

# Überprüfung von Temperatur und Material von Leiterseilen

Autor(en): **Dinser, Sandro**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **106 (2015)**

Heft 12

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-856760>

## **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.

# Überprüfung von Temperatur und Material von Leiterseilen

## Temperaturen sind genau berechenbar und der Einfluss der Temperatur auf das Materialverhalten ist charakterisiert

Die ETH Zürich und die Empa Dübendorf haben gemeinsam verschiedene Eigenschaften von Leiterseilen bei Freileitungen überprüft. Dabei hat das Forschungsteam von Christian Franck, ETH Zürich, eine präzise Berechnungsmethode für die Betriebstemperatur der Leiterseile entwickelt, die den Stromfluss und Wetterdaten berücksichtigt. Ein Forschungsteam von Edoardo Mazza, Empa, hat zudem nachgewiesen, dass kurzfristig erhöhte Betriebstemperaturen die Leiterseile nicht zwingend beschädigen.

### Sandro Dinser

Elektrische Netze sind so gebaut, dass die Leistung von den Kraftwerkstandorten zu den Verbrauchern jederzeit sicher übertragen wird. Bei der Netzplanung berücksichtigen die Ingenieure deshalb die Einspeisung der Kraftwerke sowie den Leistungsbedarf der Verbraucher. Das Schweizer Stromnetz besteht aus einem Übertragungsnetz und vielen Verteilnetzen. Das Übertragungsnetz ist mit 41 grenzüberschreitenden Leitungen sehr gut in das europäische Netz eingebunden, was einen intensiven Leistungsaustausch mit dem Ausland ermöglicht. Das Übertragungsnetz erfüllt somit sowohl eine nationale als auch eine internationale Aufgabe, die infolge des steigenden Energiebedarfs und der Marktliberalisierung erheblich anspruchsvoller geworden ist. Die transportierte Strommenge und die Volatilität haben sich erhöht. Aufgrund der erhöhten Herausforderungen für den Netzbetrieb wurden bisher bereits umfangreiche Untersuchungen im schweizerischen Übertragungsnetz durchgeführt. [1–3]

### Transportkapazität

Die Transportkapazität eines Übertragungsnetzes ergibt sich aus den maximalen Belastbarkeiten der einzelnen Netzelemente. Sowohl Leitungen als auch Transformatoren dürfen im Betrieb nicht überhitzt. Die Transformatoren werden aktiv gekühlt, die Leitungen hingegen nicht. Der Strom und die Sonne erwärmen die

Leiterseile, der Wind und die Wärmeabstrahlung an die Umgebung kühlen sie ab.

### Folgen von hohen Temperaturen

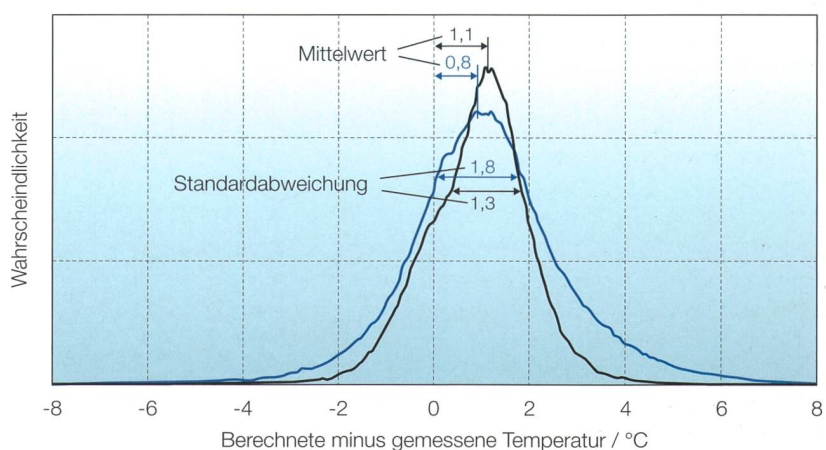
In der Schweiz bestehen die meisten Leiterseile aus einer Aluminiumlegierung namens Aldrey. Untersuchungen an diesem Material haben in den 1970er-Jahren ergeben, dass die Leiterseile nicht wärmer als 80°C werden sollten. Unter mechanischer Last beginnen sich die Leiterseile dauerhaft zu verlängern, und die Zugfestigkeit verringert sich. Die Verlängerung findet bei höheren Temperaturen schneller statt. Die Zugfestigkeit verringert sich ebenfalls stärker mit zunehmender Temperatur.

### Ausgangslage

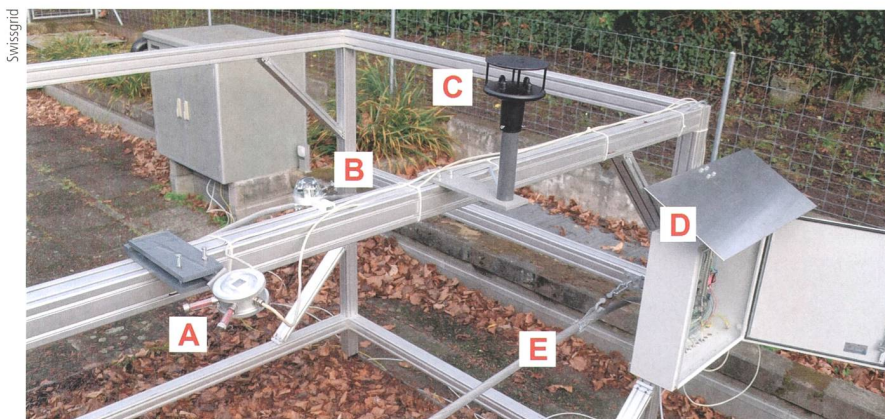
Um das bestehende Übertragungsnetz optimal zu nutzen, darf die Seiltemperatur im Betrieb nicht zu hoch werden. Da die Seiltemperaturen meist nicht gemessen werden, müssen sie mit einem mathematischen Modell berechnet werden. Solche Modelle gibt es bereits für Stahl-Aluminium-Leiterseile. Bisher wurde jedoch nicht umfassend untersucht, wie gut sich diese Modelle für Aldrey-Leiterseile eignen. Zudem gab es bisher keine detaillierte Untersuchung, wie sich diese Leiterseile bei Temperaturen verhalten, die deutlich höher als die heutigen Betriebstemperaturen sind. Insbesondere kann die heute geltende maximale Betriebstemperatur von 80°C nicht eindeutig von den Materialeigenschaften hergeleitet werden.

### Seiltemperaturen: Berechnungen und Messungen

Ein Leiterseil wird durch die ohmschen Verluste des Stroms sowie die Sonneneinstrahlung erwärmt. Gekühlt wird es durch die vorbeiströmende Luft (Konvektion, Wind) und die Wärmeabstrahlung an die Umgebung. Wenn mehr geheizt als gekühlt wird, erhöht sich die Temperatur. Die Wärmekapazität der Leiterseile verlangsamt die Temperaturänderung. Wenn die Erwärmung und die Kühlung konstant bleiben, erreicht



**Bild 1** Histogramme der Temperaturdifferenzen zwischen der Messung und der Berechnung; April 2012 bis März 2015. Die blaue Kurve zeigt die Werte am Tag, die schwarze Kurve die Werte in der Nacht.



**Bild 2** Die dritte Messstelle im Freien. Verschiedene Sensoren messen das Wetter: A: Sonneneinstrahlung, B: Niederschlag, C: Wind. In der Box D befindet sich die zentrale Datenerfassung und E markiert das Leiterseil.

das Leiterseil nach einer gewissen Zeit einen Gleichgewichtszustand: Die Temperatur bleibt konstant. Bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist, dauert es zwischen einer halben und einer ganzen Stunde. Die maximale Betriebstemperatur wird hingegen deutlich schneller überschritten, wenn der Gleichgewichtszustand eine höhere Temperatur aufweist.

Bisher wurden drei unterschiedlich komplexe Modelle für die Temperaturberechnung von Leiterseilen verwendet: IEC, IEEE und Cigré. Die Forscher in der Gruppe von Christian Franck, Professor am Hochspannungslabor der ETH Zürich, haben ein erweitertes dynamisches Cigré-Modell entwickelt, bei dem die Wärmekapazität berücksichtigt wird. Dieses Modell korrigiert die Windkühlung beim Übergang zwischen Windstille und mässigem Wind sowie die Wärmeabstrahlung in den Himmel.

Die Forscher haben im Labor ein Aldrey-Leiterseil gespannt, durch das sie einen definierten Strom fliessen lassen. Um die Temperaturverteilung zu messen, wurden Sensoren an verschiedenen Stellen auf der Leiterseiloberfläche und in diversen Lagen bis hinein in den Kern platziert. Die bekannten Umgebungsbedingungen ermöglichen es, das Modell zu überprüfen und zu verbessern.

Um die Laborwelt mit der Realität zu vergleichen, liefern zwei Messeinheiten aus dem realen Betrieb des Übertragungsnetzes beim Kraftwerk Brugg/Wildegg Daten über die Seiltemperaturen und das Wetter (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung). Bild 1 zeigt den Vergleich der gerechneten mit den gemessenen Seiltemperaturen. Die Auswertung enthält Daten von drei Jahren und ist aufgeteilt in Tages- und Nachtzeit. Im Schnitt

sind die berechneten Seiltemperaturen grösser als die gemessenen. Am Tag ist der Mittelwert der Differenz um 0,8°C höher, in der Nacht um 1,1°C. Die Standardabweichung beträgt 1,3°C bzw. 1,8°C. Der Grund für diesen Unterschied kann der Wind sein, da dieser am Tag stärker ist als in der Nacht. Wegen der nur schwer messbaren Variation der Windgeschwindigkeit ist die Standardabweichung am Tag grösser.

Die Temperatursensoren der Leiterseile haben eine Messgenauigkeit von 1,5°C. Der Vergleich des Fehlers der Temperaturberechnung mit der Messgenauigkeit der Sensoren führt zur Erkenntnis, dass die Seiltemperaturen sehr genau berechnet werden können, wenn die Wetterdaten, Materialparameter des Leiterseils sowie der Leiterseilstrom zur Verfügung stehen.

Eine dritte Messstelle wurde in einem Freiluftlabor aufgebaut. Bild 2 zeigt den Messaufbau. Hier konnte der Strom kontrolliert erhöht werden. Das Leiterseil erreichte Temperaturen von bis zu 100°C.

Die mathematischen Modelle wurden so mit realen Umweltbedingungen überprüft. Dieser Aufbau komplettierte die Verifikationsmessungen an Leiterseilen.

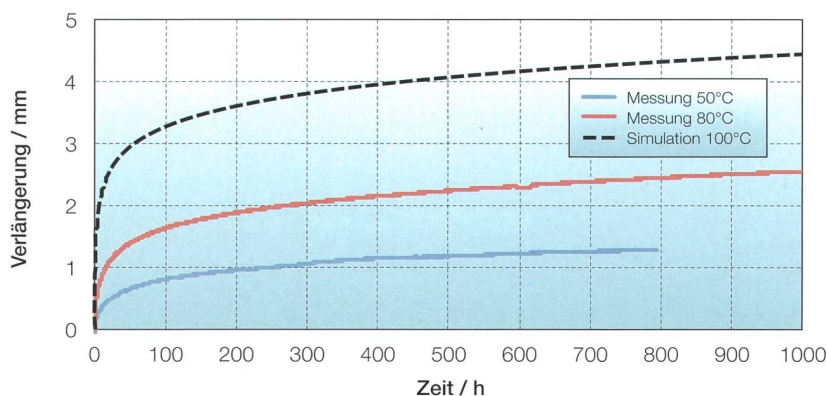
Eine wichtige Erkenntnis ist, dass die Windgeschwindigkeit die Seiltemperatur deutlich mehr beeinflusst als die Lufttemperatur. Doch leider variiert der Wind zeitlich stark und ist von der lokalen Geländebeschaffenheit abhängig. Aus diesem Grund haben die Forscher die Seiltemperaturen für geschützte Lagen ohne Wind berechnet. Dabei fallen die Seiltemperaturen deutlich höher aus als mit einer angenommenen Windgeschwindigkeit von z.B. 0,5 m/s. Das bedeutet, dass unter der Annahme «kein Wind» deutlich weniger Strom über die Leitung transportiert werden darf.

### Materialuntersuchungen

Jedes Material verlängert sich dauerhaft, wenn es einer Zugspannung ausgesetzt ist. Dabei erhöht sich mit zunehmender Temperatur die Geschwindigkeit dieses Prozesses.

Das Forschungsteam von Edoardo Mazza, Professor an der ETH Zürich und Leiter der Organisationseinheit «Mechanische Integrität von Energiesystemen» der Empa, hat untersucht, wie sich ein Leiterseil als Ganzes bei höheren Temperaturen verhält. Denn nicht nur das Material verlängert sich, das gesamte Leiterseil bestehend aus mehreren Lagen von Aldrey-Drähten ändert seine Form.

Die Forscher haben Langzeit-Messungen bei hohen Temperaturen durchgeführt. Sie haben sowohl einzelne Drähte als auch ganze Leiterseile gespannt und die Verlängerung gemessen. Mit den Beobachtungen haben sie ein Berechnungsmodell erstellt, welches die Verlängerung des ganzen Leiterseils beschreibt.



**Bild 3** Längenänderung eines 4 m langen Seils über die Zeit. Die Zugspannung beträgt 50 MPa. Gezeigt sind Messungen für die Temperaturen 50 und 80°C. Die gestrichelte Kurve zeigt die berechnete Längenänderung bei 100°C.

**Bild 3** zeigt die Verlängerung eines 4 m langen Leiterseils für eine Zugspannung von 50 MPa. Zwei ausgezogene Kurven zeigen Messungen bei 50 °C und 80 °C. Die dritte, gestrichelte Kurve zeigt das berechnete Verhalten bei 100 °C. Zu Beginn der Messung verlängert sich das Leiterseil schneller als mit zunehmender Zeit. Dieses Verhalten ist für zahlreiche mechanische Komponenten und Materialien bekannt. In diesem Fall ist das Verhalten auf den komplexen Zustand der Drähte zurückzuführen, die im Herstellungsprozess auf eine Spiral-Geometrie verformt werden.

Die Erkenntnis dieser Untersuchungen ist, dass sich die Leiterseile bemerkbar verlängern, sobald sie gespannt werden. Dies passiert sowohl nach der erstmaligen Montage des Leiterseils als auch beim Nachspannen nach mehreren Jahren. Nach wenigen Wochen ist der grösste Teil der Verlängerung passiert und die Leiterseile verlängern sich anschliessend deutlich langsamer. Die wichtigste Erkenntnis ist, dass dieser Prozess bereits bei tiefen Temperaturen stattfindet und er sich bei höheren Temperaturen beschleunigt. Das neue Modell erlaubt es, die entsprechende Vergrösserung des Durchhangs zu berechnen. Für die Leiterseile stellt es kein Problem dar, wenn sie während ihrer Lebensdauer wenige Stunden über 80 °C heiss sind.

Ein weiterer untersuchter Effekt von hohen Temperaturen ist, dass sich die Zugfestigkeit reduziert: Die Leiterseile reissen mit zunehmendem Alter bei geringeren Zugkräften als im Neuzustand. Die Messungen haben gezeigt, dass bis zu einer Temperatur von 100 °C und einer Zeit von 1000 h sich die Zugfestigkeit nicht wesentlich reduziert. Die Untersuchungen haben es erlaubt, eine Methode zur Bestimmung der Restlebensdauer der Leiterseile zu entwickeln. Mit mechanischen und metallographischen Untersuchungen an einem kurzen Seilstück kann man für Leiterseile, die schon lange in Betrieb sind, bestimmen, wie lange und bei welchen Temperaturen diese in der Zukunft ohne Risiko eingesetzt werden können.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Sowohl die Messungen am Übertragungsnetz als auch die Messungen im Freiluftlabor haben gezeigt, dass das Modell über den gesamten Temperaturbereich auf wenige Grad Celsius genau ist. Für die Genauigkeit der berechneten Temperatur ist der Wind bedeutender als die

### Résumé

## Vérification de la température et des matériaux des câbles conducteurs

### La température peut être évaluée avec précision et son influence sur le comportement des matériaux est caractérisée

L'EPF de Zurich et l'Empa de Dübendorf ont vérifié le comportement thermique et les propriétés mécaniques des conducteurs des lignes aériennes. D'une part, l'équipe de recherche du Prof. Franck (EPF de Zurich) a conçu une méthode de calcul précise pour la température de service des câbles conducteurs qui prend en compte le flux de courant et les données météorologiques. D'autre part, une équipe de recherche du Prof. Mazza (Empa) a démontré qu'une augmentation de courte durée des températures de service n'endommage pas nécessairement les conducteurs.

La force du vent est le principal facteur influant sur la température des conducteurs. Étant donné que ce dernier varie fortement et qu'il est donc difficile de le définir correctement, il est nécessaire d'émettre des hypothèses prudentes quant à la force du vent, sinon les câbles conducteurs risqueraient d'atteindre des températures supérieures à celles calculées.

Une méthode élaborée dans le cadre de ce projet permet de déterminer la durée d'utilisation restante des conducteurs. Ainsi, il est possible d'utiliser l'infrastructure existante de manière optimale.

No

Lufttemperatur. Der Wind variiert zeitlich und örtlich stark. Wenn man sicherstellen will, dass die reale Seiltemperatur nicht höher als die berechnete ist, muss die Windgeschwindigkeit geringer als die gemessene (oder durch Wettermodelle prognostizierte) angenommen werden.

Die Materialuntersuchungen haben gezeigt, dass Aldrey-Leiterseile auch bei höheren Temperaturen eingesetzt werden können. Das erstellte Modell zeigt auf, wie sich die Leiterseile bei erhöhten Temperaturen verlängern. Die verringerte Zugfestigkeit stellt jedoch kein Risiko für einen sicheren Netzbetrieb dar, wenn die Alterung der Leiterseile nicht schon fortgeschritten ist.

Für Netzbetreiber ist es wertvoll zu wissen, dass die weitere Nutzungsdauer der Leiterseile, beziehungsweise die Zeit bis zum nächsten Nachspannen, bestimmt werden kann. So ist es möglich, die bestehende Infrastruktur optimal zu nutzen.

Für die mechanische Sicherheit der Freileitungen sind weitere Komponenten verantwortlich. Die Leiterseile werden mit Keilklemmen an den Masten befestigt. Diese Keilklemmen sind ebenfalls hohen mechanischen Spannungen

und erhöhten Temperaturen ausgesetzt. Deshalb untersucht das Forschungsteam von Prof. Franck in Kooperation mit Prof. Mazza das thermische und mechanische Verhalten dieser wichtigen Komponente.

Die Resultate des von Swisselectric Research, Swissgrid, Axpo, Pfisterer und dem Kompetenzzentrum für Energie & Mobilität (CEEM) finanzierten Forschungsprojekts «Temperaturabhängige Kapazitätsausnutzung von Freileitungsnetzen» wurden im Detail in Fachzeitschriften publiziert und an wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt.

### Referenzen

- [1] Joachim Bertsch, Gerhard Biedenbach, Mark Bucher, Volker Hinrichsen, Philippe Rothermann, Walter Sattinger, Urs Steinegger, Renata Teminova, Martin Weibel, «Leitererwärmung im Hochspannungsübertragungsnetz», Bulletin SEV/VSE 17/2007.
- [2] Martin Weibel, Martin Bucher, Urs Steinegger, Walter Sattinger, Jürgen Schmitt, Matthias Bucher, «Leiterseiltemperaturmessung am Lukmanier», Bulletin SEV/VSE 5/2010.
- [3] Urs Steinegger, Roland Notter, Walter Sattinger, «Der Weg zur temperaturbasierten Netzführung», Bulletin SEV/VSE 5/2014.

### Autor

**Sandro Dinsler**, Leiter technische und wissenschaftliche Netzprojekte.

### Electrosuisse / ETG-Kommentar

#### Netzbetreiber profitieren

Diese Studie trägt massgebend zur Optimierung von Diagnosemöglichkeiten der Netzbetreiber bei, denn mit den vorgestellten Methoden lässt sich die verbleibende Einsatzdauer von installierter Netz-Infrastruktur präziser abschätzen. Die ETG unterstützt Entwicklungen und Zusammenarbeit für moderne Energietechnik und bietet Fachleuten Plattformen als Schnittstelle zu Wissen und Erfahrung.

**Thierry Saugy**, Geschäftsführer der Brugg Cables Schweiz und Vorstandsmitglied der Fachgesellschaft ETG von Electrosuisse.

## Haben Sie gewusst, dass ...

... der VSE-Rechtsdienst allen VSE-Mitgliedern unentgeltlich Kurzauskünfte erteilt?

... Ihnen der VSE-Rechtsdienst in komplizierten Rechtsfragen und in juristischen Verfahren auf Mandatsbasis zur Seite steht?

Mehr unter:  
www.strom.ch > Fachbereiche > Rechtsdienst

Oder noch besser ...  
rufen Sie uns einfach an: 062 825 25 40

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen  
Association des entreprises électriques suisses  
Associazione delle aziende elettriche svizzere  
www.strom.ch, www.electricite.ch



## LANZ – moderne Kabelführung

- Kabelschonend
- Preisgünstig
- Koordinierbar
- Schraubenlos montierbar
- Funktionserhalt E 30 / E 90
- Sofort lieferbar

- LANZ G- und C-Kanäle
- LANZ Multibahnen
- Flachbahnen nur 70 mm hoch
- LANZ Briport
- Inst-Alum- und ESTA Installationsrohre
- V-Rohrschellen für koordinierte Installationen
- Gitterbahnen, Flachgitter
- Weitspan-Multibahnen
- Weitspan-Tragprofile
- LANZ Steigleitungen
- Schnellverleger

Stahl halogenfrei polyethylenbeschichtet, galv. verzinkt, feuerverzinkt oder rostfrei A4. Hoch belastbar nach IEC 61537. CE-konform. ISO-9001-zertifiziert. Geprüft für Funktionserhalt E 30 / E 90. Trägermaterial ACS-schockgeprüft 1 bar, abrutschsicher verzahnt. Geprüft auf Erdbebensicherheit. Deckenstützen für 1-Dübel-Montage.

Ab Lager von lanz oensingen und allen Elektrogrossisten.  
lanz oensingen ag Tel. 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24

Mich interessieren ..... Bitte senden Sie Unterlagen.

Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. \_\_\_\_\_

•K5



lanz oensingen ag

CH-4702 Oensingen  
Telefon 062 388 21 21  
www.lanz-oens.com

Südringstrasse 2  
Fax 062 388 24 24  
info@lanz-oens.com



## Coreloss & Motor Test Systeme

### Coreloss Tester (CL)

- Computergestützte Messung der Kernverluste von Rotoren und Statoren
- Hot Spot Test zur Identifikation von lokalen kurzgeschlossenen Kernblechen
- Prüfstrom bis 5 kA
- Prüfung entsprechend der Richtlinie EASA AR100-2010



CL125A

### Motor Test System (MTS)

- Halbautomatisierter Prüfstand für rotierende Maschinen (AC und DC)
- Prüfleistung von 50 kVA bis 10 MVA
- Prüfspannung bis 13.8 kV
- Bestimmung von Leerlaufverlusten und Wirkungsgrad (optional)
- Messung von Drehzahl, Temperatur und Vibration



MTS300R-240

High Voltage • High Current • High Power  
Test Systems and Components

Phenix Technologies, Inc.  
75 Speicher Drive  
Accident, MD 21520 USA  
Tel: +1 301 746 8118  
info@phenixtech.com

Phenix Systems AG  
Riehenstrasse 62A  
4058 Basel Switzerland  
Tel: +41 61 383 2770  
info@phenixsystems.com

www.phenixtech.com