

# Thermografie im Bauwesen: Qualitätssicherung stahlfaserverstärkter Betonbauteile

Sascha GETTO\*, Tina WILHELM\*  
\* Fraunhofer IPA Nobelstr. 12 70569 Stuttgart  
sascha.getto@ipa.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Eine neue Richtlinie ermöglicht der deutschen Bauindustrie erstmals den Einsatz von stahlfaserbewehrten Betonbauteilen ohne Zulassungsverfahren. Eine zentrale Herausforderung hierbei stellt die Qualitätssicherung bezüglich der Faserverteilung als sicherheitskritische Maßnahme in einem wirtschaftlichen Rahmen dar.

Die Induktions-Thermografie ermöglicht eine ebensolche Qualitätssicherung. Das Prüfverfahren basiert auf der Erwärmung der Stahlfasern durch induzierte Wirbelströme. Diese Erwärmung kann mit einer Infrarot-Kamera sichtbar gemacht werden. Aufbauend auf dieser Technologie entwickelt das Fraunhofer IPA ein Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung in Betonbauteilen.

Dieser Beitrag geht auf die bisher erreichten Entwicklungsschritte ein. Er beschreibt die Herangehensweise und Anforderungen an eine solche Entwicklung und enthält erste Ergebnisse. Ein Ausblick auf weitere Entwicklungsschritte wird gegeben und im Gesamtkontext vorgestellt.

## 1. Einführung

Die Stahlfaser als statisch anrechenbare Bewehrung in Stahlbeton ist in Deutschland nun erstmals durch eine entsprechende Richtlinie ohne Zulassungsverfahren einsetzbar. Die Möglichkeiten die sich hierdurch für die Bauindustrie ergeben sind immens und versprechen eine gute Wertschöpfung. Es gibt jedoch auch Hindernisse auf dem Weg zu einer erfolgreichen großflächigen Markteinführung dieser Technologie.

Eine der größten Aufgaben besteht in der praktischen Umsetzung dieses neuen Verfahrens, vor allem in Hinblick auf die produktionsbegleitende Qualitätssicherung welche sich als wohl dringendste und aktuellste Fragestellung herausgestellt hat. Die Verteilung der Stahlfasern in jedem Betonbauteil spielt hierbei eine zentrale Rolle da eine ungenügende Homogenität derselben ein Versagen des Bauteils zur Folge haben kann. Eine Prüfmethodik welche eine sichere, wirtschaftliche und auch schnelle Beurteilung hinsichtlich dieser Anforderung ermöglicht ist für die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet essentiell.

Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart wurde daher im Rahmen eines Forschungsprojektes untersucht in wie fern sich die vorgenannten Anforderungen mittels Induktionsthermografie in eine industrielle Anwendung umsetzen lassen.

## 2. Induktionsangeregten LockIn Thermografie

### 2.1 Die aktive Thermografie

Die aktive Thermografie beruht auf der Beobachtung der Entwicklung einer zuvor durch Anregung verursachten oberflächlichen Wärmeenergie eines Prüfkörpers. Zu unterscheiden hierbei sind die unterschiedlichen Arten der Anregung die hierfür zugezogen werden können, sowie deren Auswertung und Ergebnis:

**Tabelle 1.** Aktive Thermografie

	Aktive Thermografie		
<b>Anregungsart</b>	Wärme / Licht	Induktiv / Elektrisch	Ultraschall
<b>Auswertung</b>	Abkühlungsthermografie	Phasenthermografie / LockIn-Thermografie	
<b>Ergebnis</b>	Kontrastbilder	Amplituden- und Phasenbild	

### 2.2 LockIn-Thermografie

Die LockIn-Thermografie wird angewandt, um im Rauschsignal verborgene Signale herauszufiltern bzw. zu verstärken. Voraussetzung für die LockIn-Thermografie ist eine periodisch gepulste oder amplitudenmodulierte Anregung. Die Frequenz der Anregung ist die sogenannte LockIn-Frequenz.

Um die im Rauschen verborgenen Signale herauszufiltern wird zunächst ein Meßsignal  $F(t)$  aufgenommen. Im Falle der LockIn-Thermografie besteht das Meßsignal aus einem Pixel eines aufgenommenen Wärmebildes. Das Meßsignal wird dann anschließend auf zwei Kanälen getrennt weiterverarbeitet. Auf jedem der Kanäle wird das Meßsignal mit einer Gewichtungsfunktion  $K$  multipliziert.

$$S_0 = K_0 * F(t)$$

$$S_{-90} = K_{-90} * F(t)$$

Diese Gewichtungsfunktionen sind ebenfalls periodisch und haben die LockIn-Frequenz. Ferner sind die Gewichtungsfunktionen zueinander um  $90^\circ$  phasenverschoben. Am einfachsten ist dies zu realisieren wenn man als Gewichtungsfunktionen  $K_0 = \sin(t)$  und  $K_{-90} = -\cos(t)$  verwendet. Durch Mittelung der Ergebnisse über mehrere LockIn Perioden werden so automatisch nur die mit der LockIn-Frequenz korrelierenden Signalanteile aus den Ergebnisbildern herausgefiltert und Störgrößen automatisch eliminiert.

Summiert und mittelt man die gewichteten Wärmebilder so ergibt sich das frequenzabhängige Amplitudenbild aus dem Betrag der beiden Kanäle. Die Phasenlage erhält man aus dem Verhältnis der beiden Kanäle [1]. Eine zusammenfassende Übersicht hierüber gibt Abbildung 1.

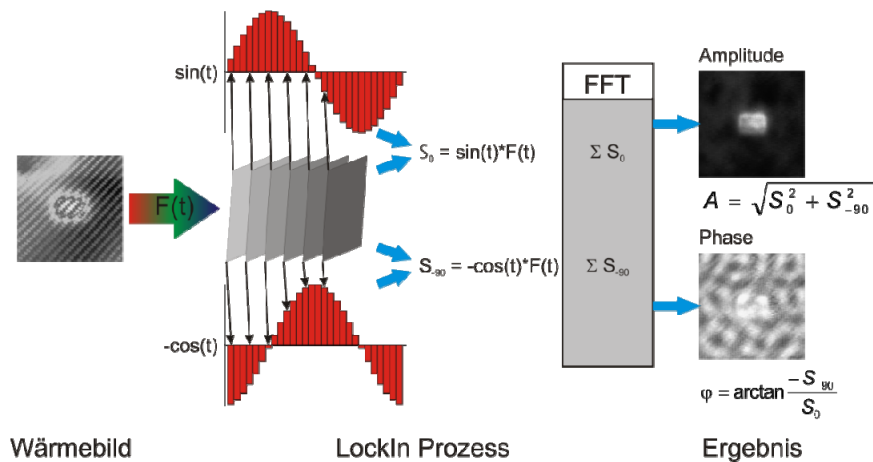


Abbildung 1. Lockin-Prozess

### 2.3 Die Induktions-Thermografie

Eine bereits erwähnte Anregungsart ist die elektro-magnetische Induktion. Hierbei wird an einer Spule ein Wechselfeld erzeugt, welches einen Wirbelstrom im Prüfbjunkt bewirkt (Abbildung 2).

Aus diesem Wirbelstrom resultiert eine lokal, z.B. durch Fehlstellen beeinflusste, variierende Stromdichte. Die hierdurch erzeugte Joulesche Erwärmung kann thermografisch als Temperaturunterschied nachgewiesen werden.

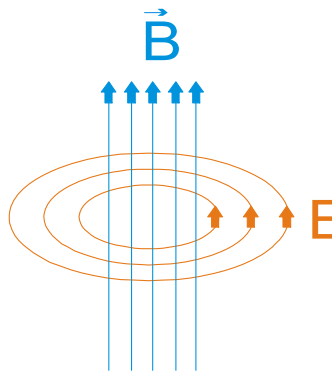


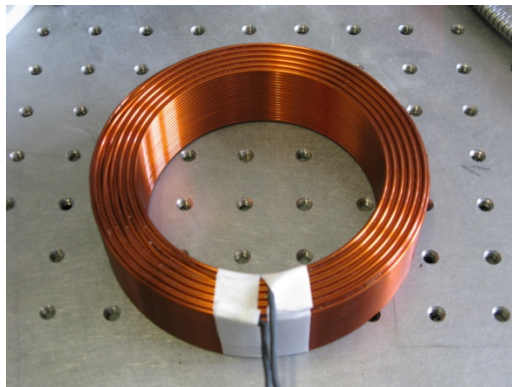
Abbildung 2. Eine Alteration der Flächendichte B des magnetischen Flusses durch eine Fläche erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld E welches einen der Flussänderung entgegenwirkenden Strom induziert.

## 3. Prüfmethdik und Ergebnisse

Ausschlaggebend für die Herangehensweise an die ausgeführten Zielsetzungen ist der Bedarf der Bauindustrie, deren momentaner technischer Stand und die eingesetzten Werkstoffe. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde eine umfangreiche Probensammlung nach Maßgaben der Prüftechnologie entworfen und gefertigt.

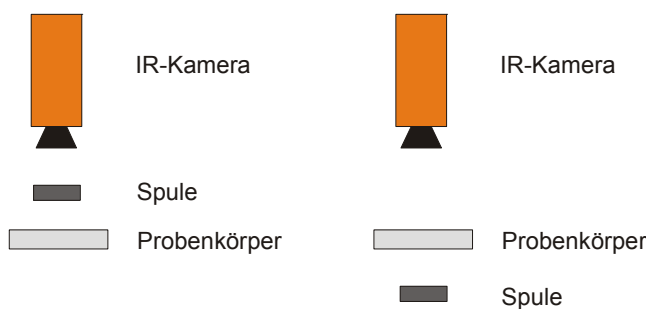
Eine erste Annäherung an die geforderte Prüfaufgabe wurde durch Gitter realisiert, welche in verschiedenen Tiefen in den Beton eingegossen wurden. Die Abmessungen dieser ersten Probenreihe betragen 15 x 15 cm in Breite und Länge, wobei die Höhe von der erwünschten Gittertiefe abhängt. Durch diese Körper sollte eine optimale Spulengeometrie und Tiefenreichweite der Methodik für die vorliegende Materialkombination ermittelt werden. Die eingesetzten Spulengeometrien beinhalten

Flachspulen unterschiedlicher Wicklungszahl, Zylinderspulen unterschiedlicher Wicklungszahl (beispielhaft zu sehen in Abbildung 3), sowie Kegelspulen.

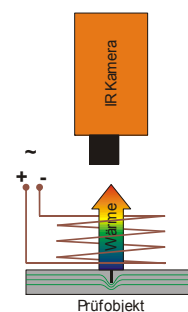


**Abbildung 3.** Beispiel einer eingesetzten Zylinderspule

Die Positionierung der Anregungs-Spule zwischen Infrarot-Kamera und Prüfobjekt oder „hinter“ dem Prüfobjekt in einer Transmissions-Anordnung ist im konkreten Fall Einschränkungen unterworfen. Der beabsichtigte Einsatz der Technologie in der Fertigbetonteilindustrie zwingt dem Aufbau die erste Variante auf, da die vorzufindenden Anlagen in den Fabrikationsstätten über fahrende Tische verfügen, auf welchen die Objekte gefertigt werden. Der Einbau von Spulen in diese Tische würde einen immensen Investitionsaufwand bedeuten und wurde daher verworfen. Es bleibt die in Abbildung 4 links aufgezeigte Positionierung mit der Spule zwischen Kamera und Prüfobjekt. Der Abstand zwischen Prüfobjekt und Spule ist für diese Fragestellung zu minimieren um ein möglichst starkes Magnet-Feld unter Einsatz der vorhandenen Hardware in den Prüfkörper einzubringen. Im konkreten Fall wurde ein maximaler Abstand von 1 mm nicht überschritten. Diese Versuchs-Anordnung (Abbildung 5) wurde nachfolgend auch für alle Untersuchungen angewandt um diesen Rahmenbedingungen Rechnung zu tragen.



**Abbildung 4.** links: Eingesetzte Prüfanordnung; rechts: alternative „Transmissions“-Anordnung



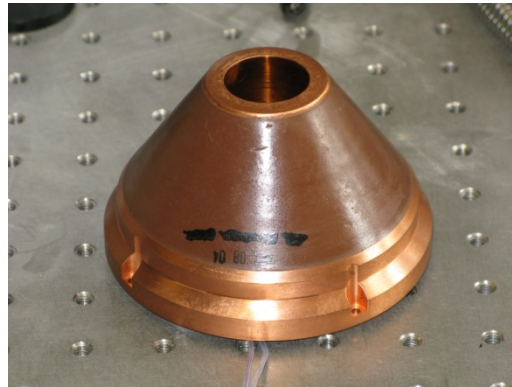
**Abbildung 5.** Induktions-Thermografie

Aufgrund des von den Flachspulen ausgebildeten elektro-magnetischen Feldes ist zwar eine homogene Anregung des Stahles in einem gewählten Messausschnitt möglich, die Tiefenreichweite des Feldes ist jedoch unter Berücksichtigung der gegebenen Grenzen des derzeit am Fraunhofer IPA verfügbaren Generators sowie der eingesetzten Spulengeometrie nur auf oberflächennahe Schichten begrenzt.

Das stärkere Feld einer Zylinderspule mit mehreren Windungen ermöglicht eine Anregung tieferer Schichten. Das stark inhomogene Feld, das dieser Spulengeometrie zu Grunde liegt, erlaubt in den meisten Fällen jedoch nur eine befriedigende Anregung der

Stahlkomponenten im unmittelbaren Umfeld der Wicklung selbst. Hier stört die Spule jedoch die Signaldetektion der Kamera durch Wärmeabstrahlung und das teilweise verdeckte Sichtfeld. Dieses gilt natürlich ebenfalls in gewissem Maße für Flachspulen.

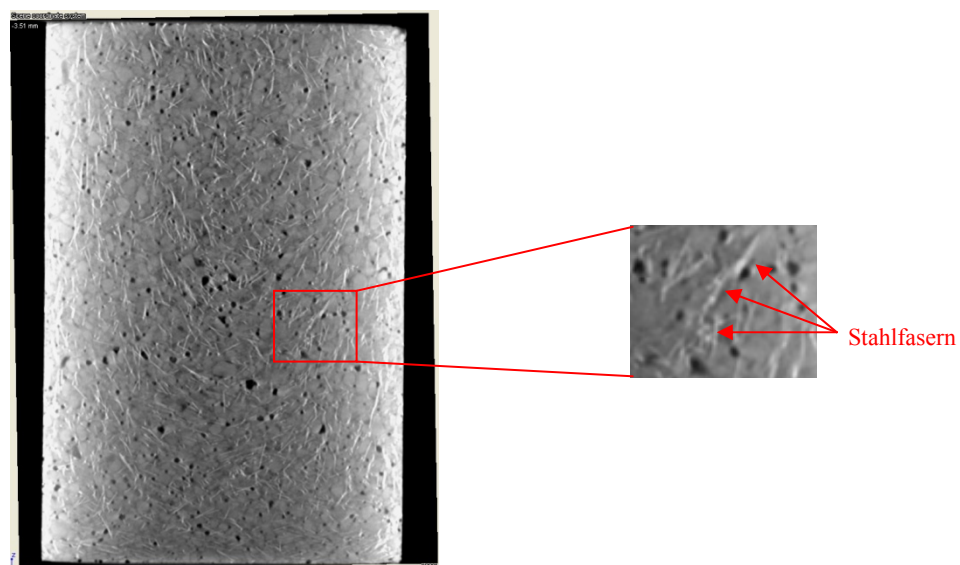
Um ein möglichst breites, homogenes Feld mit einer akzeptablen Tiefenreichweite zu generieren wurde eine alternative Spulengeometrie entworfen und deren Wirkung berechnet. Das Ergebnis dieser Optimierung ist die Kegelform welche auch in Abbildung 6 zu sehen ist.



**Abbildung 6.** Beispiel einer eingesetzten Kegelspule

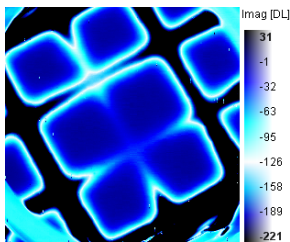
Nach den Untersuchungen an Probekörpern mit Gittern wurde der Schritt hin zu Proben mit stochastisch verteilten Fasern vollzogen. In diesen wurden die real zu erwartenden Volumenprozent von 0,5% bis 2% nachgebildet. Verwendung fanden außerdem unterschiedliche Ausführungen von in der Industrie gebräuchlichen Stahlfasern. Die Abmessungen wurden für diese Probenreihe erhöht und liegen nun bei 15 x 15 x 15 cm.

Um einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Thermografie und der real im Bauteil vorhandenen Faserverteilung herzustellen wurden computertomographische Aufnahmen (Abbildung 7) angefertigt. Das CT-Verfahren ermöglicht hierbei einen virtuellen Schnitt durch multiple Ebenen der Probekörper und gibt Aufschluss über deren innere Beschaffenheit.

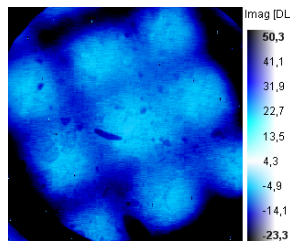


**Abbildung 7.** Beispiel einer CT-Aufnahme eines Probekörpers

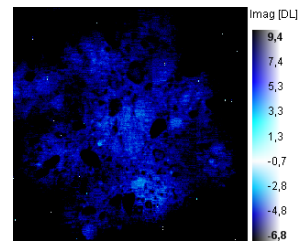
Die durchgeführten unterschiedlichen Messreihen an Proben sowohl mit Gittern, als auch mit eingebetteten Stahlfaser-Volumenanteilen von 0,5% bis 2% in Beton zeigen erste positive Ergebnisse. Eine Faserdetektion ist bei Probekörpern mit Gitter derzeit bis etwa 19 mm Tiefe möglich. Die erzielte Tiefenreichweite des Verfahrens liegt bei Stahlfasern etwas darunter. Als Beispiele können die Abbildungen 8 bis 9 dienen. Die hier verwendete Zylinderspule entstammt einer Frühphase des Projektes und ermöglicht eine geometrische Zuordnung des thermografischen Signals bis circa 9mm.



**Abbildung 8.** Messung Zylinder, oben, Imaginäre-Bild, Gitter 1mm Tiefe



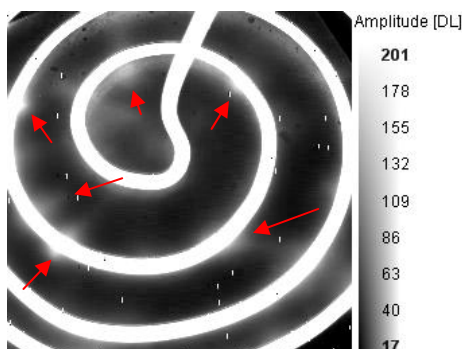
**Abbildung 9.** Messung Zylinder, oben, Imaginäre-Bild, Gitter 6mm Tiefe



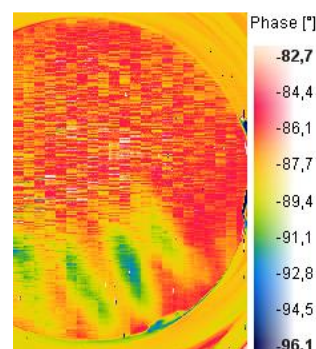
**Abbildung 10.** Messung Zylinder, oben, Imaginäre-Bild, Gitter 9mm Tiefe

Die zu erkennende Gitterstruktur gibt hierbei auch Aufschluss über die geometrische Auflösung bei unterschiedlichen Tiefen. Wie zu erwarten ist eine abnehmende geometrische Auflösung über die Tiefe aufgrund der fortschreitenden Ausbreitung der thermischen Wellen in alle drei Raumrichtungen in Abhängigkeit zur Entfernung zum Anregungsobjekt (in diesem Falle die Stahlfaser / das Stahlgitter) zu beobachten. Auch die relativ geringe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Beton von circa  $2,1 \frac{W}{mK}$  setzt Grenzen bei der erreichbaren Tiefenreichweite in der angestrebten industriellen Anwendung welche Beachtung finden sollte.

Im Bereich der Stahlfaserproben zeigen die Abbildungen 11 und 12 zwei unterschiedliche thermografische Messungen. In Abbildung 11 sind mehrere Fasern zu erkennen. Die eingesetzte Flachspule hat zu Versuchszwecken weit aufgefächerte Windungen, der Nachweis einer Detektierbarkeit kann jedoch grundsätzlich erbracht werden, wenn auch nur oberflächennah. Abbildung 12 unterstreicht die zuvor ausgeführten Vor- und Nachteile einer Anordnung mit Zylinderspule. Es kann ein eindeutigeres Signal detektiert werden, welches jedoch auf die Randbereiche nahe der Spule beschränkt ist. Hier ist jedoch auch ein Nachweis von Fasern in 10mm Tiefe und mehr möglich.



**Abbildung 11.** Amplitudenbild einer mit Flachspule angeregten Stahlfaserprobe; rot markiert die Fasern



**Abbildung 12.** Phasenbild einer mit Zylinderspule angeregten Stahlfaserprobe



#### **4. Ausblick**

Die Aufgabenstellung einer Qualitätssicherung stahlfaserverstärkter Betonbauteile im industriellen Umfeld bedarf Entwicklungen in unterschiedlichsten Bereichen der Ingenieurwissenschaften. In der hier ausgeführten ersten Phase wurde die thermografische Seite betrachtet und die Optimierung der Anregung und Auswertung betrieben. Die Ergebnisse zeigten die Machbarkeit der gestellten Aufgabe. Parallel zu den genannten Entwicklungen wurde ein Systemkonzept erstellt welches der angestrebten industriellen Anwendungs-Umgebung Rechnung trägt. Dieses Konzept dient als Leitlinie für die Prüfanordnung, Prüfparameter sowie Probenentwicklung.

Weitere Schritte sind noch in Hinblick auf die Umsetzung der optimierten Anregung für den industriellen Einsatz zu unternehmen. Die Weiterentwicklung der hierzu benötigten Hardware und der Aufbau eines kompakten Systems stehen hier im Vordergrund. Die realen Umgebungsbedingungen, wie sie im industriellen Umfeld des Fertigbetonbaus vorkommen, müssen zusätzlich mit einbezogen werden. Hierzu zählen unter anderem schwankende Umgebungstemperaturen, Feuchtigkeitsgrade des Betons oder unterschiedliche Betonarten. Der Transfer der bisher erlangten Erkenntnisse auf Proben die diese Eigenschaften nachbilden und auf Realbauteile ist das Ziel dieses Projektes.

Für einen alltäglichen Einsatz in der Industrie ist weiterhin natürlich eine gute Handhabbarkeit von Nöten. Dies wird den Abschluss der Entwicklungen bilden.

#### **5. Referenzen**

[1] Breitenstein, O.; Langenkamp, M., „Lock-in Thermography.“ Springer Verlag, Heidelberg, (2003)