

## Erneuerbare Energien

# Sicherung der Versorgungszuverlässigkeit im Niederspannungsnetz durch Netz-Impedanzmessungen

Die Energiewende stellt mit den erneuerbaren Energiequellen die Versorgungszuverlässigkeit unserer Niederspannungsnetze (NS-Netze) auf eine harte Probe. Statt den Strom wie bisher einfach nur vom zentralen Kraftwerk an den Endverbraucher weiterzuleiten, nehmen die NS-Netze heute Energie aus erneuerbaren dezentralen Energiequellen wie Blockheizkraftwerken und Photovoltaik-Anlagen direkt auf und speisen in das übergeordnete Netz ein. Damit steigt die strategische Bedeutung der NS-Netze. Die wachsende durchschnittliche Belastung bei hoher Volatilität und zweitweiser Umkehr der Leistungsflüsse lässt Schwachstellen in Form von Netzausfällen sichtbar werden.

Und das ist nur ein Aspekt der vielen neuen Herausforderungen. Der technologische Fortschritt sorgt auch auf Verbraucherseite für erheblich steigende Belastungen durch die rapide Zunahme von elektrischen und vor allem elektronischen Lasten. In den Haushalten gibt es immer mehr private IT-Netzwerke mit Smart-Phones, Smart-TV, W-Lan-Router und Tablet-PC. Ihr Gebrauch wird immer mehr zur Selbstverständlichkeit. Zudem gibt es immer mehr Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen. Und selbst die Autos tanken künftig mehr und mehr ihre Energie aus dem Niederspannungsnetz.

Schon folgt das nächste Problem: Erneuerbare Energiequellen kann man, wenn überhaupt, nur begrenzt regeln. Das gewohnte Muster von Angebot und Nachfrage wird sich deutlich verändern. Könnte man bisher die Leistung der

Kraftwerke entsprechend des Energiebedarfs einfach nachjustieren, muss man künftig zusätzlich den Endverbraucher von elektrischer Energie aktiv beeinflussen und sein Konsumverhalten an das Angebot anpassen.

Stichwort »Smart Metering«. Damit soll in Zukunft der Verbrauch durch variable Strompreise beeinflusst und so an die gerade erzeugte Energiemenge angepasst werden. Ein weiterer Beitrag zu diesem Regelprozess wäre durch die Batterien von Elektrofahrzeugen möglich, solange diese via Ladestationen mit dem NS-Netz verbunden sind. Diese könnten künftig als Zwischenspeicher dienen und Strom nicht nur bei einem Überangebot aufnehmen, sondern bei Bedarf auch wieder an das NS-Netz abgeben. Möglichst viele Verbraucher sollen zukünftig in diesen Regelprozess integriert werden.

Unter dem Strich führen all diese Entwicklungen zu einer viel höheren Durchschnittslast und zu größeren Schwankungen in den NS-Netzen. Reserven in der ursprünglichen Netzauslegung sind häufig schon heute knapp. Netzstörungen und sogar Ausfälle häufen sich. Schwachstellen, die bisher noch standgehalten haben wirken sich nun massiv aus. Dazu gehören u.a. mangelhaft angefertigte Pressverbindungen in Abzweig- und Verbindungsmuffen.

### Mehr Belastung durch Unsymmetrie und Oberschwingungen

In einem symmetrisch belasteten Dreiphasen-Netz mit sinusförmigen Spannungen summieren sich die Ströme im Neutralleiter zu Null. Viele kleinere und mittlere Einspeiseanlagen sind jedoch nur einphasig ausgeführt und führen so zu einer Unsymmetrie der Phasenströme. Es kommt durchaus vor, dass auf einer Phase Energie ins MS-Netz zurückgespeist wird, während die beiden anderen Phasen Energie vom MS-Netz an den NS-Verbraucher leiten. Mehr elektronische statt ohmsche Verbraucher führen zu steigenden Belastungen durch Oberschwingungen. Vor allem die durch drei teilbaren Vielfachen der Netzfrequenz sind kritisch. Ihre Anteile aus den drei Phasen im Neutralleiter addieren sich jetzt, statt sich wie in der Grundschwingung aufzuheben (*Bild 1*). Alle diese Belastungen gefährden die Stabilität der NS-Netze und die Versorgung der am entsprechenden Zweig angeschlossenen Verbraucher.



Jürgen Bernd Müller (links), Leiter COE Tools, SebaKMT/Megger, Baunach

Franz Neumaier, Projektleiter, SebaKMT/Megger, Baunach

Prof. Dr.-Ing. Norbert Graß (rechts), Institut Elsys, Technische Hochschule Georg Simon Ohm, Nürnberg

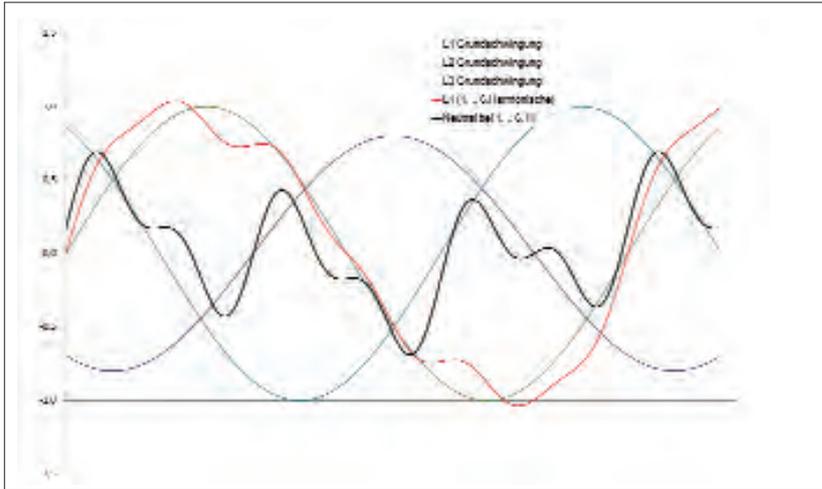


Bild 1: Neutralleiterspannung (schwarz) bei überschwingungsbehaftetem 3-Phasensystem mit Schiefast

### Die Netzimpedanzmessung liefert wertvolle Informationen

Trotz dieser zusätzlichen Belastungen muss die Versorgungszuverlässigkeit im NS-Netz aufrecht erhalten werden. Die Messung der Netzimpedanz liefert dem Netzbetreiber hierzu notwendige Informationen. Er kann durch die Netzimpedanzmessung zum Beispiel Sicherungen richtig bemessen, Schwachstellen aufdecken und so die geeigneten Maßnahmen ergreifen, um Störungen zuverlässig zu vermeiden. Die maximale Anschluss- bzw. Einspeiseleistung am Anschlusspunkt lässt sich mit Hilfe einer Netzimpedanzmessung genau ermitteln. Auch die zu erwartende Spannungserhöhung im Netz bei hohen, dezentralen Einspeiseleistungen lässt sich so zuverlässig bestimmen.

Die Netzimpedanzmessung bietet die Basis für die ordnungsgemäße Abnahme von geänderten, erweiterten oder von anderen Betreibern übernommenen Netzabschnitten. Dabei gilt: Die gemessene Netzimpedanz muss in etwa mit dem errechneten Wert übereinstimmen. Damit dient diese Messung auch der Überprüfung der zur Auslegung des NS-Netzes verwendeten Berechnungsmodelle.

Um Sicherungen richtig zu dimensionieren, muss zum einen gewährleistet sein, dass die Sicherung beim maximalen Fehlerstrom zuverlässig abschaltet. Zum anderen muss der minimale Kurzschlussstrom, welcher durch die Netzkonfiguration bestimmt ist, die Sicherung ebenfalls rechtzeitig auslösen. Diese beiden Parameter werden durch die Messung der Netzimpedanz ermittelt. So können stets die

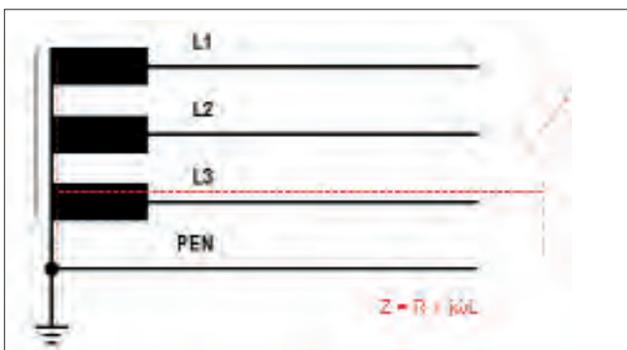


Bild 2: Messung der Schleifenimpedanz Phase-Phase, bzw. Phase-PEN

richtigen Sicherungen bestimmt werden.

### Schwachstellen rechtzeitig aufdecken

Auffällige Unterschiede der Netzimpedanzwerte der verschiedenen Phasen deuten auf verborgene Schwachstellen im betreffenden NS-Netz hin. Wird die Netzimpedanz an mehreren Phasen bestimmt, lässt sich auch die Impedanz von Schutz- und Neutralleiter (PEN-Impedanz) berechnen. Durch den Vergleich der Schleifenimpedanz von Phase-Neutralleiter mit den Messwerten der Schleife Phase-Phase, erhält man zuverlässig Hinweise auf Fehler im Neutralleiter. Auf diese Weise kann Potentialanhebungen vorgebeugt werden, die Menschen in Gefahr bringen können.

Spannungsschwankungen wie zum Beispiel Flicker werden häufig durch defekte Leiterverbinder verursacht. Meist treten diese intermittierend auf, bevor es in der Folge zum vollständigen Spannungsausfall kommt. Mit einer Netzimpedanzmessung mit ausreichend hohem Messstrom kann man diese intermittierenden Fehler gezielt provozieren und erhält so bereits klare Hinweise auf die Fehlerursache. Anschließend wird die Fehlerstelle mit einem üblichen Reflexionsmessverfahren geortet und das Problem behoben.

### Das Funktionsprinzip

Eine Einzelmessung bestimmt die Impedanz der kompletten Schleife zwischen den beiden Anschlusspolen am Messgerät. Aus den Einzelmessungen (L1-N, L2-N, L3-N, L1-L2, L1-L3, L2-L3) ergeben sich die Impedanzwerte für L1, L2, L3 und PEN (Bild 2).

Für die weitere Betrachtung wird das speisende NS-Netz am Messpunkt durch eine ideale Spannungsquelle mit dem komplexen Innenwiderstand  $Z_i$  ersetzt. Bild 3 zeigt die  $U/I$ -Kennlinie einer solchen Quelle. Sind zwei Punkte auf dieser Kennlinie bekannt, so lässt sich der Innenwiderstand  $Z_i$  des Netzes bestimmen.

Zum Zeitpunkt der Messung ist im Netz eine bestimmte Verbrau-

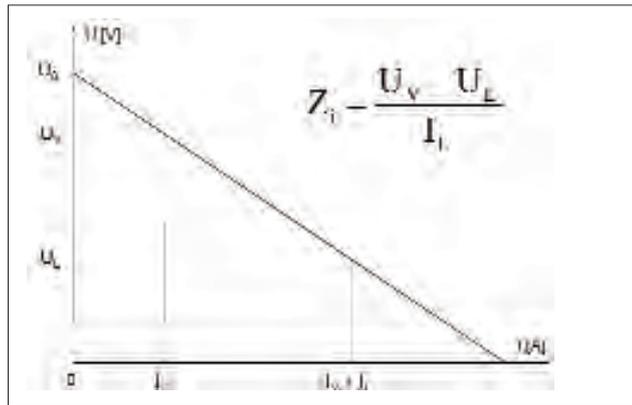
cherlast  $R_V$  vorhanden, die mit dem resultierenden Verbraucherstrom  $I_V$  die Quellenspannung  $U_0$  auf die Klemmenspannung  $U_V$  reduziert und so den ersten der beiden Punkte definiert. Von dieser Situation ausgehend wird im Netzimpedanzmessgerät ein zusätzlicher Laststrom  $I_L$  erzeugt. Nun misst man diesen zusätzlichen Laststrom  $I_L$ , sowie die resultierende Klemmenspannung  $U_L$  und berechnet aus der Spannungsdifferenz ( $U_V - U_L$ ) und dem Laststrom  $I_L$  die Quellenimpedanz  $Z_i$ .

Der während der Impedanzmessung fließende Verbraucherlaststrom  $I_V$  ist in der Praxis unbekannt. Weil das Messintervall sehr kurz ist, kann  $I_V$  mit ausreichender Wahrscheinlichkeit als konstant angenommen werden. Daher genügen zur Berechnung der Quellenimpedanz die vom Messgerät ermittelten Größen. Die Messung kann im regulären Netzbetrieb durchgeführt werden. Die Impedanz des NS-Netzes ist ein komplexer Widerstand. Der Imaginärteil der Impedanz wird von der Induktivität des Transformators dominiert. Allein schon deshalb ergibt sich eine Frequenzabhängigkeit des Impedanzbetrags  $|Z_i|$ . Jedoch stellt man auch beim ohmschen Anteil der Netzimpedanz eine Frequenzabhängigkeit fest, die durch die Stromverdrängung (Skin-Effekt) verursacht wird. Die Frequenzabhängigkeit, sowie die Real- und die Blindkomponente der Impedanz müssen deshalb bei der Konstruktion eines Netzimpedanzmessgeräts berücksichtigt werden.

Schaltet man die Last im Messkreis des Netzimpedanzmessgeräts sprunghaft oder gepulst zu, werden neben der Grundschwingung auch die Oberschwingungen angeregt, was für die Messung der frequenzabhängigen, komplexen Impedanz erforderlich ist.

Mit Mess- und A/D-Wandlern werden die Zeitverläufe von Strom und Spannung (mit und ohne Laststrom  $I_L$ ) aufgezeichnet. Unterschiede in der Laufzeit zwischen den Messkanälen wirken sich als Fehler bei der Bestimmung der komplexen Netzimpedanz aus, weshalb auf die phasentreue Signalverarbeitung geachtet werden muss.

**Bild 3:**  
Klemmenspannung einer Quelle bei Belastung



Die aufgezeichneten Spannungs- und Stromverläufe werden anschließend mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert, um dann direkt die frequenzabhängige und komplexe Schleifenimpedanz zu berechnen.

$$Z_i(t) = \frac{U_V(t) - U_L(t)}{I_L(t)} = \frac{\Delta U(t)}{I_L(t)}$$

$$Z_i(f) = \frac{\Delta U(f)}{I_L(f)}$$

Die so ermittelten Schleifenimpedanzen sind die Grundlage für die Berechnung weiterer Ergebnisse wie z.B. des zu erwartenden Kurzschlussstroms, der Kurzschlussleistung, den Impedanzwerten der einzelnen Leiter (L1, L2, L3) und der PEN-Impedanz.

Hilfreich für den Praktiker ist auch die Angabe, mit welchem Spannungseinbruch zu rechnen ist, wenn eine bestimmte Leistung am Anschlusspunkt entnommen werden soll. Vor der Installation größerer Maschinen oder medizintechnischer Anlagen, die das Netz oft mit größeren Pulsströmen belasten, lässt sich so die Anschlusssituation klären oder auch die Abnahmekriterien für die Elektroinstallation nachweisen.

Gleiches gilt auch im Falle des bevorstehenden Anschlusses von Einspeiseanlagen, wobei hier die zu erwartende Spannungserhöhung bei gegebener Einspeiseleistung berechnet wird.

### Megger NIM 1000 – bis zu 1.000 A Prüfstrom

Die Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg hat in Zusammenarbeit mit der N-ERGIE Service GmbH mit grundlegenden Forschungs- und Vorentwicklungsarbeiten die Voraussetzungen zur Entwicklung eines neuartigen Netzimpedanzmessgeräts geschaffen.

Als langjähriger Anwender des Pansa MIC 11 brachte die N-ERGIE Service GmbH dabei wertvolle Erfahrung aus der betrieblichen Praxis in das Projekt ein.

Die wichtigsten Anforderungen an ein neues Netzimpedanzmessgerät waren u.a.:

- Eine hohe Messgenauigkeit im interessanten 10-Milliohm-Bereich.
- Das Gerät sollte portabel und handlich für den mobilen Einsatz im Feld sein.



**Bild 4:** Das Megger NIM 1000 – ein kompaktes Gerät für den mobilen Feldeinsatz

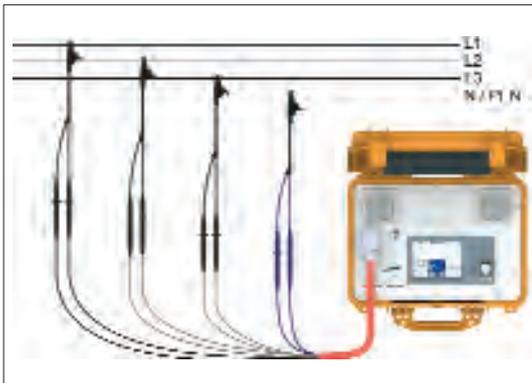


Bild 5: Mehrphasiger Anschluss mit abgesicherten Kelvinklemmen

- Die Fehlersuche im NS-Netz sollte wirksam unterstützt werden.
- Messung der komplexen Impedanz über den Frequenzbereich.

Die grundlegenden Vorarbeiten sollten zunächst klären, wie die vielfältigen technischen Anforderungen möglichst intelligent erfüllt werden können. Wie in den meisten städtischen Netzen, ist auch im Versorgungsgebiet der N-ERGIE an verschiedenen Verknüpfungspunkten eine sehr hohe Kurzschlussleistung vorhanden, weshalb ein Messgerät mit möglichst hohem Prüfstrom entstehen sollte. Die bisher marktüblichen Geräte mit einem Prüfstrom von max. 280 A genügten diesen Anforderungen nicht.

Auf Basis theoretischer Berechnungen und Analysen wurden an der Hochschule verschiedene Prototypen gebaut und in der Praxis erprobt. Bis zum Abschluss der Vorentwicklungsarbeiten konnten auf diese Weise die Richtigkeit und auch die Praxisrelevanz des gewählten Realisierungsvorschlags

erfolgreich nachgewiesen werden. Die neuartige Messmethode bestätigte sowohl die jeweiligen Ergebnisse aus der Netzberechnung als auch Messwerte marktüblicher Netzimpedanzmessgeräte. Sogar verdeckte Fehler konnten im NS-Netz mit dem Prototypen erfolgreich entdeckt und behoben werden.

Das Netzimpedanzmessgerät Megger NIM 1000 (Bild 4) basiert auf diesen neuen Konzepten. Im Rahmen eines Kooperationsprojektes von SebaKMT – einem Mitglied der Megger Gruppe, der N-ERGIE Service GmbH und der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg wurden die Vorentwicklungsergebnisse und Erfahrungen aus der Praxiserprobung in ein attraktives Serienprodukt überführt.

Obwohl das NIM 1000 mit nur 10 kg und der Größe einer Aktentasche sehr kompakt und leicht ist, erzeugt es einen Spitzenlaststrom von bis zu 1000 A für Messungen mit einer Auflösung von 1 mΩ. Dies wird durch nur kurzzeitiges Zuschalten des Laststroms erreicht. Die abzuführende Verlustleistung wird so auf ein Minimum reduziert. Zudem werden auf diese Weise sowohl die Grundfrequenz von 50 bzw. 60 Hz, als auch die höheren Frequenzen zur Messung der Netzimpedanz über den Frequenzbereich bis zur 10. Harmonischen ausreichend angeregt.

Ein großer Vorteil des neuen Messverfahrens ist auch die Unabhängigkeit von der exakten Größe des Lastwiderstands. Die Messgenauigkeit wird somit nicht durch die temperaturbedingte Änderung des Widerstandswertes – speziell bei mehrfachen Messungen – beeinträchtigt.

## NIM 1000 ist intuitiv bedienbar

Sehr wichtig für den Einsatz in der Praxis ist die leichte, intuitive Bedienung und vor allem die Sicherheit nach Messkategorie Cat IV (EN 61010-1). Auf dem farbigen Grafikbildschirm sind die Messwerte direkt ablesbar. Zur detaillierten Analyse und Protokollerstellung kann man alle Daten via USB 2.0 Schnittstelle auf einen Computer übertragen. Die Gerätesoftware lässt sich ebenfalls sehr leicht über diese USB-Schnittstelle aktualisieren.

Mittels schnell austauschbaren Kelvinklemmen wird der Anschluss an das Messobjekt (Bild 5) durchgeführt. Je nach Messaufgabe kann man das NIM 1000 einphasig oder mehrphasig anschließen. Bei mehrphasigem Anschluss ermittelt das NIM 1000 auch den Wert der PEN-Impedanz. Abhängig von den gegebenen Erdungsverhältnissen entspricht dies der Nullleiterimpedanz.

Auch bei hoher Netzvolatilität erhält man zutreffende Messwerte. Denn mit dem NIM 1000 lassen sich automatische Mehrfachmessungen mit Mittelwertbildung durchführen. Man kann auch über einen bestimmten Zeitraum (z.B. mehrere Tage) den Verlauf der Netzimpedanzwerte analysieren. Für diese Anwendung führt das NIM 1000 selbständig Messungen in bestimmten Zeitabständen durch. Bei der Auswertung dieser automatischen Messreihen sind die Einflüsse der verschiedenen Last- und Einspeiseverhältnisse im Vergleich klar erkennbar.

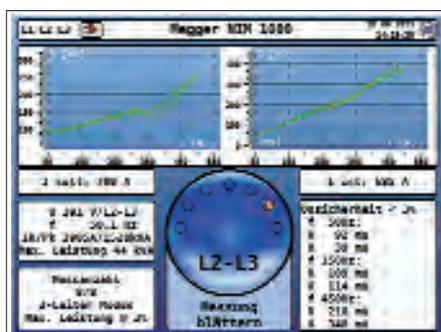
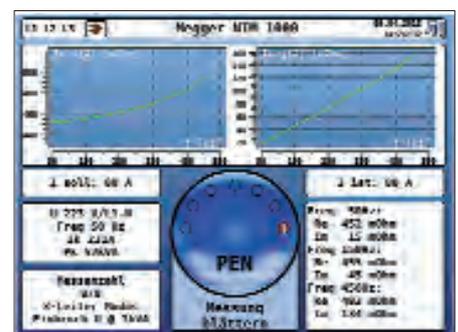


Bild 6 (links): Ergebnisbildschirm – alle wichtigen Daten auf einen Blick

Bild 7 (rechts): Aus den verschiedenen Schleifenimpedanzen ermittelt das NIM 1000 auch die PEN-Impedanz



## NIM 1000 in der Praxis

### Netzimpedanzwerte am Anschlusspunkt bestimmen

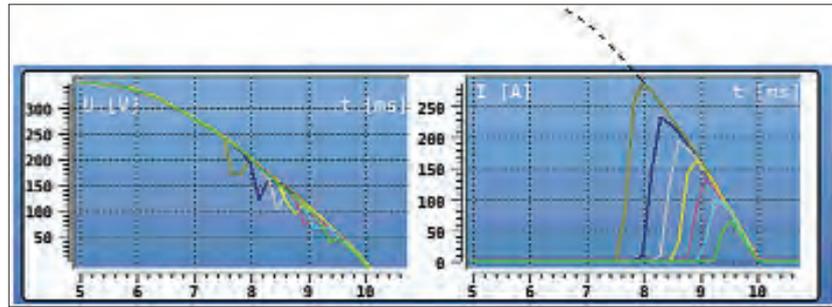
Zur Bestimmung der Netzimpedanz an einem Anschlusspunkt, wird das NIM 1000 mit Kelvinklemmen ein- oder mehrphasig angeschlossen. Mit einem praktischem Drehgeber werden anschließend die folgenden Parameter zur Messung eingestellt: Auswahl Ein- oder Mehrphasenmessung, maximaler Messstrom (wählbar zwischen 80 und 1000 A) und die Anzahl der Messungen zur Mittelwertbildung. Man kann auch weitere Parameter je nach Bedarf festlegen wie etwa die Messdauer für Langzeitmessungen oder Vorgaben zur Lastberechnung. Letztere bestimmt aus den Impedanzwerten, welche Anschlussleistung an der Messstelle zu einem maximal tolerierten Spannungseinbruch (oder Spannungserhöhung im Falle der Einspeisung) führt und umgekehrt.

Nach Freigabe der Messungen werden diese vollautomatisch ausgeführt und alle wichtigen Werte grafisch und numerisch angezeigt. Zudem werden die Werte zur späteren Protokollerstellung im Speicher dauerhaft abgelegt.

*Bild 6* zeigt den Ergebnisbildschirm mit der grafischen Darstellung des Resistanz- und Reaktanzverlaufs über die Frequenz, sowie der tabellarischen Auflistung der numerischen Werte bei drei besonders interessanten Frequenzen. Außerdem werden im linken Bereich der ermittelte Kurzschlussstrom, die maximale Kurzschlussleistung sowie die maximale Anschlussleistung bei Einhaltung des vorgegebenen zulässigen Spannungseinbruchs angezeigt.

Aus den einzelnen Werten ermittelt das NIM 1000 im Mehrleitermodus auch die PEN-Impedanzwerte (*Bild 7*). Abhängig von den Erdungsverhältnissen der Messstelle lässt dies eine Beurteilung der Neutralleiterverbindung, bzw. der Erdungswiderstände zu.

Die Ergebnisse bilden beispielsweise die Grundlage zur Abnahme von neu installierten Netzabschnitten, helfen zur Klärung der am Anschlusspunkt verfügbaren Einspeise- oder Anschlussleistung oder liefern die Basisdaten zur richtigen



*Bild 8: Messung im Fehlermodus bei fehlerfreiem NS-Netz – alle Stromkurven liegen auf der Einhüllenden*

Dimensionierung von Sicherungen, bzw. Festlegung der Einstellparameter für Lasttrennschalter.

### Fehlersuche mit NIM 1000

Zur Erkennung von Fehlern genügt in vielen Fällen bereits der Vergleich der Messergebnisse zwischen den Phasen an einer Messstelle. Mit dem Drehgeber des NIM 1000 kann man hierzu die Ergebnisse durchblättern. Wenn die Messwerte z.B. einer Phase signifikant von denen der anderen Phasen abweicht, signalisiert dies einen Fehler. Auch der Vergleich der Phase-Phase Ergebnisse mit den Phase-Neutral-Werten liefert oft sehr treffsichere Aussagen.

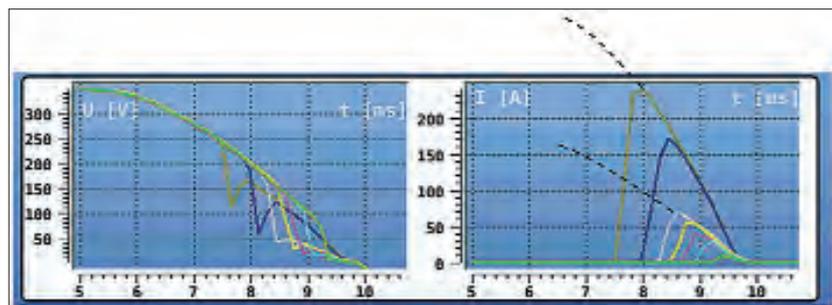
Häufig ändern Fehler in den NS-Netzen ihr Verhalten jedoch in Abhängigkeit des Laststroms. Ist eine Klemmstelle beispielsweise korrodiert oder locker, weist sie einen höheren Übergangswiderstand auf. Fließt nun ein großer Strom durch diese fehlerhafte Verbindung, wird diese typischerweise kurzfristig verschweißen und der Widerstandswert nimmt in der Folge deutlich ab. Schnell wird aber diese Ver-

schweißung bei Änderung der Temperatur, bei mechanischer Belastung oder bei einer weiteren Zunahme des Laststroms erneut aufbrechen. Sprunghafte Veränderungen des Widerstands bei unterschiedlichen Lastströmen sind also ein klarer Hinweis auf schlechte Verbindungsstellen.

### Spezielle Betriebsart zur Aufdeckung schlechter Verbindungen

Das NIM 1000 macht sich genau diese Erkenntnis zu Nutze. Mit einer speziellen Betriebsart (Fehlermodus) wird der Laststrom schrittweise bis zu einem definierten Maximalwert erhöht. Die entsprechenden Strom- und Spannungsverläufe werden nun in einer gemeinsamen Grafik angezeigt. Die charakteristische Widerstandsänderung bei einer schlechten Verbindungsstelle ist jetzt sofort erkennbar. Im Falle einer guten Verbindung liegen die Strom- und Spannungskurven alle auf der einhüllenden Sinuskurve (*Bild 8*).

In *Bild 9* zeigt sich mit einem Blick auf die Stromkurvenschar die sprunghafte Änderung des Schle-



*Bild 9: Eine schlechte Klemmverbindung verursacht einen Impedanzsprung bei Überschreiten eines bestimmten Prüfstroms*

fenwiderstands im Falle einer fehlerhaften Verbindung.

*Bild 10* zeigt ein praktisches Beispiel einer mangelhaften Verschraubung in einem Niederspannungsverteilerschrank. Mit Hilfe des Fehlermodus des NIM 1000 wurde diese Schwachstelle effizient aufgedeckt und lokalisiert. Nach Behebung des Fehlers waren alle Impedanzwerte wieder im erwarteten Bereich und die Versorgungsqualität im betroffenen Netzabschnitt wiederhergestellt.

[sales@sebakmt.com](mailto:sales@sebakmt.com)

[www.sebakmt.com](http://www.sebakmt.com)

[info@elsys-online.de](mailto:info@elsys-online.de)

[www.elsys-online.de](http://www.elsys-online.de)



*Bild 10: Die unzureichende Verschraubung an L1 wurde mit dem NIM 1000 aufgedeckt.*