

Neue Möglichkeiten elektrischer Anschlüsse an die Bewehrung und Untersuchung der Wirkung von Blitzströmen in bewehrtem Beton

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern
Fachhochschule Aachen
Abteilung Jülich
a.kern@fh-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Jan Meppelink
Universität GH Paderborn
Abteilung Soest
meppelink@t-online.de

1. Hintergrund

Im Rahmen eines modernen Blitzschutzsystems für Stahlbeton-Bauten bietet es sich an, die Betonbewehrung zu benutzen:

- Sie kann die Funktionen der Ableitungseinrichtungen und des Blitzschutz-Potentialausgleichs bei einem klassischen Gebäude-Blitzschutz übernehmen [1];
- Sie kann, ggf. bei entsprechender Ergänzung, als ein geschlossener Käfig ausgebildet werden und damit eine deutliche Reduzierung der Belastung elektrischer / elektronischer Systeme durch blitzinduzierte elektromagnetische Felder erbringen (LEMP-Schutz [2]).

Die Nutzung der Bewehrung ist dabei grundsätzlich gleichermaßen bei Neubauten wie auch bei Ertüchtigungen möglich und sinnvoll. So stellt die Nutzung der Bewehrung beispielsweise im Bereich von Großkraftwerken eine wesentliche Ertüchtigungsmaßnahme für den Blitzschutz elektrischer und elektronischer Einrichtungen dar:

- Einerseits wird der Blitzschutz-Potentialausgleich durch den Anschluss metallener Einrichtungen wie Elektronik-Schränke, Kabeltrag-Konstruktionen, Rohrleitungen, etc. an die Bewehrung deutlich verbessert.
- Andererseits kann bei größeren Gebäuden die elektromagnetische Schirmwirkung durch die elektrische Überbrückung von vorhandenen Dehnfugen bei Stahlbetonbauten optimiert werden. Diese Dehnfugen sind teilweise nur unzureichend überbrückt, so dass bei Blitzeinschlag in das betreffende oder ein benachbartes Gebäude an Kabelstrecken, die über die Dehnfuge hinwegführen, rel. hohe Spannungen induziert werden können [2, 3]. Die sich um das gesamte Gebäude herumziehende oder zwischen zwei Gebäuden befindliche Dehnfuge muss deshalb im Abstand von maximal einigen Metern überbrückt werden.

Im Falle von Blitzschutz-Ertüchtigungen in vorhandenen Gebäuden wird bisher an jeder geplanten Anschlussstelle die Bewehrung großflächig (\varnothing wenige 10 cm) freigelegt, dort ein elektrischer Anschluss zu dem Bewehrungsstab hergestellt, z.B. mittels eines Erdungsfestpunkts, und dann die Betonoberfläche wieder geschlossen. Je nach prognostizierter Strombelastung wird teilweise versucht, den über den Anschluss fließenden Strom bereits auf mehrere Bewehrungsstäbe zu verteilen. Dazu sind entweder die kreuzenden Stäbe zu verschweißen oder es sind direkt

Anschlüsse an zwei Bewehrungsstäbe herzustellen. All dieses bedeutet einen hohen Aufwand bei der Freilegung der Bewehrung und auch wieder bei der Schließung der entstandenen Betonlöcher.

Es soll deshalb hier untersucht werden, ob es beispielsweise zum Zwecke des Blitzschutz-Potentialausgleichs und auch zur Überbrückung von Dehnfugen ausreichend ist, den Anschluss an die Bewehrung nach einfachen Verfahren nur jeweils an einen Bewehrungsstab herzustellen. Damit würde der finanzielle und administrative Aufwand an Betonarbeiten deutlich reduziert.

Die hier dargestellten Verfahren sind dabei insbesondere für den Einsatz bei Blitzschutz-Ertüchtigungen in bestehenden Gebäuden vorgesehen. Abschließend sollen deshalb die Möglichkeiten zur Prüfung korrekter Anschlüsse, die Grenzen der Verfahren sowie auch die Grenzen der Anwendbarkeit bei Neuanlagen diskutiert werden.

2. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung untergliedert sich dabei wie folgt:

1. Welchen Belastungen hält der eigentliche Anschluss einer Potentialausgleichsleitung „von außen“ an die Bewehrung statt, d.h. welche Parameter kann der eingeleitete Teilblitzstrom aufweisen, so dass der Anschluss sicher nicht zerstört oder beeinträchtigt wird?
2. Kann es durch die Einleitung des Teilblitzstroms auf nur einen Bewehrungsstab zu unerwünschten Blitzstromwirkungen im Beton-Inneren bis hin zum Aufplatzen des Betons kommen, verursacht durch Überschläge an einer nicht optimal kontaktierten Kreuzung von Bewehrungsstäben ?

2.1 Anschluss von außen an Bewehrung

Der Anschluss an den gewählten Bewehrungsstab muss eine definierte Stoßstromtragfähigkeit besitzen. Möglich sind die bekannten Klemm- und Schweißverbindungen, aber auch beispielsweise neuartige Verfahren, die den Bewehrungsstab von außen detektieren und dann den Anschluss durch ein einfaches Bohrloch über unterschiedliche Varianten herstellen. Sechs mögliche Anschlussvarianten werden in dieser Studie näher betrachtet und verglichen. Wichtig ist in allen Fällen lediglich ein dauerhafter und stoßstromtragfähiger Anschluss.

Im Falle von Bewehrungsanschlüssen zum Zwecke der Dehnfugen-Überbrückungen ist davon auszugehen, dass sich bei einem Blitzeinschlag der Strom zwischen den zwei Gebäudeteilen auf mehrere Überbrückungen verteilt. Die hier untersuchten einfachen Bewehrungsanschlüsse sollen allerdings auch für andere Aufgaben des Blitzschutz-Potentialausgleichs mit vergleichbarer Strombelastung eingesetzt werden können:

- Anschlüsse innerhalb der Gebäude (Messumformer-Gestelle, Elektronik-Schränke, Kabeltrag-Konstruktionen);

- Anschlüsse von außen eingeführter Leitungssysteme (Rohrleitungen, Schirme von Erdkabeltrassen, Blitzschutz-Beschaltungen). Hier müssten dann ggf. durch mehrere solche einfachen Anschlüsse an die Bewehrung (Parallelschaltung) die Teilblitzstrom-Parameter wiederum auf die tolerierbaren Werte reduziert werden.

Die untersuchten einfachen Bewehrungsanschlüsse sollen dagegen nicht für Zwecke des Personenschutzes eingesetzt werden, d.h. sie haben keine Schutzleiter-Funktion. Insofern erscheint der Nachweis eines bestimmten Wertes für den Übergangswiderstand von Anschluss zu kontaktiertem Bewehrungsstab nach der Stoßstrombelastung nicht grundsätzlich erforderlich

2.2 Blitzstromwirkungen im Beton

Anschlüsse, die an einen Bewehrungsstab vorgenommen wurden, der nur rel. hochohmig mit anderen Stäben verbunden (verrödelt) oder ggf. gänzlich elektrisch isoliert ist, sind zu vermeiden. Durch geeignete Maßnahmen sollte dies zunächst sichergestellt werden. Allerdings kann aber auch dann nicht ausgeschlossen werden, dass der Teilstrom, der bei Blitzeinschlag an einer Anschlussstelle eingeleitet wird, eine direkt benachbarte hochohmige (oder ggf. isolierte) Bewehrungsstab-Kreuzung vorfindet, über die er fließen muss. Der dabei entstehende Lichtbogen tritt im Beton auf, so dass hier die enorme mechanische Energie bei der Expansion des Lichtbogens und bei der Verdampfung der Restfeuchte des Betons zu beherrschen ist. Sie darf nicht zu einem Aufsprengen des Betons führen.

Die Zerstörungswirkung für den Beton geht aus von der Expansion eines Lichtbogens und der Verdampfung der Restfeuchte des Betons. Beides setzt einen Lichtbogen und damit eine Funkenstrecke voraus. Ist vorab sichergestellt, dass der Bewehrungsstab, an dem der einfache Anschluss erfolgen soll, nicht gänzlich elektrisch isoliert ist, so kann davon ausgegangen werden, dass Funkenstrecken im Beton vom betrachteten zu einem weiterführenden Bewehrungsstab, an denen ein Überschlag stattfinden kann, eine Schlagweite von nur wenigen Millimetern aufweisen. Besitzt die Funkenstrecke eine größere Schlagweite (z.B. im cm-Bereich), so dürfte der Spannungsfall längs des betrachteten Bewehrungsstabes bis zu einer (vorausgesetzten) elektrischen Kontaktstelle mit weiteren Bewehrungsstäben so niedrig sein, dass die Spannungsfestigkeit der Funkenstrecke nicht überschritten wird. Als worst-case wird demzufolge eine Schlagweite von s = 5 mm angesetzt.

Geht man weiter davon aus, dass Beton und Luft in etwa identische Stoßdurchschlagsfestigkeiten besitzen [4], so ergibt sich eine Stoßspannungsfestigkeit der Funkenstrecken im Beton von ca. 2,0 kV/mm.

Die durch die räumliche Expansion des Lichtbogens und die Verdampfung der Restfeuchte des Betons in den Beton eingeleitete mechanische Energie ist nicht-linear abhängig von der Länge des Lichtbogens und damit der Schlagweite der Funkenstrecke.

Relevant für die Expansion des Lichtbogens und die Verdampfung der Restfeuchte des Betons erscheint im wesentlichen die eingespeiste Energie. Nachdem aber

sowohl die Energie des Lichtbogens als auch die zur Zerstörung des Betons erforderliche mechanische Energie nur sehr eingeschränkt analytisch berechnet werden können, sind hier experimentelle Untersuchungen vorzuziehen. Soll nun die Zerstörungswirkung durch den, einem positiven Erstblitz entsprechenden, Stoßstrom $10/350 \mu\text{s}$ abgeschätzt werden, so können dafür auch Untersuchungen mit anderen Stoßströmen herangezogen werden. Voraussetzung dafür ist eine vergleichbare eingespeiste spezifische Energie W/R . Ein Wert von z.B. $W/R = 25 \text{ kJ}/\Omega$ gilt dabei in etwa gleichermaßen für die Stoßströme $10/350 \mu\text{s}$ mit $i_{\text{max}} = 10 \text{ kA}$ und $8/20 \mu\text{s}$ mit $i_{\text{max}} = 40 \text{ kA}$. Werden also bei experimentellen Versuchen mit Stoßströmen $8/20 \mu\text{s}$ und $i_{\text{max}} = 40 \text{ kA}$ reale Prüfmuster nicht zerstört, so kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfmuster auch Stoßströme $10/350 \mu\text{s}$ mit $i_{\text{max}} = 10 \text{ kA}$ zerstörungsfrei überstehen.

3. Literaturrecherche

Im Folgenden werden Literaturstellen hinsichtlich ihrer Aussagen bezüglich der hier vorliegenden Aufgabenstellung analysiert und ihre Ergebnisse ggf. bewertet. Ausgewertet wurden dafür die Fachliteratur, die relevanten Normen bzw. Normenkommentare und die einschlägigen wissenschaftlichen Konferenzen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Problematik von verrödelten, hochohmigen Verbindungen innerhalb des Betons, nicht auf den Anschlusstechniken selbst.

H. Neuhaus führt in seinen Erläuterungen zu den Normen DIN 57185 / VDE 0185 Teil 1 und 2 [5] aus:

- ◆ „..., dass die Verrödung (Drahtverbindungen) der Bewehrungsstähle für Stoßströme zuverlässige Verbindungen ergeben kann. Das bedeutet, dass bei ausreichender Verrödung die Bewehrungen als Ableitungen verwendet werden dürfen. Auf Grund vieler Besichtigungen und Messungen auf Baustellen und der Durchsicht vieler Bewehrungspläne lassen sich die verschiedenen Bewehrungsverfahren wie folgt beurteilen:
 - Die Bewehrungen von hohen schlanken Bauwerken wie freistehende Schornsteine und Brückenpfeiler sind an den Stoßstellen so weit überdeckt und mit den Querbewehrungen so oft verrödelt, dass eine elektrisch einwandfreie Verbindung besteht. Zusätzliche Ableitungen brauchen nicht eingelegt werden.“ [5, Seite 50 f].
- ◆ „Schornsteine aus Stahlbeton werden in der Regel in Gleitschalung errichtet. Die Bewehrung wird stufenweise Stab für Stab sorgfältig eingebracht und mit reichlicher Überdeckung und mit sehr dicht liegenden Querstäben an mindestens der Hälfte aller Verbindungs- und Kreuzungspunkte verrödelt. Dadurch entsteht eine sehr gute Längsverbindung über die gesamte Schornsteinhöhe. Aus diesem Grund darf auf besondere Ableitungen verzichtet werden.“ [5, Seite 93].

Die hier untersuchten Anschlusstechniken müssen nicht zwangsläufig bei einem Schornstein zum Einsatz kommen. Dennoch ist auch bei üblichen Stahlbeton-Bauten von zahlreichen, elektrisch gut durchkontaktierten, stromtragfähigen Verbindungen der einzelnen Bewehrungsstäbe bzw. der Bewehrungsmatten untereinander auszugehen. Darüber hinaus sollen im vorliegenden Fall die Bewehrungsstäbe nicht

direkt als Ableitungen im engeren Sinne dienen, sondern nur als Teil des Blitzschutz-Potentialausgleichs und ggf. der elektromagnetischen Schirmung der Gebäude. Damit sind die Stromstärken über einzelne Bewehrungsstäbe bzw. -matten weitaus geringer.

F. Pigler schreibt zum baulichen Teil von Anlagen aus bewehrtem Ortbeton [6]:

- ◆ „Die Bewehrung der Wände und Decken ist meist ein zweilagiger Käfig aus Betonstahl, der mit Bindedraht zusammengebunden – „verrödelt“ – ist. Messungen haben gezeigt, dass im Durchschnitt jede dritte Rödelerbindung nach dem Betonieren noch einen galvanischen Kontakt gibt und damit Strom führen kann; bei den übrigen Kreuzungspunkten sind zwischen den Stäben dünne Betonschichten, die praktisch eine Isolation darstellen, aber eine große Kapazität haben, über die bei hohen Frequenzen Strom fließt, so dass dort der Schirm dichter erscheint. Dass ein bestimmter Stab der Bewehrung wirklich Kontakt mit der übrigen Bewehrung hat, ist dadurch jedoch nicht gesichert. ...“ [6, Seite 97 f.].
- ◆ „Ist die Kontrolle der Verbindung vor dem Betonieren nicht möglich, oder ist sie versäumt worden, dann kann in gewissem Umfang durch Messung nachgewiesen werden, dass die herausgeführten Anschlüsse Verbindung mit der Bewehrung haben und dass sich der Störstrom auf viele Bewehrungsseisen verteilt. Das Prüfen der Verbindung einzelner Anschlüsse kann durch eine einfache Durchgangsprüfung erfolgen. ...“ [6, Seite 224].

Damit wird bestätigt, dass Rödelerbindungen bei Einzelstab-Bewehrungen zu einem gewissen Anteil („ein Drittel“) auch nach der Betonfüllung elektrisch durchkontaktiert bleiben. Dieser Anteil, der wohl auch für die Stoßstellen von Bewehrungsmatten gelten kann, erscheint voll ausreichend, um beispielsweise die gewünschte elektromagnetische Schirmwirkung auch an den Dehnfugen aufrecht zu erhalten. Es muss nur sichergestellt sein, dass der Bewehrungsanschluss nicht zu einem vollständig elektrisch isolierten Bewehrungsstab hergestellt wird.

A.F. Roth und R. Oster beschäftigten sich mit Strombelastungsversuchen an Fundamentern durch 50 Hz-Kurzschlussströme mit Scheitelwerten von 6 kA, 10 kA und 13 kA [7]. Sie kommen zum Ergebnis:

- ◆ „dass die Wirkung eines durch Blitz oder Erdschluss erzeugten Kurzschlussstroms auf die Erdung resp. Armierung nicht vernachlässigt werden darf. Die Folgen des Stroms auf das mechanische und thermische Verhalten der Armierung ist beachtlich. ... Das Binden (gemeint ist: Verrödeln) des zur Verfügung stehenden Erders bei Stößen und Ecken ist ungenügend. Diese Verbindungsart der Armierungseisen ergibt nach dem Betonieren keine elektrisch durchgehend einwandfreie Leitung.“

Dieses Ergebnis wird allerdings erst bei rel. hohen Erdkurzschlussstrom-Scheitelwerten erzielt. Bei einem Scheitelwert von 6 kA kommt es bei den verrödelten Prüflingen noch zu keinen mechanischen Zerstörungen, sondern lediglich zu rel. hohen Temperaturen der Bewehrungsseisen durch die rel. hohen Übergangswiderstände an den Rödelerstellen.

Darüber hinaus kann im hier vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass der weitaus größte Teil eines 50 Hz-Erdkurzschlussstroms in unmittelbarer Nähe des Hinleiters (eine, zwei oder alle drei Phasen) auch wieder zurückfließt, d.h. über den Nullleiter bzw. Schutzleiter des Starkstromkabels. Dies ist Folge der gegenseitigen Strombeeinflussung in benachbarten Leitern. Nur ein kleinerer Teil eines Erdkurzschlussstroms wird über das Erdungssystem und damit ggf. die Bewehrung einer baulichen Anlage von der Fehlerstelle zurück zur Schaltanlage fließen. Darüber hinaus teilt sich dieser kleinere Teil noch auf etliche Anschlussstellen der Bewehrung auf. Es ist demzufolge nicht zu erwarten, dass hier ein Wert von 6 kA Erdkurzschlussstrom-Scheitelwert über eine einzelne Anschlussstelle erreicht wird.

D.M. Leite und F.H. Kameyama führten Stoßstromversuche an in Beton eingegossenen Bewehrungsstäben durch [8]. Die Versuche wurden mit Stoßströmen $4/10 \mu\text{s}$ vorgenommen, die allerdings einen beinahe ungedämpft schwingenden Verlauf hatten, so dass ein Vielfaches mehr an Energie gegenüber einer einfachen $4/10 \mu\text{s}$ -Welle in die Prüflinge eingespeist wurde. Die Ergebnisse können zusammengefasst werden:

- ◆ „All samples prepared with gaps (hier: 5 mm) are seriously damaged with explosion of the concrete with currents of about 20 kA.“
- ◆ „In the samples prepared as described in 4.4 (steel bars tied: verrödelt) we have applied currents of 20 kA to 100 kA. We have verified, that when the contact resistance was in the order of milliohms (29 m Ω , 47 m Ω and 620 m Ω in three samples) we can not see any problem by visual inspection, but when the contact resistance was higher than 5 Ω , we found deterioration of the concrete, as follows: (damage at 61 kA, 100 kA, 58 kA).“

Berücksichtigt man die durch die nahezu ungedämpft schwingende Entladung relativ hohe spezifische Energie der Stoßströme, so kann man aus diesen Versuchen herauslesen, dass bei Funkenstrecken im Beton ab einem Stromscheitelwert von 20 kA eine Zerstörung des Betons einsetzen kann. Dabei muss allerdings angemerkt werden, dass die Betondicke hier extrem gering war. Aus den Fotos des Beitrags kann auf eine Betonüberdeckung der verrödelteten Bewehrungsstäbe von etwa 10 mm geschlossen werden. Dies ist in der Praxis bei bewehrten Betonwänden wesentlich mehr. Hier kann man von wenigstens 20 mm, üblicherweise sogar von mehr als 50 mm Betonüberdeckung der Bewehrung ausgehen. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung des Stromscheitelwerts von Stoßströmen, bei denen Zerstörung einsetzt. Insofern sind die in [8] dargestellten Versuche für die hier vorliegende Aufgabenstellung nicht bestimmend.

Zusammenfassend bleibt als Ergebnis der Literaturrecherche festzustellen, dass die bisherigen Untersuchungen im Labor keine gesicherten Erkenntnisse über die Stoßstrom-Tragfähigkeit von Bewehrungsstab-Kreuzungen im Beton liefern. Die Praxiserfahrungen zeigen dagegen, dass durchaus (Teil-) Blitzströme in die Bewehrungen ohne Zerstörungen eingeleitet werden können, zum Teil sogar bei baulichen Anlagen, wie Schornsteinen, die aufgrund ihrer Höhe desöfteren Opfer von Blitzeinschlägen waren und sind. Im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung erschienen deshalb auch hier eigene Laboruntersuchungen unerlässlich.

4. Festlegungen für praktische Prüfungen im Stoßstromlabor

Für die Durchführung der praktischen Prüfungen muss festgelegt werden bzw. bekannt sein:

- Art und Abmessungen der Betonprüflinge, an denen die Anschlüsse vorgenommen werden;
- Variante des Bewehrungsanschlusses;
- Definition der Prüfströme und Beschreibung des Prüfgenerators zur Erzeugung.

An den Prüflingen sollten dabei gleichzeitig geprüft werden:

- die Blitzstrom-Tragfähigkeit des eigentlichen Bewehrungsanschlusses;
- die Blitzstrom-Tragfähigkeit einer Bewehrungsstab-Kreuzung.

4.1 Spezifikation der Prüflinge

Für die praktischen Prüfungen wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Prüflingsvarianten herangezogen:

- Prüfling(e) A: Quadratische Betonkörper mit nur einer Bewehrungsstab-Kreuzung;
- Prüfling(e) B: Betonplatten mit mehreren typischen Bewehrungsstäben und mehreren Kreuzungen.

Im Folgenden werden die zwei Prüflingsvarianten hinsichtlich ihres Aufbaus kurz spezifiziert. Alle Prüflinge wurden nach der Betonfüllung vier Wochen lang ausgehärtet. Sie besaßen zum Zeitpunkt der Prüfungsdurchführung nur noch eine vergleichbar geringe Restfeuchte.

Prüfling Typ A

Quadratischer Betonkörper mit folgenden Eigenschaften (Bilder 1, 2, 3 und 4):

- Abmessungen ca. 300 mm x 300 mm und ca. 400 mm x 400 mm;
- eine Bewehrungsstab-Kreuzung etwas außerhalb der Prüflingsmitte (Abstand der Stäbe 0 / 1 / 2 / 3 / 5 mm);
- starke typische Bewehrungsstäbe (Stabdurchmesser 14 mm);
- Beton B25 (die Mindestüberdeckung der Bewehrungsstäbe durch Beton betrug 50 mm);
- beide Bewehrungsstäbe konnten an den jeweils beiden Enden kontaktiert werden (Überstehen der Stäbe auf einer Länge von ca. 20 – 30 mm);
- der geprüfte Anschluss war ca. 80 – 100 mm vom Rand des Prüflings entfernt.

Geprüft wurden mit diesem Prüfling sowohl die in Abschnitt 4.2 dargestellten Varianten der Einleitung des Teilblitzstroms als auch die Blitzstrom-Tragfähigkeit der Bewehrungsstab-Kreuzung, zum Teil in getrennten Versuchen, zum Teil gemeinsam.

Prüfling Typ B

Serienmäßig hergestellte Betonplatte mit folgenden Eigenschaften (Bilder 5 und 6):

- Abmessungen ca. 800 mm x 800 mm;
- Bewehrung der Platte bestehend aus einzelnen Bewehrungsstäben (Stabdurchmesser 12 mm und teilweise 8 bzw. 6mm) im Rastermaß von ca. 150 mm;
- von den jeweils fünf längs- und querlaufenden Bewehrungsstäben ist auf beiden Seiten (d.h. oben und unten) bei einem Prüfling je ein Stab mit 12 mm Durchmesser durch einen Stab mit nur 8 mm Durchmesser, beim anderen Prüfling durch einen Stab mit nur 6 mm Durchmesser ersetzt;
- Verrödelung der einzelnen Bewehrungsstäbe an den Kreuzungen;
- Beton B 25;
- an den Enden der einzelnen Bewehrungsstäbe (an allen vier Seiten) existieren jeweils Anschlußmöglichkeiten (z.B. Überstehen der Stäbe auf einer Länge von ca. 50 mm);
- die Betonüberdeckung der Bewehrungsstäbe beträgt auf der einen Seite der Betonplatten minimal ca. 20 mm, auf der anderen maximal ca. 50 mm;
- der geprüfte Anschluss war mind. 100 mm vom Rand der Betonplatte entfernt.

4.2 Anschlussvarianten an die Bewehrung

Die zu prüfenden Anschlüsse wurden jeweils direkt vor der Prüfung im Prüflabor selbst hergestellt. Dabei wurde der zu kontaktierende Bewehrungsstab mit einem Eisensuchgerät (Ferro-Scan) detektiert, dann mit einem Betonbohrer eine Lochbohrung mit ausreichendem Querschnitt (abhängig von der Anschlussvariante) bis auf den Bewehrungsstab vorgenommen und das Bohrloch mit einem Staubsauger gereinigt. Geprüft wurden dann im Rahmen mehrerer Versuchsreihen sechs Varianten des Anschlusses bzw. der Stromeinleitung in die Bewehrung:

1. Variante „0“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch

Dabei wurde zunächst die Bohrung definiert hinterschnitten (aufgeweitet), dann eine Gewindestange mit Metalldübel eingesetzt und mit definiertem Drehmoment (ca. 15 Nm) angezogen. Der Durchmesser der Bewehrungsstäbe betrug stets 14 mm. Bei dieser Variante wurden zwei Alternativen geprüft:

- Variante „0a“: zentrale Bohrung direkt auf Bewehrungsstab bei ausreichender Betonüberdeckung der Stäbe (ca. 50 mm) und damit elektrischer Kontakt der Gewindestange zum Bewehrungsstab mit der Spitze;
- Variante „0b“: Bohrung neben den Bewehrungsstab bei geringerer Betonüberdeckung der Stäbe (bis zu ca. 20 mm) und damit elektrischer Kontakt der Gewindestange durch den seitlichen Anpressdruck des sich spreizenden Dübels beim Anziehen.

2. Variante „I“: Bolzenschweißen

Hier wurde ein Bolzen im Bolzenschweißverfahren mit Hubzündung unter Zuhilfenahme einer Schweißpistole auf dem Bewehrungsstaben festgeschweißt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Fußpunkt der Schweißung am freigelegten Teil des Bewehrungsstabes aufsetzt. Die Gegenelektrode muss ebenfalls zur Bewehrung hergestellt werden.

Variiert wurden dabei noch die Durchmesser der kontaktierten Bewehrungsstäbe, die Durchmesser der Bolzen und die Betonüberdeckung.

3. Variante „II“: Bolzensetzen

Hier wurde ein Gewindebolzen (Durchmesser ca. 4,5 mm) mit einem Bolzenschubgerät gesetzt. Die Bohrung im Beton führt den Bolzen bis zum Bewehrungsstab (Führungsbohrung), mit dem er „kaltverschweißt“ wird. Diese Variante eignet sich für rel. geringe Betonüberdeckungen der Stäbe (ca. 20 mm). Es ist darauf zu achten, dass beim Bolzensetzen seitlich Betonteile abplatzen können.

4. Variante „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS

Verwendet wurde hier ein Dübel Typ Superplus BLS 14/40/15 der Fa. Liebig mit Sechskantschraube. Es handelt sich dabei um eine Gewindestange mit integriertem Dübel. Beim Festziehen der Gewindestange bildet sich selbsttätig ein Hinterschnitt im Beton aus. Der vordere Teil des Dübels wird dadurch fest und dauerhaft im Bohrloch verankert. Die Gewindestange wird nun definiertem Drehmoment (ca. 15 Nm) angezogen.

5. Variante „IV“: Einfach fixierter Festpunktriegel

Zusätzlich zur o.g. Bohrung bis zum Bewehrungsstab wurde hier eine zweite Bohrung in einer eisenfreien Zone vorgenommen. Diese Zone muss wieder mit einem Eisensuchgerät detektiert werden. In diese Bohrung wurde dann ein Sicherheitsdübel eingeführt und der (vormontierte) Festpunktriegel festgezogen.

Bei dieser Variante werden also die Funktionen „Befestigen im Beton“ und „Bewehrungsanschluss“ getrennt: Die elektrische Kontaktierung zum Bewehrungsstab stellt eine Gewindestange her, die im Festpunktriegel befestigt ist und mit definiertem Drehmoment angezogen werden kann. Die Befestigung im Beton wird über eine zweite Gewindestange realisiert, die im Sicherheitsdübel angezogen wird.

Anstelle einer einfachen Fixierung kann auch eine doppelte Fixierung in zwei zusätzlichen Bohrlöchern vorgenommen werden. Die Ergebnisse lassen sich übertragen.

6. Variante „V“: HILTI-Betonschraube HUS-H

Hier wurde ein Universalschraubanker der Fa. HILTI (Betoschraube HUS-H) mit einem Schlagschrauber in das Bohrloch ohne Dübel bis zum Anschlag auf dem Bewehrungsstab eingeschraubt.

Die Betonüberdeckungen für die sechs unterschiedlichen Bewehrungsanschluss-Varianten wurden basierend auf den üblichen Einsatzmöglichkeiten der Anschlussvarianten festgelegt.

Nach Herstellung der Anschlüsse wurde zunächst der niederohmige elektrische Kontakt mit dem Strom-/Spannungs-Verfahren überprüft. Der Übergangswiderstand betrug stets $R_o < 5 \text{ m}\Omega$, üblich ca. $1 \text{ m}\Omega$. Dann wurde die Bohrung z.B. mit einer spritzbaren Gummidichtung oder einem Hybridmörtel zum Korrosionsschutz verschlossen. An den aus dem Beton herausragenden Teil der Gewindestange bzw. des Bolzens (ca. 30 mm) konnte dann der Anschluss der Potentialausgleichsleitung zur Stromeinleitung erfolgen.

Nach Prüfungsdurchführung wurde erneut jeweils der Übergangswiderstand zwischen Anschluss und Bewehrungsstab gemessen, um die Niederohmigkeit des Anschlusses zu kontrollieren.

Hinweise: Die Variante „0“ ist als Deutsches Patent DE 198 53 332 C 1 (Patentinhaber PreussenElektra Kernkraft GmbH & Co. KG, 30457 Hannover (DE), Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 07.09.2000) eingetragen [9]. Gleichzeitig besteht für die Variante „0“ die Europäische Patentanmeldung EP 1 002 912 A1 (Anmelder: Pfeil, Gerhard, 21723 Hollern-Twielenfleth (DE), Anmeldetag: 10.11.1999).

Für die Varianten „I“, „II“, „III“ und „IV“ wurde vom TÜV Süddeutschland eine TÜV-Typprüfung auf der Basis der DIN EN 50164-1 / VDE 0185 Teil 201 [10] durchgeführt (Prüfbescheid mit Bescheinigungs-Nr. BB-EE 1 / PB 302 / 2000 vom 26.09.2000 [11]).

4.3 Prüfaufbau

Die praktischen Prüfungen wurden im Blitzschutz- und EMV-Technologiezentrum (BET) in Menden durchgeführt. Für die Prüfung mit $10/350\mu\text{s}$ Stoßstrom-Impulsen wurde eine Schaltung in Crowbar-Technologie verwandt [12, 13]. Diese Schaltung ermöglicht einen Ladungstransfer durch den Prüfling, welcher um ein Vielfaches größer ist als die auf die Kondensatoren aufgebrachte Ladung. Um dies zu erreichen, wird der Strom im Strommaximum von einem RLC-Kreis in einen RL-Kreis (durch Schließen des Schalters C-SF) kommutiert (Bild 7). Dadurch sind sehr lange Rückenhalbwertszeiten und damit sehr hohe spezifische Energien und Ladungstransfers möglich. Den Prüfgenerator im BET zeigt Bild 8.

Für einige ergänzende Prüfungen mit $8/20\mu\text{s}$ Stoßstrom-Impulsen für die Anschlussvariante „0“ wurde ein konventioneller Stoßstromgenerator benutzt. Der Generator bildet mit dem Prüfling einen stark gedämpften Schwingkreis (das Unterschwingen des Stroms beträgt dabei weniger als 20% der Maximalamplitude).

5. Ergebnisse der praktischen Prüfungen

5.1 Stoßstrom-Tragfähigkeit der Anschlussvarianten

Im Hochstromlabor wurden Prüfungen mit Stoßströmen $10/350 \mu\text{s}$ zur Simulation von Ladung und spezifischer Energie der Teilblitzströme durchgeführt. Die Scheitelwerte der Stoßströme wurden zwischen ca. 10 kA und ca. 100 kA variiert, abhängig vom

Ziel der jeweiligen Prüfung. Für die Anschlussvariante „0“ wurden einige zusätzliche Prüfungen mit Stoßströmen 8/20 μ s durchgeführt.

Im Folgenden sind die durchgeführten Prüfungen für jede Anschlussvariante in Tabellenform zusammengefasst und die Ergebnisse der Prüfungen sowie die daraus abgeleiteten Bewertungen dargestellt. Von den Prüfströmen wird hier nur der Parameter Stromscheitelwert aufgeführt; die Parameter Ladung und spezifische Energie können daraus und aus der Stoßstromform abgeleitet werden. Jeder Prüfling wurde Mehrfachbelastungen unterzogen. In den Tabellen ist der Wert des Übergangswiderstandes von Anschluss zu Bewehrungsstab nach der letzten Belastung genannt, sowie ggf. die mechanische Zerstörung des Prüflings.

5.1.1 Variante „0“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch

Prüfling Nr.	Betonüberdeckung (mm)	Anschlussvariante	Stoßstromform	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
C1	50	„0a“: direkt	10/350	10,4 / 28,5 / 52,1 / 88,5 / 100,4	20 kΩ
C5	50	„0a“: direkt	10/350	10,4 / 26,0 / 50,9 / 87,5 / 100,1	10 kΩ
C6	50	„0a“: direkt	10/350	10,1 / 10,2 / 10,3	> 1 MΩ
C10	50	„0a“: direkt	10/350	10,5 / 26,1 / 51,1 / 103,7	1,0 m Ω
C11	50	„0a“: direkt	10/350	10,1 / 10,2 / 10,2	12 m Ω
C16	50	„0a“: direkt	10/350	103,3 / 103,4 / 102,9	2,0 kΩ
C4	50	„0a“: direkt	8/20	98,5 / 99,8 / 100,0	1,0 m Ω
C9	50	„0a“: direkt	8/20	99,2 / 99,4 / 100,1	2,0 m Ω
C15	50	„0a“: direkt	8/20	88,3 / 98,5 / 100,8	1,0 m Ω
D1	30	„0b“: seitlich	10/350	10,4 / 25,9 / 50,1 / 99,3	1,0 kΩ
D2	30	„0b“: seitlich	10/350	49,8 / 49,9 / 49,9	6,0 kΩ
D3	30	„0b“: seitlich	10/350	10,4 / 10,5 / 10,3	38 kΩ
D3a	30	„0b“: seitlich	10/350	10,5 / 10,5 / 10,5	10 kΩ
D4	30	„0b“: seitlich	10/350	96,4 / 96,2 /	zerstört

				102,1	
D5	20	„0b“: seitlich	10/350	10,5 / 10,5 / 10,7	50 kΩ
D5a	20	„0b“: seitlich	10/350	99,1 / 99,1 / 99,5 / 99,6	500 kΩ

Tabelle 1: Übersicht der Prüfungen mit der Bewehrungsanschluss-Variante „0“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch.

Die Ergebnisse der Prüfungen für die Anschlussvariante „0“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch können wie folgt dargestellt werden:

- Die Anschlussvariante „0a“ mit zentraler Kontaktierung der Bewehrung durch die Gewindestange bei ausreichender Betonüberdeckung wurde mit Stoßströmen 10/350 bis 100 kA Scheitelwert geprüft. Dabei wies kein Prüfling eine Beschädigung auf; die mechanische Integrität der Prüflinge blieb intakt. Allerdings erhöhten sich die Übergangswiderstände zum Teil bereits nach dem ersten Stromimpuls, auch bei niedrigen Scheitelwerten von 10 kA. Ein Beispiel für diesen Anschluss zeigt Bild 9, die Gewindestange vor und nach einer Stoßstrombelastung mit 100 kA Scheitelwert Bild 10. Die Prüflinge wiesen also insgesamt ein ausreichendes Stoßstromverhalten auf.
- Prüfungen der Anschlussvariante „0b“ mit seitlich kontaktierter Bewehrung über den sich spreizenden Dübel wurden ebenfalls mit Stoßströmen 10/350 bis 100 kA Scheitelwert durchgeführt. Diese Belastungen wurden von den Prüflingen wiederum grundsätzlich ohne Beschädigungen bewältigt. Lediglich in einem Fall, bei dem von Beginn an kein elektrischer Kontakt zwischen Gewindestange und Bewehrungsstab gegeben war (D4, vgl. Bild 11), trat bei der dritten Belastung mit 100 kA Scheitelwert eine lokale Zerstörung des Prüflings auf. Die geringere Betonüberdeckung, zum Teil reduziert bis auf ca. 20 mm, wirkte sich also grundsätzlich nicht nachteilig auf die Stoßstromfestigkeit der Verbindung aus. Die Übergangswiderstände erhöhten sich stets sofort nach dem ersten Stromimpuls, auch bei niedrigen Scheitelwerten von 10 kA. Auch hier kann deshalb von einem ausreichenden Stoßstromverhalten der Prüflinge gesprochen werden.
- Der Verschluss der Bohrung mit einer spritzbaren Gummidichtung wirkte sich nicht nachteilig auf die Stoßstromfestigkeit des Übergangs aus. Bei Stoßstrom-Einspeisung wird die Gummidichtung teilweise herausgedrückt. Damit wird dem Lichtbogen die erforderliche Expansionsmöglichkeit gegeben, der Lichtbogen-Druck entweicht aus der Bohrung und der Beton bleibt mechanisch intakt. Die herausgedrückte Gummidichtung kann damit sogar als Indikator dienen, ob ein solcher Anschluss durch einen energiereichen Stoßstrom beaufschlagt wurde.
- Ergänzende Prüfungen der Anschlussvariante „0a“ wurden mit Stoßströmen 8/20 mit Scheitelwerten von ca. 100 kA durchgeführt. Die Prüflinge zeigten keinerlei Beschädigungen, selbst bei mehrfacher Belastung. Darüberhinaus wurden hier auch keine merklichen Erhöhungen der Übergangswiderstände zwischen Gewindestange und kontaktiertem Bewehrungsstab verzeichnet.

5.1.2 Variante „I“: Bolzenschweißen

Prüfling Nr.	Durchmesser Bewehrungsstab (mm)	Durchmesser Gewindebolzen (mm)	Betonüberdeckung (mm)	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
I.1	12	6	50	9,9 / 24,2 / 48,7 / 67,4	3,5 mΩ
I.2	12	6	50	50,6 / 50,7 / 51,3	2,8 mΩ
I.3	12	8	50	51,3 / 90,3 / 96,6	2,3 mΩ
I.4	12	8	50	68,2 / 99,1 / 99,3 / 99,9	2,3 mΩ
I.5	12	8	20	50,7 / 101,0 / 100,6	zerstört (Bild 13)
I.6	12	8	20	81,6 / 80,5 / 80,8	1,2 mΩ
I.7	12	10	20	100,4 / 100,0 / 100,1	1,1 mΩ
I.9	8	8	50	51,2 / 80,9 / 100,6	> 500 kΩ
I.10	8	8	50	80,6 / 80,4	zerstört
I.11	6	6	50	24,5 / 27,0 / 27,3 / 40,9 / 41,0 / 41,6	> 40 kΩ
I.12	6	6	50	25,7 / 25,6 / 25,5	7,0 mΩ

Tabelle 2: Übersicht der Prüfungen mit der Bewehrungsanschluss-Variante „I“: Bolzenschweißen.

Die Ergebnisse der Prüfungen für die Anschlussvariante „I“: Bolzenschweißen (Bild 12) können wie folgt dargestellt werden:

- Die Prüflinge zeigten ein hervorragendes Stoßstromverhalten. Selbst bei der ungünstigsten Konfiguration (6 mm Gewindebolzen-Durchmesser und 6 mm Bewehrungsstab-Durchmesser) konnten mehrfach Stoßströme mit ca. 25 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen bzw. Beeinträchtigungen des Anschlusses und ohne signifikante Erhöhungen des Übergangswiderstandes zur Bewehrung eingespeist werden. Erst bei einer mehrfachen Stoßstrom-Belastung mit ca. 40 kA Scheitelwert traten Erhöhungen des Übergangswiderstandes auf.
- Bei der Kontaktierung stärkerer Bewehrungsstäbe mit 12 mm Durchmesser konnten unabhängig vom Gewindebolzen-Durchmesser mehrfach Stoßströme mit ca. 50 kA Scheitelwert problemlos eingespeist werden. Erst bei höchsten Stoßstrom-Belastungen mit 80 – 100 kA Scheitelwerten kam es zum Teil zu

Zerstörungen des Anschlusses, d.h. der Gewindebolzen wurde herausgeschossen (Bild 13), und zum Teil zu Erhöhungen des Übergangswiderstandes.

- Die Übergangswiderstände zur Bewehrung änderten sich signifikant erst bei Erreichen der mechanischen Grenzbelastung, also bei Gefahr einer Zerstörung des Anschlusses. Der Anschluss blieb also solange niederohmig, bis er an seiner mechanischen Belastungsgrenze angelangt war.
- Eine geringere Betonüberdeckung von 20 mm wirkte sich nicht nachteilig auf die mechanische Festigkeit der Prüflinge aus.
- Der Verschluss der Bohrung mit einem Hybridmörtel wirkte sich nicht nachteilig auf die Stoßstromfestigkeit des Übergangs aus. Bei Stoßstrom-Einspeisungen ab ca. 50 kA Scheitelwert rauchte der Verschluss lediglich etwas, bedingt durch die hohe Temperatur des Gewindebolzens durch den Stromfluss.

5.1.3 Variante „II“: Bolzensetzen

Prüfling Nr.	Durchmesser Bewehrungsstab (mm)	Durchmesser Gewindebolzen (mm)	Betonüberdeckung (mm)	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
II.1	12	4,7	20	51,6 / 51,8 / 52,4	1,3 mΩ
II.2	12	4,7	20	8,8 / 25,6 / 51,8	1,0 mΩ
II.3	8	4,7	20	25,5 / 26,4 / 25,9 / 51,6	2,1 mΩ
II.4	8	4,7	20	52,0	> 40 MΩ

Bemerkung: Beim Gewindebolzen handelt es sich hier um einen 42 mm langen, glatten Bolzen mit angeschlossenem M8-Gewinde für den elektrischen Anschluss.

Tabelle 3: Übersicht der Prüfungen mit der Bewehrungsanschluss-Variante „II“: Bolzensetzen.

Die Ergebnisse der Prüfungen für die Anschlussvariante „II“: Bolzensetzen (Bild 14) können wie folgt dargestellt werden:

- Die Prüflinge zeigten ein hervorragendes Stoßstromverhalten. Bei der Kontaktierung von Bewehrungsstäben mit 8 mm Durchmesser konnten mehrfach Stoßströme mit ca. 25 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen bzw. Beeinträchtigungen des Anschlusses und ohne signifikante Erhöhungen des Übergangswiderstandes zur Bewehrung eingespeist werden. Erst bei einer Stoßstrom-Belastung mit ca. 50 kA Scheitelwert trat eine deutliche Erhöhung des Übergangswiderstandes auf.
- Bei der Kontaktierung stärkerer Bewehrungsstäbe mit 12 mm Durchmesser konnten mehrfach Stoßströme mit ca. 50 kA Scheitelwert problemlos

eingespeist werden. Versuche mit noch höheren Stromscheitelwerten wurden hier nicht durchgeführt.

5.1.4 Variante „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS

Prüfling Nr.	Durchmesser Bewehrungsstab (mm)	Durchmesser Gewindebolzen (mm)	Betonüberdeckung (mm)	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
III.1	12	8	50	9,3 / 10,0 / 10,0 / 18,7 / 20,5 / 20,6	2,6 mΩ
III.2	12	8	50	21,5 / 21,0 / 20,9 / 37,7 / 51,5 / 51,8	0,9 mΩ
III.3	12	8	50	51,4 / 50,4 / 51,1	0,8 mΩ
III.3a	12	8	50	100,7	> 40 MΩ

Tabelle 4: Übersicht der Prüfungen mit der Bewehrungsanschluss-Variante „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS.

Die Ergebnisse der Prüfungen für die Anschlussvariante „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS (Bild 15) können wie folgt dargestellt werden:

- Die Prüflinge zeigten ein hervorragendes Stoßstromverhalten. Bei der Kontaktierung von Bewehrungsstäben mit 12 mm Durchmesser konnten mehrfach Stoßströme bis zu 50 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen bzw. Beeinträchtigungen des Anschlusses und ohne signifikante Erhöhungen des Übergangswiderstandes zur Bewehrung eingespeist werden. Erst bei einer Stoßstrom-Belastung mit ca. 100 kA Scheitelwert trat eine deutliche Erhöhung des Übergangswiderstandes auf.

5.1.5 Variante „IV“: Einfach fixierter Festpunktriegel

Prüfling Nr.	Durchmesser Bewehrungsstab (mm)	Durchmesser Gewindebolzen (mm)	Betonüberdeckung (mm)	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
IV.1	12	8	50	9,1 / 9,7 / 9,9 / 21,0 / 21,7 / 20,9	2,4 mΩ
IV.2	12	8	50	20,9 / 20,6 / 21,3 / 50,3 / 50,6 / 51,3	2,8 mΩ
IV.3	12	8	50	50,8 / 51,2 / 50,8	> 1 kΩ

Tabelle 5: Übersicht der Prüfungen mit der Bewehrungsanschluss-Variante „IV“: Einfach fixierter Festpunktriegel.

Die Ergebnisse der Prüfungen für die Anschlussvariante „IV“: Einfach fixierter Festpunktriegel (Bild 15) können wie folgt dargestellt werden:

- Die Prüflinge zeigten ein gutes Stoßstromverhalten. Bei der Kontaktierung von Bewehrungsstäben mit 12 mm Durchmesser konnten mehrfach Stoßströme bis zu ca. 20 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen bzw. Beeinträchtigungen des Anschlusses und ohne signifikante Erhöhungen des Übergangswiderstandes zur Bewehrung eingespeist werden. Erst bei einer mehrfachen Stoßstrom-Belastung mit ca. 50 kA Scheitelwert trat eine deutliche Erhöhung des Übergangswiderstandes auf.

5.1.6 Variante „V“: HILTI-Betonschraube HUS-H

Prüfling Nr.	Durchmesser Bewehrungsstab (mm)	Durchmesser Betonschraube (mm)	Betonüberdeckung (mm)	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
V.1	12	12	50	21,2 / 21,2 / 21,0	> 40 MΩ
V.2	12	12	50	10,8 / 11,0 / 11,1	1,5 mΩ
V.2a	12	12	50	27,1 / 25,5 / 25,4	> 40 MΩ
V.3	12	12	50	9,1 / 9,8 / 9,9	5,7 mΩ
V.4	12	12	50	21,4 / 20,8 / 21,2	> 150 kΩ

Bemerkungen: Die hier verwendete Betonschraube hatte einen Außendurchmesser von ca.12 mm.

Bei Prüfung-Nr. V.4 wurde die Schraube an der Spitze abgeschliffen, um die Kontaktfläche zum Bewehrungsstab zu vergrößern.

Tabelle 6: Übersicht der Prüfungen mit der Bewehrungsanschluss-Variante „V“: HILTI-Betonschraube HUS-H.

Die Ergebnisse der Prüfungen für die Anschlussvariante „V“: HILTI-Betonschraube HUS-H (Bild 15) können wie folgt dargestellt werden:

- Die Prüflinge zeigten ein ausreichendes Stoßstromverhalten. Bei der Kontaktierung von Bewehrungsstäben mit 12 mm Durchmesser konnten mehrfach Stoßströme bis zu ca. 10 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen bzw. Beeinträchtigungen des Anschlusses und ohne signifikante Erhöhungen des Übergangswiderstandes zur Bewehrung eingespeist werden. Bei einer mehrfachen Stoßstrom-Belastung mit ca. 20 kA Scheitelwert trat zum Teil bereits eine deutliche Erhöhung des Übergangswiderstandes auf, allerdings

ohne dass die Prüflinge mechanische Zerstörungen oder Beeinträchtigungen aufwiesen.

- Das Abschleifen der Schraube an der Spitze erbrachte keine signifikante Verbesserung.

5.1.7 Zusammenfassende Wertung der Anschlussvarianten

Basierend auf den in Kapitel 5.1.1 bis 5.1.6 dargestellten Einzelergebnissen lässt sich damit zusammenfassen:

1. Bei allen sechs Anschlussvarianten wird ein Stromscheidenwert von $i_{\max} = 10 \text{ kA}$ 10/350 sicher erreicht, ohne dass Zerstörungen bzw. Beeinträchtigungen des Anschlusses oder eine signifikante Erhöhung des Übergangswiderstandes zur Bewehrung auftreten.
2. Bei Anschlussvariante „0a“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch sind Belastungen mit Stoßströmen bis zu ca. 100 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen sicher möglich, aber ggf. bereits ab ca. 10 kA Scheitelwert verbunden mit signifikanten Erhöhungen des Übergangswiderstandes. Dies gilt für ausreichend starke Bewehrungsstäbe.
3. Mit Anschlussvariante „0b“, d.h. bei seitlicher Kontaktierung des Bewehrungsstabes, können Stoßströme bis zu ca. 50 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen sicher in die Bewehrung eingeleitet werden, auch hier aber ggf. bereits ab ca. 10 kA Scheitelwert verbunden mit signifikanten Erhöhungen des Übergangswiderstandes. Dies gilt ebenfalls für ausreichend starke Bewehrungsstäbe.
4. Die Anschlussvarianten „I“: Bolzenschweißen“, „II“: Bolzensetzen und „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS ließen bei der Prüfung die höchsten Stoßströme von bis zu ca. 50 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen und signifikante Erhöhung des Übergangswiderstandes zu. Lediglich bei der Kontaktierung auf sehr dünne Bewehrungsstäbe gibt es Einschränkungen auf ca. 25 kA Scheitelwert. Bei ausreichend starken Bewehrungsstäben waren für die Anschlussvariante „I“ auch Prüfungen mit bis zu ca. 100 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen möglich.
5. Mit der Anschlussvariante „IV“: Einfach fixierter Festpunktriegel sind Belastungen mit Stoßströmen bis zu ca. 20 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen und signifikante Erhöhung des Übergangswiderstandes sicher möglich, sofern übliche Bewehrungsstäbe kontaktiert werden.
6. Mit der Anschlussvariante „V“: HILTI-Betonschraube HUS-H sind Belastungen mit Stoßströmen bis zu ca. 10 kA Scheitelwert ohne Zerstörungen und signifikante Erhöhung des Übergangswiderstandes sicher möglich, sofern übliche Bewehrungsstäbe kontaktiert werden.
7. Die Anschlussvarianten „I“: Bolzenschweißen“ und „II“: Bolzensetzen haben den grundsätzlichen Vorteil, dass damit eine kraftschlüssige Verbindung zur

Bewehrung geschaffen wird. Die anderen Anschlussvarianten beruhen dagegen lediglich auf dem Anpressdruck der Anschlussstange oder –schraube zum Bewehrungsstab. Ist eine Verschweißung mit der Bewehrung allerdings nicht möglich, sind die Anschlussvarianten „I“ und „II“ nicht anwendbar.

8. Bei rel. geringen Betonüberdeckungen (z.B. 20 mm) bieten sich insbesondere die Anschlussvarianten „I“ und „II“ an, wenn nicht geschweißt werden darf auch die Anschlussvarianten „Ob“ und „IV“.

Die Wertung der Ergebnisse für die einzelnen Anschlussvarianten beruht ausschließlich auf den Ergebnissen der durchgeführten Stoßstrom-Prüfungen. Kommerzielle und administrative Gesichtspunkte, z.B. bezüglich der unterschiedlichen Kosten und der unterschiedlichen bereit zu stellenden Infrastruktur für einen Anschluss, werden hier ebenso wenig berücksichtigt wie andere Randbedingungen, z.B. die Zulässigkeit von Schweißen oder Bolzensetzen während des Betriebs benachbarter sensibler elektronischer Systeme.

5.2 Stoßstrom-Tragfähigkeit der Betonbewehrung

Prüfungen zur Stoßstrom-Tragfähigkeit einer Bewehrungsstab-Kreuzung wurden mit den Prüflingen A durchgeführt. Dabei wurden die Stoßströme 10/350 und 8/20 entweder in den oberen Bewehrungsstab direkt oder über die Anschlussvariante „0a“ eingespeist und über den unteren Bewehrungsstab ausgeleitet (vgl. Bild 1). Die Bewehrungsstäbe hatten mindestens 12 mm Durchmesser.

Variiert wurden die Abstände der beiden Bewehrungsstäbe an der Kreuzung, an der sich der Teilblitzstrom als Lichtbogen fortpflanzen muss. Die Abstände betragen zwischen 0 mm und 5 mm. In der Tabelle 7 sind die relevanten Parameter enthalten. Von den Prüfströmen wird hier wieder nur der Parameter Stromscheitelwert aufgeführt; die Parameter Ladung und spezifische Energie können daraus und aus der Stoßstromform abgeleitet werden. Die meisten Prüflinge wurden Mehrfachbelastungen unterzogen. In den Tabellen ist teilweise (sofern messbar und sinnvoll) der Wert des Übergangswiderstandes zwischen den beiden Bewehrungsstäben nach der letzten Belastung genannt, sowie ggf. die mechanische Zerstörung des Prüflings.

Prüfling Nr.	Betonüberdeckung (mm)	Abstand beider Bewehrungsstäbe (mm)	Stoßstromform	Stromscheitelwerte (kA)	Übergangswiderstand / Ergebnis
C3	50	0	10/350	10,4 / 18,7 / 52,5 / 82,7 / 93,6 / 100,6	1,0 mΩ
C2	50	0	10/350	100,7	1,5 kΩ
C5	50	0	10/350	10,4 / 26,0 / 50,9 / 87,5 / 100,1	5,0 kΩ
C6	50	0	10/350	25,5 / 51,4 / 93,8	-

C7	50	1	10/350	51,0 / 51,2 / 51,5	< 1,0 k Ω
C8	50	1	10/350	99,1 / 101,3 / 101,5	< 1,0 k Ω (Bild 16)
C10	50	1	10/350	10,5 / 26,1 / 51,1 / 103,7	> 500 k Ω
B3	50	2	10/350	9,5 / 24,2 / 51,3 / 51,3 / 51,9 / 100,0	zerstört
B4	50	2	10/350	28,7 / 29,3 / 29,4	-
C12	50	3	10/350	50,6 / 51,2 / 51,4	< 1,0 k Ω
C13	50	3	10/350	101,3 / 101,4 / 101,3	zerstört (Bild 17)
B8	50	5	10/350	10,9 / 24,2 / 51,8 / 52,2 / 52,3	-
B9	50	5	10/350	24,0 / 24,7 / 25,2	-
C4	50	0	8/20	98,5 / 99,8 / 100,0	30 k Ω
C9	50	1	8/20	99,2 / 99,4 / 100,1	> 500 k Ω
B2	50	2	8/20	100,0 / 100,8 / 100,9	1,5 m Ω
C15	50	3	8/20	88,3 / 98,5 / 100,8	> 100 k Ω
B9	50	5	8/20	98,2 / 97,7 / 100,0	-
B10	50	5	8/20	99,1 / 100,6 / 100,8	> 75 k Ω

Tabelle 7: Übersicht der Prüfungen zur Stoßstrom-Tragfähigkeit von Bewehrungsstab-Kreuzungen.

Die Ergebnisse der Prüfungen zur Stoßstrom-Tragfähigkeit von Bewehrungsstab-Kreuzungen können wie folgt dargestellt werden:

- Die Prüflinge konnten zum Großteil mehrfach mit Stoßströmen 10/350 bis zu 100 kA Scheitelwert belastet werden, ohne Beschädigungen zu zeigen. Lediglich in zwei Fällen trat bei (Mehrfach-) Belastung mit 100 kA Scheitelwert eine Zerstörung auf (vgl. Bild 17). Eine dreifache Belastung mit 50 kA konnten dagegen alle Prüflinge ohne mechanische Beschädigung überstehen. Die Stoßstromfestigkeit der Bewehrungsstab-Kreuzungen im Beton ist also sehr hoch; bei einer Beton-Überdeckung von 50 mm sind sie mit Stoßströmen 10/350 bis 50 kA Scheitelwert sicher belastbar.

- Die Übergangswiderstände zwischen den beiden Bewehrungsstäben änderten sich zum Teil erheblich. So traten deutliche Erhöhungen des Übergangswiderstandes von eigentlich kontaktierten Bewehrungsstäben (Abstand 0 mm) ebenso auf wie niederohmiger werdende Übergangswiderstände von Bewehrungsstäben mit galvanischer Trennung (vgl. Bild 16). Dieses uneinheitliche Bild lässt also keine tendenzielle Deutung zu.
- Ergänzende Prüfungen wurden mit Stoßströmen 8/20 mit Scheitelwerten von ca. 100 kA durchgeführt. Unabhängig vom Abstand der Bewehrungsstäbe zeigten die Prüflinge keine Beschädigungen, selbst bei mehrfacher Belastung. Dies zeigt, dass die Zerstörung an Trennstellen innerhalb des Betons im wesentlichen eine Folge der spezifischen Energie der Stoßströme ist.
- Vorversuche mit runden Betonkörpern, deren Durchmesser 300 mm betrug, führten teilweise bereits bei rel. geringen Belastungen durch Stoßströme 10/350 mit 25 kA Scheitelwert zu Zerstörungen. Dies ist offensichtlich eine Folge der geringeren seitlichen Betonüberdeckung der runden Betonkörper, wodurch das Energieaufnahme-Vermögen und damit auch die mechanische Festigkeit abnimmt. Da die Bewehrung in der Praxis in weitaus größeren Wänden eingebettet ist, als es die hier vorliegenden Prüflinge simulieren, sind die Ergebnisse der quadratischen Betonprüflinge als realistisch zu bewerten. Voraussetzung dafür ist, dass insbesondere bei in der Praxis realisierten Bewehrungsanschlüssen ein Mindestabstand von Betonkanten, z.B. von Dehnfugen, von ca. 10 cm eingehalten wird.

6. Verfahren zur Prüfung korrekter Bewehrungsanschlüsse

Die Bewehrungsanschlüsse sind gemäß den Ausführungsbeschreibungen in Kapitel 4.2 herzustellen. Genauere Spezifikationen sind in [9, 11] enthalten. Darüber hinaus sollten die Bewehrungsanschlüsse bei der praktischen Realisierung hinsichtlich ihrer Korrektheit und Qualität geprüft werden [14]. Dafür bietet sich die im Folgenden dargestellte Vorgehensweise als Prüfung während der Errichtung an (Baubegleitende Prüfung).

Es ist unbedingt zu vermeiden, dass ein Anschluss an die Bewehrung an einen vollständig elektrisch isolierten oder sehr hochohmig verbundenen Bewehrungsstab vorgenommen wird. Dies lässt sich erreichen, indem direkt nach der Herstellung des Anschlusses eine elektrische Durchgangsprüfung als baubegleitende Prüfung durchgeführt wird.

Der Ablauf der elektrischen Durchgangsprüfung kann sich wie folgt darstellen:

- Als Bezugspunkt für die neu hergestellten Bewehrungsanschlüsse wird eine zentrale Stelle im jeweiligen Bauabschnitt des Gebäudes gesucht (z.B. Potentialausgleichschiene). Geprüft wird nun, ob von jedem herausgeführten Anschluss jeweils ein niederohmiger, elektrischer Durchgang zum Bezugspunkt gemessen werden kann.

- Alternativ dazu kann auch geprüft werden, ob von einem jeweils neu hergestellten Anschluss ein niederohmiger, elektrischer Durchgang zum vorhergehenden Anschluss gemessen werden kann. Dies wird dann bis zum letzten Bewehrungsanschluss im jeweiligen Bauabschnitt des Gebäudes durchgeführt.

Die elektrische Durchgangsprüfung sollte nach dem Strom-/Spannungs-Verfahren durchgeführt werden. Dabei wird ein Strom I (in der Größenordnung einiger A und, wenn möglich, mit einer von 50 Hz verschiedenen, rel. niedrigen Frequenz) zwischen dem Bezugspunkt und dem zu prüfenden Bewehrungsanschluss eingespeist und der auftretende Spannungsfall U zwischen den beiden Punkten gemessen. Aus dem Verhältnis U/I ergibt sich der Widerstandswert, der dokumentiert werden sollte. Der Widerstand der Verbindungsleitungen (vom Stromgenerator zu Bezugspunkt und zu Bewehrungsanschluss) wird dabei als Ergebnis einer Nullmessung herausgerechnet.

Mit der Durchgangsprüfung nach dem Strom-/Spannungs-Verfahren wird gegenüber einer Prüfung mit einem Ohmmeter ein genauerer Wert des Widerstands gemessen, da Übergangswiderstände durch die Einspeisung eines größeren Stroms teilweise reduziert, teilweise auch „weggebrannt“ werden, wie es auch bei Blitzeinschlag der Fall wäre.

Die Anschlussstellen an die Bewehrung sind Bestandteil des Blitzschutzsystems der Anlage. Als sogenannte passive Maßnahme erscheint allerdings eine wiederkehrende elektrische Prüfung aus folgenden Gründen und unter Berücksichtigung der folgenden Randbedingungen nicht erforderlich:

- Bei Nutzung der Anschlussvarianten „I“: Bolzenschweißen und „II“: Bolzensetzen entstehen kraftschlüssige, dauerhafte Verbindungen zur Bewehrung. Hier ist eine wiederkehrende Prüfung grundsätzlich nicht erforderlich.
- Bei Nutzung der Anschlussvarianten „0“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch, „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS, „IV“: Einfach fixierter Festpunktriegel und „V“: HILTI-Betonschraube HUS-H wird der elektrische Kontakt zur Bewehrung über den Anpressdruck der Anschlussstange oder –schraube hergestellt. Die Anschlussstellen dienen dabei im wesentlichen dazu, im Falle von direkten und indirekten Blitzeinschlägen einen rel. ungehinderten Stromfluß über die Bewehrung zu ermöglichen. Ihr Zweck ist also der Blitzschutz-Potentialausgleich, einschließlich der Sicherstellung einer elektromagnetischen Schirmwirkung, insbesondere bei höheren Frequenzen. Auf dauerhafte, sehr niederohmige Übergangswiderstände muss dabei nicht besonders geachtet werden. Die Anschlüsse dürfen also nicht für Schutzleiter-Funktionen herangezogen werden.
- Beim Blitzschutz-Potentialausgleich von außen eingeführter Leitungssysteme (Rohrleitungen, Schirmschienen von Erdkabeltrassen, Blitzschutz-Beschaltungen) können im Einzelfall höhere Werte als die hier jeweils für die einzelnen Anschlussvarianten als tolerierbar festgestellten Stoßstrom-Belastungen auftreten. Dann muss durch eine entsprechende Parallelschaltung solcher einfacher Bewehrungsanschlüsse die Belastung für

jeden einzelnen Anschluss wieder auf die als tolerierbar festgestellten Stoßstrom-Belastungen reduziert werden.

- Die Korrosionsbeständigkeit der Anschlussstellen muss gesichert sein, insbesondere durch die nachträgliche, vollständige Abdichtung des Loches im Beton.

Aus den genannten Gründen erscheint eine wiederkehrende Sichtprüfung der Anschlüsse als ausreichend.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Aus den in Abschnitt 3 ausgewerteten Literaturquellen läßt sich ableiten, dass über hochohmige Verbindungen von Betonbewehrungen Teilblitzströme mit Scheitelwerten von 10 kA sicher abgeleitet werden können, ohne dass der Beton beschädigt wird. Dies gilt gleichermaßen auch für Erdkurzschlussströme mit Scheitelwerten von einigen kA.

Bei eigenen Prüfungen mit Stoßströmen an sechs unterschiedlichen Anschlussvarianten an die Bewehrung konnte das o.g. Ergebnis bestätigt und weitgehend sogar noch übertroffen werden. Alle geprüften Anschlussvarianten konnten Stoßströme 10/350 mit 10 kA Scheitelwert sicher in die Bewehrung einleiten. Die kraftschlüssigen Anschlussvarianten „I“: Bolzenschweißen und „II“: Bolzensetzen sowie die Variante „III“: Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS ließen dabei die höchsten Stromscheitelwerte von bis zu 50 kA 10/350 zu. Einschränkungen gab es lediglich bei sehr dünnen Bewehrungsstäben.

Wurde die Strombelastung zu hoch, so waren zunächst Erhöhungen des Übergangswiderstandes zwischen Anschluss und Bewehrung die Folge; mechanische Zerstörungen traten erst bei Stromscheitelwerten von größer 50 kA 10/350 auf.

Bei rel. geringen Betonüberdeckungen sind nicht alle Varianten anwendbar. Hier bieten sich die insbesondere die Anschlussvarianten „I“ und „II“ mit sicher eingeleiteten Stoßströmen 10/350 bis zu 50 kA Scheitelwert an, wenn nicht geschweißt werden darf auch die Anschlussvarianten „Ob“ und „IV“ mit sicher eingeleiteten Stoßströmen 10/350 bis zu 10 kA bzw. 20 kA Scheitelwert.

Über hochohmige Verbindungen innerhalb von Betonbewehrungen (Trennstellen bis zu 5 mm Schlagweite) konnten Stoßströme 10/350 bis 50 kA Scheitelwert sicher abgeleitet werden, ohne dass mechanische Zerstörungen auftraten. Insofern ist der Einsatz der geprüften Anschlusstechniken auch bei üblichen vorhandenen Betonbewehrungen, die nicht mehr durch konsequentes durchgängiges Verschweißen oder Verklemmen blitzschutz-technisch optimiert werden können, grundsätzlich möglich. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass selbst bei Einsatz der kraftschlüssigen Anschlussvarianten eine niederohmige Verbindung zum Potentialausgleichsystem nicht dauerhaft sichergestellt wird. Solche Anschlüsse können also keine Schutzleiter-Funktionen erfüllen.

Die geprüften Anschlussvarianten eignen sich demzufolge insbesondere zur Ertüchtigung des Blitzschutzsystems von existierenden Gebäuden. Dies gilt für die Verbesserung des Blitzschutz-Potentialausgleichs von metallenen Einrichtungen, wie Elektronik-Schränken, Kabeltrag-Konstruktionen, Rohrleitungen, ebenso wie für die Verbesserung der elektromagnetischen Schirmwirkung von Stahlbetonbauten.

Bei Neubauten sollte dagegen nach wie vor dem konsequenten durchgängigen Verschweißen oder Verklemmen von Bewehrungsstäben oder von zusätzlich in die Bewehrung eingelegten Eisenstäben der Vorzug gegeben werden. An diese definiert durchverbundenen Stäbe kann der Anschluss natürlich nicht nachträglich vorgenommen werden, sondern muss im Zuge der Errichtung des Gebäudes vor der Betonfüllung realisiert werden. Damit wird ein dauerhaft niederohmiger Anschluss sichergestellt, der auch Schutzleiter-Funktionen erfüllen kann.

Literatur

- [1] DIN V ENV 61024-1 (VDE V 0185 Teil 100) : 1996-08: Blitzschutz baulicher Anlagen – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- [2] DIN VDE 0185-103 (VDE 0185 Teil 103): 1997-09: Schutz gegen elektromagnetischen Blitzimpuls – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- [3] KTA 2206: 2000-06: Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen.
- [4] Zischank, W.: Der Einfluss von Baustoffen auf die Stosspannungsfestigkeit von Nährungsstrecken bei Blitzeinschlägen. 18th Intern. Conference on Lightning Protection (ICLP), Paper 3.3, München, 1985.
- [5] Neuhaus, H.: VDE-Schriftenreihe 44; Blitzschutzanlagen - Erläuterungen zu DIN 57185 / VDE 0185. VDE-Verlag Berlin – Offenbach, 1983.
- [6] Pigler, F.: EMV und Blitzschutz leitetechnischer Anlagen – Planung und Durchführung von Maßnahmen zur elektromagnetischen Verträglichkeit. Siemens AG Berlin – München, 1990.
- [7] Roth, A.F.; Oster, R.: Strombelastungsversuche an Fundamenterdern. 20th Intern. Conference on Lightning Protection (ICLP), Paper 3.5, Interlaken (CH), 1990.
- [8] Leite, D.M.; Kameyama, F.H.: Use of the concrete reinforcing steel as natural components of external lightning protection systems: Laboratory investigations. 20th Intern. Conference on Lightning Protection (ICLP), Paper 3.6, Interlaken (CH), 1990.
- [9] Deutsches Patent DE 198 53 332 C1: Verfahren zur elektrischen Kontaktierung von Betonarmierungen. 07.09.2000.
- [10] DIN EN 50164-1 (VDE 0185 Teil 201): 2000-04: Blitzschutzbauteile - Teil 1: Anforderungen für Verbindungsbauteile.

- [11] TÜV Süddeutschland: Prüfbescheid BB-EE 1 / PB 302 / 2000 zu der TÜV-Typprüfung von Bewehrungsanschlusstechniken für den Blitzschutz-Potentialausgleich. 26.09.2000.
- [12] Zischank, W.: Eine Crowbar-Funkenstrecke in einem kapazitiven Stoßstromgenerator zur Simulation direkter Blitzströme. 17th Intern. Conference on Lightning Protection (ICLP), Den Haag (NL), 1983.
- [13] Drilling, Ch.; Droidner, M.; Jordan, E.G.; Meppelink, J.: A new generator for testing SPDs using multiple lightning current impulses for combined tests with follow currents. 24th Conference on Lightning Protection (ICLP), Paper 9a.4, Birmingham (UK), 1998
- [14] Pigler, F.: Nachweis leitender Verbindungen zwischen den Bauteilen bestehender Anlagen. 20th Intern. Conference on Lightning Protection (ICLP), Paper 3.1, Interlaken (CH), 1990.

Danksagung

Die Untersuchungen und insbesondere die praktischen Prüfungen im Hochstromlabor des BET wurden im Rahmen von Aufträgen folgender Firmen durchgeführt:

- RWE Energie AG, 45117 Essen;
- Kernkraftwerk Stade GmbH, 21657 Stade;
- Bayernwerk Kernenergie GmbH, 80335 München.

Die Autoren bedanken sich bei den genannten Firmen für die finanzielle Unterstützung.

Bildteil

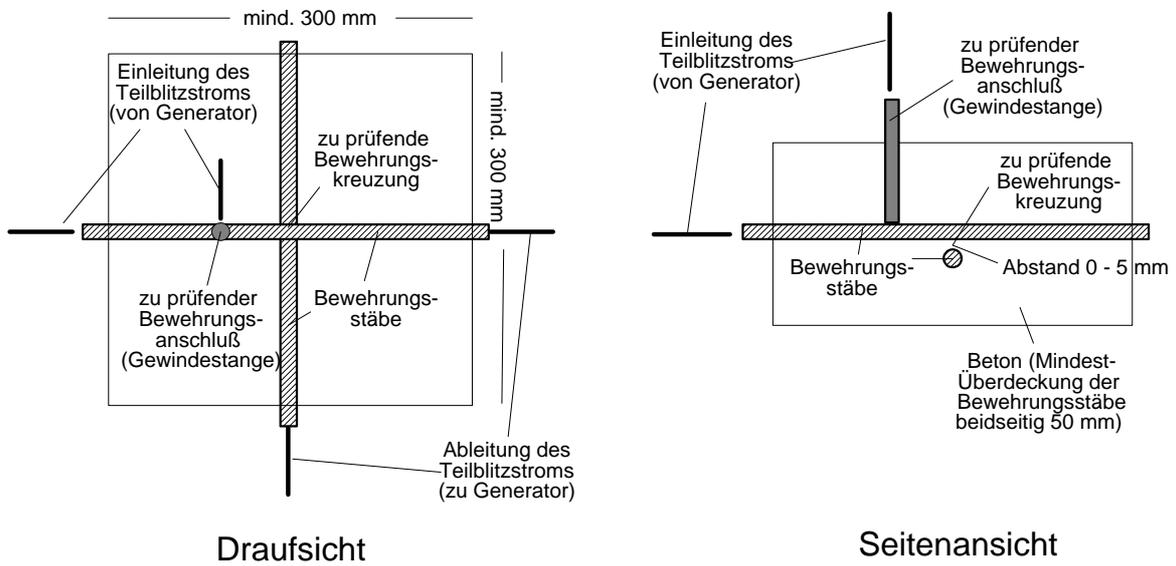


Bild 1: Prüfling A: Quadratischer Betonkörper mit einer Bewehrungsstab-Kreuzung.



Bild 2: Prüfling A: Anordnung der Bewehrungsstäbe.



Bild 3: Prüfling A: Detail der Kreuzung (Abstand 1 mm).



Bild 4: Prüfling A: Anordnung bei Prüfung.

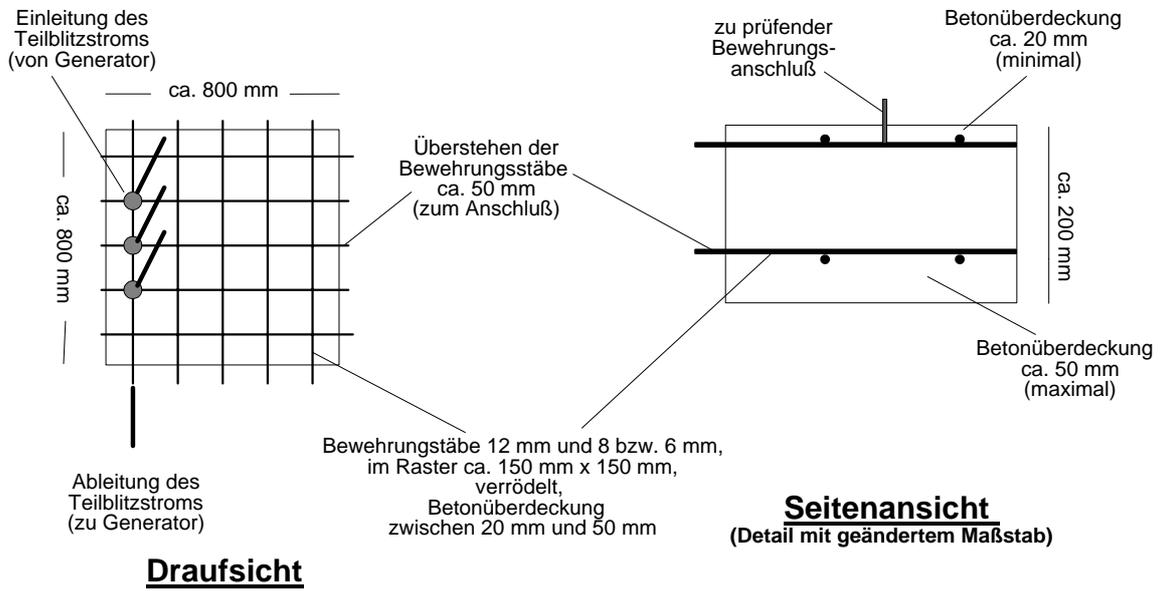


Bild 5: Prüfling B: Betonplatte 800 x 800 mm² mit mehreren Anschlüssen.



Bild 6: Prüfling B: Anordnung bei Prüfung.

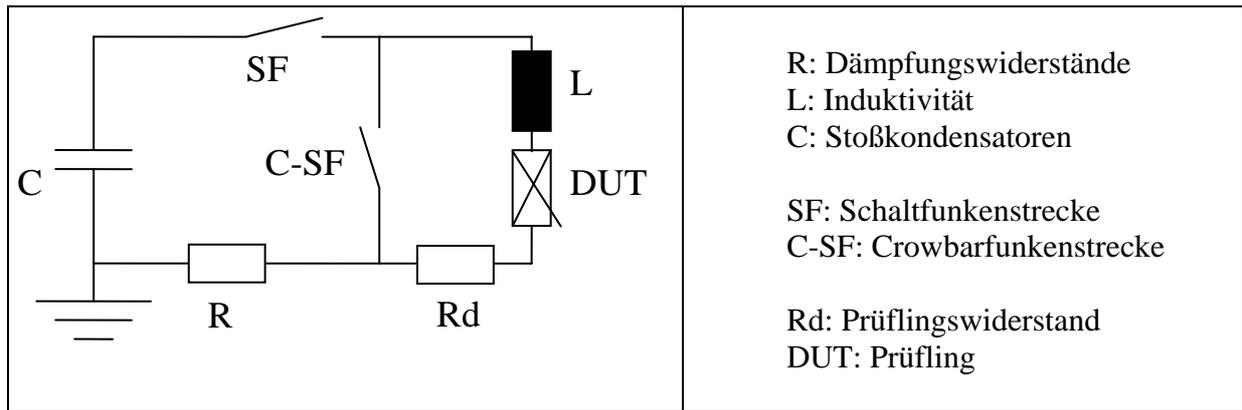


Bild 7: Ersatzschaltbild des Generators zur Prüfung mit Stoßströmen 10/350.



Bild 8: Gesamtansicht des Generators im BET.



Bild 9: Anschlussvariante „0“: Gewindestange mit Metalldübel im Bohrloch.



**Bild 10: Gewindestange mit Metalldübel vor und nach einer Stoßstrom-Belastung
10/350 mit 100 kA Scheitelwert.**



Bild 11: Gewindestange mit Metalldübel bei seitlicher Kontaktierung (Anschlussvariante „0b“) nach der Prüfung (Prüfling D4).

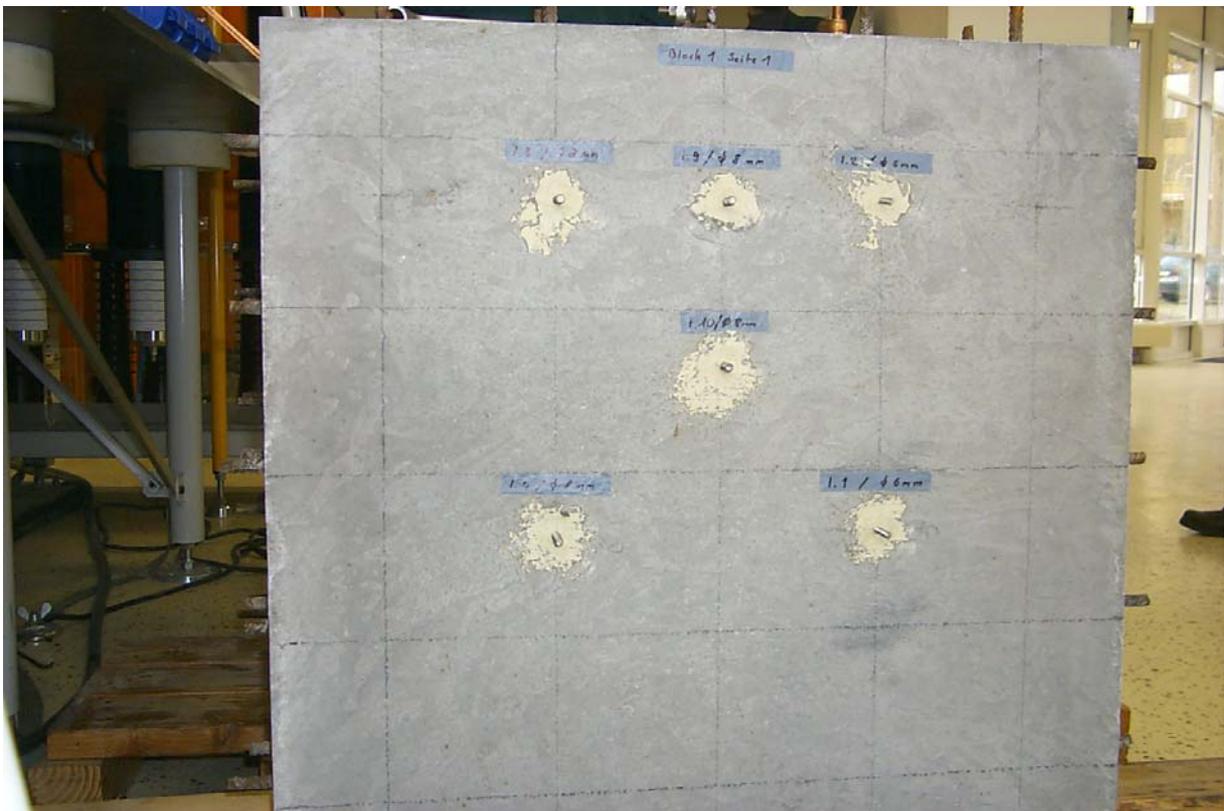


Bild 12: Anschlussvariante „I“: Bolzenschweißen (Prüflinge I.1 – I.4, I.9, I.10).



Bild 13: Anschlussvariante „I“: Zerstörter Prüfling I.5 nach der Prüfung.



Bild 14: Anschlussvariante „II“: Bolzensetzen.



Bild 15: Anschlussvarianten „III“, „IV“, „V“:

- Hinterschneidanker Liebig Superplus BLS (oben links und rechts, unten rechts);
- Einfach fixierter Festpunktriegel (2. Reihe links und rechts, 3. Reihe rechts);
- HILTI-Betonschraube HUS-H (3. Reihe links und mitte, unten links).



Bild 16: Prüfung der Bewehrungsstab-Kreuzung im Beton: Lediglich geringfügige Ausschmelzung an freigelegter Bewehrung des Prüflings C8 nach dreimaliger Belastung mit 100 kA 10/350.



Bild 17: Prüfung der Bewehrungsstab-Kreuzung im Beton: Zerstörter Prüfling C13 nach dreimaliger Belastung mit 100 kA 10/350.