



Schloss Linderhof von König Ludwig II. von Bayern, © Bayerische Schlösserverwaltung.

## **Wissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zur Präventiven Konservierung in Schloss Linderhof**

Forschungsprojekt gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projektlaufzeit:	März 2013 – März 2017
Fördermittelanteil:	220.600 €
Gesamtkosten:	441.200 €
Projektleitung:	Bayerische Schlösserverwaltung, Restaurierungszentrum
Projektpartner:	Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen Otto Friedrich Universität Bamberg, Lehrstuhl für Restaurierungswissenschaft in der Baudenkmalpflege

## 1. Einführung

Die klimatischen Bedingungen in Schloss Linderhof sind alljährlich extrem. Das von König Ludwig II. erbaute Schloss - eine der beliebtesten Touristenattraktionen in Deutschland - zieht jährlich Hunderttausende von Besuchern an. Diese bringen Feuchtigkeit und Wärme ein. In einigen Räumen ist im Jahresmittel eine relative Luftfeuchte von über 70 % vorzufinden. Das Gebäude ist nicht mit Klimatechnik ausgestattet, so dass in der Hauptsaison im Sommer der erhöhte Bedarf an Frischluft allein durch geöffnete Fenster realisiert wird. Dies führt zu erheblichen kurzfristigen wie auch zu hohen saisonalen klimatischen Schwankungen, die sich langfristig negativ auf die originale neobarocke Ausstattung auswirken. Auch im Winter ist das Klima nicht ideal, da tiefe Temperaturen bis unter 0 °C zu Versprödung von Materialien an Teilen der historischen Ausstattung führen können. Ein weiteres Problem, das sich in Linderhof aufgrund des hohen Besucherandrangs und der momentanen Lüftungssituation einstellt, ist die hohe Schmutz- und Staubbelastung. Ziel der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen (BSV) ist es, das Raumklima im Schloss mit dem Einbau einer Lüftungsanlage zu stabilisieren. Dabei wird erstmalig in einem bedeutenden historischen Gebäude der neu entwickelte Ansatz der europäischen Norm DIN EN 15757, „Erhaltung des kulturellen Erbes - Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien“ umgesetzt. Das vorliegende Raumklima wird demnach nicht grundlegend geändert und auf einen Idealstandard gebracht, sondern lediglich das hohe Feuchteniveau abgesenkt und die extremen Ereignisse etwa kurzfristige Feuchtesprünge von über 15 % rF sowie zu tiefe Temperaturen verhindert. Was den Eintrag von Schmutz und Staub betrifft, kann der Einbau der geregelten Lüftung positiv entgegenwirken, da zumindest der direkte Eintrag von außen durch geöffnete Fenster vermieden wird.

Die Realisierung der Lüftungsanlage wird in jedem Fall das Mikroklima beeinflussen. Um das Risiko von Schäden an der Ausstattung etwa durch eine veränderte Luftströmung oder Staubablagerung besser beurteilen und schnell darauf reagieren zu können und um den Erfolg der Maßnahme zu dokumentieren und sicher zu stellen, ist eine konservatorische Begleitung dringend erforderlich. Diese soll auch minimale Veränderungen der empfindlichen Oberflächen sichtbar machen. Ziel der Begleitung ist es, den Vorzustand zu dokumentieren und mit der geänderten Raumklimasituation abzugleichen und damit die schadensfreie Wirkung der Lüftungsanlage auf die historische Ausstattung in ihrem Betrieb über die ersten Jahre zu prüfen.

## 2. Problemstellung und Herangehensweise

Klimatisch bedingte Schäden an der historischen Ausstattung in Schloss Linderhof wurden mit Hilfe von restauratorischen Untersuchungen identifiziert. Doch fehlt bisher die Kenntnis, wann bzw. bei welchen klimatischen Bedingungen genau diese entstanden sind. Da diese meist nicht plötzlich auftreten, sondern über einen längeren Zeitraum, sind spezielle Methoden notwendig, um diese Phänomene zu erforschen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll die historische Ausstattung in Schloss Linderhof mit Hilfe einer Kombination von drei zerstörungsfreien, bildgebenden Verfahren – digitale Fotografie, Streifenlichtscan und 3D-Mikroskopie – hinsichtlich Bewegungen aufgrund von Schwankungen der Temperatur und relativen Luftfeuchte untersucht werden.

Die Messungen erfolgen zu unterschiedlichen Jahreszeiten, um den Umfang an klimatischen Schwankungen im saisonalen Verlauf abzudecken. Sie werden durch eine detaillierte Erfassung des Raum- und Mikroklimas sowie der vorliegenden Luftgeschwindigkeiten begleitet. Die ersten Messungen dienen dazu,

- (a) eine allgemeine Einschätzung über die Auswirkung klimatischer Schwankungen auf die diversen Materialkombinationen zu erlangen.
- (b) Weiter soll eine grundlegende Methode zur quantitativen und qualitativen Dokumentation von Veränderungen infolge klimatischer Prozesse und der Bewertung klimatischer Schwankungen erarbeitet werden.
- (c) Die Klimastabilität, die aufgrund des Einbaus einer Lüftungsanlage verbessert werden soll, wird untersucht und dokumentiert.

Aufgrund der Menge und Vielfalt an historischer Ausstattung werden vor Einbau der Lüftungsanlage exemplarische Flächen der drei Hauptmaterialkategorien Wandmalerei, vergoldete Holz- und Stuckoberflächen definiert. Ein Vergleich der Messungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten soll aufzeigen, inwieweit die unterschiedlichen Oberflächen der Ausstattung auf kurzfristige und saisonale Schwankungen in der momentanen klimatischen Situation reagieren.

Nach Einbau der Anlage werden diese Messungen an denselben Flächen im Frühling, Sommer, Herbst und Winter wiederholt. Ein Vergleich der Messungen vor und nach dem Einbau soll aufzeigen, ob bzw. inwieweit sich die Situation für die historischen Oberflächen verändert hat.

### 3. Untersuchungsverfahren

Für die Untersuchung der historischen Ausstattung werden optische Verfahren wie die die 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren, 3D-Mikroskopie oder hochauflösende Fotografie eingesetzt. Parallel dazu erfolgt die Dokumentation des Raumklimas durch Strömungs- und detaillierte Klimamessungen. Wägeversuche mit originalen Ornamentstücken sollen zusätzlich Aufschluss über die Reaktionsgeschwindigkeit der historischen Ausstattung auf klimatische Schwankungen geben.

#### 3.1 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren

Die Kombination von optischer Triangulationstechnik (optische Abstandsmessung durch Winkelmessung innerhalb von Dreiecken) und Interferometrie (Überlagerung von Wellen) bildet die Streifenprojektionstechnik. Ein großer Vorteil dieses optischen Verfahrens besteht in seiner schnellen Oberflächenerfassung mit hoher Auflösung (Eipper 2004).

Für die Messungen kommt ein Streifenlichtscanner der Fa. Steinbichler COMET L3D 5M zum Einsatz (Abbildung 1). Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, je nach Objektiv unterschiedlich große Oberflächen zu scannen: Mit dem 75 mm-Objektiv entsteht ein Messfeld von 74 x 62 x 45 mm<sup>3</sup>, mit dem 250 mm-Objektiv ein Ausschnitt von 260 x 215 x 140 mm<sup>3</sup>. Der Punktabstand ist bei 250 mm 100 µm, bei 75 mm 30 µm, also je kleiner der Bildausschnitt umso höher die Auflösung. Mit Hilfe der Software Comet Plus 9.63 werden mehrere Scans nacheinander durchgeführt und zu einer Gesamtdatei zusammengesetzt. Vorteil dieses Verfahrens ist neben der hohen Auflösung und der berührungslosen Datenerfassung, dass die Messungen an einem Standort beliebig oft wiederholt und miteinander verglichen werden können. Auf diese Weise wird ein saisonales Monitoring ermöglicht, ohne dass das Gerät vor Ort bleiben muss. Die Untersuchungen mit dem Streifenlichtscanner werden daher v. a. für die Beurteilung von saisonalen Schwankungen eingesetzt.

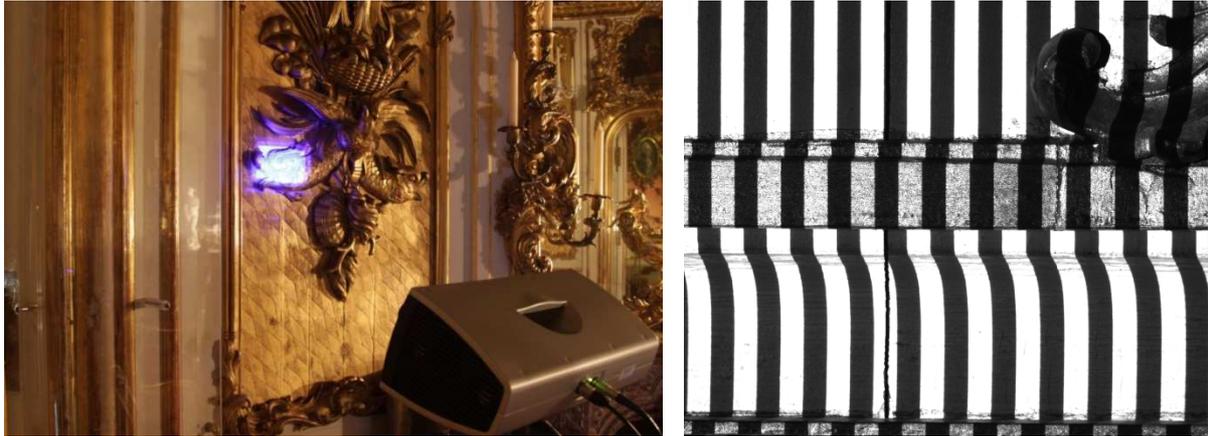


Abbildung 1:  
Links: 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren im Speisezimmer von Schloss Linderhof. Rechts:  
Streifenlichtprojektion während des Scanprozesses, © Bayerische Schlösserverwaltung.

### 3.2 3D-Mikroskopie

Mit Hilfe der 3D-Mikroskopie sollen kleinste Veränderungen an vorgeschädigter Ausstattung, die sich aufgrund von kurzfristigen (24-stündigen) Schwankungen des Raumklimas ergeben, erfasst werden.

Vorteil des 3D-Mikroskops gegenüber eines herkömmlichen ist die erhöhte Tiefenschärfe, die durch das stufenweise Scannen vom tiefsten zum höchsten Punkt des Ausschnitts erreicht wird. Alle Einzelaufnahmen werden zu einem tiefenscharfen Bild zusammengefügt. Weiter gibt die Software ein Tiefenprofil und eine topografische Darstellung im Falschfarbenmodus aus.

Ziel ist es, Details an Oberflächen unterschiedlicher Materialgattungen über 24 Stunden zu beobachten und die Veränderungen zu dokumentieren (Abbildung 2). Diese Untersuchung wird zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr an ähnlichen Positionen durchgeführt, so dass das Verhalten der Materialverbände bei unterschiedlichen klimatischen Situationen sichtbar wird. Aufgrund der starken Vergrößerung und der dreidimensionalen Untersuchungsobjekte ist es nicht möglich, exakt denselben Ausschnitt im selben Betrachtungswinkel erneut herzustellen, nachdem das Messgerät bewegt wurde. Dennoch sollte ein Vergleich der Reaktion der Oberflächen bei unterschiedlich starken klimatischen Schwankungen abhängig von den Jahreszeiten sichtbar werden.



*Abbildung 2:  
3D-Mikroskopie im Bad von Schloss Linderhof, © Bayerische Schlösserverwaltung.*

### 3.3 Vergleichende hochauflösende Fotografie

Derselbe Ansatz der 3D-Mikroskopie wird auch mit Hilfe der hochauflösenden Digitalfotografie (SLR-Aufnahmen) verfolgt: Bewegungen des Materialgefüges an vorgeschädigten Oberflächen aufgrund von klimatischen Schwankungen werden über einen Zeitraum von mehreren Tagen dokumentiert. Im Unterschied zur mikroskopischen Untersuchung werden durch den Einsatz von Digital-Spiegelreflexkameras Oberflächenänderungen im makroskopischen Bereich detektiert (Abbildung 3). Diese Methode ist gegenüber der mikroskopischen Untersuchung wesentlich kostengünstiger, so dass diese bei positiver Wirkung auch im Anschluss an das Forschungsprojekt zum Monitoring eingesetzt werden könnte.



Abbildung 3:  
 Links: Untersuchung mit hochauflösender Fotografie Übersicht der Position im Östlichen Gobelzimmer an vergoldeter Sandelung, rechts: Detailaufnahme der Monitoring Position an einer gelockerten Fassungsscholle,  
 © Bayerische Schlösserverwaltung.

### 3.4 Messung des Nahfeldklimas und der Strömungsgeschwindigkeit

Über den gesamten Zeitraum des Projektes, zeichnen Datenlogger die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den Schauräumen des Schlosses sowie das Außenklima auf. An vier der festgelegten Messstellen (Treppenhaus, Speisezimmer und Paradeschlafzimmer, Nordost- und Nordwestwand) für Streifenlichtscanner und 3D-Mikroskopie wird auch das Nahfeldklima ermittelt (Abbildung 4, links). Dort wird einmal das Lokalklima (Temperatur, relative Luftfeuchte) nahe der Messposition gemessen, zum anderen die Oberflächentemperatur in unmittelbarer Umgebung des Messfeldes.

Parallel zu den Messungen mit Streifenlichtscanner und 3D-Mikroskop werden Strömungsmessungen durchgeführt. So wird neben der klimatischen Situation die Luftgeschwindigkeit zur Zeit der Messungen und während des Betriebs zu unterschiedlichen Jahreszeiten erfasst. Dazu sind an einem Messbaum zwei Strömungssensoren (unten: 1,09 m, oben: 1,56 m) angebracht (Abbildung 4, rechts). Die Messung erfolgt im Sekundentakt.



Abbildung 4:  
 Links: Nahfeldklimamessung am Beispiel der Westwand im Paradeschlafzimmer. Rechts: Messbaum mit Sensoren zur Strömungsmessung und die lokale Erfassung des Raumklimas, © Bayerische Schlösserverwaltung.

### 3.5 Wägeversuche

Die Untersuchung der Gewichtsänderung von Kunstwerken ist ein sehr sensibles Verfahren, da hygroskopische Materialien bei Änderung des Klimas unmittelbar Feuchte aufnehmen bzw. abgeben. Daher stellt diese einen Indikator für mögliche Schädigungen dar. Abhängig von den jeweiligen Materialeigenschaften wird der Verbund stärkere oder geringere Gewichtsschwankungen aufweisen. Die Untersuchung der Gewichtsänderung bei realen klimatischen Schwankungen wird an Originalmaterial aus dem Schloss, z. B. einem abgebrochenen Stück Holzornament durchgeführt (Abbildung 5).

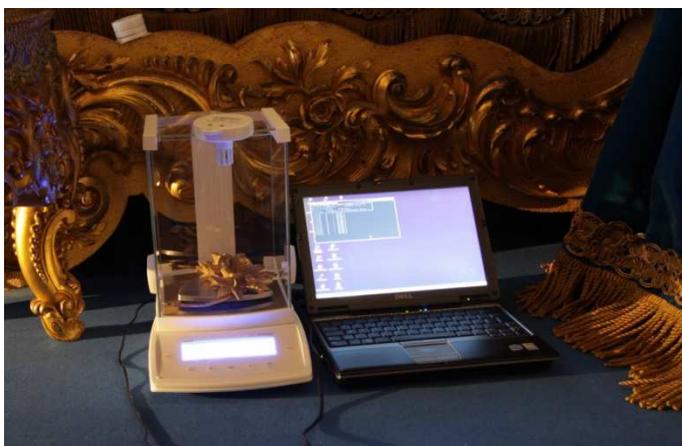


Abbildung 5:  
 Wägeversuche im Paradeschlafzimmer mit einem vergoldeten Holzornament, © Bayerische Schlösserverwaltung.

### 3.6 Staubmonitoring

Neben den klimatischen Problemen, die in Schloss Linderhof vorliegen, ist auch der Staubeintrag durch offen stehende Fenster und Besucher ein großes konservatorisches Problem.

Gegenstand der Untersuchungen ist, die Menge und Ursache des aktuellen Staubaufkommens in Schloss Linderhof zu ermitteln und die Wirkung von staubreduzierenden Maßnahmen zu prüfen. Außerdem soll anhand der ermittelten Daten die Staubentwicklung nach Einbau der Lüftungsanlage untersucht werden.

Für die Datenerhebung wurden zwei verschiedenen Arten von Staubsammlern eingesetzt: Schachteln zur losen Sammlung von Staub sowie Klebefallen für die gezielte Ermittlung der Staubzusammensetzung (Abbildung 6). Letztere weisen drei unterschiedlich farbige Klebgründe auf (weiß, grau, schwarz) um beim Auszählen der unterschiedlichen Partikel einen höheren Kontrast zu erzielen (Eibl 2009). Während die Klebefallen bereits nach wenigen Tagen wieder eingesammelt wurden, um Überlagerungen auf dem Objektträger zu vermeiden, wurden die Schachteln immer vierteljährlich geleert. Die Zeiträume orientierten sich an den vier Jahreszeiten bzw. der Saison: Winter (27.11.2012 bis 26.02.2013), Frühling (26.02.2013 bis 29.05.2013), Sommer (29.05.2013 bis 03.09.2013) und Herbst (03.09.2013 bis 26.11.2013). Um den Einfluss der Lüftungsanlage untersuchen zu können, erfolgt nach 2 Jahren Monitoring im Vorzustand ein weiteres Jahr nach der Inbetriebnahme der Anlage.



Abbildung 6:  
Staubmonitoring am Beispiel der losen Staubsammler im Westlichen Gobelinzimmer, © Bayerische Schlösserverwaltung.

## 4 Untersuchungen

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen von einwöchigen Messkampagnen zu unterschiedlichen Jahreszeiten.

In folgender Tabelle sind alle bisherigen Messkampagnen unter Berücksichtigung der vor Ort verwendeten Methoden zusammengefasst.

Tabelle 1:  
Zusammenstellung der im Rahmen der Voruntersuchung durchgeführten Messkampagnen.

Jahreszeit	Messzeitraum	Art der Messungen
Frühjahr	25. – 28. 3. 2013	Streifenlichtscans
Winter	25. – 29. 11. 2013	3D-Mikroskopie
Winter	16. – 20. 12. 2013	Streifenlichtscans, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche
Sommer	22. – 25. 7. 2014	Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche
Frühjahr	23. – 27. 3. 2015	Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche
Frühjahr	23. – 24. 4. 2015	Streifenlichtscans im Rahmen des Rütteltests (Paradeschlafzimmer, Speisezimmer)
Sommer	6. – 10. 7. 2015	Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche
Herbst	20. – 23. 10. 2015	Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche

### Auswahl der Testflächen

Für die Untersuchung und Beurteilung klimatisch bedingter Veränderungen an der historischen Ausstattung in Schloss Linderhof wurden 2012 Zustandsdokumentationen der letzten 20 Jahre verglichen. Die Grundlage bildeten 1992 gefertigte Fotografien und Zustandsbeschreibungen. Die Details der Ausstattung von damals wurden 2012 fotografisch nachgestellt und anschließend mit Hilfe von Photoshop CS5<sup>®</sup> verglichen und so der Fortschritt der Schädigung sichtbar gemacht. Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Festlegung der Testflächen im Forschungsprojekt.

Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, die im Schloss befindliche Materialvielfalt zu erfassen. Weiter wurden sowohl vorgeschädigte als auch intakte, originale und überarbeitete Oberflächen untersucht.

Um kurzfristige als auch saisonale Schwankungen zu untersuchen, kamen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz (siehe Punkt 3). Die 3D-Mikroskopie und SLR-Aufnahmen dienen überwiegend der Beurteilung von kurzfristigen Schwankungen, während mit Hilfe des Streifenlichtscanners eher die saisonal bedingten Oberflächenveränderungen analysiert werden.

An ausgewählten Flächen wurden mehrere Verfahren eingesetzt, um die unterschiedlichen Techniken miteinander vergleichen zu können. In Tabelle 2 sind die ausgewählten Flächen nach Material, Schaden und Untersuchungsmethode aufgelistet.

Tabelle 2:  
Übersicht der Testflächen unterteilt nach Schaden und Untersuchungsmethode.

Material	Schaden	Methode	Ort
Gefasste Holzoberflächen	Risse	Streifenlichtscanner	Paradeschlafzimmer Treppenhaus, Türe zum Östlichen Gobelinzimmer
	Lockerung der Fassung (glatt, gesandelt)	Streifenlichtscanner 3D-Mikroskop Hochauflösende Digitalfotografie	Speisezimmer Östliches Gobelinzimmer Audienzzimmer
Vergoldete Holzoberflächen	Risse	Streifenlichtscanner 3D-Mikroskop	Speisezimmer
	Lockerung der Fassung (glatt, gesandelt)		
	Schimmelbildung	Streifenlichtscanner 3D-Mikroskop Hochauflösende Digitalfotografie	Paradeschlafzimmer Östliches Gobelinzimmer
Verputzte Oberflächen	Lockerung, Craquelée	Streifenlichtscanner 3D-Mikroskopie	Treppenhaus Bad

Derzeit werden die erhobenen Messdaten analysiert und in Hinblick auf die vorliegenden klimatischen Schwankungen des Raumklimas ausgewertet.

## Kooperationen

- Das Forschungsprojekt wird finanziell gefördert durch die **Deutsche Bundesstiftung Umwelt**
- Das **Fraunhofer-Institut für Bauphysik** ist für die messtechnische Begleitung (Messung und Auswertung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit), die Bereitstellung des 3D-Mikroskops, sowie die Untersuchung der Wirkungsweise der Lüftungsanlage durch hygrothermische Gebäudesimulation
- Die **Otto Friedrich Universität in Bamberg**, Professur für Restaurierungswissenschaften stellt für die Messkampagnen Untersuchungsequipment zur Verfügung

Für die Diskussion von Fragen, die während des Projektes auftreten, werden externe Experten hinzugezogen.

## Veröffentlichungen

Holl, Kristina, Bichlmair, Stefan, Janis, Katrin, Naumović, Tina, Kilian, Ralf:  
Konservierungswissenschaftliche Begleitung der Inbetriebnahme einer innovativen  
Lüftungsanlage in Schloss Linderhof, in: Bausubstanz 4 / 2015, S. 40 – 47

Holl, Kristina, Bichlmair, Stefan, Janis, Katrin, Naumović, Tina, Kilian, Ralf:  
Konservierungswissenschaftliche Begleitung der Inbetriebnahme einer innovativen  
Lüftungsanlage in Schloss Linderhof, in: 32. Internationales WTA-Kolloquium  
Bauinstandsetzen + Bauphysik, 10. – 11. März 2016

## Projektleitung

Dr. Katrin Janis  
Tel. 089 17908-340, Email: [katrin.janis@bsv.bayern.de](mailto:katrin.janis@bsv.bayern.de)

## Wissenschaftliche Begleitung

Kristina Holl  
Tel. 089 17908-236, Email: [kristina.holl@bsv.bayern.de](mailto:kristina.holl@bsv.bayern.de)

Tina Naumović  
Tel. 089 17908-380, Email: [tina.naumovic@bsv.bayern.de](mailto:tina.naumovic@bsv.bayern.de)

Klaus Häfner  
Tel. 089 17908-416, Email: [klaus.haefner@bsv.bayern.de](mailto:klaus.haefner@bsv.bayern.de)

