2 Betriebsführung und Ergonomie

Trotz umfangreicher automatisierter Prozesse – z. B. der Netzregelung und der automatischen Abwicklung von Schaltmaßnahmen – ist im Netzbetrieb der Mensch noch immer wichtigstes Glied in der Entscheidungs- und Überwachungskette. Um dem Menschen die Übersicht über die weit ausgedehnten elektrischen Netze zu geben, müssen die Betriebsinformationen – z. T. über viele 100 km – aus den Schaltanlagen und Kraftwerken in zentrale Warten übertragen und hier im Zusammenhang dargestellt („visualisiert“) werden.

Viele moderne Warten bieten darüber hinaus dem Betriebsführer die Möglichkeit, unmittelbar im Netz fernzusteuern. So ergibt sich die Forderung, die Schaltmöglichkeiten unmittelbar in die Netzdarstellung aufzunehmen, sie „interaktiv“ zu gestalten.

Bei der Lösung der Visualisierungsaufgabe muss einerseits auf die Möglichkeiten und Grenzen der menschlichen Wahrnehmungsfähigkeit, andererseits auf die Vollständigkeit und Kontingenz der Informationen zur Lösung der jeweiligen technischen Aufgabe geachtet werden.

Im vorliegenden Kapitel werden daher nach einer kurzen Darstellung der menschlichen Auffassungsgaben die Verhältnisse im Netzbetrieb sowie die traditionellen und durch Rechnereinsatz erweiterten Lösungen der Informationsvisualisierung besprochen.

2.1 Menschliche Auffassungsgaben

In diesem Kapitel wird auf die grundlegenden menschlichen Fähigkeiten der Wahrnehmung, speziell im Bereich der Mensch-Maschine-Kommunikation, eingegangen. Es kann allerdings nur ein grober Überblick über die wichtigsten Kriterien gegeben werden, da dieser zur Anthropotechnik als ein interdisziplinäres Gebiet der Physiologie, Psychologie, Arbeitsmedizin und Systemtechnik zählende Teilbereich ansonsten den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Zur weiterführenden Diskussion sei daher auf die angegebene Literatur verwiesen. Vorschläge zur Gestaltung von Leitwarten finden sich auch in [VDW-92].

2.1.1 Räumliches Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges – auch als Sehschärfe bezeichnet – wird charakterisiert durch den minimalen Abstand zweier benachbarter Punkte, die von einem Betrachter in gegebener Entfernung gerade noch getrennt

der benachbarten Punkte angegeben, sondern der *Sehwinkel*. Als Sehwinkel wird der Winkel definiert, dessen Scheitel am Auge des Betrachters liegt und dessen Schenkel die beiden benachbarten Punkte berühren; er ist somit unabhängig vom Sehabstand zwischen Auge und Punkten [CHA-92]. Gleichzeitig ist die Sehschärfe auch ein Maß für die minimale Größe eines sicher zu erkennenden Objekts.

Als „normalsichtig“ gelten Menschen mit einer Sehschärfe von einem Visus – dies entspricht einem Sehwinkel von einer Winkelminute – im zentralen Sehfeld. Zur Peripherie hin nimmt die Sehschärfe bis auf 30 Winkelminuten ab. Die Sehschärfe ist von einer Anzahl Faktoren abhängig:

- Lebensalter,
- Adaptionszustand des Auges (Leuchtdichteniveau) und
- Kontrast zwischen Objekt und Hintergrund.

Um allen Anforderungen gerecht zu werden, kann nur eine Abschätzung mit entsprechendem Sicherheitszuschlag erfolgen, die nach DIN 58220 (Sehschärfebestimmungen) für Objekte im zentralen Sehfeld bei gedruckten Zeichen einen Sehwinkel von mindestens 12 Winkelminuten und bei Bildschirmdarstellung von 15 Winkelminuten vorschreibt. Bei einem Sehabstand von 1 m ergibt sich für die Bildschirmdarstellung folglich eine minimale Objektgröße von rd. 4,5 mm.

2.1.2 Farbwahrnehmung

Das menschlichen Auge nimmt elektromagnetische Wellen im Wellenlängenbereich von ca. 380 nm (violett) bis 780 nm (rot) als Licht war. Die Wahrnehmung erfolgt getrennt für Chromianz (Farbton und -sättigung) und Luminanz (Leuchtdichte). Die Chromianz, die ein Maß für die „Buntheit“ darstellt, wird mit farbempfindlichen, zäpfchenförmigen Zellen auf der Netzhaut wahrgenommen, die für jeweils eine von drei Farben besonders empfindlich sind. Es existieren Zellen für die Farben: Blau, Grün und Gelbgrün. Hiervon unabhängig wird die Luminanz, die mit der subjektiv empfundenen Helligkeit korrespondiert, durch stäbchenförmige Zellen wahrgenommen. Erst im Gehirn werden alle Einzelreize zu einem resultierenden Farbreiz zusammengesetzt.

Bei der Wahrnehmung von Farbe führt das Auge keine vollständige Farbkorrektur durch, so dass unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich stark gebrochen werden (chromatische Aberration). Dies führt dazu, dass das Auge prinzipiell immer nur auf eine Wellenlänge fokussieren kann und andere unscharf auf der Netzhaut abbildet. Speziell bei benachbarter Darstellung von farbigen Flächen mit stark unterschiedlichen Wellenlängen ergibt sich für den Betrachter eine erhöhte

(Wellenlängen) fokussiert. Dieser Effekt schwächt sich zwar mit unreiner werdenden Farben, die aus einem breiten Wellenlängengemisch bestehen, immer weiter ab, führt jedoch dazu, dass nach ISO 9241 bestimmte Farbkombinationen für die Bildschirmdarstellung nicht verwendet werden sollen [CHA-96]. Eine ungünstige Farbkombination stellen z. B. Rot und Blau dar, deren gleichzeitige Verwendung als Hintergrund- und Schriftfarbe zu vermeiden ist.

Für die Auffälligkeit von Objekten ist der Kontrast zwischen Vordergrund und Hintergrund entscheidend. Ein unbunter Hintergrund ist für die Differenzierung und Erkennbarkeit von unterschiedlichen Farbtönen von Vorteil. Allerdings muss der Kontrast zu allen zur Darstellung genutzten Farben groß genug sein. Bei schwarzem Hintergrund ist deshalb die Verwendung von nicht vollständig gesättigtem Blau erforderlich.

Durch Nutzung von Farbe lässt sich die dargebotene Informationsdichte erhöhen, die Wahrnehmung unterstützen und die Aufmerksamkeit des Betrachters steuern. Berücksichtigt werden sollte aber, dass bei ca. 8 % aller Männer und 0,4 % aller Frauen in Europa und Nordamerika das Farbsehen gestört ist. Generell lassen sich nach [SHN-92] folgende Empfehlungen für den Umgang mit Farbe formulieren:

- Farbcodierungen sollten im Gesamtsystem konsistent eingesetzt werden. Bei Einfärbungen von z. B. Fehlermeldungen sollten diese in allen Bereichen einheitlich codiert werden.

- Es muss sichergestellt sein, dass Einfärbungen die zu bewältigende Aufgabe unterstützen. Anderenfalls können Einfärbungen ablenkend oder störend wirken.

- Die Anzeige von Statusänderungen kann durch Farbänderungen unterstützt werden, um die Aufmerksamkeit des Betrachters zu steuern.

- Unterschiedliche Zustände sollten nicht alleine durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet werden, sondern auch durch unterschiedliche Formen, um Redundanz zu gewährleisten.

- Einige Farben sind mit speziellen Gefühlen oder Erwartungen verbunden. Diese können sich allerdings von Benutzergruppe zu Benutzergruppe unterscheiden. So bedeutet Rot im Allgemeinen „Stillstand“ oder „Gefahr“, kann aber auch den Zustand „heiß“ oder im Wechsel mit Grün den Einschaltzustand elektrischer Geräte angeben.

- Die Gesamtzahl von zur diskreten Codierung verwendeten Farben sollte auf maximal sieben beschränkt sein, wovon nur vier zeitgleich angezeigt werden sollten. Erfahrene Benutzer können gelegentlich von einer größeren Anzahl Farben profitieren

2.1.3 Auffälligkeit

Die Auffälligkeit von Signalen beschreibt deren Eigenschaft, sich von der Umgebung bzw. konkurrierenden Signalen abzuheben. Durch unterschiedliche Auffälligkeiten der Signale lässt sich die menschliche Aufmerksamkeit steuern. Hiermit lassen sich nach [CHA-92] folgende Tätigkeiten unterstützen:

- Entscheidung über die zutreffende Reihenfolge bei konkurrierend zur Durchführung anstehenden Tätigkeiten.
- Entscheidung über die Unterbrechung des aktuell bearbeiteten Problems zugunsten eines plötzlich aufgetretenen, vorrangigen Problems.
- Suchen eines bestimmten Objekts.

In **Tabelle 2-1** ist der Auffälligkeit von Signalen in absteigender Rangfolge angegeben. Die höchste Aufmerksamkeit erfahren bei richtiger Auslegung akustische Signale. An zweiter Stelle sind veränderliche optische Signale, wie z. B. Blinken, zu finden. An dritter und vierter Stelle beeinflussen die Luminanz und Chromianz eines Objekts seine Auffälligkeit für den Menschen.

	Signal	**Einflussgrößen**
Auffälligkeit ↑	akustisches Signal	Intensität des Signals, Hintergrundgeräusch
	veränderliches optisches Signal (Intensitäts- und/oder Ortsänderung)	Grad der Änderung, Fläche des Objekts, Kontrast zum Hintergrund
	Luminanz (Leuchtdichte)	Fläche des Objekts, Kontrast zum Hintergrund
	Chromianz (Farbton + Sättigung)	Fläche des Objekts, Kontrast zum Hintergrund

Tabelle 2-1: Auffälligkeit von Signalen (Quelle: [CHA-92])

2.1.4 Gestaltgesetze

Bei der Wahrnehmung von Objekten nimmt der Mensch nicht in allen Fällen die Einzelobjekte wahr, sondern er gruppiert sie nach gewissen Gesetzmäßigkeiten bereits im Unterbewusstsein zu zusammengehörigen Einheiten, die auch als *Gestalten* bezeichnet werden. Das Gebiet der Gestaltpsychologie beschäftigt sich mit diesen Phänomenen der Sinneswahrnehmung. Nachfolgend ist ein Auszug der nach [KAT-69] bestehenden Gesetzmäßigkeiten für das Entstehen von Gestalten bei optischer Wahrnehmung wiedergegeben:

- *Gesetz der Gleichheit*: Bei mehreren verschiedenartigen Objekten werden die

- *Gesetz der Nähe*: Unter sonst gleichen Voraussetzungen werden Objekte mit geringem Abstand als zusammengehörig erkannt.

- *Gesetz der Geschlossenheit*: Unter sonst gleichen Voraussetzungen werden Linien, die ein geschlossene Fläche bilden, leichter als Einheit aufgefasst als nicht zusammenhängende Linien.

- *Gesetz der Erfahrung*: Aufgrund von individueller Erfahrung können wiederholt auftretende Muster als Gestalt wahrgenommen werden. Bei Abweichungen von der „gewohnten" Darstellung können diese schneller erkannt werden.

Die Wahrnehmung von Gestalten ist nicht allein vom Unterbewusstsein gesteuert, sondern lässt sich auch bewusst beeinflussen. Allerdings ist hierbei ein – abhängig von der jeweiligen Situation – mehr oder minder deutlicher Seh-„Widerstand" zu überwinden, der zu einer erhöhten psychischen Belastung führen kann.

Als Beispiel der Anwendung von Gestaltprinzipien bei der Überwachung einer größeren Anzahl von Parametern zeigt **Bild 2-1** eine stilisierte Anzeigetafel, auf der 15 Parameter zu überwachen sind. Dem für den normalen Betriebszustand charakteristische Wert entspricht die durch die Markierung auf der Neun-Uhr-Position gekennzeichnete Stellung des Zeigers. Beruhend auf dem durchbrochenen Gestaltgesetz der Gleichheit wird der von der Norm abweichende Wert schnell erkannt, ohne alle Werte einzeln überprüfen zu müssen. Zu beachten ist hierbei, dass alle Anzeigen entsprechend skaliert werden, um unter normalen Betriebszuständen ein einheitliches Bild zu erzeugen. Als Nachteil dieser speziellen Art der Anordnung kann angeführt werden, dass die Anzeigen räumlich nah zueinander angeordnet sein müssen und somit eine Sortierung nach anderen (prozessorientierten) Ordnungsprinzipien ausscheidet.

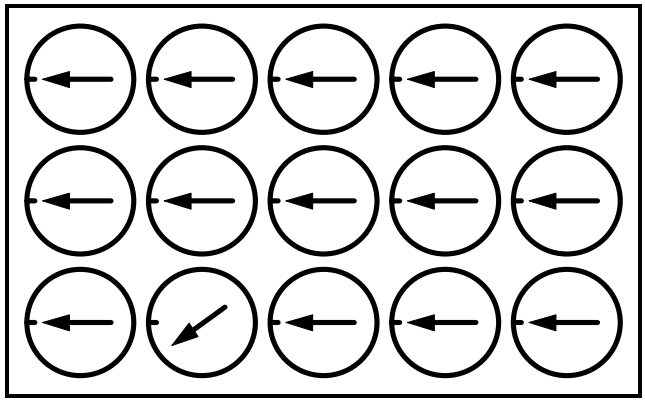


Bild 2-1: Nutzung von Gestaltprinzipien (Quelle: [FOL-87])

Die Gestaltgesetze gelten im Gegensatz zu anderen Gesetzmäßigkeiten oder Größen, die den Menschen betreffen, für alle Menschen gleich und variieren nicht [CHA-92]. Somit bieten sie sich zur Darstellung zusammenhängender Informationen, die schnell und sicher erkannt werden müssen, an.

2.1.5 Zeitliches Auflösungsvermögen

Unter dem zeitlichen Auflösungsvermögen wird die Zeitspanne verstanden, die zwischen zwei Reizen eingehalten werden muss, damit diese als zwei getrennte Signale erkannt werden. Sie hängt wesentlich von der Art des Reizes und dem erfassenden Sinnesorgan ab und beträgt für auditive Reize 2...5 ms und für visuelle Reize 20...30 ms. Die tatsächliche Chronologie der Reize kann nach [CHA-92] allerdings erst ab einer Zeitspanne von 30...40 ms festgestellt werden – unabhängig von der Art des Reizes.

2.1.6 Einfluss von Wartezeiten

Bei der Interaktion mit Computern treten nach der Eingabe von Befehlen unvermeidbare Wartezeiten für den Menschen auf. Diese werden als Systemresponsezeiten (SRZ) bezeichnet. Auch wenn diese heutzutage durch leistungsfähige Anlagen sehr kurz gehalten werden können, so haben diese doch einen gewissen Einfluss auf den Menschen. In der einschlägigen Literatur wird seit einigen Jahren über die optimale Gestaltung von SRZ diskutiert [HOL-89]. Die verschiedenen Empfehlungen differieren allerdings nicht unerheblich. Einig ist man sich lediglich darin, dass unzureichende SRZ Stress erzeugen und die Arbeitsproduktivität negativ beeinflussen können.

Eine wichtige Rolle spielen offensichtlich der Erwartungswert und die Varianz der SRZ. Während an eine konstante SRZ eine Gewöhnung eintreten kann, hat eine stark variierende SRZ zur Folge, dass bei deren Auftreten, speziell bei gegenüber dem Erwartungswert stark abweichenden Werten, ein „Erschrecken“ stattfinden kann, welches sich negativ auf die weitere Handlungsabfolge auswirkt.

2.1.7 Informationsaufnahme

Der Mensch ist in der Lage große Informationsmengen (mehr oder weniger unbewusst) aufzunehmen. Hierbei muss zwischen visuell und auditiv aufgenommen Reizen unterschieden werden. Für den visuellen Sinneskanal wird nach [CHA-92] eine Aufnahmekapazität von ca. 10^7 Bit/s angegeben, während der auditive Sinneskanal eine Kapazität von ca. $3{,}5 * 10^4$ Bit/s erreicht.

Das Gehirn ist allerdings nur in der Lage, (bewusst) etwa 30 Bit/s zu verarbeiten. Hieraus ergeben sich nach [TIE-95] etwa zwei bis drei Zustandsänderungen, die vom Menschen pro Sekunde bewusst aufgenommen werden können. Diese Anzahl gilt nur für (aus der Assoziation oder Erfahrung her) bekannte Eindrücke; bei vollkommen neuen Eindrücken dauert die Verarbeitung wesentlich länger.

Die aufgenommenen Informationen werden nicht auf unbeschränkte Zeit im Gehirn gespeichert, sondern verweilen – abhängig von der Konzentration – nur wenige Sekunden im Kurzzeitgedächtnis. Nur wichtige oder assoziierbare Informationen werden in das Langzeitgedächtnis übernommen, wo sie allerdings nicht automatisch für uneingeschränkte Zeit zur Verfügung stehen, sondern in gewissen Abständen „aufgefrischt“ werden müssen.

2.1.8 Reaktionszeiten

Die Reaktionszeit, die ein Mensch benötigt, um auf einen Reiz zu reagieren, ist neben der für die Informationsaufnahme und -verarbeitung erforderlichen Zeit von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig:

- Lebensalter
- Aufmerksamkeit und Ermüdungszustand
- Erwartungshaltung (erwarteter oder unerwarteter Reiz)
- Art und Intensität des Reizes
- Anzahl der gleichzeitig auftretenden Reize

Nach [CHA-92], [KNI-87] ergeben sich minimale Reaktionszeiten für einfach auszuführende Aktionen (z. B.: Tastendruck) von 100...180 ms. Bei komplexen Aktionen, die zusätzlich eine gewisse Verarbeitung erfordern, werden Zeiten bis in den Bereich von wenigen Sekunden erreicht (z. B. Reaktion auf bremserforderndes Ereignis im Straßenverkehr).

2.1.9 Absolute Unterscheidungsleistungen

Bei der Wahrnehmung können vom Menschen jeweils verschiedene Zustände eines Signals unterschieden werden. Ohne Vorliegen eines als Referenz dienenden Vergleichssignal und mit der alleinigen Kenntnis, dass insgesamt *n* verschiedene Codestufen des Signals auftreten können, gelten die in **Tabelle 2-2** aufgeführten Empfehlungen für die maximale Anzahl der Codestufen eines Signals, die noch eine sichere Unterscheidung zulassen.

	Art des Signals	Code-stufen
optische Signale	Länge, Stärke einer Linie	4
	Winkellage einer Linie	8
	Farbton	5
	Helligkeit	3
	Blinkfrequenz	3
akustische Signale	Tonhöhe	3...5

Tabelle 2-2: Anzahl unterscheidbarer Codestufen (Quelle: [GEI-90], [FOL-87])

2.2 Aufbau elektrischer Netze

Der Transport und die Verteilung der elektrischen Energie von den Kraftwerken zu den Verbrauchern geschieht durch elektrische Energieversorgungsnetze, die in Europa als Dreileiter-Drehstromsysteme mit einer Nennfrequenz von 50 Hz betrieben werden. Die Netze bestehen aus einer Vielzahl von einzelnen Betriebsmitteln, wie z. B. Leitungen, Transformatoren und Schaltgeräten, um eine Anpassung an die jeweilige Situation zu ermöglichen.

In **Bild 2-2** ist der schematische Aufbau eines elektrischen Energieversorgungsnetzes mit seinen unterschiedlichen Spannungsebenen und deren Verbindungen untereinander über Transformatoren gezeigt (s. auch [HEU-95]).

Das **Höchstspannungsnetz** (*Transmissionsnetz*) mit Spannungen von 230 bis 400 kV dient zum Transport großer elektrischer Leistungen bis zu mehreren GW über Entfernungen von mehreren 100 km von den Erzeugungs- in die Verbrauchsschwerpunkte. Ferner wird durch die europaweite Vermaschung im Rahmen der UCPTE[1] ein länderübergreifender Energieaustausch ermöglicht, der die Versorgungssicherheit erhöht und die Reservehaltung an elektrischer Leistung und damit die Kosten für die einzelnen beteiligten Partner minimiert. Große Kraftwerksblöcke speisen wegen der mit ihnen verbundenen hohen Leistungen direkt in das Höchstspannungsnetz ein.

[1] UCPTE: Abk. für Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité

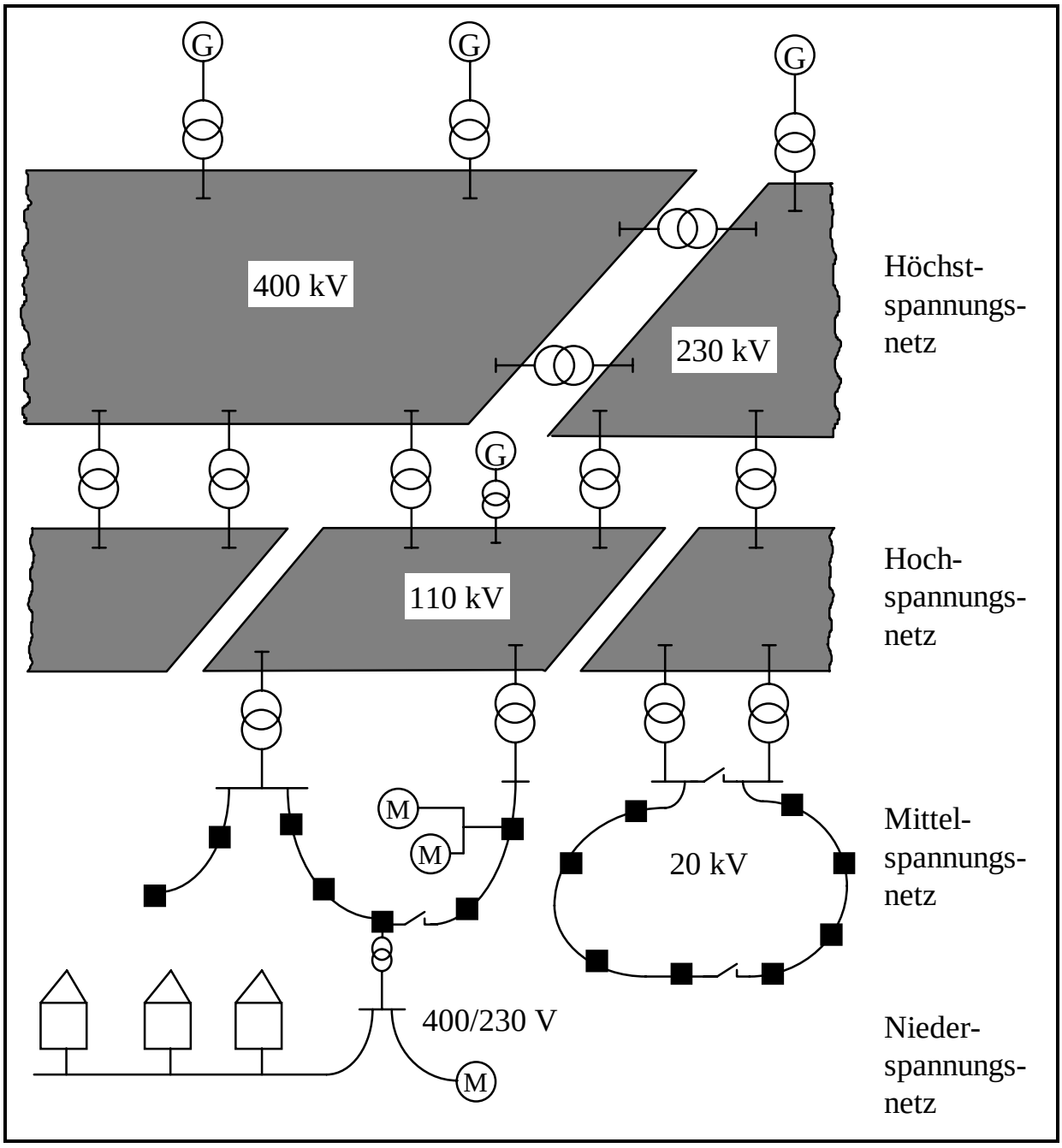


Bild 2-2: Schematischer Aufbau eines Energieversorgungsnetzes

Mit dem **Hochspannungsnetz** (*Subtransmissionsnetz*) werden Regionen bis wenige 100 km Durchmesser überspannt und die elektrische Energie direkt in die Verbrauchsschwerpunkte bzw. zu Großverbrauchern transportiert. Bei Spannungen von 110 bis 150 kV erreichen die transportierten Leistungen hier ca. 100 MW. Gespeist wird das Hochspannungsnetz aus dem Höchstspannungsnetz und durch Kraftwerkseinspeisungen mittelgroßer Kraftwerksblöcke. Die einzelnen Regionen des Hochspannungsnetzes sind im Normalbetrieb nicht verbunden, jedoch in sich vermascht und in wenigen Unterstationen über Transformatoren mit dem Höchstspannungsnetz gekuppelt.

Mittelspannungsnetze (*Verteilnetze*) mit Spannungen von 10 bis 60 kV umfassen Bereiche von wenigen Kilometern Durchmesser. Sie dienen der flächendeckenden Verteilung der elektrischen Energie bis in die Nähe der Endverbraucher. Die transportierten Leistungen erreichen einige MW. Mittelspannungsnetze werden aus dem Hochspannungsnetz über Speisestationen versorgt und sind aus Redundanzgründen vermascht aufgebaut, werden aber meist radial betrieben. Mittlere Verbraucher (große Gewerbebetriebe oder Hochhäuser) sind direkt an das Mittelspannungsnetz angeschlossen und besitzen eigene Ortsnetzstationen.

Niederspannungsnetze mit Spannungen von 230 bis 1000 V erstrecken sich über einen Bereich von wenigen 100 Metern und versorgen die kleinen Verbraucher (Haushalte) mit Energie. Die transportierten Leistungen erreichen eine Größenordnung von maximal ca. 100 kW. Sie werden aus dem Mittelspannungsnetz über Ortsnetzstationen versorgt und besitzen überwiegend einen radialen Aufbau.

2.3 Betriebsführung der Netze

Vom Gesetzgeber wurde basierend auf dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) mit den Allgemeinen Versorgungsbedingungen (AVBEltV) den Energieversorgungsunternehmen (EVU) der Auftrag zu einer zuverlässigen Versorgung aller Verbraucher mit elektrischer Energie gegeben. Daher sind die EVU neben einer ökonomischen Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie auch an ihrer sicheren Bereitstellung und der Einhaltung der Versorgungsqualität in Bezug auf Spannung und Frequenz interessiert.

Die traditionellen Aufgaben der EVU gliedern sich in vielfältige Unteraufgaben, die in folgenden Bereichen zusammengefasst werden:

- Der *Netzbetrieb* ist für den Betrieb und die Instandhaltung des elektrischen Netzes und der Unterstationen verantwortlich.

- Die *Kraftwerkskoordination* koordiniert die Verteilung der von den Verbrauchern abgenommenen Leistung inklusive der auftretenden Netzverluste auf die eingesetzten Kraftwerke.

- In der *Ausbauplanung* für Netz und Kraftwerke wird anhand weitreichender Lastprognosen der zukünftige Netz- bzw. Kraftwerksausbau geplant.

Die in letzter Zeit begonnene Öffnung des elektrischen Energiemarkts und der freie Zugang Dritter zum Netz hat bei den EVU zu einer teilweisen Umstrukturierung oder gar Ausgliederung von Aufgabengebieten geführt. Der Netzbetrieb, auf den im Folgenden näher eingegangen werden soll, ist hiervon allerdings nicht so stark betroffen wie z. B. die Kraftwerkskoordination. Dennoch werden neue Ar-

beitsabläufe und Ansprechpartner eingeführt werden müssen, was jedoch auf die vorliegende Arbeit keinen Einfluss hat.

2.3.1 Aufgaben des Netzbetriebs

Nach [HOS-88] nimmt der Netzbetrieb u. a. folgende Aufgaben eines EVU wahr:

- Betreiben der Netze und Einsatz der Betriebsmittel nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien unter Beachtung von Zuverlässigkeits-, Verfügbarkeits- und Sicherheitskriterien.
- Überwachen des statischen und dynamischen Verhaltens der Netze.
- Überwachen des Zustands und des Verhaltens der Betriebsmittel.
- Überwachen des Einflusses und der Auswirkungen eigener und fremder technischer und organisatorischer Maßnahmen.
- Überwachen der Netzzuverlässigkeit.
- Überwachen der (im Fehlerfall auftretenden) Kurzschlussströme.
- Durchführen von Schalthandlungen zur Sicherung bzw. Wiederherstellung der Versorgung und zur Freigabe von Betriebsmitteln für Bau- und Wartungsarbeiten.
- Erfassen, Beurteilen und Beseitigen von Störungen; Fehlerortung; Veranlassen bzw. Durchführen der Schadensbehebung.
- Planen und Durchführen von Instandhaltungsarbeiten (Inspektion, Wartung, Instandsetzung).

Es lassen sich die drei Bereiche Schaltbetrieb, Störungsbeseitigung und Instandhaltung erkennen. Der Schaltbetrieb, der für die Überwachung des Netzes und die Durchführung von Schaltmaßnahmen zuständig ist, wird von zentralen Netzleitstellen aus durchgeführt, deren Organisation in den folgenden Unterkapiteln besprochen wird.

2.3.2 Organisation der Netzleitstellen

Voraussetzung für die Fernüberwachung und -steuerung des elektrischen Netzes aus zentralen Netzleitstellen ist, dass alle relevanten Schaltgeräte, die sich verteilt im Netz befinden, fernsteuerbar sind. In Europa gilt dies gemeinhin für das Transmissions- und Subtransmissionsnetz uneingeschränkt und im Verteilnetz zumindest

ferngesteuert und müssen im Bedarfsfall durch entsandtes Personal umgeschaltet werden. Selbst im Transmissions- und Subtransmissionsnetz sind nicht alle Schaltgeräte fernsteuerbar. Einige Trennschalter oder Erdungsschalter, die nur zu Wartungszwecken benötigt werden, sind nur vor Ort zu betätigen. Abhängig vom EVU existieren, speziell im außereuropäischen Ausland, viele unterschiedliche „Fernsteuer-Philosophien“, die historischen Ursprungs oder durch unterschiedlichen Anlagenaufbau begründbar sind.

Für die Organisation des Betriebs gibt es bereits in Europa recht unterschiedliche Organisationsformen. Während z. B. in Frankreich nur ein staatlicher Energieversorger (EdF) existiert, der für die landesweite Versorgung mit elektrischer Energie zuständig ist, teilen sich z. B. in Deutschland neun EVU den Betrieb des Transmissionsnetzes. Unabhängig hiervon findet innerhalb eines EVU generell eine hierarchische Gliederung der Leitstellen nach Spannungsebenen statt.

Das Transmissionsnetz wird in Frankreich aus einer einzigen nationalen Leitstelle koordiniert, die mehrere regionale Leitstellen anweist; in Deutschland unterhält jedes beteiligte EVU jeweils eine eigene Leitstelle. In diesen für das Transmissionsnetz verantwortlichen Leitstellen befindet sich i. d. R. an einem benachbarten Arbeitsplatz auch die Kraftwerkskoordination, um die für den Betrieb nötigen Absprachen zu vereinfachen.

Das Subtransmissionsnetz wird meist aus mehreren Leitstellen geführt, die jeweils für eine begrenzte Region des Landes bzw. des EVU zuständig sind. Aus der überlagerten Leitstelle des Transmissionsnetzes werden ggf. Anweisungen entgegengenommen und bearbeitet.

Die Leitstellen des Verteilnetzes haben durch die nur an den Speisestationen vorhandenen Fernmelde- und Fernsteuereinrichtungen eingeschränkte direkte Eingriffsmöglichkeiten. Vielmehr dienen sie primär als Stützpunkt und Koordinierungsstelle, um durch Personalentsendung Störungen zu beheben oder Routinearbeiten im Verteilnetz auszuführen. Im außereuropäischen Ausland tritt oft der Fall auf, dass diese dann direkt in einer Unterstation angesiedelten Leitstellen als einzige die Möglichkeit der „Fernsteuerung“ besitzen und so alle Schalthandlungen – auch aus den überlagerten Spannungsebenen – von dieser Stelle ausgeführt werden. In Europa – und speziell in Deutschland – herrscht meist die Philosophie, dass die zuständige Leitstelle ihre Aktionen auch direkt fernsteuert.

2.3.3 Anforderungen an das Bediensystem

Da bei der Überwachung und Steuerung von Transmissions-/Subtransmissionsnetzen und Verteilnetzen aufgrund der unterschiedlichen Betriebsweisen recht

derungen an die Bediensysteme in diesen Leitstellen. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Betrachtung von Transmissions-/Subtransmissionsnetzen liegt, beziehen sich die weiteren Ausführungen primär auf diese.

Die beiden Grundanforderungen an die Darstellung von Informationen über das elektrische Netz lauten:

- **Informationsverdichtung**, d. h. dem Bediener zu jedem Zeitpunkt und zu jedem Netzzustand die gerade benötigte Information – und nur diese – zu zeigen und

- **angepasste Informationsdarstellung**, d. h. die Darstellung der Information an die menschliche Auffassungsgabe und die zu lösende Aufgabe optimal anpassen, um Prozessgrenzen zu zeigen und für den Bediener handhabbar zu machen.

Die wesentlichen in einer Netzleitstelle anfallenden Betriebsaufgaben lassen sich mit ihrem prozentualen Anteil an der Gesamtarbeitszeit **Tabelle 2-3** entnehmen. Die in der Tabelle gemachten Angaben gelten in erster Linie für Leitstellen von Versorgungsnetzen, können allerdings auch als Abschätzung für die Auslastung von Leitstellen des Transmissionsnetzes herangezogen werden.

Planen und Ausführen von Schaltungen im Netz	ca. 50 %
Lastausgleich	ca. 15 %
Bearbeiten von Störungen	ca. 5 %

Tabelle 2-3: Betriebsauslastung einer Netzleitstelle (Quelle: [TIE-91])

Aus weiteren Erhebungen ergibt sich, dass insgesamt ein sehr hoher Anteil der Arbeitszeit auf die reine Beobachtung und Überwachung des Systems entfällt und nur in ca. 20 % der gesamten Arbeitszeit Interaktionen mit dem System erfolgen. Daher muss ein Schwerpunkt bei der Konzeption eines Bediensystems auf den Visualisierungskomponenten liegen. Generell werden von den Netzbetriebsführern bei jeder zu bearbeitenden Aufgabe vier Bearbeitungsphasen durchlaufen:

- Informationsaufnahme,

- Strategieplanung,

- Durchführung und

- Erfolgskontrolle.

Je nach zu lösender Aufgabe werden in den verschiedenen Phasen unterschiedliche Informationen über das elektrische Netz benötigt:

Für das *Planen und Ausführen von Schaltungen im Netz* wird in der Strategieplanung eine verdichtete Darstellung der zu bearbeitenden Komponenten und ihrer Umgebung benötigt, damit z. B. bei Abschaltungen mögliche Ersatzwege erkannt werden können. Die Durchführung der Maßnahmen erfolgt mit Hilfe einer detaillierten Darstellung, in welcher alle bedienbaren Schaltgeräte ersichtlich sind. Zur abschließenden Erfolgskontrolle ist wieder eine verdichtete Darstellung vorteilhaft, da hierdurch neben der durchgeführten Maßnahme auch ihre Auswirkungen auf das umgebende Netz erkennbar werden.

Für den *Lastausgleich* müssen in der Strategieplanung die Lastflüsse und alle alternativen Schaltmöglichkeiten erkennbar sein. Dies erfordert – je nach Größe der betroffenen Region – eine verdichtete Darstellung bzw. Übersichtsdarstellung, in welcher die Lastflüsse dargestellt sind. Die Durchführung der geplanten Maßnahmen erfolgt mit Hilfe einer detaillierten Darstellung der zu bedienenden Schaltgeräte in ihrem topologischen Zusammenhang. Die Erfolgskontrolle bedarf einer zur Strategieplanung identischen Darstellung.

Obwohl die *Bearbeitung von Störungen* nur einen zeitlich begrenzten Teil der Gesamtarbeitszeit in Anspruch nimmt, ist ihre Dringlichkeit so hoch, dass auch sie in der Darstellung berücksichtigt werden muss. Nach einem ersten Anstoß durch eine gegliederte Meldungsausgabe, ggf. verbunden mit einem z. B. akustischen Signal, sollten Umfang und Auswirkung der Störung aus einer Übersichtsdarstellung des gesamten Netzes hervorgehen. In der Strategieplanung der Störungsbehebung werden verdichtete Darstellungen der betroffenen Region benötigt, aus denen Versorgungszustände und mögliche Ersatzwege erkennbar sind. Für die Durchführung der geplanten Maßnahmen werden, wie bei den anderen Aufgaben, detaillierte Ansichten der zu schaltenden Geräte benötigt. Die Erfolgskontrolle geschieht mit Hilfe der Übersicht oder von verdichteten Darstellungen, die bereits in der Strategieplanung benutzt wurden.

Die Eingabe von Befehlen an das System, um z. B. einen Schalter zu betätigen, geschah anfangs mit Hilfe von umfangreichen Funktionstastaturen, bei denen durch eine hierarchische Anwahl nach Station, Spannungsebene, Feld und Schaltgerät schließlich der Schaltbefehl abgesetzt werden konnte. Dieses zeitaufwendige Verfahren konnte durch den Einsatz von vollgraphischen Monitoren und Maussteuerung entschieden vereinfacht werden. Durch direkte Anwahl der zu betätigenden Geräte oder Betriebsmittel im Bild mit der Maus kann ein vom aktuellen Zustand abhängiges Bedienfenster angezeigt werden, in dem die auszuführende Aktion spezifiziert wird.

2.4 Aufbau der Unterstationen

An den Orten im Höchst- und Hochspannungsnetz, an denen mehrere Leitungen zusammentreffen oder mittels Transformatoren elektrische Leistung zwischen verschiedenen Spannungsebenen ausgetauscht werden soll, befinden sich Unterstationen. Diese beherbergen neben allen Geräten der Primärtechnik[2] einer oder mehrerer Schaltanlagen auch die gesamte Sekundärtechnik[3] und zusätzlichen Raum für die gesicherte Hilfsenergie und Arbeitsräume für das Personal.

Fast alle für den Netzbetrieb wichtigen und daher für die Visualisierung in der Leitstelle relevanten Daten fallen in den Unterstationen an. Die Betriebsmittel müssen (statisch) nach ihrer Art und (dynamisch) entsprechend ihrem Betriebszustand dargestellt werden. Auch Messwerte, welche die Leitungsauslastung kennzeichnen, werden in den Unterstationen gewonnen.

2.4.1 Primärtechnik

Da die von den Verbrauchern abgenommene Leistung sich im Tages- und Jahresverlauf ändert, ist es erforderlich, neben den Kraftwerken, die naturgemäß auf diese Leistungsschwankungen reagieren müssen, auch das Netz an diese unterschiedlichen Situationen anzupassen. So kann es in Schwachlastperioden wirtschaftlich sinnvoll sein, Transformatoren oder Leitungen abzuschalten. Ferner müssen routinemäßige Wartungsarbeiten durchgeführt werden, in deren Verlauf ebenfalls Umschaltungen im Netz nötig werden.

Für den topologischen Aufbau einer Schaltanlage gibt es eine Vielzahl möglicher Formen (siehe auch [RUM-89], [ABB-92]). In **Bild 2-3** ist exemplarisch der Aufbau einer für Kontinentaleuropa typischen Anlage mit zwei Transformatorabgängen, zwei Leitungsabgängen und einem Kuppelfeld gezeigt. Über die Hauptsammelschienenabschnitte, die über die Längstrennung verbunden werden können, werden die verschiedenen Felder zusammengeschaltet. Durch die Hilfssammelschiene (auch: *Umgehungssammelschiene)* kann bei Wartungsarbeiten oder Ausfall eines Leistungsschalters ein Abgang unter zusätzlicher Benutzung des Kuppelfeldes auf eine der beiden Hauptsammelschienen geschaltet werden.

Die verwendeten Schaltgeräten müssen in ihrer betrieblichen Aufgabe unterschieden werden nach: Trennschaltern, Lastschaltern und Leistungsschaltern.

---

[2] Unter *Primärtechnik* werden alle mit der Hochspannung in Berührung stehenden Teile wie Sammelschienen, Transformatoren, Schalter usw. zusammengefasst.

- *Trennschalter* dienen zum Herstellen einer sichtbaren Trennstelle, um dem Personal vor Ort bei Wartungsarbeiten die sichere Abschaltung des Arbeitsbereiches optisch anzuzeigen. Sie sind in der Lage kleine (kapazitive) Ströme im Bereich weniger Ampere zu schalten.

- *Lastschalter* können die im normalen Betrieb auftretenden Ströme schalten.

- Mit *Leistungsschaltern* lassen sich die mit Kurzschlüssen verbundenen hohen Ströme (bis zu einer schalterspezifischen Größe) abschalten. Da hierfür ein größerer konstruktiver Aufwand im Schalter benötigt wird, sind Leistungsschalter entsprechend teuer und werden nur an erforderlichen Stellen im Netz (z. B. einmal pro Feld) eingesetzt.

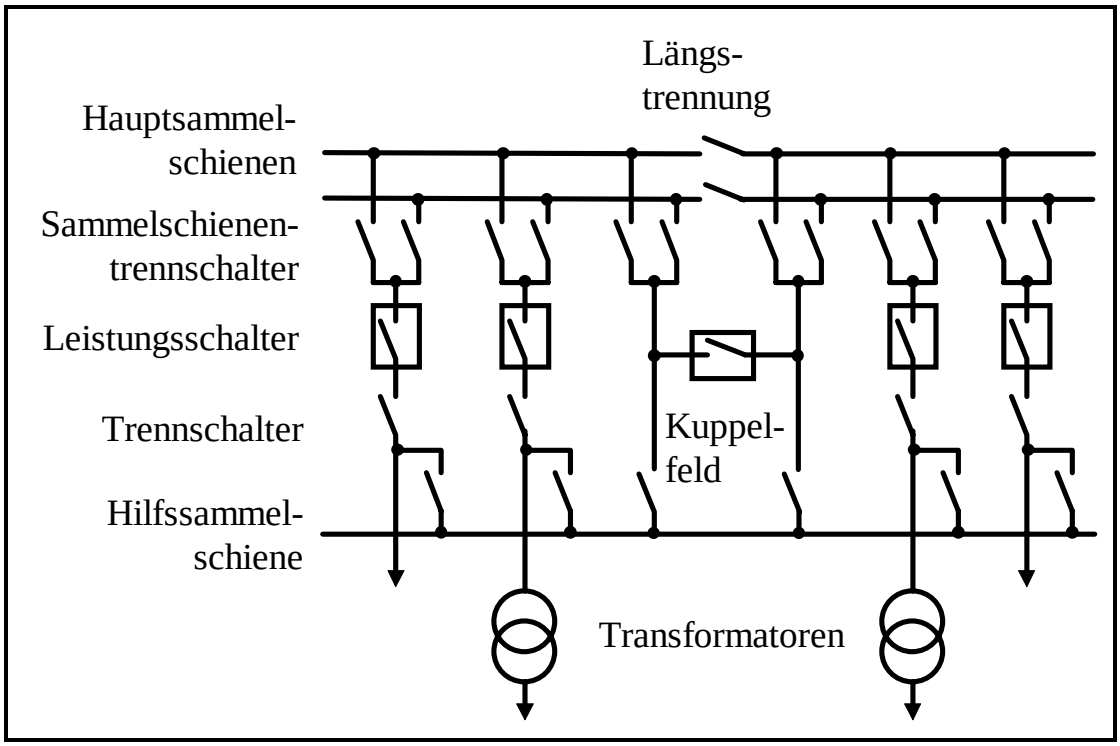


Bild 2-3: Typischer Aufbau einer Schaltanlage[4]

Weitere häufig eingesetzte Schaltgeräte sind nachfolgend aufgeführt:

- Durch das Einlegen von *Erdungsschaltern* lassen sich Teile einer Anlage erden, um bei Wartungsarbeiten die nötige Sicherheit für das Personal herzustellen.

- *Dreiwegeschalter* haben neben den beiden Endpositionen (normalerweise ein- bzw. ausgeschaltete Position) noch eine dritte definierte Position, in der eine Seite des Schalters direkt geerdet ist.

[4] [illegible]

- *Schaltwagen* finden sich i. d. R. nur in der Mittelspannungsebene und bezeichnen Leistungsschalter, die auf einer bewegbaren Einheit (dem „Wagen“) montiert sind. Hierdurch vereinen sie die Eigenschaften des Leistungsschalters und des Trennschalters in einem Gerät.

Die Transformatoren im Transmissions- und Subtransmissionsnetz sind häufig als Stelltransformatoren ausgeführt. Bei diesen können durch einen *Stufenschalter* die Anzapfungen an den Hauptwicklungen umgeschaltet werden oder durch spezielle Zusatzwicklungen der Betrag und/oder der Phasenverschiebungswinkel der Spannungszeiger auf der Sekundärseite verändert werden. Durch eine manuelle Steuerung oder eine automatische Regelung kann so u. a. der Betrag der Spannung auf der Sekundärseite bei sich ändernder Belastung oder nicht konstanter Spannung auf der Primärseite annähernd konstant gehalten werden.

Die einzelnen Schaltgeräte können in aller Regel von mehreren Stellen aus betätigt werden:

- Die *Ortssteuerung* bezeichnet die Möglichkeit, direkt am Primärgerät dieses zu betätigen.

- Bei der *Nahsteuerung* erfolgt die Steuerung aus der eigenen Steuerwarte der Unterstation.

- Unter *Fernsteuerung* wird die Steuerung des Gerätes aus einer entfernten Leitstelle verstanden.

Von der ausführenden Steuerstelle wird nach der Abgabe eines Befehls üblicherweise immer die Rückmeldung über das Erreichen des angestrebten Zustands abgewartet, bevor weitere Handlungen ausgeführt werden. An Schalterstellungsmeldungen werden von den Schaltgeräten die erreichten Endpositionen, eine Störstellung und bei Trennschaltern in manchen Fällen zusätzlich die Zwischenstellung zurückgemeldet. Bei Dreiwegeschaltern und Schaltwagen kommen noch entsprechende Stellungsmeldungen hinzu. Die Stellungen der Stufenschalter von Stelltransformatoren stellen wichtige betriebliche Informationen dar und werden ebenfalls gemeldet.

2.4.2 Sekundärtechnik

In einer Unterstation befinden sich neben den Geräten der Primärtechnik weitere Einrichtungen, die zur Sekundärtechnik gezählt werden und dem sicheren Betrieb der Primärtechnik dienen. Es sind dies im Einzelnen:

- Schutzeinrichtungen der Betriebsmittel[5], z. B. Sammelschienenschutz, Distanzschutz, Differentialschutz, Überstromzeitschutz, Buchholzschutz.

- Fernwirkgeräte zum Empfang der Steuerbefehle von einer entfernten Stelle und Übertragung der Meldungen und Messwerte aus der Station.

- Verriegelungseinrichtungen zur Unterbindung von unzulässigen Schalthandlungen (z. B. Öffnen eines Trenners unter Last).

- Messeinrichtungen für Frequenz, Spannung, Strom und ggf. Phasenwinkel der Spannungszeiger und daraus abgeleitete Größen für Schein-, Wirk- und Blindleistung.

Wichtige Meldungen der Sekundärtechnik, die für den Betrieb oder die Fehlererkennung und -ortung im Netz relevant sind, werden in der Nahsteuerwarte angezeigt und auch an die überlagerte Leitstelle übertragen. Hierbei können durch ein einzelnes Ereignis im Netz eine große Anzahl Meldungen erzeugt werden, wenn z. B. bei zeitverzögerten Schutzeinrichtungen neben der eigentlichen Auslösung, die mit der Abschaltung des Kurzschlusses im Netz verbunden ist, bereits die Anregung der Schutzeinrichtung gemeldet wird. Bei einem Kurzschluss im Netz melden alle im Einflussbereich des Fehlers liegenden Schutzgeräte eine Anregung; allerdings lösen üblicherweise nur die in unmittelbarer Nähe des Fehlers befindlichen Schutzgeräte aufgrund der niedrig eingestellten Zeitstufe aus.

2.5 Bisherige Lösungen in der Darstellung

Für den Betrieb eines elektrischen Netzes ist die Darstellung beider Topologiearten – was **kann** geschaltet werden (potentiell) und was **ist** geschaltet (aktuell) – erforderlich. Die klassische Darstellungsart ist der Nadelplan, wobei in einem (statischen) Papierplan, der die potentielle Topologie wiedergibt, die aktuellen Schalterstellungen durch Einstecken von Farbkopfnadeln (dynamisch) nachgeführt werden.

Die Entwicklung der Fernwirktechnik erlaubte, Schalterzustände und andere dynamische Daten automatisch in die Warte zu übertragen. Nach der Codierung und Übertragungsart unterscheiden sich die Netzdaten in:

- Schalterstellungsmeldungen,

- Funktionsmeldungen (Betriebs-, Warn-, Gefahrmeldungen),

- Messwerte und

- Zählwerte (Wirk-, Blindarbeit, Pegel usw.).

Traditionell – d. h. vor dem Einsatz von Digitalrechnern – war die Darstellung in der Warte eng an die Datenart gekoppelt und wurde auch meist entsprechend gruppiert:

Schalterstellungsmeldungen:

– Stellungsmelder, Quittierschalter und Steuerquittierschalter auf Blindschalttafeln

Messwerte:

– Gruppen von Zeigerinstrumenten, Schreibern, ggf. mit der Möglichkeit der Messwertanwahl

Funktionsmeldungen:

– Meldetableau

Zählwerte:

– Rollenzähler und -anzeigen

Dies hatte zur Folge, dass topologisch und betrieblich zusammengehörige Daten (z. B. die Schalterstellungen und Messwerte eines Feldes) an verschiedenen Orten der Warte dargestellt wurden und vom Betriebsführer getrennt inspiziert werden mussten. Um eine Übersicht über das gesamte Netz zu erhalten, wurden die abgebildeten Schalterstellungen von Hand in den Nadelplan übertragen.

Erst die Mosaiktechnik (Aufbau von Wandbildern aus auswechselbaren kleinen Bausteinen) erlaubte es, die potentielle Topologie größerer Netzbereiche (ca. 30 Unterstationen) effizient in einem Wandbild darzustellen und die dynamischen Zustände darin automatisch einzutragen. Ein Beispiel ist in **Bild 2-4** gezeigt. Im Vordergrund des Bildes sind zwei Monitore sichtbar, die zur Anzeige detaillierterer Informationen aus dem Prozess dienen. Im Hintergrund des Bildes ist das Mosaik zu erkennen. Obwohl es sich hier um ein eher kleines Mosaikwandbild handelt, lassen sich die Charakteristika dieser Form der Übersichtsdarstellung gut ersehen.

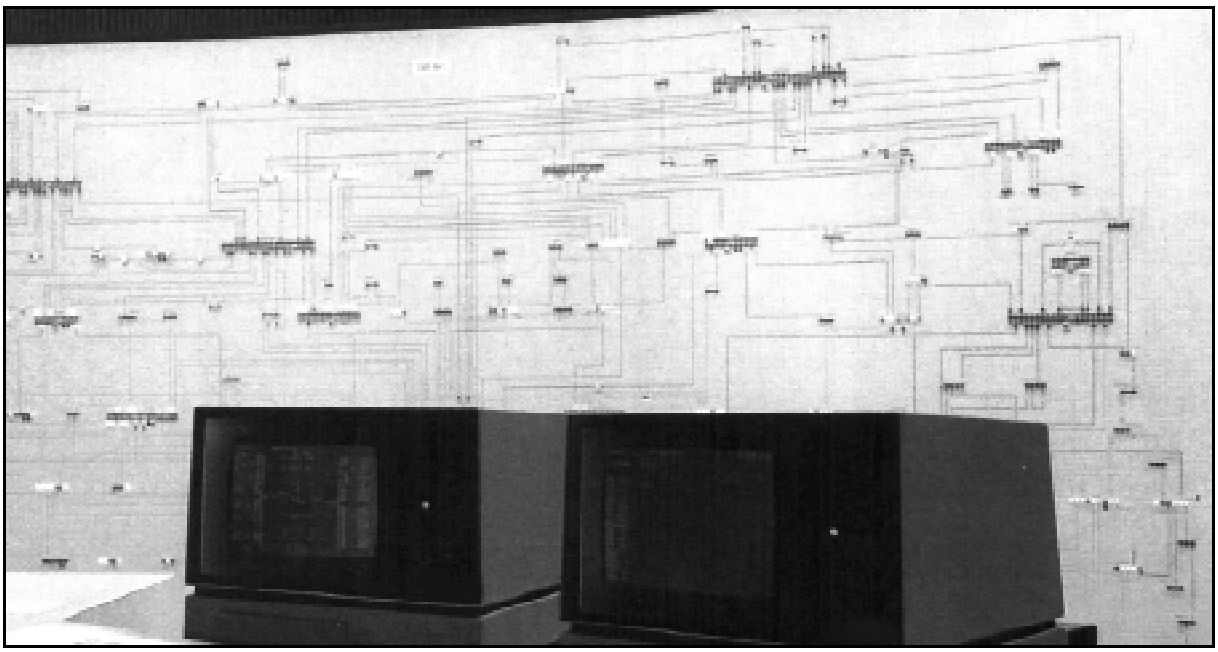


Bild 2-4: Übersichtsdarstellung auf einem Mosaikwandbild

Bereits in der Mosaiktechnik erschienen viele Probleme und Lösungsdetails, die sich auch in der modernen Bildschirmvisualisierung wiederfinden:

- Schalterstellungen werden im Wandbild am topologisch richtigen Ort durch Lichtsignale angezeigt.
- Blinksignale weisen auf Änderungen hin und müssen quittiert werden.
- Gegebenenfalls wird am Ort der Stellungsmeldung auch direkt die Steuermöglichkeit geboten.
- Die Einbettung aller Messwerte am topologisch richtigen Ort bereitet Schwierigkeiten, da sie das Wandbild stört oder übermäßig aufbläht. Hierzu existieren viele Lösungsversuche, u. a. eine Anwahl der Messwerte nach Bedarf.
- Die Darstellung der Unterstationen im Wandbild erfordert viel Platz. Für die Unterbringung der verbindenden Leitungen verbleiben oft nur schmale Korridore, in denen dann die Leitungen im Bündel geführt werden müssen. Die Einzelleitung kann mit den Augen nur noch schwer verfolgt werden und der Netzzusammenhang ist nicht direkt erkennbar.
- Der Versuch, die Wandbilder zu verkleinern bzw. größere Netzverbände auf gegebener Fläche darzustellen, führte zum Verzicht auf Details oder Herausnahme von Funktionen. Dies wurde durch eine Knotenpunktdarstellung anstatt der Darstellung aller Schalter oder Verlagerung der Schaltbefehlseingabe auf getrennte Bedienfelder erreicht.

- Durch die kombinierte Darstellungsweise können Einzelobjekte nicht mehr einzeln geändert (zugefügt oder ausgebaut) werden. Änderungen wirken sich i. d. R. auf den Bildzusammenhang aus. Die Mosaiktechnik ist Ausdruck der Erfahrung, dass sich der Ausbauzustand des Netzes langsam, aber beständig ändert und das Wandbild nachgeführt und geändert werden muss (in Details ca. einmal pro Monat).

Die Änderungsfreundlichkeit, d. h. die Minimierung des Änderungsaufwandes und der störenden Betriebsbeeinträchtigung bei Umbauten im Netz sind nach wie vor bedeutsame Themen, die auch durch die Mosaiktechnik nicht endgültig gelöst wurden.

Der Einsatz von Rechnern in der Warte und die vollgraphischen Monitore brachten neue Darstellungsmöglichkeiten. Im Gegensatz zum Wandbild rückten die Monitore auf einen Meter und näher an den Betriebsführer heran. Die Nutzung der neuen Möglichkeiten führte zu einer Zweiebenendarstellung des Netzes in unterschiedlichen Detailstufen:

- Zusammengefasste Netzdarstellungen ohne Interaktionsmöglichkeiten im Wandbild.

- Detaildarstellung einzelner Netzteile und Schaltanlagen auf Anwahl mittels Monitoren. Auf den Monitoren bestehen meist auch direkte Schaltmöglichkeiten durch interaktive Bilder.

Ein Mosaikwandbild ist in aller Regel trotz der Darstellungsmöglichkeiten der Monitore immer noch vorhanden. Es wurde zunächst unter Umgehung des Rechners auf klassische Weise unmittelbar von den Ausgabeeinrichtungen der Fernwirkgeräte angesteuert und übernahm auch die Reservefunktion bei Rechnerausfall. Im Zuge der Entwicklung von redundanten Mehrrechnersystemen und der Miniaturisierung der Fernwirkempfänger werden auch spezielle Rechner zur Mosaikversorgung eingesetzt.

Die gegenwärtigen Bestrebungen gehen dahin, das kostspielige und (infolge der mechanischen Änderungsmethode) immer noch recht änderungsunfreundliche Mosaik überhaupt zu ersetzen. Dabei lassen sich zwei Richtungen erkennen:

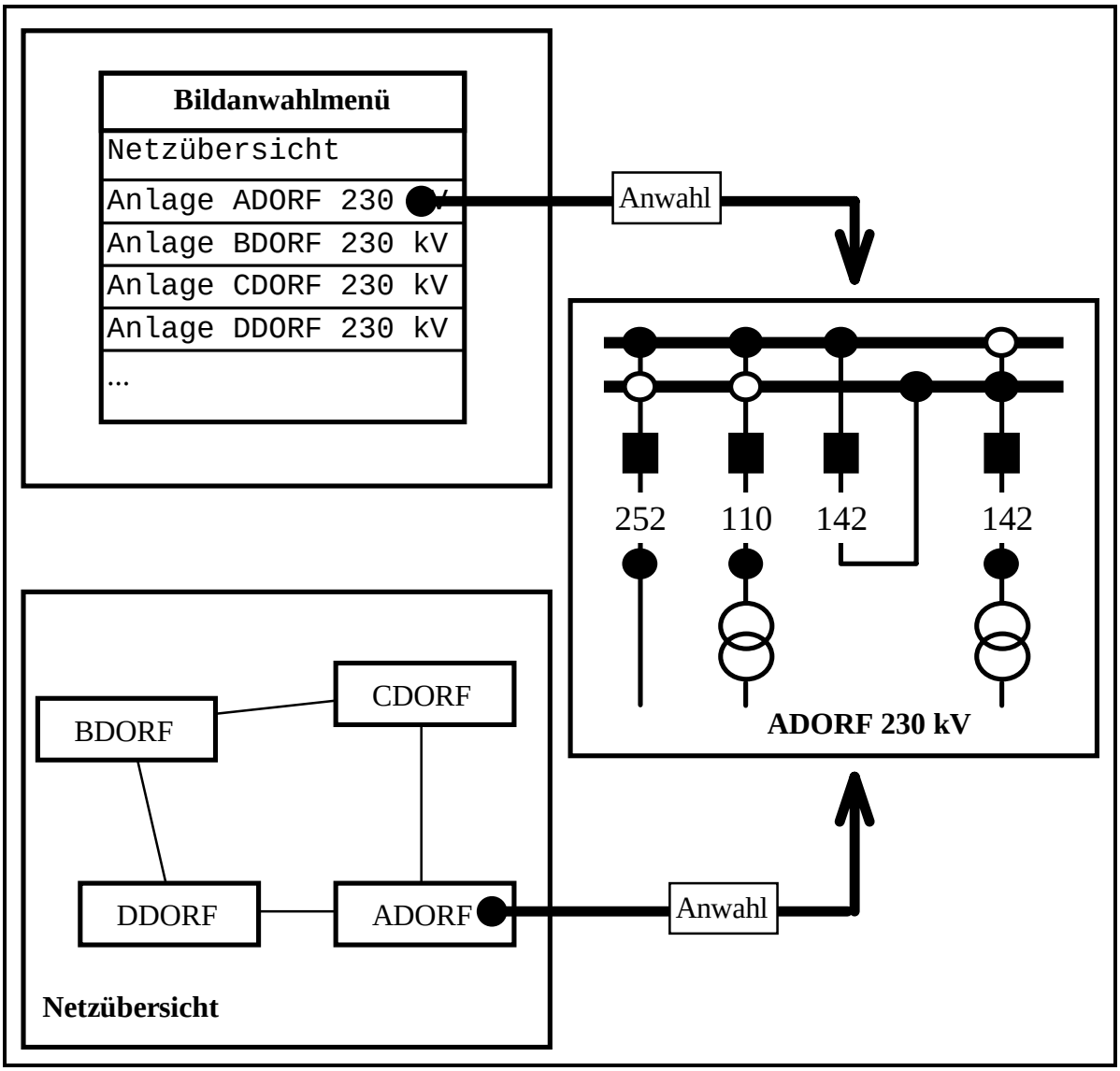
- Wegfall des Mosaiks und Ersatz seiner Funktionen durch zusätzliche Übersichtsdarstellungen auf den Monitoren.

- Ersatz des Mosaiks durch ein Wandbild mit Rückprojektion größerer Auflösung ([MÜL-98]). Auf diesem können vom Rechner generierte Bilder großflächig angezeigt werden.

Bei Darstellungen des Netzes auf dem Monitor taucht oft der Begriff *Überblick-Detail-Paradoxon* auf, der das Problem ausdrückt, auf einer begrenzten Fläche Informationen in genügendem Detail darzustellen, aber dennoch nicht den Überblick über das gesamte Netz zu verlieren. In den folgenden Unterkapiteln werden einige Verfahren der Netzvisualisierung auf Monitoren vorgestellt.

2.5.1 Feststehende Detailstufen

Eine mögliche Vorgehensweise ist in **Bild 2-5** gezeigt. Sie besteht darin, für die Übersichtsdarstellung, die Darstellung der Stationen und für ggf. weitere benutzte Zwischenebenen völlig voneinander unabhängige, eigenständige Diagramme zu verwenden, deren Größe auf die verwendeten Monitore abgestimmt ist. Zur Anwahl der einzelnen Diagramme dienen alphanumerische Auswahlmenüs oder in anderen Diagrammen definierte Anwahlbereiche.



Sowohl durch Anwahl des entsprechenden Eintrags in dem Bildanwahlmenü als auch durch Anwahl des Stationssymbols in der Netzübersicht wird die Anlage „ADORF 230 kV“ selektiert. Problematisch kann es sein, wenn durch die Anwahl aus der Netzübersicht diese durch die Anlagendarstellung verdrängt wird, da dann die ggf. in der Übersicht angezeigten globalen Meldungen des gesamten Netzes nicht mehr sichtbar sind. Bei mehreren Monitoren pro Arbeitsplatz kann allerdings das Anlagenbild auf einem anderen, freien Monitor aufgeschaltet werden, so dass beide Darstellungen parallel zur Verfügung stehen.

Eine spezielle Problematik ergibt sich bei Schaltmaßnahmen an Leitungen und Transformatoren, da i. d. R. mehrere untereinander koordinierte Schalthandlungen auf beiden Seiten bzw. Spannungsebenen erforderlich werden. Ein umständlicher mehrfacher Bildwechsel während der Schaltmaßnahme sollte hierbei vermieden werden.

Soweit die Schaltanlagen wenige Felder umfassen, können sie in Weltbildausschnitten (s. u.) oder speziellen Bildern so dargestellt werden, dass in einem Bild beide Seiten in interaktivem Zugriff sind. Größere Schaltanlagen füllen jedoch alleine einen Monitor. Hier werden z. T. spezielle „Leitungsbilder“ erstellt, bei denen ein Leitungszug über mehrere Schaltanlagen geführt wird. Von den Schaltanlagen werden jedoch nur die Felder dargestellt, die in diesem Leitungszug liegen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, von den Leitungsabgängen einer größeren Anlage jeweils das Gegenfeld in der Nachbaranlage noch mit auf dem Bild darzustellen. Bei mehreren Monitoren pro Arbeitsplatz wird teilweise die Möglichkeit genutzt, die Schaltanlagen der beiden Seiten parallel auf zwei Monitoren darzustellen. Schließlich lassen sich komfortable Bildumschaltmöglichkeiten installieren, um von einer Leitungs- bzw. Transformatorseite auf die andere zu gelangen.

2.5.2 Nutzung von Weltbildern

Anfang der 90er-Jahre tauchte der Begriff *Weltbild* bei den Entwicklern von Bedienoberflächen zur Führung elektrischer Netze erstmalig auf. Hierbei wird die „reale Welt“ in einem einzigen Bild dargestellt. Es lassen sich verschiedene Sichten auf diese Welt mit unterschiedlichen Detailstufen in verschiedenen Ebenen definieren, woraus sich dann für jede Ebene ein eigenes Weltbild ergibt. In **Bild 2-6** ist der Organisation der Weltbilder gezeigt. In diesem Beispiel werden die vier Weltbildebenen „Netzübersicht“, „Teilübersicht“, „Stationsebene“ und „Betriebsmittelebene“ benutzt.

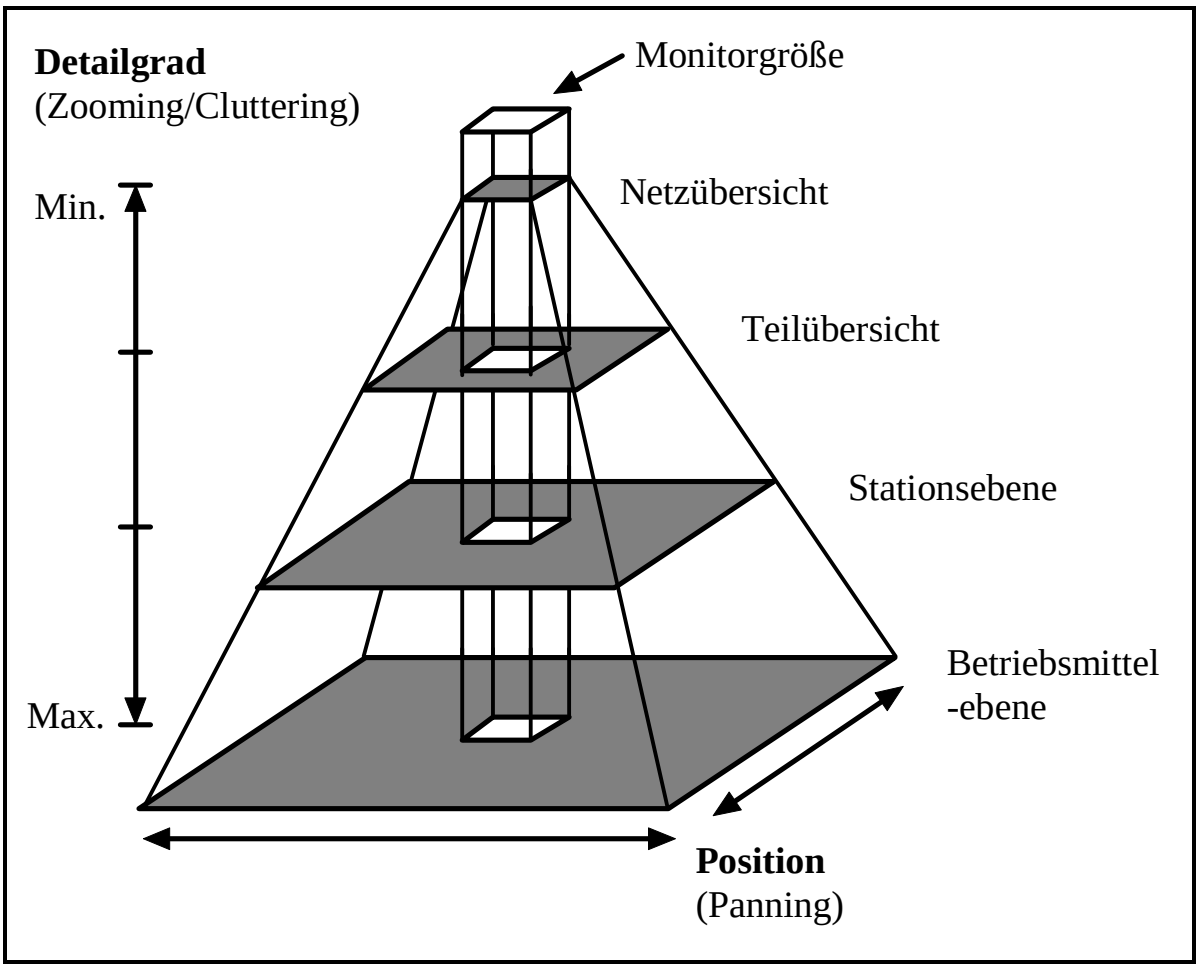


Bild 2-6: Aufbau der Netzweltbilder (Quelle: [REI-96], [AUM-92])

Durch die in höheren Detailstufen für die Darstellung des Netzes zunehmend benötigte Fläche kann auf den Monitoren immer nur ein Ausschnitt des jeweiligen Weltbildes angezeigt werden. Durch schrittweises oder kontinuierliches *Panning* („verschieben“) kann der momentan sichtbare Ausschnitt des Weltbildes eingestellt werden. Um die Orientierung zu gewährleisten wird oft, zusätzlich zum vergrößert dargestellten Netzausschnitt, ein Orientierungsfenster angezeigt, in dem der gezoomte Bildausschnitt relativ zum Ganzen dargestellt ist. Das Wechseln der Ebenen ist durch *Zooming* („vergrößern“) möglich, wobei zuerst nur eine proportionale Vergrößerung der gesamten Darstellung erfolgt und erst bei fortschreitendem Zooming ein Ebenenwechsel zu einer Darstellung mit geänderter Detailstufe stattfindet. *Cluttering* bedeutet das Einblenden von Informationen, wobei der Informationsgehalt der Darstellung zunimmt. Hiermit lassen sich Messwerte, Bezeichnungen oder andere Details, abhängig von der momentanen Zoomstufe und der somit zur Verfügung stehenden Fläche, anzeigen. Entsprechend lassen sich in verkleinerten Darstellungen durch *Decluttering* unwichtigere Informationen ausblenden, um die Darstellung nicht zu überfrachten.

Bei der Konstruktion des Weltbildes werden die verschiedenen Ebenen einzeln

det werden sollen, müssen die Zoomstufen angegeben werden, bei denen ein Darstellungswechsel erfolgen soll. Die vertikale Verknüpfung der Ebenen erfolgt über vorgegebene Referenzpunkte. Üblicherweise lassen sich im Weltbild Segmente definieren, die als eigenes Bild angewählt werden können. Hierdurch können z. B. Anlagen oder Stationen als eigenständiges Bild direkt angewählt und dargestellt werden.

2.5.3 Aufgabenbezogene Netzdarstellung

In [TIE-91] wird eine aufgabenbezogene Darstellung des Netzes gefordert. Ziel der dort geschilderten Netzdarstellung ist es, die immer wiederkehrenden Aktivitäten der Netzführung,

- Erkennen des Handlungsbedarfs,
- Festlegen einer Strategie,
- Durchführung der Maßnahmen und
- Erfolgskontrolle der getroffenen Maßnahmen,

in einem einzigen Bild durchführen zu können. Da für die einzelnen Aktivitäten jedoch unterschiedliche Detailstufen der Darstellung benötigt werden, wird in [TIE-91] ein Konzept vorgestellt, in einem Bild verschiedene Detailstufen zu mischen.

Das Konzept beruht auf dem Grundgedanken der *Netzkomponente* (siehe [TIE-87]), die eine versorgungstechnische Betrachtung des Netzes ermöglicht. Netzkomponenten sind z. B. Sammelschienen, Transformatoren, Leitungen und Kollektive daraus, einschließlich ihrer begrenzenden Schaltfelder. Eine Netzkomponente kann sich aus mehreren Abschnitten zusammensetzen; so besteht die Netzkomponente Transformator üblicherweise aus den beiden Abschnitten der zugeordneten Schaltfelder und dem Abschnitt des eigentlichen Transformators.

In **Bild 2-7** ist eine Situation gezeigt, in der die momentan geerdete Leitung zwischen den Stationen Yx und Fh wieder in Betrieb genommen werden soll. Diese Leitung ist zur Durchführung der Schaltmaßnahmen in vollem Detail, d. h. mit allen Schaltgeräten der angeschlossenen Felder, abgebildet. Die gesamte Strebe Eh-Gh mit den zugehörigen Anlagen ist in der nächst niedrigeren Detailstufe dargestellt, da zur Bearbeitung der gestellten Aufgabe die Anzeige der Sammelzustände ausreicht. Das restliche umgebende Netz ist hier in der niedrigsten Detailstufe dargestellt. Die Sammelschienen der Anlagen werden in dieser Stufe als Kreise dargestellt, wobei eine Zusammenfassung mehrerer Sammelschienen

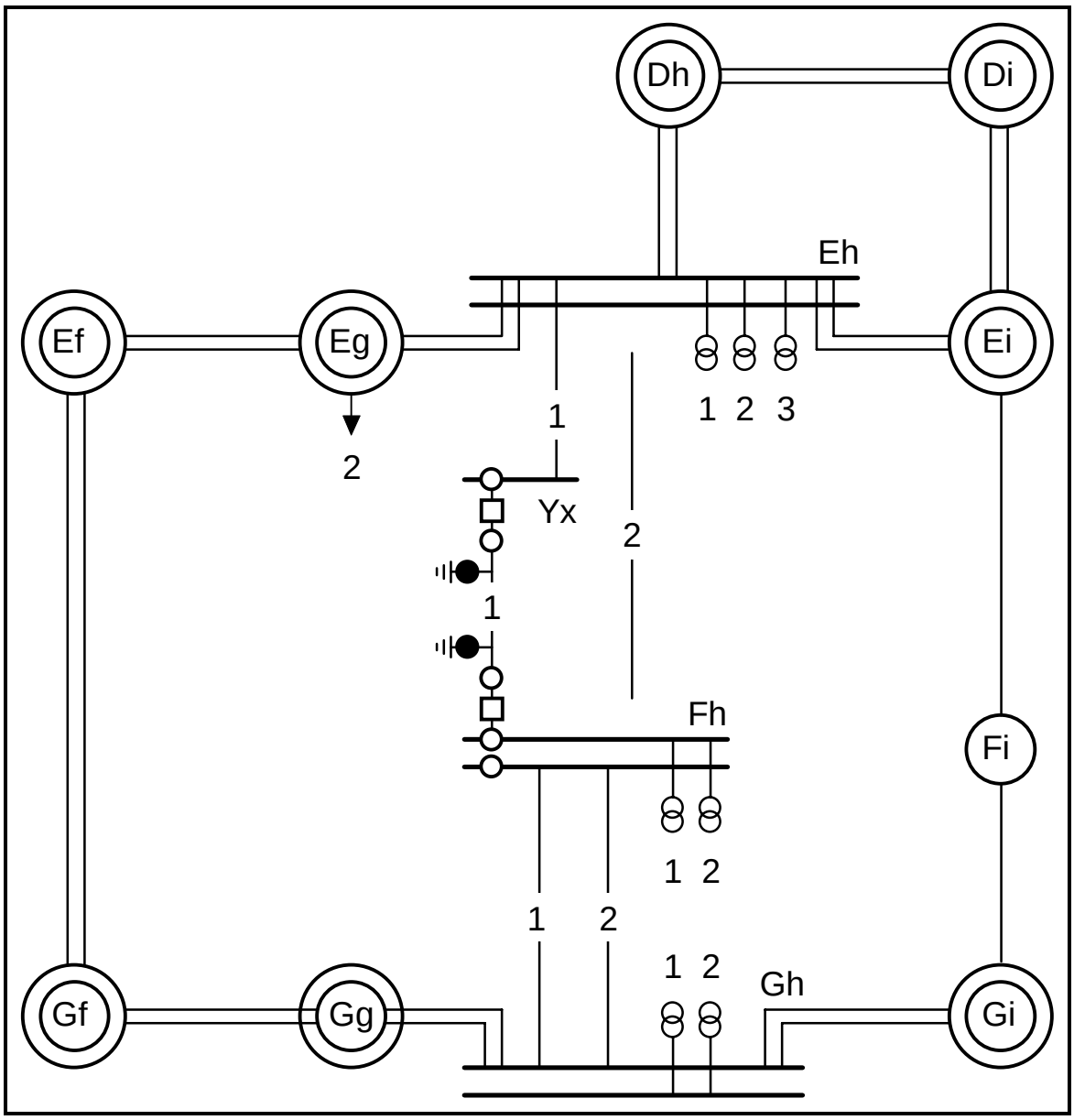


Bild 2-7: Aufgabenbezogene Darstellung des Netzes (Quelle: [TIE-91])

möglich ist. Parallele Netzkomponenten können in dieser Detailstufe zu Kollektiven vereinigt werden.

Bei der Konstruktion des Bildes werden alle Abschnitte der Netzkomponenten topologisch korrekt und geographisch angepasst in einem einzigen Weltbild hinterlegt. Die Auswahl der aktuell darzustellenden Detailstufe der einzelnen Abschnitte erfolgt dann automatisch, angepasst an die zu lösende Aufgabe. Der zur Darstellung der höheren Detailstufen benötigte Raum muss allerdings direkt bei der Konstruktion des Bildes auf der niedrigsten Detailstufe bekannt sein und entsprechend vorgehalten werden.

2.5.4 Fisheye Views

Unter dem Begriff *Fisheye Views* werden Techniken verstanden, einen bestimmten Ausschnitt eines Bildes im Detail zu betrachten und trotzdem nicht den Gesamtüberblick zu verlieren. Der Maßstab der Darstellung wird hierbei nicht konstant gehalten, sondern ändert sich über der Darstellungsfläche. Der Name leitet sich vom optischen Verhalten des Fischauges[6] ab, das im Blickzentrum eine Vergrößerung liefert, die zum Rand hin immer mehr abnimmt. Ein Beispiel ist in **Bild 2-8** gezeigt. In der linken Hälfte ist das Beispiel eines „normalen" Übersichtsbil-

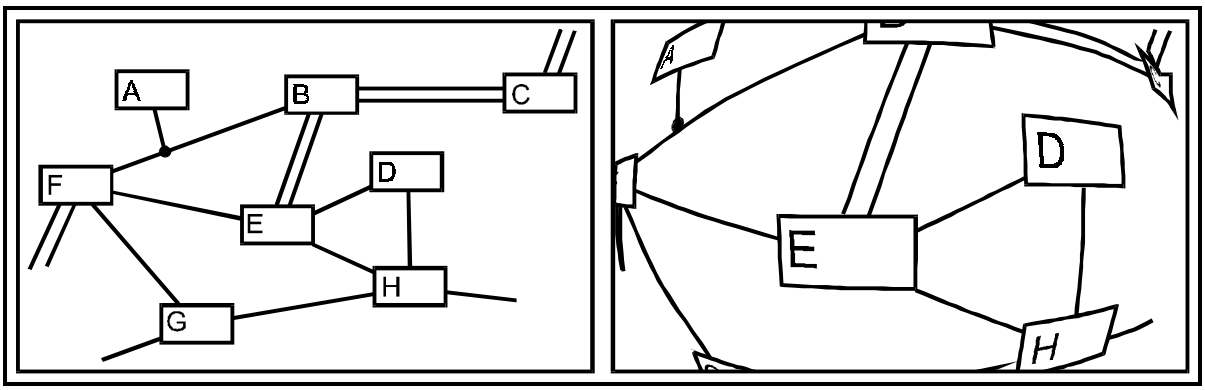


Bild 2-8: Beispiel einer rein optischen Fisheye View

des gezeigt, während in der rechten Hälfte die Auswirkung der Anwendung einer optischen Fisheye View mit dem Fokus in der Nähe der Station E gezeigt ist. Der hier prinzipiell gezeigte Weg der rein optischen Anwendung ist eher fraglich, da er durch die nichtlineare Abbildung zu stark verzerrten Bildern führt, die sehr gewöhnungsbedürftig sind.

In [ZIN-95] werden einige rechnergestützte Anwendungen der *Fisheye View* vorgestellt, die das „Überblick-Detail-Paradoxon" lösen sollen und u. a. den Vorteil bieten, mit einer fest vorgegebenen Darstellungsfläche auszukommen. Hierzu erfolgt im Randbereich der Darstellung eine Verkleinerung, um die durch den vergrößert dargestellten Bereich zusätzlich benötigte Fläche zu kompensieren. Ferner wird der Vorschlag gemacht, durch lokales Cluttering bzw. Decluttering die Darstellung an den lokalen Maßstab anzupassen.

2.5.5 Darstellungsvarianten der Netzübersicht

In der Netzübersicht werden üblicherweise der Zustand der Leitungen und globale Meldungen der Stationen angezeigt. Die Leitungen können beidseitig eingeschaltet, einseitig eingeschaltet oder beidseitig ausgeschaltet sein. In manchen Systemen werden noch weitere Zustände der Leitung (z. B. geerdet, zur Arbeit freigegeben, o. ä.) angezeigt. Die Netzübersicht ist normalerweise an der Topographie des

realen Netzes orientiert, so dass z. B. im Norden des Versorgungsgebiets befindliche Stationen in der oberen Bildregion positioniert sind.

Die graphische Darstellungen der Leitungen geschieht einheitlich durch Linien oder Linienzüge, die die Stationen miteinander verbinden. Bei der Darstellung der Stationen gibt es hingegen unterschiedliche Varianten. Zwei Möglichkeiten sind in **Bild 2-9** gezeigt. Im linken Teil wird eine Station durch einen rechteckigen Kasten, der mit dem Namen der Station versehen ist, repräsentiert. Bei dieser Form der Darstellung sind keinerlei topologische Aussagen über den aktuellen Schaltzustand innerhalb der Station möglich. Im Gegensatz dazu lassen sich bei der rechten Darstellung die Leitungsdurchschaltungen innerhalb der Station direkt erkennen, da für jede benutzte Sammelschiene(ngruppe) ein eigener Kreis gezeichnet wird, auf dem die zugeschalteten Leitungen enden. Nachteilig bei dieser Variante ist allerdings, dass die Anzahl der übersichtlich darzustellenden Sammelschienengruppen einer Station auf ca. drei begrenzt ist. Auch kann diese Verfahrensweise bei mehreren Schaltanlagen mit unterschiedlichen Spannungsebenen innerhalb einer Station nicht mehr eingesetzt werden, da hierbei für jede Anlage die zugehörigen Sammelschienen angezeigt und über die vorhandenen Transformatoren verbunden werden müssten. Dieses Vorgehen würde zu einer stark unübersichtlichen Darstellung führen.

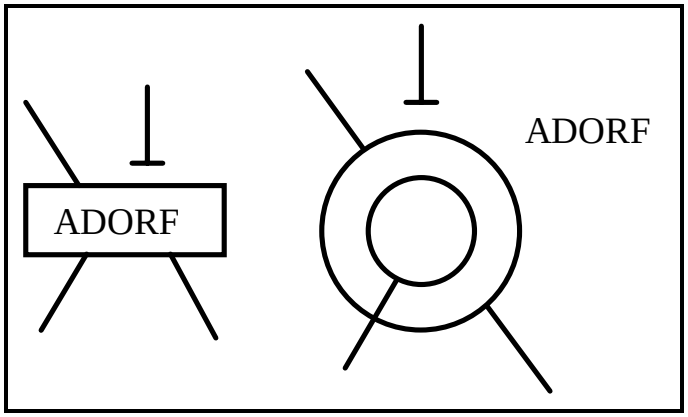


Bild 2-9: Unterschiedliche Stationssymbole

2.5.6 Sonderdiagramme

Neben den interaktiven Bildern, die unmittelbar der Betriebsführung dienen, finden sich in den Netzleitstellen Darstellungen, die Übersichten für spezielle Funktionen bieten. Solche Darstellungen werden im Rahmen des neu entwickelten Visualisierungssystems nicht behandelt, sollen aber hier der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

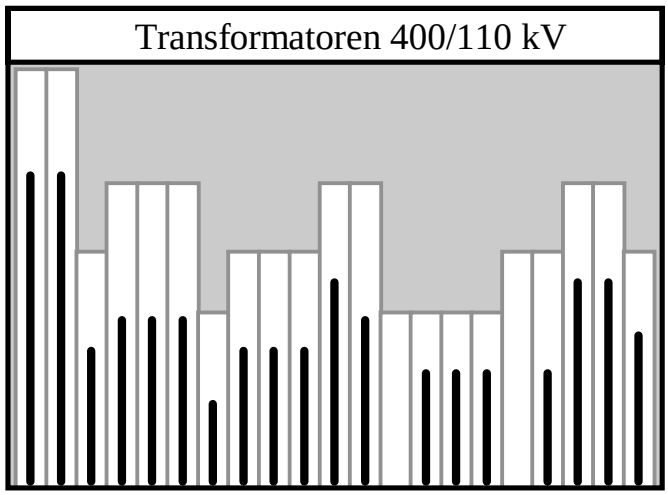


Bild 2-10: Prozentuale Auslastung von Transformatoren (Quelle: [COR-96])

In **Bild 2-10** ist das Beispiel einer Darstellung der Auslastung von Transformatoren eines Netzes gezeigt. Hierbei wird bewusst die bereits vor dem Einzug des Digitalrechners in die Leitstelle angewandte typweise Gruppierung der Meldungen bzw. Messwerte benutzt, um unter Nutzung der Gestaltgesetze (s. Kapitel 2.1.4) eine vorteilhafte Erfassung der Daten zu ermöglichen. Charakteristisch für diese Art der Darstellung ist, dass sich unter Umständen zwar Vorteile in der eigentlichen Wahrnehmung der angezeigten Daten ergeben können, der topologische Zusammenhang der repräsentierten Daten mit dem Netz aber verloren geht.

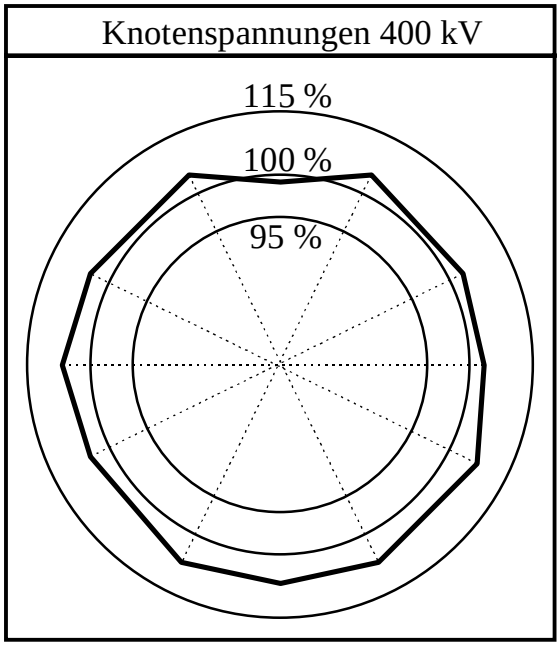


Bild 2-11: Kiviatdiagramm für Knotenspannungen (Quelle: [STE-97])

Teilweise wird durch eine geschickte Darstellung der Messwerte versucht, deren topologischen Zusammenhang mit dem Netz aufrechtzuerhalten. In **Bild 2-11** ist als Beispiel ein Kiviatdiagramm der Knotenspannungen eines Netzes gezeigt. Dem Abstand zwischen Mittelpunkt des Kreises und einer Ecke des Polygons entspricht dem Betrag der bezogenen Knotenspannung in einem Punkt des Netzes. Die Ausrichtung der Eckpunkte des Polygons wird bei diesem Darstellungsverfahren – zumindest annähernd – mit der geographischen Lage der Messstellen im Netz in Übereinstimmung gebracht, so dass im Norden befindliche Messstellen im oberen Bereich des Diagramms dargestellt werden. Auch bei diesem Beispiel wird versucht, die Gestaltgesetze auszunutzen, um eine vorteilhafte Wahrnehmung der angezeigten Daten zu erzielen, da Abweichungen von der (idealen) Kreisform leichter erkannt werden können.

In **Bild 2-12** ist ein Beispiel der Messwertdarstellung gezeigt, bei der die Topologie des Netzes im Vordergrund steht und die Auslastung der Leitungen bzw. Transformatoren und die Sammelschienenspannungen in diese integriert dargestellt werden. In dem gezeigten Beispiel werden die Anlagen mit ihren Sammelschienen durch die teilweise farbig gefüllten (kleinen) Rechtecke dargestellt. Die Sammelschienenspannung wird durch den Füllgrad der Kästen angezeigt. Die Leitungen werden durch die grauen (großen) Rechtecke repräsentiert, deren Breite proportional zur Nennleistung der Leitung ist. Die Leitungsauslastungen wird durch die Breite der Richtungspfeile angezeigt.

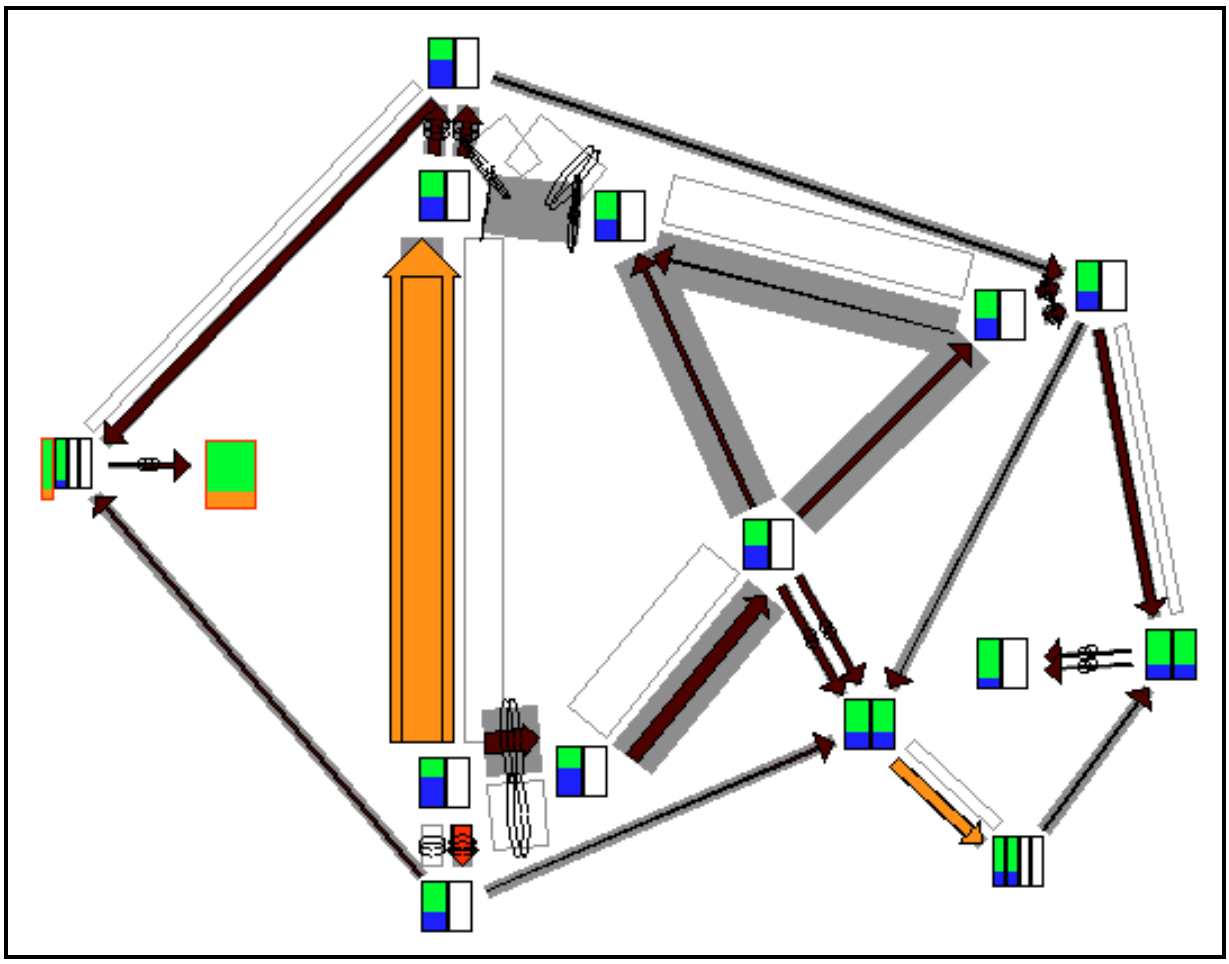


Bild 2-12: Topologisch integrierte Messwertdarstellung (Quelle: [CHR-95])

Ähnliche Darstellungen finden sich auch in [POW-97]. Dort wird zur Anzeige der Spannungsverteilung im Netz die gesamte Hintergrundfläche anhand der aktuellen Spannungen der in der Nähe befindlichen Stationen eingefärbt. Allen Darstellungen ist gemeinsam, dass sie zwar zusätzliche Informationen über den Netzzustand liefern, für die eigentliche Betriebsführung aber eher von sekundärem Interesse sind, da keine direkten Interaktionsmöglichkeiten zur Beeinflussung von Objekten im Netz möglich sind. Zur reinen Beobachtung des Netzzustands können die gezeigten Darstellung ggf. einen unterstützenden Beitrag leisten (s. auch [LIN-96]).