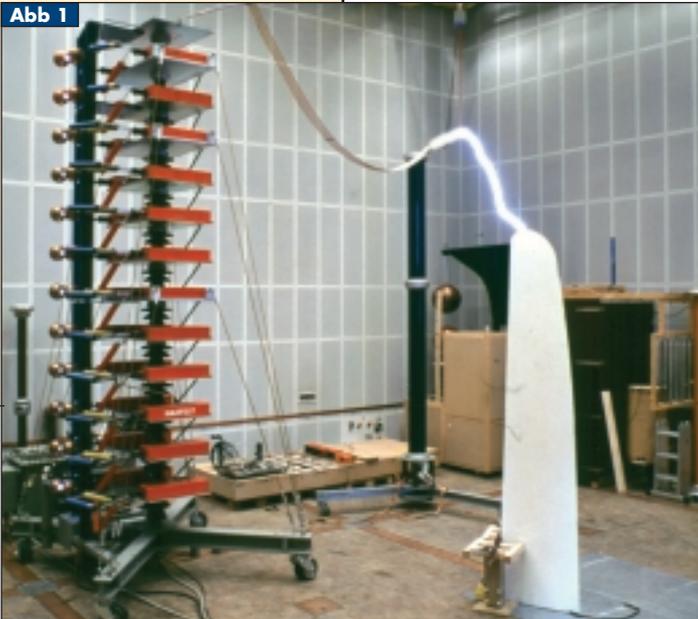




## Blitzschutz für Windenergieanlagen

Abb 1



- ▶ **Blitzschutzsysteme schützen zuverlässig vor schweren Schäden**
- ▶ **Blitzschutzkosten kleiner 1% der Gesamtinvestition**
- ▶ **Schäden überwiegend an Altanlagen ohne Blitzschutz**

*Identifizierung möglicher Einschlagpunkte an Rotorblättern mit einem 1,2 MV Stoßspannungs-Generator*

**D**ie Blitzschlaggefährdung von Bauwerken wächst in etwa quadratisch mit der Bauwerkshöhe. Schon für kleinere Windenergieanlagen ist statistisch mit einem Blitzschlag innerhalb einiger Jahre zu rechnen. Megawatt-Windenergieanlagen erreichen Turmhöhen bis 90 m und Rotordurchmesser von 70 m. Je nach Standort erleiden Objekte dieser Größe einige 10 Blitzschläge jährlich.

Moderne Windenergieanlagen verfügen über ein Blitzschutzsystem, das sowohl die Struktur als auch die elektrische und elektronische Ausstattung vor Schäden schützt. Blitzschlag ist daher nur selten die Ursache für einen längeren Anlagenstillstand. Im Einzelfall verursachen Blitze aber schwerwiegende Schäden bis hin zum Totalausfall und haben überdurchschnittlich hohe Reparaturkosten und Ausfallzeiten zur Folge. Für Hersteller, Betreiber und Versicherer ist die genaue Kenntnis des Schadenspotentials sowie der Abhängigkeiten von Größe, Standort, Meteorologie und Blitzschutzsystem von großer Bedeutung.

Ziel eines Forschungsvorhabens der Fördergesellschaft Windenergie und der Universität der Bundeswehr München war es, Vorschläge für die weitere Verbesserung der eingesetzten Blitzschutzsysteme zu erarbeiten. Hierzu wurde eine Vielzahl gemeldeter Blitzschadensereignisse über eine Fragebogen-Aktion erfasst und statistisch ausgewertet. Die Analyse von Blitzstrommessungen, die über 20 Jahre an einem Fernmeldeturm durchgeführt wurden, ermöglichte die Festlegung von Blitzstrom-Gefährdungskennwerten. Über den Abgleich mit Daten des Deutschen Wetterdienstes konnten Korrelationen zwischen meteorologischen Bedingungen und der Blitzschlagwahrscheinlichkeit ermittelt werden. Aufbauend auf den Gefährdungskennwerten führte eine Arbeitsgruppe realitätsnahe Hochspannungs- und Hochstromtests an gebräuchlichen Fangeinrichtungen von Rotorblättern durch.

An dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsvorhaben beteiligten sich verschiedene Hersteller, Betreiber sowie Versicherer, Zertifizierer und Energieversorger.

## ► Kennwerte von Blitzereignissen

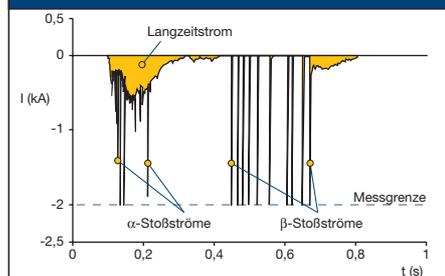
Über einen Zeitraum von mehr als zwanzig Jahren wurden an dem Fernmeldeturm auf dem Hohen Peißenberg Blitzstrommessungen bei direkten Einschlägen in den Turm durchgeführt. Aufgrund der Abmessungen und Lage des Objektes können die Ergebnisse auf Megawattanlagen an Mittelgebirgsstandorten übertragen werden.

Typisch für die Objektgröße ist, dass Blitzentladungen fast ausschließlich von der Turmspitze zur Wolke hin stattfinden (Aufwärtsblitze). Die Gefährdungskennwerte unterscheiden sich von denen der Abwärtsblitze, von denen kleinere Anlagen überwiegend betroffen sind (Abb 2). Typisch für einen Aufwärtsblitz ist ein Langzeitstrom

**Abb 2 Gefährdungsgrenzwerte für 95% aller Auf- und Abwärtsblitze**

Kennwert	Effekt Anlagenteile	Gefährdete	Aufwärtsblitz	Abwärtsblitz
Scheitelwert der Stromstöße	Potentialanhebung der WEA, Spannungsfälle längs Kabelschirmen	Energetechnische Systeme; Kontrollsysteme	25 kA	100 kA
Ladung der Stromstöße und des Langzeitstroms	Ausschmelzung mechanische Einwirkung	Rotorblätter, Lager	300 C	150 C
Spezifische Energie der Stromstöße	elektromechanische Einwirkung, Erhitzung, Verdampfung	Rotorblätter, stromdurchflossene Leiter (z.B. Blitzableiter)	100 kJ	2,5 MJ
mittlere Stirn-Stromsteilheit der Stromstöße	magnetische Induktion	Kontrollsysteme, energetechnische Systeme	100 kA/μsec.	100 kA/μsec.
Anzahl der Stromstöße	repetierende elektromagnetische Impulse	Kontrollsysteme	15	15

**Abb 3 Typischer Strom eines Aufwärtsblitzes**



bei dem innerhalb einiger zehntel Sekunden eine elektrische Ladungsmenge von bis zu einigen hundert Coulomb fließen (Abb 3). Die resultierenden hohen Stromstärken sind für thermische Schäden wie z.B. Schmelzungen an Lagern verantwortlich. Der Langzeitstrom wird überlagert von Stromstößen im Mikrosekundenbereich mit Scheitelwerten von einigen tausend Ampere. Diese kön-

nen mitverantwortlich sein für Schäden an nicht metallenen Rotorblättern, sind aber insbesondere aufgrund ihrer Störwirkung auf die energetechnischen Systeme und die Regelungs- und Steuerungselektronik bedeutsam.

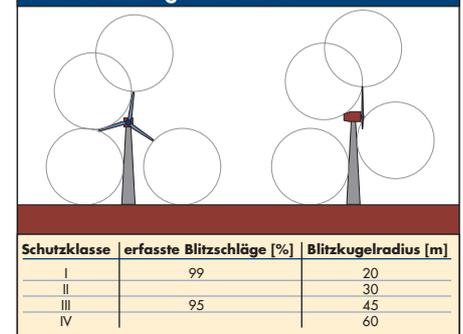
Die Dimensionierung und Prüfung von Blitzschutzeinrichtungen erfolgt anhand von Gefährdungskennwerten (Abb 2).

## ► Potentielle Blitz-Einschlagstellen

Potentielle Einschlagstellen in Windenergieanlagen können durch das international eingeführte und in verschiedenen Normen (z. B. im Entwurf zur IEC 61400-24 TS Ed. 1.0) verwendete „Blitzkugelverfahren“ bestimmt werden: An einem maßstabgetreuen Modell der Anlage wird eine „Blitzkugel“ abgerollt, deren Radius in Abhängigkeit von der Schutzklasse gewählt wird

(Abb 4). Alle Flächen, Kanten und Punkte, die von der Kugel berührt werden, stellen potentielle Einschlagpunkte dar. Nicht-berührte Bereiche sind im Rahmen der Schutzklasse einschlaggeschützt. Bei Windenergieanlagen ist darauf zu achten, dass unterschiedliche Rotor- und Gondelstellungen berücksichtigt werden.

**Abb 4 Blitzkugelverfahren**



## ► Statistik aufgetretener Schäden

Über eine Fragebogenaktion wurden 168 Schadensfälle an Windenergieanlagen erfasst und ausgewertet, die im Zeitraum 1992 bis 1998 gemeldet wurden. Betroffen waren in erster Linie Anlagen, die noch nicht mit einem Blitzschutzsystem für die Rotorblätter ausgestattet waren. Aus diesem Grund sind ältere und damit im Durchschnitt kleinere Anlagen überrepräsentiert. Für die statistische Auswertung stehen neben den Fragebogendaten

der FGW auch Ergebnisse des ISET aus dem 250 MW Programm zur Verfügung. Blitze verursachen bei der Gesamtheit der untersuchten Anlagen etwa 4% aller Anlagenstörungen. Statistisch treten etwa 5-13 blitzbedingte Störungen in 100 WEA-Betriebsjahren auf, die Wahrscheinlichkeit für ein Blitzschadensereignis ist jedoch regional unterschiedlich. WEA in Mittelgebirgsanlagen sind etwa doppelt so häufig betroffen wie

Anlagen an der Küste oder im Norddeutschen Tiefland (Abb 5).

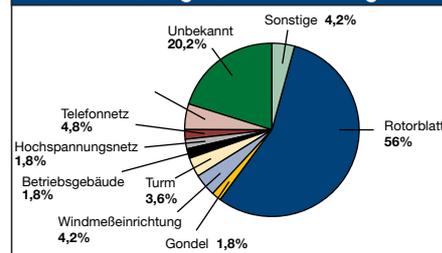
In zwei Dritteln aller Fälle waren indirekte Einschläge z. B. in Versorgungsleitungen Ursache der Störung.

Direkte Einschläge waren mit über 80% in Rotorblättern zu verzeichnen, die übrigen verteilen sich relativ gleichmäßig auf Einschlagpunkte wie Gondel, Turm Windmess-einrichtung und Betriebsgebäude.

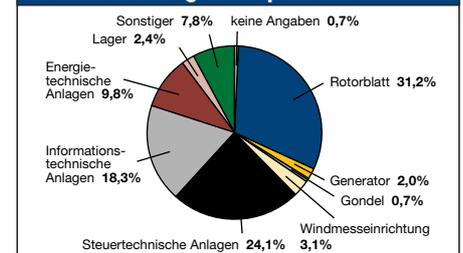
**Abb 5 Regionale Verteilung von Blitzschäden an WEA (Quelle: ISET)**

Zeitraum: 1992-1999	Küste	Nordd. Tiefebene	Mittelgebirge	Tiefebene bewaldet	Gesamt (gewichtet)
Meldungen je 100 Betriebsjahre	5	8	8	14	8
davon Direkt-einschläge [%]	34	23	22	29	28

**Abb 6 Verteilung der Blitz-Einschlagstellen**



**Abb 7 Beschädigte Komponenten**



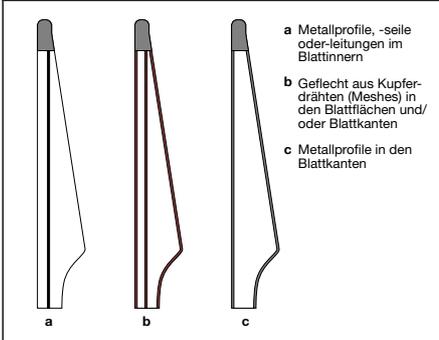
# ► Untersuchung verschiedener Rotorblattschutzsysteme

Rotorblätter sind mit einem Anteil von über 80% die mit Abstand einschlaggefährdetsten Komponente. Rotorblatt-Blitzschutzsysteme haben die Aufgabe, Schäden im Einschlagspunkt durch geeignete Fangeinrichtungen zu vermeiden (Abb 8) und den Blitzstrom über einen niederohmigen, definierten Stromweg abzuleiten (Abb 9). Mit dem weiteren Größenwachstum der Windenergieanlagen werden in Zukunft zunehmend Kohlefaser-Rotorblättern eingesetzt werden. Diese haben, wie Erfahrungen aus

**Abb 8 Vor- und Nachteile verschiedener Rotorblattschutzsysteme**

	Vorteil	Nachteil
Geflecht aus Kupferdrähten (Meshes) um die gesamte Blattspitze 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einlaminiert auf die Blattoberfläche relativ einfach</li> <li>keine Entladung durch die Blattstruktur ins Blattinnere</li> <li>Schutz des gesamten Blattes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anfällig für Zerstörung der Meshstruktur am Einschlagspunkt</li> <li>Reparatur und Austausch schwierig</li> </ul>
Austauschbare Metallspitze oder Kappe 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relativ geringe Ausschmelzungen am Einschlagspunkt</li> <li>Austausch möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufwändige Konstruktion und Befestigung an der Glasfaserstruktur</li> <li>Leitfähige Verbindung zur Ableitung muss sichergestellt sein</li> </ul>
Austauschbare Metallrezeptoren 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relativ geringe Ausschmelzungen am Einschlagspunkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kleine Einfangfläche; kein Schutz der Kanten an der Blattspitze</li> <li>Aufwändige Konstruktion</li> <li>Leitfähige Verbindung zur Ableitung muss sichergestellt sein</li> </ul>
Metallprofile (in Blattkanten) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relativ geringe Ausschmelzungen am Einschlagspunkt</li> <li>keine Entladung durch die Blattstruktur ins Blattinnere</li> <li>Zusätzlicher Schutz vor Seiteneinschlägen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufwändige Konstruktion und Befestigung an der Glasfaserstruktur</li> <li>Austausch nicht ohne weiteres möglich</li> <li>Betriebsfestigkeits-Auslegung erforderlich</li> </ul>

**Abb 9 Ableitungen in WEA**



den Anfängen der Windenergienutzung zeigen, aufgrund der Leitfähigkeit des Materials erhöhte Schutzanforderungen. Sinnvoll ist hier die vollständige Überdeckung der Kohlefaser-Strukturen am Blatt mit einem

Geflecht aus Kupferdrähten (Mesh). Für die Untersuchungen standen sechs Rotorblattproben zur Verfügung, die mit vier verschiedenen Blitzschutzsystemen ausgestattet waren.

# ► Schutz weiterer Anlagenkomponenten

Neben den Rotorblättern sind auch Turm, Gondel und Windmessenrichtungen potentielle Einschlagstellen. Bewährt haben sich Fangstangen an den hinteren Ecken der Gondel, die zusammen mit dem Rotor den Schutzraum erheblich erweitern. Ideal – auch in Hinblick auf den EMV-Schutz – ist eine Gondel mit einer vollständigen metallenen Umhüllung. In der Regel wird die Ableitung des Blatt-Blitzschutzes auf die Rotornabe geführt.

Triebstrang und Generator müssen dann durch einen geerdeten Schleifkontakt an der Welle geschützt werden; Untersuchungen zeigen aber, dass dieser Schutz die Lager nur dann hinreichend entlastet, wenn der Triebstrang gegenüber dem Maschinenfundament isoliert aufgebaut wird und zwischen Getriebe und Generator ein Isolierflansch eingesetzt wird. Alternativ ist auch eine Ableitung an der Blattwurzel direkt in das Maschinenfunda-

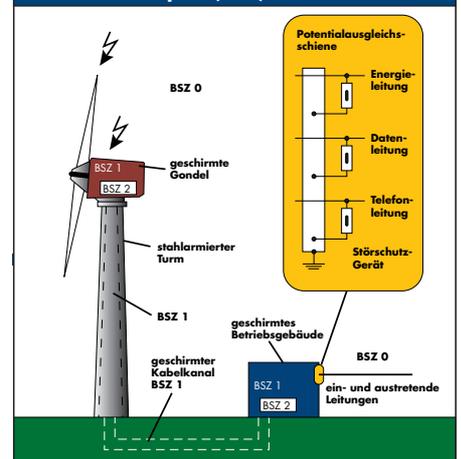
ment möglich. In diesem Fall können Funkenstrecken für definierte Übergänge sorgen. Grundlage für alle Blitzschutzmaßnahmen ist eine ausreichende Erdung, d. h. ein niedrigimpedanter Ableitweg für den Blitzstrom von der Anlage zur Erde. Wichtiger als ein bestimmter Erdungswiderstand sind jedoch Anordnung und Dimensionierung der Erdungsanlage.

# ► Schutzzonenkonzept

Sowohl die von Blitzschlägen ausgehende elektromagnetische Strahlung als auch leitungsgebundenen Störungen nach Einschlägen oder Einkopplungen in die Versorgungsleitungen können zu Überspannungsschäden in der Anlagensteuerung und den datentechnischen Einrichtungen führen. Diese Anlagenkomponenten haben in der Schadensstatistik einen Anteil von über 50%. Mit dem Blitz-Schutzzonen-Konzept wird das Ziel verfolgt, elektronische Komponenten vor den indirekten Einwirkungen eines Blitzschlages in die WEA oder in die nähere Umgebung zu schützen. Die Anlage wird in verschiedene Blitzschutzzonen (BSZ) unterteilt, die von BSZ 0 (direkter Blitzeinschlag möglich, elektromagnetische Strahlung ungedämpft) bis hin zu BSZ 2 (elektronische Anlagen) reichen

(Abb 10). In das Blitzschutzkonzept müssen auch die Trafostation und die Zu- und Ableitungskabel eingebunden werden. Beim Übertritt von einer BSZ zur nächsten werden alle Leitungen mit Störschutzgeräten beschaltet, die leitungsgebundene Störungen reduzieren. Elektromagnetische Strahlung wird durch Abschirmmaßnahmen gedämpft. Die Schirme und Schutzelemente werden so ausgelegt, dass die vom Hersteller angegebene Störfestigkeit der Geräte (gemäß DIN VDE 847 Teil 4-X) nicht überschritten wird. Bei sorgfältiger Planung sollten die Investitionen für einen umfassenden Blitzschutz 1% der Anlagenkosten nicht überschreiten. Dennoch war das Zonen-Schutzkonzept bei keiner der in dem Forschungsvorhaben untersuchten Windenergieanlagen vollständig umgesetzt worden.

**Abb 10 Anwendung des Blitz-Schutzzonenkonzeptes (BSZ) bei einer WEA**



## ► Fazit

Noch vor wenigen Jahren führten Blitzschläge in Windenergieanlagen häufig zu schweren Schäden. So wurden 1995 etwa 80% der von Versicherungen beglichene Schadenskosten durch Blitze verursacht. Heute haben Gewitter für die Anlagenbetreiber an Schrecken verloren. Die in den Schadensstatistiken dokumentierten Ausfallzeiten betreffen in der Regel Altanlagen mit unzureichendem Blitzschutz. Im Schadensfall werden bei diesen meist alle Rotorblätter ausgetauscht und die Anlage mit einem Blitzschutzsystem nachgerüstet. Wenn geeignete Rotorblätter nicht mehr verfügbar sind, entsprechen zerstörte Rotorblätter in der Regel einem Totalverlust der Anlage. Einzelne Versicherer lagern deshalb Flügelprofile für verschiedene Anlagentypen ein.

Nachgerüstete Anlagen überstehen in der Regel Blitzschläge ohne gravierende Folgen. Wie bei modernen Windkonvertern werden viele Einschläge nicht oder erst bei Wartungsarbeiten aufgrund kleinerer Brandmarken in der Rotorblattoberfläche registriert. Nur unter ungünstigen Umständen sind seitliche Einschläge in ungeschützte Blattzonen möglich. Mit der Stilllegung und Nachrüstung von Altanlagen werden Blattschäden an Bedeutung verlieren.

Auch in modernen Anlagen kann der Blitzschutz weiter optimiert werden. Dabei tritt der Schutz von Elektrik und Elektronik immer mehr in den Vordergrund. Mehr als die Hälfte aller blitzbedingten Ausfälle betrifft diese Baugruppen. Häufig beschränken sich die notwendigen Reparaturarbeiten auf den Austausch von Sicherungen oder Elektronikkomponenten und einen Anlagen-Neustart. Es können aber lange ertragsmindernde Stillstandszeiten auftreten, wenn Wartungsteams oder Ersatzteile nicht gleich verfügbar sind. Insbesondere bei Offshore-Anlagen verursachen geringfügige Störungen, die nicht von ferne behoben werden können, hohe Kosten.

Ein effektiver Schutz bietet das vorgestellte Blitz-Schutzzonenkonzept nach DIN VDE 0185 Teil 103. Dieses läßt sich bei sorgfältiger Anlagenplanung mit Kosten realisieren, die weniger als 1% der Gesamtinvestition ausmachen.

Die vorgestellten Ergebnisse der Forschungsarbeiten flossen in den Entwurf der neuen Norm IEC-TS 61400-24: „Lightning protection for Wind turbines“ ein, der den Mitgliedsländern der internationalen Elektrotechnischen Kommission derzeit zur Stellungnahme vorliegt.

## ► PROJEKTADRESSEN

- Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik  
Fakultät Elektrotechnik  
Prof. Dr. Johannes Wiesinger  
Universität der Bundeswehr München  
Werner Heisenberg Weg 39  
85577 Neubiberg
- Fördergesellschaft Windenergie e.V.  
Dr. Thomas Neumann  
Weidestr. 126  
22083 Hamburg

## ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

### Literatur

- Fördergesellschaft Windenergie e.V., Hamburg (Hrsg.); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bonn (Hrsg.): Blitzschutz von Windenergieanlagen (Kurzfassung). Abschlußbericht. BMWi-Forschungsvorhaben 0329732. Juli 2000. 25 S.
- Cotton, I.; Jenkins, N. u.a.: Lightning protection of wind turbines. A designers guide to best practice. Preview Edition. Manchester (UK) : Univ. of Science and Technology, Jan. 1999.

### Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur, Adressen, Ansprechpartner und Internet-Links sind unter <http://bine.fiz-karlsruhe.de>, „Service/Infoplus“ abrufbar.

## PROJEKTORGANISATION

- **Förderung des Vorhabens**  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  
Villemombler Straße 76, 53123 Bonn
- **Projektbegleitung im Auftrag des BMWi**  
Projektträger Biologie, Energie, Umwelt (BEO)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Jochen Viehweg  
52425 Jülich
- **Förderkennzeichen**  
0329732

## IMPRESSUM

- **ISSN**  
0937 – 8367
- **Herausgeber**  
Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- **Nachdruck**  
Nachdruck des Textes nur zulässig bei  
vollständiger Quellenangabe und gegen  
Zusendung eines Belegexemplares;  
Nachdruck der Abbildungen nur mit  
Zustimmung der jeweils Berechtigten.
- **Redaktion**  
Dr. Franz Meyer

## BINE – INFORMATIONEN UND IDEEN ZU ENERGIE & UMWELT

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst.

BINE informiert über neue Energietechniken und deren Anwendung in Wohnungsbau, Industrie, Gewerbe und Kommunen.

BINE bietet Ihnen folgende kostenfreie Informationsreihen

- Projekt-Infos
- Profi-Infos
- basisEnergie

**Nehmen Sie mit uns Kontakt auf**, wenn Sie vertiefende Informationen, spezielle Auskünfte, Adressen etc. benötigen, oder wenn Sie allgemeine Informationen über neue Energietechniken wünschen



# BINE

Informationsdienst

Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Büro Bonn  
Mechenstr. 57  
53129 Bonn

Fon: 0228 / 9 23 79-0  
Fax: 0228 / 9 23 79-29

eMail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: <http://bine.fiz-karlsruhe.de>