

Holzkonstruktionen mit Radar und Thermografie zerstörungsfrei untersuchen

Andreas HASENSTAB, S. HOMBURG, TÜV Rheinland, LGA Nürnberg
Christiane MAIERHOFER, Ralf ARNDT, BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin

Kurzfassung. Das Radarverfahren wurde erfolgreich zur Bodenerkundung sowie zur Ortung von Material- und Strukturänderungen an Baukonstruktionen eingesetzt. Thermografie wird für die bauphysikalische Untersuchung von Häusern vielfach eingesetzt. Die Anwendung des Radar- und des Thermografieverfahrens zur Untersuchung von Holzkonstruktionen wird in diesem Artikel beschrieben.

Bei einer Instandsetzung eines geschädigten BSH-Binders stellte sich beim Einbringen von zusätzlichen Gewindestangen heraus, dass die Lage der vorhandenen Stahlteile nicht exakt bekannt ist und so eine Sanierung sehr schwierig ist. Mit Radar und einem Wirbelstromgerät konnte die Position der Gewindestangen auch in Bereichen mit aufgenagelten Fournierplatten eindeutig geklärt werden.

Um das Tragverhalten einer Decke (Spindlerboden) im Neuen Palais in Potsdam besser einschätzen zu können, wurde sie zerstörungsfrei untersucht. Dabei wurde mit Radar die Lage der Deckenbalken und deren Abstände zueinander bestimmt und mit Thermografie die Intarsien und die Ausrichtung der Dielen untersucht.

1. Einleitung und Problemstellung

Die Untersuchung von Bestandsbauten ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Besonders wenn nur unvollständige Pläne über das Bauwerk vorhanden sind, müssen möglichst viele Informationen durch Untersuchungen zusammengetragen werden.

Im Bauwesen stehen zur Bauwerksuntersuchung eine Reihe zerstörungsarmer und zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Verfügung, wobei diese Verfahren ursprünglich größtenteils an Betonbauwerken angewendet werden. Neue Möglichkeiten der Anwendung der vorhandenen Verfahren an Holz werden hier vorgestellt.

2. Stand der Technik der Prüfverfahren für Holz

Innere Schäden in Holz werden zerstörungsarm vor allem mit der Bohrwiderstandsmethode und Bohrkernentnahme lokalisiert. Hierbei handelt es sich um Punktmessungen, deren Ergebnisse bei der Interpretation viel Erfahrung erfordern. Vereinzelt wird auch der Auszieh- oder Eindringwiderstand mit der Auszieh- oder Eindringwiderstandsmessung oder Penetrationsanalyse untersucht.

Neben der visuellen Prüfung wird auch der Belastungsversuch, die Durchstrahlungstechnik sowie die Ultraschalltechnik zerstörungsfrei angewendet [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Bei der Ultraschall-Durchschallungstechnik und der Durchstrahlungstechnik ist eine beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils erforderlich. Ultraschall-Durchschallung erfordert zudem eine beidseitige direkte Ankopplung am Bauteil, was die Anwendbarkeit des Verfahrens stark

begrenzt. Für Untersuchungen mit der Ultraschall-Echotechnik muss nur eine Bauteilseite zugänglich sein.

Relativ neu, und in der Fachwelt kaum bekannt, ist die folgend beschriebene Anwendung von Radar und Thermografie zur Untersuchung von Holzbauteilen.

3. Methodik

3.1. Radar

Das Radar-Verfahren (oder auch GPR: Ground Penetrating Radar) basiert auf der Ausbreitung sehr kurzer elektromagnetischer Impulse im Frequenzbereich bis oberhalb von 1 GHz, die von einer Dipolantenne in die zu untersuchende Struktur abgestrahlt werden. Diese Impulse werden bereits teilweise von der Oberfläche, größtenteils jedoch an weiteren Grenzflächen innerhalb der Struktur reflektiert und von einer Empfangsantenne detektiert. Die Laufzeit der reflektierten Impulse sowie die Intensität der Reflexionen sind dabei von den dielektrischen Eigenschaften der jeweiligen Materialien abhängig. Reflexionen treten z. B. an Hohlstellen, metallischen Einschlüssen oder auch an der Rückseite des Bauteils auf. An metallischen Oberflächen werden die Impulse vollständig reflektiert.

Häufig befinden sich Sende- und Empfangsantenne in einem Antennengehäuse. Zur Durchführung der Messungen wird diese bistatische Antenne entlang der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils geführt, während die Erfassung des Messweges mit einem Messrad erfolgt. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Material bekannt, so kann aus der Laufzeit der reflektierten Impulse auf die Tiefe des Reflektors geschlossen werden.

Im Radargramm erscheinen Reflexionen an kleineren Strukturen (z. B. an Bewehrungsstäben oder kleineren Hohlstellen) und an Kanten aufgrund des Öffnungswinkels der von der Antenne abgestrahlten elektromagnetischen Wellen im Radargramm typischerweise als Hyperbeln.

Weitere Informationen zum Radarverfahren und die Anwendungsbereiche des Verfahrens können der Literatur entnommen werden [7].

Die Ortung von Holzbalken in Boden- und Deckenkonstruktionen wurde bereits erfolgreich von M. Lualdi et al durchgeführt [8].

3.2. Thermografie

Die passive Infrarot-Thermografie wird schon seit Jahren erfolgreich zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) im Bauwesen eingesetzt. Hierbei wird ein vorhandener Temperaturgradient genutzt um z. B. Wärmebrücken, Leckagen in Fußbodenheizungen oder Regionen mit erhöhter Feuchtigkeit mittels einer im infraroten Wellenlängenbereich empfindlichen Kamera (Infrarot-Kamera) zu detektieren. Sind vorhandene Temperaturunterschiede zu gering, kann durch zusätzliche Erwärmung oder Abkühlung aktiv ein Temperaturgradient erzeugt werden.

Dieser Vorgang wird dann als aktive Thermografie bezeichnet. Ziel der passiven sowie der aktiven Thermografie ist der Nachweis und die quantitative Charakterisierung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in der zu untersuchenden Struktur, die sich aufgrund unterschiedlicher thermischer Eigenschaften vom umgebenden Material unterscheiden.

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, eine Wärmequelle (oder Kältesenke) zur Erzeugung von instationären Wärmeflüssen bei der aktiven Thermografie einzusetzen. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Verfahren im zeitlichen Verlauf der Anregung: diese kann stufenförmig, impulsartig (z. B. Impuls-Thermografie) oder periodisch (z. B. Lock-In-Thermografie) erfolgen. Bei der folgend angewendeten Impuls-Thermografie (IT) wird die

Oberfläche eines betrachteten Bauteiles durch einen Wärmeimpuls erwärmt. Der anschließende Abkühlungsvorgang wird bildgebend mit einer Infrarot-Kamera aufgenommen und die Messwerte mit Hilfe von Kalibrationstabellen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen in Temperaturwerte umgerechnet. Die zeitliche Veränderung der Oberflächentemperatur wird als Abfolge von Thermogrammen digitalisiert und gespeichert. Ausgewertet werden die zeitlichen Temperaturänderungen der einzelnen Pixel der Thermogramme (Transienten). Diese Transienten unterscheiden sich an den Positionen von Fehlstellen von denen des umgebenden ungestörten Materials. Differenzkurven zwischen Transienten im Fehlstellenbereich und im ungestörten Bereich haben häufig nach einer bestimmten Abkühlungszeit einen Extremwert, d. h. hier unterscheiden sich die Bereiche mit maximalem Temperaturkontrast. Über den quantitativen Wert des maximalen Kontrastes und dessen Zeitpunkt können über einen Vergleich mit numerischen Simulationen des Wärmetransportes auch quantitative Aussagen über die Fehlstelle getroffen werden. Typischerweise erscheinen tiefere Defekte zu einem späteren Zeitpunkt und mit geringerem Temperaturkontrast. Weitere Auswertungen der Transienten beinhalten deren Darstellung im Frequenzbereich (Puls-Phasen-Thermografie, PPT). Hierzu werden die Temperaturtransienten der einzelnen Pixel mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert und als Amplituden- und Phasenbilder dargestellt. Diese Auswertung der Messdaten nach der Methode der PPT ermöglicht eine kontrastreichere Darstellung der Fehlstellen sowie eine deutliche Reduzierung des Einflusses von Oberflächeneffekten, wie inhomogene Verteilungen der Emissivitäten oder inhomogene Erwärmung.

4. Ergebnisse

Die Möglichkeiten der beiden zerstörungsfreien Prüfverfahren Radar und Thermografie werden anhand von Anwendungsbeispielen vorgestellt.

4.1. Messung an BSH-Binder mit eingeklebten Gewindestangen mit Radar

4.1.1. Durchführung der Messungen

Nach einem Halleneinsturz im Winter 2004/2005 wurden viele Hallen auf ihre Sicherheit hin untersucht. Bei der hier untersuchten Halle fielen Querschnitte in der oberen Krümmung der Binder auf (Abbildung 1).

Im Zuge der Reparaturmaßnahme ist es laut Statik erforderlich, in die Binder Gewindestangen einzubringen.

Eine genauere Inaugenscheinnahme der Binder ergab, dass sowohl Querverspannungen einer früheren Reparatur als auch eingeklebte Gewindestangen von der Trägerherstellung im Bauteil vorhanden sind.

Diese Stahlteile wurden bei der Planung für die Sanierung berücksichtigt, wobei angenommen wurde, dass die werkseitig eingebrachten Gewindestangen rechtwinklig zur Trägerober- bzw. Unterkante verlaufen.

Bei Bohrungen für die zusätzlichen Gewindestangen wurden mehrfach Stahlteile angebohrt, was zu der Annahme führte, dass die bereits eingebrachten Stangen nicht rechtwinklig zum Bogen verlaufen.

So war ohne Kenntnis der Lage der vorhandenen Gewindestangen keine Sanierung möglich.

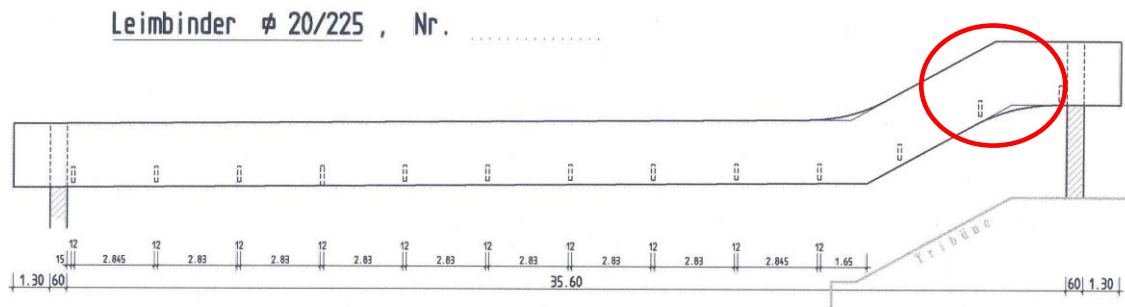


Abbildung 1: Zeichnung von untersuchtem Brettschichtholz binder (roter Kreis: Untersuchungsbereich)

Die Versuche, mit einem induktiven Bewehrungssuchegerät die Lage der Stahlstäbe zu lokalisieren waren erfolglos und so wurden Messungen mit Radar (Abbildung 2, GSSI, 1,6 GHz) und mit einem Wirbelstrombewehrungssucher durchgeführt. Dabei wurden BSH-Binder mit einer Dicke von 14 cm und 20 cm untersucht.

4.1.2. Messergebnisse

In Abbildung 3 sind zwei Messlinien von Radarmessungen an einem Binder als gepunktete Pfeile angedeutet und die erzielten Ergebnisse als Messlinien in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt, wobei sich die Gewindestangen als Scheitel der Radarhyperbeln (Pfeile) abzeichnen.



Abbildung 2: Radarmessung an BSH-Binder



Abbildung 3: Lage der Gewindestangen (rote Linien) und Messspuren (gepunktete Linien)

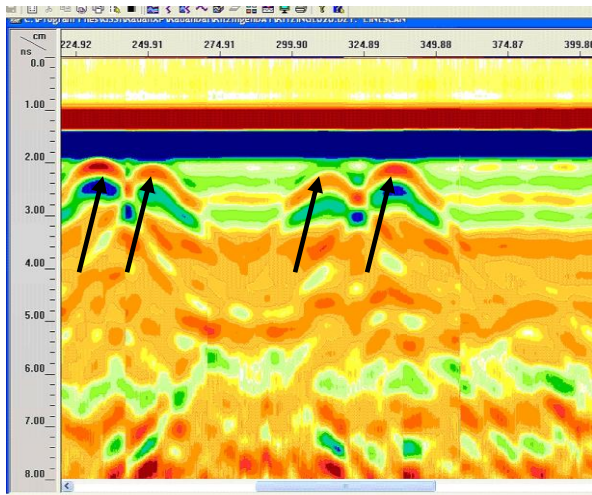


Abbildung 4: Radargramm einer Messung in Trägermitte mit Reflexionen von beiden Übergreifungsstößen der Gewindestangen (1,6 GHz)

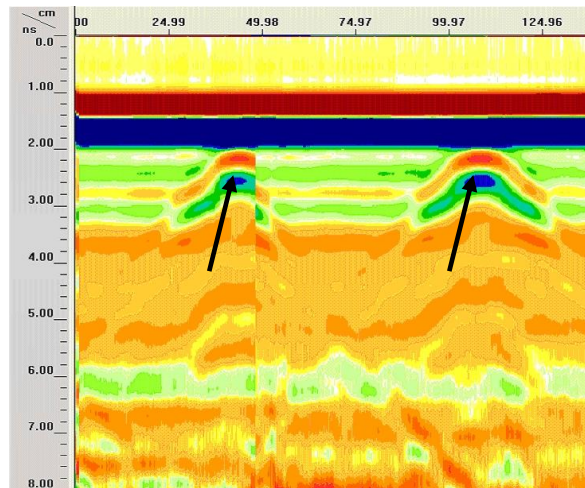


Abbildung 5: Radargramm einer Messung am unteren Trägerrand mit Reflexionen von beiden Trägerrand mit Reflexionen von beiden Gewindestangen (1,6 GHz)

Die Untersuchungen zeigten, dass bei schlanken BSH-Bindern die Lage der eingeklebten Gewindestangen übereinstimmend mit dem Radarverfahren und der Wirbelstromsonde geortet werden konnten.

Führen Untersuchungen mit zwei auf unterschiedliche physikalische Prinzipien basierenden Geräten zu den gleichen Ergebnissen kann die Aussagesicherheit als sehr hoch angesehen werden. Durch diese Selbstreferenzierung ist auch die Aussagekraft eines Verfahrens bei einer alleinigen Anwendung hoch.

Wie wichtig dies ist, zeigt sich bei der weiteren Untersuchung der BSH-Binder, wo an den dicken Bindern ($d = 20$ cm) nur das Radarverfahren die Lage der Gewindestangen orten konnte.

Eine zusätzliche Schwierigkeit stellten Fournierplatten dar, die mittels Nagelpressleimung befestigt, bei früheren Sanierungen angebracht wurden. Die Metallnägeln führten zu einer Störung des Wirbelstromverfahrens. Mit dem Radarverfahren war es dennoch möglich, die Lage der eingebauten Gewindestangen zu bestimmen.

Im Zuge der Untersuchung wurde auch die Lage der Stäbe in Bezug auf den Holzquerschnitt bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die eingebauten Gewindestangen meist schräg im Binder, d.h. zu einer Oberfläche hin, verlaufen. Dies erklärt auch, warum an Stelle einer Gewindestange meist zwei Stangen eingebaut wurden. Beim Bohren der Löcher für die Gewindestangen „verliefen“ die Bohrer; d.h. der Bohrkanal folgte nicht der Querschnittsmittelpunkt sondern erreichte eine Oberfläche. Um die Querkraftkräfte dennoch aufnehmen zu können, wurde von der gegenüberliegenden Seite gebohrt und ein zweiter Gewindestab eingebracht.

Wenn Bohrungen ganz „verliefen“ wurden die Bohrkänel ohne Gewindestangen auch mit Holzdübeln verschlossen, was bedeutet, dass die sichtbaren Holzdübel keinen Rückschluss auf die Gewindestangen zulassen.

Im Zuge der Messungen wurde die Position der Gewindestangen an jedem Träger angezeichnet. Mit dieser Information konnte für jeden Träger eine Individuallösung erarbeitet und ausgeführt werden.

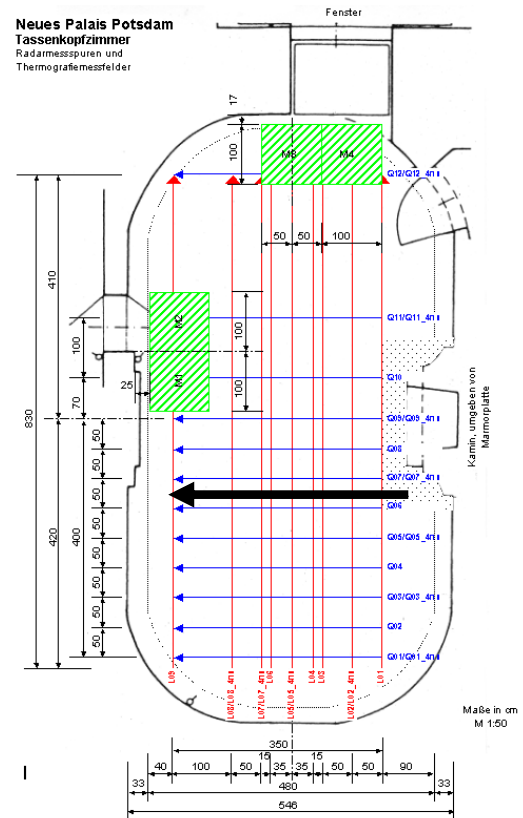
4.2. Untersuchung des Spindlerbodens im Tassenkopfzimmer (Neues Palais)

Die Studienrichtung „Restaurierung von Holzobjekten“ der Fachhochschule Potsdam führt in Zusammenarbeit mit der Stiftung „Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg“ allgemeine Zustandsuntersuchungen an den Parkettfußböden des „Neuen Palais“ in Potsdam durch [9].



Abbildung 6: Neues Palais in Potsdam

Abbildung 7: Lage der Messspuren der Radarmessungen und Messfelder der Thermografiemessungen



Im Rahmen der Untersuchung des Holzfußbodens des Tassenkopfzimmers ergaben sich Aufgabenstellungen, die mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren gelöst werden sollten. Daher wurde in dieser Phase auch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit eingebunden.

Zur Bestimmung einer für den Besucherverkehr zulässigen Nutzlast sollte die Lage der Balken (Tragrichtung und Abstände der Balken) im Tassenkopfzimmer untersucht werden.

4.2.1. Radar

4.2.1.1. Durchführung der Messungen

Für die Durchführung der Radarmessungen wurde das kommerzielle SIR 20 Radargerät von der Firma GSSI (USA) mit einer 1,5 GHz Antenne vom gleichen Hersteller verwendet (Abbildung 8). Wie in Abbildung 7 dargestellt wurden zur Untersuchung des Fußbodenaufbaus im Tassenkopfzimmer neun in Längsrichtung verlaufende Messspuren (rot markiert) und zwölf quer dazu verlaufende Messspuren aufgenommen (blau markiert). Vor Messbeginn wurden die Messspuren mit Klebeband auf dem Parkettfußboden markiert.



Abbildung 8: links: Radarausrüstung (GSSI), rechts: Messung mit 1,5 GHz Antenne (GSSI)

In den im Folgenden dargestellten Radargrammen wird in einer Tiefe von 0 cm die Objektoberfläche (statisches Signal) als horizontal verlaufendes Reflexionsband abgebildet. Hierbei stellt sich die Oberflächenreflexion im Radargramm durch eine dunkel/hell/dunkel-Graustufenfolge dar. Da die Tiefenskala mittig im ersten Extremwert des Oberflächensignals angelegt wurde, ist bei einer tiefer liegenden Reflexion zur Tiefenbestimmung ebenfalls die Lage des ersten Extremwertes entscheidend.

4.2.1.2. Messergebnisse des Radarverfahrens

In Abbildung 9 ist das Radargramm einer 3,5 m langen Messspur (Q06) dargestellt, die im Tassenkopfzimmer parallel zur Fensterwand (von Süd nach Nord) aufgenommen wurde. Die genaue Lage der Messspur zeigt Abbildung 7. Deutlich sichtbar ist im Radargramm das horizontal verlaufende Reflexionsband der Oberfläche. Direkt unterhalb der Oberflächenreflexion sind weitere schwächere Reflexionen zu erkennen, die eventuell Elementen der Holzkonstruktion zugeordnet werden können. Der Abstand dieser Elemente erscheint unregelmäßig und beträgt zum Teil weniger als 50 cm. Weitere stärkere Reflexionen sind in einer größeren Tiefe zu beobachten, die durch das sich unter dem Fußboden befindende Mauerwerksgewölbe verursacht werden. Zwischen diesen stärkeren Reflexionen sind nur sehr schwache und undeutliche weitere Reflexionen zu erkennen.

In den Radargrammen der Längsmessspuren wird die Oberflächenreflexion von vielen kleinen hyperbelförmigen Reflexionen überlagert, die den im Parkett vorhandenen metallischen Nägeln und Schrauben zugeordnet werden können. Weitere stärkere Reflexionen sind in einer größeren Tiefe zu beobachten, die wiederum durch das sich unter dem Fußboden befindende Mauerwerksgewölbe verursacht werden. Im Vergleich zu den von der Stiftung „Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg“ georteten Schrauben und Nagelungen des Parkettbodens zeigen sich im Radargramm jedoch weitaus mehr Reflexionen.

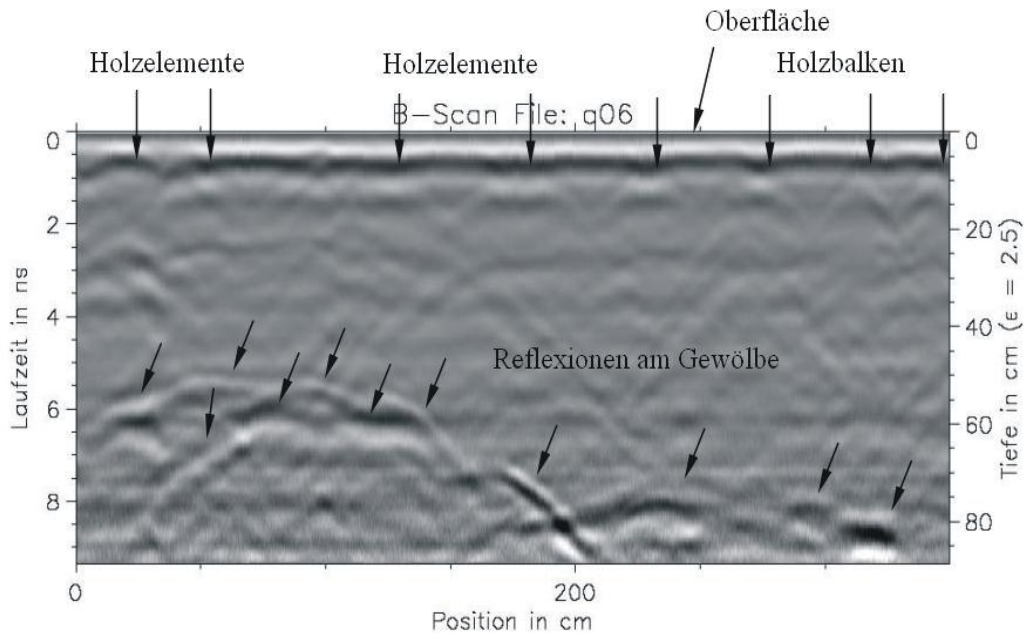


Abbildung 9: Ergebnis einer Radarmessung, mit Reflexionen von Holzelementen und Gewölbe (GSSI 1,5 GHz)

4.2.2. Thermografie

4.2.2.1. Durchführung der Messungen

Die einzelnen Messfelder M1 bis M4 sind ca. 1 m² groß und wurden vor der Durchführung der Messungen mit Kreppband markiert. Die folgend beschriebenen Messfelder M3 und M4 liegen im Norden vor dem Doppelfenster.

Die Messfelder wurden manuell 3 bis 5 Minuten lang mit einem elektrischen Heizlüfter vorsichtig erwärmt. Anschließend wurde die Abkühlung der Oberflächen über einen Zeitraum von jeweils 15 Minuten mit einer Infrarot-Kamera erfasst. Hierzu wurde die Infrarot-Kamera „ThermaCAM SC1000“ von Inframetrics (FLIR System GmbH) genutzt. Bei der Datenerfassung wurde zur Aufnahme der Sequenzen das Programm „Thermacam Researcher“ verwendet. Die Thermogramme wurden mit einer Bildwiederholrate von 10 Hz erfasst. Das Vorgehen bei der Durchführung der Messungen vor Ort gliederte sich in die folgenden Arbeitsschritte:

- Das Messfeld wird markiert und eingemessen
- Nachdem alle Einstellungen an der Kamera vorgenommen wurden, die auch bei den weiteren Messungen beibehalten werden, werden vor der Erwärmung ein hochaufgelöstes Digitalbild und ein Thermogramm (so genanntes Referenzbild) aufgenommen
- Die Randbedingungen und Umgebungsparameter wie die relative Luftfeuchte, die Lufttemperatur, die Temperatur des Objektes, die Kameraposition und weitere Messparameter der Kamera werden schriftlich dokumentiert
- Manuelle vorsichtige und möglichst gleichmäßige Erwärmung des Messfeldes mit einem Heizlüfter für 3 bis 5 min
- Beobachtung der Abkühlung mit der Infrarot-Kamera für 15 min
- Auswertung der Thermogrammsequenzen mit der PPT
- Darstellung der Phasenbilder

4.2.2.2. Messergebnisse des Thermografieverfahrens

Messfeld M3

Das 1 m² große Messfeld M3 liegt genau vor dem Doppelfenster im Norden des Raumes und wird von der von Norden nach Süden verlaufenden Trennfuge im Parkett halbiert. Auf dem Digitalbild in Abbildung 10, links, ist der Aufbau der oberen Parketttafel mit der Trennfuge gut zu erkennen. Die Verlegerichtung der Tafeln verläuft westlich von der Trennfuge von NW nach SO und östlich von ihr von NO nach SW. Es sind einige Parkettverunreinigungen, aber keine Holzstifte, Astlöcher bzw. andere Störstellen sichtbar.

Abbildung 11, links unten, zeigt das Phasenbild der ausgewerteten Messdaten. In diesem Phasenbild sind die Faserrichtung der Parketttafeln (N-O) und mehrere auffällige Punkte zu erkennen, die auf darunterliegende Nägel, Schrauben oder Dübel schließen lassen. Es gibt hier eine sehr gute Übereinstimmung mit den von der Fachhochschule Potsdam im Vorfeld der Untersuchung georteten Verbindungsmitteln. Des Weiteren sind im Phasenbild die Fugen zweier Tafeln der tragenden Parkettkonstruktion im westlichen Teil des Messfeldes klar zu beobachten.

Messfeld M4

Das Messfeld M4 schließt sich direkt an das Messfeld M3 an (Abbildung 7). Auf dem Digitalbild in Abbildung 10, rechts, ist der Aufbau der oberen Parketttafel mit den eingelegten Rosen und den dunkelbraunen Grenztafelchen im Osten des Messfeldes zu erkennen. Die Verlegerichtung der Tafeln verläuft von NW nach SO. Im Phasenbild in Abbildung 11, rechts unten, sind die Faserrichtung der Parketttafeln (N-O) und wiederum mehrere auffällige Punkten zu erkennen, die mit den im Vorfeld georteten Verbindungsmitteln (Stiftnägel und Schrauben) übereinstimmen. Auch hier scheint sich eine Fuge zwischen zwei Parketttafeln zu befinden.



Abbildung 10: Fotos der Thermografiemessbereiche, linke M3, rechts M4

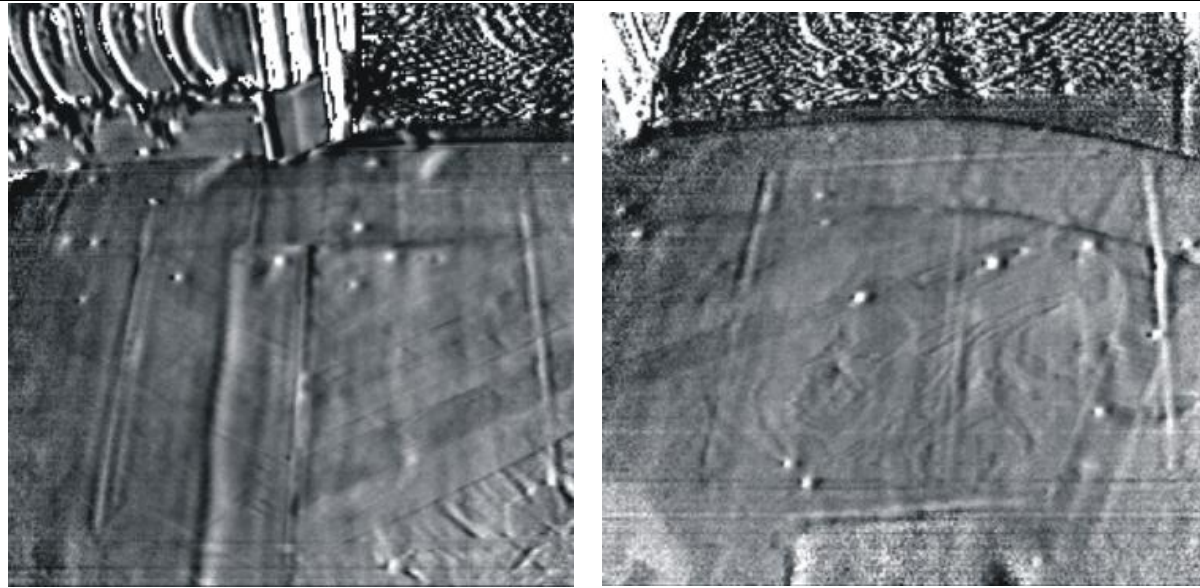


Abbildung 11: Phasenbild mit deutlich erkennbarer Maserung und Tragrichtung der Dielung, Befestigungsnägel (helle Punkte) und schemenhaften Intarsien

Mit Radar kann die Lage und Spannrichtung der Balken und die Struktur des darunterliegenden Gewölbes bestimmt werden. Trockenes Holz hat für Radarwellen ähnliche Eigenschaften wie Luft und eine Auswertung ist schwierig aber möglich.

Mit Thermographie kann das Parkett, die innenliegenden Nägel und die Lage und Maserung der darunter liegenden Dielen untersucht werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden das Radarverfahren und die aktive Thermografie als zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Untersuchung des Aufbaus von Holzkonstruktionen eingesetzt. Dabei wurde mit Radar eindeutig die Lage von Gewindestangen in BSH-Bindern bestimmt, was für die weitere Sanierung unumgänglich war.

Mit Radar bzw. Thermografie wurde ein Holzfußboden im Tassenkopfzimmer des Neuen Palais in Potsdam untersucht. Das Radarverfahren ermöglichte in dem vorliegenden Anwendungsfall die Detektion von oberflächennahen Reflexionen, die wahrscheinlich an den Gratleisten der Parketttafeln entstehen. Darunter liegende Reflexionen haben eine so geringe Intensität, dass diese nicht eindeutig den Kieferholzbalken zugeordnet werden können, es aber so scheint, als wären die Gratleisten meist auf den Kiefernbalcken befestigt. In größerer Tiefe treten wieder stärkere Reflexionen auf, die von der Gewölbestruktur verursacht werden. Weiterhin können mit dem Radarverfahren oberflächennahe metallische Nägel und Schrauben detektiert werden. Mit der Impuls- Thermografie können diese Verbindungselemente in den Phasenbildern ebenfalls dargestellt werden. Das zweidimensionale Phasenbild ermöglicht dabei eine einfachere Kartierung dieser Elemente. Weiterhin sind im Phasenbild die Holzstrukturen unmittelbar unterhalb der Intarsien zu erkennen.

Diese Untersuchung zeigt, dass insbesondere in den Fällen, wo sowohl Informationen über die innere Struktur von Bauteilen als auch über die oberflächennahen Bereiche benötigt werden, das Radarverfahren und die aktive Thermografie sinnvoll kombinierbar sind und aus der Kombination zum Teil komplementäre Messergebnisse erzielt werden können. Zukünftige systematische Untersuchungen werden sich verstärkt mit der Bewertung der Zuverlässigkeit der verschiedenen Messverfahren für unterschiedliche Materialien, Strukturen und Messtiefen befassen.

6. Danksagung

Bei der Durchführung und Auswertung der Radarmessungen am Neuen Pallais sowie bei der Darstellung der Messergebnisse haben Jens Wöstmann, Kerstin Borhardt und Christiane Trela mitgewirkt (BAM VIII.2). Die Thermografieauswertungen wurden von Mathias Röllig (ebenfalls BAM VIII.2) durchgeführt. Die Messeinsätze wurden von der *Stiftung Preussische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg* gefördert und von der *Fachhochschule Potsdam* begleitet. Allen Teilnehmern der Messeinsätze sei hiermit für ihre gute Zusammenarbeit gedankt.

7. Literatur

- [1] Görlacher, R., Hättrich, R.: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz (1990), H. 6, S. 455-459]
- [2] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): ZfPBau-Kompendium. <http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm> (2004)
- [3] Wenzel, F., Kleinmanns, J.: Sonderforschungsbereich 315, Historische Holztragwerke, Untersuchungen, Berechnungen und Instandsetzen. Universität Karlsruhe (1999)
- [4] Hasenstab, A., Rieck, C., Hillemeier, B., Krause, M.: Hohlstellenortung in Holzbalken mit dem Ultraschallverfahren. DGZfP-Jahrestagung 06.-08. Mai 2002 in Weimar, DGZfP-Berichtsband auf CD: Plakat 32, Berlin (2002)
- [5] Hasenstab A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation TU Berlin (2005)
- [6] Hasenstab, A., Osterloh, K., Robbel, J., Krause, M., Ewert, U., Hillemeier, B.: Mobile Röntgenblitzröhre zum Auffinden von Holzschäden, DGZfP-Jahrestagung 17.-19. Mai 2004 in Salzburg, DGZfP-Berichtsband auf CD: Plakat 15, Berlin (2004)
- [7] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP): Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10). Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin (2001)
- [8] M. Lualdi, L. Zanzi, L. Binda: Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. In: Proceedings of the International Symposium on Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 2003, DGZfP, Berlin
- [9] K. Mikszas: Untersuchung und Konzepterstellung eines Marketeriebodens von 1767/68 der Gebrüder Spindler aus dem Neuen Palais in Potsdam. Masterarbeit an der Fachhochschule Potsdam, 2006