Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 101 (2010)
Heft: 5

Artikel: Leiterseiltemperaturmessung am Lukmanier
Autor: Sattinger, Walter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856075

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: 07.08.2025

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

Leiterseiltemperaturmessung am Lukmanier

Grundlagen für ein schweizweites Monitoring

Mit der zunehmenden Komplexität des europaweiten Stromverbunds und den Folgen des liberalisierten Strommarkts sind schnelle Wechsel im Lastfluss die Regel. Nicht zuletzt der Blackout in Italien im Herbst 2003 zeigte, welche Auswirkungen diese Dynamik haben kann. Die zentrale Rolle der Schweiz als Transitland für Strom macht eine stetige Optimierung der Sicherheit der Stromführung unabdingbar. Die Leiterseiltemperaturmessung leistet ihren Beitrag dazu.

Walter Sattinger et al.

Die maximale Strombelastbarkeit einer Leitung wird durch den thermischen Grenzwert der Leiterseile bestimmt. Dieser darf nicht überschritten werden, um die mechanischen Eigenschaften der Leiterseilmaterialien garantieren zu können. Neben der Leiterseiltemperatur muss auch noch der davon abhängige Seildurchhang berücksichtigt werden, um Überschläge zu seilnahen Objekten zu verhindern. Heute werden statische Annahmen getroffen, wie stark das Seil im Sommer oder Winter belastet werden darf. Um trotz extremer Umwelteinflüsse die Betriebssicherheit gewährleisten zu können, müssen deshalb genügend grosse Sicherheitsmargen definiert werden.

Durch den Einsatz von Monitoringsystemen kann die Sicherheit zusätzlich erhöht werden, da die Leiterseiltemperatur und weitere Umwelteinflüsse wie Wind oder Sonneneinstrahlung jederzeit bekannt sind.

Ein weltweit einzigartiges Projekt wurde Anfang September 2003 von Alpiq (ehemalige Atel) und Swissgrid (ehemalige Etrans) genau auf der Leitung gestartet, welche am 28. September 2003 zu einem Glied in der Ereigniskette des Blackouts in Italien wurde.

Ziel des Projekts ist der direkte Vergleich verschiedener Messsysteme sowie das Erlangen neuer Erkenntnisse über wichtige thermische Einflüsse auf Leiterseile.

Die Lukmanierleitung als Teil der europäischen Nord-Süd-Verbindung stellte sich als besonders geeignet heraus, da innerhalb von ca. 100 km drei verschiedene Klimazonen, mit jeweils einer Messstation, durchquert werden **(Bild 1)**. Dies sind im gemässigten Klima Erstfeld (Station 1), im alpinen Klima Rueras nahe Sedrun (Station 2) und im mediterranen Klima Cugnasco (Station 3). Die Daten werden von den Messgeräten via Datenlogger und GSM-Übertragung an eine zentrale Datenbank geschickt und dort aufbereitet und archiviert.

Mittlerweile sind Datenreihen über eine Zeitspanne von 6 Jahren mit einer zeitlichen Auflösung zwischen 5 und 10 Minuten vorhanden. Sowohl die Erkenntnisse aus den Messdaten als auch der direkte Vergleich der einzelnen Messsysteme dienen als Grundlage für ein zukünftiges schweizweites Monitoringsystem.

Eingesetzte Messsysteme

Die hier beschriebenen Messsysteme werden zur Messung der Leiterseiltemperaturen und Umgebungseinflüsse eingesetzt. Das FOFW-Messsystem lieferte zunehmend unzuverlässige Messwerte und wird daher nicht mehr berücksichtigt.

PowerDonut

Der erst kürzlich installierte PowerDonut, ein verhältnismässig kleines Gerät, wird direkt auf das Leiterseil montiert und benötigt weder eine Bodenstation noch eine externe Stromversorgung **(Bild 2)**. Das Magnetfeld des Leiters liefert mittels Induktion genügend Energie für den Betrieb der Messinstrumente und der Kommunikation. Mit einer Rogowski-Spule wird die Strommessung robust und störungsresistent. Sie muss jedoch auf die jeweilige Leiterseilkonfiguration (Bündelleiter) angepasst werden. Eine einfache Installation (nur kurze Leitungsabschaltung nötig) und Datenabfrage via UMTS sowie die Robustheit des Instruments sind weitere Vorteile. Durch die beiden Temperatursensoren lassen sich zwei unabhängige Temperaturmessungen

Swissgrid

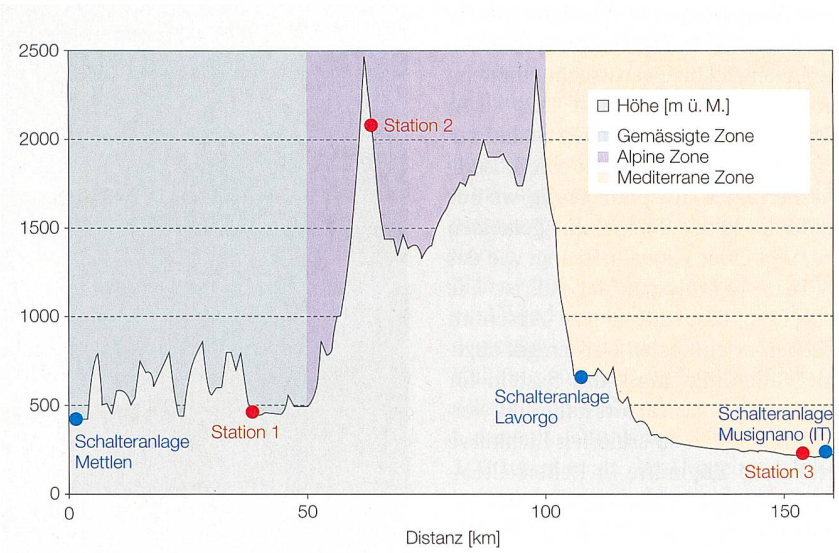
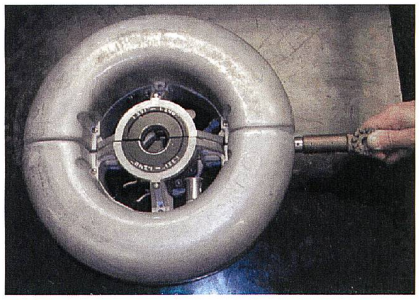


Bild 1 Höhenprofil entlang dem Leitungsverlauf der Lukmanierleitung und Anschlussleitung.



Underground Systems Inc.

Bild 2 Selbstversorgender PowerDonut.

durchführen, deren Plausibilität durch den direkten Vergleich ermittelt werden kann. Das eingebaute Inklinometer, welches die Abweichung der Leitung von der horizontalen Lage misst, lässt sich zudem für die Eisdetektion verwenden. In einer experimentellen Anordnung ist es gelungen, mit hoher Genauigkeit von der Inklination der Leitung auf die Leiterseiltemperatur zu schliessen. Ebenfalls lässt sich aus dem gemessenen Winkel und den gegebenen Parametern der Leiterseildurchhang bestimmen. Nachteilig ist die extrem lokale Messung, da der PowerDonut selbst die Messköpfe vor Umwelteinflüssen wie Sonneneinstrahlung oder Niederschlag abschirmt. Im Weitern wird die interne Batterie erst ab einem gewissen Stromschwellwert geladen, d.h., bei längerem tiefem Stromfluss kann ein Unterbruch in der Messung auftreten.

Clearance Assurance of Transmission Lines

Das Clearance Assurance of Transmission Lines System (CAT-System) misst die mechanische Zugkraft des Leiterseils. Hierzu werden die Kraftmesszellen zwischen Abspannmast und Isolatorenkette eingebaut (Bild 3). Die temperaturabhängige Leiterseillänge verursacht eine temperaturabhängige Zugkraft und einen entsprechend veränderlichen Seildurchhang. Diese Methode bietet eine Lösung zwischen einer Hotspotmessung, wo nur gerade die lokale Temperatur gemessen wird, und einer Globalmessung, wie das z. B. beim LTM-System der Fall ist. Die Umwelteinflüsse auf einem Abschnitt zwischen zwei Masten werden gut abgebildet, allerdings muss das System für den jeweiligen Einsatzort kalibriert werden. Anhand der so eruierten Eichkurve werden die Zugkräfte in Leiterseiltemperaturen umgerechnet. Das System eignet sich optimal für die Eisdetektion. Zusätzlich zur Zugkraft wird auch die Umgebungstemperatur erfasst.

Neben der aufwendigen Installation – Leitung muss abgeschaltet und abgehängt werden – und der benötigten Bodenstation sind auch starke Winde ein Problem, da diese die Zugkräfte beeinträchtigen und so zu Falschinterpretationen der Leiterseiltemperatur führen können. In Bild 4 erkennt man am 18. Juli starke Abweichungen der Temperaturmesswerte von CAT-System und PowerDonut. Diese korrelieren mit dem gleichzeitigen Auftreten eines starken Windes. Die Messwerteauflösung ist zudem viel geringer als bei einer direkten Messmethode.

Line Thermal Monitoring

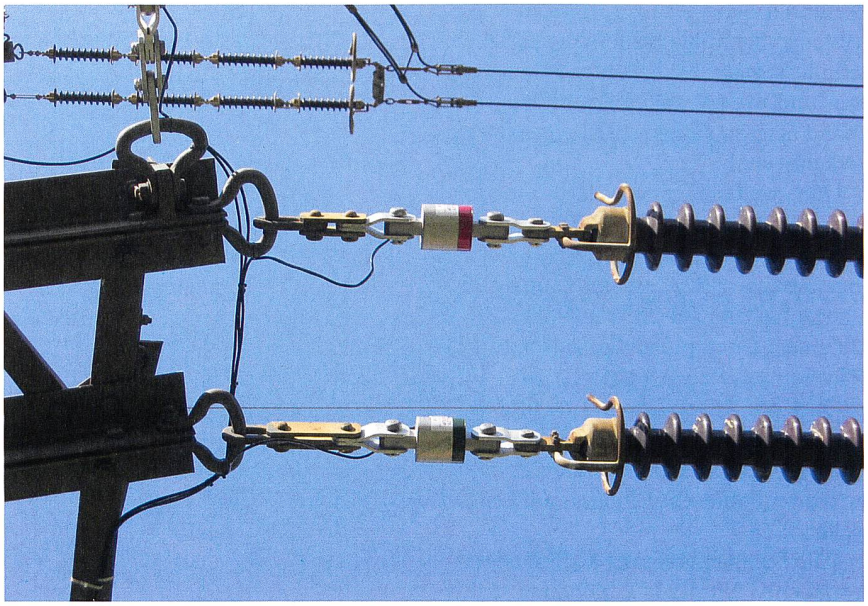
Das einzige implementierte globale Messsystem ist das Line Thermal Monitoring (LTM). Aus genauen Messungen des Wirkleistungsverlusts durch PMUs (Phasor Measurement Unit) zwischen zwei Stationen (in diesem Fall Mettlen und Lavorgo) können durch starke Filterung über die in guter Näherung lineare Temperaturabhängigkeit des Leitungswirkwiderstands der globale Durchschnitt der Leiterseiltemperatur berechnet werden. Der Vorteil liegt darin, dass bei diesem simplen Prinzip trotzdem alle thermischen Einflüsse abgebildet werden. Es dürfen dabei nicht die absoluten Messwerte, sondern eher die (globale) Tendenz als ausschlaggebend für die Temperaturverteilung betrachtet werden. Neben der sehr hohen zeitlichen Auflösung braucht das LTM keine zusätzlichen Installationen, da es sich bestehender Hardware bedient. Die berechneten Leiterseiltemperaturen können bequem per Software ausgelesen werden. Die Genauigkeit der Messwerte hängt in erster Linie von der Genauigkeit der eingesetzten Messgeräte (Strom- und Spannungswandler) ab. Ein verhältnismässig hoher Stromfluss und eine präzise Kalibrierung der Parameter sind Voraussetzung für eine brauchbare Genauigkeit.

Meteostationen

Zur Erfassung von meteorologischen Einflüssen sowie als Vergleichsbasis wurden Meteostationen installiert. Diese umfassen neben Temperatur- und Luftfeuchtemessgeräten auch Netto(Sonnen-)strahlungs- und 3-D-Windmessgeräte. Im Unterschied zu konventionellen Meteostationen befinden sie sich auf Leiterseilhöhe und nicht in Bodennähe. Damit können die umweltbedingten thermischen Einflüsse auf die Leiterseile präziser erfasst werden. Die gemessenen Werte sind dabei durchaus plausibel.

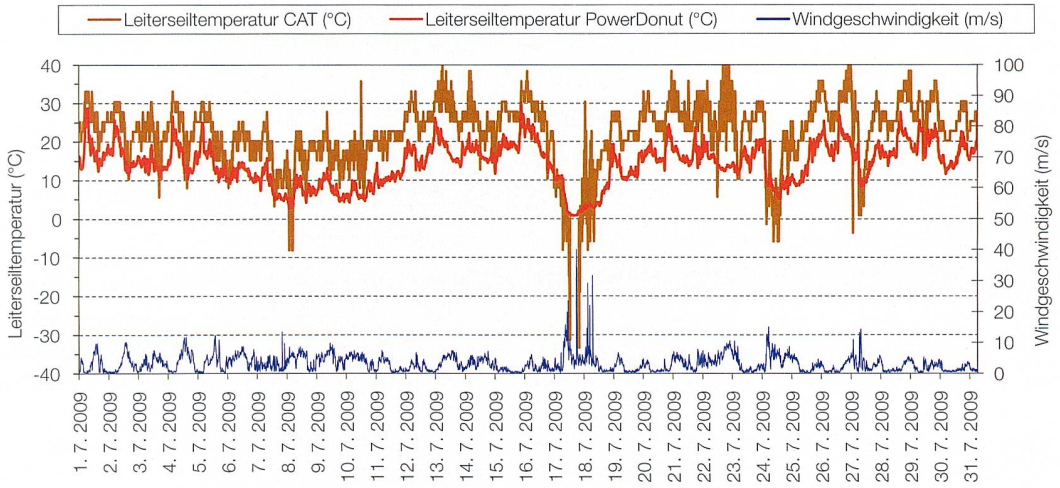
Einflüsse auf die Leiterseile

Als Haupteinflüsse auf die Leiterseiltemperatur wurden Strom, Wind, Sonneneinstrahlung und Niederschlag eruiert. Um eine Grössenordnung der Einflüsse zu bekommen, wurden Teile der archivierten Daten analysiert. Die Erkenntnisse wurden durch Modellberechnungen bestätigt. Da die Lukmanierleitung mittlerweile nicht mehr zu den höchstbelasteten Leitungen gehört, werden zurzeit Anstrengungen unternommen, um Messungen auf thermisch stärker belasteten Leitungen vornehmen zu können.



Underground Systems Inc.

Bild 3 Installierte CAT-Messzellen zwischen Isolatoren und Abspannmasten.



Swissgrid

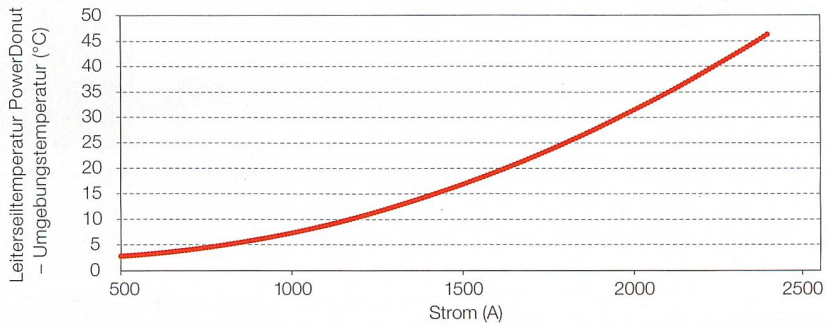
Bild 4 Beeinflussung der Temperaturmessung des CAT-Systems durch Windeinflüsse.

Einfluss von Strom

Den stärksten Einfluss hat der Strom selbst. Wie zu erwarten ist, zeigt die Temperaturdifferenz zwischen Leiterseiltemperatur und Umgebungstemperatur eine quadratische Abhängigkeit.

Die Heizleistung ist abhängig vom Stromfluss und vom temperaturabhängigen Wirkwiderstand der Leitung.

Eine Extrapolation basierend auf Messdaten vom PowerDonut und von der Meteostation in Rueras (**Bild 5**) zeigt, dass der durchschnittliche thermische Einfluss auf der Lukmanierleitung bei Betrieb nahe des Maximalstroms eine Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Leiterseil von über 30 °C haben kann. Dies wird momentan durch die Herabsetzung der maximalen Strombelastung im Sommer bereits berücksichtigt.



Swissgrid

Bild 5 Extrapolation des durchschnittlichen Stromeinflusses auf Leiterseiltemperatur, basierend auf Messdaten aus Rueras, 1.6.2009–24.8.2009.

Einfluss von Wind

Der Wind reduziert die Differenz zwischen der Seiltemperatur und der Lufttemperatur. Da die Seiltemperatur meist höher ist als die Lufttemperatur, wirkt der Wind meist kühlend. **Bild 6** zeigt die Differenz der Leiterseiltemperatur und Umgebungstemperatur in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Bereits sehr geringe Windgeschwindigkeiten bewirken eine hohe Kühlleistung. Ganz wichtig dabei ist der Angriffswinkel zwischen Leiterseilverlauf und Windrichtung. Die Kühlung ist massiv stärker, wenn die Luft senkrecht auf das Leiterseil auftrifft anstatt, im Unterschied zu entlang von Tälern laufenden Leitungen üblich, parallel dazu. **Bild 7** bestätigt, dass die Differenz zwischen der Leiterseil- und der Umgebungstemperatur eine winkelabhängige cosinusförmige Tendenz mit Minima bei Angriffswinkel 90° und 270° und Maxima um jeweils 90° verschoben aufweist. Da die Messungen in einem ausgeprägten Tal gemacht wurden, entspricht die Häufung bei 200° dem Talverlauf an jener Stelle. Mögliche Abweichungen kommen durch die Beschaffenheit der Umgebung zustande.

Einfluss von Sonne

Die Nettostrahlung kann entweder positiv oder negativ sein. Positiv während Sonneneinstrahlung und null oder negativ in der Nacht. **Bild 8** zeigt Differenztemperaturmesswerte aus Rueras zusammen mit der entsprechenden Nettostrahlungsmessung. Der Temperaturunterschied zwischen Leiterseil und Umgebung nimmt dabei mit steigender Nettostrahlung linear zu (der Offset kann anderen Einflüssen wie Stromfluss zugeordnet werden). Es muss angemerkt werden, dass die Beschaffenheit des Leiterseils und der Untergrund wesentlich für die Stärke des Sonneneinflusses sind. Zum Beispiel Schnee bewirkt durch Reflektion eine zusätzliche Anstrahlung der Leiterseile von unten. Zudem absorbieren die Leiter abhängig von Alter und Oberflächenbeschaffenheit unterschiedlich viel Sonnenenergie.

Einfluss von Niederschlag

Niederschlag hat eine starke Kühlleistung. In **Bild 9** ist die Temperaturdifferenz von Leiterseil und Umgebung gegenüber dem stündlichen Niederschlag (in mm) aufgetragen. Die Niederschlagsmesswerte stammen von zwei Messstationen in Sedrun und Gütsch, in der Nähe von Rueras. Ähnlich dem Einfluss von Wind genügt auch hier wenig Niederschlag, um bereits eine beträchtliche Kühlung zu erzielen. Bereits 3 mm Niederschlag pro Stunde genügen, um die Lukmanierleitung im Schnitt weniger als 3 °C wärmer als die Umgebungsluft zu halten. Während der Messperiode war die Leitung im Mittel ohne Regeneinfluss ca. 4,7 °C wärmer als die Umgebungsluft, mit Regeneinfluss im Mittel ca. 2 °C.

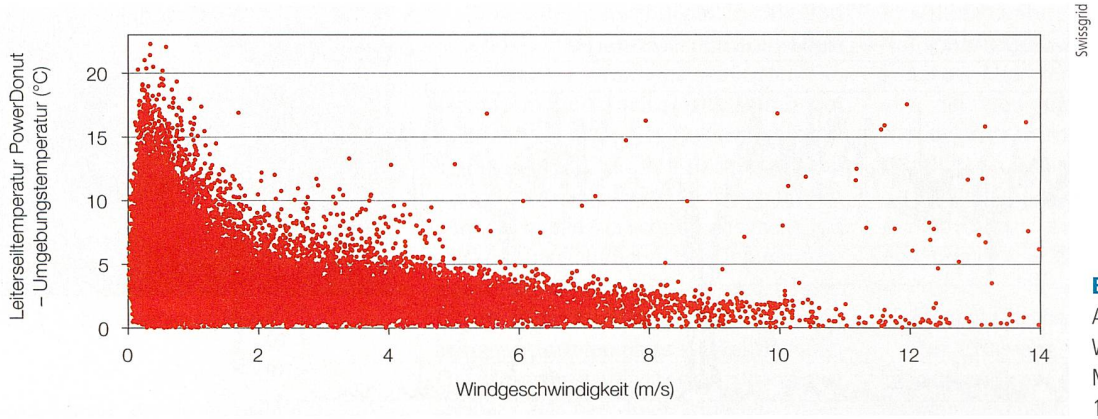


Bild 6 Kühlleistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Messungen aus Rueras, 1.6.2009–15.12.2009.

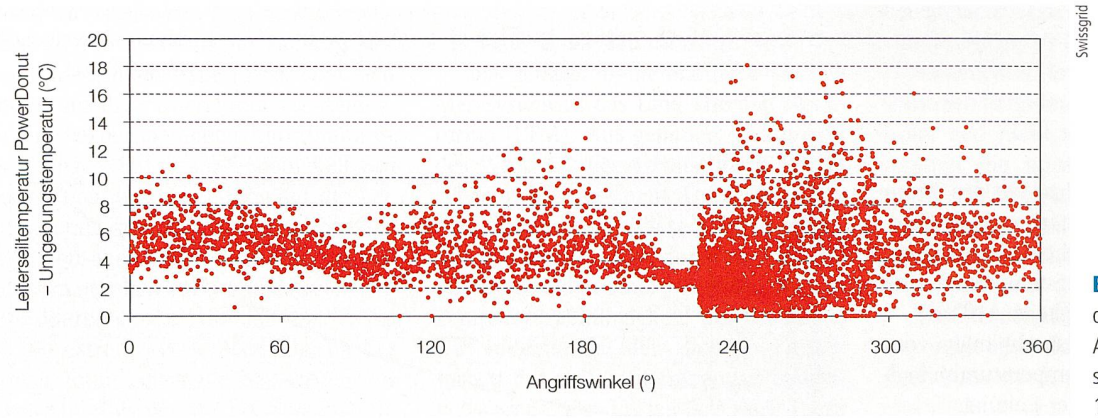


Bild 7 Abhängigkeit der Windkühlung vom Angriffswinkel. Messungen aus Rueras, 1.6.2009–15.12.2009.

Modelle

Neben dem direkten Messwertevergleich von Systemen bieten Temperaturmodelle für Leiterseile eine weitere gute Möglichkeit, die Messwerte auf Plausibilität zu überprüfen. Gerade im Hinblick auf einen Einsatz im täglichen Betrieb ist es von Interesse, die Möglichkeiten dieser Modelle zu kennen, da die Messsysteme meist nicht redundant ausgeführt werden. Der mögliche Einsatz besteht vor allem in der Überprüfung der Daten sowie der temporären Prognosemöglichkeit bei einem Messsystemausfall.

Es existieren diverse Modelle, und alle verlangen diverse Eingangsgrössen wie Umweltgrössen (Sonne, Wind, Umgebung usw.), charakteristische Grössen der Leitung (Widerstand, Leiterseilaufbau, Alter usw.) und Belastung. Daraus wird mit geringer Abweichung (sowohl Mittelwert als auch Standardabweichung) die Leiterseiltemperatur berechnet. Es existieren Modelle, die in der Lage sind, sowohl statische Endwerte wie auch dynamische Verläufe zu simulieren. **Bild 10** zeigt die Temperaturmessungen des PowerDonuts und die entsprechende Ausgabe durch ein von Cigré vorgeschlagenes Modell. Die Prognosefehler für die in **Bild 10** verwendete Mess-

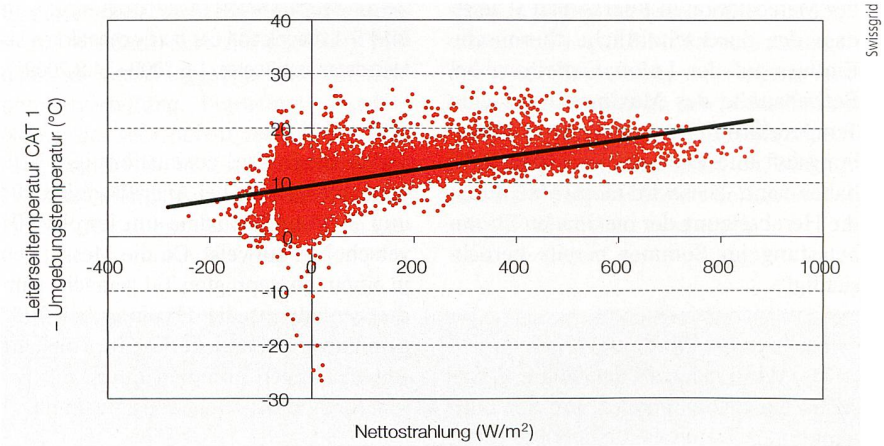


Bild 8 Tendenzieller Einfluss der Sonnenstrahlung. Messungen aus Rueras, 1.6.2009–26.8.2009.

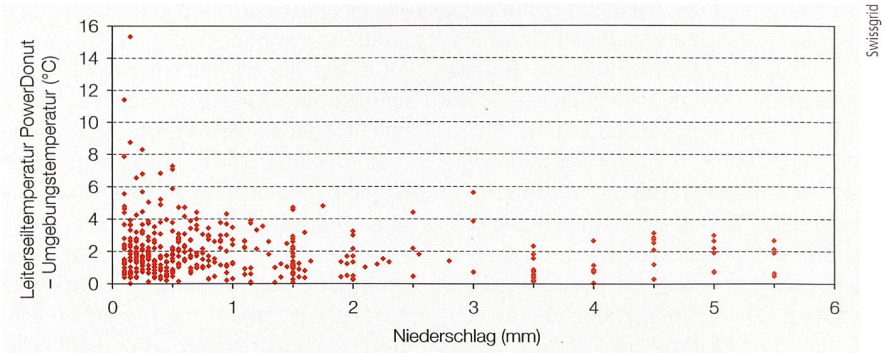
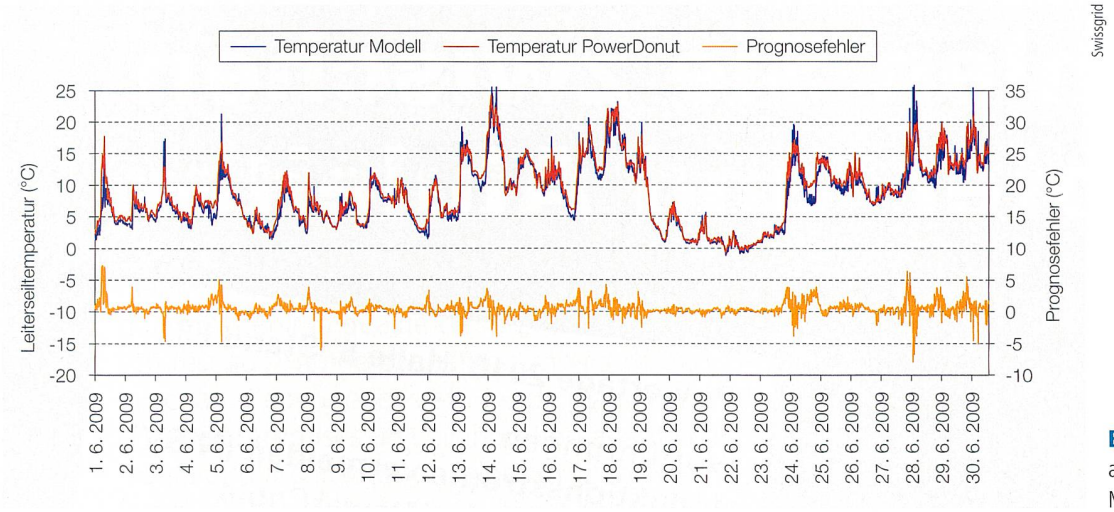


Bild 9 Einfluss von Niederschlag auf die Temperaturdifferenz von Leiterseil und Umgebung. Messungen aus Sedrun, Gütsch und Rueras, 12.4.2009–31.12.2009.



Swissgrid

Bild 10 Prognosegüte am Beispiel des Cigré-Modells.

periode liegen im Mittel um 0,6 °C, die Standardabweichung ist ca. 1 °C.

Alternativ zu Modellen wie dem Cigré-Modell, wo viele physikalische Gegebenheiten miteinbezogen werden, lassen sich auch Prognosen aus alten Messdaten erstellen. Dies bedingt allerdings, dass Messwerte vom jeweiligen Ort vorhanden und ausreichend genau sind.

Zusammenfassung und nächste Schritte

Der Vergleich der Messsysteme hat die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren aufgezeigt. Aus der Analyse der Messdaten, welche mittlerweile automatisch gesammelt und auf einem Server archiviert werden, konnten bereits wertvolle Erkenntnisse gezogen und das Verständnis für das thermische Verhalten der Leitungen weiter vertieft werden. Die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit unterschiedlicher Messsysteme konnten überprüft werden, der Einfluss von erwärmenden wie auch von kühlenden Faktoren konnte in Ihrem Zusammenhang detailliert ermittelt werden. Es existieren zudem brauchbare Modelle, um die Messwerte auf Plausibilität überprüfen zu können.

In Zukunft soll das Projekt ausgeweitet, und weitere Partner sollen gesucht werden. Ebenfalls werden thermisch stark belastete Leitungen für Messungen eruiert. Das gesammelte Know-how und die gemachten Erfahrungen sollen die Basis für den Aufbau eines schweizweiten Monitorings bilden.

Résumé

Mesure de la température des câbles conducteurs au Lukmanier

Bases d'un monitoring couvrant tout le territoire suisse

Vu la complexité croissante du réseau interconnecté européen et les conséquences de la libéralisation du marché de l'électricité, les changements rapides des flux de charge sont fréquents. La panne totale survenue en Italie à l'automne 2003 a montré quelles pouvaient être les répercussions de cette dynamique. Le rôle central de la Suisse en tant que pays de transit pour le courant électrique rend indispensable une optimisation constante de la sécurité de transport. La mesure de la température des câbles conducteurs y contribue. No

Referenzen

- Leitererwärmung im Hochspannungsübertragungsnetz, Joachim Bertsch, Gerhard Biedenbach, Mark Bucher, Volker Hinrichsen, Philippe Rothermann, Walter Sattinger, Urs Steinegger, Renata Teminova, Martin Weibel, Bulletin SEV/VSE 17, 2007.
- Cigré Brochure 324, Sag-Tension Calculation Methods for Overhead Lines, Task Force B2.12.3, June 2007.
- Cigré Brochure 207, Thermal Behaviour of Overhead Conductors, WG 22.12, Aug. 2002.

Angaben zu den Autoren

Martin Weibel, dipl. El.-Ing. HTL, ist Leiter Leitungen Ost bei Alpiq Netz AG Gösgen.
Alpiq Netz AG, 5013 Niedergösgen, martin.weibel@alpiq.com

Mark Bucher, El.-Ing. FH, MAS-BA, war bis Ende 2009 Projektleiter bei Alpiq Netz AG Gösgen.
CTeam-Kull AG, 8903 Birmensdorf, mark.bucher@cteam-kull.ch

Urs Steinegger, dipl. Natw. ETH, ist Mitarbeiter und Mitglied der Geschäftsleitung bei Meteodat GmbH.
Meteodat GmbH, 8005 Zürich, steinegger@meteodat.ch

Dr.-Ing. **Walter Sattinger** ist Fachexperte innerhalb der Abteilung Systemführung Support bei Swissgrid AG.
Swissgrid AG, 5080 Laufenburg, walter.sattinger@swissgrid.ch

Jürgen Schmitt, Dipl.-Ing. BA, ist Mitarbeiter im Assetmanagement bei Swissgrid AG.
Swissgrid AG, 5080 Laufenburg, juergen.schmitt@swissgrid.ch

Matthias Bucher studiert Elektrotechnik und Informationstechnologie an der ETH Zürich und war Praktikant bei Swissgrid AG.
Swissgrid AG, 5080 Laufenburg, buchmatt@ethz.ch

Anzeige

Besuchen Sie ...

www.technik-museum.ch **www.soiree-electrique.ch** **www.elektrojob.ch**

Wählen Sie zwischen Kupfer- und Aluleiter.

Powertage 2010, Halle 6, Stand F31

Vorführungen:
Induktionsströme vermeiden (NISV)
mit unserem CFW PowerCable
Lösungen für Teilentladungsmessung
und Monitoring bei Hochspannungs-
kabelanlagen

Brugg Cables entwickelt und produziert Kabel, Zubehör sowie Systemlösungen, um elektrische Energie gezielt, wirtschaftlich und umweltfreundlich fliessen zu lassen. Das halogenfreie Niederspannungskabel mit Alu-Leiter gibt Ihnen die Möglichkeit, bei gleicher Leistung wie bei einem Kupfer-Leiter-Kabel, Kosten und Gewicht zu reduzieren. Für weitere Informationen, eine Beratung oder Ausbildungsprogramme für Kabelmonteure wenden Sie sich bitte an:

Brugg Kabel AG, Klosterzelgstrasse 28, 5201 Brugg,
Telefon +41 (0)56 460 33 33, Fax +41 (0)56 460 35 36,
E-Mail info@brugg.com, www.bruggcables.com

BRUGG CABLES
Well connected.