TECHNISCHE UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN
Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl Hochspannungstechnik und EMV

Untersuchungsbericht

Name und Anschrift des Prüflaboratoriums	Technische Universität Kaiserslautern AG Hochspannungstechnik und EMV Postfach 3049 D-67653 Kaiserslautern
Prüfort	Hochspannungshalle der TU Kaiserslautern
Laufende Nummer	801/SSCHT/8585620
Name und Anschrift des Auftraggebers	Selfsan Consult GmbH Hellerwaldstr. 8 56154 Boppard
Prüfdatum	12. August 2008
Prüfspezifikation	Überprüfung von Korrosionssensoren
Prüfer	Dr.-Ing. B Gutheil, Dipl.-Ing. J. Stolz

Aufgabenstellung:

Experimentelle Untersuchung von „Baustahl-Korrosionssensoren“ bzgl. ihres Störverhaltens bei Blitzeinschlägen

Vorbemerkungen:

Die Korrosionssensoren der Fa. Selfsan Consult sind elektronische Geräte zur Überwachung des Fortschritts schädlicher Beeinflussungen von Stahlbetonbauwerken durch Umwelt- und Witterungseinflüsse. Die Sensoren werden zu diesem Zweck mit in die Stahlbetonkonstruktion eingegossen und liegen zwischen der Stahlarmierung und der den Umwelteinflüssen ausgesetzten äußeren Betonfläche, wenige Zentimeter mit Beton bedeckt. In dem Maße, wie das gesamte Bauwerk von Blitzentladungen bei Gewittersituationen betroffen ist, werden auch die Sensoren einer elektromagnetischen Beeinflussung durch die Gewitteraktivität ausgesetzt und sollten demgegenüber eine ausreichende Störfestigkeit aufweisen.

Beschreibung der Prüflinge:

Bei den Korrosionssensoren handelt es sich um konventionelle, passive RFID-Tags oder aktive, mit einem Sendesystem im ISM Band (868 MHz), bei denen der die Sende-/Empfangsantenne durch einen korrosionsanfälligen Draht ersetzt wurde und eine Rahmenantenne mit einem Durchmesser von ca. 7 cm bildet. Der Tag selbst, bzw. die aktive Elektronik, ist in ein rundes, geschlossenes Kunststoffgehäuse eingebracht, der Korrosionsdraht umringt das Gehäuse.
Für die Prüfung wurden zwei Prüfmuster entsprechend Bild 1 erstellt:

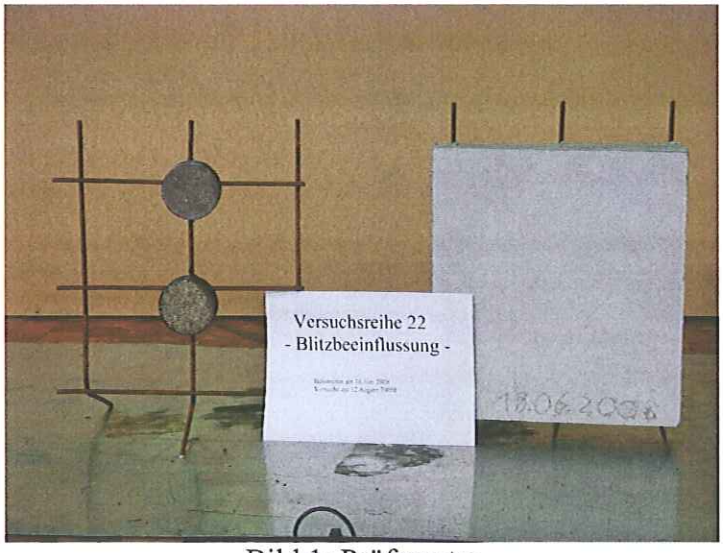

Bild 1: Prüfmuster

1. Ein Ausschnitt einer Baustahlmatte mit einem passiven und einem aktiven Sensor ohne Betonverguss, im Bild links.
2. Ein gemäß dem späteren Einsatz vergossener passiver Korrosionssensor, im Bild rechts.

Festlegung der Prüfspezifikation:

In Ermangelung normativer Vorgaben für den zu untersuchenden Fall werden durch eine Analyse der möglichen Störszenarien Prüfaufbauten und Prüfpegel festgelegt.

Es ist zu unterscheiden zwischen

a) einem sensornahen Blitzeinschlag in die Konstruktion mit Ableitung des Blitzstromes über die Baustahlarmierung und
b) einem direkten Blitzeinschlag auf den Beton direkt oberhalb des eingegossenen Sensors.

Zu a): Von größerer Relevanz für die Beeinflussung der Sensoren sind Blitzeinschläge an sensorferner Stelle in die Gebäudestruktur. Diese führen in der Folge zu einer Ableitung der Blitzströme über metallische Teile, insbesondere die Armierung. Die Blitzableitströme führen aufgrund der galvanischen Entkopplung der Sensoren von der metallischen Struktur nicht zu einer direkten Beeinflussung, wohl aber zu einer induktiven Einkopplung über das entstehende magnetische Feld. Die schnellen, pulsförmigen Magnetfelder finden in der durch den beschriebenen Korrosionsdraht aufgespannten Rahmenantenne ideale Einkoppelmöglichkeiten, was zu pulsförmigen Spannungen am Ein- bzw. Ausgang des RFID-Tags bzw. an den logischen Eingängen der aktiven Sensoren führt. Diese eingekoppelten Störgrößen sind potentiell in der Lage, die Tags zu zerstören. Eine Störbeeinflussung der Tags ohne nachhaltige Schädigung ist für die Untersuchung unerheblich, da während des Störereignisses kein Lesevorgang initiiert werden wird.
Das Hauptaugenmerk der Untersuchung wird somit hier auf die indirekte Beeinflussung gerichtet.

Zu b): Ein gezielter Blitzeinschlag direkt oberhalb des eingegossenen Sensors darf als weitestgehend unwahrscheinlich angesehen werden. Die Sensoren sind entweder passiv oder mit einer internen Batterie versorgt, so dass sie sich elektrisch auf freiem Potential befinden und für die Blitzentladung in der Gesamtstruktur als „unsichtbar" angenommen werden können. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Einbringung der Sensoren im Allgemeinen nicht an exponiertester Stelle erfolgt. Blitze entladen sich – stark vereinfacht dargestellt – meist in die höchsten Stellen mit Erdpotential (Funktionsweise der Blitzableiter) weshalb der Untersuchung der direkten Einschläge nur qualitativ untersucht wird.
Bei feuchter oder durchnässter Betonoberfläche wird durch die Leitfähigkeit des Wassers eine Ableitung des Blitzes über die Oberfläche erfolgen, was zu einem Störverhalten gemäß a) führen wird.

Prüfaufbau:

Die Prüfung erfolgte mit einem 1 MV Blitzstoßgenerator in einer Prüfschaltung entspr. Bild 2.

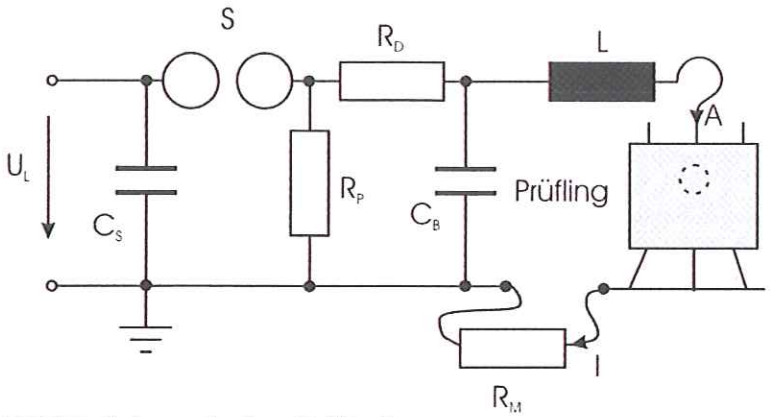

Bild 2: Schematischer Prüfaufbau

U_L: Ladespannung
C_S: Stoßkapazität
R_P: Entladewiderstand
S: Schaltfunkenstrecke
R_D: Dämpfungswiderstand
C_B: Belastungskapazität
L: Induktivität des Aufbaus
R_M: Messwiderstand für Entladestrom
I: Prüfstrom
A: Ankoppelpunkt

Prüfdurchführung:

Einleitung des Blitzstromes in die Baustahlbewehrung durch galvanische Kontaktierung (Indirekte Beeinflussung):

Der Hauptteil der Prüfung erfolgt durch Eintragen von schnellen Blitzentladeströmen direkt in die dem Sensor unmittelbar benachbarte Betonarmierung zur Simulation der im realen Aufbau u.U. auftretenden Ableitströme.
Dazu erfolgt eine direkte galvanische Verbindung - ohne Luftentladestrecke - zwischen dem Prüfgenerator und dem Prüfling. Bild 3 zeigt eine der untersuchten Kontaktierungsstellen der Elektrode mit der Betonarmierung.

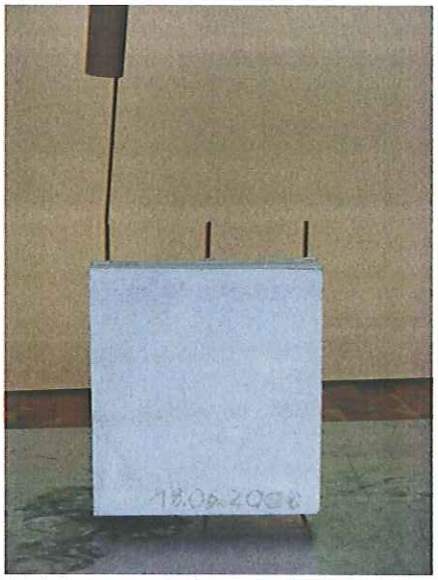

Bild 3: Kontaktierung der Prüflinge

Wegen fehlender normativer Vorgaben erfolgt eine Herleitung physikalisch und technisch sinnvoller Prüfpegel aus grundlegenden Überlegungen zum möglichen Blitzgeschehen.
Die Stromstärke natürlich auftretender Blitzentladungen ist abhängig von der Art des Blitzes und wird im Bereich von unter 20 kA bis einige hundert kA angegeben, wobei die

stromstarken Blitze mit nur geringer Häufigkeit auftreten. Im Mittel wird ein Wert von 20 kA angegeben.

Bei einem Einschlag in eine vermaschte metallische Struktur, wie sie eine Baustahlarmierung ausbildet, wird sich der Blitzstrom schnell in der Struktur verteilen, was dazu führt, dass an den Sensoren selbst nur Bruchteile des eigentlichen Blitzstromes vorbeigeführt werden.

Bild 4 zeigt exemplarisch die Verteilung des Blitzstromes bei einem Einschlag in ein neunstöckiges Gebäude. Bereits nach kurzer Distanz vom Einschlagpunkt bleibt der Anteil des Blitzstromes unterhalb von 20 %.

Im Rahmen der Prüfung werden Blitzströme mit Scheitelwerten bis ca. 25 kA realisiert, wodurch über 95% der Blitzentladungen in einer Entfernung von einigen Maschenweiten der Baustahlarmierung abgedeckt werden.
Die bei den Untersuchungen vorhandene, geringe Vermaschung der Baustahlarmierung kann somit als worst-case-Betrachtung angesehen werden.

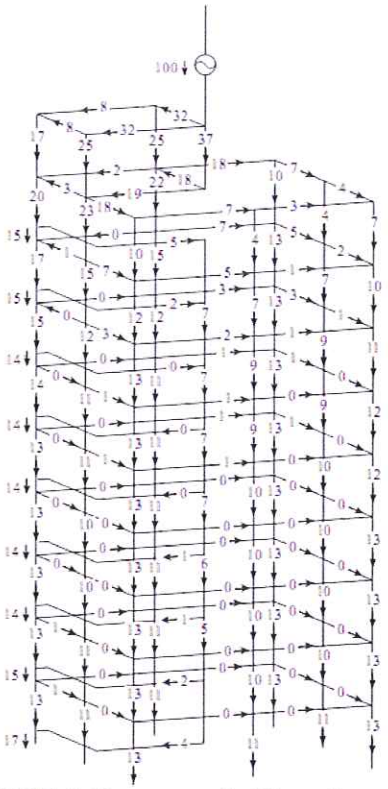

Bild 4: Prozentuale Verteilung des Blitzstromes bei einem Einschlag in ein neunstöckiges Gebäude[1]

Prüfablauf:

Beginnend mit einer Generator-Ladespannung von 100 kV erfolgt eine Beaufschlagung des Prüflings mit steigenden Ladespannungen bis 900 kV. Dabei wurden bei jeder Spannungsstufe jeweils 10 Entladungen positiver und negativer Polarität sowohl auf den linken als auch auf den mittleren, aus dem Betonklotz herausragenden Bewehrungsdraht durchgeführt. Der jeweilige Entladestrom wurde protokolliert und nach je 10 Entladungen eine Funktionskontrolle des Sensors durch Auslesen des RFID-Tags durchgeführt.

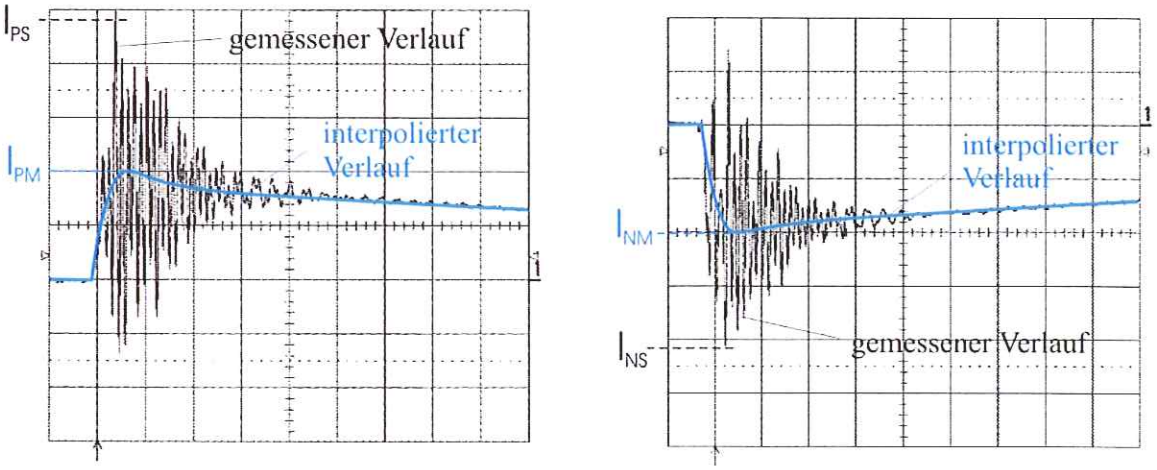

Bild 5: Exemplarische Prüfstromverläufe, links: positiv, rechts: negativ

Bild 5 zeigt exemplarisch den Entladestrom, dessen Verlauf für alle Spannungsstufen vergleichbar ist.
Aus dem gemessenen Stromverläufen lässt sich erkennen, dass deutliche Überschwinger auftreten. Diese sind durch die parasitäre Induktivität des Aufbaus und der Ankopplung des Prüflings in Kombination mit den Kapazitäten von Stoßspannungsgenerator Prüfling begründet. Die Stromüberschwinger führen aufgrund des hohen di/dt zu einer stärkeren induktiven Einkopplung und damit zu noch höheren induzierten Spannungen, als es durch den interpolierten Verlauf der Fall wäre. Somit ergibt sich durch die Überlagerung der hochfrequenten Ausgleichsschwingung und des interpolierten Blitzstoßstroms eine kombinierte Belastung der Prüflinge, welche den realen Einsatzbedingungen sehr nahe kommt.
Das mit steigender Ladespannung nicht proportionale Verhältnis zwischen Strom und Spannung ist auf die Strombegrenzende Wirkung der parasitären Induktivität des Aufbaus zurückzuführen. Die Zeitkonstante aus Dämpfungswiderstand und parasitärer Zuleitungsinduktivität begrenzt den maximalen Strom bei impulsförmiger Belastung.

Tabelle 1: Prüfablauf indirekte Beeinflussung

Spannung	Polarität x	Kontakt	I_{XS}	I_{XM}	Zustand RFID
100 kV	P	links	7,6 kA	4 kA	o.k.
100 kV	P	rechts	7,6 kA	4 kA	o.k.
100 kV	N	links	7,6 kA	4 kA	o.k.
100 kV	N	rechts	7,6 kA	4 kA	o.k.
200 kV	N	links	16 kA	7,5 kA	o.k.
200 kV	N	rechts	16 kA	7,5 kA	o.k.
200 kV	P	links	15 kA	7 kA	o.k.
200 kV	P	rechts	15 kA	7 kA	o.k.
300 kV	P	links	21 kA	10 kA	o.k.
300 kV	P	rechts	21 kA	10 kA	o.k.
300 kV	N	links	21 kA	10 kA	o.k.
300 kV	N	rechts	21 kA	10 kA	o.k.
500 kV	N	links	38 kA	18 kA	o.k.
500 kV	N	rechts	38 kA	18 kA	o.k.
500 kV	P	links	33 kA	17kA	o.k.
500 kV	P	rechts	33 kA	17 kA	o.k.
700 kV	P	links	46 kA	22 kA	o.k.
700 kV	P	rechts	46 kA	22 kA	o.k.
700 kV	N	links	46 kA	22 kA	o.k.
700 kV	N	rechts	46 kA	22 kA	o.k.
900 kV	N	links	46 kA	25 kA	o.k.
900 kV	N	rechts	46 kA	25 kA	o.k.
900 kV	P	links	51 kA	26 kA	o.k.
900 kV	P	rechts	51 kA	26 kA	o.k.

Ergebnis:

Die Sensoren konnten im Rahmen dieser Untersuchungen nicht dauerhaft gestört werden, d.h. ein Auslesen der RFID-Tags war nach der Belastung mit jeweils zehn Blitzstoßstromimpulsen immer noch möglich.

Vergleich mit Luftentladung:

Zur Verifikation der Vergleichbarkeit einer Blitzstromeinleitung über einen direkten galvanischen Kontakt mit einem Lufteinschlag in die Bewehrung wurden Versuche nach Bild 6 und Bild 7 durchgeführt.

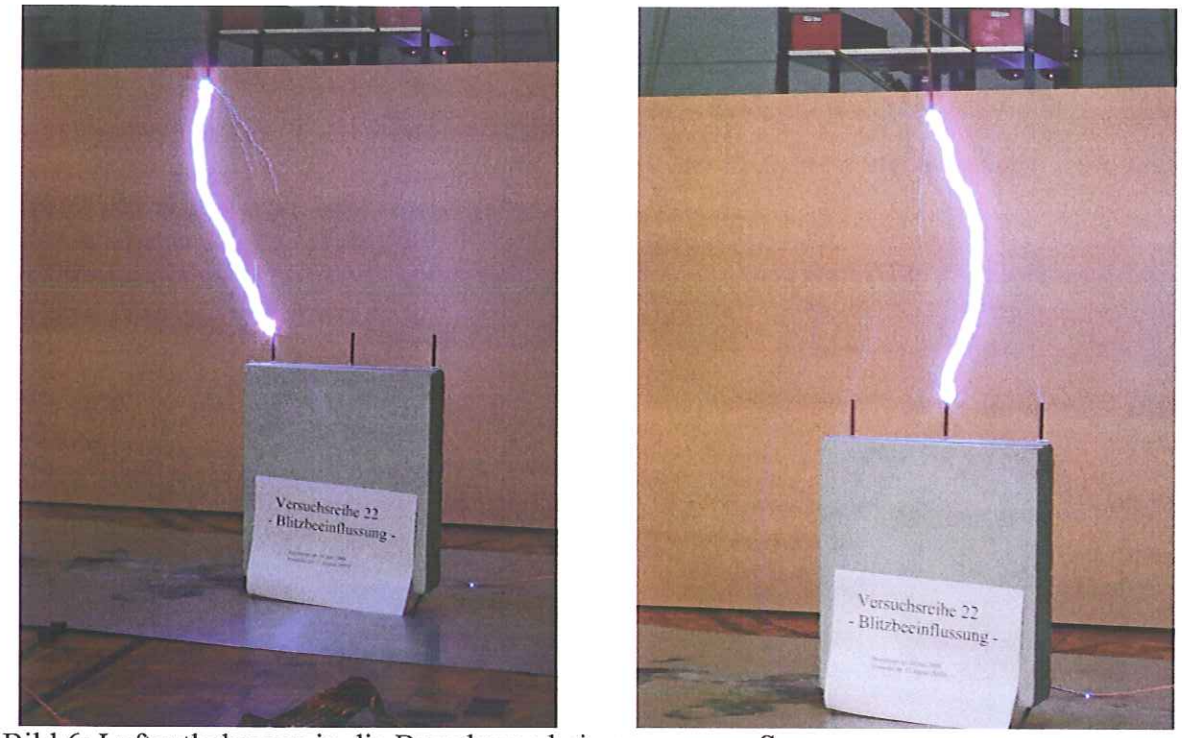

Bild 6: Luftentladungen in die Bewehrung bei vergossenen Sensoren

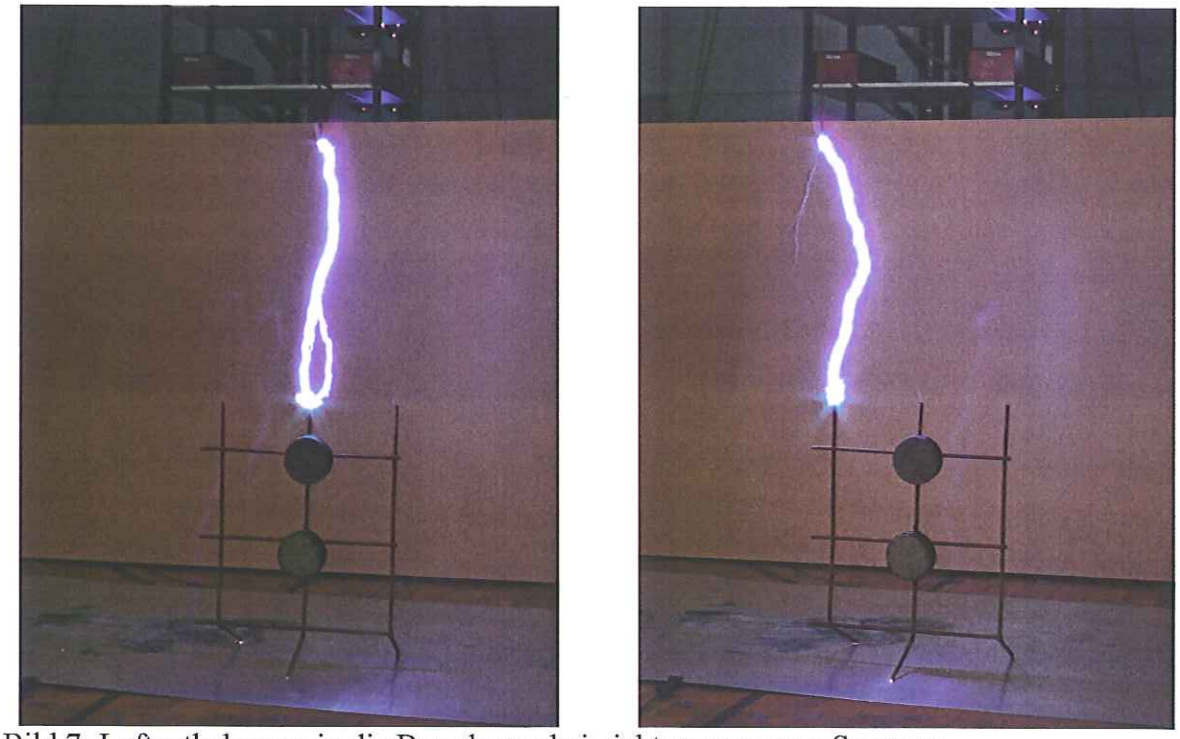

Bild 7: Luftentladungen in die Bewehrung bei nicht vergossenen Sensoren

Die eingestellte Ladespannung am Stoßspannungsgenerator betrug 700 kV bei positiver Polarität. Die gemessenen Stromverläufe entsprechen denen aus Bild 5 (links), was die

Vergleichbarkeit zur kontaktierten Entladung belegt. Allerdings liegen die Maximalwerte der Ströme I_{PS} und I_{PM} etwa 30 % unter den entsprechenden bei Kontaktentladung, was auf die jetzt höhere Impedanz des Aufbaus – der zusätzliche Lichtbogen besitzt einen endlichen Widerstand und Induktivität – zurückzuführen ist.
Für den Prüfling stellt die kontaktierte Prüfung eine wesentlich stärkere Beanspruchung dar.

Ergebnis:

Erwartungsgemäß konnten die Sensoren auch im Rahmen dieser Beaufschlagung nicht dauerhaft gestört werden.

Direkte Entladungen auf die Prüflinge

Zur Abschätzung möglicher Schadensszenarien bei einem direkten Blitzeinschlag in die Sensoren oder den sie direkt umgebenden Beton wurden bei maximale möglicher Prüfanlagenspannung mehrere Entladungen direkt auf die Prüflinge bzw. den Beton durchgeführt.

Entladungen auf nicht vergossenen Sensoren:

Bild 8: Kontaktentladungen direkt auf die Sensorgehäuse im nicht vergossenen Aufbau

Während bei der Baustahl-geführten Entladung die Induktionswirkung des Blitzstromes die entscheidende Störbeeinflussung darstellt, kann es bei einer direkten Entladung zu verschiedenen anderen Beeinflussungsmechanismen kommen. Schlägt die Entladung durch das Kunststoffgehäuse der Sensoren durch, sind auch direkte Überspannungsschädigungen möglich. Wird die Entladung jedoch über die Gehäuseoberfläche und somit um den eigentlichen Sensor herumgeleitet, so entsprechen die Wirkmechanismen denen der induktiven Einkopplung aus der Blitzstromführenden Baustahlbewehrung.
Die eingestellte Ladespannung am Stoßspannungsgenerator betrug auch hier 700 kV bei positiver Polarität. Die gemessenen Stromverläufe entsprechen ebenfalls denen aus Bild 5 (links), mit etwa 30 % reduzierten Maximalwerten der Ströme I_{PS} und I_{PM}.

Ergebnis:

Es kam zu keiner dauerhaften Störung der Sensoren.

Entladungen direkt auf den Beton direkt oberhalb der Sensoren (Betonoberfläche befeuchtet)

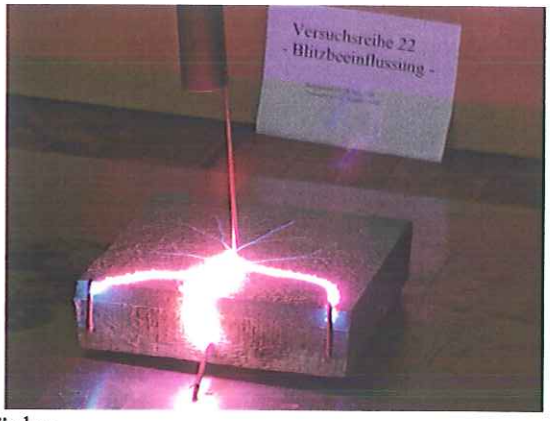

Bild 9: Kontaktentladung auf die Betonoberfläche

Die Versuche erfolgten bei befeuchteter Betonoberfläche zu Simulation der Oberflächenbeschaffenheit bei Regen. Auch hier könnten neben der Induktionswirkung noch andere Beeinflussungsmechanismen wirksam werden. Die Aufnahmen zeigen die Ableitung der Entladung über die Oberfläche.
Die eingestellte Ladespannung am Stoßspannungsgenerator betrug auch hier 700 kV bei positiver Polarität. Die gemessenen Stromverläufe entsprechen ebenfalls denen aus Bild 5 (links), mit etwa 30 % reduzierten Maximalwerten der Ströme I_{PS} und I_{PM}.

Ergebnis:

Nach etwa 15 Entladungen konnte einer der beiden RFID-Tags im eingegossenen Sensor nicht mehr ausgelesen werden.

Zusammenfassung und Fazit:

Im Rahmen der Untersuchungen wurden RFID-Tag-basierte und aktive, auf einem Funksystem basierende Korrosionssensoren der Fa. Selfsan Consult bezüglich ihrer Widerstandsfähigkeit gegen Blitzentladungen untersucht. Dabei wurden verschiedene Störszenarien simuliert und die entsprechende Reaktion der Sensoren überprüft.

1. Direkte Blitzeinschläge mit Blitzströmen bis ca. 25 kA.
   Statistisch gesehen liegen ca. 50 % aller Blitzentladungen unterhalb dieser Stromwerte.
2. Nahe Blitzeinschläge im Abstand weniger Maschenweiten der Baustahlkonstruktion.
   Bei Blitzeinschlägen in die Baustahlkonstruktion verteilen sich die Blitzströme sehr schnell über die Bewehrung, wodurch die induktive Einkopplung auf die Sensoren reduziert wird, bereits nach 2 Maschenweiten auf ca. 20-25 %.
   Die durchgeführten Untersuchungen entsprechen somit nahen Blitzeinschlägen mit 100 kA und mehr. Laut Statistik liegen 97% aller Blitzentladungen unterhalb dieser Stromwerte.

Die Sensoren zeigen eine sehr gute Störfestigkeit gegenüber den beaufschlagten Blitzentladungen. Die Zerstörung eines Sensors zum Ende der Untersuchung ist in diesem Zusammenhang als unkritisch zu betrachten. Bis zu seinem Ausfall wurde der Sensor insgesamt mit mehr als 300 Blitzentladungen unterschiedlicher Pegel beaufschlagt, was eine unrealistisch hohe Beanspruchung darstellt. (Ausfall durch multiple Belastung.)

Kaiserslautern, 28.08.2008

TU KAISERSLAUTERN
Hochspannungstechnik und EMV
Prof. Dr.-Ing. P. Weiß
Postfach 30 49
67653 KAISERSLAUTERN
Germany

Dr.-Ing. Bernd Gutheil