

Abschlussbericht "Dalles de verre" Teil Zerstörungsfreie Prüfung – ZfP

Dr. Johannes Hugenschmidt
Ostschweizer Fachhochschule
Fachstelle Zerstörungsfreie Prüfung

Inhalt

1. Methoden	4
Georadar	4
Potentialmessung	9
Elektrischer Widerstand	11
Thermographie	13
Induktion.....	15
Magnet.....	19
Ultraschall.....	19
2. Fragestellungen und Verfahren	21
Position und Existenz von Bewehrung	21
Magnet.....	21
Induktion.....	22
Georadar direkte Detektion.....	24
Georadar via Rückwandreflektion	25
Bewehrungsüberdeckung.....	26
Induktion mit automatisierter Auswertung.....	26
Georadar	27
Korrosion	28
Dicke	30
Materialeigenschaften, Risse, Feuchtigkeit, Porosität	31
3. Aufwand – Nutzen Analyse	34
Existenz und Position von Bewehrungsstäben.....	35
Bewehrungsüberdeckung.....	36
Dicke	37
Korrosion	38
Materialeigenschaften, Risse, Feuchtigkeit, Porosität	39
4. Werkzeugkasten zerstörungsfreie Prüfung	40
Existenz und Position von Bewehrungsstäben.....	40
Bewehrungsüberdeckung.....	40
Dicke	40
Korrosion	40
Materialeigenschaften, Risse, Feuchtigkeit, Porosität	41

1. Methoden

Georadar

Unter Georadar [1, 2, 3, 4] versteht man ein elektromagnetisches Wellenverfahren. Andere gebräuchliche Bezeichnungen dieses Verfahrens sind Bodenradar, Ground Penetrating Radar (GPR), Surface Penetrating Radar und Elektromagnetisches Reflektionsverfahren (EMR). Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein elektromagnetisches Signal wird von der Antenne (Sender) abgestrahlt und an verschiedenen Grenzflächen reflektiert. Das reflektierte Signal wird von der Antenne (Empfänger) empfangen und kann, nach Aufbereitung durch die Zentraleinheit, auf einem Monitor dargestellt und zur weiteren Bearbeitung abgespeichert werden. Eine einzelne derartige Messung bestehend aus Messwerten über eine bestimmte Zeit an einem Ort wird als Zeitreihe, Spur, Einzelspur oder Scan bezeichnet. Das gesendete und somit auch das empfangene Signal haben eine gewisse zeitliche Dauer, wodurch das Auflösungsvermögen beschränkt wird.

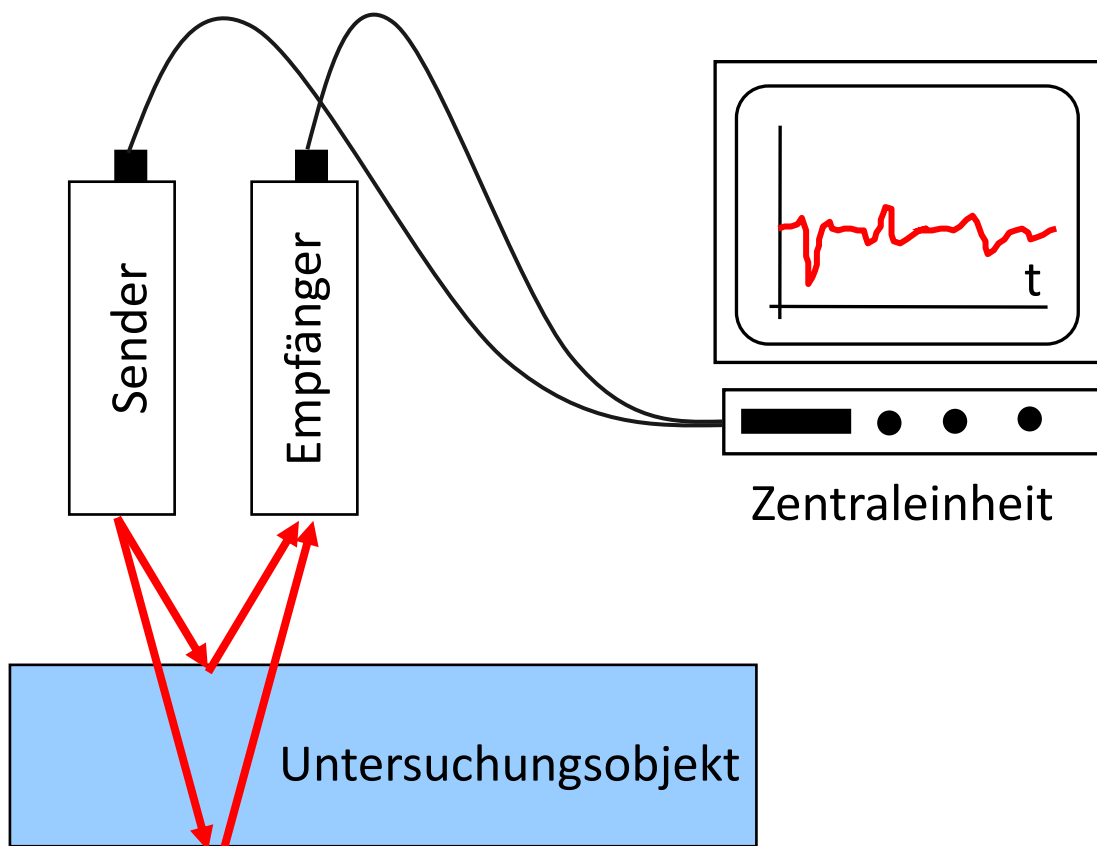


Abbildung 1; Funktionsprinzip Georadar

Das Prinzip einer Einzelmessung an einem Ort ist schematisch in der Abbildung 3 (links) dargestellt. Die mittlere Darstellung zeigt das durch eine Messung an einem Ort erhaltene Ergebnis. Diese Zeitreihe kann auf verschiedene Arten dargestellt werden. Da mittels

Georadar vielfach der Untergrund untersucht wird, wird die Zeitreihe meist mit der Zeitachse nach unten dargestellt Abbildung 3 (rechts). Entweder wird die Zeitreihe direkt als Kurve geplottet, oder die Signalstärke wird in Farben oder Graustufen codiert. Meist sind nicht Zeiten sondern Tiefen und Dicken relevant. Zeiten können in Tiefen umgewandelt werden, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals bekannt ist.

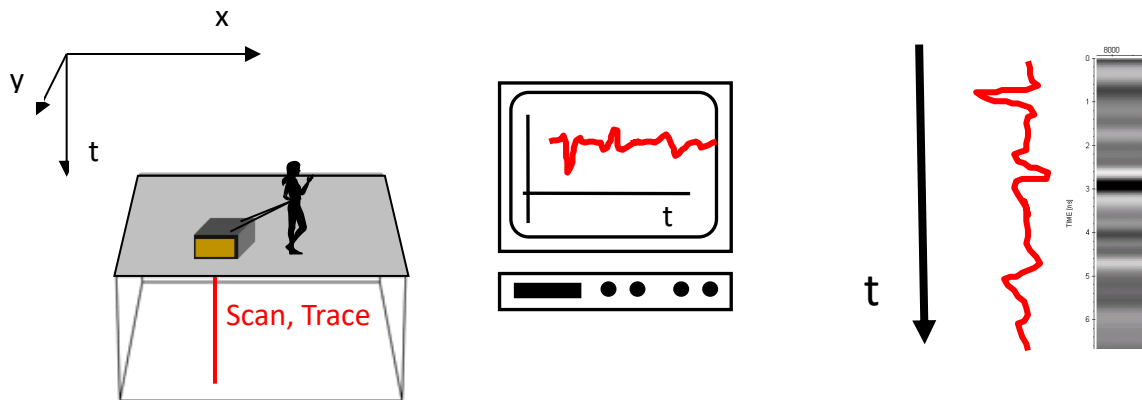


Abbildung 3: Einzelmessung an einem Ort (links), Ergebnis der Einzelmessung (Mitte) und Darstellungsformen (rechts)

Radardaten werden meist entlang von Linien als Serie von Einzelmessungen aufgezeichnet (Abbildung 4, links). Da das Verfahren sehr schnell arbeitet, können die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten sehr gering gehalten werden. Werden viele dieser Spuren nebeneinander geplottet, so ergibt sich ein Bild, welches durch Eigenschaften des Untergrundes bestimmt wird. Beispiel derartiger Darstellungen, aufgezeichnet auf einer bewehrten Betonplatte zeigt Abbildung 4, rechts. Eine derartige Darstellung wird als Radargramm oder Radarprofil bezeichnet. Die horizontale Achse stellt die Länge dar entlang derer die Antenne bewegt wurde, die vertikale Achse ist eine Zeitachse.

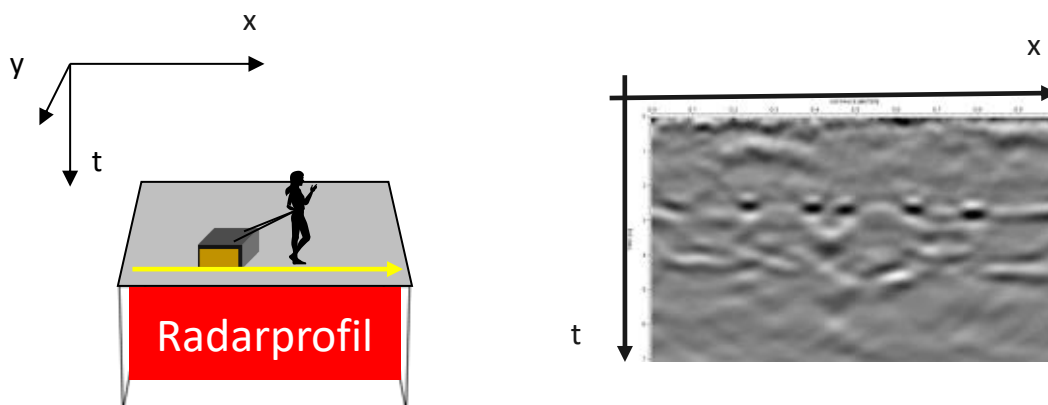


Abbildung 4: Aufzeichnung eines Profils (links) und Datenbeispiel (rechts)

Radardaten können nicht nur entlang von Linien sondern auch flächig aufgezeichnet werden, beispielsweise durch die Aufzeichnung entlang vieler paralleler Linien (Abbildung 5, links). Dies ermöglicht flächige oder dreidimensionale Darstellungen. Eine Zeitscheibe (Abbildung 5) stellt die Radardaten einer bestimmten Zeit oder Zeitspanne dar. Die Abbildung 5, rechts, zeigt ein auf einem bewehrten Betonboden aufgezeichnetes Beispiel einer Zeitscheibe, die durch die einzelnen Bewehrungseisen verursachten Reflexionsmaxima zeichnen sich deutlich ab. Die beiden Achsen entsprechen nun den beiden horizontalen Richtungen auf dem Fussboden. Bei der Betrachtung von Zeitscheiben muss die zeitliche Ausdehnung des reflektierten Signals berücksichtigt werden.

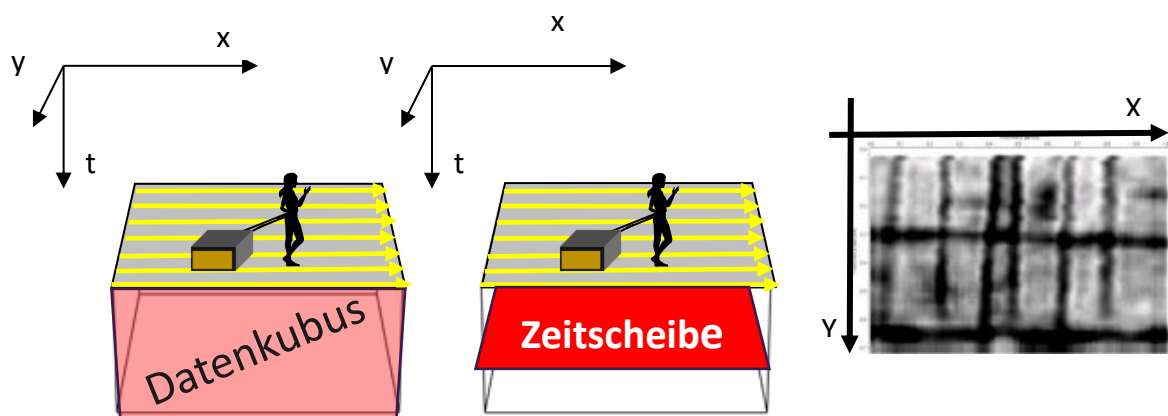


Abbildung 5: Aufzeichnung eines Datenkubus (links), Zeitscheibe (Mitte) und Datenbeispiel (rechts)

Vielfach wird von einer Georadarmessung gesprochen, wenn eigentlich eine Georadaruntersuchung gemeint ist. Dies wird der Sache nicht gerecht, da die Messung nur einen von mehreren Schritten darstellt. Zunächst muss ein Konzept erstellt werden, welches die geforderten Informationen auf einem bestimmten Objekt liefern kann. In diesem Schritt wird beispielsweise die Antennenfrequenz festgelegt oder es wird entschieden ob eine zwei- oder dreidimensionale Untersuchung vorgenommen wird. Anschliessend finden die Messungen statt. Die aufgezeichneten Rohdaten werden anschliessend einem Processing unterzogen, z.B. um das Verhältnis zwischen Signal und rauschen zu verbessern. Auf die Datenverarbeitung folgt die eigentliche Auswertung. Hier werden in den Daten vorhandene Informationen im Objekt vorhandenen Strukturen oder Materialeigenschaften zugeordnet. Hier wird beispielsweise unterschieden, ob eine in den Daten vorhandene Reflexion von der Rückwand des Objektes oder einem Materialwechsel innerhalb stammt. Schliesslich müssen die Ergebnisse einer Untersuchung benutzergerecht ausgegeben werden.



Abbildung 6: Schritte einer Georadaruntersuchung

Georadar ist eine äusserst vielseitige Untersuchungsmethode. Die Anwendungen reichen von der grossflächigen Untersuchung von kilometerdicken Eisdicken in der Antarktis bis zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauwerken. Im Rahmen dieses Projektes zielte die Georadaruntersuchung auf die Position von allfälliger Bewehrung, der Bestimmung der Dicke der Fenster und allfälliger Schwankungen sowie zur Untersuchung allfälliger Materialwechsel, zum Beispiel durch variierende Feuchtigkeiten oder Schäden im Material. Aufgrund der geringen Dicke der Fenster und der beschränkten Abmessungen wurde eine dreidimensionale Untersuchung mit hoher Antennenfrequenz vorgenommen. Die Kosten der in diesem Projekt eingesetzten Ausrüstung liegt bei über CHF 30000.-. Für spezielle Anwendungen sind auch einfachere Geräte für etwa ein Drittel dieses Preises auf dem Markt erhältlich. Die Fachstelle verfügt über eine Lizenz des Bundesamtes für Kommunikation zum legalen Betrieb der Radaranlage in der ganzen Schweiz.

Anwendung in Courfaivre

Georadar wurde in Courfaivre auf zwei Fenstern angewendet, La Multiplication des Pains und L'Annonciation. Bei beiden Fenstern wurde analog vorgegangen. Zunächst wurde ein Grid aus Papier auf dem Fenster befestigt. Dies diente einerseits dem Schutz der Oberfläche und weiterhin wurde dadurch ein Referenzsystem für die Orientierung eingeführt. Anschliessend wurden auf der Oberfläche Daten entlang von horizontalen Linien im Abstand von 2 cm aufgezeichnet (Abbildung 7).



Abbildung 7: Aufzeichnung der Radardaten auf La Multiplication des Pains

Die eingesetzten Geräte, Software und die Aufzeichnungsparameter können wie folgt zusammengefasst werden.

Tabella 1; eingesetzte Geräte und Software

Bezeichnung	
Radargerät	GSSI SIR-30
Antenne	GSSI Modell 62000 Palm Antenne
Zubehör	Diverses Zubehör wie Kabel etc...
Software für Datenverarbeitung	REFLEXW von Sandmeier Scientific Software

Tabella 2: Aufzeichnungsparameter

Bezeichnung	Parameter
Abstand zwischen Messlinien	0.02 m
Messpunktabstand auf Messlinien	0.0025 m
Werte pro Messpunkt	1024
AD Wandlung	32 Bit

Die aufgezeichneten Daten wurden anschliessend verarbeitet. Dabei wurden die folgenden Schritte angewendet:

- Bandpassfilter
- Korrektur des Nullpunktes
- Zeitabhängige Verstärkung
- Zusammenstellung eines 3-D Datenkubus
- 3-D Migration

Als Ergebnis von Messung und Datenverarbeitung stand für beide Fenster ein Datenkubus zur Verfügung. Eine daraus ausgeschnittene Zeitscheibe aus einer Tiefe von 0.03 m von La Multiplication des Pains zeigt die [Abbildung 8](#). Details werden im Abschnitt Ergebnisse beschrieben.

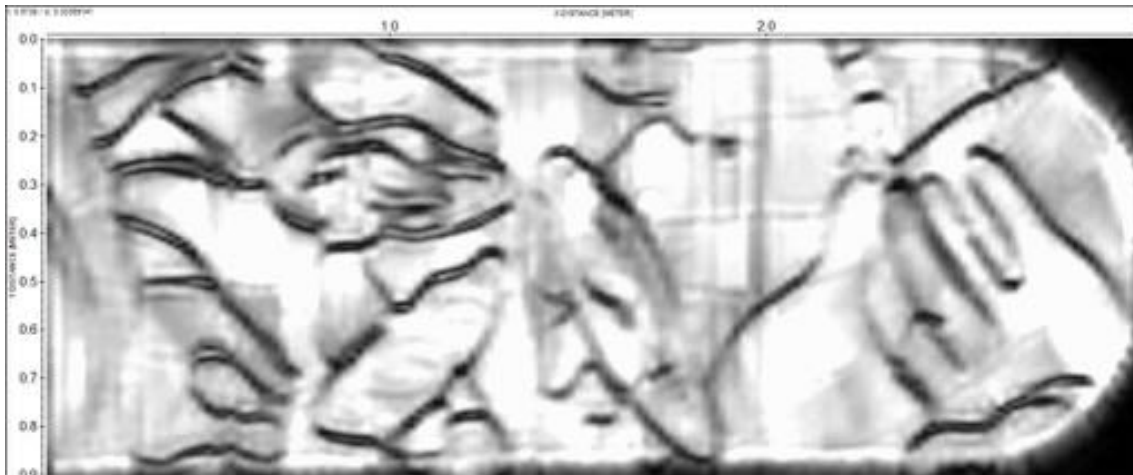


Abbildung 8: Zeitscheibe, Tiefe 0.03 m

Literatur

- [1] Hugenschmidt J. and Balayssac J.P. (2012) Ground Penetrating Radar, In: Non-destructive assessment of concrete structures: reliability and limits of single and combined techniques, Springer, chapter 2.7, edited by Denys Breyse, 63-71, ISBN 978-94-007-2735-9
- [2] Hugenschmidt J. (2010) Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures, In: Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited 2010, Chapter 15, edited by C. Maierhofer, H-W Reinhardt and G. Dobmann: 317-333, ISBN 978-1-84569-950-5
- [3] Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (2010), Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Februar 2008, 2. Auflage
- [4] Hugenschmidt J. (2006) Georadar zur zerstörungsfreien Prüfung von Verkehrsbauwerken MITTEILUNGEN der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Sonderband 2/2006, pp 69-84

Potentialmessung

Die Potentialmessung [1] stellt heute ein breit eingesetztes Instrument zur Untersuchung von Korrosionsprozessen in Stahlbeton dar. Das Messprinzip beruht auf der Tatsache, dass korrodierende Bewehrung ein tieferes Potential ausbildet als passive (nicht von Korrosion befallene) Bewehrung (Elsener et al., 1996). Das klassische Messprinzip (Abbildung 9) erfordert einen sogenannten Bewehrungsanschluss, d.h. eine elektrische Verbindung zur Bewehrung. Dieser Bewehrungsanschluss wird normalerweise durch das Freilegen eines Stabes und anschließender Bohrung zum Einführen eines Steckers realisiert. Mit einer Bezugselektrode wird dann die Betonoberfläche abgetastet um die Potentialdifferenz zwischen Punkten auf der Betonoberfläche und der Bezugselektrode zu messen. In dieser Konstellation weisen Bereiche mit stark negativen Potentialdifferenzen (einige hundert mV) auf eine stattfindende

Korrosion hin. Da auch weitere Faktoren, wie beispielsweise Feuchtigkeit oder Chloridgehalt einen Einfluss auf das gemessene Potential haben, existiert kein einfacher Grenzwert für Korrosion oder Nicht-Korrosion, sondern die Situation muss im Einzelfall fachgerecht beurteilt werden.

Diverse Studien demonstrieren, dass die Potentialmessung auch Informationen über weitere Parameter, wie zum Beispiel die Feuchtigkeit in einem Bauteil liefert. Diese Studien haben derzeit eher experimentellen Charakter.

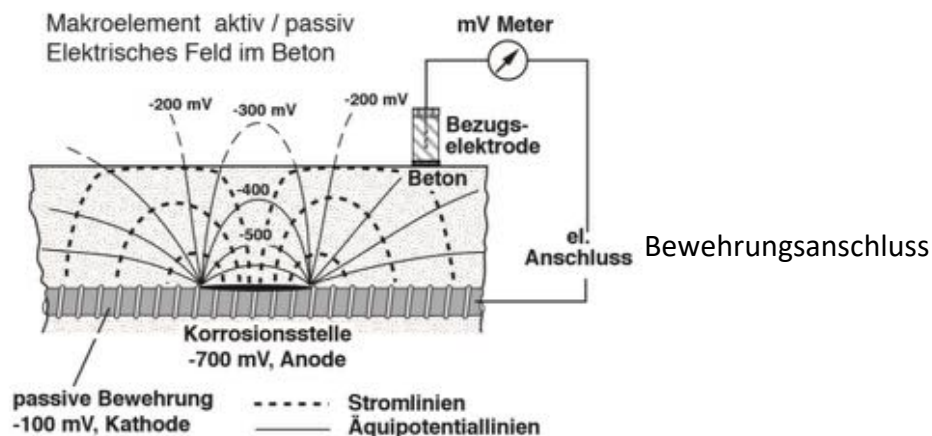


Abbildung 9: Prinzip der Potentialmessung (nach; Elsener et al. 1996)

Auf fragilen und wertvollen Objekten, wie den im Rahmen des hier dokumentierten Projektes untersuchten Betonverglasungen, verbietet sich ein Bewehrungsanschluss. Potentialmessungen mit Bewehrungsanschluss haben sich bewährt und es liegt ein breites Erfahrungswissen vor, rein physikalisch ist der Bewehrungsanschluss jedoch nicht zwingend. Potentialdifferenzen können auch direkt auf der Oberfläche mit zwei Elektroden in einem fixen Abstand d abgegriffen werden (Abbildung 10). Dies ist ein auch auf den hier untersuchten Betonglasfenstern praktikabler Ansatz. Allerdings verliert bei dieser Vorgehensweise das Vorzeichen seine Bedeutung und es liegen keine breiten Erfahrungen vor.

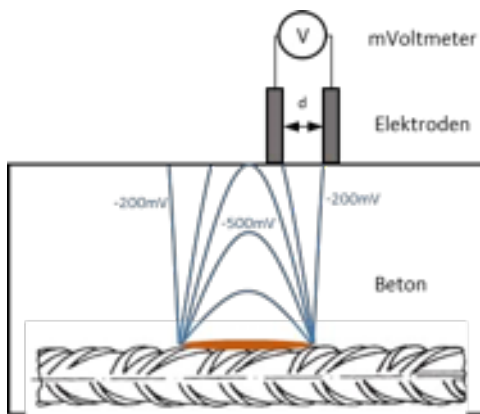


Abbildung 10: Potentialmessung mit fixem Elektrodenabstand

Anwendung in Courfaivre

In Courfaivre wurden Potentialmessungen mit einem fixen Elektrodenabstand von 0.1 m auf den Fenstern "La Multiplication des pains" und "L'annonciation" durchgeführt. Das Elektrodenpaar wurde möglichst engmaschig über die Betonflächen des Fensters geführt. Dieser Vorgang wurde gefilmt, damit anschliessend die gemessenen Potentialdifferenzen mit den jeweiligen Positionen zusammengeführt werden konnten.



Abbildung 11: Potentialmessung mit fixem Elektrodenabstand auf l'annonciation

Literatur

[1] Elsener B. et al. (1996) Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton, Eidgenössisches Verkehrs und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag 85/88 im Auftrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung

Elektrischer Widerstand

Die Bestimmung des elektrischen Widerstands ist ein Standardverfahren in der oberflächennahen Geophysik [1, 2], zeichnen sich doch verschiedene geologische Strukturen

und Materialien durch verschiedene spezifische elektrische Widerstände aus. Bei der Untersuchung von kleineren Strukturen, wie z.B. Bauwerken werden Untersuchungen zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes durchgeführt, allerdings kann dies nicht als Standardverfahren bezeichnet werden. Es ist zu unterscheiden zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand, welcher eine materialabhängige Grösse ist. Im Gegensatz dazu ist der elektrische Widerstand eine bauteilabhängige Grösse und hängt nicht nur vom Material eines Bauteils, sondern beispielsweise auch vom Durchmesser einer elektrischen Leitung ab. Prinzipiell kann der spezifische elektrische Widerstand durch eine Anordnung ermittelt werden, an dem an zwei Punkten eine Spannung angelegt wird und der Strom gemessen wird (

Abbildung 12). In der Praxis stellt sich hier das Problem, dass der gemessene Widerstand wesentlich durch den Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Bauteil beeinflusst wird. Dies kann mit einer sogenannten Vierpunktanordnung vermieden werden. Dort wird über zwei Elektroden ein Strom eingespeist und mit zwei weiteren Elektroden die Spannung gemessen (Abbildung 13).

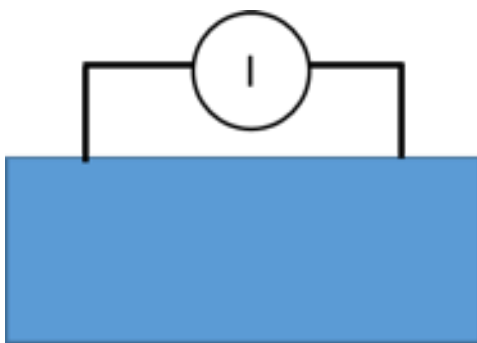


Abbildung 12: Widerstandsmessung mit Zweipunktanordnung

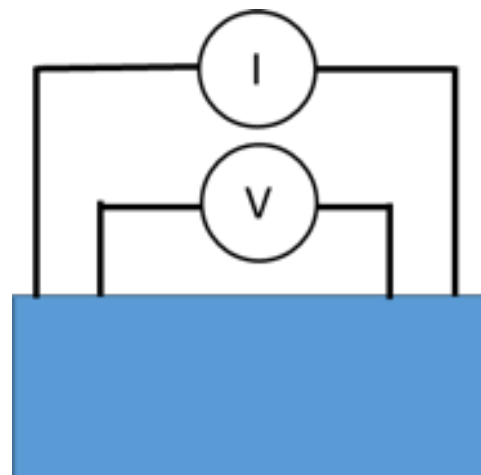


Abbildung 13: Widerstandsmessung mit Vierpunktanordnung

Für die Prüfung an Bauwerken sind Geräte mit fixen Elektrodenabständen auf dem Markt erhältlich. Beim Einsatz auf Betonglasfenstern kann eine Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes insbesondere Hinweise auf vorhandene Bewehrungsstäbe liefern. Weiterhin könnten eine allfällige Karbonatisierung und unterschiedliche Feuchtigkeiten im Beton das Ergebnis beeinflussen.

Anwendung in Fribourg

Die Widerstandsmessung wurde nur in Fribourg durchgeführt. Die Widerstände im Beton waren so hoch, dass keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden konnten. Zu hohe Widerstände verhindern die Einspeisung des Stroms und somit auch die Messung sinnvoller

Spannungen. Die hohen Widerstände sind vermutlich auf eine Kombination von Austrocknung und vollständiger Karbonatisierung zurückzuführen. Es wurde daher entschieden, das Verfahren in Courfaiivre nicht anzuwenden.

Literatur

[1] Wenner F. (1915/1916) A method of measuring earth resistivity, National Bureau of Standards, Scientific Bulletin, 12, 478-496.

[2] Loke M. H. (2000), Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies
A practical guide to 2-D and 3-D surveys

Thermographie

Während das menschliche Auge elektromagnetische Strahlung im Bereich von etwa $400\text{-}800 \cdot 10^{12}$ Hertz als sichtbares Licht wahrnimmt, spielt sich die Wärmestrahlung weitgehend im Bereich zwischen etwa $6\text{-}400 \cdot 10^{12}$ Hertz ab. Die Strahlung in diesem Bereich wird als Infrarotstrahlung bezeichnet [1]. Jeder Körper mit einer Temperatur von mehr als 0 Grad Kelvin gibt Infrarotstrahlung ab. Diese Tatsache kann einerseits genutzt werden um Oberflächentemperaturen zu messen, andererseits können Variationen dieser Oberflächentemperaturen auf Defekte im Inneren des Körpers hinweisen.

Zur Aufzeichnung der abgestrahlten Infrarotstrahlung kann eine Infrarotkamera verwendet werden. Diese zeichnet neben der vom Körper abgegebenen Strahlung auch an der Oberfläche reflektierte Strahlung ab. Weiterhin spielt die Emissivität der Oberfläche sowie die Absorption im Medium zwischen Objekt und Kamera eine Rolle. Weiterhin kann auch das Medium zwischen Objekt und Kamera Infrarotstrahlung abgeben und somit das Ergebnis verfälschen.

Sollen mittels Thermographie Defekte wie Risse, Feuchtigkeitsunterschiede sowie Einbauteile detektiert werden, so spielen vor allem Temperaturunterschiede auf der Oberfläche eine Rolle. Die Auswirkung von verschiedenen Feuchtigkeiten auf einem Objekt zeigt die [Abbildung 14](#). Durch die dem feuchten Teil entzogene Verdunstungswärme wird dort eine tiefere Temperatur aufgezeichnet.

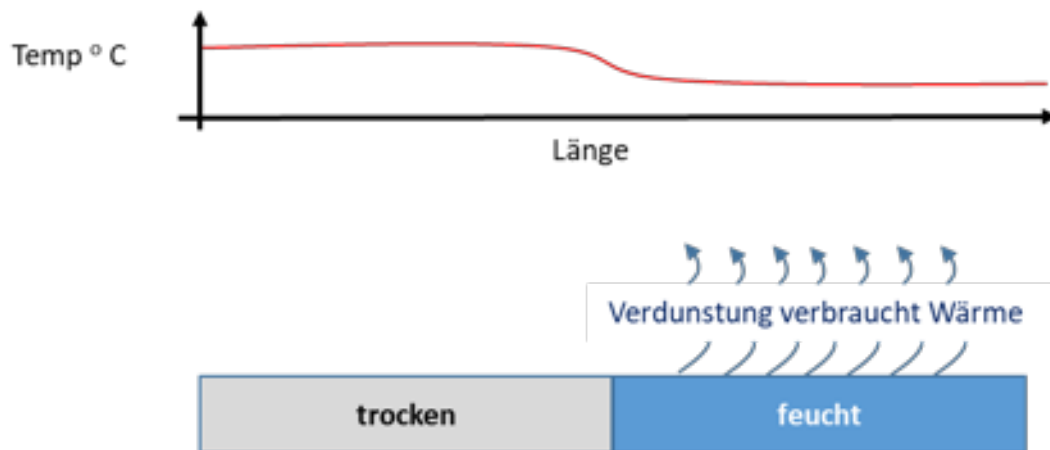


Abbildung 14: Auswirkung von Feuchtigkeit auf eine Thermographieaufzeichnung

Die Wirkung von Defekten wie Hohlräumen oder Rissen ist in [Abbildung 15](#) veranschaulicht. Ein Objekt mit einem Hohlraum weist eine kalte und eine warme Seite auf. Dadurch ergibt sich ein Wärmefluss von warm nach kalt. Wenn das Material im Hohlraum eine geringere Wärmeleitfähigkeit hat als das Objekt, dann wird auf der Oberfläche des Objektes eine tiefere Temperatur gemessen.

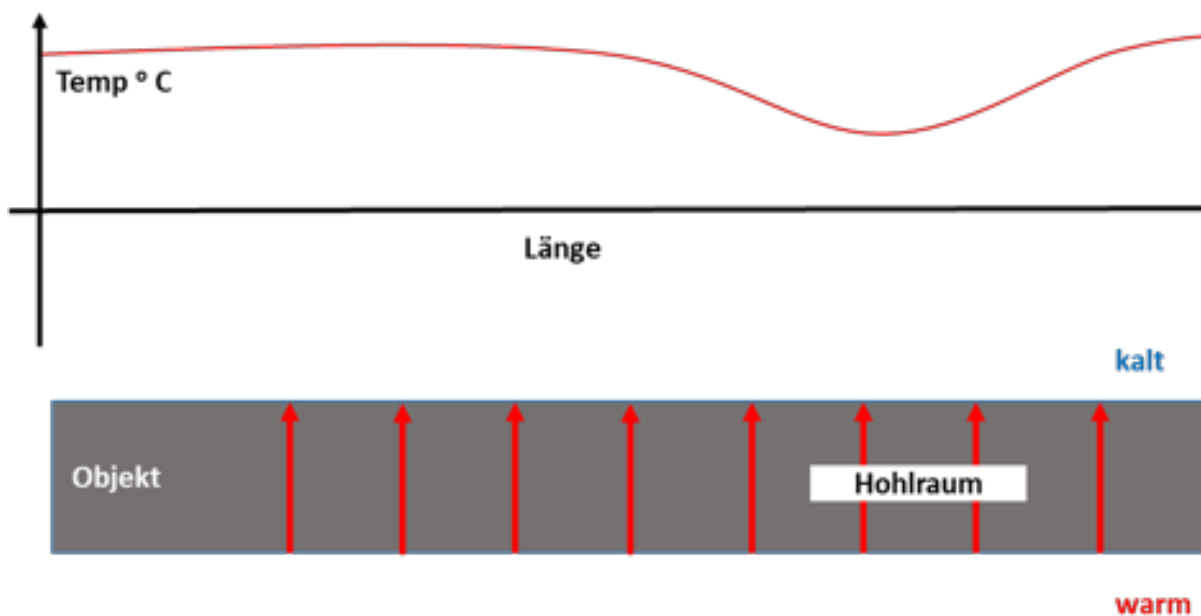


Abbildung 15: Auswirkung eines Hohlraumes auf eine Thermographieaufzeichnung

Prinzipiell kann zwischen aktiver und passiver Thermographie unterschieden werden. Bei der passiven Thermographie werden bestehende Temperaturunterschiede ausgenutzt, bei der aktiven Thermographie werden diese aktiv herbeigeführt, beispielsweise durch Bestrahlung mit einer Lampe oder durch aufheizen mit einer Heizdecke. Thermographiekameras sind auf

dem Markt zu Preisen zwischen einigen Hundert Franken und etwa CHF 100000.- erhältlich. Betonglasfenster sollten aufgrund ihrer geringen Dicke für die Detektion von Rissen oder Hohlräumen mittels Thermographie geeignet sein. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass dies erst ab einer gewissen Grösse der Defekte erfolgreich sein wird.

Anwendung in Fribourg und Courfaivre

In Fribourg wurden die Fensterteile während eine Stunde mit einer Heizdecke aufgewärmt (Abbildung 16), anschliessend wurde während einer Stunde pro Minute eine Aufnahme gemacht. In Courfaivre war dies nicht möglich, so dass die Kamera auf der Empore in der Kirche platziert wurde und während drei Stunden eine Aufnahme pro Minute aufgezeichnet wurde. Die Kameraperspektive auf das Fenster La Resurrection zeigt die Abbildung 17.



Abbildung 16: Aufwärmen mit Heizdecke

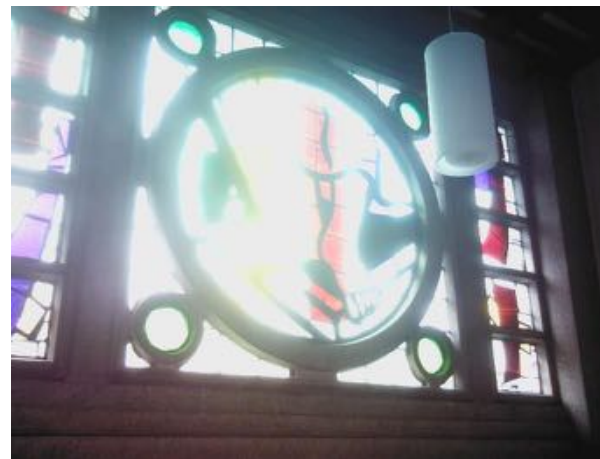


Abbildung 17: Kameraperspektive Courfaivre

Literatur

[1] Flir Systems Inc. (?) THE ULTIMATE INFRARED HANDBOOK FOR R&D PROFESSIONALS, www.flir.com

Induktion

Induktive Verfahren [1] werden vor allem für die Detektierung und Lokalisierung von Bewehrungsstäben eingesetzt. Für diese Anwendung können induktive Verfahren als Standard bezeichnet werden. Das Prinzip beruht auf einem magnetischen Wechselfeld (Primärfeld), welches durch eine Spule erzeugt wird (Abbildung 18). Sind nun keine elektrisch leitenden Objekte in der Umgebung vorhanden, so wird durch eine zweite Spule das Feld abgegriffen, welches von der ersten Spule erzeugt wird (Abbildung 19).

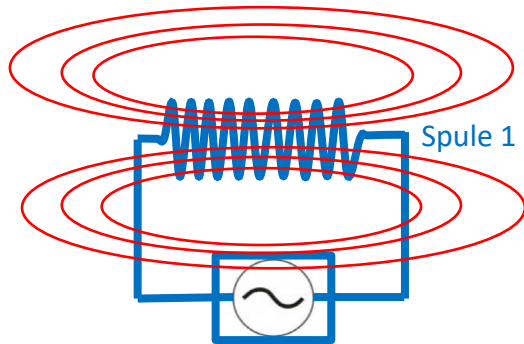


Abbildung 18: Eine Spule erzeugt ein magnetisches Wechselfeld

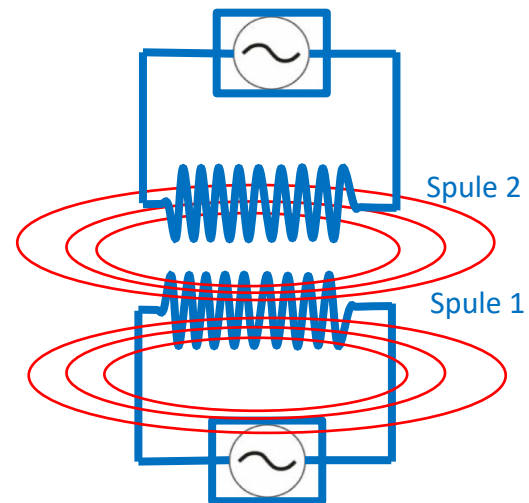


Abbildung 19; Abgriff des magnetischen Wechselfeldes durch eine zweite Spule

Befinden sich nun in der Umgebung der Spulen elektrisch leitfähige Objekte, wie beispielsweise Bewehrungsstäbe (Abbildung 20), so werden in diesen Ströme induziert, welche ebenfalls ein magnetisches Wechselfeld (Sekundärfeld) verursachen. In diesem Fall greift die zweite Spule die Überlagerung von Primärfeld und Sekundärfeld ab. Dieses veränderte Signal weist auf die Existenz eines Bewehrungsstabes an einem bestimmten Ort hin. Grundsätzlich sind drei Parameter relevant, die horizontale Position des Stabes, die Tiefe im Beton und der Stabdurchmesser. Die Bestimmung der horizontalen Position stellt meist kein Problem dar. Da aber ein dünner Stab in geringer Tiefe einen ähnlichen Effekt verursacht wie ein dickerer Stab in grösserer Tiefe, muss entweder der Durchmesser oder die Tiefe bekannt sein, um die andere Grösse präzise zu bestimmen.

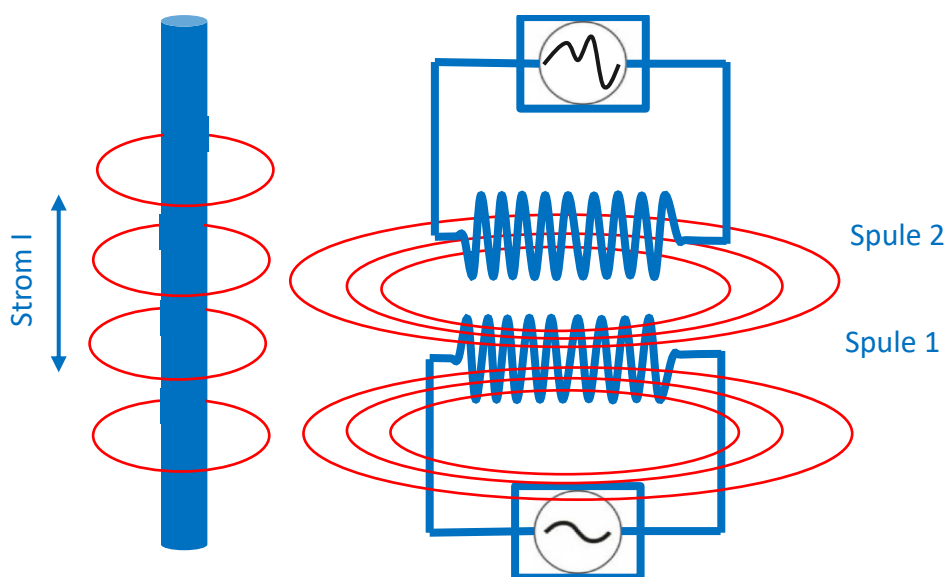


Abbildung 20: Abgriff der Summe von Primärfeld und Sekundärfeld durch eine zweite Spule

Die im Handel erhältlichen Geräte können Bewehrungsstäbe bis in eine Tiefe von etwa 10 cm orten. Somit sollte die Methode prinzipiell für Betonglasfenster geeignet sein. Allerdings ist hinzuzufügen, dass Grösse und Form des Sensors sowie die im Gerät hinterlegten Algorithmen zur Auswertung für die Untersuchung von rechtwinkligen Bewehrungsnetzen in Betonbauwerken optimiert sind. Im Rahmen des hier dokumentierten Projektes wurden 4 verschiedene Geräte eingesetzt. Das einfachste war ein günstiges Leitungssuchgerät aus dem Baumarkt für etwa CHF 30.-. Weiterhin wurden drei professionelle Geräte verwendet, welche teilweise über komplexe Algorithmen zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse verfügen. Die Kosten derartiger Geräte liegen bei über CHF 10000.-.

Anwendung in Fribourg und Courfaivre

In Fribourg wurde mit einem Proceq Profometer 6 die Oberfläche abgescant und die aufgefundenen Bewehrungspositionen direkt auf das Grid gezeichnet (Abbildung 21). Hierbei stellte die Grösse des Sensors ein Problem dar, weil nicht klar definiert ist wo auf dem etwa 0.2 m langen Sensor der Stab detektiert wurde. Deshalb wurde in Courfaivre mit einem Profometer5+ mit kürzerem Sensor gearbeitet. Zusätzlich wurde ein billiges Leitungssuchgerät aus dem Baumarkt in gleicher Weise eingesetzt. Weiterhin wurde durch die Firma Geotest ein Flächenscan mit dem Ferroscan PS200 auf "L'annonciation" (Courfaivre) und auf Fensterteilen in Fribourg durchgeführt.

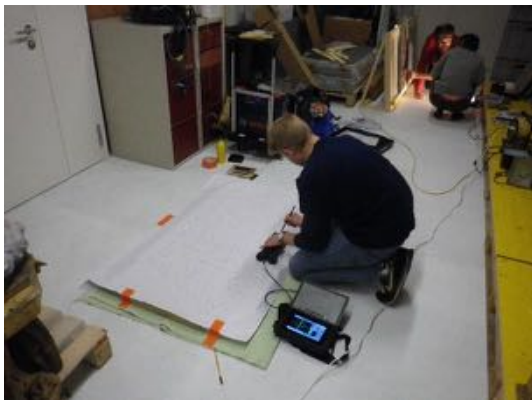


Abbildung 21: Profometer6 In Fribourg



Abbildung 22: Profometer5+ in Courfaivre

Zusatzexperiment im Labor

Wie oben erwähnt, bestehen die meisten Bewehrungsnetze aus Bewehrungsstäben, welche in zwei Richtungen verlaufen, wobei die beiden Richtungen senkrecht aufeinander stehen. Es ist davon auszugehen, dass die handelsüblichen Geräte hierfür optimiert sind. Bei den Betonglasfenstern in Fribourg und Courfaivre kann nicht von einer rechtwinkligen Anordnung der Stäbe ausgegangen werden. Somit stellt sich die Frage ob ermittelte Bewehrungsüberdeckungen vom Winkel abhängig sind, in der der Sensor den Stab passiert.

Um dies abzuklären, wurde ein Laborexperiment durchgeführt. Auf einem Prüfkörper wurden die Sensoren zweimal über zwei Bewehrungsstäbe geführt. Einmal war die Sensorachse dabei parallel zum Stab (Abbildung 23) und einmal betrug der Winkel 45 Grad (Abbildung 24). Die Stabdurchmesser wurden wie folgt eingestellt und während der Messung nicht verändert:

Proceq Profometer5+: 8 mm

Proceq Profometer6: 10 mm

Hilti Ferrosan PS200: 12 mm



Abbildung 23: Sensorachse parallel zur Stabachse (rote Linie)



Abbildung 24: Sensorachse im 45 Grad Winkel zur Stabachse

Die Ergebnisse können wie in der Tabelle 3 zusammengefasst werden. Die 45 Grad Ergebnisse liegen mit einer Ausnahme deutlich über den Ergebnissen mit paralleler Anordnung. Prinzipiell wäre es denkbar, dass ein derartiger Effekt bei einer automatisierten Auswertung einer Flächenmessung korrigiert wird, da dann ja die Winkel bekannt sind. Ob dies tatsächlich der Fall ist, konnte im Rahmen dieses Experimentes nicht geklärt werden.

Tabelle 3: Laborexperiment Induktion

	Stab 1 - parallel	Stab 1 - 45 Grad	Stab 2 - parallel	Stab 2 – 45 Grad
Profometer 5+	21 mm	27 mm	46 mm	49 mm
Profometer 6	19 mm	22 mm	46 mm	47 mm
FerrosanPS200	29 mm	29 mm	45 mm	56 mm

Literatur

[1] Maierhofer C., Reinhardt H. W. Dobmann G (editors) (2010) Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited 2010

Magnet

Ein starker Magnet, welcher von Hand über eine Oberfläche geführt wird, eignet sich zur Detektion von oberflächennaher Bewehrung. Eigens an der Hochschule durchgeführte Experimente zeigen, dass Bewehrungsstäbe mit den üblichen Durchmessern typischerweise in einer Tiefe bis 1.5 cm geortet werden können. Somit ist die Anwendung auf Betonglasfenstern aufgrund der beschränkten Dicke vielversprechend. Der Magnet ist das günstigste zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren, welches in diesem Projekt eingesetzt wurde. Die Kosten liegen bei einigen Franken.

Anwendung in Fribourg und Courfaivre

In Fribourg und Courfaivre wurde der Magnet eingesetzt. Der Magnet wurde von Hand über das auf dem Objekt befindliche Grid aus Papier bewegt. Der Magnet haftete dabei vielerorts klar auf der Oberfläche an anderen Orten jedoch nicht. Der Magnet konnte somit entlang der Haftung über die Oberfläche bewegt werden. Dabei wurde die Position der Bewehrungsstäbe direkt auf dem Papier angezeichnet. Die *Abbildung 25* zeigt den auf der Oberfläche haftenden Magneten mit bereits mit roten Linien bezeichneten Positionen von Bewehrungsstäben auf "La Multiplication des Pains".

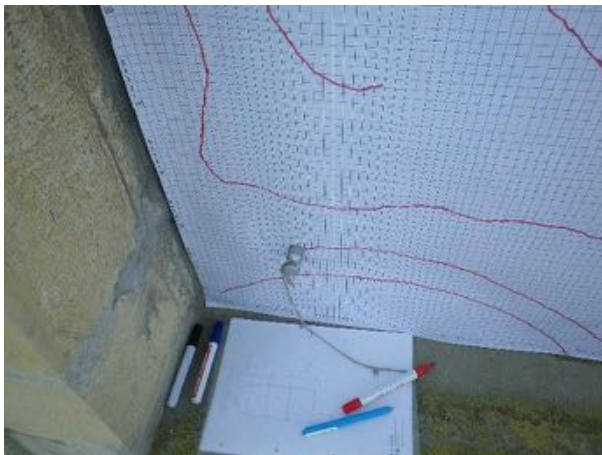


Abbildung 25: Auf der Papieroberfläche haftender Magnet mit bereits eingezeichneten Bewehrungsstäben (rote Linien)

Ultraschall

Ultraschall [1] ist ein Prüfverfahren, welches auf mechanischen Wellen basiert. Zu untersuchende Objekte können entweder im Reflexionsmodus, ähnlich wie Georadar untersucht werden, oder es können Durchschallungsuntersuchungen vorgenommen werden. Im Reflexionsmodus werden Dicken untersucht und Einbauteile lokalisiert werden. Die Durchschallungsprüfung dient vor allem zur Ermittlung von Materialkennwerten, wie z.B. der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im Material. Um Daten im Reflexionsmodus aufzuzeichnen, muss ein Prüfkopf (*Abbildung 26*) mit erheblichem Anpressdruck auf jeden einzelnen Messpunkt aufgesetzt werden. Bei der Durchschallungsprüfung werden die

Prüfköpfe beidseits des Untersuchungsobjektes mit einem Kontaktmittel mit der Oberfläche gekoppelt werden. Um mechanische Beschädigungen der untersuchten Fenster zu vermeiden und um die Oberflächen nicht mit Kontaktmitteln zu verunreinigen, wurde auf den grossflächigen Einsatz von Ultraschall verzichtet. Stattdessen wurden von der Firma Geotest lokale Messungen mit einem Gerät der Serie TT-10 von TIME Group Inc. auf den Gläsern von l'annonciation durchgeführt (Abbildung 28).



Abbildung 26: Prüfkopf Ultraschall Reflexion



Abbildung 27: Prüfkopf Ultraschall Reflexion im Einsatz auf Betonkörper



26.8 mm



25.4 mm



24.1 mm



24.7 mm

Abbildung 28: Serie TT-10 von TIME Group Inc. auf l'annonciation (Geotest S.A.)

Literatur

[1] Maierhofer C., Reinhardt H. W. Dobmann G (editors) (2010) Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited 2010

2. Fragestellungen und Verfahren

Position und Existenz von Bewehrung

Magnet

Mit dem Magneten konnte die Position der Bewehrungsstäbe sowohl in Fribourg, als auch in Courfaivre ("La Multiplication des Pains" und "L'Annonciation") problemlos detektiert werden. Es gab keinen Interpretationsbedarf, da die Haftung des Magneten auf der Oberfläche offensichtlich war und die einzelnen Stäbe direkt nachgefahren werden konnten. Die auf dem Grid vor Ort eingezeichneten Positionen wurden anschliessend fotografiert und von Hand auf ein Foto der Fenster übertragen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 29: Mit dem Magneten ermittelte Bewehrungspositionen (rote Linien) auf "La Multiplication des Pains"



Abbildung 30: Mit dem Magneten ermittelte Bewehrungspositionen auf "L'Annonciation"

Induktion

Die Untersuchungen mittels Induktion wurden in mehreren Varianten durchgeführt. Mit einem Hilti Ferroskan wurde ein sogenannter Flächenscan durchgeführt (Christophe Gosselin, Geotest). Dabei handelt es sich um ein flächiges Abrastern der zu untersuchenden Fläche mit anschließender automatisierter Auswertung. Danach können flächige Darstellungen der Situation in verschiedenen Tiefen dargestellt werden. Zu Zuordnung einer Tiefe muss genaugenommen der Stabdurchmesser bekannt sein, was vielfach nicht der Fall ist. Die Abbildung 31 zeigt das Ergebnis für "L'annonciation". Die Abbildung 32 zeigt den Vergleich mit dem Ergebnis des Magneten. Es fällt auf, dass die Übereinstimmung der beiden Ergebnisse recht gut ist. Der Flächenscan liefert aufgrund der automatisierten Auswertung nur Ergebnisse auf quadratischen Teilflächen. Dies ist bei einem kreisrunden Fenster nicht optimal, könnte aber zumindest teilweise durch die Untersuchung auf mehreren Teilflächen und deren anschließende Kombination verbessert werden. Auf jeden Fall bleiben Lücken an den Rändern eines Fensters und die Anwendung auf grössere Flächen durch Kombination vieler Teilflächen ist zeitaufwändig. Die wichtigste technische Einschränkung ist daher die Größe und Konfiguration des Geräts für den Zugang zu den Fensterecken



Abbildung 31: induktiver Flächenscan, Tiefe 20-30 mm



Abbildung 32: Vergleich Flächenscan mit Magnet

Die Untersuchungen ohne automatisierte Auswertung bzw. Flächenscan wurden parallel mit einem billigen Gerät aus dem Baumarkt sowie dem Proceq Profometer 5 durchgeführt. Dabei wurde der Sensor auf der Oberfläche hin und her bewegt, die Position der Bewehrungsstäbe wurden hierbei direkt auf dem Papier eingezeichnet. Die *Abbildung 33* zeigt einen Vergleich der Ergebnisse dieses Ansatzes mit dem Ergebnissen des Magneten für einen Ausschnitt von "La Multiplication des Pains". Neben wenigen deutlichen Fehlern, welche in der Abbildung mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet sind, befinden sich die derart bestimmten Bewehrungspositionen meist nur wenige Zentimeter von den mit dem Magneten bestimmten Positionen entfernt. Diese Abweichungen sind auf die Ausdehnung des Sensors zurückzuführen, da die Positionen jeweils in der Mitte des Sensors eingezeichnet wurden.

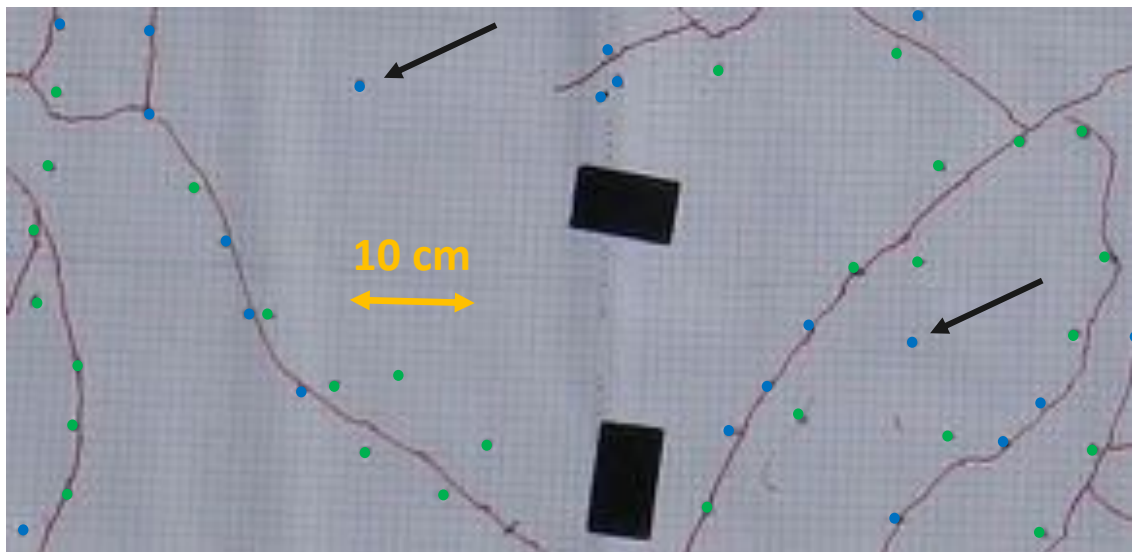


Abbildung 33: Vergleich Profometer 5 (blaue Punkte) und billiges Gerät aus Baumarkt (grüne Punkte) mit Ergebnis Magnet (rote Linien), der gelbe Pfeil hat eine Länge von 0.1 m

Georadar direkte Detektion

Die Abbildung 34 zeigt eine Zeitscheibe aus den Georadardaten aus einer Tiefe von etwa 3 cm von "La Multiplication des Pains". Die Bewehrung zeichnet sich durch schwarze Linien deutlich ab. Einen Vergleich dieses Ergebnisses mit den Ergebnissen mit dem Magneten ist in [Abbildung 35](#) dargestellt. Hier ist folgendes erkennbar:

- Die mit dem Magneten erhaltenen Ergebnisse reichen an den Rändern über die Georadardaten hinaus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Magnet aufgrund seiner kleineren Größe näher bis an die Ränder des Fensters herangeführt werden kann.
- In den Radardaten werden Bewehrungsstäbe in X-Richtung (siehe Koordinatensystem in der Abbildung) besser abgebildet als solche in Y-Richtung. Dies ist auf die Tatsache, dass die Messungen in Y Richtung vorgenommen wurden und die Polarisation des Signals zurückzuführen. Dieser Effekt könnte durch Messung und Datenverarbeitung in beiden Richtungen eliminiert werden. Dadurch würde allerdings auch der Aufwand verdoppelt.
- In der [Abbildung 34](#) (oranger Pfeil) scheint ein Bewehrungsstab an einer Stelle zu existieren, wo eigentlich kein Stab zu erwarten ist, da dort kein Beton vorhanden ist. Möglicherweise wurde diese Fuge nachträglich mit einem anderen Material verfüllt oder unterscheidet sich aus anderen Gründen.
- An einigen Stellen zeigt sich eine kleine Verschiebung zwischen den beiden Ergebnissen. Dies ist auf die manuelle Übertragung der Ergebnisse mit dem Magneten auf das Hintergrundfoto zu erklären.

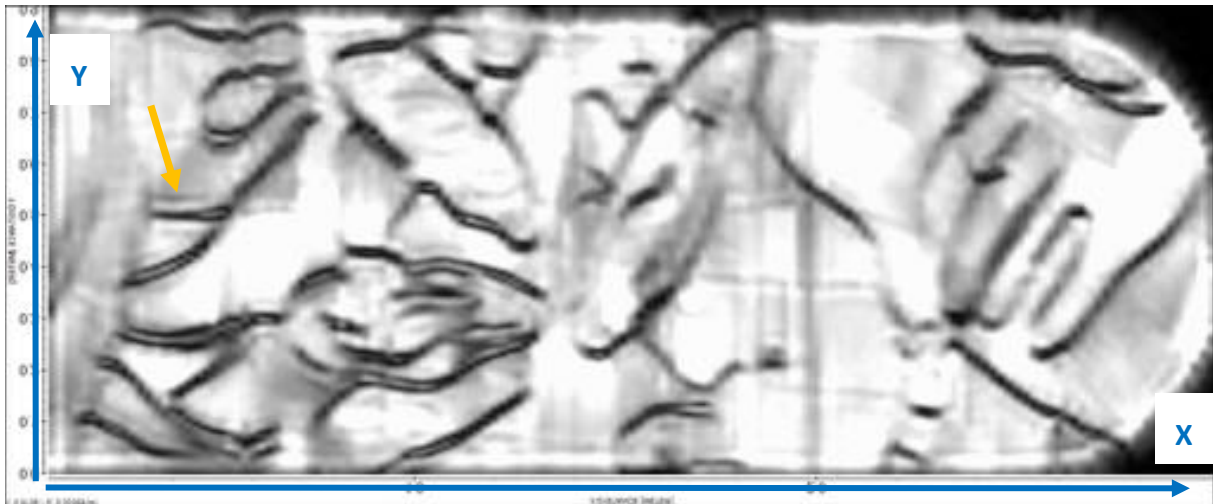


Abbildung 34: Georadar, Zeitscheibe aus ca. 3 cm Tiefe, La Multiplication des Pains



Abbildung 35: Vergleich Georadar mit Magnet

Georadar via Rückwandreflektion

Wird das Signal, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, an den Bewehrungsstäben reflektiert, so erreicht es die Rückwand nicht und wird dort auch nicht mehr reflektiert. Die Abbildung 36 zeigt die Amplitude der Rückwandreflexion für "La Multiplication des Pains". Die Position der Bewehrungsstäbe zeichnet sich deutlich durch reduzierte Reflexionsamplituden (weisse Bereiche) ab.

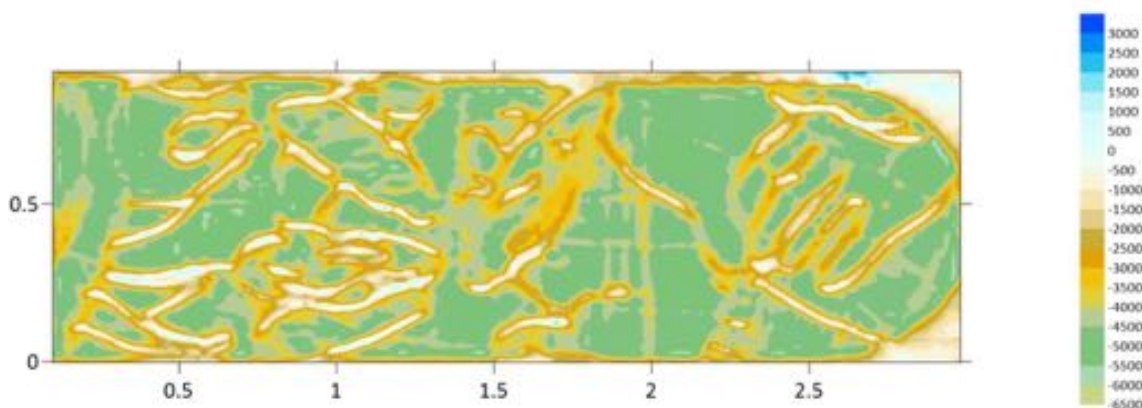


Abbildung 36: Georadar, Amplitude der Rückwandreflexion, La Multiplication des Pains

Bewehrungsüberdeckung

Die Bewehrungsüberdeckung, d.h. die Tiefe der Bewehrungsstäbe im Beton spielt für die Vermeidung von Korrosion eine wesentliche Rolle, sind doch Stäbe in der Nähe der Oberfläche erheblich stärker gefährdet als tiefer liegende Stäbe. Dies ist vor allem bei Glasfenstern mit geringen Dicken und unterschiedlicher Einwirkung der Luftfeuchtigkeit je nach Ausrichtung relevant.

Induktion mit automatisierter Auswertung

Prinzipiell haben Bewehrungsüberdeckung und Bewehrungsdurchmesser einen Einfluss auf das Messergebnis. So muss streng genommen eine der beiden Größen bekannt sein, um die andere zu bestimmen. Häufig geschieht dies durch Freilegen der Bewehrung an wenigen ausgesuchten Stellen. In Courfaivre war dies nicht möglich. Allerdings lag die Bewehrung an einigen Stellen frei, so dass die Durchmesser abgeschätzt werden konnten. Die Abbildung 37 bis Abbildung 39 zeigen das Ergebnis der automatischen Auswertung für verschiedene Tiefen.

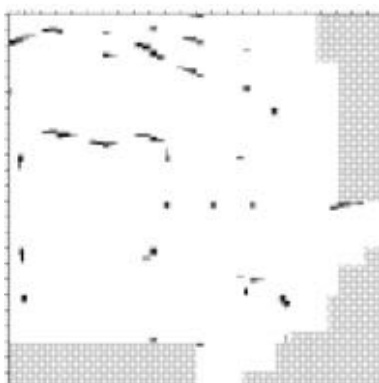


Abbildung 37: Induktion, 0-10 mm



Abbildung 38: Induktion 10-20 mm



Abbildung 39: Induktion, 20-30 mm

Georadar

Die Abbildung 40 zeigt einen horizontalen Schnitt durch den mit Georadar aufgezeichneten Datensatz bei 0.71 m. Die Reflexion an der Rückwand des Fensters ist mit einem grünen Pfeil gekennzeichnet, die an einem der Bewehrungsstäbe mit einem roten Pfeil. Links sind die Laufzeiten des Signals in Nanosekunden dargestellt, rechts eine unkalibrierte Tiefe in Metern. Die Abbildung 41 zeigt die manuell gekennzeichneten Überdeckungen der einzelnen Bewehrungsstäbe. Die Überdeckungen schwanken zwischen 0.01 und 0.02 m, dies ist gut vereinbar mit den Ergebnissen der Induktion.

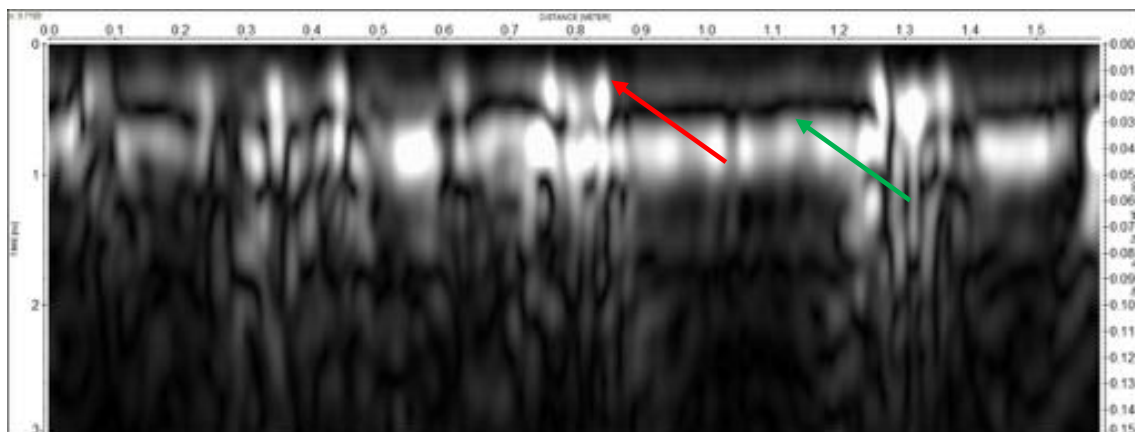


Abbildung 40: L'annonciation, Georadar, Schnitt bei 0.71 m

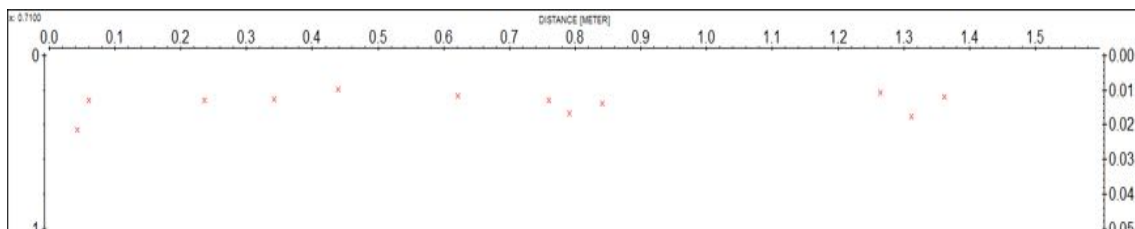


Abbildung 41: L'annonciation, Georadar Interpretation, Schnitt bei 0.71 m

Die Abbildung 42 und die Abbildung 43 zeigen zwei Zeitscheiben aus Tiefen von 0.01 m und 0.02 m. Die Tiefen sind nicht kalibriert. Bei der Analyse dieser beiden Darstellungen ist zu berücksichtigen, dass die reflektierten Signale eine zeitliche Ausdehnung besitzen und sich dadurch über eine gewisse Tiefe erstrecken.

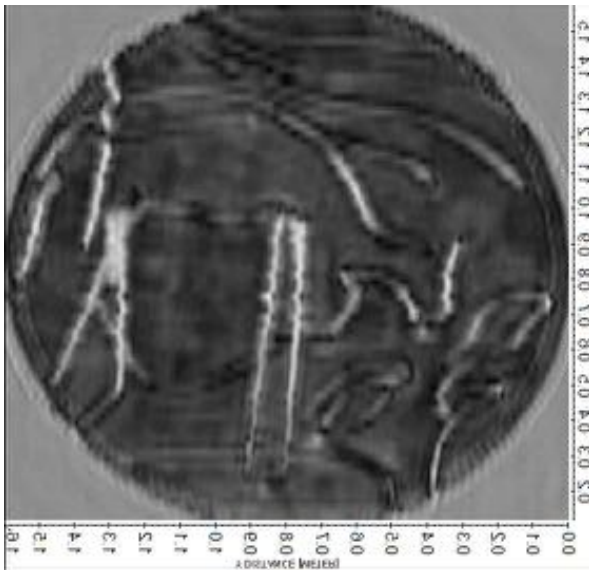


Abbildung 42: Zeitscheibe, Georadar, Tiefe 0.01 m

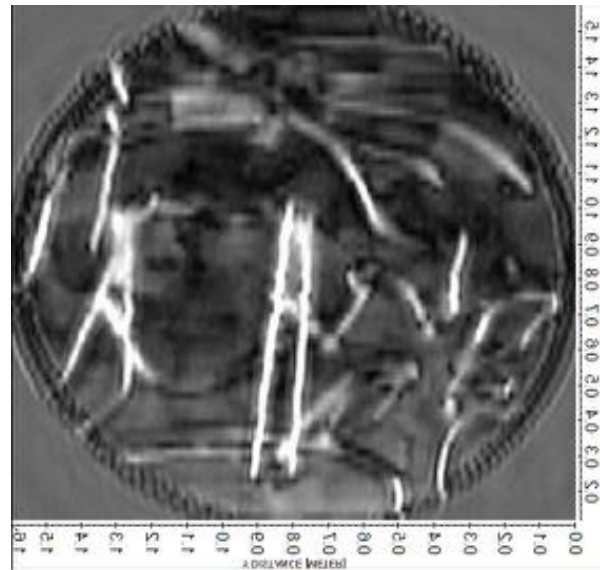


Abbildung 43: Zeitscheibe, Georadar, Tiefe 0.02 m

Korrosion

In Courfaivre wurden L'annonciation und La multiplication des pains mittels Potentialmessung untersucht. Die Abbildung 44 und die Abbildung 46 zeigen die aufgezeichneten Potentialdifferenzen (Spannungen) eingeteilt in zwei Klassen, gelb grösser 50 mV und rot grösser 100 mV. Die Wahl dieser beiden Klassen ist weitgehend willkürlich. Es ist nicht auszuschliessen, dass eine andere Einteilung sinnvoller wäre. Eine Überprüfung dieser Ergebnisse bzw. der Wahl der Klassen ist nur eingeschränkt möglich, da keine zerstörenden Untersuchungen möglich sind. Allerdings wurden Risse und freiliegende Bewehrungsstäbe während der visuellen Beurteilung kartiert, so dass zumindest eine Plausibilitätsbetrachtung möglich ist. Die visuelle Kartierung ergab bei l'annonciation (Südseite) erheblich mehr Risse als bei La multiplication des pains (Nordseite), die Häufigkeit der freiliegenden Bewehrungsstäbe weist keine markanten Unterschiede auf. Dies deutet darauf hin, dass bei der Rissbildung die grösseren Temperaturschwankungen auf der Südseite eine Rolle spielen und die freiliegenden Bewehrungsstäbe vermutlich bereits von Anfang an vorhanden sind. Letztere Annahme wird durch die Tatsache, dass keine Abplatzungen vorhanden sind unterstützt.

Ein qualitativer Vergleich zwischen freiliegenden Bewehrungsstäben und Potentialmessung ergibt, dass an den meisten Stellen wo Bewehrungsstäbe freiliegen auch die die Potentialmessung Spannungen von über 50 mV ergibt. Allerdings werden derartige Werte auch an Stellen gemessen, an denen keine Stäbe freiliegen. Eine ähnliche Schlussfolgerung kann für mittlere und offene Risse gezogen werden.

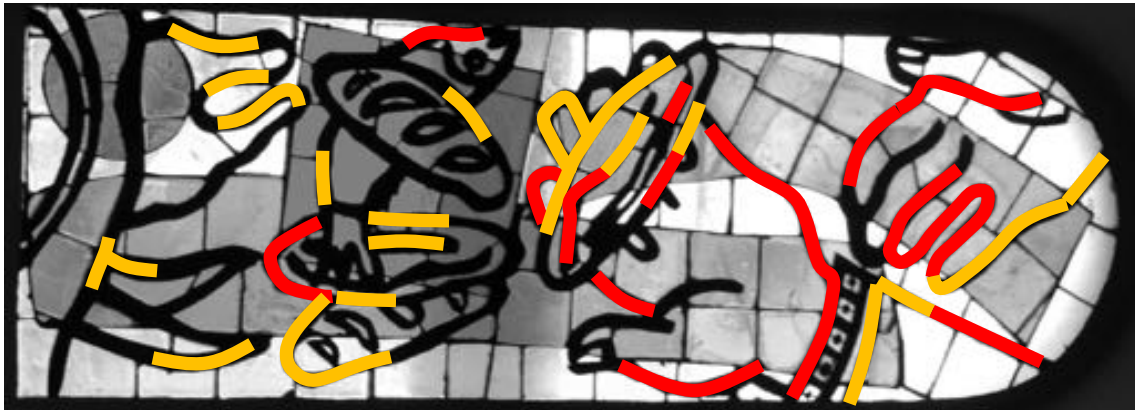


Abbildung 44: La multiplication des pains, Ergebnisse Potentialmessung, rot: $U > 100 \text{ mV}$, gelb: $U > 50 \text{ mV}$



Abbildung 45: La multiplication des pains, Ergebnisse Risskartierung, feine Risse=grün, Offene (durchgehende?) Risse = braun, offenliegende Bewehrungsstäbe=rot, ursprüngliche Betonhaut vorhanden= blau



Abbildung 46: L'annonciation, Ergebnisse Potentialmessung, rot: $U > 100 \text{ mV}$, gelb: $U > 50 \text{ mV}$



Abbildung 47: L'annonciation, Ergebnisse Risskartierung, feine Risse=grün, grössere Risse= blau, offene (durchgehende?) Risse = braun, offenliegende Bewehrungsstäbe=rot

Dicke

Bei Reflexionsmethoden wie Georadar oder Ultraschall kann die Dicke eines Objektes bestimmt werden, wenn es eine eindeutige Rückwandreflexion gibt und die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im betreffenden Medium bekannt ist. Weiterhin deuten Variationen der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Variationen in den Materialeigenschaften hin.

Auf l'annonciation wurden Dicken mit zwei Methoden bestimmt. Mit dem Ultraschallgerät TT-10 von TIME Group Inc. wurde auf vier Gläsern eine Dickenmessung vorgenommen. Die Abbildung 48 zeigt die entsprechenden Stellen, die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt.



Abbildung 48: Messstellen mit TT-10 von TIME Group Inc. (Geotest S.A.)

Tabelle 4: Dicke Ultraschall

Position	Dicke in mm Ultraschall	Dicke in mm Georadar
1	24.7	24-25
2	26.8	25-26
3	25.4	24-25
4	24.1	23-24

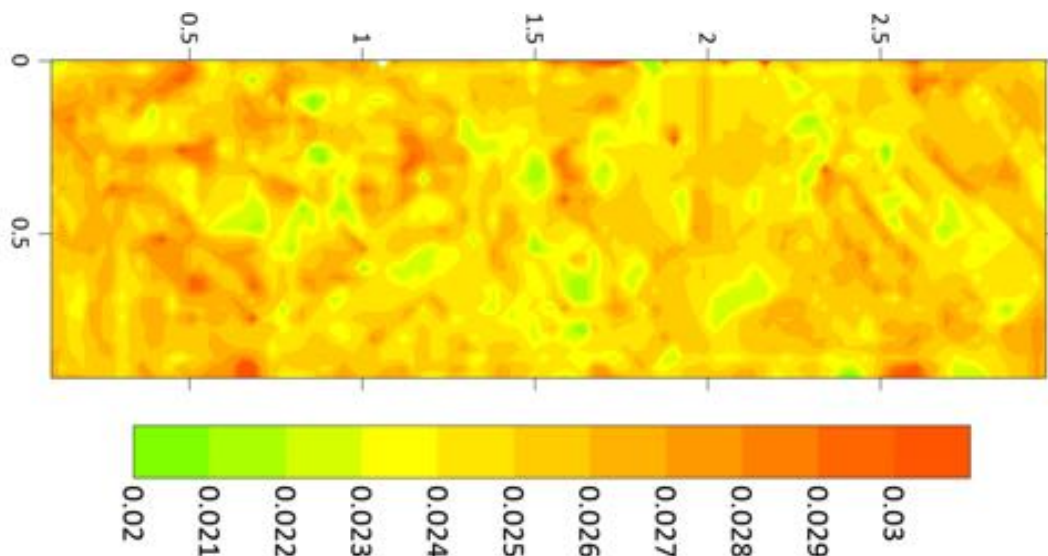


Abbildung 49; La multiplication des pains, Dicke Georadar, unkalibriert, mittlere Dicke 0.025 m

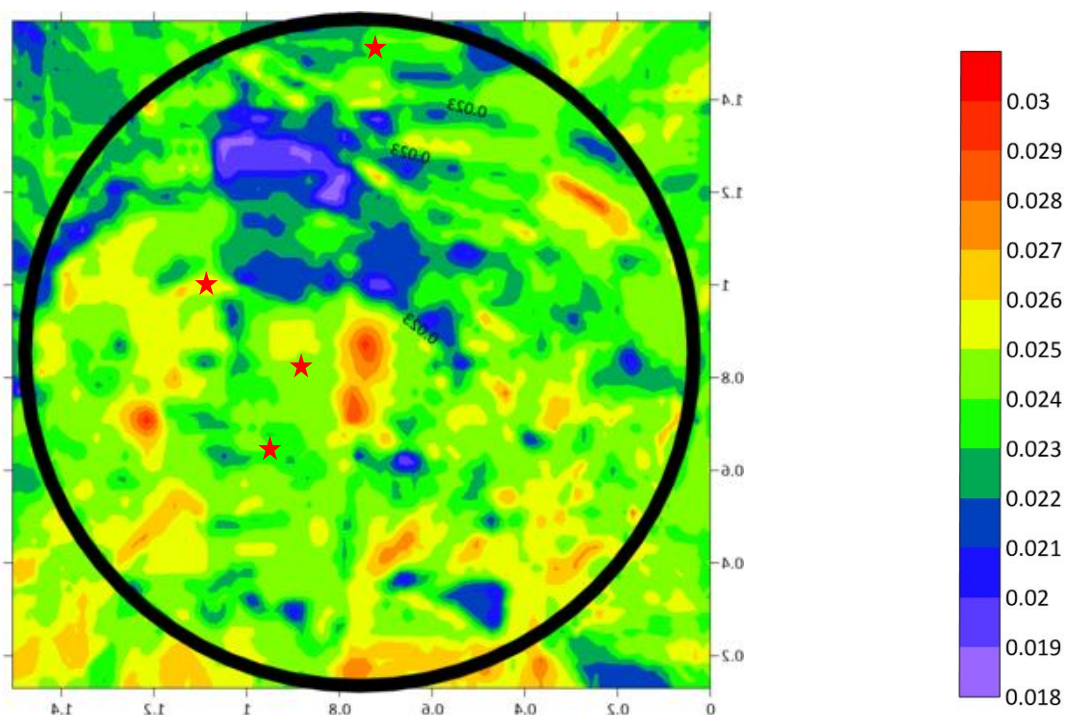


Abbildung 50: L'annonciation, Dicke Georadar, unkalibriert, mittlere Dicke 0.024 m

Materialeigenschaften, Risse, Feuchtigkeit, Porosität

Die Erfassung von Materialeigenschaften wie Feuchtigkeit oder nicht mit bloßem Auge erkennbaren Rissen oder variierenden Porositäten ist anspruchsvoll und eng verbunden mit anderen Methoden wie Potentialmessung oder visueller Inspektion. In Fribourg und Courfaivre wurden Thermographiedaten aufgezeichnet und ausgewertet. In Courfaivre wurden zusätzlich die Amplituden der Rückwandreflexionen dargestellt. Die zu Grunde

liegende Überlegung bei diesem Ansatz beruht auf der Tatsache, dass beispielsweise höhere Feuchtigkeiten zu einer stärkeren Dämpfung des Signals führen können.

In Fribourg wurden die ausgebauten Fensterteile während einer Stunde mit einer Heizdecke aufgewärmt. Anschliessend wurde während einer Stunde pro Minute eine Thermographieaufnahme vom Abkühlungsprozess aufgezeichnet. Dies erlaubt nicht nur das direkte Erkennen von unterschiedlichen Temperaturen z.B. auf Grund verschiedener Feuchtigkeiten, sondern auch die Berechnung von Temperaturdifferenzen zwischen verschiedenen Zeitpunkten.

Die Abbildung 51 und die Abbildung 52 zeigen zwei Ausschnitte, welche nach 40 Minuten auf dem Fensterteil 3c aufgenommen wurden. Auf den ersten Blick sind die Unterschiede zwischen Glas und Beton erkennbar. Allerdings sind auch Temperaturunterschiede auf den einzelnen Betonflächen (grüne Pfeile) erkennbar, welche nicht durch den Unterschied Glas-Beton erklärbar sind. Auch eine klare Zuordnung der Temperaturunterschiede zur Lage der Bewehrungsstäbe auf diesem Fensterteil (Abbildung 55) ist nicht möglich.

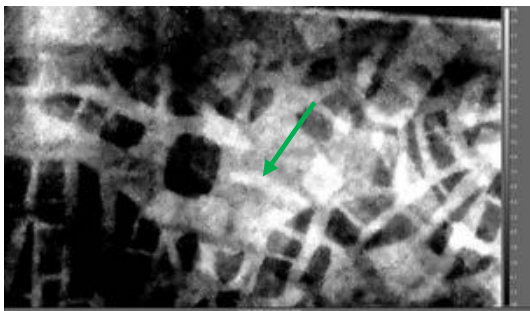


Abbildung 51: Fribourg, Fensterteil 3c, Ausschnitt 1

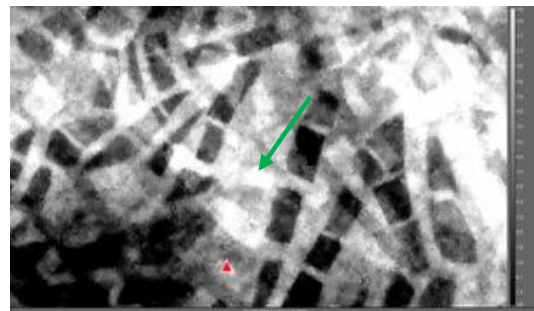


Abbildung 52: Fribourg, Fensterteil 3c, Ausschnitt 2



Abbildung 53: Fribourg, Fensterteil 3c mit markiertem Ausschnitt 1



Abbildung 54: Fribourg, Fensterteil 3c, mit markiertem Ausschnitt 2



Abbildung 55: Fribourg, Fensterteil 3c, Bewehrung gemäss Magnet

Die Abbildung 56 zeigt die berechneten Differenzen zwischen den Zeitpunkten 40 Minuten und 10 Minuten nach dem Ende des Heizvorgangs für das Fensterteil 3a (Abbildung 57). Zwar zeigen sich auch hier Temperaturdifferenzen, welche nicht durch mit bloßem Auge erkennbaren Strukturen erklärbar sind, deren Interpretation bleibt aber schwierig.

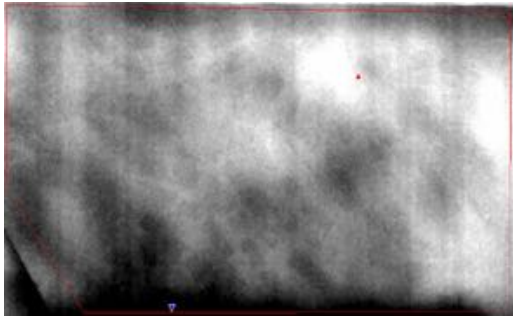


Abbildung 56: Fensterteil 3a, $t=10\text{Minuten}-T=40\text{Minuten}$



Abbildung 57: Fensterteil 3a

In Abbildung 36 wurde bereits die Amplitude der Rückwandreflexion auf la multiplication des pains dargestellt, dort zur indirekten Detektion von Bewehrungsstäben. Im Folgenden wurde diese Darstellung so überarbeitet, dass die Unterschiede der Reflexionsamplituden in höherer Auflösung erscheinen, um eine allfällige Dämpfung im Material besser erkennen zu können. Die Abbildung 58 zeigt zunächst das gesamte Fenster. In Abbildung 59 ist ein Ausschnitt aus diesem Bild dargestellt. Die Abbildung 60 zeigt den entsprechenden Ausschnitt aus einem Foto. Zunächst einmal zeichnen sich in der Rückwandreflexion deutlich die unterschiedlichen Materialien Glas und Beton ab (blaue Pfeile). Allerdings zeigen sich auch weitere Zonen mit reduzierten Reflexionsamplituden, für die sich im Foto keine Erklärung findet (rote Pfeile).

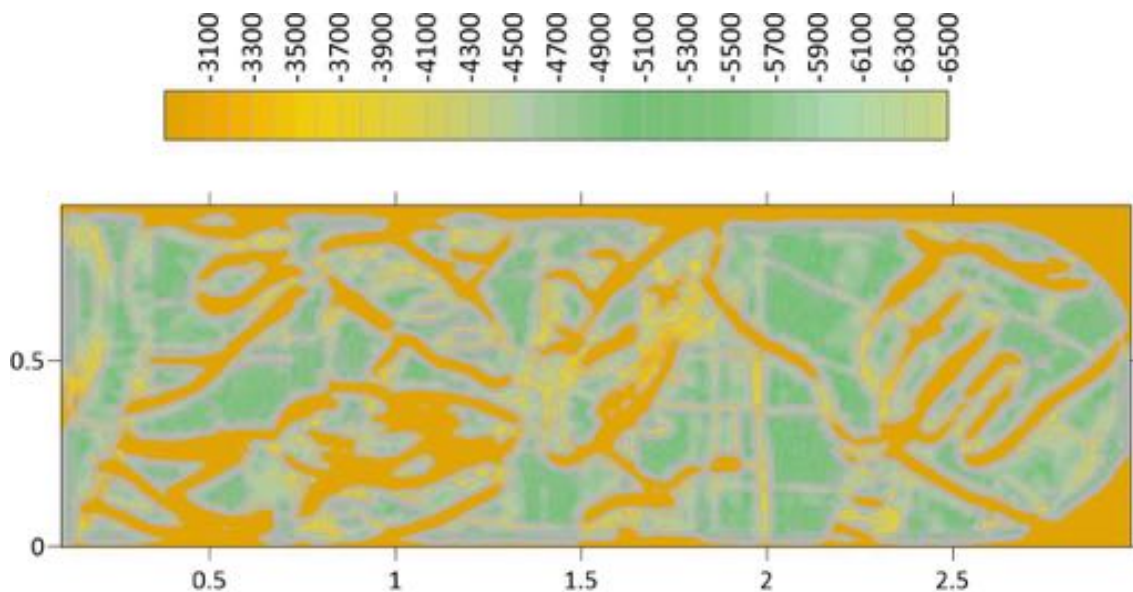


Abbildung 58: La multiplication des pains, Amplitude Rückwandreflexion, hohe Auflösung



Abbildung 59 *La multiplication des pains*, Amplitude Rückwandreflexion, Ausschnitt

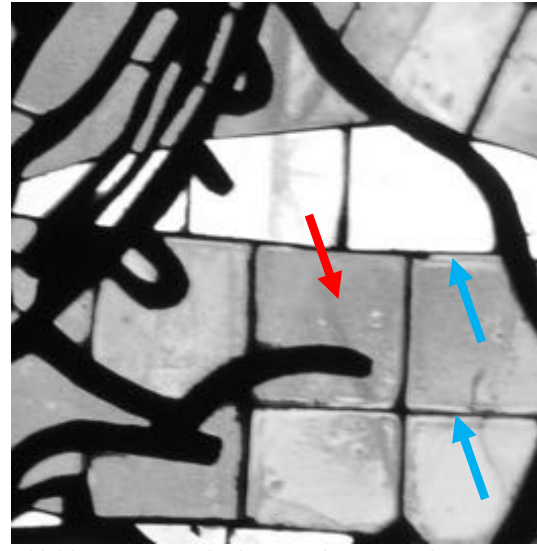


Abbildung 60 *La multiplication des pains*, Photo, Ausschnitt

3. Aufwand / Nutzen Analyse

Mit den beiden im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Untersuchungskampagnen in Fribourg und Courfaivre wurden wertvolle Erfahrungen über Aufwand und Nutzen von zerstörungsfreien Untersuchungsverfahren auf Betonglasfenstern gewonnen. Diese Erfahrungen sollen hier im Sinne einer Empfehlung für künftige Anwender zusammengefasst werden. Wünschenswert wäre es, wenn auch zukünftige Erfahrungen auf weiteren Objekten in diese Empfehlung einfließen könnten.

Im Folgenden werden Aufwand und Nutzen von Untersuchungsverfahren für einzelne Fragestellungen in Bezug gebracht. Der Nutzen besteht in der Fähigkeit eine Frage zu beantworten, der Aufwand beinhaltet den Zeitaufwand für die Durchführung einer Untersuchung, die Gerätekosten und die Notwendigkeit von Spezialisten. Es werden nur Untersuchungsmethoden beurteilt, welche im Rahmen des hier dokumentierten Projektes zum Einsatz kamen.

Existenz und Position von Bewehrungsstäben

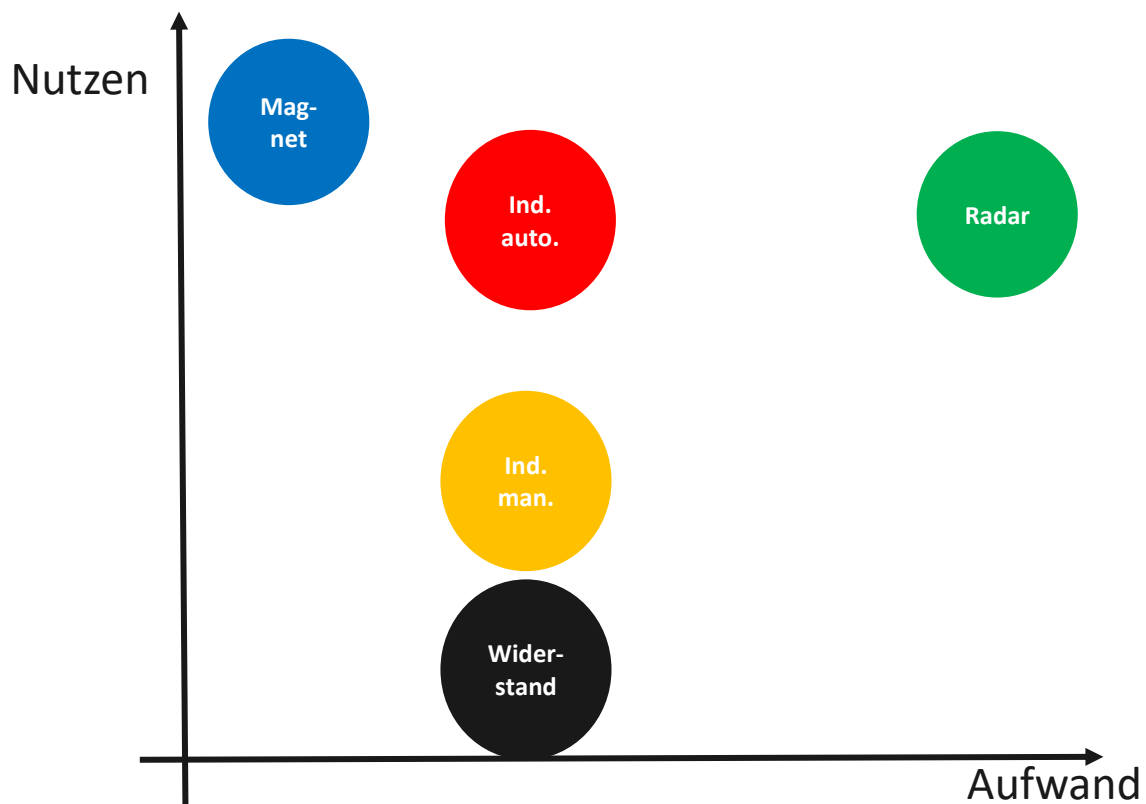


Abbildung 61: Existenz und Position von Bewehrung, Magnet(blau), Induktion mit automatisierter Auswertung (rot), Induktion mit manueller Auswertung (orange), Radar (grün), elektrischer Widerstand (schwarz)

Der Magnet liefert das beste Ergebnis bei minimalem Aufwand. Induktion mit automatisierter Auswertung und Radar liefern ebenfalls ein gutes Ergebnis, jedoch erfordern sie einen grösseren Aufwand. Induktion mit manueller Auswertung ist brauchbar, elektrischer Widerstand liefert kein brauchbares Ergebnis.

Bewehrungsüberdeckung



Abbildung 62: Bewehrungsüberdeckung, Induktion mit automatisierter Auswertung (rot), Induktion mit manueller Auswertung (orange), Radar (grün)

Induktion mit automatisierter Auswertung und Radar liefern ein brauchbares Ergebnis. Induktion mit manueller Auswertung liefert ein Ergebnis. Bei Induktion wäre es sinnvoll in einem Laborexperiment abzuklären, inwieweit das Ergebnis richtungsabhängig ist.

Dicke

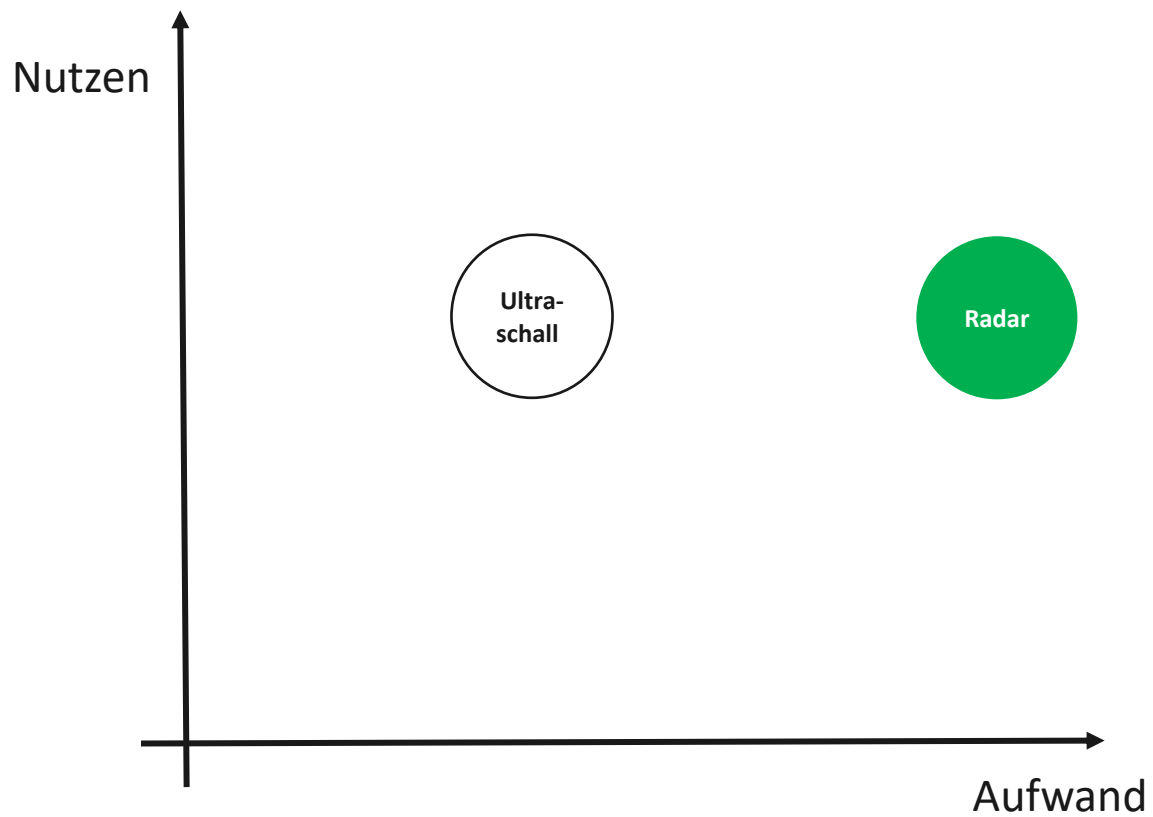


Abbildung 63: Dicke, Ultraschall (weiss) und Radar (grün)

Bei eingebauten Betonverglasungen kommen insbesondere Radar und Ultraschall als Methode in Frage. Für beide Verfahren wäre eine Kalibration der Ausbreitungsgeschwindigkeit wünschenswert.

Korrosion

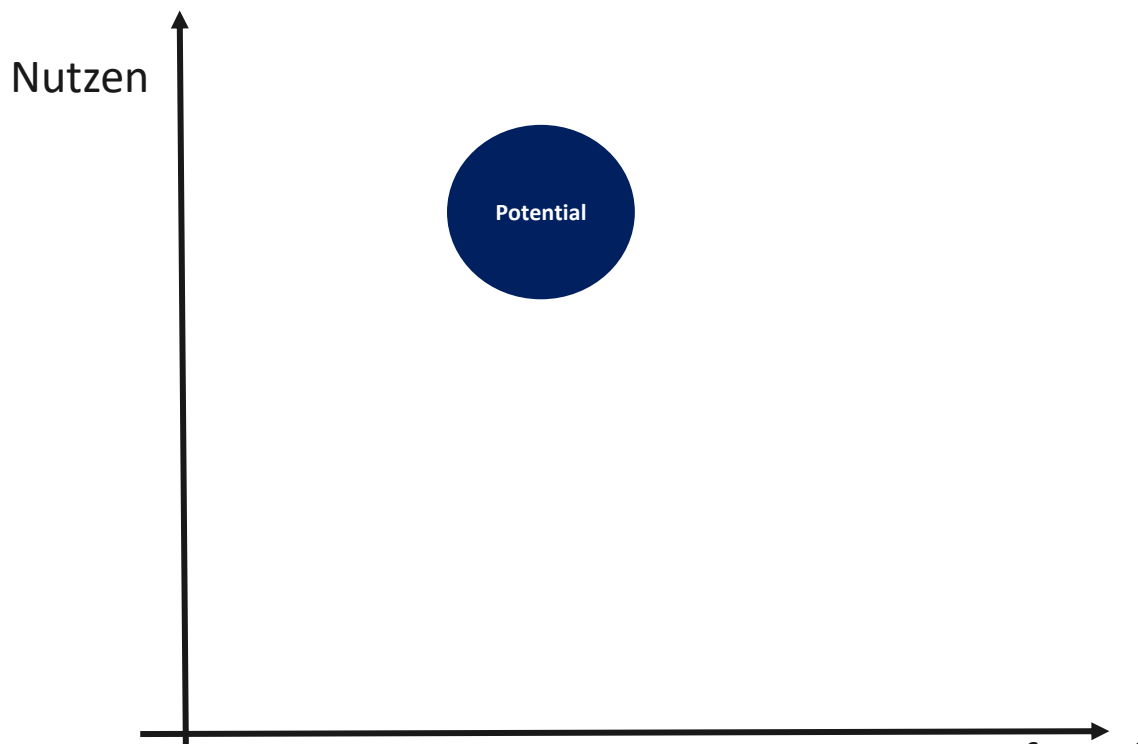


Abbildung 64: Korrosion, Potentialmessung (dunkelblau)

Abgesehen von einer visuellen Inspektion kommt für die Untersuchung der Korrosion lediglich die Potentialmessung in Frage. Da ein Bewehrungsanschluss meist nicht möglich sein wird, können entweder Potentialdifferenzen zwischen zwei Punkten an der Oberfläche gemessen werden, so wie es in Courfaivre gemacht wurde. Alternativ könnten auch Differenzen zwischen einem Punkt an der Oberfläche des Fensters und einer Erdung (Erdspieß, Erdung an einer Steckdose) gemessen werden.

Materialeigenschaften, Risse, Feuchtigkeit, Porosität

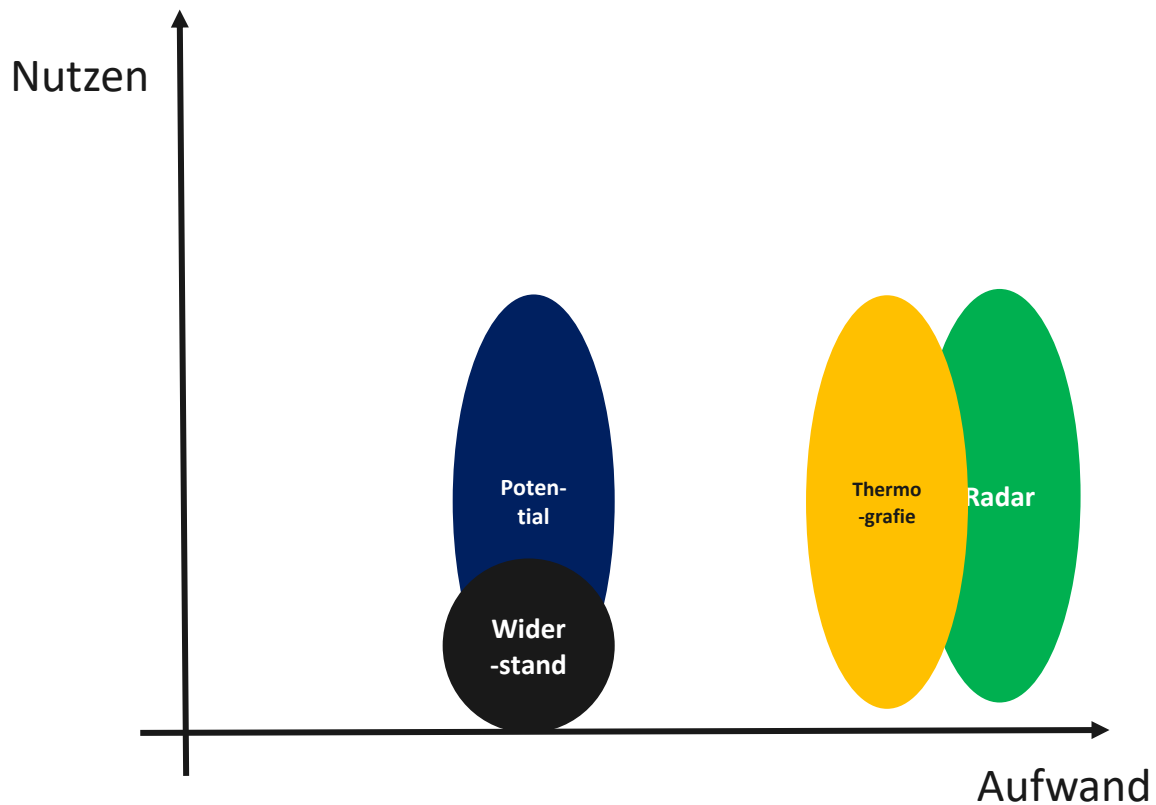


Abbildung 65: Materialeigenschaften: elektrischer Widerstand (schwarz), Potentialmessung (dunkelblau), Thermographie (orange) und Radar (grün)

Hier handelt es sich um ein sehr vielschichtiges Thema. Mit den beiden Pilotversuchen in Fribourg und Courfaivre können nicht alle Fragen abschliessend beantwortet werden. Thermographie, Georadar, Potentialmessung und elektrischer Widerstand können Informationen über Materialeigenschaften liefern. Klare Aussagen können derzeit lediglich über die elektrische Widerstandsmessung gemacht werden, diese hat keine brauchbaren Ergebnisse geliefert.

4. Werkzeugkasten zerstörungsfreie Prüfung

Existenz und Position von Bewehrungsstäben

1. **Priorität - Magnet:** Kann von Laien eingesetzt werden, ist kostengünstig und dürfte auf Grund der beschränkten Dicke von Betonglasfenstern in den meisten Fällen zuverlässig Ergebnisse liefern
2. **Priorität – Induktion mit automatisierter Auswertung:** Benötigt Spezialisten oder eingewiesene Laien, liefert auch bei dickeren Betonglasfenstern Ergebnisse
3. **Priorität – Radar:** Zeitaufwändige Methode mit teuren Geräten, benötigt Spezialisten, liefert Ergebnisse aus grösseren Tiefen als Magnet und Induktion, die Richtungsabhängigkeit des Ergebnisses kann durch Untersuchung in zwei senkrecht zu einander stehenden Richtungen eliminiert werden
4. **Priorität – Induktion manuell:** Benötigt Spezialisten oder eingewiesene Laien, liefert auf Grund der Ausdehnung des Sensors nur beschränkte Genauigkeit

Bewehrungsüberdeckung

1. **Priorität – Induktion mit automatisierter Auswertung:** Benötigt Spezialisten oder eingewiesene Laien
2. **Priorität – Radar:** Zeitaufwändige Methode mit teuren Geräten, benötigt Spezialisten

Dicke

1. **Priorität - Ultraschall:** Einfache Methode, kann auch von Laien eingesetzt werden, die Genauigkeit ist derzeit kaum abschätzbar, liefert punktuelle Ergebnisse, sollte kalibriert werden, liefert ohne Kalibration relative Ergebnisse im Sinne von dickeren oder dünneren Bereichen
1. **Priorität – Radar:** Zeitaufwändige Methode mit teuren Geräten, liefert flächige Ergebnisse, sollte kalibriert werden, liefert ohne Kalibration relative Ergebnisse im Sinne von dickeren oder dünneren Bereichen oder absolute Dicken bei der Verwendung von Erfahrungswerten

Korrosion

1. **Priorität – Potentialmessung:** Benötigt Spezialisten oder erfahrenen Laien, preisgünstige Geräte, einziges anerkanntes Verfahren zur Untersuchung von Korrosion, die Interpretation der Messwerte erfordert Erfahrung

Materialeigenschaften, Risse, Feuchtigkeit, Porosität

1. Priorität – Potential: Benötigt Spezialisten oder erfahrenen Laien, preisgünstige Geräte, die Interpretation der Messwerte erfordert Erfahrung
2. Priorität – Thermografie: Benötigt Spezialisten, teure Geräte, die Interpretation und Verarbeitung der aufgezeichneten Daten erfordert Erfahrung
3. Priorität – Radar: Benötigt Spezialisten, teure Geräte, die Interpretation und Verarbeitung der aufgezeichneten Daten erfordert Erfahrung