
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 [°C] Temp. unten	10.40	20.90	15.25
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						

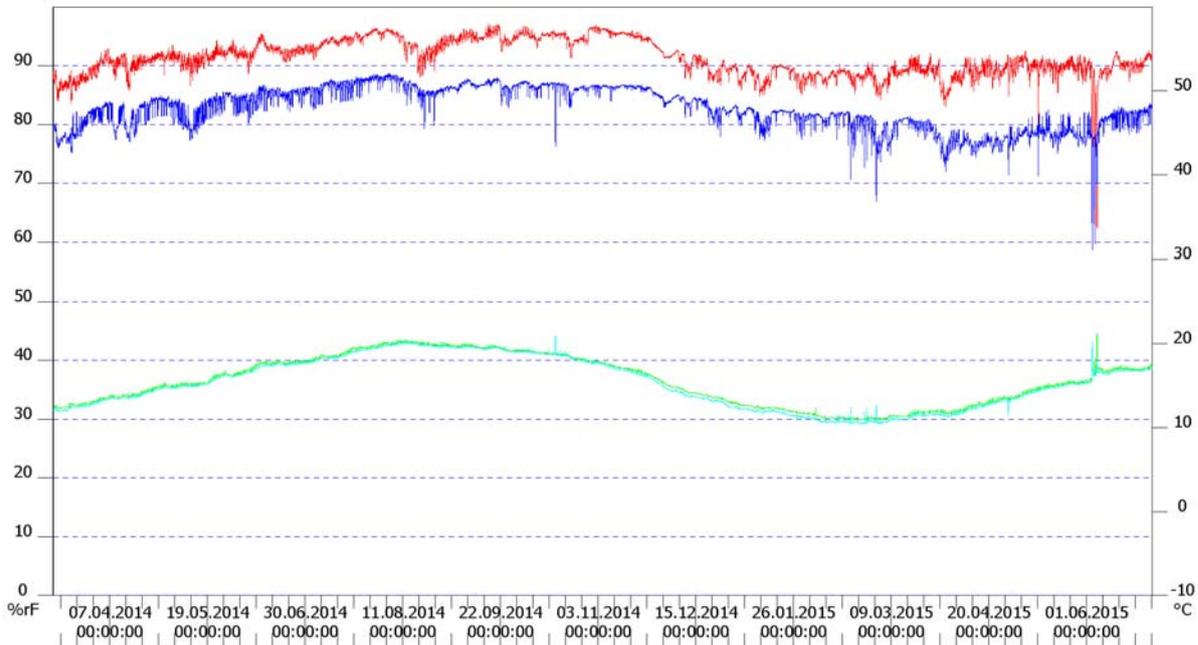


Abb 27: Verlauf des Raumklimas in der Crodellhalle von April 2014 bis Juni 2015; dieser Verlauf steht exemplarisch für den Zeitraum von 2014 bis Ende 2016 (siehe Anhang)

Die Werte der relative Luftfeuchte hinter der vorgestellten Wand, auf der sich die übertünchten Fragmente der Crodellmalerei befinden, bewegen sich im Messbereich zwischen 80% und 90% rel. Feuchte ebenfalls auf hohem Niveau (siehe Abb. 30). Die identischen Lufttemperaturen bewegen sich hinter der Wand in einer nur geringen Schwankungsbreite zwischen 17°C und 21°C. Auch die berechneten Werte der absoluten Luftfeuchte sind nahezu identisch. Lediglich die Werte, die sich oberhalb hinter der Wand im Bereich des Spaltes befinden schwanken etwas stärker als die unteren Werte. Im Vergleich entsprechen die Werte der absoluten Feuchte hinter der vorgestellten Wand den etwas niedrigeren Werten der absoluten Luftfeuchte im unteren Raumbereich ca. 20 cm über dem Fußboden (siehe Abb. 30). Da die Werte der absoluten Luftfeuchte hinter der vorgestellten Wand nicht signifikant höher sind als in der Raummitte liegt der Rückschluss nahe, dass hinter der vorgestellten Wand keine erhebliche Verdunstungsprozesse aus den Wänden oder dem Fußboden erfolgen, die zu einem Feuchteeintrag in den Luftspalt hinter der vorgestellten Wand führen.

Die Werte der relativen Raumluftfeuchte an der Südwand in ca. 80 cm Höhe liegen zwischen den Werteverläufen in den unterschiedlichen Raumhöhen in der Raummitte ebenfalls auf hohem Niveau zwischen 80% und 90% rel. Feuchte (siehe Anhang). Auch die Raumlufttemperatur entspricht in diesem Bereich den Werten in der Raummitte. Die Berechnung der relativen Luftfeuchte für den Kontaktbereich der Raumluft mit der glänzenden Wandoberfläche ergibt Werte, die der relativen Raumluftfeuchte in diesem Bereich entsprechen. Hinweise auf Kondensationsbedingungen wurden für den bisherigen Aufzeichnungszeitraum nicht ermittelt.

Die Aufzeichnungen der Ausgleichsfeuchte in den Bohrlöchern der Ostwand, wiesen nahezu durchgängig Werte an die 100% rel. Feuchte auf (siehe Anhang). Dies lässt den Rückschluss auf ein Materialfeuch-

teniveau des Mauerwerks im überhygroskopischen Bereich und damit auf freibewegliches Kapillarwasser zu. Eine schnelle Trocknung des südlichen Teils der Ostwand ist nicht zu erwarten, da es sich um einen sehr massiven Mauerwerkskörper handelt. Außerdem wird eine Trocknung durch den wenig diffusionsoffenen Anstrich auf der Putzoberfläche behindert. Um die Feuchte in diesem Teil der Ostwand effektiver zu reduzieren, wurde vom IDK die Abnahme der Farbschicht und des Putzes empfohlen. Die Ausführung der Maßnahme erfolgte Ende April 2015 durch Mitarbeiter des Bauhofs der Stiftung Dome und Schlösser Sachsen-Anhalt. Am 22.10.2015 wurden mit 98,3 und 98,4% rel. Luftfeuchte erstmals Werte erfasst, die nicht mehr im überhygroskopischen Bereich liegen.

Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen lässt sich ableiten, dass die hohen Werte der relativen Raumluftfeuchte die Schimmelproblematik in der Crodelhalle stark begünstigen. Es ist dringend geboten durch die Belüftung des Raumes die relative Luftfeuchte abzusenken und nach weiteren Feuchtigkeitsquellen zu suchen. Aus den bisherigen Untersuchungen ergaben sich keine Hinweise darauf, dass eine auffällige Feuchtigkeitsabgabe aus den Wänden oder dem Boden hinter der vorgestellten Wand in den Luftspalt zwischeneigentlichen Raumwand und der vorgestellten Wand erfolgt.



Abb 28: Klimamessungen in der Crodelhalle; Messpunkt 1 (links), Messpunkt 3 (Mitte), Messpunkt 4 (rechts)

Mit dem Beginn der versuchsweisen leichten Temperierung des Raumluft sowie einer geringfügigen Öffnung zweier Fenster zur Realisierung einer sehr leichten Querlüftung sank die relative Raumluftfeuchte im Januar bis April 2017 deutlich auf Werte zwischen 40% und 50% rel. F. ab (siehe Abb. 29).

Ein versuchsweises Schließen der Fenster vom 24.02 bis 03.04.2017 führt zu einem moderaten Anstieg der relativen Raumluftfeuchte auf Werte zwischen 50% und 70% rel. Feuchte.

Diese Versuche belegen, dass eine leichte Anhebung der Raumlufttemperatur in der Crodelhalle um ca. 4 K in Verbindung mit einer sehr leichten Lüftung zu einer schnellen und deutlichen Trocknung der Raumluft führt. Das Verschließen der Belüftung und der damit in Verbindung stehende erneute Anstieg der relativen Raumluftfeuchte weist eine Feuchtigkeitsquelle im Raum nach. Wie eine Bilanzierung über die absolute Raumluftfeuchte und dem Vergleich mit der absoluten Außenluftfeuchte belegt, erfolgen nach wie vor über die Raumwände und den Fußboden Verdunstungsprozesse der Feuchtigkeit in die Raumluft (siehe Anhang). Die Verdunstungsmengen sind aber nicht so groß, dass der durch die Temperierung und Belüftung erreichte Trocknungsvorgang überlagert wird.

IDK	Diagramm 1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 [%rF] rel.F. oben	34.90	99.90	77.36
Halle Moritzburg Crodellhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	13.50	22.20	17.80
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	31.10	88.30	69.83
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Höhe oben (3 m) rel. F. [rot]; Temp. [grün]			K:4 [°C] Temp. unten	11.40	22.10	16.83
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Höhe unten (20 cm) rel. F. [dunkelblau]; Temp. [hellblau]						

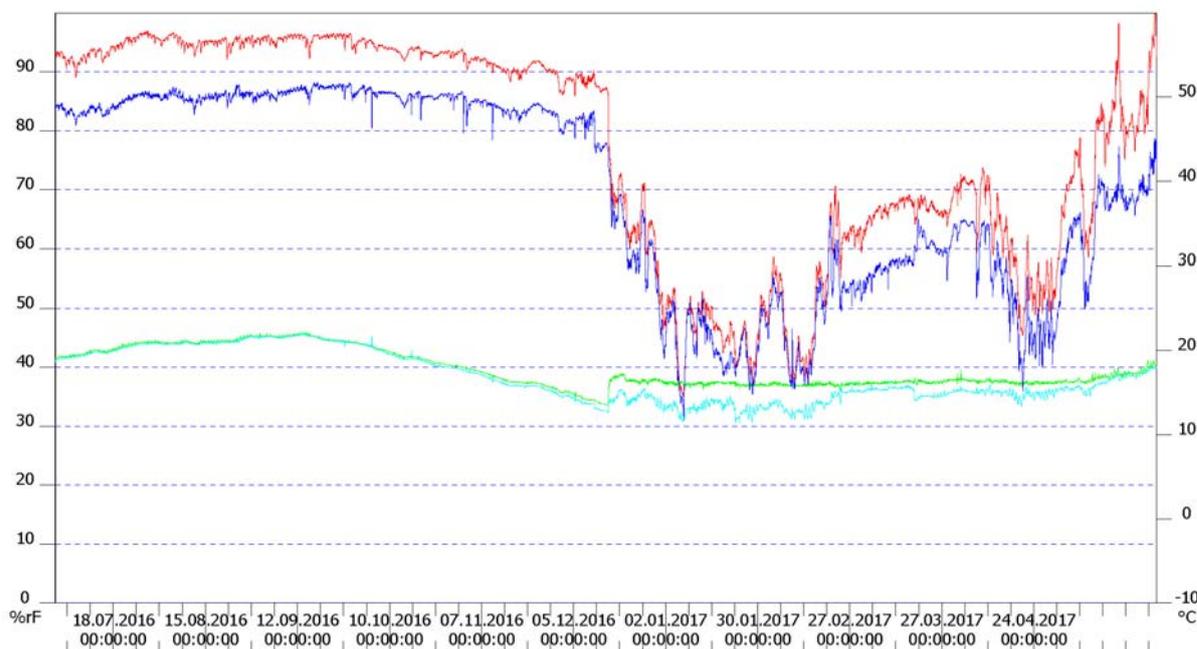


Abb 29: Verlauf des Raumklimas in der Crodellhalle von Juli 2016 bis Mai 2017; leichte Querlüftung und Temperierung bewirken einen deutlichen Rückgang der relativen Raumluftfeuchte

Im Zeitraum von 01. bis 31. Mai 2017 führt der Einfluss der zunehmend erwärmten und feuchten Außenluft in Verbindung mit ihrer Abkühlung in der Crodellhalle zu einem schnellen und hohen Anstieg der relativen Raumluftfeuchte. Eine weitere Erhöhung der Raumlufttemperatur über 18°C bis 20°C hinaus um die relative Raumluftfeuchte abzusenken war in diesem Fall aus Nutzungsaspekten nicht sinnvoll. Aus den Versuchen ließ sich keine nachteilige Wirkung für den Zwischenraum zwischen der Gewölbewand hinter der Crodellmalerei und der vorgestellten Wand auf der sich die Malerei befindet feststellen, da keine raumklimatisch akuten Differenzen zwischen der Raumluft und dem Zwischenraum hinter der Crodellmalerei auftraten (siehe Abb. 30). Der Luftaustausch zwischen der Raumluft und dem Zwischenraum erfolgt nach der Reinigung des Zwischenraumbodens sowie der Freilegung der Belüftungsöffnungen am Fußboden sowie über den Spalt an der Decke offenbar sehr schnell.

IDK	Diagramm 1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F unten W...	70.50	88.40	79.25
Halle Moritzburg, Crodellhalle, Malereiwand			K:2 [°C] Temp unten W...	12.90	21.90	16.84
Logger Nr.:Gj 4.2			K:3 [%rF] rel.F. oben W...	78.90	97.00	85.95
Anschl.: 1 Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand			K:4 [°C] Temp. oben W...	13.30	22.40	17.32
Anschl. Nr.: 2 Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 oben hinter der Wand						

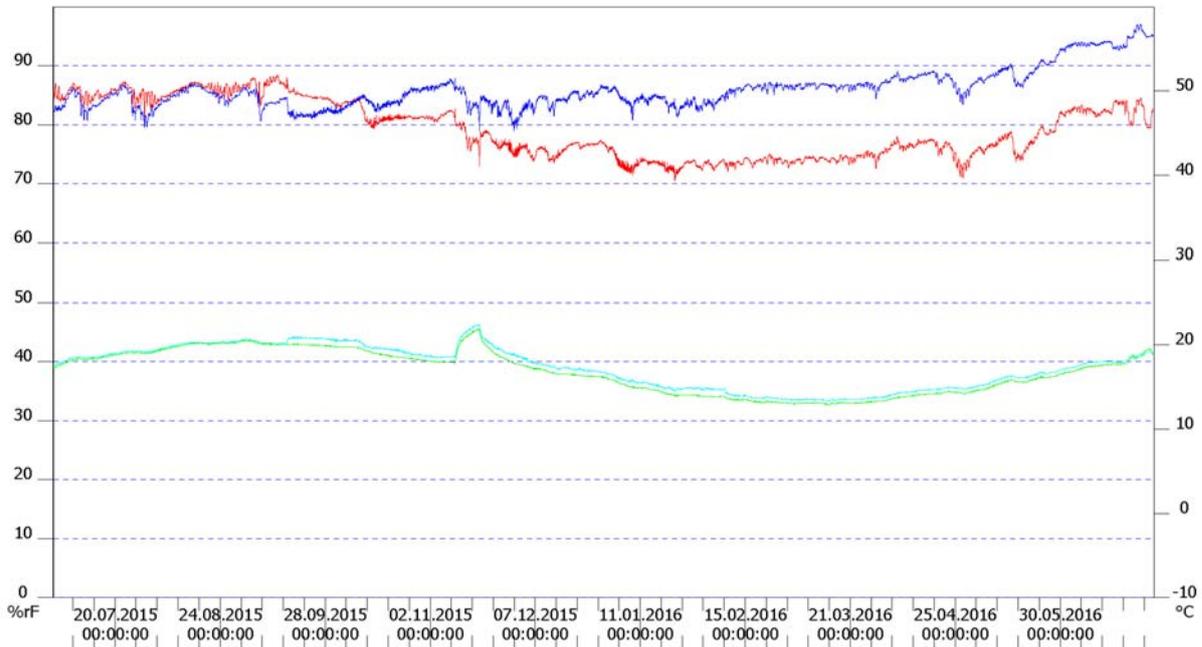


Abb 30: Verlauf des Raumklimas in der Crodellhalle hinter der Malereiwand von Juli 2015 bis Juni 2016; nach der Reinigung des Zwischenraumbodens sowie der Freilegung der Belüftungsöffnungen am Fußboden im September 2015 erfolgt die Angleichung an das Raumklima der Crodellhalle

1.5 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, Empfehlungen

Die erfolgten Feuchteuntersuchungen zeigen, dass die starke Feuchtebelastung des Mauerwerks durch die Baumaßnahmen im Jahr 2008 weitestgehend abgeklungen ist. Nur der direkt erdberührte Bereich der Ostwand weist noch hohe Feuchtegehalte auf. Parallel zum Projekt erfolgte hier eine vertikale Sperrung. Durch den erwähnten Feuchteeintrag oder auch schon in früheren Jahren kam es stellenweise zu starken Anreicherungen bauschädlicher Salze im Mauerwerk der Crodellhalle. Diese Anreicherungen konnten durch die zahlreichen Salzanalysen nachgewiesen werden. Der in der Crodellhalle verwendete Anstrich zeigt nur geringe Diffusionseigenschaften und behindert so die Trocknung noch feuchtebelasteter Bereiche. Aufgrund der unzureichenden Diffusionseigenschaften des Anstriches und der vielfach hohen bzw. relevanten Belastung der Putzschicht mit zum Teil hygroskopisch wirkenden Salzen, wird im Rahmen einer Sanierung der Crodellhalle die komplette Abnahme des Putzes empfohlen. Um die Trocknung der besonders feuchtebelasteten Ostwand zu beschleunigen, erfolgte die Abnahme des Putzes hier schon parallel zum Projekt. Besonders bei der Auswahl eines neuen Putzsystems für die Crodellhalle muss die verbleibende Salzbelastung im Mauerwerk berücksichtigt werden. Dazu sollten Putzmusterflächen in besonders belasteten Bereichen angelegt werden.

Der aktuell in der Crodellhalle befindliche Fußbodenbelag muss aufgrund seiner extremen Salzbelastung und der daraus resultierenden hygroskopischen Feuchte unbedingt entfernt werden. Des Weiteren sollte eine restauratorische Reinigung des Zwischenraums hinter dem Gemälde, und die Gewährleistung einer kontinuierlichen Hinterlüftung erfolgen.

Die erfolgte Untersuchung des Crodel-Wandbildes mit Hilfe von aktiver Infrarotthermografie zeigt neben verschiedenen Fehlstellen und Hohlstellen auch eine metallische „Revisionsklappe“, die sich im Bereich des Gemäldes befindet und möglicherweise durch den Künstler mit übermalt wurde. Die Untersuchung des Zwischenraums hinter dem Gemälde mit Hilfe einer Endoskopkamera zeigt die Anbindung der vorgestellten Wand an die dahinterliegende Wand durch zahlreiche Eisen. Der Zwischenraum ist stark verschmutzt und die Lüftungsöffnungen in Bodennähe waren komplett durch große Mengen Staub verschlossen. Nach einer provisorischen Reinigung dieser Öffnungen konnte der Luftaustausch mit der Raumluft deutlich verbessert werden.

Während der ersten drei Jahre des Projektes herrschte in der Crodelhalle ein relativ konstant sehr feuchtes Klima mit Luftfeuchten zwischen 80 und 95% rel. Feuchte. Diese klimatischen Bedingungen sind ein wichtiger Faktor für das anhaltende Wachstum bestimmter Schimmelarten. Allerdings wurden weder im Zwischenraum hinter dem Crodel-Gemälde, noch an der Ostwand Kondensationsbedingungen nachgewiesen.

Besonders der Vergleich zwischen absoluter Raum- und Außenluftfeuchte belegt, dass in der Crodelhalle eine Feuchtequelle existiert. Die im Mauerwerk enthaltenen Restfeuchten benötigen längere Zeiträume um vollständig zu verdunsten. Jedoch zeigt ein von 2016 bis 2017 durchgeführter Heiz- und Lüftungsversuch, dass schon mit relativ geringem Aufwand eine deutliche Absenkung der Luftfeuchte in der Crodelhalle möglich ist.

2. Mikrobiologische Untersuchungen und Erhaltungsstrategien

Karin Petersen, Lilli Birresborn, Ulrich-Markus Fritz, Jennifer Jahn, Jens Klocke, Gabriele Krüger und Bendix Schönfeldt

2.1 Einleitung

Infolge massiven Feuchteintrags sowohl über die Gewölbe als auch die Außenwände hatte sich in der Crodellhalle augenscheinlich ein massiver Schimmelpilzbefall ausgebildet.



Abb. 31: Detail der Besiedlung an einer Probenstelle



Abb. 32: Übersicht, Crodellhalle

Untersuchungen hierzu erfolgten durch mehrere Institute, insbesondere im Bereich der Gewölbe wurde die auffällig braun pigmentierte Art *Tritirachum oryzae* nachgewiesen, jedoch konnte bereits 2014 auch belegt werden, dass diese Art bereits abgestorben war und daher nicht mehr aktiv zu einer weiteren Schadensausbildung beitragen konnte.

Bereits vor Beginn der Projektantragsphase stellte sich heraus, dass ausgedehnte Bereiche der Oberflächen im weiteren Verlauf nicht erhalten werden konnten, zumal es sich nicht um originale Oberflächen handelte. Diese Entscheidung ermöglichte es, Testungen zur Desinfektion nicht nur an dem Objekt nachgestellten Prüfkörpern, sondern auch im Objekt in situ an den realen Materialien durchzuführen. Derart gute Bedingungen für sehr realitätsnahe Testungen, die auch für die Untersuchungen eine Materialentnahme ermöglichen, sind in den meisten Situationen nicht gegeben.

Zu Projektbeginn war der Zugang zur Crodellhalle auf der Basis vorhergehender Untersuchungen, die eine extreme Belastung der Raumluft mit lebenden Keimen (>55.000 KBE/m³: Kolonie bildenden Einheiten) aufgezeigt hatten, nicht möglich. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen ging diese Keimbelastung mit dem inzwischen einsetzenden Austrocknens der Oberflächen, weitgehend auf eine als normal anzusehende Belastung zurück. Eine Gefährdung der Arbeiter und damit einhergehende Nutzung einer entsprechenden persönlichen Schutzausrüstung blieb aber zunächst wegen des erhöhten Vorkommens von Keimen der u. U. gesundheitsrelevanten Art *Aspergillus versicolor* noch erforderlich.

Im Rahmen des Projekts konnten daher in situ - ergänzt durch vertiefende Untersuchungen im Labor - verschiedene Methoden zur Abtötung oder zumindest Eindämmung von Schimmelpilz an Architektur-

oberflächen durchgeführt und auf ihre Wirkung untersucht werden. Für die relativ neue Technik der Ionisation erfolgten zudem Untersuchungen zur Materialverträglichkeit.

2.2 Projektziele und Fragestellungen

1. Erproben von Möglichkeiten einer auch als Pflegemaßnahme anzusehenden Behandlungsmethode in dauerfeuchten Räumen
2. Vermeiden von wiederholtem Einbringen giftiger Chemikalien mit längerer Verweildauer im Material
3. Wird eine effektive Abtötung erreicht?
4. Welche Maßnahmen lassen sich als materialverträglich einstufen?

2.3 Zur mikrobiellen Belastung in der Crodalhalle

Bereits 2007 wurden Untersuchungen der Raumluft auf die Belastung mit Kolonie bildenden Einheiten (KBE/m³) durchgeführt. Die erzielten Werte lagen bei über 55.000 KBE/m³ Raumluft. Leider fehlen zu diesem Zeitpunkt die Vergleichsdaten für die Belastung der Außenluft und auch Aussagen zur Artenverteilung. Dennoch muss nach unseren bisherigen Erfahrungen (siehe auch weitere Daten in diesem Beitrag) von einer extremen Überhöhung der Luftbelastung ausgegangen werden. Mit über 10⁷ KBE/g Staub lag die Belastung war die Belastung des Staubs aus der Crodalhalle ebenfalls sehr hoch. Eine qualifizierte Untersuchung der Luftbelastung erfolgte erneut im April 2014.

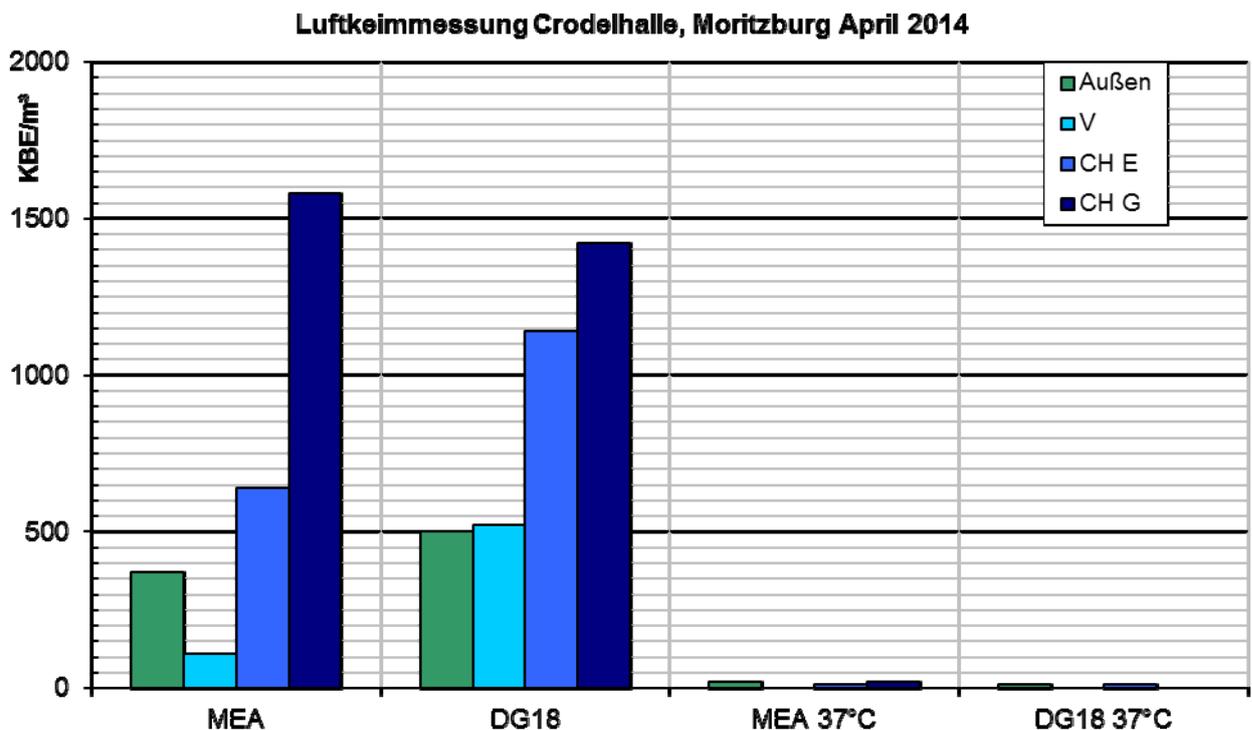


Abb. 33: Keimbelastung (KBE/m³) in der Moritzburg (V: Vergleichsraum), CH E Crodalhalle, CH G: Luft hinter dem Gemälde) im Vergleich zur Belastung der Außenluft (außen) bei Anzucht auf Malzextrakt- (MEA) und Dichloranagar (DG 18)

Abb.3 belegt eine zu diesem Zeitpunkt mit max. 500 KBE/m³ geringe Belastung der Außenluft. Zudem zeigt sich in einem Vergleichsraum (V), der keine Schimmelproblematik aufwies, eine sehr geringe Belastung auf dem trockeneren Nährmedium (DG 18), mengenmäßig im Bereich der Belastung der Außenluft. Deutlich höher liegt jedoch die Keimbelastung in der Luft der Crodellhalle (CHE) mit bis zu 1.350 KBE/m³, nochmals darüber die Belastung der Luft, die sich hinter dem vorgestellten Gemälde befindet (CHG) mit max. 1.680 KBE/m³.

Deutliche Abweichungen ergaben sich im Hinblick auf die Artenverteilung. Während in der Außenluft *Cladosporium sp.* überwiegt, ist im Vergleichsraum überwiegend *Aspergillus restrictus* nachzuweisen, in der Crodellhalle selbst gesellt sich zu dieser Art noch eine fast doppelt so hohe Belastung mit *Aspergillus versicolor*, die hinter dem Gemälde nochmals gesteigert vorzufinden war (bis zu 1.000 KBE/m³).

A. versicolor gilt eine erhöhte Aufmerksamkeit, da einige Isolate diese Art zur Ausbildung des Mykotoxins Sterigmatocystin in der Lage sein können.

Artenverteilung 04/ 2014, außen

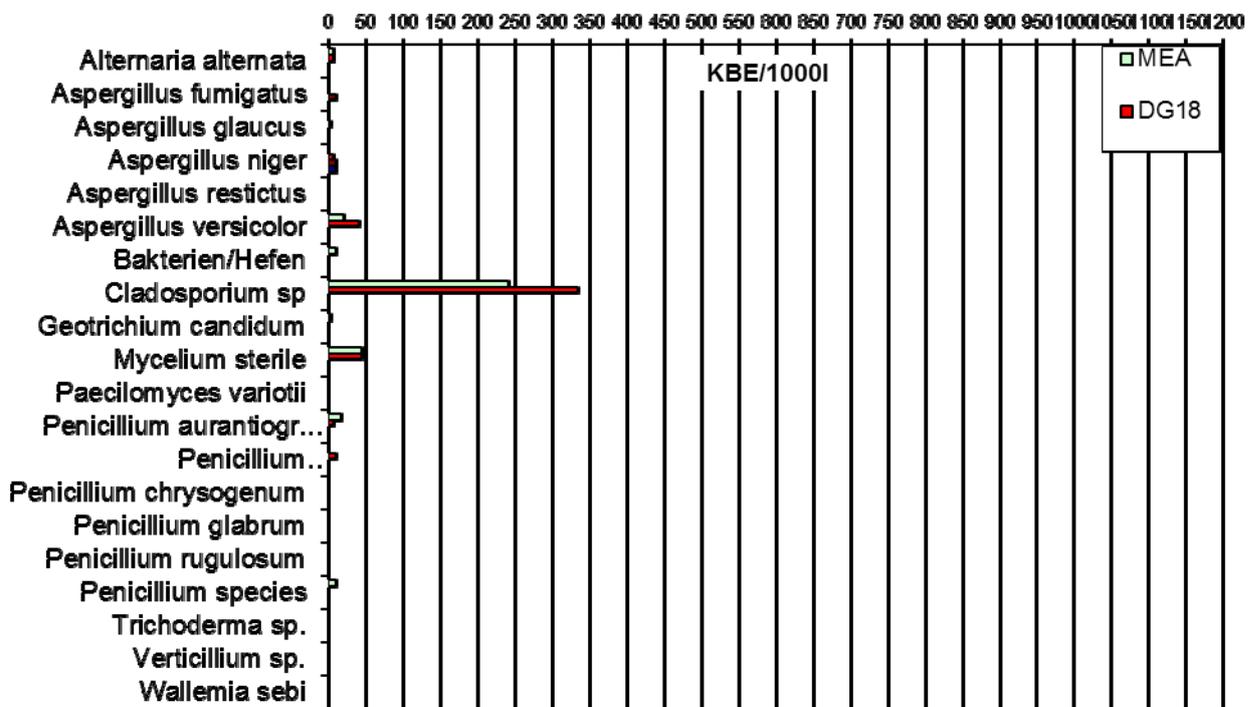


Abb. 34: Artenverteilung (KBE/m³) in der Außenluft

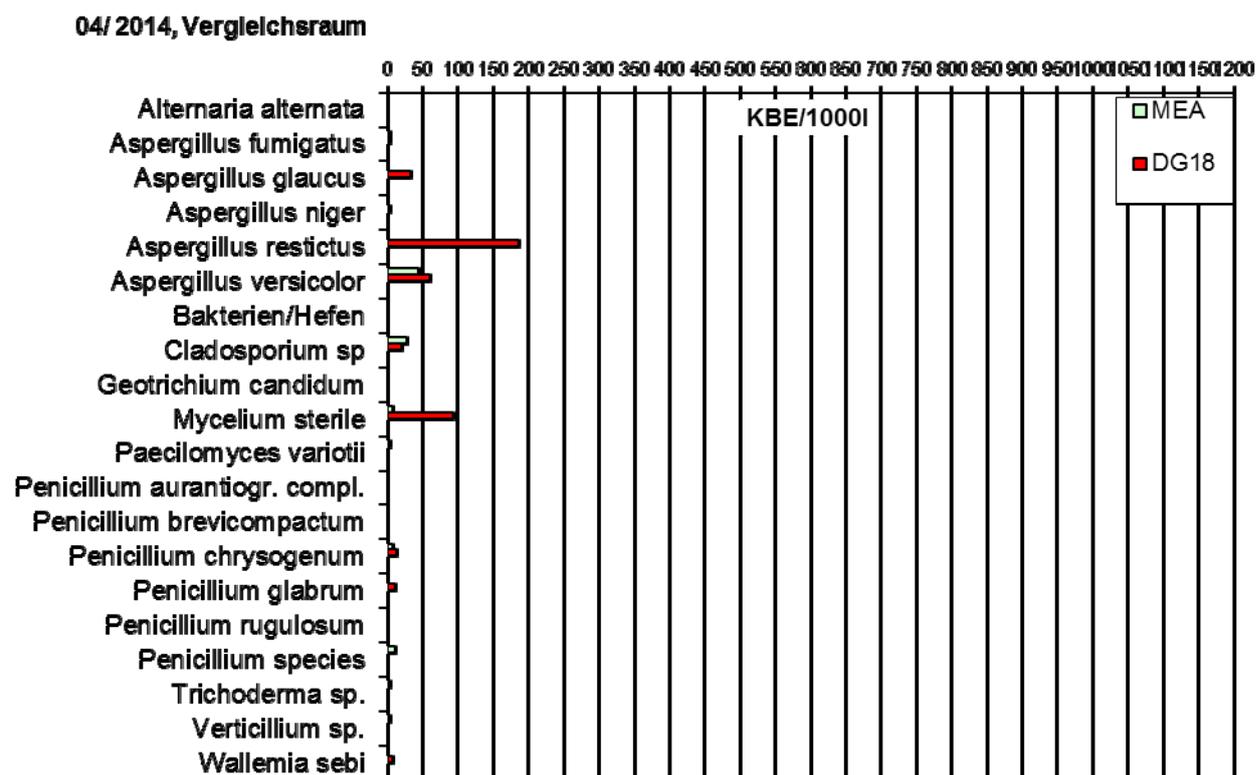


Abb. 35: Artenverteilung (KBE/m³) im Vergleichsraum

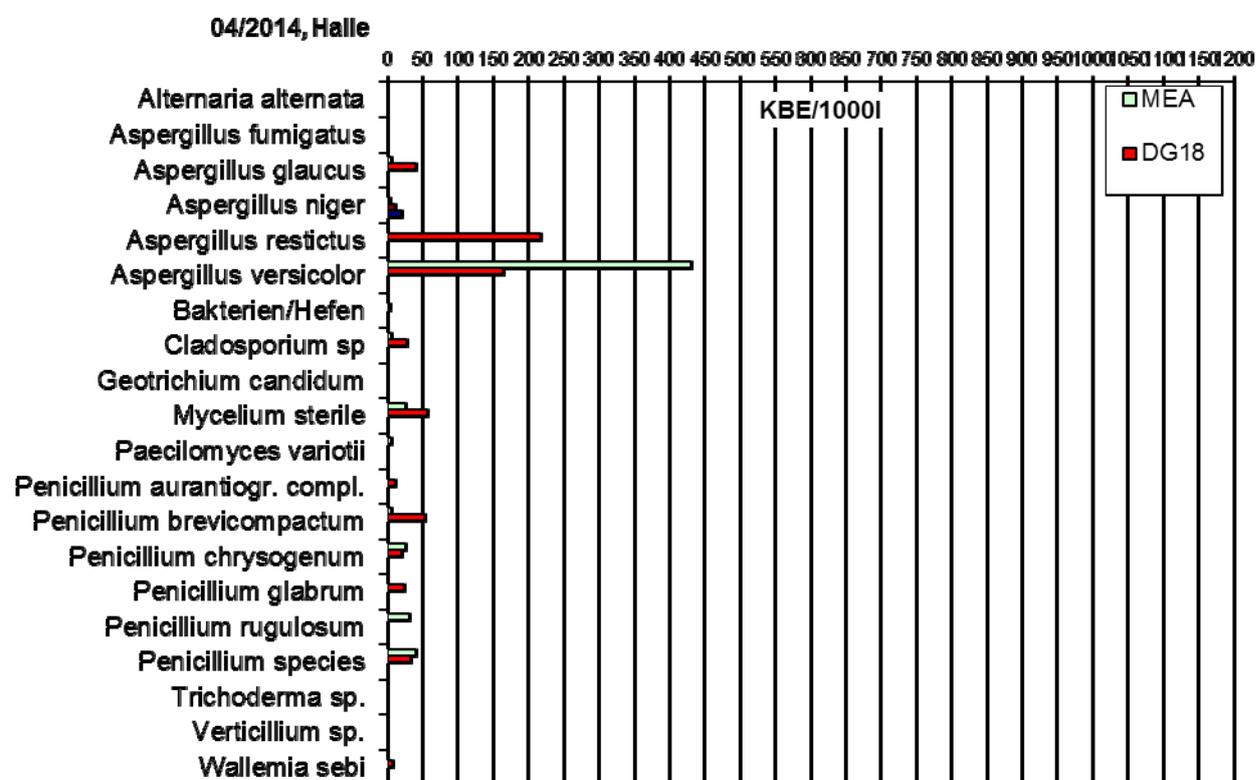


Abb. 36: Artenverteilung (KBE/m³) in der Crodellhalle

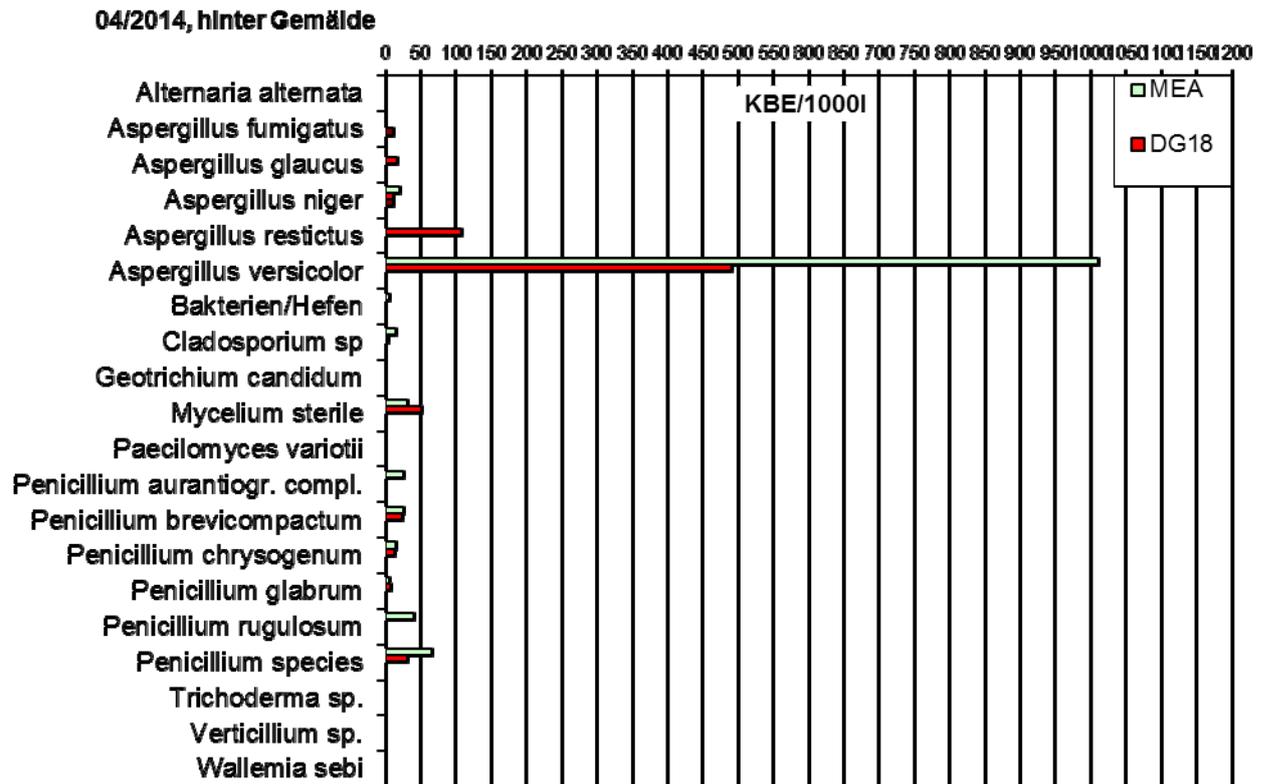


Abb. 37: Artenverteilung (KBE/m³) Zwischenraum hinter dem Gemälde
(Abb. 34-37: Artenverteilung in der Luft (KBE/m³), Legende Abb. 33)

Belastung in den Tüncheschichten

Der Aufbau der Anstrichsysteme auf den Gewölbe- und Wandflächen stellte sich nicht als einheitlich dar, so wurden in einigen Bereichen bis zu 9 verschiedene Schichten übereinander nachgewiesen, in anderen Bereichen wurden nur 4 Tüncheschichten gefunden, Pilzhyphen konnten in mehreren Proben bis zur untersten Tüncheschicht nachgewiesen werden.

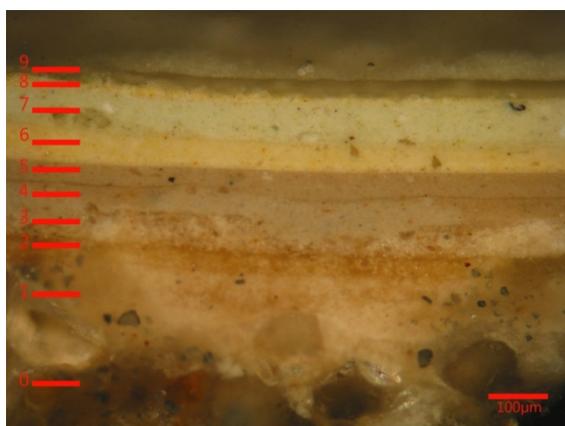


Abb. 38: Tüncheschichten, ohne Anfärbung

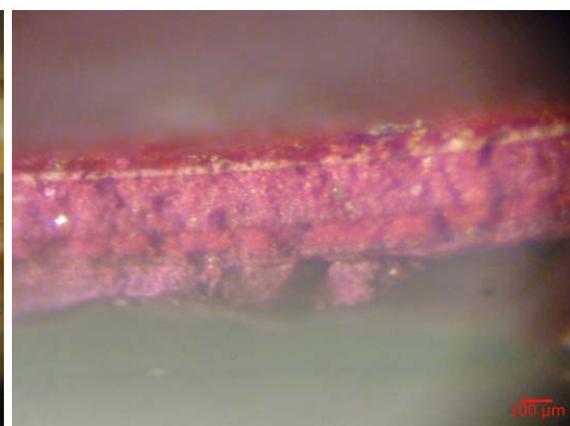


Abb. 39: Aufbau der Tünche verdeutlicht durch Anfärbung mit Perid-Schiffsäure

In freigelegten Flächen des eigentlichen Wandgemäldes konnten die Oberflächen nur zerstörungsfrei untersucht werden, zu einer möglichen Besiedlung tieferer Schichten kann daher keine Aussage gemacht werden.

2.4 Versuche zur Desinfektion

Diese Versuche sollten gemäß Projektantrag ohne den Einsatz von Giften erfolgen. Die Anwendungen konnten teilweise in situ an den exponierten Oberflächen, aber auch in geringer Tiefe bis zu 2,5 cm durchgeführt werden. Falls dies nicht möglich war, erfolgten die Testungen an Probekörpern, die in der Crodellhalle unter weitgehend vergleichbaren Bedingungen aufgestellt werden konnten.

Überwiegend wurden physikalische Verfahren eingesetzt, ergänzend dazu erfolgte die Testung durch Behandlung mit p-Chloro-meta-Kresol über die Gasphase, einer Chemikalie, die nicht zu einer längerfristigen Belastung der Materialien führt.

2.4.1 Mikrowellenanwendung

Hierzu wurden die relevanten Pilzarten kultiviert und deren Konidien –umgangssprachlich Sporen- in Suspension gebracht und in geeigneter Konzentration gleichmäßig auf die Oberflächen der Testflächen aufgesprüht. Ebenso wurden diese Keimsuspensionen in 2,5 cm Tiefe an festgelegten Stellen in den Putz eingespritzt. Diese Testflächen konnten sowohl in bereits abgetrockneten Mauerbereichen als auch in Bereichen mit nach wie vor erhöhter Feuchtigkeit angelegt werden.



Abb. 40: v. l. n. r.: Anlegen der Testflächen durch Aufsprühen und Einspritzen der Keimsuspension, Probennahme nach der jeweiligen Anwendung

Die Beurteilung der Desinfektionswirkung erfolgte nach der jeweiligen Anwendung durch die Entnahme von Materialproben und die anschließende Aufarbeitung im Labor zum Nachweis noch lebender Keime durch Anzucht auf geeigneten Medien.



Abb. 41: Testfläche und Vorbereitung der Abschirmung für Mikrowellenanwendung



Abb. 42: die mobile Mikrowelle an der Laufschiene

Sowohl für die Mikrowellenanwendung als auch die Bestrahlung mit kurzwelligem Ultraviolettem Licht (< 260 nm) erfolgte eine Abschirmung der Anwendungsbereiche zum Raum hin.

Die Mikrowellenanwendung mit einer mobilen Anlage erfolgte für 5, 15, 45 und 125 Minuten. Neben der Keimabtötung erfolgte mittels Thermografieaufnahmen auch die Messung der Temperaturerhöhung an den Testflächen.

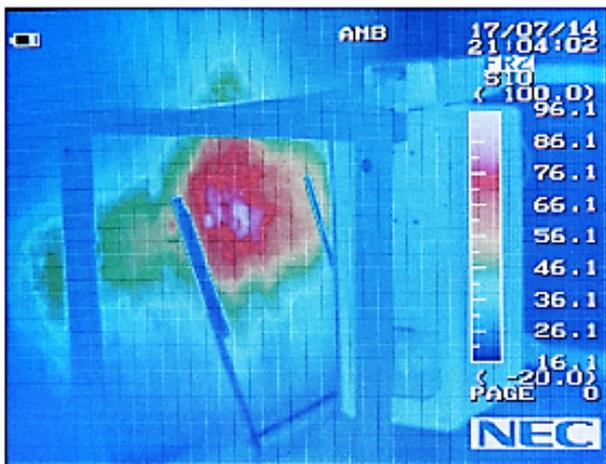


Abb. 43: Thermografieaufnahme der bestrahlten Fläche nach 125 Minuten Anwendung

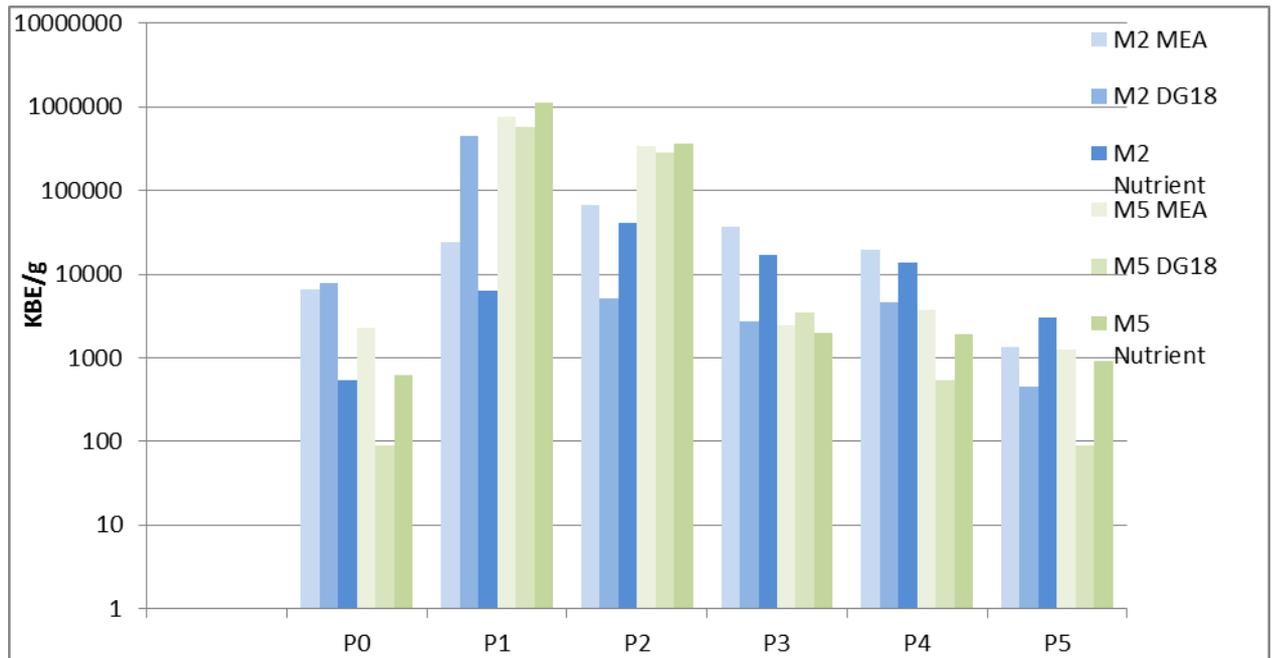


Abb. 44: Keimbelastung in 2,5 cm Putztiefe nach Mikowellenanwendung (Legende siehe Tabelle 36, nach Anzucht auf verschiedenen Nährmedien (MEA: Malzextraktmedium, DG 18: Dichloranagar, Nutrient: Bakterienagar) an einer trockenen (Probenstelle F2) und einer feuchten Probenstelle (F5)

Behandlung	F2	F5
P0: Ohne Keimsuspension Ohne MW	160	> 1.000
P1: Keimsuspension Ohne MW	> 1.000	> 1.000
P2: Keimsuspension 5 Minuten MW	> 350	> 1.000
P3: Keimsuspension 15 Minuten MW	315	> 1.000
P4: Keimsuspension 45 Minuten MW	310	> 150
P5: Keimsuspension 125 Minuten MW	150	47

Tab. 36: Oberflächenverkeimung KBE/ 25 cm² der Testflächen

Hier zeigt sich zunächst die deutliche Erhöhung der Keimzahlen durch die Injektion der Keimsuspension (P0 verglichen mit P1), ab einer Behandlungszeit von 45 Minuten wird besonders an der feuchteren Probenstelle eine Verringerung der Keimzahlen ersichtlich, allerdings liegt die Materialtemperatur bereits nach 15 minütiger Bestrahlung bei ca. 78 °C, was an historischen Materialien keinesfalls toleriert werden kann. Akzeptierbare Werte für die Oberflächenbelastung erfordern ebenfalls Bestrahlungszeiten ab 45 Minuten, auch hier erscheint die Anwendung nicht realistisch.

2.4.2 UV-C Bestrahlung

Ebenso wie für die Mikrowellenanwendung erfolgte die Vorbereitung der Testflächen für die Bestrahlung mit kurzwelligem Ultraviolettem Licht (256 nm).

Probe	Behandlung	KBE/ 25 cm ² MEA	KBE/ 25 cm ² DG18	KBE/ 25 cm ² 40S
MFL05/TF6	Ohne Behandlung Ohne Keimsuspension	Sehr dicht bewachsen: Nicht auszählbar	Sehr dicht bewachsen: Nicht auszählbar.	Sehr dicht bewachsen: Nicht auszählbar
MFL05/07	Ohne Behandlung mit Keimsuspension	Sehr dicht bewachsen: Nicht auszählbar	Sehr dicht bewachsen: Nicht auszählbar	Sehr dicht bewachsen: Nicht auszählbar
MFL05/08	Keimsuspension + 24h UV	6	2	20
MFL05/09	Keimsuspension + 48h UV	2	1	6
MFL05/10	Keimsuspension + 72h UV	1	6	5
MFL02/06	Keimsuspension +72h UV	0	0	0

Tab. 37: KBE/ 25 cm²

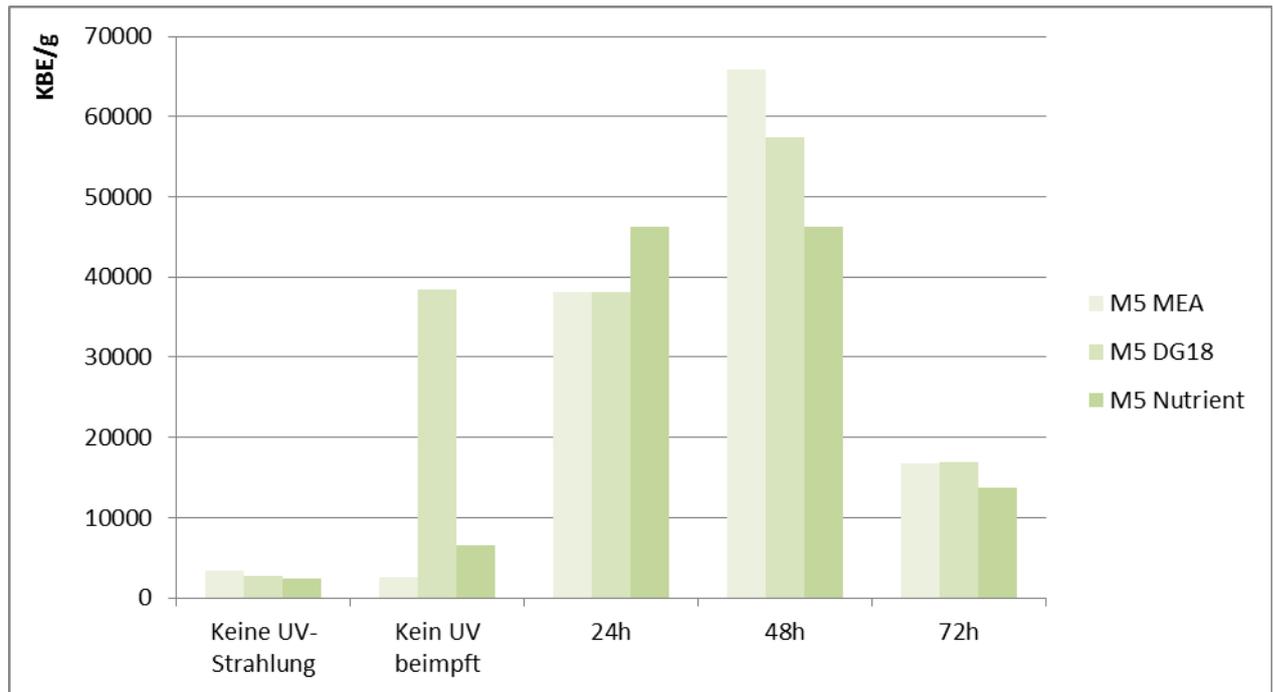


Abb. 45: Keimbelastung in 2,5 cm Putztiefe nach UV-C Bestrahlung (Legende Abb. 14)

2.4.3 Ionisierte Luft

Ein weiteres, für die Anwendung im historischen Objekt bisher relativ neues Verfahren, stellt die Ionisation der Raumluft dar.

In der Crodelhalle kamen insgesamt 3 Ionisationsanlagen zum Einsatz. Die zwei Anlagen zur Behandlung der Raumluft vom Typ RL 200 arbeiten auf Basis der Ionisationstechnologie der 3 FP GmbH. Dabei wird durch ein Gebläse Raumluft angesaugt und sodann nach einer groben Filterung über ein spezielles elektrisches Feld geleitet. Aufgrund der dortigen elektrischen Ladung kommt es zur Herauslösung der positiv und negativ geladenen Sauerstoffionen. Diese werden dann aufgrund des Gebläses und der damit erzeugten Luftbelastung großflächig im Raum verteilt. Dabei kommt es zur gewünschten Reaktion mit den in der Luft und auf den Oberflächen befindlichen mikrobiologischen Verschmutzungen. Mit gleicher Technologie und der Anlage vom Typ RL 100 wurde ionisierte Luft hinter das Wandbild geleitet um dort die gleiche Reaktion mit bestehenden mikrobiologischen Belastungen herbeizuführen. (Fischer, K. W., 3 FP GmbH)

In Abhängigkeit von den eingestellten Parametern kann auch ein Anteil Ozon entstehen, der u. U. ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse ausübt. Ebenfalls kann wegen des starken Luftstroms eine Entfeuchtung der Materialien erwartet werden. Um diesen Effekt zu überprüfen wurden feuchte Petrischalen mit Gesteinsproben in unterschiedlichen Abständen (mit 1 m, 7 m und 14 m Abstand) in den Luftstrom eingestellt und diese nach 6 Tagen ausgewogen. Im Abstand von einem Meter hatten die Proben rund 7,9 % ihres Ausgangsgewichts verloren, in 7 Metern Abstand 68 % und in 14 Metern Abstand 49,5 %, was ausschließlich auf das Austrocknen durch Wasserabgabe zurückgeführt werden muss.



		Tisch 1	Tisch 2	Tisch 3
		4 x Nr. 1	4 x Nr. 2,3	4 x Nr. 4,5
	Ionisator 1	4 x Nr. 6	4 x Nr. 7,8	4 x Nr. 9,10
		1m Abstand	7m Abstand	14m Abstand
	Ionisator 2			

Abb. 46a,b: Anordnung der Proben-tische vor dem Gerät

Messpunkte	Position	29.06.2016	19.07.2016	28.07.2016	16.08.2016
1	etwa 30cm nach Auslass Anlage 1	2.000.000	2.000.000		1.931.000
2	hinter Proben-tisch	1.256.000	890.000		695.000
3	etwa 30cm nach Auslass Anlage 2	1.850.000	1.560.000		1.508.000
4	hinter Proben-tisch 1	760.000	632.000		879.000
5	hinter Proben-tisch 2	263.000	189.000		641.000
6	ca. 7m hinter Auslass Anlage 1	1.270.000	614.000		710.000
7	ca. 7m hinter Einlass Anlage 2	1.090.000	606.000		654.000
8	ca. 9m hinter Auslass Anlage 2	1.180.000	625.000		606.000
9	ca. 9m hinter Einlass Anlage 1	890.000	618.000		582.000
10	zwischen beiden Anlagen	940.000	629.000		586.000

Tab. 38: Ionenkonzentration in unterschiedlichem Abstand zu den Geräten

Um den Effekt der Abtötung von Schimmelpilzen zu untersuchen, wurden zuvor sterilisierte 1 cm dicke Scheiben aus Thüster Kalk mit Keimsuspensionen der relevanten Pilzarten in geeigneter Nährlösung auf ihrer Ober- und Unterseite beimpft. Die beimpften Scheiben befanden sich in einem ebenfalls sterilisierten Plastikgefäß und schlossen bündig mit dessen Rand ab.

Dieser Versuch simulierte sowohl eine trockene Situation, als auch durch Einbringen definierter Wassermengen in das Versuchsgefäß eine feuchte Objektsituation, gleichzeitig konnte so auch die Wirkung auf die Oberflächen- wie auch Tiefenbesiedlung erfasst werden.

Diese Proben wurden in der Crodellhalle für mehrere Wochen bei laufender Ionisation aufgestellt und zu Versuchsende (nach 3 bzw. 5 Wochen) auf verbleibenden keimfähigen Schimmel (KBE/ 2 cm²) untersucht. Nicht behandelte Kontrollproben wurden in einem gleich klimatisierten Nebenraum in der Moritzburg aufgestellt.



Abb. 47: Aufsicht auf das Versuchsgefäß



Abb. 48: Anordnung der Versuchsgefäße

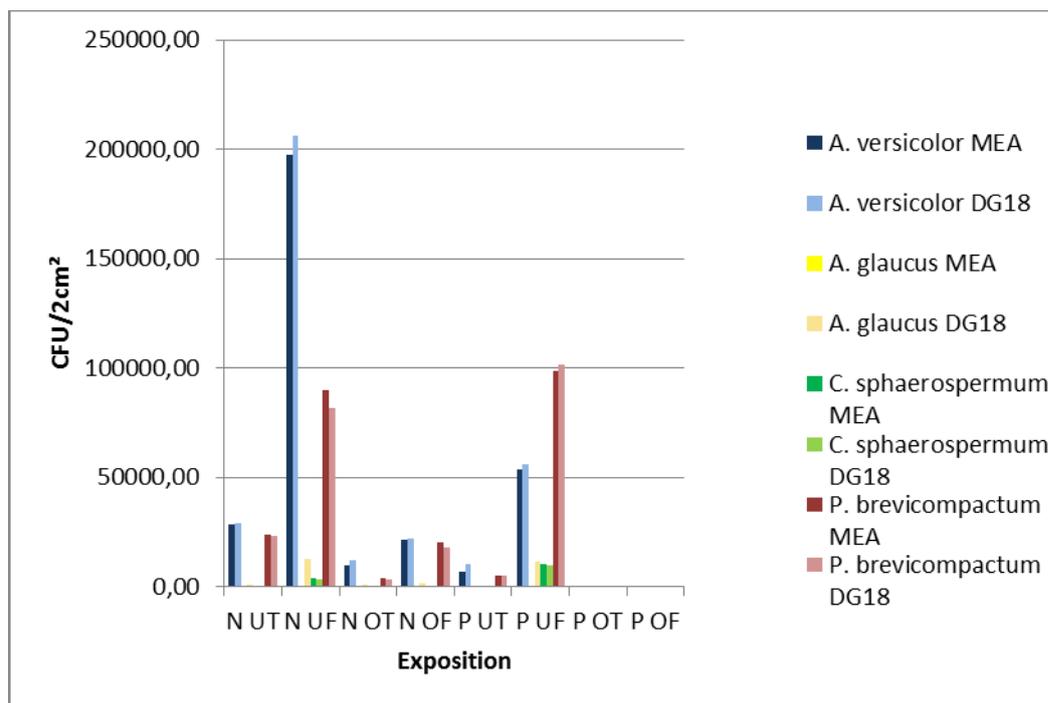


Abb 49: Keimfähige Schimmelpilze nach 5 Wochen versuchsdauer (KBE/2 cm²)
N: Nullprobe ohne Ionisation, P: Probe mit Ionisation, U: Unterseite, O: Oberseite,
T: trocken, F: feucht

Zunächst zeigt sich wie zu erwarten, dass sich auf den Unterseiten der angeimpften und feucht gelagerten unbehandelten Proben eine deutliche Entwicklung der Besiedlung eingestellt hatte, die jedoch für die angesetzten Arten unterschiedlich deutlich ausfiel. Auch nach 5 Wochen Behandlungsdauer wird hier für diese Probenunterseiten zumindest für die Arten *Aspergillus versicolor* und *Penicillium brevi-*

compactum keine ausreichende Desinfektion erzielt. Für die Probenoberseiten kann jedoch nach 5 Wochen, aber auch bereits nach 3 Wochen Versuchsdauer eine völlige Abtötung aller Keime erzielt werden.

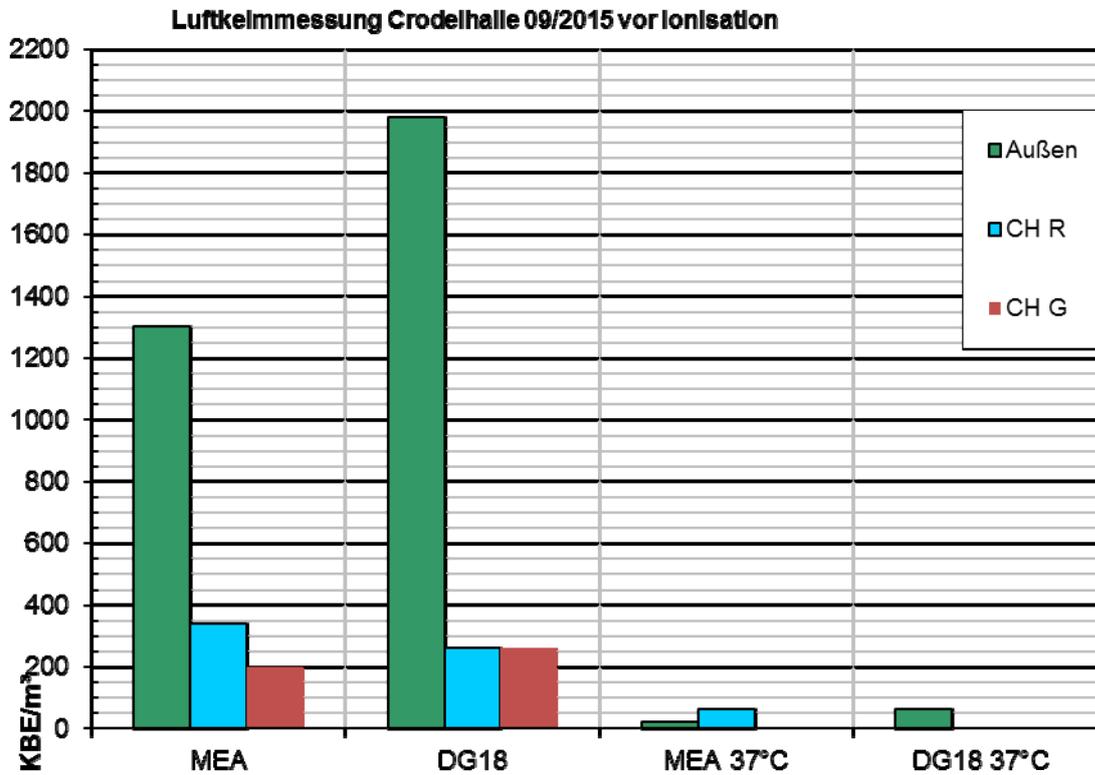


Abb. 50

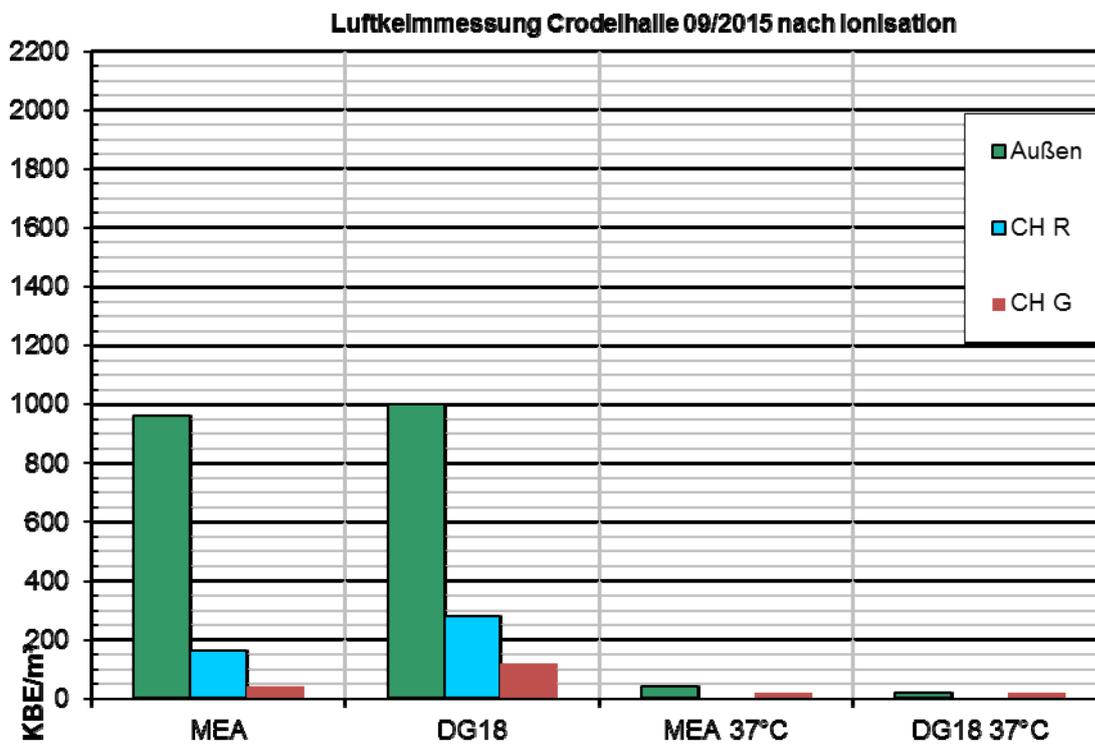


Abb. 50, 51: Keimbelastung (KBE/m³) in der Raumluft (CH R) und hinter dem Gemälde (CH G) vor und nach 21 Tagen Ionisation im Vergleich zur Außenluft (Außen)

Im Gegensatz zur Keimreduktion an den angeimpften Probenkörpern im Bereich der ionisierten Luft, konnte –zumindest nach 21 Tagen Anwendung keine eindeutige Reduktion der Belastung in der Raumluft und im Luftspalt hinter dem Gemälde nachgewiesen werden, wenn die realen Werte in Relation zur Belastung der Außenluft am Messtag gestellt werden (Abb. 50, 51). Im Hinblick auf die Materialverträglichkeit liegen erste Untersuchungen vor (Birresborn, 2016), aus denen für einige der eingesetzten Pigmente eine mögliche Farbveränderung abgeleitet werden können, ebenso ergeben sich Hinweise auf Veränderungen gängiger Bindemittel. Wegen der in diesem Versuchsansatz bereits aufgezeigten massiven Verringerung der Feuchtigkeit in den Versuchskörpern, muss ebenfalls mit Schädigungen an stark salzbelasteten Oberflächen gerechnet werden, Untersuchungen zu dieser Problematik sind bisher nicht erfolgt.

2.4.4 Anwendung von p-Chloro-meta-Kresol

Die im Projektraum einige Anwendung von Bioziden erfolgte über den Einsatz von p-Chloro-meta-Kresol, das wegen seines hohen Dampfdrucks bereits nach kurzer Zeit aus dem Material austritt und nicht persistiert. Die Versuchsdurchführung entspricht der für die Ionisation, wobei die Proben in ein Plastikzelt eingebracht wurden, in dem eine mit pCMK gesättigte Atmosphäre eingestellt worden war.

Mischkultur	Dauer der pCMK Anwendung	KBE/2 cm ² MEA	KBE/2 cm ² DG 18
To	0 h	> 500	> 500
Oberseite, feucht	24 h	>500	>500
Oberseite, feucht	48 h	306	486
Oberseite, feucht	7 Tage	260	279
Oberseite, feucht	10 Tage	1	2
Unterseite, feucht	10 Tage	98	97
Oberseite, trocken	10 Tage	370	>500
Unterseite, trocken	10 Tage	436	>500

Tab. 39: Keimbelastung auf den Ober- und Unterseiten der Probekörper

Nach 48 Stunden wird an feucht eingestellten Oberseiten bereits ein erster Effekt durch Verringerung der Kolonie bildenden Einheiten sichtbar. Während für die trockenen Flächen eine ausreichende Dekontamination auch nach 10 Tagen noch nicht erzielt wurde, wird in dieser Zeit eine fast vollständige Abtötung der Keime an den feuchten Probenoberseiten nachgewiesen, für die feuchten Probenunterseiten werden ebenfalls starke Keimzahlreduktionen gezeigt. Die Anwendung kann also zumindest bei aktiven Keimen als sehr erfolgreich an Materialoberflächen und auch in Situationen, in denen das Gas in das Material hinein wirken muss durchaus noch als effektiv eingestuft werden.

2.5 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Für die Crodellhalle musste zu Beginn der Untersuchungen 2007 eine massive Belastung der Architekturoberflächen festgestellt werden, auch die Raumluft wies mit über 55.000 Keimen (KBE/m³) eine extrem hohe Anzahl keimfähiger Schimmelpilzzellen auf, die eine weitere Nutzung des Raums nicht mehr zuließ.

In den folgenden Jahren konnte jedoch bereits zu Beginn der Untersuchungen im Projekt festgestellt werden, dass einerseits ein Teil der insbesondere das Gewölbe besiedelnden Arten nicht mehr lebensfähig waren, vermutlich im Zuge der einsetzenden Verringerung der Feuchte, als auch die Belastung der Raumluft deutlich reduziert war.

Die modellhaft ausgeführten Untersuchungen zur Auswirkung verschiedener Dekontaminationsmaßnahmen wurden weitgehend in situ in der realen Situation der Crodellhalle ausgeführt, eine Möglichkeit die bei denkmalrelevanten Oberflächen nicht gegeben ist, da hier Eingriffe in die Substanz erforderlich waren, diese konnten in der Crodellhalle in ausreichendem Umfang erfolgen, da bereits zu Projektbeginn beschlossen worden war, die neuzeitlichen Tünchen und teilweise auch Putze nach Abschluss des Projektes zu entfernen.

Die hier eingesetzten Methoden wurden so ausgewählt, dass möglicherweise gesundheitsschädigende Chemikalien entweder gar nicht eingesetzt wurden, oder aber mit p-CMK ein Stoff ausgewählt wurde, der nicht längerfristig im Objekt verbleibt.

Die physikalischen Methoden zeigten alle zumindest für die Anwendung an exponierten Materialoberflächen eine mehr oder weniger gute Dekontaminationswirkung, jedoch erweist sich der Einsatz der mobilen Mikrowelle als sehr kompliziert, da hier rechtliche Einschränkungen zu beachten sind, eine geeignete Abschirmung der Strahlung erfolgen muss und die Geräte nur von Personal mit entsprechender Umgangsgenehmigung betrieben werden dürfen. Als gravierender stellt sich jedoch die mit der Bestrahlung einhergehende extreme Temperaturerhöhung dar, die in der Regel an denkmalrelevanten Materialien nicht möglich sein dürfte.

Bisher nicht untersucht werden konnte auch hier, die Auswirkung an Flächen, die eine hohe u. U. unter einer Malschicht vorhandene Salzbelastung aufweisen, und die somit ein noch verstärktes Gefahrenpotential bieten würden.

Dieser Aspekt wäre auch bei der Anwendung der Ionisation der Raumluft zu berücksichtigen, da diese, zumindest in der hier gewählten Form mit einer massiven Austrocknung einhergeht.

Die keimreduzierende Wirkung dieser Technik konnte belegt werden, in reduziertem Maß auch bei der simulierten Besiedlung in tieferen Materialschichten. Allerdings ist hier darauf hinzuweisen, dass die Anwendung – zumindest für eine erste Dekontamination - eher im Bereich von Wochen erfolgen muss. Auch hier sind mögliche Materialschädigungen zur Zeit nicht auszuschließen. Ebenfalls kann zur Zeit nicht ausgeschlossen werden, dass die Wirkung zumindest teilweise auf eine höhere Ozonbelastung zurückgeführt werden muss, da diese im Verlauf der Untersuchungen nicht untersucht werden konnte.

Die Anwendung einer Bestrahlung mit kurzwelligem Ultraviolettem Licht zeigt ebenfalls eine deutliche Wirkung auf eine Oberflächenbesiedlung, dies bereits nach 48 Stunden Bestrahlung. Eine mögliche Schädigung wandmalereitauglicher Pigmente wurde in vorangegangenen Untersuchungen bereits ausgeschlossen.

Sowohl für diese physikalischen Verfahren wie auch für die Anwendung von p-Chloro-meta-Kresol über die Gasphase, das bewusst ausgewählt wurde, um den längerfristigen Verbleib giftiger Chemikalien im Objekt auszuschließen, muss betont werden, dass die Anwendung zur einer Dekontamination führt, dass jedoch bei anhaltenden Klimabedingungen, die eine erneute Besiedlung ermöglichen, keinerlei Schutz gegen diese Wiederbesiedlung besteht. Es handelt sich damit um Verfahren, die bei dauerhaft anhaltenden Klimabedingungen, die eine mikrobielle Schädigung erlauben, regelmäßig wiederholt werden müssten.

Zudem muss darauf hingewiesen werden, dass diese Maßnahmen zwar zu einer Abtötung der Hyphen und Konidien (Sporen) geführt haben, dass damit jedoch das organische Zellmaterial ohne anschließende Reinigungsmaßnahmen auf dem Objekt verbleibt und damit u. U. als organische Nahrungsquelle für eine erneute Besiedlung dienen kann.

Weitere Untersuchungen erscheinen zudem erforderlich, um auszuschließen, dass gesundheitsrelevante Stoffwechselprodukte auch nach der Abtötung der Keime im Objekt verbleiben.

3. Anlage und Bewertung von Putzmusterflächen, Putzempfehlungen

Matthias Zötzl, Henning Kersten, Uwe Kalisch

3.1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Projektes „Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung einer starken Schimmelbesiedlung auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodellhalle der Moritzburg Halle“ wurden in der Crodellhalle Putzmusterflächen angelegt und bewertet sowie Empfehlungen für einen Innenputz gegeben. Nach den Ergebnissen der Voruntersuchungen (IDK-Bericht HAL 12/2015), sollte der gesamte Innenputz in der Crodellhalle, auf Grund der starken Feuchte- und Salzbelastung durch größtenteils hygroskopische Nitrate, Chloride und Sulfate sowie der fest aufsitzenden diffusionshemmenden Farbfassung (aber auch der noch in tieferen Putzbereichen liegenden Schimmelsporenbelastung) ersetzt werden. Dazu wurde vorgeschlagen, Musterflächen mit verschiedenen Putzsystemen anzulegen und zu bewerten.



Abb. 52: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, Putzmusterflächen

3.2 Ergebnisse der Voruntersuchungen

- z.T. noch hohe Feuchten von 8 Ma.-% im Mauerwerk
- Mögliche bauschädigende Salze: Kaliumnitrat, Natriumsulfat, Magnesiumsulfat, Natriumchlorid

Anionenuntersuchungen: Bewertung der Salzbelastung nach WTA- Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“

- Sulfatbelastung: gering
- Chloridbelastung: mittel
- Nitratbelastung: hoch

- Auffeuchtung der Oberflächen, Schäden an Putz und Farbfassung!

Gründe für eine Putzabnahme:

- Dekontaminierung der starken Schimmelbesiedlung auf Putzen ist nur oberflächennah möglich!
- Obere Farbschicht behindert weitere Abtrocknung!
- Hohe Salzgehalte mit bauschädigenden z.T. hygroskopischen Salzen!
- **Reduzierung: Schadsalze, feuchte Oberflächen, Schimmel**
- **Verbesserung der Abtrocknung**

3.3 Putzmuster

3.3.1 Auswahlkriterien

Bei der Auswahl der Putze für die Musterflächen wurden folgende Kriterien beachtet:

1. Salzspeicherkapazität
2. Gute Beständigkeit gegenüber Kristallisationsdruck
3. Widerstandsfähigkeit gegenüber Schimmelbefall (Ausschluss organischer Putzzusatzstoffe wie z.B. Stearate oder Methylcellulose, anhaltendes basisches Inventar)
4. Möglichst geringer Eintrag von Alkalien um Schadsalzreaktionen mit im Mauerwerk befindlichen Anionen zu vermeiden

3.3.2 Empfehlungen für Putzmuster

Auch auf Grundlage der Erfahrungen aus vorhergehenden Projekten werden folgende Putzmuster (ca. 2 m x 1 m mit Abstand von 10 cm zwischen den Flächen) an Nord- und Ostwand angelegt:

0. Baustellenmischung, Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand
1. Unterputz: Bauporenputz (beige), Deckputz: Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand
2. Unterputz: Hasit Sanierporenausgleichsputz, Deckputz: Hasit Einlagensanierputz
3. Unterputz: Bauporenputz, Zwischenputz: Bauporenputz HIQ (WTA-Sanierputz, diffusionsoffen), Deckputz: Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand
4. Unterputz: Keim Seccopor-grosso, Deckputz: Keim Seccopor-fino
5. unten: MC-Bauchemie, Exzellent historic – grob
5. oben: MC-Bauchemie, Exzellent historic – fein
6. Unterputz: Bauporenputz: Bauporenputz: Bauporenputz mit regionalem Sand, Deckputz: Bauporenputz mit Poraver-Anteil

Von allen Materialien wurden Rückstellproben der Trockenmörtel entnommen und zur Beimpfung mit Schimmelpilzen an die Mikrobiologie, Frau Prof. Dr. Petersen, übergeben.

3.3.3 Vorbereitung der Musterflächen

Im Vorfeld der Anlage von Putzmusterflächen wurde der bestehende Putz im Bereich der stark geschädigten „Voruntersuchungsfläche 5“ entfernt, um eine Abtrocknung des Mauerwerks zu ermöglichen. Das freiliegende Mischmauerwerk zeigt Mauersteine aus Halleschem Porphyr (Rhyolith) und Sandstein aber auch Ziegelergänzungen. Im Mauerwerk befindliche Eisenteile wurden vor der Anlage der Musterflächen kartiert, um ein mögliches „Durchpausen“ im Bereich einzelner Musterflächen besser kontrollieren zu können.



Abb. 53: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, „Voruntersuchungsfläche 5“, Kartierung im Mauerwerk befindlicher Eisenteile im Vorfeld der Anlage von Putzmusterflächen

3.3.4 Anlage der Musterflächen

Die Anlage der Flächen erfolgte durch die Firma „Denkmalpflege, Putz und Stuck“ im Zeitraum Anfang Dezember 2016 bis Ende Januar 2017. Der Aufbau der Einzelflächen richtete sich nach Vorgabe des jeweiligen Datenblattes und gliedert sich allgemein in Spritzbewurf, Grundputz und Deckputz.



Abb. 54: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, Zuordnung der Putzmusterflächen



Abb. 55: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Nordwand, Zuordnung der Putzmusterflächen

3.4 Nachuntersuchungen an Putzmusterflächen

3.4.1 Probenahme

Die Beprobung der einzelnen Musterflächen an der Nord- und Ostwand erfolgte direkt im Vorfeld der Projektabschlussstagung am 15.11.2017 nach einer Standzeit von ca. 10 Monaten. Es wurden Bohrmehl-Tiefenprofile mit jeweils drei Tiefenstufen (0-1,5 cm, 1,5-3 cm und 3-10 cm) angelegt und die Feuchte- und Salzbelastung im Putzgefüge untersucht.

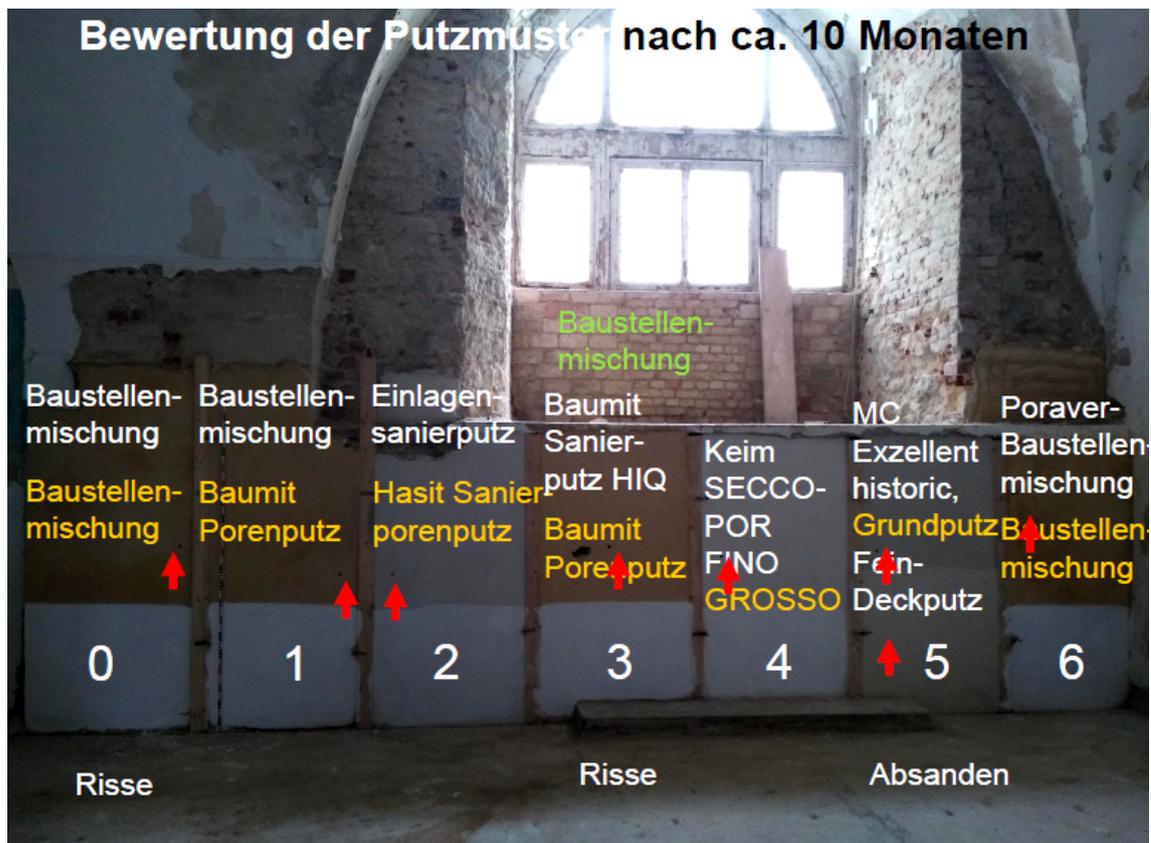


Abb. 56: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, Putzmusterflächen, Probenahmepunkte

3.4.2 Methodik und Analytik

Die in dem Bericht verwendeten Begriffe richten sich nach der Definition der DIN EN 15898 (2011), Angaben zum Erhaltungszustand nach DIN EN 165096 (2012), allerdings ohne die Zustandserhebung vollständig durchzuführen.

Analyseverfahren

Für die Feuchtebestimmung wurden Probenahmen vor Ort durch das IDK durchgeführt. Das Vorgehen der Probenahme orientiert sich an DIN EN 16085 (2012). Mit einem Spiralbohrer (\varnothing 12mm) wurde aus definierten Tiefenstufen Bohrmehl entnommen und in luftdichten Behältern aufgefangen. Die Feuchtebestimmung erfolgt mittels Darmmethode (WTA 4-11-02/D, 1999; DIN EN 16682 2017) im Labor des IDK e.V.)

Qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung

Aus den Bohrmehlproben wurden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge (in Anlehnung an DIN 38414) im Labor des IDK erstellt. Es erfolgte eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial (DIN EN 16455 2014), sowie der Leitfähigkeit (in Anlehnung an DIN EN 27888) und des pH-Werts des Extraktes. Der pH-Wert wurde über Behrotest pH81 und die Leitfähigkeit über WTW Cond 315i/Set bestimmt. Von den Extrakten wurden mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2800 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sension 2.

Die Analyseergebnisse der Salzuntersuchungen werden angegeben und bewertet in Ma.-%. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus den Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998). Tab. 40 gibt Bewertungsgrenzwerte für bauschädliche Salze nach WTA (2001, 1999) an.

Tab. 40: Bewertungsgrenzwerte für bauschädliche Salze nach WTA (1999)

Bewertung in M.-%	WTA-Merkblatt4-5-99/D "Mauerwerksdiagnostik"		
	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
"gering"	<0,5	<0,2	<0,1
"mittel"	1,5-0,5	0,5-0,2	0,3-0,1
"hoch"	>1,5	>0,5	>0,3

3.4.3 Ergebnisse

Ergebnisse der Feuchte- und Basisuntersuchung

Die Feuchte- und Salzgehalte im Putz und im darunterliegenden Mauerwerk wurden an jeder Musterfläche in jeweils drei Tiefenstufen (0-1,5 cm, 1,5-3 cm und 3-10 cm) ermittelt (Tab. 41). In Abb. 57 und Abb. 58 werden die Feuchteverteilungen in Abhängigkeit von der Profiltiefe bis in eine Tiefe von 10 cm grafisch dargestellt. Eine Bewertung der Ergebnisse erfolgt unter Gliederungspunkt 5.

Tab. 41: Ergebnisse der Feuchte- und Basisuntersuchungen an Bohrmehlproben

Probe	Einwaage [g]	Lf ₂₅₀ [μS/cm]	pH [-]	Σ wasserlösl. Bestandteile [Ma.-%]	Feuchte [Ma.-%]
Muster 0: Baustellenmischung, Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand					
HAL_CR_TP0_1	5,00	254	10,43	0,80	0,98
HAL_CR_TP0_2	3,81	249	10,54	0,55	3,77
HAL_CR_TP0_3	5,00	45	10,34	0,15	5,07
Muster 1: Unterputz: Baunit Porenputz (beige!), Deckputz: Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand					
HAL_CR_TP1_1	5,00	74	10,06	0,27	0,45
HAL_CR_TP1_2	2,51	592	10,12	2,21	2,93
HAL_CR_TP1_3	5,00	1845	10,30	4,15	8,14
Muster 2: Unterputz: Hasit Sanierporenausgleichsputz Deckputz: Hasit Einlagensanierputz					
HAL_CR_TP2_1	3,16	52	10,75	0,46	0,91
HAL_CR_TP2_2	3,18	1307	10,75	2,98	3,79
HAL_CR_TP2_3	5,00	828	10,25	1,58	6,59
Muster 3: Unterputz: Baunit Porenputz, Zwischenputz: Baunit Sanierputz HIQ, Deckputz: Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand					
HAL_CR_TP3_1	4,36	104	10,55	0,38	0,47
HAL_CR_TP3_2	4,04	107	10,39	0,30	1,53
HAL_CR_TP3_3	5,00	267	10,21	1,79	3,65
Muster 4: Unterputz: Keim SECCOPOR-GROSSO, Deckputz: Keim SECCOPOR-FINO					
HAL_CR_TP4_1	2,37	71	9,88	0,64	0,58
HAL_CR_TP4_2	3,55	592	9,67	3,49	4,01
HAL_CR_TP4_3	5,00	127	9,70	0,33	5,62
Muster 5unten: MC Exzellent historic, grob					
HAL_CR_TP5u_1	2,85	130	8,96	0,52	0,53
HAL_CR_TP5u_2	4,57	1767	8,93	2,75	2,95
HAL_CR_TP5u_3	5,00	62	9,64	0,62	4,14

Muster 5oben: MC Exzellent historic, fein					
HAL_CR_TP5o_1	4,07	220	9,27	0,69	0,70
HAL_CR_TP5o_2	2,05	1409	9,85	3,94	3,67
HAL_CR_TP5o_3	5,00	131	9,79	0,37	3,79
Muster 6: Unterputz: Baustellenmischung: Otterbein NHL 2-basierter Kalkputz mit regionalem Sand, Deckputz: Baustellenmischung mit Poraver-Anteil					
HAL_CR_TP6_1	5,00	37	9,66	<0,12	0,50
HAL_CR_TP6_2	5,00	1117	9,81	1,55	2,53
HAL_CR_TP6_3	5,00	536	9,93	0,89	5,29
Nordwand: wie Musterfläche 0					
HAL_CR_TP7_1	5,00	88	9,81	0,26	0,32
HAL_CR_TP7_2	3,38	187	9,64	1,17	0,50
HAL_CR_TP7_3	5,00	247	9,40	1,01	0,71
Nordwand: wie Musterfläche 3					
HAL_CR_TP8_1	3,74	140	10,17	0,57	0,31
HAL_CR_TP8_2	2,77	547	10,19	1,75	1,41
HAL_CR_TP8_3	5,00	278	9,85	1,23	0,90

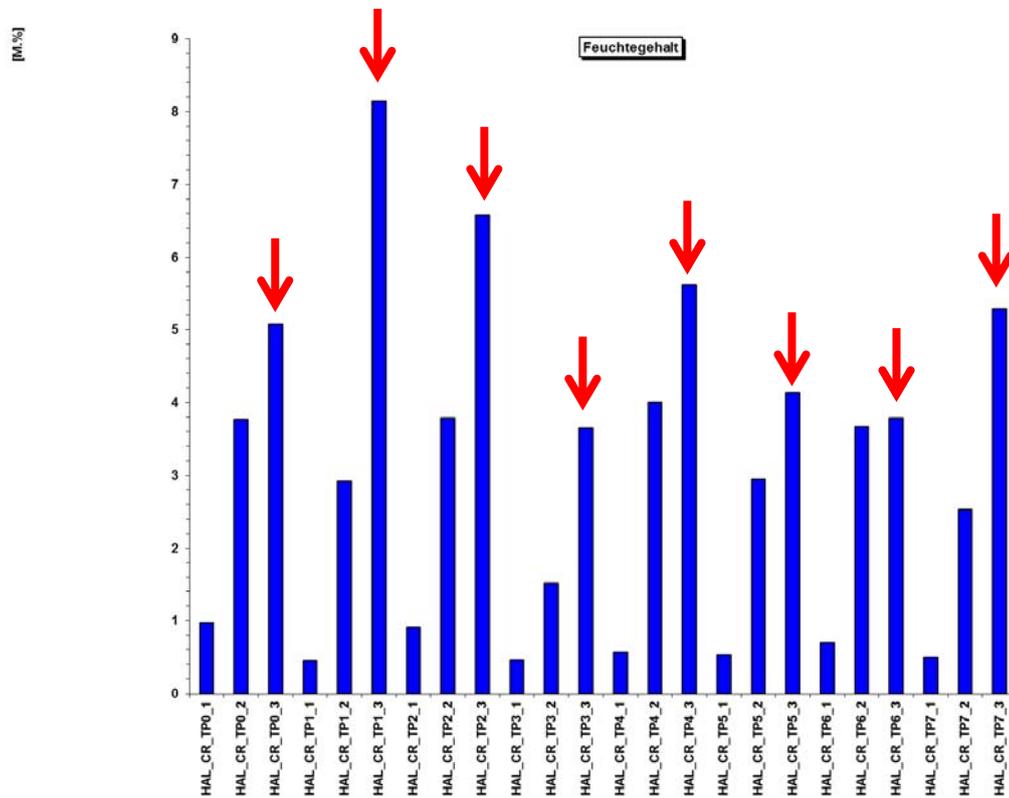


Abb. 57: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, Feuchteverteilung im Bereich der Einzelmusterflächen in den Profiltiefen: 0 bis 1,5 cm, 1,5 bis 3 cm und 3 bis 10 cm): Die roten Pfeile zeigen immer die letzte Tiefenstufe (von 3 bis 10 cm) jedes Tiefenprofils, den Bereich unterhalb der Putzlagen an.

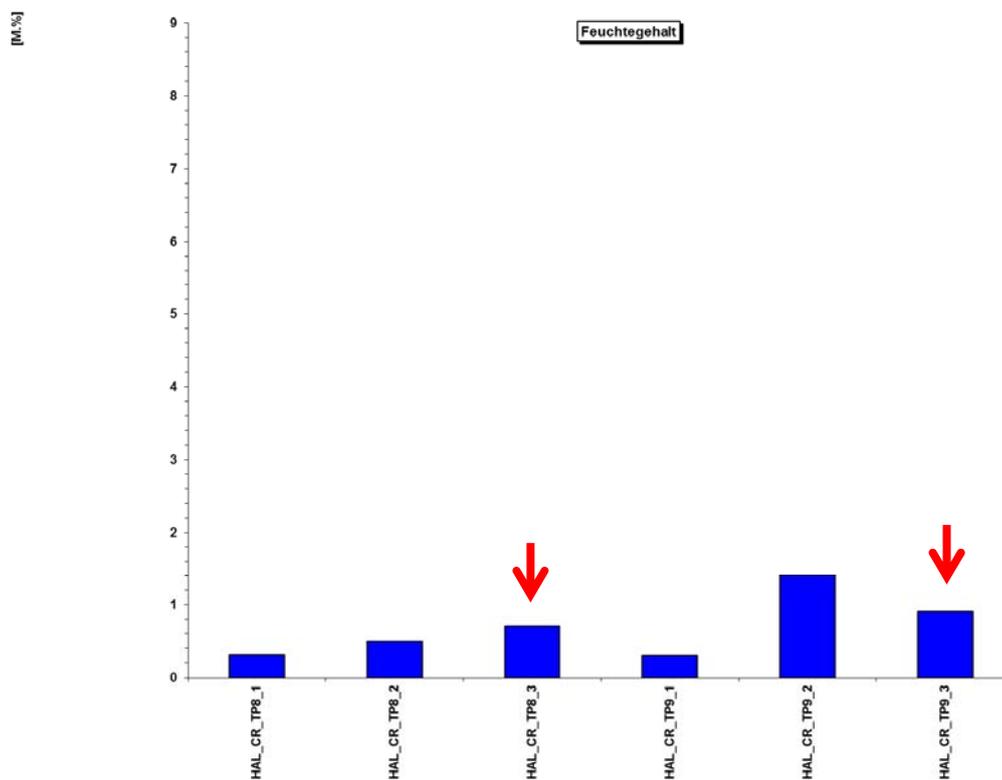


Abb. 58: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Nordwand, Feuchteverteilung im Bereich der beiden Musterflächen in den Profiltiefen: 0 bis 1,5 cm, 1,5 bis 3 cm und 3 bis 10 cm): Die roten Pfeile zeigen immer die letzte Tiefenstufe (von 3 bis 10 cm) jedes Tiefenprofils, den Bereich unterhalb der Putzlagen an.

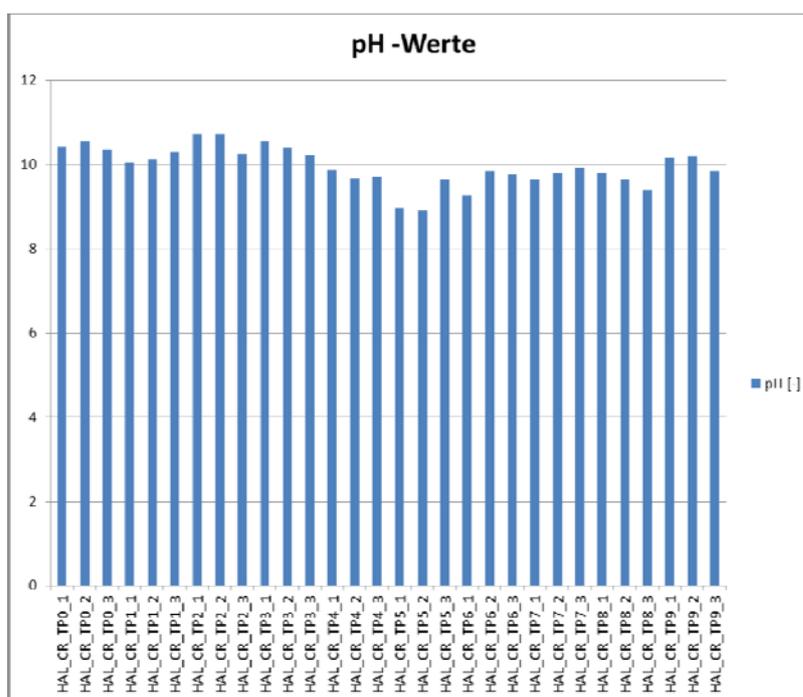


Abb. 59: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, Putzmusterflächen, Bohrmehlproben, pH-Werte

Ergebnisse der An- und Kationenanalysen

Die Ergebnisse der An- und Kationenanalyse der ersten Tiefenstufe aller Musterflächen werden in Tab. 42 vorgestellt. Eine Bewertung erfolgt unter Gliederungspunkt 5.

Tab. 42: Ergebnisse der An- und Kationenanalysen

Probe	Σ lös. Bestandteile [M.%]	Lf ₂₅₀ [μ S/cm]	pH-Wert [-]	Ca ⁺⁺ [M.%]	Mg ⁺⁺ [M.%]	K ⁺ [M.%]	Na ⁺ [M.%]	SO ₄ ⁻ [M.%]	Cl ⁻ [M.%]	NO ₃ ⁻ [M.%]
HAL_CR_TP0_1	0,80	254	10,4	0,18	0,005	0,025	<0,005	<0,01	<0,01	0,02
HAL_CR_TP0_2	0,55	249	10,5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP0_3	0,15	45	10,3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP1_1	0,27	74	10,1	0,06	0,005	0,010	0,007	<0,01	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP1_2	2,21	592	10,1	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP1_3	4,15	1845	10,3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP2_1	0,46	52	10,8	0,03	0,024	0,017	0,008	0,05	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP2_2	2,98	1307	10,8	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP2_3	1,58	828	10,3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP3_1	0,38	104	10,6	0,10	0,006	0,026	0,012	<0,01	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP3_2	0,30	107	10,4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP3_3	1,79	267	10,2	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP4_1	0,64	71	9,9	0,14	0,011	0,015	0,013	0,08	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP4_2	3,49	592	9,7	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP4_3	0,33	127	9,7	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP5u_1	0,52	130	9,0	0,06	0,018	0,058	0,011	0,05	<0,01	0,01
HAL_CR_TP5u_2	2,75	1767	8,9	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP5u_3	0,62	62	9,6	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP5o_1	0,69	220	9,3	0,17	0,012	0,052	0,016	0,01	0,01	<0,01
HAL_CR_TP5o_2	3,94	1409	9,9	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP5o_3	0,37	131	9,8	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP6_1	0,12	37	9,7	0,02	0,005	0,023	0,007	<0,01	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP6_2	1,55	1117	9,8	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP6_3	0,89	536	9,9	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP7_1	0,26	88	9,8	0,08	0,005	0,020	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP7_2	1,17	187	9,6	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP7_3	1,01	247	9,4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP8_1	0,57	140	10,2	0,17	<0,005	0,018	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
HAL_CR_TP8_2	1,75	547	10,2	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
HAL_CR_TP8_3	1,23	278	9,9	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

3.5 Bewertung der Musterflächen und Putzempfehlungen

Auf Wandbereichen mit Feuchte- und Salzbelastungen erfolgte Ende 2016, Anfang 2017 die Anlage von Putzmusterflächen mit 7 unterschiedlichen Materialien. Die Musterflächen wurden im Herbst 2017 durch das IDK beprobt und bewertet. Alle Musterflächen zeigen nach einer relativ kurzen Standzeit von 10 Monaten (noch) hohe alkalische Gehalte in allen Tiefenstufen. Dies kann mit hohen pH-Werten im Bohrmehl belegt werden. Das Mauerwerk der Ostwand ist weiterhin mit erhöhten Feuchten belastet, an der Nordwand wird keine Feuchtebelastung festgestellt. Hohe Gehalte an löslichen Salzen werden in der zweiten und dritten Tiefenstufe festgestellt. Diese werden jedoch auch durch Calciumhydroxidionen beeinflusst. Die An- und Kationenanalysen der jeweils ersten Tiefenstufe zeigen zum Zeitpunkt der Probenahme noch keine auffälligen Werte. Einige Musterflächen zeigen Schwindrisse oder sanden ab. Ein weiterer ausschlaggebender Faktor für eine Empfehlung war der Widerstand gegenüber mikrobieller Besiedlung. Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse kann das Seccopor-Putzsystem der Firma KEIM mit den unten beschriebenen Eigenschaften für die Sanierung der Crodellhalle empfohlen werden, da es neben der Funktionalität auch die ästhetischen Vorstellungen der Mitarbeiter des Kunstmuseums Moritzburg erfüllt.

Entscheidungskriterien

- Kapillarität durch Porensystem ermöglicht weitere Abtrocknung des Mauerwerks
- Salzanreicherung erfolgt an der Oberfläche, Absaugen der Salze notwendig
- ausreichende Festigkeit
- keine Farbfassung, eingefärbter Putz
- Alkaligehalte liegen im tolerierbaren Bereich
- nur sehr geringe mikrobielle Besiedlung
- Oberflächenstruktur und Farbigkeit stimmt mit ästhetischen Vorstellungen der Mitarbeiter des Kunstmuseums überein



Abb. 59: Halle, Moritzburg, Crodellhalle, Ostwand, Putzmusterflächen

4. Weiterführende Literatur

ALLMANN R., KRAUS, K. (2003): Salze im Historischen Mauerwerk. Ber. Dt Min. Gesell., Beih. Z. Eur. J. Mineral., 15, 1, 5

ARENDE, C. & SEELE, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.

BIRRESBORN, L. (2017): Untersuchungen zur Wirkung von ionisierter Luft auf Bindemittel und Pigmente. Eine Methode zur Dekontaminierung von mikrobiologisch befallenen Wandmalereien. In: Studentische Forschung Konservierung und Restaurierung Band 1, Verlag der Fachhochschule Potsdam, www.fh-potsdam.de/verlag. URN urn:nbn:de:kobv:525-15711 Digital

FAN, L., SONG, J., HILDEBRAND, P. D. & FORNEY, F. C. (2002): Interaction of ozone and negative air ions to control micro-organisms. Journal of Applied Microbiology 2002, 93, 144-148

GRASSEGGER, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S.

HILGE, C., PETERSEN, K., KRUMBEIN, W. E. (1998): Auswirkungen von UV-Bestrahlungen und Ozon auf die Stoffwechselaktivität von Gestein und Putz besiedelnden Mikroorganismen, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 12/1998, S.162-173

KERSTEN, K., KALISCH, U., MEINHARDT, J. (2015): Halle, Moritzburg, Crodelhalle – Bericht zu den Materialuntersuchungen und Klimamessungen, IDK-Bericht HAL 12/2015, 37 S.

RUSAM, H. (2011): Anstriche und Beschichtungen im Bauwesen, 214 S., Fraunhofer IRB Verlag

STEIGER, M., NEUMANN, H.-H., GRODTEN, T., WITTENBURG, C., DANNECKER, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.

STRÄTLING, M., UNGER, W. & PETERSEN, K. (2008): Orientated investigation to kill the mycelia of the dry rot fungus, *Serpula lacrymans*, with microwaves, Proceedings of the international conference Wood Science for Conservation of Cultural Heritage, 5th-7th November 2008, Braga, Portugal, Gril J, University Press, Firenze, 2010, p. 1-6

TINZL, C., OLDENBOURG, C., PETERSEN, K., FRICKE-TINZL, H., HILGE, C., KATKOV, M. (1995): UV-C-Strahlung zur Entfernung und Kontrolle von Algenbelägen an wandgebundenen Kunstwerken und Steinskulpturen: eine Alternative zur Biozid-Anwendung?, in: Restauratorenblätter, 16, Wien 1995, S. 127-138.

WILLEMS, W., SCHILD, K., DINTER, S., STRICKER, D. (2010): Formeln und Tabellen Bauphysik, 435 S., Springer-Verlag

WTA-Merkblatt "Feuchtemessung" (1999): WTA-Merkblatt 4-11-02/D: Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

WTA-Merkblatt "Mauerwerksdiagnostik" (1999): WTA-Merkblatt 4-5-99/D: Beurteilung von Mauerwerk, Mauerwerksdiagnostik. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

ZÖTZL, M., KERSTEN, H., KALISCH, U. (2017): Halle, Moritzburg, Crodelhalle - Putzempfehlungen zur Anlage von Musterflächen. IDK-Bericht HAL 42/2016, 3 S.

Abbildungsnachweis:

Fritz, U.-M., HAWK: Abb. 48

Jahn, J., Schönfeldt, B., HAWK: Abb. 38, 39

Kersten, H., IDK: Abb. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 28

Klocke, J.: Abb. 31, 32, 40, 41, 42, 43

Meinhardt, J., IDK: Abb. 13, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26

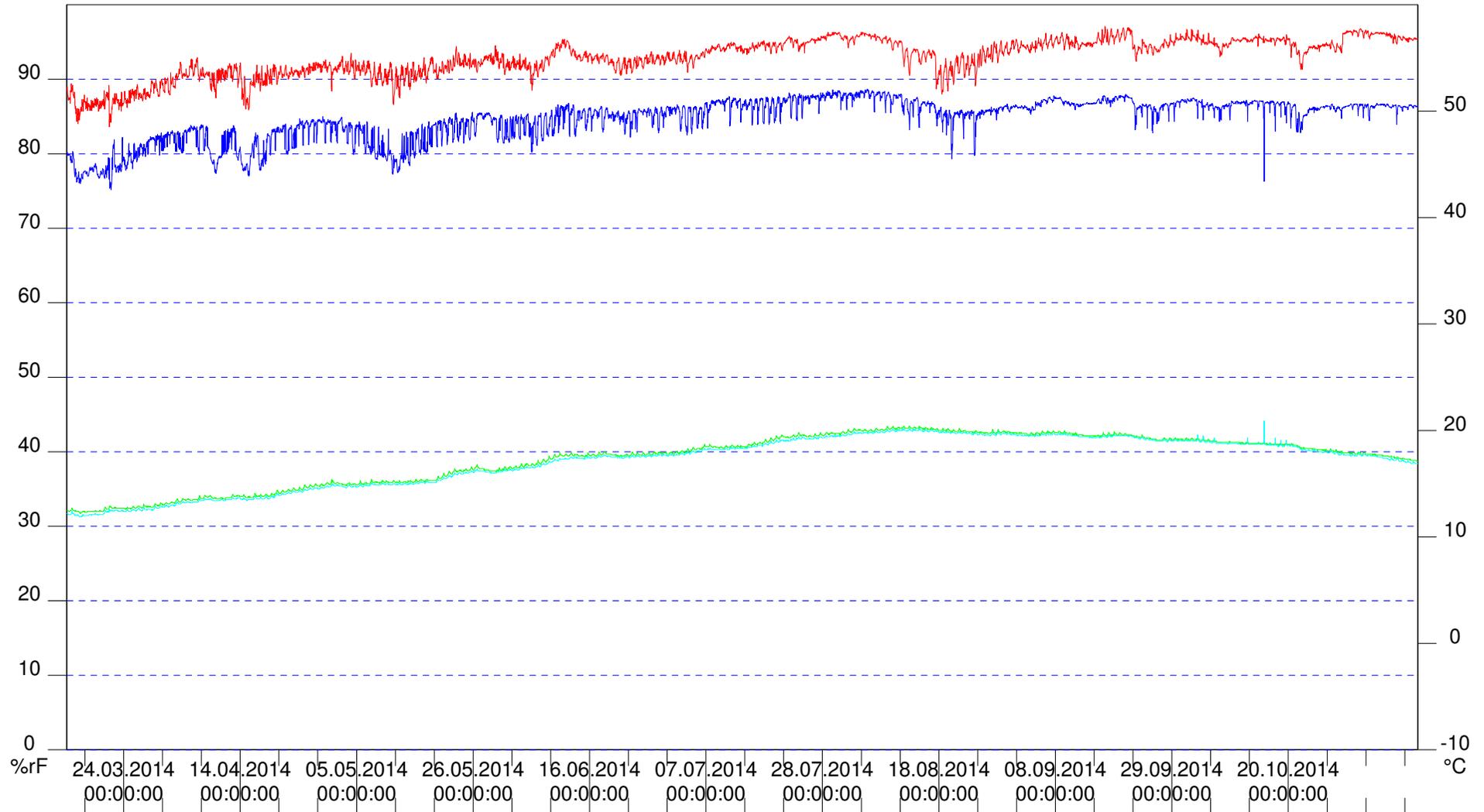
Petersen, K., HAWK: 46a, 47

Zötzl, M., IDK:

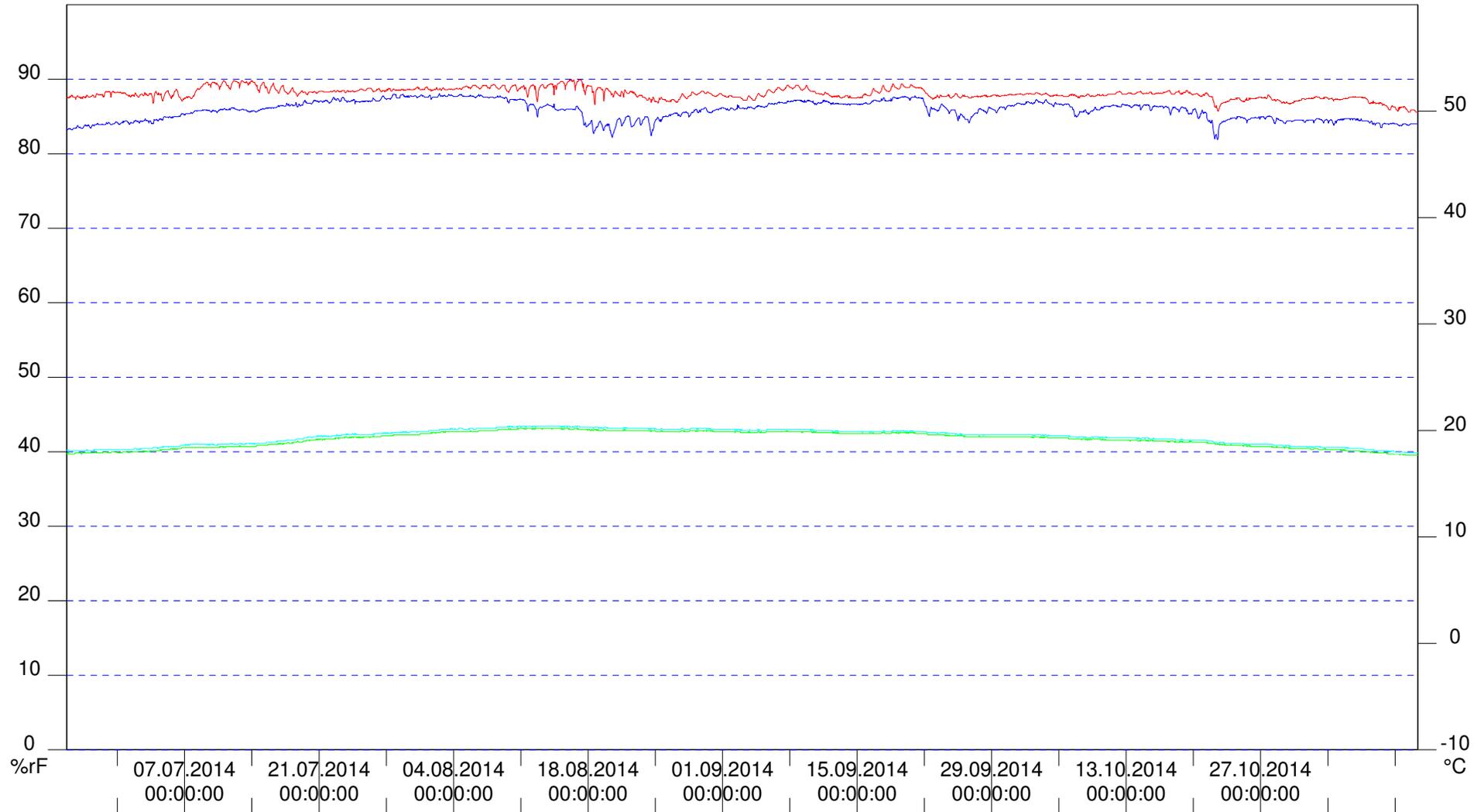
5. Anhang

- Klimadiagramme

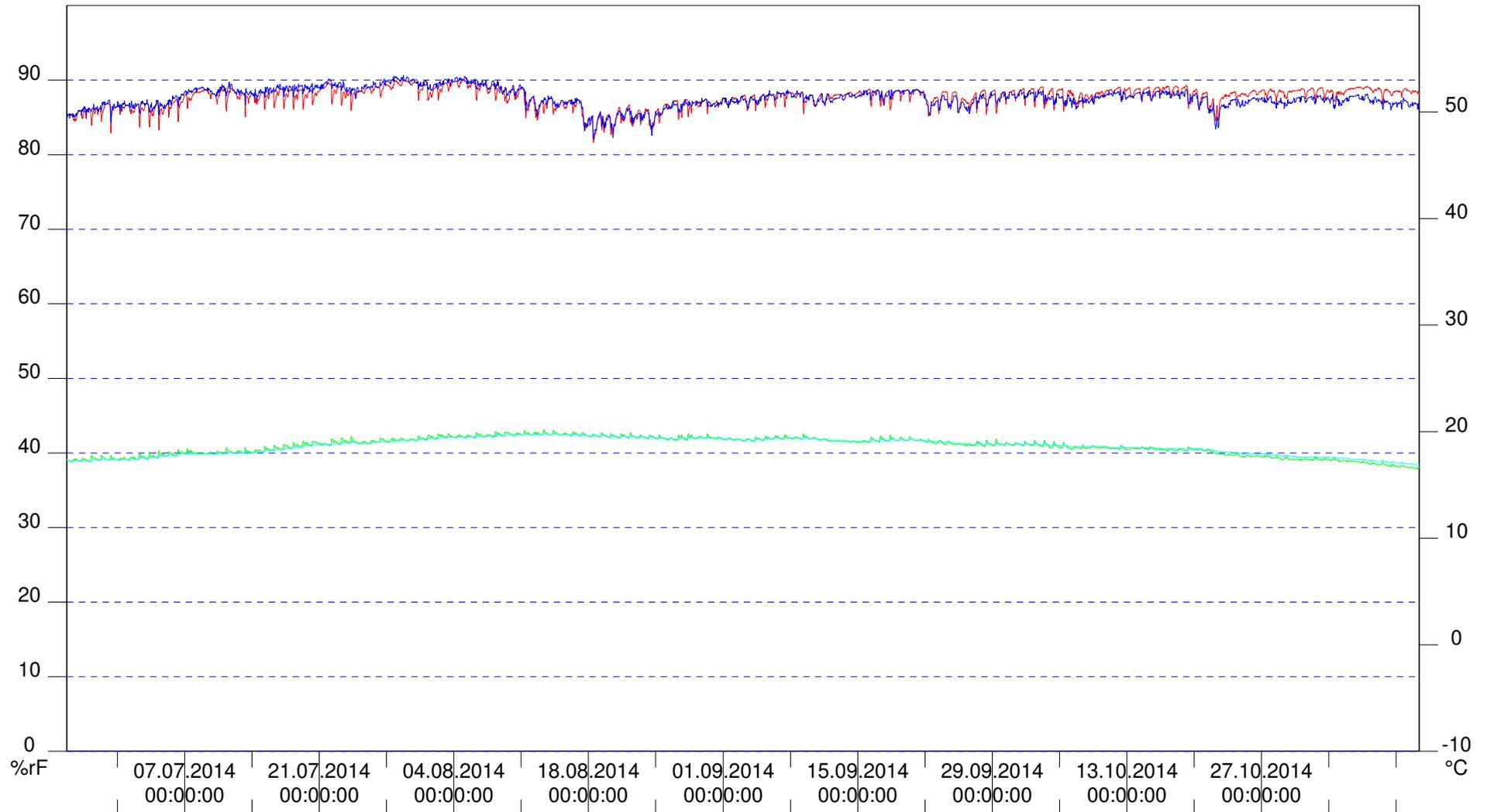
IDK	Diagramm 1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F. oben	83.60	97.10	92.91
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	12.20	20.40	17.35
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	75.20	88.70	84.67
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 [°C] Temp. unten	11.90	20.90	17.15
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						



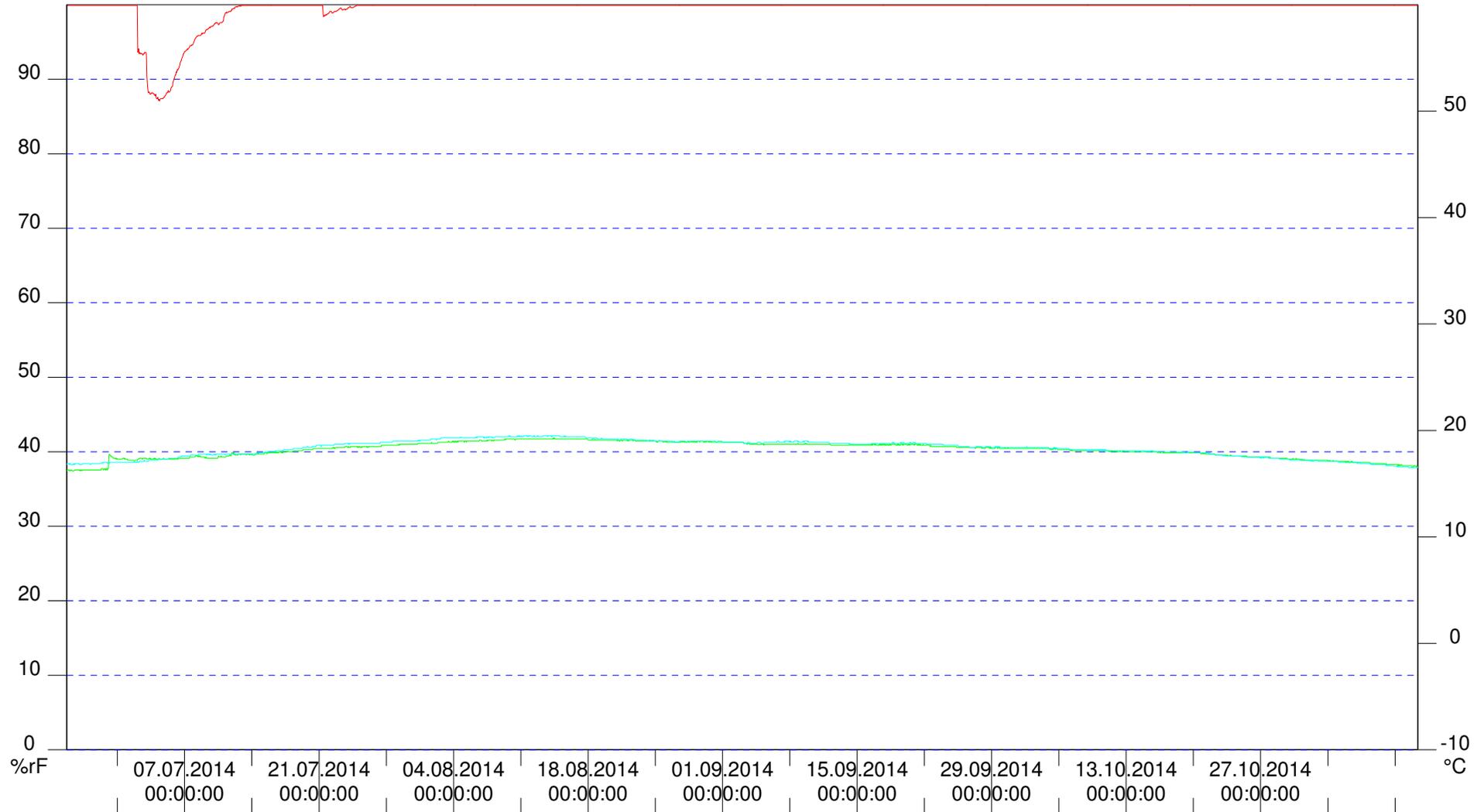
IDK	Diagramm 2	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F unten W...	85.60	90.00	88.09
Halle Moritzburg, Crodalhalle, Logger Nr.:Gj 4.2			K:2 [°C] Temp unten Wa...	17.70	20.20	19.19
Anschl.: 1 Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand rel. F. [rot]; Temp. [grün]			K:3 [%rF] rel.F. oben Wa...	81.90	88.10	85.84
Anschl. Nr.: 2 Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 oben hinter der Wand rel. F. [dunkelblau]; Temp. [hellblau]			K:4 [°C] Temp. oben Wa...	17.90	20.40	19.40



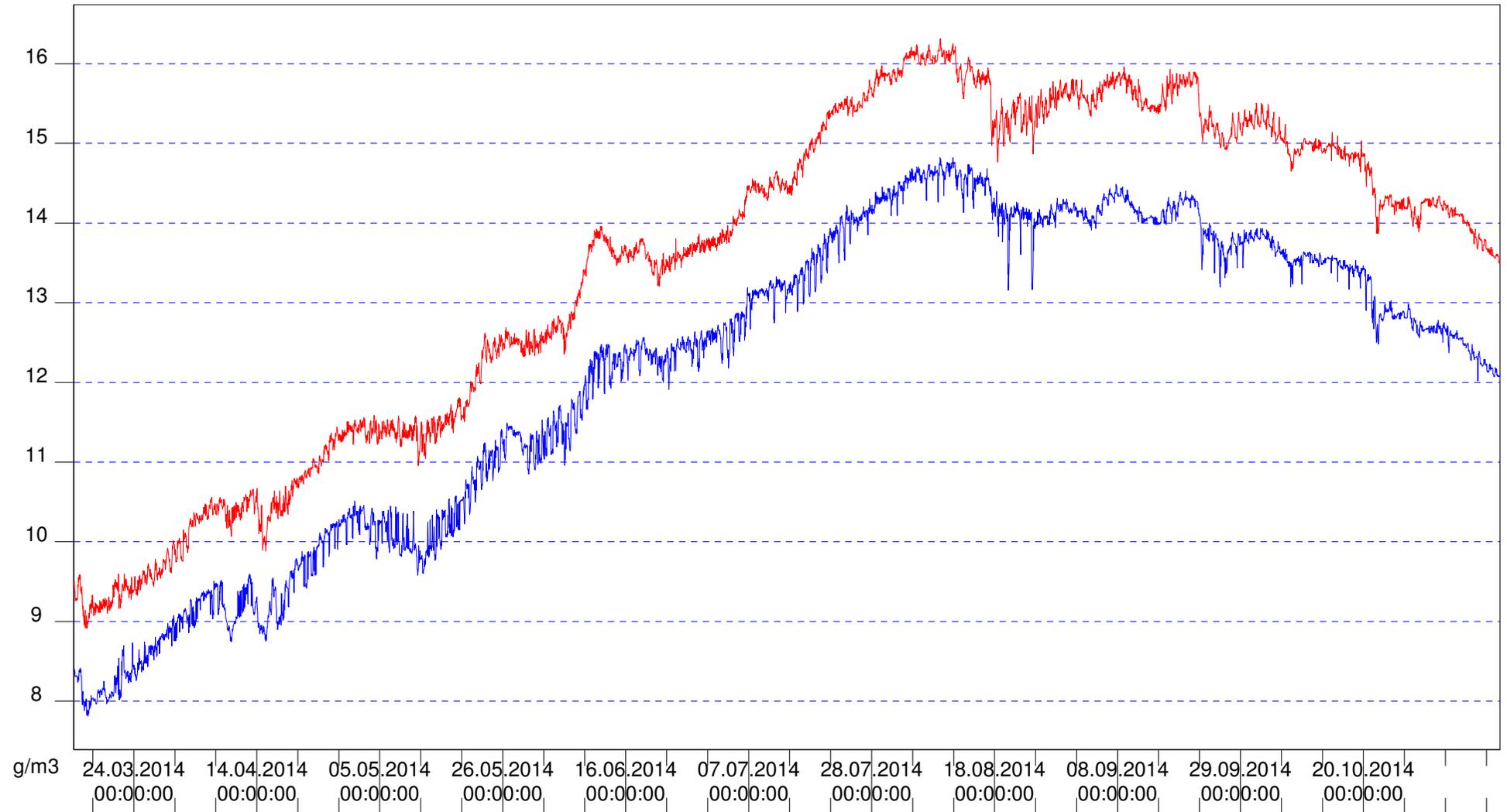
IDK	Diagramm 3	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] re. F. —	81.60	90.10	87.67
Halle Moritzburg Crodelhalle			K:2 [°C] Lufttemp. —	16.50	20.20	18.65
Vergleich der relativen Raumlufffeuchte [rot], der Raumlufftemperatur [grün] und			K:3 [°C] Oberfl- temp —	16.90	19.90	18.66
der Oberflächentemperatur [hellblau] an der Südwand mit der berechneten			K:6 [%rF] %rF —	82.06	90.62	87.61
relativen Luftfeuchte [dunkelblau] im Kontaktbereich der Raumluff zur						
Wandoberfläche						



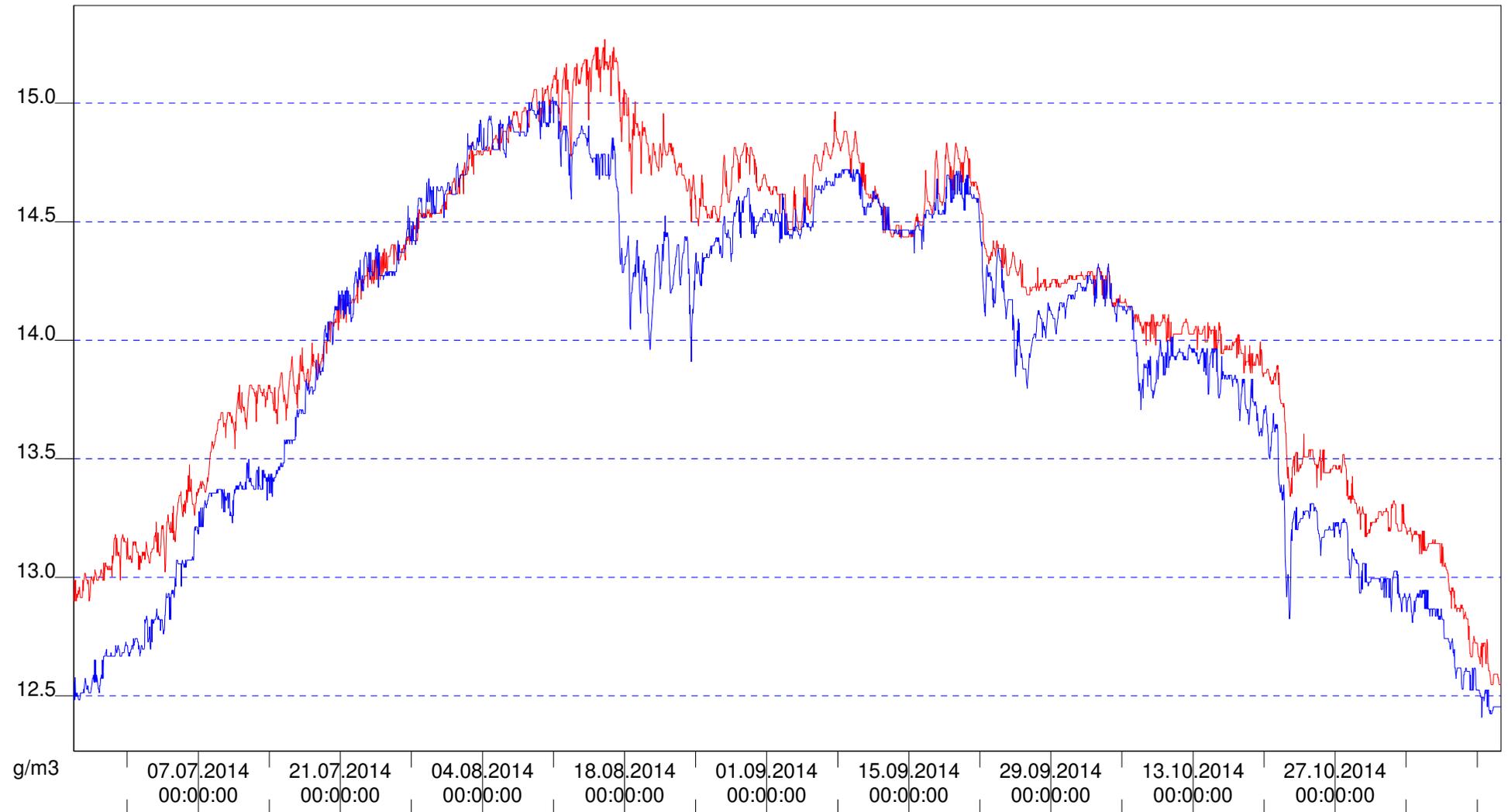
IDK	Diagramm 4	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel. F. unten	87.10	99.90	99.42
Moritzburg Halle, Crodelhalle, Ostwand zum Hof			K:2 [°C] Temp. unten	16.20	19.30	18.18
Logger 2.5			K:3 [%rF] rel. F. oben	99.90	99.90	99.90
Anschl. 1 F 5.1.1 Ausgleichsfeuchte unten			K:4 [°C] Temp. oben	16.50	19.50	18.31
Anschl. 2 F 4.5.1 Ausgleichsfeuchte oben						



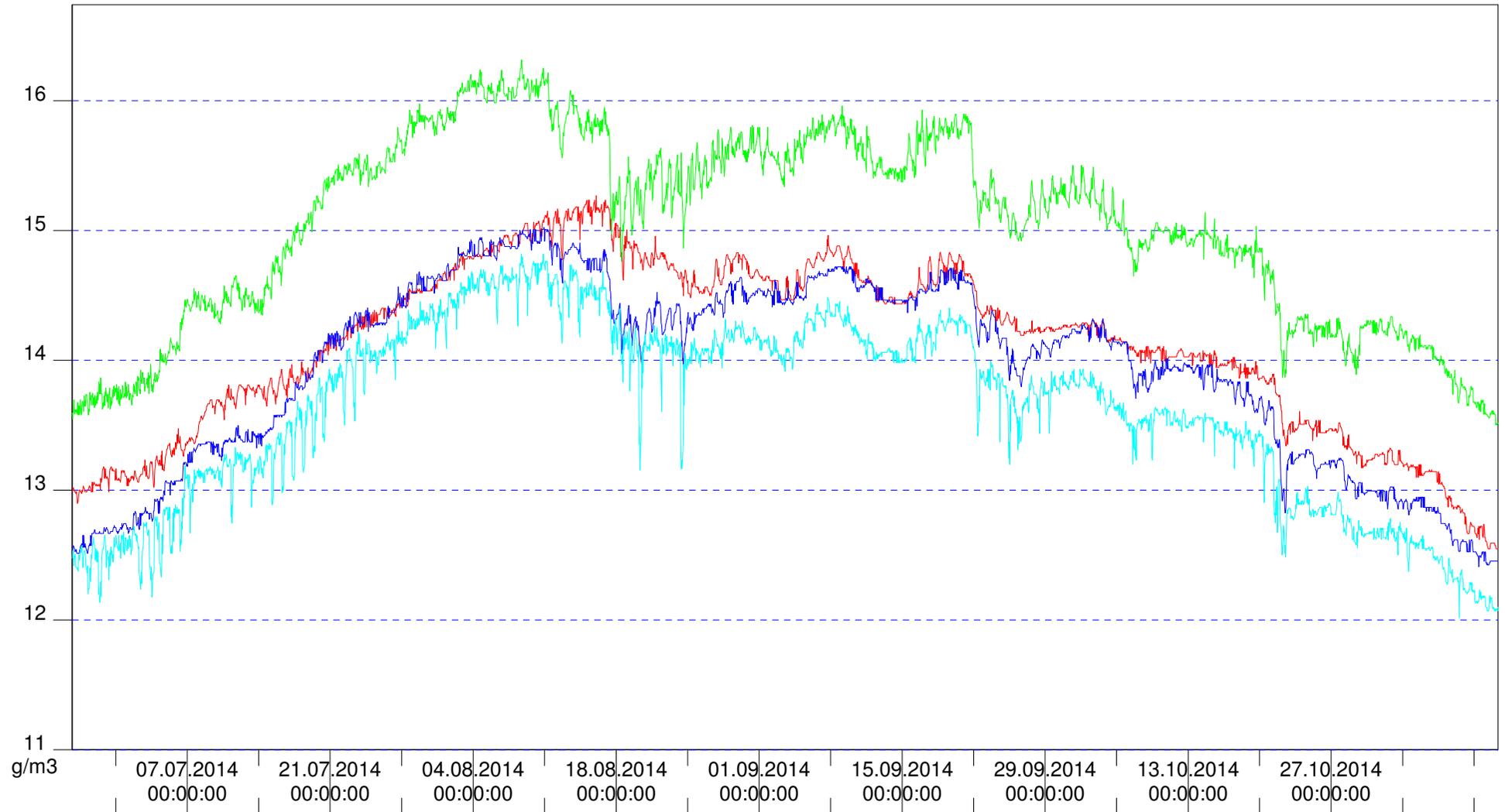
IDK	Diagramm 1.1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:5 [g/m3] g/m3	8.91	16.31	13.49
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:6 [g/m3] g/m3	7.81	14.82	12.16
Logger 9.2						
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben) absolute Luftfeuchte [rot]						
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten) absolute Luftfeuchte [blau]						



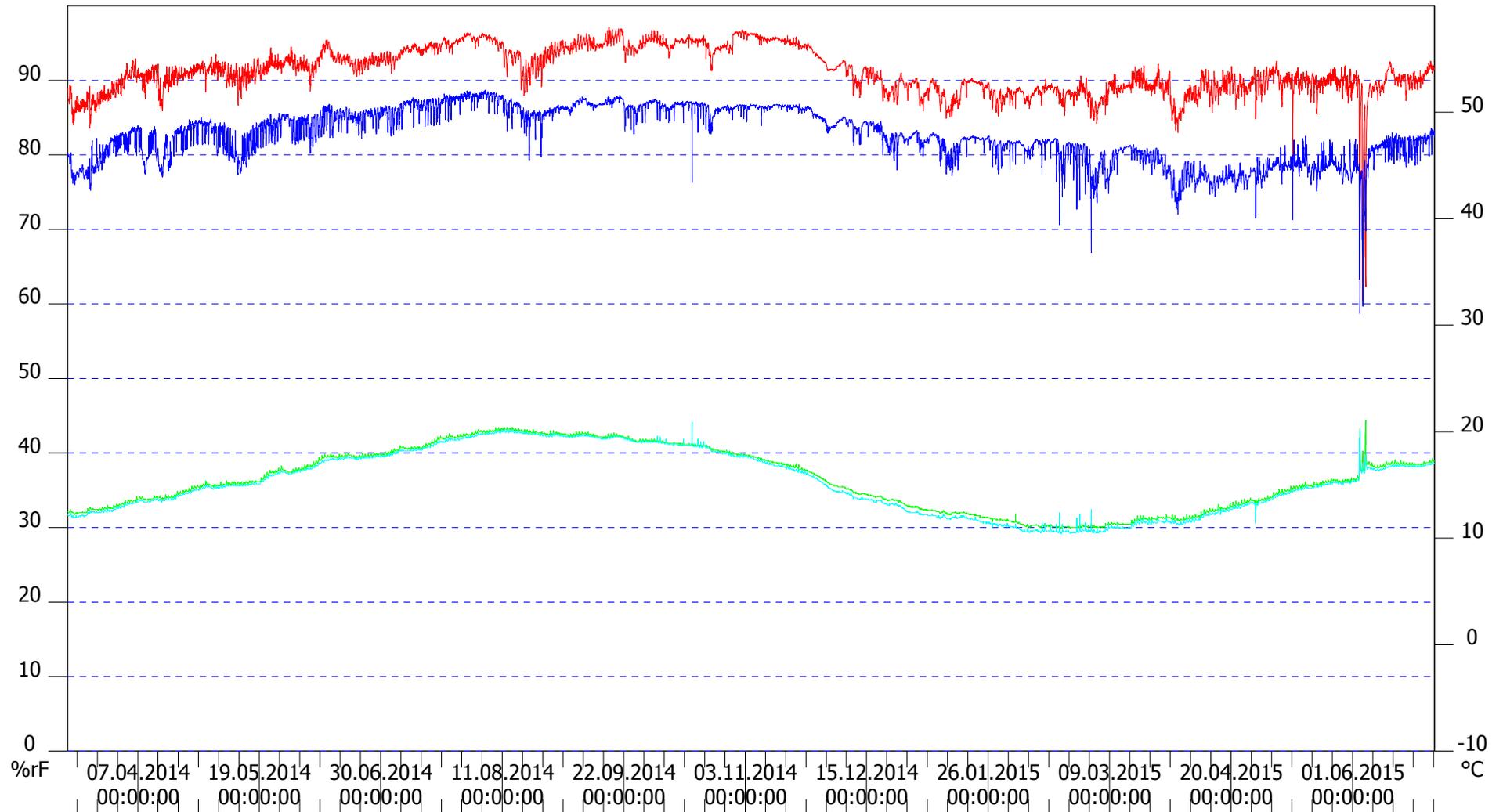
IDK	Diagramm 2.1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:5 [g/m3] g/m3 —	12.55	15.27	14.11
Halle Moritzburg, Crodelhalle, Logger Nr.:Gj 4.2			K:6 [g/m3] g/m3 —	12.41	15.03	13.93
Anschl.: 1 Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand						
absolute Luftfeuchte [rot]						
Anschl. Nr.: 2 Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 oben hinter der Wand						
absolute Luftfeuchte [blau]						



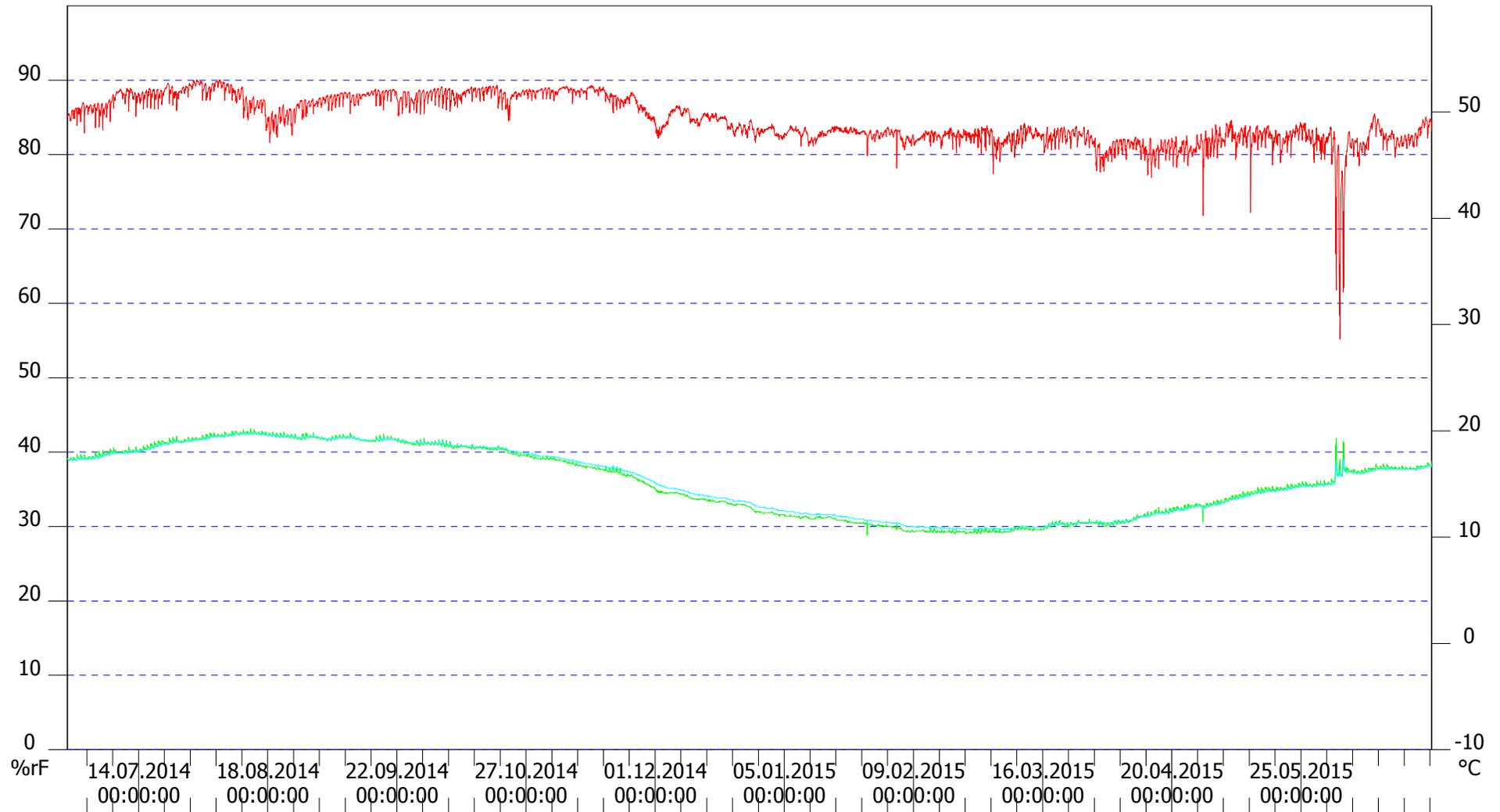
IDK	Diagramm 2.2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:5 [g/m3] g/m3	12.55	15.27	14.11
Halle Moritzburg, Crodelhalle, Logger Nr.:Gj 4.2			K:6 [g/m3] g/m3	12.41	15.03	13.93
abs. Feuchte oben hinter der Wand [dunkelblau]			K:5 [g/m3] g/m3	8.91	16.31	13.49
abs. Feuchte unten hinter der Wand [rot],			K:6 [g/m3] g/m3	7.81	14.82	12.16
abs. Raumlufffeuchte oben [grün],						
abs. Raumlufffeuchte unten [hellblau]						



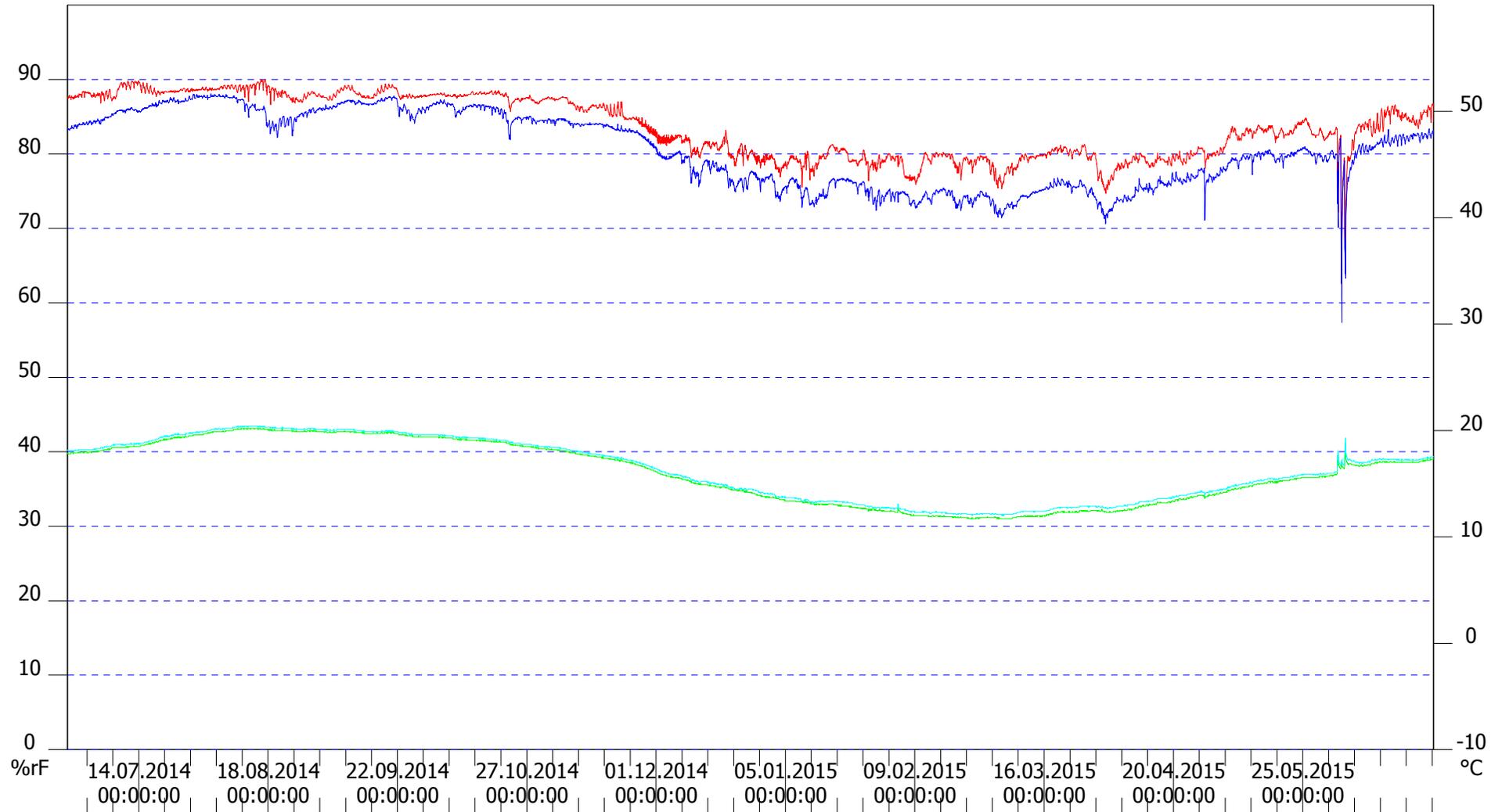
IDK	Diagramm 2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F. oben	60.50	97.10	91.25
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	10.90	21.10	15.53
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	58.70	88.70	82.66
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 [°C] Temp. unten	10.40	20.90	15.25
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						



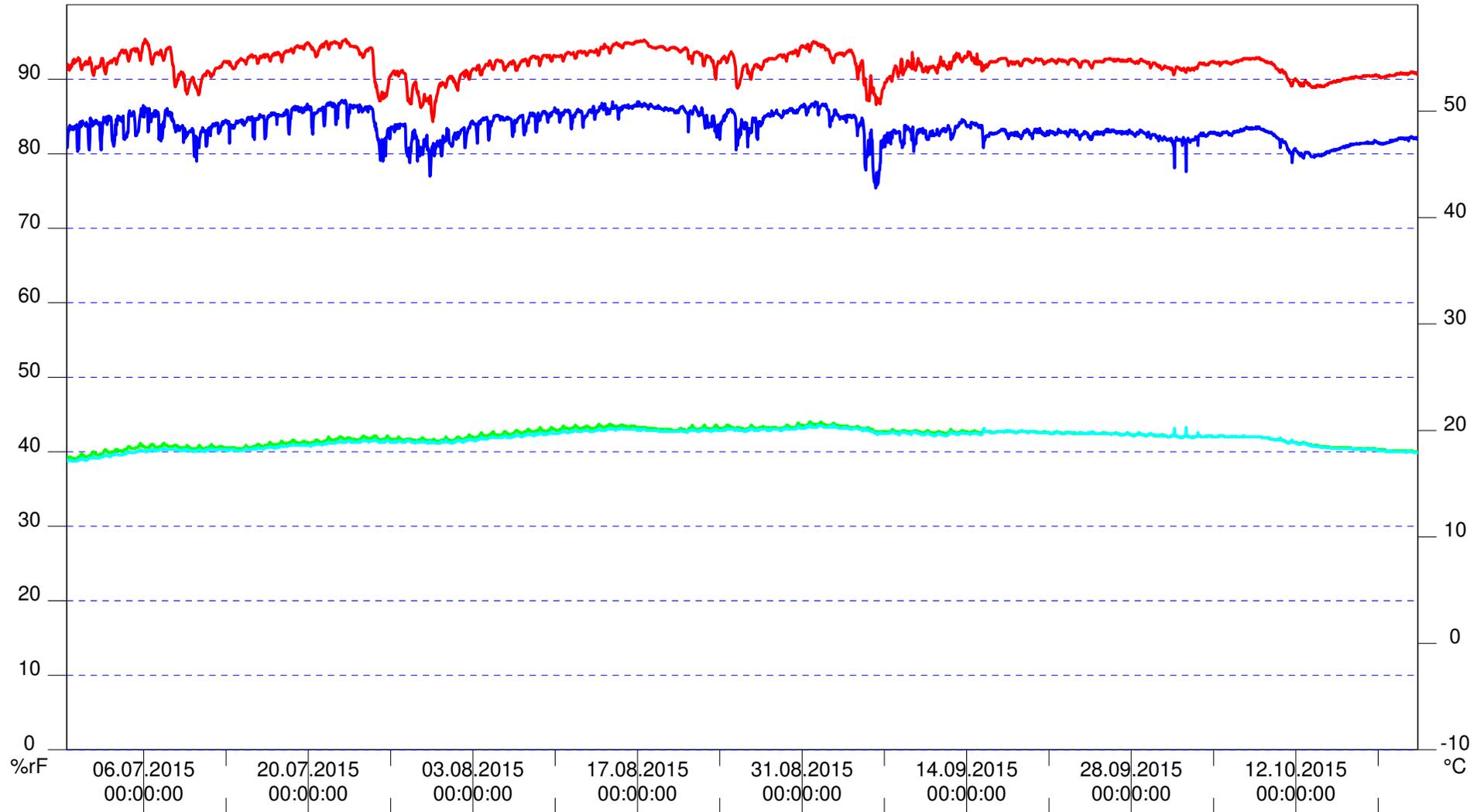
IDK	Diagramm 3	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] re. F. —	55.20	90.10	84.64
Halle Moritzburg Crodelhalle Südwand			K:2 [°C] Lufttemp. —	10.20	20.20	15.16
Logger H1 13.4 Raumklima			K:3 [°C] Oberfl- temp —	10.70	19.90	15.26
Oberflächen--temp. T11.11						



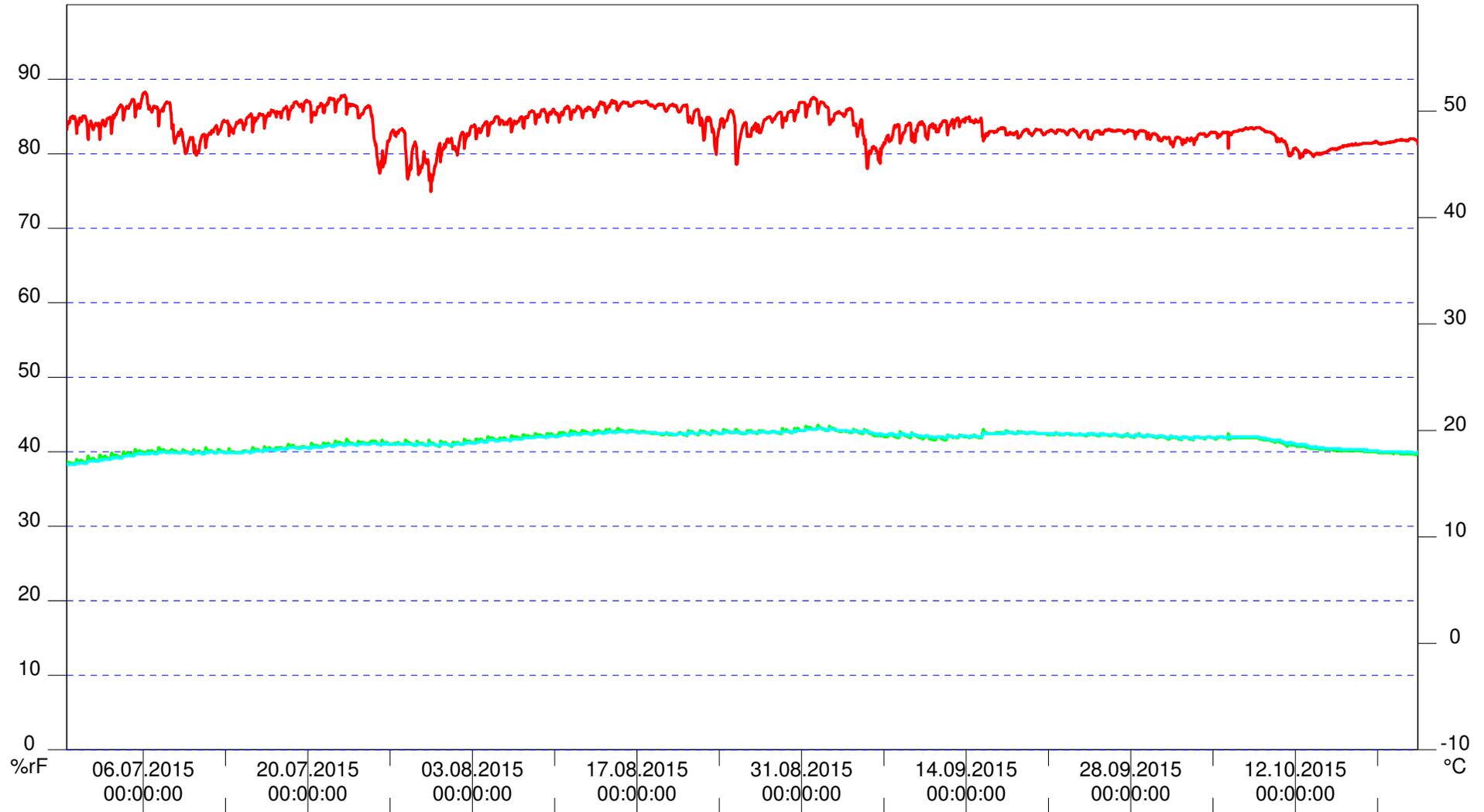
IDK	Diagramm 1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F unten W...	61.40	90.00	83.59
Halle Moritzburg, Crodelhalle, Malereiwand			K:2 [°C] Temp unten W...	11.70	20.20	16.04
Logger Nr.:Gj 4.2			K:3 [%rF] rel.F. oben W...	57.40	88.10	80.53
Anschl.: 1 Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand			K:4 [°C] Temp. oben W...	12.00	20.40	16.31
Anschl. Nr.: 2 Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 oben hinter der Wand						



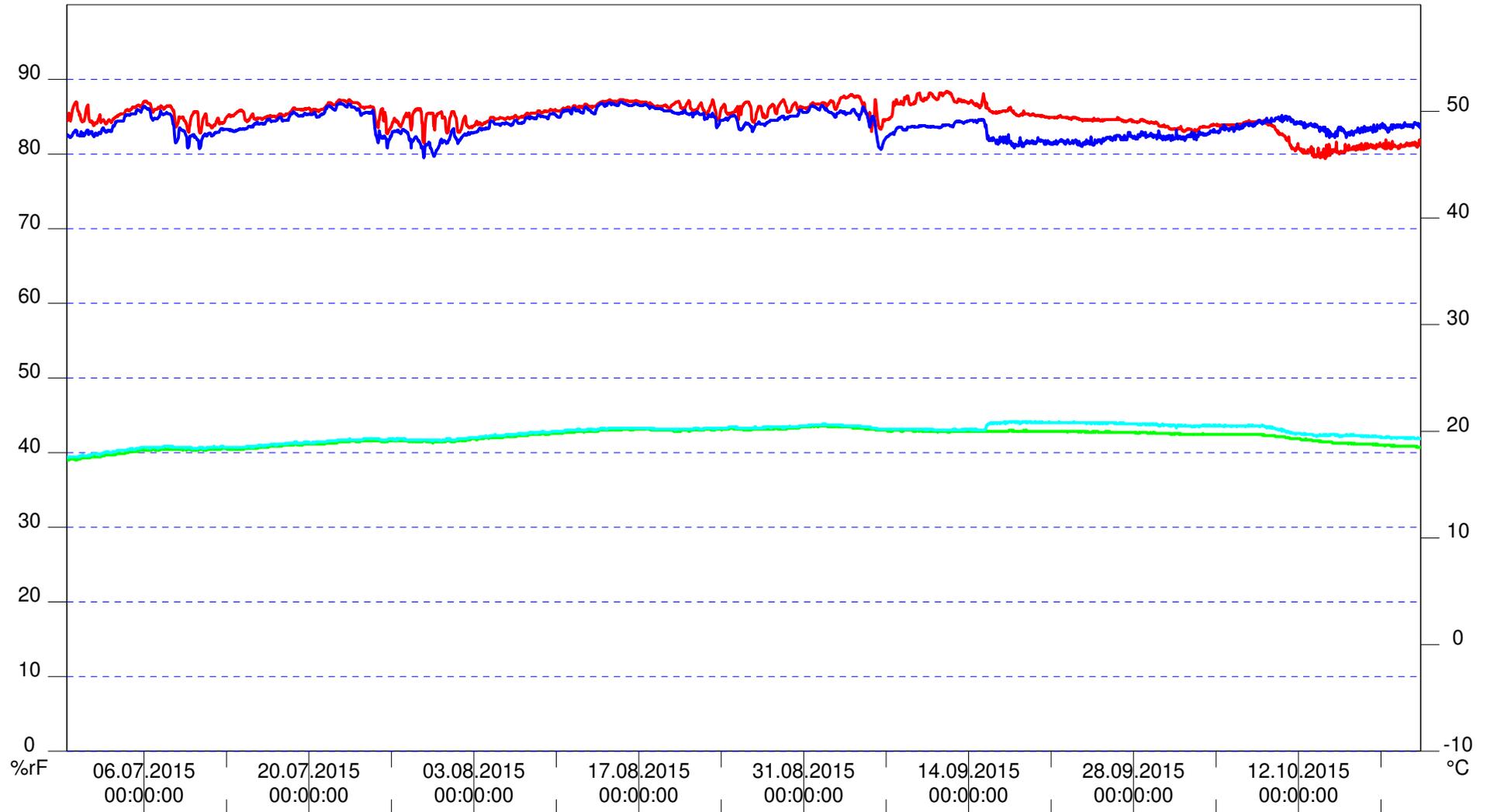
IDK	Diagramm 3	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F. oben	84.30	95.40	92.07
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	17.30	20.80	19.40
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	75.40	87.20	83.56
Raumhöhe (Gewölbebereich) rel. Feuchte [rot], Temp. [grün]			K:4 [°C] Temp. unten	17.10	20.50	19.22
Raumhöhe (Fußbodenbereich) rel. Feuchte [dunkelblau], Temp. [hellblau]						



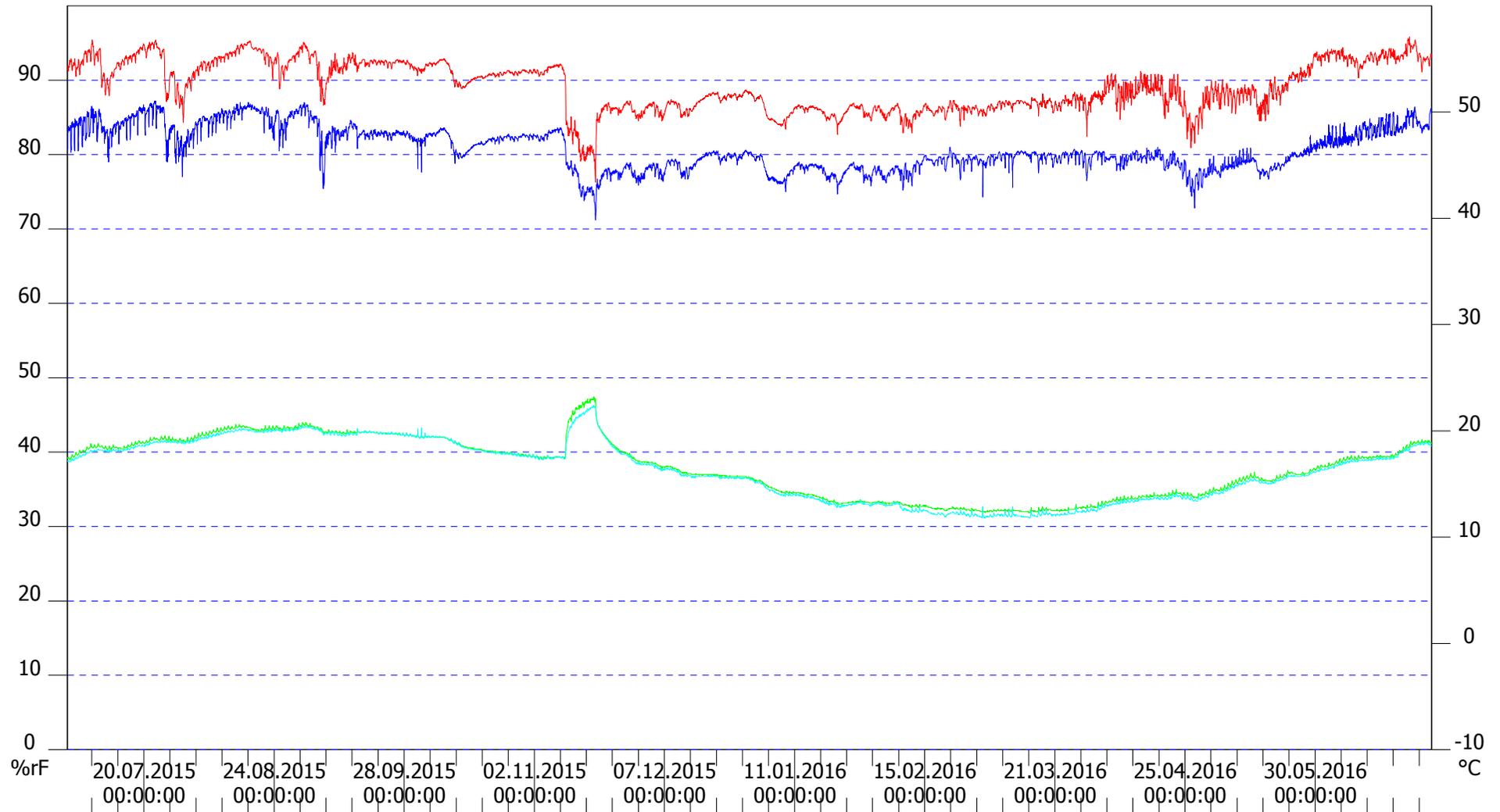
IDK	Diagramm 2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] re. F. —	74.90	88.30	83.63
Halle Moritzburg Crodelhalle			K:2 [°C] Lufttemp. —	16.80	20.50	19.05
Logger H1 13.4 Raumklima rel. Feuchte {rot}, Temp. [grün]			K:3 [°C] Oberfl- temp —	16.80	20.20	19.03
Oberflächen--temp. T11.11 [hellblau]						



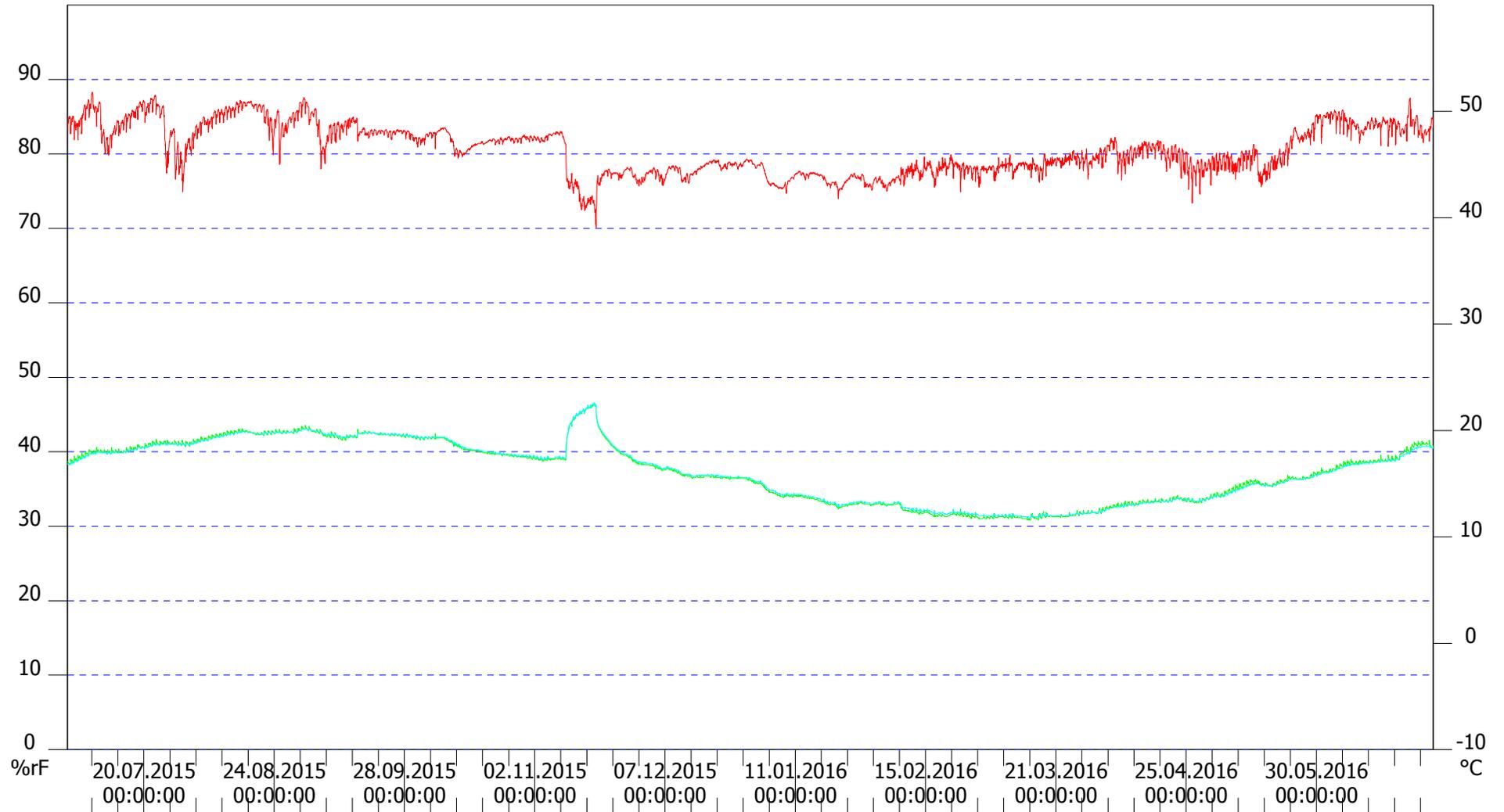
IDK	Diagramm 1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F unten W... —	79.40	88.40	85.01
Halle Moritzburg, Crodalhalle,			K:2 [°C] Temp unten Wa... —	17.30	20.50	19.43
Logger Nr.:Gj 4.2			K:3 [%rF] rel.F. oben Wa... —	79.50	87.00	83.86
hinter der Wand unterer Bereich rel. Feuchte [rot]; Temp. [grün]			K:4 [°C] Temp. oben Wa... —	17.50	20.90	19.79
hinter der Wand oberer Bereich rel. Feuchte [dunkelblau], Temp. [hellblau]						



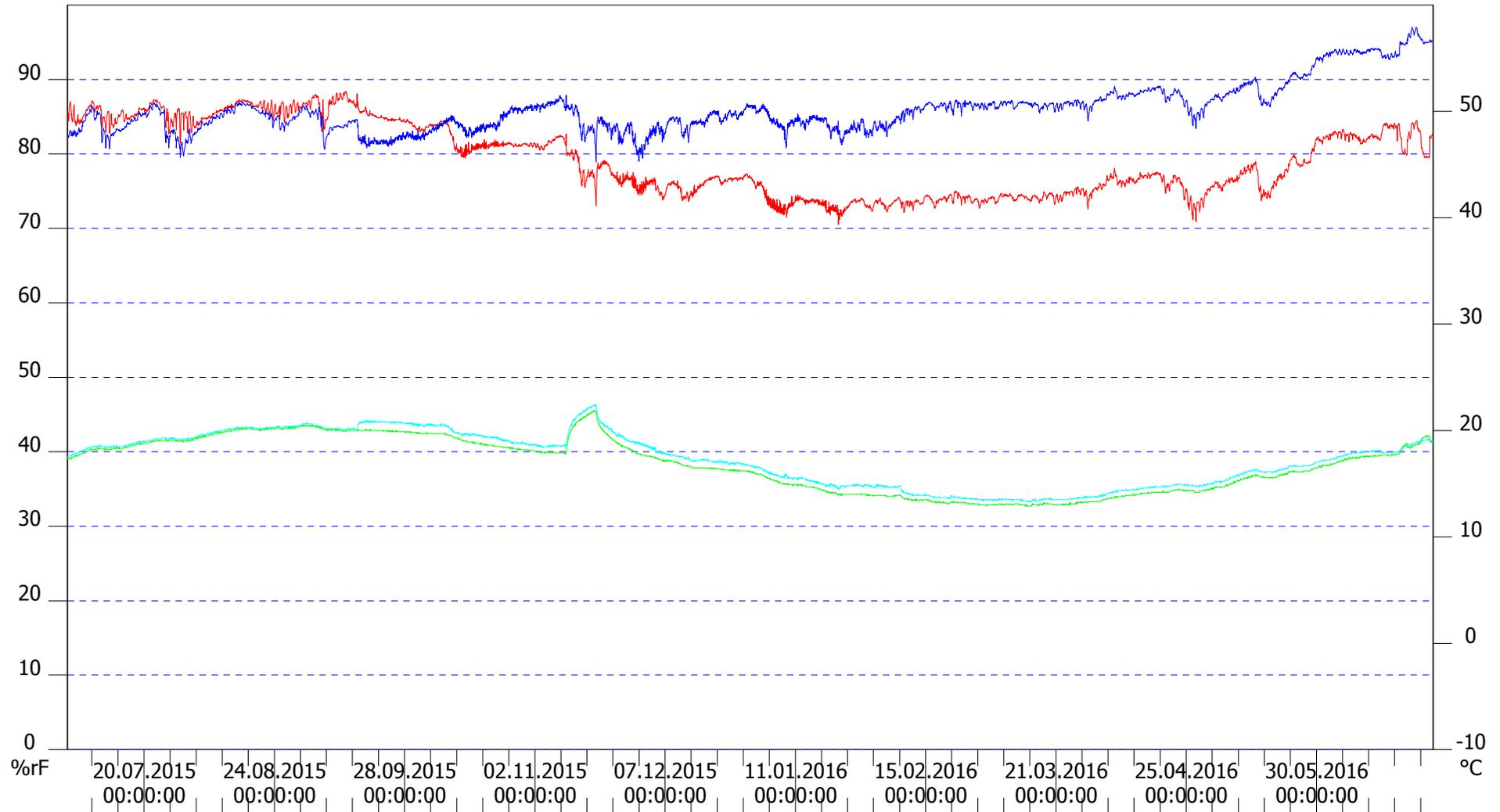
IDK	Diagramm 2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F. oben	76.30	95.80	89.16
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	12.30	23.20	16.58
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	71.20	87.20	80.74
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 [°C] Temp. unten	11.80	22.40	16.33
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						



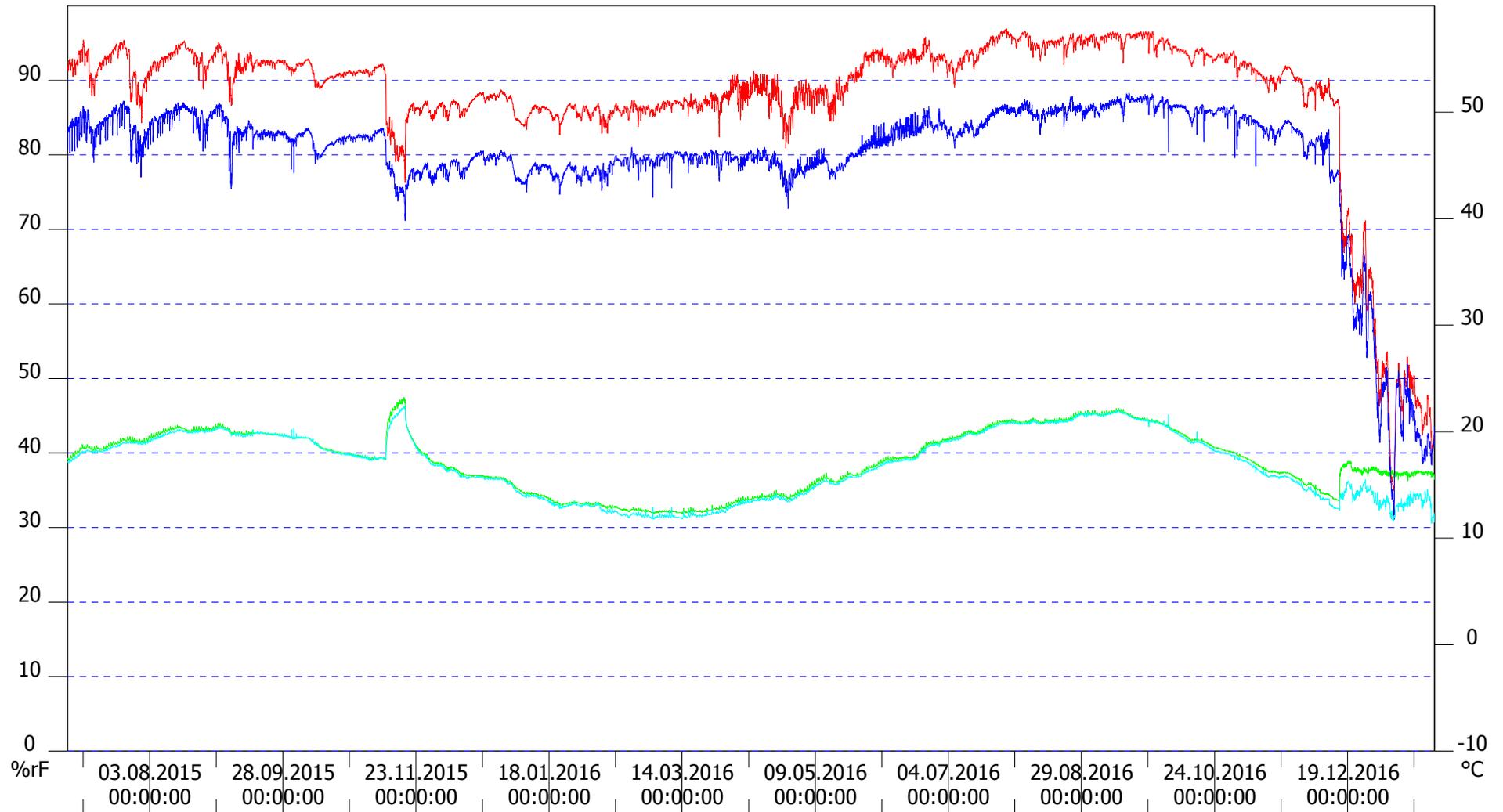
IDK	Diagramm 3	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] re. F. —	70.10	88.30	80.57
Halle Moritzburg Crodelhalle			K:2 [°C] Lufttemp. —	11.60	22.50	16.18
Logger H1 13.4 Raumklima			K:3 [°C] Oberfl- temp —	11.80	22.60	16.20
Oberflächen-temp. T11.11						



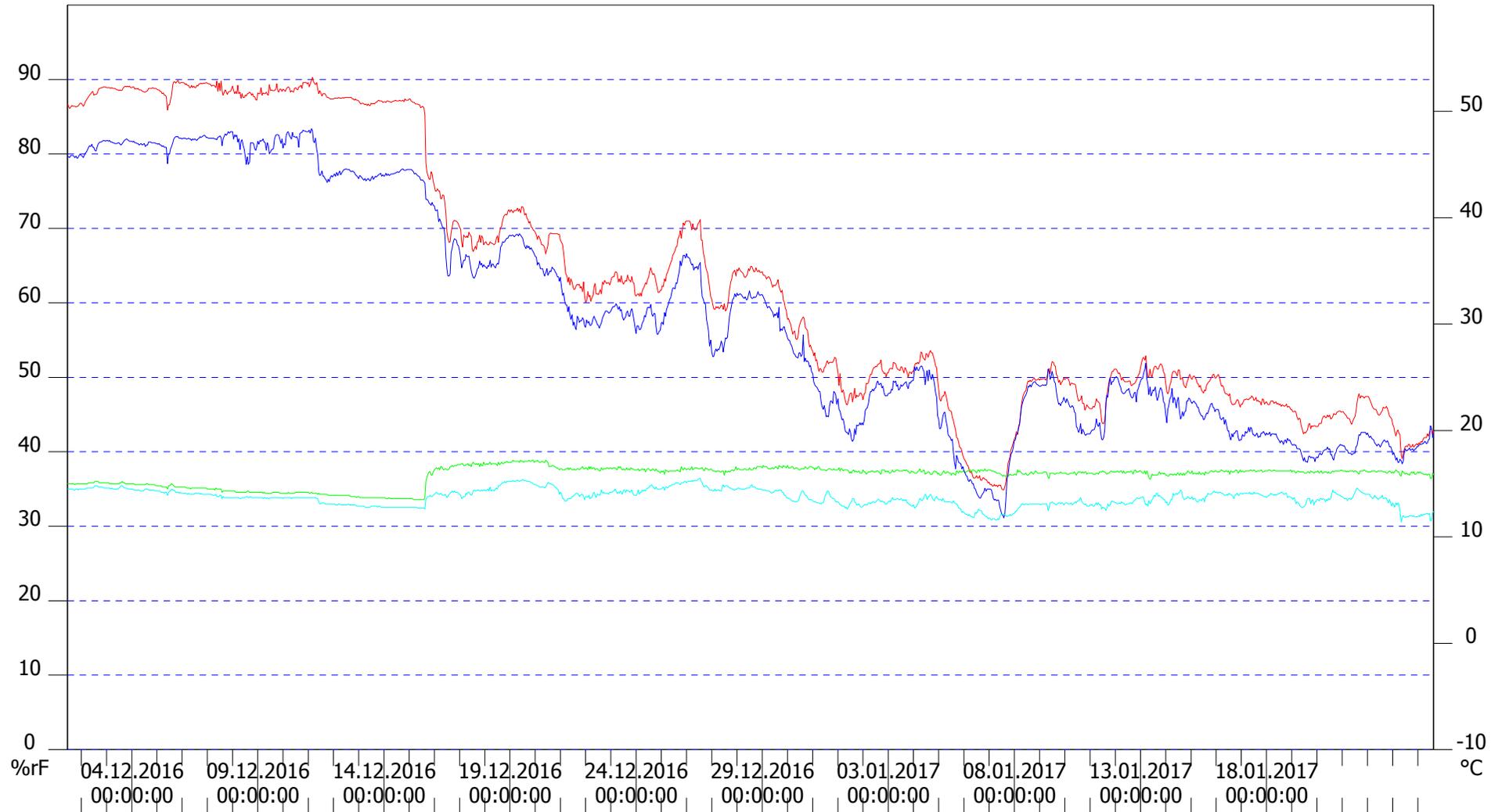
IDK	Diagramm 1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F unten W...	70.50	88.40	79.25
Halle Moritzburg, Crodelhalle, Malereiwand			K:2 [°C] Temp unten W...	12.90	21.90	16.84
Logger Nr.:Gj 4.2			K:3 [%rF] rel.F. oben W...	78.90	97.00	85.95
Anschl.: 1 Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand			K:4 [°C] Temp. oben W...	13.30	22.40	17.32
Anschl. Nr.: 2 Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 obe hinter der Wand						



IDK	Diagramm 01	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 %rF	34.90	96.90	87.94
Halle Moritzburg Crodellhalle Raumklima			K:2 °C	12.30	23.20	17.34
Logger 9.2			K:3 %rF	31.10	88.30	79.87
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 °C	11.40	22.40	16.93
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						



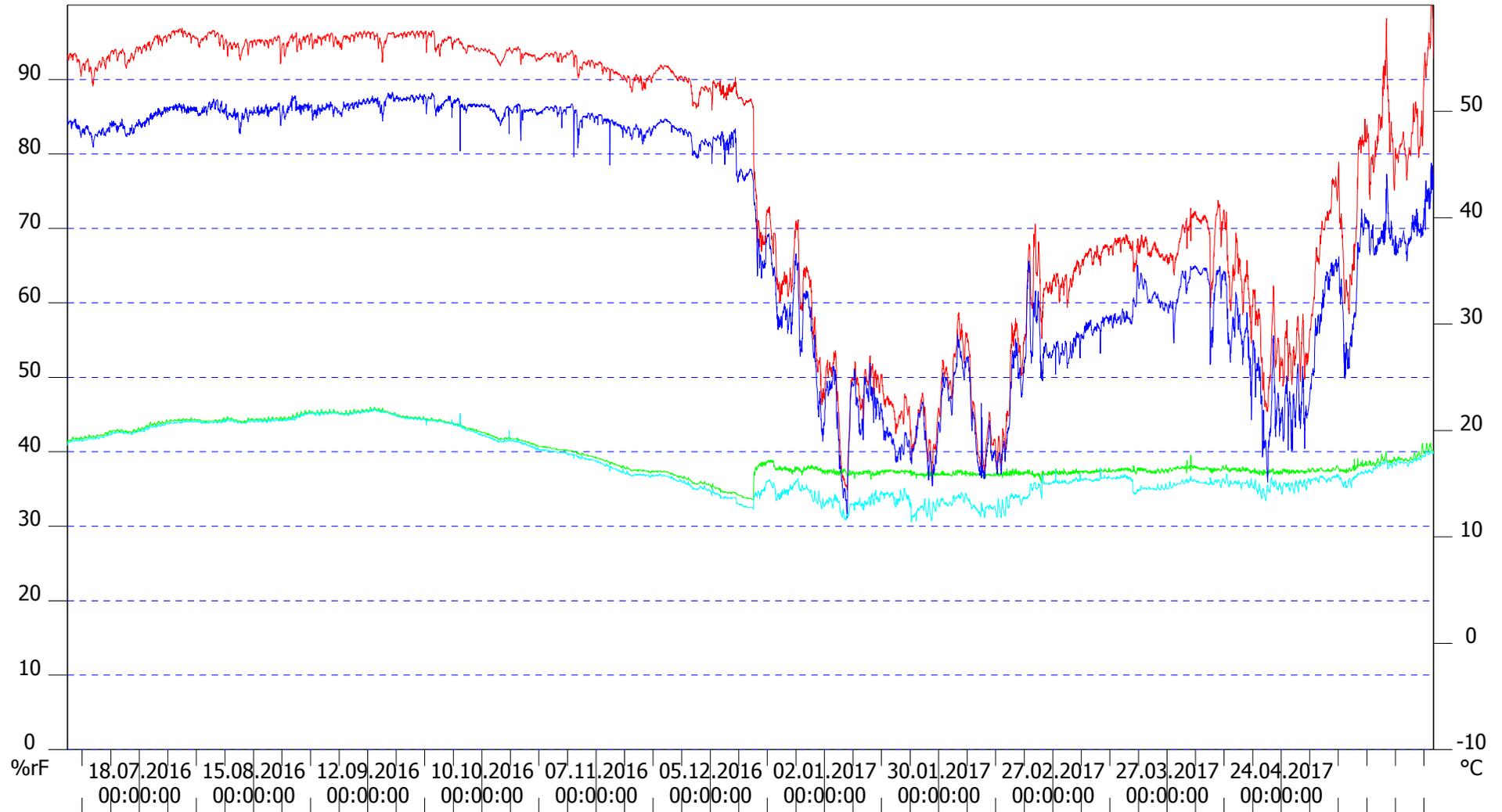
IDK	Diagramm 02	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 %rF	34.90	96.90	87.94
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 °C	12.30	23.20	17.34
Logger 9.2			K:3 %rF	31.10	88.30	79.87
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 °C	11.40	22.40	16.93
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						
Zeitraum 01.12.2016 bis 24.01.2017						



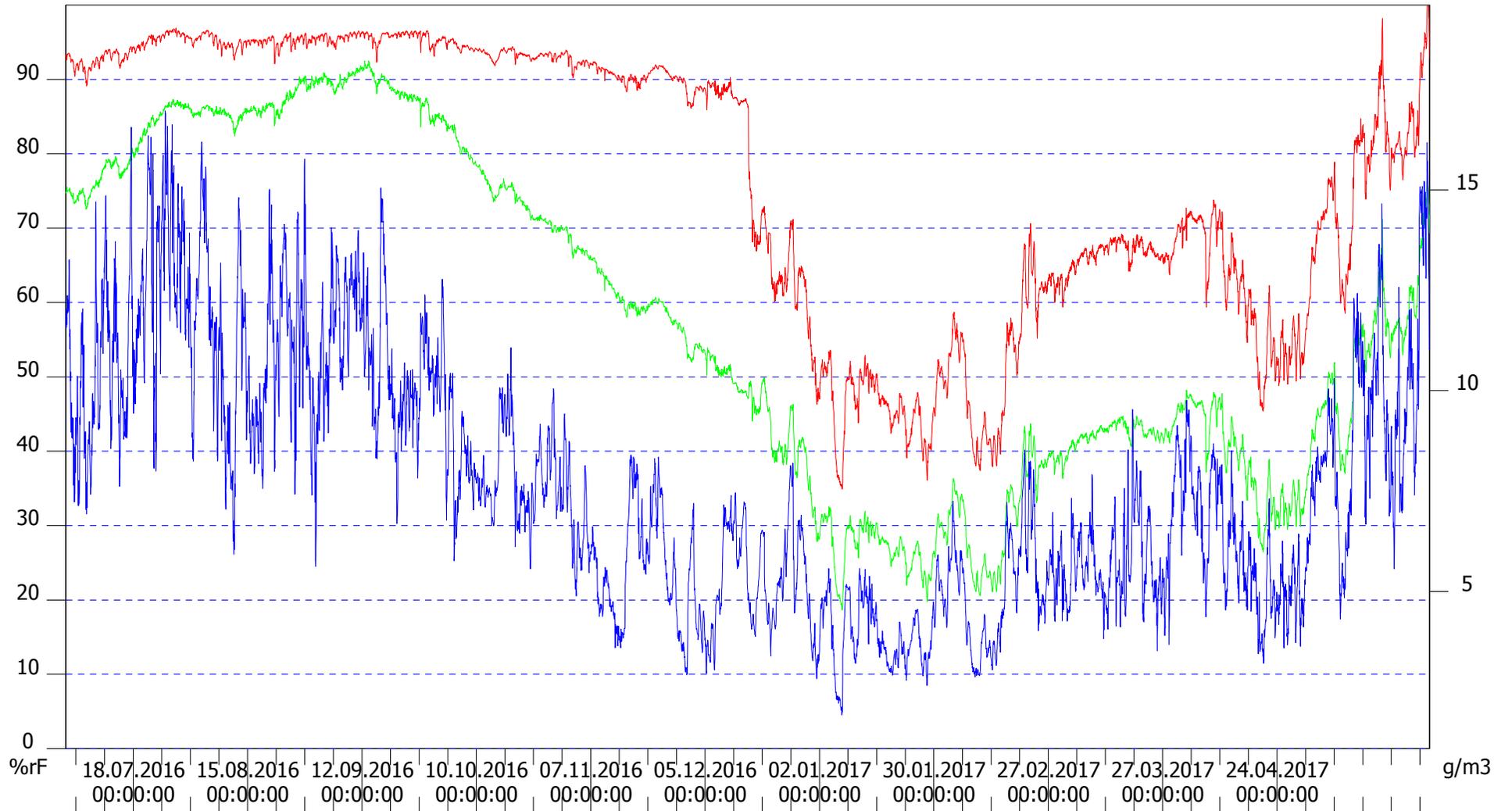
IDK	Diagramm 02.1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 %rF	34.90	96.90	87.94
Halle Moritzburg Crodellhalle Raumklima			K:2 °C	12.30	23.20	17.34
Vergleich der gemessenen rel. Raumluftfeuchte [rot] und Temperatur [grün] mit einer simuliert um 4 k erhöhten Temperatur [hellblau] und der daraus berechneten rel. Raumluftfeuchte [dunkelblau]			K:7 °C	16.30	27.20	21.34
Zeitraum 01.12.2016 bis 24.01.2017			K:9 %rF	27.50	77.11	69.52



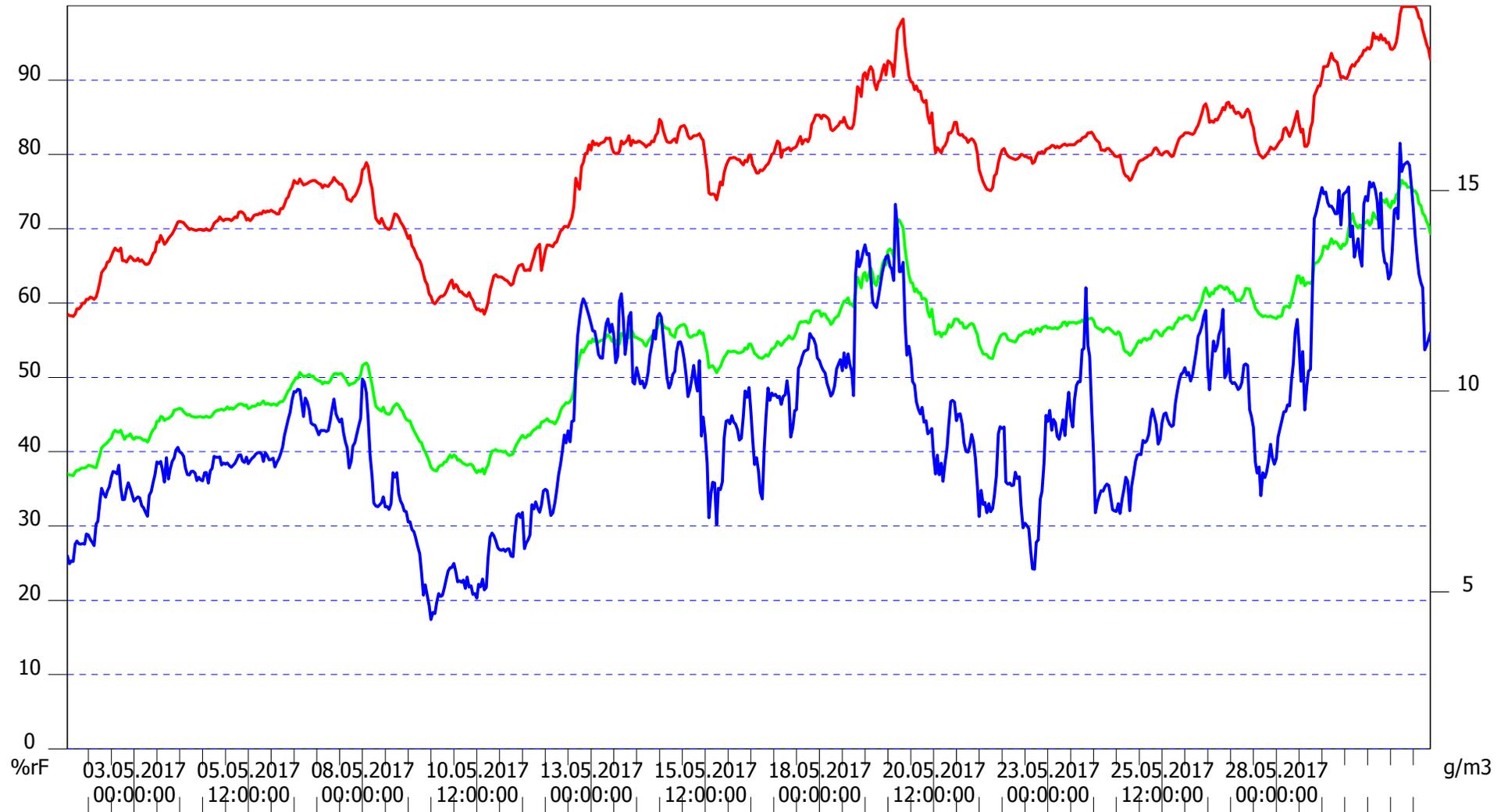
IDK	Diagramm 1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 [%rF] rel.F. oben	34.90	99.90	77.36
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	13.50	22.20	17.80
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	31.10	88.30	69.83
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Höhe oben (3 m) rel. F. [rot]; Temp. [grün]			K:4 [°C] Temp. unten	11.40	22.10	16.83
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Höhe unten (20 cm) rel. F. [dunkelblau]; Temp. [hellblau]						



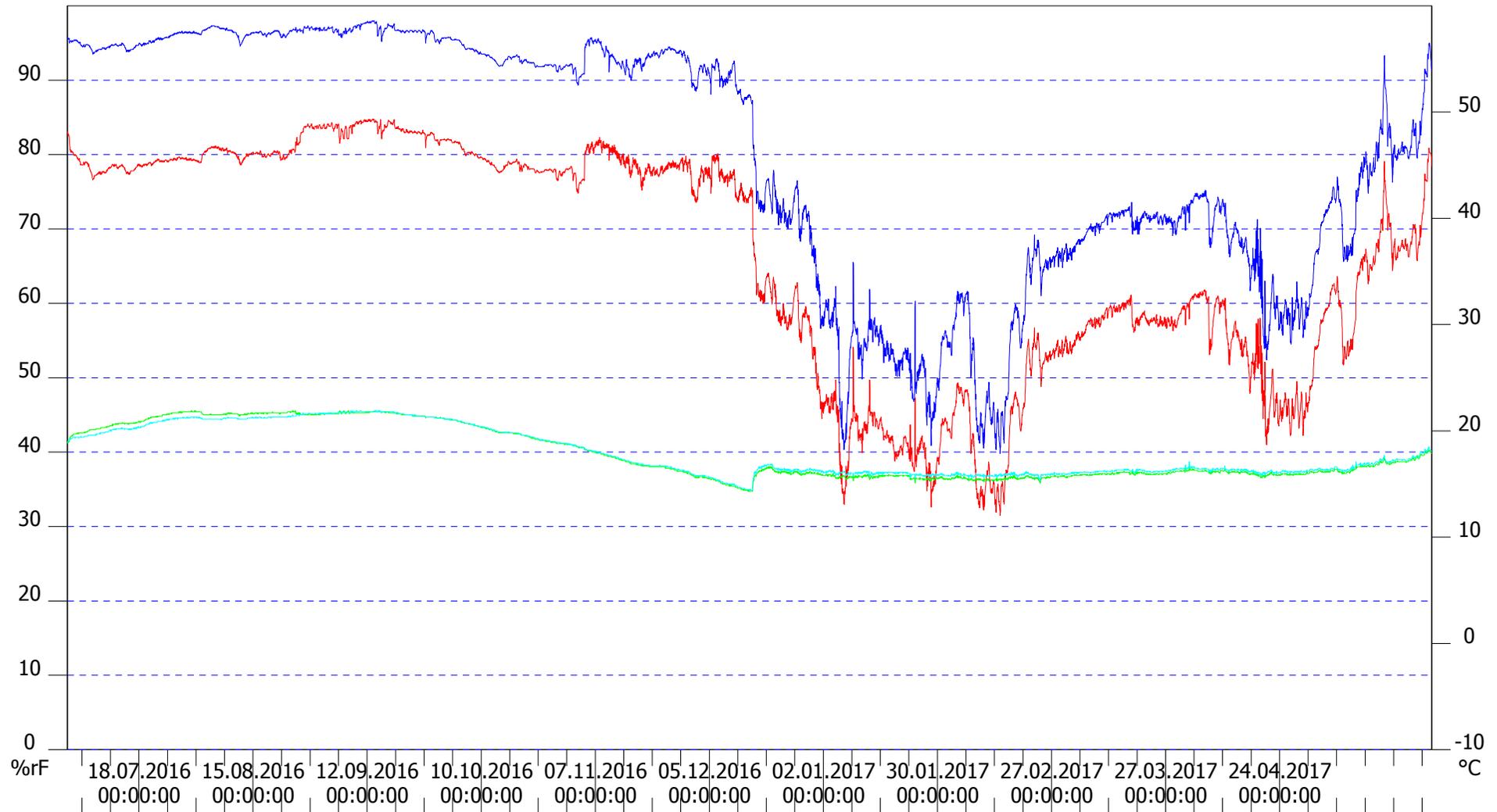
IDK	Diagramm 1.1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 [%rF] rel.F. oben	34.90	99.90	77.36
Halle Moritzburg Crodellhalle Raumklima			K:5 [g/m3] g/m3	4.54	18.21	11.76
Vergleich der relativen Raumluftfeuchte [rot] mit der absoluten Raumluftfeuchte [grün] sowie der absoluten Außenluftfeuchte [dunkelblau]			K:3 g/m3	1.93	18.76	7.76



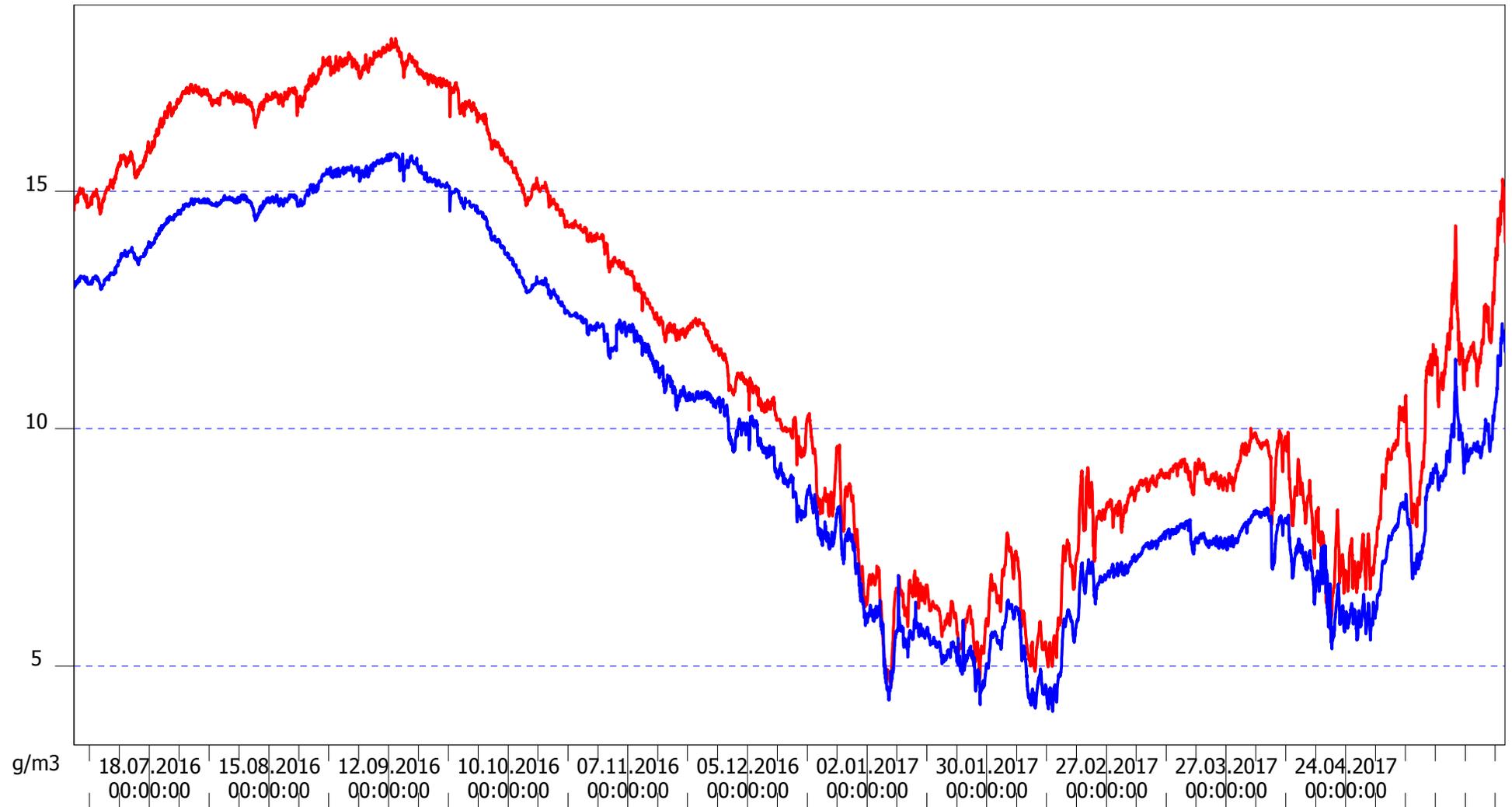
IDK	Diagramm 1.2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 [%rF] rel.F. oben —	34.90	99.90	77.36
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:5 [g/m3] g/m3 —	4.54	18.21	11.76
Vergleich der relativen Raumluftfeuchte [rot] mit der absoluten Raumluftfeuchte [grün] sowie der absoluten Außenluftfeuchte [dunkelblau]			K:3 g/m3 —	1.93	18.76	7.76



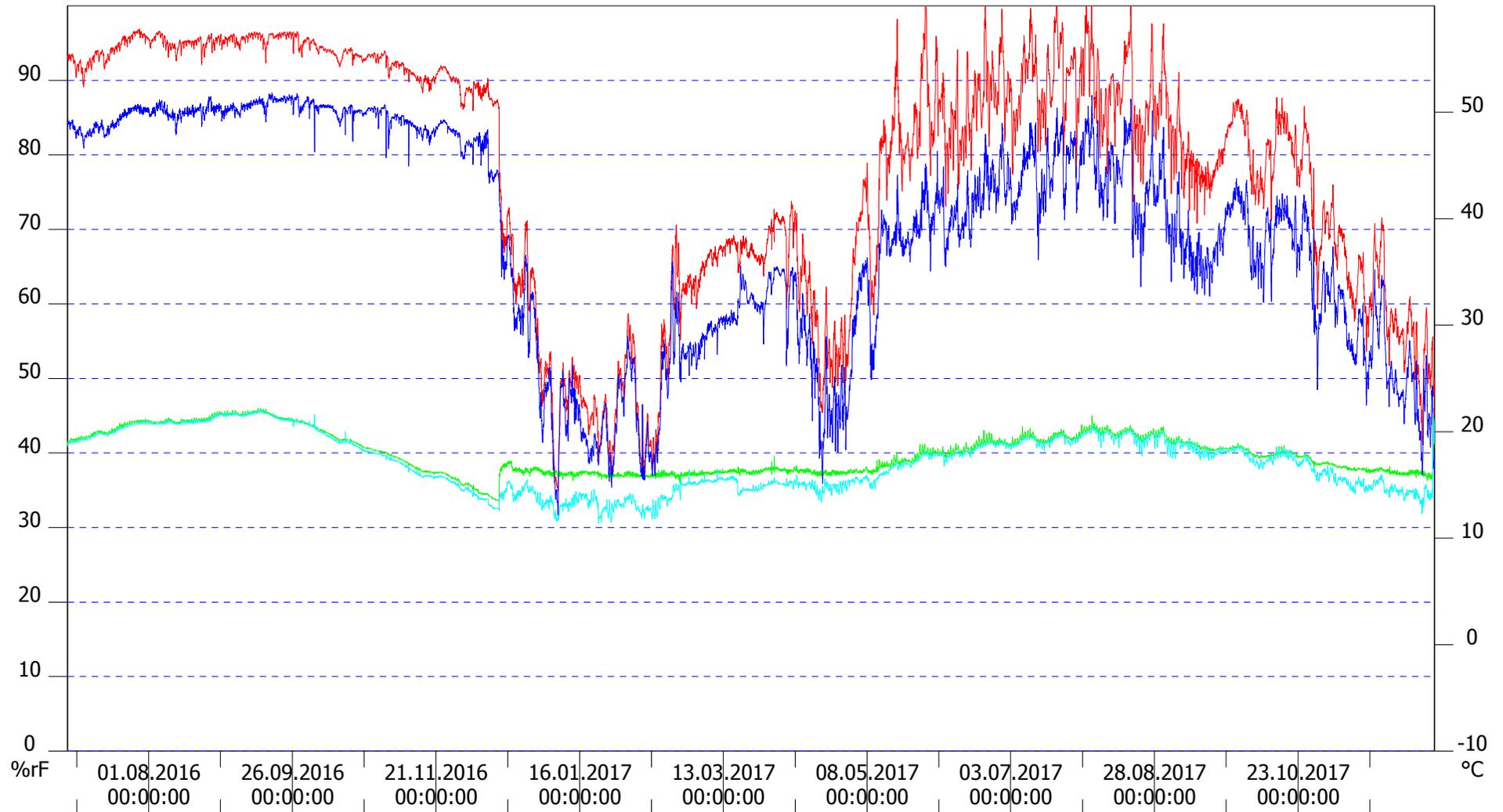
IDK	Diagramm 1.3	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle Datein\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:1 [%rF] rel.F unten W...	31.50	84.80	66.43
Halle Moritzburg, Crodelhalle, Malereiwand			K:2 [°C] Temp unten W...	14.30	21.90	17.89
Logger Nr.:Gj 4.2			K:3 [%rF] rel.F. oben W...	39.80	98.00	79.96
Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand rel. F. [rot]; Temp. [grün]			K:4 [°C] Temp. oben W...	14.40	21.90	17.97
Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 oben hinter der Wand rel. F. [dunkelblau]; Temp. [hellblau]						



IDK	Diagramm 1.4	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\HALLE\Moritzburg\Klima\AW			K:5 [g/m ³] g/m ³ —	4.54	18.21	11.76
Halle Moritzburg Crodellhalle			K:5 [g/m ³] g/m ³ —	4.05	15.80	10.21
Vergleich der absoluten Luftfeuchte im Raum der Crodellhalle [rot] mit der absoluten Luftfeuchte hinter der Malereiwand [dunkelblau]						



IDK	Diagramm 2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Datein\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F. oben	34.90	99.90	78.19
Halle Moritzburg Crodelhalle Raumklima			K:2 [°C] Temp. oben	13.50	22.20	18.00
Logger 9.2			K:3 [%rF] rel. F. unten	31.10	88.30	69.46
Anschl. 1 Fühler Nr. F9.2.1 Wandhöhe (oben)			K:4 [°C] Temp. unten	11.40	22.10	17.16
Anschl. 2 Fühler Nr. F10.1.1 Wandhöhe (unten)						



IDK	Diagramm 1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel.F unten W...	31.50	87.70	66.56
Halle Moritzburg, Crodelhalle, Malereiwand			K:2 [°C] Temp unten W...	14.30	21.90	18.07
Logger Nr.:Gj 4.2			K:3 [%rF] rel.F. oben W...	39.80	99.90	80.06
Anschl.: 1 Fühl. Nr.: Gj 4.1.1 + K1.4 unten hinter der Wand			K:4 [°C] Temp. oben W...	14.40	21.90	18.16
Anschl. Nr.: 2 Fühl. Nr.: Gj 4.1.2 obe hinter der Wand						

