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: 75 (1984)

Heft: 12

Artikel: Automation in elektrischen Verteilnetzen : wirtschaftlich machbar oder ein Wunsch?

Autor: Lutz, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904419

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: 24.08.2025

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

Automation in elektrischen Verteilnetzen: Wirtschaftlich machbar oder ein Wunsch?

E. Lutz

Die Betriebsführungsaufgaben und die heutige Führung von elektrischen Verteilnetzen bilden den Hintergrund, vor dem ein zukünftiges System zur Verteilnetzautomation (VNA) beschrieben wird. Anhand der hypothetischen Implementation eines VNA-Systems im Verteilnetz eines mittelgrossen, regionalen Elektrizitätswerkes wird eine Kosten-Nutzen-Analyse gemacht. Das Ergebnis zeigt, dass auch unter Worst-Case-Bedingungen drei Viertel der Investitionen sowie die Betriebskosten des VNA-Systems durch den messbaren Nutzen getragen werden. Unter Berücksichtigung der jeweils spezifischen Gegebenheiten dürften VNA-Systeme bereits heute selbsttragend sein.

Les tâches de la conduite actuelle de réseaux de distribution d'énergie électrique sont la base de la description d'un futur système d'automatisation de réseaux. On procède à une analyse du coût et bénéfice d'un tel système pour une entreprise électrique régionale moyenne. Le résultat montre que, même dans les conditions les plus défavorables, les trois quarts des investissements ainsi que des frais d'exploitation du système d'automatisation sont compensés par son utilité réelle. Compte tenu des conditions particulières de chaque entreprise électrique, on peut affirmer que l'application de tels systèmes est d'ores et déjà justifiée.

Dieser Aufsatz ist eine überarbeitete Darstellung des Vortrages im Rahmen des Kolloquiums über «Aktuelle Probleme der Energietechnik» vom 17. Januar 1984 an der ETHZ.

Adresse des Autors
Emil Lutz, El.-Ing. HTL, LGZ Landis & Gyr Zug AG, 6301 Zug.

1. Einleitung

Verteilnetzautomation (VNA) ist ein Schlagwort, unter dem man sich verschiedenes vorstellen kann, z.B.:

- Einsatz von Schutzrelaissystemen zur automatischen Freischaltung fehlerbehafteter Mittelspannungsnetzteile (z.B. Staffelschutz),
- Einsatz der Rundsteuerung zur besseren Ausnutzung der verfügbaren Energie (Tag/Nacht) bzw. automatische Lastkontrolle zur Vermeidung von Leistungsspitzen,
- Automatisierung der Zählerablesung bei den Abnehmern im Zuge der vollständigen Automatisierung der Verrechnung,
- Rechnergestützte Netzplanung für die Grundstruktur des Netzes sowie für dessen lastabhängigen Ausbau über grosse Zeiträume von 20 bis 30 Jahren.

Alle genannten Applikationen sind Aspekte der VNA, die bestimmte Problemkreise ansprechen und lösen. Um eine klare Ausgangsbasis zu schaffen, sollen zuerst die Probleme der Betriebsführung im weitesten Sinne des Wortes erfasst und anschliessend die Automation der Verteilnetzführung behandelt werden.

2. Problemstellung bei der Führung von Verteilnetzen

2.1 Grundsätzliches

Als Ausgangspunkt zur Definition der Probleme werden die wichtigsten Anforderungen der Abnehmer und der Energieverteilungsunternehmen (EVU) aufgelistet. Aus der Sicht der Abnehmer stehen folgende Anforderungen im Vordergrund:

- Verfügbarkeit der gewünschten Leistung und Energie,
- Lieferung der Energie mit guter Qualität (u, f),
- Hohe Versorgungssicherheit, Zuverlässigkeit,
- Preisgünstige Energie.

Die Gewichtung dieser Anforderungen fällt natürlich bei den Abnehmerkategorien Industrie, Handel, Gewerbe, Landwirtschaft und Haushalt unterschiedlich aus. Aus der Sicht der EVU stehen folgende Anforderungen im Vordergrund:

- Volle Ausschöpfung der Möglichkeiten des Vertrags mit dem Energielieferanten bzw. der eigenen Produktion,
- Möglichst gute Ausnutzung der installierten Netzkapazität,
- Reduktion der Netzverluste,
- Gute Versorgungssicherheit (Zuverlässigkeit),
- Wirtschaftlicher Auf- und Ausbau des Verteilnetzes (Investitionen),
- Senkung der Betriebskosten durch sinnvolle Automation,
- Erzielung eines angemessenen Gewinns.

Die Gewichtung der Anforderungen hängt von der Art und Grösse des EVU ab. Ferner muss in Betracht gezogen werden, dass beim heutigen Stand der Verteilnetztechnologie die Netze während langer Zeitperioden störungsfrei arbeiten und nur für relativ kurze Zeitabschnitte in Teilbereichen gestört sind. Die resultierenden Aufgaben sind in die vier Führungsbereiche Betrieb, Unterhalt, Bau und Planung gegliedert und sind stichwortartig in Tabelle I zusammengefasst.

2.2 Betriebsführungsaufgaben

Im folgenden einige Bemerkungen zu den in Tabelle I aufgelisteten Betriebsführungsaufgaben.

Wirtschaftliche Aspekte: Oft kaufen die EVU den grössten Teil der an die Abnehmer gelieferten Energie von Dritten, mit denen die Lieferbedingungen vertraglich geregelt sind. Die Verträge basieren gewöhnlich auf zwei Komponenten, nämlich Leistung und Energie. Die Leistungskomponente (vertragliche Leistung × Leistungspreis) ist fix, solange die Leistung nicht überschritten wird. Bei einer Überschreitung dagegen treten erhebliche Mehrkosten auf. So könnte z.B. für die kommenden 12 Monate die auf

Zusammenstellung der Betriebsführungsaufgaben Tabelle I

Führungsbereich / Systemelemente	Betrieb	Unterhalt	Bau (Neubau und Erweiterung)	Planung
Energielieferant Eigenproduktion	*Energiefahrplan-überwachung* Leistung Energie	Kraftwerke		Energiefahr-plan Unterhalt Ausbau
Zukauf Energie	*Vertragsüber-wachung* Leistung Energie			Vertrags-bedingungen
Verteil-unterwerke	*Normalbetrieb* Überwachung Optimierung *Störung* Fehlerfrei-schaltung Umschaltungen Reparatur Restauration	Verteilunterwerke		Ausbau Unterhalt
Energieverteilung	*Ungestörtes Netz* Überwachung Optimierung *Gestörtes Netz* Fehlerlokalisierung Fehlerfreischaltung Netzumschaltung Reparatur Netzrestauration	MS-Leitung Schaltstationen Trafostationen NS-Leitungen Verteilkabinen Trennkabinen		Ausbau Unterhalt
Energieabnehmer Industrie Handel Gewerbe Landwirtschaft Haushalte	*Tarifsteuerung* Leistung Energie *Laststeuerung* *Verrechnung* Abnehmerdatei Zählerablesung Rechnungs-erstellung	Rundsteueranlagen Rundsteuer-empfänger *Verrechnungsapparate* Zähler Registriergeräte Uhren Auswertesysteme für Registriergeräte EDV-Anlagen		*Lastvorhersage* Kurzfristig Mittelfristig *Lastwachstum* Mittelfristig Langfristig *Tarife* *Laststeuerung* Lastgruppen-struktur Schalt-programme

der Überschreitung basierende Leistungskomponente verrechnet werden. Die Energiekomponente (gelieferte Energie × Energiepreis) kann einen gestaffelten Energiepreis enthalten.

Aus diesen Gründen können bei Verletzung der Vertragsbedingungen für das EVU grosse zusätzliche, nicht budgetierte Betriebskosten resultieren. Deshalb haben in den Führungsbereichen Betrieb und Planung die folgenden Aufgaben eine dominierende Bedeutung:

- Energiefahrplanüberwachung für Eigenproduktion,
- Vertragsüberwachung bei Energiezukauf,
- Kurz- und mittelfristige Lastvorhersage,
- Laststeuerung beim Abnehmer über die Rundsteuerung.

Für das Aushandeln der meist langfristigen Lieferverträge spielt im Führungsbereich Planung die Aufgabe Lastwachstum (mittel und langfristig) eine wichtige Rolle. Als Vorgabe benötigt man dazu unter anderem:

- Wirtschaftliche Entwicklungsprognosen der Region,
- Prognosen über das Verbrauchsverhalten der Abnehmerkategorien,
- Statistische Daten über die Abnehmerkategorien.

Ausgehend vom Gesamtaufwand, in dem die Energiebeschaffungskosten den Hauptanteil ausmachen (etwa 60%), sind die Tarife für die Abnehmerkategorien so festzulegen, dass aus den Einnahmen einerseits die Betriebskosten und die Investitionsmittel für den Ausbau und anderseits ein angemessener Gewinn bereitgestellt werden können. Die entsprechenden Vorgaben kommen aus dem Führungsbereich Planung als Resultate der Aufgaben Tarife und Lastwachstum.

Operationelle Aspekte: Die Verteilnetze für Mittel- und Niederspannung stellen grosse Investitionen dar, die möglichst gut eingesetzt und genutzt werden müssen. Ein effizienter Betrieb durch Reduktion der Verluste ist anzustreben. Deren Kosten belaufen sich auf etwa 4000 Fr. bezogen auf 1% Verlust, 1 MW Spitze und 1 Jahr.

Die thermischen Verteilnetzverluste, auf deren Konto der Hauptanteil der Verluste geht, verlaufen quadratisch mit dem Strom und betragen etwa 5%. Eine wesentliche Reduktion kann durch eine möglichst gleichmässige Belastung der Unterwerke, Leitungen, Trafostationen und Stränge, erzielt werden. Daher kommen im Führungsbereich Betrieb den Optimierungsaufgaben in Unterwerken und im Verteilnetz eine wachsende Bedeutung zu.

Eine rasche Behebung von Störungen ist, obwohl diese nur sehr selten auftreten, eine vordringliche Aufgabe, und zwar aus psychologischen und wirtschaftlichen Gründen.

Im Durchschnitt sind pro Abnehmer und Jahr drei Versorgungsunterbrüche von mehr als 2 min Dauer bzw. pro Abnehmer und Jahr eine kumulierte Unterbruchsdauer von durchschnittlich 2,5 h zu verzeichnen, die volkswirtschaftliche Verluste von durchschnittlich 5 Fr. für jede nichtgelieferte Kilowattstunde verursachen. Ziel ist, die Anzahl von 3 auf 1,5 und die kumulierte Dauer von 2,5 auf 1 h herabzusetzen.

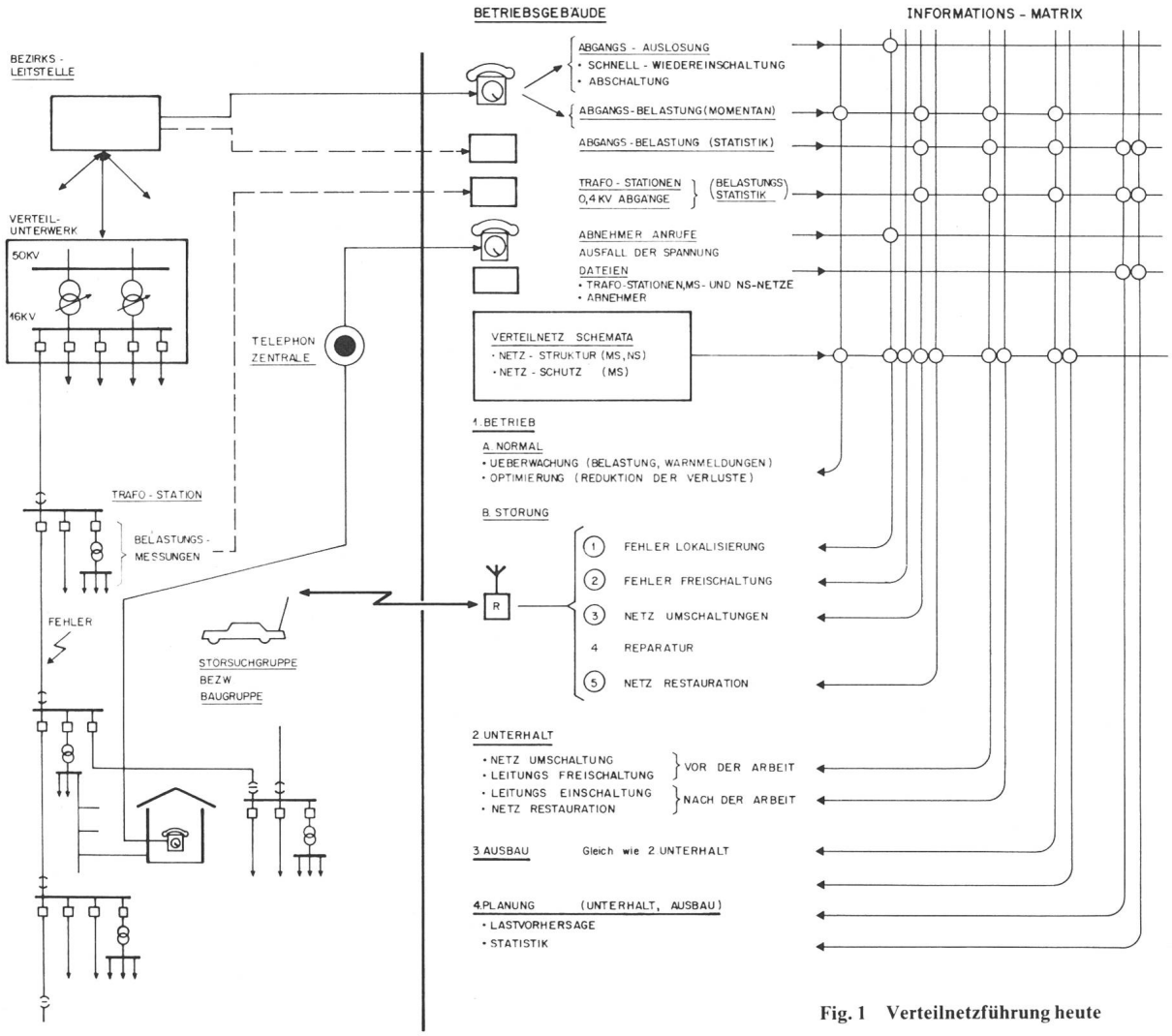

Fig. 1 Verteilnetzführung heute

Obwohl das Konzept der volkswirtschaftlichen Verluste nicht unumstritten ist, ergeben die abnehmerkategoriebezogenen Zahlen Richtwerte für eine Kosten-Nutzen-Analyse. In Fällen, wo Versorgungsunterbrüche zu extremen Schäden bzw. Gefahren führen können, sind entsprechende Massnahmen, wie Mehrfacheinspeisung bzw. Notstromversorgung, vorzusehen.

Die Überwachung der Betriebsmittel hilft Schäden zu vermeiden bzw. beginnende so frühzeitig zu erkennen, dass daraus keine katastrophalen Schäden wie z.B. Brand eines Transformators oder Explosion eines Ölschalters entstehen.

3. Betriebsführung heute und in der Zukunft

Die Art und Weise, wie der Betrieb von Verteilnetzen gestaltet ist und wie die Netze geführt werden, hängt von der Art und Grösse des EVU (Gemeinde-, städtisches oder regionales EW) sowie vom Versorgungsgebiet und der Netzauslegung (Abnehmer-Mix, Netzstruktur, Netzschutz) ab.

Die Betriebsführung, wie sie heute implementiert ist, ist eine über Jahrzehnte gewachsene Organisation, geprägt von den zu lösenden Problemen, aber auch von den Persönlichkeiten des EVU-Managements.

3.1 Verteilnetzführung heute

Wegen der oben begründeten Vielfalt werden hier nur die grundsätzlichen Betriebsführungsaspekte angesprochen (Fig. 1). Das Führungszentrum ist das Netzbüro im Betriebsgebäude mit den in Figur 1 aufgelisteten Hilfsmitteln. Die Kommunikation basiert auf dem Betriebsfunk zur Verbindung mit Störungssuch- und Baugruppen im Verteilnetz sowie dem öffentlichen Telefonnetz für die Anrufe von Abnehmern (Störungsmeldungen) bzw. zur Kommunikation mit der Bezirks- oder Netzleitstelle.

Im Zentrum der Informationsmatrix steht der Mensch, der die ankommenden Informationen aufnimmt und in Aktionen zur Führung des Verteilnetzes verarbeitet (Betrieb, Unterhalt, Bau und Planung). Während der normalen Arbeitszeit erfolgt die Netzführung vom Netzbüro aus. In der übrigen Zeit übernimmt der Pikettdienstleiter, meist von seinem Wohnort aus, die Behandlung von allfälligen Störungen. Für diese Aufgaben stehen ihm nur ein Teil der Hilfsmittel zur Verfügung (Verteilnetzschemata, Betriebsfunk, öffentliches Telefonnetz). Bei grossen Netzstörungen muss er daher ins Netzbüro gehen.

Unterhalt, Bau und Planung für das Mittelspannungsnetz werden meist zentral durchgeführt, während dieselben Aufgaben für das in Kreise aufgeteilte 0,4-kV-Niederspannungsnetz von den Kreisleitern ausgeführt werden.

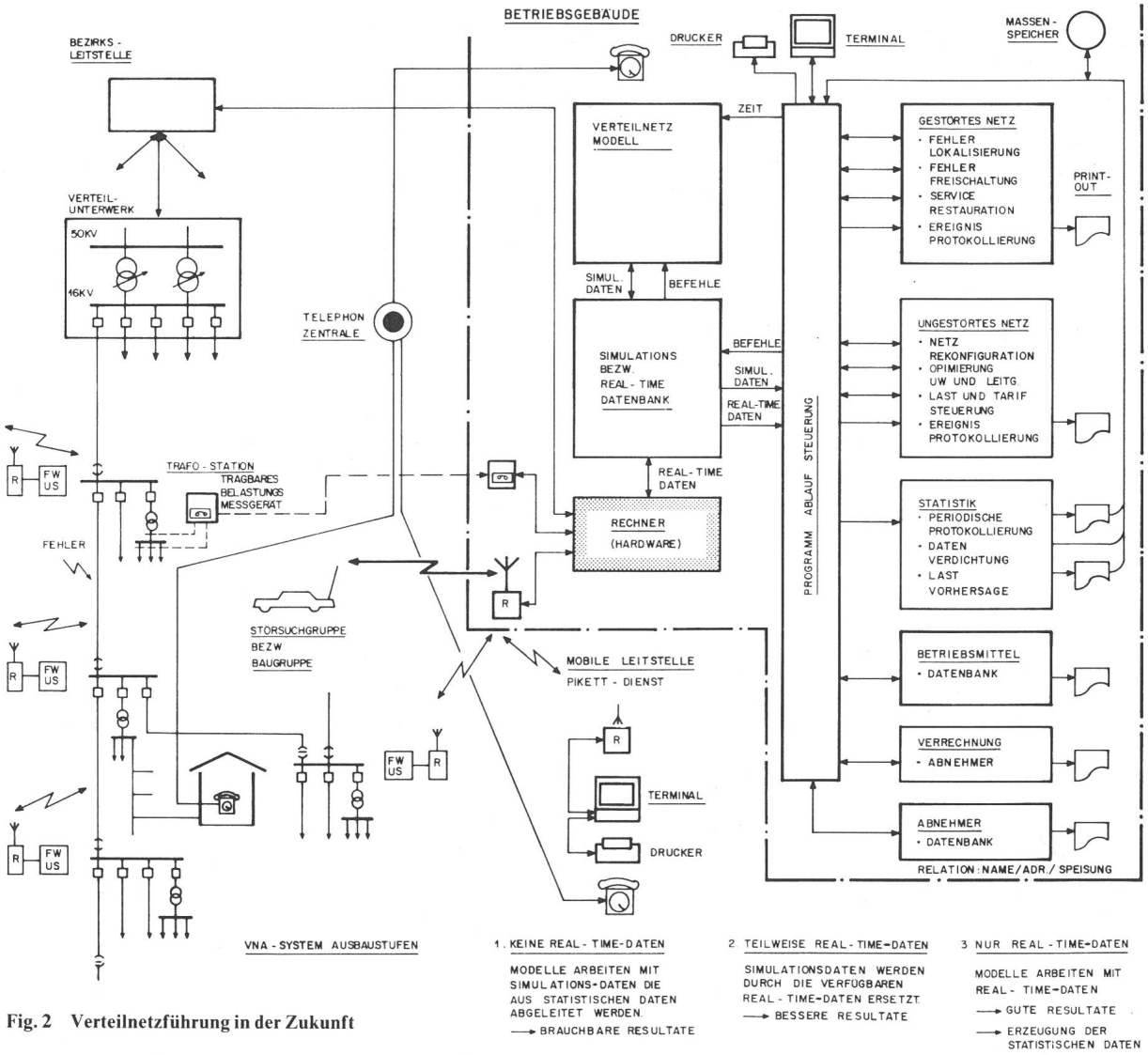

Fig. 2 Verteilnetzführung in der Zukunft

3.2 Verteilnetzführung in der Zukunft

Die rasche Entwicklung der Kommunikationstechnologie und Informatik ermöglichen in der nahen Zukunft wirtschaftliche Lösungen zur Automatisierung der Verteilnetzführung (Fig. 2). Die Schwerpunkte liegen dabei auf folgenden Gebieten:

- Überwachung und Steuerung von Betriebsmitteln an strategisch wichtigen Punkten des Mittelspannungsnetzes, z.B. Leitungsschalter in Netzknoten (Trafostationen) und an Netzkuppelstellen,
- Überwachung von Verteiltransformatoren (Belastung und Warnmeldungen),
- Kommunikation mit Fernwirkgeräten an diesen Stellen über EVU-eigene Signalkabel, Betriebsfunk, Lichtleiterkabel usw.,
- Erfassung der Belastungsdaten von Verteiltransformatoren und 0,4-kV-Strängen anlässlich von Netzmesstagen,
- Automatisierung von Verarbeitungsfunktionen in der Informationsmatrix (Fig. 1) wie Überwachung des Energieliefervertrages (Laststeuerung), Reduktion der Netzverluste (Optimierung), Beschleunigung der Störungsbehandlung, Bereitstellung von statistischen Daten für die Netzausbauplanung, Netzberechnungen für die Netzausbauplanung und Ausbau der Hilfsmittel für den Pikettdienstleiter zur effizienteren Störungsbehandlung.

Die anvisierten Lösungen müssen Schnittstellen zu anderen, bereits existierenden Systemen, wie Bezirksleitstellen, Rundsteueranlagen und EDV-System, zur Verfügung stellen. Ebenso müssen diese Lösungen in verschiedenen aufwärtskompatiblen Leistungsstufen den Bedürfnissen der EVU angepasst werden können.

4. Systemkonzept zur Automatisierung der Betriebsführung

Die Konzepte für die Verteilnetzautomation variieren beträchtlich zwischen den einzelnen EVU. Dafür massgebend sind die technischen und operationellen Anforderungen, die Struktur der Organisation sowie die subjektive Beurteilung der Betriebsführungs-Philosophie.

In dieser Situation ist es nicht möglich, ein Standard-VNA-System zu konzipieren. Die Lösung liegt vielmehr in einem modularen System, dessen Kern die Basis für die Realisierung eines breiten Spektrums von anwenderspezifischen Problemlösungen bildet. Zu zweckmässigen und wirtschaftlichen Lösungen führt die folgende Aufteilung in drei Teilsysteme

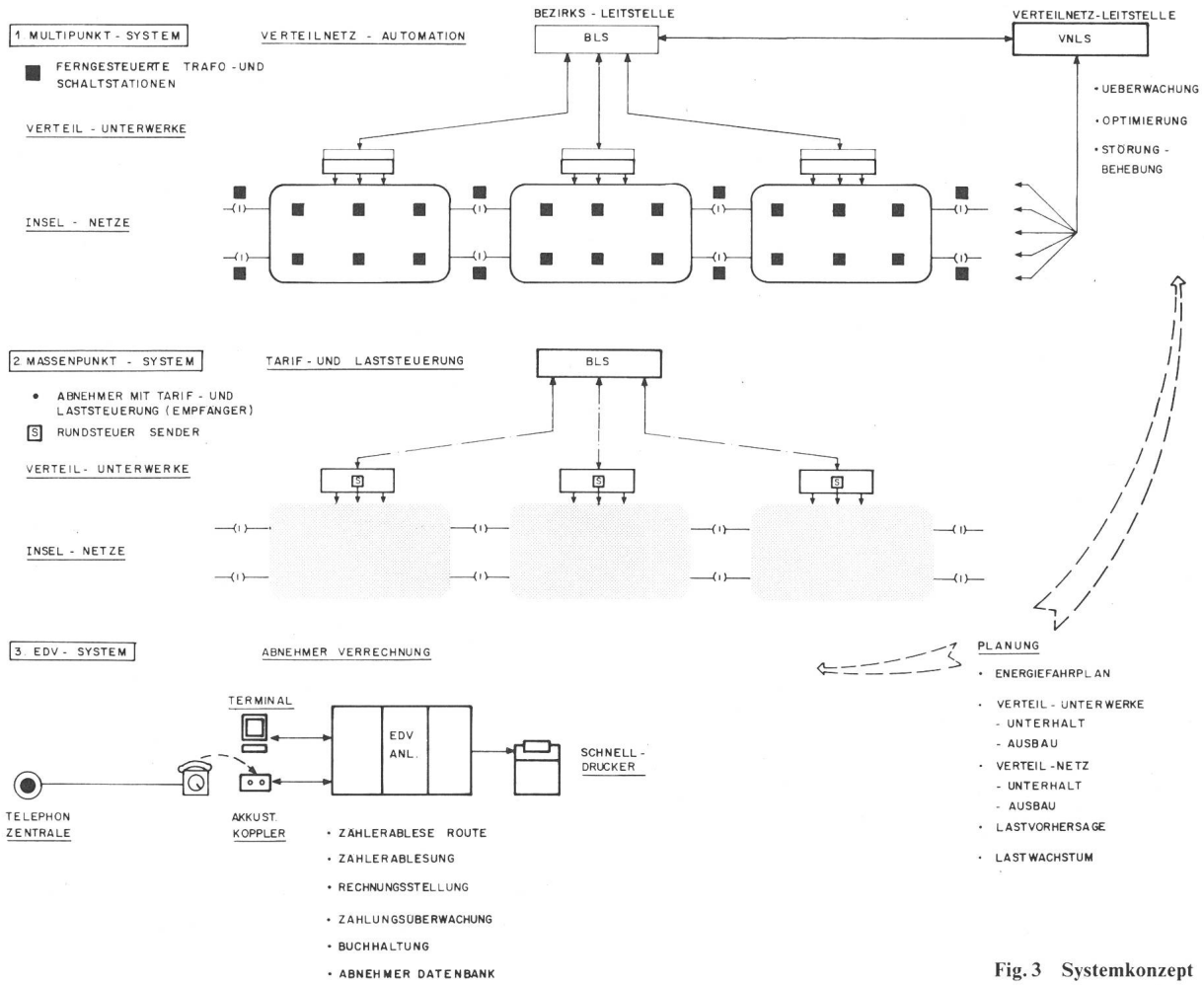

Fig. 3 Systemkonzept

(Fig. 3), von denen jedes wieder modular strukturiert ist:

- Ein *Multipunkt-System* zur Verteilnetzführung und -automation. In grossen EVU existiert meist ein Führungssystem mit Netz- und Bezirksleitstellen zur Führung der Produktion, des Hochspannungsnetzes und der Verteilunterwerke. Die Verteilnetzführung ist dann zweckmässig in das existierende Führungssystem zu integrieren.
- Ein *Massenpunkt-System* für Tarif- und Laststeuerung, typischerweise ein Rundsteuersystem.
- Ein *EDV-System* für die Verrechnung der von den Abnehmern bezogenen Energie und Leistung.

Die Aufgaben des Führungsbereiches Planung können sowohl im System Verteilnetzführung als auch im EDV-System implementiert werden. Welche Lösung gewählt wird, hängt weitgehend von der Grösse und Organisation des EVU sowie von der Leistungsfähigkeit des EDV-Systems ab.

Im folgenden wird nur noch das Multipunkt-System zur Verteilnetzführung und -automation betrachtet. Das Lösungskonzept basiert auf der Strategie, mit relativ wenigen und einfachen Geräten, die im Verteilnetz unter harten klimatischen Bedingungen arbeiten müssen, und einer leistungsfähigen Intelligenz in der Leitstelle, ein zuverlässiges Führungssystem mit hoher Verfügbarkeit zu realisieren, d.h.:

- Überwachung und Steuerung von relativ wenigen, strategisch wichtigen Schaltern im Verteilnetz, nämlich der Leitungsschalter zur Sektionalisierung der gestörten Leitungen und der Kuppelschalter zur Servicerestaurierung von gesunden Leitungsteilen.

- Datenerfassung an wenigen, wichtigen Punkten im Verteilnetz, d.h. an den Abgängen in den Verteilunterwerken (Leistung oder Strom) und den grossen Transformatorstationen (Leistung oder Strom).
- Überwachung wichtiger Betriebsmittel im Verteilnetz, z.B. grosser Verteiltransformatoren (Warnsignale).
- Verarbeitung der oben genannten Informationen mit einem Rechner in der Verteilnetzleitstelle zu aussagefähigen Daten für die Betriebsführung und Verteilnetzautomation:
  - Lastverteilung im Netz
    → Reduktion der Verluste
  - Netztopologie
    → Automatische Fehlerbehandlung
  - Datenpräsentation
    → Netz- und Teilnetzbilder
  - Ereignisprotokollierung
    → Betriebstagebuch
  - Datenreduktion
    → Statistik

In dieser Lösung spielen neben Datenbanken Modelle eine dominierende Rolle. Mit ihnen werden aus den relativ wenigen Real-Time-Daten alle für die Betriebsführung und Automation relevanten Werte berechnet. Wesentlich komplexere Modelle werden in Transportnetzen zur Berechnung des Lastflusses herangezogen.

Beispiel: EVU-Daten (1981) Tabelle II

1. Allgemeines		*2. Verteilunterwerke*	
Art des EVU:	Regional, mittelgross	Unterwerke:	13 UW (∅53 MVA)
Spitzenleistung:	210 MW	Installierte Leistung:	693 MVA
Energielieferung:	989 GWh	Anzahl Leitungsabgänge:	85
Umsatz:	115,8 Mio sFr. (∅11,71 Rp./kWh)	Mittlere Leitungslänge:	16,4 km

3. Mittelspannungsnetz 20/17/13/5 kV (Umbau auf 20 kV)		*4. Netzverluste (allgemeine Angaben)*	
Freileitungen:	1104 km	Mittelspannungsnetz:	1,6–2,0%
Kabeleitungen:	292 km	Verteiltransformatoren:	1,0–1,6%
Niederspannungsnetz 0,4 kV		Niederspannungsnetz:	1,5–2,0%
Freileitungen:	1769 km	Total Verluste:	4,1–5,6%
Kabelleitungen:	900 km		

5. Transformatorstationen	*Anzahl*	*Inst. Leitung*	*Durchschnitt*
EVU	1 398	306,5 MVA	∅ 220 kVA
Stangenstationen: 568			
Kabinenstationen: 469			
Gebäudestationen: 361			
Abnehmer	57	129,5 MVA	∅ 2300 kVA
Total	1 455	436,0 MVA	

6. Abnehmer, Kategorie	*Anzahl*	*Einwohner*	*Energie (GWh)*
Industrie	50	0	196,9
Gemeinden mit Erzeugung	4	25 466	53,5
Gemeinden ohne Erzeugung	6	52 568	199,0
Niederspannung	74 720	144 036	478,1
Total	74 780	222 070	927,5

5. Implementierung eines Verteilnetzführungssystems

Als Beispiel für die Implementierung wird ein mittelgrosses, regionales EVU angenommen. Die entsprechenden Daten sind in der Tabelle II zusammengestellt.

5.1 Zielsetzung

Mit dem System sollen die folgenden operationellen Ziele erreicht werden:

1. Reduktion der Dauer der Versorgungsunterbrüche durch Fernsteuerung strategisch wichtiger Schalter im Verteilnetz.
   - *Störungsbedingte Unterbrüche*[1]*):* Reduktion der Unterbrechungszeit um 50% von 1 h 44 min auf 52 min,
   - *Arbeitsbedingte Unterbrüche*[1]*):* Vor Beginn der Arbeit Rekonfiguration des Netzes und Freischaltung des entsprechenden Leitungsabschnitts, nach Beendigung der Arbeit Einschaltung des entsprechenden Leitungsabschnittes und Netzrestauration. Reduktion der Unterbrechungszeit um 0,5 h von 1 h 48 min auf 1 h 18 min, d.h. um 27,8%.
2. Reduktion der nichtgelieferten kWh als Folge der Verkürzung der Versorgungsunterbrüche.
   - *Störungsbedingte Unterbrüche*[1]*):* Reduktion um 50% von 92 240 kWh auf 46 120 kWh,
   - *Arbeitsbedingte Unterbrüche*[1]*):* Reduktion um 27,8% von 93 670 kWh auf 67 650 kWh.

[1]) Durchschnittswerte 1979–1981

5.2 Verteilnetz

Das Verteilnetz hat eine vermaschte Struktur, wird aber radial betrieben. Die Leitungen sind thermisch so dimensioniert und die Schutzrelais entsprechend eingestellt, dass im Störungsfall eine Leitung die gesamte Last einer anderen übernehmen kann. Für das rasche und grobe Eingrenzen von Störungen werden die folgenden, strategisch wichtigen Schalter ferngesteuert:

- Pro Leitung ein Leitungsschalter, der die Leitung etwa in zwei gleich lange Leitungsabschnitte unterteilt.
- Kuppelschalter, die die Verbindung zwischen zwei Leitungen gestatten.

Für das genaue Lokalisieren der Störung dienen mehrere, handbetätigte Leitungstrenner innerhalb eines Leitungsabschnittes. Mit dieser Konzeption kann die Verteilnetzleitstelle sofort den gestörten Leitungsabschnitt feststellen und freischalten sowie über einen Kuppelschalter den gesunden Leitungsabschnitt speisen (Netzrekonfiguration). Über den Betriebsfunk wird dann die Verteilnetzleitstelle in Zusammenarbeit mit der Störsuchgruppe die Störung auf dem fehlerhaften Leitungsabschnitt weiter eingrenzen und durch Öffnen der beiden benachbarten Leitungstrenner isolieren. Damit wird der Versorgungsunterbruch für die Mehrzahl der von dieser Leitung versorgten Abnehmer auf 5 bis 30 min begrenzt.

5.3 Verteilnetzführungssystem

Die gesamte Netzführungsstruktur ist in Figur 4 dargestellt. Die beiden Bezirksleitstellen BLS 1 und BLS 2 zur Führung der Verteilunterwerke sowie die Netzleitstelle NLS mit Dispatching-Aufgaben für Eigenproduktion und Energiezukauf existieren bereits. Soweit die Gegebenheiten bei diesem EVU.

Als Basis für die Kosten-Nutzen-Betrachtungen wird nun ein hypothetisches Verteilnetzführungssystem implementiert. Es besteht aus:

- 2 Verteilnetzleitstellen VNLS 1 und VNLS 2
- 2 tragbaren Pikettdienststationen
- 128 Verteilnetzunterstellen

Dieses System ist in das bestehende EVU-Netzleitsystem zu integrieren, und zwar sowohl organisatorisch als auch informationsmässig. Organisatorisch betrifft dies hauptsächlich die Zuständigkeit für das Schalten der Mittelspannungsabgänge in den Verteilunterwerken, informationsmässig die folgenden Real-Time-Daten pro

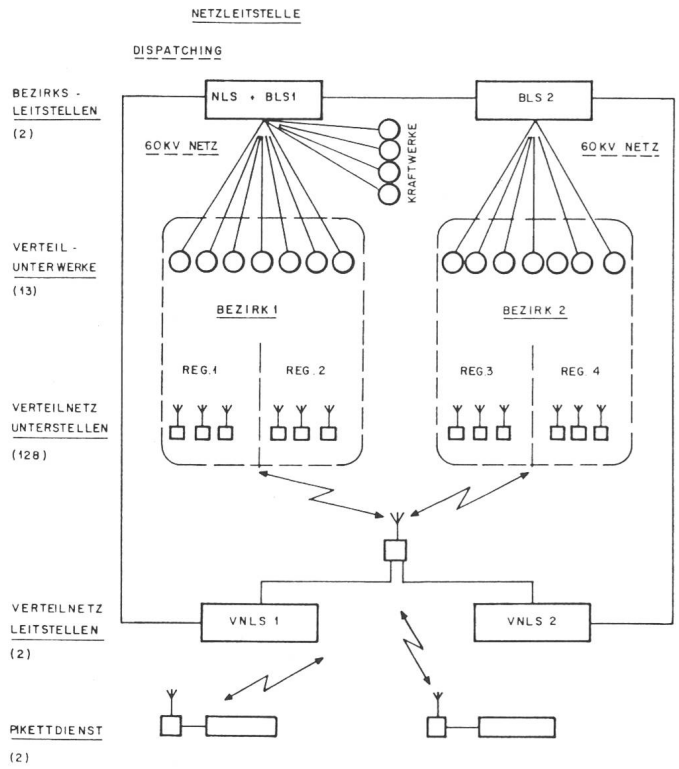

Fig. 4
Netzführungsstruktur

Mittelspannungsabgang: Leistungsschalter (Stellung), Belastung (Strom) und Schutz (Erdschlussrelais). Kommunikationsmässig sind Verbindungen zwischen Verteilnetz- und Bezirksleitstellen zu schaffen sowie von den Verteilnetzleitstellen zum Betriebsfunksystem.

In kleineren EVU mit Spitzenwerten von 10 bis 50 MW, z.B. in Gemeindewerken, ist die Situation wesentlich einfacher, indem nur eine Verteilnetzleitstelle notwendig ist. Die Verteilunterwerke gehören oft dem Energielieferanten. Aus diesen wird das EVU auf der Mittelspannungsebene mit 2 bis 10 Abgängen gespeist. Ob Real-Time-Daten von den Abgängen verfügbar sind, hängt von der fernwirktechnischen Ausrüstung des Energielieferanten ab.

6. Kosten-Nutzen-Betrachtungen

Für das zugrundeliegende Beispiel wurden die Kosten eines VNA-Systems abgeschätzt; sie sind aus Tabelle III ersichtlich.

Der erzielbare Nutzen kann in die beiden Kategorien messbarer Nutzen, dessen Wert in Geld angegeben werden kann, und nicht direkt erfassbarer Nutzen, dessen Wert nicht in Geld angegeben werden kann, aufgeteilt werden. Im weiteren hängt die Grösse des Nutzens von den Gegebenheiten eines EVU ab, wie z.B. Vertragsbedingungen für Energiezukauf, Struktur der Verteilnetze, Dimensionierung der Verteilnetze, Topologie des Versorgungsgebietes sowie Art, Grösse und Anzahl der Abnehmer (Abnehmer-Mix).

In diesem Sinne können die folgenden Angaben nur als Richtwerte betrachtet werden. Bei allen weiteren Betrachtungen wird bewusst der schlechteste Fall angenommen (worst case), um die untere Grenze der Wirtschaftlichkeit sichtbar zu machen.

6.1 Messbarer Nutzen

Reduktion der Verluste: Als Richtwert kann die Zahl von Fr. 4000.– pro 1% Verlust, 1 MVA Spitzenleistung und ein Jahr angenommen werden. Wenn man von der Annahme ausgeht, dass sich durch gleichmässigere Belastung der Betriebsmittel die Verluste um 0,2% absolut senken lassen, so resultiert daraus eine jährliche Einsparung von Fr. 168 000.–.

Reduktion der nichtgelieferten kWh: Hier geht es um zwei Aspekte, nämlich einerseits um einen Umsatzverlust des EVU und anderseits um Verluste der Volkswirtschaft.

In der Zielsetzung (5.1.2) wurde gefordert, diese Verluste um total 72 140 kWh zu reduzieren. Bei einem jährlichen Energieumsatz von 988 GWh bedeutet dies lediglich eine Umsatzverbesserung von 0,07‰ oder Fr. 8430.–.

Volkswirtschaftliche Verluste: Es wird davon ausgegangen, dass arbeitsbedingte, also geplante Versorgungsunterbrüche auch den Abnehmern bekannt sind. Damit können sie entsprechende Massnahmen treffen, um Verluste zu vermeiden. Störungsbedingte Unterbrüche dagegen treffen die Abnehmer unvorbereitet und führen daher zwangsläufig zu Verlusten. Allerdings treten nicht alle Störungen während der Arbeitszeit auf, so dass lediglich ein Teil der nicht gelieferten kWh zu volkswirtschaftlichen Verlusten führt. Nimmt man dafür 50% an, so errechnet sich aus der geforderten Reduktion von 50% (5.1.2) ein Nutzen von Fr. 115 300.–, den die Abnehmer gewinnen. Es wäre daher durchaus vertretbar, die Aufwendungen des EVU über den Preis der kWh auf die Abnehmer zu verlagern. In diesem Beispiel würde sich eine Verteuerung der kWh um 1‰ ergeben.

Aufschub von Investitionen: In der Regel sind die Unterwerke (Transformatoren) und das Verteilnetz aus Gründen der Betriebssicherheit stark überdimensioniert. Im Störungsfall, d.h. bei Ausfall *eines* Betriebsmittels, dürfen keine Überlastungen der restlichen Betriebsmittel auftreten. Diese

Kostenabschätzung für VNA-System, Beträge in 1000 sFr. Tabelle III

Investitionen		Total
Verteilnetz		
128 Freiluftschalter Schalter, Schalterantrieb, Montage		1664
Fernwirksystem		
2 VNA-Leitstellen		
2 Pikettdienstgeräte		
128 VN-Unterstellen		
Total Fernwirksystem		1252
Total Investitionen		2916
Betriebskosten	**Pro Jahr**	**Über 15 Jahre**
128 Radiokonzessionen Kat II (PTT)	6,1	
Service und Unterhalt des Fernwirksystems (5% der Investitionen)	62,6	
Total Betriebskosten	68,7	1030

Philosophie ist verständlich, da das Verteilnetz nicht überwacht wird.

Mit dem Verteilnetzführungssystem stehen nun aber Mittel zur Verfügung, um das Netz zu überwachen und damit näher an der Kapazitätsgrenze zu fahren, ohne dabei die Betriebssicherheit zu tangieren. Die verfügbare Information erlaubt:

- Frühzeitiges Erkennen von potentiellen Problemen und Gefahren,
- Rasche Reaktion auf sich abzeichnende Überlastungen (Netzrekonfiguration),
- Lastverlagerung im Störungsfall, um das Verteilnetz trotzdem sicher zu betreiben (Netzrekonfiguration).

Dadurch können grössere Ausbauinvestitionen oft um Jahre verschoben werden. Den entsprechenden Nutzen, d.h. die Einsparung von Kapitalzinsen und Abschreibungen, muss man aber von Fall zu Fall berechnen.

6.2 Nicht direkt erfassbarer Nutzen

EVU haben eine Monopolstellung und sind daher verpflichtet, eine gute und preisgünstige Dienstleistung zu erbringen. Viele und lang andauernde Versorgungsunterbrüche geben ein schlechtes Image und können politische Konsequenzen haben. Die folgenden Möglichkeiten ergeben einen nicht direkt erfassbaren Nutzen:

- Vermeidung von potentiellen Störungen durch frühzeitiges Erkennen von Unregelmässigkeiten. Beispiel: Ansteigen des Erdschlussstroms deutet auf einen sich anbahnenden Erdschluss hin.
- Vermeidung von potentiellen Schäden an Betriebsmitteln (Brand, Explosion) durch frühzeitiges Erkennen von sich anbahnenden Störungen.
- Vermeidung der Überbeanspruchung der Betriebsmittel (thermischer Stress) und damit Erhöhung der Lebensdauer.
- Besserer Informationsstand über den Prozess. Heute weiss man nicht, was im Verteilnetz passiert, und ist im Störungsfall auf Anrufe der Abnehmer angewiesen.
- Verfügbarkeit von statistischen Daten zur effizienten Netzausbauplanung.
- Ausnutzung von Synergien in industriellen Betrieben (EW, Wasser, Gas).

Diese und weitere situationsspezifische Punkte haben, neben dem messbaren Nutzen, ebenfalls eine gewisse Bedeutung.

Analyse Tabelle IV

- Amortisationsdauer	15 Jahre
- Zinssatz	5%
- Jährliche Einsparungen (Worst-Case)	
Reduktion der Verluste	168 000.- (59,3%)
Reduktion der volkswirtschaftlichen Verluste	115 300.- (40,7%)
Total Einsparungen	283 300.- (100,0%)
- Betriebskosten, Abzug	68 700.-
- Jährlicher Betrag für Investitionen	214 600.-

Alle Beträge in sFr.

6.3 Analyse

Für das Beispiel werden die Werte der Tabelle IV herangezogen. Die Betriebskosten des VNA-Systems werden aus den jährlichen Einsparungen laufend abgedeckt. Damit ergibt sich für die Investitionen pro Jahr ein Betrag von Fr. 214 600.-. Die durch den Nutzen getragenen Investitionen können mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$I = N_j \frac{(1+p)^n - 1}{p(1+p)^n}$$

wobei I die Investitionen, N_j den jährlichen Nutzen, n die Amortisationszeit in Jahren und p den Zinssatz bedeuten.

Gemäss obiger Formel resultieren daraus durch den Nutzen getragene Investitionen von 2,228 Mio Fr. (76,4%).

Auf der anderen Seite betragen die effektiven Investitionen 2,916 Mio Fr. Die Differenz von 0,688 Mio Fr. kann sicher durch Berücksichtigung der EVU-spezifischen Gegebenheiten, z.B. des Aufschubs von Investitionen oder des nicht direkt erfassbaren Nutzens, wesentlich reduziert werden.

Diese überschlägige Rechnung zeigt, dass ein VNA-System auch bei unterbewertetem Nutzen (worst case) im Bereich des wirtschaftlich Machbaren liegt. Für die Erarbeitung von fundierten Entscheidungsgrundlagen ist eine möglichst realistische, auf die Gegebenheiten des betreffenden EVU ausgerichtete Kosten-Nutzen-Analyse eine unabdingbare Voraussetzung.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Analyse zeigt, dass die Automation elektrischer Verteilnetze mit der heute verfügbaren Technologie grundsätzlich wirtschaftlich machbar ist. Für den Nachweis der Wirtschaftlichkeit spielen sowohl die spezifischen Gegebenheiten des EVU als auch die mittelfristige Ausbauplanung des Verteilnetzes eine wichtige Rolle. Die wirtschaftliche Rechtfertigung muss jedoch hauptsächlich auf dem messbaren Nutzen basieren. Der nicht direkt messbare Nutzen kann nur zur Unterstützung der Argumentation und allenfalls zur wirtschaftlichen Begründung von kleineren Differenzen herangezogen werden.

Die steigenden Kosten der elektrischen Energie, hohe Kapitalkosten, stabile oder sogar fallende Kosten von elektronischen Geräten sowie der technologische Fortschritt unterstützen die Wirtschaftlichkeitsrechnung zugunsten der Automation. Mittelfristig gesehen, werden sich deshalb diese Systeme durchsetzen, so wie dies bei den Führungssystemen in der Erzeugung und in Transportnetzen seit geraumer Zeit der Fall ist.