

## **Die Auswirkung der Umgebung auf Kulturgüter**

Adriana Bernardi  
CNR-ISAC Padua

Übersetzung: Christoph Merzenich

### Einleitung

Bezüglich seiner physisch-chemischen Charakteristika unterliegt ein jedes Objekt Umwandlungs- und Veränderungsprozessen, die im Laufe der Zeit zu dessen unaufhaltsame Zerstörung führen. Dennoch kann man versuchen, durch gezielte Maßnahmen die Alterungs- und vor allem die Zerstörungsprozesse zu verlangsamen: Wenn es nicht möglich ist, das zu verhindern, was die Natur auferlegt, so kann man zumindest dem vorbeugen, was das antropische Eingreifen und die hiermit einhergehenden Prozesse angeht.

Man unterscheidet verschiedene Arten der Materialveränderung: 1) chemische (geschuldet der Natur des Materials oder auch der Wechselwirkung mit z.B. Substanzen in der Atmosphäre oder auch mit der Strahlung), 2) physikalische (Stress bedingt durch thermisch-hygrische Zyklen bei der Gleichgewichtsherstellung nach Klimaschwankungen; durch Schadstoffniederschlag auf der Oberfläche), und 3) biologische (Angriff von Mikroorganismen infolge bestimmter mikroklimatischer Bedingungen).

Der heutige Genuss von Kunst durch Besuchermassen vergrößert die Problematik. Hierzu gehören die Schwankungen des Mikroklimas und die hierauf folgenden kontinuierlichen thermo-hygrometrischen Zyklen. Zudem kann die gleichzeitige Immission von Schadstoffen später mit den wertvollen Oberflächen reagieren.

Früher war der Genuss von Kunstgut das Privileg weniger. Die diesbezüglich zwischenzeitlichen Errungenschaften haben eine Serie neuer Probleme entstehen lassen – zum Nachteil des Kunst- und Kulturguts.

Zu ihrem Erhalt benötigen Kunstwerke geeignete Umweltbedingungen, die allerdings nicht unbedingt denen des menschlichen Wohlbefindens entsprechen. Und sehr häufig gesteht man dem Publikum heutzutage viele, nicht immer zum Vorteil des Kunstwerks reichende Rechte zu: Sie schlagen sich in Veränderungen des Umfeldes nieder (unachtsamer Gebrauch von Heizungen, Klimaanlage und Beleuchtungssystemen etc.). Dennoch kann vieles mit entsprechenden Entscheidungen verbessert werden - auch wenn hierbei nur ein „akzeptabler Kompromiss“ zustande kommt. „Erhalten“ bedeutet in der Tat: so wenig wie möglich eingreifen. Das heißt: Vorbeugen durch Schaffung eines für das Kunstwerk geeigneten Umfeldes. „Erhalten“ heißt auch: Planung von Eingriffen unterschiedlichster Art, die die Ursachen der Zerstörung abstellen und die die Anzahl der andernfalls notwendigen Restaurierungseingriffe weitestmöglich reduzieren. Bei einer solchen Planung bedarf es auch viele äußere Umstände zu bedenken. Man vergesse etwa nicht, dass der architektonische Behälter bereits selbst ein historisches Gebäude sein kann, das es zu schützen und zu erhalten gilt und aufgrund dessen geringe Freiheit des Eingreifens bietet.

In Bezug auf die Lösung grundsätzlicher Probleme beim Erhalt von Kunst- und Kulturgut haben sich in den letzten Jahrzehnten die Atmosphärenphysik und insbesondere auch die Mikroklimatologie als sehr wichtige Wissenschaften herausgestellt. Denn es ist wünschenswerter, Zerstörung vorzubeugen als kontinuierlich zu restaurieren: Den besten Erhalt eines Kunstwerks gewährleisten geeignete Umweltbedingungen.

Auf nationaler wie internationaler Ebene wurden in den letzten Jahren viele wissenschaftliche Studien mit dem Ziel durchgeführt, die Ursachen für die Zerstörung des Kulturgutes festzustellen, Rahmenwerte für die Umwelt zu definieren sowie Richtlinien für diejenigen zu erarbeiten, die auf dem Gebiet des Kunsterhalts tätig sind. Die Diskussion ist noch nicht abgeschlossen, denn in der Wissenschaftswelt besteht immer noch keine einhellige Übereinstimmung hinsichtlich der einzuleitenden Maßnahmen. Das Thema ist äußerst komplex, und zahlreich sind die zu beachtenden Umweltvariablen. So sind auch die Konsequenzen nicht immer klar oder kurzfristig direkt erkennbar. Konsens besteht allerdings in Bezug auf die hohe Korrelation zwischen Mikroklima und Zerstörungsphänomenen.

Das Studium des Mikroklimas bedeutet: Analyse der Umgebung, in der sich das Kunstwerk (Bild, Skulptur oder ganzes Gebäude) befindet. Das heißt: die realen Umweltbedingungen festzustellen und – wenn nötig – einzugreifen, um (im Sinne von Stabilität im Umfeld des Kunstwerks) zu optimieren.

An diesem Punkt fragt man sich nun: Welches sind die besten Umweltbedingungen? Und die Antwort lautet: Es gibt keine festen Grenzwerte. Eine solche Information ist zu starr, schematisch und verallgemeinernd und kann sogar zu ernststen Schäden führen. Ein Objekt, das über Jahrhunderte, ja möglicherweise über Jahrtausende, unter bestimmten mikroklimatischen Bedingungen existiert hat, kann irreversiblen Schaden erleiden, wenn es in ein abweichendes Mikroklima umgesetzt wird – auch wenn letzteres den – laut Literatur - sogenannten „optimalen Bedingungen“ entspricht. Auch wenn sie das Ergebnis wissenschaftlicher Laboruntersuchungen sind, erweisen sich solche Vorgaben häufig als zu schematisch und verallgemeinernd. Materialproben werden in solchen Untersuchungen häufig als vergleichbar betrachtet, auch wenn es sich hierbei nicht um dasselbe Material handelt. Dies gilt vor allem auch in Bezug auf die spezielle Vorgeschichte des Objektes.

Die geeigneten Bedingungen unterscheiden sich zudem von Material zu Material. Da Kunstwerke von sehr unterschiedlicher physikalisch-chemischer Natur sein können, sind deren Anforderungen hinsichtlich der Bedingungen ebenfalls unterschiedlich. Das heißt: Das Konzept des „Geeignetseins“ für ein bestimmtes Material, kann - im Vergleich zu anderen Materialien - unterschiedlich ausfallen. So fällt es beispielsweise nicht schwer, sich vorzustellen, dass die klimatischen Bedingungen für Holz oder Papier wesentlich restriktiver sind als für Stein oder Metall.

Die Nennung von Schwankungsbereichen der Relativen Luftfeuchte (RL) für Materialien kann mitunter gefährlich sein. Es ist in der Tat bekannt, dass jedes Material eine eigene Porenverteilung hat. So füllen sich die Poren entsprechend ihres Durchmessers bei unterschiedlicher RL mit Wasser – und dies auch unter 100% RL. Folglich bietet das Absenken im Ausstellungsbereich der RL unter 100% keine absolute Garantie gegen Kondensbildung in den Mikrohohlräumen. Jedes Material hat seinen eigenen mehr oder minder großen Toleranzbereich hinsichtlich thermo-hygrometrischer Schwankungen. Es bedarf folglich einer genauen Analyse, bevor man unterschiedliche Materialien in dasselbe Ambiente stellt (auch wenn es ästhetisch angenehmer, da nicht so monoton ist). Wenn zum Beispiel die Feuchte im Holz über 20% steigt (was einer hohen RL entspricht), wird bei zu hoher atmosphärischer Stabilität das Wachstum von Mikroorganismen begünstigt, oder – wenn es sich um Fresken handelt – kann, wie häufig zu beobachten, niedrige RL das Kristallisieren von Salzen (die sich immer im Baumaterialien befinden) verursachen.

Zu große Heterogenität des Ausstellungsmaterials erschwert zudem extrem die Verwaltung des Mikroklimas. Für einen Ausstellungsort ist es daher gute Regel, stabile thermo-hygrometrische Bedingungen in den korrekten Schwankungsgrenzen der einzelnen Materialien zu schaffen.

Ein Kunstwerk kann aus verschiedenen Gründen – seien sie nun physikalischer, chemischer oder auch biologischer Art – zerstört werden. Doch sind es die mikroklimatischen Bedingungen, die diese Stressbelastungen für das Material steuern. Das Realisieren „geeigneter“ mikroklimatischer Bedingungen ist daher für den Erhalt von Kunst- und Kulturgut das erste (auch wenn nicht immer leicht) zu lösende Problem. In der Tat sind die Problematiken unzählig. Viel zu häufig simplifiziert man hierbei den Sachverhalt, indem man sich auf einige wenige Variable (Feuchte und Temperatur) konzentriert. Zahlreiche Studien an verschiedensten Monumenten<sup>1</sup>, die sich hinsichtlich klimatischer Bedingungen, des Bautyps (alt oder neu), der Nutzungspolitik etc. unterscheiden, haben gezeigt, dass eine jede Situation sich von der anderen sehr unterscheidet. Um praktische Lösungen zur Verbesserung der Umfeldbedingungen zu finden und einzuleiten, bedarf es daher genauer Kenntnisse hinsichtlich des spezifischen Mikroklimas.

Die hierbei gefundenen Lösungen sind allerdings nur „Kompromisse“, jenseits derer man - in Anbetracht der unterschiedlichen und z.T. auch widersprüchlichen Anforderungen - nicht gehen kann. Das Reduzieren der Zerstörungsphänomene und die Lebensverlängerung eines Kunstwerks stellen auf jeden Fall einen großen Erfolg dar.

---

<sup>1</sup> Sixtinische Kapelle, Rom; „Letztes Abendmahl“ von Leonardo da Vinci, Mailand; British Museum, London, Musées de Louvre, Orangerie und Sainte Chapelle, Paris; Königliche Museen, Antwerpen; Kölner Dom; Uffizien Florenz; Museo Correr, Venedig etc., siehe Bibliographie.

Die Analyse des Mikroklimas muss daher die Basis für eine jegliche Erhaltungsmaßnahme bilden: Sie erlaubt es, die Umfeldbedingungen und den Verlauf der verschiedenen Variablen (Oberflächentemperatur, Relative und Spezifische Luftfeuchte, Taupunkt etc.) zu kennen sowie Momente größeren Stresses oder der Schadstoffdeposition sowie die korrekte Führung derjenigen Kräfte festzustellen, welche interne Gradienten und Stress verursachen (Beleuchtung, Klimaanlage, Heizungssysteme).

Probleme:

Zur Schaffung eines geeigneten Ambientes für sensibles Kunst- und Kulturgut (Museum, Bibliothek etc.) bedarf es bei der Planung von Maßnahmen folgender Überlegungen (aufgrund eines wenig umsichtigen Betriebs werden potentiell geeignete Milieus häufig der eigentliche Auslöser für Zerstörungsprozesse):

1) Innerhalb der akzeptablen Mittelwerte eines jeden Materials sollten die mikroklimatischen Bedingungen stabil sein. Beim größeren Teil der Materialien sollte die Relative Luftfeuchte nicht zu hoch und nicht zu niedrig sein. Denn beide Extreme sind Ursachen für Zerstörungsprozesse (biologische oder irreversible Veränderung des Materials selbst).

2) Der Einbau eines Heizungssystems oder einer Klimaanlage ist sehr sorgfältig zu überlegen und zu planen. Vor allem gilt es, die Notwendigkeit genau abzuwägen: Gebäude haben selbst eine gewisse Thermik und folglich eine gewisse thermische Trägheit. Zudem verweilen die Besucher in der Regel nicht lange. Wenn man also eine Heizung einbauen will, so bedarf es - in Hinblick auf die zu erhaltenden Kunstwerke - eines genauen Abwägens hinsichtlich der Art und des Standortes. Das Betreiben der Anlage muss zudem sehr umsichtig erfolgen (nicht intermittierend, Laufzeiten), Einstellen auf die geeigneten thermo-hygrometrischen Werte der Umgebung. Ein schlechter täglicher Betrieb schafft häufig die größten Probleme.

3) Eine gute Isolierung der täglichen Klimaschwankungen, die im Inneren absolut nicht bemerkbar sein sollten, besorgt eine thermisch nicht leitende Decke (insbesondere bei Außendecken) sowie eine gute Belüftung des Dachbodens.

4) Einen konstanten Wärme- und Dampfzufluss sowie -abfluss erhält man durch die Kontrolle der Besuchermenge sowie der Verweildauer des Publikums in den Räumen.

5) Die in einem Saal ausgestellten Materialien sollten so weit wie möglich homogen und passend ausgewählt sein, so dass die thermo-hygrometrischen Bedingungen im Inneren in Funktion der klimasensiblen Materialien reguliert werden können und nicht umgekehrt.

6) Die thermo- hygrometrischen Bedingungen müssen vor allem in Funktion der ausgestellten Materialien und nicht in Funktion menschlichen Wohlbefindens festgelegt werden.

7) Beleuchtungssysteme sind in Hinblick auf die geringste Wärmeverteilung zu beurteilen. Bei der Planung sind der unerwünschte Transport von Luftpartikeln sowie die hiermit einhergehende Deposition von Schadstoffen zu berücksichtigen.

8) Direkte Sonneneinstrahlung ist unbedingt zu vermeiden. Die betreffenden Fenster sind mit Spezialfiltern, die den unerwünschten Teil des Lichtspektrums (UV und IR) herausnehmen, zu versehen. Die Fenster in solchen Räumen dürfen auf keinen Fall nach Lust und Laune geöffnet werden, sondern dienen vor allem zur Verbreitung diffusen Lichtes, das immer künstlichem Licht vorzuziehen ist.

9) Der Austausch von Luft unterschiedlich thermo-hygrometrischen Gehalts mit der Außenwelt sowie den angrenzenden, anders genutzten Räumen (z.B. Studienräume, Magazine) ist zu vermeiden. Die Zugänge sollen daher so angelegt sein, dass bei jedem Öffnen Luftaustausch vermieden wird. Der Luftaustausch soll über spezielle Kanäle erfolgen. Hierbei muss die Luft bei ihrer Immission vorher thermo-hygrometrisch behandelt und gefiltert werden. Zur Vermeidung unerwünschter Zirkulation sollte die Geschwindigkeit minimal sein, einen ausreichenden täglichen Austausch allerdings garantieren.

10) In den Räumen ist thermische Stabilität anzustreben, um den vertikalen Transport von Schadstoffen zu vermeiden: Ein vertikal-thermischer Gradient verhindert die Bildung konvektiver Zellen, die die atmosphärischen Schadstoffe nach oben transportieren.

11) Die Reinigung hat mit speziellen Maschinen zu erfolgen, die keinen Wasserdampf freisetzen und die bereits deponierten Partikel nicht wieder in die Luft wirbeln. Geeignet sind Staubsauger, die über spezielle Rohrleitungen den Staub direkt nach außen abgeben.

#### Analysemethoden

Die Herangehensweise bei einer mikroklimatischen Analyse basiert auf einigen fundamentalen Schritten, die sich wie folgt kurz zusammenfassen lassen:

- 1) Kenntnis des Mikroklimas vor einem jeglichen Eingriff mittels einer Serie wissenschaftlicher Umfeldanalysen.
- 2) Feststellen der Ursachen für das Abweichen von dem – für das auszustellende Material – angestrebten Klima.
- 3) Festlegen der notwendigen Maßnahmen.
- 4) Ausführung vor allem passiver Maßnahmen (i.e. die keine Energie benötigen)
- 5) Erneute Kontrolle des Mikroklimas in Bezug auf die ursprüngliche Planung.
- 6) Bei Nichterreichen des Ziels: Erwägung weiterer Maßnahmen – diesmal aktiver Art (i.e. mit Energienutzung) doch in vorsichtiger und gut geplanter Weise.
- 7) Festlegung eines Protokolls zur täglichen Überprüfung.

Mit diesen nicht zerstörerischen Methoden können die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und dem Manufakt studiert, sowie die Ursachen für mikroklimatisch bedingte Veränderungen herausgestellt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Ursachen für die Veränderungen herauszufinden und nützliche Vorschläge hinsichtlich der betroffenen Klimata im Ausstellungsbereich zu unterbreiten.

Die Untersuchung des Mikroklimas erfolgt nach einer bereits mehrfach beschriebenen Methodologie (siehe Bibliographie). Sie besteht in der Ausführung kontinuierlicher Messungen, alternierend mit intensiven Kampagnen (Dauer: einige Tage), die während der verschiedenen Jahreszeiten (zumindest im Sommer und Winter) erfolgen. Auf diese Weise beobachtet man die Bedingungen während eines ganzen Sonnenjahres. Zudem werden die klimatischen Schwankungen am Ort bei unterschiedlicher Betreibung während der verschiedenen Jahreszeiten abgedeckt. Es werden die wichtigsten thermohygrometrischen Parameter (direkt oder mit Hilfe spezieller mathematischer Formeln extrapoliert) erhoben: Temperatur (T) der Luft und einiger Oberflächen; Spezifische Feuchte (SF); Relative Feuchte (RF) und Abstand zum Taupunkt (TP). Die hieran anschließende Auswertung bietet Einblick in die Dynamiken, deren räumlichen und zeitlichen Verlauf. Dies gilt auch in Bezug auf die Vertikale (Untersuchung der atmosphärischen Stabilität), und auf die Horizontale (Beobachtung des Austausches zwischen Atmosphäre und Manufakt und der Gradientenverteilung).

Es werden zudem anemometrische Messungen ausgeführt sowie Messungen der Partikelkonzentrationen in Abhängigkeit ihrer dimensional Verteilung in der Atmosphäre (die großen und die feinen unterliegen unterschiedlichen Niederschlagsprozessen). Das Ziel ist die Feststellung der Niederschlagsprozesse auf dem Kunstwerk. Unter Niederschlagsprozessen versteht man Prozesse, die zum Anhäufen von Partikeln auf den Oberflächen führen und als gravitatisch, inert, foretisch, steffansche etc. klassifiziert werden und - in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers sowie der mikroklimatischen Bedingungen - mehr oder weniger effizient sind.

#### Beispiele mikroklimatischer Untersuchungen

Die verschiedenen Fallstudien, die hier kurz präsentiert werden, zeigen, dass die Durchführung mikroklimatischer Untersuchung sich nicht einfach auf die Beobachtung von Temperatur und Umgebungsfeuchte beschränkt, sondern auch die Berücksichtigung einer Reihe räumlich und zeitlich gestaffelter Phänomene bedeutet. Nur eine solche umfassende Betrachtung sowie enge interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu korrekten Lösungen.

Das Betreiben („gestione“) des Gebäudes; aktive und passive Maßnahmen

Es ist immer vorzuziehen, das Ambiente in seinem natürlichen Verhalten, in Funktion der architektonischen Struktur und des lokalen Außenklimas zu kennen. Hierzu studiert man es eingehend während der verschiedenen saisonalen und täglichen Zyklen. Nur nachdem die Eigenheiten bekannt sind, gilt es das Gebäude in seiner ganzen Potenzialität bei der Stabilisierung des Mikroklimas zu nutzen. Hierzu greift man auf Hilfsmittel zurück, die als „passiv“, i.e. weniger invasiv, zu bezeichnen sind, und die keine Energie für ihr Funktionieren benötigen. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang etwa die thermische Isolierung, das Abschirmen vor direkter Sonneneinstrahlung, die Verwendung von Materialien wie etwa Holz, die dazu beitragen, die RL konstant zu halten. Diese sind den schneller angegangenen (teuren und raffinierten) „aktiven“ Maßnahmen vorzuziehen. Aufgrund unvollständiger Kenntnis hinsichtlich des zu behandelnden Ambientes werden letztere in der Tat häufig unkorrekt geplant und anschließend ebenso unkorrekt betrieben (indem sie etwa in der Abgabe von Wärme und/oder Wasserdampf übertreiben). Dies könnte im Fall privater Nutzung unbedeutend sein (wenn nicht unter dem Aspekt des Energieverbrauchs), doch im Zusammenhang von Räumlichkeiten zur Lagerung und Ausstellung von Kunst- und Kulturgut ist es unbedingt zu vermeiden. Der unnötige Zufluss von Energie und/oder Wasserdampf hat unerwünschte Effekte zufolge: Ein jeglicher Exzess an Energie und/oder Wasserdampf kann sich in überflüssigen thermohygro-metrischen Zyklen der dort aufbewahrten Materialien niederschlagen. Eine gute thermische Isolierung der Decken, vor allem wenn sie direkt nach Außen exponiert sind, oder eine gute Lüftung des Zwischendachs sind unerlässliche Maßnahmen in Hinblick auf eine gute Isolierung der täglichen Klimaschwankungen, die sich keinesfalls im Inneren durchschlagen sollen. Dies zeigen deutlich die zahlreichen Klimamessungen, die in den letzten Jahren bei vielen Museen und Ausstellungsräumen gesammelt wurden.

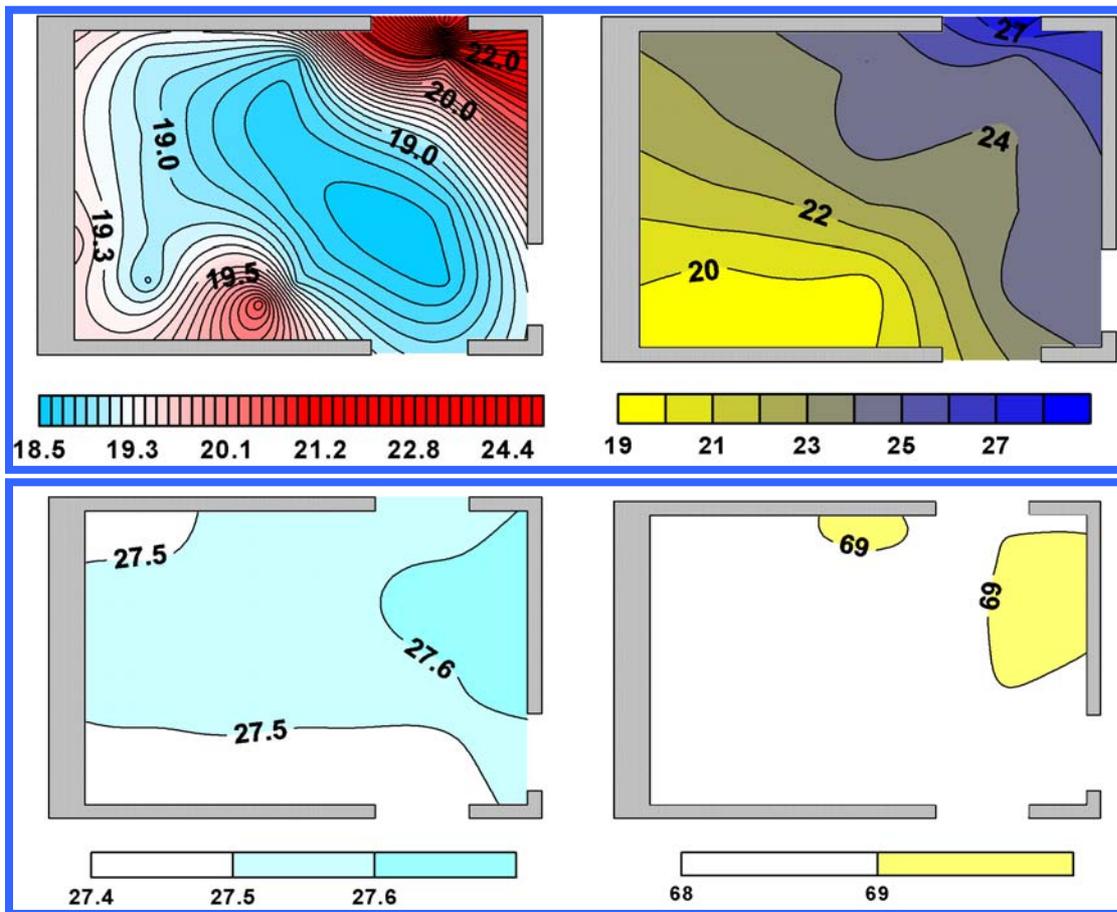
Das British Museum in London liefert eine anschauliche Bestätigung für das oben Gesagte. Es handelt sich um ein altes Gebäude und ist aufgrund seiner Charakteristika im Grunde sehr gut geeignet. Die Untersuchungen, die in zwei verschiedenen Zonen mit unterschiedlicher Betreibung ausgeführt wurden, erwiesen sich als ausreichend. Die erste Zone betrifft die Ägyptischen Säle. Hier lagen während des Messungszeitraums zahlreiche Kräfte vor – vor allem: einströmende Außenluft; Sonneneinstrahlung durch ein transparentes Dach; hohe Besucherzahl; intermittierendes Heizungssystem mit Abgabe heißer Luft; punktuelle Immission der Luft über Bodengitter. Dies alles war Ursache für stark variable Gradienten, mit einer RL die an bestimmten Punkten 18-20% erreichte und für die dort ausgestellten sehr sensiblen Objekte (Mumien, Sarkophage, etc.) extrem gefährlich war. Ein anderer Bereich hingegen, i.e. die „Special Exhibition Gallery“ (keine direkte Heizung, kein direktes Sonnenlicht; kein direkter Lufteintrag von außen, keine großen Publikumszahlen) zeigte extrem stabile Konditionen mit nur geringer Bildung von räumlichen und zeitlichen Gradienten. Dies macht den Raum – trotz der gleichen Struktur - geeignet für die Aufbewahrung von Kunstwerken.

Die Sixtinische Kapelle in Rom ist ein weiteres bestes Beispiel für eine komplexe Situation. Das Gebäude - alt, mit dicken Mauern - weist bei ungestörter Situation - gute mikroklimatische Bedingungen auf. Während der Öffnungszeiten verursachen die Menschenmassen jedoch eine beträchtliche Veränderung des Mikroklimas: Es entstehen markante zeitliche und räumliche Gradienten. Zusammen mit anderen vorgeschlagenen Maßnahmen (Fußbodenbelag, Beleuchtung, Ratschläge allgemeiner Art) wurde zudem auch vorgeschlagen, mit alternativen Systemen die Verweildauer des Publikums im Raum zu beschränken. Die von den Verantwortlichen gewählte Lösung war hingegen die Installation eines hoch raffinierten Kontrollsystems. Dieses konnte auch – wenn gut geplant und ausgeführt - eine akzeptable Lösung darstellen, auch wenn es wesentlich mehr Risiko in sich barg und zudem teuer war. In der Tat, die negativen Aspekte dieser Art von Lösung sind, dass die Systeme der automatischen Kontrolle außer Tarierung geraten, kaputt gehen oder auch nicht perfekt eingestellt werden, wenn zum Beispiel der hierfür vorgesehene Fachmann nicht da ist. Aus diesen Gründen sollten solche Systeme nur gewählt werden, wenn keine anderen, weniger risikoreichen Lösungen zur Verfügung stehen. Man beobachtet nämlich gar nicht so selten Schäden, die genau auf das Ausfallen der Klimakontrollsysteme zurückzuführen sind (bedingt einerseits durch das unvorhergesehene Ausfallen während ungünstiger Klimasituationen, und andererseits durch plötzliches Wiederanstellen).

Es gibt freilich Situationen, die solche technischen Lösungen erfordern – insbesondere wenn das Milieu sich als für die Aufbewahrung von besonders delikaten Kunstwerken als nicht geeignet erweist. Dies ist zum Beispiel bei modernen Gebäuden mit geringer thermischer Kapazität der Fall, oder auch bei älteren Gebäuden, bei denen man beispielsweise das oberste, mit dem Dachboden in Kontakt stehenden Geschoss nutzt. Auch wenn dieser Raum gut isoliert ist, weist er nicht unbedingt die

thermische Trägheit auf, um die äußeren Einwirkungen (Tag-Nacht- und auch des Jahreszyklus) abzufangen.

Abb. 1: Palazzo Chiericati (Vincenza – Italien)



Temperatur (°C)

Relative Feuchte (%)

Thermo-hygrometrische Verteilung in zwei Sälen vor und nach Durchführung der Maßnahmen.

Ein Beispiel hierfür liefert die Vergrößerung des Palazzo Chiericati von Andrea Palladio in Vicenza (Italien) (Abb. 1). Im Jahr 1987 sollte im obersten Geschoss des Palazzos eine neue Bilderabteilung eingerichtet werden. Bei den angefundnen Bedingungen hätten die vorgeschlagenen „passiven“ Methoden – wie etwa: thermische Isolierung, Kontrolle der Öffnungen, Beleuchtung mit geringer Energieabgabe, Windfang am Publikumseingang, Vinylteppiche zum Binden des Staubes etc.- das Raumklima stabilisiert. Durch Verminderung der thermo-hygrometrischen Zyklen sowie der Luftschadstoffe hätte man einen für die Aufbewahrung/Ausstellung von Kunstwerken geeigneten Raum erhalten. Die klimatischen Bedingungen erfreuten allerdings nicht im gleichen Maß das Publikum mit seinem ganz anderen „Wohlfühl“-Forderungen. In dem vorliegenden Fall reichte somit die einfache Umsetzung einiger passiver Maßnahmen nicht dazu aus, alle Forderungen, i.e. die der guten Konservierung als auch des menschlichen Wohlbefindens, zu befriedigen. Und es erwies sich als notwendig, ein aktives (wesentlich teureres und anfälligeres) System der Klimakontrolle einzurichten. In diesem konkreten Fall gab es jedoch auch noch eine weitere einfache Lösung, die man vor Einleitung der entschiedenen Maßnahmen direkt nach der ersten Analyse hätte umsetzen können: Es wäre in der Tat einfacher gewesen, die Aufstellung der Kunstwerke im Museum zu überprüfen und etwa die Gemälde in das tieferliegende Geschoss zu verlegen. Aufgrund der natürlichen Verhältnisse verfügt letzteres über geeignete klimatische Bedingungen. In das obere Geschoss hätte man dann die Münzen und andere Objekte verlegen können, die weniger anfällig auf Klimaschwankungen reagieren.

#### Probleme der Klimatisierung und des Heizens

Das Einsetzen von Heizungs- und Klimatisierungssystemen ist einer der delikatesten Punkte auf dem Gebiet des Erhalts von Kunst- und Kulturgut. In der Tat werden Klimatisierungs- und Heizungssysteme im allgemeinen in Hinblick auf das Wohlbefinden des Menschen eingerichtet, das häufig nicht mit dem der Kunstwerke übereinstimmt. Die Realisierung von Klimaanlage und Heizungen ist daher eine Maßnahme, die sehr genau erwogen und geplant werden muss. „Angenehme“ Bedingungen erreicht man häufig durch Heizungssysteme und Klimaanlage, die an bestimmten Punkten in den Räumen (mitunter auch unter oder in nächster Nähe zu den Kunstwerken) Luft abgeben, die ihrerseits in ihren thermo-hygrometrischen Charakteristika sehr unterschiedlich zum restlichen Raum sind und aufgrund dessen besonders markante Gradienten ausbilden. Zur Vorbeugung solcher Gradienten werden mitunter Luftbe- oder Luftentfeuchter hinzugesetzt. Sie sollen die thermischen Auswirkungen gegenbalancieren und eine konstante Relative Luftfeuchte bewirken. Dies hat allerdings zur Konsequenz, dass sie an anderen Stellen Gradienten erzeugen, die – im Gegensatz zu den vorherigen – auch hygrometrischer Art sind.

Ein Beispiel liefert der Louvre in Paris, wo in der Sammlung italienischer Malerei ein diskontinuierlich laufendes Heizungssystem in Kombination mit einigen, nicht richtig auf die thermische Bewegung eingestellten Luftbefeuchtern (aufgestellt in den Ecken des Saales) in verhältnismäßig kurzer Zeit beträchtliche thermische und hygrometrische Schwankungen erzeugen (Abb. 2).

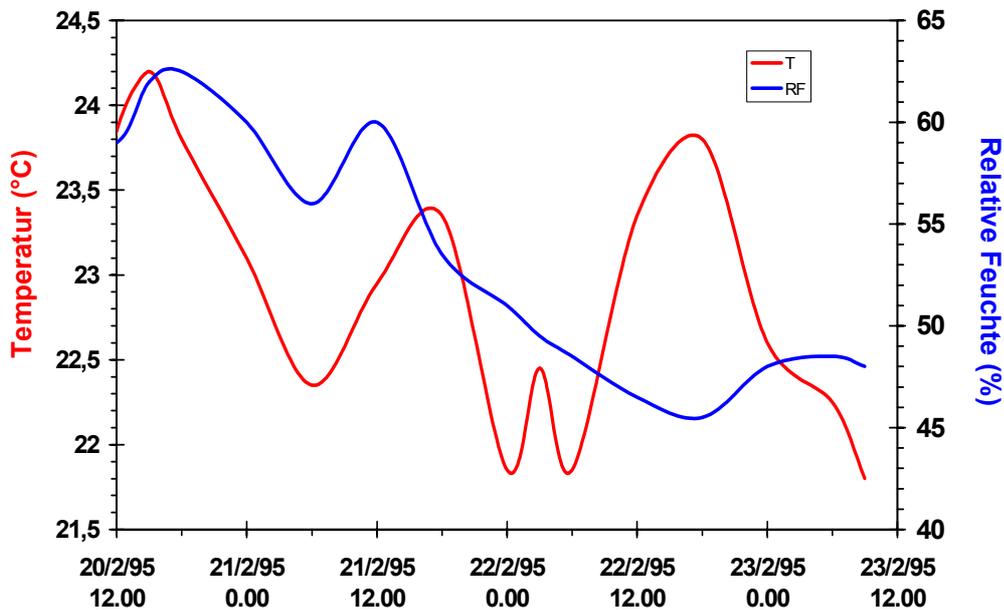


Abb. 2: Musée du Louvre, Paris – Italienische Malerei  
Nicht akzeptable Temperatur- und Feuchtwerte innerhalb eines kurzen Zeitraums infolge diskontinuierlichen Heizens und Befeuchtens.

Daher gilt es, die effektive Notwendigkeit eines Heizungssystems und/oder einer Klimaanlage zu überprüfen. Hierbei sollte man auch bedenken, dass die Besucher nur durchgehen und nicht lange verweilen. Wenn man nichtsdestotrotz ein Heizungssystem installieren will, sollte dieses sehr umsichtig bedient werden. Das Anstellen sollte nicht intermittierend erfolgen, und die Regulierung sollte auf die geeigneten thermo-hygrometrischen Werte des Ambientes abgestimmt sein.

Die Aufstellung muss fern von den Kunstwerken erfolgen, da in deren Nähe die thermo-hygrometrischen Gradienten merklich markant sein können.

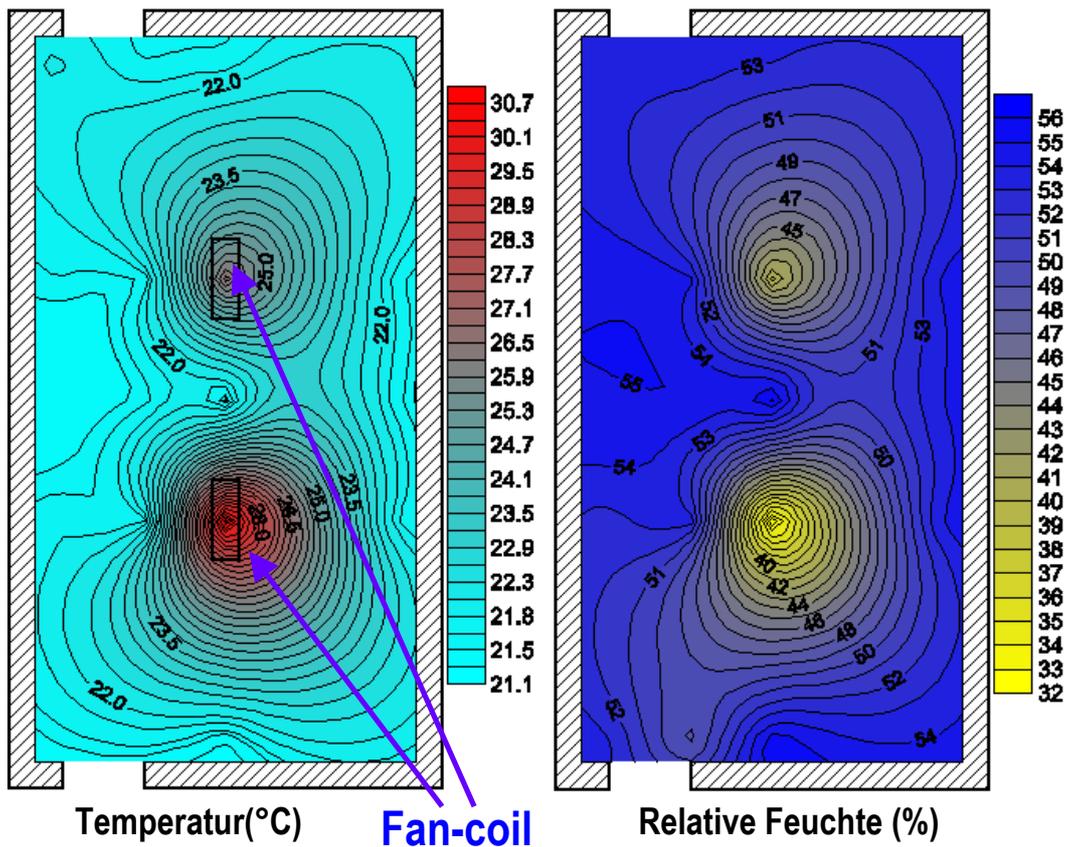


Abb. 3: Koninklijk Museum voor Schone Kunsten, Anwerpen, Room T – 12.02.1999, 10:00am

Auswirkung des Heizungssystems auf die thermische und hygrometrische Verteilung (Fan-coil)

Ein Beispiel stammt aus dem Museum in Antwerpen (Abb. 3), wo Radiatoren im Zentrum einiger Säle markante Gradienten erzeugen. Sehr markant sind diese in den Bereichen fern von den (an den Wänden aufgehängten) Kunstwerken, die folglich diese Veränderungen nur schwach mitbekommen.

Heizungs-, Klimatisierungs- sowie die Beleuchtungssysteme werden aus verschiedenen Gründen in der Regel diskontinuierlich gebraucht. Für den Erhalt von Kunst- und Kulturgut ist dies kein geeignetes System: Die Intermettenz erlaubt nämlich kaum thermo-hygrometrisch stabile Bedingungen herzustellen. Während des Einschaltens gibt ein solches System abrupt exzessive Energie ab. Die Wahl eines geeigneten und kontrollierten Heizungs- und Klimatisierungssystems, das man auf einem energetisch niedrigeren Niveau benutzt, erfüllt sicher besser die Forderung nach Stabilität. Bei rechter Wahl kann man auch – im Vergleich zu den üblichen Wohnungssystemen – Energie einsparen. Häufig verursacht das schlechte tägliche Betreiben größere Probleme.

Freilich ist die Energieeinsparung kein primäres Ziel beim Erhalt von Kunst- und Kulturgut, doch ändert dies nichts an der Tatsache, dass falsche technologische Entscheidungen zu einer größeren Energievergeudung führen. Dieser Aspekt sollte natürlich vermieden werden: Das Zuführen von mehr Energie bedeutet größere Wärmezufuhr, bedeutet Temperaturanstieg, bedeutet thermo-hygrometrische Zyklen, bedeutet in letzter Konsequenz Stress und Beschädigung.

Dies alles ist das evidente Ergebnis auch der zahlreichen mikroklimatischen Untersuchungen, die seit vielen Jahren in einigen Ausstellungsräumen der Uffizien (Sala di Giotto, Leonardo, Pollaiuolo und Botticelli) durchgeführt werden. Aufgrund einer komplexen Situation erweisen sich im konkreten Fall der Uffizien die Lösungen zur Verbesserung des Mikroklimas nicht immer als leicht. Die oben zitierten Studien beispielsweise brachten nämlich hervor, dass in den Ausstellungsräumen des Giotto und Leonardo nicht immer konstante thermo-hygrometrische Bedingungen vorliegen, so wie sie die Museumsleitung mit den später eingeleiteten Maßnahmen hat realisieren wollen. Die „Sala di Giotto“

ist nicht klimatisiert, wohingegen die „Sala di Leonardo“ 1991 mit einem raffinierten System ausgestattet worden ist. Nichtsdestotrotz erweisen sich die thermo-hygrometrischen Bedingungen in den beiden Sälen nicht als substantiell unterschiedlich – im Gegenteil zu dem, was man sich nach den Maßnahmen im Leonardo-Saal erhofft hatte. Dies ist die Konsequenz einer Serie von aktuellen Problemen – hierunter das des intermittierenden Heizungs- und Klimatisierungssystems. Zu bestimmten Augenblicken des Tages weisen nämlich beide Räume Orte mit markanten Gradienten auf, die sich durch das Eindringen thermo-hygrometrisch unterschiedlicher Luft aus benachbarten Räumen erklären. Zudem bewirkt die Wasserdampfabgabe der Luftbefeuchter, die die trocken-warme Luft des zentralen Klimatisierungssystems (im Giotto-Saal durch Luftimmission aus der Decke) gegenbalancieren soll, lokale Gradienten der Spezifischen Feuchte. Im Leonardo-Saal hingegen bilden sich die Gradienten, außer durch den Austausch mit den angrenzenden Räumlichkeiten, auch durch die spezielle Zirkulation der klimatisierten Luft durch die Lüftungsgitter. Die damals bereits existierenden Gitter wurden 1991 gezwungenermaßen genutzt, um die Eingriffe in die alte Struktur soweit wie möglich zu begrenzen.

Auch in den Sälen des Botticelli und des Pollaiolo sind die Konditionierungssysteme schlecht reguliert und werden durch Luftbefeuchter kompensiert. In Korrespondenz zu den Luftbefeuchtern sind die beobachteten Gradienten häufig sehr ausgeprägt (zum Beispiel in der *Sala di Botticelli*, wo die Luftbefeuchter glücklicherweise im Zentrum des Raums, fern von den Kunstwerken an der Wand aufgestellt sind). Die Systeme sind jedenfalls häufig mehr zufällig reguliert, was bemerkenswerte Veränderungen hinsichtlich Temperatur und Relativer Luftfeuchte zufolge hat. Aufgrund eines Befeuchtungssystems, das das thermische Niveau schlecht ausgleicht, erreicht letztere mitunter sehr hohe Werte (90% RL). Diese ausgeprägten Schwankungen der Relativen Luftfeuchte führen zu Stress und zu Verformungen.

Zu den häufigsten Schäden gehören solche, die auf nächtliches Abschalten sowie auf abruptes (und nicht graduelles) Anstellen der Heiz- und Klimatisierungssysteme zurückzuführen sind.

#### Das Publikum

Ein Ambiente, das fast keine thermo-hygrometrischen Gradienten aufweist und aufgrund seiner gegebenen Struktur als geeignet zu betrachten ist, kann durch das Entstehen anderer - publikumsbedingter - Gradienten zu einem ungeeigneten werden. Die Ansammlung von Personen in einem beschränkten Ambiente führt zu einer starken Anhäufung von Wasserdampf in Abhängigkeit der Anzahl und Permanenz des Publikums. Das Kunstwerk, das immer ein Gleichgewicht mit der Atmosphäre anstrebt, antwortet auf die Veränderungen mit der Aufnahme von Wärme und/oder Wasserdampf. Wenn einige Stunden nach Schließung und Abstellen der Beleuchtungs- und Klimatisierungssysteme die thermo-hygrometrischen Bedingungen umschlagen, gibt es sie wieder ab. Diese Phänomene werden als thermo-hygrometrische Zyklen bezeichnet und führen - abhängig von der Häufigkeit - zur Zerstörung des Objektes. Im Laufe einer Stunde gibt der Mensch Energie von 150 Watt ab. Wenn man ein Ambiente mit hohem Publikumsverkehr betrachtet – wie etwa die Sixtinische Kapelle – kann man davon ausgehen, dass bei normalen Besucherverkehr (durchschnittlich 6000 Personen am Tag; allerdings auf drei bis vier Stunden Öffnungszeit konzentriert) bei einer Verweildauer von dreißig Minuten ca. 450 kW/h abgegeben werden; in Zeiten besonders hohen Besucherandrangs (ca. 15-17000/Tag): zwischen 1100 – 1300 kW. Wenn man bedenkt, dass eine Lampe 100 W pro Stunde an Energie abgibt, bedeutet das mit anderen Worten, dass in den wenigen Stunden der Öffnung dies 1500 Lampen entspricht, die drei bis vier Stunden brennen (an stärker besuchten Tagen: 4500 Lampen).

Betrachten wir nun die Abgabe von Wasserdampf aufgrund natürlichen Atmens und Schwitzens: Man veranschlagt, dass eine jeder Person pro Stunden 50g. Wasserdampf ausscheidet. Im Fall der Sixtinischen Kapelle kann man berechnen, dass an einem normalen Besuchertag ca. 150kg Wasser/Stunde abgegeben werden (in Momenten maximalen Besuchs bis zu 250 – 300 kg/Stunde).

Diese einfachen Berechnungen machen deutlich, dass allein die Anwesenheit des Publikums eine beachtliche Menge an Wärme und Wasserdampf bedeutet, die von den Wänden aufgenommen wird. Nach Schließung tendieren letztere dazu, sie erneut an die Luft abzugeben. Massive Präsenz des Publikums während der Öffnungszeiten führt also zu einer beachtlichen Veränderung des Mikroklimas: Es entstehen markante räumlich-zeitliche Veränderungen und es stellt sich eine kontinuierlich ändernde thermo-hygrometrische Dynamik ein. Zu zahlreiches Publikum kann ein - für die Aufbewahrung und Ausstellung geeignetes - Ambiente in ein Ambiente mit beträchtlichen thermo-hygrometrischen Gradienten verwandeln. Es ist daher eine gute Regel, keine allzu hohe

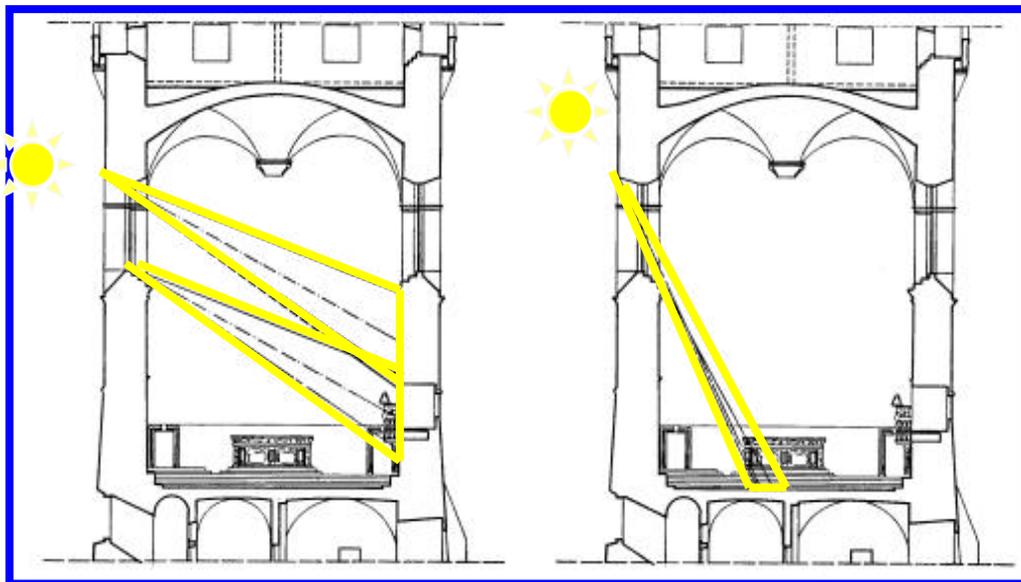
Menschenansammlung zuzulassen (insbesondere bei kleineren Räumen). Es erweist sich immer günstiger, die Anwesenheit zeitlich zu verteilen.

Ein anschauliches Beispiel für mikroklimatische Schwankungen, die auf das Publikum zurückzuführen sind, haben die Untersuchungen der Sixtinischen Kapelle erbracht. Man hat nämlich feststellen können, dass die hohe Besucherzahl in einer nicht zu vernachlässigenden Weise die (dank struktureller Voraussetzungen) von sich aus optimalen mikroklimatischen Bedingungen verändert.

#### Beleuchtung

Die Beleuchtung ist ein weiterer, sehr delikater Punkt im Betrieb eines musealen Ambientes. Die Immission von Sonnenlicht soll nicht direkt in die Räume erfolgen und hinsichtlich der Handhabung von Öffnungen gut überlegt sein. Astronomische Studien angewandt auf die Architekturgeometrie können zu einer korrekteren Handhabung verhelfen (Abb. 4). Von IR und UV-Strahlen gefiltertes Sonnenlicht ist, freilich diffus eintretend, immer vorzuziehen, da es aufgrund seiner spektralen Charakteristika maximale Leuchtkraft besitzt.

Abb. 4: Einfall des Sonnenlichts in die Sixtinische Kapelle, Rom



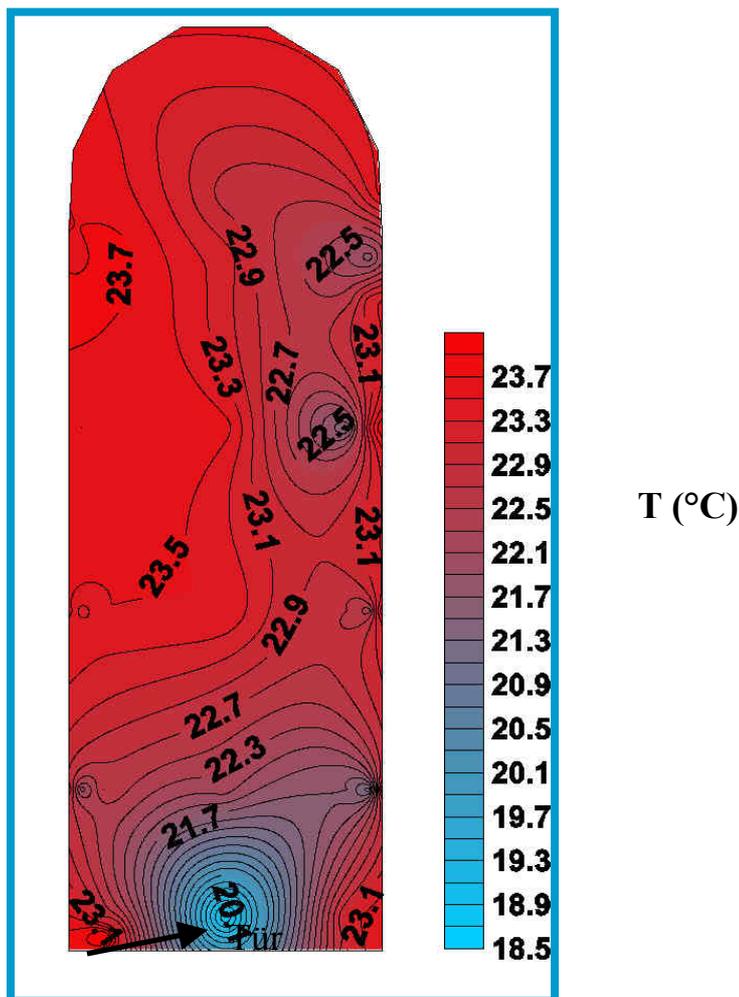
Die Energieerzeugung durch Beleuchtung erweist sich nämlich nicht als banal im Rahmen der gesamten Wärmeabgabe und der inneren Balance. Heutige Technologien ermöglichen Beleuchtungssysteme mit niedriger Energieabgabe bei – im Vergleich zu früher – gleicher Sehqualität. Kunstwerke müssen beleuchtet werden - schlechte Lösungen sind fast überall zu anzufinden.

Der Effekt eines diskontinuierlichen Beleuchtungssystems mit direkter Bestrahlung des Gemäldes (wie z.B. bei der Untersuchung des „Letzten Abendmahls“ von Leonardo da Vinci angefundnen) verursacht beim Ein- und Ausschalten kontinuierliche Erwärmungs- und Verdunstungszyklen mit Abkühlung und Kondensbildung – sowie innere Stresssituationen. Die Beleuchtung sollte sowenig wie möglich direkt und sehr graduell sein. Hierbei sollte man jeglichen Schock vermeiden – z.B. durch Einsatz von Lampen mit niedrigster Energieabgabe und mit Spektren vor allem in der Wellenlänge des sichtbaren Lichts sowie mit Filtern, die den verbleibenden ultravioletten Teil herausnehmen. Glücklicherweise hat in den letzten Jahren die Herstellung von Lampen sich soweit entwickelt, dass sie sich stark den genannten Charakteristika nähern (gradueller Anstellen, niedrige Energieabgabe). Ihre Anbringung ist eine weitere wichtige Frage. Eine jegliche niedrig positionierte Wärmequelle verursacht atmosphärische Instabilität: Es kommt zu Aufwärtsbewegungen der Luftmassen und unten zum Zustrom kälterer Luft. Dies begünstigt thermo-hygro-metrische Zyklen, Transport und folglich Deposition von Schadstoffen etc. Die Lampen sollten daher in einer Zone oberhalb des Kunstwerks angebracht werden, so dass sich die konvektive Zelle der Luftzirkulation zwischen Wärmequelle (Lampe) und Decke schließt. Die Prozesse beschränken sich dann auf diese Zone und belassen die darunter liegenden Bereiche mit den Kunstwerken in stabileren Konditionen.

### Luftaustausch und Reinigung

Die Nutzung von Räumlichkeiten führt dazu, dass man Zugänge für das Publikum offen hält. Türen und auch Fenster werden sehr häufig ohne jegliche Kontrolle offen gelassen (siehe etwa die Sainte Chapelle in Paris, Abb. 5). Luftmassen mit unterschiedlich thermo-hygrometrischen Charakteristika können eindringen. Ein solches Einströmen von Luft anderen Ursprungs führt zu Vermischungen der Luftmassen, zu thermischen und hygri-schen Gradienten in den Sälen und in letzter Konsequenz zur Belastung für das ausgestellte Material. Mitunter erfolgt der Austausch kontinuierlich auf indirekte Weise durch Leitungen, die die Ausstellungssäle direkt mit der Außenwelt verbinden und vermittelt unkontrollierten Eindringens von Luft mit unterschiedlichen thermo-hygri-schen Charakteristika. Beim British Museum in London z.B. fiel bei Messungen auf, dass in zwei Ägyptischen Sälen, zwei Gitter (vor der Durchgangstür zwischen den beiden Räumen) von außen abgesaugte Luft direkt in die Räume einließen. Obwohl die von Außen eindringende Luft während ihres Durchlaufs und vor Eintritt in die Säle den thermischen Schock zum Teil verminderte, zeigte sich in den Erhebungen, dass sie nicht thermo-hygrometrisch behandelt, geschweige denn gefiltert wird. Es gilt also, den Austausch von Luft mit unterschiedlichem thermo-hygrometrischen Inhalt zwischen den Ausstellungsräumen einerseits und andererseits dem angrenzenden Äußeren oder auch den angrenzenden Räumen mit anderer Nutzung (Lesesäle, Magazine) zu vermeiden. Ausgänge sollten daher so angelegt sein, dass sie einen solchen Austausch beim Öffnen nicht zulassen (etwa durch Verwendung von Windfängen). Es ist insbesondere eine nicht kontrollierte Luftzirkulation zu vermeiden, auch wenn ein natürlicher Luftaustausch freilich in den Sälen vorliegen sollte. Der Luftaustausch sollte mittels Zufuhr über speziell geplante Schächte erfolgen, wobei die einzuleitende Luft vorher thermo-hygrometrisch zu behandeln und zu filtern ist. Kleinste Geschwindigkeiten helfen eine unerwünschte Luftzirkulation zu vermeiden und bewirken dennoch einen täglich ausreichenden Austausch.

Abb. 5: Sainte Chapelle, Paris, Datum 20/08/02, Zeit 16.45



Kühle Luftmassen dringen durch die Tür auf der Westwand ein.

Das Öffnen von Türen und Fenstern und die hierdurch erzeugte Luftzirkulation bedeuten zudem Zufuhr von Schadstoffen in das Innere der Säle. Dies hat nicht nur die Ablagerung von verschmutzenden Partikeln zur Folge, sondern auch die Deposition chemischer Substanzen und - unter speziellen Bedingungen – auch deren Interagieren mit den Kunstwerken. Es ist absolut zu unterlassen, die Fenster solcher Räume nach Gutdünken zu öffnen. Sie sollten hauptsächlich dazu dienen, diffuses Licht – wenn möglich gefiltert – hereinzulassen.

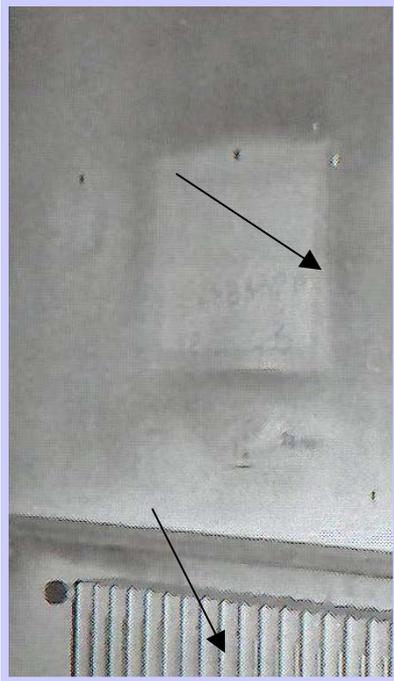
Erhöhte Nutzung eines Ausstellungsraums zieht häufiges Reinigen nach sich, das in der Regel in den – dem Raumtyp entsprechenden – traditionellen Methoden erfolgt. Im einfachsten und immer noch weitest verbreiteten Fall werden die Fußböden direkt mit Wasser gereinigt. Es kommt zur Erhöhung der Spezifischen Feuchte und infolgedessen der Relativen Feuchte – mit all den hiermit verbundenen Problemen (erhöhtes Risiko der Kondensbildung auf den Wänden und im Inneren der Poren der Materialien).

Eine weitere Angewohnheit ist der Gebrauch traditioneller Staubsauger, die den (während der Schließung) deponierten Staub wieder aufwirbeln. Eine Untersuchung im Palazzo Chiericati in Vicenza beispielsweise belegt deutlich den üblichen Gebrauch des Staubsaugers. Nach Einsatz dieses täglichen Reinigungsgeräts stellt sich eine Erhöhung der atmosphärischen Partikel ein. Bei den Partikeln größeren Durchmessers liegt die Konzentration zehn bis zwanzigfach höher als vorher. Es gilt also die Aufmerksamkeit auch auf das tägliche Reinigen zu lenken. Auch wenn es notwendig und scheinbar einfach ist, muss es so ausgeführt werden, dass die Bedingungen im Inneren – was Temperatur, Feuchte, Turbulenzen etc. betrifft – nicht verändert werden. Im Gegensatz zu dem, was üblicherweise geschieht, sollte weniger gereinigt werden und dann mit der notwendigen Sorgfalt und Kenntnis (z.B. durch Staubsauger mit Schläuchen, die die Partikel direkt aus den Sälen raus transportieren).

#### Die Verschmutzung

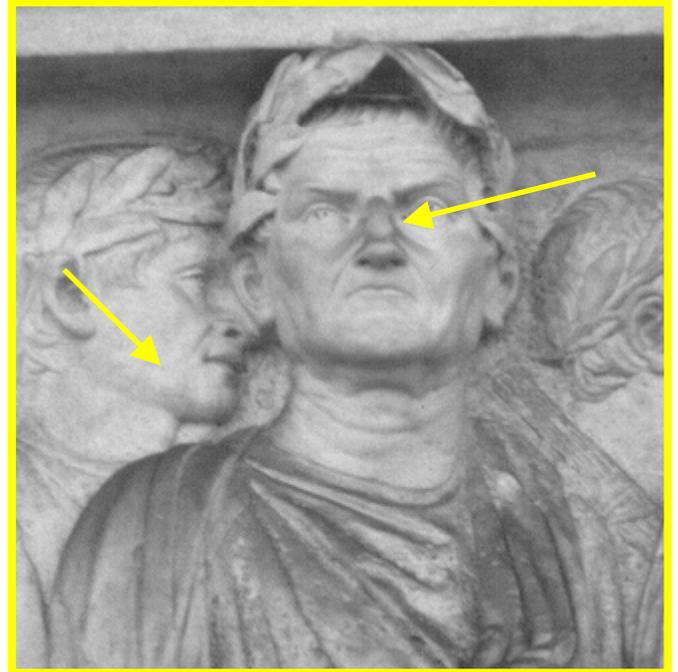
Zum Schluss bleibt noch das Problem der Immission von Luftverschmutzung. Sie wird durch das Publikum hineingetragen und gelangt auch mittels Luftaustausch durch geöffnete Türen. Aufgrund verschiedener physikalischer Prozesse (brownsche, forétische, di Steffano, der Trägheit, der Schwerkraft etc. (Abb.6, 7) deponieren sich später diese Partikel entsprechend ihrer Durchmesser und der mikroklimatischen Bedingungen. Die Auswirkungen sind nicht zu vernachlässigen: Wie Messungen in der *Sala di Giotto* der Florentiner Uffizien oder im Palazzo Chiericati in Vicenza zeigen, werden diese Partikel (vor allem die mit größerem Durchmesser) bei jedem Vorbeigehen des Publikums sowie während des Reinigens wieder aufgewirbelt. Ein korrektes Betreiben der Ausstellungsräume sowie des Mikroklimas kann auch das Problem der Schmutzablagerung auf den (nicht unbegrenzt reinigbaren) Oberflächen der Kunstwerke lösen oder zumindest vermindern.

Abb. 6: Beispiel einer inerten Deposition:



Hindernisse verursachen Turbulenzen, in deren Folge es zu einer verstärkten inerten Deposition kommt (Pfeile)

Abb. 7: Ara Pacis – Rom



Beispiel für Ablagerungen durch Schwerkraft. Die Pfeile zeigen die stärker betroffenen (horizontalen) Oberflächen für Ablagerungen durch Schwerkraft an

Man ist immer gut beraten, die Luft, bevor sie in das Ambiente eingelassen wird, zu filtern - auch wenn eine solche Maßnahme Luftbewegungen zwischen den ein- und ablassenden Punkten zur Folge haben und daher aerodynamische Deposition bewirken. Zur Entfernung feinerer (und aufgrund ihrer langen Verweildauer in der Atmosphäre besonders gefährlicher) Partikel sind die im Handel befindlichen Filter äußerst nützlich. Sie helfen jedoch nicht, den Eintrag durch das Publikum bzw. über dessen Schuhe sowie Kleidung zu vermeiden. Auch diese Immission könnte in Teilen kontrolliert werden und zwar mittels einer präventiven Reinigung zumindest der Sohlen vor Eintritt in die Ausstellungsräume. Hierzu liefert der Handel sehr effiziente Teppiche zum Binden der Partikel. Bei entsprechender Wartung können sie eine gute präventive Falle für die von den Sohlen transportierte Verschmutzung abgeben.

Zur Vermeidung der unerwünschten Aspekte gilt es vor allem thermische Stabilität herzustellen – d.h. einen vertikal verlaufenden thermischen Gradienten, der die Bildung von Konvektivzellen und den Aufwärtstransport der Luftverschmutzung verhindert.

### Einweisung des Fachpersonals

Im Rahmen dieses rein technischen Diskurses gibt es jedoch auch einen anderen Aspekt, den des „Bildens“: Die Notwendigkeit über Personal zu verfügen, das auf dem Kunstsektor arbeitet, sich kontinuierlich weiter spezialisiert und darauf vorbereitet ist, im Rahmen der eigenen Aufgaben die anstehenden Probleme anzupacken, zu verstehen und zu erledigen.

Ganz allgemein ist die Präparation, wie sie von den Schulen den zukünftigen „Referenten für die Verwaltung des Kulturpatrimoniums“ vermittelt wird, sehr stark auf Einzelbereiche ausgelegt. Auch wenn sich ein jeder anstrengt, die Probleme anzugehen und zu lösen, stößt man auf die gravierenden Beschränkungen der Grundausbildung.

Viele Forschungsgebiete, die von der historisch-technischen bis zu den streng wissenschaftlichen reichen (Chemie, Physik, Biologie, Ingenieurwesen und Architektur (*sic!*)), beschäftigen sich mit dem Erhalt von Kunst- und Kulturgut.

In den letzten Zeiten, in denen die Wissenschaften, die sich dem Erhalt von Kunst- und Kulturgut verschrieben haben, bemerkenswerte Fortschritte zu verzeichnen haben, hat sich bei den Fachleuten das Bewusstsein entwickelt, ihr eigenes Wissensgebiet zu öffnen. Von dieser Warte aus beginnt man nunmehr auch die Wichtigkeit einer neuen „Bildungsphilosophie“ einzusehen. Es bleibt zu hoffen, dass diese Philosophie die Personen auf allen Ebenen erreicht.

### Schlussfolgerung

Das Problem des Betriebens von Museen ist, wie gezeigt wurde, alles andere als leicht. Die Realisierung geeigneter mikroklimatischer Bedingungen für den Erhalt von Kunstwerken verlangt die Kenntnis des Mikroklimas zu allen Zeitpunkten – seien sie zeitlich bezogen (Tag-Nacht, Jahreszeit etc.), seien sie bezogen auf die Präsenz externer, der Nutzung geschuldeter Kräfte (Klimatisierung, Beleuchtung, Öffnung, Reinigung, Besucher etc.). Insbesondere hinsichtlich der Letzteren gilt ein korrektes Handeln, das sich bewusst eines jeden einzelnen Problems ist, und das dessen zerstörerische Wirkung auf das Kunstwerk weitestmöglich minimiert.

Es wurde versucht, anhand einiger Beispiele aus Studien der letzten Jahre über die Kontrolle des Mikroklimas in Ausstellungsräumen zu zeigen, dass Gebäude, die sich im Grunde als ideal für die Aufbewahrung von Kunst- und Kulturgut erweisen, durch Massennutzung ungeeignet werden. Zudem kann sich die Wahl eines Raumes – im Vergleich zu einem anderen - als fundamental hinsichtlich einer einfacheren und besseren Aufbewahrung von Kunstwerken herausstellen.

In Hinblick auf die thermo-hygrometrische Stabilität wie auch auf die Immission und das Vermischen von Luftschadstoffen erweist sich das Klimatisieren sowie das Heizen von Räumen als einer der brisantesten und kompliziertesten Punkte.

Es hat sich gezeigt, dass auch die Wahl einer korrekten Beleuchtung kein zu unterschätzendes Problem ist.

Diese und andere Problematiken sind zu berücksichtigen, wenn man ein Museum oder Ausstellungsraum auf die beste Weise betreiben und einrichten will. Wie man leider häufig beobachtet, haben falsche Entscheidungen, die nicht immer wegen einer einfachen Lösung oder niedriger Kosten getroffen worden sind, beträchtlichen und irreversiblen Schaden an unserem wertvollen Kulturbesitz verursacht.

### Danksagung

Die hier zitierten Studien konnten dank der Unterstützung nationaler und internationaler Programme vor allem der Europäischen Gemeinschaft (zuletzt: VIDRIO – contract n.EVK4-CT-2001-00045) und bilateraler Projekte durchgeführt werden.

## Bibliographie

1. Bernardi A., 1990: Microclimate in the British Museum, London. *Museum Management and Curatorship*, 9, 169-182
2. Bernardi A., 1990: Effects of Lighting: Problems and modelling. *European Cultural Heritage Newsletter on Research*, 4, 2, 11-12
3. Camuffo D. and Bernardi A., 1991: The Microclimate of Leonardo's "Last Supper". Joint Edition *Bollettino Geofisico and European Cultural Heritage Newsletter on Research*, Spec. Vol., XIV, 3, 1-123
4. Bernardi A. and Vincenzi S., 1994: Diurnal Variation of Solar Radiation on Differently Oriented Surfaces of Monuments. *Il Nuovo Cimento*. 17C, 4, 431-442
5. Bernardi A. and Camuffo D., 1995: Microclimate in Chiericati Palace Municipal Museum, Vicenza. *Museum Management and Curatorship*. 14,1, 5-18
6. Bernardi A. and Camuffo D., 1995: Uffizi Galleries in Florence: a Comparison Between Two Different Air Conditioning Systems. *Science and Technology for Cultural Heritage*. 4, 2, 11-22
7. Camuffo D. and Bernardi A., 1995: The Microclimate in the Sistine Chapel. Joint Edition *Bollettino Geofisico and European Cultural Heritage Newsletter on Research*, Volume Spec., 9, 1-32
8. Camuffo D. and Bernardi A., 1995: Study of the Microclimate of the Giant Hall of the Da Carrara's Royal Palace, Padova. *Studies in Conservation*., 40, 237-249.
9. Camuffo D. and Bernardi A., 1996: Deposition of Urban Pollution on the Ara Pacis, Rome. *The Science of the Total Environment*, 189/190, 235-245
10. Camuffo, D. and Bernardi A., 1996: Il condizionamento estivo nei musei: il Museo Correr (Venezia), la Galleria degli Uffizi (Firenze) e il Museo del Louvre (Parigi). 1st Intern. Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin. *Luxograph*, Palermo, pp. 1679-1685
11. Camuffo D. and Bernardi A., 1997: Controlling the Microclimate and the Particulate Matter inside the Historic Anatomic Theatre, Padova. *Museum Management and Curatorship*, 15, 3 , 285-298
12. Bernardi, A., Camuffo, D., Sturaro, G. e Valentino, A., 1998: Indagini microclimatiche per la conservazione ed il restauro in ambienti interni ed esterni. *Technology Highlights Information - Numero monografico Conservazione e Restauro*, 22-37
13. Camuffo D., 1998: *Microclimate for Cultural Heritage*, Elsevier, 415 p
14. Bernardi A., Bossi F. and Villanti S., 1999: Contribution towards a "preservative" architecture. Analyses of the microclimate of the National Library "Marciana"- Venice. *International Conference on Conservation and Restoration of Archive and Library Materials*. Erice 22-29 April, Palumbo ed., 111-124
15. Camuffo, D., Brimblecombe, H.J., Van Grieken, R., P., Busse, Sturaro, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., De Bock, L., Gysels, K., Wieser, M. and Kim, O., 1999: Indoor Air Quality at the Correr Museum, Venice, Italy. *The Science of the Total Environment*, 236, 135-152
16. Bernardi A., Todorov V. and Hristova J., 2000: Microclimatic Analysis in the St. Stephan Church, Nessebar - Bulgaria after Interventions for the Conservation of the Frescoes. *Science and Technology for Cultural Heritage* 1, 281-286
17. Camuffo, D., Van Grieken, R., Busse H.J., Sturaro, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., Gysels, K., Deutsch, F., Wieser, M., Kim, O. and Ulrych, U., 2001: Environmental Monitoring in Four European Museums *Atmospheric Environment*, 35, 1, S127- S140
18. Gysels, K., Deutsch, F., Van Grieken, R., Camuffo, D., Bernardi, A., Sturaro, G., Busse, H.J. and Wieser, M. 2003: Characterisation of the indoor environment of the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium, *Journal of Cultural Heritage*, Vol 5/2 pp 221-230
19. Sturaro, G., Camuffo, D., Brimblecombe, P., Van Grieken, R., Busse, H.J., Bernardi, A., Valentino, A., Blades, N., Gysels, K., Deutsch, F., Wieser, M. and Buczolits, S. 2003: Multidisciplinary environmental monitoring at the Kunsthistorisches Museum, Vienna, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 21, 2, 273-294
20. Bernardi A., 2003: *Conservare opere d'arte: Il microclima negli ambienti museali*. Il Prato. 143pp.
21. Camuffo D., Bernardi A., Pagan E., Becherini F, 2004: The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study *Journal of Cultural Heritage*, 5, 409-416.
22. Bernardi A., Becherini F., Kontonzova V., Godoi R. and VanGrieken R. and F. Deutsch, 2004: Effects of Air Pollution and Microclimate on Stained Glass Windows: Preliminary Results in the Sainte Chapelle (Paris). *Air Pollution and Cultural Heritage*. C.Saiz-Jimenez ed. 133-140.

**Das Mikroklima in historischen Gebäuden und die Konservierung von Kulturgut**  
Zusammenfassung

Dr. Adriana Bernardi

CNR-ISAC  
Corso Stati Uniti 4  
35127 Padova, Italien  
Mail: [a.bernardi@isac.cnr.it](mailto:a.bernardi@isac.cnr.it)

Trotz der zahlreichen nationalen und internationalen Studien der letzten Jahre zur Erforschung von Zerstörungsprozessen sowie zur Definition von Grenzwerten für Schadstoffbelastungen und zur Erarbeitung von Leitfäden ist die Diskussion zu diesem Thema noch immer nicht abgeschlossen. Die Wissenschaftswelt zeigt sich nicht immer einig hinsichtlich der einzuleitenden Maßnahmen. So ist auch - angesichts der Komplexität und Vielzahl an Variablen - eine Schlussfolgerung nicht immer evident und in ihren Konsequenzen auf kurze Sicht nicht immer erkennbar. Es besteht jedoch große Übereinstimmung darin, dass eine direkte Korrelation zwischen Mikroklima und Zerstörung besteht.

Die Zerstörung eines Kunstwerks kann physikalischer, chemischer oder biologischer Natur sein. Es sind jedoch die mikroklimatischen Begebenheiten, die diese Prozesse regulieren. Die Schaffung „geeigneter“ mikroklimatischer Bedingungen gilt daher als das erste, wenn auch nicht leicht zu realisierende Bestreben. Man vereinfacht jedoch den Sachverhalt zu stark, wenn man sich allein die beiden Variablen „Temperatur“ und „Relative Luftfeuchte“ konzentriert.

Unserer Gruppe hat in den letzten 25 Jahre viele europäische Monumente untersucht (Sixtinische Kapelle, Rom; Leonardos „Letzte Abendmahl“, Mailand; British Museum, London, Louvre, Paris; Sainte Chapelle, Paris; kgl. Museum der Schönen Künste, Antwerpen; Kölner Dom; Uffizien, Florenz, Museo Correr, Venedig etc.). Diese Monumente unterscheiden sich durch die klimatische Lage, durch den Gebäudetyp, Alter, Nutzungspolitik etc. und weisen daher sehr unterschiedliche Situationen auf.

Es bedarf daher einer sehr genauen Kenntnis des spezifischen Mikroklimas, um praktische Lösungen zu Verbesserung Konservierungsbedingungen einzuleiten zu können. Die hier präsentierten Fallstudien zeigen, dass die Analyse des Mikroklimas nicht einfach mit der Messung von Temperatur- und Feuchtwerten gleichzusetzen ist, sondern mit der gleichzeitigen Beobachtung einer Reihe von Phänomenen, die hiermit zeitlich und räumlich assoziiert sind. Nur eine Gesamtsicht der Problematik sowie eine enge Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen erlaubt es, korrekte Lösungen für eine bessere Konservierung zu finden. In Anbetracht der Nutzungsbedürfnisse stellen die jeweils gefundenen Lösungen meist allerdings nur einen „Kompromiss“ dar.

## Dr. Adriana Bernardi

### Kurzbiografie

Studium der Physik an der Universität Padua, Abschluss 1980. Seitdem Mitarbeiterin (und seit 1984 feste Angestellte) des *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR), Abteilung Umweltphysik angewandt auf die Konservierung von Kunst- und Kulturgut. Forschungstätigkeit vor allem auf dem Gebiet der Umwelt, insbesondere des Mikroklimas in Verbindung mit dem Erhalt von Kunst- und Kulturgut. Untersuchung bedeutender Monumente des In- und Auslands (Sixtinische Kapelle, British Museum, London; Musée du Louvre, Paris; Musée de l'Orangerie, Paris, Sankt Stephan Kirche, Nassebar (Bulg.); Königl. Museum der Schönen Künste, Antwerpen; Sainte Chapelle, Paris; Kölner Dom; „Das letzte Abendmahl“ von Leonardo da Vinci, Mailand; Uffizien, Florenz; Museo Civico des Palazzo Chiericati, Vicenza; Museo Correr, Venedig; Biblioteca Marciana, Venedig; Palazzo Ducale, Urbino; Dom, Orvieto; Teatro Anatomico der Universität, Padua; Ara Pacis, Rom. Hierüber ca. 150 Veröffentlichungen sowie Autorin eines Buch über das Mikroklima in Museen. Verantwortlich für zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte, so z.B. augenblicklich als Koordinatorin für das Projekt VIDRIO (EVK4-CT-2001-00045) der Europäischen Gemeinschaft. Evaluiert für die Europäische Gemeinschaft und das italienische Wissenschaftsministerium. Herausgeberin der wissenschaftlichen Zeitschrift „Bolletino Geofisico“ der *Associazione Italiana di Geofisica*. Mitglied zahlreicher nationaler und internationaler Kommissionen der jeweiligen Ministerien für den Erhalt von Kunst- und Kulturgut und für Normen. Professorin an der Universität Ferrara. Hält das Patent für ein wissenschaftliches Instrument zur Untersuchung von Kondenz auf Oberflächen.