

## Verlustleistungsreduzierung durch leistungseffiziente Transformatoren mit Trafokernen aus Nanotechnologie

### 1. Verlustquellen und Einflussfaktoren Leerlaufverluste und Lastverluste

Bei der Beurteilung von Trafoverlusten wird meist von Leerlauf- und Lastverlusten gesprochen, für welche aus physikalischer Sicht die nachstehend erläuterten Eisen- und Kupferverluste (Aluminium) der sog. Wicklungsverluste maßgebend sind. Die Leerlaufverluste  $P_0$  werden oberspannungsseitig bei Nennspannung und ohne Last gemessen. Diese werden durch die Eisenverluste im Trafokern bestimmt.

Je nach physikalischer Zusammensetzung des Eisens, Siliziumanteil, Kohlenstoffanteil und der Schichtstärke des umzumagnetisierten Materials beeinflussen die Eisenverluste im Trafokern. Die Lastverluste werden aus der im Kurzschluss mit Nennstrom gemessenen Impedanz berechnet. Diese werden bei Nennlast in der Regel durch die Kupferverluste bestimmt.

#### 1.1 Eisenverluste

Der Eisenkern des Trafos muss zur Erfüllung seiner Funktion im Rhythmus der Betriebsfrequenz ummagnetisiert werden. Dabei entstehen u.a. aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Kernwerkstoffes (Wirbelströme) Ummagnetisierungs- bzw. Eisenverluste. Die technische Entwicklung konnte diese Eisenverluste in den letzten Jahrzehnten markant senken aufgrund von:

- a) Einsatz verbesserter Eisenlegierungen z.B. kornorientierter Bleche
- b) Reduzierung des Blechstärken (0,2 mm heute)
- c) Einführung der >>Step-Lap<< Blechstapelung
- d) Laserbehandlung der Bleche zur Brechung der Kornstruktur
- e) Neuere Fertigungsverfahren zur Isolierung, Lackierung und Beschichtung von Eisenblech

Der eigentliche Technologiesprung basiert auf der Massenfertigung von sog. >>Gläsernen Metallen<< welche formbar waren. Die amorphen Bleche werden bis dato durch extrem schnelle Abkühlung der Eisenlegierung gewonnen womit ein glasartiger Aggregatzustand (amorph, d.h. völlig untergeordnete und magnetisch ungerichtete Legierungsstruktur) entsteht.

#### 1.2 Bleche aus amorphen Glasmetail

Magnetbleche aus amorphen Metall ohne kristalline Struktur weisen äußerst geringe Leerlaufverluste auf, auch im Vergleich zu den 0,23 mm HI-B Texturblechen.

Werden solche Trafokerne auf eine Optimierung der Gesamtverluste hin speziell ausgelegt, so resultiert auch eine Reduktion der Lastverluste. Amorphe Glasmetailbänder werden durch extrem schnelle Abkühlung der Eisenlegierung gewonnen womit ein glasartiger Aggregatzustand (amorph, d.h. völlig untergeordnete und magnetisch ungerichtete Legierungsstruktur) entsteht. Das aus der Fertigung kommende Band kann wegen seiner spröden Struktur weder gestanzt noch gestapelt werden. Das amorphe Metallband lässt sich daher nur für Wickelkerne verarbeiten.

Die Herstellung der Basismaterialien obliegt nur wenigen Oligopolisten wie Hitachi ; Metglas, oder Honeywell (Allied Signal). Diese Unternehmen haben ein Verfahren entwickelt und patentiert, welches aus den endlosen Bändern 5 teilige -Kernstrukturen zu konfigurieren, welches es ermöglicht auch Dreiphasige Kerngeometrien zu konfigurieren. Diese Konstruktionsart ist wegen seiner besonderen Blecheigenschaften erforderlich und führt zu größeren, schweren Kernen als vergleichsweise in >>3-schenkeligen Stapelblechkernen<< üblich.



Dreiphasiger amorpher Glasmetailkern  
*Three phase amorphous glass metal core*

## 2. Leistungsfähige Transformatoren aus nanokristallinen Werkstoffen

Die magnetischen Kerne in einem Transformator bestehen aus weichmagnetischen Werkstoffen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass beim Umkehren der Magnetisierungsrichtung nur geringe Leistungsverluste auftreten. 1987 entdeckten japanische Wissenschaftler eine neue Klasse weichmagnetischer Werkstoffe, die von winzigen magnetischen Körnern mit einem Durchmesser von nur wenigen Millionstel Millimetern (Nanometern) durchsetzt sind. Diese nanokristallinen Weichmagnete haben beispielsweise in der Technik der Erneuerbaren Energien die bisher üblichen weichmagnetischen Materialien ersetzt und zu einer Vielfalt neuer Anwendungen geführt.

Je weiter Forscher die Abmessungen ihrer Bauteile verkleinern, desto mehr Überraschungen erleben sie. Kleinste magnetische Körnchen mit einem Durchmesser von zehn Mikrometern bis herunter zu einem Mikrometer sind beispielsweise "härtere" Magnete als ein kompakter Block aus dem gleichen Material. Das heißt, sie sind wesentlich schwerer umzumagnetisieren. Dieser Effekt lässt aber wieder nach, wenn man zu noch kleineren Teilchengrößen übergeht. Bei Durchmessern von wenigen Nanometern wird es immer leichter, die Richtung der Magnetisierung umzukehren. Darüber hinaus erweist sich das Material als äußerst unempfindlich gegenüber mechanischer Beanspruchung. Diese beiden großen Vorteile machen sich die Forscher bei Eragerise bei der Konstruktion leistungsfähiger Mittelspannungstransformatoren zunutze.

Hergestellt wird der Werkstoff als metallisches Band. Es entsteht, indem eine 1200 Grad heiße Metallschmelze auf Eisenbasis (mit Zusätzen vom Silizium, Bor, Niob und Kupfer) durch eine enge Keramikdüse auf eine kalte, rotierende Walze gespritzt wird. Durch die rasche Erstarrung der Schmelze bildet sich ein amorphes Material, das im Gegensatz zu einem Kristall keine bevorzugten Raumrichtungen für die Magnetisierung aufweist. Diese Tatsache trägt ebenfalls dazu bei, dass das Material sich leicht ummagnetisieren lässt. Durch eine anschließende Wärmebehandlung bilden sich 10 bis 20 Nanometer kleine magnetische Kristalle, die in die übrige amorphe Struktur eingebettet sind.

Gegenüber herkömmlichen weichmagnetischen Werkstoffen besitzen die nanokristallinen Materialien den Vorteil, dass sie sich aufgrund der niedrigen Leistungsverluste nur geringfügig erwärmen. So lässt sich die Masse eines Transformators von ursprünglich 10 bis 15 Kilogramm pro Kilowatt Leistung auf weniger als 500 Gramm pro Kilowatt reduzieren.

Eines der hauptsächlichen Einsatzgebiete für solche Transformatoren ist die Energieumformung von Leistungswechselrichtern in den Erneuerbaren Energien. Hier kommt den nanokristallinen Werkstoffen außerdem zugute, dass sie gegenüber ständigen Erschütterungen, Vibrationen und Temperaturschwankungen vergleichsweise unempfindlich sind. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sieht SUNRISE in Bordnetzversorgungen für Schiffe, Energiedistribution bei Örtlichen EVU's und Elektroautomobilen sowie in der Schweißtechnik und Galvanik. In großen Druckmaschinen oder Windkraftanlagen. In großen Solar Wechselrichterstationen bis 2 MW haben diese amorphen Transformatoren von SUNRISE bereits ihre bevorzugte Verwendung gefunden, da durch die garantierte Einspeisevergütung eine schnelle kommerzielle Amortisation in Verbindung mit einem höherem Wirkungsgrad und niedrigsten Po-Verlusten bei hoher Wechsellast der Anlagen sich bereits in der Praxis durchgesetzt hat.

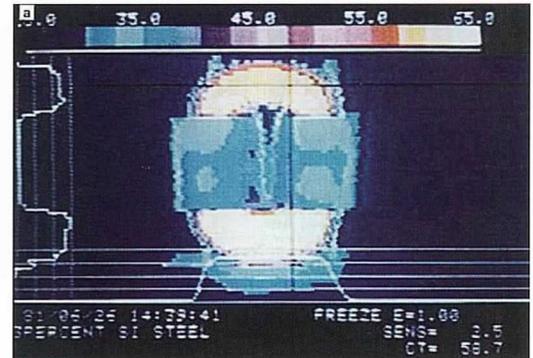


Bild Quelle: Hitachi Metals Ltd.

Infrarotfotografie von kornorientierten Siliziumstahlkern  
Infrared photographs of grain-oriented silicon steel core

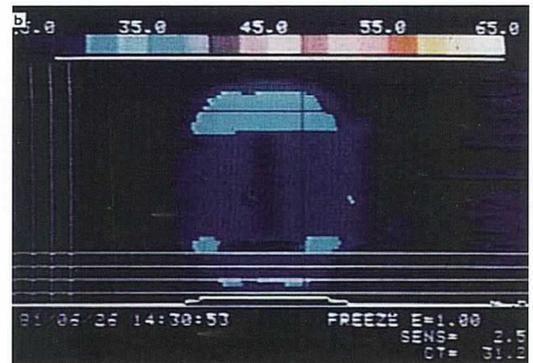


Bild Quelle: Hitachi Metals Ltd.

Infrarotfotografie von Amorpher Glasmetalldkern.  
Die extreme Leerlaufverluste des Amorphen Glasmetalls führt zu einer sehr kühlen Kerntemperatur.  
Infrared photographs of amorphous glass metal core.  
The extreme low no-load losses of the Metglas core cause the core to run much cooler.



## Wirtschaftliche Bewertung eines Transformators

Um Transformatoren unterschiedlichen Verlustniveau unter dem wirtschaftlichen Aspekt vergleichen zu können, wird folgende Formel gemäß dem Total-Ownning-Cost (T.O.C.) Abrechnungsverfahren verwendet. Durch diese Formel wird die Gesamtbetriebskosten eines Transformators in Euro berechnet. Der Transformator mit den niedrigsten Gesamtbetriebskosten stellt langfristig gesehen die günstigste Wahl dar. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass der niedrigere Einkaufspreis nicht die optimale wirtschaftliche Lösung darstellt.

$$T.O.C. = EK + (P_0 * KP_0) + (P_k * KP_k)$$

EK=Einkaufspreis

P<sub>0</sub>=Leerlaufverluste (Watt)

P<sub>k</sub>=Kurzschlussverluste (Watt)

KP<sub>0</sub>=kundenspezifischer Kapitalisationswert für P<sub>0</sub>(EUR/Watt)

KP<sub>k</sub>=kundenspezifischer Kapitalisationswert für P<sub>k</sub> (EUR/Watt)

## Economic evaluation of a transformer

In order to compare the transformers of different losses level under the economic aspect, the following formel is used in accordance with total-owning-cost (T.O.C.) calculation procedure. Throuth this formel the total operating cost of a transformer is in euro calculated. The transformer with the lowest total operating cost represents the economical choice in the long term. The result show that, the lowest purchasing price represents not the optimal economic solutions.

$$T.O.C.= EK + (P_0 * KP_0) + (P_k * KP_k)$$

EK=purchasing price

P<sub>0</sub>=No-load losses (Watt)

P<sub>k</sub>=Short circuit losses (Watt)

KP<sub>0</sub>=customer-specific capitalisation value for P<sub>0</sub> (EUR/Watt)

KP<sub>k</sub>=customer-specific capitalisation value for P<sub>k</sub> (EUR/Watt)

## Vergleich zweier Verteiltransformatoren TRAF01 (Amorpher Kern) und TRAF02 (Siliziumstahl Step-Lap-Kern) Comparison of two distribution transformers TRAF01 (amorphous core) und TRAF02 (silicon steel step-lap core)

Modell Model (kVA)	Leistung Power (kVA)	OS HV (kV)	P <sub>0</sub> P <sub>0</sub> (W)	P <sub>k</sub> P <sub>k</sub> (W)	EK EK (EUR)	P <sub>0</sub> *KP <sub>0</sub> P <sub>0</sub> *KP <sub>0</sub> (EUR)	P <sub>k</sub> *KP <sub>k</sub> P <sub>k</sub> *KP <sub>k</sub> (EUR)	T.O.C. T.O.C. (EUR)
TRAF01 (SH15)	1000	10	450	9900	15.000,00	1.935,00	11.088,00	28.023,00
TRAF02 (S11)	1000	10	1150	10300	12.500,00	4.887,00	11.536,00	28.923,00

Anmerkung: bei der Berechnung KP<sub>0</sub>=4,30 EUR/Watt, KP<sub>k</sub>=1,12 EUR/Watt  
Note: by the calculation KP<sub>0</sub>=4,30 EUR/Watt, KP<sub>k</sub>=1,12 EUR/Watt