

Grenzflächen bei Silikon-Verbundisolatoren

Messungen bestätigen die guten Eigenschaften von Verbundmaterialien

Aus ökonomischen und betrieblichen Gründen werden Silikon-Verbundisolatoren seit über 30 Jahren in der Energietechnik eingesetzt. Um die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Isolatoren abschätzen zu können, verdienen vor allem ihre verschiedenen Grenzflächen besondere Beachtung. Sowohl die Praxis als auch Versuche im Labor haben gezeigt, dass die guten Isoliereigenschaften von Silikon auch von Silikon-Verbundisolatoren erreicht werden und dass die Lebensdauer der Isolatoren durch diese Verbundtechnik nicht verkürzt wird.

Bauteile in Verbundtechnik spielen in der Stromversorgung seit eh und je eine wichtige Rolle. Der Hauptgrund liegt darin, dass bei diesen Bauteilen eine separate Auslegung und somit eine bessere Ausnutzung der einzelnen Komponenten des Verbundes möglich ist. Das klassische Beispiel für eine erfolgreiche Anwendung des Verbundkonzeptes in der Energietechnik sind die Aluminium/Stahl-Seile, bei denen bekanntlich die Aluminiumdrähte primär die Stromleitung übernehmen, wogegen die Stahl-drähte die mechanischen Lasten tragen. Ähnlich erfolgversprechend hat sich in den letzten Jahren der Einsatz von Verbundisolatoren im Netzbau entwickelt, da bei dieser Bauart von Isolatoren eine getrennte Optimierung von elektrischen und mechanischen Funktionen möglich ist [1] und mit Silikon ein Isoliermaterial mit fast idealen Eigenschaften gefunden werden konnte [2].

Ein Verbundisolator (engl. Composite Insulator) ist laut Norm [3] aus mindestens zwei verschiedenen Isolierstoffen aufgebaut. Er besteht aus dem Kern und der Schirmhülle sowie den Metallarmaturen. Der Kern ist die innere Isolierung und ist so ausgelegt, dass die mechanische Stabilität des Isolators garantiert werden kann. Die Schirmhülle ist die äussere Isolierung, welche den erforderlichen Kriechweg bereitstellt und den Kern vor Umwelteinflüssen schützt.

Adresse des Autors
Dr. Konstantin O. Papailiou
Sefag AG, 6102 Malters

Grenzflächen von Verbundisolatoren

Ein Verbundisolator besitzt konstruktionsbedingt Grenzflächen, welche oft als mögliche Schwachstellen eingeschätzt werden. Die sichere Beherrschung von deren Dimensionierung und Fertigung (auch in der Serienproduktion) ist eine entscheidende Voraussetzung für das störungsfreie Betriebsverhalten des Isolators.

Diese Grenzflächen (engl. Interfaces) werden in der Norm [3] wie folgt definiert:

«Eine Grenzfläche ist die Fläche zwischen den verschiedenen Materialien oder Bestandteilen des Verbundisolators. In den meisten Verbundisolatoren kommen verschiedene Grenzflächen vor, nämlich:

- Grenzflächen zwischen Glasfasern und Harz
- Grenzflächen zwischen Füllstoff und Polymer
- Grenzflächen zwischen Kern und Schirmhülle
- Grenzflächen zwischen verschiedenen Teilen der Schirmhülle, zwischen den einzelnen Schirmen oder zwischen Isoliermantel und Schirmen
- Grenzflächen zwischen Schirmhülle, Kern und Metallarmaturen.»

Die Grenzflächen kann man zusätzlich unterscheiden zwischen äusseren (sichtbaren) und inneren (nicht sichtbaren) Grenzflächen sowie zwischen makroskopischen und mikroskopischen Grenzflächen (Bild 2).

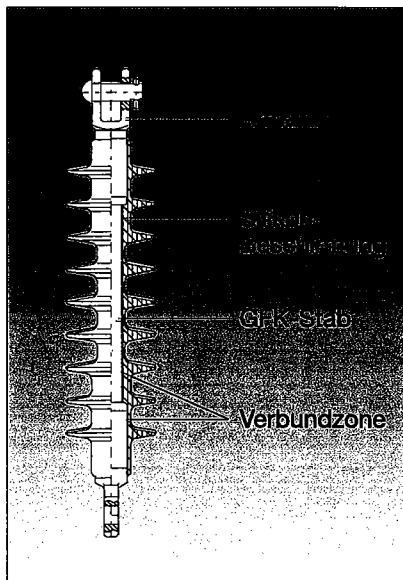


Bild 1 Prinzipzeichnung eines Silikon-Verbundisolators

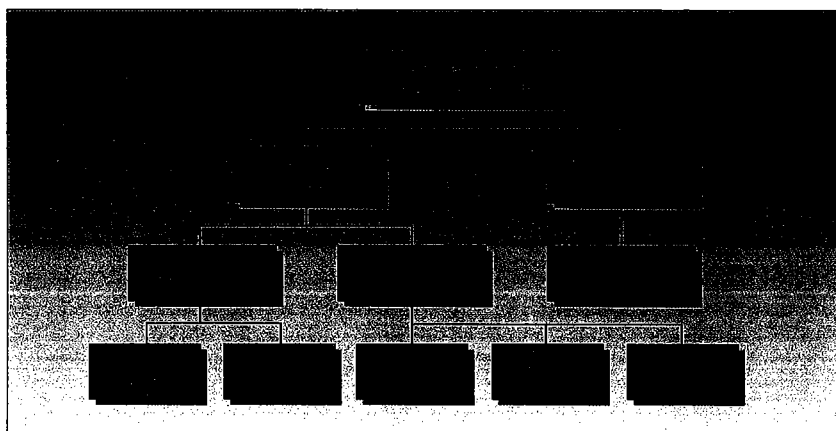


Bild 2 Ordnungsschema der Grenzflächen bei Verbundisolatoren

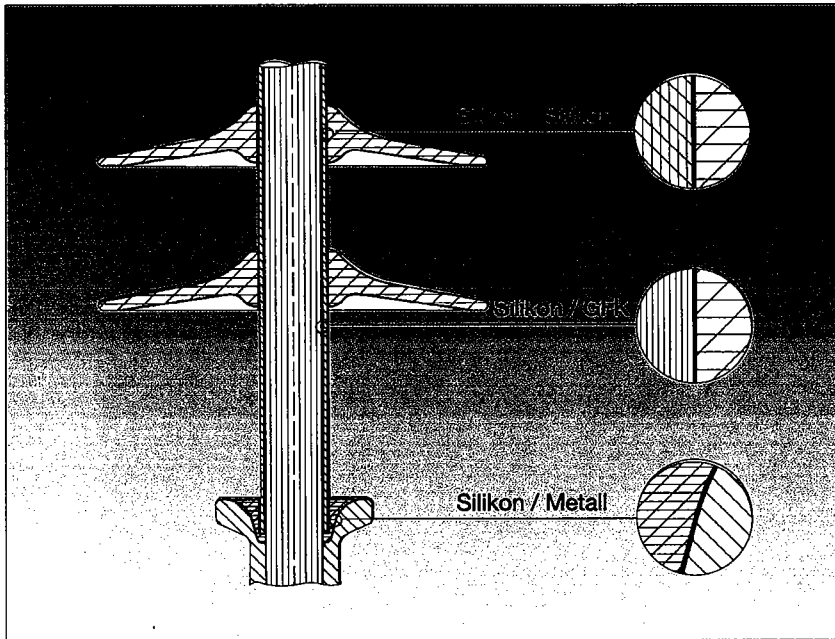


Bild 3 Innere, makroskopische Grenzflächen von Verbundisolatoren

Verständlicherweise wurde zunächst die äussere, die Silikon/Luft-Grenzfläche von Verbundisolatoren am ausführlichsten untersucht, ist sie doch entscheidend verantwortlich für das Betriebsverhalten der Isolatoren. Vor allem ihre Hydrophobie- und Alterungseigenschaften sind Bestandteil von vielen Arbeiten [4]. Diese haben dazu verholfen, dass Silikon für den Freilufteinsatz so weit optimiert wurde, dass heute Silikonverbundisolatoren weltweit generelle Akzeptanz genießen und vor allem bei Anwendungen mit

hoher Verschmutzung sehr oft zum Einsatz kommen [5].

Aber auch die inneren, mikroskopischen Grenzflächen Glasfaser/Epoxidharz und Füllstoff/Silikon werden von spezialisierten Zulieferfirmen so gut beherrscht, dass heute Silikon und glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) als ausgereifte Werkstoffe betrachtet werden können.

Zunehmend an Bedeutung haben dagegen in den letzten Jahren Untersuchungen über das elektrische Verhalten der inne-

ren, makroskopischen Grenzflächen von Verbundisolatoren gewonnen [6, 7]. Das sind im einzelnen die Silikon/GFK-, die Silikon/Metall- und die Silikon/Silikon-Grenzflächen (Bild 3).

Fertigungskonzepte von Verbundisolatoren

Über die Silikon/GFK- und die Silikon/Metall-Grenzfläche wurde unter anderem in [6] ausführlich berichtet. Dieser Aufsatz dagegen befasst sich primär mit den Silikon/Silikon-Grenzflächen, wie sie bei Verbundisolatoren in modularer Bauweise auftreten. Damit dies besser verständlich wird, werden in Bild 4 schematisch die beiden prinzipiellen Fertigungskonzepte von Verbundisolatoren in Erinnerung gerufen [8].

Bei der sogenannten modularen Bauweise (A) wird auf dem vorgängig gepresstem GFK-Kern (Vollstab oder Rohr) im Extrusionsverfahren ein Silikonmantel von üblicherweise 3 mm Wanddicke aufgebracht. Die unabhängig davon gefertigten Schirme werden anschliessend auf diesen Silikonmantel plaziert und aufvulkanisiert. Im Gegensatz dazu wird im sogenannten einteiligen Verfahren (B) die gesamte Schirmhülle um den GFK-Kern, der in einer zweiteiligen Form positioniert ist, in einem oder bei längeren Isolatoren in mehreren Schritten (man spricht dann vom «Step by Step»-Verfahren) vergossen oder verpresst und in der Form ausvulkanisiert. Die Wahl des Verfahrens hängt im wesentlichen von der Losgrösse der herzustellenden Isolatoren

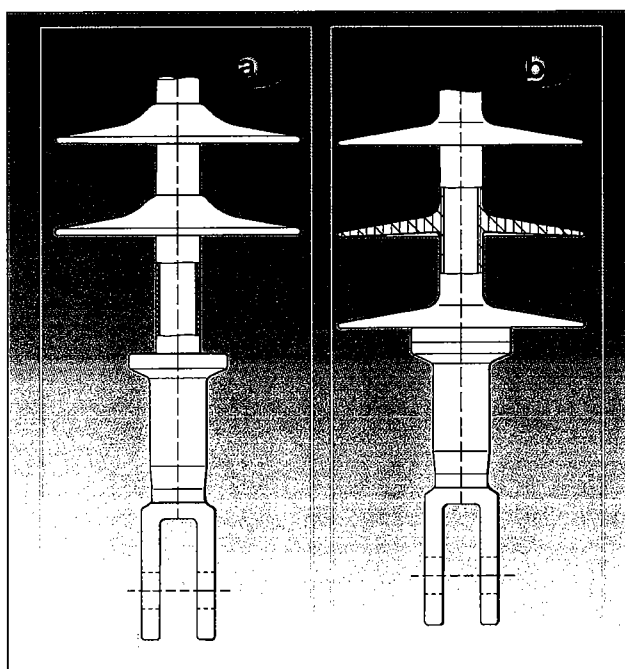


Bild 4 Prinzip der unterschiedlichen Fertigungskonzepte von Verbundisolatoren
a: Modulares Konzept
b: Einteiliges Konzept

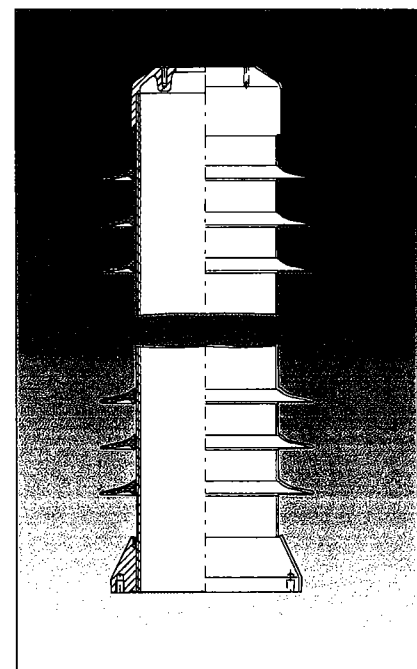


Bild 5 Prinzipzeichnung eines Verbundhohlisolators in modularer Bauweise

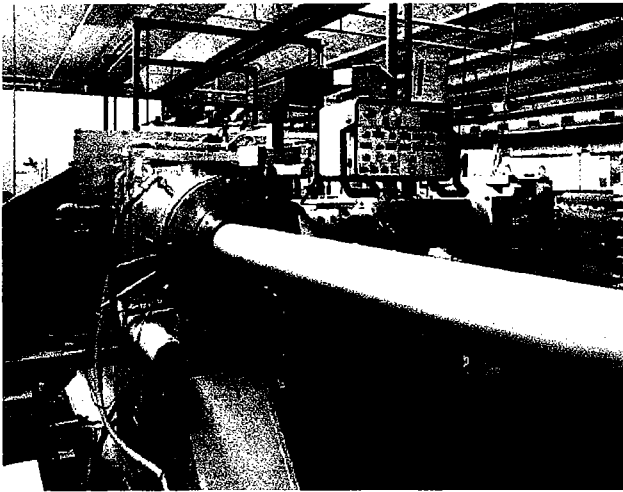


Bild 6 GFK-Rohr von etwa 300 mm Durchmesser beim Extrudieren mit HTV-Silikon

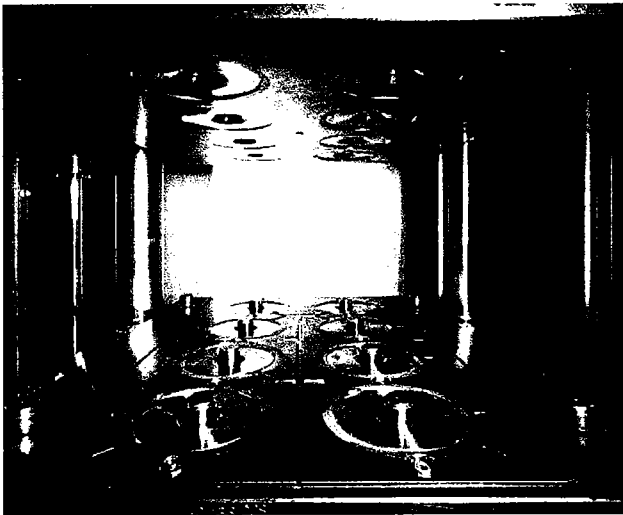


Bild 7 Spritzpresse mit Mehrfachform für die Isolatorschirme

ab. Bei kleinen bis mittleren Losgrößen ist das modulare Verfahren günstiger; bei grossen Stückzahlen von baugleichen Isolatoren kann das einteilige beziehungsweise das «Step by Step»-Verfahren, trotz den damit verbundenen hohen Formkosten, wirtschaftlich interessant sein.

Beide Verfahren sind bei Langstab-Verbundisolatoren seit mehr als dreissig Jahren erfolgreich im Einsatz [8, 9]. Hohlisolatoren in Verbundweise wurden dagegen bis vor kurzem fast ausschliesslich im einteiligen Giessverfahren mit RTV (Raum-Temperatur-Vernetzung) oder LSR-(Liquid-Silicon-Rubber-)Silikonen gefertigt. Durch einen Technologiesprung im Extrusionsprozess ist es vor kurzem möglich geworden, auch diese Art von Verbundisolatoren in modularer Bauweise zu fertigen (Bild 5).

Dabei erlaubt die Unterteilung der Beschirmung in Mantel und Schirm neben der flexiblen Gestaltungsmöglichkeit auch die Verarbeitung von HTV-(Hochtemperatur-Vernetzungs-)Silikonen auf

hochproduktiven Verarbeitungsmaschinen. Während der 3 mm dicke Mantel des GFK-Stabes oder -Rohres der Silcosil-Isolatoren im Extrusionsverfahren aufgebracht wird (Bild 6), werden die Schirme spritzgepresst (Bild 7). Bei beiden Techniken kann das Silikon durch exakte Temperatur-, Druck- und andere wichtige Prozessparameter optimal zu einem hochwertigen Isolierteil verarbeitet werden. Mittels dieser Verfahren wird zudem eine hohe Qualitätskonstanz und -sicherheit erreicht.

Diese Technologie erlaubt somit eine grosse Flexibilität in den Ausführungsformen der Isolatoren bei minimalem Werkzeugeinsatz. Für verschiedene GfK-Stab- oder Rohrdurchmesser wird jeweils nur ein Extrusionswerkzeug und ein Spritzpresswerkzeug, natürlich mit mehreren Einsätzen, benötigt. Im Vergleich zu Technologien, bei welchen der Isolator komplett gegossen oder spritzgepresst wird, wird so eine wesentliche Senkung der Werkzeugkosten erreicht. Andererseits lassen sich durch den modularen

Aufbau fast beliebige Kriechwege bei gleicher Schlagweite eines Isolators realisieren. Das ist vor allem bei hoher Verschmutzung von Bedeutung.

Verbindung von Silikonschirm und Silikonmantel

Durch Feinabstimmung der Material- und Prozesseigenschaften wurde eine optimale Technologie der Verbindung von Schirm zu Mantel geschaffen. Dabei werden die Schirme auf den Mantel aufgebracht, indem sie einzeln im aufgeweiteten Zustand an der vorgesehenen Stelle positioniert werden. Zuvor wird diese Stelle des Mantels mit einem RTV-Silikonkautschuk, einer flie遝sfähigen Einkomponentenmasse, eingestrichen. Das Mass des Schirmdurchbruchs ist geringfügig kleiner als der Manteldurchmesser, was bedeutet, dass der Schirm durch seine Elastizität den Verbindungsspalt voll auffüllt.

Die chemische Reaktion, die zur Haftung der (vulkanisierten) Schirme auf dem (vulkanisierten) Mantel führt, verläuft wie folgt:

Das RTV-Vulkanisat besteht aus losen Silikon-Kettenmolekülen. Es ist flüssig mit einer Viskosität zwischen flie遝sfähig und pastös. Mit der Luftfeuchtigkeit reagieren die Endgruppen der Moleküle zu einem räumlich vernetzten Gebilde. Dabei wird das Vulkanisat in festen Kautschuk umgewandelt. Während der Vernetzung verbindet sich das Vulkanisat mit freien Silanolgruppen der hochdispersen Kieselsäure, welche zu 10–25% im HTV-Silikon von Mantel und Schirmen als Füllstoff zur mechanischen Verstärkung enthalten ist. Es handelt sich also nicht um ein Verkleben im eigentlichen Sinne, welches nur eine physikalische Verbindung ergibt, sondern es werden Mantel und Schirme durch das RTV-Silikon chemisch miteinander verbunden. Die Verbindungsfuge zwischen Schirm und Mantel vulkanisiert zu einem dreidimensionalen Silikongummi, das sich in seinen dielektrischen Eigenschaften praktisch nicht vom Schirm- und Extrudatmaterial unterscheidet. Auch eine mechanische Trennung dieser Verbindungsstelle ist nicht mehr möglich, es sei denn, die Reissfestigkeit des Silikons wird überschritten. Das Vulkanisationsprodukt härtet aus mit einer Geschwindigkeit von 4 mm in 24 h.

Wie schon eingangs erwähnt, bestehen bei zusammengesetzten Bauteilen häufig Zweifel an der Funktionalität der Verbindungsstelle. Obwohl das hochautomatisierte Beschirmungsverfahren (Bild 8) eine hohe und gleichmässige

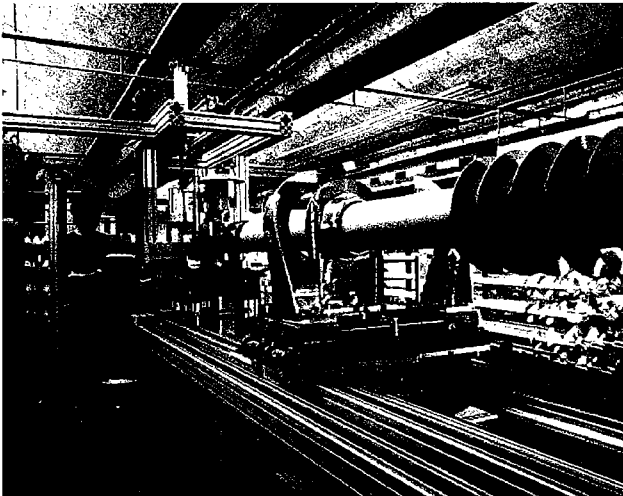


Bild 8 Automatische Beschichtungsanlage für Verbundisolatoren

den inzwischen dreissigjährigen störungsfreien Betrieb von Langstab-Verbundisolatoren in modularer Bauweise eindrücklich dokumentiert [8].

Praxisnahe Prüfkörper für Hohlisolatoren

Da es sich bei den vorangegangenen Untersuchungen primär um Modellanordnungen handelte, wurden eigene Versuche konzipiert und ausgeführt, welche im folgenden vorgestellt werden. Insbesondere wurde dabei der Hohlkörperisolator in modularer Bauweise mit HTV-Silikon betrachtet. Eventuelle Fehlerstellen an der Vulkanisationsgrenze zwischen der Silikonbeschichtung des Glasfaserkernes und dem aufvulkanisierten Silikonschirm beim modular aufgebauten Langstabisolator beeinträchtigen in keiner Form Eigenschaften und Lebensdauer des Isolators. Das belegt die langjährige Erfahrung. Der Einfluss solcher Fehlerstellen beim Hohlisolator unter Spannung sollte durch nachfolgend beschriebene Versuche mit bewusst provozierten Fehlerstellen ermittelt werden.

Qualität garantiert, wurde der Einfluss von Fehlerstellen (z. B. unzureichendes Vulkanisat) mit folgenden Versuchen simuliert.

Grundlagenuntersuchungen an einer Silikon/Silikon-Grenzfläche

Zunächst sollen in diesem Zusammenhang neuere Ergebnisse aus der Grundlagenforschung vorgestellt werden. Untersuchungen an einfachen Modellanordnungen zeigten ein sehr gutes Verhalten der Silikon/Silikon-Grenzfläche [10]. Unter anderem wurde die Durchschlagsspannung an einem plattenförmigen Prüfkörper aus Silikonelastomer, an dem Spitzenelektroden aus Aluminiumfolie befestigt wurden (Bild 9), sowohl für die Silikon/Silikon-Grenzfläche als auch für das Einstoffsystem (nur Silikon, SIR) in Abhängigkeit von der Schlagweite gemessen. Bild 10 zeigt die Messergebnisse.

Es wurde dabei festgestellt, dass sich die Durchschlagfeldstärken der beiden Anordnungen nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Bei Schlagweiten grösser als 10 mm, wie sie in der Praxis vorkommen, hat sogar die Grenzfläche eine etwas höhere Spannungsfestigkeit als die einteilige Silikonprobe.

Aber auch das für den störungsfreien Betrieb entscheidende Langzeitverhalten dieser Art von Grenzfläche scheint sehr gut zu sein. In Bild 11 wird der sogenannte Lebensdauerexponent n , welcher ein Mass für die Alterung der Isolierung darstellt, aus der Steigung der im doppeltlogarithmischen Massstab aufgetragenen Durchschlagsspannung/Durchschlagszeit-Kennlinie ermittelt. Die parallele Verschiebung der Kurven resultiert aus den unterschiedlichen Schlagweiten

der untersuchten Proben. Der hohe Wert von $n = 20$, der sowohl für die Silikon/Silikon-Grenzfläche als auch für das Silikon ohne Grenzfläche errechnet wurde, berechtigt zu der Annahme, dass das bekannte gute Alterungsverhalten von Silikon auch auf die Grenzfläche übertragen werden kann. Diese Tatsache wird durch

Bild 9 Elektrodenanordnung (aus [10])

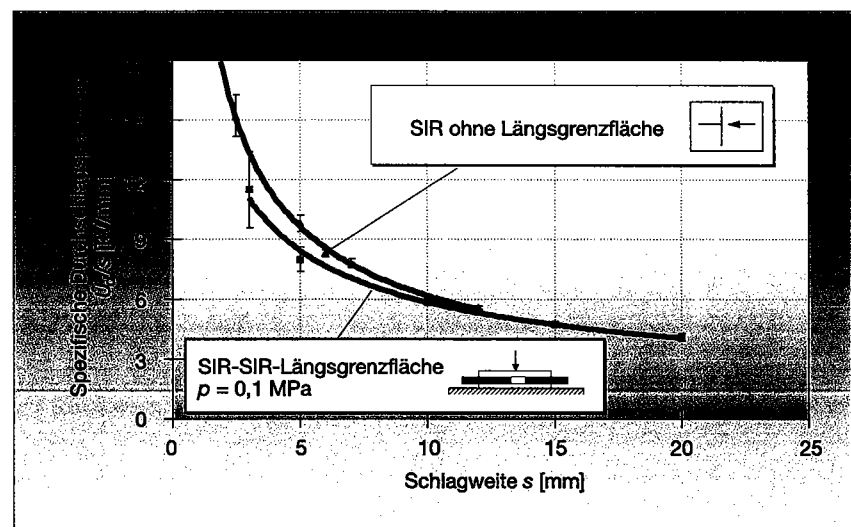
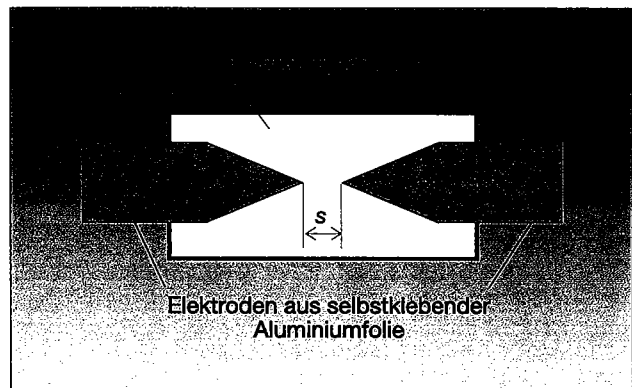


Bild 10 Abhängigkeit der spezifischen Durchschlagsspannung von der Schlagweite (aus [10])

