

Ausbildung an deutschen Hochschulen im Bereich ZfP im Bauwesen

Christian GROßE

Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München, Baumbachstr. 7, 81245 München, grosse@tum.de

Kurzfassung. Der Artikel führt in den Stand der universitären Lehre zur ZfP im Bauwesen an deutschen Hochschulen ein und gibt Empfehlungen für eine systematische Abdeckung der wesentlichen Lehrinhalte. Dabei werden unterschiedliche Konzepte für verschiedene Lehrveranstaltungsformen berücksichtigt.

Einführung

Im Bauwesen ist die Bedeutung der Zerstörungsfreien Prüfung in den vergangenen Jahren gestiegen. Dies betrifft sowohl den klassischen Bereich der Inspektion von Bauwerken wie auch die Qualitätssicherung bei der Bauwerkserstellung und die Dauerüberwachung im Betrieb. Dazu kommt die zunehmende Bedeutung von neuen Werkstoffen und Baumaterialien, bei deren Entwicklung und Einsatz zerstörungsfreie Prüfungen im Zusammenspiel mit empirischen Schädigungsuntersuchungen und Simulationen eingesetzt werden. Allerdings ist werkstoffbedingt die Streuung auf Materialebene (makroskopischer und mesoskopischer Bereich) im Bauwesen deutlich größer als in anderen Bereichen. Der wichtigste Baustoff ist Beton; er ist ein Verbundwerkstoff unterschiedlicher Komponenten, in dem die Zuschläge, die Zementmatrix, Luftporen und Wasser jeweils wichtige Rollen spielen, aber in sehr unterschiedlichen Mischungsverhältnissen und Erscheinungsformen auftreten. Dazu kommt noch in den meisten Fällen die Notwendigkeit, Bauteile beispielsweise mit Stahlelementen (Stäben, Matten, Fasern) zu bewehren, was den Materialmix weiter erhöht. Die Werkstoffpalette ist im Bauwesen aber noch weitaus größer, denn auch Stein und Ziegel, Holz und Polymere (um nur einige weitere Baumaterialien zu nennen) werden neben Beton und Stahl häufig verwendet und miteinander kombiniert. Die Vielfalt von Materialkombinationen führt gemeinsam mit den unterschiedlichsten Randbedingungen im Hoch- und Tiefbau dazu, dass praktisch kein Ingenieurbauwerk dem anderen gleicht [1]. Dazu kommen noch die Variationen in der Ausführung, die oft nicht nur erlaubt sondern auch gewollt sind. Da zudem Bauwerke oft als singuläre Objekte ausgeführt werden, ist die „Stückzahl“ sehr begrenzt, was Auswirkungen einerseits auf die finanziellen Randbedingungen einer Prüfung hat und andererseits auch jeweils angepasste Methoden und Geräte erfordert. Diese komplexen Randbedingungen haben lange die Weiterentwicklung von Prüfverfahren und -geräten im Bauwesen verzögert. Typischerweise werden Verfahren und Geräte, die für das Maschinenwesen, in der Medizintechnik oder in den Geowissenschaften (Geophysik) eingesetzt wurden, im Bauwesen erst mit einer Nachlaufzeit angewendet. Zudem gibt es im Bauwesen Regelungen zur Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren oder gar zur Zertifizierung von ZfP-Prüfgerät und -Personal nur für wenige ausgewählte Anwendungsfälle. Die Ausbildung (vor allem im Ingenieurbereich) ist für das Gebiet der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen weder eindeutig geregelt, noch liegen dafür klare Konzepte

vor. Die Anwender und Experten in diesem Bereich bilden sich weitgehend autodidaktisch fort oder organisieren selbst ihre Fortbildung u. a. über den Fachverband „Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung“ (DGZfP).

Obwohl ein solcher Status einen gewissen Charme haben mag, ist er doch im Zuge der beschriebenen Entwicklung im Werkstoffbereich sowie der Bedeutung, dem ein modernes Qualitätsmanagement auch im Bauwesen heute zukommt, nicht mehr haltbar. Das ist vielen Experten seit langem bewusst [2, 3] und gilt insbesondere, da die Komplexität und Menge der Prüfaufgaben steigt und der Trend hingeht zu einer Kombination von verschiedenen zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren. Notwendig sind deshalb Konzepte, welche auf die aktuelle Situation Rücksicht nehmen und die Qualität einer Ausbildung im Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung als hochinterdisziplinärer Wissenschaft sicherstellen. Solche Konzepte existieren bislang weder im deutschsprachigen Raum noch sind sie dem Autor auf internationaler Ebene bekannt.

1. Status der Lehre im Bereich Zerstörungsfreie Prüfung

1.1 Bauwesen

Es ist schwierig, den aktuellen Stand der Lehrveranstaltungen zum Thema Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen an deutschen Hochschulen in Erfahrung zu bringen, da es kein entsprechendes Nachschlagewerk oder eine andere Quelle dazu gibt. Von den Hochschulen herausgegebene Verzeichnisse sind oft veraltet oder es sind nicht alle Lehrveranstaltungen zu dem Thema aufgenommen. Am ehesten kann noch der „Studienführer zur ZfP-Ausbildung an Universitäten, Hoch- und Fachhochschulen – Eine Übersicht für Studenten und ihre Dozenten“ [4] verwendet werden, der von der DGZfP herausgegeben wird. Im Fachausschuss „Hochschullehrer im Lehrgebiet ZfP“ sind einige der Hochschullehrer organisiert und tragen zu dem Führer bei. Dieser Führer ist keineswegs nur auf das Bauwesen fokussiert. Zudem wird er nur alle 3-4 Jahre aktualisiert. Die Meldung von Lehrveranstaltungen ist freiwillig, so dass er kein vollständiges Verzeichnis darstellt.

Auf der Grundlage der aktuellen Version des Studienführers und vor dem Hintergrund eigener Erfahrungen wurden vom Autor im Sommer 2011 Hochschullehrer und Dozenten von deutschen Hochschulen angeschrieben – allerdings mit einer sehr schlechten Rücklaufquote, so dass eigene Recherchen die folgenden Informationen ergänzen mussten. Auch die folgenden Angaben sind also wahrscheinlich unvollständig.

Danach scheint die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen als eigenständige Lehrveranstaltung mit diesem Titel nur an zwei Universitäten (Universität Stuttgart und TU München) angeboten zu werden und das mit sehr unterschiedlichem Umfang (Stuttgart: 2 Semesterwochenstunden nur im Wintersemester; München: 4 Semesterwochenstunden im Sommer- und Wintersemester, die jeweils um ein ZfP-Seminar mit 2 SWS ergänzt werden). Weitere Lehrveranstaltungen zum Thema ZfP werden an der TU Berlin und der TU Braunschweig angeboten. Die Vorlesung „Bauwerksdiagnose“ an der TU Berlin hat 2 SWS und wird durch ein vierstündiges Laborpraktikum an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ergänzt. Die TU Braunschweig bietet die Lehrveranstaltung „Bauwerksmonitoring und Messtechnik“ an und die TU Darmstadt eine Lehrveranstaltung zum Thema „Überwachen und Prüfen von Bauwerken“, die „als wesentliches Element die zerstörungsfreie Bauteilprüfung“ enthält. An der Fachhochschule Potsdam wird außerdem eine Vorlesung „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ mit sechsmal vier Stunden Umfang angeboten, die durch ein zweimal vierstündiges Laborpraktikum ergänzt werden.

An anderen deutschen Universitäten und Hochschulen ist die ZfP für das Bauwesen ein mehr oder weniger großer Bestandteil von Lehrveranstaltungen zu anderen Themen.

Tab. 1 enthält eine keineswegs vollständige Übersicht, die dazu dienen soll zu zeigen, in welchem Umfeld ZfP-Inhalte angeboten werden.

Tabelle 1. Themen von Lehrveranstaltungen an deutschen Hochschulen für Studierende des Bauingenieurwesens mit Bezug zur Zerstörungsfreien Prüfung:

<ul style="list-style-type: none">– Massivbau– Werkstoffe im Bauwesen bzw. Baustofflehre– Bauphysik– Bauwerkserhaltung bzw. Instandhaltung– Instandsetzung– Bauschäden und Bauschadensanalyse– Bauwerksdiagnostik– Materialprüfung bzw. Werkstoffprüfung

Dazu kommen weitere Spezialvorlesungen wie Holzbau, Stahlbau, Mauerwerk, Konservierung (von Objekten des kulturellen Erbes) usw., die spezifische Anwendungen von zerstörungsfreien Prüftechniken beinhalten können.

Grundlagenfächer wie die Physik (Experimentalphysik), Elektrotechnik und Mechanik (insbesondere Kontinuumsmechanik) können ebenfalls Elemente der Zerstörungsfreien Prüfung enthalten. Dabei wird regelmäßig eher der Grundlagenbereich der Prüfverfahren beleuchtet (evtl. mit einigen wenigen Anwendungsbeispielen). Materialwissenschaftliche Grundlagenfächer beleuchten demgegenüber eher den Anwendungsbereich, wobei die Vermittlung der Grundlagen in den Hintergrund tritt. Solche Lehrveranstaltungen besitzen aber nicht den Anspruch, das Gebiet der ZfP umfassend darzustellen.

1.1 Die Zerstörungsfreie Prüfung in Lehrveranstaltungen anderer Fakultäten

Die Zerstörungsfreie Prüfung ist nicht nur ein Thema im Bauwesen. Fachbereiche bzw. Fakultäten wie die Physik, die Geowissenschaften, das Maschinenwesen, die Medizintechnik, die Elektrotechnik oder die Architektur (sowie natürlich alle Mischformen) behandeln mehr oder weniger intensiv dieses Gebiet. An dieser Stelle kann nicht auf alle Besonderheiten eingegangen werden oder auch nur eine Übersicht über die entsprechenden Lehrveranstaltungen gegeben werden. Es sei auf den bereits genannten ZfP-Studienführer der DGZfP [4] verwiesen, der allerdings unvollständig ist. Generell scheint der gesamte Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung selten in den Fachprüfungsordnungen verankert zu sein und eher individuell je nach Interessenlage der Hochschullehrerinnen bzw. -lehrer behandelt zu werden. Interfakultative Lehrveranstaltungen in diesem Gebiet sind eine Ausnahme. Hinweise dazu enthält ein parallel erscheinender Beitrag [5].

2. Lehrkonzepte für das Fachgebiet Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen

Ehe mögliche Lehrinhalte diskutiert werden können, muss geklärt sein, welchen Raum dem Thema in geeigneten Studiengängen gegeben wird bzw. gegeben werden kann. Generell gibt es verschiedene Konzepte, die man bei der Realisierung einer Lehrveranstaltung zum Thema ZfP im Bauwesen verfolgen kann. Einerseits können die Lehrinhalte auf verschiedene existierende Lehrveranstaltungen verteilt werden. Andererseits kann eine Lehrveranstaltung zum Thema Zerstörungsfreie Prüfung konzipiert werden. Diese beiden Fälle sollen näher betrachtet werden.

2.1 Integration der ZfP-Inhalte in existierende Lehrveranstaltungen

Für diese Lösung spricht, dass keine zusätzliche Lehrveranstaltung kreiert werden muss. Dies ist ein gewichtiges Argument, da spätestens nach den Studentenprotesten von 2009/2010 klar wurde, dass (nicht zuletzt nach der Einführung der Bachelor-/Master-Programme) die zeitliche Belastung der Studierenden durch (Pflicht-) Lehrveranstaltungen und vor allem durch Prüfungen sehr hoch ist. Da in der Regel keine Lehrveranstaltung angeboten werden kann, ohne dass die erfolgreiche Teilnahme durch eine wie auch immer geartete Prüfung nachgewiesen wird, bedeutet jede zusätzliche Lehrveranstaltung auch mehr Aufwand für die Studierenden. Dieser Aspekt trifft sicherlich auf Studierende des Bauingenieurwesens in besonderem Maße zu, wo die Fächeranzahl üblicherweise außerordentlich hoch ist.

Teilt man den Stoff auf verschiedene existierende Lehrveranstaltungen auf, die (wie es wohl der Regelfall sein dürfte) dann von verschiedenen Hochschullehrern betreut werden, so setzt dies eine gute Koordination der Lehrinhalte voraus. Ein nachhaltiger Lehrerfolg setzt in der ZfP erst ein, wenn verschiedene Verfahren miteinander verglichen werden und wenn deren Einsatz (Erfolg/Misserfolg) in verschiedenen Anwendungsfeldern diskutiert werden kann. Auch das Zusammenspiel von zerstörender Prüfung, zerstörungsfreien Messverfahren und Simulationsmethoden ist ein wesentlicher Kern der modernen ZfP-Anwendung. Erfahrungsgemäß ist eine einheitliche Behandlung der unterschiedlichen ZfP-Verfahren und ihrer Anwendungen (Nomenklatur, Notation) sowie eine vergleichende Diskussion der Methoden innerhalb der üblichen Lehrveranstaltungsstruktur einer deutschen Hochschule durch verschiedene Hochschullehrer wenig realistisch. Eine solche Lösung wäre deswegen nicht zu priorisieren, jedoch immer noch besser, als wenn ZfP-Inhalte gar nicht vermittelt würden.

2.2 Eigenständige ZfP-Lehrveranstaltungen

Es leuchtet deswegen vielleicht ein, dass die Abhaltung von eigenständigen Lehrveranstaltungen zum Thema ZfP die bessere Lösung ist. Deren Umfang und vor allem der für die Studierenden damit verbundene Arbeitsaufwand kann durch verschiedene Steuerungsmöglichkeiten kontrolliert werden, was wie folgt erläutert wird.

2.2.1 Prüfungsleistungen

Neben dem reinen Zeitaufwand (gemessen üblicherweise in Semesterwochenstunden, SWS) treten Übungen und Prüfungen als zeitrelevante Elemente hervor. Der erfolgreiche Besuch einer Lehrveranstaltung wird üblicherweise nach dem *European Credit Transfer and Accumulation System* (ECTS) über ein Punktesystem gemessen, das eine gegenseitige Anerkennung der Prüfungsleistungen auf europäischer Ebene ermöglichen soll [6]. Die Beschlüsse der KMK von 2010 dazu sollen sicherstellen, dass insbesondere die Anzahl von Lehrveranstaltungen mit wenigen ECTS-Punkten begrenzt sein soll, um vor allem den Prüfungsaufwand zu vermindern. Diese Regelungen verhindern allerdings die Einführung von neuen (innovativen) Fächern neben dem existierenden klassischen Fächerkanon, so dass hier spezielle Lösungen gefragt sind. Neben den im Regelfall angewendeten Prüfungsleistungen in Form von mündlichen oder schriftlichen Prüfungen kann für die Zerstörungsfreie Prüfung als Prüfungsleistung auch die Anfertigung von Hausarbeiten, die Durchführung von Messaufgaben oder das Halten von Vorträgen erwogen werden. Diese Prüfungsleistungen können zu einem großen Teil bereits während der Vorlesungszeit erfüllt werden oder lassen sich so ausarbeiten, dass die ZfP nicht zusätzlich zur üblichen Prüfungsbelastung am Semesterende beiträgt.

2.2.2 Prüfungsleistungen

Als Alternative zu den klassischen Lehrveranstaltungsformen können Blockvorlesungen angeboten werden. Da jedoch zunehmend auch die vorlesungsfreie Zeit der Studierenden gut gefüllt ist, wird es immer schwieriger, hier noch geeignete zeitliche Freiräume zu finden. Der Vorteil von Blockveranstaltungen ist, dass deren zeitliche Dichte ein effizienteres Lernen ermöglicht. Auch organisatorisch hat diese Veranstaltungsform Vorteile, da es die Koordinierung der Lehrinhalte auch bei verschiedenen Lehrenden (s.o.) erleichtert. Zudem kann in komprimierter Form und mit guter zeitlicher Nähe auch die Durchführung von ZfP-Messungen mit den Studierenden in Labor-, Hörsaal- oder Feldübungen eingeübt oder ihnen zumindest demonstriert werden.

2.2.3 Übungen

Während in vielen Fächern die Einübung des Stoffes oft in Form von sogenannten Übungsblättern erfolgt, bieten sich bei der ZfP andere Wege an. Die Anwendung von ZfP-Verfahren im Bauwesen ist gerade dadurch charakterisiert, dass mobile Geräte für In-situ-Messungen angewendet werden. Deswegen liegt nichts näher, als die Vorlesungen durch praktische Übungen mit ZfP-Geräten zu ergänzen. Dies dient nicht nur dem Umsetzen des (in der Regel in Form von Frontalvorlesungen vermittelten) Stoffes anhand von Beispielmessungen, sondern erhöht auch den Spaß am Fach. Bei jedem ZfP-Verfahren lässt sich so zeigen, wie einfach einerseits die Messdurchführung oft ist, wie komplex aber die Datenanalyse sein kann. Ein wesentliches Ziel kann beispielsweise sein, die Bedeutung der Randbedingungen für den Erfolg einer Messung zu vermitteln (siehe Abschnitt 3.3).

2.3 Personelle Aspekte und interfakultative Lehrangebote

Betrachtet man das Konzept der eigenständigen Lehrveranstaltung zur Zerstörungsfreien Prüfung näher, so ist die Frage der personellen Umsetzung zu stellen. Im Regelfall bietet sich an, ein Mitglied der Fakultät zu benennen, das eine solche Lehrveranstaltung übernehmen kann. Für reine Bauingenieur fakultäten kann dies schwierig sein, da tiefere mathematisch-physikalische Grundlagenkenntnisse notwendig sind. So wundert es auch nicht, dass viele Spezialisten auf dem ZfP-Gebiet ein naturwissenschaftliches Grundstudium besitzen und keine klassische Bauingenieurausbildung besitzen. Für Fakultäten, die einen Schwerpunkt im ZfP-Bereich setzen wollen, bieten sich deswegen wiederum mehrere Möglichkeiten an. Die Schaffung eines Lehrstuhls im Bereich der ZfP im Bauwesen wird eher die Ausnahme sein. Nicht nur dort, sondern auch im Maschinenwesen oder in der Elektrotechnik gibt es nur sehr wenige Lehrstühle dieser Art. Eine weitere Möglichkeit ist die Vergabe eines Lehrauftrages – mit allen Nachteilen, die dies hat. Eine andere Möglichkeit ist die Schaffung von interfakultativen Lehrstühlen. Die Zerstörungsfreie Prüfung bietet sich als Querschnittsfach geradezu dafür an, Anwendungsbereiche aus dem Bauingenieurwesen, dem Maschinenbau, der Architektur, den Geowissenschaften und der Elektrotechnik (so wie u. U. auch der Medizintechnik) zusammenzufassen. Entweder man beruft eine Persönlichkeit auf einen entsprechenden Lehrstuhl einer Fakultät und deckt die anderen Gebiete in Form von sogenannten Lehrexporten ab, oder man schafft Lehrstühle mit Mehrfachmitgliedschaften (engl. *multi appointments*). In Deutschland gibt es für das Bauwesen derzeit leider keine Vollprofessur für die Zerstörungsfreie Prüfung. Allerdings wurde Anfang 2010 an der TU München ein Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung als *double appointment* der Fakultäten Bau- und Umweltingenieurwesen sowie Maschinenwesen eingerichtet. Schon länger gibt es an der Universität Saarbrücken die *Professur für Zerstörungsfreie Materialprüfung und Qualitätssicherung*. Der Lehrstuhlinhaber ist gleichzeitig Direktor des Fraun-

hofer Instituts für Zerstörungsfreie Prüfung (IZFP) und Mitglied der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät. Eine Verbindung zum Bauwesen existiert allenfalls über das Fraunhofer Institut, da es den Fachbereich Bauingenieurwesen an der Universität des Saarlandes nicht gibt. Schwerpunkte der Arbeit sind ZfP-Anwendungen im Maschinenwesen und Anlagenbau. Es wäre durchaus zu überlegen, ob die Einrichtung von ein bis zwei Professuren zum Thema Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen in Deutschland bzw. im deutschsprachigen Raum sinnvoll und möglich ist. Dies setzt voraus, dass die Bedeutung des Gebietes auf Fakultäts- und/oder auf Universitätsebene klarer gesehen wird. Erfolgreiche Modelle wie das *double appointment* in München oder die Personalunion mit einer Forschungseinrichtung wie in Saarbrücken könnten dabei u. U. durch die Einrichtung eines Stiftungslehrstuhls ergänzt werden.

3. Lehrinhalte für das Fachgebiet Zerstörungsfreie Prüfung

Welche Lehrinhalte im Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen sollten heute vermittelt werden? Die Beantwortung dieser Frage hängt von den Konzepten ab, die umgesetzt werden können und die im vorangegangenen Abschnitt erläutert wurden. Es ist sinnvoll, einen Mindestumfang festzulegen, sowie ergänzende Themen vorzuschlagen. Ein solches Vorgehen kann die Definition von Lehrinhalten (Curriculum) in Form eines Memorandums für die universitäre Lehre in einem Fach beinhalten und ist durchaus üblich. Ein Beispiel hierfür bietet das „Hochschullehrer-Memorandum: Werkstoffe im Bauwesen – universitäre Lehre und Forschung“ [7], das gemeinsam von den Herausgebern unter Federführung von Prof. Reinhardt im Jahr 2000 erarbeitet wurde und das derzeit überarbeitet wird. Für die Zerstörungsfreie Prüfung gibt es aktuell kein solches Memorandum. Es wäre gemeinsam von den Experten und Hochschullehrern im deutschsprachigen Raum zu erstellen. Die folgenden Ausführungen können das nicht ersetzen, sollen aber einen Anstoß zu einem Memorandum geben.

3.1 Generelle inhaltliche Gliederung

Aufgrund der Brückenfunktion der ZfP zwischen Bauwesen und Messtechnik sollten die Lehrinhalte in vier Teile gegliedert werden:

1. Theorie, mathematisch-physikalische Grundlagen
2. Messtechnische Grundlagen
3. Zerstörungsfreie Prüfverfahren
4. Anwendungen im Bauwesen

Die ersten beiden Punkte behandeln grundlegende Aspekte der zerstörungsfreien Prüfung, die nicht unbedingt materialspezifisch sind, während der letzte und teilweise der dritte Punkt bauwesenspezifische Aspekte behandeln. In welcher Form diese Teile gelehrt werden, ist möglicherweise sekundär, jedoch sollten alle vier Aspekte in angemessener Form im Kanon enthalten sein. Wird dem dritten Teil mehr Gewicht gegeben, ist zu bedenken, dass (insbesondere bei der universitären Lehre) die Vermittlung von Grundlagen nicht vernachlässigt werden sollte. Da strenggenommen nur der letzte Teil bauwesenspezifische Aspekte beinhaltet, eignet sich das Fach in besonderem Maße für Synergieeffekte, die durch interfakultative Lehrformen genutzt werden kann. Dies ist in Große [5] dargestellt.

3.2 Gliederung der mathematisch-physikalischen Inhalte

Die theoretischen Grundlagen für die Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren liegen vor allem im Bereich der Physik der kondensierten Materie, der Kontinuumsmechanik sowie der Akustik, Elektrotechnik und Optik. Dazu zählen unter anderem:

- i. Physik von Massenpunkten; Mechanik
- ii. Schwingungen und Wellen
- iii. Akustik und Ausbreitung von elastischen Wellen in Festkörpern
- iv. Felder/Potentialfelder
- v. Elektromagnetische Wellen (Thermografie, Radar, Mikrowellen)
- vi. Potentialfeldverfahren und Gravimetrie
- vii. Optik und opto-elektronische Grundlagen
- viii. Strahlenphysik
- ix. Simulationsmethoden

Sicher ist diese Aufzählung nicht vollständig und kann noch um weitere Aspekte ergänzt werden. Muss jedoch eine weitere Begrenzung vorgenommen werden, so kann man Schwerpunkte bei den Punkten i.-v. setzen.

3.3 Mögliche Inhalte bei der Vermittlung messtechnischer Grundlagen

Die Praxis zeigt, dass der Weg von den theoretischen Grundlagen zur Praxisanwendung nur über ein vertieftes Verständnis auch der messtechnischen Grundlagen geht. Vielfach scheitert eine ZfP-Anwendung in der Baupraxis an einem mangelhaften Verständnis der Umsetzung der Theorie in die Praxis und an der Beachtung der Einschränkungen, denen jede Messung unterliegt. Zu den Aspekten, die behandelt werden sollten, zählen unter anderem:

- a. Wahl des Prüfgerätes; Funktionen des Gerätes
- b. Charakterisierung der einzelnen Messkomponenten der Messkette inkl. Sensorik
- c. Ankopplungsbedingungen
- d. Bedeutung von Störeinflüssen
- e. Optimierung von Prüfzeitpunkt und Prüfobjekt
- f. Messkonzept und Durchführung der Messung
- g. Abspeicherung, Analog-Digital-Wandlung
- h. Darstellung von Messergebnissen
- i. Fehleranalyse und Fehlerrechnung nach Gauß
- j. Manipulation der Messergebnisse und der Ergebnisdarstellung
- k. Kombination von Messverfahren und Daten

Auch diese Aufzählung ist sicher nicht vollständig. Die einzelnen Punkte können allgemein angesprochen werden, beinhalten aber jeweils auch Aspekte, die verfahrenstypisch sind. Diese Aspekte müssen dann jeweils im Zusammenhang mit der Beschreibung des Verfahrens erörtert werden.

3.4 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Das Kernstück der Lehre im Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen ist die Vermittlung der Kenntnisse, die zum Gebrauch von Prüfgeräten befähigen und der Anwendung von Verfahren dienen. Es gibt eine schwer überschaubare Vielzahl an Verfahren, die permanent weiterentwickelt werden. Das Ziel der ZfP-Lehrveranstaltungen kann deswegen nur sein, die wichtigsten Verfahren vorzustellen und die Studierenden für deren Anwendungsbereiche sowie Vor- und Nachteile zu sensibilisieren, damit sie die geeignetesten Verfahren für den jeweiligen Anwendungsfall sicher auswählen können. Welche Verfahren vom Dozenten als wichtig eingestuft werden sollten, kann diskutiert werden, jedoch können dazu für Anwendungen im Bauwesen die folgenden Verfahren gezählt werden:

- I. Ultraschall
- II. Impakt-Echo
- III. Schwingungs- und Modalanalyse
- IV. Schallemissionsanalyse
- V. Radar und Mikrowellen

- VI. Infrarot-Thermografie
- VII. Potentialfeldmessverfahren, Wirbelstrom
- VIII. Radiografische Verfahren

Dazu kommen noch verschiedene i. d. R. handgeführte Verfahren und „einfache“ Prüfverfahren oder minimalinvasive wie z. B. der Rückprallhammer oder die Endoskopie. Auch Aspekte der Dauerüberwachung (engl. *Structural Health Monitoring*) können hinzukommen. Diese Einteilung folgt der im Abschnitt 3.2 für mathematisch-physikalische Grundlagen, allerdings ist eine solche Einteilung nicht zwingend. Häufig werden die verfahrenstypischen Abschnitte von ZfP-Lehrveranstaltungen nach Schädigungs- oder Anwendungsklassen gegliedert. Die Gliederung erfolgt dann beispielsweise nach dem Muster: „Welches Verfahren kann zur Detektion/Lokalisierung der Schädigung xy verwendet werden“. Typische Schädigungsarten bzw. Anwendungsszenarien sind beispielsweise:

- (1) Korrosion
- (2) Risse
- (3) Fehlstellen, Kiesnester, Hohlräume
- (4) Abweichungen in der Geometrie, Minderdicke
- (5) Suche von Leitungen oder Bewehrung
- (6) Bestimmung von Längen, Dicken und Dehnungen
- (7) Bestimmung von Temperatur und Feuchte (auch in Bauteilen)

Dazu kommen noch weitere materialspezifische Verfahren oder Verfahren, mit denen mehr oder weniger indirekt die Festigkeit bzw. Restfestigkeit, die inneren Spannungen oder die Funktionstüchtigkeit ermittelt werden können.

Zwar ist Beton bzw. Stahlbeton mit Abstand der wichtigste Baustoff, doch werden ZfP-Verfahren natürlich auch für Bauteile und Bauwerke aus anderen Materialien benötigt. Aufgabenstellungen bei der Prüfung von reinen Stahl-, Holz- oder Mauerwerkskonstruktionen weichen teilweise erheblich von denen bei Beton ab. Zunehmend werden Komposite verwendet [1], was für die Prüfung zusätzliche Herausforderungen birgt.

3.5 Gliederung bauwesenspezifischer Inhalte

Der Inhalt der anwendungsspezifischen Teile der Lehrveranstaltungen kann über die o. g. Aspekte hinaus nach vier weiteren Aspekten unterteilt werden:

- i. Baustoffentwicklung und -forschung
- ii. Qualitätssicherung in der Bauphase
- iii. Inspektion im Betrieb, Rehabilitierung, Bauen im Bestand
- iv. Dauerüberwachung/Monitoring

Damit wird der gesamte Lebenszyklus eines Bauwerkes abgedeckt, sozusagen von der Geburt bis zum Abbruch bzw. Recycling. In aller Regel müssen sich die Aspekte unter Kapitel 3.2 und 3.3 sowie die Wahl des oder der ZfP-Verfahren der Prüfaufgabe unterordnen. Aus diesem Grund gibt es eine gewisse Ambivalenz zwischen der anwendungsorientierten und der verfahrenstechnischen Beschreibung der Zerstörungsfreien Prüfung in der Lehre. Generell kann man die Beschreibung der Anwendungsaspekte in den Vordergrund stellen und die Grundlagenaspekte sowie die Verfahrensbeschreibungen an diesen Anwendungen orientiert erörtern. Es ist nicht möglich vorzugeben, welcher Weg sinnvoller ist.

Häufig wird nur der Aspekt „Zerstörungsfreie Prüfung bei Inspektion, Rehabilitierung, Bauen im Bestand“ bei Lehrveranstaltungen herausgegriffen, was der ZfP als universelles Mittel zur Qualitätssicherung und Überwachung nicht gerecht wird. Außerdem sind spezifische Anwendungsaspekte beispielsweise bei Sicherung von Objekten des kulturellen Erbes im Rahmen von Denkmalschutz und Konservierung sind interessante zusätzliche Aspekte, die behandelt werden können.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Bedeutung von Verfahren zur Qualitätssicherung und Prüfung steht in einem gewissen Kontrast zum Umfang der universitären Lehre in diesem Gebiet. Es erscheint notwendig, die Fachprüfungsordnungen an zumindest einigen deutschen Hochschulen zu überarbeiten und die Zerstörungsfreie Prüfung zu berücksichtigen. In welchem Umfang dies erfolgt, muss der Schwerpunktbildung an den Hochschulen überlassen bleiben. Jedoch sollten die im Artikel beschriebenen Lehrinhalte oder zumindest ein großer Teil davon im Lehrplan derjenigen Universitäten verankert werden, die die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen als Schwerpunkt anbieten wollen. In Anbetracht der Fülle an Lehrinhalten (wie in Abschnitt 3 beschrieben) kann nicht empfohlen werden, eine solche Lehrveranstaltung mit lediglich zwei Semesterwochenstunden durchzuführen. Um die Lehrbelastung der Studierenden nicht zu erhöhen, kann u. U. der Umfang anderer Lehrveranstaltungen mit ZfP-Inhalten reduziert werden. Ein solches Vorgehen würde zudem die Effizienz in der Lehre verbessern.

Die Definition von einheitlichen Ausbildungsstandards, -inhalten und Lehrzielen wäre ein entscheidender Schritt hin zu einer größeren Akzeptanz des Faches im Bauwesen und wäre die Grundlage für eine breitere Anwendung. Dies beinhaltet beispielsweise die „sichere Auswahl und Anwendung von Prüfverfahren“ sowie grundlegende Kenntnisse zu den Verfahren selbst sowie zur Messtechnik. Um die Qualität der Lehre im Bereich Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen sicherzustellen, wird empfohlen, mindestens 1-2 Professuren im deutschsprachigen Raum zu installieren. Die Lehrinhalte selbst sollten anerkannten Standards folgen, die in Form eines Curriculums für die Zerstörungsfreie Prüfung (im Bauwesen) von den Experten in diesem Gebiet auszuarbeiten sind.

Danksagung

Für Hinweise zu ZfP-Lehrveranstaltungen danke ich meinen Kollegen Holst (Technische Universität Braunschweig), Mähner (Fachhochschule Münster), Middendorf (Universität Dortmund), Müller (Karlsruher Institut für Technologie), Reinhardt (Universität Stuttgart) und Taffe (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung). Der Technischen Universität München danke ich für die Möglichkeit, einen Teil der beschriebenen Empfehlungen umsetzen zu können.

Referenzen

- [1] Grosse, C.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – Möglichkeiten und Grenzen. In: Bauingenieur, VDI-Bautechnik, Jahresausgabe 2011/2012, Springer VDI-Verlag, S. 122-131.
- [2] Heidt, H.: ZfP im Bauwesen - ist Ausbildung notwendig? DGZfP-Berichtsband 66-CD, Vortrag 12 1999, S. 117-120.
- [3] Wiggenhauser, H.: Bauwerksdiagnose mit zerstörungsfreien Prüfverfahren – Einführung und neue Entwicklungen. NDT.net Vol. 11, Nr. 1 (2006), 4 Seiten.
- [4] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.): Studienführer zur ZfP-Ausbildung an Universitäten, Hoch- und Fachhochschulen – Eine Übersicht für Studenten und ihre Dozenten. ISBN 3-931 381-56-0, Berlin, 2008, 111 Seiten.
- [5] Große, C.: Konzepte für die interfakultative Lehre im Fach Zerstörungsfreie Prüfung, Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. H. Budelmann, TU Braunschweig, 16 Seiten (in Druck).
- [6] Kultusministerkonferenz (KMK): Ländergemeinsame Strukturvorgaben für die Akkreditierung von Bachelor- und Masterstudiengängen, Beschluss vom 10.10.2003 i.d.F.v. 04.02.2010.
- [7] Reinhardt, H.-W et al. (Hrsg.): Hochschullehrer-Memorandum Werkstoffe im Bauwesen – universitäre Lehre und Forschung. In: Bauingenieur 75 (2000), Nr. 11, S. 723-729.