

Verfahren zur Rissanalyse bei Betonbauteilen

J. Lange, W. Benning
Geodätisches Institut, RWTH, Aachen

1. Einleitung

Risse in Betonbauteilen werden als unästhetisch empfunden. Sie können einerseits ein Indiz des Versagens sein, andererseits wird Stahlbeton erst durch Risse wirtschaftlich. Das Wissen über Risse befähigt den Ingenieur Bauteile zu bemessen und Gefahren abzuschätzen. Zur Rissanalyse wurden Messverfahren basierend auf unterschiedlichen physikalischen Messgrößen entwickelt. Der vorliegende Beitrag bietet dazu einen Überblick.

2. Risse

Risse in Betonbauteilen können ab einer Rissbreite von ca. 0,003 mm - 0,005 mm vom menschlichen Auge erkannt werden. Die DIN 1045-1 [DIN] schreibt für Normalbeton eine maximale Rissbreite von 0,3 mm vor. Die Begrenzung der Rissbreite wird durch eine Mindestbewehrung und durch die Auswahl eines geeigneten Durchmessers und Abstands der Bewehrung erreicht.

Treten größere Risse in Bauteilen und Gebäuden auf, besteht nicht zwangsläufig eine Versagensgefahr. Doch können indirekte Folgen, wie z.B. Wasserdurchlässigkeit und Korrosionsgefahr, eine Sanierung z.B. durch Rissverpressung notwendig machen.

Für eine Untersuchung der Statik ist neben der absoluten Rissbreite auch ihre zeitliche Veränderung und die Entwicklung des Rissbilds von Bedeutung.

Die Beobachtung der Risse gestaltet sich aus folgenden Gründen komplex:

- Nach Irwin [Irw58] werden 3 Rissöffnungsarten unterschieden (Bild 1a). In einer Momentaufnahme ist meist nur die Rissbreite (Fall I) bestimmbar, die Aufteilung der Komponenten in Rissbreite (Fall I) und Rissuferverschiebungen (Fall II und III) lässt sich erst durch die Betrachtung zweier Lastzustände ermitteln. Viele Messverfahren (z.B. Wegaufnehmer, Dehnungsmessstreifen) können nur eine oder zwei Komponenten ermitteln.
- Die Form der Risskante (Bild 1b) hängt vom Material und der Belastung ab und kann z.B. durch Bewitterung abgerundet werden. Eine exakte Festlegung ist für optische Verfahren (Risslupe, Bildverarbeitung) wesentlich.
- Die Messpositionen befinden sich bei vielen Verfahren nicht exakt auf dem Rissufer (Bild 1c), so dass im Messwert neben der Rissbreite, die Betondehnung zwischen Rissufer und den Messpositionen enthalten ist.

- Auf ein Betonbauteil wirken zeitabhängige Einflüsse wie z.B. Kriechen und Schwinden, die das Ergebnis einer zeitintensiven Messung beeinflussen können.



Bild 1: von links nach rechts:
a) Rissöffnungsarten nach Irwin [Irw58]
b) Risskanten
c) Messmarken neben einem Riss

3. Rissinformation

Die Messverfahren zur Rissanalyse können anhand der räumlichen und zeitlichen Ausprägung des Messbereichs klassifiziert werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Messbereiche

		Messwert	Messbereich
Räumlicher Messbereich			
global		Rissverlauf, Verteilung der Risse über das gesamte Rissbild	[cm] - [m]
lokal		Rissbreite, Rissuferverschiebung parallel und senkrecht zum Rissverlauf, Risstiefe	[μ m] - [cm]
Zeitlicher Messbereich			
Einzelmessung		Rissbild, Rissbreite	[-]
Differenzmessung	kurz	Rissentwicklung	> [μ s]
	lang	Rissbildentstehung, Rissverteilung	> [μ s]

Die Festlegung des Messbereichs hängt von der Fragestellung, dem Bauteil und dem Messverfahren ab. **Räumlich** kann sich ein Rissbild über das gesamte Bauteil erstrecken und Rissbreiten sind von unsichtbar (Mikrorisse, Haarrisse) bis hin zur vollständigen Trennung der Bauteile verteilt.

Zeitlich sind einerseits sehr kurze Entwicklungen zu beobachten. Z.B. ist die Entwicklung eines Trennrisses in den meisten Fällen nur mit einer Highspeedkamera zu verfolgen. Die Rissausbreitungsgeschwindigkeit für einen Trennriss z.B. bei einem Zugversuch wird nach oben begrenzt durch die Rayleigh - Wellengeschwindigkeit, die bei Beton bei ca. $(1.5 - 4.0) \times 10^3$ m/s liegt [HER90]. Andererseits lässt sich die Rissentwicklung z.B. bei Biegerissen in Richtung Druckzone durch die Belastung und somit zeitlich beliebig steuern. Evtl. wird ein abgeschlossenes Rissbild während der Lebenszeit des Bauwerks nicht erreicht.

4. Mess- und Prüfverfahren

Messbereich, Messgenauigkeit und die Anwendbarkeit (räumlich, zeitlich und wirtschaftlich) bestimmen die Wahl eines geeigneten Rissmessverfahrens. Laborbe-

dingungen erfordern andere Verfahren als Messungen in situ. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Mess- und Prüfverfahren für Betonrisse. Die darauf folgende Tabelle 3 ordnet den Verfahren räumliche Genauigkeiten, Messbereiche und Messwerte zu. Im Folgenden werden diese Verfahren weiter beschrieben.

Tabelle 2: Mess- und Prüfverfahren

		Zeitlicher Messbereich	
		Einzelmessung (E)	Differenzmessung (D)
Räumlicher Messbereich	lokal	Risslupe Rissbreitenmesser	Gipsmarken Rissmonitor Setz-Dehnungsmesser Dehnungsmessstreifen Wegaufnehmer
	global 2D	Bildverarbeitung	Photogrammetrie Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)
	global 3D	Ultraschallmessverfahren, Schallemissionsanalyse	Tomografische Verfahren (Röntgen)

**Tabelle 3: Räumliche Genauigkeiten, Messwerte und Messbereiche
(E = Einzelmessung, D = Differenzmessung)**

Messgerät bzw. Verfahren	Genauigkeit (Standardabweichung)	Messwert	Messbereich	
visuelle Prüfung Menschliches Auge	-	Rissexistenz	> 0,003 mm - 0,005 mm	E
Rissbreitenmesser	0,04 mm	Rissbreite	0,05 mm - > 5 mm	E
Risslupe	0,002 mm	Rissbreite	0,05 mm - > 15 mm	E
Setz-Dehnungsmesser	0,001 mm	Dehnung, Rissexistenz	-	D
Gipsmarken	0,005 mm - 0,02 mm je nach Belastungsrichtung	Existenz der Rissveränderung	punktuell	D
Rissmonitor	0,1 mm - 1,0 mm	Rissveränderung	punktuell	D
Dehnungsmessstreifen	0,1 % - 1 % der Dehnungsänderung	Dehnung	0,6 mm - 150 mm	D
Wegaufnehmer	0,1 % des Skalen- endwerts	Dehnung	0,5 mm - 100 mm	D
Bildverarbeitung und optische Verfahren	> 0,1 mm	Rissbild (Rissbreite)	50 cm x 50 cm	E
Digitale Photogrammetrie	0,002 mm -	Rissbild,	10 cm x 10 cm	D

	0,005 mm	Rissverschiebung	- 1 m x 1 m	
Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)	bis zu 0,01 μm (theoretisch)	Dehnung	60 cm x 45 cm	D
Ultraschallmessverfahren	1 mm	Rissbild	beliebig	E
Computertomographie (Röntgenstrahlung)	0,1 mm	Rissbild, Einzelriss	\varnothing Probe 1 cm - 50 cm	E
Schallemissionsanalyse	1 mm - > 100 mm	Versagensort, -art	5 cm - > 1 m	E

Visuelle Prüfung (menschliches Auge)

Mit einer **visuellen Prüfung** durch das **menschliche Auge** kann sowohl global das Rissbild überblickt, als auch lokal die Existenz eines Risses erkannt werden. Die theoretische Auflösung des Auges beträgt durch die Größe der Zäpfchen von 2-3 μm und der Brennweite von ca. 17 mm ca. $1/120^\circ$ bzw. 30". Damit kann rechnerisch eine Rissbreite aus 100 mm Entfernung von ca. 15 μm aufgelöst werden. Die wirkliche geometrische Auflösung liegt jedoch deutlich höher (3 - 5 μm), da das Auge zusätzlich ca. 20 Graustufen und 7 Millionen Farben unterscheidet und das stereoskopische Auflösungsvermögen höher liegt.

Manuell optische, lokal begrenzte Messverfahren

Der **Rissbreitenmesser** (Bild 2) ist ein Vergleichsmaßstab zur visuellen Prüfung.

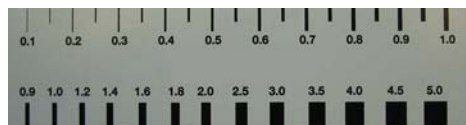


Bild 2: Rissbreitenmesser

Für eine höhere Genauigkeit wird die **Risslupe** (Bild 3a) verwendet, mit der sich lokal Rissbreiten durch Vergrößerung und Vergleich mit einer Skala (Bild 3b) bestimmen lassen.

Der **Setz-Dehnungsmesser** (Bild 3c) ermittelt durch mechanisches Abgreifen von Metallmarken vorgegebene Streckenlängen. Entsteht zwischen zwei Marken ein Riss wird ein Dehnungssprung ermittelt.

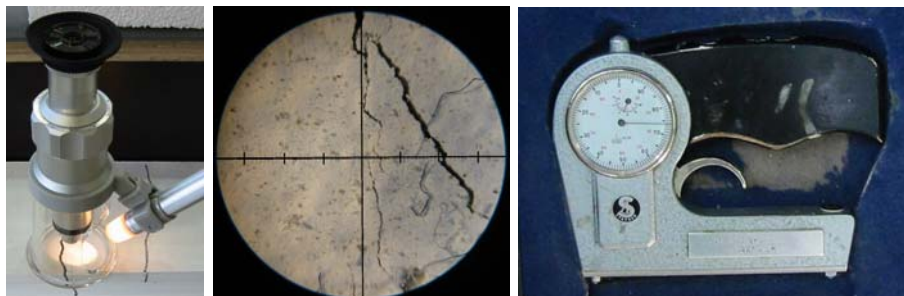


Bild 3:
a) Risslupe
b) Rissbild in der Risslupe
c) Setz-Dehnungsmesser

Gipsmarken werden auf Risse gesetzt, deren Verhalten beobachtet werden soll. Da Gips ein sprödes Material ist, reißt die Marke bei kleinen Bewegungen ab. Es lässt sich also nur feststellen, dass ein Riss sich verändert. Für die qualitative Messung werden **Rissmonitore** eingesetzt, die über einen Riss geklebt anhand zweier Maßstabkunststoffscheiben die Verschiebung parallel und senkrecht zum Riss anzeigen.

Elektronische, lokal begrenzte Messverfahren

Dehnungsmessstreifen (DMS) (Bild 4a) sind auf Folien aufgebrachte Metallbeschichtungen, die auf den Versuchskörper geklebt werden [Keil05]. Der elektrische Widerstand ist proportional zur Dehnung und wird elektronisch erfasst. Der DMS ist für kleine Dehnungen geeignet und kann entsprechende Risse überbrücken. Bei einer größeren Rissbreite besteht die Gefahr des Versagens (Durchreißen).

Wegaufnehmer (Bild 4b) messen die Differenzverschiebung mittels Induktion zwischen zwei Punkten, auf denen Widerlager aufgebracht worden sind.

Sowohl DMS als auch Wegaufnehmer messen die Dehnung einer vorgegebene Streckenlänge, die sich aus Rissbreiten und der Betondehnung zusammensetzt.



Bild 4: a) Dehnungsmessstreifen DMS
b) Wegaufnehmer (induktiv)

Globale 2D Messverfahren - Einzelmessung

Die Auswertung hochauflösender digitaler Fotos mittels **Bildverarbeitungs-Methoden** ermöglicht die Ermittlung eines Rissbilds zum Aufnahmezeitpunkt. Das Bild wird hierzu zuerst vorverarbeitet (Entzerren, Kontrast erhöhen, Kantenextraktion, Thinningverfahren). Danach werden Rissstrukturen mit unterschiedlichen Verfolgungsverfahren detektiert. Dare und Niemann verwenden hierzu den Fly-Fisher- (Bild 5) oder den Route-Finder-Algorithmus [Dare02, Nie03]. Durch ein Labelingverfahren erkennt Ito zusammenhängende Rissbereiche [Ito02]. Aus diesem erkannten Rissverlauf werden der Risswinkel und durch Betrachtung der Grauwertverteilung eines senkrechten Querschnitts die Rissbreite ermittelt.

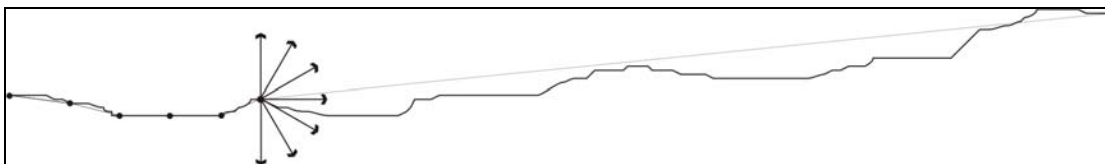


Bild 5: Fly-Fisher-Algorithmus (Abschnittsweise Rissverfolgung durch radiale Suche nach dem geringsten Gradienten) [Dare02, Nie03]

Globale 2D Messverfahren - Deformationsmessung

Das Verfahren der **Photogrammetrie** wertet digitale Aufnahmen zweier oder mehrerer Kameras (Bild 6 links) einer markierten Oberfläche eines Bauteils aus und liefert dreidimensionale Koordinaten. Durch eine Deformationsanalyse, d.h. die Untersuchung der Differenz zweier Laststufen, wird ein Rissbild ermittelt. Riss-

breiten und Rissuferverschiebungen lassen sich durch die Differenz der Verschiebungen von beiden Rissseiten ermitteln (Bild 6 rechts) [Ben04, Lan].

Die Markierung des Bauteils besteht aus Messmarken, deren Koordinaten in jedem Bild bestimmt werden, oder aus einem Zufalls- Specklemuster, das mittels Least-Square-Matching-Verfahren [För82] oder Korrelation verfolgt wird. Die Orientierung der Kameras wird in einer Kalibrierung mittels Bündelausgleichung ermittelt und die Koordinaten der Messung durch Vorwärtseinschneiden bestimmt.

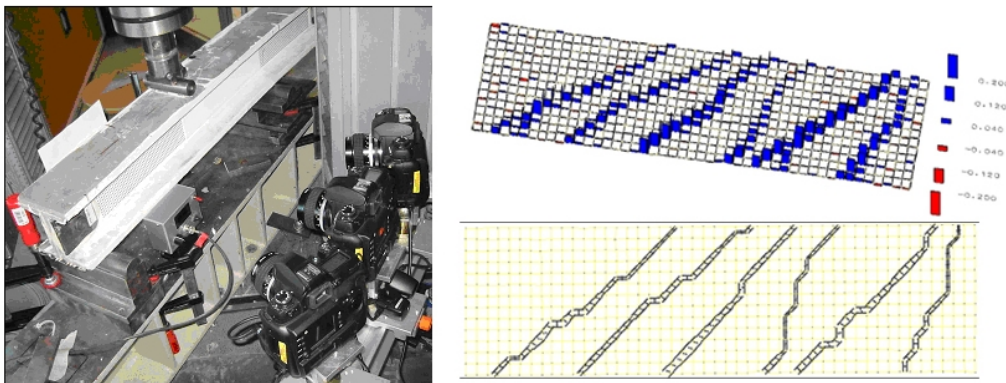


Bild 6: Photogrammetrie: Versuchsaufbau (links), Verschiebungsbild und Rissbild (rechts)

Das Verfahren **Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)** dient zur Messung sehr kleiner Deformationen [Heg03]. Es eignet sich zur Beobachtung der Rissentstehung. Kohärentes (einwelliges) Licht wird auf der rauen Betonoberfläche reflektiert und es entsteht ein Speckle-Muster. Durch Addition zweier Messbilder unterschiedlicher Belastung entsteht ein Interferenzbild (Bild 7b), aus dessen Welligkeit Verschiebungen interpretiert werden (Bild 7c).

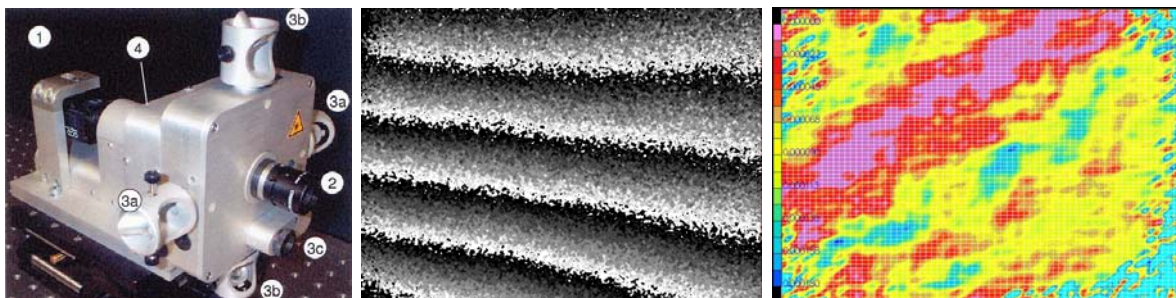


Bild 7: ESPI: (von links nach rechts)
a) Messkopf (1 CCD- Videokamera, 2 Objektiv, 3 Laserablenkeinheiten In-plane (a, b), Out-of-plane (c), 4 Empfangseinheit)
b) Interferenzbild des kohärenten Lichts
c) Auswertung der Deformationen

Globale 3D Messverfahren – Einzelmessung

Ultraschallmessverfahren (Sonographie) [Schi99] verwenden den Schall zur Riss- und Fehlstellenermittlung. Schallwellen werden im Material besonders an Trennschichten (z.B. Veränderungen der Bauteildichte, aber auch Rissen, Fugen, Ablösungen) stark reflektiert und gestreut. Die verwendeten Frequenzen liegen bei

20 kHz - 500 kHz. Die Interpretation der reflektierten Wellen lässt weitere Rückschlüsse auf die Trennschicht zu.

Unterschieden werden **Ultraschalltransmission**, bei der Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten des Bauteils liegen und **Ultraschall-Echo**, bei dem die reflektierten Wellen gemessen werden.

Das **Impact-Echo**-Verfahren misst Reflektionen aus einer Anregung durch einen mechanischen Stoß. Das Frequenzspektrum erweitert sich daher auf den hörbaren Schall (> 20 Hz). [Schi99]

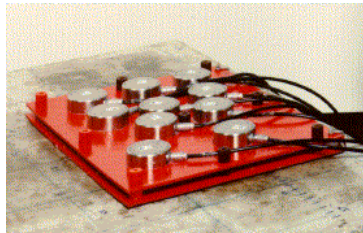
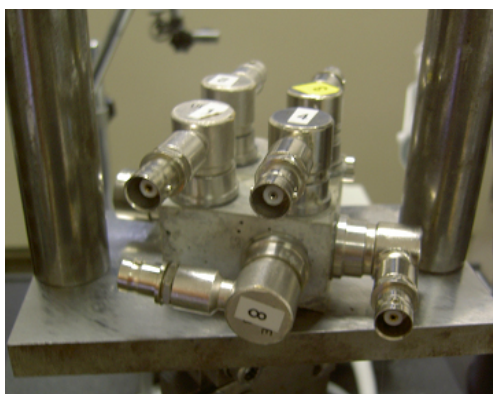


Bild 8: Ultraschall-Echo (Quelle: [Schi99])

Die **Computertomographie** ist aufgrund der medizinische Anwendung ein bekanntes Messverfahren. Das Material wird z.B. mit Röntgenstrahlen durchleuchtet und eine Dichteverteilung abgebildet. Durch Drehung des Bauteils, bzw. der Messeinrichtung wird aus Schnitten (Tomographie) über eine Radontransformation ein dreidimensionaler Aufbau ermittelt. An der Technischen Universität Dresden konnten Maas et al. [Maas05] einen Riss eines Pullout-Versuchs in einem Betonzylinder mit dem Durchmesser von 3 cm darstellen.

Indirekte Verfahren

Bei der **Schallemissionsanalyse (SEA)** (Bild 9) werden akustische Signale von Versagens- und Ablösevorgängen im Bauteil durch Sensoren aufgenommen. Sind die Positionen der Sensoren und die Schallgeschwindigkeit im Material bekannt, wird aus den gemessenen Laufzeiten der Ort der Schallquelle lokalisiert. Das Frequenzspektrum gibt durch eine Frequenzanalyse (z.B. Fourier- oder Wavelet-Analyse) Aufschluss über die Art des Versagens [Köp].



$$t_i = t + \frac{1}{c} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

- i Nummer des Sensors
- t aktuelle Zeit
- t_i Laufzeit Quelle zum Sensor i
- x_i, y_i, z_i Position des Sensor i
- x, y, z Position der Quelle
- c Schallgeschwindigkeit im Material

Bild 9: a) Schallemissionsanalyse (SEA) bei einem Pulloutversuch (Institut für Bauforschung Aachen)
b) Bestimmung der Koordinaten

Weitere Verfahren

Weitere Messverfahren zur Risserkennung bzw. -analyse basieren z.B. auf der Kapillarwirkung des Risses, dem Eindringen von radioaktiven Material oder auch der Thermografie. Zusätzlich kann eine Kombination von Messtechniken untereinander oder die Kombination von Messtechniken mit analytischen und numerischen Berechnungen die Ergebnisse entscheidend verbessern. Kap. 5 zeigt dies am Beispiel des SFB 532.

Weitere Messverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen im Allgemeinen finden sich bei [Schi99].

5. Anwendung im SFB 532 und Dank

Im Sonderforschungsbereich 532 "Textilbewehrter Beton" an der RWTH Aachen [SFB532] werden eine Reihe der vorgestellten Messtechniken nebeneinander verwendet. Neben Standardwerkzeugen wie Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen werden z.B. das Verfahren der Photogrammetrie zur externen Rissanalyse, das ESPI-Verfahren zur Dehnungsanalyse und die Schallemissionsanalyse für die Erforschung der inneren Vorgänge verwendet. Zusätzlich werden numerische Ansätze auf Basis der Erkenntnisse aus der Versuchstechnik entwickelt [Mom06]. Erst durch die Kombination unterschiedlicher Verfahren lassen sich Aussagen über das Riss- und Verbundverhalten des Textils und der Betonmatrix machen.

Der Sonderforschungsbereich 532 "Textilbewehrter Beton", sowie das Teilprojekt "Photogrammetrische Deformationsmessung" werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert.

6. Literatur

Alle angegebenen Internetadressen wurden im Dezember 2005 kontrolliert.

- [SFB532] Sonderforschungsbereich 532 "Textilbewehrter Beton" an der RWTH Aachen, <http://sfb532.rwth-aachen.de>
- [Schi99] Schickert, G., Henschen, J., Krause, M., Maierhofer, Ch., Weise, F., Wiggenshauser, H. und K. Borchardt: ZfPBau- Kompendium, Veröffentlichung im Internet, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin (1999), <http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm>
- [DIN] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Beuth Verlag, Juli 2001.
- [HER90] Hermann, H.J.: Statistical Models for the fracture of disordered media, editors: Roux S., Hermann H.J., Elsevier Science Publishers B.V. (North- Holland) 1990.
- [Irw58] Irwin, G.R.: Fracture, in: Flügge, S. (Hrsg.) Handbuch der Physik, Bd VI: Elastizität und Plastizität. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1958.
- [Mom06] Mombartz, M.; Chudoba, R.; Peiffer F.; Hegger, J.: Simulation of textile reinforced concrete with 2D Discrete crack and discrete crack bridges representation; Euro-C 2006 (Computational Modelling of Concrete Structures) Wien 2006.
- [Keil05] Keil, S.: Fast 70 Jahre alt und noch immer quicklebendig. Entstehung und Entwicklung des Dehnungsmessstreifens, Gesa-Symposium 2005 Strukturanalyse, VDI-Berichte 1899, Saarbrücken 2005.

- [Nie03] Niemeier, W.; Riedel, B.; Fraser, C.; Neuß, H.: Bestimmung von Rissbreiten an Betonbrücken aus digitalen Bildern, Gesa-Symposium 2003, VDI- Berichte 1757, Braunschweig 2003.
- [Dare02] Dare, P.; Hanley, H.; Fraser, C.; Riedel, B.; Niemeier W.: An operational application of automatic feature extraction: the measurement of cracks in concrete structures; Photogrammetric Record Volume 17 Issue 99 Page 453 - April 2002.
- [Ito02] Ito, A.; Aoki, Y.; Hashimoto, S.: Accurate Extraction and Measurement of Fine Cracks from concrete Block Surface Image, IEEE 2002.
- [Ben04] Benning, W.; Lange, J.; Schwermann, R.; Effkemann, C.; Görtz, S. (2004): Monitoring Crack Origin and Evolution at Concrete Elements using Photogrammetry. XXth congress of ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 12.-23. July 2004, Istanbul, ISPRS proceedings XXXV Part B, pp. 678-683, ed.: M. Orhan Altan, Istanbul.
- [För82] Förstner, W.: Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder. 40. Photogrammetrische Woche, Stuttgart, 1982.
- [Lan] Lange, J.: Zur Messung und Analyse des Rissverhaltens bei Betonbauteilen mittels Photogrammetrie, Dissertation am Geodätischen Institut, RWTH Aachen, in Vorbereitung.
- [Heg03] Hegger, J.; Görtz, S.; Niewels, J.: Anwendung der Laser-Interferometrie (ESPI) bei der Deformationsanalyse von Stahlbetontragwerken. GESA Symposium 2003, Braunschweig, 12.-13. Juni 2003, VDI-Berichte 1757, VDI Verlag, 2003.
- [Maas05] Maas, H-G.: TU Dresden, SFB528, TP D3, Zerstörungsfreie bildgebende Verfahren (Computertomographie) und voxelbasierte Bildanalyse zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Proben textilbewehrter Bauwerke, http://www.tu-dresden.de/ipf/photo/forschung/SFB_D3.htm
- [Köp02] Köppel, S.: Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken, Dissertation an der ETH- Zürich 2002, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/eth14490.pdf>