



**Bewertung  
der  
Umweltbedingungen  
bei der Lagerung  
historischer  
Verglasungen  
in  
Glasrestaurierungs-  
werkstätten**

Seminararbeit zum Abschluss der interdisziplinären Fortbildung von mittelständischen  
Glasrestauratorenbetrieben

Praxisgerechte Konservierungsmaßnahmen für durch Umwelteinflüsse geschädigte  
historische Glasfenster (Modellvorhaben).

Kurztitel:

"Weiterbildung in der Glasmalereirestaurierung"  
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
in Zusammenarbeit mit  
der Dombauhütte in Erfurt,  
der Dombauhütte in Köln und  
dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC),  
Gruppe Kulturgüterschutz, Aussenstelle Bronnbach,

**Bewertung der Umweltbedingungen  
bei der Lagerung historischer  
Verglasungen in Glasrestaurierungswerkstätten**

vorgelegt von

**Matthias Rothkegel**

Telefon: 0931/60096-0

e-mail: [matthias.rothkegel@rothkegel.com](mailto:matthias.rothkegel@rothkegel.com)

Würzburg, Oktober 1998

**Betreuung:**

Frau Dr. Hannelore Römich,  
Frau Kathrin Bracken,  
Fraunhofer Institut für Silicatforschung (ISC), Gruppe Kulturgüterschutz  
Frau Carola Müller-Weinitschke  
Dombauhütte Köln

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Einleitung</b>	
1.1 Einführung und Zielsetzung .....	5
1.2 Wie läuft die Glaskorrosion ab? .....	5
<b>2. Methodik</b>	
2.1 Analyse der Situation in Glasrestaurierungswerkstätten .....	6
2.1.1 Welche Fertigungstechniken werden in einer Glasrestaurierungswerkstatt angewandt? ...	6
2.1.2 Welche Belastungen können durch diese Techniken auf eine Glasmalereien wirken?.....	7
2.1.3 Welche Belastungen können durch das Gebäude und die Einrichtungsgegenstände auf eine Glasmalereien wirken?.....	7
2.1.4 Auswahl der Testräume für diese Studie .....	8
2.2 Welche Methode ist zur Untersuchung der Glaskorrosion in Glasrestaurierungswerkstätten geeignet?.....	8
2.2.1 Messung der relativen Luftfeuchte und Temperatur.....	8
2.2.2 Messung der anfallenden Stoffe .....	8
2.2.3 Sensitive Gläser als "Wirkungsmesser".....	9
2.3 Welche Methode wurde gewählt?.....	9
2.3.1 Wie werden Glassensoren ausgewertet?.....	10
2.3.2 Warum wurde diese Methode gewählt?.....	10
2.4 Anwendung der Glassensortechnik in dieser Arbeit .....	11
2.4.1 Expositionsorte und Seriennummern der Glassensoren .....	11
2.4.2 An den Expositionsorten anfallende Stoffe und Bedingungen .....	12
2.4.3 Zusätzliche Klimamessungen .....	12
<b>3. Ergebnisse</b>	
3.1 Korrosionsverlauf anhand der Glassensoren	
3.1.1 $\Delta E$ -Werte der Glassensoren .....	13
3.1.2 $\Delta E$ -Werte der Glassensoren in der grafischen Darstellung .....	14
3.1.3 Mikroskopische Auswertung der Glassensoren.....	15
3.2 Die Umgebungsbedingungen	
3.2.1 Der Verlauf der Temperaturen während der Exposition der Glassensoren .....	17
3.2.2 Der Verlauf der Temperaturen in der grafischen Darstellung .....	18
3.2.3 Der Verlauf der relativen Luftfeuchte während der Exposition der Glassensoren.....	19
3.2.4 Der Verlauf der relativen Luftfeuchte in der grafischen Darstellung .....	20

<b>4.</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse</b> .....	21
4.1.1	Bewertung des Korrosionsverlaufes anhand der $\Delta E$ -Werte der am stärksten korrodierten, in Innenräumen gelagerten Glassensoren .....	21
4.1.2	Umgebungsbedingungen der Glassensoren - Durchschnittstemperatur .....	23
4.1.3	Umgebungsbedingungen der Glassensoren - Durchschnittliche relative Luftfeuchte.....	23
4.1.4	Umgebungsbedingungen der Glassensoren Verlauf der Temperatur im Sicherungsraum in Köln und im Sicherungsraum der Werkstatt in Würzburg .....	24
4.1.5	Umgebungsbedingungen der Glassensoren Verlauf der relativen Luftfeuchte im Sicherungsraum in Köln und im Sicherungsraum der Werkstatt in Würzburg .....	25
4.1.6	Erkenntnisse der mikroskopischen Untersuchung .....	26
	Videoprints der mikroskopischen Untersuchung.....	27
<b>5.</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	
5.1	Der Ablauf der Arbeit .....	50
5.2	Mikroskopische Untersuchungen .....	50
5.3	$\Delta E$ -Werte der Glassensoren in Köln .....	52
5.4	Erkenntnisse der Studie für die Lagerung historischer Glasmalereien in Werkstätten ....	52
5.5	Rückschlüsse für die Praxis .....	52
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	53
<b>7.</b>	<b>Abkürzungen</b> .....	55
<b>8.</b>	<b>Literatur / Nebenbemerkung</b> .....	56
<b>9.</b>	<b>Danksagungen</b> .....	57

# 1. Einleitung

## 1.1 Einführung und Zielsetzung

Wenn historische Glasmalereien zum Zwecke der Dokumentation, Restaurierung oder Konservierung in Glasrestaurierungswerkstätten verbracht werden, lagern sie dort oft viele Monate.

Zwar geht der mit der Restaurierung der Glasmalerei Betraute schon auf Grund seiner Sorgfallspflicht vorsichtig und gewissenhaft mit den ihm anvertrauten Objekten um.

Es bleibt jedoch fraglich, welche Wirkung das Werkstattgebäude und die dort verwendeten Stoffe, Einrichtungsgegenstände und Fertigungstechniken auf die dort gelagerten historischen Glasmalereien haben.

Gegenstand dieser Arbeit ist, das korrosive Schädigungspotential von Lagerungsarten und -orten zu beurteilen und welchen Einfluß dieses auf, in den Glasrestaurierungswerkstätten gelagerte, historische Glasmalereien hat.

## 1.2 Wie läuft die Glaskorrosion ab?

Unter Korrosion im allgemeinen versteht man Materialzerstörung und Materialabtrag durch den Angriff von Flüssigkeiten.

Bei Glas unterscheidet man im engeren Sinne die Korrosion durch den Angriff wässriger Lösungen, z.B. auf der Innenseite einer mit Flüssigkeit gefüllten Flasche und Bewitterung / Verwitterung als Angriff durch gasförmige Atmosphären. Diese Verwitterung kann noch einmal unterschieden werden in kondensierende und nicht kondensierende Atmosphäre.

Bei der Glaskorrosion, also dem Angriff von wässrigen Lösungen, unterscheidet man zwei grundlegende Mechanismen, die Auslaugung und die Auflösung.

Bei der Auslaugung werden die Alkali/Erdalkali-Ionen der Glasstruktur ( $\text{Na}^+$ ) gegen  $\text{H}^+$ -Ionen der Lösung ausgetauscht. Es bildet sich eine netzwerkwanlerarme bzw. relativ gesehen siliziumreiche Schicht, welche auch molekulares Wasser enthält und als Gelschicht bezeichnet wird.

Da mit fortschreitender Auslaugung die Alkali/Erdalkali-Ionen nur mehr in weiter von der Glasoberfläche entfernten Schichten vorkommen und folglich die  $\text{H}^+$ -Ionen eine weitere "Strecke" durch diese Gelschicht zurücklegen müssen bis weitere Alkali/Erdalkali-Ionen aus dem Netzwerk herausgelöst werden können wirkt die Gelschicht, wenn sie unzerstört vorliegt, auch als eine Art Passivierungsschicht.

Diese Austauschreaktion benötigt  $\text{H}^+$ -Ionen in der Lösung, d.h. sie hängt vom pH-Wert der Lösung ab.

Bei der Auflösung werden durch den Angriff von Wasser die Si-O-Si Bindungen im Glasnetzwerk aufgebrochen. Es tritt eine vollständige Auflösung des Glases ohne die Bildung einer Gelschicht ein.

Die Anwesenheit von OH-Gruppen beschleunigt die Auflösung, sie ist deshalb ebenfalls pH-Wert abhängig.

Bei der Verwitterung, dem Angriff durch Luftschadstoffe, bildet sich eine wenige moleküllagendicke Wasserschicht auf der Glasoberfläche.

Bedingt durch die sauren Luftbestandteile (z.B.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , usw.) ist der pH-Wert in dieser Schicht kleiner als 7.

Es tritt deshalb eine Auslaugungsreaktion auf. Diese ausgelaugten Netzwerkwanler verbleiben jedoch auf der Glasoberfläche, wenn sie nicht durch Regen o.ä. abgewaschen werden und bilden dort zusammen mit den Luftbestandteilen eine sekundäre Korrosionskruste.

Diese Korrosionskrusten bestehen z.B. bei SO<sub>2</sub>-haltiger Luft und K- und Ca-haltigem Glas aus Gips (CaSO<sub>4</sub> • 2H<sub>2</sub>O) und Syngenit (K<sub>2</sub>Ca(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> • H<sub>2</sub>O).

## 2. Methodik

### 2.1 Analyse der Situation in Glasrestaurierungswerkstätten

Da jede Glasrestaurierungswerkstatt unterschiedliche Voraussetzungen im Bezug auf Gebäude, geografische Lage, verwendete Produkte oder Einrichtungsgegenstände hat, scheint es schon bei den ersten Überlegungen zu dieser Arbeit eindeutig, daß deren Aussagen, ähnlich wie bei Untersuchungen zu Klimasituationen, z.B. bei Schutzverglasungen, nicht generalisiert werden können.

Es gibt jedoch sicherlich Tendenzen die Überschneidungspunkte mit anderen Werkstätten erkennen lassen.

Die Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden in den Räumen der Glaswerkstätte Rothkegel, Würzburg, einem 1987 errichteten Gebäude mit einem 1992 errichteten Anbau sowie in einem, an der südlichen Aussenwand des Kölner Domes gelegenen Depot der Dombauhütte Köln, vorgenommen.

#### **2.1.1 Welche Fertigungstechniken werden in einer Glasrestaurierungswerkstatt angewandt?**

- **ggf. Ätztechnik**

Mittels Flußsäure wird z.B. Echt Antik-Überfangglas behandelt um die Farbschicht des Überfangs ganz oder teilweise zu entfernen.

- **ggf. Sandstrahltechnik**

Mit einem Gebläse und z.B. Korund (Aluminiumoxid) können Gläser mattiert werden. Bei entsprechender Anwendung können auch Reliefs in Glas herausgearbeitet werden.

- **Glasmalen**

Hierbei werden, meist in feinem Pulver vorliegende, zum Teil Blei-, Metalloxyd-haltige Farben mittels Pinsel oder z.B. Sprühpistole auf Glas aufgetragen und anschließend bei ca. 550 - 630 °C in Glasbrennöfen gebrannt.

- **Verbleien**

Einzelne Glasstücke werden mit verschiedenen geformten und / oder verschiedenen breiten H-Bleiprofilen zusammengefügt und anschließend an den Stoßpunkten der Bleiprofile mit einem LötKolben, Stearinöl und Lötzinn verbunden.

- **ggf. Siebdrucktechnik**

Bei der Siebdrucktechnik werden auf fotochemischen Wege Vorlagen, z.B. Fotos, auf Siebe übertragen. Anschließend wird entweder direkt oder über einen Zwischendruck und "Abziehbilder" Glasmalfarbe auf Glasscheiben aufgebracht und anschließend bei ca. 550 - 630 °C in Glasbrennöfen gebrannt.

Sollte die Werkstätte entsprechend ausgerüstet sein, kann auch die Herstellung der Siebe dort erfolgen. Hierbei wird eine geeignete UV-Lampe eingesetzt, bei deren Betrieb Ozon frei werden kann.

- **ggf. Fusingtechnik**

Mit Hilfe der Fusingtechnik werden Glasscheiben mit dem gleichen Ausdehnungskoeffizienten bei ca. 850 bis 900°C miteinander verschmolzen oder bei niedrigeren Temperaturen Glasscheiben verformt.

- **ggf. Glasschleifen**  
z.B. zur Kantenbearbeitung von Flachgläsern, zum Hohl- oder Flachglasschmuckschliff, zum Nacharbeiten von zugeschnittenen Gläsern.
- **ggf. Metallverarbeitung**  
z.B. im Zuge der Anfertigung von Schutzverglasungssystemen oder Lüftungsflügeln für Kirchenfenster
- **ggf. Lackieren**  
z.B. ebenfalls im Zuge der Anfertigung von Schutzverglasungssystemen oder Lüftungsflügeln für Kirchenfenster

### 2.1.2 Welche Belastungen können durch diese Techniken auf die Glasmalerei einwirken?

- **Stäube**  
(Sandstrahlen, Metallverarbeitung, Holzstäube durch Sägemehl zum Reinigen der Bleiverglasungen nach deren Verkitten usw.)
- **Lösungsmittel**  
(Glasmalen, Lackieren, Restaurierung, Siebdruck usw.)
- **Wasserdampf**  
(Siebdruck, Glasschleifen usw.)
- **Ofendämpfe**  
(Glasmalerei, Fusingtechnik usw.)
- **Säuren & Laugen**  
(Glasätzen, Restaurierung, Siebdruck usw.)
- **Feuchtwechsel**  
(Glasschleifen usw.)
- **Wärmewechsel**  
(Glasmalerei, Fusingtechnik usw.)

### 2.1.3 Welche Belastungen können durch das Gebäude und die Einrichtungsgegenstände auf die Glasmalerei einwirken?

- **Ausdünstungen**  
von Holzplatten, Wandfarben,
- **Dämpfe, Gase**  
von Raumpflegermitteln, Kopierer, Laserdrucker,
- **Klimaschwankungen**  
durch Heizung / Lüftung, Sonneneinstrahlung

## 2.1.4 Auswahl der Testräume für diese Studie

Zuerst wurde nach den Räumen und Bereichen gesucht, die zur Lagerung von historischen Glasmalereien typisch sind, bzw. nach den Räumen, die repräsentativ für Glasrestaurierungswerkstätten sind.

Ausgewählt wurden folgende:

- Werkstattfertigungsräume (Glazuschnitt, Verbleien, Glasmalerei) / Sonne
- Werkstattfertigungsräume (Glazuschnitt, Verbleien, Glasmalerei) / Schatten
- Arbeitsbereich zum Glasätzen
- ... Glasschleifen
- ... Sandstrahlen / putzen
- Arbeitsbereich mit Brennofen
- Sicherungsraum
- Belichtungsraum
- Farblagerraum
- Schlosserei
- Büro

Desweiteren wurden als Vergleichsstandort ein Sicherungsraum der Dombauhütte in Köln, sowie die Freilandsituation am Standort der Glaswerkstätte in Würzburg mit in die Untersuchungen einbezogen.

Der im Kölner Dom untersuchte Lagerraum ist ein allgemeines Zusatzdepot, hauptsächlich für Dommobiliar, Teppiche, Domkrippe etc. An Glasmalereien werden dort wenige Reste von Fenstern des späten 19. Jahrhunderts und der Nachkriegszeit verwahrt.

## 2.2 Welche Methode ist zur Untersuchung der Umweltbedingungen in Glasrestaurierungswerkstätten geeignet?

Neben der absoluten Verfügbarkeit einer Analysemethode für die Entscheidung über deren Verwendung in dieser Arbeit, spielen auch deren Anwendbarkeit, Zuverlässigkeit und Kosten eine entscheidende Rolle.

### 2.2.1 Messung der relativen Luftfeuchte und Temperatur

Beachtet man die unter Punkt 2. genannten Abläufe der Glaskorrosion und Glasverwitterung, ist z.B. die Luftfeuchte unmittelbar mit der Korrosion und Verwitterung verbunden.

Jedoch läßt allein die Messung dieser Umgebungsbedingungen keine Rückschlüsse auf die korrosiven Bedingungen zu, da die weiteren für die Korrosion verantwortlichen Stoffe nicht erfaßt werden.

### 2.2.2 Messung der anfallenden Stoffe

Durch die Überlegungen unter Punkt 2.2.1 gelangt man zwangsläufig zu der Überlegung die für die Korrosion verantwortlichen Stoffe z.B. durch SAM (Surface Active Monitoring)-Technik zu erfassen.<sup>1</sup>

Hierbei werden die sauren Schadstoffe an alkalisch imprägnierten Glasfaserfiltern passiv deponiert und können somit mengenmäßig bestimmt werden.

Diese Methode ist jedoch relativ teuer und läßt keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die tatsächliche Glaskorrosion zu. Routinemäßige Messungen wurden damit bisher noch nicht durchgeführt.

Die direkte Messung von Umweltschadstoffen (z.B. mit Passivsammlern) ist nicht zuletzt deshalb sehr aufwendig, weil für jeden Schadstoff ein eigens darauf abgestimmtes Analyseverfahren eingesetzt werden muß.



### 2.2.3 Sensitive Gläser als "Wirkungsmesser"

Als sensitives Meßverfahren bietet sich die Glassensortechnik an. Diese Technik läßt durch ihre simultative Methode mit besonders sensibel auf Umweltfaktoren reagierenden Gläsern, durchaus einen Vergleich mit der Korrosion an Originalen zu. (siehe hierzu auch 3.2 ff)

### 2.3 Welche Methode wurde gewählt?

Es wurde der Einsatz von Glassensoren des Fraunhofer-Instituts für Silicatiforschung ISC, Abtl. Kulturgüterschutz in Bronbach bei Wertheim als "sensitives Meßverfahren" gewählt.

Glassensoren besitzen eine besonders empfindliche Glaszusammensetzung, die Korrosionsprozesse, welche an gewöhnlichen Gläsern Jahrzehnte bis Jahrhunderte benötigen, innerhalb von Wochen oder Monaten, je nach Glassensortyp, darstellen lassen.

Die Glassensoren werden nach dem standartisierten Verfahren, welches die VDI-Richtlinie 3955 Blatt 2 festlegt, hergestellt.

Es gibt sechs verschiedene Modellgläser, die sich in ihrer Zusammensetzung wie folgt aufbauen:

in mol %		MI	M 1.0	M 1.5	M 2.0	M 2.5	M III
"SiO <sub>2</sub> "	SiO <sub>2</sub>	53,10 %	59,80 %	60,50 %	61,20 %	61,80 %	62,30 %
Netzwerkbildner	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,00 %					
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,90 %					
RO	CaO	17,80 %	20,00 %	21,60 %	23,40 %	25,50 %	27,80 %
Zwischenoxide	MgO	5,00 %					
R2O	Na <sub>2</sub> O	3,20 %	20,20 %	17,90 %	15,40 %	12,70 %	9,90 %
Netzwerkwanlder	K <sub>2</sub> O	18,00 %					

Im Vergleich hierzu der Aufbau einiger Originale:

in mol %		Gläser aus Altenberg	Gläser aus York	
"SiO <sub>2</sub> "	SiO <sub>2</sub>	51,00 %	56,40 %	mechanische Festigkeit
Netzwerkbildner	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,20 %	0,89 %	chemische Resistenz
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,70 %	1,90 %	Transformationspunkt wird herabgesetzt
RO	CaO	26,60 %	17,90 %	chemische Resistenz in bestimmten Verhältnissen
Zwischenoxide	MgO	7,00 %	9,50 %	Verbesserung der Verarbeitungseigenschaft
R2O	Na <sub>2</sub> O	0,40 %	2,20 %	Verbesserung des Verarbeitungsbereiches
Netzwerkwanlder	K <sub>2</sub> O	9,00 %	9,50 %	Schmelzpunkterniedrigung
	MnO	0,90 %	1,04 %	Farbgebung, ggf. Verunreinigung
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,30 %	0,21 %	Farbgebung, ggf. Verunreinigung
	TiO <sub>2</sub>	0,20 %	0,09 %	Säurebeständigkeit wird verbessert

Beim Vergleich der Zusammensetzungen der Modellgläser und der hier beispielhaft ausgewählten Zusammensetzungen einiger Glasstücke aus Altenberg und York wird deutlich, wie sich der Aufbau der Gläser bei den für die Korrosion mitverantwortlichen Stoffen ähnelt.

Andererseits bieten die Modellgläser die Vorteile, daß sie reproduzierbar hergestellt werden, sie sind einfach zu handhaben und auszuwerten.

### 2.3.1 Wie werden Glassensoren ausgewertet?

Diese vom Fraunhofer Institut für Silikatforschung ISC, Abtl. Kulturgüterschutz Mitte der achtziger Jahre entwickelte Methode reagiert als eine Art Wirkungsdosimeter und erfaßt so eine Vielzahl von Einflußfaktoren anstelle von Einzelparametern. <sup>2</sup>

Die Korrosionsprozesse an den Glassensoren lassen sich vereinfacht als Ausbildung einer wasserhaltigen Gelschicht und wasserhaltigen Kruste aus K- und Ca-Sulfat-Hydraten verstehen. Deshalb ist eine quantifizierbare Erfassung der Korrosion durch die Bestimmung der OH-Bande mittels der IR-Spektroskopie möglich. <sup>3</sup>

Hierzu wird vor der Exposition der Glassensoren der Ausgangswert  $E_0$  gemessen.

Von diesem wird nach dem Ende der Exposition von neuem die OH-Bande des jeweiligen Glassensors bestimmt. Von diesem,  $E_1$  genannten Wert wird der Ausgangswert  $E_0$  abgezogen und man erhält den Wert der Zunahme (selten der Abnahme) der OH-Bande  $\Delta E$ .

Durch die Bewertung der Differenz zwischen  $E_0$  und  $E_1$  als  $\Delta E$  können die gemessenen Werte miteinander verglichen werden, da nur die Zunahme innerhalb der OH-Bande verglichen wird.

Je kleiner  $\Delta E$  ist, desto geringer ist der Sensor korrodiert, desto optimaler waren die Umgebungsbedingungen.

Ausser der Betrachtung der Entwicklung der OH-Bande werden vor der Exposition, sowie unmittelbar nach jeder IR-Spektroskopie, Untersuchungen der Glassensoren mit dem Lichtmikroskop (Leitz DM RX/E) vorgenommen.

Hierbei werden die sichtbaren Korrosionsprodukte wie z.B. Kristalle, Risse in der Gelschicht, aber auch mögliche Spuren von Mikroorganismen oder Schmutzablagerungen betrachtet. Von jedem Glassensor wurde dabei mindestens ein charakteristischer sw-Videoprint angefertigt.

### 2.3.2 Warum wurde diese Methode gewählt?

In zahlreichen Projekten hat sich diese Methode bereits als praktikable und zuverlässige Methode zur Bewertung der Umweltbedingungen an Glasmalereien bewiesen.

So z.B. im Rahmen verschiedener BMFT Projekte an Objekten in Altenberg, Köln, Mönchengladbach, Keyenberg, Lamersdorf, Rheydt, Breinig, Kloster Neuendorf, Erfurt, Wörlitz, Kloster Wienhausen, Augsburg, aber auch im europäischen Ausland wie z.B. in den Niederlanden, England und Spanien, um nur einige zu nennen.

Desweiteren wurden Glassensoren in der Arbeit von Dr. Johanna Leibner, Dr. Dieter R. Fuchs und Dr. Stefan Oidtmann zur Konstruktion und Wirkung von Aussenschutzverglasungen angewendet um neben der klimatechnischen Betrachtung auch ausführliche Informationen über die korrosiven Verhältnisse innerhalb der Schutzverglasungssysteme zu erhalten. <sup>4</sup>

Auch ausserhalb der Anwendung im Rahmen von Untersuchungen zum Erhalt von historischen Glasmalereien wurden und werden Glassensoren zur Beurteilung von Klimasituationen eingesetzt.

So z.B. zur Erfassung von Umwelteinflüssen im Spiegelkabinett der Residenz in Würzburg, in den Vitrinen und den Ausstellungsräumen des Grünen Gewölbes in Dresden, am Brandenburger Tor, dem Jagdschloß in Clemenswerth sowie weiteren Denkmälern in Deutschland, der Tschechischen Republik und England.

## **2.4 Anwendung der Glassensortechnik in dieser Arbeit**

In der hier durchgeführten Arbeit wurde je ein Paar Glassensoren, Typ M 1.0 an einem charakteristischen Ort innerhalb der Glasrestaurierungswerkstatt, dem Sicherungsraum der Werkstatt und einem Depotraum der Dombauhütte in Köln, sowie ein Vergleichs-sensorpaar der Freilandbewitterung in Würzburg ausgesetzt. (siehe Kapitel 2.1.4)

Die Glassensoren waren dabei nicht Rückseitenversiegelt, wodurch sie von beiden Seiten zugänglich waren und so gleichmäßig bewittert werden konnten.

Die Auswertung der Glassensoren mittels IR-Spektroskopie (Transmission) und Mikroskopie erfolgte jeweils am 20.10.1997, 11.03.1998 und 25.06.98. Expositionsbeginn war der 3.06.1997.

Im Laufe des Expositionszeitraumes gingen zwei Sensorpaare, trotz ausführlicher Kennzeichnung, Sicherung und Aufklärung verloren.

Es waren dies die Glassensorpaare an den Expositionsorten "Sandstrahlen/putzen"; der Sensor-Nr. 6 A - 7.972.051 sowie der Sensor-Nr. 6 B - 7.972.061.

Am Expositionsort "Glasschleifen" gingen die Glassensoren mit der Sensor-Nr. 9 A - 7.972.111, und der Sensor-Nr. 9 B - 7.972.121 verloren.

Somit können diese Expositionsorte nicht in die abschließende Betrachtung mit einfließen.

### **2.4.1 Expositionsorte und Seriennummern der Glassensoren**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Expo. Nr.</b>	<b>Seriennummer A</b>	<b>Seriennummer B</b>
Werkstatt / Sonne	Expo. Ort 1	7.971.951	7.971.961
Werkstatt / Schatten	Expo. Ort 2	7.971.971	7.971.981
Glasätzen	Expo. Ort 3	7.971.991	7.972.001
Brennofen	Expo. Ort 4	7.972.011	7.972.021
Sicherungsraum	Expo. Ort 5	7.972.031	7.972.041
Sandstrahlen / putzen	Expo. Ort 6	7.972.051	7.972.061
Belichtungsraum	Expo. Ort 7	7.972.071	7.972.081
Farblagerraum	Expo. Ort 8	7.972.091	7.972.101
Glasschleifen	Expo. Ort 9	7.972.111	7.972.121
Schlosserei	Expo. Ort 10	7.972.131	7.972.141
Büro	Expo. Ort 11	7.972.151	7.972.161
Sicherungsraum DBH Köln	Expo. Ort 12	7.972.191	7.972.201
Ref.Sensor Freiland / Wü	Expo. Ort 13	7.972.171	7.972.181

## 2.4.2 An den Expositionsorten anfallende Stoffe und Bedingungen

	Stäube anorganisch/mineralisch	Stäube organisch	Lösungsmittel	Metallspäne und -abrieb	Holzplatten	Schweißrauch	Farbausdünstungen	Lötdämpfe	Flußsäure	Ofendämpfe	Ozon	Wasserdampf	relativ kleiner Raum
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1	+	+	+		+			+		+			
Werkstatt / Schatten Sensor-Nr. 2	+	+	+		+			+		+			
Glasätzen Sensor-Nr. 3	+	+							++	+		+	
Brennofen Sensor-Nr. 4	+	+							+	++		+	
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5				+	+		+						++
Sandstrahlen/ putzen Sensor-Nr. 6	++	+	+										
Belichtungsraum Sensor-Nr. 7	+	+										++	
Farblagerraum Sensor-Nr. 8			++				++						
Glasschleifen Sensor-Nr. 9	+	+							+	+		++	
Schlosserei Sensor-Nr. 10	+		+	+		++		+				+	
Büro Sensor-Nr. 11											+		
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12	?												
Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13													

## 2.4.3 Zusätzliche Klimamessungen

Ausser der Exposition der Glassensoren wurde die Luftfeuchte und Lufttemperatur am jeweiligen Standort der Glassensoren erfaßt.

Diese Messungen wurden um den jeweiligen 3. des Monats um ca. 7:30, 11:30 und 16:00 Uhr durchgeführt.

Zur Messung wurde in Köln ein "Testo 601" (Typ 0636.9760; Sensortyp 0420.0019) und in der Werkstatt ein "Testo 615" (Typ 0560.6150; Sensortyp 0216.0566) eingesetzt.

Die Messung von Luftfeuchte und Lufttemperatur konnte einheitlich erst zu Anfang August durchgeführt werden (Lieferschwierigkeiten des Meßgerätes "Testo 615").

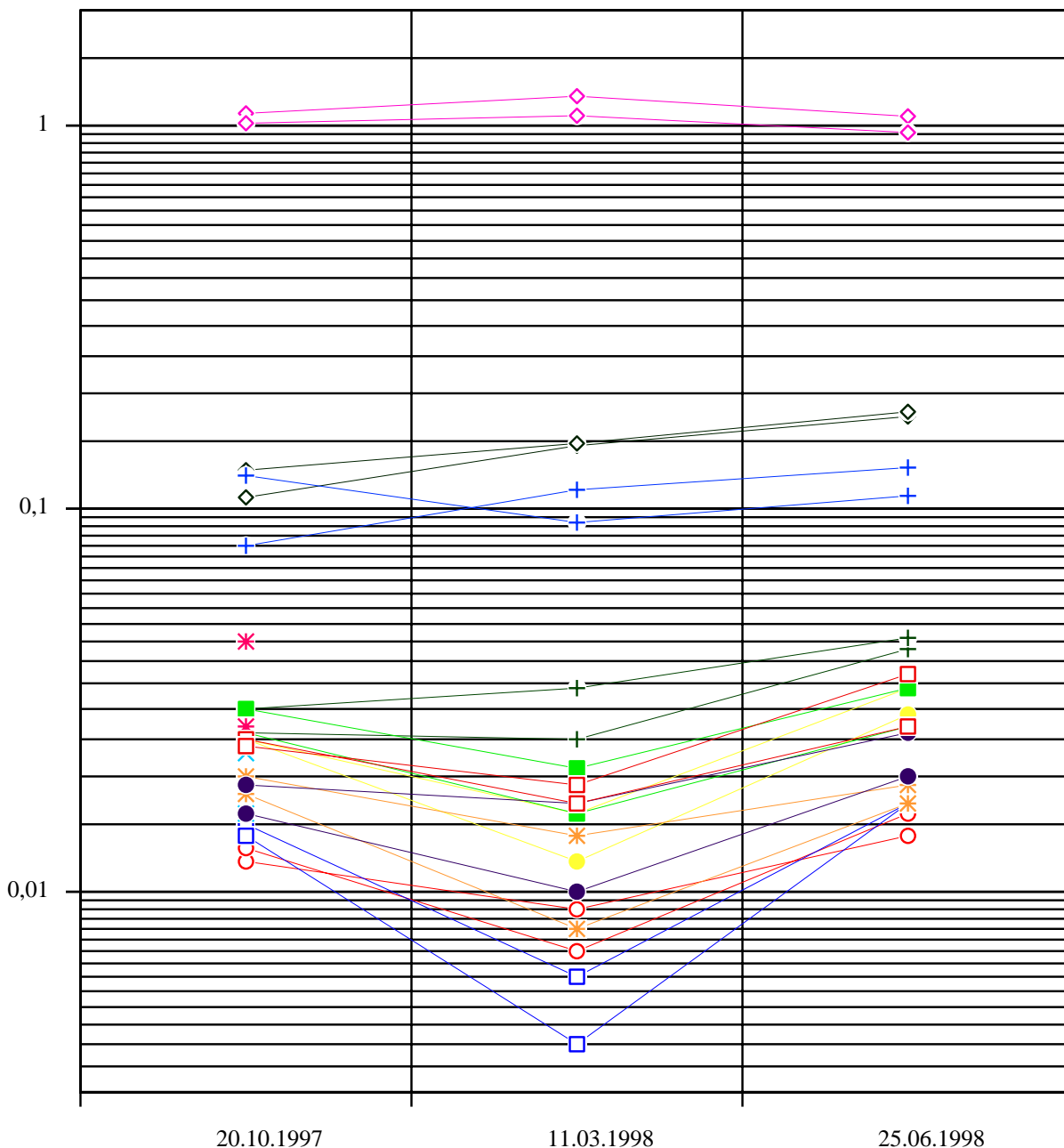
### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Auswertung der Glassensoren

##### 3.1.1 $\Delta E$ -Werte der Glassensoren

	Ausgangswert $\Delta E$	20.10.1997		11.03.1998		25.06.1998	
		$E_1$	$\Delta E_1$	$E_2$	$\Delta E_2$	$E_3$	$\Delta E_3$
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 A - 7.971.951	0,028	0,040	<b>0,012</b>	0,037	<b>0,009</b>	0,042	<b>0,014</b>
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 B - 7.971.961	0,029	0,042	<b>0,013</b>	0,036	<b>0,007</b>	0,045	<b>0,016</b>
Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 A - 7.971.971	0,031	0,046	<b>0,015</b>	0,037	<b>0,006</b>	0,048	<b>0,017</b>
Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 B - 7.971.981	0,030	0,044	<b>0,014</b>	0,034	<b>0,004</b>	0,047	<b>0,017</b>
Glasätzen Sensor-Nr. 3 A - 7.971.991	0,032	1,108	<b>1,076</b>	1,225	<b>1,193</b>	1,089	<b>1,057</b>
Glasätzen Sensor-Nr. 3 B - 7.972.001	0,027	1,041	<b>1,014</b>	1,088	<b>1,061</b>	0,986	<b>0,959</b>
Brennofen Sensor-Nr. 4 A - 7.972.011	0,030	0,056	<b>0,026</b>	0,055	<b>0,025</b>	0,073	<b>0,043</b>
Brennofen Sensor-Nr. 4 B - 7.972.021	0,030	0,060	<b>0,030</b>	0,064	<b>0,034</b>	0,076	<b>0,046</b>
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 A - 7.972.031	0,027	0,052	<b>0,025</b>	0,039	<b>0,012</b>	0,056	<b>0,029</b>
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 B - 7.972.041	0,029	0,054	<b>0,025</b>	0,045	<b>0,016</b>	0,063	<b>0,034</b>
Sandstrahlen/ putzen Sensor-Nr. 6 A - 7.972.051	0,030	0,046	<b>0,016</b>	Verlust		Verlust	
Sandstrahlen/ putzen Sensor-Nr. 6 B - 7.972.061	0,028	0,051	<b>0,023</b>	Verlust		Verlust	
Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 A - 7.972.071	0,027	0,047	<b>0,020</b>	0,041	<b>0,014</b>	0,046	<b>0,019</b>
Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 B - 7.972.081	0,029	0,047	<b>0,018</b>	0,037	<b>0,008</b>	0,046	<b>0,017</b>
Farblageraum Sensor-Nr. 8 A - 7.972.091	0,028	0,054	<b>0,026</b>	0,044	<b>0,016</b>	0,055	<b>0,027</b>
Farblageraum Sensor-Nr. 8 B - 7.972.101	0,028	0,058	<b>0,030</b>	0,049	<b>0,021</b>	0,062	<b>0,034</b>
Glasschleifen Sensor-Nr. 9 A - 7.972.111	0,029	0,074	<b>0,045</b>	Verlust		Verlust	
Glasschleifen Sensor-Nr. 9 B - 7.972.121	0,030	0,057	<b>0,027</b>	Verlust		Verlust	
Schlosserei Sensor-Nr. 10 A - 7.972.131	0,027	0,043	<b>0,016</b>	0,037	<b>0,010</b>	0,047	<b>0,020</b>
Schlosserei Sensor-Nr. 10 B - 7.972.141	0,024	0,043	<b>0,019</b>	0,041	<b>0,017</b>	0,050	<b>0,026</b>
Büro Sensor-Nr. 11 A - 7.972.151	0,028	0,053	<b>0,025</b>	0,045	<b>0,017</b>	0,055	<b>0,027</b>
Büro Sensor-Nr. 11 B - 7.972.161	0,030	0,054	<b>0,024</b>	0,049	<b>0,019</b>	0,067	<b>0,037</b>
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 A - 7.972.191	0,028	0,135	<b>0,107</b>	0,174	<b>0,146</b>	0,202	<b>0,174</b>
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 B - 7.972.201	0,027	0,153	<b>0,126</b>	0,175	<b>0,148</b>	0,206	<b>0,179</b>
Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 A - 7.972.171	0,029	0,109	<b>0,080</b>	0,141	<b>0,112</b>	0,157	<b>0,128</b>
Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 B - 7.972.181	0,028	0,150	<b>0,122</b>	0,120	<b>0,092</b>	0,136	<b>0,108</b>
<b>Durchschnittswerte ohne die Sensoren 7.971.991 und 7.972.001 (Glasätzen)</b>			<b>0,034</b>		<b>0,033</b>		<b>0,046</b>

### 3.1.2 $\Delta E$ -Werte der Glassensoren in der grafischen Darstellung



- |   |  |
|---|--|
| -○- Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 A - 7.971.951     | * Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 B - 7.972.081               |
| -○- Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 B - 7.971.961     | ■ Farblageraum Sensor-Nr. 8 A - 7.972.091                  |
| -□- Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 A - 7.971.971  | ■ Farblageraum Sensor-Nr. 8 B - 7.972.101                  |
| -□- Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 B - 7.971.981  | * Glasschleifen Sensor-Nr. 9 A - 7.972.111                 |
| -◇- Glasätzen Sensor-Nr. 3 A - 7.971.991            | * Glasschleifen Sensor-Nr. 9 B - 7.972.121                 |
| -◇- Glasätzen Sensor-Nr. 3 B - 7.972.001            | ● Schlosserei Sensor-Nr. 10 A - 7.972.131                  |
| -+- Brennofen Sensor-Nr. 4 A - 7.972.011            | ● Schlosserei Sensor-Nr. 10 B - 7.972.141                  |
| -+- Brennofen Sensor-Nr. 4 B - 7.972.021            | -□- Büro Sensor-Nr. 11 A - 7.972.151                       |
| ● Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 A - 7.972.031         | -□- Büro Sensor-Nr. 11 B - 7.972.161                       |
| ● Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 B - 7.972.041         | -◇- Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 A - 7.972.191    |
| -x- Sandstrahlen/ putzen Sensor-Nr. 6 A - 7.972.051 | -◇- Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 B - 7.972.201    |
| -x- Sandstrahlen/ putzen Sensor-Nr. 6 B - 7.972.061 | + Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 A - 7.972.171 |
| * Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 A - 7.972.071        | + Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 B - 7.972.181 |

### 3.1.3 Mikroskopische Auswertung der Glassensoren

	20.10.1997	11.03.1998	25.06.1998
		Videoprints bei 200-facher Vergrößerung Leica	
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 A - 7.971.951	kein Gelschichtrißnetz, lokale Kristalle unter 5µm	Vereinzelte feuchte Kristalle bis 50 µm, kein Rißnetz erkennbar	Belege mit feuchten Tröpfchen bis 50 µm und Schmutzpartikel gleichmäßig verteilt, lokal bis >100 µm, kein Rißnetz, im Randbereich Anhäufung des Schmutzes.
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 B - 7.971.961	kein Gelschichtrißnetz, lokale bis statistisch verteilte Kristalle unter 5µm	Gleichmäßig verteilte, feuchte Kristalle, kein Rißnetz erkennbar	Stärkere, feinere Verschmutzung als 7.971.951, kein Rißnetz, Tröpfchenbildung
Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 A - 7.971.971	kein Gelschichtrißnetz, deutliche, aber kleine Kristallisate, nur lokal, feuchte Korrosionsprodukte	Gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle, kein Rißnetz erkennbar	Kein Rißnetz, stärkere Verschmutzung als 7.971.951 in den Randbereichen
Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 B - 7.971.981	kein Gelschichtrißnetz, lokale bis statistisch verteilte Kristalle unter 5µm, feuchte Korrosionsprodukte	Gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle, kein Rißnetz erkennbar	Kein Rißnetz, Schmutzablagerung an der Oberfläche mit angelagerter Feuchtigkeit.
Glasätzen Sensor-Nr. 3 A - 7.971.991	lokale Gelschichtrisse, beginnendes Rißnetz, deutliche, aber kleine Kristallisate, nur lokal	Oberfläche überwiegend gerissen; nicht stark ausgeprägt. Agglomiert stärkere Belegung von Kristallen. Kristallgröße 50 bis 100 µm.	Mosaikartige, nicht vollständig gerissene Gelschicht, feine Risse, gleichmäßig verteilte Korrosionsprodukte (KP), Schmutzablagerungen und feuchte Kristalle (fK).
Glasätzen Sensor-Nr. 3 B - 7.972.001	lokale Gelschichtrisse, beginnendes Rißnetz, flächige, deutliche, aber kleine Kristallisate, lokale Kristalle mit 10-100 µm	Lokale Belegung von Kristallen und mosaikartig gerissenes Gelschichtnetz.	Feine, mosaikartige, nicht vollständig gerissene Gelschicht, lokale Kristallbildung sowie Schmutzablagerungen.
Brennofen Sensor-Nr. 4 A - 7.972.011	Keine Gelschichtrisse, Kristalle unter 10 µm statistisch verteilt, z.T. feuchter Vorhof	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte Kristallbelegung bis 100 µm	Kein Rißnetz erkennbar, Schmutzablagerung an der Oberfläche mit vereinzelter angelagerter Feuchtigkeit.
Brennofen Sensor-Nr. 4 B - 7.972.021	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 100 µm, z.T. feuchter Vorhof	Keine Gelschichtrisse - relativ gleichmäßig verteilte Kristallbelegung 50 bis 100 µm, teilweise Kristalle auch über 100 µm.	Kein Rißnetz erkennbar, Schmutzauflagerung gleichmäßig bis flächig verteilt.
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 A - 7.972.031	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 10µm, agglomiert, stärkere Belegung	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle bis 50 µm und kleinere sowie vereinzelte größere Kristalle.	Kein Rißnetz erkennbar, starke Schmutzablagerungen im Randbereich, gleichmäßig verteilte, feuchte Kristalle
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 B - 7.972.041	Keine Gelschichtrisse, lokale Kristalle bis 10 µm, agglomiert, stärkere Belegung	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle unter 50 µm	Kein Rißnetz erkennbar, statistisch verteilte (gleichmäßig, in regelmäßig wiederkehrender Form) feuchte Kristalle bis 50 µm
Sandstrahlen/putzen Sensor-Nr. 6 A - 7.972.051	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte Kristalle unter 5 µm, z.T. agglomiert, lokale Kristalle bis 10 µm	Verlust	Verlust
Sandstrahlen/putzen Sensor-Nr. 6 B - 7.972.061	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte Kristalle unter 5 µm	Verlust	Verlust

Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 A - 7.972.071	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 10 µm	Keine Gelschichtrisse - vereinzelte Feuchtekristalle ca. 5 µm	Kein Rißnetz erkennbar, statistisch verteilte feuchte Kristalle bis 10 µm
Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 B - 7.972.081	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 10 µm	Keine Gelschichtrisse - vereinzelte Feuchtekristalle ca. 5 µm	Kein Rißnetz erkennbar, gleichmäßig verteilte, lokal jedoch gehäufte, feuchte Kristalle > 5 µm sowie vereinzelter Schmutz im Randbereich,
Farblageraum Sensor-Nr. 8 A - 7.972.091	Keine Gelschichtrisse, flächig, kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 10 µm, z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle unter 10 µm	Kein Rißnetz erkennbar, gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle > 10 µm sowie vereinzelte Schmutzablagerung
Farblageraum Sensor-Nr. 8 B - 7.972.101	Keine Gelschichtrisse, flächig, kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 10 µm, z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle unter 10 µm	Kein Rißnetz erkennbar, statistisch verteilte, feuchte Kristalle, gelegentlich Schmutz
Glasschleifen Sensor-Nr. 9 A - 7.972.111	Keine Gelschichtrisse, flächig, kleine Kristalle, statistisch verteilte Kristalle bis 5 µm, lokal Kristalle bis 100 µm	Verlust	Verlust
Glasschleifen Sensor-Nr. 9 B - 7.972.121	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 5 µm	Verlust	Verlust
Schlosserei Sensor-Nr. 10 A - 7.972.131	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, Kristalle bis 5 µm, lokal agglomeriert z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle 5 µm vereinzelt 20 µm vereinzelt aufliegende Schutzablagerungen	Kein Rißnetz erkennbar, statistisch verteilte, feuchte Kristalle, gleichmäßige Schmutzablagerung
Schlosserei Sensor-Nr. 10 B - 7.972.141	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, Kristalle bis 5 µm, lokal agglomeriert, lokal Kristalle bis 100 µm, z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle 10 bis 50 µm vereinzelt aufliegende Schutzablagerungen	Kein Rißnetz erkennbar, gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle, vereinzelter Schmutz, evtl. Mikroorganismen-> Strukturen
Büro Sensor-Nr. 11 A - 7.972.151	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte kleine Kristalle, lokal Kristalle bis 10 µm, z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle 10 bis 20 µm	Kein Rißnetz erkennbar, gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle, vereinzelter Schmutz, evtl. Mikroorganismen
Büro Sensor-Nr. 11 B - 7.972.161	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte Kristalle bis 5 µm, lokal Kristalle bis 10 µm	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle 10 µm	Kein Rißnetz erkennbar, feuchte Kristalle < 5 µm, vereinzelter Schmutz, evtl. Mikroorganismen
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 A - 7.972.191	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte Kristalle bis 10 µm z.T. feucht, statistisch verteilte Kristalle bis 100 µm z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - akkumuliert feuchte Kristalle bis 50 µm	Kein Rißnetz erkennbar, flächig, feuchte Kristalle, kaum Schmutz
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 B - 7.972.201	Keine Gelschichtrisse, statistisch verteilte Kristalle bis 10 µm, statistisch verteilte Kristalle bis 100 µm z.T. feucht	Keine Gelschichtrisse - gleichmäßig verteilte feuchte Kristalle 100 µm	Kein Rißnetz erkennbar, flächig, feuchte Kristalle, kaum Schmutz
Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 A - 7.972.171	Keine Gelschichtrisse, flächig, fast dichte Belegung mit kleinen Kristallen, lokal, agglomerierte Kristalle bis 10 µm	Keine Gelschichtrisse - Korrosionsprodukte 50 bis 100 µm, akkumuliert belegt Kristallbelegung	Kein Rißnetz erkennbar, lokal, flächig Feuchtseln, lokale Kristalle, organische Rückstände
Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 B - 7.972.181	Keine Gelschichtrisse, flächig, fast dichte Belegung mit kleinen Kristallen, lokal, agglomerierte Kristalle bis 10 µm, lokal Kristalle bis 100 µm	Feuchte Kristalle bis 50 µ, andere Kristallformen 50 bis 100 µ, lokale Gelschichtrisse	Kein Rißnetz erkennbar, im Bereich vermuteter Spuren von Mikroorganismen Feuchtseln, lokale feuchte Kristalle, organische Rückstände

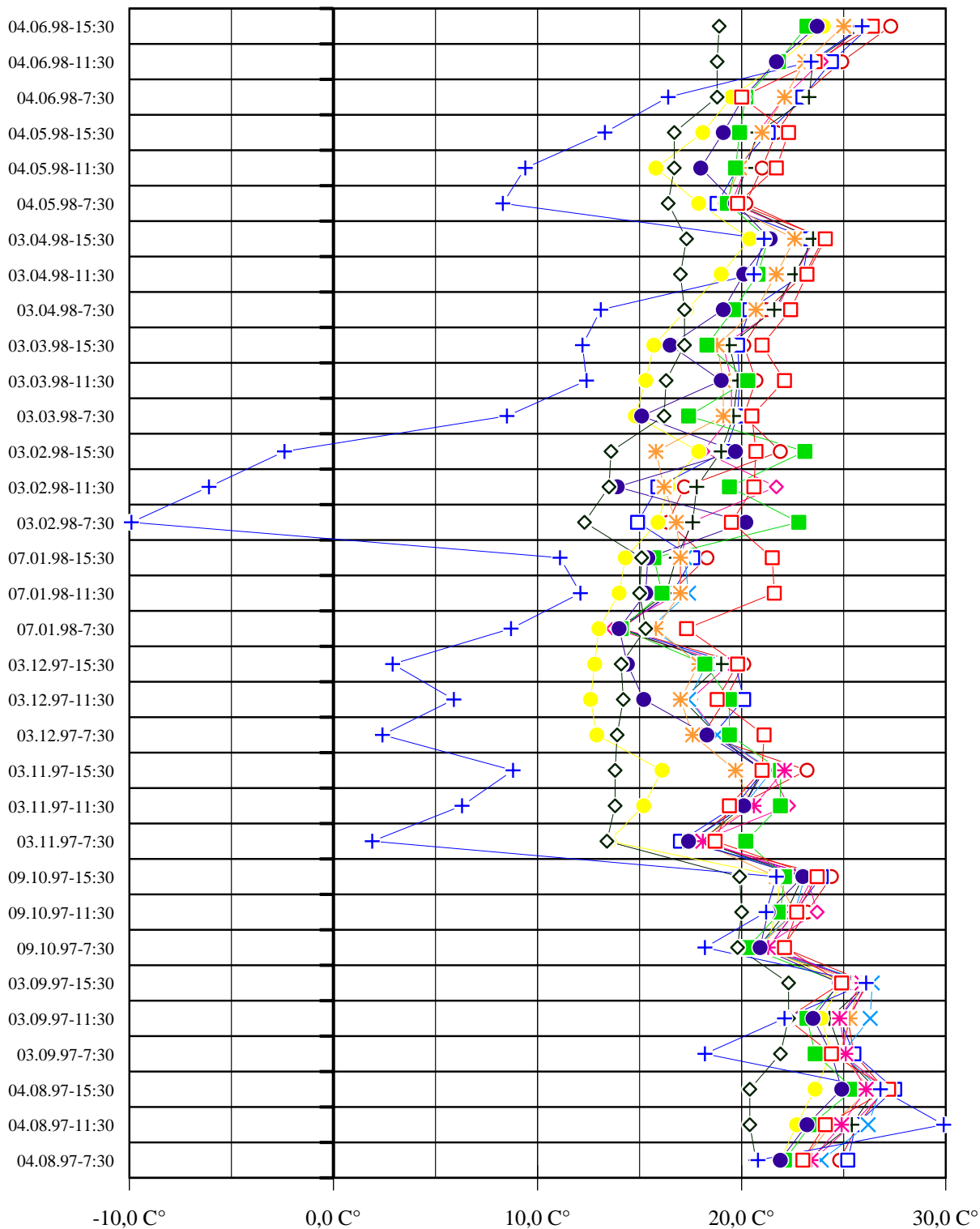


### 3.2 Die Umgebungsbedingungen

#### 3.2.1 Der Verlauf der Temperatur während der Exposition der Glassensoren

		Werkstatt/Sonne Expositionsort-Nr. 1	Werkstatt / Schatten Expositionsort-Nr. 2	Glasätzen Expositionsort-Nr. 3	Brennofen Expositionsort-Nr. 4	Sicherungsraum Expositionsort-Nr. 5	Sandstrahlen/putzen Expositionsort-Nr. 6	Belichtungsraum Expositionsort-Nr. 7	Farblageraum Expositionsort-Nr. 8	Glasschleifen Expositionsort-Nr. 9	Schlosserei Expositionsort-Nr. 10	Büro Expositionsort-Nr. 11	Sicherungsraum DBH Köln Expositionsort-Nr. 12	Referenzsensor Freiland / Wü Expositionsort-Nr. 13
04.08.1997	7:30	24,8 C°	25,2 C°	23,5 C°	23,2 C°	21,9 C°	23,9 C°	23,0 C°	22,1 C°	23,4 C°	21,9 C°	23,0 C°	20,7 C°	20,8 C°
04.08.1997	11:30	25,7 C°	25,6 C°	25,4 C°	25,4 C°	22,7 C°	26,2 C°	24,4 C°	23,4 C°	24,9 C°	23,2 C°	24,1 C°	20,4 C°	29,9 C°
04.08.1997	15:30	27,0 C°	27,5 C°	27,1 C°	26,6 C°	23,6 C°	26,8 C°	26,3 C°	25,5 C°	26,1 C°	24,9 C°	27,2 C°	20,4 C°	26,8 C°
03.09.1997	7:30	25,5 C°	25,5 C°	24,9 C°	24,9 C°	24,4 C°	24,9 C°	24,8 C°	23,6 C°	25,1 C°	24,4 C°	24,4 C°	21,9 C°	18,2 C°
03.09.1997	11:30	25,2 C°	24,8 C°	25,3 C°	24,3 C°	23,9 C°	26,3 C°	25,3 C°	23,2 C°	24,8 C°	23,5 C°	22,2 C°	22,3 C°	22,1 C°
03.09.1997	15:30	26,2 C°	26,1 C°	26,1 C°	26,2 C°	24,9 C°	26,4 C°	25,8 C°	24,9 C°	25,9 C°	24,8 C°	24,9 C°	22,3 C°	26,1 C°
09.10.1997	7:30	22,0 C°	21,3 C°	21,0 C°	20,8 C°	21,2 C°	20,7 C°	20,8 C°	20,3 C°	21,3 C°	20,9 C°	22,1 C°	19,8 C°	18,2 C°
09.10.1997	11:30	23,2 C°	22,6 C°	23,7 C°	22,2 C°	21,7 C°	22,6 C°	22,6 C°	21,9 C°	22,6 C°	21,3 C°	22,7 C°	20,0 C°	21,2 C°
09.10.1997	15:30	24,4 C°	23,9 C°	23,2 C°	23,0 C°	21,9 C°	23,1 C°	21,7 C°	22,1 C°	23,5 C°	23,0 C°	23,7 C°	19,9 C°	21,7 C°
03.11.1997	7:30	17,6 C°	17,0 C°	18,0 C°	18,0 C°	13,5 C°	17,5 C°	17,9 C°	20,2 C°	18,1 C°	17,4 C°	18,7 C°	13,4 C°	1,9 C°
03.11.1997	11:30	19,8 C°	19,7 C°	22,3 C°	20,1 C°	15,2 C°	20,1 C°	20,5 C°	21,9 C°	20,6 C°	20,1 C°	19,4 C°	13,8 C°	6,3 C°
03.11.1997	15:30	23,2 C°	21,1 C°	21,4 C°	21,0 C°	16,1 C°	21,5 C°	19,7 C°	21,9 C°	22,1 C°	21,1 C°	21,0 C°	13,8 C°	8,8 C°
03.12.1997	7:30	18,1 C°	18,6 C°	18,8 C°	18,8 C°	12,9 C°	18,8 C°	17,6 C°	19,4 C°	Verlust	18,3 C°	21,1 C°	13,9 C°	2,4 C°
03.12.1997	11:30	19,2 C°	20,1 C°	17,5 C°	17,1 C°	12,6 C°	17,4 C°	17,0 C°	19,4 C°	Verlust	15,2 C°	18,8 C°	14,2 C°	5,9 C°
03.12.1997	15:30	20,1 C°	19,7 C°	19,4 C°	19,0 C°	12,8 C°	18,3 C°	17,9 C°	18,2 C°	Verlust	14,4 C°	19,8 C°	14,1 C°	2,9 C°
07.01.1998	7:30	14,1 C°	14,0 C°	13,7 C°	14,0 C°	13,0 C°	15,5 C°	15,8 C°	14,1 C°	Verlust	14,0 C°	17,3 C°	15,3 C°	8,7 C°
07.01.1998	11:30	16,5 C°	16,6 C°	17,0 C°	16,3 C°	14,0 C°	17,4 C°	17,0 C°	16,1 C°	Verlust	15,3 C°	21,6 C°	15,0 C°	12,1 C°
07.01.1998	15:30	18,3 C°	17,6 C°	17,0 C°	16,8 C°	14,3 C°	17,2 C°	17,0 C°	15,7 C°	Verlust	15,4 C°	21,5 C°	15,1 C°	11,1 C°
03.02.1998	7:30	16,4 C°	14,9 C°	17,5 C°	17,6 C°	15,9 C°	Verlust	16,8 C°	22,8 C°	Verlust	20,2 C°	19,5 C°	12,3 C°	-9,9 C°
03.02.1998	11:30	17,2 C°	15,9 C°	21,7 C°	17,8 C°	16,4 C°	Verlust	16,2 C°	19,4 C°	Verlust	13,9 C°	20,6 C°	13,5 C°	-6,1 C°
03.02.1998	15:30	21,9 C°	19,2 C°	18,1 C°	19,0 C°	17,9 C°	Verlust	15,8 C°	23,1 C°	Verlust	19,7 C°	20,7 C°	13,6 C°	-2,4 C°
03.03.1998	7:30	20,1 C°	19,8 C°	19,5 C°	19,6 C°	14,8 C°	Verlust	19,1 C°	17,4 C°	Verlust	15,1 C°	20,5 C°	16,2 C°	8,5 C°
03.03.1998	11:30	20,7 C°	19,9 C°	19,5 C°	19,8 C°	15,3 C°	Verlust	19,1 C°	20,3 C°	Verlust	19,0 C°	22,1 C°	16,3 C°	12,4 C°
03.03.1998	15:30	20,1 C°	19,8 C°	19,1 C°	19,4 C°	15,7 C°	Verlust	18,8 C°	18,3 C°	Verlust	16,5 C°	21,0 C°	17,2 C°	12,2 C°
03.04.1998	7:30	21,2 C°	20,4 C°	21,7 C°	21,6 C°	17,3 C°	Verlust	20,7 C°	19,6 C°	Verlust	19,1 C°	22,4 C°	17,2 C°	13,1 C°
03.04.1998	11:30	23,1 C°	23,0 C°	22,6 C°	22,6 C°	19,0 C°	Verlust	21,7 C°	20,8 C°	Verlust	20,1 C°	23,2 C°	17,0 C°	20,6 C°
03.04.1998	15:30	24,0 C°	23,3 C°	23,6 C°	23,5 C°	20,4 C°	Verlust	22,6 C°	21,3 C°	Verlust	21,4 C°	24,1 C°	17,3 C°	21,1 C°
04.05.1998	7:30	20,2 C°	18,8 C°	19,5 C°	19,7 C°	17,9 C°	Verlust	19,2 C°	19,3 C°	Verlust	19,7 C°	19,8 C°	16,4 C°	8,3 C°
04.05.1998	11:30	21,0 C°	19,8 C°	20,2 C°	20,2 C°	15,8 C°	Verlust	19,9 C°	19,7 C°	Verlust	18,0 C°	21,7 C°	16,7 C°	9,4 C°
04.05.1998	15:30	21,7 C°	21,3 C°	20,8 C°	20,8 C°	18,1 C°	Verlust	21,0 C°	19,9 C°	Verlust	19,1 C°	22,3 C°	16,7 C°	13,3 C°
04.06.1998	7:30	22,9 C°	23,0 C°	22,1 C°	23,3 C°	19,5 C°	Verlust	22,1 C°	20,2 C°	Verlust	20,1 C°	20,0 C°	18,8 C°	16,4 C°
04.06.1998	11:30	24,9 C°	24,4 C°	23,9 C°	23,5 C°	21,9 C°	Verlust	23,1 C°	21,8 C°	Verlust	21,7 C°	23,6 C°	18,8 C°	23,4 C°
04.06.1998	15:30	27,3 C°	26,3 C°	25,8 C°	26,0 C°	24,0 C°	Verlust	25,0 C°	23,2 C°	Verlust	23,7 C°	26,4 C°	18,9 C°	25,9 C°
<b>Durchschnittswert</b>		<b>21,6 C°</b>	<b>21,1 C°</b>	<b>21,2 C°</b>	<b>21,0 C°</b>	<b>18,2 C°</b>	<b>21,4 C°</b>	<b>20,5 C°</b>	<b>20,6 C°</b>	<b>23,2 C°</b>	<b>19,6 C°</b>	<b>21,9 C°</b>	<b>17,1 C°</b>	<b>13,1 C°</b>

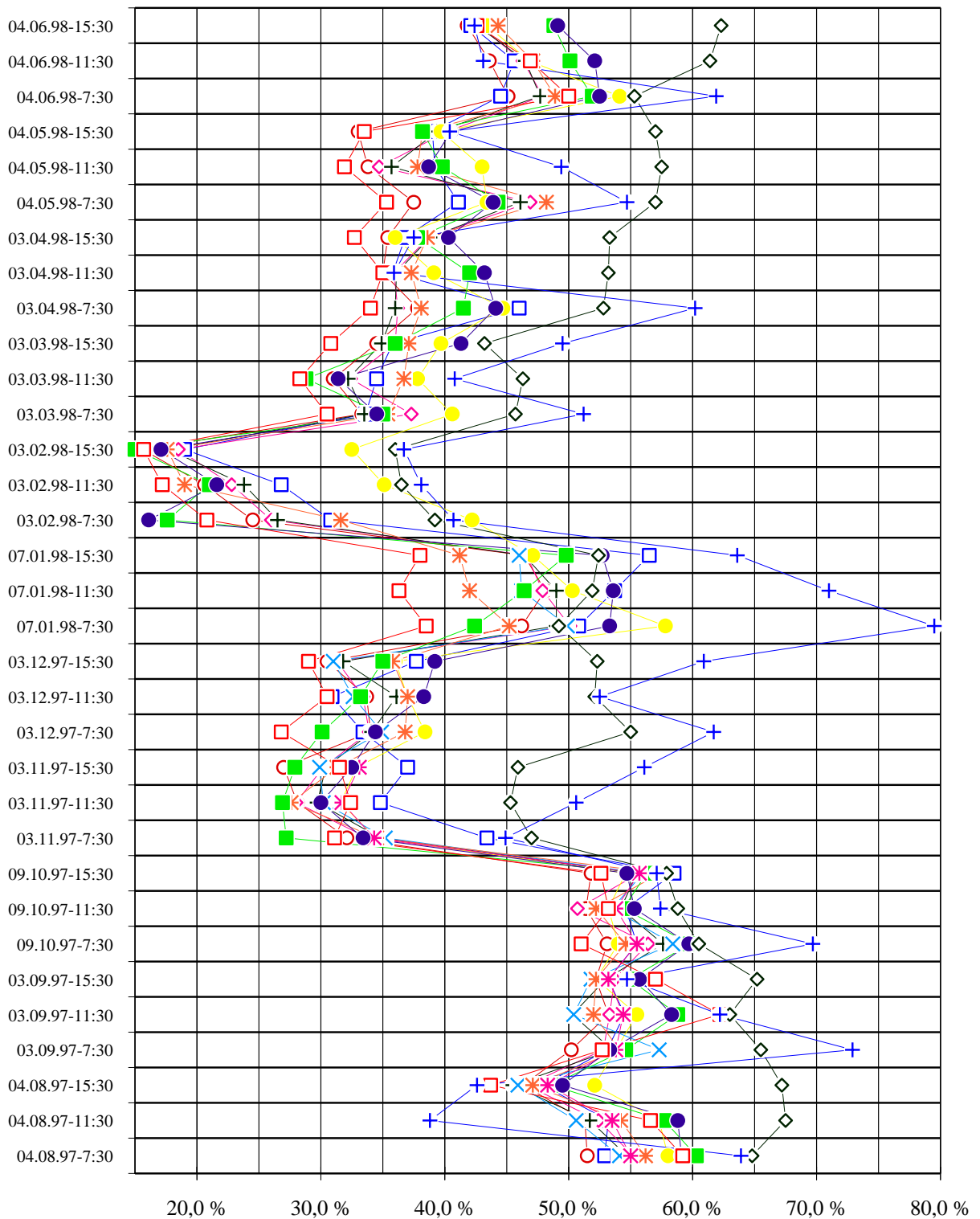
### 3.2.2 Der Verlauf der Temperatur in der grafischen Darstellung



### 3.2.3 Der Verlauf der relativen Luftfeuchte während der Exposition der Glassensoren

		Werkstatt/Sonne Expositionsort-Nr. 1	Werkstatt / Schatten Expositionsort-Nr. 2	Glasätzen Expositionsort-Nr. 3	Brennofen Expositionsort-Nr. 4	Sicherungsraum Expositionsort-Nr. 5	Sandstrahlen/putzen Expositionsort-Nr. 6	Belichtungsraum Expositionsort-Nr. 7	Farblageraum Expositionsort-Nr. 8	Glasschleifen Expositionsort-Nr. 9	Schlosserei Expositionsort-Nr. 10	Büro Expositionsort-Nr. 11	Sicherungsraum DBH Köln Expositionsort-Nr. 12	Referenzsensor Freiland /Wü Expositionsort-Nr. 13
04.08.1997	7:30	51,5 %	52,9 %	55,2 %	54,7 %	58,0 %	54,1 %	56,2 %	60,3 %	55,0 %	59,1 %	59,2 %	64,8 %	63,9 %
04.08.1997	11:30	51,3 %	53,2 %	52,4 %	51,7 %	57,3 %	50,6 %	54,2 %	57,7 %	53,5 %	58,8 %	56,6 %	67,5 %	38,8 %
04.08.1997	15:30	46,3 %	47,9 %	46,6 %	45,5 %	52,1 %	45,9 %	47,1 %	48,6 %	48,3 %	49,5 %	43,7 %	67,2 %	42,6 %
03.09.1997	7:30	50,2 %	53,1 %	52,8 %	53,5 %	53,8 %	57,3 %	54,1 %	54,6 %	53,8 %	53,3 %	52,7 %	65,5 %	72,9 %
03.09.1997	11:30	53,2 %	54,5 %	53,3 %	50,3 %	55,5 %	50,4 %	52,0 %	58,8 %	54,4 %	58,3 %	62,2 %	63,0 %	62,2 %
03.09.1997	15:30	52,2 %	53,2 %	53,7 %	53,0 %	52,2 %	51,8 %	52,2 %	54,9 %	53,2 %	55,7 %	57,0 %	65,2 %	54,7 %
09.10.1997	7:30	53,1 %	55,5 %	56,4 %	57,6 %	54,0 %	58,4 %	54,6 %	59,8 %	55,5 %	59,7 %	51,0 %	60,5 %	69,7 %
09.10.1997	11:30	51,4 %	54,6 %	50,7 %	54,2 %	53,2 %	53,5 %	52,2 %	54,4 %	53,8 %	55,3 %	53,2 %	58,8 %	57,4 %
09.10.1997	15:30	51,8 %	58,5 %	55,7 %	55,5 %	54,6 %	56,0 %	57,4 %	56,3 %	55,7 %	54,7 %	52,6 %	57,9 %	57,1 %
03.11.1997	7:30	32,1 %	43,4 %	33,8 %	34,8 %	34,4 %	35,2 %	34,5 %	27,2 %	34,3 %	33,4 %	31,1 %	47,0 %	44,9 %
03.11.1997	11:30	28,1 %	34,8 %	28,0 %	29,7 %	31,6 %	30,2 %	27,6 %	26,9 %	31,7 %	30,0 %	32,4 %	45,3 %	50,6 %
03.11.1997	15:30	27,0 %	37,0 %	30,2 %	30,4 %	32,9 %	29,9 %	31,3 %	27,9 %	33,1 %	32,5 %	31,5 %	45,9 %	56,1 %
03.12.1997	7:30	34,0 %	33,4 %	33,9 %	34,1 %	38,4 %	34,9 %	36,8 %	30,1 %	Verlust	34,4 %	26,8 %	55,0 %	61,7 %
03.12.1997	11:30	33,7 %	30,9 %	33,4 %	36,1 %	37,0 %	32,6 %	37,0 %	33,2 %	Verlust	38,3 %	30,5 %	52,1 %	52,5 %
03.12.1997	15:30	30,5 %	37,7 %	31,3 %	31,8 %	36,0 %	31,0 %	35,8 %	35,0 %	Verlust	39,2 %	29,0 %	52,3 %	60,9 %
07.01.1998	7:30	46,2 %	50,8 %	50,1 %	49,0 %	57,8 %	49,9 %	45,2 %	42,4 %	Verlust	53,3 %	38,5 %	49,2 %	79,5 %
07.01.1998	11:30	48,1 %	53,7 %	47,9 %	49,0 %	50,3 %	46,2 %	42,0 %	46,4 %	Verlust	53,6 %	36,3 %	51,9 %	71,0 %
07.01.1998	15:30	46,4 %	56,5 %	46,6 %	46,4 %	47,1 %	46,0 %	41,2 %	49,8 %	Verlust	52,7 %	38,0 %	52,4 %	63,6 %
03.02.1998	7:30	24,5 %	30,8 %	26,0 %	26,5 %	42,2 %	Verlust	31,6 %	17,6 %	Verlust	16,1 %	20,8 %	39,2 %	40,7 %
03.02.1998	11:30	20,6 %	26,8 %	22,8 %	23,8 %	35,1 %	Verlust	19,0 %	21,0 %	Verlust	21,6 %	17,2 %	36,5 %	38,1 %
03.02.1998	15:30	15,6 %	19,0 %	18,5 %	17,7 %	32,5 %	Verlust	17,6 %	15,0 %	Verlust	17,1 %	15,7 %	36,0 %	36,7 %
03.03.1998	7:30	33,3 %	33,6 %	37,3 %	33,5 %	40,6 %	Verlust	35,4 %	35,0 %	Verlust	34,5 %	30,5 %	45,7 %	51,2 %
03.03.1998	11:30	31,0 %	34,5 %	32,4 %	32,2 %	37,8 %	Verlust	36,7 %	28,8 %	Verlust	31,4 %	28,3 %	46,3 %	40,8 %
03.03.1998	15:30	34,5 %	35,8 %	36,0 %	34,9 %	39,7 %	Verlust	37,1 %	36,0 %	Verlust	41,3 %	30,8 %	43,2 %	49,5 %
03.04.1998	7:30	37,8 %	46,0 %	36,2 %	36,0 %	44,7 %	Verlust	38,1 %	41,5 %	Verlust	44,1 %	34,0 %	52,8 %	60,2 %
03.04.1998	11:30	35,0 %	35,8 %	35,9 %	36,1 %	39,1 %	Verlust	37,3 %	42,0 %	Verlust	43,2 %	35,0 %	53,2 %	35,9 %
03.04.1998	15:30	35,4 %	36,8 %	38,7 %	38,8 %	36,0 %	Verlust	38,6 %	37,8 %	Verlust	40,3 %	32,7 %	53,3 %	37,5 %
04.05.1998	7:30	37,5 %	41,1 %	46,9 %	46,1 %	43,4 %	Verlust	48,2 %	44,3 %	Verlust	43,9 %	35,3 %	57,0 %	54,7 %
04.05.1998	11:30	33,8 %	39,2 %	34,7 %	35,7 %	43,0 %	Verlust	37,8 %	39,8 %	Verlust	38,7 %	31,9 %	57,5 %	49,4 %
04.05.1998	15:30	33,0 %	39,0 %	40,2 %	39,4 %	39,7 %	Verlust	38,2 %	38,2 %	Verlust	40,5 %	33,5 %	57,0 %	40,4 %
04.06.1998	7:30	45,1 %	44,5 %	47,9 %	47,7 %	54,1 %	Verlust	48,9 %	51,9 %	Verlust	52,5 %	50,0 %	55,3 %	61,9 %
04.06.1998	11:30	43,6 %	45,6 %	46,3 %	46,5 %	46,8 %	Verlust	47,1 %	50,1 %	Verlust	52,1 %	46,9 %	61,4 %	43,1 %
04.06.1998	15:30	41,8 %	42,1 %	42,7 %	42,6 %	43,4 %	Verlust	44,3 %	48,8 %	Verlust	49,1 %	42,6 %	62,3 %	42,4 %
<b>Durchschnittswert</b>		<b>39,1 %</b>	<b>42,8 %</b>	<b>41,0 %</b>	<b>41,1 %</b>	<b>44,7 %</b>	<b>45,2 %</b>	<b>41,4 %</b>	<b>41,6 %</b>	<b>48,5 %</b>	<b>43,6 %</b>	<b>38,4 %</b>	<b>53,9 %</b>	<b>52,8 %</b>

### 3.2.4 Der Verlauf der relativen Luftfeuchte in der grafischen Darstellung



- |  |   |
|--|---|
| ○- Werkstatt/Sonne Expositionsort-Nr. 1      | ■- Farblageraum Expositionsort-Nr. 8                  |
| □- Werkstatt / Schatten Expositionsort-Nr. 2 | *- Glasschleifen Expositionsort-Nr. 9                 |
| ◇- Glasätzen Expositionsort-Nr. 3            | ●- Schlosserei Expositionsort-Nr. 10                  |
| + - Brennofen Expositionsort-Nr. 4           | □- Büro Expositionsort-Nr. 11                         |
| ●- Sicherungsraum Expositionsort-Nr. 5       | ◇- Sicherungsraum DBH Köln Expositionsort-Nr. 12      |
| ×- Sandstrahlen/putzen Expositionsort-Nr. 6  | + - Referenzsensor Freiland /Wü Expositionsort-Nr. 13 |
| *- Belichtungsraum Expositionsort-Nr. 7      |   |

#### 4. Bewertung der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der  $\Delta E$ -Werte der Glassensoren fallen besonders die Sensoren "Glasätzen, Sensor-Nr. 3 A - 7.971.991", "Glasätzen, Sensor-Nr. 3 B - 7.972.001", "Sicherungsraum DBH Köln, Sensor-Nr. 12 A - 7.972.191", "Sicherungsraum DBH Köln, Sensor-Nr. 12 B -7.972.201" auf.

Aus diesem Grund sollen hier vor einer allgemeinen Bewertung der Ergebnisse der Korrosionsverlauf dieser Glassensoren interpretiert werden.

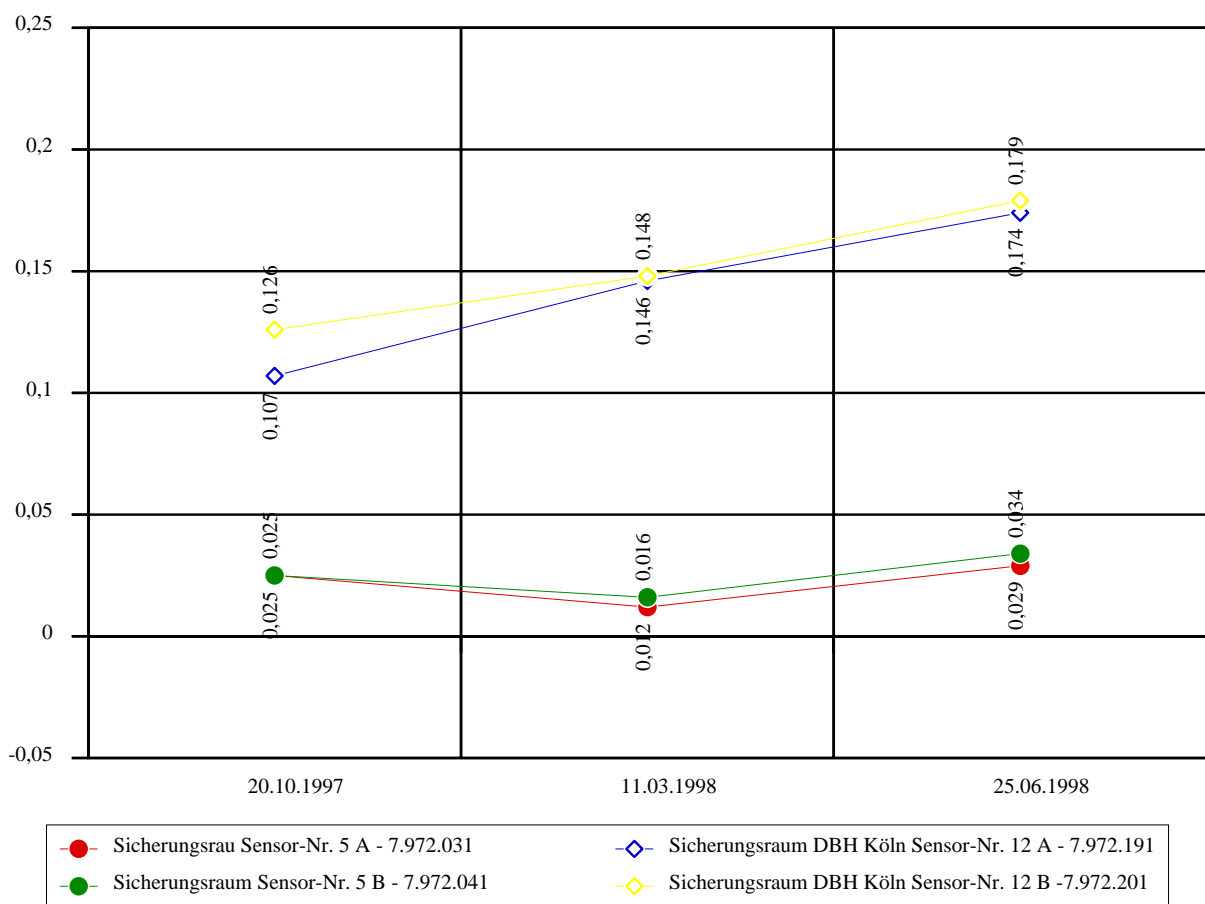
##### 4.1.1 Bewertung des Korrosionsverlaufs anhand der $\Delta E$ -Werte der am stärksten korrodierten in Innenräumen gelagerten Glassensoren

Am Lagerungsort der Glassensoren Nr. 3 A - 7.971.991 und Nr. 3 B - 7.972.001 in unmittelbarer Nähe (ca. 15 cm) der, zwar geschlossenen, Flußsäurewanne, waren solch hohen Werte ( $\Delta E$  am 25.06.1998 1,057 bzw. 0,959) zu erwarten.

Auch die relativ hohen  $\Delta E$ -Werte bei den in der Nähe des Brennofens gelagerten Glassensoren, Sensor-Nr. 4 A - 7.972.011 und Sensor-Nr. 4 B - 7.972.021 überrascht nicht, da hier der Stress durch die Erwärmung und Abkühlung und dem damit verbundenen Wechsel der relativen Luftfeuchte für die Glassensoren aussergewöhnlich hoch ist. Auch wenn diese Schwankungen der Temperatureur und relativen Luftfeuchte, aufgrund der relativ großen Abstände der Messungen nicht unmittelbar abzulesen sind.

Die Werte an den Lagerungsorten der Glassensoren Nr. 12 A - 7.972.191 und Nr. 12 B - 7.972.201 im Sicherungsraum der Dombauhütte in Köln haben jedoch überrascht. So betragen die  $\Delta E$ -Werte am 25.06.1998 0,174 bzw. 0,179.

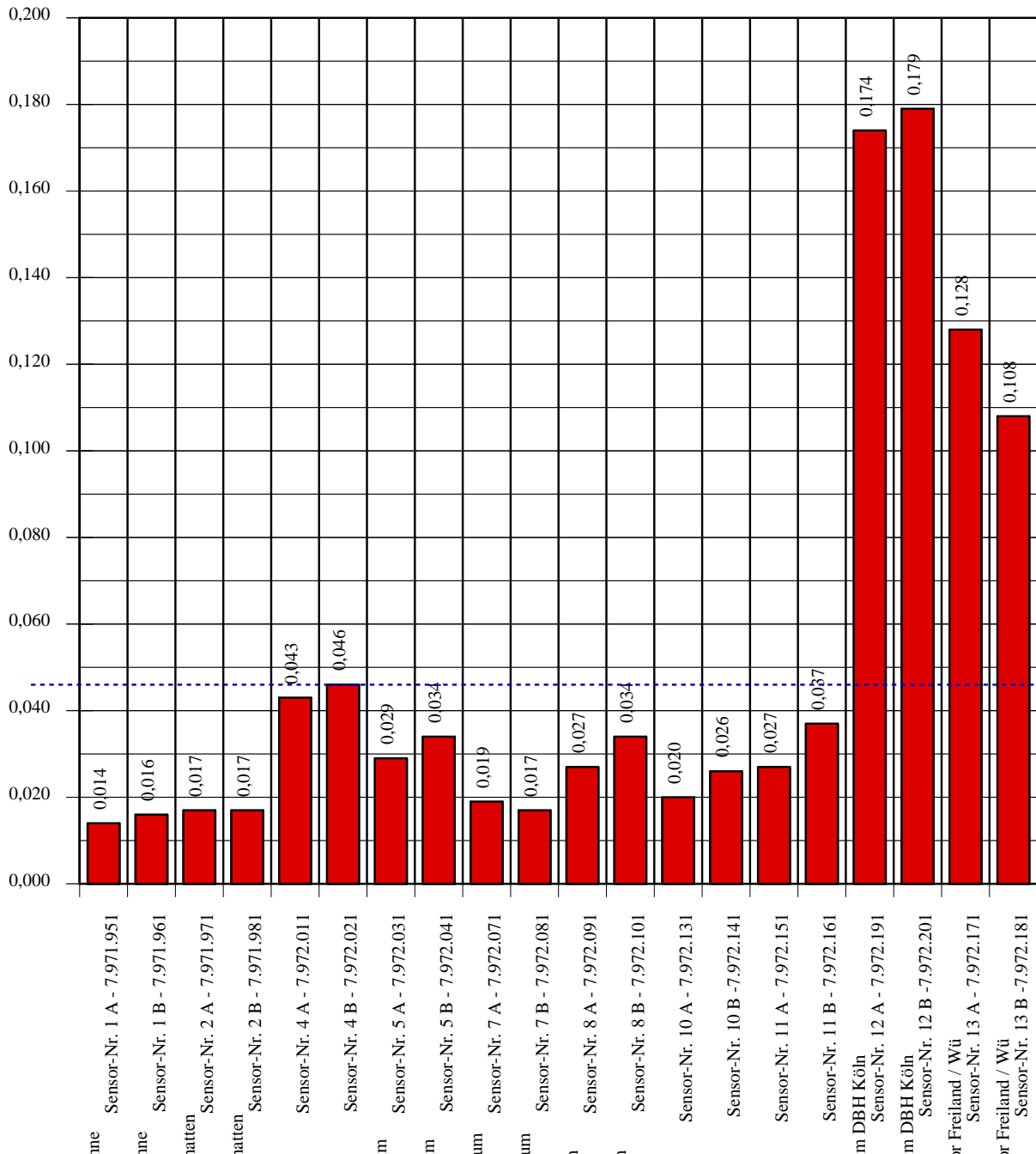
Nachfolgend werden die  $\Delta E$ -Werte der Glassensoren des Sicherungsraumes in Köln mit den  $\Delta E$ -Werten der Sensoren im Sicherungsraum in der Werkstatt in Würzburg verglichen.



Um diese Werte relativieren zu können wurde auch der Durchschnittswert aller  $\Delta E$ -Werte mit Ausnahme der Werte der Sensoren 7.971.991 und 7.972.001 (Glasätzen) errechnet, da in der Nähe der Ätzvorrichtung wohl kein verantwortungsbewusster Glasrestaurator historische Verglasungen lagern wird.

Dieser Durchschnitts- $\Delta E$ -Wert lag bei 0,046.

So ergibt sich nachfolgende Grafik:



Bei den in Würzburg exponierten Sensoren fällt auf, daß die Werte bei der zweiten Messung leicht gesunken sind und bei der 3. Messung wieder ansteigen.

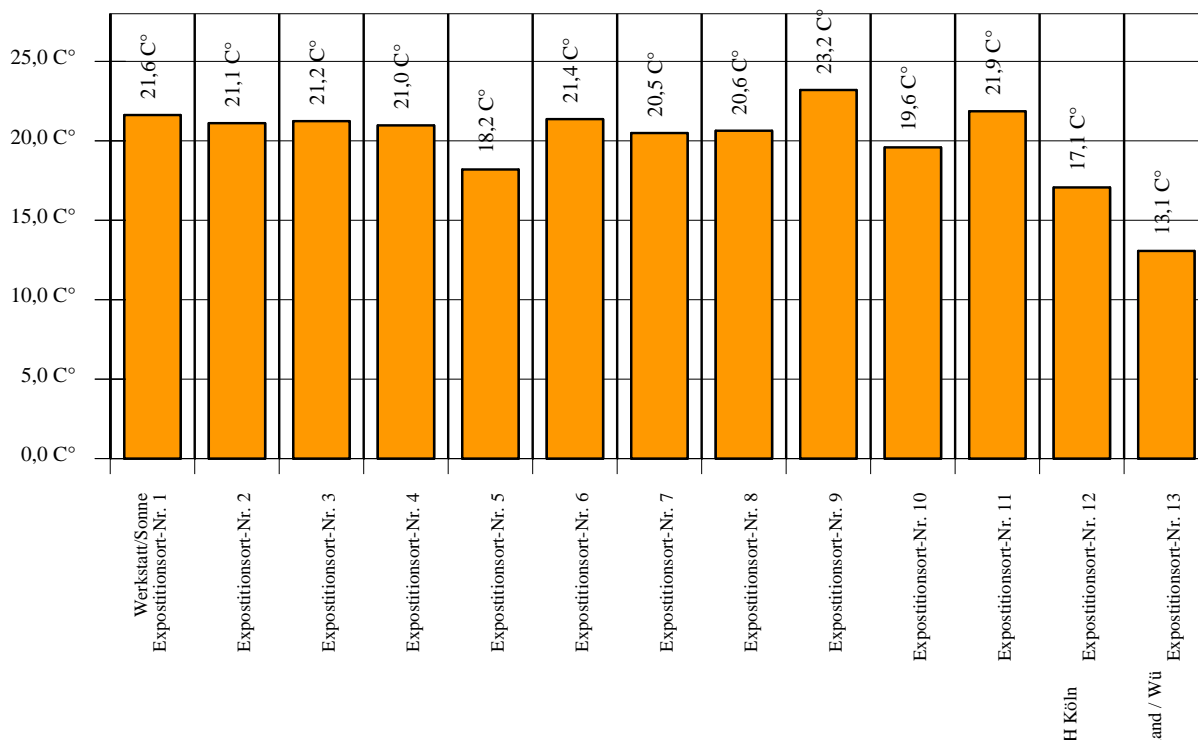
Solche Effekte traten auch bei anderen Sensoren auf. Man kann das dadurch erklären, daß die Sensorwerte zunächst durch Korrosion (Aufbau einer Gelschicht) ansteigen, später aber wieder sanken, wenn das Klima sehr trocken war und dadurch die Gelschicht teilweise entwässert wurde.

Besonders häufig tritt dieser Effekt auf, wenn zunächst feuchte Kristalle entstehen, da diese in Zeiten mit niedrigen Feuchtwerten auch einen Teil ihres Hydratwassers abgeben können.

### 4.1.2 Umgebungsbedingungen der Glassensoren - Durchschnittstemperatur

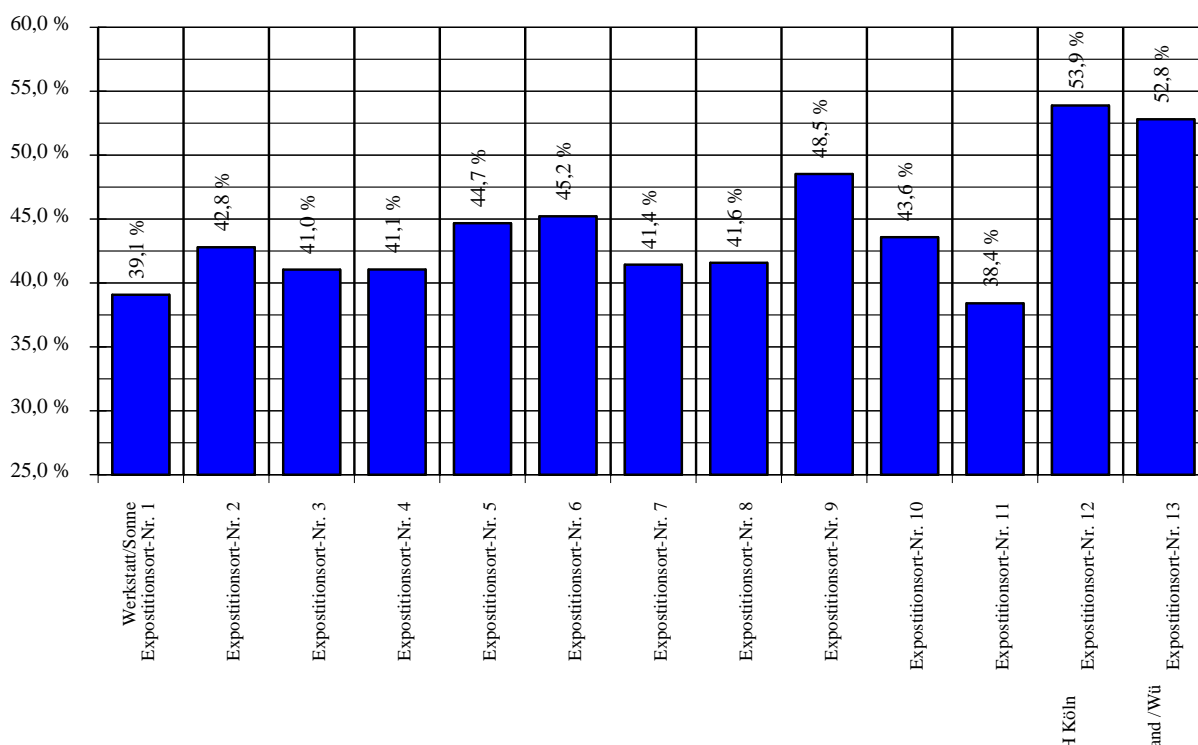
Die hohen  $\Delta E$ -Werte führen zwangsläufig zu der Frage nach Auffälligkeiten bei den weiteren Lagerungsbedingungen. Als wahrscheinlich relativ optimal, auch für die Lagerung von historischen Verglasungen, können ca. 20°C bei 40% relativer Luftfeuchte angesehen werden. <sup>5</sup>

Der Vergleich der Durchschnittswerte an den Expositionsorten der Glassensoren zeigt, daß im Sicherungsraum der Dombauhütte in Köln die niedrigste Durchschnittstemperatur im Innenbereich zu verzeichnen war.



### 4.1.3 Umgebungsbedingungen der Glassensoren - Durchschnittliche relative Luftfeuchte

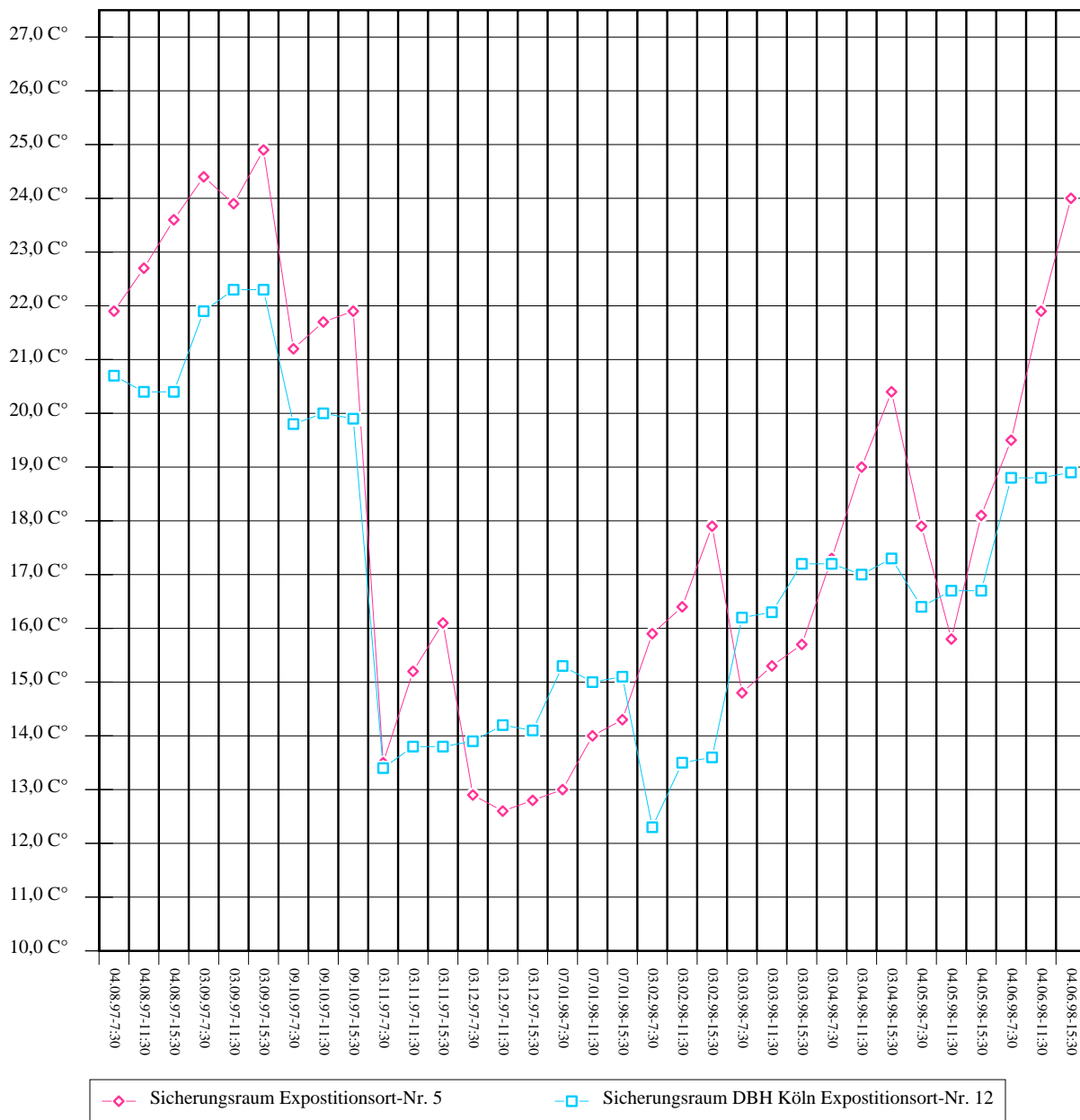
Die durchschnittliche relative Luftfeuchte wies am Expositionsort im Sicherungsraum der Dombauhütte den höchsten Wert auf.



#### 4.1.4 Umgebungsbedingungen der Glassensoren - Verlauf der Temperatur im Sicherungsraum in Köln und im Sicherungsraum in der Werkstatt in Würzburg

Da nicht nur die absolute Höhe der Temperatur und relativen Luftfeuchte bei der Belastung der Glassensoren und historischer Gläser eine Rolle spielt, sondern auch der Stress, welcher durch häufige Wechsel dieser Faktoren verursacht wird, soll nachfolgend deren Verlauf betrachtet werden.

Hier als Vergleichswert parallel dazu der Verlauf der Temperatur im Sicherungsraum in Würzburg.



Hierbei fällt auf, daß sich beide Temperaturkurven ähnlich verhalten, wobei die min. und max.-Werte in Würzburg (12,6 bis 24,9 °C) stärker differieren als in Köln (12,3 bis 22,3 °C) .

Anzumerken ist jedoch, daß das Meßraster hierbei relativ grob war.



### 4.1.5 Umgebungsbedingungen der Glassensoren - Verlauf der relativen Luftfeuchte im Sicherungsraum in Köln und im Sicherungsraum in der Werkstatt in Würzburg

Auch hier als Vergleichswert parallel dazu der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Sicherungsraum in Würzburg.



Bei der Betrachtung des Verlaufs der relativen Luftfeuchte fallen zuerst die relativ hohen Schwankungen innerhalb eines Tages im Sicherungsraum in der Werkstatt in Würzburg auf.

Der Grund hierfür liegt wohl darin, daß der relativ kleine Raum (ca. 1,32 m<sup>3</sup>) mit einer relativ großen Tür (ca. 1,1 m<sup>2</sup>) nicht begehbar ist und allein durch den Meßvorgang eine teilweise Durchmischung der Raumluft mit der Aussenluft vorliegen könnte, da der Zugang zum Sicherungsraum ca. 3 Meter von einem ca. 8 m<sup>2</sup> großem Aussentor entfernt liegt.

Hier sollten die Werte des Raumes ggf. mit einer kontinuierlichen Meßmethode bei geschlossener Tür erfaßt werden.

Der Verlauf der Meßwerte in Köln zeigt innerhalb der täglich gemessenen Werte relativ kleine Schwankungen. Jedoch ändert sich die Luftfeuchte insgesamt stärker. Der höchste gemessene Wert betrug 67,5%, der kleinste 36,0% relative Luftfeuchte, die Schwankung betrug also 31,5%.

Vergleicht man hierzu die Würzburger Werte so ergibt sich eine maximal gemessene Luftfeuchte von 58,0% und eine minimale Luftfeuchte von 31,6%, die Schwankung betrug 26,4%.

Zur Lage des Sicherungsraumes in Köln sollte noch ergänzt werden, daß dieser Raum an die Aussenwand des Domes angebaut ist und durch den Dom betreten wird. Von der Aussenatmosphäre ist dieser Raum durch die Türen des Domes, einer ersten in einen Vorraum, einer zweiten Tür in einen vorgelagerten Raum und schließlich der dritten, eigentlichen Zugangstür getrennt. Somit sind Schwankungen der Messergebnisse durch das Öffnen der Türen sicherlich geringer als in Würzburg.

Der Raum selber ist ca. 105 m<sup>3</sup> gross. Eine "Aussenwand" wird durch die Aussenmauer des Domes gebildet. Im Raum lagern neben Glasmalereien weitere Kunstgegenstände aus unterschiedlichen Materialien.

#### 4.1.6 Erkenntnisse der mikroskopischen Untersuchung

Die mikroskopischen Untersuchungen wurden mit einem Lichtmikroskop (Leitz DM RX/E) des Fraunhofer-Instituts für Silikatforschung ISC, Abtl. Kulturgüterschutz in Bronbach bei Wertheim durchgeführt.

Neben Rückschlüssen auf den Zustand der für die Korrosion von Glas wichtigen Gelschicht, sind auch Aussagen über den Grad der Verschmutzung, Kristallbildung, den Zustand der Kristalle und eventuell Mikroorganismen möglich.

Die nachfolgenden Abbildungen sind wie folgt sortiert:

- Linke Spalte Sensor A am jeweiligen Expositionsort, rechte Spalte Sensor B.
- Erste Zeile Abbildung nach erster Messung,
- zweite Zeile Abbildung nach zweiter Messung,
- dritte Zeile Abbildung nach Schlußmessung.
- Ergänzende Abbildungen sind auf Folgeseiten in der gleichen Zeile der "a"-Abbildung mit b, c usw. gekennzeichnet, beigefügt.

*Die Abbildungen liegen noch nicht gescannt vor und sind deshalb hier nicht zu finden.*

Abbildung 1  
Sensor-Nr. 2 A - 7.971.971 - Standort: Werkstatt/ Schatten  
Datum: 15.05.1997 - Vergrößerung: 100 fach  
Zustand vor Expositionsbeginn.

Abbildung 2  
Sensor-Nr. 1 A - 7.972.101 - Standort: Farblageraum  
Datum: 15.05.1997 - Vergrößerung: 100 fach  
Zustand vor Expositionsbeginn.

## 5. Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Der Ablauf der Arbeit

Trotz umfangreicher Aufklärungs-, Sicherungs- und Kennzeichnungsmaßnahmen der Standorte der Glassensoren gingen innerhalb der eineinhalb Jahre leider zwei Sensorpaare komplett durch mechanische Einflüsse verloren.

Ein Sensorpaar wurde fast durch eine übereifrige Reinigungskraft "auf Hochglanz poliert".

Verschiedene innerbetriebliche Vorgänge (z.B. Anlieferungen großer Mengen Glas) verhinderten einige Male die Erfassung aller o.g. Parameter an einem Tag, da nicht alle Sensoren zugänglich waren. Die Daten wurden auf die Tage datiert, an denen die anderen Werte erfaßt wurden, da hierdurch keine überragend andere Aussage der Arbeit zu erwarten war.

### 5.2 Mikroskopische Untersuchungen

Bei der Betrachtung der Videoprints von den Glassensoren die in Innenräumen exponiert waren, wird deutlich, daß allein die Beurteilung der Lagerbedingungen und Schäden durch die Analyse der Glassensoren mittels IR-Spektroskopie kein vollständiges Bild bietet.

So fallen bei einigen Glassensoren feine Schmutzpartikel und Stäube auf (z.B. Werkstatt Sonne 7.971.951 & 7.971.961, Werkstatt Schatten 7.971.971 & 7.971.981, Belichtungsraum 7.972.071 & 7.972.081).

Bei einigen Glassensoren war eine vereinzelte bis stärkere Kristallbildung zu beobachten (Sicherungsraum 7.972.031 & 7.972.041, Farblageraum 7.972.091 & 7.972.101, Sicherungsraum der DBH in Köln 7.972.191 & 7.972.201).

Auch Spuren und Fäden, die eventuell auf Mikroorganismen hinweisen, waren auf den Glassensoren zu finden (Schlosserei 7.972.141, Büro 7.972.151 & 7.972.161).

Ein ausgeprägtes Reißnetz war lediglich in der Gelschicht der Sensoren 7.971.991 & 7.972.001, welche in unmittelbarer Nähe zum Glasätzen exponiert waren, festzustellen.

Nachfolgend die tabellarische Zusammenfassung der mikroskopischen Beobachtungen:

	kein Reißnetz der Gelschicht	beginnendes Reißnetz	ausgeprägtes Reißnetz	Korrosionsprodukte	feuchte Kristalle	leichte Schmutzablagerung	Schmutzablagerung	starke Schmutzablagerung	Spuren von Mikroorganismen, organische Rückstände
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 A - 7.971.951	•			•		•		•R	
Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 B - 7.971.961	•			•				•	
Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 A - 7.971.971	•							•R	
Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 B - 7.971.981	•			•		•			
Glasätzen Sensor-Nr. 3 A - 7.971.991		•		•	•		•		
Glasätzen Sensor-Nr. 3 B - 7.972.001		•		•			•		

	kein Rißnetz der Gelschicht	beginnendes Rißnetz	ausgeprägtes Rißnetz	Kristalle	feuchte Kristalle	leichte Schmutz- ablagerung	Schmutz- ablagerung	starke Schmutz- ablagerung	Spuren von Mikroorganismen, organische Rückstände
Brennofen Sensor-Nr. 4 A - 7.972.011	•			•			•		
Brennofen Sensor-Nr. 4 B - 7.972.021	•						•		
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 A - 7.972.031	•				•			•	
Sicherungsraum Sensor-Nr. 5 B - 7.972.041	•				•				
Sandstrahlen/putzen Sensor-Nr. 6 A - 7.972.051		Verlust							
Sandstrahlen/putzen Sensor-Nr. 6 B - 7.972.061		Verlust							
Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 A - 7.972.071	•				•				
Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 B - 7.972.081	•				•	•R			
Farblagerraum Sensor-Nr. 8 A - 7.972.091	•				•	•			
Farblagerraum Sensor-Nr. 8 B - 7.972.101	•				•	•			
Glasschleifen Sensor-Nr. 9 A - 7.972.111		Verlust							
Glasschleifen Sensor-Nr. 9 B - 7.972.121		Verlust							
Schlosserei Sensor-Nr. 10 A - 7.972.131	•				•		•		
Schlosserei Sensor-Nr. 10 B - 7.972.141	•				•	•			•
Büro Sensor-Nr. 11 A - 7.972.151	•				•	•			•
Büro Sensor-Nr. 11 B - 7.972.161	•				•	•			•
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 A - 7.972.191	•				•	•			
Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 B - 7.972.201	•				•	•			
Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 A - 7.972.171	•			•					• Abbildung 71a
Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 B - 7.972.181	•			•	•				•

### 5.3 $\Delta E$ -Werte der Glassensoren in den Sicherungsräumen

Das allein die Schwankungen der relativen Luftfeuchte und Temperatur bzw. die Höhe der relativen Luftfeuchte für die im Rahmen dieser Arbeit festgestellten, hohen  $\Delta E$ -Werte, der Glassensoren im Sicherungsraum der Dombauhütte in Köln verantwortlich sind, scheint fraglich.

Vielmehr deuten die drastisch hohen  $\Delta E$ -Werte der Glassensoren (Sicherungsraum DBH Köln Sensor-Nr. 12 A - 7.972.191 und Sensor-Nr. 12 B -7.972.201) auf eine zusätzliche Belastung mit Schadstoffen des Sicherungsraumes in Köln hin.

Untermauert wird diese Vermutung durch die Tatsache, daß die  $\Delta E$ -Werte der Vergleichsensoren in der Freilandbewitterung (Referenzsensor Freiland / Wü Sensor-Nr. 13 A - 7.972.171 und Sensor-Nr. 13 B -7.972.181) trotz eines höheren Streßes durch Temperatur-, Luftfeuchteschwankungen und sicherlich vorhandener Luftschadstoffe, einen niedrigeren  $\Delta E$ -Wert als die Sensoren im Sicherungsraum der Dombauhütte in Köln aufweisen.

Deshalb sollten noch weitergehende Untersuchungen, z.B. zur Überprüfung spezieller Schadstoffe, etwa Formaldehyd, im Sicherungsraum der Dombauhütte in Köln vorgenommen werden.

Darüberhinaus sollten in Lagerräumen die Umgebungsbedingungen kontinuierlich erfaßt werden und ggf. Maßnahmen zur Steuerung der relativen Luftfeuchte und Temperatur ergriffen werden.

### 5.4 Erkenntnisse der Studie für die Lagerung historischer Glasmalereien in Werkstätten

Es ist meiner Ansicht nach nicht möglich, ohne objektive Werte, wie z.B. durch eine Glassensorstudie, die wirkliche Umweltbelastung von in Werkstätten gelagerten historischen Verglasungen einzuschätzen.

Selbst innerhalb ähnlich aufgebauter Räume, ohne sofort augenscheinliche Umweltbelastungen, können erheblich unterschiedliche Ergebnisse vorliegen.

Deshalb können die Ergebnisse dieser Studie über die Belastungen an speziellen Orten oder in Räumen mit besonderen Fertigungstechniken nicht auf andere Räume und Werkstätten übertragen werden. Individuelle Belastung, z.B. durch die Bausubstanz, Luftfeuchteschwankungen u.a. sind zu unterschiedlich.

Werkstätten, welche historische Glasmalereien längere Zeit bei sich lagern müssen, sollten, neben den bereits üblichen Versicherungen für unmittelbare materielle Schäden z.B. durch Diebstahl, mit einer Orientierungsstudie ihre Werkstatt- oder Sicherungsräume prüfen lassen um so auch gegen "indirekte Schäden" Maßnahmen treffen zu können.

#### Rückschlüsse für die Praxis

Folgende Umgebungsvoraussetzungen sollten bei der Lagerung von historischen Glasmalereien vorliegen:

##### 1) Schadstoffarme Atmosphäre

In Lagerraum und in den angrenzenden Räumen sollten möglichst keine Schadstoffe freigesetzt werden.

##### 2) Steuerbare relative Luftfeuchte und Temperatur

Im Lagerraum sollten möglichst geringe Schwankungen der relativen Luftfeuchte und Temperatur auftreten.

In Frage kommen besonders Räume im Inneren eines Gebäudes. Diese Lagerräume sollten nicht an Räume angrenzen in denen z.B. der Glasbrennofen oder die Heizungsanlage steht.

Im bestmöglichen Fall sollten die Klimabedingungen steuerbar sein.

- 3) **Staubarme, wasserfreie Atmosphäre**  
Auch in den an den Lagerraum grenzenden Räumen sollten möglichst keine Stäube und Wassernebel (Sandstrahlen, Metallverarbeitung, Glasschleifen) freigesetzt werden.
- 4) **Keinen Arbeitsraum als Lagerraum auswählen**  
Der Lagerraum sollte möglichst keinen Publikumsverkehr haben und nur als Archiv dienen.
- 5) **Sicherer Raumabschluß**  
Mit feuer- und einbruchhemmenden Türen und ggf. Fenster sollte der Raum schon aus versicherungsrechtlichen Gründen ausgestattet sein.
- 6) **"Alter" Raum**  
Der Lagerraum sollte nicht frisch gestrichen sein, die Lagerungsmöglichkeiten sollten schadstofffrei bzw. ausgedünstet sein. Hierbei ist insbesondere auf schadstofffreie Baustoffe, wie Holz- und Wandverkleidungen zu achten.
- 7) **Liegende Lagerung**  
Die historischen Glasmalereien sollten als Schutz vor mechanischer Beschädigung möglichst einzeln, liegend in Schubladen gelagert werden.
- 8) **Untersuchung der Umweltbedingungen**  
Der Umstand, daß in einem Raum, in welchem historische, wenn auch nicht besonders korrosionsanfällige, Glasmalereien gelagert wurden, erhöhte Korrosion an Glassensoren des empfindlichsten Typs M 1.0 festgestellt wurden, verdeutlicht wie wichtig die individuelle Untersuchung von Depot- und Sicherungsräumen für Glasmalereien auf mögliche korrosiven Belastungen, sind.

## 6. Zusammenfassung

Ziel dieser Studienarbeit war es, die Umweltbedingungen in einer Glasrestaurierungswerkstatt zu erfassen, um die Gefährdung der dort zum Zwecke der Restaurierung eingelagerten Glasmalereien beurteilen zu können.

Es wurden verschiedene Räume ausgewählt, in denen Glasmalereien bearbeitet oder gelagert werden.

In diesen Räumen wurden Glassensoren exponiert, an denen die korrosive Wirkung der dort herrschenden Umweltbedingungen festgestellt werden sollte.

An diesen Glassensoren wurden das erste und zweite Mal nach je 20 Wochen Expositionszeit und zur Schlußbewertung nach nochmals 15 Wochen Expositionszeit Messungen der OH-Bande mittels IR-Spektroskopie sowie mikroskopische Untersuchungen vorgenommen. Die Schlußbewertung erfolgte also nach knapp einem Jahr Expositionszeit, um einen gesamten Jahreszyklus (inkl. der Heizperiode) zu erfassen.

Zusätzlich wurde parallel die Temperatur und relative Luftfeuchte an den jeweiligen Standorten der Glassensoren erfaßt.

Die höchsten  $\Delta E$ -Werte wurden beim Glasätzen gemessen (Sensor-Nr.: 3 A - 7.971.991 & 3 B - 7.972.001).

Die hohen  $\Delta E$ -Werte der Sensoren beim Glasätzen lassen sich durch die massive Wirkung der stark glasätzenden Flußsäure (HF) erklären.

Die HF wirkt in Verbindung mit dem Feuchtfilm auf der Glasoberfläche der Sensoren, ähnlich der Wirkung von  $\text{SO}_2$  als Luftschadstoff, welcher sich mit dem Feuchtfilm auf Glas zu  $\text{H}_2\text{SO}_3$  wandelt. Somit werden die klassischen Korrosionsmechanismen der Auslaugung in Gang gesetzt. Unter Extrembedingungen kann dieser HF-Film das Sensorglas sogar "anätzen".

Deutlich niedrigere  $\Delta E$ -Werte zeigen die Glassensoren der Freilandbewitterung in Würzburg (Sensor-Nr.: 13 A - 7.972.171 und 13 B -7.972.181).

Die  $\Delta E$ -Werte der Glassensoren im Sicherungsraum der DBH in Köln (Sensor-Nr.: 7.972.191 & 7.972.201) waren sogar deutlich höher als die der Glassensoren in Freilandbewitterung.

Die  $\Delta E$ -Werte der in Köln und Würzburg exponierten Glassensoren (Sensor-Nr. 7.972.191 & 7.972.201) zeigen erhebliche Unterschiede. Da die  $\Delta E$ -Werte im Sicherungsraum der Würzburger Werkstatt geringer sind als im Depot des Kölner Domes, ist dieser Raum für die Aufbewahrung von Kunstgut offensichtlich besser geeignet. Auch die parallel durchgeführten Klimamessungen zur relativen Luftfeuchte erwiesen in Köln gegenüber Würzburg eine höhere Belastung durch Feuchteschwankungen. Ob der damit verbundene Streß allein die 5,6 fach höheren Sensorwerte in Köln bewirkt hat, oder ob weitere Ursachen, z.B. spezifische Schadstoffe wie Formaldehyd, dafür verantwortlich sind, müßte genauer untersucht werden.

Die  $\Delta E$ -Werte der anderen untersuchten Räume (ohne signifikanten Streßfaktoren wie z.B. Flußsäure, hohe Temperatur- und Feuchtewechsel in der Nähe des Brennofens) unterschieden sich nur relativ gering voneinander. 6

Die Studie belegt, daß es wichtig ist, die Klimasituation von Lagerräumen, in denen Glasmalereien oder andere Kulturgüter - oftmals für lange Zeit - aufbewahrt werden, gründlich zu überprüfen.

## 7. Abkürzungen:

DBH	Dombauhütte
fK	feuchte Kristalle
fT	feuchte Tröpfchen
KP	Korrosionsprodukte
Krist.	Kristalle
Rn	Rissnetz
Rb	Randbereich
Sp	Schmutzpartikel



## 8. Literatur - Nebenbemerkung:

- 1 "Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien; Depositionsratenmeßsysteme zur Bewertung der Immissionsbelastung in Aussenschutzverglasungen", Ergebnisse eines Forschungsverbundprojektes, gefördert vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Dirk Kirchner und Stefan Brüggerhoff, Zollern-Institut beim Deutschen Bergbau-Museum, Bochum.
- 2 "Glassensoren erfassen das Schadensrisiko an Kunstobjekten", Dieter R. Fuchs, Johanna Leißner, Restauro 3/95.
- 3 "Glassensoren Ein neues Konzept zum Nachweis korrosiver Belastungen", Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, Broschüre des FhG/ISC.
- 4 "Glassensorstudie zur Abschätzung der korrosiven Verhältnisse an Kirchenfenstern mit Außenschutzverglasungen", Dieter R. Fuchs, Johanna Leißner, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. BAU 5026 C/4 "Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien" im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie für die Projektlaufzeit vom 01.11.1989 bis 31.08.1996.
- 5 "Proceedings of the International Congress on Glass, San Francisco (1998); "Sick"-Glasses - a case for the Veste Coburg", Clementine Schack von Wittenau, Kunstsammlungen der Veste Coburg, D-96450 Coburg.

... The case design was conceived as a so-called tandem-system, in which a saturated magnesium-chlorid solution conditions silica gel in form of an absorption layer, resulting in the desired constant relative humidity level of 37 to 42 % (fig. 13). The system of the case is based on the understanding that the salt solution guarantees the desired relative humidity level. ...

... Small monitors installed in each case observe that the relative humidity level of 37 to 42% is maintained (fig. 15). At the Collections of the Veste Coburg these data are decisively based on Ullitzka's and Steger's investigations although we are aware that Robert Brill has recommended higher levels in the 1970s. ...

Zwar ist die Übertragbarkeit dieser Daten auf die anderen historischen Gläser im Bereich z.B. der Kirchenfenstern zu hinterfragen. Hierfür gibt es jedoch bisher, meines Wissens, keine weiteren Untersuchungen zum Thema "optimale Lagerungsbedingungen für historische Glasmalereien".

- (6) Andererseits zeigen die Daten dieser Studie, daß alle Sensoren, die keinen signifikanten Streßfaktoren wie z.B. Flußsäure, hohe Temperatur- und Feuchtwchsel in der Nähe des Berennofens usw. ausgesetzt waren, eine Durchschnittstemperatur zwischen 20,5 und 21,6°C (Werkstatt/ Sonne Sensor-Nr. 1 A - 7.971.951 und 1 B - 7.971.961, Werkstatt/ Schatten Sensor-Nr. 2 A - 7.971.971 und 2 B - 7.971.981, Belichtungsraum Sensor-Nr. 7 A - 7.972.071 sowie 7 B - 7.972.081) und eine durchschnittlichen, relativen Luftfeuchte zwischen 31,9 und 42,8 % zu verzeichnen hatten, auch mit die niedrigsten  $\Delta E$ -Werte aufwiesen (in Folge der Sensor-Nr.: 0,014/0,016/0,017/0,017/0,019/0,017).

Vielleicht kann eine spätere Studie einmal die Frage nach den optimalen klimatischen Umgebungsbedingungen für Glasmalereien näher untersuchen.

## 9. Danksagungen:

Neben Frau Dr. Hannelore Römich, Kathrin Bracken, Carola Müller-Weinitschke, möchte ich allen an der Umsetzung dieses Seminars beteiligten Mitarbeiter der Dom-bauhütten in Erfurt und Köln, den Mitarbeitern des Fraunhofer-Institut für Silicat-forschung (ISC), Gruppe Kulturgüterschutz, Aussenstelle Bronnbach sowie sämtlichen externen Referenten für ihre Vorträge, Unterstützung, Geduld und Mühen danken.

Mein Dank gilt meinen Eltern und auch den Mitarbeitern unserer Glaswerkstätte, insbesondere Frau Ruppert, für die Unterstützung und Rücksichtnahme während der Durchführung dieser Arbeit.

Meiner Frau und meinen Kindern danke ich, daß sie wieder einmal "ohne Klagen" etliche Abende und Wochenenden auf mich verzichtet haben.