

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 96 (2005)
Heft: 21

Artikel: Hochgenaue und EMV-sichere Messdatenerfassung für Hochstromanlagen
Autor: Weindl, Christian / Braisch, Dieter / Nieberlein, Uwe
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857868>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

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

Hochgenaue und EMV-sichere Messdatenerfassung für Hochstromanlagen

Entstörungsmassnahmen und Signalübertragung bei galvanischer Trennung

Zur Erfassung der Ströme in Hochstromanlagen werden meist extrem niederohmige Shunts eingesetzt. Die von diesen gelieferten stromabhängigen Ausgangsspannungen bewegen sich häufig im unteren mV-Bereich. Infolge des extrem EMV-belasteten Umfeldes und der relativ grossen Ausdehnung der Anlagen können die Messsignale auf dem Weg zur Erfassung bzw. digitalen Umsetzung relativ leicht mit Störungen überlagert werden. Ein am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Universität Erlangen-Nürnberg neu entwickeltes Messdatenerfassungssystem ermöglicht auf Grund seiner hohen EM-Festigkeit und seiner Genauigkeit eine präzise Auswertung von Untersuchungen im Bereich der Forschung und der industriellen Anwendung [1].



Bild 1 Oberspannungsseite des Hochstromtransformators

sowohl Versuche für die Grundlagenforschung als auch Tests von Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik durchgeführt werden (Bild 1).

Für die Auswertung der durchgeführten Hochstromversuche sind die Primär- und Sekundär-Spannungen und -Ströme – sowie bei Bedarf zusätzliche Messsignale wie beispielsweise die Temperatur – über einen längeren Zeitraum exakt zu messen und zu speichern. Die Betriebsfrequenz der Anlage liegt bei 50 Hz, jedoch müssen auch Einschwingvorgänge sowie weitere höherfrequente Signale genau erfasst werden können. Derartige Signale ergeben sich u.a. beim Versagen von Betriebsmitteln, beim Auftreten von Sättigungseffekten oder bei Lichtbögen.

Bisherige Messtechnik

Das Kernstück der bisherigen Messtechnik besteht aus einem 12-kanaligen

Hochstromanlagen zur Erzeugung von Drehstrom im Bereich von mehr als 20 kA sind in den meisten Fällen kundenspezifische und somit relativ kostenintensiv

Christian Weindl, Dieter Braisch, Uwe Nieberlein

sive Einzelanfertigung. Die Anforderungen an die dabei eingesetzte Messtechnik sind hoch und gestalten sich vielfältig.

Auf Grund der extrem hohen Ströme von bis zu 100 kA (Stosskurzschlussstrom) und der resultierenden hohen elektromagnetischen Feldstärken kommt es zu hohen Induktionsspannungen in benachbarten Leitern und somit auch in den Messleitungen. Gerade bei der Strommessung kommen sehr niederohmige Shunts (wenige $\mu\Omega$) zum Einsatz, um die entstehende Verlustleistung klein zu halten. Somit sind die stromabhängigen Ausgangsspannungen gegenüber den induzierten Störspannungen sehr klein.

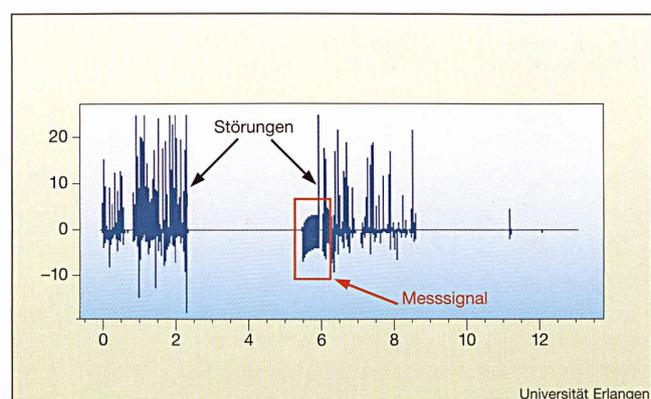
Wegen der relativ grossen Ausdehnung der gesamten Anlage über mehrere Stockwerke hinweg können sich auch andere Störquellen, wie z.B. die elektrische Steuerung (Relais, elektrische Antriebe

der Schalter usw.), negativ auf die Messsignale auswirken.

Die Hochstromanlage des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung

Die Hochstromanlage des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ist eine der wenigen an deutschen Hochschulen. Mit einem Nennkurzzeitstrom von 40 kA/5 s können

Bild 2 Typischer Sekundärstrom, aufgezeichnet mit der alten analogen Messtechnik; rot umrandet das eigentliche Messsignal



Transientenrekorder sowie einem 12-kanaligen analogen Trennverstärker.

Mit bis zu 20 m langen BNC-Kabeln werden die Messsignale von den Hochstrom-Shunts bzw. Spannungswandlern zum Trennverstärker geführt und von dort zum Transientenrekorder weitergeleitet. Die hierbei übertragenen Messsignalamplituden liegen im Bereich der Sekundärströme teilweise unterhalb von 50 mV. Die sich in der Anlage befindenden motorbetriebenen Spannantriebe der Leistungsschalter erzeugen wegen des auftretenden Kollektorfeuers einen Grossteil der EMV-Störungen. Bild 2 zeigt ein derartig gestörtes Messsignal. Die Störampplituden weisen im dargestellten Beispielplot eine bis zu achtfache Amplitude des Nutzsignals auf. Die effektive Auswertung eines solchen Signals ist in der Regel inakzeptabel. Auch eine weitgehende Entstörung der Antriebsmotoren reduzierte die Störungen zwar erheblich, konnte aber deren Einfluss auf die Messergebnisse nicht vollständig beseitigen.

Entwicklung der neuen Messdatenerfassung

Anforderungsprofil des Erfassungssystems

Ziel war es, ein modernes Messsystem zu entwickeln, das störungsfrei sowie hochpräzise Messergebnisse liefert. Ebenso sollte der Testablauf bezüglich der Messdatenerfassung automatisiert und die weitere Auswertung der Daten durch den Testingenieur erleichtert werden. Im Folgenden sind die wichtigsten

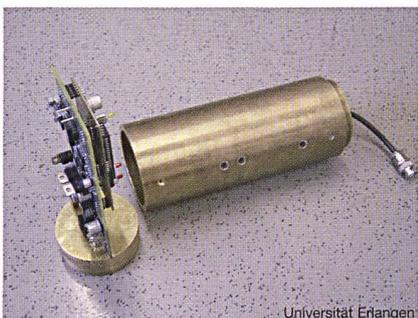
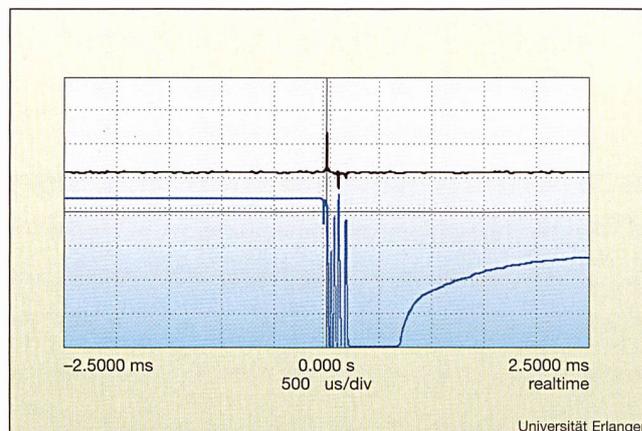


Bild 3 Kopfeinheit des Messdatenerfassungssystems mit digital verstellbarem Eingangssignalverstärker, galvanischer Trennung, Micro-Controller-basierter Steuerelektronik, Referenz-/Digitalisierungseinheit und Leitungstreibern

Bild 4 Öffnen eines Stromkreises durch ein Schütz. Die durch das Kontaktprellen entstehenden Spannungen erreichen 600 Vpp an der Schützspule sowie über 100 Vpp in einer parallel geführten Leitung



Anforderungen an das neue Messdatenerfassungssystem zusammengefasst:

- 32 Messkanäle mit galvanischer Trennung der Daten- und Steuerkanäle
- sehr hohe EMV-Festigkeit gegenüber Störfeldern
- Übertragungsgrenzfrequenz > 100 kHz, Fehler < 0,5%
- computergesteuerte Anpassung des Signaleingangsbereichs der Messköpfe (Messbereichswahl von ± 75 mV bis ± 10 V)
- übersichtliche graphische Benutzeroberfläche
- Möglichkeit eines vollautomatischen Kalibrier- und Messbetriebs
- Fernsteuerbarkeit über das Intranet/Internet.

Voruntersuchungen zur EMV-Problematik

Da bei der Entwicklung der neuen Messdatenerfassung von Anfang an auf computergesteuerte Kopfeinheiten zur Anpassung und Verstärkung der Messsignale gesetzt wurde, schied eine reine Lichtwellenleiterlösung infolge des zu den Messköpfen zu übertragenden Leistungsbedarfs aus (Bild 3). Durch weitergehende Untersuchungen zur EMV-Problematik wurde geklärt, inwieweit auf ein aufwändiges hybrides elektro-optisches Übertragungsmedium zu Gunsten einer rein elektrischen Lösung und wesentlich geringerer Kosten verzichtet werden kann.

Im Vorfeld wurde daher durch mehrere Testreihen unter Anwendung unter-

schiedlicher Laboraufbauten der Einfluss der EMV-Immissionen auf die vorgesehenen geschirmten und verdrehten (twisted pair) Mess-, Steuer- und Versorgungsleitungen näher untersucht. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kabelsysteme und Kabellängen wurden sämtliche in der Hochstromanlage und ihrer Steuerung eingesetzten Schütze, Relais und motorbetriebenen Spannantriebe der Leistungsschalter in die Voruntersuchung mit einbezogen. Es zeigte sich, dass die durch das unvermeidliche Kollektorfeuer der Spannantriebe, das Kontaktprellen von Schützen bzw. Relais oder die hohen Lastströme in benachbarten Stromkreisen induzierten Spannungen Amplituden von bis zu 100 Vpp erreichen können (Bild 4). Selbst durch die Verwendung anderer Kabeltypen (mehrfach geschirmte Kabel, BNC usw.) oder symmetrische Eingangsverstärker und Kabelanordnungen konnten die Störspannungsamplituden nur unwesentlich beeinflusst werden.

Aufbau und Funktionsweise des neuen Erfassungssystems

Die Voruntersuchungen zeigen sehr deutlich, dass die beim Zu- und Abschalten der zahlreichen induktiven Antriebe entstehenden Störimpulse bzw. Einkopplungen in die Messsignalleitungen eine analoge Signalübertragung unmöglich machen oder zumindest erheblich erschweren. Zudem ist der Aufwand, ein analoges Messsignal hochpräzise über die geforderte galvanische Barriere zu übertragen, relativ hoch. Um die notwendige hohe EMV-Festigkeit und Übertragungsqualität zu erreichen, wird daher auf den bis zu 20 m langen Leitungen von den Messköpfen zur zentralen Empfangseinheit ein unempfindliches digitales Übertragungsverfahren angewendet. Durch den Verzicht auf eine protokollbasierte Übertragung und den Einsatz einer

Technische Daten der Hochstromanlage

Kurzzeitleistung:	17,35 MVA (40 kA/5 s)
Nennleistung:	1,952 MVA (4,5 kA)
Nennspannung primär:	20 kV
Nennspannung sekundär:	52,3–250,5 V

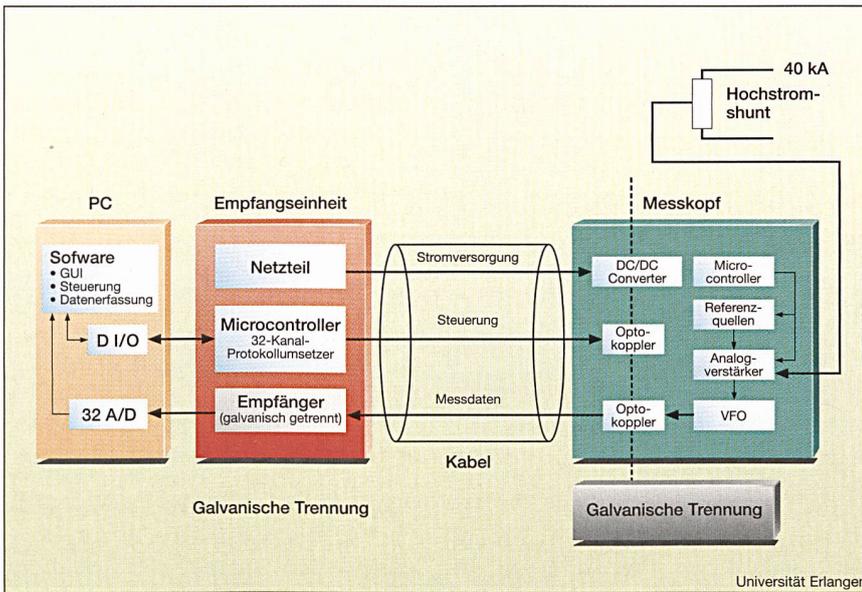


Bild 5 Struktureller Aufbau des entwickelten Messdatenerfassungssystems

einfachen, aber extrem störfesten Spannungs-/Frequenzumsetzung (U/f-Umsetzung) kann der notwendige Schaltungsaufwand in der Übertragungsstrecke selbst minimiert werden. Das System arbeitet dabei mit einer Bandbreite von weniger als 10 MHz. Die resultierende Auflösung der Analog-/Digital-Umsetzung beträgt näherungsweise 20 Bit.

Aus der notwendigen galvanischen Barriere und der U/f-Umsetzung entste-

hen insbesondere bei der angestrebten hohen Auflösung und in dem stark EMV-belasteten Umfeld weitere Problemstellungen, die es zu lösen gilt. Ohne weitere Massnahmen kann beispielsweise die Offset- und Verstärkungsstabilität in den analogen Schaltungsabschnitten nicht zuverlässig gewährleistet werden. Um die relativ hohen Anforderungen an die Signalübertragung zu erreichen, musste eine Lösung gefunden werden, die auch unter

den erschwerten Bedingungen des Hochstrom-Testbetriebs zuverlässig arbeitet. Standardschaltungen aus der Halbleitertechnik fallen z.B. wegen der geforderten galvanischen Trennung (Festigkeit $> 2 \text{ kV}_{\text{eff}}$) und der digitalen Signalübertragung ausser Betracht. Daher wurde in dem realisierten Messdatenerfassungssystem ein Weg beschritten, der zudem eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Erwärmung und/oder Bauteiltoleranzen vermeidet. Jeder der Messköpfe beinhaltet eine Referenzspannungseinheit, die auf einer hochgenauen thermisch kompensierten Referenzspannungsquelle (0,1% Genauigkeit) basiert. Aus dieser werden den unterschiedlichen Messbereichen angepasste Kalibrierspannungen abgeleitet. Anhand dieser Spannungen und einer Nullspannung (Kurzschluss am Messeingang) kann sowohl die Sollverstärkung als auch der ggf. vorhandene Offset eines jeden Messkopfes controllergestützt vom PC aus selektiert werden. Die Einstellung erfolgt hierbei mehrfach und rekursiv, bis die geforderten Werte für Gain und Offset innerhalb der geforderten Toleranz liegen. Der gesamte Kalibrierungsvorgang kann vom Messdatenerfassungssystem auf Knopfdruck und automatisch für alle 32 Kopfeinheiten und selektiv angepasst an die jeweiligen Verstärkungsfaktoren in weniger als 5 Sekunden durchgeführt werden.

Neben der sicheren galvanischen Trennung erwies sich auch der angestrebte relativ grosse Eingangsspannungsbereich, den es in den Messköpfen bei einem ausreichenden Störspannungsabstand abzudecken galt, als problematisch. Zudem sollte erreicht werden, dass alle Funktionseinheiten vom PC aus sowohl manuell als auch automatisch gesteuert und überprüft werden können.

Die Einheiten des Messdatenerfassungssystems

Das realisierte Messdatenerfassungssystem besteht im Wesentlichen aus drei Funktionseinheiten (Bild 5).

Der PC

Der PC stellt dem Anwender hierbei ein Graphical User Interface (GUI, Bilder 6 und 7) zur Verfügung. Zudem beinhaltet er die Analog-/Digital-Messhardware zum Einlesen und Speichern der Messsignale auf Datenträger bzw. im Netzwerk und übernimmt die Steuerung und die Kalibrierung der 32 Messköpfe.

Die zentrale Empfangseinheit

Die zentrale Empfangseinheit enthält die 32 Empfänger, die das digitale Messsignal für den PC zum Einlesen vorberei-

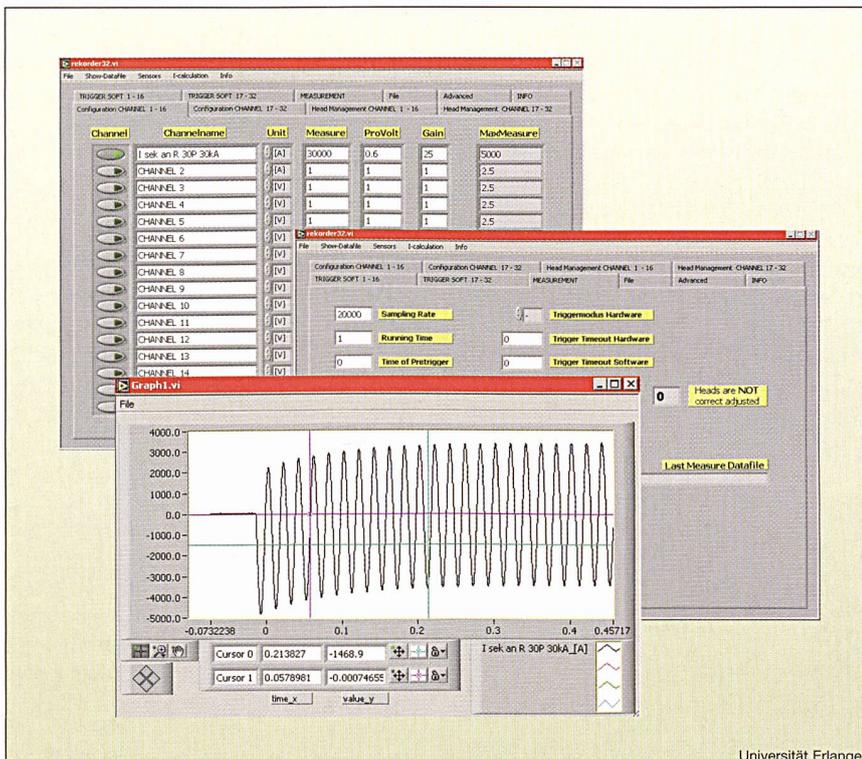


Bild 6 Die übersichtliche Benutzeroberfläche erleichtert den Umgang mit dem Erfassungssystem. Alle Signalplotter sind mit Cursor-, Zoom- und Druckfunktionen ausgestattet.

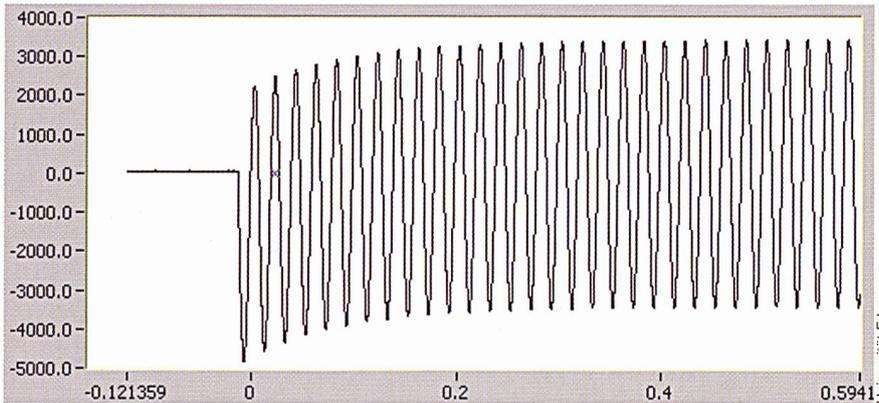


Bild 7 Beispiel der Visualisierung eines mit dem neuen hochgenauen Erfassungssystem gemessenen Sekundärstroms

ten und die Netzspeisung, um die 32 Messköpfe mit Leistung zu versorgen (Bild 8).

Die Messköpfe

Die Messköpfe bestehen aus je zwei galvanisch getrennten Elektronikseinheiten. Der über die zentrale Empfangseinheit geerdete Teil hat die Aufgabe, das digitale Messsignal so aufzubereiten und zu treiben, dass es über kostengünstige CAT-5-Twisted-Pair-Standardkabel bis zu einer Länge von 20 m sicher übertragen werden kann. Der zweite Teil (eingangsseitig bezogen auf die galvanische Trennung) hat keine elektrische Verbindung zur Erde des Messsystems. Diese potenzialfrei erfassende Kopfelektronik kann daher problemlos an die zum Einsatz kommenden Messshunts oder beliebige Spannungs- und Stromwandler über möglichst kurze BNC-Kabel angeschlossen werden. Die Aufgabe der Kopfeinheiten besteht somit darin, das Sensorsignal geeignet zu verstärken und in ein digitales Signal umzuwandeln. Um eine Steuerung und Kalibrierung vom PC aus zu ermöglichen, verfügt jede Kopfeinheit über einen separaten Microcontroller, der sie ausgehend vom PC und über die zentrale Empfangseinheit hinweg erreichbar macht. Die Energieversorgung erfolgt über galvanisch trennende DC/DC-Konverter, und die digitalisierten Signale werden über schnelle Optokoppler übertragen.

Steuerung über asynchrones serielles Signal

Da die Kopfeinheit durch eine galvanische Trennung von der Empfangseinheit getrennt sein muss, kann der Microcontroller der Kopfeinheit nur über ein asynchrones serielles Signal ohne Quittierungshandshake angesteuert werden, das entweder über eine Glasfaser oder einen Optokoppler übertragen werden kann.

Nachdem kein Rückkanal zur Verfügung steht, muss dieses serielle Protokoll so aufgebaut werden, dass auch eine schnelle und korrekte Datenübertragung ohne Quittierungshandshake verwendet werden kann.

Auf der gegenüberliegenden Seite der Übertragungsleitung ist der PC mit einer «Meilhaus ME4670i AD D I/O»-Karte ausgestattet, die nur über je 8 digitale Ein- und Ausgänge verfügt, die aber nicht echtzeitfähig angesteuert werden können. Aus 8 parallelen, nicht echtzeitfähigen I/Os können nur mit Hilfe eines Protokollumsetzers 32 echtzeitfähige Signale gewonnen werden, mit denen die 32 Messköpfe über die Optokoppler angesteuert werden können.

Der Protokollumsetzer ist in Form eines Microcontrollers ausgeführt, dessen Ansteuerung vom PC aus seriell-parallelasynchron über ein Handshake-Verfahren erfolgt, um eine schnelle und fehlerfreie Kommunikation zu ermöglichen. Der PC überträgt Kopfadresse, Befehl und Daten an den Protokollumsetzer. Dieser wandelt das Paket in Echtzeit in das serielle Messkopprotokoll um und schickt die Daten an den entsprechenden Messkopfcontroller.

Da es beim Kalibrieren der Messköpfe im Wesentlichen auf langsame, aber sehr genaue Signale ankommt, muss das Rauschen der Messköpfe und der AD-Wand-



Bild 8 Die Empfangseinheit des Messsystems beinhaltet das Netzteil, die Messsignalempfänger und den Protokollumsetzer, der zwischen Hauptrechner und den 32 Messkopf-Controllern vermittelt

ler so weit wie möglich reduziert werden. Als Worst-Case-Fall kann das Rauschen als ein Rechtecksignal mit einer Frequenz gleich der Abtastfrequenz betrachtet werden. In Wirklichkeit ist das Rauschen kein Rechtecksignal und daher noch besser filterbar. Um das System nicht zu überlasten, werden während der Eichphase alle 32 Kanäle mit 4 kHz abgetastet und gleichzeitig diskret gefiltert. Damit kann das Rauschen etwa um den Faktor 100 verkleinert werden, so dass die Messköpfe genau eingestellt und kalibriert werden können.

Alle notwendigen Einstellungen werden entweder auf Registerkarten oder über Pull-Down-Menüs durchgeführt. Projekteinstellungen können in einer Datei gespeichert und daraus wieder gelesen werden. Sinnvolle Voreinstellungen sind bereits vorprogrammiert. Alle Sensoren (Stromshunts, Spannungsteiler usw.) der institutseigenen Hochstromanlage sind mit ihren Parametern im Messsystem hinterlegt, so dass der Anwender diese einfach per Pull-Down-Menü während der Neukonfiguration auswählen kann. Die Ploteinstellungen der Datenvisualisierung werden entsprechend der Verstärkung und dem Sensorwert automatisch skaliert. Ausserdem berechnet das System sofort, bis zu welchem maximalen Amplitudenwert pro Kanal ohne Übersteuerung gemessen werden kann, was es dem Testingenieur ermöglicht, ohne Nachrechnen den optimalen Messbereich für den jeweiligen Sensor und Versuchsaufbau zu ermitteln. Mit Hilfe der Verstärkungseinstellung ist es möglich, den Messkopfeingang an den Spannungsmessbereich des Sensors optimal anzupassen, um stets eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen.

Verifikation im Testbetrieb

Das U/f-Übertragungskonzept hat sich im praktischen Einsatz gegen alle Störeinflüsse behauptet. Auch die Tatsache, dass die erste Signalverstärkerstufe des Messkopfs direkt am Messsensor sitzt, hat die Auswirkungen der Störimpulse von aussen extrem reduziert. Sehr viel Entwicklungsaufwand war auch im Testbetrieb notwendig, um aus dem PC und der AD-Karte einen anwenderfreundlichen und stabilen 32-kanaligen Signalrekorder zu entwickeln. Zudem waren auch im Bereich der Messhardware weitere Problemstellungen zu lösen. Schliesslich gelang es, eine sehr schnelle Regelung zu entwickeln, die in Zusammenarbeit mit den speziell auf diese Anwendung ausgerichteten Übertragungsprotokollen in 5 Sekunden 32

Messköpfe einstellt und kalibriert. Bei den Testversuchen konnte zudem sichergestellt werden, dass sich auch die Microcontroller-Steuerung sicher gegenüber den EMV-Störungen aus der Hochstromanlage verhält. Die Handhabung der Messanlage hat sich auf Grund der praxisorientierten und selbsterklärenden Bedienoberfläche als günstig erwiesen. Das so entwickelte Messsystem erfüllt somit alle Bedingungen des eingangs genannten Anforderungskataloges und wird die Hochstromanlage des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung mess- und analysetechnisch in vielfältiger Weise ergänzen.

Referenz

- [1] U. Nieberlein: Entwurf und Implementierung eines EMV-verträglichen computergestützten Systems zur Erfassung transienter Messgrößen einer Hochstromanlage. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung, Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.

Angaben zu den Autoren

Dr.-Ing. **Christian Weindl** ist seit 2001 Leiter der Hochspannungs- und Hochstromprüfanlagen des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung der Universität Erlangen-Nürnberg.
Universität Erlangen, D-91058 Erlangen,
weindl@eev.eei.uni-erlangen.de

Dipl.-Ing. **Dieter Braisch** ist seit 2000 Doktorand am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der

Universität Erlangen-Nürnberg und betreut die Hochstromanlage als Testingenieur.

Universität Erlangen, D-91058 Erlangen,
dieter.braisch@eev.eei.uni-erlangen.de

Dipl.-Ing. **Uwe Nieberlein** hat im Rahmen seiner Diplomarbeit am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung der Universität Erlangen-Nürnberg das Messdatenerfassungssystem entworfen und realisiert.
Universität Erlangen, D-91058 Erlangen
ee@eev.eei.uni-erlangen.de

NEU

PräsenzLight 360

energiebewusst

fernbedienbar

IP 54

preiswert



Der kostengünstige Präsenzmelder

für Büro, Korridor, Nasszonen.

HTS

Energie zur rechten Zeit

PRÄSENZMELDER

HTS
High Technology Systems AG
Im Langhag 11
CH-8307 Effretikon

Tel. +41 (0)52 355 17 00
Fax +41 (0)52 355 17 01
info@hts.ch
www.hts.ch