

# Einfluss der Wicklungsart auf die Erwärmung von Asynchronmotoren

Autor(en): **Palit, Basanta B.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **80 (1989)**

Heft 23

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903747>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Einfluss der Wicklungsart auf die Erwärmung von Asynchronmotoren

Basanta B. Palit

**Der Einfluss verschiedener Ständer- und Läuferwicklungen auf die Erwärmung von Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren wurde untersucht. Es wurde festgestellt, dass diese bei Dreieckschaltung höher ist als bei Sternschaltung, bei Umrichterspeisung höher als bei Netzspeisung und dass die Temperaturerhöhung von Doppelkäfigläufern grösser ist als von Einfachkäfigläufern. Es wird auch gezeigt, dass der Temperaturanstieg minimal wird, wenn der Wert der Speisespannung entsprechend der Frequenz optimal gewählt wird.**

**On a étudié l'influence de différents enroulements du stator et du rotor sur l'échauffement des moteurs asynchrones à cage. On a constaté que cet échauffement est plus élevé en triangle qu'en étoile, qu'il est également plus élevé dans le cas d'alimentation par convertisseur de fréquence que par réseau, et que l'augmentation de température des moteurs à double cage est plus élevée que celle des moteurs à simple cage. On montre de même que la croissance de la température devient minimale si la valeur de la tension d'alimentation est adaptée de manière optimale à la fréquence.**

## Adresse des Autors:

Dr. Basanta B. Palit,  
Ingenieurschule beider Basel,  
Abteilung Elektrotechnik, Gründenstrasse 40,  
4132 Muttenz

Die Statorwicklung von Käfigläufer-Asynchronmotoren kann mit Einschicht- oder Zweischichtwicklung ausgeführt sein. Einschichtwicklungen haben in jeder Nut eine Spulenseite oder einen Leiter. Die gesamte Spulenzahl ist gleich der halben Nutenzahl. Bei Zweischichtwicklungen mit zwei Schichten je Nut ist demnach die Anzahl der Spulen gleich der Nutenzahl. Einschichtwicklungen werden heute hauptsächlich bei der Herstellung durch direktes Wickeln mit Hilfe von Automaten in halbgeschlossenen Nuten verwendet. Die Spulenköpfe liegen in zwei Ebenen, auch Etagen genannt. Zweischichtwicklungen können aus Spulen gleicher Weite oder aus konzentrischen Spulen unterschiedlicher Weite bestehen. Beträgt die Spulenweite eine Polteilung, so wird die Wicklung als Durchmesserwicklung bezeichnet. Ist die Spulenweite jedoch kleiner oder grösser als eine Polteilung, dann hat man es mit einer Sehnenwicklung zu tun. Bei gesehten Wicklungen lassen sich die Leiterspannungen der beiden Spulenseiten einer Spule nicht mehr algebraisch addieren, da die beiden Spulenseiten nicht um eine Polteilung auseinander liegen. Durch Sehnung der Wicklung kann man einzelne, in der Feldkurve stark vertretene Oberwellen vollständig ausieben oder einige Oberwellen der Feldkurve gezielt stark unterdrücken.

Die Statorstränge können in Stern oder Dreieck geschaltet werden. Bei den heute meist stark gesättigten Motoren ist das Luftspaltfeld abgeflacht, enthält also insbesondere eine stark ausgeprägte dritte Harmonische. Diese läuft synchron mit der Grundwelle um und bewirkt innerhalb des Dreiecks kreisende Ausgleichströme von dreifacher Netzfrequenz, welche die von der Eisensättigung herrührenden Feldoberwellen zu unterdrücken trachten und die Wicklungsverluste erhöhen [1]. Die Dreieckschaltung des Ständers ist deshalb bei grösseren Leistungen und

besonders bei Umrichterspeisung zu vermeiden. Die vom Sättigungsfeld mit dreifacher Polzahl stammenden Ausgleichströme erzeugen im Läufer die dreifache Schlupffrequenz.

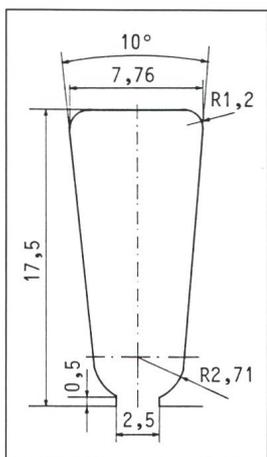
Die Läuferwicklung, die mit dem Netz nicht leitend verbunden ist, kann eine beliebige Strangzahl aufweisen. Wird die Läuferwicklung dauernd kurzgeschlossen, so ergibt sich eine äusserst einfache Bauart, die aus einem Stab je Nut besteht. Die Stäbe werden an beiden Enden durch Ringe direkt miteinander verbunden. Man spricht dann von einem Käfigläufer. Es werden Käfigwicklungen mit hohen schmalen Stäben, sogenannte Hochstabläufer, oder solche mit keilförmigen Stäben, sogenannte Keilstabläufer, gebaut. Ferner sind auch Doppel- und Mehrkäfiganker zur Verbesserung der Anlaufverhältnisse gebräuchlich.

Man kann die Asynchronmotoren aus dem Netz mit gegebener Frequenz speisen und dabei einen Betrieb mit praktisch konstanter Drehzahl erreichen. Mit Hilfe eines Frequenzumrichters können die Asynchronmotoren mit veränderlicher Spannung und Frequenz gespeist werden. Da die Ausgangsspannung von Umrichtern aus rechteckförmigen Pulsen besteht, ergeben sich bei Umrichterspeisung im Vergleich zur Netzspeisung grössere Verluste in den Asynchronmaschinen.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit war, das Betriebsverhalten von Asynchronmotoren und besonders deren Temperaturanstieg, bei Kombinationen von verschiedenen Ständern mit unterschiedlichen Läufern zu untersuchen.

## Aufbau der Motoren

Es standen drei Asynchronmotoren gleicher Baugrösse zur Verfügung. Ständer und Läufer waren unter sich austauschbar und besaßen verschiedene Ständerwicklungsarten und ver-



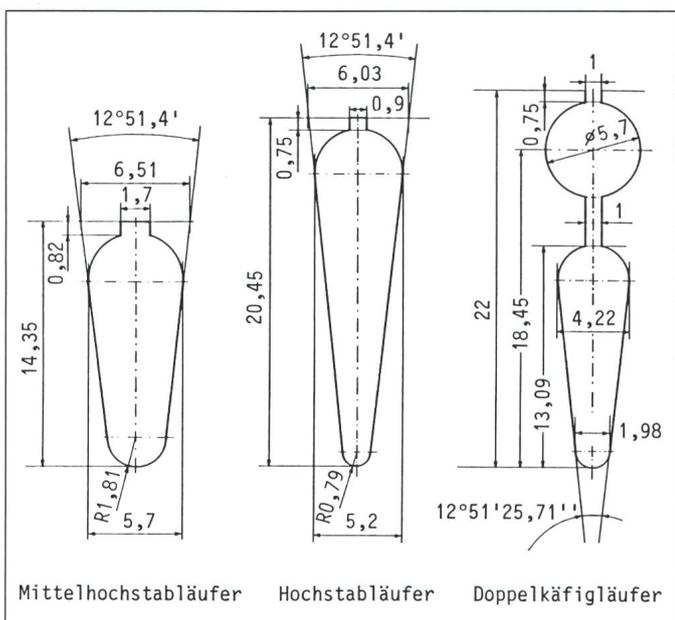
**Figur 1**  
**Ständernutform**  
Abmessungen in mm

schiedene Läuferkurzschlussstäbe. So konnten beliebige Ständer-Läuferkombinationen untersucht werden.

Alle Ständer waren mit einem PTC-Temperaturfühler, eingebettet im Wickelkopf, gegen Überschreitung der zulässigen Grenztemperatur von 155°C ausgerüstet. Beim Ansprechen stellte der Motor nicht ab, sondern es leuchtete nur eine Warnlampe auf. Die Lüftung der Motoren erfolgte durch einen Fremdlüfter, so dass die Fremdkühlung, unabhängig von den tiefen Drehzahlen bei niedriger Frequenz, immer konstant blieb.

### Ständervarianten

Für die Versuche standen drei vierpolige, aber verschieden bewickelte Ständervarianten zur Verfügung. Das Statorgehäuse, das Lagerschild, der Klemmenkasten, der Bohrungsdurchmesser, das Ständereisen und die halbgeschlossene Nutform (Figur 1) waren bei allen Ständervarianten gleich.



**Figur 2**  
**Rotornutform**  
Abmessungen in mm

Alle Motoren besaßen folgende Nenndaten und ausgelegte Grössen:

- Nennleistung: 5,5 kW
- Nennspannung: 380 V
- Nennfrequenz: 50 Hz
- Nennmoment: 37 Nm
- Isolationsklasse: F (155°C)
- Luftspaltlänge: 0,4 mm
- Statornutenzahl: 36
- Lochzahl: 3

Die drei Drehstrommotoren hatten folgende unterschiedliche Wickeldaten:

- Ständervariante S1: Einschichtwicklung in Dreieck, ungeseht, Wickelschritt 1:10; Strangwiderstand bei 24°C: 2,76 Ω.
- Ständervariante S2: Einschichtwicklung in Stern, ungeseht, Wickelschritt 1:10; Strangwiderstand bei 24°C: 0,921 Ω.
- Ständervariante S3: Zweischichtwicklung in Dreieck, geseht, Wickelschritt 1:8; Strangwiderstand bei 24°C: 3,16 Ω.

### Läufervarianten

Es kamen folgende drei Läufervarianten (Figur 2) zur Anwendung:

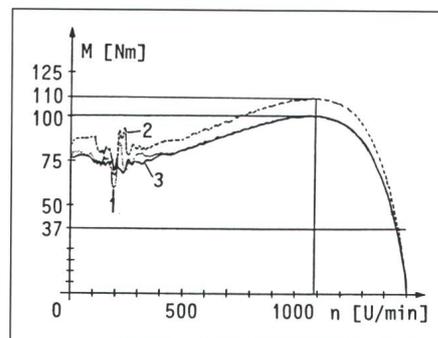
- Läufervariante M: Mittelhochstabläufer; Stabquerschnitt: 71,2 mm<sup>2</sup>
- Läufervariante H: Hochstabläufer; Stabquerschnitt: 67 mm<sup>2</sup>
- Läufervariante D: Doppelkäfig; Stabquerschnitt: 67,5 mm<sup>2</sup>

Bei der Dimensionierung der Querschnitte der Läuferstäbe wurde darauf geachtet, dass sich bei Vernachlässigung der Stromverdrängung praktisch gleiche Stromdichten ergaben. Die 28

Stäbe pro Läufer waren aus Aluminium. Die Läuferfalten verliefen um ungefähr 6° schräg zur Wellenachse. An den Kurzschlussringen wurden kleine Ventilatorenflügel für einen zusätzlichen Konvektionswärmeaustausch angebracht.

### Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien

Der netzgespeiste Asynchronmotor wurde mit einem Gleichstrommotor, dessen Drehmoment in Gegenrichtung zum asynchronen Drehmoment stand, von der Leerlaufdrehzahl bis zum Stillstand der Welle belastet. Für diesen Versuch wurde nur die Läufervariante M mit den drei Ständervarianten verwendet. Aus den Drehmoment-Drehzahlkennlinien (Figur 3)

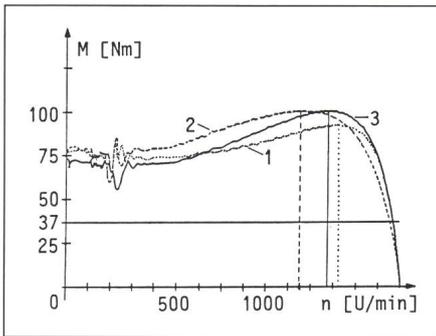


**Figur 3** Einfluss der Ständerwicklung auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

- M Drehmoment  
n Rotordrehzahl  
1 Ständer S1 mit Mittelhochstabläufer M  
2 Ständer S2 mit Mittelhochstabläufer M  
3 Ständer S3 mit Mittelhochstabläufer M

erkennt man, dass der sterngeschaltete Ständer, d.h. Variante S2, praktisch über den ganzen Drehzahlbereich das grösste Drehmoment erzeugt. Dieses Ergebnis kann auf die geringste Streuinduktivität von 4,77 mH der Kombination S2 mit M, gegenüber den Streuinduktivitäten von 14,97 mH und 14,84 mH der Kombination S1 mit M und S3 mit M zurückzuführen. Die beiden dreieckgeschalteten Ständer sind im Anzugsmoment und über einem Drehzahlbereich von null bis etwa 400 U/min kaum zu unterscheiden. Der Ständer S3 mit gesehter Wicklung, welche die Raumoberwellen unterdrückt, wies im Bereich von 150...400 U/min den ruhigsten Drehmomentverlauf auf. Das grösste Kippmoment betrug 111 Nm.

Der Einfluss der Läufervarianten auf die Drehmoment-Drehzahlkennlinie bei unveränderter Ständervariante S1 ist aus Figur 4 ersichtlich. Ver-



**Figur 4 Einfluss der Läuferwicklung auf die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie**

- M Drehmoment
- n Rotordrehzahl
- 1 Doppelkäfigläufer D mit Ständer S1
- 2 Mittelhochstabbkfigläufer M mit Ständer S1
- 3 Hochstabbkfigläufer H mit Ständer S1

gleicht man Figur 3 mit Figur 4, so lässt sich die Kombination der Ständervariante S2 mit der Rotorvariante M als die beste erkennen, sofern es um die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie geht.

### Erwärmungsversuche im Netzbetrieb

Obwohl der Temperaturanstieg bekanntlich pauschal mit den Motorverlusten und somit mit dem Wirkungsgrad zusammenhängt, erfassen die vorliegenden Untersuchungen die quantitative Temperaturverteilung an drei Stellen der Motoren.

#### Indirekte thermische Messung

In erster Linie interessiert die Endtemperatur der Ständerwicklung, da bei Überhitzung die Wicklungsisolation Schaden nehmen könnte. Deshalb werden die verschiedenen Isolierstoffe nach ihrer Wärmebeständigkeit in Klassen eingeteilt, gemäss Empfehlung VDE 0,530, Teil 1, Anhang II.

Mit der sogenannten Widerstandsmethode kann die Temperatur einer Wicklung ermittelt werden. Die Methode beruht auf der Änderung des

Widerstandes metallischer Leiter mit der Temperatur. Mit dem Index *w* für den warmen und *k* für den kalten Zustand der Wicklung folgt für die Temperatur im betriebswarmen Zustand:

$$T_2 = [(R_w - R_k) / R_k] (T_o + T_k) + T_k$$

Dabei bedeuten:

- $R_k$  Widerstand der kalten Wicklung zu Beginn der Messung
- $R_w$  Widerstand der warmen Wicklung am Ende der Messung
- $T_k$  Temperatur der kalten Wicklung zu Beginn der Messung in °C
- $T_w$  Temperatur der warmen Wicklung am Ende der Messung in °C
- $T_o$  Materialabhängiger Parameter (Kupfer:  $T_o = 235\text{ °C}$ ; Aluminium:  $T_o = 245\text{ °C}$ )

Die Widerstandsmessung erfolgte je nach Widerstandswert mit der Thomson- oder der Wheatstonebrücke. Das bedingte aber, dass der Läufer im Stillstand und die Klemmen spannungsfrei waren. Eine Messung im Ausschalt Augenblick war also nicht möglich. Deshalb wurde während der Abkühlung des Motors der Widerstand der Wicklung mehrmals in konstanten Zeitabschnitten gemessen und auf den Ausschaltzeitpunkt 0 extrapoliert.

#### Direkte thermische Messung

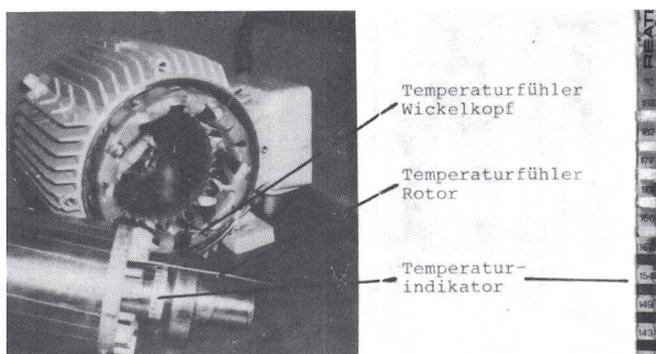
In zweiter Linie interessierte auch die Rotortemperatur. Dazu wurden Temperaturmessstreifen (Indikatoren) verwendet, die diese durch Umschlagen der weissen Flächen auf schwarz beim Erreichen entsprechender Temperaturen anzeigten (Figur 5). Mit einer solchen Methode wurde die Temperatur der Lager und des Kurzschlussringes ermittelt. Die Probemessungen ergaben einen gleichen Temperaturanstieg für die beiden Kurzschlussringe. Aus diesem Grunde wurde die Temperatur von nur einem Kurzschlussring gemessen. Die Lager-

temperatur wurde bei jenem Lager gemessen, das dem Lüfter zugewandt war. Dieses Lager wurde heisser als dasjenige auf der Kupplungsseite, da bei letzterem sehr viel Wärme durch die Wärmeleitung über die Kupplung verlorenging.

Zusätzlich zu den beiden oben erwähnten Messungen wurden Thermoelemente an verschiedenen Stellen des Motors, z. B. an Ständerwickelkopf, Motorgehäuse und Läufer (durch ein Loch im Kurzschlussring) angebracht und auf einen Schreiber geführt. Die Läufertemperatur konnte erst nach Abschalten des Motors und Stillstand des Läufers gemessen und auf den Abschaltzeitpunkt extrapoliert werden. Die Messungen mit den Thermoelementen waren aus zwei Gründen vorteilhaft: Erstens erhielt man zu den Messungen mit der Widerstandsmethode und mit den Indikatoren eine Redundanz, konnte also damit diese Messungen grob kontrollieren, und zweitens sah man, wie sich der Motor zeitlich erwärmte, wann er seine Endtemperatur erreichte, und wie er sich wieder zeitlich abkühlte. Anhand des zeitlichen Temperaturverlaufs des Ständerwickelkopfes wurde die Endtemperatur des Motors beurteilt. Dabei wurde angenommen, dass der Motor die Endtemperatur dann erreicht hatte, wenn die Temperaturänderung innerhalb einer halben Stunde weniger als 1 °C betrug.

#### Erwärmungsversuche

Bei Netzbetrieb wurden die Erwärmungsversuche zuerst nur mit der Läufervariante M und allen Ständervarianten durchgeführt. Der Motor wurde jeweils bei Nennspannung und Nennfrequenz mit dem Nennmoment 37 Nm belastet. Die Temperaturen der Ständerwicklung, des Kurzschlussringes und des Lagers wurden jeweils am Anfang und am Ende des Versuches, d. h. nachdem die Temperatur den stationären Endwert erreicht hatte, ermittelt. Anschliessend wurden die Erwärmungsversuche mit der thermisch besten Ständervariante und den übrigen Läufervarianten H und D weitergeführt. Ausser den Temperaturen wurden noch folgende Grössen in warmem Zustand der Motoren, d. h. nach Erreichen der stationären Endtemperatur, gemessen: der Zuleitungsstrom zum Motor, die vom Motor aufgenommene Wirkleistung (Zweiwattmetermethode), das Wellendrehmoment und die Läuferdrehzahl. Aus dem Wellendrehmoment und der Läuferzahl



**Figur 5 Temperaturmessung in Ständer und Läufer**

Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdrehzahl [U/min]	Temperaturanstieg			Ständerstrom [A]	Leistungsaufnahme [W]	Wirkungsgrad [%]
			Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]			
S1	M	1432	64	82	66	10,95	6090	91,1
S1	M	1436	60	76	58	11,00	6060	91,8
S3	M	1430	62	80	64	10,80	6075	91,2
S2	H	1438	63	81	63	11,60	6338	90,4
S2	D	1434	68	84	67	12,00	6480	85,7

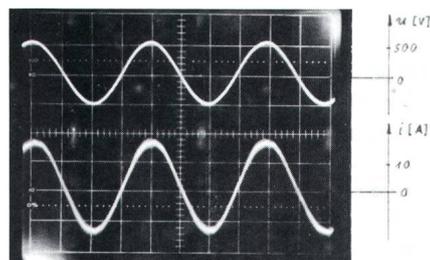
**Tabelle I Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei direkter Netzspeisung**

Betrieb mit Nennspannung und Nennfrequenz  
Ständerspeisespannung und -frequenz:  $3 \times 380$  V, 50Hz  
Wellenmoment: 37 Nm

konnte die vom Motor abgegebene Wellenleistung und somit der Wirkungsgrad des Motors ermittelt werden. In Tabelle I sind die Messergebnisse zusammengestellt.

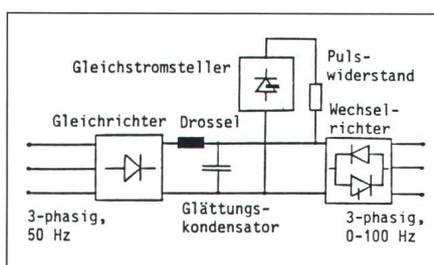
Die Temperaturwerte zeigen, dass S2 mit M, d.h. der sterngeschaltete Ständer mit dem Mittelhochstabläufer, die in thermischer Hinsicht und auch wirkungsgradmässig beste Ständer-Läufer-Kombination ist. Das Oszillogramm der verketteten Ständerspannung und des Ständerstromes dieser Ständer-Läufer-Kombination ist in Figur 6 zu sehen. Spannung und Strom sind praktisch sinusförmig.

Der ungesehnte, dreieckigeschaltete Ständer (d.h. Variante S1), kombiniert mit M, ist nur wenig schlechter. Die Mehrerwärmung gegenüber Variante S2/M kann auf die in den Ständersträngen zirkulierenden harmonischen Ströme 3. Ordnung (37,5% des grundharmonischen Stromes) und deren Einfluss auf den Läufer zurückgeführt werden. Die gesehnte Ständerwicklung (d.h. Variante S3), kombiniert mit M, wäre vom thermischen Verhalten her aufgrund der Sehnung besser als die ungesehnte Wicklung S1. Die grösseren Erwärmungen stammen in diesem Fall einerseits von den harmonischen Strömen 3. und 15. Ordnung



**Figur 6 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Netzbetrieb**

$u$  verkettete Motorspannung, 50Hz  
 $i$  Motorstrom  
Kombination S2 mit M



**Figur 7 Schaltbild des Frequenzrichter-Leistungsteils**

(33% und 29% des grundharmonischen Stromes) und andererseits von den grösseren Eisenverlusten, die bei dieser Ständervariante schon bei den Leerlaufversuchen festgestellt wurden. Die Fourieranalyse des Ständerstromes wurde mit einem Frequenzanalysator der Firma General Radio Company durchgeführt.

Die Kombination der verschiedenen Läufer mit dem sterngeschalteten Ständer S2 zeigte, dass die Temperatur umso stärker anstieg, je mehr die Stromverdrängung im Läufer zunahm. Somit war der Mittelhochstabläufer M der beste, der Hochstabläufer der zweitbeste und der Doppelkäfigläufer D der schlechteste hinsichtlich des Temperaturanstiegs. Die Temperaturerhöhungen im Kurzschlussring unterschieden sich mit ungefähr 8 °C jedoch nicht stark, und ihr Einfluss auf den Ständer war gering. Zwischen der Temperatur des Kurzschlussringes und der Temperatur des Lagers war ein Temperaturgefälle von 16...18 °C zu beobachten.

Für die Isolationsklasse F ist eine maximale Wicklungstemperatur von 155 °C zugelassen. Rechnet man mit einer maximalen Kühlmitteltemperatur von 40 °C, dann darf die maximale Temperaturdifferenz  $\Delta T = 115$  °C betragen. Somit waren die hier untersuchten Ständer-Läufer-Kombinationen alle auf der sicheren Seite, da kei-

ne eine Temperaturdifferenz von mehr als 82 °C erreichte. Zusammenfassend kann für den Netzbetrieb gesagt werden, dass mit Ausnahme der Ständerwicklung S3, in Kombination mit M, die Temperaturunterschiede von 3...9 °C bei den übrigen Kombinationen nicht auffallend gross waren.

## Erwärmungsversuche im Umrichterbetrieb

### Der verwendete Frequenzrichter

Der für die Versuche verwendete Pulsumrichter besitzt, gemäss den Angaben der Herstellerfirma, die folgenden wichtigen Kenndaten:

- Umrichterart: Spannungsumrichter
- Eingangsspannung:  $3 \times 380$  V
- Ausgangsspannung:  $3 \times 0...380$  V
- Ausgangsfrequenz: 0...100 Hz
- Nennleistung: 25 kVA
- Ausgangsseitiger Nennstrom: 40 A
- Strombegrenzung: 60 A
- Wirkungsgrad:  $\geq 95\%$

Der Umrichter arbeitet mit einer konstanten Zwischenkreisspannung (Figur 7). Die eingangsseitige Drehspannung wird in einer sechspulsigen Brückenschaltung gleichgerichtet. Der Gleichstromteil besitzt eine Glättungsdrossel und einen Glättungskondensator für die Spannungsglättung. Eine Rücklieferung elektrischer Energie in das 50-Hz-Drehstromnetz ist bei dem Umrichter nicht möglich. Die zu rekuperierende Energie, wie sie etwa beim Abbremsen von Motoren mit grossen Schwungmassen auftritt, wird hier in einem gesteuerten Puls-widerstand (Figur 7) in thermische Energie umgewandelt. Die Wechselrichtung erfolgt mit Hilfe eines selbstgeführten Wechselrichters, dessen Konzept für eine Phase aus Figur 8 ersichtlich ist. Der Wechselrichter arbeitet nach dem Prinzip der Pulsweitenmodulation (PWM).

Ständervariante	Läufervariante	Läuferdrehzahl [U/min]	Temperaturanstieg			Netzseitiger Strom [A]	Leistungsaufnahme [W]	Gesamtverluste
			Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]			
S1	M	1414	91	114	90	12,0	6510	1031
S2	M	1420	87	108	80	12,0	6450	948
S3	M	1408	112	114	86	11,6	6525	1070
S2	H	1422	87	108	80	12,3	6600	1090
S2	D	1415	96	119	92	12,5	6750	1267

**Tabelle II Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei direkter Umrichterspeisung mit 50 Hz**

Betrieb mit Nennspannung und Nennfrequenz  
 Ständerspeisespannung: 3 × 380 V  
 Wellenmoment: 37 Nm

**Erwärmungsversuche bei 50 Hz**

Die Erwärmungsversuche wurden zuerst bei 50 Hz durchgeführt. Bei Umrichterbetrieb wurden die Wirkleistung und der Zuleitungsstrom vor dem Umrichter gemessen. Die Resultate sind in Tabelle II zusammengestellt.

Die Gesamtverluste in dieser Tabelle stellen die Summe der Verluste im Umrichter und im Motor dar. Bei 50-Hz-Umrichterbetrieb erwies sich der sterngeschaltete Ständer S2 mit dem Mittelhochstabläufer M als die verlustärmste Kombination. Thermisch waren die Kombinationen S2 mit M und S2 mit H sowohl gleichwertig als auch am besten.

Ein Vergleich mit den Ständererwärmungen bei Netzbetrieb zeigte, dass alle Ständer beim Umrichterbetrieb im Mittel etwa 27 °C wärmer wurden. Dies ist auf den Oberschwingungsgehalt des Motorstromes mit ansehnlichem Anteil an Komponenten der 5., 7., 11., 19. usw. Ordnung zurückzuführen (Figur 9). Diese Stromüberschwingungen rufen im Läufer Pendelmomente und zusätzliche Verluste hervor. Die Läufertemperaturen waren beim Umrichterbetrieb um etwa 32 °C höher als beim Netzbetrieb, d.h., die Temperaturdifferenz zwi-

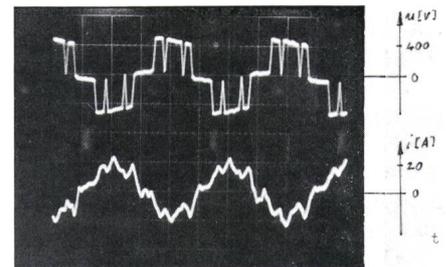
schen Netz- und Umrichterbetrieb war hier noch grösser als bei den Ständern. Einerseits ist dies der grösseren Stromverdrängung durch die Oberschwingungsströme im Läufer und andererseits dem grösseren Schlupf beim untersuchten Umrichterbetrieb zuzuschreiben. Als thermisch beste Läufer erwiesen sich die Varianten M und H mit einem Temperaturanstieg von je 108 °C. Die Lagertemperaturen waren beim Umrichterbetrieb um etwa 22 °C höher als beim Netzbetrieb. Die Läufertemperaturen waren rund 27 °C höher als die Lagertemperaturen. Der Ständer blieb durchschnittlich um etwa 21 °C kühler als der Läufer.

Beim Umrichterbetrieb führten alle Ständer-Läufer-Kombinationen zu höheren Temperaturen als beim Netzbetrieb mit unveränderter Rangfolge. Bei den hier untersuchten Varianten musste keine Drehmomentreduktion vorgenommen werden, da die höchstzulässige Erwärmung von 115 °C bei maximaler Lufttemperatur von 40 °C nie überschritten wurde.

**Erwärmungsversuche bei 5 Hz**

Die U-f-Kennlinie des Umrichters, d. h. die Festlegung der Ausgangsspannung entsprechend der Ausgangsfrequenz des Umrichters, wurde so einge-

stellt, dass die Nennschlupfdrehzahl bei 5 Hz gleich gross wie bei den 50-Hz-Umrichterversuchen war. Damit wurde die Bedingung der konstanten Ständerflussverkettung erfüllt. Dies führte zu einer Ausgangsspannung des Umrichters von 3 × 58 V, anstatt 3 × 38 V wie im Falle einer linearen U-f-Kennlinie. Gegenüber letzteren wurde die Ständerspannung also um 52,63% erhöht. Tabelle III zeigt die Messergebnisse. Die Erwärmungen

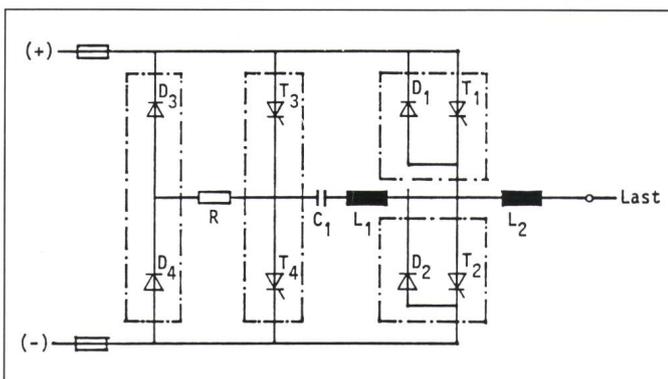


**Figur 9 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Umrichterbetrieb mit 50 Hz**

u verkettete Motorspannung  
 i Motorstrom  
 Kombination S2 mit M

der Ständer lagen durchwegs unter denen der 50-Hz-Messung. Bei der Ständervariante S3 konnte der Erwärmungsversuch nicht durchgeführt werden, da die Motordrehzahl mit zunehmender Erwärmung bis zum Stillstand abnahm und der Motor das Drehmoment von 37 Nm nicht mehr aufbringen konnte. Der dreieckgeschaltete Ständer S1 mit dem Läufer M wurde ebenfalls ziemlich warm. Der Läufer zeigte einen starken Schlupf, und die Gesamtverluste waren am grössten.

Die geringere Erwärmung der übrigen Kombinationen gegenüber den 50-Hz-Messungen war auf die geringeren Eisen- und Zusatzverluste, bedingt durch niedrigere Spannung und Frequenz, zurückzuführen. Hier erwies sich die Kombination der Ständer-



**Figur 8 Aufbau einer Wechselrichterphase mit Kommutierungseinheit**

- T1, T2 Hauptthyristoren
- T3, T4 Löschyristoren
- C1, L1 Umschwingkreis
- D1, D2 Dioden
- L2 Glättungsdrossel

Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdrehzahl [U/min]	Temperaturanstieg			Netzseitiger Strom [A]	Leistungsaufnahme [W]	Gesamtverluste
			Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]			
S1	M	37	90	125	86	3,9	1695	1552
S2	M	83	67	86	64	3,5	1500	1178
S3	M							
S2	H	89	61	80	64	3,6	1545	1200
S2	D	75	73	91	64	3,7	1605	1314

**Tabelle III Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei Umrichterspeisung mit 5 Hz**

Ständerspeisespannung:  $3 \times 58$  V

Wellenmoment: 37 Nm

Bei Kombination S3/M fiel die Motordrehzahl bei zunehmender Erwärmung sehr stark bis zum Stillstand ab. Der Versuch wurde abgebrochen.

variante S2 mit dem Läufer H als die beste, dicht gefolgt von jener mit dem Läufer M. Das Oszillogramm der verketteten Ständerspannung und des Ständerstromes der letztgenannten Läufervariante mit S2 ist in Figur 10 ersichtlich. Der Ständerstrom weist Oberschwingungesanteile der 2., 5., 7., 8., 12., 100., 210., 306., 412. usw. Ordnung auf. Gegenüber den Läufern waren die Ständer etwa 18...35°C und die Lager 16...39°C kühler.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die dreieckgeschalteten Ständer S1 und S3 thermisch sehr stark bis zum Betriebsversagen beansprucht wurden. In diesen beiden Fällen war vermutlich die eingestellte Ständerspannung für das gegebene Lastmoment nicht optimal. Der Begriff «optimale Spannung» wird in einem späteren Abschnitt erläutert.

### Erwärmungsversuche bei 16 Hz

Um den Einfluss der  $U$ - $f$ -Kennlinie auf die Erwärmung der Motoren abzuklären, wurden Erwärmungsversuche auch mit 16 Hz durchgeführt. Das Kriterium für die Einstellung der  $U$ - $f$ -Kennlinie wurde dieses Mal so festge-

legt, dass der Motor bei 16 Hz genau so viel Leerlaufstrom bezog wie bei Nennspannung und Nennfrequenz. Dies führte zu einer Ausgangsspannung des Umrichters von  $3 \times 125$  V, anstatt  $3 \times 121,6$  V wie bei Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen Ausgangsspannung und -frequenz des Umrichters. Bezogen auf eine lineare Kennlinie, wurde also die Ständerspannung nur um 2,8% erhöht, womit die Konstanz der Ständerflussverketung bereits nicht mehr gewährleistet war. In Tabelle IV sind die Messergebnisse zusammengestellt.

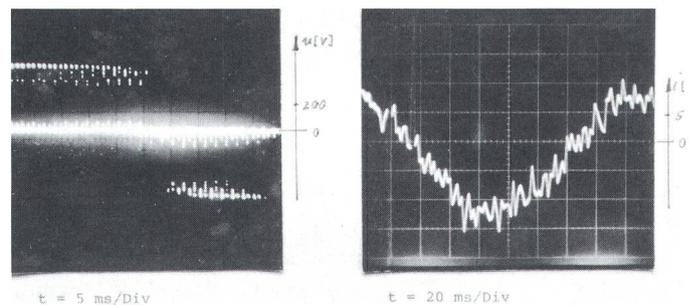
Bei der Kombination S3 mit M sprach 25 Minuten nach Versuchsbeginn der PTC-Widerstand bei noch sehr steilem Temperaturanstieg an.

Der Versuch wurde abgebrochen, damit der Motor nicht Schaden nehmen konnte. Die Tabellenwerte sind somit Messwerte bei Versuchsabbruch. Die Messungen zeigten eine durchwegs grössere Erwärmung als bei 50 Hz. Der grosse Schlupf führte zu sehr starker Erwärmung im Läufer. Auch der Ständer erwärmte sich einerseits durch die Strahlungswärme vom Läufer her, und andererseits führte der höhere Ständerstrom zu zusätzlichen Erwärmungen.

Es zeigte sich auch hier, dass Varianten mit sterngeschaltetem Ständer, also mit S2, thermisch die besten waren. als thermisch idealer Läufer erwies sich auch hier der Mittelhochstabläufer M. Der Verlauf der verketteten Ständerspannung und des Ständer-

**Figur 10 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Umrichterbetrieb mit 5 Hz**

- $u$  verkettete Motorspannung
- $i$  Motorstrom in A, Kombination S2 mit M



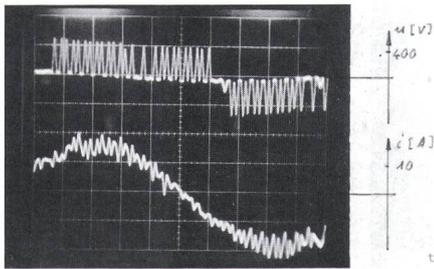
Ständer-variante	Läufer-variante	Läuferdrehzahl [U/min]	Temperaturanstieg			Netzseitiger Strom [A]	Aufnahmeleistung [W]	Gesamtverluste
			Ständerwicklung [°C]	Kurzschlussring [°C]	Lager [°C]			
S1	M	351	105	141	91	6,6	3000	1640
S2	M	376	89	113	79	6,4	2995	1538
S3	M	388	127	108	69	PTC	spricht	an
S2	H	355	110	141	92	6,9	3240	1865
S2	D	340	115	147	97	7,1	3360	2043
					PTC	spricht	an	

**Tabelle IV Temperaturanstieg von Ständer und Läufer bei Umrichterspeisung mit 16 Hz**

Ständerspeisespannung:  $3 \times 125$  V

Wellenmoment: 37 Nm

stromes der Kombination S2 mit M kann der Figur 11 entnommen werden. Die Frequenzanalyse des Ständerstromes zeigte Oberschwingungsanteile erst ab der Ordnungszahl 27. Die Läufer wurden etwa 31 °C wärmer als die Ständer. Das Temperaturgefälle vom Kurzschlussring zum Lager betrug rund 45 °C. Einzig die ideale Ständer-Läufer-Kombination lag noch deutlich unter dem maximalen Temperatur-



Figur 11 Oszillogramm von Spannung und Strom bei Umrichterbetrieb mit 16 Hz

$u$  verkettete Motorspannung  
 $i$  Motorstrom  
 Kombination S2 mit M

anstieg von 115 °C. Alle anderen Kombinationen waren sehr nahe daran oder überschritten diese Grenze sogar.

Um auch bei 16 Hz Speisefrequenz eine Messung zu bekommen, die mit denen bei 50 und 5 Hz verglichen werden konnte, wurde die Ständerspannung so weit erhöht, dass die Nennschlupfdrehzahl wieder gleich gross war wie bei 50 Hz. Dazu musste die Spannung von 125 V auf 138 V erhöht werden. Die Versuche wurden nur mit S2 und M durchgeführt. Die Messung zeigte, dass die Erwärmung jetzt wesentlich geringer war als vorher. Die Temperaturänderung der Ständerwicklung lag nur noch bei 74 °C gegenüber 114 °C bei 125 V. Dadurch wurde bestätigt, was auch schon die 5-Hz-Messung gezeigt hatte, dass nämlich die Motor-Endtemperatur mit abnehmender Frequenz ebenfalls absinkt.

### Optimierung der Speisespannung

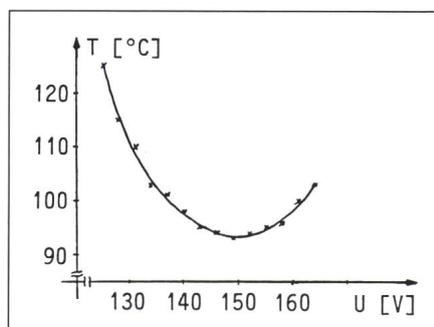
Im vorhergehenden Abschnitt hat man gesehen, dass eine falsche Speisespannung den Motor sehr stark erwärmen kann. Deshalb ist es wichtig, dass die Spannung nach einer optimalen  $U$ - $f$ -Kennlinie eingestellt wird. Um dieses Optimum durch Erwärmungsversuche zu ermitteln, muss bei ge-

gebener Frequenz jene Spannung gesucht werden, bei welcher der Motor die geringste Enderwärmung erreicht.

Zur Bestimmung der optimalen Spannung bei 16 Hz wurden Versuche am Motor mit S2 und M, ausgehend von 125 V, begonnen und die Temperaturen auf die Endwerte gebracht. Anschliessend wurde die Speisespannung in Schritten von je 3 V erhöht und dabei jeweils die Endtemperatur des Ständerwickelkopfes (nicht zu verwechseln mit den in den Tabellen I...IV erwähnten Ständerwicklungen) untersucht. Die Messung zeigte, dass die Temperatur bei 149 V, d.h. bei einer Spannung, die 22,6% höher als die frequenzproportionale Spannung lag, ihr Minimum von 93 °C erreichte (Figur 12). Bei Spannungen grösser oder kleiner als 149 V stieg die Temperatur stärker an.

### Schlussbemerkungen

Einschichtwicklungen können einfacher und kostengünstiger hergestellt werden als Zweischichtwicklungen. Einschichtwicklungen sind daher für kleinere Asynchronmaschinen vorzuziehen. In thermischer Hinsicht ist die Sternschaltung der drei Ständersträn-



Figur 12 Temperatur in Abhängigkeit der angelegten Ständerstrangspannung bei 16 Hz

$U$  Ständerstrangspannung  
 $T$  Endtemperatur des Ständerwickelkopfes

ge der Dreiecksschaltung überlegen, da bei der ersteren kein Nullstrom fließen kann. Bei Dreieckschaltung können hauptsächlich Oberschwingungsströme der 3. und anderer ungeradzahligere Ordnungen mit entsprechend höherer Frequenz innerhalb der Wicklung kreisen. Diese Ströme entstehen durch das Luftspaltfeld, dessen Gestalt durch die ungleichmässige Eisensättigung, durch den nicht immer konstanten Luftspalt und schliesslich durch die asymmetrische Speisung der

Wicklungen hervorgerufen wird. Der letzte Fall kann z.B. auch bei einer Umrichterspeisung auftreten, bei welcher die Zündzeitpunkte der Thyristoren Asymmetrien aufweisen.

Der Ständer mit der ungesehnten Einschichtwicklung in Stern, kombiniert mit dem Mittelhochstabläufer, wies sowohl das grösste Kipp- als auch das grösste Anlaufmoment auf. Bei dieser Kombination von Ständer und Läufer ergaben die Erwärmungsversuche auch die tiefsten Verluste und den niedrigsten Temperaturanstieg des Motors. Dieses Ergebnis wurde sowohl durch die Messungen bei Netz-, als auch durch die Messungen bei Umrichterspeisung bestätigt. Der Temperaturanstieg bei Netzspeisung ist unproblematisch. Bei Umrichterspeisung sind die Motortemperaturen generell höher als bei Netzspeisung.

Bei höheren Frequenzen ist der Mittelhochstabläufer temperaturmässig etwas besser als der Hochstabläufer. Bei niedrigeren Frequenzen kann es umgekehrt sein, sofern die Speisespannung entsprechend der Bedingung der Flusskonstanz gewählt wird. Bei tiefen Frequenzen ist der Temperaturanstieg der Motoren von der Höhe der angelegten Spannung abhängig. Es gibt eine optimale Spannungshöhe, bei welcher der Temperaturanstieg minimal wird. Eine Abweichung von dieser optimalen Spannung führt zu einer stärkeren Erwärmung der Motoren.

Von den drei untersuchten Läuferarten erwärmt sich der Doppelstabläufer am stärksten. Dies ist auf die Oberschwingungseinflüsse im Läuferstab wegen seiner schmälere und höheren Bauform zurückzuführen.

Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass zur Verhinderung von unzulässigen Erwärmungen bei industriellen Antrieben einerseits der richtige Ständer mit dem richtigen Läufer kombiniert und andererseits die Spannung des Frequenzumrichters optimal eingestellt werden muss.

Die Untersuchungen wurden an der Ingenieurschule beider Basel, Muttentz, im Rahmen eines Industriauftrages durchgeführt.

### Literatur

- [1] H. Jordan, V. Klima und K. P. Kovács: Asynchronmaschinen: Funktionen, Theorie, Technisches. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1975.



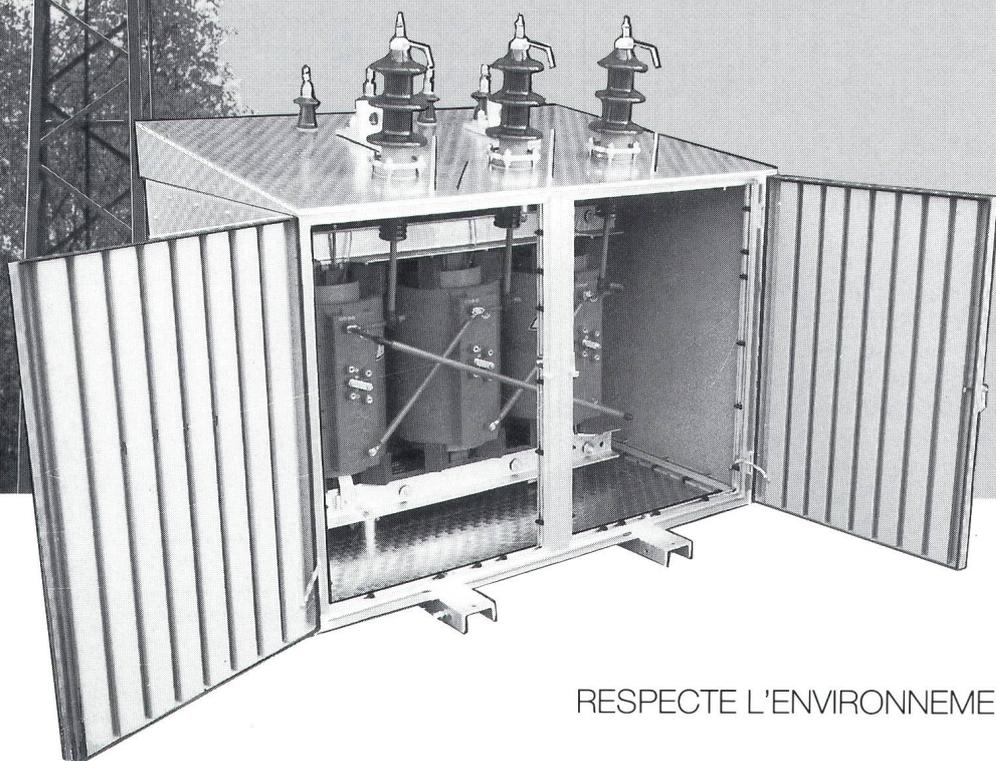
**Transformateur  
isolé à la résine  
pour montage sur poteau**

Degré de protection IP 34 dans coffret en Alu.

**MAYLAMID<sup>®</sup>**

**Giessharz-Transformator  
für Mastaufstellung**

Schutzart IP 34 in Alu.-Gehäuse



RESPECTE L'ENVIRONNEMENT

UMWELTFREUNDLICH

**APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE HAUTE ET BASSE TENSION  
ELEKTRISCHE APPARATE FÜR HOCH- UND NIEDERSpannung**

GARDY S.A.  
C.P. 230  
15, rue Marziano  
CH-1211 GENÈVE 24

Tel. 022/43 54 00  
Telex. 422 067  
Telegr. YDRAG-GENÈVE  
Fax. 022/43 95 48

**GARDY**