Ausführung der Hochspannungs-Isolierung des 110 kV-Impedanzmesscontainers

Johannes Schräder*, Marc Meyer, Patrick Möbius, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*Johannes.schraeder@hsu-hh.de

***Kurzfassung* – Die Umsetzung eines Netzimpedanzmessgeräts auf der Hochspannungsebene stellt einen Meilenstein der messtechnischen Netzidentifikation dar und eine ebenso große technische Herausforderung. An der Professur für Elektrische Energiesysteme wurde ein Konzept für einen Prototypen entwickelt, um das patentierte Messverfahren auf der Hochspannungsebene einzusetzen. Kern ist die asynchrone Netzanregung, welche primär durch zwei Komponenten umgesetzt wird. Die SF_6-Schaltanlage erfüllt neben ihrer Schutzfunktion zusätzlich die Aufgabe der Phasenselektion zur asynchronen Netzanregung. Daran angeschlossen ist eine Sonderanfertigung eines leistungselektronischen Tanks. Dieser beinhaltet eine Schaltung aus B6-Diodenbrücke zur Gleichrichtung des Stroms, IGBT-Schalter zur Erzeugung des Pulsmusters und einen Leistungswiderstand zur Begrenzung der Anregungsleistung. Gefüllt ist der Tank mit einem Esteröl und einer Konstruktion aus speziellem Transformatorboard, um die hohen Spannungen zu beherrschen und die Komponenten zu fixieren. In diesem Paper wird der aktuelle Stand der Fertigung dieses Messgeräts und die abschließende elektrische Prüfung der Tankeinheit vor dem Einbau und der Inbetriebnahme vorgestellt.**

Stichworte – Netzimpedanz, Netzidentifikation, Hochspannung, Stehspannungsprüfung, Prototyp, Messgerät

NOMENKLATUR

A	Ampere
EEA	Erneuerbare Energieanlagen
HV	High Voltage
HSU	Helmut-Schmidt-Universität
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
SF_6	Schwefelhexafluorid
SHM	Structural Health Monitoring
SNH	Stromnetz Hamburg
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UMZ	Unabhängiger Maximalstromzeitschutz
V	Volt
kΩ	Kiloohm
MW	Megawatt

I. EINLEITUNG

Ein Schwerpunktthema an dem die Professur für Elektrische Energiesysteme der Helmut-Schmidt-Universität (HSU) seit vielen Jahren forscht ist die Netzimpedanzmessung und Netzidentifikation. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Umsetzung, des in der Professur entwickelten und patentierten Verfahrens zur Netzimpedanzmessung [1], auf der Hochspannungsebene dar. Dieses soll dazu eingesetzt werden, die Anschlussplanung von erneuerbaren Energieanlagen (EEA) zu optimieren, Netzrückwirkungen frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden und bietet darüber hinaus viele weitere Anwendungsmöglichkeiten, beispielweise im Structural Health Monitoring (SHM) [2]. Das Vorhaben begann bereits in 2012 mit dem Projekt „Entwicklung eines Messgerätes zur Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz auf der Hochspannungsebene bis 110 Kilovolt“. Die besonderen Anforderungen aufgrund der hohen Spannungen erforderten ein neues Hardware-Konzept, welches sich in der Umsetzung von dem bisherigen, erfolgreich auf der Mittelspannungsebene eingesetzten, Konzept unterscheidet.

Das Verfahren zur Bestimmung der dreiphasigen Netzimpedanz erfordert eine asynchrone, breitbandige Netzanregung, um die Impedanzauswertung bis 50 kHz zu ermöglichen [3]. Um mobil eingesetzt werden zu können, durfte der gesamte Messcontainer die Maße eines 40 Fuß Containers nicht überschreiten. ABBILDUNG 1 zeigt eine 3D-Darstellung des Hardware-Konzepts des 110 kV-Messcontainers.

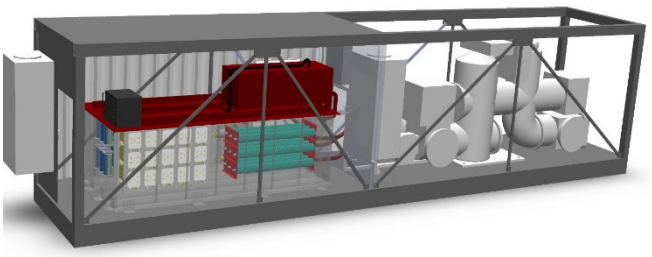

ABBILDUNG 1: 110 KV-MESSCONTAINER 3D-DARSTELLUNG.

Wie zu erkennen ist, setzt sich der 110 kV-Messcontainer aus zwei Teilen zusammen. Die rechte Hälfte wird von einer dreiphasigen SF_6-Schaltanlage eingenommen, welche zu einer Seite an das Netz angeschlossen wird. Während auf der Mittelspannungsebene die notwendige Anregung durch

DOI: 10.24405/14598

Thyristoren, IGBTs und einen Leistungswiderstand realisiert werden, dabei sorgen die Thyristoren für die Phasenselektion und Gleichrichtung des Stroms, wird im Gegensatz dazu auf der Hochspannungsebene die Phasenselektion über den messgeräteigenen SF_6-Leistungsschalter realisiert. Bei dem SF_6-Leistungsschalter handelt es sich um eine bereits für den Einsatz auf der Hochspannungsebene erprobte und etablierte Komponente. Gesteuert wird diese Komponente wie ein herkömmlicher Leistungsschalter über das Feldleitgerät, mit dem Unterschied, dass zur Durchführung der Messung lediglich zwei Phasen des Messgeräts an das Netz zugeschaltet werden. Die Abschaltung findet aus Sicherheitsgründen weiterhin immer dreiphasig statt.

An die SF_6-Schaltanlage schließt sich die Tankeinheit als zweite größere Komponente an, in ABBILDUNG 1 links dargestellt. Diese wird im hinteren Containerteil untergebracht und ist im Gegensatz zur Schaltanlage eingehaust. Bei der Tankeinheit handelt es sich um eine Spezialentwicklung der Professur in Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern. Die Tankeinheit beinhaltet sämtliche weiteren leistungselektronischen Komponenten, die zur Erzeugung der Netzanregung notwendig sind. ABBILDUNG 2 stellt die Tankeinheit und die darin enthaltenen leistungselektronischen Komponenten dar. Durch eine Konstruktion aus Transformerboard, welche ebenfalls auf ABBILDUNG 2 zu sehen ist, werden diese Komponenten an Ort und Stelle fixiert und die unterschiedlichen Spannungspotentiale im Tank gegeneinander abgeschirmt, um Faserbrückenbildungen zu verhindern und zur Spannungsfestigkeit beizutragen.

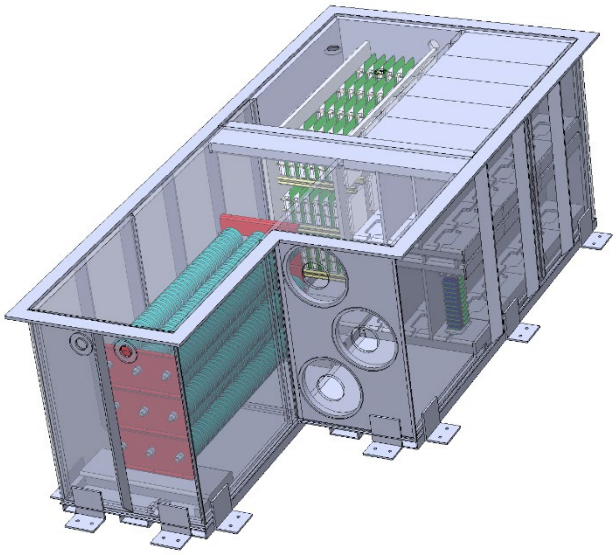

ABBILDUNG 2: TANKEINHEIT MIT LEISTUNGSELEKTRONISCHEN KOMPONENTEN UND TRANSFORMERBOARD.

Die, durch die Leistungsschaltanlage, phasenselektierte Spannung wird im Tank zunächst über eine B6-Diodenbrücke gleichgerichtet. Hiermit wird dann auch die zweite Aufgabe der im Pendant auf der Mittelspannungsebene eingesetzten Thyristoren erfüllt. Die Erzeugung des Pulsmusters erfolgt dann wiederum, wie auf der Mittelspannungsebene, mit einem entsprechend dimensionierten IGBT-Schalter. Eine Besonderheit dieses IGBT-Schalters besteht allerdings darin, dass die Gate-Ansteuerung über Lichtwellenleiter (LWL) realisiert wurden, um die benötigte Öffnung im Tankdeckel so gering wie möglich auszuführen, siehe ABBILDUNG 3. Begrenzt wird der Anregungsstrom durch einen 1 kΩ Leistungswiderstand von HVR International GmbH. Insgesamt ist mit diesem Aufbau eine Anregungsleistung von bis zu 22 MW möglich.

ABBILDUNG 3: IGBT IN TANK MIT LWL.

II. STAND DER MESSGERÄTFERTIGUNG

Die Inbetriebnahme und erste Messreihen sollen in der Schaltanlage der Stromnetz Hamburg (SNH) in Jenfeld durchgeführt werden. Der Container, inklusive der SF_6-Leistungsschaltanlage, befinden sich bereits vor Ort und wurden an die mittlere Sammelschiene der Schaltanlage Jenfeld angeschlossen. Die Spezialkonstruktion der Tankeinheit wurde in diesem Jahr fertiggestellt und befindet sich derzeit für letzte Tests in einer Fertigungs- und Prüfhalle.

A. SF_6-Schaltanlage

Eine der beiden Hauptkomponenten zur Erzeugung der Anregungsleistung ist die SF_6-Schaltanlage. Dabei handelt es sich um eine Anlage der Firma Siemens des Typs 8DN8. Diese befindet sich montiert im vorderen Teil des Messcontainers in der Schaltalge Jenfeld der SNH, zu sehen auf ABBILDUNG 4 in der rechten Bildhälfte.

ABBILDUNG 4: 110 KV-MESSCONTAINER IN DER SCHALTANLAGE JENFELD.

Die SF_6-Leistungsschaltanlage ist auf Betriebsdruck mit SF_6-Gas befüllt. Gesteuert und überwacht wird die Leistungsschaltanlage durch ein Feldleitgerät des Typs 7SJ64. Anhand eines baugleichen Feldleitgeräts wurden bereits Funktionstests der UMZ-Schutzfunktionen im Labor erfolgreich durchgeführt [4].

B. Tankeinheit

Die Tankeinheit wurde konzipiert, um die notwendige Leistungselektronik zur Erzeugung der Netzanregung auf engstem Raum unterzubringen. Eine Luftisolation wäre für diesen Zweck ungeeignet. Stattdessen wurde ein Esteröl vom Typ Shell Naturelle Transformerfluid S4I als Hauptisoliermedium gewählt. In Durchschlagversuchen in den Hochspannungslaboren der HSU konnte unter Normbedingungen eine Durchschlagfestigkeit des Esteröls von 73,5 kV festgestellt werden. Bei der besonders kritischen Spitze-Kugel-Anordnung wurde eine 99 %-Durchschlag-

festigkeit von 31,4 kV bei einem Elektrodenabstand von 2,5 mm festgestellt [5]. Der geringste Abstand unterschiedlicher Spannungspotentiale im Tank beträgt 11 cm. Die Anforderungen an die Spannungsfestigkeit sind somit erfüllt. Faserbrückenbindungen durch die ausgerichteten elektromagnetischen Felder im Betrieb werden durch eine Konstruktion aus Trafoboard und den Einsatz von Isolationspapier verhindert. Diese Konstruktion trennt sämtlich spannungsführenden Teile unterschiedlicher Spannungspotentiale voneinander und sorgt gleichzeitig für eine stabile Fixierung aller Komponenten im Tank. Im Abschnitt III wird ausführlich die abschließende Stehspannungsprüfung vor der Integration der Tankeinheit in den Messcontainer und dessen Inbetriebnahme beschrieben. In der Tankeinheit befindet sich eine B6-Diodenbrücke, ein IGBT-Schalter und ein 1 kΩ Leistungswiderstand.

1) Diodenstacks

Zur Gleichrichtung der Spannung wird eine B6-Diodenbrücke bestehend aus 36 Stacks mit jeweils 12 Dioden der Firma Astrol Electronic AG vom Typ 5SDD 06D6000 eingesetzt. Angeordnet ist die B6-Brücke, wie auf ABBILDUNG 5 zu sehen, über zwei Ebenen, wobei die erste Phase links, die zweite Phase rechts und die dritte Phase in der Mitte angeschlossen ist. Dabei werden die positive und negative Halbwelle zwischen der oberen und unteren Ebene getrennt. Von Hinten führt dann ein gemeinsamer Leiter zu dem IGBT-Schalter und von Vorne führt ein Leiter zum Widerstand. Diese Anordnung sorgt für ein gleichmäßiges Spannungspotential über die gesamte Diodenbrücke. Jeder einzelne Stack wurde vor der Installation auf seine Funktionsfähigkeit getestet. Es wurden die Durchgangs- und Sperrrichtung geprüft.

ABBILDUNG 5: B6-DIODENBRÜCKE IN DER TANKEINHEIT.

2) IGBT

Der IGBT-Schalter wurde, wie auf ABBILDUNG 6 zu sehen, als ein kompaktes Bauelement von der Firma Astrol Electronic AG geliefert.

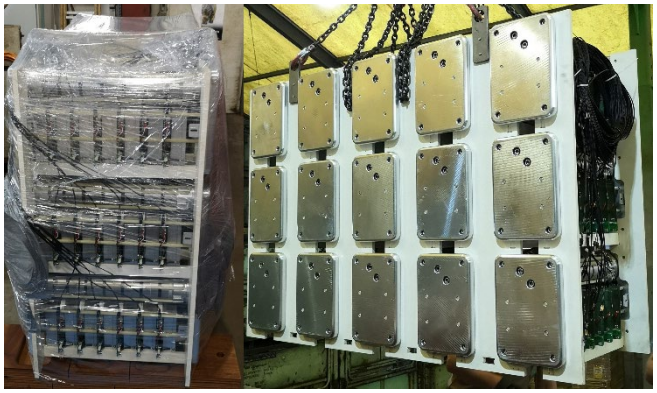

ABBILDUNG 6: IGBT-SCHALTER.

Der Schalter besteht aus insgesamt 15 Stacks mit jeweils sechs IGBTs vom Typ T0340VB45G des Herstellers IXYS. Zur Ansteuerung der 90 Gate Drive Units wird das Schaltsignal über Steuerboxen synchronisiert an alle IGBT mittels Duplex LWL gesendet. ABBILDUNG 7 zeigt die Steuerboxen in einem 19 Zoll Rack verbaut, wobei eine als Master und die andere als Slave fungiert. Um die Funktionsfähigkeit der IGBTs vor dem Schließen des Tanks zu überprüfen, wurden diese einzeln getestet. Zu diesem Zweck wurden zunächst die LWL einer Sichtprüfung unterzogen. Anschließend wurde jeweils über Emitter und Kollektor jeder Diode eine 600 V Gleichspannung mittels Delta Electronica Spannungsquellen angelegt und ein Schaltsignal via LWL an das Gate gesendet. ABBILDUNG 8 zeigt exemplarisch die gemessenen Schaltsignale während der Prüfung.

ABBILDUNG 7: STEUERBOXEN ZUR ANSTEUERUNG DES IGBT-SCHALTERS.

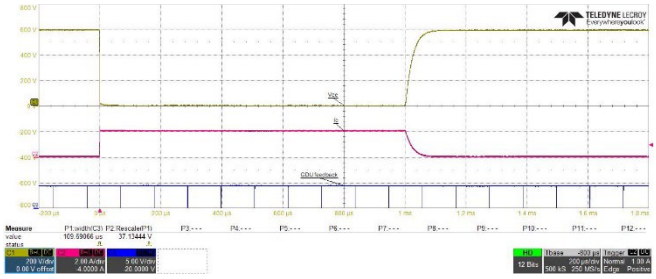

ABBILDUNG 8: SCHALTSIGNALE IGBT-PRÜFUNG, V_{ce} (GELB), I_c (ROT), GATE-FEEDBACK (BLAU).

In Gelb wird die Spannung über Kollektor und Emitter dargestellt. Der Kollektorstrom ist rot dargestellt. Das Feedbacksignal der Gateunit wurde in blau aufgetragen. Das Gatesignal wurde jeweils für eine Millisekunde gehalten, die Spannung bricht in dieser Zeit von 600 V auf 0 V ein und es fließt ein Strom von 2 A. Um die Gateunit über einen LWL anzusteuern besitzt diese einen parallelen Kondensatorstrang, welcher über die Kollektor-Emitter-Spannung geladen wird. Bei dem dritten, blauen Signal handelt es sich um ein Feedbacksignal der Gateunit. Aus der Pulsbreite des Signals kann die Spannung des parallelen Kondensatorstrangs der Gateunit abgeleitet werden. Im Prüfaufbau wurde diese verwendet, um eine ausreichende Kondensatorladung und damit die hinreichende Gatespannung zum Schalten des IGBT zu verifizieren.

3) Anschluss der Tankeinheit

Angeschlossen wird die Tankeinheit an die SF_6-Schaltanlage über drei HV-Kabel aus der Reihe des CONNEX-Systems von Pfisterer. Verwendet wird auf der Seite der Schaltanlage ein HV-CONNEX Kabelanschlussteil der Größe 5S und auf der Seite der Tankeinheit ein HV-CONNEX Kabelanschlussteil der Größe 6. Das Verbindungskabel und die Stecker in den Größen 5S und 6 sind auf ABBILDUNG 9 zu sehen. Zur Prüfung des gesamten Tankeinheit-Systems liefert der Hersteller Pfisterer zusätzlich zwei Prüfkabel und zwei Blindstecker. Bei den Prüfkabeln handelt es sich um dasselbe Kabelsystem der CONNEX-Reihe mit einer Gesamtlänge von 5 m. Tankseitig wird es über einen CONNEX-Stecker angeschlossen und auf der Seite des

Prüfkondensators verfügt es über einen Freiluftanschluss mit einem 2 m langen Isolator, an dessen Ende sich ein Presskabelschuh befindet. Die Stehspannungsprüfung der Tankeinheit wird in Abschnitt III beschrieben.

ABBILDUNG 9: HV-CONNEX VERBINDUNGSKABEL.

C. *Steuerung und Software*

Die Durchführung einer Netzimpedanzmessung wird mit Hilfe eines Steuercomputers mit eingebautem Transientenrekorder zur Aufnahme der Messdaten erfolgen. Zum einen verfügt der Steuercomputer über eine Bedienungssoftware vom Hersteller des Feldleit-gerätes. Diese dient der Parametrierung der Schutzsysteme. Zum anderen wurde eine Software entwickelt, welche die Aufnahme und Analyse der Messdaten sowie die Steuerung des SF6-Leistungsschalters und der Leistungselektronik übergeordnet koordiniert. Die tatsächliche Ansteuerung von Relais zum Schalten der binären Eingänge des Feldleitgerätes sowie die Ansteuerung des Lichtwellenleiters zum Schalten des IGBTs im Leistungselektroniktank erfolgt durch einen Mikrocontroller. Dieser lässt sich deterministisch programmieren, so dass er ein berechenbares Verhalten aufweist und eine höhere Ausfallsicherheit gewährleistet ist. Die Kommunikation zwischen Steuercomputer und Feldleitgerät sowie zwischen Steuercomputer und Mikrocontroller erfolgt über RS-232-Schnittstellen. Als zusätzliche Sicherheit wird eine Sicherheits-SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) verbaut, welche die Ansteuerung des Feldleitgerätes blockiert, insofern vorhandene Sicherheitsschalter nicht den gewünschten Schalterzustand aufweisen. Diese können beispielsweise Türkontakte oder Not-Aus-Schalter sein. Zur schnellen Abschaltung bei Fehlern im Leistungselektroniktank, ist dieser mit einem Buchholzrelais und einem Ölstandanzeiger versehen, welche direkt mit der Auslösespule der SF6-Leistungsschalter verbunden werden. Hierdurch kann im Fehlerfall die sehr schnelle Abschaltung des Leistungsschalters gewährleistet werden.

III. SPANNUNGSFESTIGKEIT DER TANKEINHEIT

Während bei vielen Komponenten des Hochspannungsmesscontainers auf etablierte und erprobte Technik gesetzt werden konnte, musste das Herzstück des 110 kV-Messcontainers, die Tankeinheit, als Prototyp völlig neu aufgebaut werden. Um die Betriebssicherheit am öffentlichen Netz zu gewährleisten ist es notwendig die elektrische Spannungsfestigkeit der Tankeinheit nachzuweisen. Bei der Erstellung eines Prüfprogramms zur Nachweisführung der elektrischen Spannungsfestigkeit, als Grundlage der Betriebssicherheit, wurden die VDE 0370 Teil 5 Isolierflüssigkeiten, die VDE 0434 Hochspannungs-Prüftechnik: Teilentladungsmessung, die VDE 0111-1: Isolationskoordination Teil 1 und 2, die VDE 0104 Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen, sowie die allgemeinen Vorgaben und Richtlinien der Elektrotechnik berücksichtigt.

A. *Isolieranordnung*

ABBILDUNG 10 stellt schematisch die Verschaltung der leistungselektronischen Komponenten innerhalb der Tankeinheit und die nichtselbstheilende Festkörperisolierung durch Transformerboard zwischen den Leitern und der Tankwand dar.

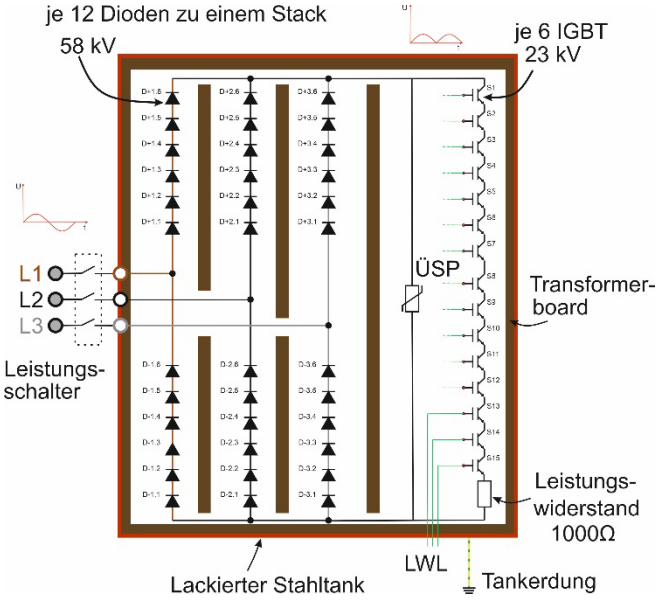

ABBILDUNG 10: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ISOLIERANORDNUNG DER TANKEINHEIT.

Im Einsatz als Messgerät auf der Hochspannungsebene wird folgende elektrische Beanspruchung erwartet: Das Gehäuse der Tankeinheit, ein lackierter Stahltank, wird an mehreren Stellen an der Betriebserde des Netzanschlusspunktes geerdet. Die drei Leiter L1, L2 und L3 werden über den Leistungsschalter paarweise zu je zwei Leitern an das Netz geschaltet (L1-L2, L2-L3, L3-L1).

Das Spannungspotential zwischen zwei Leitern am Eingang der Tankeinheit beträgt 110 kV Effektivspannung mit 155,5 kV Spannungsamplitude. Jeder Leiter wird hinter den Anschlüssen innerhalb des Tanks zur Gleichrichtung über die B6-Diodenbrücke aufgetrennt. Die Dioden mit positiver und negativer Sperrrichtung einer Phase befinden sich im Tank zueinander parallel übereinander und sind antiseriell verschaltet. Der Effektivwerte der Spannung für jedes untereinander befindliche Paar, mit derselben Phase aber unterschiedlicher Sperrrichtung, beträgt 55 kV. Die höchsten Spannungsamplituden treten allerdings jeweils an den ersten und letzten Diodenstackpaaren auf mit jeweils 155,5 kV.

Die höchsten Spannungen der parallel nebeneinander befindlichen Diodenstacks der **Leiter-Leiter-Anordnung** betragen 155,5 kV Amplitudenspannung und 110 kV Effektivspannung und liegen jeweils am Eingang einer Diodenreihe an.

Das Spannungspotential zwischen diesen Leitern und dem geerdeten Stahltank beträgt 63,5 kV effektive Wechselspannung mit einer Spannungsamplitude von 90 kV. Hinter der B6-Diodenbrücke, zwischen dem Leistungswiderstand und der geerdeten Tankwand, wirkt ein gleichgerichtetes Wechselspannungspotential mit 90 kV Spannungsamplitude.

Die höchste Spannung der **Leiter-Erde-Anordnung** liegt am Ein- und Ausgang der Diodenschaltung an, mit einer Spannungsamplitude von 90 kV. Der geringste Abstand zwischen spannungsführenden Komponenten und dem Erdpotential beträgt 15 cm. Das geerdete Gehäuse ist von innen komplett mit 4 cm dicken Trafoboardwänden verkleidet und unter Vakuum mit Shell Naturelle Transformerfluid S4 I befüllt worden. Beide Isolationskomponenten wurden im Vorfeld in Labortests auf ihre Eigenschaften zur elektrischen Isolation untersucht.

Zur Spannungsfestigkeit in **Längsrichtung** muss sowohl die B6-Diodenbrücke als auch der IGBT-Schalter für die Betriebszustände des 110 kV Netzes ausgelegt werden. Diese Bauteile wurden von der Firma Astrol hergestellt und getestet. Sechs Diodenstacks mit jeweils 12 Dioden und einer gesamten Sperrspannung von 12 x 58 kV wurden pro Leiter und Halbwelle verbaut. Damit ergibt sich eine gesamte Sperrspannung von 348 kV. Der Sicherheitsfaktor zur erwarteten Spannungsamplitude von 155,5 kV beträgt demnach 2,24. 15 IGBT-Stacks mit jeweils sechs IGBTs und einer Sperrspannung von 23 kV sperren im geschlossenen Zustand die Nominalspannung i.H.v. 110 kV. Die gesamte Sperrspannung des IGBT-Schalters beträgt 345 kV. Damit besteht für den IGBT-Schalter ein Sicherheitsfaktor von 2,22.

B. Durchschlagfestigkeit und Teilentladungen

Im Zuge der Auslegung der Tankeinheit wurden Durchschlags- und Teilentladungsmessungen mit den Isolationskomponenten im Hochspannungslabor der HSU durchgeführt. Die Versuchsdurchführung wurden an die VDE 0370 Teil 5, Isolierflüssigkeiten, Bestimmung der Durchschlagspannung bei Netzfrequenz-Prüfverfahren und VDE 0434, Hochspannungs-Prüftechnik, Teilentladungs-messung, angelehnt.

Neben der vorgegebenen 50 %-**Durchschlagfestigkeit** wurde ein 1 %-Quantil zur Abschätzung der 99 %-Durchschlagfestigkeit bestimmt. Die für den Durchschlag kritischste Elektrodenanordnung mit der höchsten Feldlinienkonzentration ist eine inhomogene, asymmetrische Spitze-Kugel-Anordnung. Für diese Anordnung wurde für das Ester-Öl eine 99 %-Durchschlagfestigkeit von ca. 30 kV auf 2,5 mm nachgewiesen [5]. Bei weiterführenden Untersuchungen mit Transformerholz konnte festgestellt werden, dass vor allem die Ausrichtung der Holzschichten ein entscheidender Faktor ist [6]. Aus diesem Grund wurde darauf geachtet, dass zwischen sämtlichen kritischen Potentialunterschieden immer mindestens eine 20 mm dicke Barriere senkrecht zu den Feldlinien eingesetzt wurde. Für dieses Isoliermedium mit einer Dicke von 13,15 mm konnte bis zu einer Spannung von 80 kV kein Durchschlag im Prüfling nachgewiesen werden [6].

Zur Teilentladungsmessung wurde das MPD 600-Messsystem von Omicron verwendet. ABBILDUNG 11 zeigt die Einsetz- und Aussetzspannung für Teilentladungen in Ester-Öl bei einer Spitze-Spitze-Anordnung.

Zu sehen ist, dass ab ca. 18,35 kV Teilentladungen mit einer geringen Intensität einsetzten und ab ca. 31,5 kV sprunghaft ansteigen. Die Aussetzspannung lag bei etwa 25,4 kV und ist damit etwas niedriger als die Einsetzspannung, was als Indiz für Hohlraumentladungen interpretiert werden kann [7].

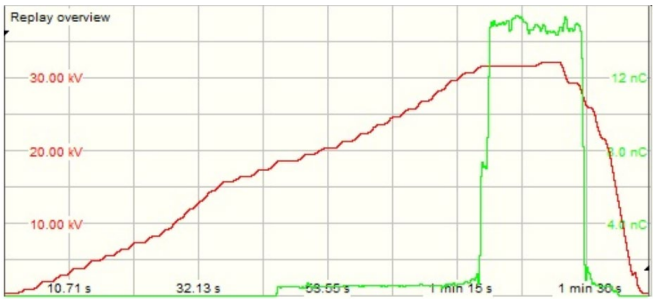

ABBILDUNG 11: SPITZE-SPITZE-ANORDNUNG: SPANNUNG ÜBER DER ZEIT (ROT), TEILENTLADUNGSINTENSITÄT ÜBER DER ZEIT (GRÜN) [5].

Gestützt wird diese Beobachtung durch den Fingerprint der Teilentladungen nach Einsetzen bei 31,6 kV zu sehen in ABBILDUNG 12.

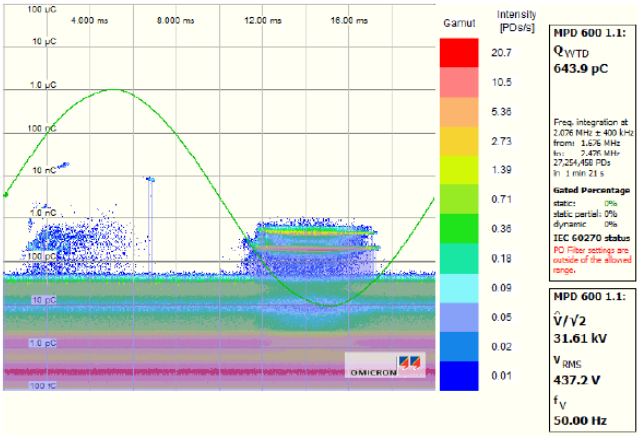

ABBILDUNG 12: FINGERPRINT NACH EINSETZEN DER TEILENTLADUNGEN BEI 31,6 KV [5].

Es sind Teilentladungen in beiden Halbwellen zu erkennen, welche sich allerdings in ihren Ausprägungen unterscheiden, was ebenfalls für Hohlraum- oder Oberflächenentladungen mit einseitigem Elektrodenkontakt spricht [7]. Die gemessenen Teilentladungen sind ab einer Spannung von 18,35 kV bei einem Elektrodenabstand von 2,5 mm aufgetreten. Diese lassen sich allerdings nicht eindeutig dem Prüfling zuordnen und können auch an den Kontaktstellen entstanden sein. Eine frühzeitige Materialalterung aufgrund von Teilentladungen im Tank ist daher nicht zu erwarten.

C. Stehspannungsprüfung

Als Grundlage für die Prüfung zur Feststellung der Spannungsfestigkeit gelten folgende Grundsätze: Bei der Tankeinheit handelt es sich um einen Prototyp vorgesehen für den Einsatz auf der 110 kV-Hochspannungsebene, für den es keine Prüfnormen bzw. Prüfprogramme gibt. Als Messsystem ist dieser nicht grundsätzlich als Betriebsmittel anzusehen und wird auch nicht als solches eingesetzt. Die Tankeinheit befindet sich hinter einer SF_6-Schaltanlage innerhalb eines klimatisierten Containerraums. Der gesamte Messcontainer soll zur Durchführung von Einzelmessungen auf der 110 kV Hochspannungsebene eingesetzt werden. Das Tankgehäuse wird über die Betriebserde des Umspannwerks Jenfeld geerdet. Das gesamte Messsystem verfügt über ein umfangreiches Blitzschutzkonzept. Die Messeinheit wird nicht dauerhaft unter Spannung stehen. Es handelt sich um einen Prototyp eines Messgeräts, welches während der Einsatzphasen unter ständiger Beobachtung eines

schaltberechtigten Mitarbeiters steht. Die Tankeinheit ist von Umwelteinflüssen nicht betroffen. Daher wurde mit dem Netzbetreiber SNH vereinbart, dass die Nachweise für die Spannungssicherheit des Tanks mittels Labor- und betriebsüblichen Prüfmitteln der Firma Elotec GmbH und der HSU erbracht werden. Die Prüfungen orientieren sich an den allgemeinen gültigen Prüfvorschriften für Betriebsmittel.

Auf dieser Basis und orientiert an der VDE 0111-1: Isolationskoordination Teil 1 und 2 wurde folgendes Prüfprogramm festgelegt: Die Betriebssicherheit und die Qualität der Isolation von Geräten, Anlagen und Systemen im Hochspannungsnetz muss durch Hochspannungsprüfungen nachgewiesen werden. Die Festlegung der erforderlichen Prüfungen und Prüfspannungspegel erfolgt im Rahmen der Isolationskoordination. Die Isolationsanordnung der zu untersuchenden Tankeinheit ist eine Dreileiteranordnung. Diese ist in Leiter-Erde-Anordnung (p-e) sowie in Leiter-Leiter-Anordnung (p-p) zu beschalten [8] [9].

Als repräsentative Überspannung bezeichnet man Überspannungen, von denen angenommen wird, dass sie die gleichen dielektrischen Auswirkungen auf die Isolation haben wie Überspannungen einer bestimmten Kategorie, die im Betrieb aufgrund von verschiedenen Ursachen auftreten [8]. Für die Tankeinheit wird daher die Kategorie einer niederfrequenten, zeitweiligen Spannung am Anschlusspunkt zum SF_6-Leistungsschalter angenommen. Die Spannungsform entspricht einem Sinusverlauf mit einer Frequenz von 50 Hz. Als Dauer der Überspannung für die Prüfung wurde eine Minute festgelegt.

Als **Koordinationsstehspannung** wird der niedrigste Stehspannungswert der Isolierung ermittelt, bei dem noch das festgelegt Auswahlkriterium erfüllt wird.

TABELLE I: KOORDINATIONSSTEHSPANNUNG U_{CW}.

Koordinationsspannungen	***Wert***
Effektivwert der Außenleiterspannung	$110\ kV \cdot 1{,}1 = 121\ kV$
Amplitude der Außenleiterspannung	$121\ kV \cdot \sqrt{2} = 172\ kV$
Effektivwert der Leiter-Erde-Spannung	$\frac{121\ kV}{\sqrt{3}} = 70\ kV$
Amplitude Leiter-Erde-Spannung	$\frac{121\ kV \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 99\ kV$

Die Bestimmung der **erforderlichen Stehspannung** dient der Umrechnung der Koordinationsspannung auf passende, genormte Prüfbedingungen, um Unterschiede zwischen den Prüfbedingungen und den Betriebsbedingungen auszugleichen [8].

Der atmosphärische Korrekturfaktor K_t wird mit 1 gewählt, da die Tankeinheit im späteren Einsatz keinen äußeren Einflüssen ausgesetzt ist. Der Sicherheitsfaktor K_s berücksichtigt folgende Einflüsse:

- Unterschiede der Geräteordnung,
- Streuung der Produktqualität,
- Qualität der Installation,
- Alterung der Isolierung in der erwarteten Lebensdauer und
- unbekannte Effekte.

Der Sicherheitsfaktor K_s wird mit 1,2 als gering eingeschätzt, da es sich um einen einzigartigen Prototyp mit direkter Prüfung handelt und ausschließlich unbekannte Effekte berücksichtigt werden müssen.

Der Höhekorrekturfaktor K_a wird ebenfalls mit 1 gewählt, da die innere Isolation der Tankeinheit auf einem inkompressiblen Öl-Ester basiert.

Daraus folgt:

Erforderlicher Effektivwert der Außenleiterspannung: 145,2 kV

Erforderlicher Effektivwert der Leiter-Erde-Spannung: 84 kV

Angewendet wird die Kurzzeit-Wechselspannungsprüfung. Hierbei werden die Anschlüsse der Isolieranordnung mit der relevanten Bemessungs-Kurzzeit-Wechselspannung, der erforderlichen Stehspannung U_{rw} bzw. der Prüfspannung U_P beaufschlagt. Die Isolierung gilt als fehlerfrei, wenn kein Durschlag auftritt [9].

Für die Leiter-Erde-Anordnung gilt die Prüfung bei einer Effektivspannung von mindestens 84 kV und bei der Leiter-Leiter Anordnung von mindesten 145,2 kV als bestanden.

IV. WEITERES VORGEHEN

Derzeit wird die Lieferung der Prüfkabel zur Durchführung der Stehspannungsprüfung für Ende Oktober 2022 erwartet. Nach bestandener Prüfung wird die Tankeinheit nach Hamburg Jenfeld transportiert und in dem hinteren Container-Teil des Messgerätes eingesetzt. Die Verbindung mit der SF_6-Leistungsschaltanlage wird durch Fachpersonal von Pfisterer durchgeführt. Mit der Inbetriebnahme und einer ersten Messung wird im Sommer 2023 gerechnet.

LITERATUR

[1] D. Schulz, M. Jordan, T. Do und H. Langkowski, „Vorrichtung zur Messung der Netzimpedanz eines elektrischen Versorgungsnetzes“. 2010.

[2] J. Schräder, . M. Meyer, P. Möbius und D. Schulz, „Optimierte Netzanschlussbewertung von Erneuerbaren Energieanlagen durch die Bewertung von Oberschwingungsemissionen mittels Zeit- und Frequenzabhängiger Netzimpedanzmessungen,“ in *Hamburger Beiträge zum Technischen Klimaschutz 3*, 2021.

[3] T. Do, Dissertation, Messeinrichtung zur mobilen Netzimpedanzmessung auf der Mittelspannungsebene, Hamburg, 2014.

[4] C. Ritter, Inbetriebnahme eines Teststandes zum Betrieb einer SF6-Leistungsschaltanlage im Asynchronen Schaltbetrieb, Hamburg, 2020.

[5] J. Schräder, Messtechnische Untersuchung der Isolierfähigkeit des Ester-Öls Naturelle Transformer Fluid S4 I für den Einsatz auf der Hochspannungsebene, Hamburg, 2017.

[6] J. Schräder, Messtechnische Untersuchung der kritischen Bereiche der elektrischen Festigkeit im Impedanzmessgerät für die 110 kV Hochspannungsebene, 2017.

[7] A. Küchler, Hochspannungstechnik Grundlagen-Technologie-Anwendung, Springer, 2009.

[8] VDE, *0111-1 Isolationskoordination: Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen,* VDE, 2010.

[9] VDE, *0111-2 Isolationskoordination: Teil 2: Anwendungsrichtlinien,* VDE, 2021.