Zerstörungsfreie Schadensanalyse

Anwendung und Grenzen bei Betonbauwerken

Prof. Dr.-Ing. Rainer Auberg

WISSBAU® Beratende Ingenieurgesellschaft mbH

Essen Köln München Berlin

Geschäftsführender Gesellschafter

Beratender Ingenieur und
Staatlich anerkannter Sachverständiger
für Schall- und Wärmeschutz nach LBO NRW

Dipl.-Ing. Thomas Borg

WISSBAU® Beratende Ingenieurgesellschaft mbH

Essen Köln München Berlin

Zusammenfassung

Die zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Bauwerksteilen in Stahlbetonbauweise im Zuge der Bauwerksanalyse ist mittlerweile Regel der Technik und findet vermehrt Anwendung.

Für die zerstörungsfreie Bauwerksanalyse werden auf der Basis vorliegender technischer Unterlagen Untersuchungskonzepte abgestimmt und als zielführend angesehene Messverfahren ausgewählt. Die Schwierigkeit besteht meist darin, dass man möglichst wenig zerstörende Bauteilöffnungen vornehmen möchte und die Anwendung der modernen Messtechnik auf die zu untersuchenden Bauwerksbereiche abstimmen muss. Die Anwendung der modernen zerstörungsfreien Messtechnik ermöglicht eine systematische, flächendeckende Untersuchung der Bausubstanz erforderlich. Zur Kalibrierung der Messungen sind dann nur wenige zerstörende Untersuchungen.

Heute angewandte zerstörungsfreie Messverfahren sind aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Messtechnik einfacher in der Handhabung und bieten unter der Berücksichtigung der „richtigen“ Bewertung der Ergebnisse eine gute Basis für eine aussagesichere Beurteilung des Ist – Zustandes der vorliegenden Bausubstanz. Die Messmethoden finden des weiteren Einsatz bei der Überwachung und der Mängelaufnahme.

Wie bei allen Messmethoden müssen die Messergebnisse hinsichtlich der Fehlergenauigkeit und unter Beachtung der vorliegenden Randbedingungen genau analysiert werden. Obwohl die Messgeräte heute durch Computereinsatz deutlich einfacher zu bedienen sind, ist für die Auswertung der Ergebnisse ein hoher Erfahrungs- und Ausbildungsstand des Messingenieurs bzw. des jeweiligen Anwenders vor Ort erforderlich, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Die Qualitätssicherung ist im Rahmen der zerstörungsfreien Bauwerksdiagnostik bei der Messung und Auswertung dringend erforderlich und kann über das sog. „3 – Stufenmodell“ – DGZfP[1] bestehend aus

1. Stufe: Prüfer vor Ort
2. Stufe: Auswerter mit Aufsichtsfunktion
3. Stufe: Prüfingenieur mit Planungs – und Interpretationstätigkeit

sichergestellt werden wobei u.a. das „Vier-Augen-Prinzip“ Anwendung findet.

[1] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V

1. EINLEITUNG

Die Anwendung von zerstörungsfreien Messmethoden im Rahmen der Bauwerksdiagnostik ist durch moderne Messgeräte einfacher und aussagesicherer geworden.

Die Vorteile der zerstörungsfreien Bauwerksuntersuchungen liegen insbesondere darin, dass u.a.

1. keine signifikante Zerstörung am Bauteil stattfindet,
2. eine nachträgliche Qualitätsüberprüfung bzw. eine Abnahmeprüfung an Bauteilen vorgenommen werden kann,
3. eine frühzeitige Schadenserkennung an Bauteilen (z.b. im Rahmen eines Bauwerksmonitorings) möglich ist und
4. die Möglichkeit der Feststellung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in großen bzw. kompliziert aufgebauten Bauteilen besteht.

Als Nachteile der zerstörungsfreien Bauwerksuntersuchungen können benannt werden, dass

1. ein hoher Ausbildungs- und Erfahrungsgrad trotz i.d.R. einfacher Messgeräte beim Anwender vor Ort vorausgesetzt wird,
2. die z.T. komplexen Messergebnisse und Einflussgrößen einen hohen Sachverstand zur Überführung in einfache und interpretierbare Ergebnisse für den Auftraggeber erfordern,
3. Haftungs- und Gewährleistungsfragen auftreten können, da die Anwendungen i.d.R. nicht genormt sind und
4. hohe Kosten im Rahmen der Anschaffung der Messtechnik entstehen können.

Im Folgenden werden beispielhaft einige zerstörungsfreie Messmethoden vorgestellt und kritisch betrachtet:

1. Potentialmessung
2. Induktive Bewehrungserkundung
3. Ultraschallmessung
4. Impact-Echo-Technik
5. Bauwerksthermografie

In der Tabelle 1 werden die zu ermittelnden möglichen Zielgrößen der o.g. Messverfahren gegenübergestellt.

Diese Zielgrößen dienen in der praktischen Anwendung als Basis für die Planung von Instandsetzungsmaßnahmen oder für die Qualitätsüberwachung. Im Zuge der Anwendung der zerstörungsfreien Messmethoden bei der Ist-Zustand-Ermittlung und der Qualitätssicherung ist eine höhere Aussagesicherheit bei der Planung von Instandsetzungsmaßnahmen und der Abnahme durch genauere und umfangreichere Kenntnis der Bauteilqualität möglich.

Tabelle 1: Angewandte Messverfahren und deren Zielgrößen

Methode	Zielgrößen
Potentialmessung	Korrosionsgrad der Bewehrung, Qualitative Ermittlung von Feuchte- und Fremdsalzgehaltverteilungen
Magnetische / induktive Messmethoden	Betondeckung, Bewehrungslage, Bauteilerkundung im Hinblick auf jegliche Eisenmetalle, Verankerungsortung
Ultraschall, Schallemission, Impact Echo	Festigkeit, Dichte, Homogenität, Schädigungsfront, Fehlstellen, Bauteilerkundung, dyn. E-Modul, Schichtenaufbau, Rissanalyse
Bauwerksthermografie	Oberflächentemperaturen, Wärmeverluste, Ortung von Leckagen, Durchfeuchtungen

2. Angewandte Meßmethoden

2.1. Potentialmessung

Die Messung des Korrosionspotentials von Bewehrungsstahl in Stahlbetonbauwerken für die Ermittlung des Korrosionsgrades der Bewehrung kann weitestgehend zerstörungsarm an der Oberfläche des Bauwerks erfolgen. Es ist lediglich eine kleine Bauteilöffnung für das Ankoppeln an die Bewehrung notwendig.

Der sich aufgrund der elektrochemischen Korrosion ausgebildete Potentialunterschied zwischen der Anode und der Kathode (Korrosionselement; Abb. 1) bildet Potentialfeldlinien aus, die an der Betonoberfläche messbar sind. Seit Anfang der 70er Jahre wird dieser Aspekt zur zerstörungsfreien Inspektion des Bewehrungsstahls in Massivbauteilen genutzt.

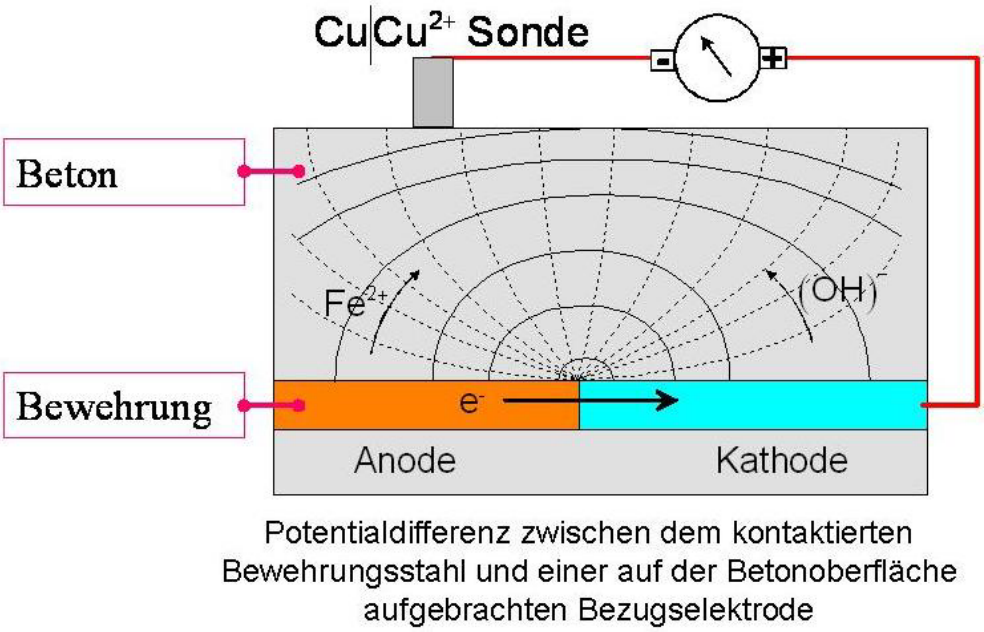
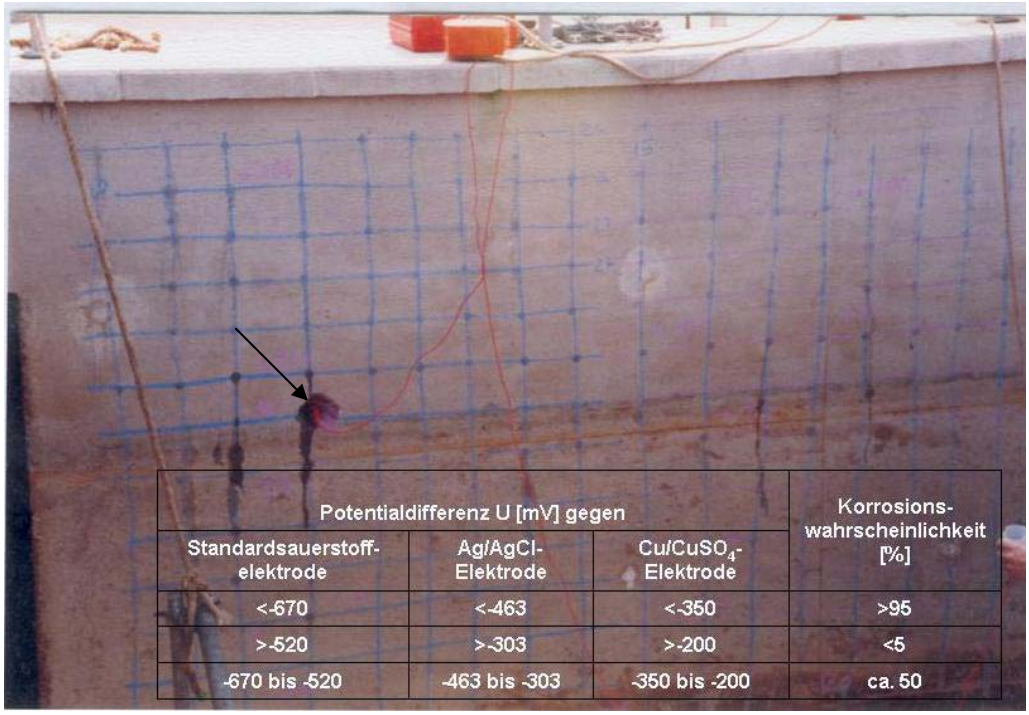


Abbildung 1: Darstellung des Messprinzips

Bei dem Verfahren der Potentialmessung werden mittels einer Bezugselektrode, die Potentialfeldlinien der im Bauwerk ablaufenden Korrosion gemessen. Dazu wird auf die Bauteiloberfläche eine Elektrode, die eine bekannte Potentialdifferenz besitzt, aufgesetzt und ein Messraster mit lokaler Bauteilöffnung (Potentialpunktmessung, s. Abb.2) untersucht. Mit Hilfe eines hochohmigen Voltmeters wird dann der Potentialunterschied zu der Bewehrung gemessen. Trotz der recht guten Aussagekraft des Verfahrens und des relativ geringen Apparateaufwandes, weist das Verfahren bis heute einige prinzipielle Schwierigkeiten auf.



Potentialdifferenz U [mV] gegen			Korrosions-wahrscheinlichkeit [%]
Standardsauerstoff-elektrode	Ag/AgCl-Elektrode	Cu/$CuSO_4$-Elektrode	
<-670	<-463	<-350	>95
>-520	>-303	>-200	<5
-670 bis -520	-463 bis -303	-350 bis -200	ca. 50

Abbildung 2: Darstellung eines Messrasters mit Ankopplungsstelle und Angabe der Bewertungskriterien nach ASTM

Die Zahl der Einflussfaktoren auf die Messung des Korrosionspotentials ist sehr vielfältig, wodurch sich die hohe Anforderung an den Erfahrungs- und Ausbildungsstand Messingenieur ergibt.

Beispielhafte Einflüsse auf die Ergebnisse der Potentialmessung:

- Betonfeuchte (--)
- Fremdsalzgehalte (--)
- Karbonatisierung (+)
- Hydratationsgrad, Dichtigkeit (+)
- Betondeckung (+)

Alle genannten Faktoren beeinflussen die Größe des Oberflächenpotentials in signifikanter Weise und erschweren damit die Aussage über das Vorliegen von Korrosion. Die o.g. Faktoren können ein vorhandenes Korrosionspotential überdecken oder ein nicht existentes Korrosionspotential vortäuschen.

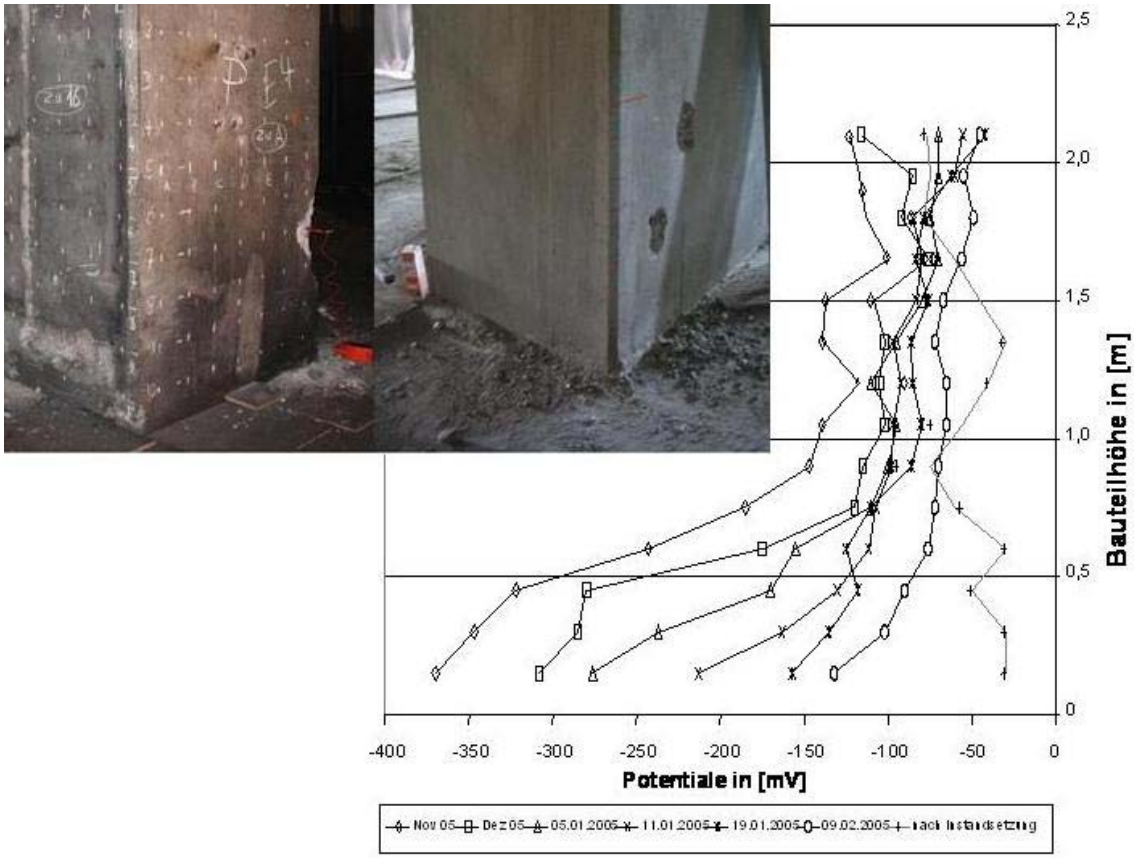


Abbildung 3: Darstellung einer untersuchten chloridbelasteten Stütze mit Ergebnissen, der über die Zeit gemessenen Korrosionspotentiale bei unterschiedlichem Trocknungsgrad

Im praktischen Anwendungsfall konnte am Beispiel eines Stützenbauteils die Entwicklung des Korrosionspotentials über einen Zeitraum von etwa 10 Monaten unter Simulation einer geplanten Nutzungsänderung (Änderung der Randbedingungen) herausgestellt werden.

In Anlehnung an die ASTM 876 „Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete“ wurden die Messungen mit einer Kupfer-Kupfersulfat-Sonde das Korrosionspotential an der Stahlbetonstütze im Bestand und im sanierten Zustand durchgeführt.

2.2. Induktive Bewehrungserkundung

Für die Ortung der Bewehrung mittels zerstörungsfreier Prüfmethode wird der minimale Abstand zwischen einem auf der Betonoberfläche geführten Prüfkopf und dem (magnetisierbaren) Bewehrungseisen ermittelt.

Das angewandte Messprinzip beruht auf der Funktionsweise eines Transformators. Hierbei erzeugt eine Primärspule über eine angelegte Wechselspannung eine Induktionsspannung in einer Sekundärspule. Die Größe der induzierten Spannung stellt ein Maß für den Anteil und den Abstand des Bewehrungsstahls in der Umgebung dar. Ein Schwingkreis wird durch die verschiedenen Materialien unterschiedlich gedämpft.

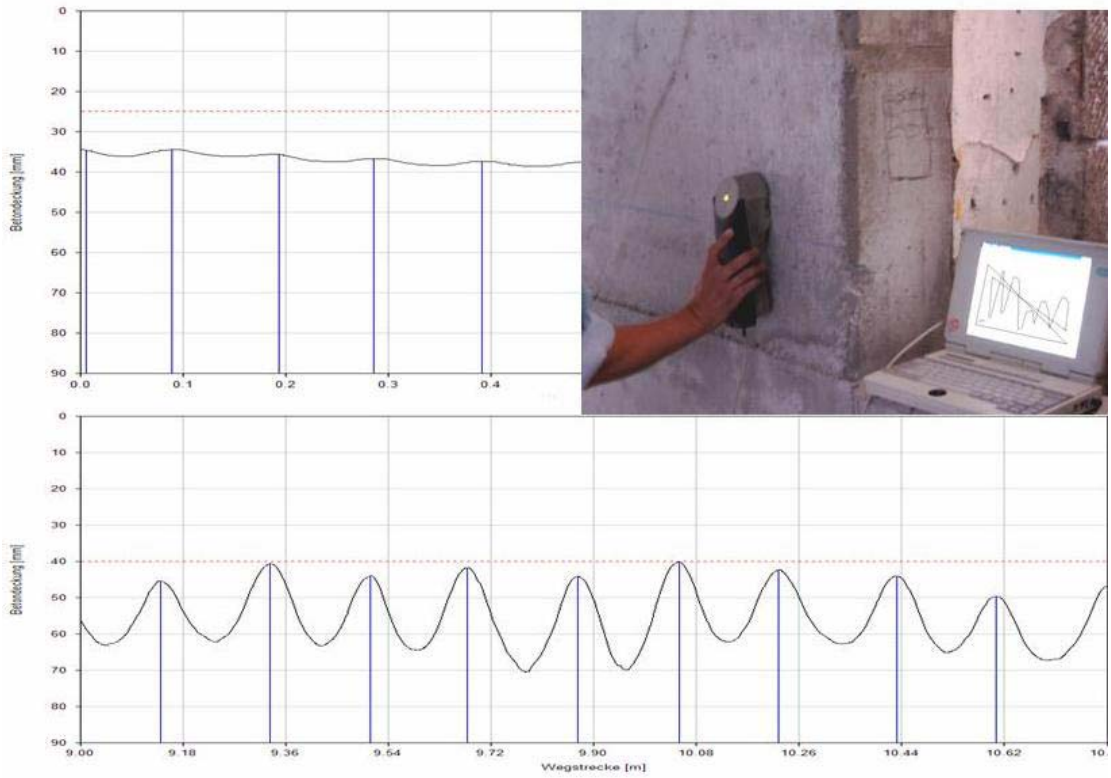


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung von zwei Messreihen. Die obere Messreihe wurde oberhalb eines parallel zur Messrichtung gelegenen Eisens aufgezeichnet, die untere Messreihe wurde fachgerecht in ausreichendem Abstand zu einer parallel verlaufenden Bewehrung ermittelt.

Die hieraus resultierende Induktionsänderung wird gemessen und die Entfernung des Stahls unter Berücksichtigung der Dämpfung durch den Beton errechnet. Je höher die gemessene Spannung, desto geringer ist der Abstand der Bewehrung bei gleichem Durchmesser bzw. je größer ist der Bewehrungsstabdurchmesser bei gleicher Betondeckung. Daraus ergibt sich die Abhängigkeit der beiden Größen, d.h. eine Messung einer Größe ist nur bei Kenntnis der anderen Größe möglich. Ein Rad als Wegaufnehmer nimmt während der Messung die abgefahrene Wegstrecke auf. Beide Werte werden in einer Grafik

(s. Abb. 4) ausgegeben, in welcher sich die Betondeckung und die Lage des Stahls ablesen lassen. Die Messgenauigkeiten liegen gemäß Herstellerangaben für Betondeckungen bis 4 cm bei ± 1 mm, für Betondeckungen bis 9 cm bei ± 2 mm.

Mit der induktiven Meßmethode können folgende Punkte festgestellt werden:

- Bewehrungslage und Bewehrungsführung
- Abstand und Anzahl der Bewehrungsstähle
- Betondeckung (bei Kenntnis des Stabdurchmessers)
- Bewehrungsstabdurchmesser (bei Kenntnis der Betondeckung)

In der praktischen Anwendung der Messmethode können unterschiedliche Störgrößen auftreten. Diese kennzeichnen sich insbesondere durch:

- Einflüsse aus der Anordnung der Bewehrungslage,
- Überlagerungen von Bewehrungselementen (z.B. Mattenbewehrung)
- dem für die Auswertung angesetzten Stabdurchmesser (Kurvenverschub bei Durchmesseränderung; s. Abb.5)
- Qualität des Bewehrungsstahls („Magnetisierbarkeit“) und nicht zuletzt durch die
- Erfahrung und Messgenauigkeit des Anwenders

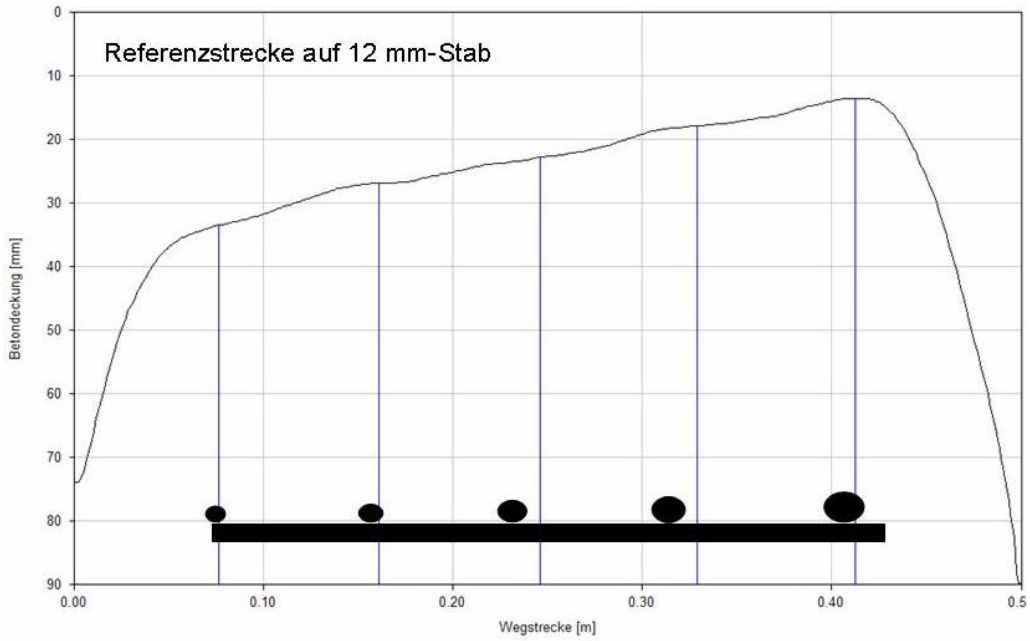


Abbildung 5: Messlinie auf einer Referenzstrecke mit unterschiedlichen Bewehrungsdurchmessern (Wahl des Stabdurchmessers bei der Auswertung).

Aufgrund der am Bauteil vor Ort vorliegenden Randbedingungen sollte im Rahmen der Messungen die Planungsunterlagen gesichtet werden und / oder

lokale Bauteilöffnungen vorgenommen werden. Hierdurch können u.a. Fehler bei der Auswertung und Bewertung der Messergebnisse vermieden werden.

Insbesondere an Kreuzungspunkten von Bauteilen, sowie an Bauwerkskanten und in Bereichen, in denen der Bewehrungsabstand kleiner als die Betondeckung ist, sind die Messwerte besonders kritisch zu betrachten.

Die Auswertung der Messergebnisse wird gemäß DBV-Merkblatt[2] über den Schwellwert min c vorgenommen. Als Schwellwerte werden die für die jeweilige Expositionsklasse maßgeblichen Werte gemäß DIN 1045 / DIN EN 206 angesetzt. Abweichungen von der beschriebenen Vorgehensweise sind mit dem jeweiligen Auftraggeber festzulegen.

2.3. Ultraschallmessung

Das Ultraschallmessverfahren basiert darauf, dass Ultraschallwellen in einem homogenen Werkstoff an der Grenzfläche zu Inhomogenitäten reflektiert und umgeleitet werden. Hieraus resultiert eine Vergrößerung der Laufzeit. Aus der Laufzeit und der Durchschallungsstrecke wird die Ultraschallgeschwindigkeit ermittelt. Eine hohe Ultraschallgeschwindigkeit deutet auf eine hohe Dichte des Baustoffs hin.

Abbildung 6: Darstellung eines Messrasters und Ankopplung eines Exponentialmesskopfes an eine raue Betonoberfläche

Die verwendeten Ultraschallprüfgeräte bestehen im Wesentlichen aus den Prüfköpfen [Sender, Empfänger], die eine Übertragung des Impulses auf das zu messende Bauteil gewährleisten, und der Laufzeitmesseinrichtung, die

[2] Deutscher Beton – Verein e.V. Merkblatt: „Betondeckung und Bewehrung“, Fassung 2002

meistens in das Gerät integriert ist. Der für das Bauwesen übliche Frequenzbereich der Prüfmethode (z.B. für eine Betonprüfung) liegt zwischen 50 und 300 kHz, was bei einer typischen Longitudinalwellengeschwindigkeit von ca. 4000 m/s einer Wellenlänge von ca. 80 bis 10 mm entspricht.

Für die Untersuchungen in der Praxis hat sich die Verwendung eines Ultraschallmessgerätes mit Exponentialwandlern als Messköpfe als praktikabel erwiesen. Hiermit ist eine sichere Ankopplung auch an rauere Betonoberflächen möglich. Bei der Bauwerksprüfung werden i.d.R. aufgrund der zu messenden Bauteildicken Messfrequenzen von 20 bis 50 kHz verwendet.

Die Ultraschallmessung kann entsprechend der Richtlinie DAfStb Heft 467[3] in Verbindung mit einer Bohrkernprüfung zur Abschätzung der Betondruckfestigkeit am Bauwerk verwendet werden. Eine typische Kalibrierungskurve der Ultraschalllaufzeiten mit der Betondruckfestigkeit ist in Abbildung 7 dargestellt.

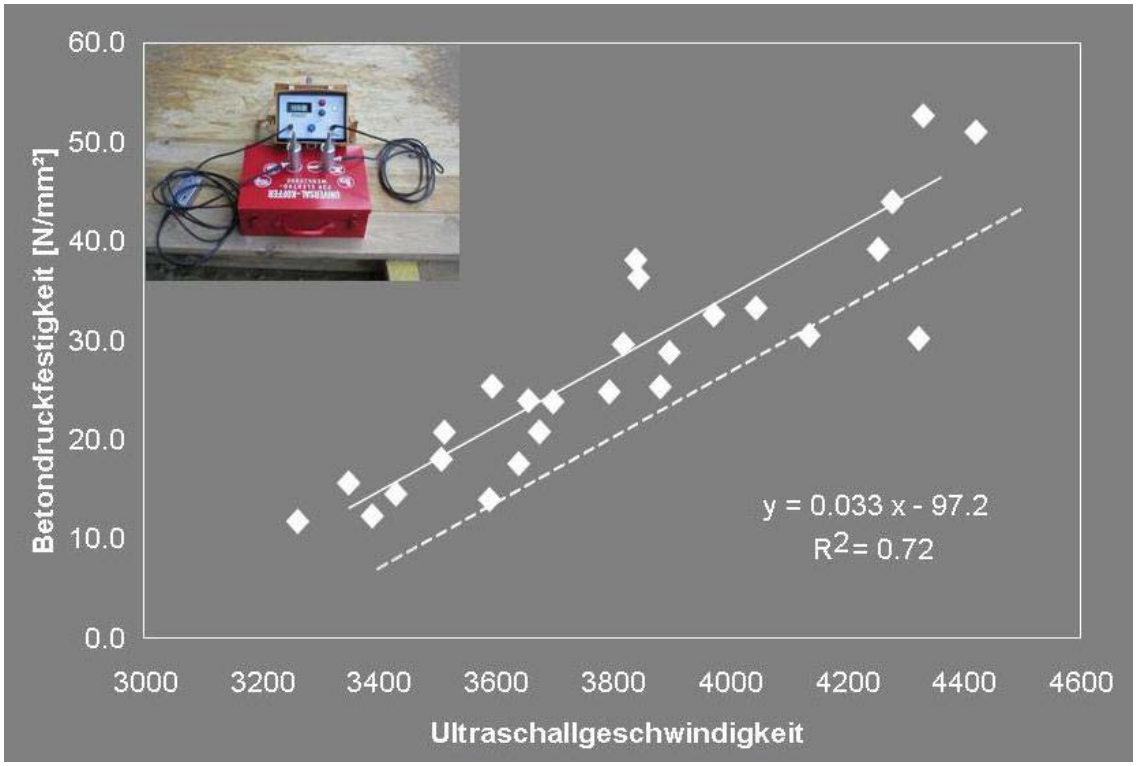


Abbildung 7: Darstellung einer Kalibrierungskurve [US-Geschwindigkeit zu Druckfestigkeit] mit Messaufbau

Am Bauwerk kann neben der Aussage zur Betongüte auch die Homogenität über den Betonquerschnitt untersucht werden. Ein Beispiel aus der Praxis ist in der Abbildung 8 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine messtechnisch erfasste vorgespannte Konsole aus selbstverdichtendem Beton, an der sich Verbundstörungen und Hohllagen ausgebildet haben.

Typische Anwendungsbereiche der Ultraschalldurchschallungsmethodik in der Praxis sind u.a.: die Dickenmessung und die Ermittlung der Bauteilgeometrie

bei einseitiger Zugänglichkeit, Lokalisieren von Ablösungen, Gefügestörungen und Hohllagen und das Lokalisieren von Verpressfehlern in Hüllrohren (Spannbetonkonstruktionen).

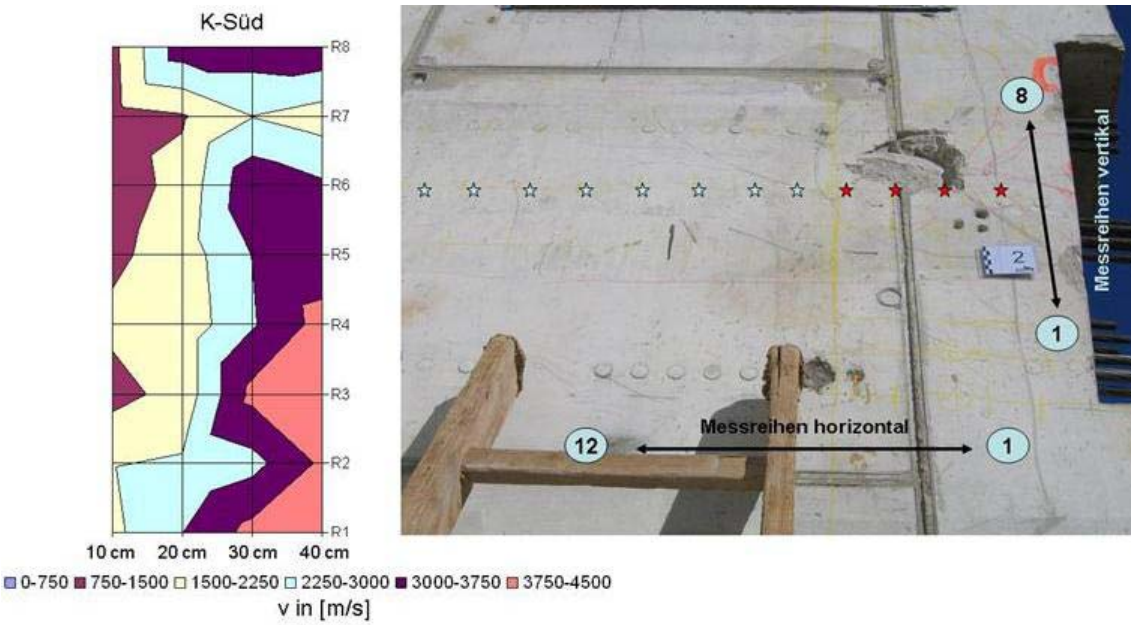


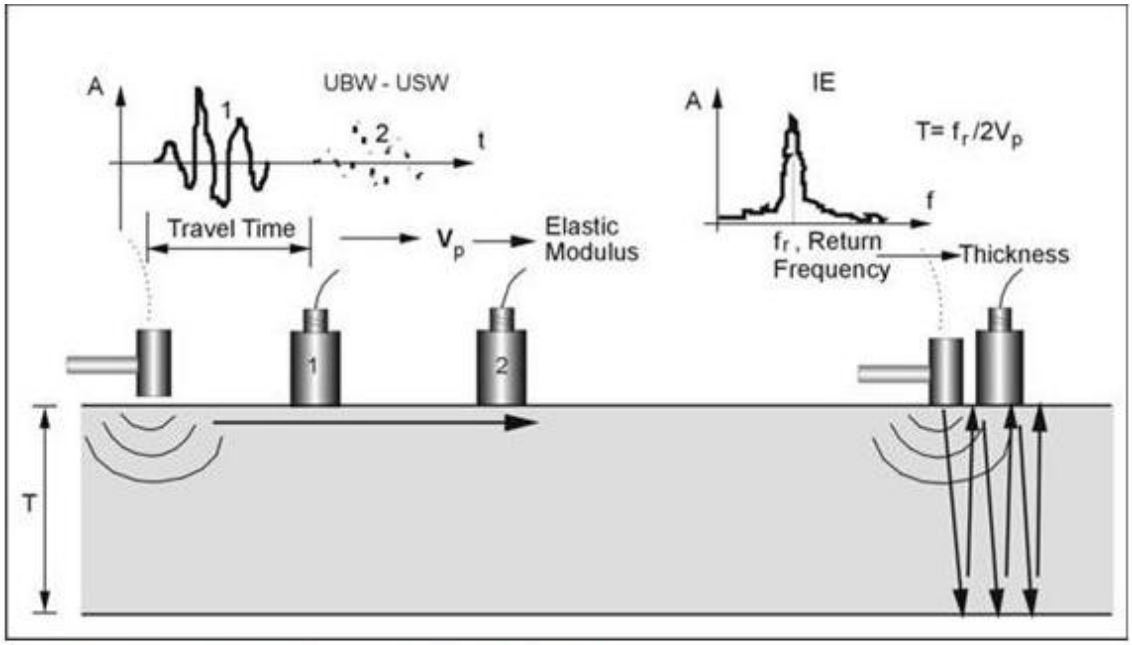
Abbildung 8: Darstellung der Messergebnisse eines Bauteils mit Verbundstörungen in einer grafischen Flächendarstellung der gemessenen US-Geschwindigkeiten.

2.4. Impact-Echo-Technik

Bei dem Impact-Echo-Verfahren wird Schallenergie über eine mechanische Impulsanregung (Impact), z.B. durch einen Hammerschlag, auf das Messobjekt erzeugt.

Die dadurch entstandene, als Resonanz mehrfach reflektierte Welle, wird mit einem breitbandigen Empfänger aufgenommen und ausgewertet. Hierbei bestimmen die Größe bzw. die Masse des sog. Impactors sowie auch die eingesetzte Schlagenergie ebenso wie die Bauteildicke und Schallgeschwindigkeit des Materials das vom Empfänger aufgenommene Signal und dessen Frequenzspektrum.

[3] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton „Verstärken von Betonbauteilen – Sachstandsbericht“



http://www.cflhd.gov/agm/images/fig67.jpg

Abbildung 9: Systemdarstellung des Messaufbaus unter Verwendung eines Beschleunigungsaufnehmers [Bildnachweis s.o.]

Das Prüfverfahren ist vorteilhaft bei Untersuchungen an einseitig zugänglichen Betonbauteilen und zur Bestimmung von Schichtdicken sowie zur Ortung von Fehlstellen und Ermittlung des Schichtenbaus eingesetzt.

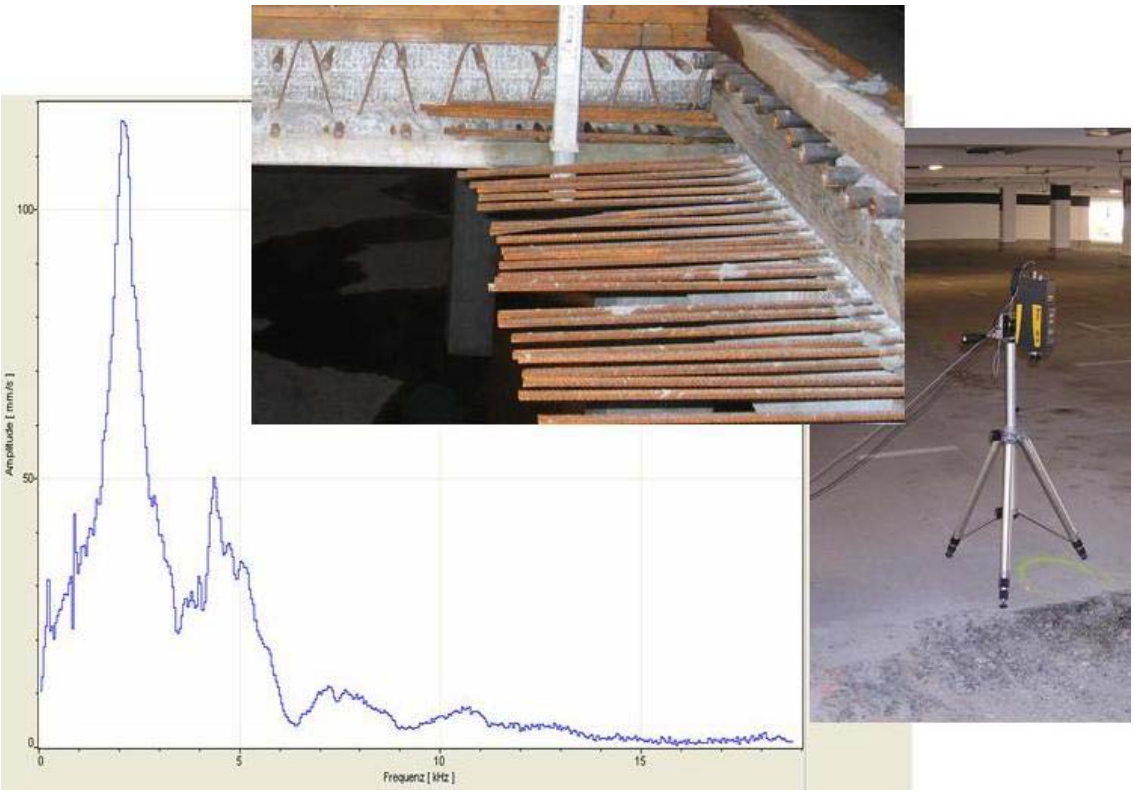


Abbildung 10: Darstellung des Messaufbaus (berührungslose Messung; Laservibrometer) an einer Bodenplatte mit exemplarischem Messergebnis

Die Messungen können berührungslos mittels sog. Laser Vibrometer (Abb.10) oder über eine direkte Ankopplung am Bauteil mit einem Beschleunigungsaufnehmer (Abb. 11) vorgenommen werden.

Aus der, in Abhängigkeit von der Zeit, gemessenen Oberflächenbewegung als Funktion wird mittels Fast – Fouriertransformation (FFT) das Frequenzspektrum berechnet.

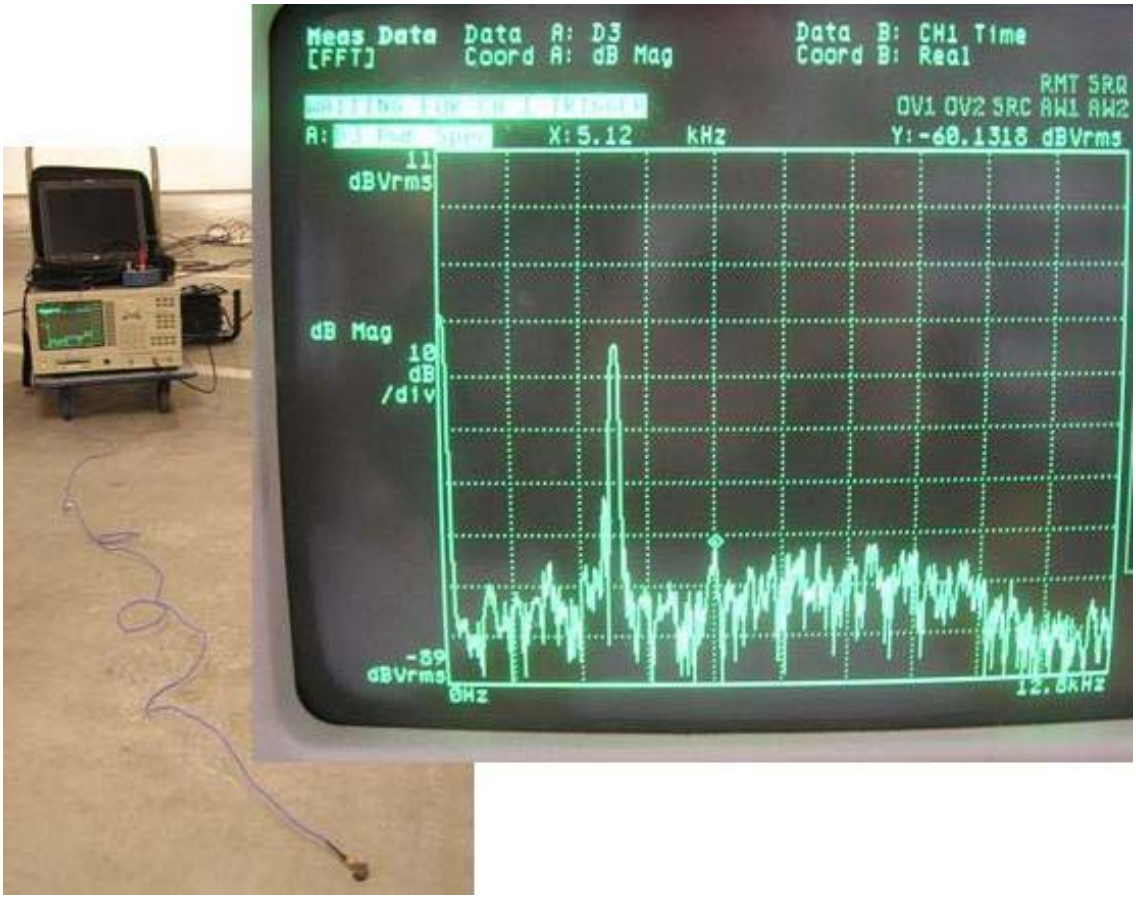


Abbildung 11: Darstellung des Messaufbaus Verwendung eines Beschleunigungsaufnehmers.

Für die Auswertung der Daten ist die Kenntnis der Ultraschalllaufzeit im ungestörten Bauteil erforderlich. Die Ultraschalllaufzeit einer Bodenplatte kann z.B. an entnommen Bohrkernen bestimmt werden.

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im untersuchten Objekt wird entweder durch Vergleich mit ähnlichen Probekörpern abgeschätzt oder, wenn möglich, direkt am Bohrkern bestimmt. Wenn beide Seiten des Bauteils zugänglich sind, kann die Wellengeschwindigkeit direkt aus den Messungen abgeleitet werden.

Die Auswertungsgleichungen stellen sich wie folgt dar:

$$d\,[m] = \frac{v\,[m/s]}{2 * f\,[Hz]}$$

$$v\,[m/s] = d\,[m] * 2 * f\,[Hz]$$

Diese Abschätzung kann die Genauigkeit der Impact-Echo-Dateninterpretation beeinflussen, wobei der Beitrag zur Unsicherheit der Dickenbestimmung zwischen 2,5% und 7% liegt. Durch eine Kalibriermessung bei bekannter Bauteildicke kann der Fehler verringert werden.

Wenn eine größere Hohlstelle oder Schichtenübergänge vorhanden sind, ergeben sich in deren Frequenzspektrum üblicherweise Peaks, welche dem Abstand der Hohlstelle / Schichtung von der Bauteiloberfläche zugeordnet werden können.

Die Eignung des Impact-Echo-Verfahrens als Referenzverfahren z.B. für die Dickenmessung von Betonbauteilen resultiert aus der Geschwindigkeit und Wiederholbarkeit der Messungen. Auch ist im Vergleich zu anderen Techniken der zerstörungsfreien Bauwerksprüfung die Präzision hervorzuheben.

2.5. Bauwerksthermografie

Die angewandte Bauwerksthermografie macht die, für das menschliche Auge unsichtbare Wärmestrahlung (Infrarotlicht) eines Objektes sichtbar. Die Bauwerksthermografie ist ein berührungsloses und somit zerstörungsfreies Messverfahren mit dessen Hilfe ein genaues Bild über mögliche thermische Verluste oder bestehende Wärmequellen ermittelt und dargestellt werden kann. Die Bauwerksthermografie nutzt die Tatsache, dass alle Gegenstände Wärmestrahlung in Form von elektromagnetischen Wellen aussenden.

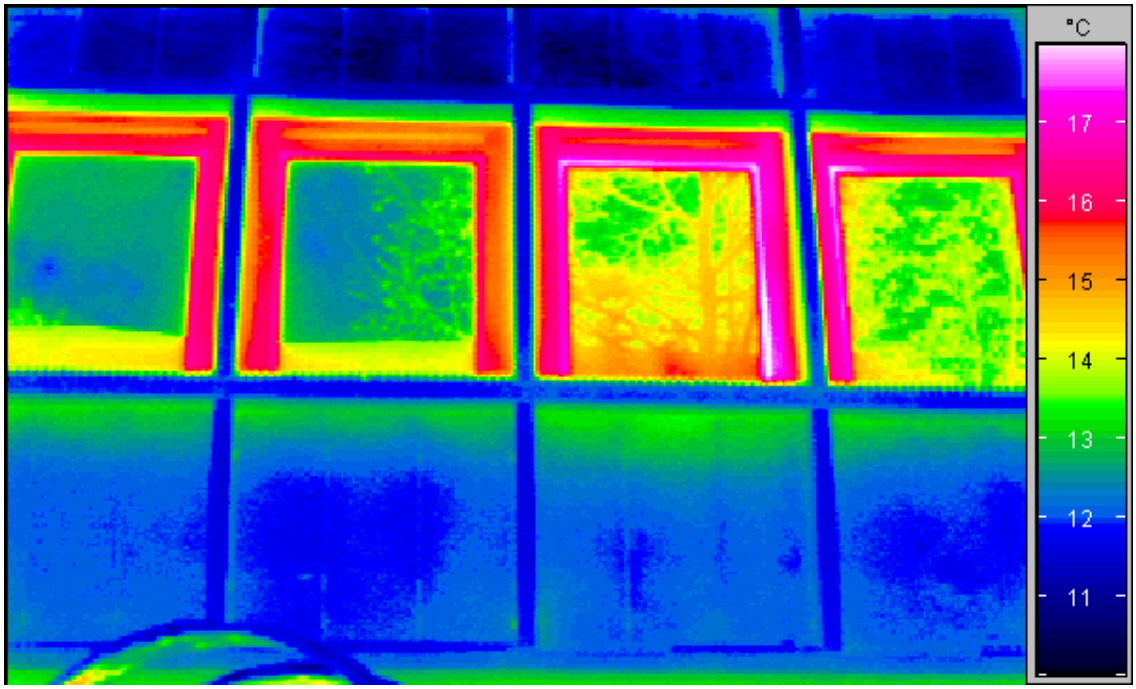


Abbildung 12: Darstellung eines Thermogramms einer Fassade (exemplarisch) mit einer möglichen Fehlinterpretation in der Messung im Bereich der Fensterglasflächen, die die Wärmestrahlung der gegenüberliegenden Bäume reflektieren.

Die Bauwerksthermografie kann im Rahmen der Bauwerksdiagnose u.a. für folgende Punkte Anwendung finden:

- Ortung verdeckter baulicher Veränderungen (Lokalisierung von Baufugen, Fensterausmauerungen, Einbauten, Fachwerk, etc.)
- Ausführungskontrolle; Überprüfung der Funktionstauglichkeit von Wärmedämmung
- Nachweis von Durchfeuchtungen / Oberflächenfeuchte unter Berücksichtigung der Verdunstungskälte
- Leckageortung (z.B. Defekte an Wasserleitungen oder Fußbodenheizungen)

- Untersuchung von Undichtigkeiten in der Gebäudehülle (in Verbindung mit der Blower - Door - Prüfung)

Die im Bauwesen am häufigsten auftretenden wärmetechnischen Baumängel, die unter ungünstigen Randbedingungen zu Bauschäden führen können, stellen die Wärmebrücken dar.

In den Abbildungen 13 und 14 sind exemplarische Darstellungen einer vorliegenden Durchfeuchtung und von einer Wärmebrückenausbildung im Wandaufbau eines Kellergeschosses aus WU – Beton dargestellt.

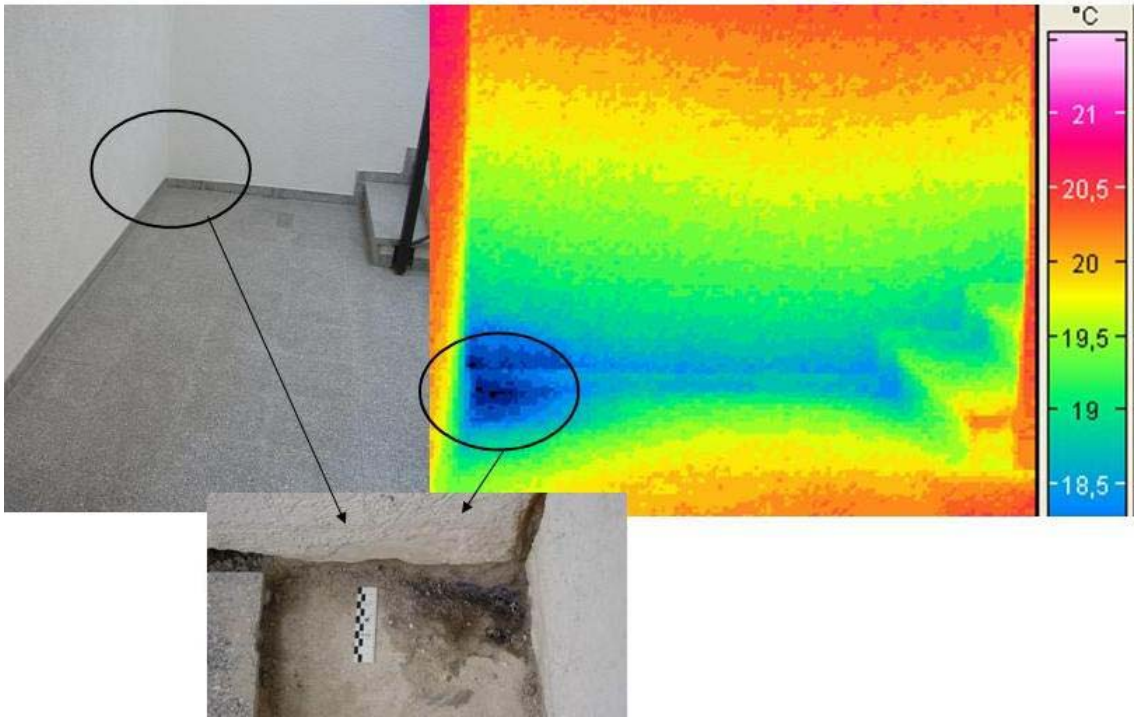


Abbildung 13: Darstellung eines Feuchteschadens im Bereich einer Außenwandecke eines Kellergeschosses in WU - Bauweise

Im Rahmen der Durchführung der Messungen ist darauf achten, Fehlerquellen wie z.B. die solare Aufheizung durch direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden.

Zum Nachweis von Wärmebrücken ist ein Temperaturgefälle von min. 10 Kelvin zwischen Innen – und Außenseite eines Bauteils nötig, um ein aussagekräftiges Messergebnis zu erzielen. Das bedeutet, dass in der Regel eine Messung in der kälteren Jahreszeit erforderlich ist. Zur Vermeidung von strahlungsbedingten Einflüssen sollten Messungen in den frühen Morgenstunden (vor Sonnenaufgang) durchgeführt werden. Bei Leckagesuche mit der Thermografiekamera ist der Zeitpunkt der Messung nebensächlich.

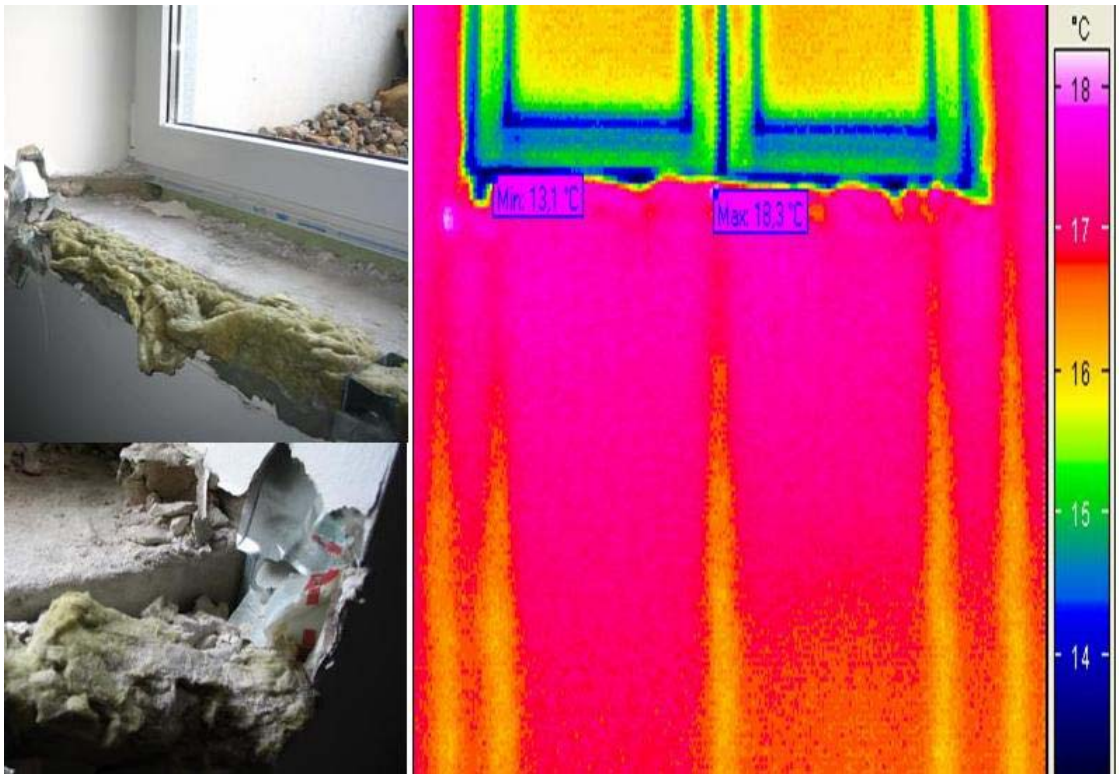


Abbildung 14: Darstellung einer Wärmebrücke an einer innengedämmten Kellerwand mit Leicht-Ständerwerk

Das zu analysierende Objekt muss wie bei der Erstellung einer Aufnahme frei sichtbar und gut zugänglich sein. Zu beachten ist, dass die Thermografiekamera einen eingeschränkten Blickwinkel aufweist und so ein ausreichender Abstand vom Zielobjekt gegeben sein muss. Die zu untersuchende Bauteilfläche sollte möglichst senkrecht und nicht schräg aufgenommen werden.

Es gilt zudem Störfaktoren, wie geringe Temperaturdifferenzen der beiden Bauteilseiten, den Emissionsfaktor des Baumaterials, solare Aufheizung und den dreidimensionalen Wärmestrom zu beachten.

3. Literatur

1. **Merkblatt 2006 SiA** Schweizerischer Ingenieur – und Architekten – Verein „Durchführung und Interpretation der Potentialmessung an Stahlbetonbauten“; Ausgabe Februar 1993
2. **DGZfP Merkblatt B4** „Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile“; Ausgabe Mai 1999
3. **ASTM 876** „Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete“
4. **Setzer, M.J., Auberg, R., Wehling, M., Wowra, O.** „Einfluss von Wasserströmungen auf die Potentialfeldmessung zur Korrosionsdetektion“; Berichtsband 76-CD, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfungen, Leipzig, Oktober 2001
5. Derzeit wird von der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreien Prüfung (DGZfP) ein Merkblatt mit dem Arbeitstitel „Anwendung des Impact-Echo-Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen“ vorbereitet.