

F 3004

Daniel Heite, Johannes Ingrisch

Transparente Schutzhüllen – Konzeptionelle Entwicklung eines Einhausungssystems unter Verwendung von transparenten Membranen mit kontrollierter Belüftung zur optimierten winterlichen Einhausung von außenexponierten Kulturgütern

> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

### F 3004

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-8167-9953-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung, Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht STB-005/062/2016

# "Transparente Schutzhüllen" Konzeptionelle Entwicklung eines Einhausungssystems unter Verwendung von transparenten Membranen mit kontrollierter Belüftung zur optimierten winterlichen Einhausung von außenexponierten Kulturgütern

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

BBSR

Frau Inken Pfrengle Deichmanns Aue 31 53179 Bonn

Der Bericht umfasst 53 Seiten Text 8 Tabellen 36 Bilder Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Valley, 8. November 2016

Stellv. Institutsleiter

M. Thurez

Dr. Klaus Breuer

Gruppenleiter

M.Eng. Andreas Kaufmann

Bearbeiter

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Heite

Dipl.-Ing lohannes Ingrisch

Fraunhofer-Institut für Bauphysik Nobelstraße 12 · D-70569 Stuttgart Telefon +49 (0) 711/970-00 Telefax +49 (0) 711/970-3395 www.ibp.fraunhofer.de

Institutsteil Holzkirchen Fraunhoferstr. 10 · D-83626 Valley Telefon +49 (0) 8024/643-0 Telefax +49 (0) 8024/643-366

Projektgruppe Kassel Gottschalkstr. 28a · D-34127 Kassel Telefon +49 (0) 561/804-1870 Telefax +49 (0) 561/804-3187

## Inhalt

| 1   | Einführung und Problemstellung  | 3   |
|---|---|---|
| 2   | Zielstellung  | 5   |
| <b>3</b><br>3.1<br>3.2  | <b>Stand der Technik</b><br>Derzeit übliche Schutzeinhausungen für Kulturgüter<br>Vorausgehende Forschungsarbeiten  | <b>5</b><br>6<br>8  |
| <b>4</b><br>4.1<br>4.1.1<br>4.1.2<br>4.2<br>4.3<br>4.4<br>4.5<br>4.5.1<br>4.5.2<br>4.5.3<br>4.5.4 | Material und Methoden<br>Konstruktion der Versuchseinhausungen<br>Übersicht über die verwendeten Versuchseinhausungen<br>Ausführungsdetails an den Versuchseinhausungen<br>Testobjekte in den Versuchseinhausungen<br>Messkonzept in den Versuchseinhausungen<br>Versuchsdurchführung<br>Rechnerische Simulation<br>Modellbildung und Simulation<br>Untersuchte Parameter in der Simulation<br>Ergebnisse der Simulationsrechnungen<br>Diskussion der Simulation und Schlussfolgerungen | <ul> <li>9</li> <li>12</li> <li>13</li> <li>14</li> <li>15</li> <li>16</li> <li>18</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>29</li> </ul> |
| <b>5</b><br>5.1<br>5.2<br>5.3<br>5.4<br>5.5<br>5.6<br>5.6.1<br>5.6.2                              | Auswertung der Messergebnisse<br>Temperatur und relative Luftfeuchte<br>Oberflächentemperatur<br>Auswertung der Belüftungsparameter<br>Trocknungsverlauf<br>Visuelle Begutachtung der Testobjekte<br>Diskussion der Messergebnisse<br>Technische Beurteilung der Projektergebnisse<br>Konservatorische Beurteilung des transparenten<br>Einhausungssystems  | <ul> <li><b>33</b></li> <li>40</li> <li>41</li> <li>42</li> <li>43</li> <li>44</li> <li>44</li> <li>45</li> </ul>                 |
| 6   | Zusammenfassung und Ausblick  | 46  |
| 7   | Literaturverzeichnis  | 51  |
| 8   | Anhang  | 52  |

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.11. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

# 1 Einführung und Problemstellung

Das Forschungsvorhaben behandelt die Erstellung und Erprobung eines Konzeptes zum Schutz von außenexponierten Kulturgütern unter Verwendung transparenter Membranmaterialien. Der Schutz von außenexponierten Kulturgütern wie Statuen oder Skulpturen vor jahreszeitlich bedingten schädigenden Einflüssen, stellt ein Thema von grenzüberschreitender Relevanz dar. Außenexponierte Kulturgüter sind einer Reihe von schädigenden Einflüssen ausgesetzt. Zu den häufigsten Schadensmechanismen an Natursteinen gehören:

- Thermische Entfestigung: Entfestigung des Kristallgefüges durch Temperaturänderungen. Besonders gravierend bei Marmoren aufgrund deren Anisotropie.
- Hygrothermische Entfestigung: Entfestigung des Kristallgefüges durch Temperaturänderungen bei gleichzeitigem Vorliegen erhöhter Materialund / oder Luftfeuchte. Durch eine Messreihe am Beispiel von Marmoren konnte der Einfluss der umgebenden Luftfeuchte bei Aufheizzyklen ermittelt werden. Hierbei zeigte sich, dass die Restdehnung und damit die Entfestigung bei hohen Luftfeuchten um das bis zu Vierfache zunimmt (Ruedrich & Rieffel, 2006 - 2010).
- Eiskristallisation im Porenraum bei Frost-Tau-Wechsel: Sprengdruck von in den Poren vorhandenem Wasser beim Wechsel des Aggregatzustandes.
- Organischer Bewuchs: Bakterien, Algen, Pilze, Flechten, Moose.
- Salzkristallisation: Sprengdruck von in die Poren eingedrungenen Salzen bei der Kristallisation.
- Chemische Lösung, z.B. durch Säuren.

Während die hygrothermische Entfestigung zu Beginn der Schädigungshistorie eines Objekts steht, erlangt in fortgeschrittenem Schädigungsstadium die Feuchtigkeit im Porenraum stärkere Bedeutung. Bei langzeitbewitterten Objekten mit bereits vorhandenen Schädigungen, kann die Materialfeuchte und die umgebende Luftfeuchte als entscheidender Einflussfaktor für weitere Schädigungen identifiziert werden (Grimm, 2008). Die Schadensmechanismen variieren in Ihrer Intensität in Abhängigkeit von der Steinsorte, der Massivität der Objektteile, dem Standort und der Vorbelastung. Bisher werden Kulturgüter wie Skulpturen, Brunnen, Wandreliefs und Grabmäler im Winter meist in Holzeinhausungen verborgen, um sie vor Witterungseinflüssen zu schützen. Diese Holzeinhausungen sind aus unterschiedlichen Gründen als nicht optimal zu bewerten:

- Es entsteht unter Umständen ein schädigendes Innenklima, da durch unkontrollierte, nachteilhafte Durchlüftung sowie Diffusion Feuchte eingetragen wird und am Objekt kondensiert.
- Holzeinhausungen sind i.d.R. opak. Daraus folgt, dass die Kulturgüter für das Publikum bzw. den Tourismus in den Wintermonaten nicht sichtbar sind.
- Einhausungen aus Holz werden durch das winterliche Klima ebenso geschädigt. Regelmäßige Instandsetzungen bzw. ein regelmäßiger Austausch der Konstruktionen werden erforderlich.
- Es besteht ein hoher Logistik-, Lager- und Kostenaufwand.

Die Verwendung von Membranen ermöglicht die Herstellung leichter, materialsparender und langlebiger Konstruktionen bei einem hohen Grad an Transparenz. Im Rahmen von Vorüberlegungen und aus Ergebnissen erster Eigenforschung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP) und der Technischen Universität München (TUM) Professur für Gebäudehülle zu transparenten Winterschutzeinhausungen konnten sich vielversprechende Erkenntnisse ableiten lassen, welche eine weitergehende Untersuchung der Potentiale solcher Einhausungen aussichtsreich erscheinen lassen. Die hierbei zu beantwortende Forschungsfrage lässt sich so formulieren: Können transparente Winterschutzeinhausungen bei vorteilhafter Belüftung ein Innenklima befördern, bei welchem die bekannten Schadensmechanismen gegenüber heute gebräuchlichen Einhausungssystemen reduziert werden?

Aufgrund der bisher gesammelten Erkenntnisse wird folgende **Hypothese** aufgestellt:

- Solarer Eintrag führt im Luftvolumen unter der Einhausung zeitweise zu niedrigeren relativen Luftfeuchten, welche dem Objekt Materialfeuchte entziehen.
- Durch kontrollierte Belüftung in Abhängigkeit der Luftfeuchte wird die Materialfeuchte abgeführt. Dadurch entsteht ein höheres Trocknungspotential.
- Durch Unterbinden der Belüftung in ungünstigen Zeiträumen wird Kondensateintrag vermieden.
- Je trockener das Objekt ist, desto geringer ist die Schadenswirkung durch Frost-Tau-Wechsel und die hygrothermische Entfestigung. Außerdem wird die Gefahr von organischem Bewuchs und Schimmel reduziert.

Laut der Hypothese sind transparente Einhausungssysteme somit in der Lage, einen Großteil der Schadensmechanismen an außenexponierten Natursteinen gänzlich zu verhindern oder zumindest zu verringern.

# 2 Zielstellung

Zielstellung dieses Projekts ist die Entwicklung, Erprobung und Evaluierung eines Einhausungssystems unter Verwendung von transparenten Membranen zur winterlichen Einhausung von Kulturgütern mit folgenden Ansprüchen:

- maximale Transparenz zum Erhalt der Objektwirkung.
- Gewährleistung eines optimierten bauphysikalischen Innenklimas zum Schutz des Objekts unter Ausnutzung physikalischer Effekte für die Belüftung.
- Die Regulierung der vorteilhaften Belüftung soll nach Möglichkeit intrinsisch oder durch autoreaktive Aktoren erfolgen, im Rahmen dieser Messkampagne soll vorerst konventionelle Sensorik / Aktorik zum Einsatz kommen.

Anhand einer Simulation und einer Messkampagne wird die neu zu entwickelnde transparente Einhausung im Vergleich mit einer konventionellen Holzeinhausung evaluiert und hierbei die aufgestellte Hypothese überprüft.

### 3 Stand der Technik

Man nimmt an, dass Schutzeinhausungen für Parkfiguren und Skulpturen seit dem 19. Jahrhundert in Europa Verwendung finden (Ruedrich & Rieffel, 2006 - 2010). Bei den geschützten Objekten handelt es sich um Parkskulpturen, Brunnen oder Wandreliefs an Mauern oder Gebäuden.

Die geschützten Objekte haben i.d.R. einen hohen künstlerischen und/oder kunsthistorischen Wert und sind Bestandteil von außenräumlichen Gesamtanlagen oder Stadträumen. Sie erfahren einen hohen Grad an öffentlicher Wahrnehmung und entfalten damit Identifikationswirkung. Bisweilen muss der Erhalt der Werke auch gesichert sein z.B. aufgrund von Denkmalschutzanforderungen.

Die Anzahl der Objekte, welche über die Wintermonate in Europa eingehaust werden, ist nicht eindeutig zu beziffern, da die Zahlen von lokalen oder regionalen Verwaltungen bisher nicht erhoben und zusammengeführt wurden. Aus Informationen und den Aussagen erfahrener Fachleute kann man in Europa jedoch von mehreren Tausend Objekten ausgehen, welche jeden Winter in situ durch Einhausungen oder Einhüllungen geschützt werden. Rieffel spricht von einem Anteil von weniger als 5 % aller Parkskulpturen, bei welchen regelmäßig Schutzmaßnahmen angewandt werden (Ruedrich & Rieffel, 2006 - 2010).

Otto Wölbert verzeichnet seit den 1970er Jahren einen Trend, auf Winterschutzeinhausungen zu verzichten und nennt als Gründe die Kosten für den Aufwand als auch den touristischen Aspekt der ganzjährigen Sichtbarkeit (Wölbert, 2005). In den letzten Jahren ist ein weiterer Trend hin zu transparenten Einhausungen zu beobachten, insbesondere bei touristisch bedeutsamen Objekten wie Brunnen auf Stadtplätzen. Beispiele hierfür sind der Schöne Brunnen am Königsplatz in Schwabach (ca. 2009), der Brunnen am Kornsteinplatz in Hallein, Österreich (2015), zwei Figureneinhausungen in Iphofen (2005) sowie der Marienbrunnen in Altötting (2015). Gemeinden sind durchaus bereit, für eine gut gestaltete Einhausung hohe Kosten zu tragen. So beliefen sich die Kosten laut Auskunft der Gemeinden in Altötting auf 162.000 € (Alt-Neuöttinger Anzeiger, 2015), in Schwabach auf 128.000 €. Allen diesen Beispielen ist jedoch gemeinsam, dass sie ohne kontrollierte Belüftung arbeiten.

#### 3.1 Derzeit übliche Schutzeinhausungen für Kulturgüter

Zum heutigen Zeitpunkt finden sich unterschiedliche Winterschutzsysteme, bei denen grundsätzlich zwischen zwei Prinzipien der Schutzhülle unterschieden werden kann:

- <u>Einhausungen</u>, welche das Objekt mit einer i. d. R. statisch unabhängigen und freistehenden Konstruktion wie ein "Gebäude" umgeben und einen bedeutenden Luftanteil im Inneren aufweisen, sowie
- <u>Einhüllungen</u>, welche an die Objektform angepasst sind und deren Innenoberfläche die Objektkonturen mit sehr geringer oder keiner dazwischen liegender Luftschicht umgibt. Hierbei erfolgt die Lastabtragung über die Skulptur selbst.

In Bezug auf Material und Konstruktionsart können die Schutzhüllen weiter untergliedert werden:

<u>Einhausungen mit holzverschalten Rahmen:</u> (Bild 1) Diese älteste Art der Winterschutzeinhausung ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt und stellt den häufigsten Typ der Einhausung dar. Die Erscheinungsformen reichen von einfachen, rechteckigen Verschlägen für Parkskulpturen bis zu komplexen, vielflächigen Sondergeometrien. In der Regel handelt es sich um holzverschalte Rahmen. Diese Konstruktionen werden über Fugenundichtigkeiten oder dafür vorgesehene Öffnungen unkontrolliert durchlüftet. Die Holzkonstruktionen sind robust und langlebig, jedoch schwer, zudem benötigen sie viel Transport- und Lagervolumen.



#### Bild 1:

Holzeinhausung im Schlosspark Nymphenburg. (Foto: TUM, Milos Vlastic).

- <u>Einhausungen mit opaken Folien oder Textilien auf einem Tragskelett:</u> Seit einigen Jahren werden vereinzelt Skelettkonstruktionen eingesetzt, welche dann mit Membranen ausgefacht oder umgeben werden. Die Skelettkonstruktionen bestehen zumeist aus Metall oder Holz, die Ausfachungen i.d.R. aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe. Vorteilhaft sind hierbei die geringen Einzelteilgewichte sowie das geringe Lagervolumen.
- <u>Einhausungen mit Glas oder transparenten Kunststoffen (selten)</u>: Diese Art der Einhausung findet sich bei Objekten in stark tourismusfrequentierten Stadträumen, z.B. Salzburg, wo der Sichtbarkeit des Objekts hohe Bedeutung zukommt. Die Verglasung wird hierbei entweder analog zum Fensterbau oder mit Pressleistenprofilen auf stabilen Rahmenkonstruktionen befestigt. Die Konstruktionen sind sehr schwer, kostenintensiv, aufwendig im Auf- und Abbau sowie anfällig für Bruch (Glas) oder Verkratzen (z.B. Acrylglas).
- <u>Einhüllungen mit opaken Folien oder Textilien (z.B. Art Coat®)</u>: Bei den zum Einsatz kommenden Membranstoffen handelt es sich um Polyestergewebe mit Teflon-Beschichtung (System Art Coat® www.artcoat.at) oder um Polyethylengewebe (Tyvek®). Bei dem System Art Coat® wird das Objekt vorab mit Schaumstoffschläuchen umgeben, um die Konturen zu egalisieren und ein Anliegen der Membran auf dem Objekt zu vermeiden. Die Vorteile dieser Systeme sind der rasche Auf- und Abbau, das geringe Gewicht und das geringe Lagervolumen bei konkurrenzfähigen Anschaffungskosten. Jedoch weisen diese direkten Einhüllungen auch Nachteile auf: Sehr filigran gearbeitete Figuren können aufgrund von Beschädigungsgefahr nicht umhüllt werden. Die Hülle vergrößert die Windangriffsfläche, ohne die Lastabtragung zu verbessern.

Im Gespräch mit der Firma Embacher/Wien, welche das System Art Coat<sup>®</sup> vertreibt, wurde auf die Unzulänglichkeiten des Innenklimas hingewiesen, welches trotz Belüftungsöffnungen keine ausreichende Abfuhr der Luftfeuchte sicherstellt, weswegen es bereits zu Eisbildung im Inneren gekom-

men ist. Nach mehrjährigem Einsatz im Schlosspark Schönbrunn wurde das System dort 2013 ausgemustert.

<u>Einhüllungen mit gedämmter Kunststoff-Passform (Ciccum<sup>®</sup>):</u> Das System Ciccum<sup>®</sup> (www.ciccum.de) wurde von der Restaurationsfirma Nuethen entwickelt und zielt gegenüber den anderen Systemen neben dem Witterungsschutz zusätzlich auf eine Dämpfung der Temperaturschwankungen durch eine Dämmschicht ab. Jede Ciccum<sup>®</sup>-Schutzhülle wird objektbezogen gefertigt: In situ wird das Objekt geschützt, mit Ton überformt (diese Schicht, etwa 3-4 cm, entspricht später der Luftschicht zwischen Objekt und Innenoberfläche), anschließend mit PU-Schaum umgeben und mit einer Schicht aus glasfaserverstärktem Kunststoff umgeben. Hierbei werden mehrere Teilschalen hergestellt, welche dann um das Objekt positioniert und untereinander verbunden werden. Die Lastabtragung erfolgt über das Objekt. Zur Belüftung sind im oberen und unteren Bereich Rohre eingefügt. Das System kostet im Vergleich etwa das drei- bis vierfache einer Holzeinhausung oder Membraneinhüllung und ist damit verhältnismäßig teuer.

Grundsätzlich gibt es im Rahmen der präventiven Konservierungsmaßnahmen auch Alternativen zur Winterschutzeinhausung:

- Beschichtungen (z.B. bei nicht freistehenden Objekten wie Wandreliefs an Gebäuden oder bei Balustraden etc.)
- Austausch durch Kopie, Original in ein Lapidarium oder Museum (bei besonders wertvollen Objekten)

#### 3.2 Vorausgehende Forschungsarbeiten

Mit dem Thema Winterschutzeinhausungen haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten mehrere Forschungsprojekte beschäftigt:

- <u>"Winterzelt", Labor Blum, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung</u> <u>Umwelt (DBU), 1997 – 2003:</u> Ziel dieses Projekts war die Untersuchung der seinerzeit neuartigen Anwendung von Membranen als Einhausungsmaterial und ein wissenschaftlicher Vergleich mit herkömmlichen Holzeinhausungen. Ziel war die Verwendung von leichteren Materialien, jedoch wurden keine transparenten Folien verwendet. Die Arbeit weist insbesondere auf das Thema der Standsicherheit hin.
- <u>"Entwicklung und Überprüfung von Einhausungssystemen zur Reduzierung umweltbedingter Schädigungen von außenexponierten Marmorobjekten mit dem Ziel des langfristigen Erhalts in situ an einem national bedeutenden Objektkomplex, den Schlossbrückenfiguren Unter Den Linden, Berlin", LDA Berlin, Haspel, J., Rieffel, Y. et al., gefördert durch die DBU, 2006 2010. Dieses sehr umfangreiche Forschungsprojekt beschäftigt sich mit einem sehr spezifischen Gegenstand, liefert jedoch in vielerlei Hinsicht übertragbare Erkenntnisse zu Schadensursachen und Schutzzielen von Einhausungen.
  </u>
- <u>"Wintereinhausungen", Franzen, C., gefördert durch die DBU, 2012 2016</u> (voraus.): Dieses aktuell noch laufende Forschungsprojekt untersucht die drei Einhausungssysteme Holzeinhausung, ArtCoat und Ciccum durch Simulation und Testaufbau in Bezug auf ihre bauphysikalischen Eigenschaften und ihre konservatorische Wirksamkeit. Bei Projektabschluss sollen eine Evaluierung

der Systeme und ein Leitfaden für die Handelnden vorliegen. Vorläufige Ergebnisse der Messung und Simulation wurden bereits bei einer Projekttagung am 9.9.2015 in Dresden bekanntgegeben und diskutiert. Bei den bisherigen Messungen zeichnete sich ab, dass die Innenklimata der betrachteten Einhausungen bzw. Einhüllungen über die gesamte Messperiode eine extrem hohe relative Luftfeuchte aufwiesen, was einerseits der Tatsache geschuldet ist, dass Steinobjekte i .d. R. zum Zeitpunkt der Einhausung eine hohe Materialfeuchte aufweisen, andererseits am geringen Luftwechsel und Trocknungspotential der betrachteten Systeme liegt. Es zeigt sich dabei ein Widerspruch zwischen dem Ziel der Feuchteabfuhr, die einen hohen Luftwechsel erfordert und dem Ziel der Temperaturamplitudendämpfung, welche durch hohen Luftwechsel reduziert wird. Zum Zeitpunkt der Tagung stand noch eine weitere Messperiode aus.

### 4 Material und Methoden

#### 4.1 Konstruktion der Versuchseinhausungen

#### Lastabtragung

Grundfrage bei der Konstruktion einer transparenten Schutzeinhausung unter Verwendung von Membranen ist, wie über die Membrane, die nur Zugkräfte aufnimmt, die Lastabtragung, insbesondere für Wind- und Schneelasten, realisiert werden kann. Als mögliche Tragkonstruktionen kommen Rahmen aus Holz, Kunststoff oder Metall, ein außenliegendes Traggestell oder pneumatische Stabilisierungen in Frage.

Folienbespannte Rahmen (Bild 2) bieten den Vorteil, dass die Folie beim Lagern gespannt bleibt und nicht gefaltet werden muss. Knicke als Lagerschäden können somit vermieden werden. Die Nachteile dieser Konstruktionsweise sind insbesondere im erhöhten Lager- und Montageaufwand zu sehen. Die Folienbespannung ist weniger resistent gegen Beschädigungen als die derzeit üblichen Holzeinhausungen.



Bild 2: Entwurfsvarianten folienbespannter Rahmen.

Die Vorteile eines *Traggestelles mit eingehängter Folienhülle* sind in einem sehr geringen Packmaß, einer leichten Montage durch leichte Einzelteile und einer Gewerketrennung zwischen Folienhülle und Traggestell zu sehen (Bild 3). Die Gewerketrennung ermöglicht einen schnellen und kostengünstigen Ersatz einzelner Bauteilgruppen bei Verschleiß. Nachteilig ist die Lagerung zu bewerten. Ab einer gewissen Größe der Folienhülle, sind Faltungen nicht zu vermeiden. Da Knicke in der Folienhülle die optische Erscheinung stark verschlechtern, ist die Auswahl der Folienwerkstoffe eingeschränkt.





*Pneumatisch stabilisierte Hüllen* bieten große Vorteile in der Montage da sie lediglich "aufgepumpt" werden müssen und beanspruchen sehr geringe Lagerflächen. Hauptnachteil und Ausschlusskriterium dieser Konstruktionsweise in diesem Forschungsvorhaben ist, dass eine permanente Stromversorgung zum Ausgleich der Druckverluste notwendig ist.

#### Witterungsschutz

Ausschlaggebender Bestandteil der in diesem Projekt angestrebten Schutzeinhausungen ist die transparente Hülle. Die Recherche zur Bestimmung geeigneter Materialen für die Schutzhülle wurde unter mehreren Gesichtspunkten durchgeführt:

- Reißfestigkeit (Witterung)
- Transmission (Ultraviolette Strahlung (UV), Visuelle Strahlung (VIS))
- Reflektion (Infrarotstrahlung (IR))
- Verarbeitbarkeit
- Anschaffungskosten

Aufgrund der geforderten Transparenz sind die infrage kommenden Folien mindestens für den visuellen Bereich der Solarstrahlung (VIS) durchlässig. Materialien mit geringer Neigung zu Versprödung sind zudem meist auch im UV-Bereich transparent. Allerdings sollte das verwendete Material für IR-Strahlung möglichst undurchlässig sein, damit sich innerhalb der Schutzeinhausung ein Treibhauseffekt einstellen kann. Materialien wie beispielsweise Polyethylen sind damit eher ungünstig.

Vor allem in Bezug auf ein knitterfreies Montieren der Schutzhülle werden elastische Materialien, welche ein Falten ohne dauerhafte Schäden überstehen, bevorzugt. Die Anschaffungskosten werden im Hinblick auf eine spätere Serienproduktion betrachtet – für die Erstellung der Versuchsaufbauten werden nur vergleichsweise geringe Mengen benötigt.

Es wurden 27 Folien von 9 Herstellern untersucht und bewertet. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Folien sind im Anhang zu finden. In Abstimmung mit Verarbeitern von Folien fiel die Entscheidung auf eine transparente Folie aus Polyvinylchlorid, die für Heckfenster von Cabrio-Faltdächern eingesetzt wird. Hauptgründe hierfür sind die hervorragenden Transmissionseigenschaften im VIS- und im UV-Bereich sowie die hohe Reißfestigkeit. Die gute Verarbeitbarkeit dieser Folie lässt Kleben, Nähen und eine knitterfreie Montage zu. Vergleichbare Werte in den Bereichen der Reißfestigkeit und der Transmissionseigenschaften liefern Ethylen-Tetrafluorethylen Folien (ETFE). Diese sind jedoch sehr knickanfällig, die Verarbeitung kann nur in Spezialbetrieben erfolgen und zudem sind sie verhältnismäßig hochpreisig. Prinzipiell kommen ETFE Folien für diese Verwendung, besonders bei bespannten Rahmenkonstruktionen, jedoch in Frage.

#### Belüftung

Eine kontrollierte Belüftung der Schutzeinhausungen soll die Kulturgüter, nach Beginn der Einhausungsperiode im Spätherbst, möglichst rasch und schonend entfeuchten und neue Feuchteeinträge (z.B. durch Rückkondensation) vermeiden. An Tagen mit solarer Einstrahlung erwärmt sich die Luft innerhalb der Einhausung und hat somit die Möglichkeit mehr Feuchte aufzunehmen. Um einen Feuchtetransport aus der Schutzhülle zu ermöglichen, ist ein kontrollierter Luftaustausch notwendig. Es wurden drei unterschiedliche Lüftungskonzepte an den Versuchseinhausungen realisiert und miteinander verglichen.

- <u>Freie Konvektion (FK)</u>: Als "Antrieb" der Konvektion bei solarer Einstrahlung dient der Dichteunterschied der Innen- (warm und feucht) und Außenluft (kalt und trocken). Es entsteht ein "Kamineffekt" innerhalb der Schutzeinhausung.
- <u>Mechanische Belüftung (MB)</u>: Mit Hilfe eines elektrischen Innenrohrlüfters wird die erwärmte, feuchte Innenluft aus den Einhausungen abgeführt. Durch den entstehenden Unterdruck wird kalte Außenluft durch eine Zuluftöffnung in die Einhausungen nachgeführt. Der Innenrohrlüfter wird durch eine Photovoltaikzelle gespeist. Somit ist eine Konvektion nur bei solarer Einstrahlung und damit vorwiegend günstigen Lüftungsbedingungen möglich.

Eine Rückschlagklappe am Abluftrohr verhindert eine Konvektion bei inaktivem Innenrohrlüfter.

 Mechanische Belüftung mit Warmluftkollektor (MB WLK): Zur Erhöhung der Lufttemperatur wird ein Warmluftkollektor mit einer Absorptionsfläche von 0,7 m<sup>2</sup> der Zuluft vorgeschaltet. Es wird der gleiche Innenrohrlüfter wie für die mechanische Belüftung verwendet. Eine theoretische Temperaturerhöhung der Zuluft um 15 °C ist laut Hersteller möglich.

#### 4.1.1 Übersicht über die verwendeten Versuchseinhausungen

Es wurden fünf Versuchseinhausungen angefertigt:

- Eine transparente Schutzeinhausung Konstruktionsprinzip: "Traggestell mit eingehängter Folienhülle" mechanische Belüftung. (EH1)
- Drei transparente Schutzeinhausungen Konstruktionsprinzip: "folienbespannter Rahmen" mit den Belüftungskonzepten:
  - Mechanische Belüftung mit Warmluftkollektor (EH2)
  - Mechanische Belüftung (EH3)
  - Freie Konvektion (EH4)
- Eine konventionelle Schutzeinhausung aus Holz mit Belüftung über freie Konvektion. (EH5)

Die unterschiedlichen Versuchseinhausungen ermöglichen den Vergleich zwischen den Materialien (Holz- und Folieneinhausungen), den Konstruktionsprinzipien ("Traggestell mit eingehängter Folienhülle" und "folienbespannter Rahmen") sowie den unterschiedlichen Belüftungskonzepten.

An den Einhausungen EH2, EH3 und EH4 (Bild 4) werden die unterschiedlichen Belüftungskonzepte miteinander verglichen, an den Einhausungen EH1 und EH3 erfolgt ein Vergleich der Konstruktionsvarianten und an den Einhausungen EH4 und EH5 der Vergleich der Einhausungsmaterialien.



Bild 4: Vergleichskonzept der unterschiedlichen Schutzeinhausungen.

#### 4.1.2 Ausführungsdetails an den Versuchseinhausungen

Sämtliche gefertigten Versuchseinhausungen verfügen über eine im unteren Viertel angebrachte Zuluftöffnung und im oberen Viertel angebrachte Abluftöffnung. Die Ausführung erfolgte mittels Aluminium-Flexrohren (Ø 100) welche aus dem Lüftungsbau bekannt sind.

Die aktiv belüfteten Einhausungssysteme wurden zusätzlich mit einer Rückschlagklappe an der Abluftöffnung versehen, um unkontrollierte Belüftung, bzw. Konvektion bei ungünstigen Bedingungen zu vermeiden.

Das Tragwerksskelett der EH1 besteht aus einem Edelstahl-Rohrsystem mit 3-Wege Winkelsteckverbindern sowie einem stabilen Sockelrahmen aus kaltverzinktem C-Stahl. Die Aussteifung erfolgt über Seilauskreuzungen, welche Vförmig von der Mitte der Sockelrahmenseiten in die oberen Ecken führen. Die Abtragung der Horizontallasten wird durch Erdnägel mit einer Länge von 480 mm in den Ecken des Sockelrahmens sichergestellt. Der Abschluss gegen aufsteigende Bodenfeuchte wird über Folienlappen, welche nach erfolgter Montage zusammengerafft und fixiert werden, realisiert.

Die Einhausungen EH2 – EH5 bestehen aus einer Rahmenkonstruktion welche im Fall von EH2 – EH4 an Seitenwänden und Dach mit PVC-Folie bespannt sind. Die Seitenwände der EH5 sind mit einer Nut- und Federverschalung aus Fichtenholz versehen, das Dach besteht aus einer folienbespannten (wasserführenden Schicht) Holzwerkstoffplatte. Die Abtragung der Horizontallasten erfolgt über Seilabspannungen in Verbindung mit Erdnägeln. Die Einhausungen stehen auf dem Boden auf und werden über eine innenliegende PE-Folie gegen aufsteigende Bodenfeuchte abgedichtet.



#### Bild 5:

Ausführungsvarianten der Schutzeinhausungen im Überblick: links: Holzeinhausung (EH5); mitte: folienbespannter Rahmen (EH2 – EH4); rechts: Traggestell mit eingehängter Folienhülle (EH1).

#### 4.2 Testobjekte in den Versuchseinhausungen

In jeder der unterschiedlichen Schutzeinhausungen wurden gleichzeitig zwei Testobjekte eingelagert.

Die **Testobjekte A** (vgl. Bild 6) bestehen aus Sander Sandstein. Die Masse beträgt ca. 85 kg. Diese Steine repräsentieren die Versuche die zu schützenden Objekte dar. Sie sind in Form und Masse vergleichbar mit kleinen Skulpturen. Da der Herbst 2015 ungewöhnlich trocken war, wurden die Steine vor dem Einlagern in die Schutzeinhausungen über 48 Stunden im Wasser gelagert. Die Oberflächen wurden nicht gereinigt, da die Steine Bestandteil einer langfristigen Verwitterungsstudie sind.





Die **Testobjekte B** sind quaderförmige Oberkirner- und Ruhrsandsteine mit den Abmessungen von ca.  $0,3 \times 0,1 \times 0,14$  m<sup>3</sup> und der Masse von ca. 10 kg. Anhand dieser Steine soll der Trocknungsverlauf über gravimetrische Messung bestimmt und organischer Bewuchs nachgewiesen werden. Die Steine wurden gereinigt und 24 Stunden im Wasser gelagert.

#### 4.3 Messkonzept in den Versuchseinhausungen

Ziel der transparenten Einhausungen ist ein für die zu schützenden Objekte positiveres Innenraumklima (vgl. Kap.2).

Um die Auswirkungen der Transparenz auf das Innenraumklima erfassen zu können, werden insbesondere Temperatur- und Luftfeuchtesensoren innerhalb der Einhausungen installiert. In Bild 7 ist die Anordnung der unterschiedlichen Sensoren am Beispiel der Einhausungen EH2 – EH5 dargestellt. Die Anordnung der Sensoren in EH1 (Traggestell mit Folienhülle) ist gleich.





Anordnung der Sensoren innerhalb der Versuchseinhausungen.

Die Messdaten von Temperatur und Luftfeuchte werden zentral erfasst und in einer Datenbank hinterlegt. Da das Innenklima in erster Linie durch Lufttemperatur und –feuchte bestimmt ist, wird diese Messgröße redundant mittels Stand-Alone Datenloggern erfasst, um eventuellen Ausfällen an der Datenbank oder Messtechnik vorzubeugen.

Die Außenklimadaten werden durch die institutseigene Wetterstation des Fraunhofer-Institut für Bauphysik erfasst.

#### 4.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung findet auf dem Freigelände des Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen statt. Holzkirchen befindet sich im Alpenvorland, 680 m über dem Meeresspiegel. Wie in fast ganz Europa üblich, liegt die Wetterseite hauptsächlich im Nordwesten. Die charakteristischen Witterungsverhältnisse in Herbst und Winter zeigen sich im Holzkirchner Oberland besonders ausgeprägt. Die Versuchseinhausungen sind an der Nord-Südachse in einem Abstand von 6 m ausgerichtet. In der Luftaufnahme Bild 8 ist der Versuchsstandort auf dem Freigelände mit einem roten Kreis markiert.



Bild 8: Standort des Versuchsaufbaus auf dem Freigelände des Fraunhofer Institut für Bauphysik.

Die Positionierung der Versuchseinhausungen ist so gewählt, dass eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Windabschirmung oder Verschattung weitgehend vermieden wird. Eine Berechnung der Schattenlängen am Sonnenhöchststand der Wintersonnenwende, ergibt eine kurze Verschattung am frühen Vormittag von ca. 45 Minuten. Unter der Annahme eines parabelförmigen Verlaufs direkter Globalstrahlung sowie dem Verhältnis des Verschattungszeitraums zu Sonnenscheindauer, ergeben sich Strahlungsverluste von weniger als 5 %. Zudem ist eine Verschattung, durch die transparente Ausführung der meisten Versuchseinhausungen, nur teilweise gegeben – die Auswirkungen sind somit vernachlässigbar.

Die Montage der Versuchseinhausungen auf dem Freigelände erfolgte Ende November 2015.

Die Messperiode begann am 09.12.2015 und endete am 03.05.2016. Sie betrug somit 21 Wochen. In der kommunalen Praxis erfolgt die Aufstellung der Schutzeinhausungen für Denkmäler überwiegend nach festen Terminen und weniger nach den eigentlichen Wetterverhältnissen. Somit erstreckt sich die Einhausungsperiode von Oktober bis April. Aufgrund der kurzen Vorlaufzeit zur Realisierung des Projektes, sind Messdaten aus den Herbstmonaten Oktober und November nicht verfügbar. Durch wässern der Testobjekte und einer Schlechtwetterperiode zum Einhausungszeitpunkt im November wird ein Worst Case Szenario abgebildet welches vergleichbar mit einer langen Regenperiode während eines üblichen Einhausungszeitpunkts im Herbst ist.

#### 4.5 Rechnerische Simulation

Die durchgeführte Simulation mit WUFI<sup>®</sup> ist nicht darauf ausgelegt, die erfassten Messdaten nachzurechnen, sondern darauf zwei grundlegenden Fragen zu beantworten:

- Wie verläuft die Trocknung der Steine in den Einhausungen und
- welches Klima stellt sich in diesen Einhausungen ein?

Dafür wurde mit dem Klima-Referenzjahr 1991 ein Jahr zugrunde gelegt, das einen vergleichsweise ungünstigen Fall zum relativ sonnigen Winter im Messzeitraum 2015/16 abbildet. Für die Modellierung bedeutet das, verglichen mit den gemessenen Daten eine Worst Case Betrachtung, mit der nicht der tatsächlich gemessene Zeitraum betrachtet wird, sondern das zu erwartende Verhalten in einem ungünstigeren, aber insgesamt durchschnittlichen Winter. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, ob das Prinzip der Membraneinhausung generell und unter ungünstigen Witterungsbedingungen funktioniert und wie sich die Steine dabei verhalten.

#### 4.5.1 Modellbildung und Simulation

Die Einhausung wurde als 3D Geometrie in der Software WUFI<sup>®</sup> Plus vereinfacht implementiert. Die Grundfläche beträgt im Simulationsmodell 0,7 x 0,7 m<sup>2</sup> und die mittlere Höhe 2,3 m. Das Dach wurde ohne Schräge abgebildet. Die transparente Einhausung ist entsprechend der tatsächlichen Bauweise mit einem Holzrahmen im Modell abgebildet. In WUFI<sup>®</sup> Plus wird dies über den Holzrahmenanteil an der Gesamtfläche mit einem Faktor von 0,3 berücksichtigt. Der Strahlungsanteil wird über diesen Faktor und der Gesamtfläche berechnet. Der Energieeintrag über den Strahlungsanteil wird entsprechend dem g-Faktor reduziert und im Modell gleichmäßig an die Raumluft bzw. inneren Bauteile abgegeben. Eine orientierungsabhängige Einstrahlung auf innere Objekte wird im verwendeten Modell nicht berücksichtigt. Im Simulationsmodell wird die Raumtemperatur in Raummitte berechnet.

Die Berechnungen mit dem Außenklima der Freilandversuchsstelle des Fraunhofer IBP Holzkirchen (Klima-Referenzjahr 1991) erfolgen an der Hülle mit Schlagregen und solarer Strahlung. Hierbei wird auch die nächtliche Abstrahlung über eine explizite Strahlungsberechnung mit berücksichtigt. Die Luftwechselrate wurde auf zwei unterschiedlichen Wegen untersucht. Für die realitätsnahe Abbildung erfolgte eine Berechnung des natürlichen Luftwechsels mit dem Durchströmungsmodell. Hierbei werden Anströmung durch Wind mit den daraus resultierenden Druckunterschieden Luv und Lee berücksichtigt. Ebenso erfolgt die Berechnung der Druckdifferenzen über die Höhe durch Temperaturunterschiede von Innen- und Außenklima. Die Undichtigkeiten der Einhausungshülle wurden dabei über einen simulierten Blower-Door Test n<sub>50</sub> mit einer Luftwechselrate von 10 abgebildet. Das heißt, bei einem konstanten Druckunterschied von 50 Pa ergäbe sich eine Luftwechselrate von 10 1/h, was einem großen Öffnungsquerschnitt entspricht. Aus dem Umgebungsklima, dem berechneten Raumklima und der Windanströmung ergeben sich in der dynamischen Simulation ständig wechselnde Druckdifferenzen, die zu ständig wechselnden Luftwechselraten führen. Im weiteren Verlauf wurden Falluntersuchungen mit konstant vorgegeben Luftwechselraten durchgeführt. Damit ist es möglich, erste orientierende Aussagen zu den prinzipiellen Auswirkungen unterschiedlicher konstanter Luftwechselraten auf das Raumklima und den Wassergehalt der Steinskulptur zu treffen.

Die zu schützende Steinskulptur (sog. "Asterix") ist mit zwei gleichen vereinfachten Bauteilen mit einer Größe von 0,1 × 0,3 × 0,8 m<sup>3</sup> im Modell abgebildet. Die Modellierung über zwei Einzelflächen mit einer etwas dünneren Bauteildicke entspricht eher der komplexen Bauteilgeometrie in Fläche und Volumen sowie mittlerer Dicke wie ein einzelnes dickeres Bauteil. Die Bauteile beeinflussen über die Masse das Raumklima. Da das Objekt als kompaktes 1D Objekt abgebildet wurde, ist das hygrische und thermische Verhalten nur angenähert im Vergleich zur realen Skulptur, insbesondere im kurzfristigen Verhalten. Im langfristigen Verhalten können damit jedoch orientierende Abschätzungen zur Veränderung des Gesamtwassergehaltes der Steinskulptur gemacht werden, siehe Bild 9 und Bild 10. Als Materialkennwerte wurden die in der WUFI<sup>®</sup>-Datenbank enthaltenen Daten für den Sander Sandstein verwendet.



#### Bild 9:

Berechnung des Innenraumklimas sowie des Feuchte- und Temperaturfeldes der idealisiert implementierten Steinskulptur (Testobjekt A) im Simulationsmodell der transparenten Einhausung. Im Bild rechts oben ist der Verlauf der Temperatur, relativen Feuchte und des Wassergehalt über den Steinquerschnitt dargestellt.



Bild 10:

Simulationsmodell in WUFI<sup>®</sup> Plus der opaken Einhausung. Im rechten Bild wurden die Außenwände im opaken Modell transparent eingestellt, um das idealisiert abgebildete Testobjekt A (Steinskulptur) erkennen zu können.

#### 4.5.2 Untersuchte Parameter in der Simulation

Anhand des Simulationsmodells können Modellparameter verändert und deren Einfluss auf das Raumklima nachvollzogen werden. Es erfolgen Vergleiche der transparenten Einhausung mit der opaken Einhausung sowie die Auswirkung einer trockenen Steinskulptur im Vergleich zu einer Nassen. Weiter wird als wesentlicher Parameter die Auswirkung der Luftwechselrate untersucht. Folgende Falluntersuchungen wurden durchgeführt, siehe Tabelle 1.

#### Tabelle 1:

Falluntersuchungen, die in der Parameterstudie mit WUFI Plus durchgeführt wurden.

| Fall  | Typ der Einhausung | Anfangswassergehalt<br>[kg/m³] | Luftwechselrate n<br>[1/h] |  |  |
|---|--------------------|--------------------------------|----------------------------|--|--|
| 01)   | ohne               | 19                             | Außenluft                  |  |  |
| 1   | transparent        | 19                             | variabel, Ø 0,24           |  |  |
| 2   | transparent        | 75                             | variabel, Ø 0,24           |  |  |
| 3   | opak               | 19                             | variabel, Ø 0,15           |  |  |
| 4 <sup>2)</sup>   | opak               | 75                             | variabel, Ø 0,15           |  |  |
| 5   | opak               | 75                             | variabel, Ø 0,15           |  |  |
| 6   | transparent        | 75                             | 0,5                        |  |  |
| 7   | transparent        | 75                             | 3                          |  |  |
| 8   | transparent        | 75                             | 10                         |  |  |
| <sup>1)</sup> Vorberechnung mit WUFI 1D zur Feststellung des Verlaufs des Gesamtwassergehaltes in<br>der nicht geschützten Steinskulptur.<br><sup>2)</sup> Die Falluntersuchung 4 wird im Weiteren nicht dargestellt. |                    |                                |                            |  |  |

#### 4.5.3 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

#### Frei stehende Steinskulptur (Fall 0)

Zur Feststellung des Wassergehaltes wurde die Steinskulptur in vereinfachter Form modelliert und der Verlauf des Wassergehalts für die freistehende Skulptur im Holzkirchner Außenklima berechnet. Der Wassergehalt variiert sehr stark, siehe Bild 11. Durch die ungeschützte, westseitige Orientierung wird bei Schlagregen Wasser kapillar aufgesaugt, der Wassergehalt steigt entsprechend stark an. Ebenso können längere Trockenperioden zu intensiver Austrocknung des Steins führen.





Simulierter Wassergehalt einer Steinskulptur aus Sander Sandstein bei wechselnden klimatischen Bedingungen. (Außenklima Holzkirchen 1991).

#### Trockene vs. nasse Steinskulptur in der transparenten Einhausung (Fall 1 und 2)

Mit dem Vergleich der Simulation wurden die Auswirkungen des Anfangswassergehaltes der Steinskulptur auf das entstehende Raumklima und den weiteren Verlauf des Wassergehaltes im Stein untersucht. Es wurden als Anfangswassergehalte trocken mit 19 kg/m<sup>3</sup> und feucht mit 75 kg/m<sup>3</sup> verwendet. Die Wassergehalte korrespondieren entsprechend der Feuchtespeicherfunktion mit der Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Feuchte (r.F.) bzw. 99,5% r.F. In Bild 12 ist der berechnete Verlauf der relativen Feuchte und Temperatur mit den Außenklimadaten für den Fall 2 mit nasser Steinskulptur abgebildet. Bei der relativen Feuchte ist zusätzlich der gleitende Tagesmittelwert der Raumluft eingezeichnet. Die Schwankungen der relativen Feuchte sind deutlich reduziert gegenüber dem Außenklima. Die Schwankungen der Temperatur sind jedoch deutlich höher im Vergleich zum Außenklima, insbesondere werden höhere Tagestemperaturen durch solare Erwärmung erreicht.



#### Bild 12:

Simuliertes Raumklima in der transparenten Einhausung mit feuchtem Stein im Kontext des Außenklimas mit stündlichen Werten sowie Tagesmittelwert der relativen Feuchte des Raumklimas.

In Bild 13 ist der Verlauf der berechneten relativen Feuchte des Raumklimas in der Schutzeinhausung beider Varianten als gleitender Monatsmittelwert dargestellt. Das Raumklima wird sehr stark vom Anfangswassergehalt bei den gewählten Randbedingungen beeinflusst. Der feuchte Stein erhöht deutlich die relative Feuchte in der Einhausung. Zu Beginn ist die relative Feuchte im monatlichen Mittel bei ca. 96 % r.F. und trocknet im weiteren Verlauf kontinuierlich ab auf ca. 83 % r.F. Die Variante mit trockenem Stein beginnt mit ca. 81 % r.F. und steigt nach einer kurzen Absenkung auf ca. 85% r.F. Danach sinken die Werte auf ca. 76 % r.F.

In Bild 14 ist der Verlauf des Wassergehaltes beider Varianten und der frei bewitterten Steinskulptur abgebildet. Der nasse Stein trocknet sehr stark ab und erreicht einen Wassergehalt von 18,4 kg/m<sup>3</sup>. Der Verlauf des Wassergehaltes bei geringem Anfangswassergehalt verändert sich nur geringfügig und liegt zum Schluss bei 15,0 kg/m<sup>3</sup>.



#### Bild 13:

Simulierter Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchte (gleitender Monatsmittelwert) des Klimas in der Einhausung im Vergleich zum Außenklima. Der Einfluss des Anfangswassergehalts der Steinskulptur sowie die fortschreitende Austrocknung sind deutlich ablesbar.



#### Bild 14:

Simulierter Verlauf des Wassergehaltes im Stein, beeinflusst durch den Anfangswassergehalt der Steinskulptur in der transparenten Einhausung im Vergleich zu einer frei bewitterten Skulptur.

#### Trockene vs. nasser Steinskulptur in der opaken Einhausung (Fall 3 und 5)

Die Auswirkungen des Anfangswassergehaltes der trockenen bzw. nassen Steinskulptur auf das entstehende Raumklima und den Verlauf des Wassergehaltes im Stein wurden auch für die opake Einhausung untersucht. In Bild 15 ist der berechnete Verlauf der relativen Feuchte und Temperatur mit den Außenklimadaten für den Fall 5 mit feuchter Steinskulptur abgebildet. Bei der relativen Feuchte ist zusätzlich der gleitende Tagesmittelwert der Raumluft eingezeichnet. Die Schwankungen von relativer Feuchte und Temperatur sind deutlich geringer als bei einer transparenten Einhausung.







In Bild 16 ist der simulierte Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumklimas als Monatsmittelwert abgebildet. Der feuchte Stein erhöht auch hier sehr deutlich die relative Feuchte, beginnend bei ca. 91 % r.F. Im weiteren Verlauf sinkt das Niveau etwas ab, auf ca. 88 % r.F. Die Luftfeuchte mit trockenem Stein als Ausgangsbasis ist zu Anfang bei 79 % r.F. im Monatsmittel und steigt im weiteren Verlauf etwas an auf 82 % r.F., um dann geringfügig auf 81 % r.F. abzusinken.

Bild 17 zeigt den Verlauf des Wassergehaltes. Der nasse Stein trocknet auch hier sehr stark ab und erreicht einen Wassergehalt von 28,9 kg/m<sup>3</sup>. Der Verlauf des Wassergehaltes mit einem Anfangswassergehalt von 19 kg/m<sup>3</sup> zeigt einen geringfügigen Anstieg auf 20,1 kg/m<sup>3</sup> an.





Simulierter Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumklimas, beeinflusst durch den Anfangswassergehalt der Steinskulptur in der opaken Einhausung im Kontext des Außenklimas als gleitender Monatsmittelwert.





Simulierter Verlauf des Wassergehaltes im Stein, beeinflusst durch den Anfangswassergehalt der Steinskulptur in der opaken Einhausung.

#### Auswirkungen der Luftwechselrate in der transparenten Einhausung (Fall 2, 6, 7, und 8)

Die Luftwechselrate ist ein Maß dafür, wie häufig die Innenluft pro Zeiteinheit durch zugeführte Außenluft ersetzt wird. Bei den vorangegangenen Untersuchungen wurde die Luftwechselrate anhand des Durchströmungsmodells mit definierten Undichtigkeiten und den realen Druckverhältnissen berechnet (Fall 1, 2, 3 und 5). Der Verlauf der Luftwechselrate über einen beispielhaften Winter ist für diese Fälle in Bild 18 dargestellt. In die Berechnung der Luftwechselrate geht auch die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenklima ein. Durch den deutlichen Unterschied im Temperaturverhalten zwischen der transparenten und opaken Einhausung ergibt sich eine unterschiedliche Luftwechselrate. Die Luftwechselrate kann auch auf das Raumvolumen bezogen werden und wird mit "n" bezeichnet. Bei einem Raumvolumen der Einhausung von 1,1 m<sup>3</sup> kann entsprechend die Luftwechselrate in m<sup>3</sup>/h umgerechnet werden. Als Durchschnittswert wurde für die transparente Einhausung n = 0,24 1/h und für die opake Einhausung n = 0,15 1/h berechnet. Für die weiteren Falluntersuchungen wurde ein konstanter Luftwechsel angenommen mit n = 0,5 1/h; n = 3 1/h; n = 10 1/h (Fall 6, 7 und 8).





Verlauf der Luftwechselrate für die berechneten Varianten mit Durchströmungsmodell für die Fälle 1, 2, 3 und 5.

In Bild 19 ist der berechnete Verlauf der relativen Feuchte und Temperatur mit den Außenklimadaten für den Fall 7 mit einer Luftwechselrate von 3 1/h abgebildet. Zusätzlich zur relativen Feuchte ist der gleitende Tagesmittelwert der Raumluft in der Einhausung eingezeichnet. Die Schwankungen der relativen Feuchte sind deutlich intensiver im Vergleich zur gleichen Variante mit einem durchschnittlichen Luftwechsel von n = 0,24 1/h (Fall 2, siehe Bild 12). Die Temperaturen haben sich jedoch kaum verändert und sind nur in den Spitzen etwas zurückgegangen.





Raumklima in der transparenten Einhausung mit feuchtem Stein im Kontext des Außenklimas mit stündlichen Werten sowie Tagesmittelwert der relativen Feuchte des Raumklimas für Fall 7 mit der Luftwechselrate n = 3 1/h.

In Bild 20 sind die Verläufe der relativen Feuchte mit gleitendem Monatsmittel der vier Varianten, mit unterschiedlichen Luftwechselraten, abgebildet. Erhöht sich der Luftwechsel von n = 0,24 1/h auf n = 0,5 1/h stellt sich am Anfang noch keine wesentliche Änderung der relativen Feuchte ein. Das Ansteigen der Feuchte der Außenluft wirkt sich jedoch bei n = 0,5 1/h bereits erhöhend auf die relative Luftfeuchte innen aus. Im weiteren Verlauf sinkt die Raumluftfeuchte deutlich tiefer auf Werte um 80 % r.F. Wird die Luftwechselrate deutlich erhöht bzw. vervielfacht, nähert sich der Verlauf dem Verlauf des Außenklimas an. Bereits zu Beginn stellt sich ein deutlich niedrigerer Wert der Raumluftfeuchte ein.

Die Verläufe des Wassergehaltes der vier untersuchten Varianten (Fall 2, 6,7 und 8) sind in Bild 21 abgebildet. Trotz deutlich unterschiedlicher relativer Raumluftfeuchten zeigen sich nur geringfügige Unterschiede im Austrocknungsverhalten und Verlauf des Wassergehaltes im Stein. Das bedeutet, dass ein höherer Luftwechsel zwar zu deutlich höheren Luftfeuchteschwankungen führt, die sich konservatorisch negativ auswirken können, aber nicht zu einer besseren Austrocknung.





Simulierter Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumklimas der transparenten Einhausung, beeinflusst durch unterschiedliche Luftwechselraten, im Kontext des Außenklimas als gleitender Monatsmittelwert.



#### Bild 21:

Simulierte Verläufe des Wassergehaltes des zu Beginn feuchten Steins für vier Varianten der transparenten Einhausung, beeinflusst durch unterschiedliche Luftwechselraten. Die Trocknung verläuft nahezu gleich.

#### 4.5.4 Diskussion der Simulation und Schlussfolgerungen

Um Schlussfolgerungen aus den Simulationen ziehen zu können, ist eine vergleichende Betrachtung der beiden grundsätzlich unterschiedlichen Einhausungstypen (Holzverschalung / Membranhülle) erforderlich. Wie in der Simulationsbeschreibung ausgeführt, wird für das Simulationsmodell die sich einstellende Durchlüftung mittels angenommener Undichtigkeiten in der Hülle abgebildet. Es sei hier nochmals erwähnt, dass mit den angegebenen Luftwechselraten (z.B. n = 0,15 1/h oder n = 3 1/h) keine feste Luftwechselrate eingestellt wird, sondern in Anlehnung an das Prinzip des Differenzdruck-Messverfahrens (BlowerDoor-Test), dieser angenommene Luftwechsel bei einer undichten Hülle entsteht, wenn eine Druckdifferenz zwischen innen und außen von 50 Pa vorliegt. Das bedeutet umgekehrt, dass ohne einen treibenden Potenzialunterschied zwischen innen und außen (z.B. Druckunterschied, Temperaturunterschied, Feuchteunterschied) im Simulationsmodell auch keine Durchströmung stattfindet. Im simulierten Modell wird deshalb auch nur das Prinzip der freien Lüftung abgebildet. Die im Versuch auch getesteten Systeme mit erzwungener Lüftung verhalten sich (wie die Messergebnisse zeigen) aus raumklimatischer Sicht noch besser.

Wie der Vergleich der Verläufe von relativer Feuchte und Temperatur in den beiden Einhausungstypen zeigt (Bild 22) ist die Temperaturamplitude in der Holzvariante deutlich gedämpft. Auch der Verlauf der relativen Feuchte schwingt nur gering im Bereich um 90 %, während die relative Feuchte in der Membranvariante nach etwa drei Monaten erkennbar absinkt und um die 75 %-Marke oszilliert. Die Innen-Bedingungen der Membranhülle sind damit erkennbar trockener als in der betrachteten Holzverschalung.





Vergleich des Verlaufes des Innenklimas von Holz- und transparenter Einhausung. Betrachtet man nur die stark geglätteten Verläufe der relativen Feuchten in den Einhausungen, zeigt sich, bei unterschiedlichen Anfangszuständen, ein unterschiedliches Bild. Werden trockene Steine eingehaust, bleibt das Innenklima in beiden Fällen weitgehend trocken (Bild 23, rot gestrichelte und grüne Kurve). Sind die Steine allerdings beim Einbau feucht, bleibt die relative Feuchte in der Holzverschalung deutlich länger hoch, als in der transparenten Hülle (Bild 23, grün gestrichelte und orange Linie).





Vergleich Innenklima bei unterschiedlichen Stein Anfangsfeuchten.

Vergleicht man zudem das Austrocknungsverhalten der Steine - in diesem Fall zusätzlich mit einem frei bewitterten Stein - ist deutlich zu sehen, dass beide Verschalungen dazu führen, dass die Steine trocknen, während der frei bewitterte Stein immer wieder Wasser aufnimmt. Allerdings lässt sich auch erkennen, dass sich in der Simulation der Wassergehalt in der transparenten Hülle bereits nach rund 3 Wochen von 80 kg/m<sup>3</sup> auf 40 kg/m<sup>3</sup> halbiert (Bild 24, orange Kurve), während der Stein in der Holzeinhausung dafür rund zwei Monate benötigt (Bild 24, blau gestrichelte Kurve). Werden die Steine allerdings trocken eingebaut, halten sie ihr Niveau weitgehend.



Bild 24: Vergleich Austrocknungsverhalten der Steine.

Es bleibt noch die Frage, welche Luftwechselrate zur schnellsten Austrocknung führt. Hier zeigt die Simulation, dass sich der Trocknungsvorgang der Steine praktisch nicht unterscheidet, ob eine korrespondierende Leckage Rate – also eine angenommene Undichtigkeit der Umschließungsfläche (vgl. Kap. 4.5.1) von n = 0,24 1/h oder n = 10 1/h angenommen wird (Bild 21). Was zunächst seltsam erscheinen mag, lässt sich damit erklären, dass jeder Stein einen bestimmten Wasserdampfdiffusionswiderstand besitzt. Davon abhängig ist, wie schnell er das gespeicherte Wasser nach außen abgeben kann. Für den hier untersuchten Sander Sandstein genügt bereits eine geringe Durchlüftung, weil er die gespeicherte Feuchtigkeit aufgrund seines hohen Wasserdampfdiffusionswiderstandes nicht schneller an die Umgebung abgeben kann. Dieses Verhalten ist spezifisch und materialabhängig. Für andere Steinsorten sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Grundsätzlich kann ein Stein nur dann trocknen, wenn ein entsprechender Partialdruckunterschied zwischen Stein und Umgebung vorhanden ist. Eine hohe Umgebungsfeuchte würde eine Austrocknung behindern. Das bedeutet, dass die Luftwechselrate so bemessen sein muss, dass sich für die Austrocknung günstige Verhältnisse einstellen. Wie die Simulationsrechnungen gezeigt haben, ist das für das transparente System mit freier Lüftung bereits der Fall. Die aktiv belüfteten Varianten können darüber hinaus noch bedarfsgerecht gesteuert werden.





Aus den Simulationsergebnissen lässt sich Schlussfolgern, dass das Konzept einer durchlüfteten transparenten Schutzhülle für Kulturgüter zu einem Innenklima führt, das die Austrocknung der darin enthaltenen Steine begünstigt. Wie die Simulation zeigt, trocknen die Steine auch in einer Holzschalung. Der Wassergehalt verbleibt jedoch auf einem vergleichsweise höheren Niveau insbesondere wenn die Steine in einem nassen Zustand verschalt werden. Der Trocknungsvorgang dauert dann wesentlich länger.

Das Problem schädigender Frost-Tau-Wechsel bei hohem Wassergehalt erscheint vor diesem Hintergrund, insbesondere für die ersten Wochen einer Einhausungsperiode, relevant. Während Frost-Tauwechsel in einer Holzschalung noch problematisch sein können, sind die Steine in den transparenten Hüllen kürzere Zeit gefährdet, da der Wassergehalt schneller abnimmt.

Die Simulationsergebnisse lassen weiterhin vermuten, dass die in der Holzeinhausung vorhandenen hohen relativen Feuchten mikrobiellen Aufwuchs begünstigen können, während die relativen Feuchten in der transparenten Hülle für einen Algen- und Schimmelaufwuchs kaum ausreichen. Zudem kann der eindringende UV-Strahlungsanteil (abhängig vom verwendeten Folien-Material) mikrobiellen Aufwuchs zusätzlich eindämmen.

#### Fazit der rechnerischen Simulation

Die hier durchgeführten Simulationen bestätigen die positiven Ergebnisse aus der Messung und bilden die Grundlage für weitere rechnerische Untersuchungen. Insbesondere können Simulationen mit unterschiedlichen Belüftungsstrategien durchgeführt werden bzw. Belüftungsstrategien optimiert werden, die in Feldversuchen messtechnisch überprüft werden sollen. Die Untersuchung weiterer Parameter, wie das Verhältnis des Einhüllungsvolumina zur sorbierten Wassermasse der Steinskulptur (Größenskalierung), Auswirkung von Leckagen, der Einhüllung bei Regen oder aufsteigende Bodenfeuchte sollten hierbei mit berücksichtigt werden.

## 5 Auswertung der Messergebnisse

Für die Auswertung der Messergebnisse gelten die Bezeichnungen der Einhausungen nach Kap.4.1.1:

- EH1 = Traggestell mit eingehängter Folienhülle mechanische Belüftung,
- EH2 = Folienbespannter Rahmen mechanische Belüftung mit Warmluftkollektor (WLK),
- EH3 = folienbespannter Rahmen mechanische Belüftung,
- EH4 = folienbespannter Rahmen freie Konvektion,
- EH5 = Holzeinhausung freie Konvektion,

die Wetterdaten auf dem Freigelände werden mit FG bezeichnet.

#### 5.1 Temperatur und relative Luftfeuchte

Die ermittelten Klimadaten werden zunächst im Mittel der gesamten Messperiode betrachtet. Dazu werden die gemessenen Daten des Innenklimas aus den einzelnen Einhausungen mit dem Außenklima verglichen.

Die Werte entsprechen grundsätzlich den Erwartungen. Im Durchschnitt liegen die Lufttemperaturen (LT) der transparenten Schutzeinhausungen, besonders jener mit WLK, deutlich über den Werten des Freigeländes, die relativen Luftfeuchten wiederum darunter. Dies zeigt sich größtenteils in den Grenzbereichen der Messwerte (Minimum und Maximum). Die auffällige Unterschreitung der unteren Lufttemperaturen, innerhalb der transparenten Schutzeinhausungen, im Vergleich zum Freigelände lassen sich auf den Strahlungsaustausch zum freien Nachthimmel zurückführen.

#### Tabelle 2:

Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen während der gesamten Messperiode. (Farbliche Kennzeichnung: grün = positivste Auswirkungen auf die Steintrocknung; rot = negativste Auswirkungen auf die Steintrocknung).

|     | Mes    | sgröße   | EH1   | EH2   | EH3   | EH4   | EH5   | FG    |
|-----|--------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| qe  | Ø      | LT in °C | 5,8   | 8,0   | 6,9   | 7,4   | 2,8   | 3,5   |
| ŗ   |        | RF in %  | 74    | 56    | 60    | 66    | 81    | 86    |
| spe | Min.   | LT in °C | -21,4 | -19,8 | -20,7 | -20,3 | -21,9 | -20,1 |
| es  |        | RF in %  | 9     | 7     | 7     | 9     | 34    | 24    |
| Š   | Max    | LT in °C | 45,6  | 55,9  | 51,1  | 51,3  | 27,1  | 23,1  |
|     | iviax. | RF in %  | 99    | 93    | 96    | 95    | 99    | 100   |

In Tabelle 3 wird die Nutzung des solaren Energieeintrages deutlich. EH1 liegt bezüglich der Durchschnittstemperaturen etwa 3 °C hinter den Einhausungen mit bespannten Rahmen. EH1 verfügt konstruktionsbedingt über sehr wenig thermischen Speicher. Des Weiteren konnte der Foliensaum kaum abgedichtet werden, wodurch neben Bodenfeuchte auch Außenluft unkontrolliert das Innenklima beeinflusste.

Die durchschnittlichen Werte der relativen Luftfeuchte am Tag liegen bei den transparenten Schutzeinhausungen (EH1 – EH4) 25 % bis 30 % unterhalb der Gesamtwerte (Tag und Nacht). Zur Differenzierung der Messwerte (Tag und Nacht) wurde die gemessene Globalstrahlung verwendet (IG > 0 = Tag; IG < 0 = Nacht). Aufgrund der Trägheit der Objekte ist eine scharfe Abgrenzung von Tages- und Nachtwerten nicht möglich.

#### Tabelle 3:

Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen am Tage während der gesamten Messperiode. (Farbliche Kennzeichnung: grün = positivste Auswirkungen auf die Steintrocknung; rot = negativste Auswirkungen auf die Steintrocknung).

|      | Mes  | sgröße   | EH1   | EH2   | EH3   | EH4   | EH5   | FG    |             |
|------|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| þ    | Ø    | LT in °C | 12,3  | 16,1  | 14,4  | 15,2  | 5,6   | 6,1   | 5           |
| rioc |      | RF in %  | 58    | 47    | 49    | 52    | 80    | 77    | traç<br>m²  |
| spe  | Min. | LT in °C | -17,2 | -17,4 | -17,9 | -17,8 | -16,6 | -15,5 | eint<br>Vh/ |
| ess  |      | RF in %  | 9     | 7     | 7     | 9     | 34    | 24    | gie<br>kv   |
| ž    | Max. | LT in °C | 45,6  | 55,9  | 51,1  | 51,3  | 27,1  | 23,1  | 29<br>29    |
|      |      | RF in %  | 99    | 85    | 96    | 92    | 99    | 100   | ΝĽ          |

Die in Tabelle 4 dargestellten Werte der Temperatur und Luftfeuchte in der Nacht zeigen, dass die Durchschnittswerte der Temperatur in allen Einhausungstypen, in der Nacht ohne Sonneneinstrahlung, stark vergleichbar sind. Besonders in den Einhausungen mit kontrollierter Belüftung (EH1 – EH3) liegen die Durchschnittswerte der relativen Luftfeuchte auch in der Nacht weit unter den Werten der Holzeinhausung (EH5) bzw. des Freigeländes (FG). Dieses allgemein trockenere Innenraumklima der EH1 – EH3 ist mit der Installation der Rückschlagklappen zu begründen (vgl. Kap. 4.1), durch die ein unkontrollierter Luftaustausch bei ungünstigen Außenluftbedingungen (hohe Luftfeuchte) verhindert wird. Tabelle 4:

Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen in der Nacht während der gesamten Messperiode. (Farbliche Kennzeichnung: grün = positivste Auswirkungen auf die Steintrocknung; rot = negativste Auswirkungen auf die Steintrocknung).

|     | Mes    | sgröße   | EH1   | EH2   | EH3   | EH4   | EH5   | FG    |
|-----|--------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| de  | Ø      | LT in °C | 1,6   | 2,6   | 2,0   | 2,2   | 1,0   | 1,8   |
| Ū   |        | RF in %  | 84    | 62    | 67    | 75    | 82    | 92    |
| be  | Min.   | LT in °C | -21,4 | -19,8 | -20,7 | -20,3 | -21,9 | -20,1 |
| ese |        | RF in %  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Ž   | Max    | LT in °C | 42,6  | 46,2  | 45,4  | 44,1  | 24,6  | 18,7  |
|     | ividX. | RF in %  | 99    | 93    | 95    | 95    | 97    | 100   |

Bild 26 verdeutlicht noch einmal die Unterschiede der durchschnittlichen Lufttemperaturen, innerhalb der Einhausungen, zwischen den Tag und Nachtwerten. Sämtliche transparenten Einhausungssysteme (EH1 – EH4) weisen am Tag wesentlich höhere Durchschnittstemperaturen auf, während sich die Durchschnittstemperaturen aller Einhausungssysteme in der Nacht sehr ähnlich gestalten.



#### Bild 26:

Vergleich der Durchschnittstemperaturen (Innenluft) von Tag und Nacht während der Messperiode in den Einausungen.

Die Trends der innenklimatischen Bedingungen der einzelnen Schutzeinhausungen werden mit feinerer Auflösung immer deutlicher. Die Messergebnisse der Einhausungen mit folienbespanntem Rahmen (EH2 – EH4) liegen sowohl im Durchschnitts- wie auch im Messbereich nah zusammen, wobei sich die Ausführung mit Warmluftkollektor (EH2) nochmals hervorhebt. Die Ausführungsvariante Traggestell mit eingehängter Folienhülle (EH1) zeigt hierbei leichten Abstand. Das System Holzeinhausung nähert sich stets dem Klima am Freigelände. In Tabelle 5 ist eine monatsweise Auswertung der Messergebnisse dargestellt. Tabelle 5:

Monatsansicht der Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen. (Farbliche Kennzeichnung: grün = positivste Auswirkungen auf die Steintrocknung; rot = negativste Auswirkungen auf die Steintrocknung).

|      | Mes          | sgröße   | EH1   | EH2   | EH3   | EH4   | EH5   | FG    |
|------|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ے    | a            | LT in °C | 4,0   | 5,5   | 4,6   | 5,0   | 1,6   | 3,2   |
| pe   |              | RF in %  | 79,9  | 58,3  | 63,1  | 71,5  | 86,2  | 85,7  |
| en   | Min          | LT in °C | -9,5  | -8,4  | -9,2  | -8,4  | -9,0  | -5,8  |
| Dez  | IVIIII.      | RF in %  | 24    | 16    | 19    | 23    | 57    | 36    |
|      | Max          | LT in °C | 29,3  | 34,8  | 31,7  | 32,7  | 14,1  | 15,7  |
|      | IVIAX.       | RF in %  | 99    | 93    | 88    | 95    | 99    | 100   |
|      | a            | LT in °C | 6,1   | 6,1   | 5,8   | 6,1   | 5,8   | 6,9   |
|      | Ø            | RF in %  | 81,7  | 60,4  | 67,3  | 73,7  | 88,1  | 91,0  |
| Iua  | Min          | LT in °C | -21,4 | -19,8 | -20,7 | -20,3 | -21,9 | -20,1 |
| Jar  |              | RF in %  | 27    | 17    | 23    | 23    | 67    | 51    |
|      | Max          | LT in °C | 26,4  | 35,0  | 29,1  | 32,7  | 11,4  | 12,4  |
|      | IVIAA.       | RF in %  | 98    | 87    | 96    | 93    | 97    | 100   |
|      | a            | LT in °C | 4,1   | 5,8   | 4,9   | 5,4   | 1,9   | 2,9   |
| 5    | Ø            | RF in %  | 76,0  | 62,0  | 63,4  | 69,0  | 81,1  | 85,5  |
| L08  | Min.<br>Max. | LT in °C | -11,2 | -10,1 | -11,0 | -10,1 | -10,7 | -9,3  |
| leb  |              | RF in %  | 21    | 15    | 16    | 15    | 42    | 32    |
| "    |              | LT in °C | 28,8  | 36,8  | 33,7  | 37,7  | 18,1  | 17,2  |
|      |              | RF in %  | 98    | 92    | 90    | 93    | 97    | 100   |
|      | a            | LT in °C | 6,4   | 9,1   | 7,7   | 8,4   | 2,4   | 3,0   |
|      | <u>v</u>     | RF in %  | 68,2  | 50,3  | 54,2  | 60,7  | 78,0  | 85,4  |
| än   | Min          | LT in °C | -9,4  | -8,2  | -9,0  | -8,3  | -9,3  | -8,5  |
| ŝ    |              | RF in %  | 13    | 9     | 10    | 11    | 40    | 27    |
|      | Max          | LT in °C | 39,1  | 49,7  | 43,2  | 47,7  | 25,1  | 22,5  |
|      | IVIAA.       | RF in %  | 97    | 86    | 87    | 92    | 94    | 100   |
|      | Ø            | LT in °C | 12,6  | 15,7  | 14,3  | 14,9  | 8,2   | 7,6   |
|      |              | RF in %  | 64,4  | 48,9  | 51,3  | 57,5  | 73,5  | 81,3  |
| oril | Min          | LT in °C | -6,7  | -6,0  | -6,7  | -6,0  | -6,4  | -3,7  |
| ∣₹   |              | RF in %  | 9     | 7     | 7     | 9     | 34    | 24    |
|      | Mav          | LT in °C | 45,6  | 55,9  | 51,1  | 51,3  | 27,1  | 23,1  |
|      | iviax.       | RF in %  | 95    | 86    | 87    | 91    | 92    | 100   |

Anschaulich sind die Durchschnittswerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte in Bild 27 und Bild 28 grafisch dargestellt. Auch hier zeigt sich:

- Die durchschnittliche Lufttemperatur in den transparenten Einhausungssystemen (EH1 – EH4) liegt immer über den Werten in der Holzeinhausung (EH5) und des Freigeländes.
- Die durchschnittliche relative Luftfeuchte in den transparenten Einhausungssystemen ist immer geringer als die durchschnittliche Luftfeuchte in der Holzeinhausung (EH5) und dem Freigelände (FG).





Darstellung der Lufttemperatur in den Einhausungen (EH) und im Freigelände (FG) im wöchentlichen Durchschnitt.



#### Bild 28:

Darstellung der relativen Luftfeuchte in den Einhausungen (EH) und im Freigelände (FG) im wöchentlichen Durchschnitt.

Folgende zwei Auswertungen zeigen den Verlauf der Innenklimadaten während einer Woche mit tendenziell guten Wetterbedingungen (Bild 29 und Bild 31) und einer Woche mit tendenziell schlechten Wetterbedingungen (Bild 30 und Bild 32) bezogen auf das Trocknungspotential der unterschiedlichen Einhausungssysteme.



Bild 29: Der Verlauf der Innenlufttemperatur während der Schönwetterperiode zeigt ein hohes Trocknungspotential der transparenten Einhausungen.







Bild 31: Verlauf der relativen Luftfeuchte innerhalb der Einhausungssysteme während der Schönwetterperiode.



#### Bild 32:

Verlauf der relativen Luftfeuchte innerhalb der Einhausungssysteme während einer Woche mit tendenziell schlechten Wetterbedingungen.

Die tagesfeinen Darstellungen der Messwerte zeigen, dass das Trocknungspotential der transparenten Einhausungssysteme (EH1 – EH4) selbst bei schlechteren Wetterbedingungen wesentlich höher ist im Vergleich zu der Holzeinhausung. Die relative Luftfeuchte ist zumeist geringer und die Innenraumtemperatur zumeist höher.

Sehr gute Trocknungseigenschaften zeigt EH2 bei guten Wetterbedingungen. Es konnten relative Luftfeuchten von unter 20 % bei gleichzeitigen Lufttemperaturen von über 30 °C gemessen werden.

#### 5.2 Oberflächentemperatur

Hohe Temperaturspreizungen ( $\Delta$ T) zwischen Nord- und Südseite der transparenten Einhausungssysteme führen auch zu Temperaturspreizungen an der Oberfläche der Testobjekte, die zu hygrothermischer Entfestigung führen können.

Durch den solaren Energieeintrag bei den transparenten Einhausungssystemen zeigen die gemessenen Oberflächentemperaturen (OFT) auf der Nord- und Südseite des Testobjektes deutlich erkennbare Unterschiede. Dadurch, dass die gesamte Innenluft erwärmt wird, fällt  $\Delta$ T jedoch deutlich geringer aus als im Vorfeld vermutet. Die größte Temperaturspreizung betrug ca. 12 °C. Die Holzeinhausungen weisen die geringsten Temperaturspreizungen auf. (Vgl. Bild 33).



Bild 33: Verlauf der Temperaturspreizung während der Messperiode.

Anhand der Oberflächentemperaturen kann die Anzahl der Frost-Tauwechsel während der Messperiode ermittelt werden. Frost-Tauwechsel können zu Beschädigungen durch Abplatzungen führen. Die Anzahl der Frost-Tauwechsel sind in den transparenten Einhausungssystemen gegenüber der Holzeinhausung aufgrund der stärkeren Nachtauskühlung leicht erhöht.

- EH1 = 39 Frost-Tauwechsel
- EH2 = 30 Frost-Tauwechsel
- EH3 = 31 Frost-Tauwechsel
- EH4 = 56 Frost-Tauwechsel
- EH5 = 28 Frost-Tauwechsel

Der Ausfall von Kondenswasser auf der Objektoberfläche durch Unterschreitung der Taupunkttemperatur stellt einen schädigenden Einfluss auf das Objekt dar. Eine hohe Oberflächenfeuchte kann zu einem gesteigerten Organismenbewuchs führen und verstärkt die Auswirkungen von Frost-Tauwechseln. Innerhalb der Holzeinhausung bildet sich während der Messperiode deutlich mehr Tauwasser, im Vergleich zu den transparenten Einhausungssystemen. Der Zeitraum in denen die Taupunkttemperatur um mehr als 1,0 °C unterschritten wurde betrug in:

- EH1 = 47 Stunden.
- EH2 = 15 Stunden.
- EH3 = 14 Stunden.
- EH4 = 37 Stunden.
- EH5 = 187 Stunden.

Die transparenten Einhausungssysteme bieten somit günstigere Bedingungen bei der Vermeidung von Feuchteeintrag durch Kondensation und der damit verbundenen Befeuchtung der Schutzobjekte.

#### 5.3 Auswertung der Belüftungsparameter

Innerhalb der Messperiode wurde der Volumenstrom in Abhängigkeit der Globalstrahlung bestimmt. Auf dieser Grundlage wurde für jede Einhausung der Volumenstrom während der Messperiode zum Luftwechselvolumen aufsummiert. Zur Bestimmung der Luftwechselrate wurde das jeweilige Luftwechselvolumen auf das Netto-Innenraumvolumen der Einhausung bezogen. Ausnahme bildet hier die Holzeinhausung EH5, hier konnte keine Strömung nachgewiesen werden.

| Größe                                | EH1    | EH2    | EH3    | EH4 | EH5 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-----|-----|
| Luftwechselvolumen [m <sup>3</sup> ] | 39.000 | 21.000 | 39.000 | 500 | -   |
| Innenraumluftwechsel [-]             | 49.000 | 24.000 | 44.000 | 600 | -   |

Tabelle 6: Belüftung der Einhausungen während der Messperiode.

Die mechanische Belüftung erfolgt ausschließlich bei einfallender Globalstrahlung (IG) ab 80 W/m<sup>2</sup>. Diese Untergrenze wird von den elektrischen Komponenten bauteilbedingt bestimmt. Ist die mechanische Belüftung nicht in Betrieb, verhindern die verbauten Rückschlagklappen größtenteils eine natürliche Durchströmung. Die Steuerung der mechanischen Belüftung, auf Basis einfallender Globalstrahlung, führt zu kontraproduktiver Belüftung. Mit kontraproduktiver Lüftung sind ungünstige Lüftungsbedingungen gemeint, wie beispielsweise höhere absolute Feuchten im Außen- als im Innenraumklima der Einhausungen (negative Differenz der abs. Feuchte  $\Delta p$ ). In Tabelle 18 werden die Anteile von produktiver (günstige Lüftungsbedingungen) den kontraproduktiven Lüftungszeiten gegenübergestellt. Die Anzahl der produktiven Belüftungsstunden überwiegt deutlich.

#### Tabelle 7:

Gegenüberstellung der produktiven und kontraproduktiven Belüftungszeiten.

| Belüftung       | Stunden in h | Ø $\Delta \rho$ in $\frac{g}{m^3}$ | Ø $\omega$ in $\frac{m}{s}$ |
|-----------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Produktiv       | 770          | 1,3                                | 3                           |
| Kontraproduktiv | 420          | -1,0                               | 5                           |

#### 5.4 Trocknungsverlauf

Der Trocknungsverlauf der Objekte innerhalb der Versuchseinhausungen wurde anhand von gravimetrischen Messungen der Testobjekte B bestimmt. Es zeigt sich, dass alle transparenten Einhausungssysteme ein besseres Trocknungspotential aufweisen als die Holz-Einhausung. Dies zeigt sich besonders am Beginn des Trocknungsverlaufs (vgl. Bild 34 und Bild 35). Die jeweilige Ausgleichsfeuchte (AGF) der Steinsorten wurde in den transparenten Einhausungen in einem wesentlich kürzeren Zeitraum erreicht.



Bild 34: Trocknungsverlauf der Testobjekte aus Ruhrsandstein.



Bild 35:

Trocknungsverlauf der Testobjekte aus Oberkirner Sandstein.

#### 5.5 Visuelle Begutachtung der Testobjekte

Organischer Bewuchs ist das Schadbild, welcher am einfachsten nachgewiesen werden kann. Sporen von Moosen und Flechten finden sich auf den Oberflächen aller frei bewitterten Objekte, jedoch sind bestimmte Vorrausetzungen wie indirektes Sonnenlicht und konstante Feuchtigkeit für das Wachstum notwendig. An der Oberfläche des Testobjekts B (Sander Sandstein) innerhalb der Holzeinhausung ließen sich bereits in der siebten Messwoche Anzeichen von neuem, organischen Bewuchs feststellen. Bis zum Ende der Messperiode konnte dies bei keinem der anderen Testobjekte beobachtet werden.



#### Bild 36:

Anzeichen von organischem Bewuchs am Testobjekt B (Sander Sandstein) der Holzeinhausung (links), kein erkennbarer Bewuchs an den Testobjekten der transparenten Einhausungssysteme (rechts).

#### 5.6 Diskussion der Messergebnisse

#### 5.6.1 Technische Beurteilung der Projektergebnisse

Die Auswertung der gemessenen und berechneten Werte entsprach größtenteils dem aus der aufgestellten Hypothese erwarteten Verhalten. Die Daten des Innenraumklimas zeigen ein deutlich höheres Trocknungspotential der transparenten Einhausungssysteme verglichen mit einer Holzeinhausung. Das allgemein von Denkmalschützern als Vorteil anerkannte Verhalten der Holzeinhausung - Dämpfung der Temperaturamplitude, geringe Spreizung der Oberflächentemperaturen an den Testobjekten sowie die Minderung der Frost-Tau-Wechsel - können bestätigt werden. Die Dämpfung der Temperaturamplitude ist vor allem der Abschirmung gegenüber dem Nachthimmel und dem fehlenden Energieeintrag aus der Sonnenstrahlung geschuldet.

Im Hinblick auf die Minderung der Frost-Tauwechsel, zeigt die Holzeinhausung nur geringfügig bessere Ergebnisse als die transparenten Einhausungen EH2 und EH3.

Die Messergebnisse der transparenten Einhausungen mit einem mechanischen Lüftungssystem heben sich deutlich, gegenüber der Variante mit freier Konvektion, ab. Der etwas geringere Innenraumluftwechsel der EH2 mit Warmluftkollektor zeigt keinen negativen Einfluss auf den Trocknungsverlauf.

Die Trocknungskurve verläuft bei den transparenten Einhausungen annähernd identisch, unabhängig von der Art der Belüftung. Der Grund für die engen Kurvenverläufe des Feuchtegehaltes wird einerseits in der geringen Masse der Testkörper vermutet und liegt andererseits an deren Materialeigenschaften. Auch bei höheren Luftwechselraten trocknen die Steine dann nicht mehr unbedingt schneller.

Die mechanische Belüftung erweist sich, bei Betrachtung der Messwerte, bei allen Ausführungen im Vergleich zu freier Konvektion als sehr leistungsstark. Besonders die Rückschlagklappen an den Abluftöffnungen zeigten positive Effekte bezüglich des Innenraumklimas. Die Steuerung der Belüftung allein durch Globalstrahlung erscheint ausreichend – bessere Ergebnisse bzgl. des Trocknungspotentials könnten durch eine für den jeweiligen Stein optimierte Steuerung erzielt werden.

Das gereinigte Testobjekt B aus Sander Sandstein, innerhalb der Holzeinhausung EH5, zeigte als einziges Testobjekt Anzeichen von organischem Bewuchs. Während der gesamten Messperiode konnte dies bei keiner anderen Einhausung beobachtet werden.

Das Konzept des autarken Einhausungssystems erwies sich als erfolgreich. Die Nutzung der Sonnenenergie zur Erwärmung der Lufttemperatur innerhalb der Einhausungen wie auch zur Energieversorgung der mechanischen Belüftungskonzepte stellte sich als ausreichend heraus.

#### 5.6.2 Konservatorische Beurteilung des transparenten Einhausungssystems

Aus konservatorischer Sicht stellt die Nutzung transparenter Wintereinhausungen aus Membranen eine interessante Option dar, insbesondere im Hinblick auf die Präsentation der Bauten, aber auch im Hinblick auf die dauerhafte Erhaltung. Hier zeigt das Projekt positive Aspekte dieser neuen Konstruktion, wie die deutliche Reduzierung der Betauung der Skulpturen, die Anhebung der Temperatur im Winter und die deutlich schnellere Trocknung der Skulpturen.

In Hinblick auf das Wachstum von Mikroorganismen auf der Oberfläche scheint die transparente Einhausung Vorteile zu bieten. Insbesondere bei zu Beginn des Winters feucht eingehausten Skulpturen verbleibt die relative Luftfeuchte in Holzeinhausungen auf konstant hohem Niveau. Die relative Feuchte in den transparenten Einhausungen hingegen sinkt soweit ab, dass die Bedingungen weniger günstig für das Wachstum von Mikroorganismen sind. Hier sind jedoch weitere Betrachtungen notwendig.

Es muss noch eine detailliertere Betrachtung der klimatischen Schwankungen in einer transparenten Einhausung erfolgen und diese fallweise in Beziehung gesetzt werden zu verschiedenen Denkmalgesteinen. Hier bieten die Konzepte des gesteuerten Luftaustauschs eine interessante Option, die sich gezielt bedarfsgerecht auslegen lässt. In Hinblick auf die dauerhafte Erhaltung sind es weniger die absoluten Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchte, als die Klimawechsel, die Schäden an Kunst- und Kulturgut voranschreiten lassen. Hier sind insbesondere die Frost-Tauwechsel zu nennen, hygrische und thermische Dehnungsprozesse, aber auch die Kristallisation von hygroskopischen Salzen. Die gezielte Einstellung optimaler klimatischer Bedingungen ist hier von großem Vorteil, benötigt aber noch weitere Forschungs- und Anpassungsarbeit.

Wenn sich ein derartiges System im Bereich der Konservierung durchsetzen soll, müssen diese aus konservatorischer Sicht teilweise kritischen betrachteten Punkte geklärt werden. Die bisherigen, traditionellen Einhausungen aus Holz lassen den Blick auf die darunter verborgenen Werke nicht zu, schützen diese aber ebenfalls vor der Witterung, verfolgen aber das Konzept eines konstanten Klimas im Innenraum. In weiterführenden Untersuchungen wäre es daher wünschenswert, die Vorteile einer transparenten Einhausung in praxisnahem Einsatz weiter herauszuarbeiten und detaillierter darstellen zu können.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsvorhaben behandelt die Erstellung und Erprobung eines Konzeptes zum Schutz von außenexponierten Kulturgütern unter Verwendung transparenter Membranmaterialien zum Erhalt der optischen Wirkung der Schutzobjekte und einer Optimierung des bauphysikalischen Innenklimas in den Einhausungen über kontrollierte Belüftung. Es werden unterschiedliche Konstruktionsweisen und Belüftungsarten von

transparenten Schutzeinhausungen in einer winterlichen Messkampagne überprüft und mit einer herkömmlichen Holzeinhausung verglichen. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass transparente Einhausungssysteme ein hohes Trocknungspotential aufweisen jedoch stärkeren Temperatur-

und Feuchteschwankungen unterliegen.

Die Erkenntnisse sollen gezielt in die Weiterentwicklung der transparenten Einhausungssysteme einfließen. Zu untersuchen sind geeignete Maßnahmen um die Temperatur- und Luftfeuchtespreizungen zu verringern und so ein möglichst konstant niedriges Feuchteprofil bei gleichzeitig erhöhten und möglichst konstanten Innenraumtemperaturen zu erreichen. Denkbar sind diesbezüglich der Einsatz von Latentwärmespeichern, die Verringerung der Nachtabstrahlung und der Einsatz bedarfsgesteuerter Lüftungssysteme. Eine differenzierte Untersuchung, welches Einhausungssystem (transparent oder opak) in Bezug auf Steinart und Verwitterungsstadium des Schutzobjektes den höheren konservatorischen Nutzen verspricht, wird angestrebt.

Die erzielten Erkenntnisse lassen sich langfristig für weitere Entwicklungen mit ähnlichem Bedarf in anderen Anwendungsbereichen verwenden. So eignet sich der Ansatz der gezielten winterlichen Nutzung der Solarstrahlung mit kontrollierter Belüftung zur Entwicklung energetisch wirksamer, transparenter Membran-Vorsatzfassaden. Die derzeit verwendeten Vorsatzfassaden funktionieren alle entweder als reiner Witterungsschutz oder führen tendenziell zu einer sommerlichen Überhitzung.

Besonders im Gebäudebestand, vor allem aber auch an denkmalgeschützten Gebäuden, erscheint eine folienbasierte Vorsatzfassade mit kontrollierter Belüftung derzeit als eine interessante Option, um einerseits die Fassade ohne grö-Bere Eingriffe zu schützen und andererseits eine energetische Verbesserung des Gebäudes zu ermöglichen. Dies ist bei denkmalgeschützten Gebäuden ansonsten nur über eine Innendämmung, mit allen bekannten Nachteilen, realisierbar. Weiterhin bietet die Adaption der Grundtechnologie weitere vielfältige Anwendungsmöglichkeiten auch im konstruktiven Membranbau, wo bedarfsgerechte, energiesparende und einfache Lüftungskonzepte gebraucht werden.

# Bildverzeichnis

| Bild 1: Holze | einhausung im Schlosspark Nymphenburg. (Foto: TUM, Milos<br>Vlastic).  | 7  |
|---------------|--|----|
| Bild 2: Entw  | /urfsvarianten folienbespannter Rahmen.  | 9  |
| Bild 3: Entw  | vurf eines Traggestelles mit Folienhülle.  | 10 |
| Bild 4: Verg  | leichskonzept der unterschiedlichen Schutzeinhausungen.  | 13 |
| Bild 5: Ausf  | ührungsvarianten der Schutzeinhausungen im Überblick: links:<br>Holzeinhausung (EH5); mitte: folienbespannter Rahmen (EH2 –<br>EH4); rechts: Traggestell mit eingehängter Folienhülle (EH1).   | 14 |
| Bild 6: Testo | objekt A – Zeichnerische Darstellung.  | 15 |
| Bild 7: Anor  | rdnung der Sensoren innerhalb der Versuchseinhausungen.  | 16 |
| Bild 8: Stan  | dort des Versuchsaufbaus auf dem Freigelände des Fraunhofer<br>Institut für Bauphysik.   | 17 |
| Bild 9: Bere  | echnung des Innenraumklimas sowie des Feuchte- und<br>Temperaturfeldes der idealisiert implementierten Steinskulptur<br>(Testobjekt A) im Simulationsmodell der transparenten<br>Einhausung. Im Bild rechts oben ist der Verlauf der<br>Temperatur, relativen Feuchte und des Wassergehalt über den<br>Steinquerschnitt dargestellt. | 19 |
| Bild 10: Sim  | nulationsmodell in WUFI <sup>®</sup> Plus der opaken Einhausung. Im<br>rechten Bild wurden die Außenwände im opaken Modell<br>transparent eingestellt, um das idealisiert abgebildete<br>Testobjekt A (Steinskulptur) erkennen zu können.  | 20 |
| Bild 11: Sim  | ulierter Wassergehalt einer Steinskulptur aus Sander Sandstein<br>bei wechselnden klimatischen Bedingungen. (Außenklima<br>Holzkirchen 1991).  | 21 |
| Bild 12: Sim  | nuliertes Raumklima in der transparenten Einhausung mit<br>feuchtem Stein im Kontext des Außenklimas mit stündlichen<br>Werten sowie Tagesmittelwert der relativen Feuchte des<br>Raumklimas.  | 22 |
| Bild 13: Sim  | nulierter Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchte (gleitender<br>Monatsmittelwert) des Klimas in der Einhausung im Vergleich<br>zum Außenklima. Der Einfluss des Anfangswassergehalts der<br>Steinskulptur sowie die fortschreitende Austrocknung sind<br>deutlich ablesbar.   | 23 |
| Bild 14: Sim  | nulierter Verlauf des Wassergehaltes im Stein, beeinflusst durch<br>den Anfangswassergehalt der Steinskulptur in der   |    |
|               |  |    |

| transparenten Einhausung im Vergleich zu einer frei<br>bewitterten Skulptur.  | 23 |
|---|----|
| Bild 15: Simuliertes Raumklima in der opaken Einhausung mit feuchtem<br>Stein im Kontext des Außenklimas mit stündlichen Werten<br>sowie Tagesmittelwert der relativen Feuchte des Raumklimas.  | 24 |
| Bild 16: Simulierter Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumklimas,<br>beeinflusst durch den Anfangswassergehalt der Steinskulptur<br>in der opaken Einhausung im Kontext des Außenklimas als<br>gleitender Monatsmittelwert.          | 25 |
| Bild 17: Simulierter Verlauf des Wassergehaltes im Stein, beeinflusst durch<br>den Anfangswassergehalt der Steinskulptur in der opaken<br>Einhausung.   | 25 |
| Bild 18: Verlauf der Luftwechselrate für die berechneten Varianten mit<br>Durchströmungsmodell für die Fälle 1, 2, 3 und 5.   | 26 |
| Bild 19: Raumklima in der transparenten Einhausung mit feuchtem Stein<br>im Kontext des Außenklimas mit stündlichen Werten sowie<br>Tagesmittelwert der relativen Feuchte des Raumklimas für Fall<br>7 mit der Luftwechselrate n = 3 1/h. | 27 |
| Bild 20: Simulierter Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumklimas der<br>transparenten Einhausung, beeinflusst durch unterschiedliche<br>Luftwechselraten, im Kontext des Außenklimas als gleitender<br>Monatsmittelwert.             | 28 |
| Bild 21: Simulierte Verläufe des Wassergehaltes des zu Beginn feuchten<br>Steins für vier Varianten der transparenten Einhausung,<br>beeinflusst durch unterschiedliche Luftwechselraten. Die<br>Trocknung verläuft nahezu gleich.        | 28 |
| Bild 22: Vergleich des Verlaufes des Innenklimas von Holz- und transparenter Einhausung.  | 29 |
| Bild 23: Vergleich Innenklima bei unterschiedlichen Stein Anfangsfeuchten.  | 30 |
| Bild 24: Vergleich Austrocknungsverhalten der Steine.   | 31 |
| Bild 25: Austrocknungsverhalten bei unterschiedlichen Luftwechselraten.   | 32 |
| Bild 26: Vergleich der Durchschnittstemperaturen (Innenluft) von Tag und<br>Nacht während der Messperiode in den Einausungen.   | 35 |
| Bild 27: Darstellung der Lufttemperatur in den Einhausungen (EH) und im<br>Freigelände (FG) im wöchentlichen Durchschnitt.  | 37 |
| Bild 28: Darstellung der relativen Luftfeuchte in den Einhausungen (EH)<br>und im Freigelände (FG) im wöchentlichen Durchschnitt.   | 37 |

| Bild 29: Der Verlauf der Innenlufttemperatur während der<br>Schönwetterperiode zeigt ein hohes Trocknungspotential der<br>transparenten Einhausungen.  | 38 |
|--|----|
| Bild 30: Verlauf der Innenlufttemperatur während einer Woche mit tendenziell schlechten Wetterbedingungen.   | 38 |
| Bild 31: Verlauf der relativen Luftfeuchte innerhalb der<br>Einhausungssysteme während der Schönwetterperiode.   | 39 |
| Bild 32: Verlauf der relativen Luftfeuchte innerhalb der<br>Einhausungssysteme während einer Woche mit tendenziell<br>schlechten Wetterbedingungen.  | 39 |
| Bild 33: Verlauf der Temperaturspreizung während der Messperiode.  | 40 |
| Bild 34: Trocknungsverlauf der Testobjekte aus Ruhrsandstein.  | 42 |
| Bild 35: Trocknungsverlauf der Testobjekte aus Oberkirner Sandstein.   | 43 |
| Bild 36: Anzeichen von organischem Bewuchs am Testobjekt B (Sander<br>Sandstein) der Holzeinhausung (links), kein erkennbarer<br>Bewuchs an den Testobjekten der transparenten<br>Einhausungssysteme (rechts). | 43 |

## Tabellenverzeichnis

| Tabelle 1: Falluntersuchungen, die in der Parameterstudie mit WUFI Plus<br>durchgeführt wurden.   | 20 |
|---|----|
| Tabelle 2: Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen während der<br>gesamten Messperiode. (Farbliche Kennzeichnung: grün =<br>positivste Auswirkungen auf die Steintrocknung; rot =<br>negativste Auswirkungen auf die Steintrocknung).                 | 33 |
| Tabelle 3: Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen am Tage<br>während der gesamten Messperiode. (Farbliche<br>Kennzeichnung: grün = positivste Auswirkungen auf die<br>Steintrocknung; rot = negativste Auswirkungen auf die<br>Steintrocknung).      | 34 |
| Tabelle 4: Durchschnittswerte der klimatischen Bedingungen in der Nacht<br>während der gesamten Messperiode. (Farbliche<br>Kennzeichnung: grün = positivste Auswirkungen auf die<br>Steintrocknung; rot = negativste Auswirkungen auf die<br>Steintrocknung). | 35 |
| Tabelle 5: Monatsansicht der Durchschnittswerte der klimatischen<br>Bedingungen. (Farbliche Kennzeichnung: grün = positivste<br>Auswirkungen auf die Steintrocknung; rot = negativste<br>Auswirkungen auf die Steintrocknung).                                | 36 |
| Tabelle 6: Belüftung der Einhausungen während der Messperiode.  | 41 |
| Tabelle 7: Gegenüberstellung der produktiven und kontraproduktiven<br>Belüftungszeiten.   | 42 |
| Tabelle 8: Übersicht der ermittelten Folieneigenschaften.   | 52 |

# 7 Literaturverzeichnis

- Alt-Neuöttinger Anzeiger. (17. 11 2015). Abgerufen am 12. 06 2016 von http://www.pnp.de/region\_und\_lokal/landkreis\_altoetting/altoetting/1874792\_Viereinhalb -Tonnen-Pyramide-schuetzt-den-Marienbrunnen.html
- Franzen, C. (2008). Zur Erhaltung von Grabsteinen, Parkskulpturen und Kleindenkmälern. Mainz: Institut für Steinkonservierung e.V.
- Grimm, W. D. (2008). Zur Erhaltung von Grabsteinen, Parkskulpturen und Kleindenkmälern. Mainz: Institut für Steinkonservierung e.V.
- Hörenbaum, W. (kein Datum). Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk. Universität Karlsruhe.
- Kast, & Krischer. (1978). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik.* Springer Verlag.
- Kneule, F. (1974). Das Trocknen.
- Kotan, E. (2012). Ein Prognosemodell für die Verwitterung von Sandstein. TH Karlsruhe.
- (2007). Modellvorhaben: Wirkung von Schutzbauten (Vorsorgemaßnahmen) auf umweltschadensbedingten Verwitterungen von Sandstein am Beispiel des Nordportals der Benediktinerabtei Tholey. Mainz: Institut für Steinkonservierung.
- Ruedrich, J., & Rieffel, Y. (2006 2010). Entwicklung und Überprüfung von Einhausungssystemen zur Reduzierung umweltbedingter Schädigungen von außenexponierten Marmorobjekten mit dem Ziel des langfristigen Erhalts in Situ an einem national bedeutenden Objektkomplex. Berlin: DBU.
- Wölbert, O. (2005). Winterschutzverkleidungen für witterungsgefährdete Objekte. *Klimastabilisierung und bauphisikalische Konzepte ICOMOS.* Reichenau: Dörthe Jakobs.

# 8 Anhang

#### Tabelle 8:

Übersicht der ermittelten Folieneigenschaften.

| Nr. | Material         | T <sub>total</sub> (UV,VIS) | Τ <sub>υν</sub> | T <sub>vis</sub> | Reißfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> |
|-----|------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|--|
| 1   | Polyethylen LD   | 0,89                        | 0,70            | 0,91             | 26                                     |
| 2   | Polyethylen LD   | 0,89                        |                 |                  | 23                                     |
| 3   | Polyethylen LD   | 0,91                        |                 |                  | 27                                     |
| 4   | Polyethylen LD   | 0,90                        | 0,20            |                  | 20                                     |
| 5   | Polyethylen LD   | 0,91                        | 0,70            |                  | 27                                     |
| 6   | Tri-Acetat       | 0,92                        | 0,91            | 0,92             | 80                                     |
| 7   | Polyester        | 0,90                        | 0,80            | 0,90             | 42                                     |
| 8   | Polyester        | 0,89                        | 0,75            | 0,89             | 42                                     |
| 9   | Polycarbonat     | 0,88                        | 0,80            | 0,90             | 60                                     |
| 10  | Polycarbonat     | 0,90                        | 0,81            | 0,90             | 60                                     |
| 11  | Polycarbonat     | 0,89                        | 0,80            | 0,90             | 60                                     |
| 12  | Polyvinylchlorid | 0,87                        | 0,70            | 0,88             | 90                                     |
| 13  | Polyvinylchlorid | 0,87                        | 0,69            | 0,88             | 90                                     |
| 14  | Polyvinylchlorid | 0,86                        | 0,64            | 0,87             | 90                                     |
| 15  | Polypropylen     | 0,91                        | 0,90            | 0,92             | 20                                     |
| 16  | Polypropylen     | 0,90                        | 0,89            | 0,90             | 19                                     |
| 17  | Fluorpolymer     | 0,90                        | 0,85            | 0,92             | 44                                     |
| 18  | Fluorpolymer     | 0,79                        | 0,78            | 0,89             | 60                                     |

| 19 | Fluorpolymer     | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 60 |
|----|------------------|------|------|------|----|
| 20 | Fluorpolymer     | 0,90 | 0,85 | 0,93 | 50 |
| 21 | Fluorpolymer     | 0,89 | 0,84 | 0,92 | 50 |
| 22 | Polypropylen     | 0,87 | 0,72 | 0,92 | 40 |
| 23 | Polyvinylchlorid | 0,91 | 0,79 | 0,91 | 90 |
| 25 | Tri-Acetat       | 0,93 |      |      |    |
| 26 | Polyethylen LD   | 0,89 | 0,85 | 0,89 | 24 |
| 27 | Polyethylen LD   | 0,90 | 0,70 |      | 22 |