

# VEW

Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG · Dortmund

## Konzeption eines Frühwarnsystems zum Seiltanzen an Hochspannungsfreileitungen

*Von Norbert Allnoch, Claus Jürdens, Hans-Christian Müller und Julius Werner*

# Konzeption eines Frühwarnsystems zum Seiltanzen an Hochspannungsfreileitungen

Von Norbert Allnoch, Münster, Claus Jürdens und Hans-Christian Müller, Dortmund, und Julius Werner, Münster \*)

Die deutschen Verbundunternehmen haben seit vielen Jahren Seiltanzereignisse an ihren Hochspannungsfreileitungen räumlich und zeitlich dokumentiert. Die Verfasser haben diese Ereignisse mit den Wetterdaten im Umfeld der Seiltanzergebnisse in Korrelation gesetzt und daraus ein meteorologisches Frühwarnsystem entwickelt. Das Frühwarnsystem könnte künftig die Leitstellen rechtzeitig auf nahende Seiltanzgefahr aufmerksam machen.

Das Phänomen des Seiltanzens (conductor galloping) beschäftigt seit Jahrzehnten Fachleute der Verbundnetze in vielen Ländern der Erde. Man versteht darunter großhubige Bewegungen von Leiterseilen an Freileitungen ab etwa 110 kV aufwärts. Seiltanzen tritt bei bestimmten winterlichen Wetterlagen auf. Die Amplituden der langsam Seilschwingungen können so groß werden, daß es durch die Annäherung der Erd- und Phasenseile zu Erd- und Kurzschlüssen, bei Mehrsystemleitungen auch zu Zwischen-systemkurzschlüssen kommen kann. Durch wiederholte stromstarke Fehler können die Leiterseile bis zur Zerstörung beschädigt werden. Mastumbrüche sind auch direkt als Folge der großhubigen Seilbewegungen bekannt geworden. Seiltanzereignisse sind also - auch ohne Störungen und Schäden - »Fehler« im Sinne der VDEW-Störungs- und Schadensstatistik, da sie eine schwerwiegende »ungewollte Änderung des normalen Betriebszustandes« darstellen.

Mit den bisherigen Arbeiten und den darin aufgestellten Theorien zum Anregungsmechanismus des Seiltanzens ist vorwiegend das Ziel verfolgt worden, Erklärungsmodelle für das Auftreten von Seilschwingen zu entwickeln, um durch Ausrüstung gefährdeter Leitungsabschnitte mit geeigneten Vorrichtungen dieses Phänomen möglichst zu unterdrücken [1; 2; 3]. Eine die gesamte Bandbreite abdeckende Abhilfe konnte bisher nicht erreicht werden; sieht man einmal von speziell entwickelten Phasenabstandshaltern ab, die aus Kostengründen nur eine begrenzte Anwendung finden.

Ziel dieses Aufsatzes ist die Vorstellung eines regional operierenden, EDV-gestützten Frühwarnsystems auf der Basis meteorologischer Grundlagen. Bereits in früheren Veröffentlichungen wird im Zusammenhang mit Seilbewegungen auf bestimmte winterliche Wetterlagen bzw. auf Eisansatz am Seil und auf hohe Windgeschwindigkeiten hingewiesen [4; 5; 6]. Im Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen zielt die vorliegende Studie auf die Parametrisierung der meteorologischen Bedingungen für die »Schwungsbereitschaft« der Leiterseile ab. Auf der Basis der von der DVG seit 1980 angelegten Datei wurde in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der Vereinigten Elektrizitätswerke Westfalen (VEW) AG, Dortmund, dieses Warnsystem entwickelt. Die zeitlich und räumlich dokumentierten Fehler (Beobachtungsprotokolle der EVU) bilden die Ausgangsbasis für die Analyse der Störungsabläufe, deren meteorologische Rahmenbedingungen anhand dreistündiger Wettermeldungen von benachbarten Stationen des Deutschen Wetterdienstes rekonstruiert wurden. Obwohl der Wetterdienst routinemäßig nicht alle seiltanzrelevanten klimatologischen Parameter zur Verfügung

\*) Dr. N. Allnoch, Leiter der Arbeitsgruppe Anwendung in der Grenzschichtklimatologie am Institut für Geographie der Universität Münster; Dipl.-Ing. C. Jürdens, Abteilungsleiter Bau und Instandhaltung; Prof Dr.-Ing. H.-C. Müller, Direktor des Bereiches Elektrotechnik, bei der Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund; Prof Dr. J. Werner, Leiter der Abteilung Grenzschichtklimatologie am Institut für Geographie der Universität Münster.

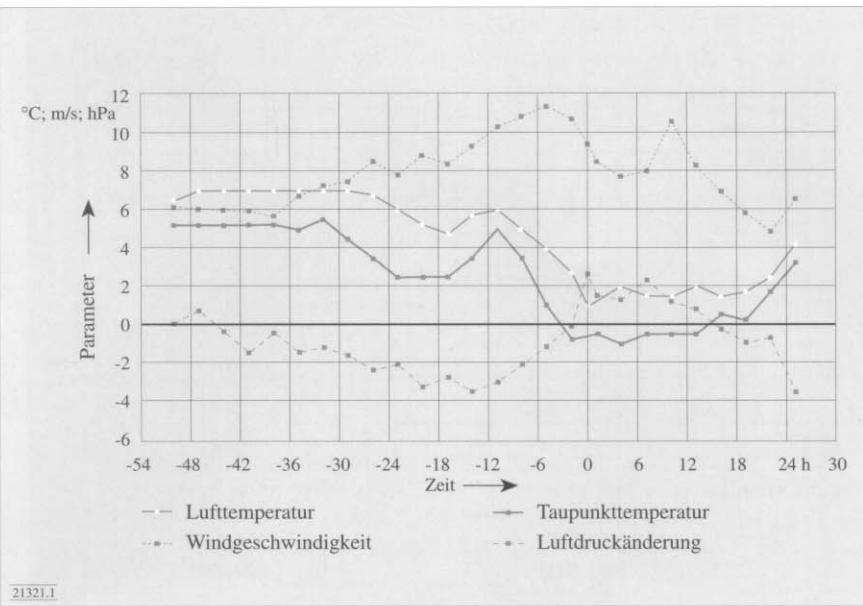


Bild 1. Verlauf der Leitparameter in der previous time, im trouble point und während der past time für den Fehler am 1. Januar 1981 in der Region Hannover

tionen eine hohe Informationsdichte zu erhalten und durch die Auswahl »homogener« Wetterstationen eine horizontale topografische Stationarität zum Fehler herzustellen.

3. Grundlage des zeitlichen Rasters sind die Sequenzen, in denen die Daten des Deutschen Wetterdienstes im Europäischen Wetterbericht dokumentiert werden (3-Stunden-Rhythmus). Ausgehend von der Überlegung, daß für die Entwicklung des Warnsystems meteorologische Früherkennungsparameter von Bedeutung sind, wurde ein Zeitraum von rd. 72 Stunden für jeden Fehler in die Analyse einbezogen. Dabei kommt es besonders darauf an, jeden Fehler anhand der relevanten Parameter in seiner zeitlichen Entwicklung zu analysieren und mit den anderen Fehlern vergleichbar zu machen. Die Unterteilung der relevanten Zeitabschnitte in folgende drei Phasen

- previous time: Vorgeschichte ( $t_{-48}$  bis  $-1$ )
- trouble point: Fehlereintritt ( $t_0$ ) bzw. Fehlerzeitraum ( $t_{01}$  bis  $0_n$ )
- past time: Nachgeschichte ( $t_1$  bis  $24$ ), ermöglicht zudem die separate Auswertung einzelner Phasen.

Die statistische Auswertung der 66 nach strengen Eignungskriterien (Differenzierungsgrad der Dokumentation) ausgewählten Fehlern mit über 7000 erfaßten Datensätzen führte zur Reduktion der ursprünglich 12 erfaßten Parameter auf vier Leitparameter. Bild 1 zeigt den Verlauf von Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit und den Betrag der Luftdruckänderung für den Fehler am 1. Januar 1981 vormittags in der Region Hannover. Die synoptischen Meldedaten stammen von den umliegenden vier Wetterstationen Soltau, Gütersloh, Bad Salzuflen und Hannover-Flughafen. Wie aus dem Zeitreihenverlauf deutlich wird, bewegen sich Luft- und Taupunkttemperatur in der previous time nur wenige K voneinander entfernt. Kurz vor Fehlereintritt fällt die Lufttemperatur von über  $6^{\circ}\text{C}$  auf rd.  $2^{\circ}\text{C}$ , während die Taupunkttemperatur um  $0^{\circ}\text{C}$  liegt. Durch die geringe Taupunktdifferenz und die Temperaturlage um  $0^{\circ}\text{C}$  ist die Bereitschaft der Luft, unterkühlte Wassertropfen ausfallen zu lassen, relativ groß. Berücksichtigt man noch die Temperaturunterschiede zwischen den Wetterstationen (Meßhöhe 2 m ü.Gr.) und den Leiterseilen (30 bis 50 m

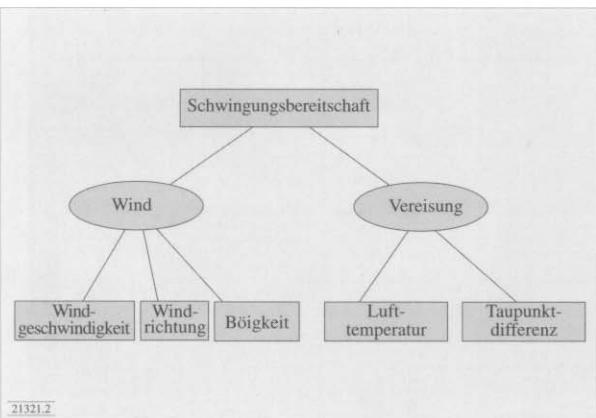


Bild 2. Schwingungsbereitschaft an Leiterseilen und ihre nicht-technischen Voraussetzungen

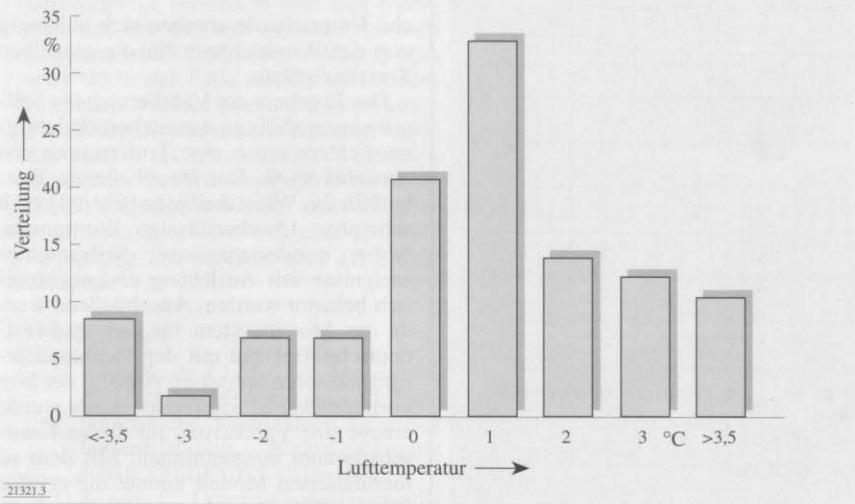
stellt und auch die Übertragbarkeit der Stations-Wetterdaten aufgrund der räumlichen Entfernung zum Seil nicht unproblematisch ist, wurde unter Abwägung der zu erwartenden Kosten für ein eigenes Meßnetz und aus Zweckmäßigkeitsgründen ausschließlich auf die vorliegenden synoptischen Meldungen der Wetterämter zurückgegriffen.

Für die Datenerhebung und Anlegung der Datenbank sowie für die spätere Auswertung wurden zunächst grundlegende Rahmenbedingungen festgelegt.

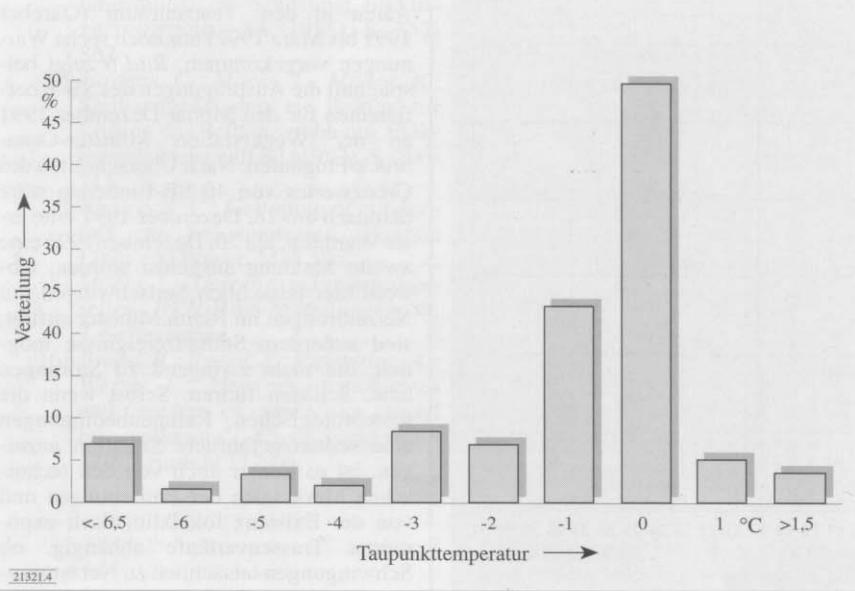
1. Als »Fehler« werden ein oder mehrere Seiltanzereignisse mit Auslösung in einem räumlich abgegrenzten Gebiet und während eines bestimmten Zeitraumes definiert. Bei länger anhaltenden Seiltanzereignissen wird als »Fehlereintritt« ( $t_0$ ) das erste protokollierte Auftreten eines Ereignisses festgelegt. Ziel ist es, eine möglichst klare Abgrenzung der Fehler vorzunehmen und eine Vergleichbarkeit der Ereignisse untereinander zu erreichen.

2. Innerhalb oder im näheren Umkreis der Fehlerregion gelegene Wetterstationen wurden zur Analyse der Ereignisse ausgewählt. Die im Einzelfall verfügbaren drei bis acht Wetterstationen sollten nach Möglichkeit einen Maximalabstand von 100 km zum Fehlerzentrum nicht überschreiten und sich in ähnlicher topografischer Lage befinden. Ziel ist es, durch Einbeziehung möglichst vieler Sta-

Bild 3. Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur an den Wetterstationen im trouble point



21321.3



21321.4

Bild 4. Häufigkeitsverteilung der Taupunkttemperatur an den Wetterstationen im trouble point

ü.Gr.) in freien Lagen, so ist leicht vorstellbar, daß sich die Wassertropfen an Gegenständen, zum Beispiel den Seilen, anlagern und dort gefrieren. Zusammen mit dem gleichzeitigen Auftreten vergleichsweise hoher Windgeschwindigkeiten um 10 m/s in 10 m ü.Gr. an den Wetterstationen kann das einsetzende Seiltanzen erklärt werden. Der Betrag der Luftdruckänderung zeigt über die ganze Zeitspanne den typischen Verlauf beim Durchzug der Kaltfront eines Tiefdruckgebietes. Der eigentliche Kaltfrontdurchgang mit steigendem Luftdruck, fallenden Temperaturen und hohen Windge-

schwindigkeiten findet kurz vor und während des trouble points statt. Häufig sind mit dem Durchzug einer Kaltfront starke Böen verbunden, die als besonders anregungswirksam für das Seiltanzen vermutet werden.

Ziel der klimatologischen Seilschwing-Modellierung war es, einen einzigen Frühwarnparameter bereitzustellen, dessen Merkmalausprägung die Gefahr des Auftretens für das Seiltanzen signalisiert. Im Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen wurde nicht die mathematische Modellierung der Fehlersituation am trouble point vorgenommen; vielmehr sollen die meteorologischen Leitparameter nach Möglichkeit im Sinne von dynamischen Frühindikatoren so in das Gesamtsystem einfließen, daß mit dem Schwingungsbereitschafts-Koeffizienten (SB-Koeffizient) die zu erwartenden Seiltanzereignisse mit einem ausreichenden zeitlichen Vorlauf angezeigt werden. Für eine EDV-gerechte Implementierung und Automatisierung des Frühwarnsystems auf der Basis der vom Wetterdienst vorgegebenen zeitlichen Datensequenzen war konzeptionell zu berücksichtigen, daß der Verlauf des ausschlaggebenden SB-Koeffizienten auf einer Bildschirmoberfläche grafisch visualisierbar ist und Veränderungen kontinuierlich angezeigt werden können. Aufgrund der Analyse des Fehlerkatalogs, eigener Laboruntersuchungen zur »Schwingungsbereitschaft« sowie der im Schrifttum beschriebenen Seiltanzvorgänge zeigt sich, daß für ein zu entwickelndes Prognosemodell der Wind- und der Vereisungsfaktor die Hauptkomponenten bilden müssen (Bild 2). Die Schlüsselvariable »Wind« wird über die Windgeschwindigkeit, -richtung und Böigkeit erfaßt, wobei für Letztgenannte hilfsweise der Betrag der dreistündigen Luftdruckänderung einfließt. Als verstärkende Komponente des Windfaktors wirkt der Windrichtungsbeiwert. Dieser wird aus dem Relativwinkel zwischen Wind- und Trassenrichtung bestimmt und berücksichtigt die erhöhte Anregungswahrscheinlichkeit, sofern der Wind im rechten Winkel zum Trassenverlauf auf die Leiterseile auftrifft.

Der zweite Hauptfaktor, die »Vereisung«, wird über die beiden Komponenten Lufttemperatur und Taupunktdifferenz erfaßt. In Bild 3 und 4 sind die Häufigkeitsverteilung für die Lufttemperatur und die Taupunkttemperatur für die 66 Fehler zum Zeitpunkt des trouble points dargestellt. Erhöhte Seilschwinggefahr liegt nach der Auswertung des Fehlerkatalogs dann vor, wenn Lufttemperaturwerte zwischen -2 und +2 °C auftreten und die Taupunktdifferenz nahe 1 K liegt.

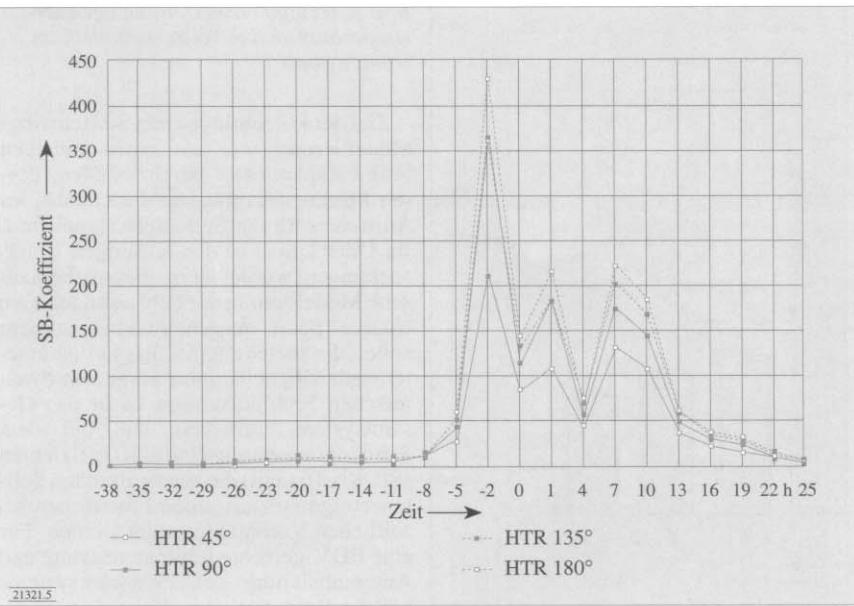


Bild 5. Verlauf des SB-Koeffizienten für den Fehler am 1. Januar 1981 in der Region Hannover

che Unterschiede ergeben sich abhängig von der Windrichtung für die einzelnen Trassenverläufe.

Das Ergebnis der Validierung des Seilschwingmodells an den 66 berücksichtigten Fehlern ergab eine Trefferquote von zunächst 85 %. Der anschließende Testlauf für das Winterhalbjahr 1991/92 ergab scheinbar 15 überflüssige Warnungen, wobei mindestens zwei Seilschwingereignisse mit Auslösung erst nachträglich bekannt wurden. Anschließend wurde das Modellsystem für das nordwestdeutsche Tiefland mit den Regionalisierungsfaktoren optimiert. Anhand der hier vorliegenden 25 »Referenzfehler« wurde erneut eine Validierung für diesen Landschaftsraum vorgenommen. Mit dem so modifizierten Modell konnte die erfaßte Fehlerquote nunmehr auf 90 % erhöht werden; im Winterhalbjahr 1991/92 wären in dem Testzeitraum (Oktober 1991 bis März 1992) nur noch sechs Warnungen vorgekommen. Bild 6 zeigt beispielhaft die Ausprägungen des SB-Koeffizienten für den Monat Dezember 1991 an der Wetterstation Münster-Osnabrück/Flughafen. Nach Überschreiten des Grenzwertes von 40 SB-Einheiten wäre demnach am 18. Dezember 1991 eine erste Warnung, am 20. Dezember 1991 eine zweite Meldung ausgelöst worden. Obwohl hier tatsächlich Seilschwingen mit Netzstörungen im Raum Münster auftrat, sind außerdem Seiltanzereignisse möglich, die nicht zwingend zu Störungen bzw. Schäden führen. Selbst wenn die meteorologischen Rahmenbedingungen eine seiltanzgefährdete Situation anzeigen, ist es immer auch von den technischen Merkmalen der Freileitungen und von der Existenz lokalklimatisch exponierter Trassenverläufe abhängig, ob Schwingungen tatsächlich zu Netzstörungen führen.

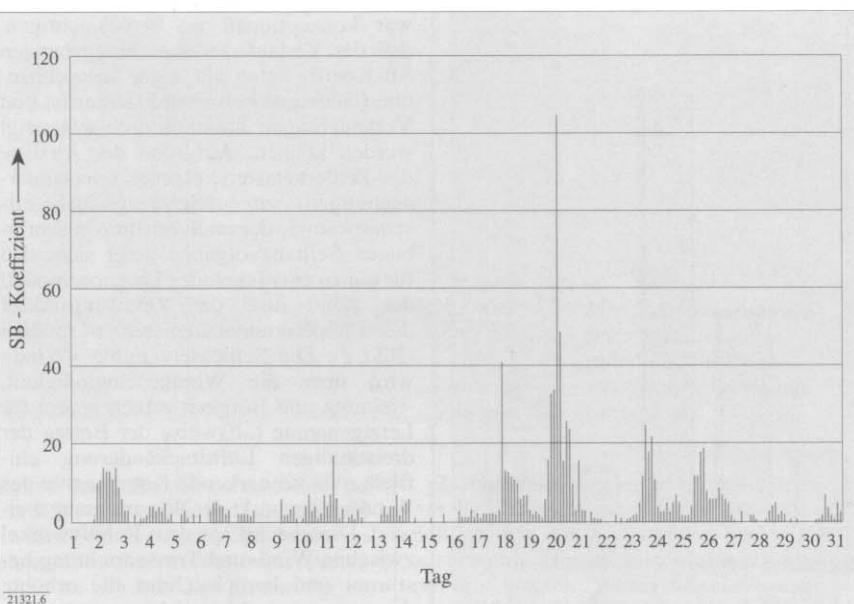


Bild 6. Der SB-Koeffizient im Dezember 1991 für die Wetterstation Münster-Osnabrück/Flughafen. Von den vier berechneten SB-Koeffizienten (für jede Haupttrassenrichtung) ist der mit dem höchsten SB-Wert dargestellt

Außerhalb dieser Bandbreite nimmt die Vereisungsbereitschaft relativ schnell ab.

Unter Berücksichtigung der dynamischen Entwicklung bzw. der Verteilungsfunktionen für die vier Leitparameter wurde das Modell zur Seilschwingbereitschaft zunächst anhand des Fehlerkatalogs validiert. Mit den optimierten, aber noch räumlich unspezifischen Regionalisierungsfaktoren, die den Einfluß der Topografie der betrachteten Wetterstationen

berücksichtigen, wurde der SB-Koeffizient für alle erfaßten Seilschwingereignisse bestimmt. Bild 5 zeigt exemplarisch den Verlauf des SB-Koeffizienten für den oben genannten Fehler, abhängig von vier »Haupttrassenrichtungen« (HTR), bezogen auf die Nordrichtung. Etwa fünf Stunden vor dem aufgetretenen Fehler wird der auf 40 SB-Einheiten festgelegte Warnschwellwert überschritten. Deutlich

Das Frühwarnsystem aufgrund meteorologischer Daten könnte künftig die Leitstellen der Verbundnetze rechtzeitig vor dem Auftreten von Seiltanzern warnen. Die Leitstellen könnten dann größere Kunden auf bevorstehende mögliche Störungen aufmerksam machen, in Bereitschaft stehendes Personal aktivieren, später auch in den Netzschutz eingreifen, z.B. die Kurzunterbrechung vorübergehend außer Betrieb nehmen. Möglicherweise läßt sich auch durch gezielte Netzumschaltung die Belastung und damit die Temperatur der bedrohten Leitungen erhöhen, um dadurch den Eisansatz zu verhindern.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen von 66 ausgewählten Fehlern, die eindeutig durch Seiltanzvorgänge verursacht sind, läßt erkennen, daß ein auf vier meteorologischen Leitparametern beruhendes Warnsystem etwa 90 % der Fälle mit ausreichendem zeitlichen Vorlauf prognostizieren kann. Für das nordwestdeutsche Tiefland wurde das Modell im Winter 1991/92 getestet. Besonders für Trassenverläufe im reliefierten Gelände sowie für andere Landschaftsräume erweist sich eine spezielle Anpassung des Modells aber als unverzichtbar.

## Schrifttum

- [1] *Schwab, A. J.; Miri, A. M.; Büche, R.*: Über den Mechanismus des Seiltanzens und Maßnahmen zu seiner Unterdrückung. Elektrizitätswirtschaft 89 (1990), S.1316-1322.
- [2] *Theda, F.*: Untersuchung langwelliger Schwingungen an einem Freileitungsmodell im Windkanal. Elektrizitätswirtschaft 84 (1985), S. 857-862.
- [3] *Jürdens, C.; Möcks, L., Müller, K.*: Seiltanzmeßstation, ein Beitrag zur Lösung des Seiltanzproblems. Elektrizitätswirtschaft 82 (1983), S. 706-711.
- [4] *Binder, R. C.*: Galloping of conductors can be suppressed. Electric Light and Power, May 1962.
- [5] *Möcks, L.*: Tanzen von Freileitungsseilen. JHW-Ribe-Mitteilungen Nr. 7, Selbstverlag.
- [6] *Brand, R.; Brand, E.; Palstering, A.; Werse, E.*: Network disturbances and damages of conductors caused by galloping. Cigre-Symposium 22/81, Bericht 112-06.