Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 7

Artikel: Das Verhalten von Transformerboard bei Kurzschlussbeanspruchung

Autor: Dahinden, V.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904787

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das Verhalten von Transformerboard bei Kurzschlussbeanspruchung

V. Dahinden

Es wird über Untersuchungen über das mechanische Verhalten von Wicklungsdistanzierungen von Transformatoren berichtet, die durchgeführt wurden, um über die dynamische Belastbarkeit im Kurzschlussfalle bessere Kenntnisse zu schaffen.

Compte rendu des essais du comportement mécanique des cales de distancement des enroulements de transformateurs, entrepris pour obtenir de meilleures connaissances de la charge dynamique admissible dans le cas d'un court-circuit.

Die Arbeit ist im Rahmen eines Projektes des Department of Energy DOE (USA) entstanden.

Adresse

V. Dahinden, dipl. Chem., H. Weidmann AG, 8640 Rapperswil

Mitautoren sind: *H. G. Fischer*, EHV-Weidmann Ltd., St. Johnsbury (USA), sowie *R. Ammann, P. Brupbacher* und *H. Hummel*, H. Weidmann AG, 8640 Rapperswil.

1. Einleitung

Über die Art und das Auftreten von Druckbeanspruchungen in Transformatorenwicklungen wurde in [1] ausführlich berichtet. Hohe Druckbeanspruchungen treten vor allem im Kurzschlussfalle unter pulsierenden Kräften auf, welche die Isolationen vorgepresster und vorgespannter Wicklungen durch schwingende Bewegungen zerstören können. Der steigenden Leistung wegen gewinnt die Kurzschlussfestigkeit des Transformators immer mehr an Bedeutung, und sie ist ebenso wichtig wie das dielektrische Verhalten. Vor allem die axial kontrahierenden Kurzschlusskräfte stellen hohe Anforderungen an das Isoliermaterial. Es können Beanspruchungen bis 10 kN/cm² auftreten und bewirken, dass sich durch Nachlassen der Wicklungspressung der ursprüngliche Aufbau und damit die Symmetrie der Wicklungen verändert. Zwischen den scheibenförmigen Spulen und Abteilungen der Wicklung angeordnete Distanzstücke aus Transformerboard gewährleisten einerseits den Durchfluss des Kühlöls und haben anderseits die auf deren Fläche konzentrierten Presskräfte zu übertragen. Es ist wichtig, dass sich diese Teile so wenig wie möglich deformieren, auch während längerer Belastungsdauer, damit die Vorpressung, welche Voraussetzung für eine gute Kurzschlussfestigkeit ist, während des Betriebs aufrechterhalten bleibt. Das heisst, dass im gesamten Pressbereich der Wicklung mit den aufgebrachten Drücken statisch und während Kurzschlussvorgängen dynamisch keine bleibenden Verformungen auftreten dürfen. In speziell gebauten Pressvorrichtungen können statische und dynamische Einflüsse auf Transformerboard gemessen werden.

Verschiedene Transformerboard-Qualitäten wurden auf ihr dynamisches Kompressionsverhalten hin geprüft. Dabei handelte es sich um Material, welches verschiedenen Aufbereitungsverfahren unterzogen wurde. Unbehandelte oder gehobelte Proben wurden mit oder ohne Druck und zum Teil mit 12 Temperaturwechselzyklen bei fester Pressung aufbereitet. Während der Aufbereitung wurde das statische Kompressionsverhalten gemessen. Nach den statischen Kompressionstests bzw. der Aufbereitung wurde das Probenmaterial zur Messung des dynamischen Verhaltens verwendet.

Proben, welche ohne Druck aufbereitet wurden, wiesen bei den dynamischen Versuchen durchwegs eine höhere plastische Verformung auf. Auch lag der *E*-Modul in der Mehrheit der Fälle tiefer als bei Proben, die mit Druck aufbereitet wurden. Daraus lässt sich eine stabilisierende, gewissermassen härtende Wirkung der Aufbereitung unter Druck ableiten.

Die Stabilisierungszeit hatte einen grossen Einfluss auf den Verlauf der plastischen Verformung. Weichere Materialien benötigen eine höhere Stabilisierungszeit als harte. Schlecht stabilisierte Proben wiesen bei der dynamischen Prüfung einen deutlich steigenden Kurvenverlauf der plastischen Verformung auf.

2. Statische Druckmessungen

2.1 Prüfmethode

Die Übertragung der für den Erhalt der Pressung im Betrieb eines Transformators angelegten Kraft ist zur Hauptsache Aufgabe von Elementen aus Transformerboard. Zwar ist auch das Papier der Leiterisolation in den Aufbau der Wicklungsabstützung miteinbezogen, bedeutet jedoch, verglichen mit der Anzahl und Stärke der Auflagen aus Transformerboard sowie der massiven Abstützringe, nur einen verhältnismässig geringen Anteil und wurde deshalb bei diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt.

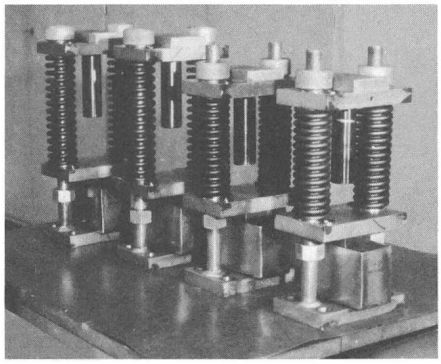

Fig. 1 Prüfeinrichtung für Temperaturwechselzyklen unter konstantem Druck

Als Prüfmethode für die Beurteilung des Druckverhaltens über lange Zeit diente das in [2] kurz beschriebene Wechselzyklusverfahren. Bei diesem Verfahren wird eine gewünschte Anzahl zu messender Proben aufgestapelt und unter Öl in einer Kompressionseinrichtung mit Spiralfedern auf einen hohen Druck von 10 N/mm² gebracht. Der Wechselzyklus besteht in zwölfmaligem Auf- und Abfahren der Temperatur zwischen 25 und 90 °C mit einer jeweiligen Taktzeit von 5 h. Die Wahl fiel auf dieses Verfahren in erster Linie deshalb, weil bekannte und zum Teil auch standardisierte Kurzzeitprüfungen nur sehr beschränkte Aussagen über das wirkliche Verhalten von Wicklungsdistanzierungen über längere Zeit abgeben. Zudem sind erhebliche Streuungen bei Kurzzeitprüfungen ein weiteres stetes Hindernis, exakte Schlüsse für die Praxis zu ziehen.

Der Temperaturwechselzyklus-Versuch stellt eine praxisnahe Operationsfolge dar, sind doch bei einem Transformator durch den Tages- und Nachtbetrieb ähnliche Vorgänge zu beobachten. Die Dauer des Wechselzyklusversuchs lässt Schlüsse auf das Langzeitverhalten von Distanzierungen zu (Fig. 1).

2.2 Aufbereitung

Das Aufbereitungsverfahren von Wicklungsdistanzierungen hat sich als ausserordentlich wichtig erwiesen. Nur unter Vakuum aufbereitetes Transformerboard erfährt im nachgeschalteten Ölimprägnierprozess eine weitere Schrumpfung, genannt Ölschrumpfung. Um diese vorwegzunehmen und um gleichzeitig die Distanzierungsproben mechanisch zu stabilisieren, wurde die Aufbereitung vor dem Versuch unter konstanter Last von 10 N/mm² vorgenommen, gefolgt von einer Ölimprägnierung unter Vakuum.

Physikalische Prüfwerte von diversen Transformerboard-Qualitäten (Nenndicke 3 mm)

Tabelle I

			Trbd calendered	Trbd mouldable	Trbd precompressed, high density	Blockspan 2×2 mm verleimt und gehobelt
Dicke gemessen		mm	2,93	3,15	3,04	3,98
Rohdichte		g/cm³	1,17	1,01	1,30	1,27
Zugfestigkeit	MR	N/mm²	107	90	133	139
Zugfestigkeit	QR	N/mm²	72	62	110	111
Dehnung	MR	%	6,5	7,2	6,0	4,7
Dehnung	QR	%	7,3	7,5	6,6	4,7
Biegefestigkeit	MR	N/mm²	78	64	90	135
Biegefestigkeit	QR	N/mm²	69	57	77	123
Ölaufnahme		Gew.-%	17,2	26,8	9,2	8,9
Schrumpfung	MR	%	0,58	0,46	0,49	0,28
Schrumpfung	QR	%	0,79	0,69	0,65	0,33
Schrumpfung	Dicke	%	5,5	3,7	6,1	3,4
Lagenfestigkeit		N/9 cm²	184	240	–	–
Leitfähigkeit		µS/cm	26,3	27,4	32,4	44,9
pH-Wert		–	7,4	7,4	7,1	6,2
Aschegehalt		%	0,32	0,34	0,32	1,18
Wassergehalt		%	7,5	6,3	6,8	5,2

MR = in Maschinenrichtung; QR = quer zur Maschinenrichtung

Bei den anschliessenden Versuchen zeigte sich, dass eine solche Aufbereitung zur kleinsten plastischen Verformung über längere Zeit führt.

2.3 Probenmaterial

Das Probenmaterial wurde so gewählt, dass möglichst alle gängigen Transformerboard-Qualitäten vertreten waren. Tabelle I gewährt Einblick in die wichtigsten Materialdaten.

2.4 Messresultate

Die Resultate des Temperaturwechselzyklus-Versuchs (Tabelle II) ergaben eine klare Selektionierung verschiedener Qualitäten Transformerboard. Ein Trend Richtung Material hoher Dichte ist dabei unverkennbar.

Die Proben aus diesen Versuchen werden im Sinne eines praxisnahen Vorgehens weiter den dynamischen Kompressionsmessungen zugeleitet. Frische, unbelastete Proben würden ein völlig falsches Bild widerspiegeln, zumal ja im Transformator die Distanzierungen vor jeglicher dynamischer Druckbelastung statisch gepresst werden.

Resultate der Temperaturwechselzyklen: Plastische Verformung nach 12 Wechselzyklen (%)

Tabelle II

Transformerboard calendered	0,22
Transformerboard mouldable	0,32
Transformerboard precompressed, high density	0,06
Blockspan 2 × 2 mm	0,09

3. Dynamische Kompressionsmessungen

Dynamische Kompressionsmessungen bestehen im wesentlichen aus einer Beaufschlagung von Distanzierungsproben mit pulsierenden Druckstössen, im Normalfalle mit der Kurzschlussfrequenz entsprechenden 100 Hz, und hohen Druckspitzen bis zu 40 N/mm².

Gerätschaften für solche Messungen wurden bereits verschiedentlich beschrieben, beruhten in den meisten Fällen jedoch auf dem Prinzip fallender Gewichte bzw. dadurch erzeugter Einzelstösse hoher Frequenz.

Die Aufgabe im Rahmen dieses Projekts bestand in der Erfassung des Verhaltens von Distanzierungsmaterialien unter kurzschlussähnlichen Bedingungen, d.h. mit Druckstössen während einer Kurzschlussdauer von etwa 100 ms.

3.1 Aufbau der Prüfapparatur

Das Gerät zur Messung der dynamischen Kompression besteht aus vier Teilen (vgl. Gesamtansicht Fig. 12 in [2]): dem Hydraulikteil, dem Prüfblock

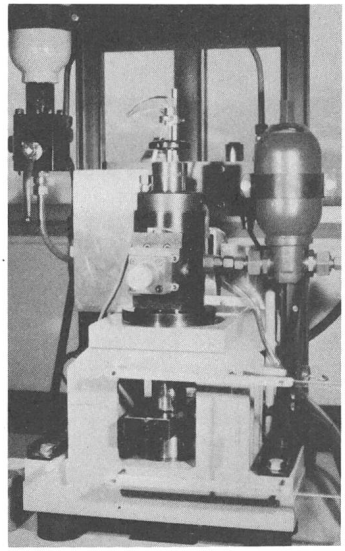

Fig. 2 Prüfblock für dynamische Kompressionsmessungen

mit Druckkolben und elektrohydraulischem Regelventil, dem elektronischen Regelteil sowie der Messeinrichtung für Druck und Weg.

Der Hydraulikteil versorgt die Messapparatur mit Öl unter einem Druck von 300 kp/cm². Figur 2 zeigt den Prüfblock.

Dynamische Versuche an unter Druck vorbehandelten Materialien Tabelle III

Geprüfte Materialien	Plastische Verformung in ‰ der Probendicke			Elastische Verformung in ‰ der Probendicke			*E*-Modul in N/mm² × 10³		
Stösse	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Transformerboard calendered	1,1	1,9	2,4	10,8	11,8	12,1	2,7	2,5	2,4
Transformerboard mouldable	3,8	5,6	6,5	19,2	17,9	18,1	1,5	1,6	1,6
Transformerboard high density	0,5	0,6	0,6	6,8	6,3	6,5	4,3	4,6	4,5
Blockspan 2×2 mm	1,0	1,0	1,0	7,0	7,3	7,3	3,7	4,0	4,0

3.2 Dynamische Druckmessungen

Den dynamischen Druckmessungen gingen, wie erwähnt, statische Aufbereitungsvorgänge voran.

Die dynamische Kompressionsapparatur wurde so konzipiert, dass sowohl statische wie auch dynamische Belastungen überlagert oder einzeln applizierbar sind. In der Regel wird mit statischen Vorlasten bis zur Konstanz des Weges (Probendicke) gefahren und anschliessend dynamisch bis zu Spitzenlasten innerhalb der Zeit von 100 ms und bei 100 Hz belastet, das Ganze unter Öl und bei 90 °C während 100 ms pro Versuch (Fig. 3, 4).

Die statischen Drücke von 10 N/mm² und dynamische Spitzenlasten bis 40 N/mm² entsprechen einem angenommenen Mittelwert aus der Praxis. Einzelproben sowie auch kleine Stapel im Kleinformat 25 × 25 mm dienten als Prüfmaterial.

Selbstverständlich haben Parameter wie Öltemperatur, Frequenz, Vorpresslast, Spitzenlast sowie Stabilisierungsdauer einen Einfluss auf die Messresultate. Zum Vergleich diverser Distanzierungsqualitäten sowie von deren Aufbereitung wurden deshalb einheitliche Bedingungen für die dynamischen Messungen gewählt.

Die Resultate der dynamischen Kompressionsmessungen lassen Rückschlüsse auf die Qualität einer Distanzierung und hiermit auf das Langzeitverhalten in Transformatoren zu. Ein eindeutiger Trend Richtung minimaler plastischer (verbleibender) Verformung zeichnet sich an Proben ab, welche nach dem Heisspressverfahren hergestellt sind (Tabelle III). Allgemein kann festgestellt werden, dass die Aufbereitung unter statischem Pressdruck die plastische Verformung bei dynamischer Belastung verringert, unabhängig von der Qualität der Distanzierungsproben.

Aus den Belastungskurven (Druck/Weg-Diagramm) lässt sich nebst der plastischen Verformung auch der Ela-

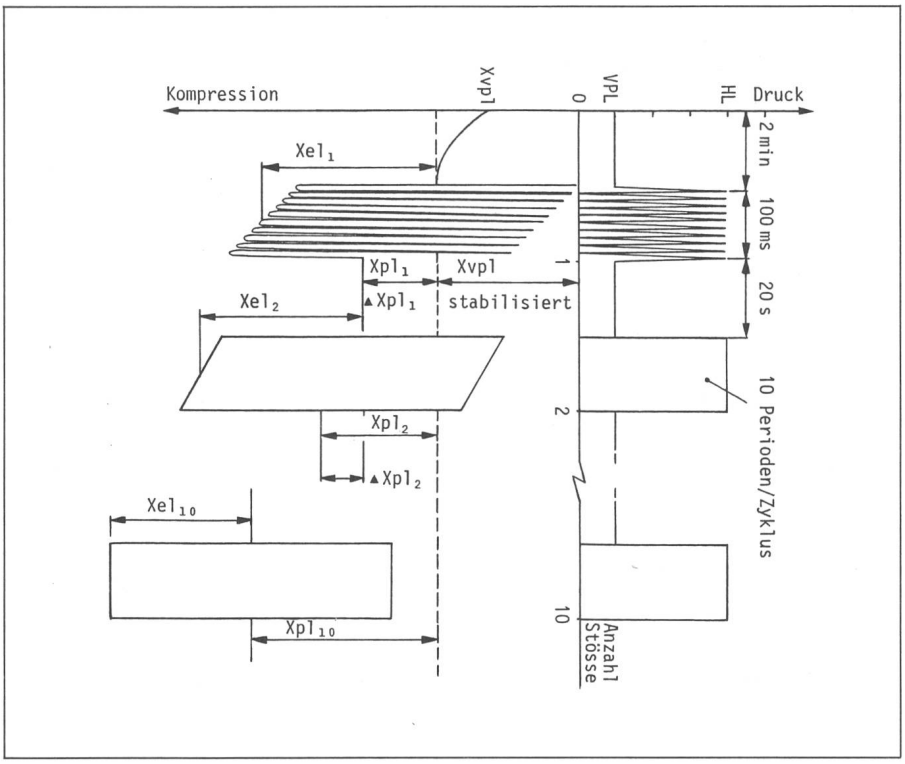

Fig. 3 Messvorgang der dynamischen Kompressionsprüfung

HL	Hochlast, Spitze des Druckes
VPL	Vorpresslast
X	Kompressionsweg
Xvpl	Durch Vorpresslast stabiler Anfangswert
Xpl 1...10	Zusätzlich zu Xvpl nach jedem Stoss
ΔXpl 1...10	Zunahme des Kompressionsweges unter Vorpresslast VPL von Stoss zu Stoss als plastische Verformung durch den Stoss
Xel 1...10	Mittlerer elastischer Kompressionsweg bei der Spitze HL des Druckes

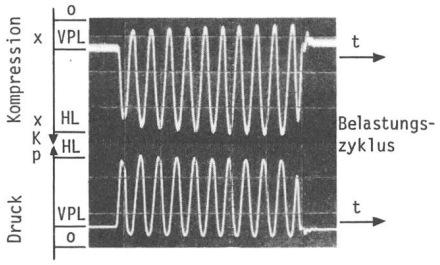

Fig. 4 Oszillogramm eines Belastungszyklus dynamischer Kompression

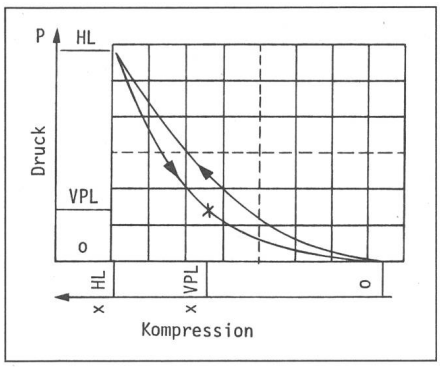

Fig. 5 Kompressionsvorgang während einer Periode

stizitätsmodul errechnen (Fig. 5). Dieser wird zwischen Vorpresslast und Hauptlast definiert:

$$E = \frac{p \cdot d \cdot \varepsilon \cdot 10^4}{U_{el}} \text{ (kN/cm}^2\text{)}$$

p Belastungsdruckdifferenz (HL–VPL) (kN/cm²)
d Probendicke (cm)
ε Messempfindlichkeit (mV/µm)
U_{el} gemessener Spannungswert (X_{el}) (mV)

Eine hohe Materialdichte wirkte sich stabilisierend aus bzw. brachte ganz allgemein einen höheren Elastizitätsmodul und geringere plastische Verformung. Auch die Elastizität war erwartungsgemäss und entsprechend dem hohen *E*-Modul gering.

Formbare Qualitäten (Transformerboard mouldable) liessen sich im allgemeinen schlecht stabilisieren. Eine dauernde Zunahme der plastischen Verformung liess einen inneren Faserverbund bei dieser Art Transformerboard vermissen.

Ein wesentlicher Einfluss konnte der Beschaffenheit der Probenoberfläche zugemessen werden. Sind Oberflächen mit Rastern oder Siebmarkierungen versehen, tragen diese durch Zonen mit geringer Dichte und unregelmässiger Struktur zu einer betont stärkeren plastischen Verformung bei. Durch leichtes Abhobeln bzw. Kalibrieren kann dieser negative Effekt leicht behoben werden.

Die Zusammenstellung der Daten in Diagrammen gibt Aufschluss über die bei den einzelnen Messungen erhaltenen Materialcharakteristiken (Fig. 6):

Transformerboard calendered (Fig. 6a):

Plastische Verformung: Proben, welche ohne Druck aufbereitet wurden, zeigen höhere Werte. Deren Kurve liegt auf einem höheren Niveau und steigt steiler an.

E-Modul: Der *E*-Modul ist in beiden Versuchen konstant. Allerdings verhält sich Transformerboard calendered ohne Druck aufbereitet klar weicher.

Folgerung: Die Aufbereitung unter Druck macht Transformerboard calendered härter und vermindert die plastische Verformung.

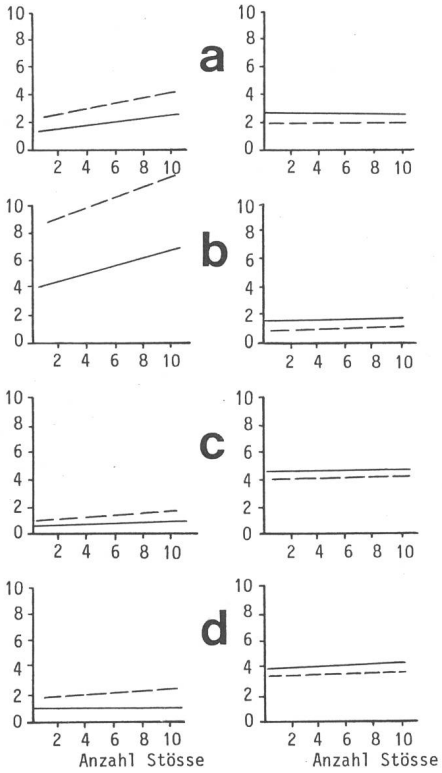

Fig. 6 Dynamisches Kompressionsverhalten

Links: plastische Verformung in ‰ der Probendicke in Funktion der Anzahl Stösse
Rechts: E-Modul in 10^3 N/mm²
----- Aufbereitung ohne Druck
——— Aufbereitung mit Druck
a Transformerboard calendered
b Transformerboard mouldable
c Transformerboard precompressed, high density
d Blockspan 2×2 mm

Transformerboard mouldable (Fig. 6b):

Plastische Verformung: Die plastische Verformung des ohne Druck aufbereiteten Materials liegt deutlich höher und steigt steiler an.

E-Modul: Beide Aufbereitungsvarianten zeigen einen konstanten *E*-Modul. Ohne Druck aufbereitetes Transformerboard mouldable verhält sich weicher als das mit Druck aufbereitete.

Folgerung: Die Aufbereitung unter Druck wirkt stabilisierend auf die plastische Verformung und macht das Material härter.

Transformerboard precompressed, high density (Fig. 6c):

Plastische Verformung: Beide Aufbereitungsvarianten zeigen eine geringe, kaum zunehmende Verformung. Der horizontale Kurvenverlauf zeigt, dass dieses Transformerboard nach einer Aufbereitung unter Druck vollständig stabilisiert ist.

E-Modul: Auch hier verhalten sich beide Aufbereitungsvarianten ähnlich.

Folgerung: Bei Transformerboard precompressed, high density, handelt es sich um ein sehr hartes, stabiles Material.

Blockspan 2 × 2 mm (Fig. 6d):

Plastische Verformung: Blockspan, unter Druck aufbereitet, weist eine konstante, nicht ansteigende Verformung auf.

E-Modul: Bei beiden Aufbereitungsvarianten ergibt sich ein hoher, konstant verlaufender E-Modul: Die auftretenden Unterschiede liegen im Streuungsbereich.

Folgerung: Die Aufbereitung unter Druck hat einen grossen, stabilisierenden Einfluss auf die plastische Verformung. Nach einer Aufbereitung ohne Druck steigt die Verformung nach jedem Stoss weiter an, bis das Material stabil ist.

Literatur

[1] *H. P. Moser:* Transformerboard. Die Verwendung von Transformerboard in Grossleistungstransformatoren. Sonderdruck aus der Zeitschrift «Scientia Electrica». Rapperswil, H. Weidmann AG, 1979.

[2] *H. P. Moser* u. a.: Entwicklungstendenzen bei den Isolationssystemen für Transformatoren. Bull. SEV/VSE 72(1981)13, S. 674...679.