

HARZSELEKTION ALS SCHLÜSSEL ZUM FILAMENT-KÄFIG- DESIGN FÜR ÜBERSPANNUNGSABLEITER

Thomas Paalhorn*

Tridelta Meidensha GmbH, Marie-Curie-Straße 3, 07629 Hermsdorf

Durch sorgfältige Materialauswahl, vor allem im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe, und maßgeschneidertem Design entstand eine neue Überspannungsableiterserie, die eine herausragende Kurzschlussfestigkeit, Medienbeständigkeit, skalierbare Mechanik sowie Vibrationswiderstandsfähigkeit, bei gleichzeitig kompakter und leichter Bauweise, aufweist. Die Verstärkungsstruktur ist auf unterschiedlichste Bedürfnisse anpassbar. Das Harz war für den Entwicklungsprozess die Schlüsselkomponente, da dessen Eigenschaften direkt zum Erfolg oder Misserfolg des Überspannungsableitersdesigns führten. Das entstandene Baukastenprinzip, welches flexibel für verschiedene Geometrien verwendbar ist, wird aktuell nur durch die zur Verfügung stehenden Produktionsmaschinen begrenzt.

1. Einleitung

Gewickelte Überspannungsableiter werden häufig kritisch betrachtet, trotz der ähnlichen Herstellung von Isolatoren in Gehäuseableitern, die vermehrt eingesetzt werden. In den Köpfen der Anwender sind Bedenken hinsichtlich der Qualität und Sicherheit verankert, die oft auf Herstellungsverfahren von minderer Qualität und/oder ungünstige Materialauswahl zurückzuführen sind. Abbildung 1 zeigt offene Stellen in der Wickelstruktur, die durch die aufgeschobene, isolierende Außenhaut nicht geschlossen werden können. Die fehlende Haftung zwischen Wickel und Isolationsschicht verursacht Probleme im Zusammenhang mit Feuchtigkeit.



Abbildung 1: Wickelstruktur und Isolationsschicht ohne Haftung

Tridelta Meidensha hat seit mehr als 20 Jahren Überspannungsableiter basierend auf Wickeltechnik im Produktportfolio. Diese alten Typen sollten ersetzt werden. Die neuen Designs nutzen den aktuellen Stand der Technik in Hinblick auf Materialauswahl und Produktionsanlagen.

Um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden und den Automatisierungsgrad zu erhöhen, wurde eine umfangreiche Technologie-

und Produktentwicklung gestartet, mit dem Ziel eine neue, flexible Produktfamilie hervorzubringen. Dieser Beitrag befasst sich überwiegend mit dem Typ „SBKW-I“.

2. Technologieentwicklung

2.1. Maschinenpark

Bei den neuen Überspannungsableitern sollen die Varistoren inklusive der Endarmaturen direkt von einem glasfaserverstärkten Kunststoffkäfig umhüllt werden. Dieser gewährleistet die mechanische Integrität und schützt den Innenaufbau vor Umwelteinflüssen. Die Aufbringung des Käfigs erfolgt mit einer Filament-Winding-Maschine. Durch ein patentiertes Imprägnierverfahren lässt sich das Verhältnis von Harz zu Glasfaser genau einstellen. Der gesteuerte Spulenständer garantiert eine konstante, eingestellte Spannung des Rovings. Dank der Präzision der gesamten Anlage lässt sich die Verstärkungsstruktur genau und reproduzierbar herstellen.

Die Außenhaut soll aus „high temperature vulcanizing silicone“ (HTV-Silikon) gefertigt werden. Es ist hydrophob, besteht lediglich aus einer festen Komponente und ermöglicht kurze Prozesszeiten. Um das Silikon für den Vergussprozess in einen fließfähigen Zustand zu versetzen, sind hohe Einspritzdrücke notwendig. Sie gewährleisten ein sicheres Ausfüllen aller Konturen. Der Verguss selbst erfolgt unter Vakuum, sodass keine Lufteinschlüsse entstehen.

2.2. Harzselektion

2.2.1. Marktscreening und Testphase

Die wichtigste Komponente im Entwicklungsprozess war das Harzsystem. Es beeinflusst eine

Vielzahl von Eigenschaften. Zusammen mit dem Glasfaser-Roving wird die mechanische Festigkeit eingestellt. Im Kurzschlussfall muss das Material selbstverlöschend sein. Die Resistenz gegen Wassereindringen und -anlagerung an Grenzflächen innerhalb eines Überspannungsableiters werden ebenfalls von dem verwendeten Harz beeinflusst.

Verschiedene Hersteller und Händler wurden für die Suche nach einem geeigneten Harz kontaktiert. Alle Harzsysteme mit folgenden Eigenschaften wurden untersucht:

- Eignung für Hochspannungsanwendungen
- Einkomponentig
- UV-aushärtend
- Aushärtung von Wickelwandstärken bis zu 10 mm für mechanisch starke Strukturen
- Viskosität im Bereich 200...500 mPas
- Topfzeit > 8 h

Anhand der Anforderungen konnten mehr als zehn Harzsysteme beschafft und getestet werden. Darunter waren Polyester-, Vinylester-, Acryl- und Epoxidharze. Diese wurden in mehreren Iterationsschleifen sowohl solo als auch in verschiedenen Käfigstrukturen getestet.

Zum Beginn der Untersuchungen wurde als Referenz ein klassisches, wärmehärtendes Zwei-Komponenten-Epoxidharz betrachtet. Als erster Vergleich diente ein Acrylharzsystem. An Reinharzproben und an gewickelten Mustern wurde mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) und dynamisch-mechanischer Analyse (DMA) der Aushärtegrad und die Glasübergangstemperatur ermittelt. Während das Epoxidharz eine Glasübergangstemperatur von mehr als 100 °C aufzeigte, lag der Wert bei dem getesteten Acrylat bei ca. 50 °C.

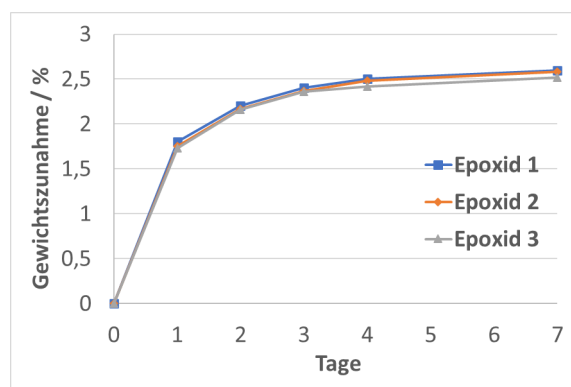


Abbildung 2: Wasseraufnahme der Epoxid-Reinharz-Probenkörper (Lagerung in Wasser bei 97 °C; Probengröße 45x6x3 mm; Dreifachbestimmung)

Im weiteren Verlauf wurde die Gewichts Zunahme nach Lagerung in 97 °C heißem Wasser untersucht. Auch hier gab es große Unter-

schiede. Während das Epoxid nach sieben Tagen kontinuierlich Gewicht zugelegt hatte (2,6 % Zunahme, s. Abbildung 2), stieg die Gewichts Zunahme des Acrylats innerhalb von zwei Tagen auf rund 7 % und verringerte sich bis zum siebten Tag wieder auf rund 2 %. Offensichtlich fand nach dem ersten Tag eine chemische Zersetzung statt. Die Proben veränderten sich optisch und zeigten u.a. Risse (s. Abbildung 3).



Abbildung 3: Harzproben nach siebentägiger Wasserlagerung (oben Acrylat, unten Epoxid)

Im nächsten Schritt wurden Probekörper aus allen zu testenden Harzen gewickelt, um die Verarbeitbarkeit zu überprüfen. Wandstärken von bis zu 10 mm sollten komplett durchgehärtet werden können. Als erste, einfache Kontrolle wurden die Probekörper zerlegt und begutachtet, ob alle Schichten durchgehärtet wurden oder ob Material weich blieb. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde eine Druckprüfung (s. Abbildung 4) durchgeführt. Mit einer definierten Spitze konnte eine festgelegte Kraft aufgebracht werden. Die resultierenden Eindringtiefen wurden zur Evaluierung herangezogen. Es zeigten sich vor allem bei größeren Wandstärken teils deutliche Unterschiede von außen nach innen. Nicht ausgehärtetes Harz am Grundkörper ist nicht zulässig, da die Isolationseigenschaften des nicht ausgehärteten Werkstoffs geringer sind und eine gewisse Diffusionsoffenheit bestehen bliebe. In solchen Fällen musste die Aushärtung genauer betrachtet und optimiert werden.



Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Eindringtiefe

Je nach Harz kamen für die Aushärtung Strahlersysteme mit 365 nm oder 405 nm Wellenlänge zum Einsatz.

Die Medienbeständigkeit wurde auch durch den Water Immersion Test (Lagerung in siedendem Wasser für 42 h), entsprechend IEC 60099-4 [1], beurteilt. Die Probekörper enthielten neben Aluminiumterminals auch Varistoren, um eine Verlustleistung vor und nach dem Test ermitteln und vergleichen zu können. Es wurden offene Kreuzwickel und geschlossene Kreuzwickel in verschiedenen Wandstärken getestet, wobei die Wandstärke von offenen Kreuzwickeln für das Testergebnis keine Rolle spielten. Die Harzsysteme zeigten teils gravierende Unterschiede. Besonders bei offenen Kreuzwickeln und aber auch bei geschlossenen Kreuzwickel schnitten Epoxidharze besser ab.

In der nächsten Iteration wurde die Käfigstruktur verändert. Die Wandstärke der geschlossenen Kreuzwickel wurde schrittweise erhöht und dadurch konnten auch zuvor versagende Harzsysteme den Water Immersion Test bestehen. Die Testdauer wurde für diese Harzwickel-Kombinationen auf 100 h erhöht. Dadurch sind die Harze schlussendlich erneut aus dem akzeptablen Bereich der Verlustleistungen gefallen. Das deutet daraufhin, dass Wassermoleküle durch die gesamte Wickelstruktur durchdiffundieren, die Haftung des Harzes auf dem Grundkörper schlecht ist und sich Wasser in den Grenzschichten anlagert.

Nach diesen Vorversuchen blieben wenige Harze übrig und es kristallisierten sich zwei unterschiedliche Strategien bei der Käfigauslegung heraus:

- Epoxidharz + beliebige Wickelstruktur
- Acrylharz + geschlossene Wicklung mit großer Wandstärke (> 6 mm)

Weitere entscheidende Eigenschaften waren die Brennbarkeit sowie allgemein das Verhalten im Kurzschlussfall. Zur Überprüfung wurden Kurzschluss tests an verschiedenen Mustern durchgeführt. Mit Epoxidharz wurden Muster sowohl mit einem geschlossenen als auch mit einem offenen Kreuzwickel hergestellt. Mit Acrylharz wurden nur Muster mit geschlossenem Kreuzwickel hergestellt.

Alle Kurzschlussversuche wurden mit einem Prüfstrom von 40 kA durchgeführt. Dabei stellte sich klar heraus, dass eine Verstärkungsstruktur in einem klassischen Rohrdesign (geschlossener Kreuzwickel) nicht funktioniert, weil die nötige Druckentlastung fehlt. Die Prüfkörper zerborsten regelrecht. Die andere Variante des Käfigs (offener Kreuzwickel) zeigte im Gegensatz dazu eine beachtliche Performance. Nach dem Kurzschluss blieben die Käfigstruktur und das Innenleben strukturell intakt.

Das getestete Epoxidharzsystem war für die später angedachte Serienproduktion nicht optimal, da die Aushärtung in der Maschine zu viel Zeit in Anspruch nahm. Dank einer neuen Strahlergeneration mit einer Wellenlänge von 405 nm und einer Intensität von bis zu 16 W/cm² konnte zumindest eine gute Tiefenhärtung erzielt werden. Im nächsten Schritt musste ein reaktiveres Harzsystem gefunden oder speziell nach Maß formuliert werden.

2.2.2. Weitere Harzentwicklung

Da alle getesteten Harzsysteme entweder für den Einsatz an sich oder in der Handhabung während der Produktion unbrauchbar waren, kam es zu einer gezielten Entwicklung eines maßgeschneiderten Harzsystems speziell für die Anwendung in Überspannungsableitern mithilfe einer Filament-Winding-Maschine.

Die Kernproblematik im Finden eines geeigneten Harzes war der Preis, da Photoinitiatoren, vor allem für den Bereich des sichtbaren Lichts, sehr rar und entsprechend teuer waren. Tridelta Meidensha hat auf dem Markt ein geeignetes, anpassbares Harzsystem ermittelt, welches in weiterer Folge für die Spezialanwendung angepasst und qualifiziert wurde. Die einzelnen Entwicklungsschritte wurden stets überprüft. Somit konnte gewährleistet werden, dass keine andere Eigenschaft negativ beeinflusst wurde. Schlussendlich entstand ein Harzsystem, dass sich sehr gut verarbeiten lässt, eine lange Topfzeit sowie Haltbarkeit aufweist und sehr gut bis in größere Tiefen innerhalb einer vertretbaren Prozesszeit aushärtet.

2.3. Käfigdesign

Die Auslegung des Käfigs lief parallel zur Harzauswahl, da es direkt auf die Gesamteigenschaften der Probekörper Einfluss nahm. Der einfache Ansatz eine Art Rohr direkt auf die Varistoren zu wickeln, wurde durch das schlechte Abschneiden im Kurzschlussversuch verworfen. Die Verstärkungsstruktur benötigt Bereiche zur Druckentlastung. Gleichzeitig sollte eine medianisolierende Schicht die Varistoren schützen. Das hatte vor allem prozesstechnische Hintergründe, um das Aufbringen des Käfigs so weit wie möglich zu automatisieren und den Varistorstapel vor dem Silikon zu schützen, damit der elektrische Kontakt gewährleistet wird. Für den HTV-Silikonverguss ist das essentiell, weil sonst Silikon durch den hohen Einspritzdruck beispielsweise zwischen Varistoren gelangen kann.

Die Nutzung eines offenen Kreuzwickels in Kombination mit einer geschlossenen Schicht um Varistoren und Terminals (hybrider Kreuz-

wickel) konnte nur durch die präzise Arbeit der Filament-Winding-Maschine realisiert werden. Durch das genaue Ablegen des Rovings sowie die exakte Einstellung des Harz-Roving-Verhältnisses blieben die Druckentlastungsbereiche frei.

Das entwickelte Käfigdesign wurde internen Bending-Moment-Tests unterzogen. Der Käfig selbst kann dabei ohne äußere Silikonummantelung getestet werden, da das siedende Salzwasser während des Water Immersion Tests kein Problem darstellt. Diese Eigenschaft machte die Entwicklung sehr flexibel, weil auf den Bau einer Vergussform vorerst verzichtet werden konnte, bis das Käfigdesign klar war.

Bei einem guten Harz ist im Water Immersion Test das Käfigdesign nahezu egal. Das konnte in einer Versuchsreihe mit verschiedenen Wickelstrukturen auf Überspannungsgrundkörpern ($U_r = 24 \text{ kV}$) nachgewiesen werden. Untersucht wurden ein offener Kreuzwickel, ein geschlossener Kreuzwickel und ein hybrider Kreuzwickel. Ein Teil der Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Vor- und Nachmessungen zeigen keine wirklichen Unterschiede. Die Nachmessungen sollten größer oder gleich der Eingangsmessung sein. Die hier auftretenden Abweichungen kommen von unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und Ungenauigkeiten beim Einstellen der Messspannung. Der Versuch zeigt, dass kein Wasser in den Prüfkörpern ansammelt, was die Verlustleistung unweigerlich erhöhen würde.

Die mechanische Festigkeit der Prüflinge wird über die Stärke der Wickelstruktur eingestellt. Bei dem hybriden Kreuzwickel wird dafür nur die Dicke der offenen Verstärkungsschicht variiert, da es sonst erneut zu Problemen im Kurzschlussfall kommt.

Tabelle 1: Vergleich der Verlustleistungen unterschiedlicher Käfigstrukturen mit Epoxidharz

Typ	Verlustleistung / mW		
	initial	final	zulässig
offen	450	471	834
offen	498	470	882
geschlossen	446	442	830
geschlossen	484	494	868
hybrid	416	406	800
hybrid	439	412	823

3. Produktentwicklung

3.1. Anpassung des Käfigs

Die ausgiebigen Voruntersuchungen während der Technologieentwicklung lieferten ein klares Bild, wie der Käfig aufzubauen ist: Nutzung des hybriden Kreuzwickel in Kombination mit einem Epoxidharz. Die Stärke des Käfigs ist so zu verändern, dass er die mechanischen Anforderun-

gen für den jeweiligen Überspannungsableiter erfüllt. Die Struktur ist so aufgebaut, dass eine mechanische Verstärkung des Käfigs keine negativen Auswirkungen auf die Kurzschlussfestigkeit hat. Wie aus den vorangegangenen Untersuchungen zu erkennen war, kann je nach Design eine erhöhte mechanische Festigkeit die Kurzschlussfestigkeit negativ beeinflussen.

Um den SLL- (Specific Longterm Load) Wert von 350 Nm und den SSL- (Specific Shortterm Load) Wert von 500 Nm sowie eine Torsionsfestigkeit von 100 Nm zu erreichen, wurde eine Versuchsreihe mit möglichen Käfigstrukturen, die im Erwartungsbereich lagen, hergestellt und getestet. Die Variationen betrafen die einzelnen Wickellagen und die Terminalformgebung. Die Kombinationen aus bester Performance und niedrigen Kosten wurden in weiteren Iterations Schleifen ausoptimiert.

3.2. Design der Außenhaut

Kernelemente für die Auslegung der Außenhaut waren die Materialüberdeckung zum inneren Kern, die Kriechweganforderung von 31 mm/kV und die normativen Vorgaben nach IEC 60815 [2]. Das Wechselschirmprofil musste an die unterschiedlichen Gehäuselängen angepasst werden, um die Modularität und den geforderten Kriechweg einzuhalten.

Neben der reinen Geometrie ist die Qualität, Passgenauigkeit und Funktionalität des Vergusswerkzeugs sowohl wichtig für die Produkteigenschaften als auch für die Produktion. Es ist essentiell, dass beide Formhälften ohne einen Versatz übereinanderstehen. Anderenfalls entsteht eine Kante im Trennebenenbereich, die sich beispielsweise negativ auf den Salznebeltest auswirken kann, wenn sich dort Wasser sammelt oder entlang dieser Kante abläuft. Das Silikon selbst muss zwangsweise sehr gut auf dem Grundkörper haften. Wenn diese Grenzschicht Mängel aufweist, kann das zum Ansteigen der Verlustleistung im Water Immersion Test führen.

3.3. Ausgewählte Typprüfungen

3.3.1. Kurzschluss

Die Kurzschlussfestigkeit des Filament-Käfig-Designs mit hybridem Kreuzwickel wurde in verschiedenen Überspannungsableitern nachgewiesen. Die Palette reicht von äußerst kompakten Überspannungsableitern für DC-Bahnwendungen (bis 120 mm Varistordurchmesser und rund 150 mm Bausteinlänge) bis zu sehr kompakten ECLA- (Externally Gapped Line Arrester) Anwendungen (32 mm Varistordurchmesser mit rund 460 mm Bausteinlänge). Die

Prüfungen konnten mit verhältnismäßig hohen Werten bestanden werden.

Das bisher beste Kurzschlussergebnis (Abbildung 5) lieferte der SBKW-I mit 63 kA.

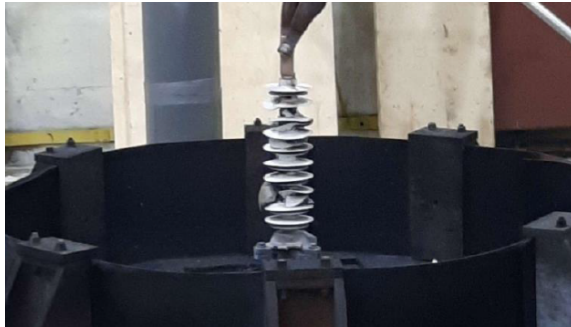


Abbildung 5: SBKW-I nach Kurzschlussprüfung

Alle Testkörper zeigten nach der Prüfung ein wiederkehrendes Muster: Dank der großzügigen Druckentlastung bleibt die Käfigstruktur intakt und die innenliegende Varistorsäule an ihrem Platz.

3.3.2. Bending Moment

Die mechanische Festigkeit, die während der Bending-Moment-Prüfung getestet wird, ist das Hauptkriterium für die Wandstärke des Käfigs. Für das Beispiel SBKW-I galt es für die SLL 350 Nm, für die SSL 500 Nm und für Torsionskräfte 100 Nm zu bestätigen. Für seine geringe Größe ist diese Ableiterserie sehr stabil. Abbildung 5 zeigt einen Prüfkörper während der SSL-Prüfung. Bei voller Belastung trat eine Auslenkung von 23 mm auf.

Die zulässige Dauerbelastung, die über 1000 Zyklen während der SLL-Prüfung nachgewiesen wird, beträgt für diesen Typ 350 Nm. Die maximale Auslenkung betrug rund 16 mm.

Nach den mechanischen Prüfungen folgte der Water Immersion Test sowie die elektrischen Nachmessungen. Die Prüflinge zeigten nahezu keine Zunahme der Verlustleistung. Der Zuwachs betrug rund 100 mW bzw. rund 5 %, was weit unter den normativen Höchstgrenzen liegt.

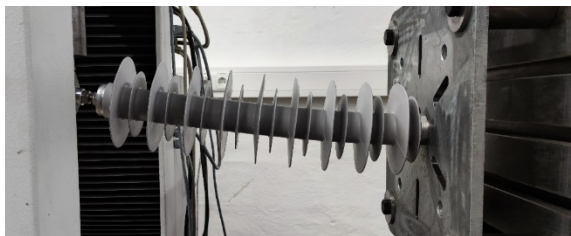


Abbildung 6: SSL-Test mit 500 Nm am SBKW-I

3.3.3. Salznebeltest

Durch eine Anforderung von 31 mm/kV Kriechweg sind die Schirmdurchmesser relativ groß

und deren Abstand zueinander eher gering, was für die Wetteralterungsprüfung kritisch ist.

Der Startsalzgehalt für die gesamte Testdauer betrug 10 g/l. Es traten keine Überstromereignisse auf, die zur Unterbrechung des Tests geführt hätten. Weiterhin gab es auch keine Anzeichen von Tracking and Erosion. Die Silikonhaut blieb unbeschadet, siehe Abbildung 7.

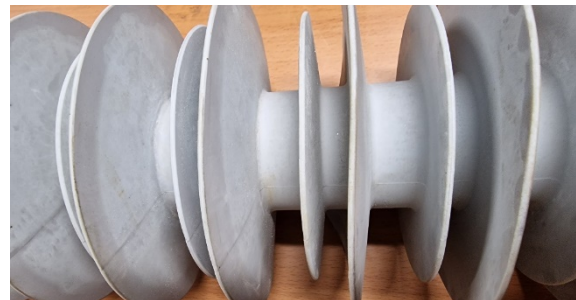


Abbildung 7: Detailansicht Silikonoberfläche nach 1000 h Salznebelprüfung

3.3.4. Vibration

Während die „normalen“ Typenreihen nach IEC 60099-4 keine Vibrationsprüfungen absolvieren müssen, ist es speziell für die Bahn- als auch für die EGLA-Anwendungen Pflicht. Das zugrundeliegende Design konnte sich im Shock and Vibration Test nach IEC 61373 (Abbildung 8) und im Vibrationstest nach IEC 60099-8 [3] (Abbildung 9) beweisen. Da der Käfig wie ein Exoskelett schützend und direkt um die Varistoren liegt bei gleichzeitig guter Haftung auf den Materialien, kann sich nichts während Vibrationen lösen. Der schlanke Aufbau, das vergleichsweise geringe Gewicht sowie die kompakten Abmessungen wirken sich positiv auf Vibrationswiderstandsfähigkeit aus.



Abbildung 8: Prüfaufbau Shock and Vibration Test am SBKW-B DC-B

Die geforderten Prüfungen konnten problemlos bestanden werden. Auch für andere Überspannungsableitertypen ist das eine wichtige Eigenschaft. Je nach Montageart treten unterschiedlich ausgeprägte Vibrationen auf. Besonders bei NGLAs (Non-Gapped Line Arrester), die meist wie EGLAs hängend montiert werden, häufiger zu Vibrationsbelastungen.

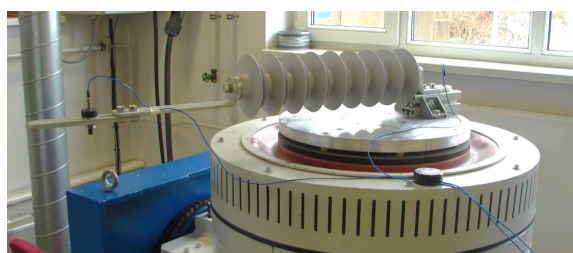


Abbildung 9: Prüfaufbau für Vibrationsprüfung am SBKW-E mit Elektrode

Zukünftig bekommt das Thema Vibration bei Leistungsableitern mehr Aufmerksamkeit. In dem INMR-Beitrag „Mechanical Consideration & Service Life of Non-Gapped Line Arresters“ [4] aus dem Jahr 2022 wurde dieses Thema ausführlicher betrachtet.

4. Zusammenfassung

Mithilfe der umfangreichen Untersuchungen wurde ein Überspannungsableiterdesign entwickelt, dass den typischen Anforderungen an Überspannungsableitern gerecht wird. Mit dem hochwertigen und an die Bedürfnisse speziell angepassten Harz können Überspannungsableitergrundkörper unkompliziert hergestellt werden. Das Handhabung ist einfach gehalten, weil das Harzsystem eine lange Topfzeit hat und der Grundkörper direkt nach Aufbringen der Käfigstruktur weiterverarbeitet wird. Eine automatische Harznachfüllung macht den sensiblen Prozess sicher, da die Maschine bei Unterschreiten eines eingestellten Levels stoppt. Die patentierte Harzbadtechnik ermöglicht einen quasi tropffreien Harzauftrag. Die Produktionsstätte bleibt von herabtropfendem Harz verschont und das eingestellte Harz-Glasfaser-Verhältnis konstant. Der HTV-Silikon-Vergussprozess harmoniert optimal mit dieser Art der Käfigstruktur, da er alle Hohlräume mit Silikon ausfüllt und die Haftung des Silikons auf dem geprimerten Grundkörper ausgezeichnet ist. Die Verlustleistung nach dem Water Immersion Test bleibt nahezu konstant.

Das Produktdesign erfüllt alle entscheidenden Kriterien, die für die Typprüfungen von Überspannungsableitern wichtig sind. Es gelang die Entwicklung von minimalistischen, aber dennoch widerstandsfähigen Überspannungsableitern, die je nach Einsatzzweck mit herausragenden Fähigkeiten bestechen. In Abbildung 10 ist ein Vergleich von Überspannungsableitern mit $U_r = 60$ kV zu sehen, der SBKW-I ist dabei der kompakteste. Von links nach rechts sind folgende Typen abgebildet: SBKW-I, SBKC-0, SBKC-II und SBKT-I. Dabei haben SBKW-I und SBKC-0 die gleichen Varistoren im Inneren.

Tabelle 2 zeigt zum besseren Vergleich die Höhen und Massen der einzelnen Überspannungsableitertypen.

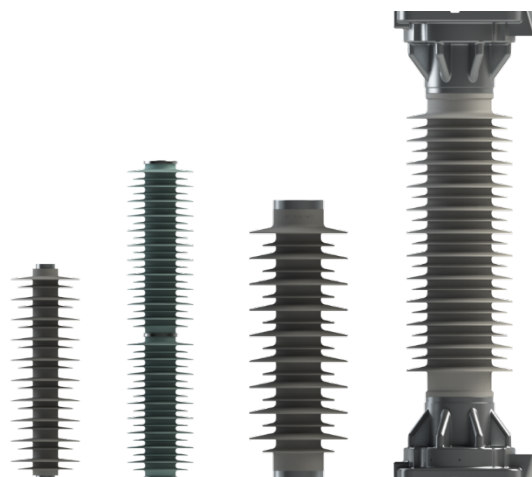


Abbildung 10: Vergleich verschiedener Überspannungsableiter mit $U_r = 60$ kV

Tabelle 2: Höhen- und Massenvergleich verschiedener Überspannungsableiter

Typ	Höhe / mm	Masse / kg
SBKW-I	470	5,6
SBKC-0	688	9
SBKC-II	609	16
SBKT-I	1022	37

Literatur

- [1] IEC 60099-4, „Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems,“ VDE Verlag, 2014.
- [2] IEC/TS 60815-3, „Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems,“ VDE Verlag, 2016.
- [3] IEC 60099-8, „Surge arresters – Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV,“ VDE Verlag, 2017.
- [4] P. Raschke, „Mechanical Consideration & Service Life of Non-Gapped Line Arresters,“ INMR, 2022.