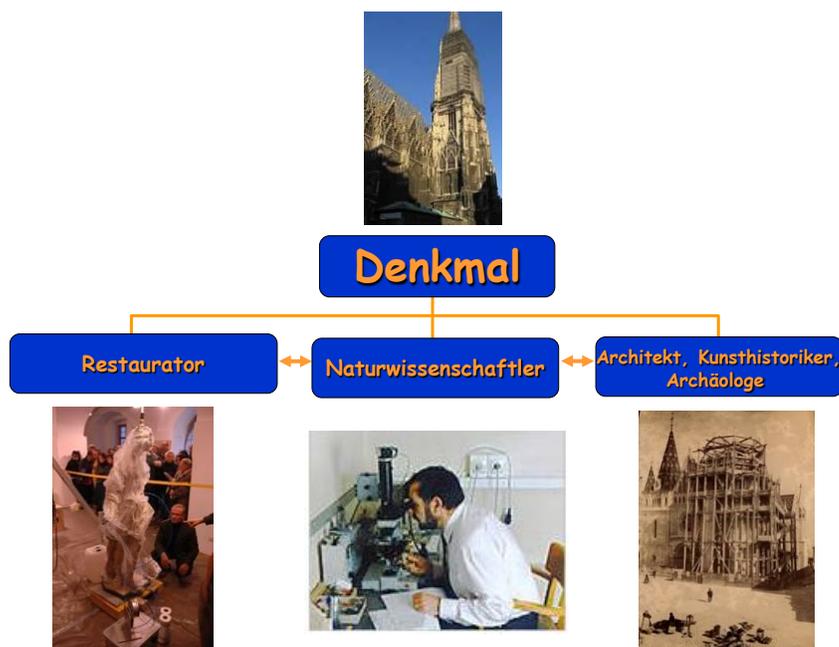




### Die Rolle des Naturwissenschaftlers in der Denkmalpflege und Denkmalforschung



## Die wichtigsten naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden in der Denkmalpflege

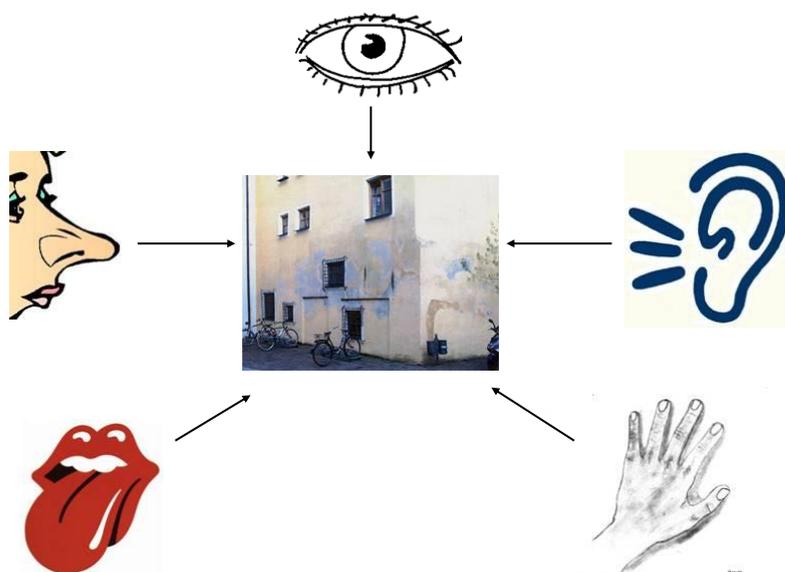
### Vor Ort

Hören, sehen, riechen... etc.  
Bohrwiderstandsmessung  
Ultraschallmessung  
Feuchtigkeitsmessung  
Wasseraufnahme  
Klimamessung  
Thermobild  
Georadar

### Labor

Mikroskopie (Pol, CL, UV, REM)  
Chemische Analysen (REM-EDX, RFA, AAS, ICP-MS)  
Ionenchromatographie  
Röntgendiffraktometrie (Phasenanalyse)  
Infrarot Spektroskopie (FTIR)  
<sup>14</sup>C-Datierung  
Dendrochronologie  
Thermolumineszenz  
IC  
Wasseraufnahme  
Frost-Tau-Wechsel  
Salzsprengungstest  
...

## Hören, sehen, riechen, tasten, schmecken als Grundlage der Objektuntersuchung



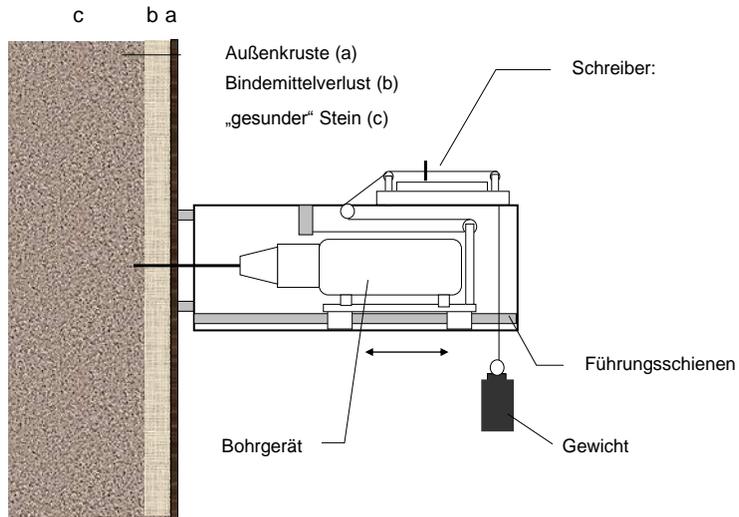
## Probenahme



## Schadenskartierung

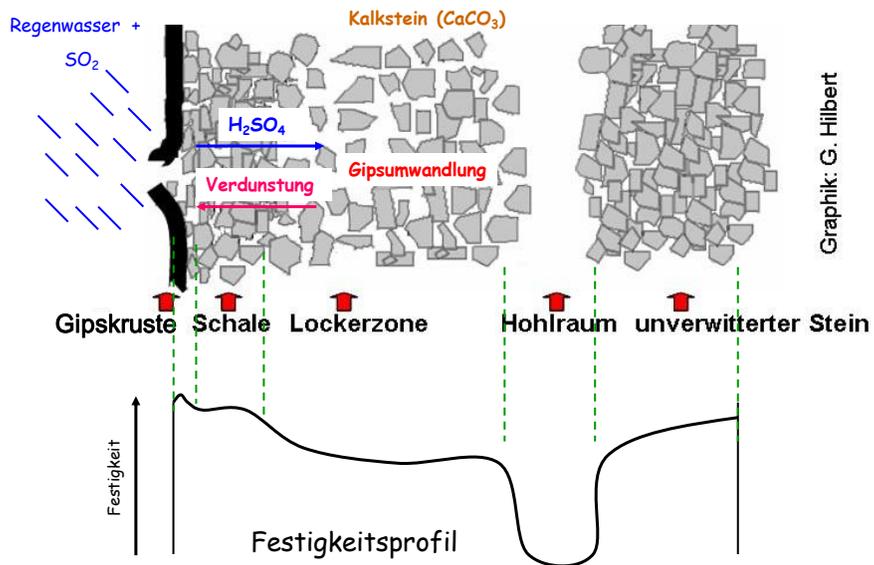


### Schadensmonitoring poröser Bausteine: Bohrwiderstandsmessung



Graphik: G. Fleischer, OFI

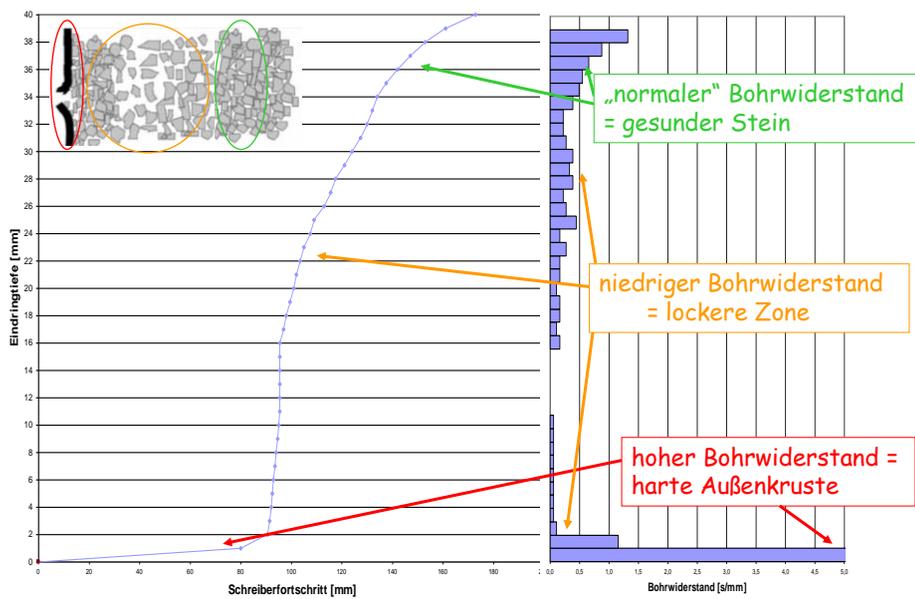
### Theoretisches Festigkeitsprofil entlang eines verwitterten Kalksandsteines



Graphik: G. Hilbert

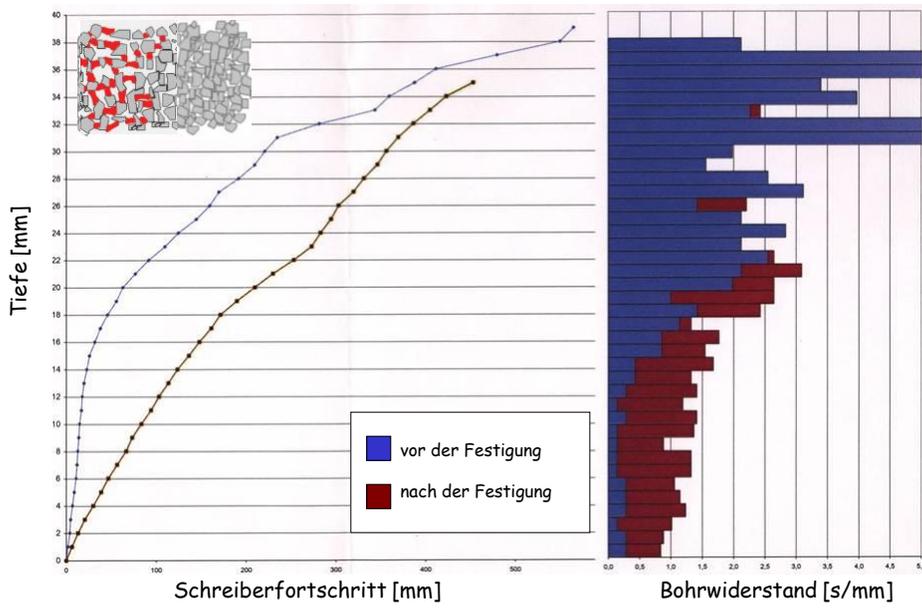


### Krustenbildung und Gefügeauflockerung infolge Vergipsung



Graphik: G. Fleischer, OFI

### Bestimmung der Effektivität von Steinfestigungen



Graphik: G. Fleischer, OFI



## Schadensmonitoring dichter Bausteine: Ultraschalldiagnostik

Zerstörungsfreie  
Untersuchungsmethode

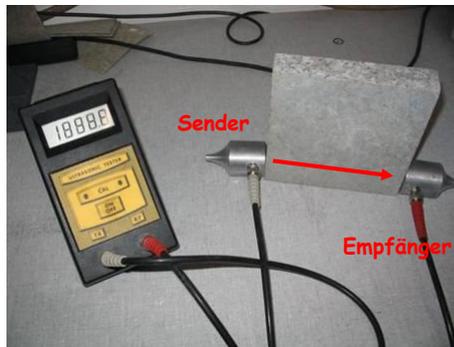
**Messprinzip:** Sendung von  
Ultraschallimpulsen bestimmter  
Frequenz (40...250 MHz) →  
Detektierung der Laufzeit →  
Ultraschalldurchgangs-  
geschwindigkeit kann berechnet  
werden

$$v = s/t \text{ [km/s]; } s \text{ [mm], } t \text{ [}\mu\text{s]}$$

→ Charakterisierung des Materials

→ dyn. E-Modul

Die Ultraschalltechnik basiert auf bestimmten Eigenschaften der Ausbreitung von mechanischen Wellen in verschiedenen (elastischen) Materialien. Dabei werden die Stoffteilchen zu sinusförmigen Schwingungen um ihre Ruhelage angeregt. Aus den zeitversetzten Schwingungen der Masseteilchen setzt sich eine Welle zusammen.



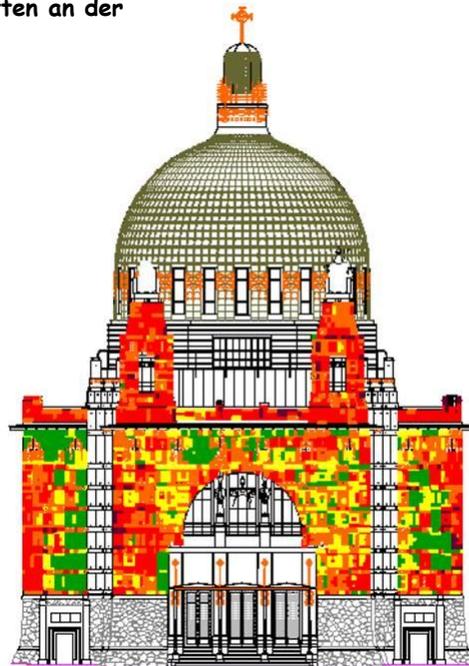
## Ultraschallmessung vor Ort



## Ultraschallkartierung von Marmorplatten an der Ostfassade der Kirche am Steinhof



G. Fleischer, 2002



## Ultraschallmessung an Bohrkern

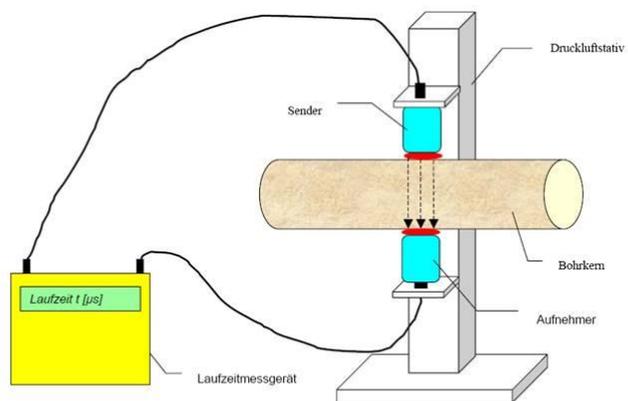
Ultraschallgeschwindigkeit-  
werte einiger Baustoffe:

Beton: 4,0...5,0 km/s

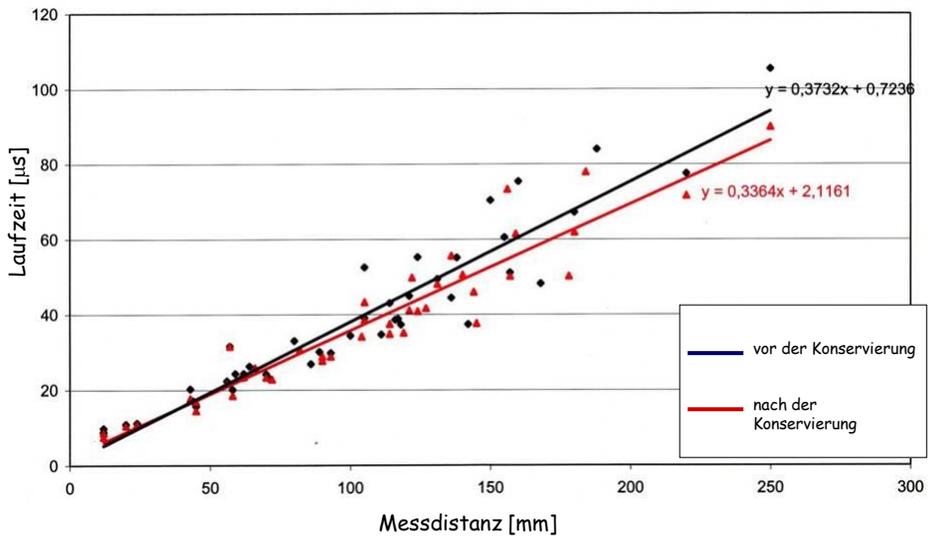
Marmor (unverwittert):  
5,4...6,7 km/s,

Marmor (verwittert):  
1,0...3,0 km/s.

Sandstein: 2,0...4,3 km/s

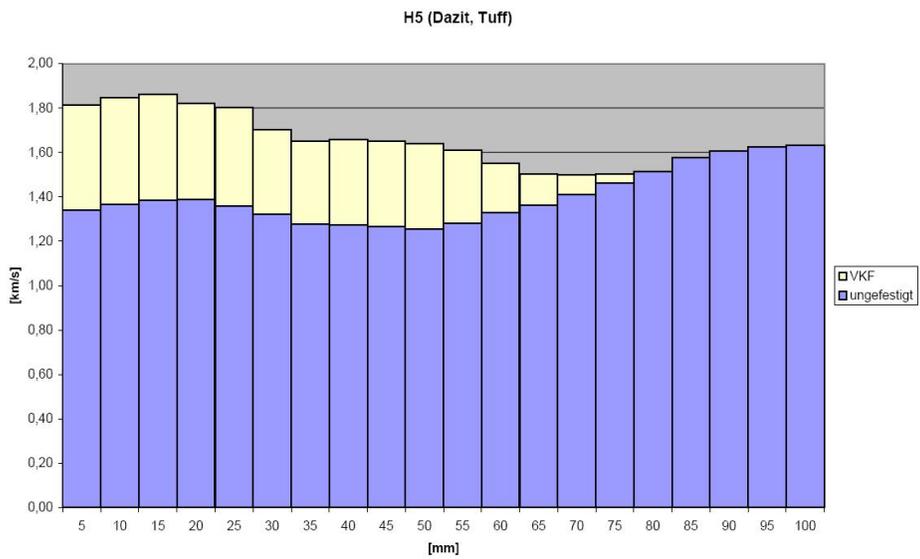


### Evaluierung von Steinfestigung



Graphik: G. Fleischer, OFI

### Evaluierung einer Steinfestigung II.



Graphik: G. Fleischer, OFI

## Feuchtigkeitsmessung I.

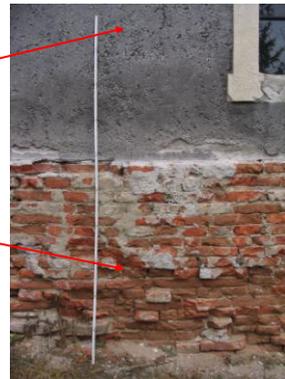
### Widerstands-Messmethode

Meßprinzip: der elektrische Widerstand nahezu jedes Feststoffes verändert sich je nach vorhandener Feuchtigkeit.  
Bei geringerer Materialfeuchte → höherer elektrischer Widerstand



### Dielektrisches Verfahren

Das Meßverfahren beruht auf dem Meßprinzip des elektrischen Feldes. Das Meßfeld bildet sich zw. dem aktiven Teil (Gerät) und der zu beurteilenden Untergrundmasse aus. Die Veränderung des elektrischen Feldes durch Feuchte wird erfasst und auf dem Gerät angezeigt (relative Werte!).



## Feuchtigkeitsmessung II. - CM Methode

Bei der CM-Methode wird eine Mauerprobe mittels eines Mörsers zerkleinert oder Bohrmehl verwendet.

Eine genau bestimmte Menge wird in eine Druckflasche gefüllt und eine Kapsel sowie Stahlkugeln dazugegeben.

Nach dem Verschließen der Flasche wird diese eine angegebene Zeit geschüttelt und gedreht. Da das Karbid ( $\text{CaC}_2$ ), wenn es mit Feuchtigkeit in Kontakt kommt, Acetylen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) entwickelt, entsteht Druck in der Stahlflasche. Dieser kann über das aufgesetzte Manometer abgelesen werden.

Aus dem Druck und dem Materialgewicht kann über eine Tabelle der Feuchtegehalt bestimmt werden.

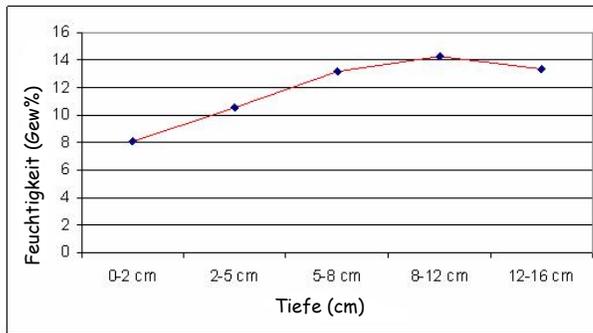


Geringere Genauigkeit als bei Gravimetrie

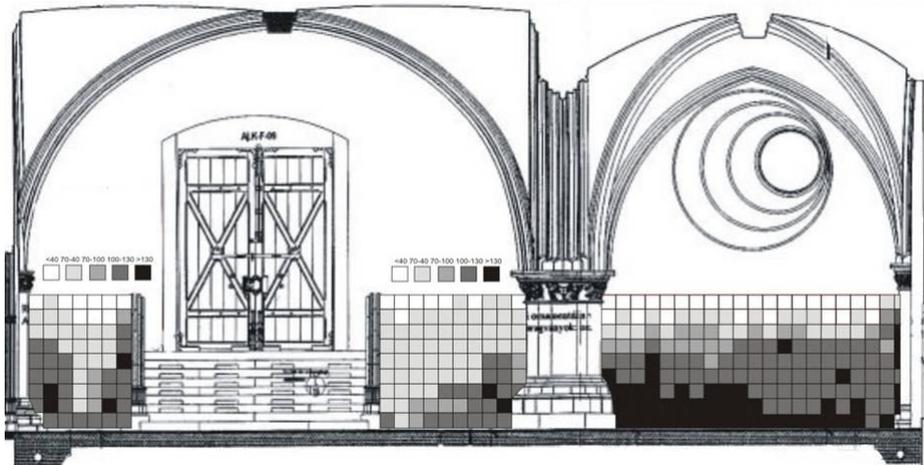
### Feuchtigkeitsmessung III. - Gravimetrische (Darr) Methode

Trocknen bei 105 °C → Gewichtsverlust

$$\frac{(\text{Nassgewicht} - \text{Trockengewicht}) \times 100}{\text{Trockengewicht}} = \text{Feuchtigkeit Gew.}\%$$



### Feuchtigkeitskartierung



## Wasseraufnahme

### Karsten'sches Prüfröhrchen

Einfacher Test zur Bestimmung der Penetration von Wasser in Baumaterialien, z.B. Beton, Stein, Putz. Ein wassergefülltes Glasrohr wird mit Plastilin am Testmaterial befestigt und unter Druck gesetzt. An einer Skala lässt sich der Zeitverlauf der eingedrungenen Wassermenge ablesen

- Beurteilung der kapillaren Saugfähigkeit (Material/OF)
- Wirksamkeitsüberprüfung einer Hydrophobierung
- Schlagregenbelastung
- Beurteilung von Oberflächenbeschichtungen (Anstrichen, Schlämmen, etc.)
- Einschätzung der Notwendigkeit und Wirksamkeit von Reinigungsmaßnahmen
- Beurteilung von Fugen-, Ersatzmörteln (Kompatibilität)
- Monitoring



### w-Wert, Wasseraufnahmekoeffizient

Er gibt an, wie viel Wasser ein Stoff innerhalb einer bestimmten Zeit aufnimmt.

Ein Stoff mit der Grundfläche  $A$  wird in Wasser eingetaucht. Der Stoff wird in bestimmten Zeitabständen gewogen und man erhält damit jeweils die Masse des aufgesaugten Wassers  $m$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ . Daraus ergibt sich der Wasseraufnahmekoeffizient:

$$w = \frac{m}{A \cdot \sqrt{t}}$$

$w$  Wasseraufnahmekoeffizient [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ]

$m$  Masse des aufgesaugten Wassers [kg]

$A$  Grundfläche [ $\text{m}^2$ ]

$t$  Zeit [h]

Gängig ist folgende Einteilung des Wasseraufnahmekoeffizienten:

- saugend:  $w > 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- wasserhemmend:  $w \leq 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- wasserabweisend:  $w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- wasserundurchlässig:  $w \leq 0,001 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$



Einige Beispiele:

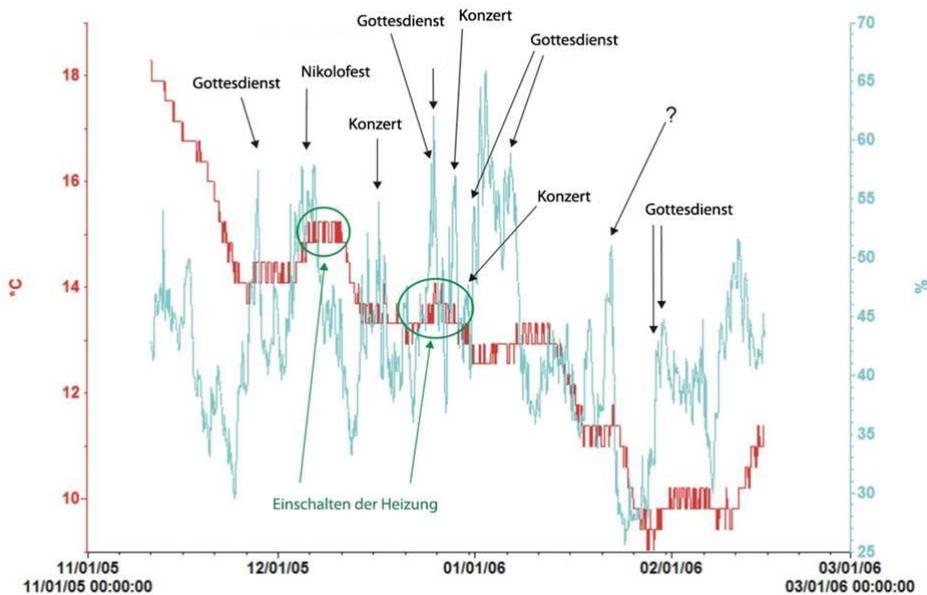
- Vollziegel:  $w = 20 \text{ bis } 30 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- Leichtziegel:  $w = 5 \text{ bis } 8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- Blähton:  $w = 0,2 \text{ bis } 0,24 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- Zementputz:  $w = 2 \text{ bis } 3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- Kunststoffdispersion:  $w = 0,05 \text{ bis } 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- Holz (Fichte):  $w = 2,0\text{-}3,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

## Klimamessung

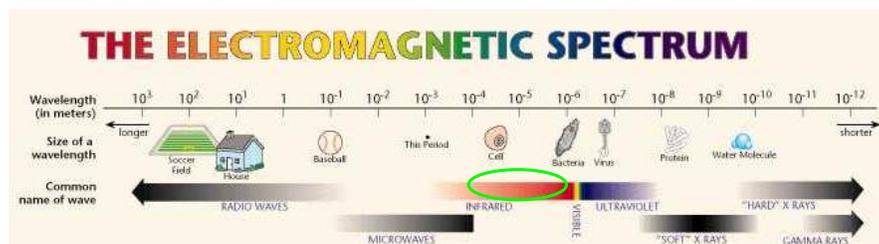
Kontinuierliche Datenregistrierung mit tragbaren Datenloggern.

Misst die Veränderungen des Aussen-, und/oder Innenklimas (Luft-, Oberflächen-temperatur, rF, Licht, etc.)





## Thermographie



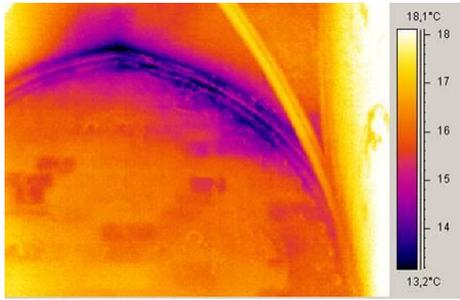
### Prinzip

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ( $-273\text{ °C}$ ) sendet Wärmestrahlung aus. Bei einigen hundert Grad Celsius beginnt der Körper schließlich zu glühen, so dass die erzeugte Strahlung auch für den Menschen sichtbar ist.

Die Thermographie wird bevorzugt im infraroten Bereich (Wellenlänge:  $0,7\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$ ) eingesetzt, also bei Objekttemperaturen, die im Bereich der gewöhnlichen Umgebungtemperaturen liegen.

Damit bei Messungen an weiter entfernt liegenden Objekten die Wärmestrahlung der zwischen Objekt und Kamera liegenden Atmosphäre die Messung nicht verfälscht, arbeiten die Kameras in der Regel in eingeschränkten Wellenlängenbereichen, in denen die Atmosphäre wenig Eigenstrahlung emittiert (und absorbiert). Ein solches „Fenster“ liegt beispielsweise im Bereich von etwa 8 bis  $14\text{ }\mu\text{m}$ .

## Passive Thermographie



## Aktive Thermographie

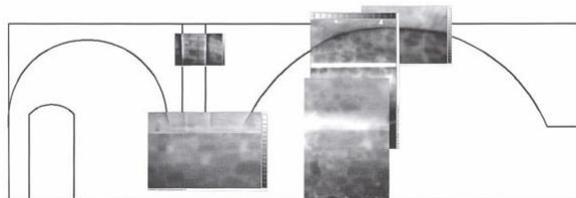
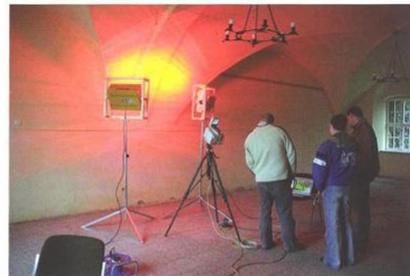
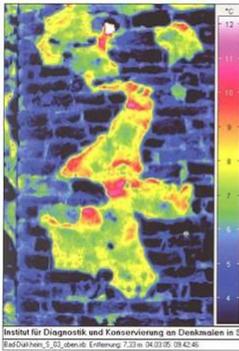


Abb.: Franzen et al, 2011

## GPR (Ground Penetrating Radar) - Georadar

### Prinzip

Ein Sender sendet elektromagnetische Hochfrequenzimpulse (1,6 GHz) die im Medium (Boden, Mauerwerk, etc.) z.T. absorbiert, z.T. reflektiert werden. Die reflektierten Signale werden durch ein Empfänger aufgenommen, die in Form eines Zeitprofils dargestellt werden. Die Intensität ist von den dielektrischen Eigenschaftsunterschieden und elektrischen Leitfähigkeiten der einzelnen Phasen und/oder Schichten abhängig.

Je grösser ist der Unterschied zwischen den Phasen, umso stärkere Reflexion wird registriert.

z.B.: Eisenarmierung, oder Loch, Nische, Röhre, Kabel, etc.

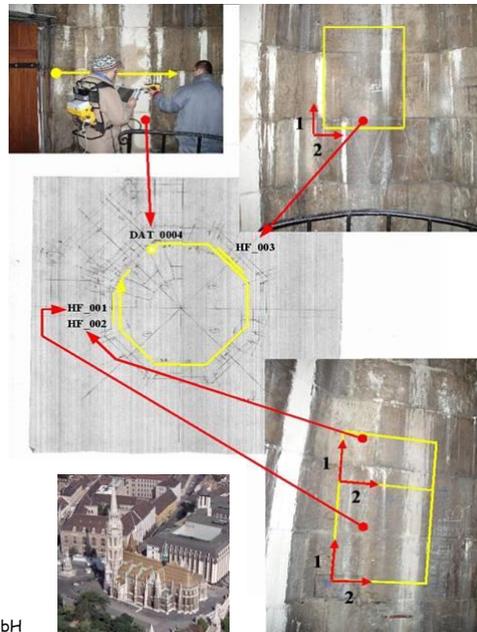


Abb.: Burken GmbH

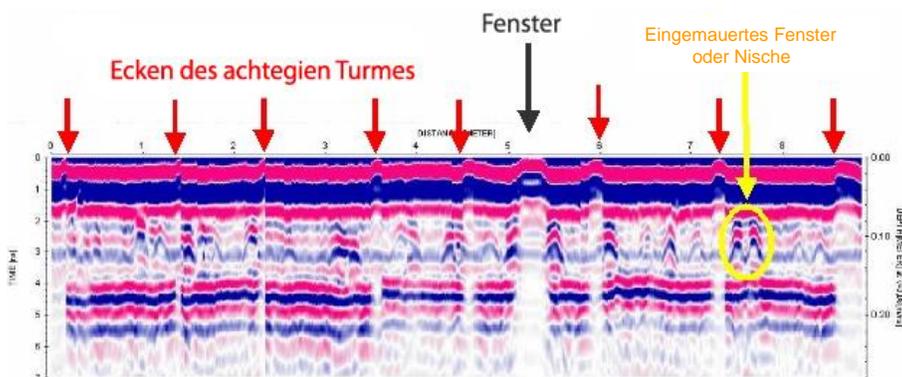
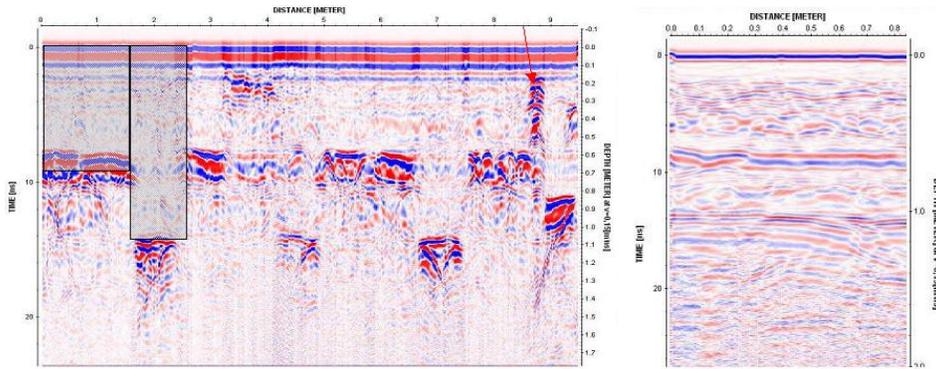


Abb.: Burken GmbH

## Anwendungsbeispiel Georadar II.



Inhomogenes (links) und homogenes (rechts) Mauerwerk

Abb.: Burken GmbH