Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 84 (1993)

Heft: 1

Artikel: Entscheiden mit Expertensystemen : Anwendung eines Expertensystems zur Optimierung des Betriebszustands elektrischer Netze

Autor: Reichelt, Dieter / Glavitsch, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902649

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: 11.07.2025

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

Expertensysteme finden vermehrte Anwendung in verschiedenen Bereichen der Technik. Der folgende Artikel gibt im ersten Teil eine Übersicht über den Aufbau und die Funktionsweise von Expertensystemen und beschreibt im zweiten Teil den Einsatz eines Expertensystems für die Optimierung des Betriebszustands elektrischer Netze. Bei einer umfassenden Optimierung des Betriebszustands treten verschiedene Anforderungen auf, die nicht isoliert betrachtet werden können. Anhand eines Beispiels, bei dem in einem Testnetz Kurzschlussströme verringert und die Überlast auf einer Leitung beseitigt werden müssen, zeigen die Autoren auf, wie eine derartige Problemstellung mit der Kombination von analytischen Programmen und einem Expertensystem gelöst werden kann.

Entscheiden mit Expertensystemen

Anwendung eines Expertensystems zur Optimierung des Betriebszustands elektrischer Netze

■ Dieter Reichelt und Hans Glavitsch

Expertensysteme haben heute als spezifische Werkzeuge in vielen Bereichen von Wissenschaft, Technik und Wirtschaft Eingang gefunden. Es gibt bereits eine Vielzahl von Anwendungen, wie zum Beispiel im Bankenwesen (Bewertung von Wertschriften), in der Automobilindustrie (Diagnosesystem für automatische Getriebe) oder in der Bildverarbeitung (Robot Vision). Im Bereich der elektrischen Energieübertragungssysteme werden Expertensysteme unter anderem für die Interpretation von Alarmmeldungen [1] und für den Netzwiederaufbau nach einer Grossstörung [2] eingesetzt.

Expertensysteme sind aus der Forschung auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz (KI) entstanden. In der Anwendung bieten sie eine Ergänzung zu den analytischen Methoden, die auf mathematischen Algorithmen aufbauen [3]. Expertensysteme sind Computerprogramme, die für Probleme eingesetzt werden, deren Lösung bisher menschlichen Experten vorbehalten war. Es können Erfahrungswerte und Heuristiken in das System eingebracht werden, so dass die Problemlösung auf Expertenniveau vollzogen wird. Das Expertensystem arbeitet mit einer ähnlichen Strategie und kommt auf die selben Ergebnisse wie ein menschlicher Experte. Der Hauptunterschied zu konventionellen Computerprogrammen besteht in der Trennung des Wissens von der Verarbeitung dieses Wissens. Das Wissen ist ausserhalb des eigentlichen Programms in einer Wissensbasis untergebracht und so formuliert, dass es leicht lesbar und modifizierbar ist.

Im vorliegenden Artikel wird nach einer Übersicht über die wichtigsten Komponenten eines Expertensystems und deren Funktionsweise ein Konzept für ein hybrides Expertensystem vorgestellt, bei dem die Vorteile von konventionellen numerischen Programmen und symbolischer Programmierung vereinigt sind. Ein Anwendungsbeispiel zeigt, wie dieses Expertensystem den Betriebszustand eines elektrischen Energieübertragungsnetzes optimieren kann [4, 5].

Aufbau von Expertensystemen

Ein vollständiges Expertensystem besteht aus der *Wissensbasis*, der *Inferenzmaschine* zur Verarbeitung des Wissens, dem *Arbeitsspeicher*, in dem die Zwischenstufen von Schlussfolgerungen abgelegt sind, einer *Erklärungskomponente*, einem Subsystem zum *Wissenserwerb* oder *Wissensakquisition* sowie einem *Benützerinterface* (Bild 1).

Wissensrepräsentation

Die drei für Expertensysteme hauptsächlich verwendeten Formalismen zur Wissensrepräsentation – Regeln, strukturierte Objek-

Adressen der Autoren
Prof. Dr. *Hans Glavitsch*, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich und
Dr. *Dieter Reichelt*, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich; seit 1.11.1992: Nordostschweiz. Kraftwerke AG, Parkstrasse 23, 5400 Baden.

te (Frames) und Prädikatenlogik – führen zu verschiedenen Techniken zur Verarbeitung des Wissens. Allen gemeinsam ist, dass aus einer Sammlung von Eingangsdaten neue Daten generiert werden. Dabei werden Programmodule aktiviert, die mit den Eingangsdaten korrespondieren, wobei die Auswahl und die Aktivierung der Programmodule zyklisch gesteuert wird. Je nach Aufgabenstellung wird die eine oder andere Technik angebracht sein.

Regelbasierte Systeme

In regelbasierten Systemen (Rule Based Systems) wird das Wissen in Form von Regeln und Fakten dargestellt. Die Regeln bestehen aus zwei Teilen; auf der linken Seite stehen die Bedingungen oder Voraussetzungen, auf der rechten Seite die Handlungen oder Schlussfolgerungen. Für die Anwendung der Regeln auf die Fakten gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, *Vorwärtsverketten* (Forward Chaining) oder *Rückwärtsverketten* (Backward Chaining).

Beim Vorwärtsverketten werden mit Hilfe von Regeln aus einer vorgegebenen Menge von Fakten Schlüsse gezogen und neue Fakten generiert. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis eine Lösung gefunden ist. Expertensysteme, die nach diesem Prinzip arbeiten, nennt man *Produktionssysteme* (Production Systems). Bei Produktionssystemen haben die Regeln folgende Form:

IF– *Bedingung* THEN– *Aktion*

Der Schlussfolgerungsmechanismus geht hier von den Daten aus (Data Driven) und versucht, bis zu einer Zielaussage zu gelangen. Eine Anwendung ist das Expertensystem R1 [6] zur Konfiguration von VAX-Computern, aus dem die Produktionssystemshells OPS5 und später OPS83 [7] hervorgingen.

Beim Rückwärtsverketten wird der umgekehrte Weg begangen. Die Regeln haben die folgende Form:

IF– *Prämisse* THEN– *Folgerung*

Eine Zielaussage wird als Hypothese aufgestellt. Nun wird versucht, diese Hypothese zu verifizieren, indem die linken Seiten derjenigen Regeln, die zu dieser Hypothese führen, mit den Fakten verglichen werden. Dabei wird die Hypothese entweder bestätigt oder widerlegt oder nur teilweise bestätigt. Die noch offenen Teile der linken Seite werden als neue Teilziele formuliert, die wiederum verifiziert werden müssen. Da die linke Seite der Regeln aus mehreren Prämissen bestehen kann, wird es Verzweigungen geben, so dass eine Baumstruktur entsteht. Die Prämissen einer Regel sind logisch mit UND/ODER verknüpft, der resultierende Baum wird deshalb auch als UND/ODER-Baum bezeichnet. Innerhalb des Baumes verwendet das Expertensystem *Backtracking*, um von erfüllten Prämissen nach oben zu gehen und in noch nicht erfüllte Zweige des Baumes vorzudringen. Bei diesen Systemen ist der Ablauf vom Ziel gesteuert (Goal Driven). Typische Anwendungen sind Diagnosesysteme, wie zum Beispiel Mycin [8].

Beim Vergleichen von Fakten mit den linken und rechten Seiten der Regeln wird ein Mustervergleich durchgeführt (Pattern Matching).

Prädikatenlogik

Ein Formalismus zur Repräsentation von Fakten, allgemeinen Aussagen, vagen Aussagen und komplexen Beziehungen ist die Prädikatenlogik. In der Prädikatenlogik sind neben den Formen der Aussagelogik auch Quantoren wie $\forall$ (für alle x gilt) und $\exists$ (es gibt x mit) erlaubt.

Die bekannteste Programmiersprache, die auf einer Untermenge der Prädikatenlogik, den Horn-Klauseln aufbaut, ist Prolog [9]. In Prolog ist *Backtracking* und ein *Unifikationsalgorithmus* (Pattern Matching mit Variablenzuordnung) bereits eingebaut. Prolog geht jedoch in einigen Punkten über die reine Prädikatenlogik hinaus. So kann mit der Kontrollstruktur CUT das Backtracking unterbrochen werden; die Reihenfolge der Ausdrücke ist dann nicht mehr beliebig. Ähnliches gilt für den Gebrauch des Operators NOT, der auf Variablen angewendet, denen noch kein Wert zugewiesen wurde, ein anderes Verhalten zeigt, als man das von der logischen Negation erwarten würde.

Strukturierte Objekte

Wenn Daten in strukturierter Form vorliegen, so sollte die Wissensrepräsentation daraus Nutzen ziehen können. Strukturierte Objekte oder Frames tragen dieser Tatsache Rechnung, gehen aber neben der reinen Datenrepräsentation noch weiter und stellen Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten her. Dazu kommen Vererbungsmechanismen, die Default-Werte für eine übergeordnete Klasse von Objekten nach unten zu den einzelnen Objekten weitergeben. Frames können auch Regeln aktivieren. Zwei Beispiele von Expertensystemshells, welche die Möglichkeit, mit Frames zu arbeiten, unterstützen, sind KEE (Knowledge Engineering Environment) und Nexpert Object. Neben Forward Chaining und Backward Chaining bieten Frame-basierte Systeme noch einen dritten Inferenzmechanismus, die sogenannten *Dämonen*. Dämonen sind Funktionen, die im Hintergrund Variablenwerte überwachen und, falls bestimmte Situationen erfüllt sind, Handlungen auslösen.

Wissensakquisition

Das für ein Expertensystem notwendige Wissen wird aus dem spezifischen Gebiet, in dem es eingesetzt werden soll, extrahiert. Diese Aufgabe wird vom Wissensingenieur oder Knowledgeengineer übernommen. Im Normalfall sind der Experte und der Wissensingenieur nicht eine und dieselbe Person, so dass der Wissensingenieur durch Interviews mit dem Experten zum Wissen kommen muss. Er bereitet dann das Wissen auf, um es in einer geeigneten Form verfügbar zu machen. Das Wissen muss auf Vollständigkeit und auf Widerspruchsfreiheit geprüft werden, damit die Wissensbasis konsistent ist.

Die Wissensbasis muss leicht zugänglich sein, so dass der Benützer einerseits in das vorhandene Wissen Einblick nehmen kann, andererseits müssen auch Änderungen und Erweiterungen vorgenommen werden können, ohne dass dabei zusätzlicher Programmieraufwand notwendig ist. Aus diesem Grund ist die Wissensbasis von der Inferenzmaschine, die das Wissen verarbeitet, abgesetzt. Das Wissen selber ist in verständlichen Ausdrücken formuliert, die von der Inferenzmaschine symbolisch verarbeitet werden.

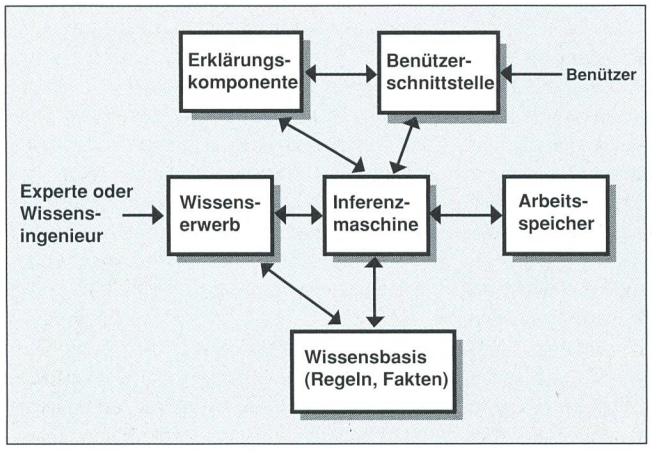


Bild 1 Grundstruktur eines Expertensystems

Transparenz

In den meisten Fällen wünscht der Anwender eines Expertensystems eine gewisse Transparenz. Er will wissen, warum das Expertensystem eine bestimmte Lösung gefunden hat, und er will eventuell auch wissen, wie das Expertensystem diese Lösung gefunden hat. Bei einem regelbasierten Expertensystem für Diagnosen sieht die Erklärungskomponente beispielsweise so aus:
Auf die Frage, *warum* eine bestimmte Lösung gefunden wurde, liefert das System den Pfad von allen Regeln, die von der Lösung bis zur Hypothese führen.
Auf die Frage, *wie* das System diese Lösung gefunden hat, werden alle Regeln aufgezeigt, die für diese Lösung angewendet wurden. Dazu wird der ganze Entscheidungsbaum aufgestellt, den die verwendeten Regeln bilden.

Arbeitsweise am Beispiel eines Produktionssystems

Die Aufgabe eines Produktionssystems ist es, aus einer Reihe von Fakten mit Hilfe von Regeln Folgerungen abzuleiten und zu einer Zielaussage zu gelangen. Ein Produktionssystem besteht im wesentlichen aus einer *Inferenzmaschine*, aus dem *Produktionsspeicher* und aus dem *Arbeitsspeicher*. Der Arbeitsspeicher enthält die Fakten. Im Produktionsspeicher stehen die Regeln. Sie bestehen aus einem Bedingungs- und einem Aktionsteil. Wenn der Bedingungsteil erfüllt ist, so wird der Aktionsteil ausgeführt. Der Aktionsteil wirkt direkt auf den Arbeitsspeicher, indem bestehende Fakten aus dem Arbeitsspeicher entfernt oder neue Fakten zugefügt werden.

Die Inferenzmaschine verarbeitet die Regeln und die Fakten. Ausgehend von einer gegebenen Menge Fakten werden diese mit den Bedingungsteilen der Regeln verglichen. Von den Regeln, deren Bedingungsteil durch die vorhandenen Fakten erfüllt wäre, wird anhand einer Strategie (Konflikt-Resolution) eine Regel ausgewählt und *gefeuert*. Der Aktionsteil der Regel modifiziert den Arbeitsspeicher, indem neue Fakten generiert oder alte Fakten gelöscht werden. Auf diese neue Menge von Fakten im Arbeitsspeicher werden wiederum die Regeln angewandt. Dieser Vorgang wird solange zyklisch wiederholt, bis das Ziel erreicht ist oder bis sicher ist, dass keine Lösung gefunden werden kann.

Netzoptimierung mit einem Expertensystem

Übergeordnete Optimierung

Für die Optimierung des Betriebszustands elektrischer Energieübertragungsnetze stehen heute eine ganze Reihe analytischer Programme zur Verfügung. Diese Programme können ein bestimmtes Kriterium optimieren, zum Beispiel minimale Verluste. Aus der bisherigen Praxis der Netzbetriebsführung hat man erkannt, dass auf analytischen Algorithmen basierende Methoden allein nicht mehr ausreichen, um eine umfassende Verbesserung des Betriebszustands von elektrischen Energieübertragungsnetzen herbeizuführen.

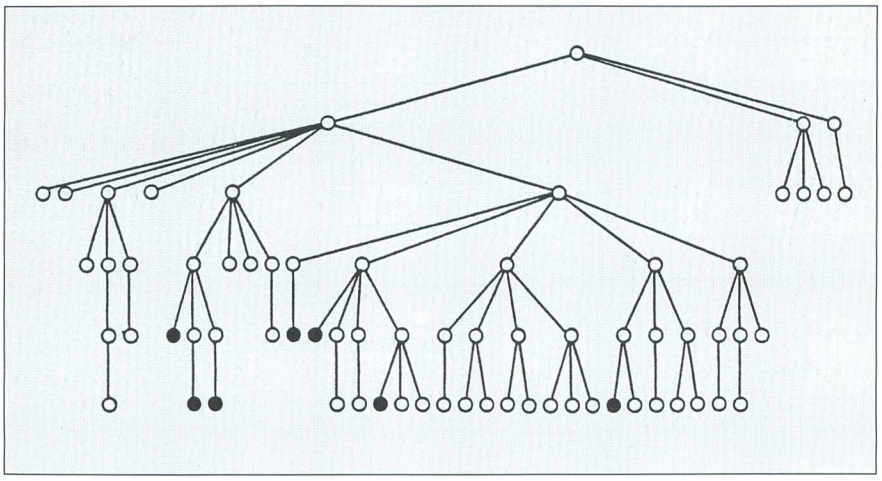


Bild 2 Typischer Suchbaum für eine Netzoptimierung
Jeder Kreis symbolisiert einen erlaubten Netzzustand

In einem Energieübertragungsnetz muss die Belastung der einzelnen Elemente unter einem gegebenen Grenzwert bleiben, der in einem Sicherheitsabstand unter der thermischen Grenze liegt. Daneben sollte das Energieübertragungsnetz (n-1)-sicher sein, das heisst der Ausfall eines Elements darf nicht zu einem unerlaubten Betriebszustand führen. Zudem dürfen die Kurzschlussströme vorgegebene Grenzwerte nicht überschreiten. Für jede dieser Anforderungen existieren analytische Optimierungsprogramme. Mit einer übergeordneten Optimierung des Netzzustands wird versucht, die verschiedenen Anforderungen zu berücksichtigen.

Der Begriff der Optimierung wird hier aus einem erweiterten Blickwinkel betrachtet, der über den rein mathematisch definierten Begriff hinausgeht. Unter einer übergeordneten Optimierung wird ganz allgemein eine Verbesserung des Netzzustandes in verschiedenen Bereichen verstanden, wobei sich die einzelnen Anforderungen nicht in ihrem mathematischen Optimum befinden müssen. Denn es existiert kein absolut bester Systemzustand, bei dem alle Zielfunktionen ihr Minimum haben. Aufgabe der Optimierung ist es nun, einen Zustand zu finden, der alle Kriterien möglichst gut erfüllt. Dies ist nicht immer eindeutig möglich.

In einem *hybriden* Expertensystem werden symbolische und analytische Programmierung kombiniert. Das hybride System hat die gleiche Funktionsweise wie ein konventionelles Expertensystem. An die Stelle von Fakten treten in gewissen Situationen analytische Programme, die an Modellen Simulationen rechnen und Daten liefern. Die Stärke eines hybriden Expertensystems liegt in der Tatsache, dass durch symbolisches Programmieren die Möglichkeit gegeben ist, Probleme zu lösen, die mit analytischen Programmen allein nicht gelöst werden könnten. So kann Erfahrungswissen in Form von Fakten und Regeln dargestellt werden. Bei der übergeordneten Netzoptimierung bestimmt dieses Wissen, nach welcher Strategie vorgegangen wird.

Die analytischen Programme liefern exakte Resultate, die aus Modellen des elektrischen Übertragungsnetzes abgeleitet sind. Diese exakten Daten sind dem reinen qualitativen Wissen, das auf Erfahrungen beruht, überlegen. Die Netzoptimierung ist auf die Ergebnisse aus Simulationen angewiesen, denn auch für einen erfahrenen Benützer ist es zum Beispiel sehr schwer, bei Änderungen im Netz den neuen Lastfluss genügend genau abzuschätzen. So vereinigt ein hybrides Expertensystem, das analytische Programme miteinbezieht und deren exakte Resultate als Teil der Wissensbasis verwendet, die Vorteile beider Techniken.

Mit dem Einsatz von Expertensystemen soll nun nicht versucht werden, diese analytischen Programme, die mit hochentwickelten Algorithmen in kurzer Zeit exakte Resultate liefern, zu ersetzen, sondern diese Programme zu koordinieren und so einzusetzen, wie es auch ein Mensch als Bediener tun würde. Das Expertensystem führt einen *heuristischen Suchprozess* durch und schlägt als Ergebnis Betriebszustände des Netzes vor, welche die gestellten Anforderungen erfüllen. Dadurch wird dem Benützer das ar-

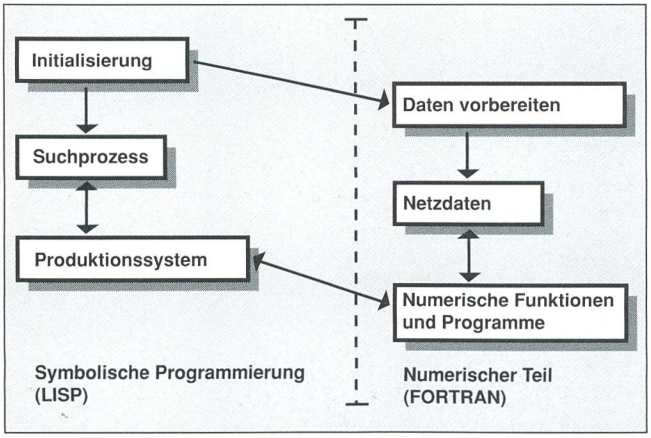


Bild 3 Hybrider Aufbau eines Expertensystems

beitsintensive Suchen und wiederholte Anwenden von Programmen abgenommen. Durch das Bestimmen von möglichen Betriebszuständen, welche die Anforderungen erfüllen, unterstützt das Expertensystem den Benützer (Decision Support). Die endgültige Entscheidung, welcher Betriebszustand realisiert werden soll, verbleibt beim Benützer.

Heuristische Suche

Eine übergeordnete Netzoptimierung umfasst mehrere Kriterien. Da für jedes dieser Kriterien eine Zielfunktion formuliert werden kann, wird die Optimierung unter mehrfachen Zielfunktionen (Multiple Objectives) durchgeführt. Die einzelnen Zielfunktionen haben ihr Minimum nicht am gleichen Ort, sie können sogar gegenläufig sein. Bei der Optimierung müssen deshalb Prioritäten gesetzt werden, die sich im Laufe der Optimierung ändern können. Die Priorität bestimmt, in welche Richtung die Optimierung geht. Dabei dürfen die Zielfunktionen mit geringer Priorität nicht oder nur wenig verschlechtert werden. Sobald ein Kriterium erfüllt ist, wird die Priorität geändert. Im weiteren Verlauf der Optimierung muss dann beachtet werden, dass die bereits erreichten Kriterien nicht mehr verletzt werden.

Für die Optimierung können diskrete (zum Beispiel Schaltmassnahmen) oder kontinuierliche Steuervariablen (Änderung der Generatoreinspeisungen) verwendet werden. Bei diskreten Steuervariablen sind die einzelnen Zielfunktionen nichtkonvex. Dies erschwert die Optimierung zusätzlich, da Nebenminima als solche erkannt und überwunden werden müssen.

Bei der Planung werden verschiedene Varianten durch wiederholtes Anwenden analytischer Optimierungsprogramme untersucht. Jede Änderung der Zustandsgrössen führt zu einem neuen Netzzustand. Dieser Zustand wird anhand der Werte der Zielfunktionen bewertet. Dann wird entschieden, ob der Zustand den Anforderungen genügt, ob in der gleichen Richtung weitergesucht wird oder ob der Suchprozess zurückgehen soll, um neue Varianten zu untersuchen. Da wegen der Gegenläufigkeit und der Nichtkonvexität der Zielfunktionen kein eigentliches Optimum existiert, muss eine grössere Anzahl von Netzzuständen untersucht werden.

Dieser von Erfahrung geprägte Suchprozess wird von einem regelbasierten System nachgebildet. Das Expertensystem führt einen Suchprozess durch, der in der Menge der realisierbaren Netzzustände nach Lösungen sucht, die alle gestellten Anforderungen erfüllen. Der Suchprozess wird von einem Produktionssystem gesteuert. In der Wissensbasis stehen die Regeln, mit denen die Heuristik bei der Suche realisiert wird. Die Regeln erfüllen folgende Aufgaben:

- sie bewerten jeden Netzzustand anhand der Werte der Zielfunktionen
- sie setzen Prioritäten unter den einzelnen Kriterien
- sie entscheiden, wie die Suche weitergeht
- sie wählen die benötigten analytischen Programme aus.

Bild 2 zeigt einen typischen Suchbaum, der im Verlauf einer Optimierung aufgestellt wurde. Jeder Kreis symbolisiert einen erlaubten Netzzustand. Ein Übergang zwischen zwei Netzzuständen kann eine Schalthandlung sein (zum Beispiel Umschalten einer Leitung in einer Doppelsammelschiene) oder eine Änderung der Generatoreinspeisungen als Resultat eines optimalen Lastflusses (OPF). Die ausgefüllten Kreise stellen Netz-

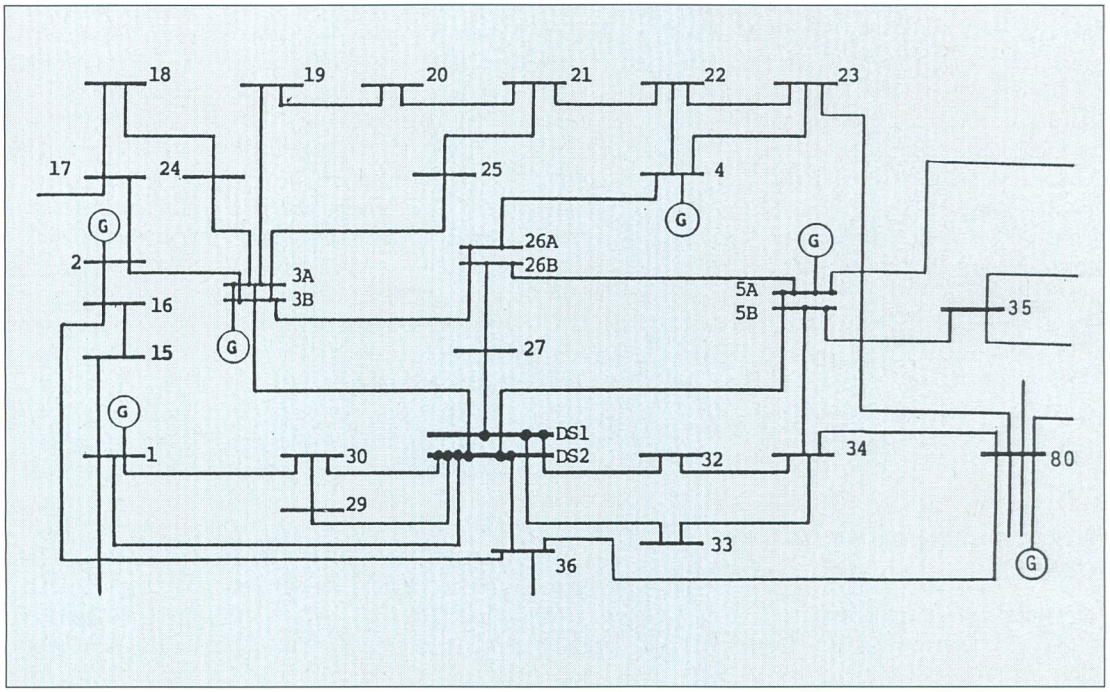


Bild 4 Ausschnitt aus dem Testnetz

Das ganze Testnetz besteht aus 83 Knoten und 124 Leitungen

zustände dar, bei denen alle gestellten Anforderungen erfüllt sind.

Ein Programmpaket für korrektives Schalten gibt dem Expertensystem eine lineare Näherung der Auswirkung von Schalthandlungen auf den Lastfluss und auf die Kurzschlussströme. Diese Informationen sind für den Suchprozess sehr wichtig, da sie die Anzahl der zu durchsuchenden Netzzustände auf die erfolgversprechenden Varianten einschränken.

Architektur des Expertensystems

Am Institut der Autoren wurde ein hybrides Expertensystem entwickelt, das einen symbolischen und einen numerischen Teil enthält. Beide Teile verfügen über eigene Datenspeicher und sind über eine Schnittstelle miteinander verbunden. Das Expertensystem läuft in einer Lisp-Umgebung, in der die einzelnen Funktionen implementiert sind und aus der heraus auch die analytischen Programme aufgerufen werden.

Am Anfang steht die Initialisierung des gesamten Expertensystems. Hier werden bereits numerische Programme aufgerufen, welche die Daten aus den in allgemeiner Form vorliegenden Netzdateien aufbereiten und neue Dateien generieren, welche die Informationen beinhalten und das Format aufweisen, das später von den analytischen Programmen verlangt wird. An dieser Stelle werden auch vorbereitende Rechnungen vorgenommen, die zeitaufwendig sind und die im voraus erledigt werden können. Dazu gehören zum Beispiel die Berechnung von Verteilfaktoren und das Aufstellen der Systemmatrizen.

Das Expertensystem nimmt den aktuellen Netzzustand als Ausgangszustand und beginnt mit der Optimierung. Während des Suchprozesses werden die benötigten numerischen Programme aufgerufen. Mit ihnen können Topologieänderungen vorgenommen werden oder die Einspeisungen der Generatoren optimiert werden. Für jeden neuen Netzzustand wird ein Lastfluss gerechnet. Dann bestimmt das Produktionssystem, wie der Suchprozess weitergehen soll, und wählt die neu benötigten numerischen Programme aus. Dieser Prozess wiederholt sich so lange, bis der Suchraum durchlaufen ist. Dabei schränkt das in den Regeln gespeicherte heuristische Wissen den Suchbaum auf die relevanten Teilbereiche ein, so dass nicht der ganze Suchraum abgearbeitet werden muss.

Computerumgebung

Das Expertensystem wurde auf einer VAX-Station 3100 unter dem Betriebssystem VMS entwickelt. Die Anzeige der Netztopologie und der Änderungen der Topologie erfolgt in einem separaten Bildschirmfenster (Window). Wenn 80% der Fläche eines 19-Zoll-Farbbildschirms für die Graphik verwendet wird, können Netzausschnitte mit bis zu 50 Knoten und 80 Verbindungen noch gut dargestellt werden. Die restliche Fläche des Bildschirms dient für die interaktive Programmbedienung und für die Anzeige alphanumerischer Resultate.

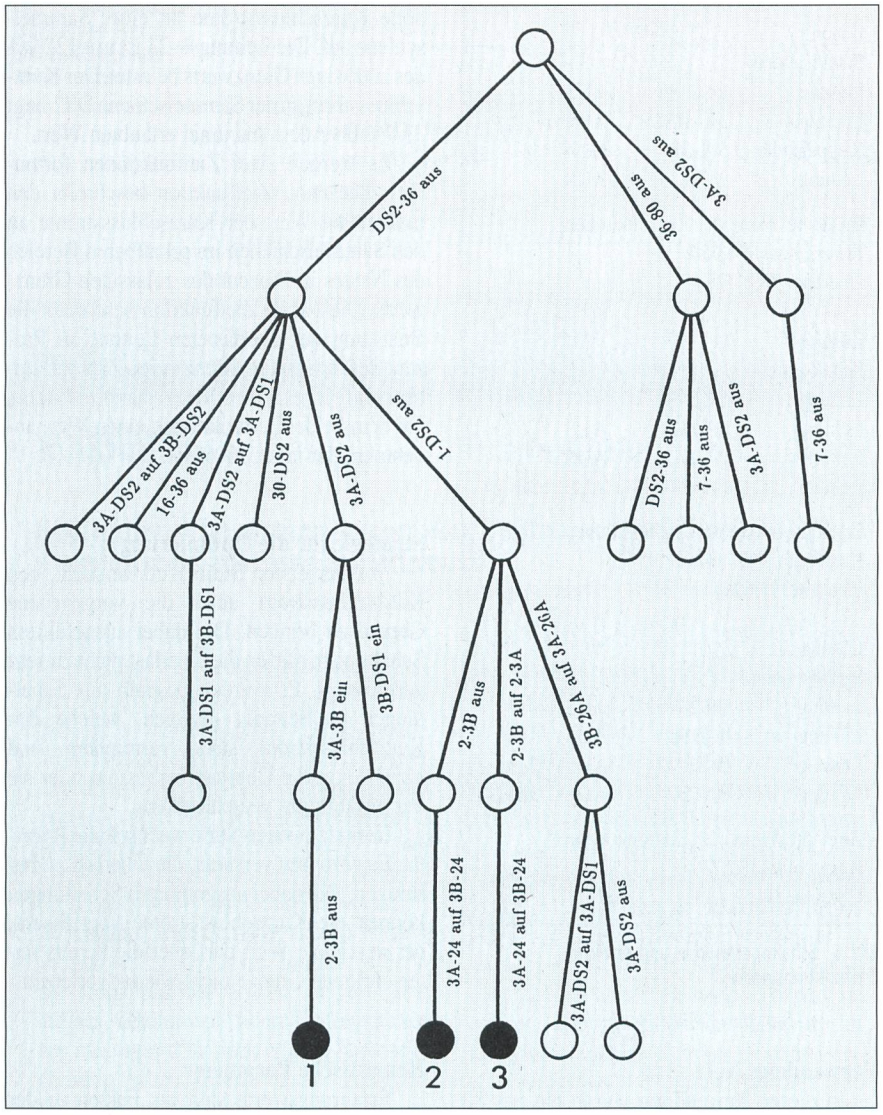


Bild 5 Suchbaum für die Optimierung des Testnetzes
Die Netzzustände *1*, *2* und *3* entsprechen den Lösungen *1*, *2* und *3* in Bild 6

Anwendung: Erhöhung der Netzsicherheit

Überlastbeseitigung und Reduktion von Kurzschlussströmen

In der folgenden Anwendung wird ein Fallbeispiel untersucht, bei dem das hybride Expertensystem eine übergeordnete Netzoptimierung unter zwei Zielfunktionen durchführt. Es wird ein Netzzustand betrachtet, bei dem die Netzsicherheit nicht ausreichend ist. In diesem Ausgangszustand weist eine Leitung eine Überlast auf, zudem ist der Kurzschlussstrom an einer Sammelschiene zu gross.

Die übergeordnete Netzoptimierung hat die Bestimmung eines Netzzustands zum Ziel, in dem keine Überlasten mehr auftreten und in dem die Kurzschlussströme unter dem vorgegebenen Grenzwert bleiben. Als Steuermassnahmen werden Schalthandlungen eingesetzt. Als drittes Kriterium, neben den beiden explizit formulierten Zielfunktionen, soll das Ziel mit möglichst wenigen Schaltungen erreicht werden.

Der Grenzwert für die Belastung einer Leitung existiert im analytischen Modell. In der Realität entspricht er entweder einer für den Betrieb festgelegten Grenze, die mit einem Sicherheitsabstand unter dem thermischen Grenzwert liegt, oder einer fiktiven Grenze, wie sie zum Beispiel für die Einhaltung der (n-1)-Sicherheit gefordert wird.

Lösung *1*
Schaltsequenz

Leitung	DS2–36	AUS	
Leitung	3A–DS2	AUS	
Kuppelstelle	3A–3B	EIN	
Leitung	2–3B	AUS	

Erreichte Werte der Zielfunktionen:
Kurzschluss: 94,05%
Überlast: 98,01%

Lösung *2*
Schaltsequenz

Leitung	DS2–36	AUS	
Leitung	1–DS2	AUS	
Leitung	2–3B	AUS	
Leitung	3A–24	AUF	3B–24

Erreichte Werte der Zielfunktionen:
Kurzschluss: 95,60%
Überlast: 91,62%

Lösung *3*
Schaltsequenz

Leitung	DS2–36	AUS	
Leitung	1–DS2	AUS	
Leitung	2–3B	AUF	2–3A
Leitung	3A–24	AUF	3B–24

Erreichte Werte der Zielfunktionen:
Kurzschluss: 97,77%
Überlast: 91,52%

Bild 6 Schaltoperationen und erreichte Zielfunktionswerte

Verwendetes Netz

In dieser Anwendung wurde ein aus 83 Knoten und 124 Leitungen bestehendes Testnetz benützt. Acht dieser Knoten sind in Form von Doppelsammelschienen angeordnet. In Bild 4 wird ein Ausschnitt dieses Netzes dargestellt, in dem Schaltmassnahmen vorgenommen werden können.

Im Zentrum des schaltbaren Netzteils steht das Doppelsammelschienensystem DS1/DS2, an dem neun Leitungen anliegen. Bei ungünstigen Anordnungen der Leitungen werden die Kurzschlussströme an den Sammelschienen zu gross.

Das Testnetz befindet sich in einem relativ stark belasteten Zustand. Die Leitungen im schaltbaren Teil haben Grenzwerte für den höchstzulässigen Strom. Diese Begrenzungen müssen bei der Optimierung eingehalten werden. Aus diesem Grund kann nicht beliebig geschaltet werden. Es ist nur noch eine limitierte Anzahl von Schalthandlungen möglich.

Ausgangssituation

Vor dem Beginn der Optimierung weist das Netz eine überlastete Leitung sowie zu hohe Kurzschlussströme an einer Sammelschiene auf. Die Leitung 4–23 ist mit 122,9% des zulässigen Grenzwerts belastet. Der Kurzschlussstrom an der Sammelschiene DS2 liegt 33,7% über dem maximal erlaubten Wert.

Es werden zwei Zielfunktionen formuliert. Die erste Zielfunktion beschreibt den maximalen Wert der Kurzschlussströme an den Sammelschienen im schaltbaren Bereich des Netzes in Prozent des zulässigen Grenzwerts. Die zweite Zielfunktion beschreibt die Belastung der überlasteten Leitung in Prozent des zulässigen Grenzwerts. Ziel der Optimierung ist es, einen Netzzustand zu finden, bei dem beide Zielfunktionen einen Wert annehmen, der unter 100% ist.

Strategie für die Optimierung

In einer ersten Stufe wird versucht, den Kurzschlussstrom unter die vorgegebene Grenze zu bringen. Die dabei ausgeführten Schaltungen dürfen die Überlast nicht zu sehr vergrössern. Es werden deshalb nur Schaltungen in Betracht gezogen, welche den Kurzschlussstrom stark vermindern und gleichzeitig die Überlast verbessern oder sie nur geringfügig verschlechtern.

In einer zweiten Stufe wechselt die Priorität. Es wird nun versucht, die Überlast zu beseitigen. Die dabei ausgeführten Schaltungen können die Kurzschlussströme vergrössern, der maximale Wert darf aber die bereits unterschrittene Grenze nicht wieder verletzen.

Heuristische Parameter

Erfahrungswerte sind als Fakten in der Wissensbasis gespeichert. Dazu gehören Parameter, die bestimmen, wie weit der Suchprozess in die Tiefe des Suchraums dringen kann oder die festlegen, wo die Grenze zwischen erfolgversprechenden Varianten und ausser Betracht zu lassenden Varianten verläuft. Diese Parameter bestimmen die Grösse des Suchbaums und damit direkt die Rechenzeit.

Ergebnisse

Bild 5 zeigt den Suchbaum, der im Verlauf der Optimierung aufgestellt wurde. Die Schalthandlungen, die den Übergang von einem Zustand des Netzes in einen neuen Zustand charakterisieren, sind im Suchbaum eingetragen. Für den vorliegenden Fall bestimmt das Expertensystem drei Lösungen. Die dazu vorgeschlagenen Schaltoperationen und die erreichten Werte für die Zielfunktionen werden in Bild 6 gezeigt.

Verlauf der Optimierung

Zur Illustration, wie die Optimierung der Zielfunktionen bei einer vorgeschlagenen Lösung verläuft, wird im folgenden der Pfad vom Ausgangsknoten zum Zielknoten 2 detailliert betrachtet. Die Bilder 7 und 8 zeigen die Werte der einzelnen Zielfunktionen für diesen Pfad.

Mit der ersten Schaltung wird der maximale Kurzschlussstrom auf 102% vermindert. Dabei steigt die Überlast ganz leicht an um 0,4%, was toleriert wird. Mit der zweiten Schaltung wird der maximale Kurzschlussstrom unter den Grenzwert gebracht. Nun wechselt die Priorität. Die beiden folgenden Schaltungen verringern nun die Überlast. Sie wird zuerst auf 107%, dann auf 91% des Grenzwerts gebracht. Die Kurzschlussströme bleiben dabei auf einem Wert unter 100%.

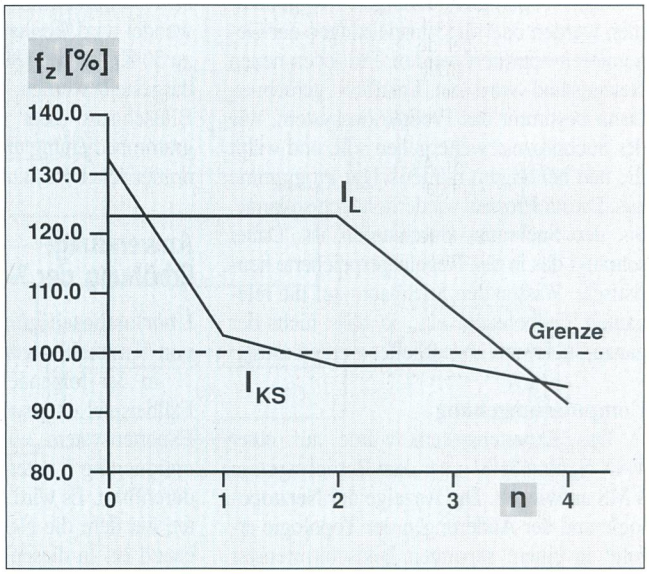


Bild 7 Verlauf der Zielfunktionen für Lösung 2

f_z Wert der Zielfunktion
n Anzahl Schaltungen
I_L Belastung der Leitung 4–23
I_{KS} maximaler Kurzschlussstrom

Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Optimierung bestätigen das gewählte Konzept. Sie zeigen, dass durch die Kombination von Techniken der künstlichen Intelligenz mit analytischen Programmen eine Vorgehensweise bei einer übergeordneten Netzoptimierung erreicht werden kann, die der menschlichen Vorgehensweise sehr ähnlich ist.

Abgegrenzt wird diese Vorgehensweise auf der einen Seite durch ein vollständiges Ausprobieren aller Möglichkeiten, was sehr rechenzeitaufwendig wäre, auf der anderen Seite durch ein direktes Vorgehen nach einer Methode des steilsten Abstiegs, bei der die notwendige Breite des Suchraums nicht berücksichtigt wurde.

Die Stärke des Expertensystems liegt nun darin, dass eine ausreichend grosse Anzahl von Varianten untersucht wird, ohne dass der Prozess dabei unverhältnismässig an Effizienz einbüsst.

Ein hybrides Expertensystem kann eine Verbesserung des Netzzustandes unter praxisrelevanten Gesichtspunkten erzielen. Hier liegt der Vorteil eines übergeordneten Expertensystems, das den Einsatz von analytischen Optimierungsprogrammen koordiniert, gegenüber dem isolierten Einsatz einzelner analytischer Optimierungsprogramme.

Literatur

[1] *C. Fukui, J. Kwakami*: An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4 (Oct. 1986), pp. 83–90.

[2] *G. Krost*: Expertensystem Netzwiederaufbau. Elektrizitätswirtschaft Heft 13/88 (1988), S. 625ff.

[3] *J. Kriz*: Einführung in Expertensysteme. Bull. SEV/VSE 81(1990)3, S. 19–23.

[4] *D. Reichelt, H. Glavitsch*: Features of a Hybrid Expert System for Security Enhancement. (PICA 91), IEEE Trans. PWRS, May 92, pp. 907–913.

[5] *D. Reichelt*: Über den Einsatz von Methoden und Techniken der künstlichen Intelligenz zu einer übergeordneten Optimierung des elektrischen Energieübertragungsnetzes. Dissertation ETH Nr. 9324, Zürich 1990.

[6] *J. McDermott*: R1: A Rule-Based Configurer of Computer Systems. Artificial Intelligence 19(1982), pp. 39–88.

[7] *L. Brownston, R. Farrell, E. Kant, N. Martin*: Programming Expert Systems in OPS5. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1985.

[8] *E.H. Shortliffe*: Computer-Based Medical Consultations. MYCIN, Elsevier New York, 1976.

[9] *W.F. Clocksin, C.S. Mellish*: Programming in Prolog. Springer-Verlag, 3rd edition, Berlin 1987.

Bild 8 Optimierungsschritte und Werte der Zielfunktionen für Lösungen 2

Nr.	Schaltoperation	Zielfunktionen	
		Überlast	Kurzschluss
1	Leitung DS2–36 AUS	123,3%	102,1%
2	Leitung 1–DS2 AUS	123,4%	97,8%
3	Leitung 2–3B AUS	107,9%	97,8%
4	Leitung 3A–24 AUF 3B–24	91,6%	95,6%

Décider au moyen de systèmes-experts

Application d'un système-expert pour l'optimisation de l'état d'exploitation des réseaux électriques

Aujourd'hui, les systèmes-experts sont des outils spécifiques qui ont trouvé accès dans de nombreux secteurs de la science, de la technique et de l'économie. Il existe déjà une grande variété d'applications, par exemple dans les institutions bancaires (évaluation des papiers-valeurs), dans l'industrie automobile (système de diagnostic pour boîtes automatiques) ou dans le traitement d'images (robot vision). Dans le secteur des systèmes de transport d'énergie électrique, les systèmes-experts sont utilisés notamment pour l'interprétation des messages d'alarmes et pour la reconfiguration d'un réseau après une perturbation grave. L'article donne dans une première partie un aperçu de la structure et du principe de fonctionnement des systèmes-experts et décrit dans une deuxième partie l'utilisation d'un système-expert destiné à l'optimisation de l'état d'exploitation des réseaux électriques.

Les systèmes-experts sont des programmes informatiques spécialisés dans la résolution de problèmes dont le traitement était réservé à ce jour aux experts humains. Un système-expert complet comprend une base de connaissances avec les règles et les faits, un moteur d'inférence destiné au traitement des connaissances, d'une mémoire vive dans laquelle sont archivés les paliers intermédiaires des résultats, d'une composante descriptive, d'un sous-système destiné à l'acquisition de savoir et d'une interface utilisateur. Sa tache consiste, à l'aide de règles, à partir d'une série de faits à déduire des conclusions et de parvenir à un résultat visé. Le savoir requis par le système-expert doit être collecté par l'ingénieur du savoir qui le traite et en contrôle l'intégralité et l'absence de contradictions.

Dans la deuxième partie de l'article, les auteurs montrent comment optimiser et corriger l'état d'exploitation d'un réseau électrique à l'aide d'un système-expert, de manière à éviter qu'aucune ligne ne soit surchargée, que les courants de courts-circuits restent dans les limites prévues, que les pertes soient faibles et que le réseau, si possible soit sûr n-l. On cite en exemple un réseau de test comprenant 83 nœuds et 124 lignes (la figure 4 en montre un secteur), dans lequel on doit réduire les courants de courts-circuits et la surcharge d'une ligne. Le système-expert doit indiquer ici les manœuvres possibles qui conduisent au but. La figure 5 montre l'arbre de recherche qui a été érigé au cours de l'optimisation. Les manœuvres qui caractérisent la transition d'un état du réseau dans un nouvel état sont inscrites dans l'arbre. Pour le cas présent, le système-expert détermine trois solutions. Les manœuvres proposées à cet effet et les valeurs obtenues pour les fonctions visées sont montrées dans la figure 6.

UNIGARD 300

Das universelle Messgerät

Mehlsecken CH-6260 Reiden Telefon 062 81 20 20 Telefax 062 81 29 38

F. Borner AG

Wieder einen Schritt voraus.

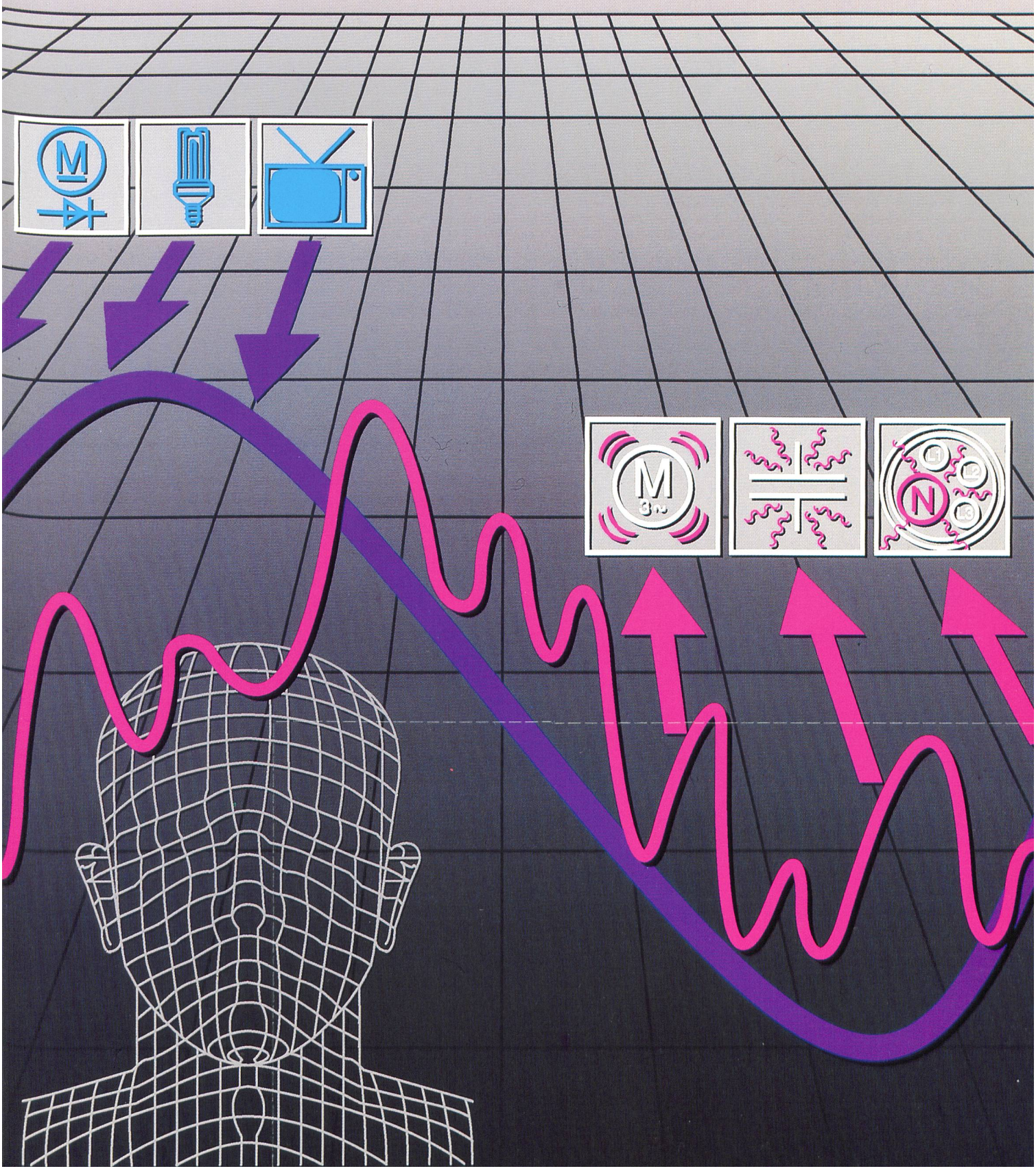
Eines für alle . . .

- Direktanschluss 5A
- Wandler frei programmierbar
- Echt-Effektivwert (true RMS)
- Max.-Werte mit Zeitangabe
- Standardgrösse 96/96 mm

NEUHEIT

Verursacht Ihnen die Netzqualität Kopfschmerzen?

Prüfen Sie die Oberschwingungspegel in Ihrem Verteilnetz, damit es nicht soweit kommt!



Wichtige Vorteile der MEMOBOX 604:

- **Auch Ungeübte werden schnell zu Messspezialisten für Netzoberschwingungen**
- **Deutliche und einfache Interpretation der Messresultate**

Anschlussgesuch
für Geräte und Anlagen, die Oberschwingungen und/oder Spannungsänderungen verursachen

☐ Neuanlage
☐ Erweiterung

☒ Zutreffendes ankreuzen

An das Elektrizitätswerk: Zürich Strasse: Plz./Ort:

	Name	Strasse	Plz./Ort	Tel.-Nr.
Antragsteller:	MEIER + Co AG	Bergstr. 253	8032 Zürich	
Eigentümer:	do.			
Objekt:	Energieversorgung Maschinensaal			
Gerätelieferant:	Ateliers Mécaniques		1200 Genève	

Oberschwingungen verursachende Geräte und Anlagen

Anschluss an: ☐ NS-Netz 400 V ☐ MS-Netz kV
Anschlussart: ☐ L-N ☐ L-L-N ☐ L1-L2-L3-N

☐ Beleuchtungsanlage (Wechselstromsteller) ☐ Glühlampen ☐ Leuchtstoffröhren
☐ Gleichrichter ungesteuert ☒ Frequenzumrichter
☐ Gleichrichter gesteuert ☐

Vorsteller auszufüllen

Daten der Geräte / Anlage: Anzahl	Typ	Nenn-/ Anschluss-leistung kVA	Puls-zahl	Verbraucher (Lastkreis): Bezeichnung der Last	Nenn-/Anschl.-leistung Total kVA		Betriebs-dauer/Tag in Stunden
1	ATV-452-VD20	20	6	Ventilatormotor	20	20	6

Spannungsänderungen verursachende Geräte und Anlagen *1) siehe Erläuterungen*

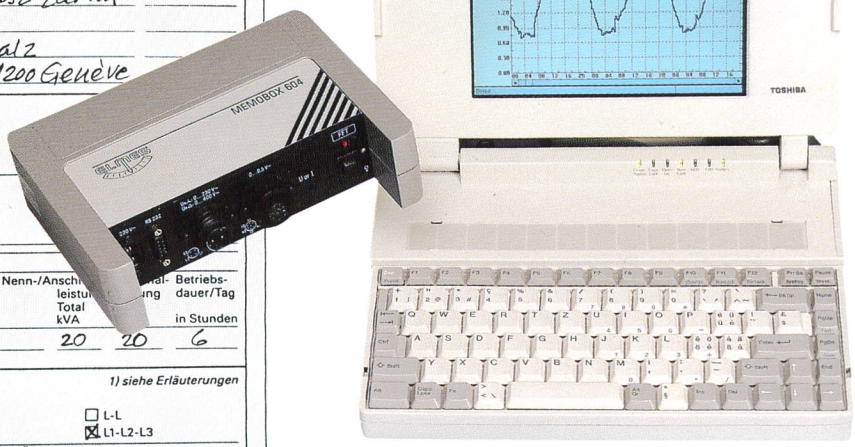
Anschluss an: ☐ NS-Netz V ☐ MS-Netz kV
Anschlussart: ☐ L-N ☐ L-L-N ☐ L1-L2-L3-N ☐ L-L ☒ L1-L2-L3

☐ Schweissmaschine
Art der Schweissung:
Max. Schweissleistung S_{max} kVA
oder
Kurzschlussleistung S_{cc} kVA

☒ Motor
Art des Motors: Käfiganker
Nennleistung 20 kW
Nennstrom 30 A
Max. Anlaufstrom 50 A

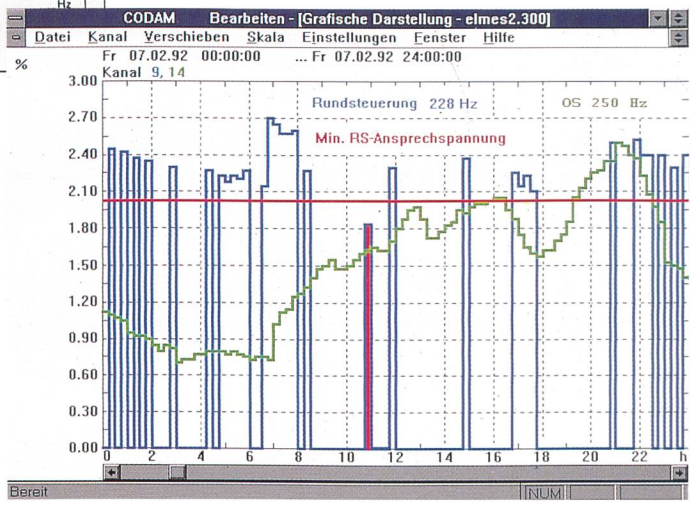
☐ Übrige Geräte und Anlagen (z.B. Schwingungspaket-Steuerung)
Art der Last:
Nenn-/Anschlussleistung (Gerät) kVA
Max. Leistung (Last) kVA
cosφ 1)

Dieses Anschlussgesuch ersetzt die Installeingabe nicht.



Kontinuierliche Erfassung der Oberschwingungspegel über mehrere Tage

Kontrolle von Anschlussgesuchen



Überwachung der Rundsteuerungssignale, Lokalisierung von Störquellen

☐ Wir möchten es genauer wissen. Bitte informieren Sie uns ausführlicher über die Analyse von Netzverzerrungen mit der neuen **MEMOBOX 604** zur Erfassung der Oberschwingungen.

Firma

zuständig

Adresse

PLZ/Ort

Tel.

Fax

SEV

Nicht frankieren
Ne pas affranchir
Non affrancare

Geschäftsantwortsendung Invio commerciale-risposta
Correspondance commerciale-réponse

LEM ELMES AG
Systeme für die Messtechnik
Bergstrasse 43
8805 **Richterswil**

Verlangen Sie ausführliche Unterlagen!

LEM ELMES AG
Systeme für die Messtechnik
Bergstrasse 43
CH-8805 **Richterswil**
Telefon (..41) 01-784 22 22
Fax (..41) 01-784 64 07

ELMES VERKAUFS GmbH
Mess- und Regeltechnik
Genfer Strasse 6
D-6000 **Frankfurt/Main** 50
Telefon (..49) 069-507 28 28
Fax (..49) 069-507 14 48