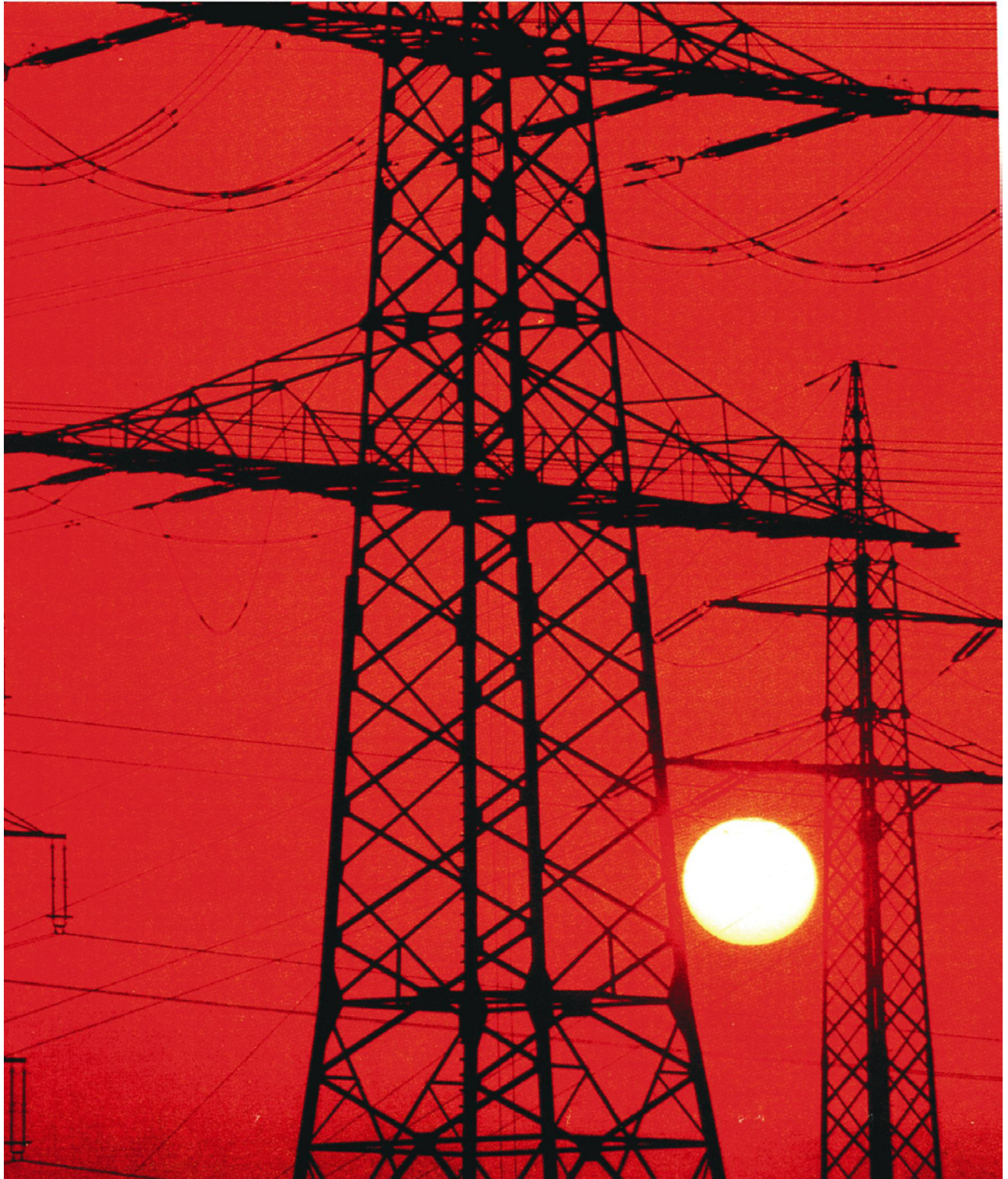


Universität Hannover
Institut für
Energieversorgung und Hochspannungstechnik



Grundlagen der Elektrischen Energieversorgung

Vorlesung von Prof. Dr.-Ing. habil. B. R. Oswald

Die elektrische Energieversorgung (Stromversorgung, Elektrizitätsversorgung, Elektroenergieversorgung) umfasst die Bereiche der Bereitstellung von Elektroenergie (Erzeugung), Übertragung und Verteilung sowie Nutzung bei den Abnehmern.

Betrachtungs- und Untersuchungsgegenstand sind die erforderlichen Anlagen und Betriebsmittel (Primärtechnik) zusammen mit den Einrichtungen zur Steuerung und Regelung des komplexen elektrischen Energieversorgungssystems sowie den Einrichtungen zum Schutz vor Überlastung und Überbeanspruchung durch Schaltvorgänge, Kurzschlüsse und andere Störungen (Schutz- und Leittechnik).

Neben der Funktionsweise der einzelnen Betriebsmittel und deren Zusammenwirken im System interessieren Verfahren und Methoden zur optimalen Systemgestaltung und Systemführung, zur Lastprognose sowie zum Energiemanagement.

Hierzu ist die Computersimulation des stationären und nichtstationären Betriebsverhaltens des elektrischen Energieversorgungssystems ein wichtiges Hilfsmittel, ebenso, wie zur Vermeidung und Aufklärung von Störungen.

Der derzeitige Trend zur Dezentralisierung der Energieversorgung verbunden mit der zunehmenden Nutzung regenerativer Energieträger einerseits und die mit dem Wettbewerb einhergehende Globalisierung andererseits stellen neue Anforderungen an die Gestaltung der Netze und deren Betriebsweise.

So wird heute der Einsatz neuer Komponenten, wie FACTS (Flexible A. C. Transmission Systems), supraleitende Betriebsmittel, neuartige schnelle Energiespeicher ebenso intensiv untersucht, wie die Einsatzmöglichkeiten von künstlichen neuronalen Netzen und anderen selbstlernenden Verfahren.

Das Arbeitsgebiet des in der Energieversorgung tätigen Ingenieurs wird so mehr und mehr interdisziplinär und ist zu einem nicht geringen Teil durch die Technische Informatik, die Mikroelektronik, die Automatisierungstechnik sowie die Betriebs- und Volkswirtschaft beeinflusst.

In der Vorlesung, die einführenden Charakter hat, werden folgende Themen behandelt:

- Aufgaben der Elektrischen Energieversorgung, Historie und Entwicklungstendenzen
- Symmetrische und unsymmetrische Drehstromsysteme, Spannungsebenen, Netzaufbau, Schaltanlagen, Kraftwerke
- Aufbau und Funktion der Generatoren, Transformatoren, Drosselspulen, Kondensatoren
- Anpassung der Erzeugung an den Bedarf (Frequenz-Leistungsregelung)
- Freileitungen und Kabel, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)
- Übertragungsverhältnisse und deren Berechnung
- Stabilität der Energieübertragung im Normalbetrieb und bei Störungen
- Elektroenergiequalität (Oberschwingungen, Netzurückwirkungen, elektrische und magnetische Felder)
- Störungsgeschehen, Versorgungssicherheit, Zuverlässigkeit
- Kurzschlußverhältnisse und deren Berechnung

Zu ausgewählten Vorlesungskapiteln werden rechnerische Übungen durchgeführt.

Univ. Hannover	Vorlesungsinhalt Zielstellung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/01

Albert, K., Apelt, O., Bär, G., Koglin, H.-J.: Elektrischer Eigenbedarf. Energietechnik in Kraftwerken und Industrie. VDE-Verlag GmbH Berlin Offenbach 1993.

Bohn, T. (Herausgeber): Elektrische Energietechnik, Band 4 der Handbuchreihe Energie. Verlag TÜV Rheinland 1987.

Crastan, V.: Elektrische Energieversorgung 1. Springer Verlag Berlin...Tokio 1999.

Fischer, W. (Herausgeber): Die Geschichte der Stromversorgung. VWEW-Verlag Frankfurt 1992.

Flosdorff, R., Hilgarth, G.: Elektrische Energieverteilung. B. G. Teubner Verlag Stuttgart, 6. Auflage 1994.

Happoldt, H., Oeding, D.: Elektrische Kraftwerke und Netze. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 5. Auflage 1978.

Herold, G.: Grundlagen der elektrischen Energieversorgung. B. G. Teubner Verlag Stuttgart 1997.

Heuck, K., Dettmann, K.-D.: Elektrische Energieversorgung. Vieweg Verlag Braunschweig, 4. Auflage 1999.

Hosemann, G., Boeck, W.: Grundlagen der elektrischen Energietechnik. Springer Verlag Berlin...Tokyo, 3. Auflage 1987.

Hütte Taschenbücher der Technik. Elektrische Energietechnik, Band 3, Netze. Springer Verlag Berlin...Tokyo 1988.

Nelles, D., Tuttas, Ch.: Elektrische Energietechnik. B. G. Teubner Verlag. Stuttgart 1998.

Schulze-Buxloh, W.: Elektrische Energieverteilung Teil 1 und 2. W. Girardet Verlag München 1962.

Schwickardi, G.: Elektroenergietechnik Band 1-3. AT Verlag Aarau (Schweiz) 1979.

Voß, A. (Herausgeber): Die Zukunft der Stromversorgung. VWEW-Verlag Frankfurt 1992.

Zeitschriften:

Elektrizitätswirtschaft. Zeitschrift der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW.

ELEKTRIE. Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik. Berlin.

ETZ. Elektrotechnik und Automation. Elektrotechnische Zeitschrift des VDE.

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV).

Univ. Hannover	Literaturhinweise	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/02

Präambel zum Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft vom 13.12.1935 (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)

Um die Energiewirtschaft als wichtige Grundlage des wirtschaftlichen und sozialen Lebens im Zusammenhang aller beteiligten Kräfte der Wirtschaft und der öffentlichen Gebietskörperschaften einheitlich zu führen und im Interesse des Gemeinwohls die Energiearten wirtschaftlich einzusetzen, den notwendigen öffentlichen Einfluß in allen Angelegenheiten der Energieversorgung zu sichern, **volkswirtschaftlich schädliche Auswirkungen des Wettbewerbs** zu verhindern, einen zweckmäßigen Ausgleich durch Verbundwirtschaft zu fördern und durch all dies die Energieversorgung so **sicher** und **billig** wie möglich zu gestalten, hat die Reichsregierung das folgende Gesetz beschlossen, das hiermit verkündet wird.

Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechts*) vom 24. 04 1998

Artikel 1

Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz–EnWG)

§ 1 Zweck des Gesetzes

Zweck des Gesetzes ist eine möglichst **sichere**, **preisgünstige** und **umweltverträgliche** leistungsgebundene Versorgung mit Elektrizität und Gas im Interesse der Allgemeinheit.

§ 2 Begriffsbestimmungen

- (1) **Energie** sind **Elektrizität** und **Gas**, soweit sie zur leitungsgebundenen Energieversorgung verwendet werden.
- (2) **Energieanlagen** sind Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung oder Abgabe von Energie, soweit sie nicht lediglich der Übertragung von Signalen dienen.
- (3) **Energieversorgungsunternehmen** sind alle Unternehmen und Betriebe, die andere mit Energie versorgen oder ein Netz für die allgemeine Versorgung betreiben.
- (4) **Umweltverträglichkeit** bedeutet, daß die Energieversorgung den Erfordernissen eines **rationellen** und **sparsamen** Umgangs mit Energie genügt, eine **schonende** und **dauerhafte** Nutzung von Ressourcen gewährleistet ist und die Umwelt möglichst wenig belastet wird. Der Nutzung von **Kraft-Wärme-Kopplung** und **erneuerbaren Energien** kommt dabei besondere Bedeutung zu.
- (5) Die Abnahme- und Vergütungspflicht für die Einspeisung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien in das Netz für die allgemeine Versorgung richtet sich nach dem **Stromeinspeisungsgesetz**.

*) Dieses Gesetz dient der Umsetzung der Richtlinie 96/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Dezember 1996 betreffend gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt (ABl. EG 1997 Nr. L 27 S. 20). Die Verpflichtungen aus der Richtlinie 83/189/EWG des Rates vom 28. März 1983 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der Normen und technischen Vorschriften (ABl. EG Nr. L 109 S. 8), zuletzt geändert durch die Richtlinie 94/10/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 (ABl. EG Nr. L 100 S. 30), sind beachtet worden.

Univ. Hannover	Energiewirtschaftsgesetz (Auszüge)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/03

§ 4 Betrieb des Elektrizitätsversorgungsnetzes

(1) Elektrizitätsversorgungsunternehmen sind zu einem Betrieb ihres Versorgungsnetzes **verpflichtet**, der eine Versorgung entsprechend den Zielen des § 1 sicherstellt.

(4) Das Übertragungsnetz ist als eigene Betriebsabteilung, **getrennt** von Erzeugung und Verteilung sowie von den übrigen Tätigkeiten, die nicht mit ihm zusammenhängen, zu führen.

§ 5 Zugang zum Elektrizitätsversorgungsnetz

Der **Zugang zum Elektrizitätsversorgungsnetz** erfolgt, vorbehaltlich des § 7, nach dem System des verhandelten Netzzugangs.

§ 6 Verhandelter Netzzugang

(1) Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen haben anderen Unternehmen das Versorgungsnetz für **Durchleitungen** zu Bedingungen zur Verfügung zu stellen, die nicht ungünstiger sind, als sie von ihnen in vergleichbaren Fällen für Leistungen innerhalb ihres Unternehmens oder gegenüber verbundenen oder assoziierten Unternehmen tatsächlich oder kalkulatorisch in Rechnung gestellt werden. Dies gilt nicht, soweit der Betreiber nachweist, dass ihm die Durchleitung aus betriebsbedingten oder sonstigen Gründen unter Berücksichtigung der Ziele des § 1 nicht möglich oder **nicht zumutbar** ist. Die Ablehnung ist schriftlich zu begründen. § 22 Abs. 4 und § 26 Abs. 2 des Gesetzes gegen Wettbewerbsbeschränkungen bleiben unberührt.

(3) Bei der Beurteilung der Zumutbarkeit nach Absatz 1 Satz 2 ist besonders zu berücksichtigen, inwieweit dadurch Elektrizität aus fernwärmeorientierten, umwelt- und ressourcenschonenden sowie technisch-wirtschaftlich sinnvollen **Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen** oder aus Anlagen zur Nutzung **erneuerbarer Energien** verdrängt und ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Anlagen verhindert würde, wobei Möglichkeiten zum Verkauf dieser Elektrizität an Dritte zu nutzen sind.

§ 7 Netzzugangsalternative

(1) Die Behörde erteilt Elektrizitätsversorgungsunternehmen für die Versorgung von **Letztverbrauchern** eine Bewilligung, durch die die Anwendung des § 5 ausgeschlossen wird. Die Bewilligung setzt voraus, dass der Netzzugang nach den Absätzen 2 bis 5 erfolgt und zu erwarten ist, dass dieser Netzzugang zu gleichwertigen wirtschaftlichen Ergebnissen und daher zu einer direkt vergleichbaren Marktöffnung sowie einem direkt vergleichbaren Zugang zu den Elektrizitätsmärkten führt. Die Bewilligung darf nur einheitlich für das **gesamte Gebiet**, in dem das Elektrizitätsversorgungsunternehmen die allgemeine Versorgung durchführt, oder für alle von ihm versorgten Gebiete einer Gemeinde erteilt werden.

(4) Die Tätigkeiten des Elektrizitätsversorgungsunternehmens nach den Absätzen 2 und 3 sind **getrennt** von der Erzeugungs- und Verteilungstätigkeit zu **verwalten**. Es dürfen keine Informationen zwischen den Tätigkeiten nach den Absätzen 2 und 3 und den Erzeugungs- und Verteilungsaktivitäten vermittelt werden, es sei denn, dass diese Informationen für die Erfüllung der Aufgaben nach den Absätzen 2 und 3 erforderlich sind.

Univ. Hannover	Energiewirtschaftsgesetz (Fortsetzung)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/04

Gebietsmonopol	Wettbewerb
feste Abnehmer garantierter Markt lange Vertragszeiten keine oder bekannte Konkurrenten Primat der Technik Regional behördliche Preisaufsicht Kosten + Gewinn = Preis	neue, wechselnde Kunden unsicherer Markt kurze Vertragszeiten neue, unbekannte Konkurrenten Primat des Vertriebs überregional, international, global behördliche Preisaufsicht entbehrlich Wettbewerbspreis – Kosten = Gewinn

Auswirkungen des Wettbewerbs auf die elektrische Energieversorgung

Allgemeine Auswirkungen	Strom wird zur Handelsware physikalischer und virtueller Stromfluß Kostendruck führt zur Effizienzsteigerung Einsatz von Managementsystemen wachsende Rolle der Informationstechnik
Auswirkungen auf die Erzeugung	höhere Kraftwerksauslastung neue Kraftwerke mit geringeren Kosten (GUD-KW) Stilllegung und Verdrängung unwirtschaftlicher KW dezentrale Erzeugung Kraft-Wärme-Kopplung
Auswirkungen auf die Netze	gedrosselter Netzausbau längere Nutzungsdauer der Betriebsmittel wirtschaftlich optimierte Instandhaltung Erhöhung der Auslastung erhöhter Aufwand für Zählung und Messung Fusionsbestrebungen der Netzbetreiber
Auswirkungen auf die Abnehmer	Abnehmer wird zum Kunden („König“) Angebotsvielfalt mit unklaren Tarifen Preisrückgang bis Überkapazitäten abgebaut Serviceangebote zur Kundenbetreuung Gefahr schwindender Energiequalität

Univ. Hannover	Vom Monopol zum Wettbewerb	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/05

1826 Georg Simon Ohm definiert das nach ihm benannte Ohmsche Gesetz.

1831 Der Engländer Michael Faraday (1791-1867) entdeckt die Induktion und gibt das Prinzip des Transformators an. Er benutzte als erster den Begriff des Diamagnetismus und erfand die erste Unipolarmaschine als Gleichstromgenerator.

1833 Der englische Physiker William Ritchie (1790-1837) baut den ersten Generator mit Kommutator. Der Begriff des Kommutators war von Gauß eingeführt worden.

1856 Der Deutsche Ernst Werner von Siemens (1816-1892) entwickelt den ersten Doppelt-Anker.

1863 Erste U-Bahn in London, die anfänglich mit Dampflokomotiven, 1890 jedoch mit elektrischem Antrieb fährt.

1866 Werner von Siemens (1816-1892) entdeckt das dynamoelektrische Prinzip der Selbsterregung aus dem Restmagnetismus der Maschine.

1867 Betriebsreife Dynamomaschine (Motoren, Generatoren)

1872 Der Deutsche Friedrich von Hefner-Alteneck (1845-1904) baut den ersten Trommelanker und brachte später die Wicklungen in den Nuten des Ankers unter.

1879 Der Amerikaner Thomas Alva Edison (1847-1931) erhält das Patent auf seine Glühlampe, damit Einführung der Glühlampe.

Erste elektrische Bahn bei der Gewerbeausstellung in Berlin: 3 PS, 7 km pro Stunde, Stromzuführung über Mittelschiene, gebaut von Siemens.

In Berlin und in anderen Städten entstehen Elektrotechnische Vereine.

1881 Erste elektrische Straßenbahn durch Berlin-Lichterfelde, Stromversorgung über die Schiene, von Siemens gebaut.

Den Franzosen Marcel Deprez (1843-1918) und Jules Carpentier (1851-1921) wird in einem englischen Patent die Energieübertragung mit Wechselstrom über Transformatoren zuerkannt.

1882 Marcel Deprez setzt auf Anregung von Oscar v. Miller die erste Gleichstrom-Kraftübertragung von Miesbach zur Elektrizitätsausstellung nach München in Betrieb: 57 km, 1,5 kW, 1,5 bis 2,0 kV, Übertragungsverluste 78 % !

Errichtung einer Blockstation von P. Reißner in Stuttgart für 30 Glühlampen mit 65 V.

1882 Edison baut das erste öffentliches Gleichstromkraftwerk der Welt in New York (Pearl Street): 3 (später 6) Jumbo-Generatoren 150 kW, 110 V Gleichstrom, 1200 U/min.

1883 Erster Lehrstuhl für Elektrotechnik (Prof. Adolf Slaby, 1849-1913) an der Gewerbeakademie Berlin, der späteren Technischen Hochschule eingerichtet.

Emil Rathenau (1838-1915) gründet die „Deutsche Edison Gesellschaft für angewandte Elektrizität“ (aus der 1887 die AEG hervorgeht) mit dem Ziel, die von Edison erworbenen Rechte zum Bau von Kraftwerken zu verwirklichen.

Univ. Hannover	Zeittafel I	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/06

1884 Überdruck-Dampfturbine von Charles Parson; damit Begründung der modernen KW-Technik.

1884 Goulard und Gibbs beschreiben den ersten Transformator für die Energieübertragung und nehmen erste 2000-V-Wechselstromfreileitung der Welt in Italien (Lanzoturin) in Betrieb: 40 km, 20 kW. Der Transformator mit stabförmigem Kern bewährt sich nicht, Patent später aberkannt

1884 Blockstation in Berlin, Ecke Friedrichstraße/Unter den Linden, errichtet: 4 Dampfmaschinen á 65 PS, 7 Edison-Dynamomaschinen leisten mit 100 V Gleichspannung zusammen 100 kW (aufgrund der relativ geringen Spannung war nur die Versorgung naheliegender Abnehmer möglich, daher der Name Blockstation).
Erste Installationsvorschriften für elektrische Anlagen für Berlin werden erlassen.

1885 Erstes deutsches öffentliches Elektrizitätswerk (Zentrale) Berlin Markgrafenstr. 44 geht am 15. August in Betrieb: 110 V Gleichspannung, 6 stehende Verbunddampfmaschinen je 180 PS und 12 Gleichstromgeneratoren, Zweileitersystem. Von 540 kW nehmen das Schauspielhaus 150 kW und die Reichsbank 20 kW ab (Die Gleichstromkraftwerke konnten nur einen standortnahen Bereich versorgen, wurden deshalb meist mitten in der Stadt gebaut und deshalb Zentralen genannt).
Die Ungarn Max Déri (1854-1936), Otto Tilus Bláthy und Carl Zipernovski (1853-1943) entwickeln einen technisch brauchbaren Transformator (Ringkerntransformator) und führen in den Versorgungsnetzen die Parallelschaltung der Generatoren, Transformatoren und Verbraucher ein, in den bis dato vorzüglich die Reihenschaltung angewandt wurde. Die auf der Budapester Landesausstellung vorgestellte Erfindung war bahnbrechend für Stromverteilungssysteme.

1887 Friedrich August Haselwander (1859-1932) konstruiert die erste Dreiphasen-Wechselstrommaschine Synchrongenerator): 100 V, 960 min^{-1} , 32 Hz zur Beleuchtung einer Hutfabrik und ist damit der eigentliche Erfinder des Dreiphasen-Wechselstroms.
Zusammenschaltung der von den Kraftwerken (Lichtwerken) Markgrafenstraße und Mauerstraße gespeisten Netze.
Der Kroat Nikola Tesla (1856-1943) meldet in den USA Patente auf ein „System der Kraftübertragung mit Elektrizität“ an (Mehrphasensystem).

1889 Michail Dolivo-Dobrowolsky (1862-1919) entwickelt den Drehstrommotor mit Kurzschlussläufer und prägt den Begriff Drehstrom.
Von Dolivo-Dobrowolski baut einen Drehstromtransformator.
Ganz und Co. beginnen mit dem Bau von Einphasen-Kommutatormotoren.

1890 In Deutschland werden die ersten Maschennetze gebaut; bisher wurden alle Netze offen betrieben.

1891 Ferranti (1864-1930) nimmt am 16. Februar in Deptford bei London das erste Wechselstrom-Großkraftwerk der Welt in Betrieb, das erstmalig außerhalb des Verbraucherschwerpunktes errichtet ist. Einsatz eines 2-kV-Kabels, papierisoliert, konzentrische Anordnung.

Univ. Hannover	Zeittafel II	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/07

1891 Erstes großes Wechselstromkraftwerk in Deutschland entsteht am Stadtrand von Köln (Lizenz der Firma Ganz/Budapest): 2 Dampfmaschinen mit je 600 PS und 1 Dampfmaschine mit 750 PS, 2...2,5 kV, 50 Hz, Wirkungsgrad 6% !, Bleimantelkabel. Görges (1859-1946) erfindet den Drehstromkommutatormotor. Erste Straßenbahn mit elektrischer Oberleitung und Rollen- oder Bügelabnehmern in Halle an der Saale.

1891 Oscar von Miller und von Dolivo-Dobrovolski nehmen am 24. August die erste 15-kV-Drehstromfreileitung (8,5 kV Leiter-Erde-Spannung) von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main aus Anlaß der internationalen Frankfurter elektrotechnischen Ausstellung in Betrieb: 175 km, 12,5 mm² Kupferseile, 40 Hz, Wirkungsgrad der Übertragung 75 %, Leiterabstand 1 m, 3182 Holzmaste etwa 8 m Höhe, mittlere Spannweite 60 m.

210-kW-Drehstromgenerator (Maschinenfabrik Oerlikon) in Lauffen mit 55 V Leiter-Erde-Spannung, 150 U/min, Wirkungsgrad 96,5 %, angetrieben von 304-PS-Turbine (zweikränzige Kombinationsturbine). Drehstrom-Öl-Transformatoren mit Tempelkern (AEG und Oerlikon). Auf der Ausstellung wurden mit 65 V 1000 Glühlampen und ein 100-PS-Drehstrommotor (v. Dolivo-Dobrovolski) gespeist, der Pumpen für einen künstlichen Wasserfall antrieb.

1881 Erste Dampfturbine zum Antrieb eines Dynamos eingesetzt: Parsonsturbine (Charles Parnsen 1854-1931) 150 kW bei 4700 U/min. Wirkungsgrad 10,6 %.

1893 Erstes Pumpspeicherwerk der Welt in Klus (Schweiz).

Gründung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) in Berlin.

Dem Deutschen Heinrich Goebel (1818-1893), der nach Amerika ausgewandert war, wird in einem Prozeß in USA die Erfindung der Glühlampe zuerkannt.

1895 Ferranti meldet den ersten Ölschalter zum Patent an.

1900 Erprobung einer 1000-kW-Parsonsturbine von BBC im Kraftwerk Elberfeld (erste Turbine zur Stromerzeugung auf dem Kontinent), Wirkungsgrad um 15 %.

Der größte Kraftwerksgenerator in Deutschland hat eine Leistung von 3000 kW (Kraftwerke Moabit und Oberspree).

1900 Erstes Heizkraftwerk (KWK) Europas in Dresden.

1901 Der Schweizer Charles Eugène Lancelot Brown (1863-1924, Gründer von BBC mit Walter Boveri) erfindet den Walzenturboläufer, der sich dem Turbinenantrieb anpaßt.

1902 Die U- und Hochbahn wird in Berlin eröffnet.

1903 Erste Versuchsfahrten in Deutschland mit Einphasen-Wechselstrom-Lokomotiven mit 25 Hz, 6000 V Fahrdrabtspannung.

Ein deutscher Drehstrom-Triebwagen erreicht einen Geschwindigkeitsweltrekord von 210 km/h.

1904 Erste europäische 40-kV-Freileitung in Italien (Nembro–Gromo): 35 km, 32 mm² Kupferseile, Holzmaste 8m Höhe.

Univ. Hannover	Zeittafel III	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/08

1905 Inbetriebnahme der ersten europäischen 50-kV-Freileitung von Moosburg (Uppenbergwerk) nach München: 53 km, 2x3x16 mm² Kupferseile, zwei Systeme auf zwei vollständig getrennten Traversen.

Erste Freiluftschaltanlage in Amerika errichtet. Zunächst nur Überspannungsschutzeinrichtungen mit zugehörigen Trennern und die Sammelschienen im Freien, Ölschalter und Transformatoren in Gebäuden.

1911 Der Niederländer Kamerlingh Onnes (1853-1926) entdeckt die Supraleitfähigkeit.

1912 Erste 110-kV-Drehstromübertragung Europas von Riesa nach Lauchhammer (Mitteldeutsche Stahlwerke), aus der auch der neu gegründete Elektrizitätsverband Gröba beliefert wird: 56 km, 2x3x42 mm² Kupferseile.

Die deutschen Staaten einigen sich für die Eisenbahn auf eine Fahrdrachtspannung von 15000 V, 16 ½ Hz, die noch heute Norm ist.

1915 Errichtung des derzeit größten Braunkohlen-Kraftwerkes der Welt Golpa-Zschornowitz mit zunächst 128 MW (später 1929 440 MW durch die AEG).

Der Deutsche Max Schuler (1882-1972) erhält ein Patent auf Wasserstoffkühlung von Turbogeneratoren.

1919/1924 Bau des Walchenseewerks, erster deutscher Hochdruck-Jahresspeicher großer Leistung (mit 168 000 PS, damals größte Wasserkraftanlage Europas).

1923 Erste europäische 220-kV-Freileitung von Wuppertal-Ronsdorf nach Lethmathe-Genua (RWE): 33 km, erstmals Kupferhohlseile (1923 bis 1931 nur mit 110 kV betrieben).

1924 Erster 3000-touriger Großturbinensatz von 22 500 kW für KW Trattendorf gebaut.

1925 Das deutsche Leitungsnetz umfaßt in den Spannungsebenen 500 V bis 100 kV insgesamt 196 807 km Leitungen, davon 35 311 km Kabel.

1926/1929 Bau der ersten großen, auf 380 kV umstellbaren 220-kV-Leitung des RWE von Köln nach Vorarlberg; 600 km, 2x3x400 mm² Kupfer-Hohlseile.

1927 Ausbau des 220-kV-Netzes in Deutschland.

Erstes Steinkohle-Großkraftwerk mit Kohlestaubfeuerung in Betrieb (Kraftwerk Klingenberg der Bewag: die 80-MW-Turbinen sind damals die weltgrößten, Generatorwirkungsgrad 97 %).

1928 Erstes 110-kV-Kabel im Netz eines deutschen EVU (Großkraftwerk Franken AG): 9,6 km Einleiter-Öldruckkabel je 185 mm² Cu, 40 MVA.

Erprobung der Wasserstoffkühlung durch General Electric an einem 20-MVA-Phasenschieber.

1929 Inbetriebnahme des Pumpspeicherwerks Niederwartha an der Elbe der AG Sächsische Werke (ASW), des ersten großen Pumpspeicherwerks ohne natürlichen Zufluß mit künstlichem Oberbecken, 143 m, 85 MW, später 120 MW.

Erste Lastverteilerstelle eines deutschen EVU im Kraftwerk Klingenberg der Bewag.

Das Kohlekraftwerk Golpa-Zschornowitz hat eine Gesamtleistung von 440 MW.

Univ. Hannover	Zeittafel IV	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/09

1937 Erster Turbogenerator (25 MVA, 3000 U/min) mit Wasserstoffkühlung in den USA (in Deutschland wird die Wasserstoffkühlung erst nach dem Krieg eingeführt).

1938 O. Hahn (1879-1968) und F. Strassmann entdecken die Uranspaltung.

1940 Firma BBC nimmt die erste kommerzielle Gasturbine (4 MW) in Neuchâtel (Neuenburg) in Betrieb

1942 Der erste Kernreaktor der Welt (CP-1) wird bei Versuchen in Chikago, die unter der Leitung von E. Fermi durchgeführt werden, kritisch. Etwa 28 Minuten eine Leistung von 40 Watt, Moderator Graphit.

1945 Erste deutsche Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) mit 400 kV von Dessau (Kraftwerk Elbe) nach Berlin; keine Betriebsaufnahme; Demontage durch UdSSR.

1950 Probetrieb der ersten 200-kV-Gleichstromübertragung der Welt Kashira-Moskau 30 MW, 112 km Einleiter-Massekabel 150 mm².

1951 Gründung der UCPTTE (Europäische Verbundorganisation).

1952 Erste 380-kV-Freileitung der Welt: Harspränget-Halsberg (Schweden): 460 MW, 950 km, 2x593 mm² Al/St Zweierbündel, Leiterabstand 12 m, Masthöhe 25 m.

1954 Erstes Kernkraftwerk der Welt Obninsk (UdSSR) bei Moskau.
Erstes Gleichstromseekabel der Welt von Schweden nach der Insel Gotland: 20 MW, 100 km Einleiter Massekabel.

1955 150-MW-Turbosatz im Kraftwerk Weisweiler der RWE.

1956 Europäischer Stromverbund mit Frequenz-Leistungsregelung.

1957 Inbetriebnahme der ersten 380-kV-Doppelleitung Rommerskirchen-Hoheneck (1200 MW, RWE)

1958 Erste 500-kV-Freileitung der Welt in der UdSSR.

1964 Erste 735-kV-Freileitung der Welt in Kanada (Maniconagan-Montreal): 5300 MW, Viererbündel 4x640 mm² Al/St.

1966 Erstes Siedewasser-Demonstrations-Kernkraftwerk in Grundremmigen nimmt Betrieb auf (250 MW).

1969 Erstes Druckwasser-Demonstrations-Kernkraftwerk in Obrigheim nimmt Betrieb auf (300 MW).

1973 Erste Ölpreiskrise. Förderprogramme für Energieerzeugung aus regenerativen Energieträgern.

Univ. Hannover	Zeittafel V	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/10

1974 Kernkraftwerk Biblis A mit Druckwasserreaktor geht in Betrieb. Mit 1204 MW damals größter Reaktor der Welt (Biblis B: 1976, 1300 MW)

1978 Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) mit ± 500 kV in Kanada vom Nelson-River aus; 900 km.

1979 Am 5. Oktober Versuchsbetrieb eines supraleitenden Kabels mit LHe-Kühlung im 60-kV-Netz des Kraftwerkes Arnstein bei Graz (Kabelmetal Hannover und ATF Graz).

1979/80 Zweite Ölpreiskrise.

1982 Solarthermisches Kraftwerk Solar I (Turmkonzept) in Barstow in der Mojave Wüste (Kalifornien) liefert 10 MW Spitzenleistung (1800 Heliostaten, 7 h Speicher)

1983 Inbetriebnahme der Großwindanlage GROWIAN in der Nähe von Brunsbüttel: 3 MW Lee-Läufer mit 2 Rotorblättern, 100,4 m Rotordurchmesser, 100 m Turmhöhe (mechanische Probleme, insgesamt nur 80 MWh in 3 Jahren erzeugt).

1984 Inbetriebnahme des solarthermischen Kraftwerks SEGS I (Rinnenkonzept) in Dagett, Kalifornien mit 14 MW Leistung (1985 SEGS II 30 MW).

1985 Erste 1150kV-Freileitung Ekibastus-Tscheljabinsk.

1986 Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung durch Georg Bednarz und Alex K. Müller.

1986 Europas erstes Photovoltaikprojekt (RWE) in Kobern-Gondorf an der Mosel: 340 kW

1987 Deutschlands erster Windpark entsteht im Kaiser-Wilhelm-Koog bei Brunsbüttel (32 Anlagen mit insgesamt 1,33 MW).

1995 Elektrische Wiedervereinigung. Synchronisation des westdeutschen und ostdeutschen Netzes.

1996 Am 2.07. und 10.08. Großstörungen in USA (Netzzusammenbruch).

1996 Im Oktober Langzeittest des weltweit ersten dreiphasigen induktiven HTSL-Strombegrenzers (10 kV, 60 A) im Kraftwerk Löntsch (Schweiz).

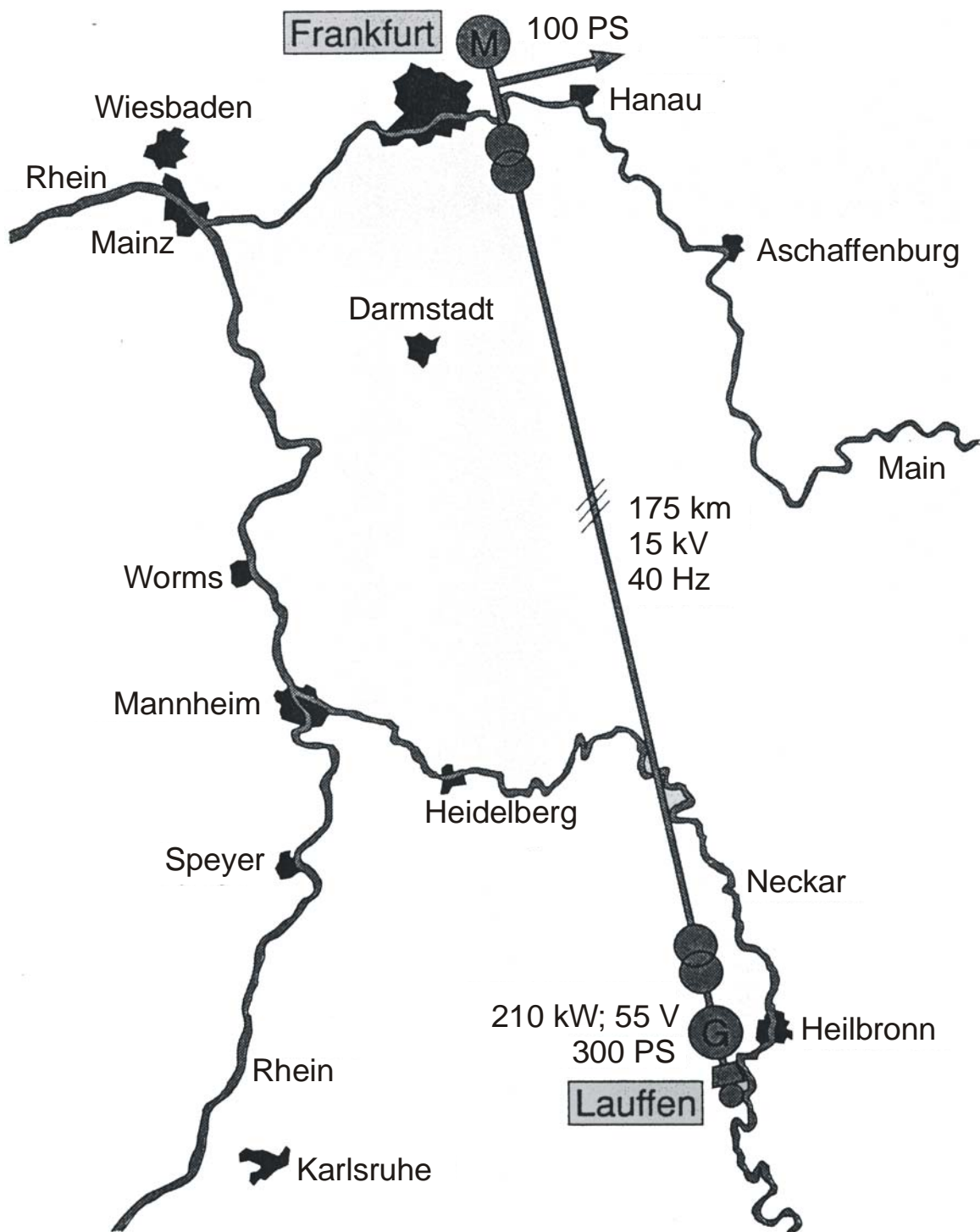
1997 Im März Netzbetrieb des weltweit ersten dreiphasigen HTSL-Transformators mit 630 kVA und 18,7kV/420 V im Kraftwerk Löntsch (Schweiz).

1998 Am 29.04. tritt das neue Energiewirtschaftsgesetz in Kraft.

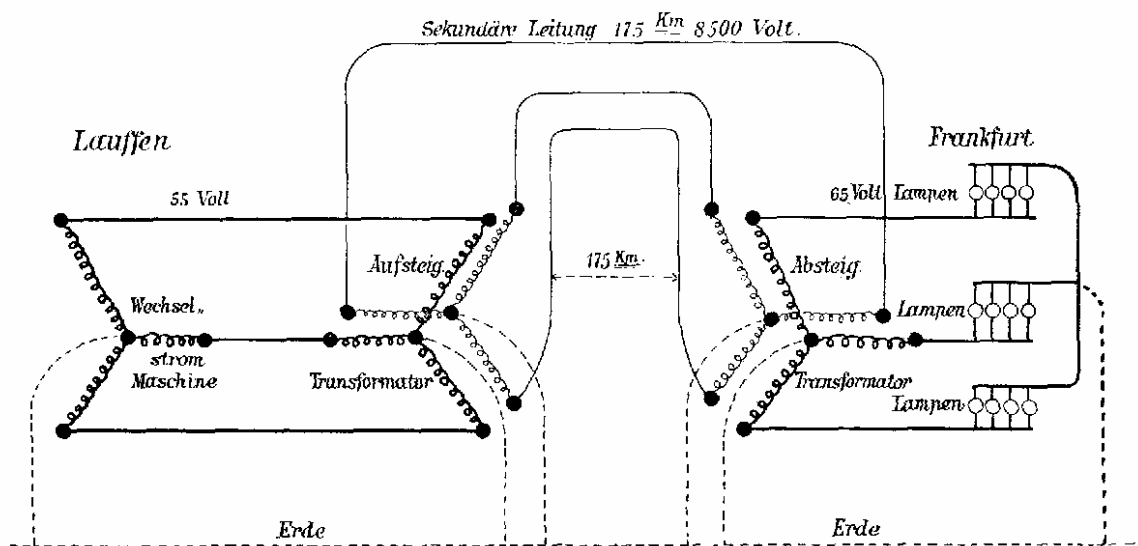
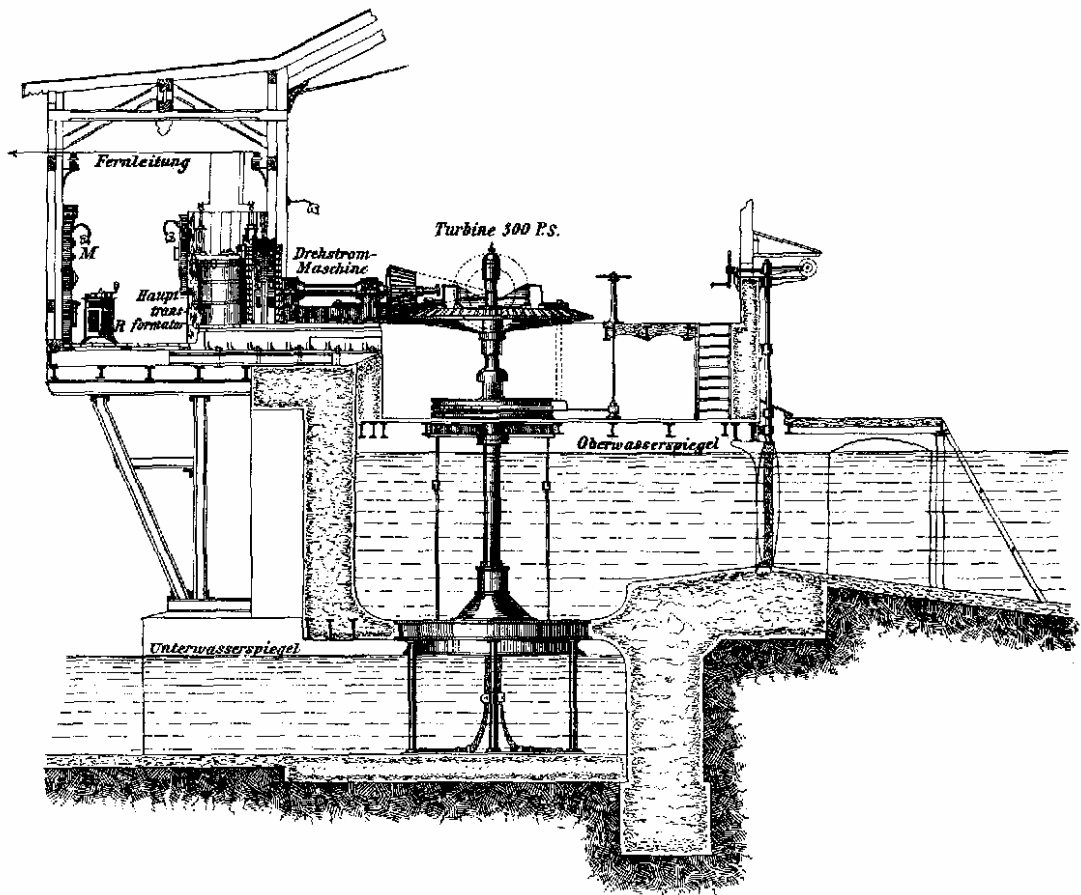
1998 Inbetriebnahme des derzeit längsten 400-kV-VPE-Kabels in Berlin (2 Systeme für je 1100 MW, luftgekühlt im begehbaren 6,3 km langen Tunnel in rd. 25 m Tiefe).

1999 In Deutschland sind 7 879 Windkraftanlagen mit insgesamt 4 445 MW installiert. Der Anteil der Windenergie am Stromaufkommen betrug 2001 etwa 3 %.

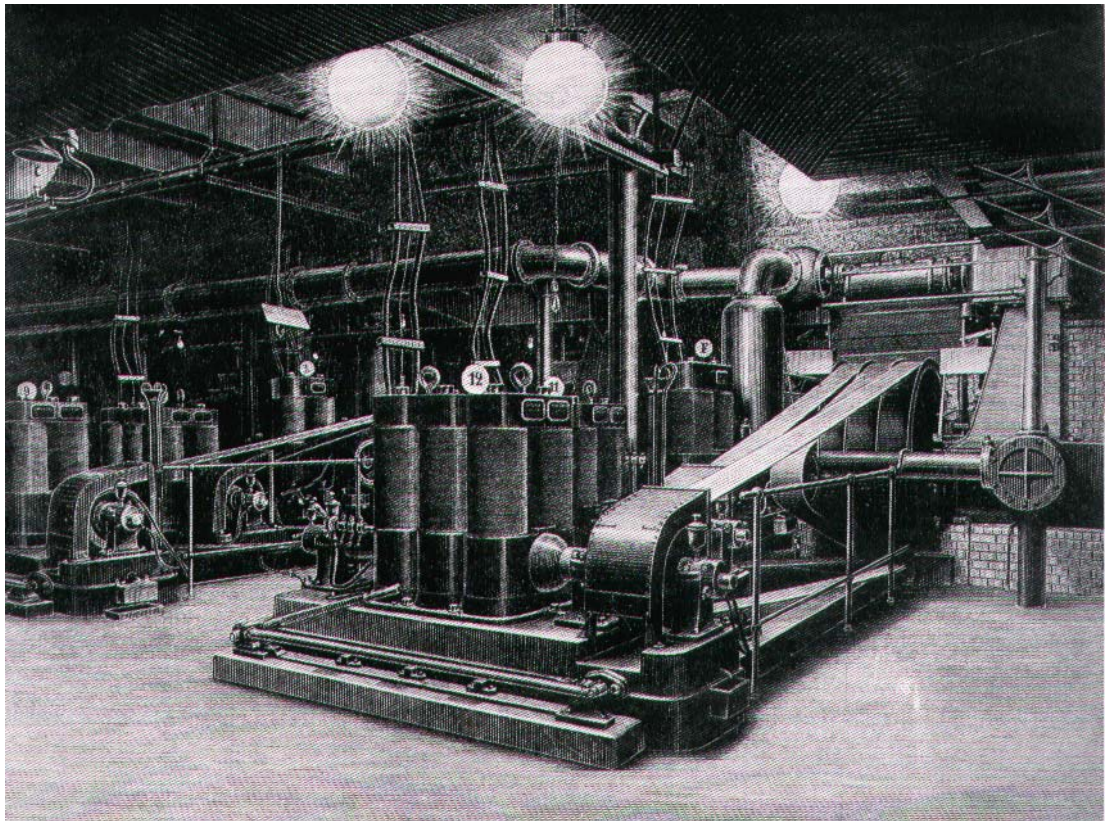
Univ. Hannover	Zeittafel VI	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/11



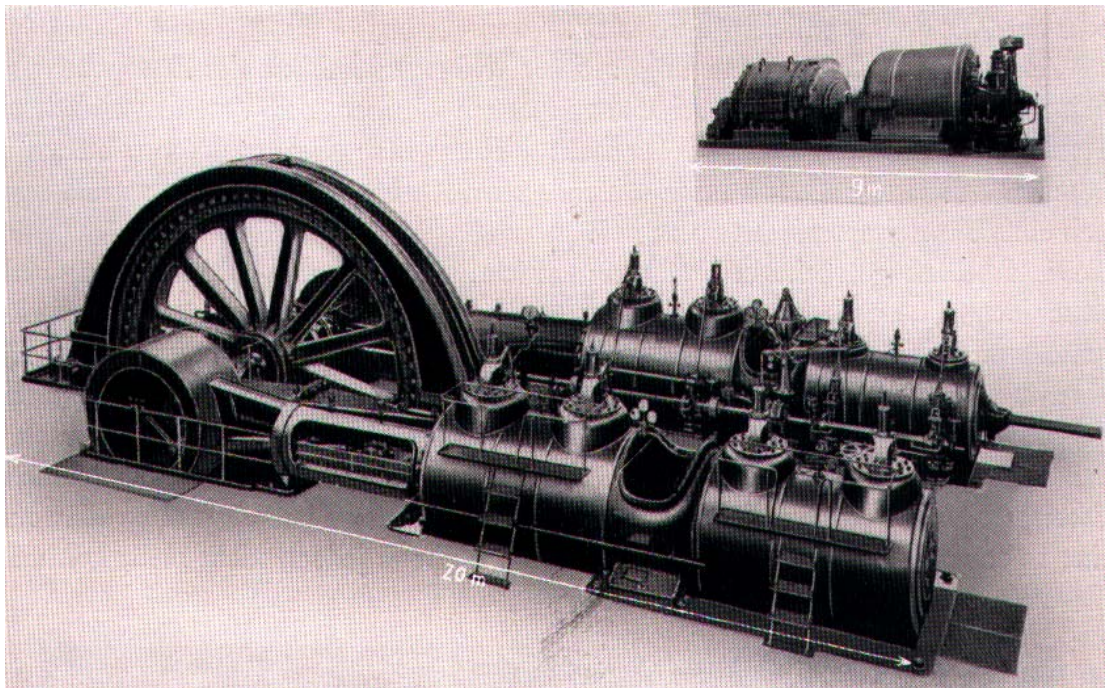
Univ. Hannover	Erste Drehstromübertragung 1891 von Lauffen nach Frankfurt	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/12



Univ. Hannover	Erste Drehstromübertragung 1891 von Lauffen nach Frankfurt II	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/13



Maschinenkeller des Kraftwerks Markgrafenstraße,
Dampfmaschine 180 PS, Stromerzeuger 45 bzw. 27 kW



Platzbedarf einer Kolbenmaschine und einer Dampfturbine gleicher Leistung
(3000 kW)

Univ. Hannover	Zentrale in Berlin Markgrafenstraße (1885) und Vergleich Kolbenmaschine / Dampfturbine	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/14



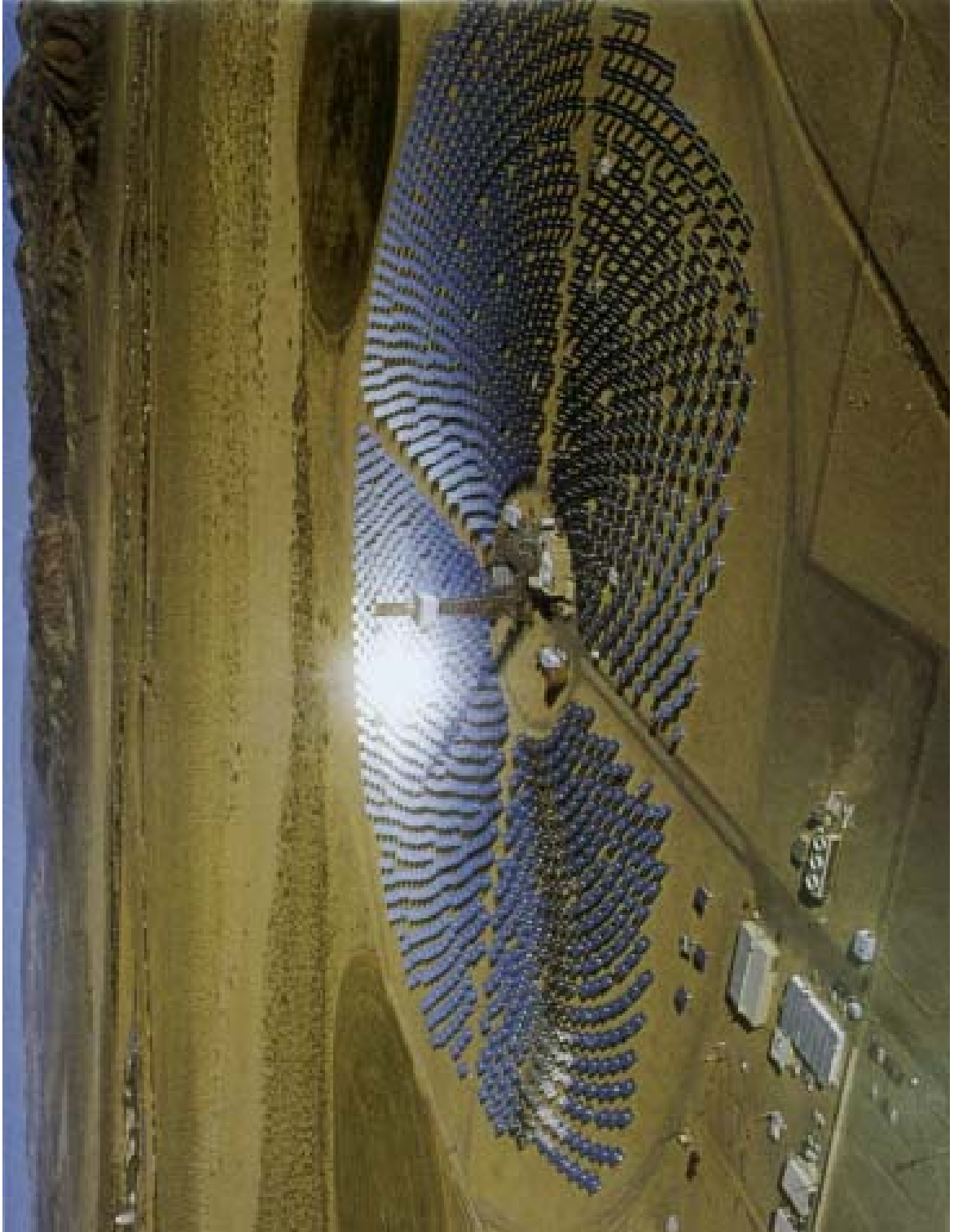
Turbogenerator

Leistung 1530 MVA
 Spannung $27 \text{ kV} \pm 1,35 \text{ kV}$
 Strom 32,7 kA
 Drehzahl 25 s^{-1}
 Frequenz 50 Hz
 $\cos \varphi$ 0,857
 H₂-Überdruck 4 bar

Erregersatz

Leistung 7620 kW
 Spannung 600 V
 Strom 12,7 kA
 Drehzahl 25 s^{-1}

Univ. Hannover	Großkraftwerk mit 1530-MVA-Turbogenerator	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/15



Univ. Hannover	4-MW-Solar-Turmkraftwerk in der Mojave Wüste Kalifornien	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/16



Univ. Hannover	Windkraftwerk GROWIAN 3 MW, 100,4 m Rotordurchmesser	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/17



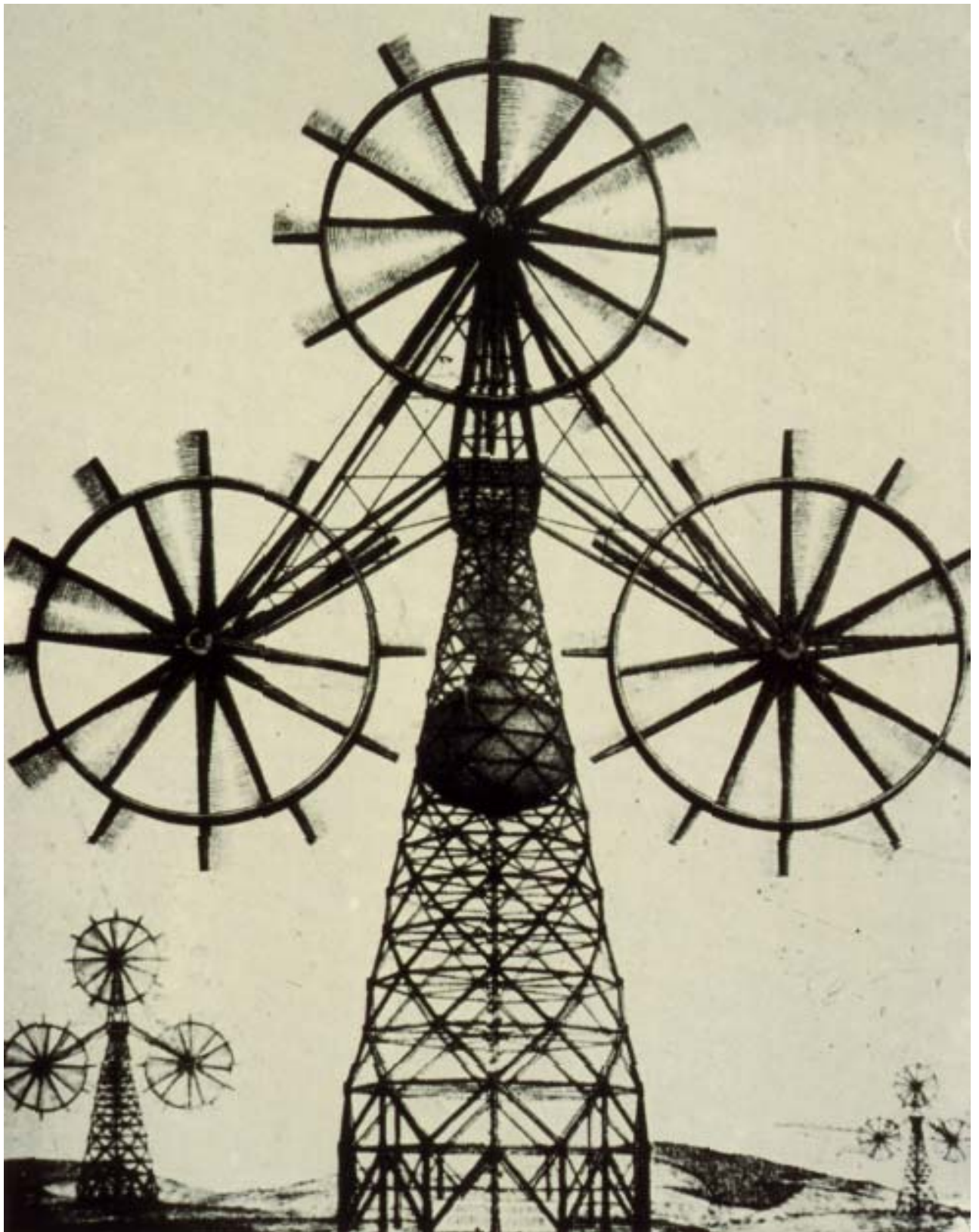
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Darrieus-Rotor mit Savonius-
Rotoren (25 kW)

Grdl. der EV

EV-A/18



Univ. Hannover

Prof. Oswald

Honnefsches Standard-Windkraft-
werk 60 000 kW

Grdl. der EV

EV-A/19



Univ. Hannover	Windpark	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/20



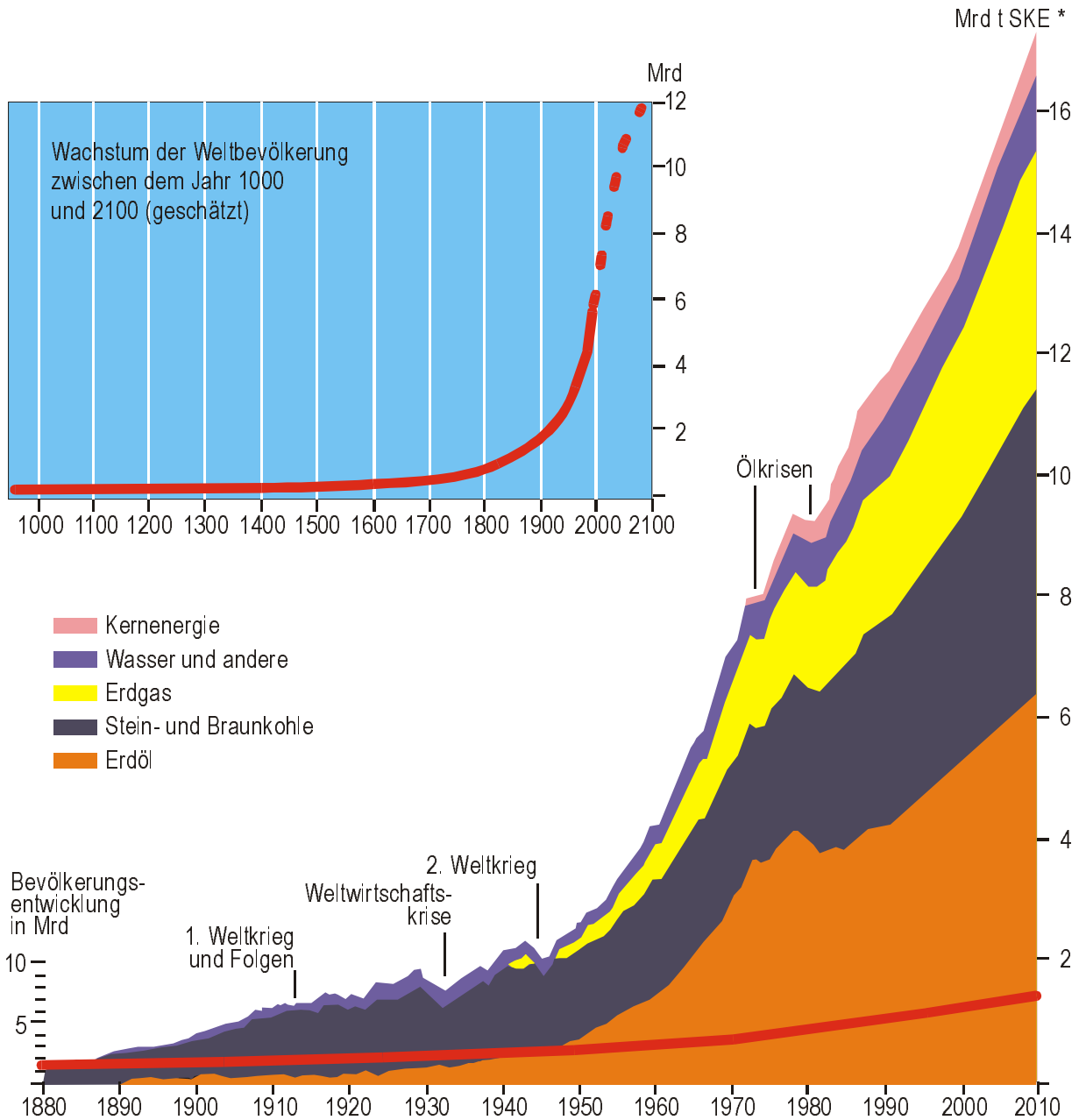
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Offshore-WEA

Grdl. der EV

EV-A/21



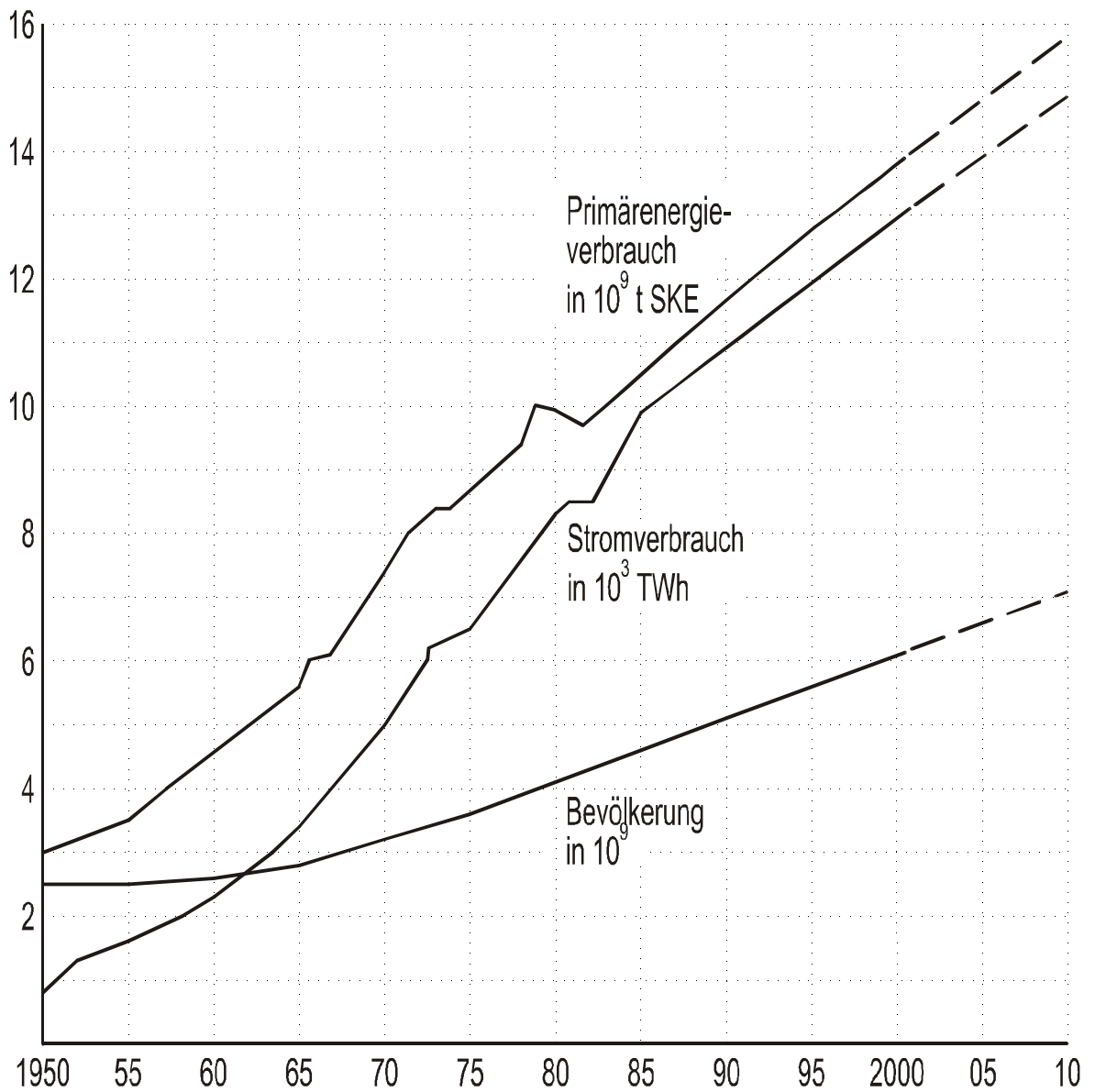
* Mrd t SKE = Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten

Jahr	weltweit				Deutschland		
	PET Mrd t SKE	jährl. Zuwachs	Bevölk. Mrd	Pro-Kopf t SKE	PET Mio t SKE	Bevölk. Mio	Pro-Kopf t SKE
1900	0,8		1,9	0,4			
1950	2,6	4,9 %	2,2	1,2			
1960	4,2	5,7 %	2,3	1,8			
1970	7,3	2,5 %	3,2	2,3			
1980	9,3	2,2 %	4,1	2,3			
1990	11,6*	1,75 %	5	2,3	510		6,2
2000	13,8		6	2,3			

Ø Pro-Kopf-Verbrauch der westlichen Industrieländer = 7 t SKE

*1990 Welt: 38 % Öl 30 % Kohle 20 % Erdgas 7 % Wasser 5 % Kernenergie

Univ. Hannover	Jährlicher PET –Verbrauch und Bevölkerungsentwicklung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/22



Stromverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland

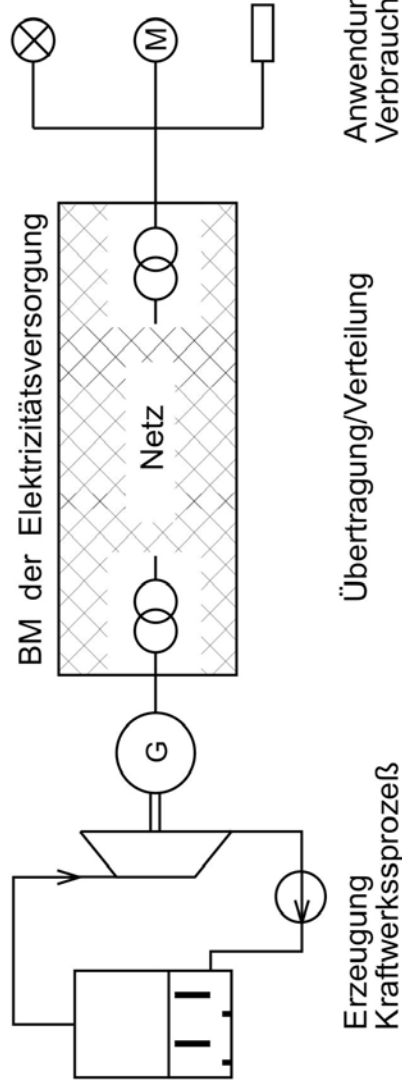
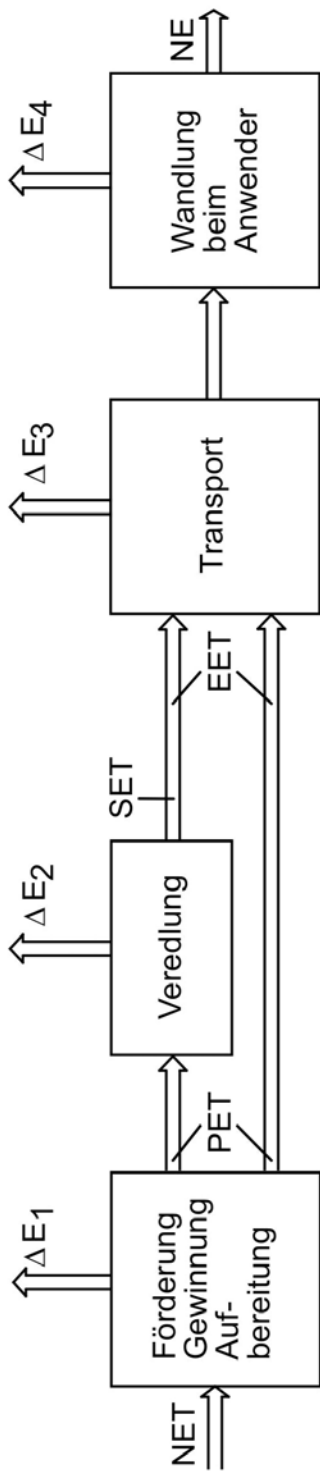
Jahr	1960	1970	1980	1990	2000
TWh/a	108	218	347	418	512

Anteil der PET an der Stromerzeugung in der BR Deutschland

1999	Kernenergie	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Wasser	Wind	Öl + sonst.
	35 %	25 %	26 %	8 %	4 %	1 %	1 %

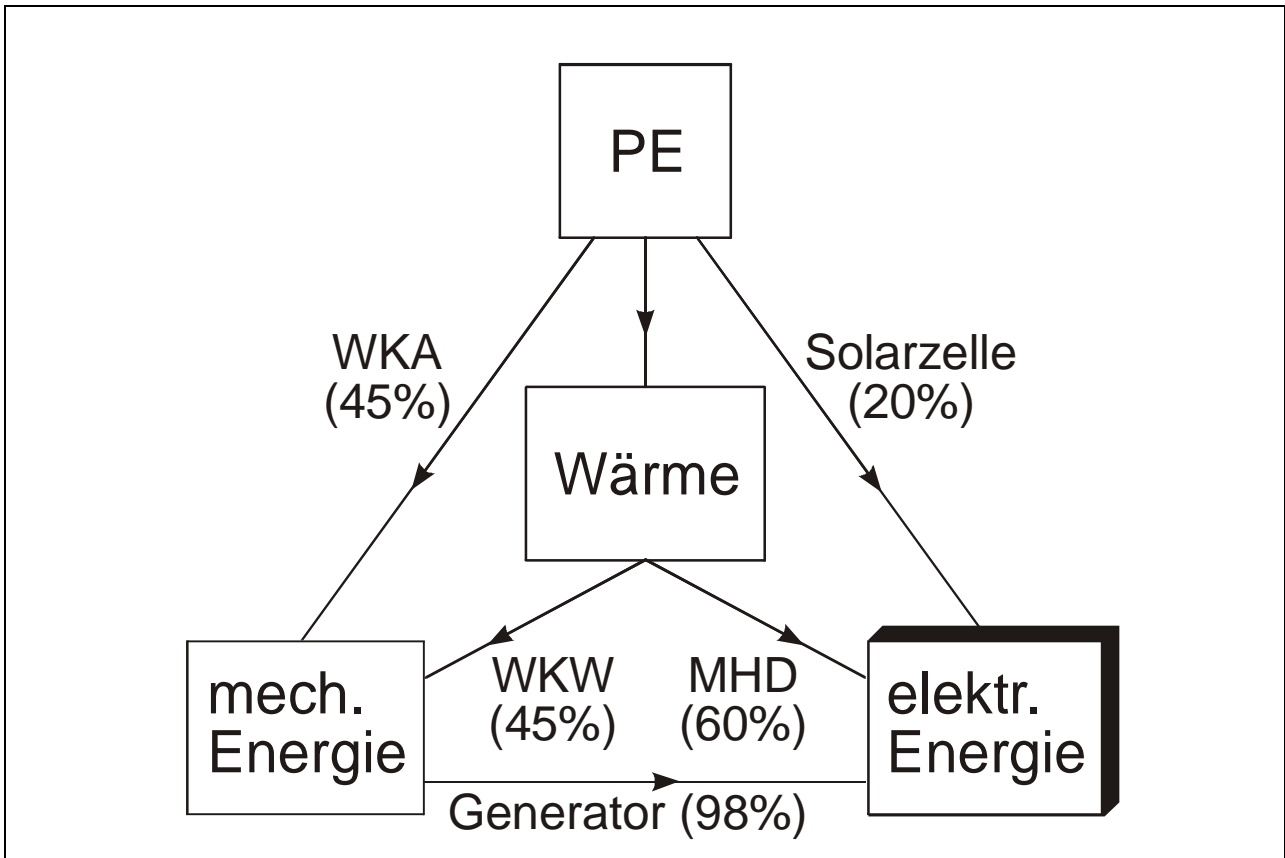
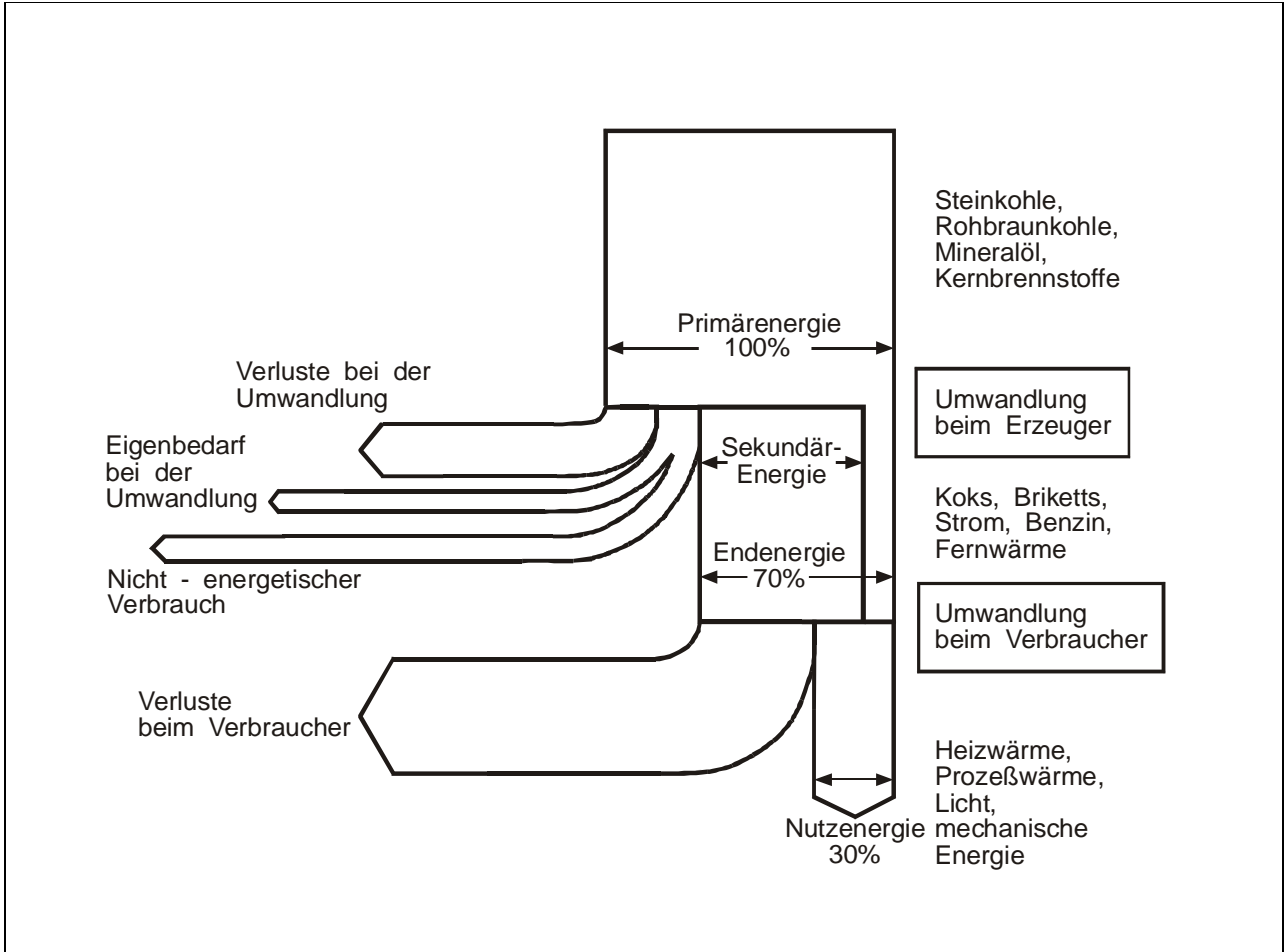
mittlerer Haushaltsverbrauch 3500...4000 kWh

Univ. Hannover	PET-Verbrauch, Stromverbrauch und Bevölkerungszahl weltweit	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/23



- NET = Naturenergieträger: fossile, nukleare, regenerative
- PET = Primärenergieträger: *nicht regenerativ*: Kohle, Öl, Gas, Kernbrennstoffe *regenerativ*: Wasser, Sonne, Wind
- SET = Sekundärenergieträger: Treib- u. Brennstoffe, Wasserdampf (Fernwärme), elektromagnetisches Feld (Strom)
- EET = Endenergieträger: SET + ein Teil der PET
- NE = Nutzenergie: Wärme (73%), mechanische Energie (26%), Licht (1%)

Univ. Hannover	Energiewandlungskette und Elektrizitätsversorgung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/24



Univ. Hannover	Sankey-Diagramm der Energiewandlung	Grdl. der EV
Prof. Oswald	Wege zur Bereitstellung der Elektroenergie	EV-A/25

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ} = 860 \text{ kcal}$$

k	Kilo-	10^3	T	Tera-	10^{12}
M	Mega-	10^6	P	Penta-	10^{15}
G	Giga-	10^9	E	Exa-	10^{18}

Steinkohleneinheit

$$1 \text{ t SKE} \triangleq 7000 \text{ kcal} = 29,31 \text{ GJ} = 8,141 \text{ MWh}$$

Rohöleinheit

$$1 \text{ t RÖE} \triangleq 10000 \text{ kcal} = 41,87 \text{ GJ} = 11,63 \text{ MWh}$$

$$1 \text{ t SKE/a} \triangleq 0,93 \text{ kW Dauerleistung (Mensch: 80...160 W)}$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{P_{\text{zu}} - \Delta P}{P_{\text{zu}}}$$

Nutzungsgrad = energetischer Wirkungsgrad

$$\eta_E = \frac{\text{geleistete Arbeit}}{\text{zugeführte Energie}} = \frac{A}{W_{\text{zu}}}$$

energetische Amortisationszeit

$$\tau_E = \frac{\text{kumulierter Energieeinsatz für die Herstellung der Anlage}}{\text{Jahresnettoerzeugung}} = \frac{\sum W_i}{\int_0^{1a} P_{\text{el}} dt}$$

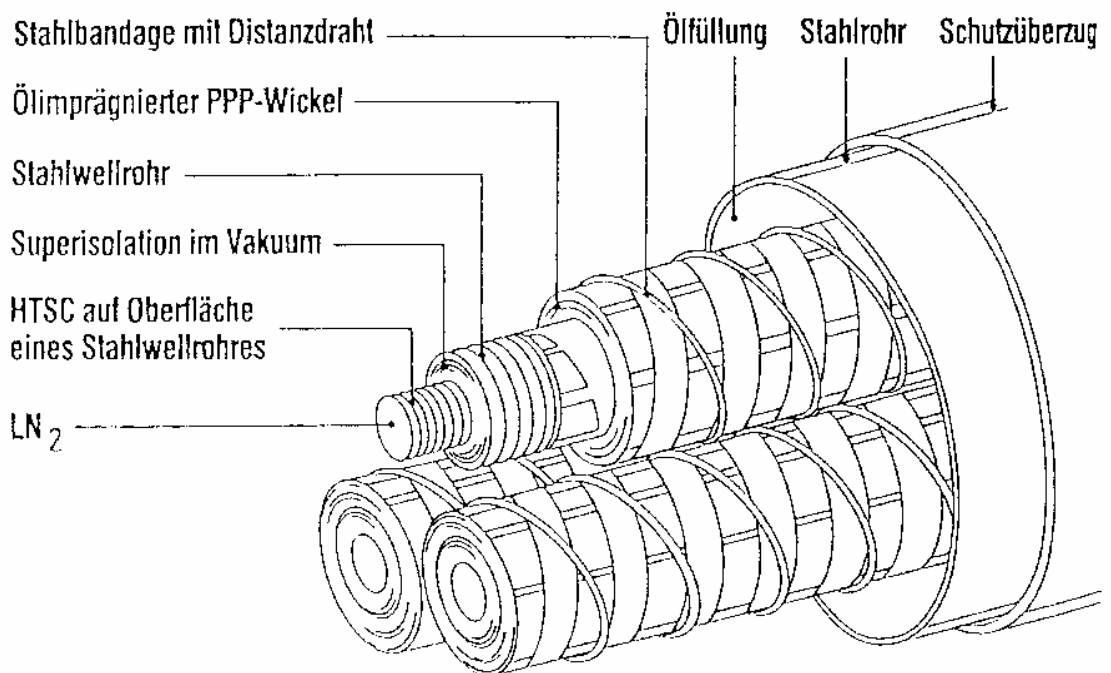
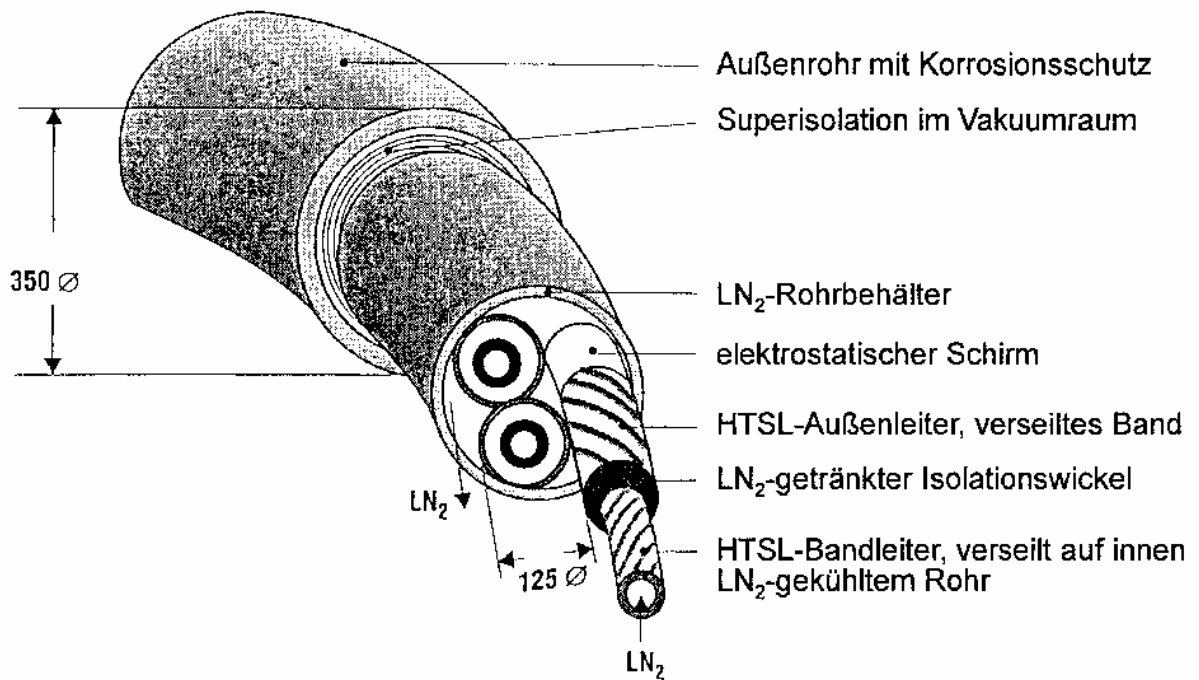
Erntefaktor

$$f_E = \frac{\text{erzeugte elektrische Energie in der Lebensdauer } T_N}{\text{kumulierter Energieeinsatz + energetische Aufwendungen}} = \frac{\int_0^{1a} P_{\text{el}} dt}{\sum W_i + \varepsilon T_N}$$

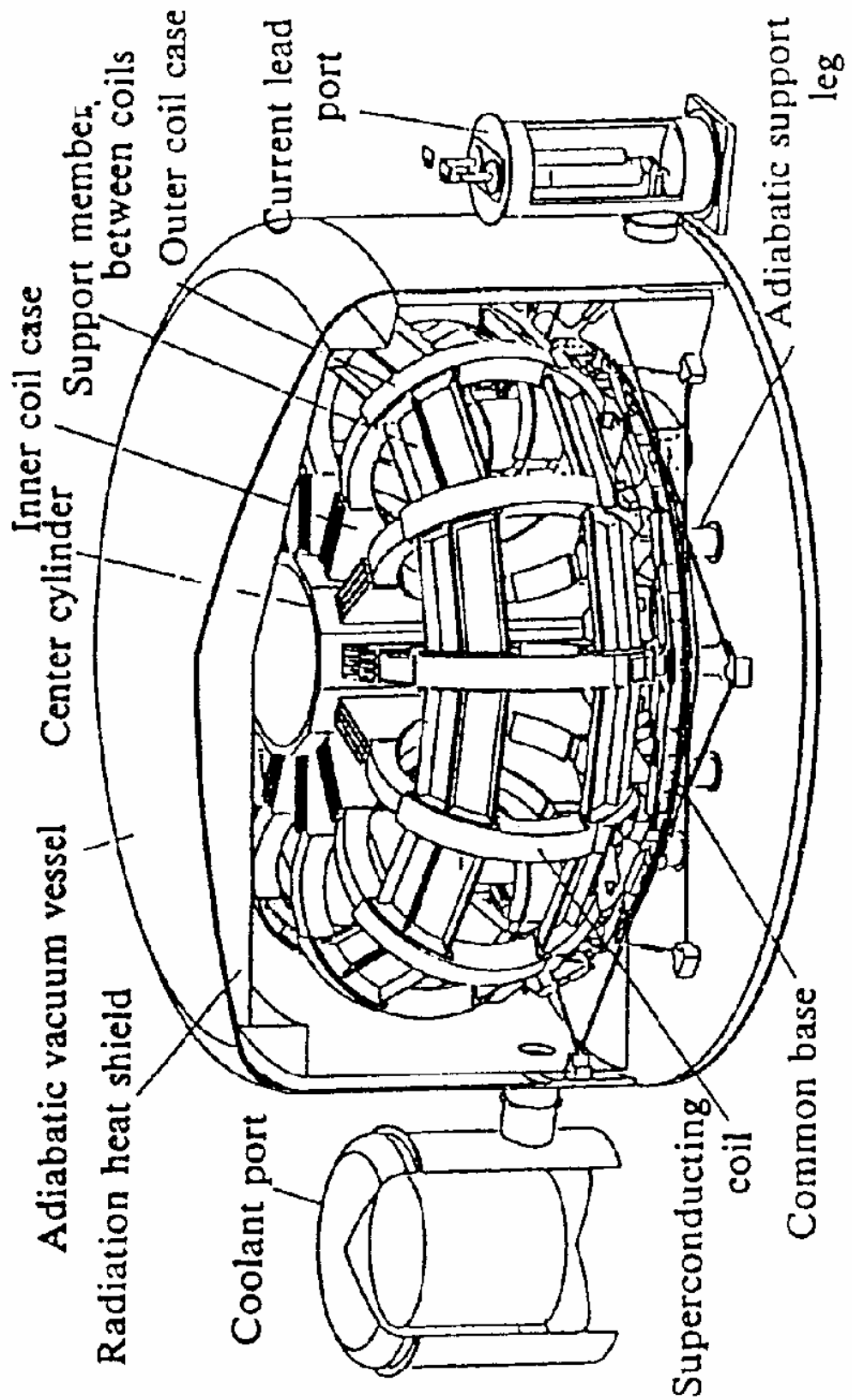
Anlage	Elektrische Leistung	Jährliche Benutzungsdauer	τ_E in Monaten	f_E
Kern-KW	1300 MW	7000	2,2	108
Steinkohlen-KW	700 MW	5000	3,4	72
Windkraftanlage	500 kW	3000	8	30
Photovoltaikanlage		1000	240	1

Anlass	Trend
Verknappung der fossilen Primärenergieträger	Energiebereitstellung aus regenerativen Energieträgern (Wind, Sonne, Wasser, Biomasse ...) Effizienzsteigerung beim Versorger und Verbraucher Erschließung von Einsparpotentialen Energiemanagement
Durchbruch nichtkonventioneller Technologien	Wasserstoffwirtschaft, Brennstoffzelle supraleitende Betriebsmittel Speicher ...
Entwicklung neuartiger und verbesserter Werkstoffe und Isolierstoffe	VPE-Höchstspannungskabel Gasisolierte Rohrleiter und Schaltanlagen Wirkungsgradverbesserung durch Temperatur und Druckerhöhung bei Dampf- und GUD-Kraftwerken
Entwicklung der Mikroelektronik und Informationstechnik	Digitale Leit- und Schutztechnik Online-Diagnoseverfahren Verbesserte Systemführung
Entwicklungen der Leistungselektronik	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) FACTS (Flexible AC Transmission Systems) Einsparung von Kupfer und Eisen z.B. durch Frequenzumrichtung
Entwicklungen der Computertechnik (Hard- und Software)	Verbesserte Simulation des Systemverhaltens (teilweise online) Intelligente Zähl- und Abrechnungssysteme Wetterprognose- und Lastvorhersagesysteme Energiemanagementsysteme
Akzeptanzprobleme der Energienutzer und der Energieversorger	Infragestellung von Kernkraftwerken Braunkohlekraftwerken, Windkraftwerken, neuen Freileitungstrassen Wirkung elektromagnetischer Felder Förderpolitik, Einspeisevergütungen Kraftwerksnutzungsdauern
Wettbewerb	Intelligente dezentrale Systeme mehr GUD Kraftwerke, Energiemanagement Lastflusssteuer- und Lastabwurfssysteme kurzfristige Investitionen verminderte Wartung mit Folgen für die Verfügbarkeit und Spannungsqualität Konfliktverschärfung Ökonomie-Ökologie
Globalisierung	Ausbau des internationalen Verbundes Seekabel- und HGÜ-Verbindungen Energiedurchleitung, verschärfter Wettbewerb

Univ. Hannover	Entwicklungstendenzen in der elektrischen Energieversorgung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/27



Univ. Hannover	Supraleitendes Kabel	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/28



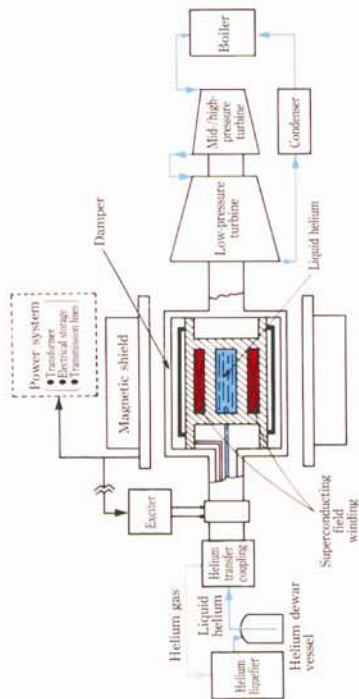
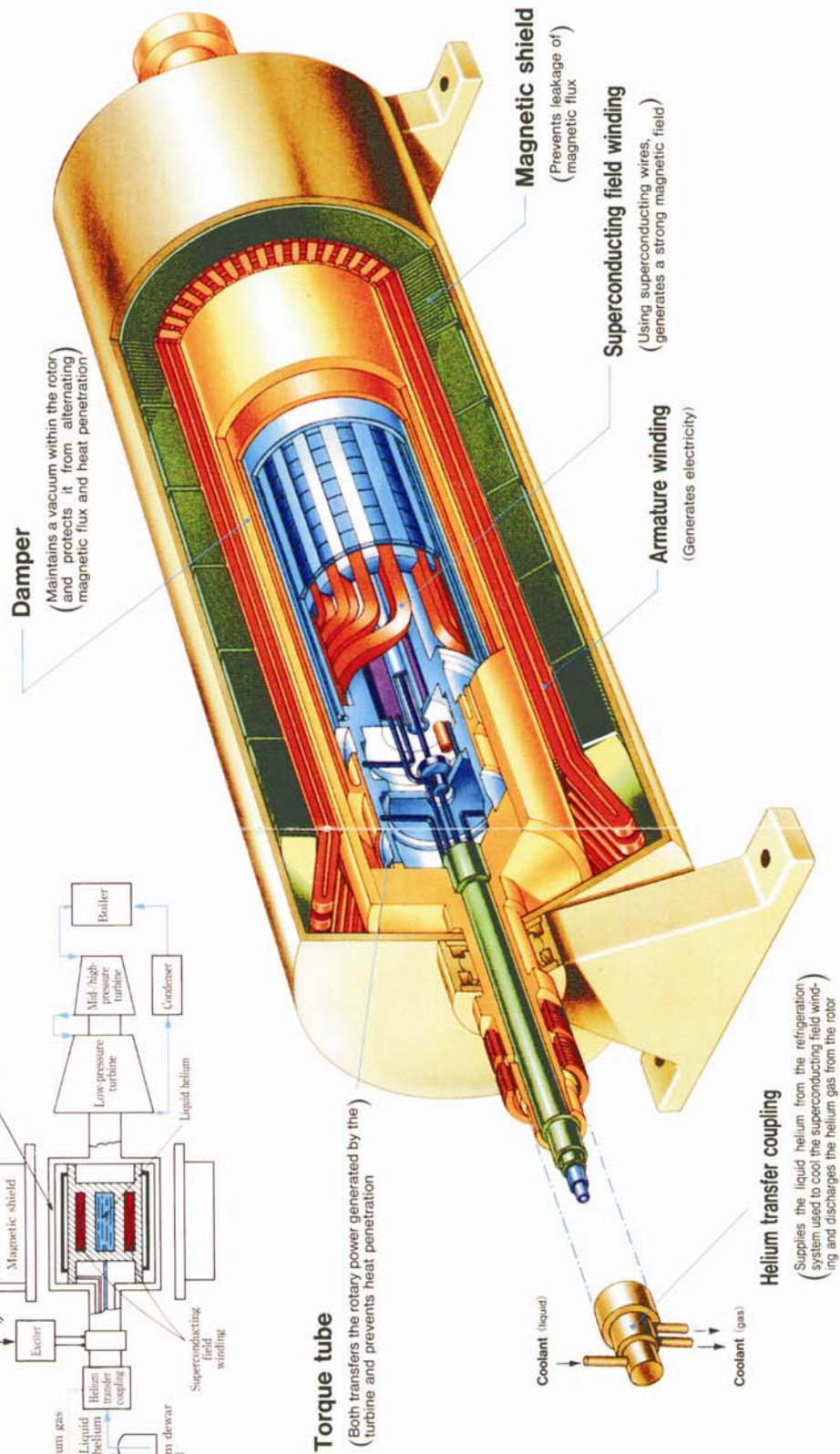
Univ. Hannover

Supraleitender Magnetspeicher

Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-A/29

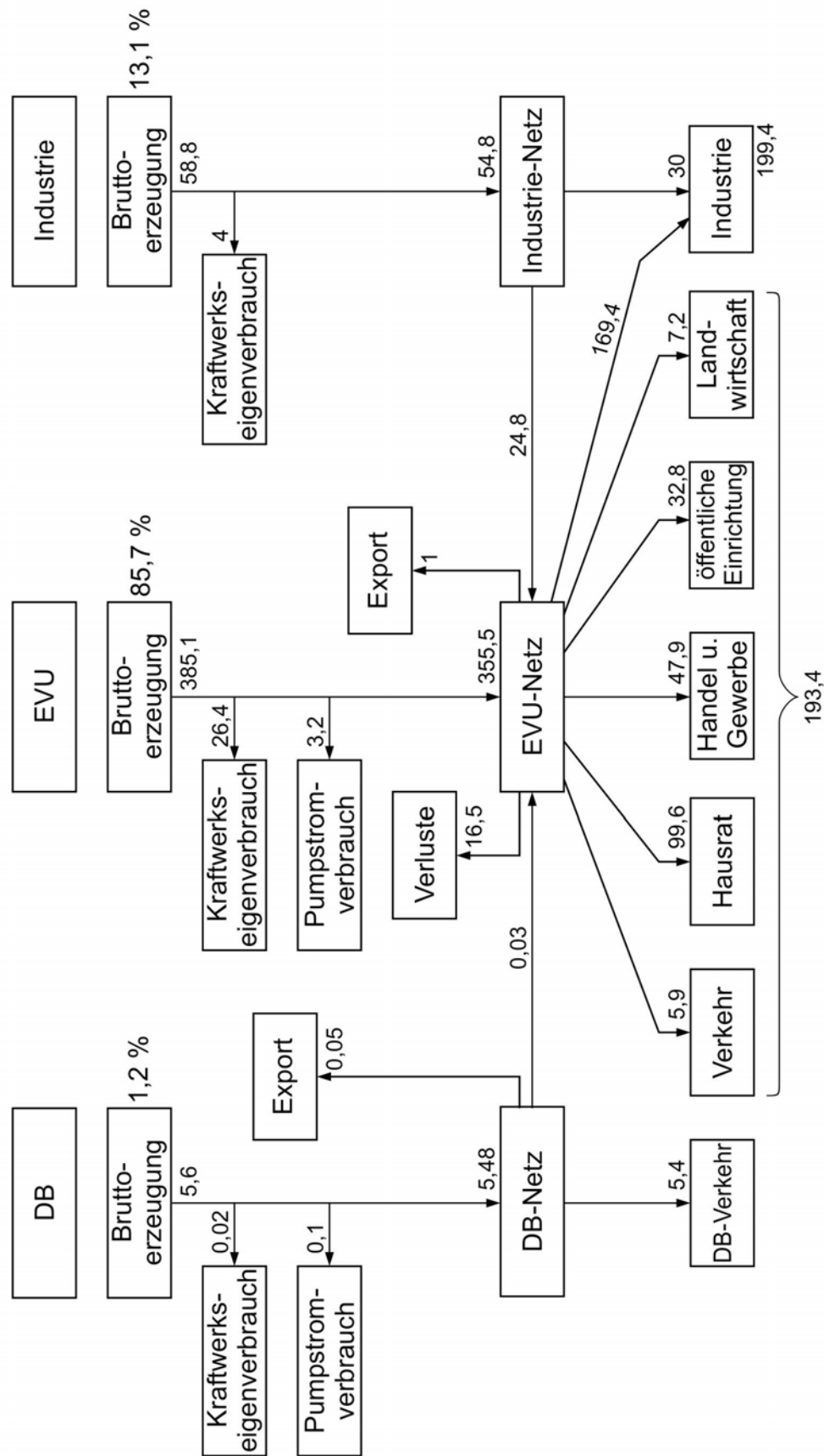


Univ. Hannover
Prof. Oswald

Supraleitender Generator

Grdl. der EV
EV-A/30

Bruttoerzeugung gesamt 449,5 TWh



Verbrauch gesamt 398,2 TWh

Univ. Hannover	Elektrizitätsflußbild von Deutschland (alte Bundesländer) für das Jahr 1990 (Energieangaben in TWh = 10 ⁹ kWh)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/31

AEG	Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft
CENELEC	Comite' Eurpe'en de coordination des Normes Electrotechniques Europäisches Komitee zur Koordination elektrotechnischer Normen
CIGRE	Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension Internationale Konferenz für Hochspannungsnetze
CIREN	Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution Internationaler Kongress über elektrische Verteilnetze
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	früher: Deutsche Industrienorm; heute: Geschütztes Normenkennzeichen des DNA
DKE	Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE, deutsches Mitglied in den internationalen Normenorganisationen der Elektrotechnik+6
DVG	Deutsche Verbundgesellschaft e.V.
ENEL	Ente Nazionale per l'Energie Elettria
ETG	Energietechnische Gesellschaft im VDE
ETZ	Elektrotechnische Zeitschrift
FGH	Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik
HEA	Hauptberatungsstelle für Elektrizitätsanwendung e.V. (früher = AFE) bei der VDEW und beim ZVEI
IEC	International Electrotechnical Commission (= CEI) Internationale Elektrotechnische Kommission
IEEE	Institute of Electrical an Electronics engineers (früher: AIEE) Amerikanischer Verein der Elektro- und Elektronik-Ingenieure
RWE	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG
SEV	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein (= ASE)
UCPTE	Union pour la Coordination, de la Production et du Transport d'Electricité Union für die Koordinierung der Erzeugung und des Transports von elektrischer Energie, jetzt UCTE
UNIPED	Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique (= UIPDEE) Internationale Union der Erzeuger und Verteiler von Elektrischer Energie
VDE	VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (früher Verband der deutschen Elektrotechnik)Verband Deutscher Elektrotechniker e.V.
VDEW	Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.
VEW	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG
ZVEI	Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie e. V.

Univ. Hannover	Abkürzungen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-A/32

Stromsysteme

System	Anwendung
Wechselstromsystem	Bahnstromversorgung
Drehstromsystem	Öffentliche Versorgung, Industrie
Gleichstromsystem	Fernübertragung (HGÜ) Seekabelverbindungen

Spannungsebenen, Netzennennspannungen nach IEC 38 (Auswahl)

Spannungsebene		Netzennennspannung
Niederspannung $U_n \leq 1000 \text{ V}$		230/400 V
Hochspannung $U_n > 1 \text{ kV}$	Mittelspannung	3 6 <u>10</u> <u>20</u> 35 60 kV
	Hochspannung	110 220 380 500 kV

Frequenz

16 2/3 Hz	Bahnstromversorgung
50 Hz	Europa
60 Hz	Nordamerika und teilweise Südamerika

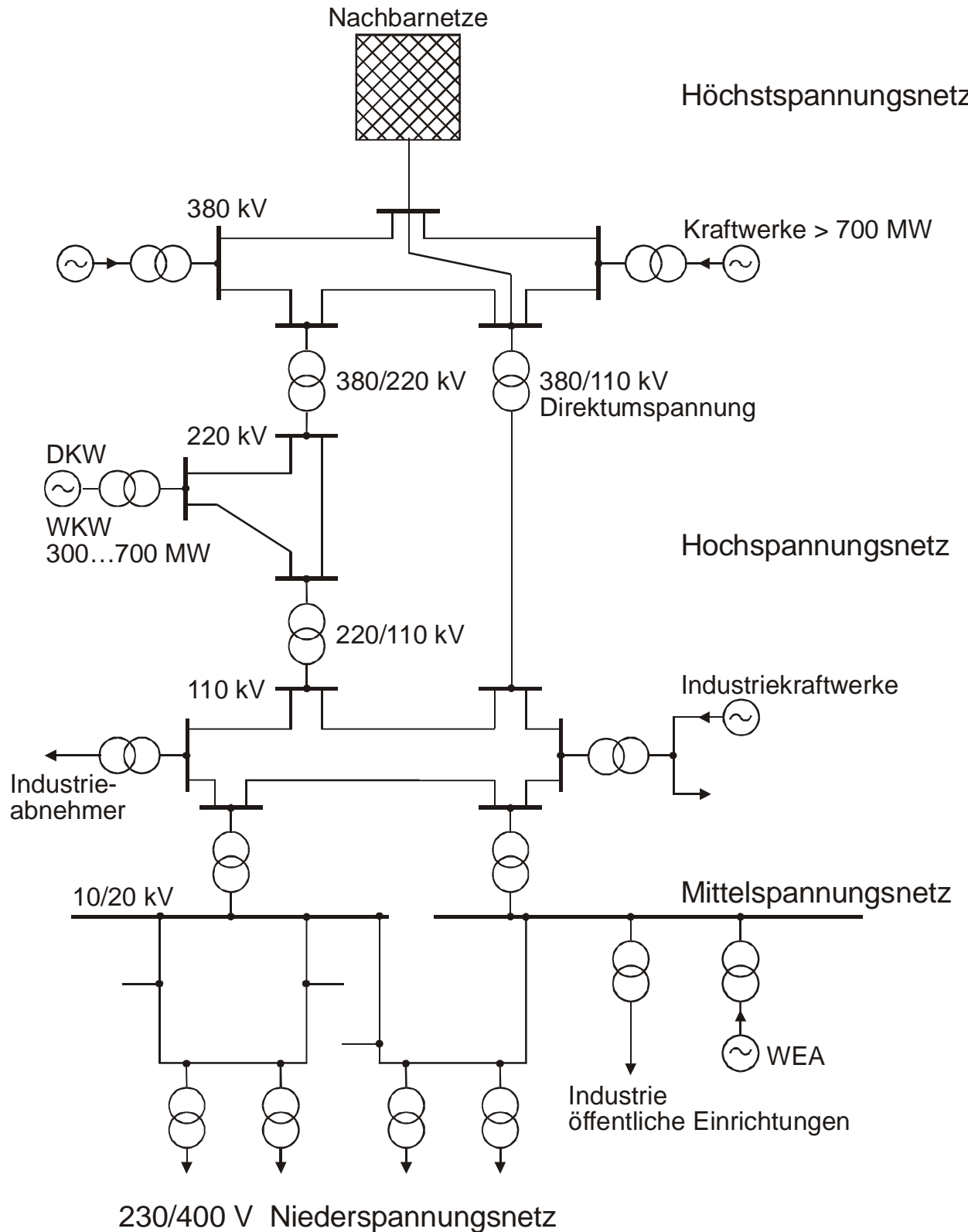
Eigenschaften der Netzformen

Merkmal	vermaschtes Netz $v > 1$	unvermaschtes Netz $v = 1$
Versorgungssicherheit	hoch	geringer
Investitionskosten	hoch	geringer
Verluste	gering	höher
Schutzeinrichtungen	aufwendig	einfach

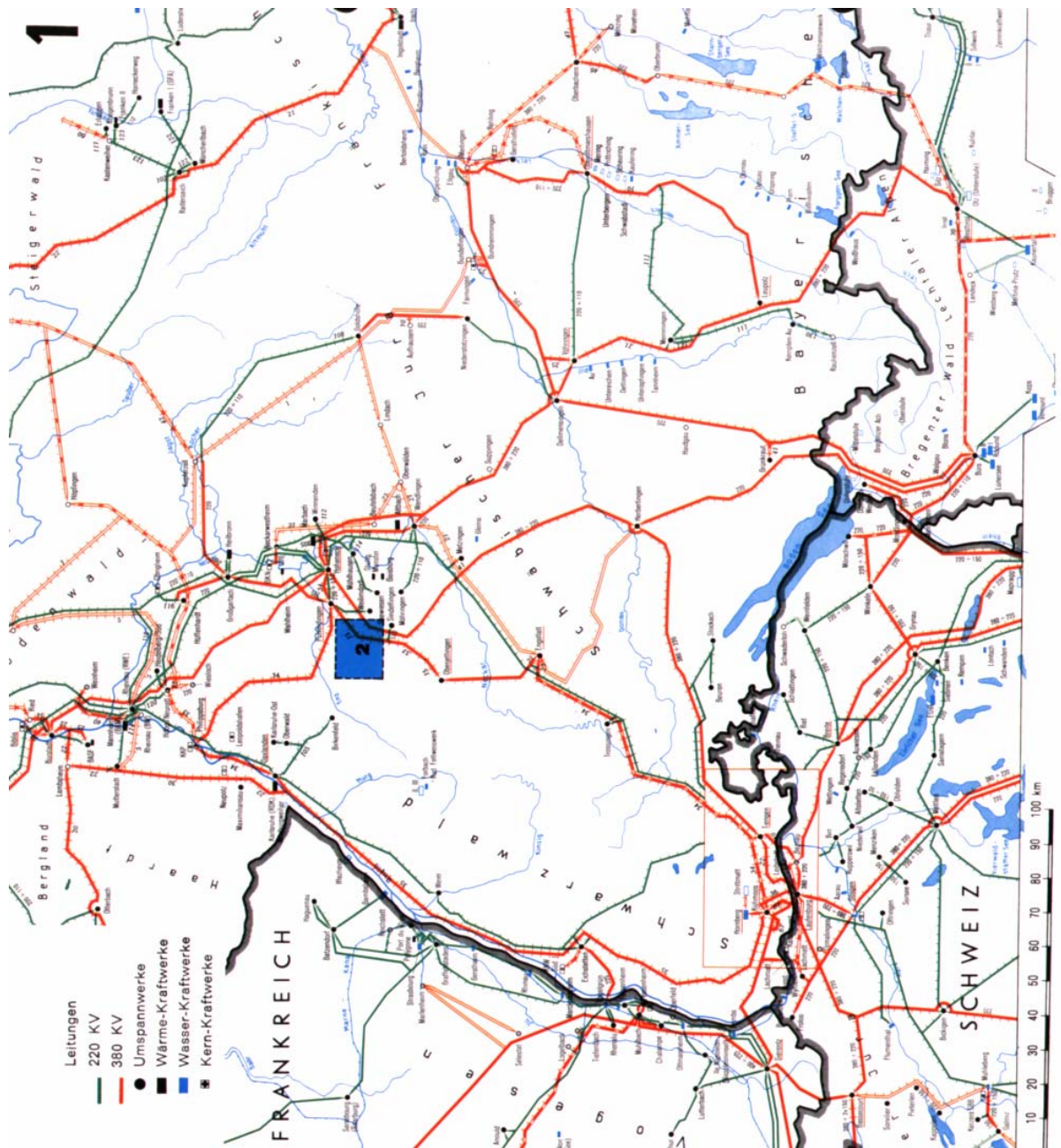
Vermaschungsgrad

$v = \frac{\text{Anzahl der Leitungen}}{\text{Anzahl der unabhängigen Knoten} - 1} = \frac{l}{n-1}$	
Strahlennetz	$v = \frac{l}{(l+1)-1} = 1$
Ringnetz	$v = \frac{l}{l-1} \rightarrow 1$
Hochspannungsnetze	$v \approx 1,5$
Theoretisch maximale Anzahl der Leitungen und maximaler Vermaschungsgrad	$l_{\max} = n(n-1)/2$ $v_{\max} = \frac{n(n-1)}{2(n-1)} = \frac{n}{2}$

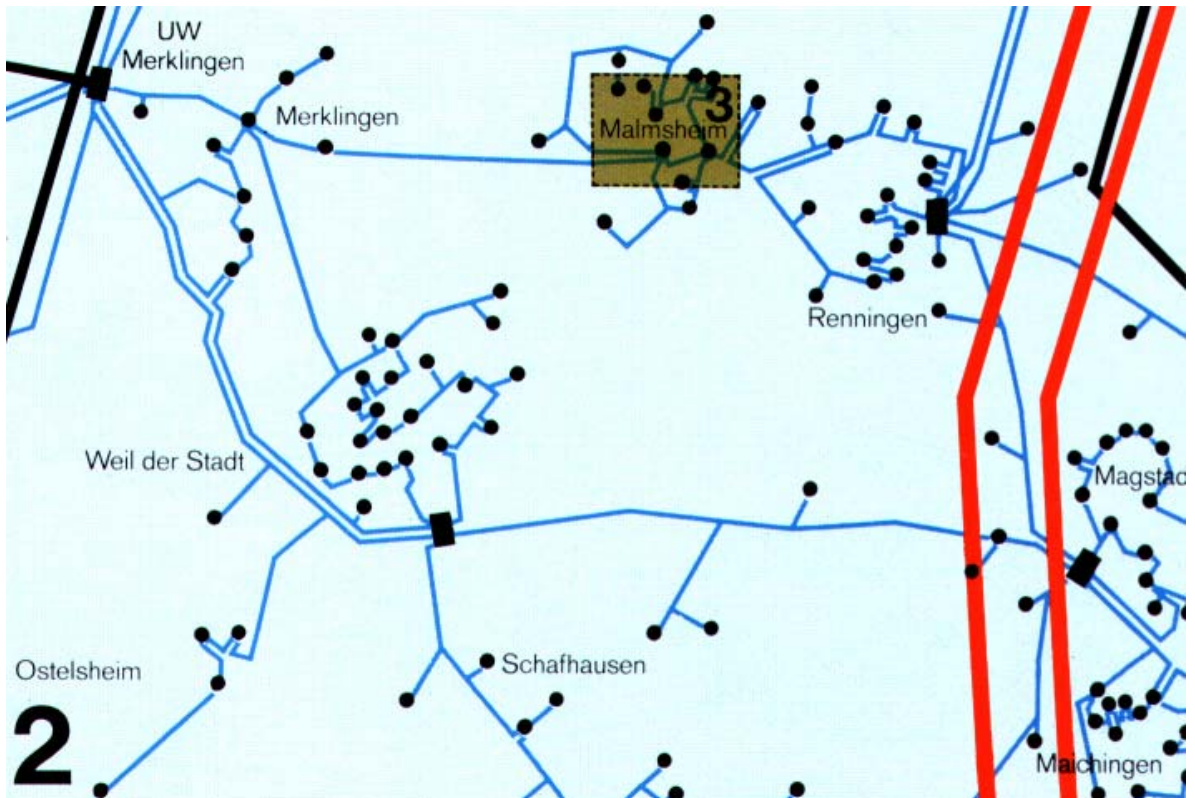
Univ. Hannover	Stromsysteme und Netzformen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/01



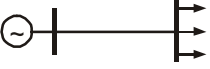
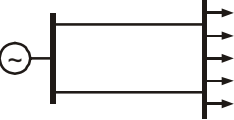

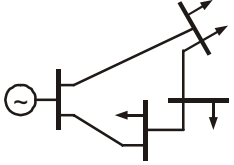
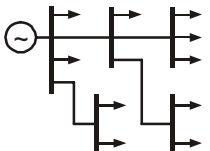
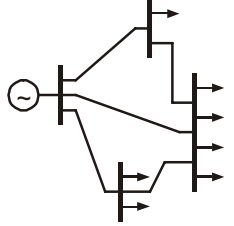
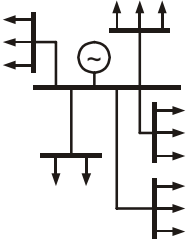
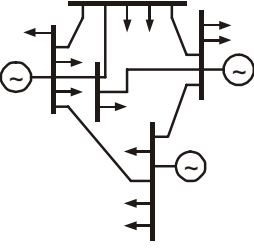
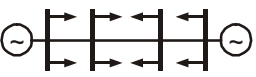
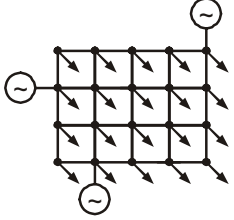
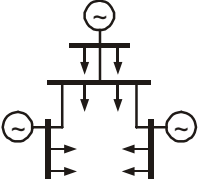
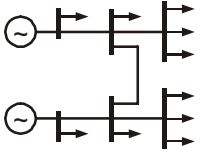
Univ. Hannover	Aufbau von Elektroenergiesystemen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/02

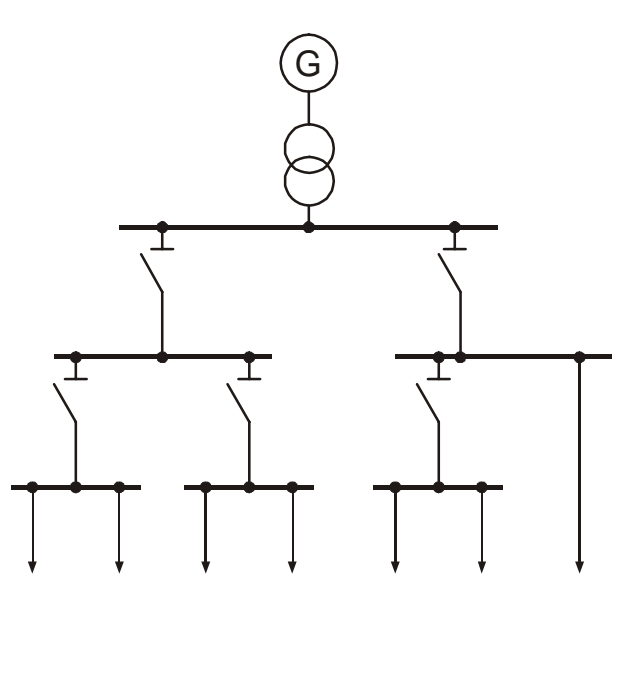


Univ. Hannover	Ausschnitt aus der DVG-Netz Karte (220/380kV)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/02a

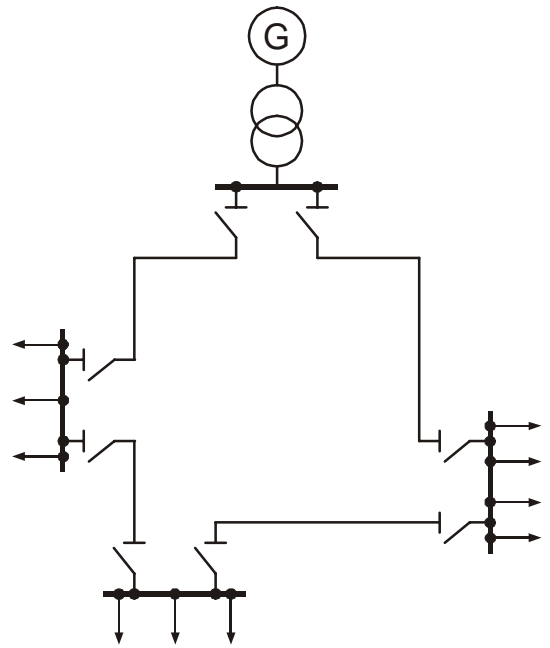


Univ. Hannover	Ausschnitt aus einem Mittelspannungs (2)- und einem Ortsnetz (3)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/02b

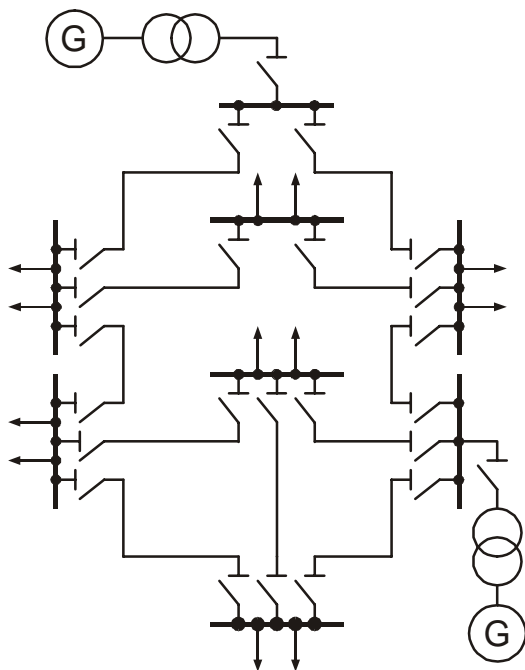
unvermascht	vermascht
 <p data-bbox="539 353 839 389">einfache Sticheleitung</p>	 <p data-bbox="1187 353 1390 389">Doppelleitung</p>
 <p data-bbox="539 495 807 568">erweiterte Sticheleitung</p>	 <p data-bbox="1187 479 1461 584">geschlossenes Ringnetz (auch geöffnet betreibbar)</p>
 <p data-bbox="539 719 820 792">verzweigte Sticheleitung</p>	 <p data-bbox="1187 689 1493 837">Maschennetz (an zahlreichen Netzknoten zusammengeslossen)</p>
 <p data-bbox="539 949 815 1106">Sternnetz oder Strahlennetz (jeder Abnehmer wird nur einseitig versorgt)</p>	 <p data-bbox="1187 949 1481 1106">dreifach gespeistes Maschennetz (z.B. Mittelspannungsverteilnetz)</p>
 <p data-bbox="539 1263 847 1339">zweiseitig gespeistes Leitungsnetz</p>	 <p data-bbox="1187 1234 1469 1384">dreifach gespeistes Maschennetz (z.B. Niederspannungsversorgungsnetz)</p>
 <p data-bbox="539 1503 847 1576">invertiertes Sternnetz oder Strahlennetz</p>	
 <p data-bbox="539 1749 836 1823">verbundene Sticheleitungen</p>	



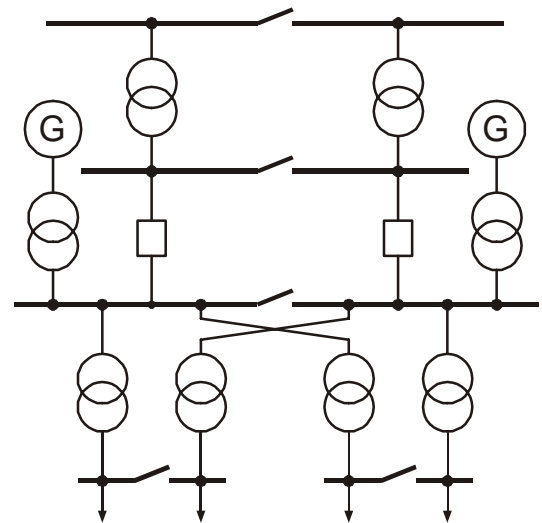
Strahlennetz



Ringnetz

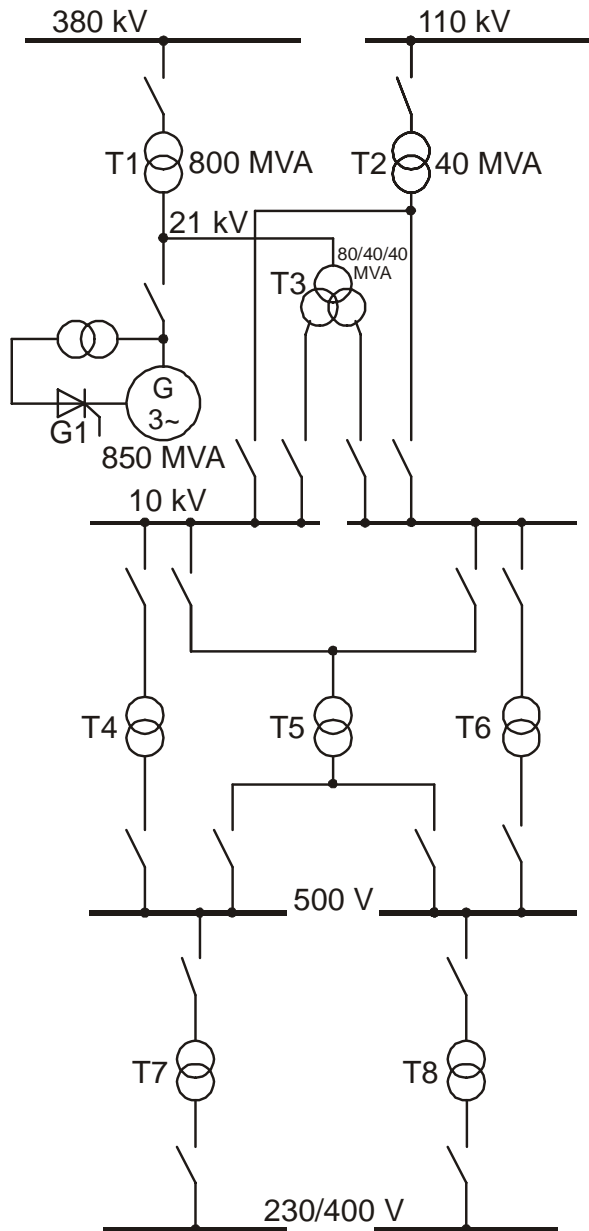


Maschennetz mit 2 Speisepunkten

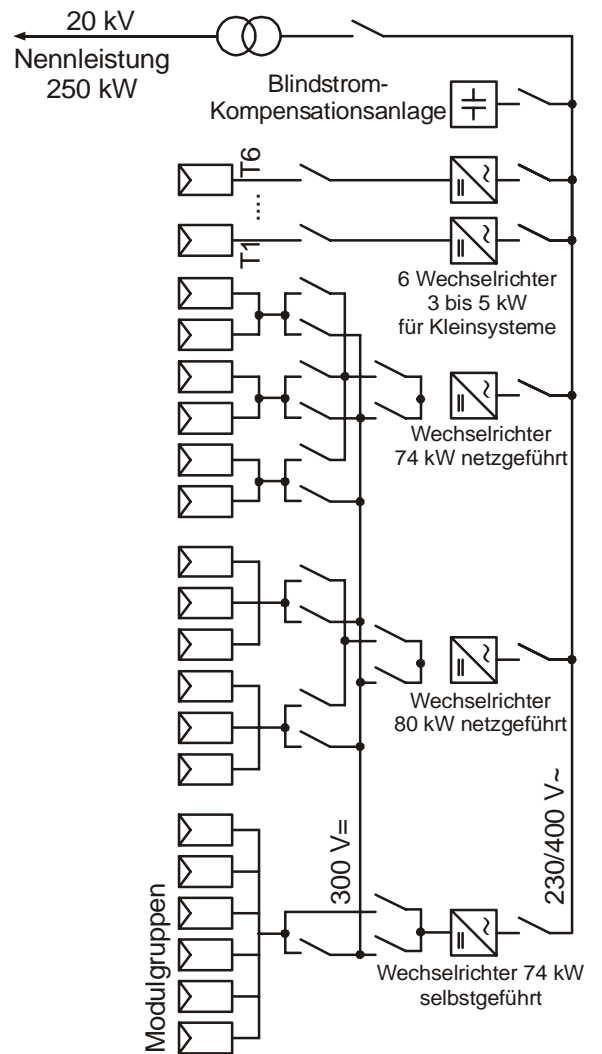


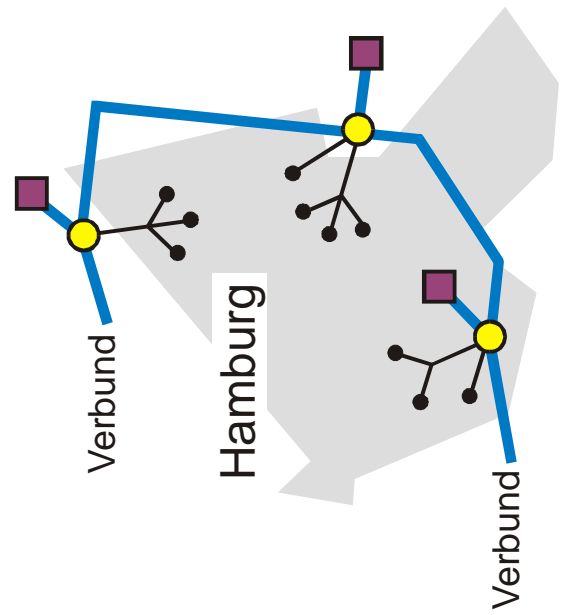
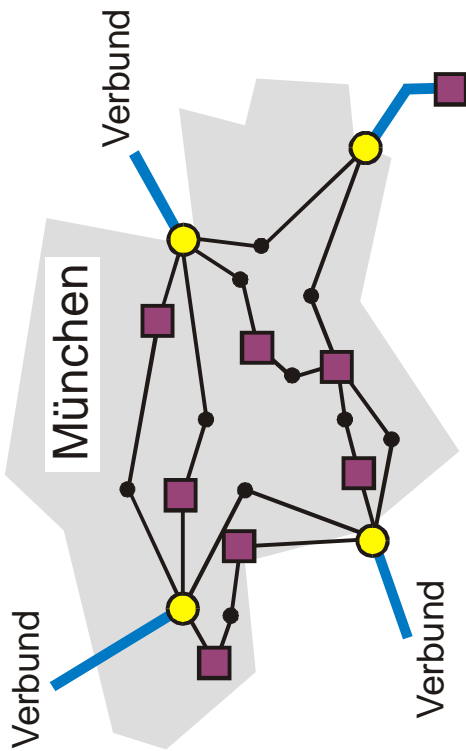
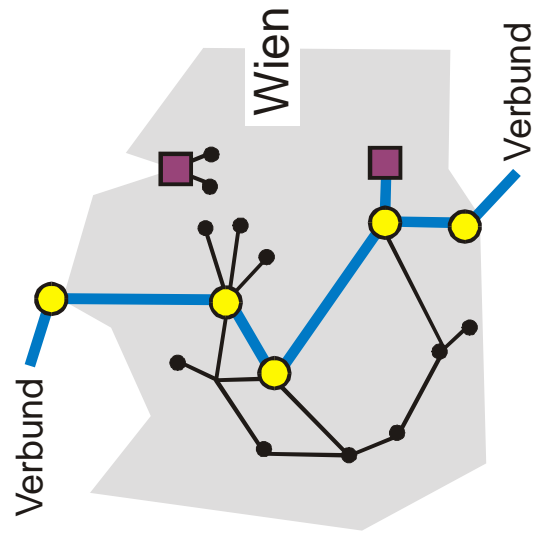
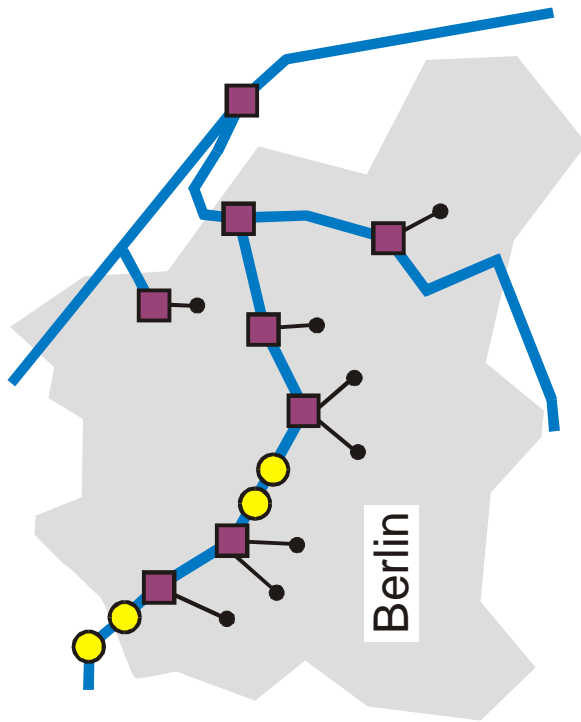
Doppel-Strahlennetz mit Eigenerzeugung und redundanter Abnehmerschaltung

Kraftwerkseigenbedarfsnetz

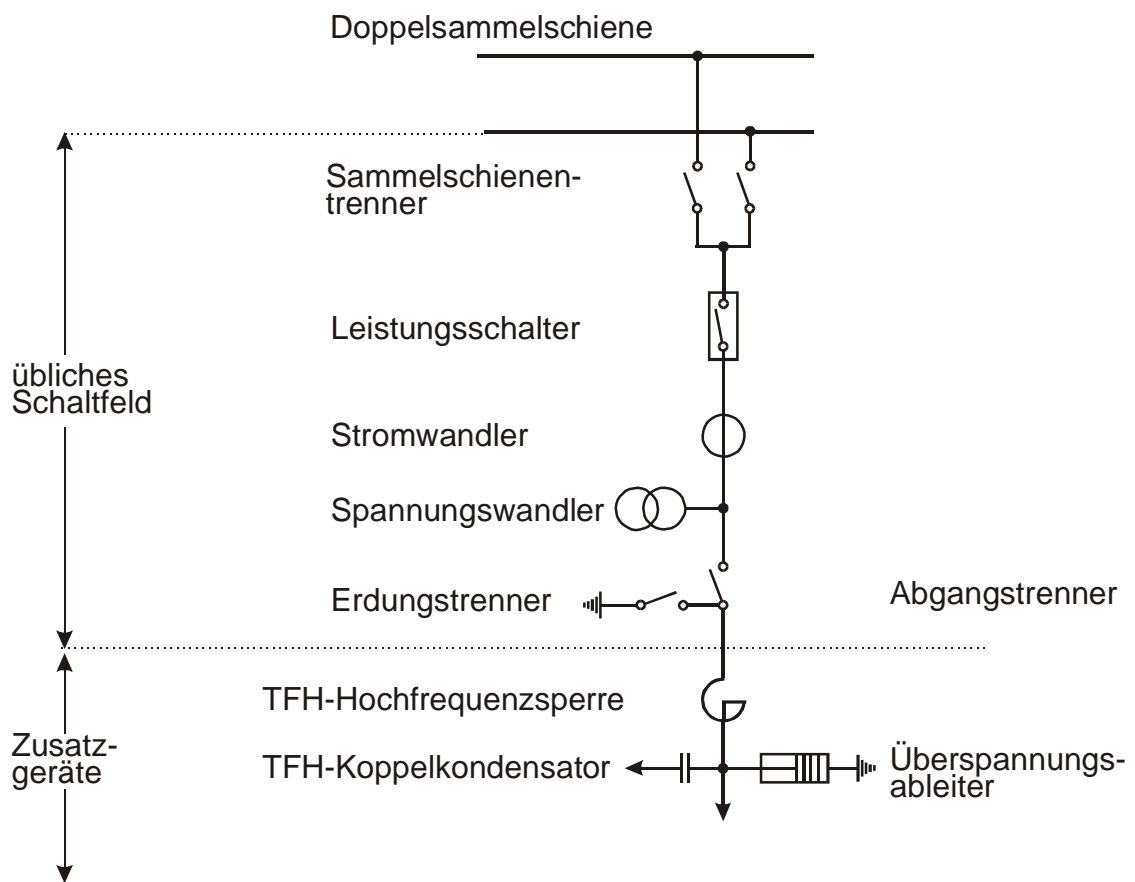
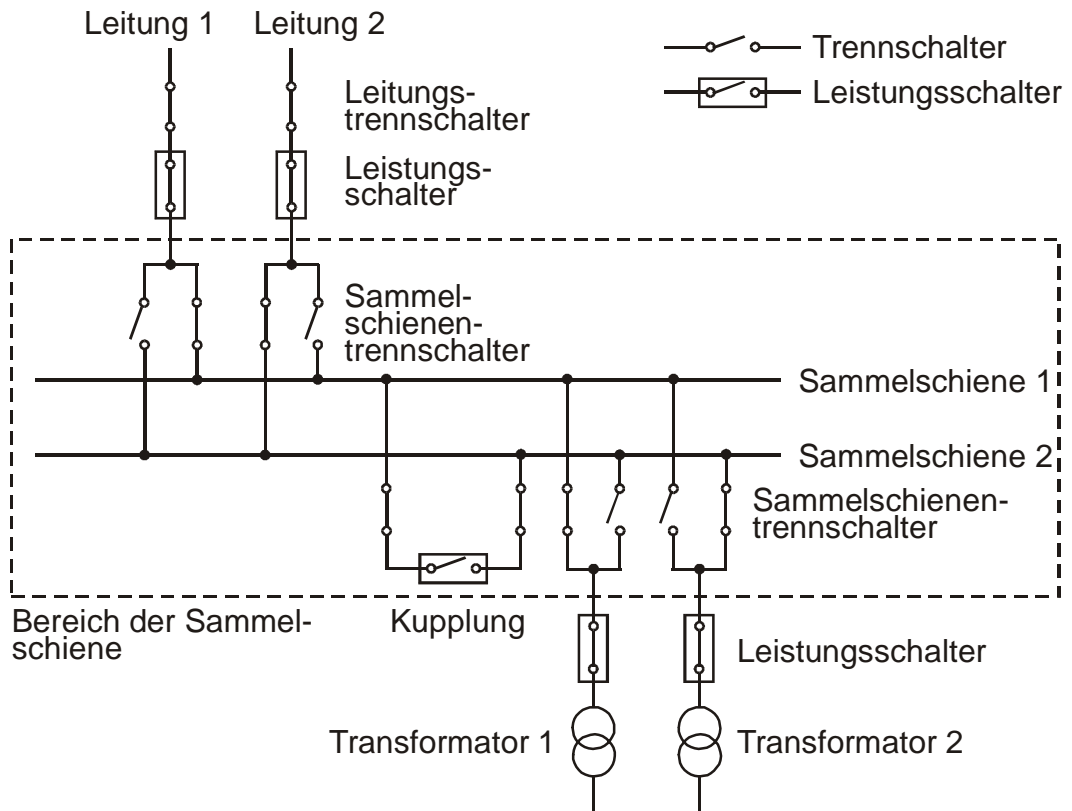


Netzanbindung einer Solaranlage

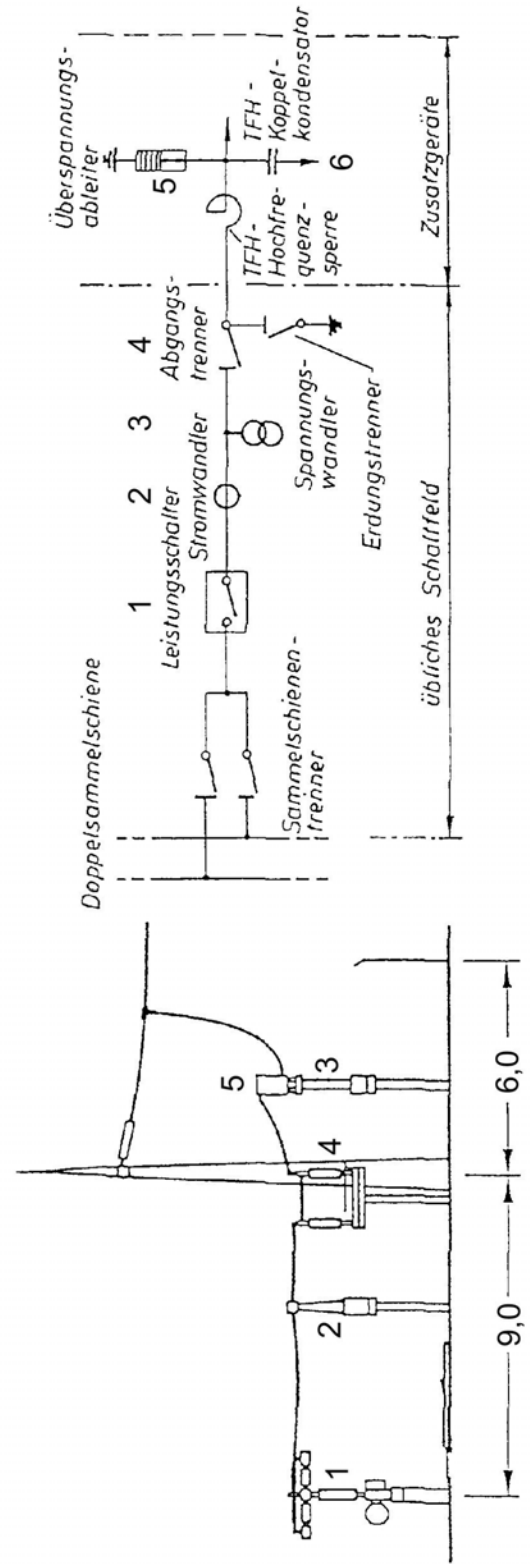
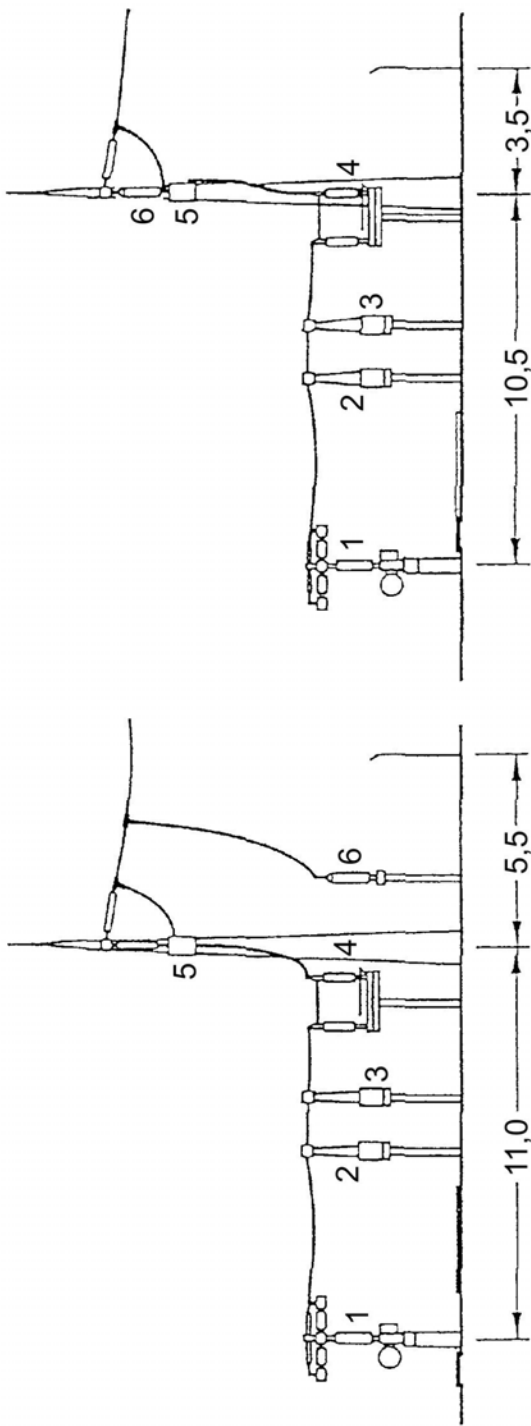




Univ. Hannover	Beispiele für Großstadt-Netze	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/06



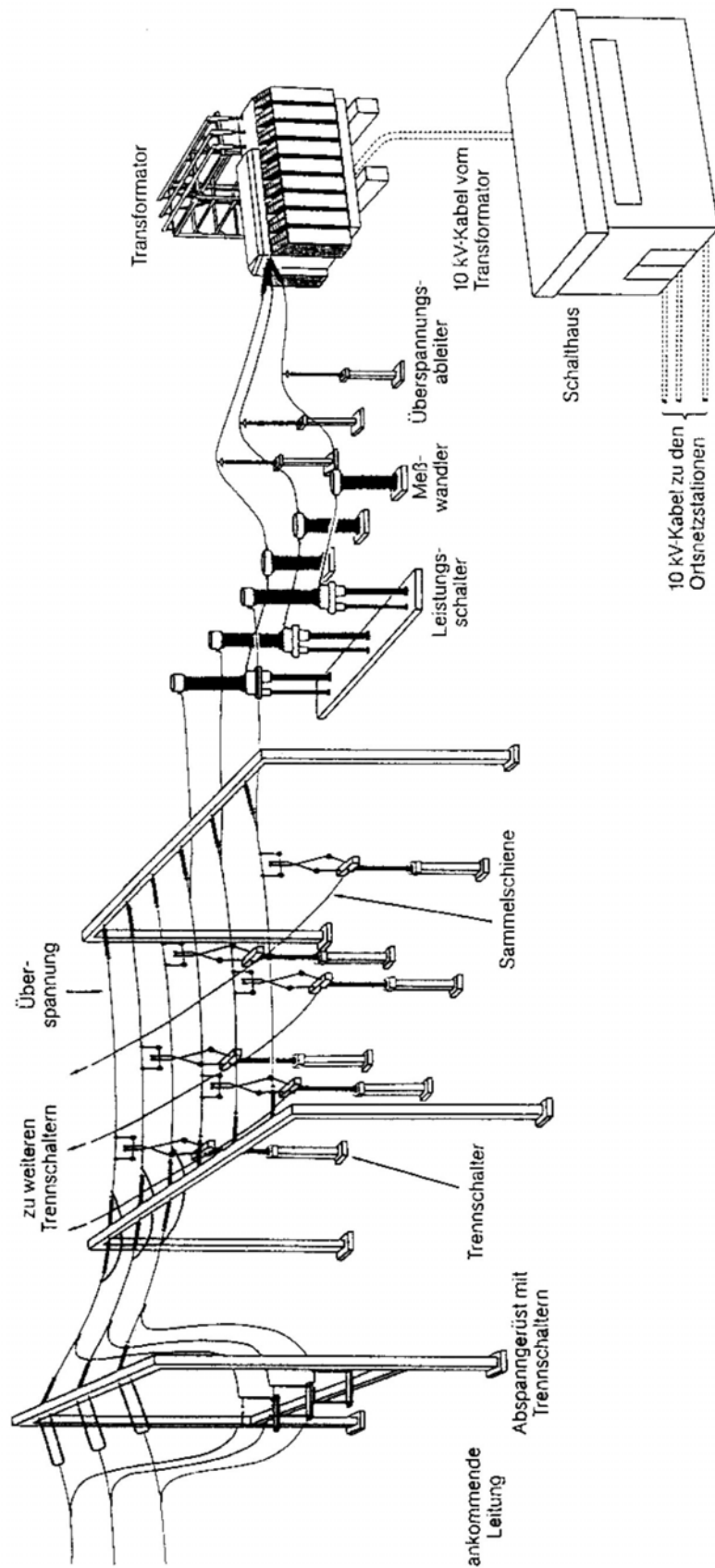
Univ. Hannover	Prinzipieller Aufbau von Schaltanlagen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/07



Univ. Hannover
Prof. Oswald

Geräteanordnung im Freileitungsabgang

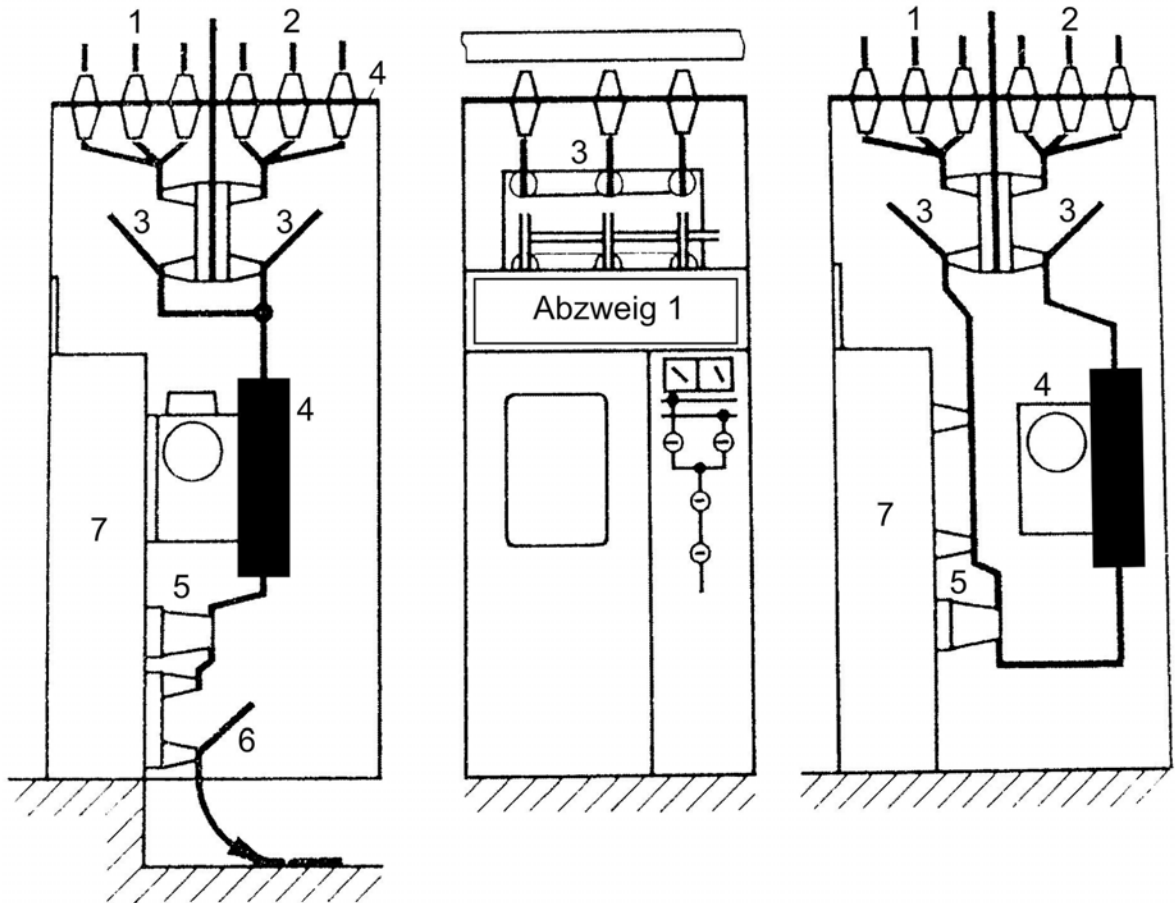
Grdl. der EV
EV-B/08



Univ. Hannover
Prof. Oswald

Schemazeichnung einer Umspann-
anlage (Transformatorabgang)

Grdl. der EV
EV-B/09



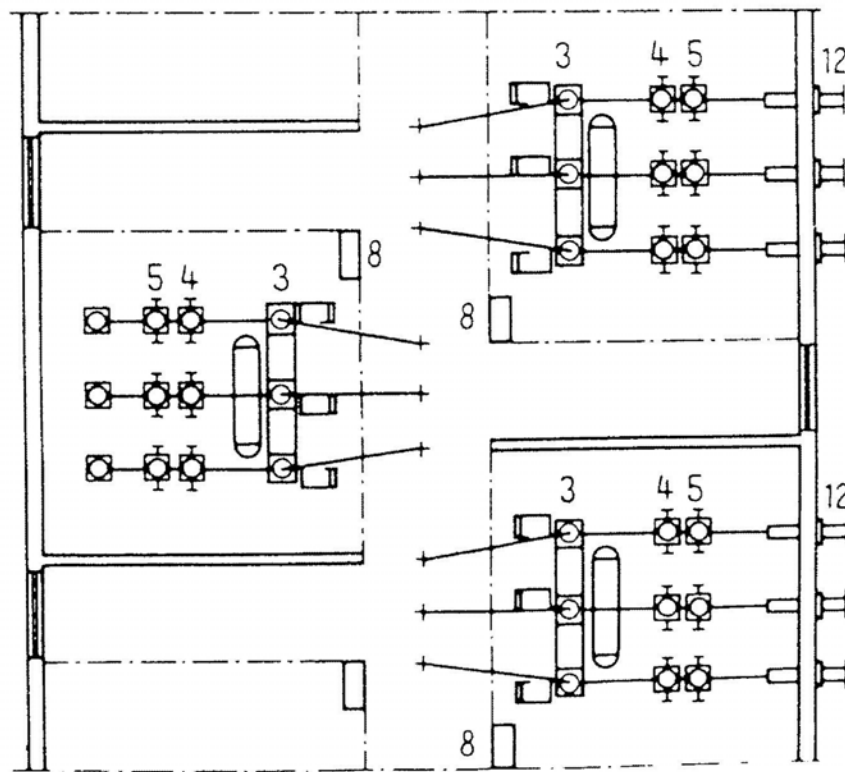
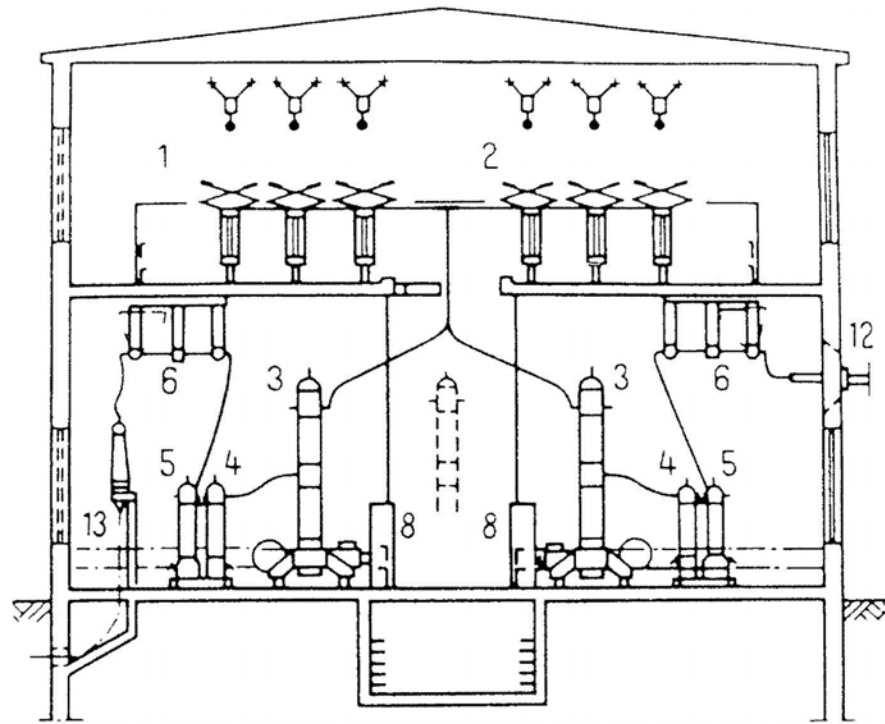
Abzweigseitenansicht

Abzweigvorderansicht

Kuppelfeld

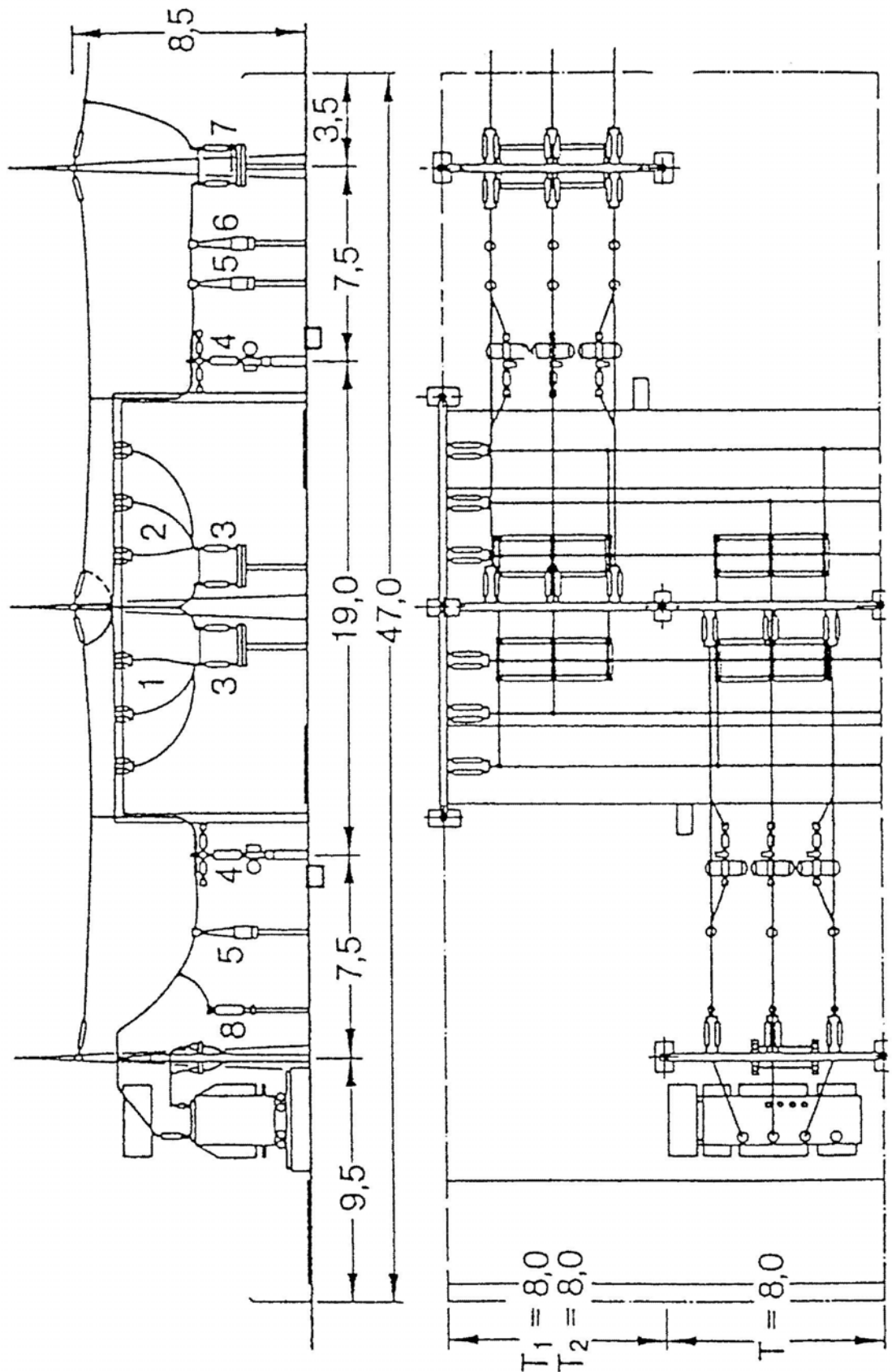
- | | | | |
|-----|----------------------|---|--------------------------------|
| 1,2 | Sammelschiene | 3 | Sammelschienen trennschalter |
| 4 | Leistungsschalter | 5 | Stromwandler |
| 6 | Abgangstrennschalter | 7 | Steuer- u. Schutzeinrichtungen |

Univ. Hannover	Mittelspannungs-Schaltanlagen (offene Innenraumausführung)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/10



- | | | | |
|------|---------------------------|---|-------------------|
| 1, 2 | Sammelschientrennschalter | 3 | Leistungsschalter |
| 4 | Stromwandler | 5 | Spannungswandler |
| 6 | Abgangstrennschalter | | |

Univ. Hannover	110-kV-Innenraum-Schaltanlage mit Doppelsammelschiene	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/11



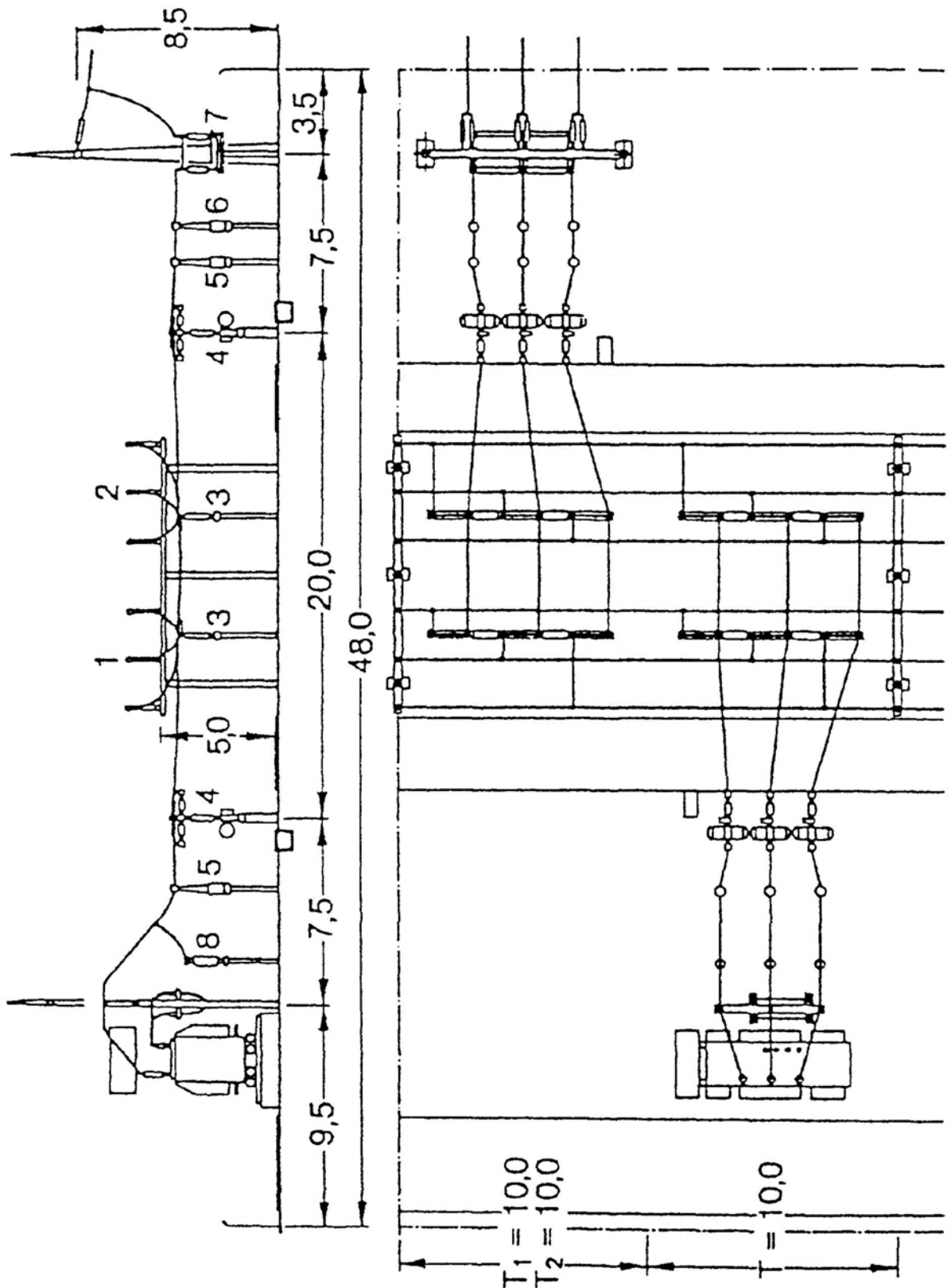
Univ. Hannover

Prof. Oswald

245-kV-Freiluft-Schaltanlage
(halbohohe klassische Bauweise)

Grdl. der EV

EV-B/12



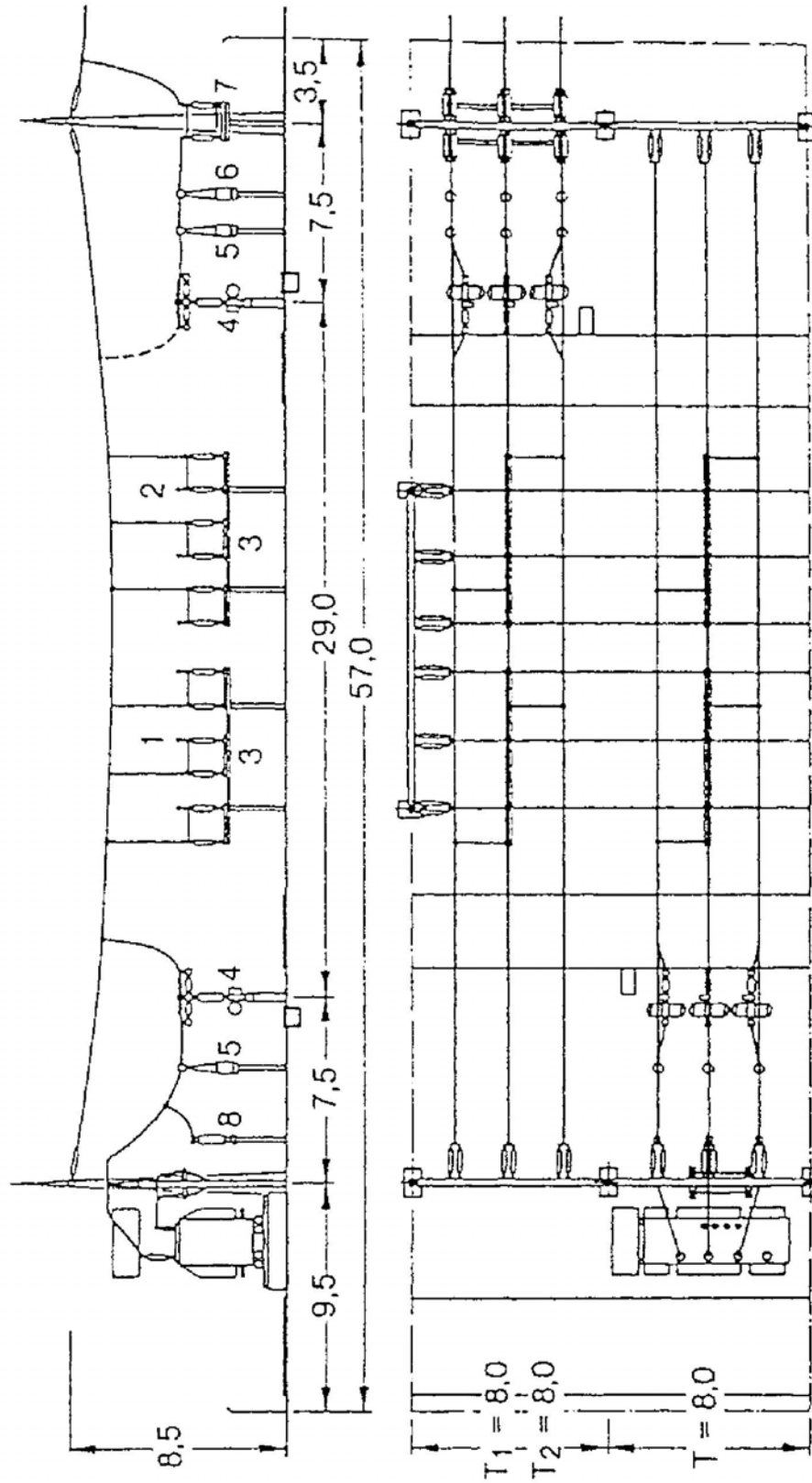
Univ. Hannover

Prof. Oswald

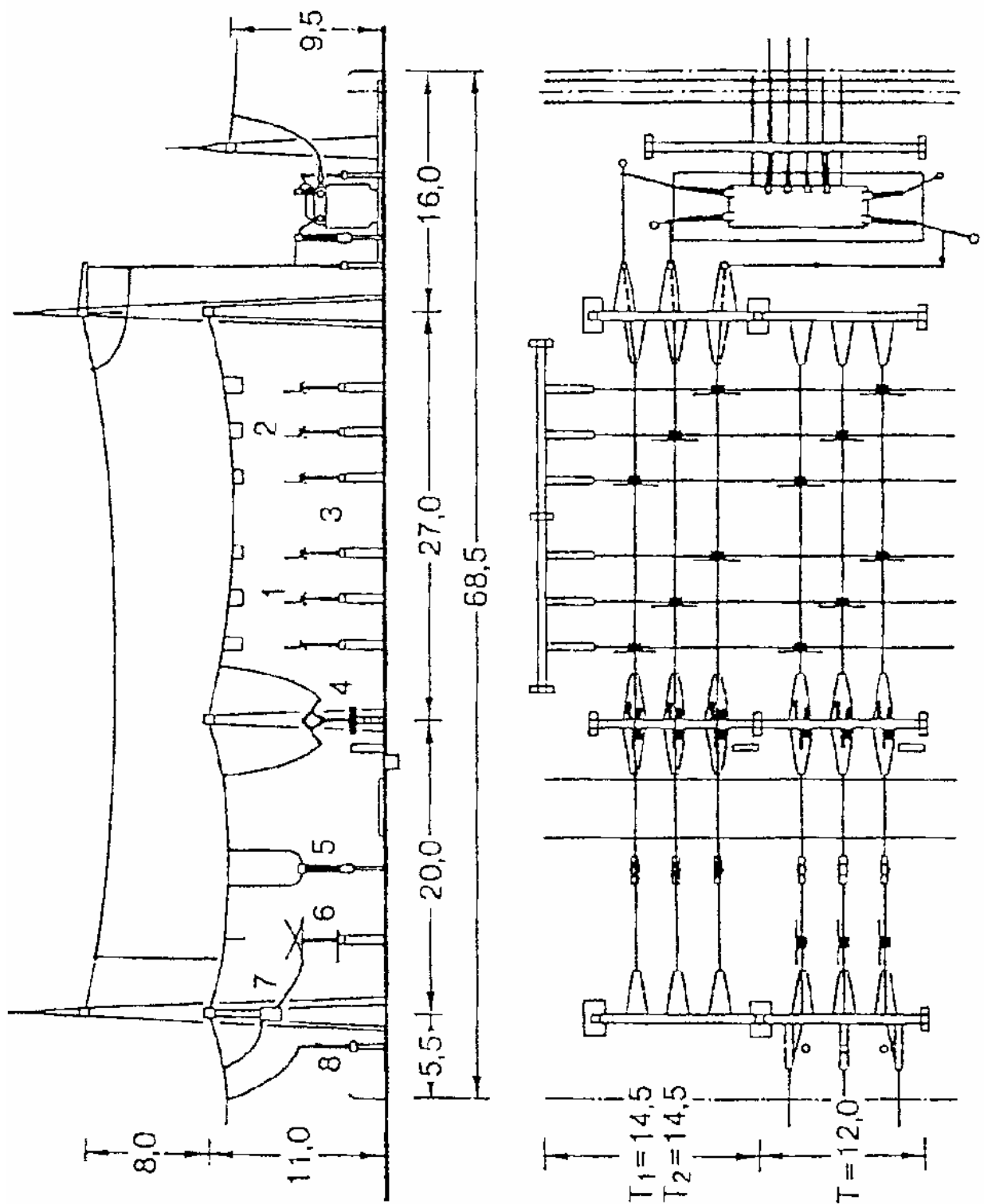
123-kV-Freiluft-Schaltanlage
(Reihen-Längsbauweise)

Grdl. der EV

EV-B/13



Univ. Hannover	123-kV-Freiluft-Schaltanlage (Reihen-Querbauweise)	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-B/14



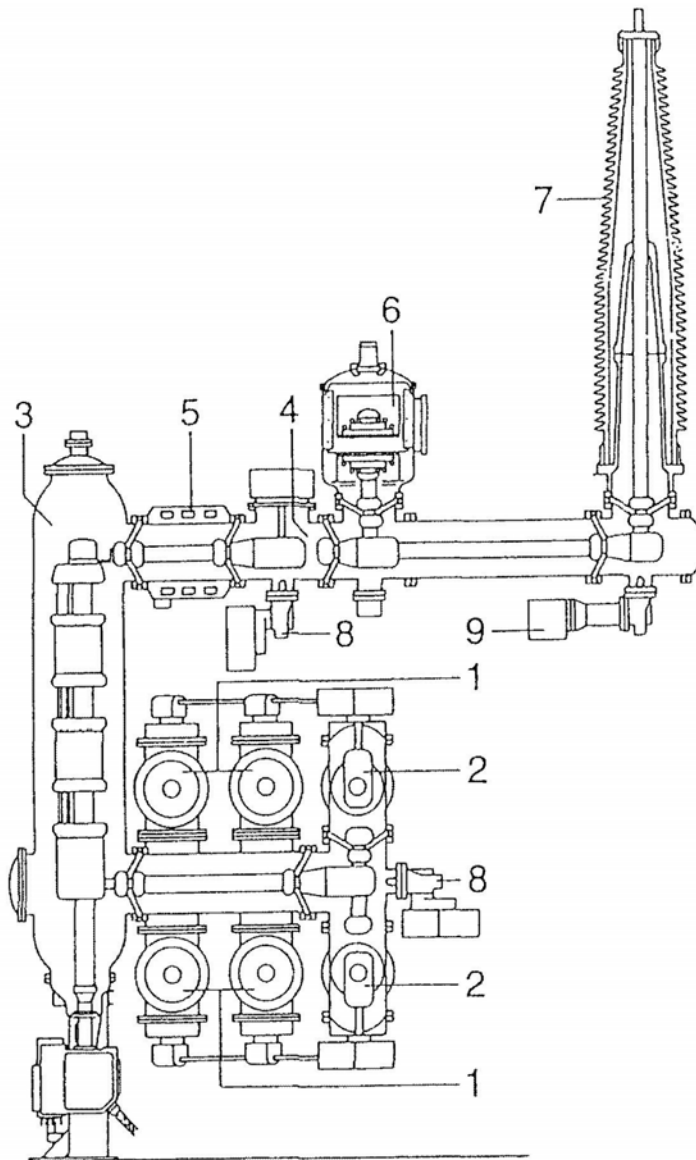
Univ. Hannover

Prof. Oswald

245-kV-Freiluft-Schaltanlage
(Diagonalbauweise)

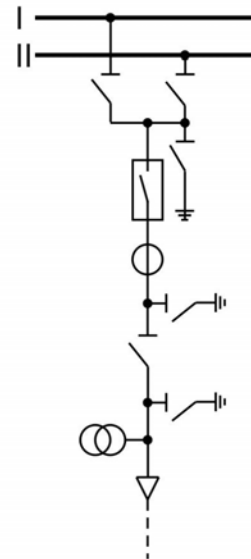
Grdl. der EV

EV-B/15



Schaltfeld

- 1 Sammelschiene
- 2 SS-Trennschalter
- 3 Leistungsschalter
- 4 Abgangs-Trennschalter
- 5 Stromwandler
- 6 Spannungswandler
- 7 Freiluftdurchführung
- 8 Arbeitserder
- 9 Schnellerder



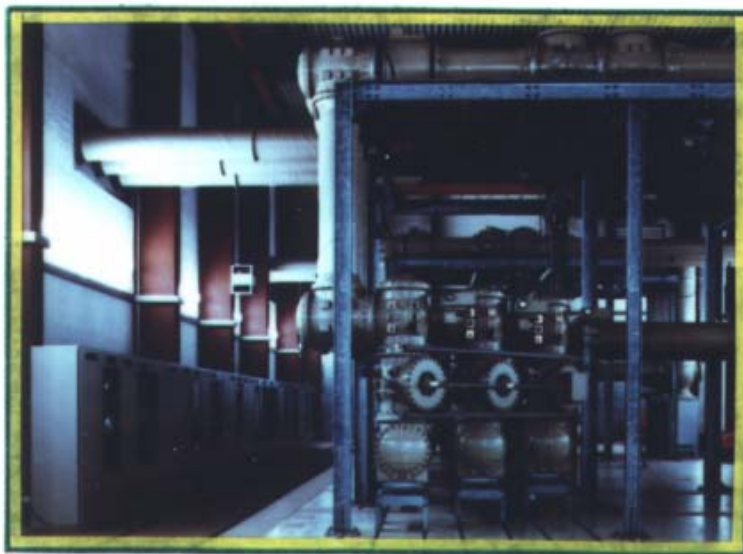
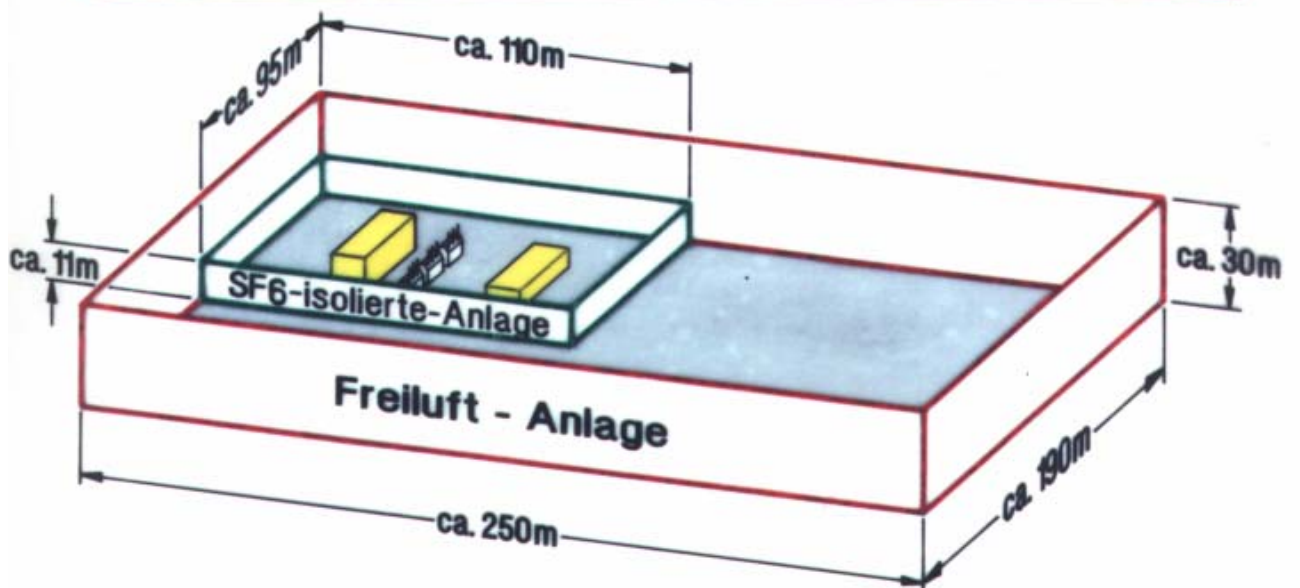
Univ. Hannover

Prof. Oswald

SF₆-Schaltanlage für 420-550 kV

Grdl. der EV

EV-B/16



Flächenbedarf
Freiluft-Technik
 ca. 47 000 m²
SF₆-Technik
 ca. 10 000 m²
 jeweils mit
 9 380-kV-Schaltfeldern
 und 18 110-kV-Schaltfeldern

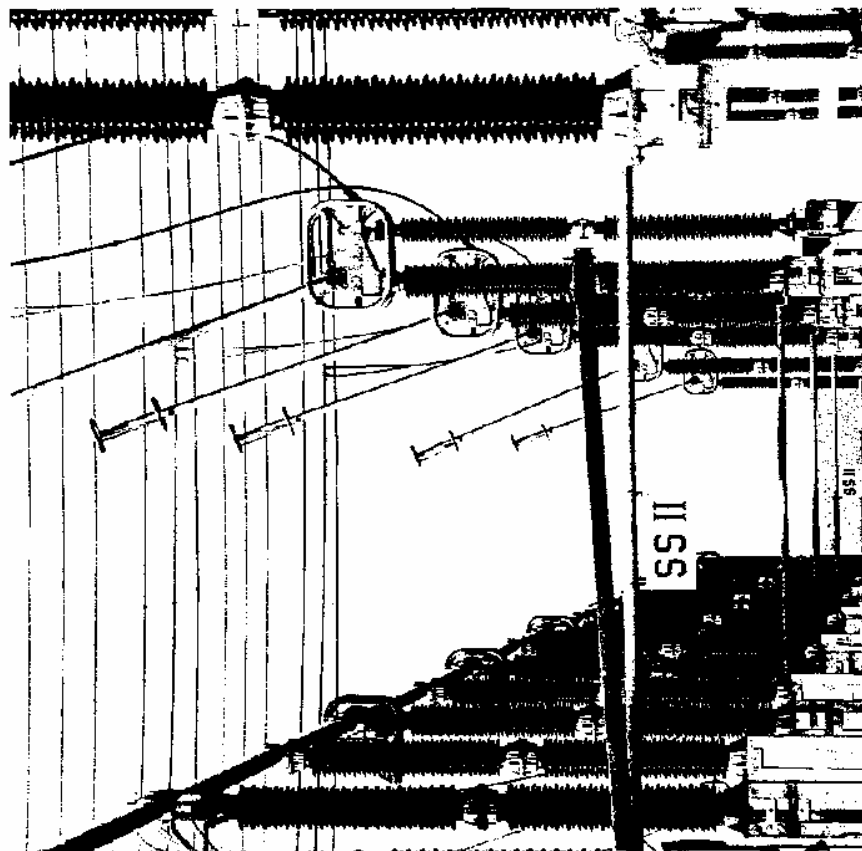
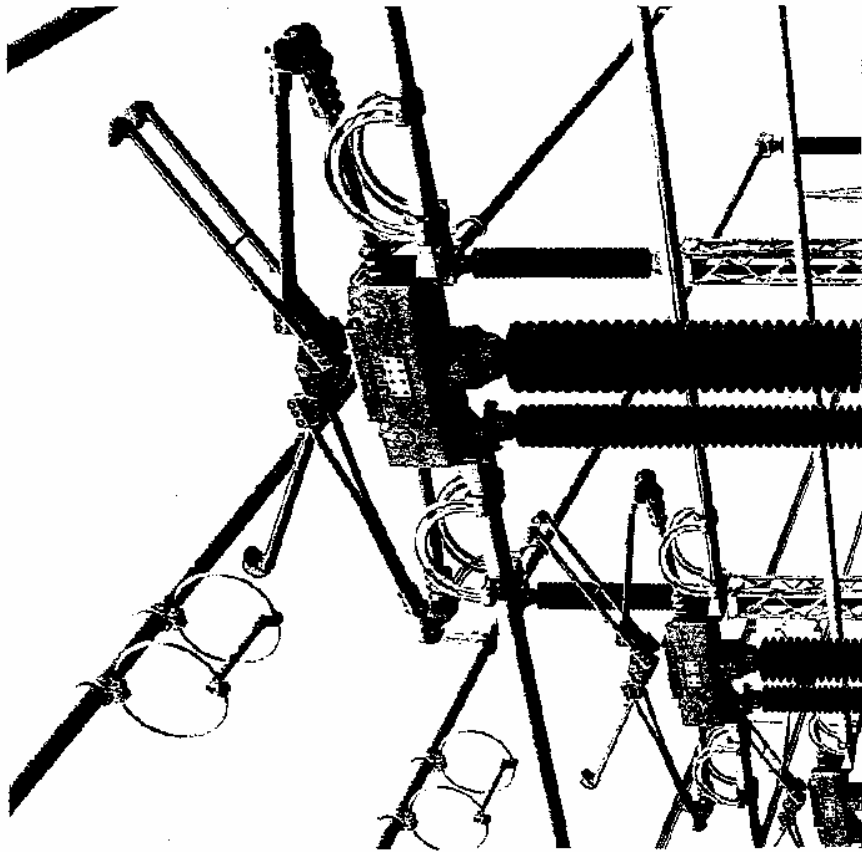
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Vergleich Freiluft/SF₆-isolierte-
 Schaltanlagen

Grdl. der EV

EV-B/17



Univ. Hannover

Prof. Oswald

Hebel- und Greifertrennschalter

Grdl. der EV

EV-B/18

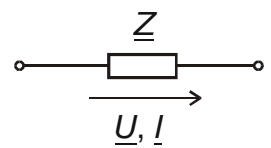
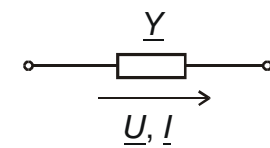
Ruhende Effektivwertzeiger (Zeiger)

$u(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u) = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{U} e^{j\omega t}\}$	$i(t) = \hat{i} \cos(\omega t + \varphi_i) = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{I} e^{j\omega t}\}$
$\underline{U} = U e^{j\varphi_u} = U(\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u)$	$\underline{I} = I e^{j\varphi_i} = I(\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i)$

Impedanz und Admittanz

$\underline{Z} = Z e^{j\varphi_Z} = R + jX = \frac{1}{\underline{Y}}$	$\underline{Y} = Y e^{j\varphi_Y} = G + jB = \frac{1}{\underline{Z}}$
-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------

Verbraucherzählfeilsystem (Strom- und Spannungszählfeil sind gleichgerichtet)

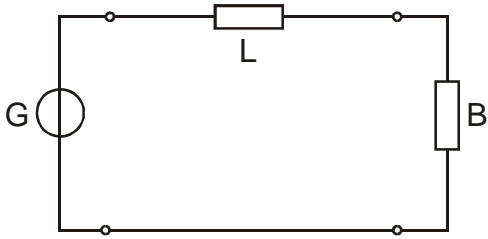
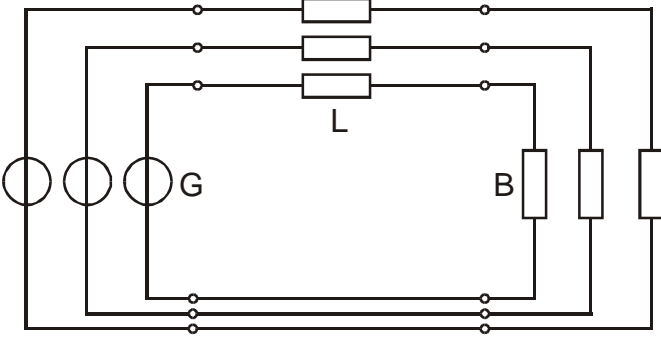
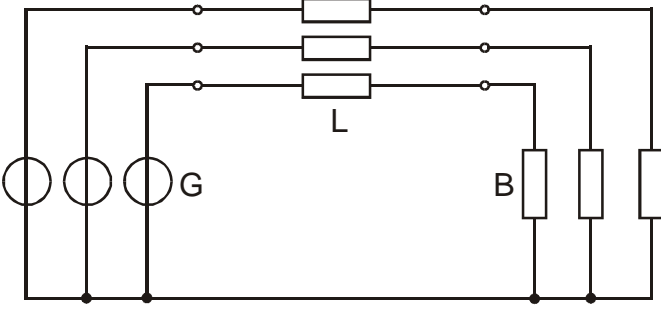
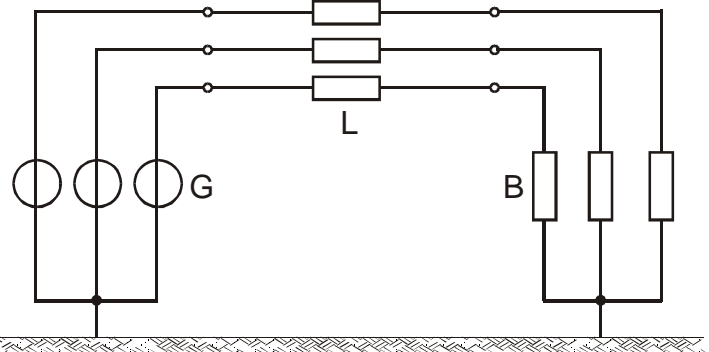
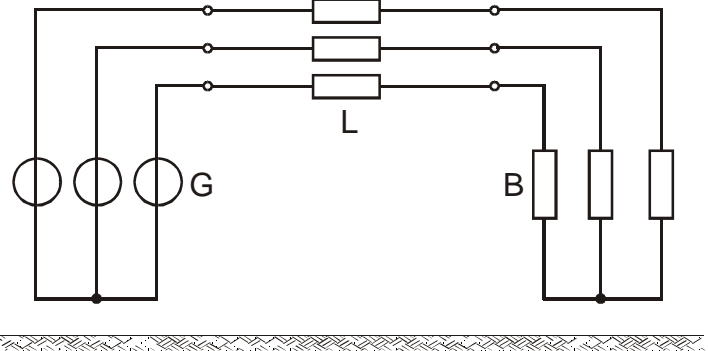
	
$\underline{U} = (+) \underline{Z} \underline{I}$	$\underline{I} = (+) \underline{Y} \underline{U}$
$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UI e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = S e^{j\varphi} = P + jQ$	
$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{Z} I^2 = R I^2 + jX I^2 = P + jQ$	$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{Y}^* U^2 = G U^2 - jB U^2 = P + jQ$
$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U(I \cos \varphi + j \sin \varphi) = UI_w + jUI_b = P + jQ$	
$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = (U \cos \varphi + jU \sin \varphi) I = U_w I + jU_b I = P + jQ$	
$\begin{aligned} p &= u(t) i(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{U} e^{j\omega t}\} \sqrt{2} \operatorname{Re}\{\underline{I} e^{j\omega t}\} = \frac{1}{2} (\underline{U} e^{j\omega t} + \underline{U}^* e^{-j\omega t}) (\underline{I} e^{j\omega t} + \underline{I}^* e^{-j\omega t}) = \\ &= \frac{1}{2} [\underline{U} \underline{I}^* + (\underline{U} \underline{I}^*)^*] + \frac{1}{2} [\underline{U} \underline{I} e^{j2\omega t} + (\underline{U} \underline{I} e^{j2\omega t})^*] = \operatorname{Re}\{\underline{U} \underline{I}^*\} + \operatorname{Re}\{\underline{U} \underline{I} e^{j2\omega t}\} = \operatorname{Re}\{\underline{S}\} + \operatorname{Re}\{\underline{s}\} = \\ &= UI [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)] = P + S \cos(2\omega t + \varphi) \end{aligned}$	

Impedanz, Admittanz und komplexe Leistung (VZS) für die Grundschaltelemente

Element	$\underline{Z} = R + jX$	$\underline{Y} = G + jB$	$\underline{S} = P + jQ$	$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$
R, G	R	G	$R I^2 = G U^2 = UI_w$	0
L	$j\omega L = jX_L$	$-j \frac{1}{\omega L} = -jB_L$	$jX_L I^2 = jB_L U^2 = jUI_b$	$+\frac{\pi}{2}$
C	$-j \frac{1}{\omega C} = -jX_C$	$j\omega C = jB_C$	$-jX_C I^2 = -jB_C U^2 = jUI_b$	$-\frac{\pi}{2}$

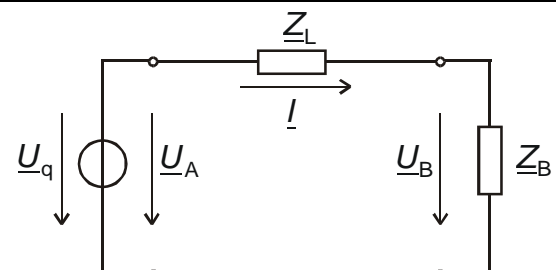
Beachte: Die Definition des Blindstromes ist in der Literatur nicht einheitlich.

Univ. Hannover	Impedanz, Admittanz und Leistung (VZS) eines Zweipols	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-C/01

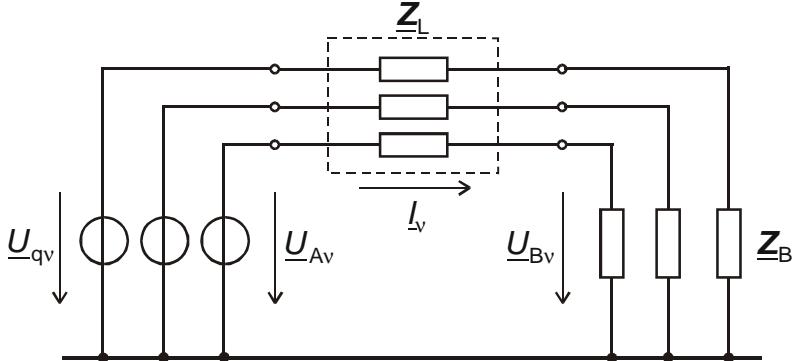
	<p>Wechselstromsystem G Generator L Leitung B Belastung</p>
	<p>unverkettetes Drehstromsystem</p>
	<p>verkettetes Drehstromsystem mit gemeinsamen Rückleiter</p>
	<p>verkettetes Drehstromsystem beidseitig geerdet Erde dient als Rückleiter</p>
	<p>verkettetes Drehstromsystem beidseitig nicht geerdet</p>

<p>Univ. Hannover</p>	<p>Vom Wechselstrom- zum Drehstromsystem</p>	<p>Grdl. der EV</p>
<p>Prof. Oswald</p>		<p>EV-C/02</p>

Wechselstromsystem (Einphasensystem)

	Ersatzschaltung
$\underline{U}_A = \underline{U}_q$ $\underline{U}_B = \underline{Z}_B \underline{I}$ $\underline{U}_q = \underline{Z}_L \underline{I} + \underline{U}_B = (\underline{Z}_L + \underline{Z}_B) \underline{I}$	Spannungsgleichungen
$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UI \cos \varphi = P + jQ$	komplexe Leistung

Drehstromsystem (Dreiphasensystem)

	Ersatzschaltung mit induktiver Kopplung $v = a, b, c$
$\begin{bmatrix} \underline{U}_{Aa} \\ \underline{U}_{Ab} \\ \underline{U}_{Ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ \underline{U}_{qb} \\ \underline{U}_{qc} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_{Ba} \\ \underline{U}_{Bb} \\ \underline{U}_{Bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ba} & & \\ & \underline{Z}_{Bb} & \\ & & \underline{Z}_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}$ $\underline{u}_A = \underline{u}_q \quad \underline{u}_B = \underline{Z}_B \underline{i}$ $\begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ \underline{U}_{qb} \\ \underline{U}_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Laa} & \underline{Z}_{Lab} & \underline{Z}_{Lac} \\ \underline{Z}_{Lba} & \underline{Z}_{Lbb} & \underline{Z}_{Lbc} \\ \underline{Z}_{Lca} & \underline{Z}_{Lcb} & \underline{Z}_{Lcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ba} & & \\ & \underline{Z}_{Bb} & \\ & & \underline{Z}_{Bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}$ $\underline{u}_q = \underline{Z}_L \underline{i} + \underline{Z}_B \underline{i}$	Spannungsgleichungen mit induktiver Kopplung Die Impedanzmatrix der Leitung ist voll besetzt
$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = \underline{u}^T \underline{i}^* = P + jQ$	Drehstromleistung = Summe der Strangleistungen

Univ. Hannover	Wechselstrom- und Drehstromsystem	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-C/03

Symmetriebedingungen

$\underline{U}_{qa} = \underline{U}_q \quad \underline{U}_{qb} = \underline{a}^2 \underline{U}_q \quad \underline{U}_{qc} = \underline{a} \underline{U}_q$ $\underline{U}_{qa} + \underline{U}_{qb} + \underline{U}_{qc} = 0$	<p>symmetrische Quellen</p> $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad \underline{a}^2 = \underline{a}^* = \underline{a}^{-1} = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$
$\underline{Z}_{Laa} = \underline{Z}_{Lbb} = \underline{Z}_{Lcc} = \underline{Z}_{Ls}$ $\underline{Z}_{Lab} = \underline{Z}_{Lbc} = \underline{Z}_{Lca} = \underline{Z}_{Lg}$ $\underline{Z}_L = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ls} & \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Lg} \\ \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Ls} & \underline{Z}_{Lg} \\ \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Ls} \end{bmatrix}$	<p>symmetrische Leitungen (Betriebsmittel)</p> <p>diagonal-zyklisch symmetrische Impedanzmatrix mit Selbst (s)- und Gegenimpedanzen (g)</p>
$\underline{Z}_{Ba} = \underline{Z}_{Bb} = \underline{Z}_{Bc} = \underline{Z}_B$	<p>symmetrische Belastungen</p>

Spannungen und Ströme

$\begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ \underline{U}_{qb} \\ \underline{U}_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ls} & \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Lg} \\ \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Ls} & \underline{Z}_{Lg} \\ \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_B & & \\ & \underline{Z}_B & \\ & & \underline{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}$	<p>Spannungsgleichungen</p>
$\underline{U}_{qa} + \underline{U}_{qb} + \underline{U}_{qc} = 0 = (\underline{Z}_{Ls} + 2\underline{Z}_{Lg} + \underline{Z}_B)(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c)$ $\rightarrow \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$	<p>Summation der 3 Gleichungen</p> <p>gilt an jeder Stelle des symmetrischen Drehstromsystems</p>
$\begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ \underline{U}_{qb} \\ \underline{U}_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ls} - \underline{Z}_{Lg} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{Ls} - \underline{Z}_{Lg} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{Ls} - \underline{Z}_{Lg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_B & & \\ & \underline{Z}_B & \\ & & \underline{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}$	<p>mit $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$</p> <p>Entkopplung der 3 Spannungsgleichungen</p>
$\begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ \underline{U}_{qb} \\ \underline{U}_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{L1} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_B & & \\ & \underline{Z}_B & \\ & & \underline{Z}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}$	<p>Einführung der Drehstromimpedanz oder Mitimpedanz oder Betriebsimpedanz</p> $\underline{Z}_{L1} = \underline{Z}_{Ls} - \underline{Z}_{Lg}$
$\underline{U}_a = U e^{j\varphi_u}; \quad \underline{U}_b = U e^{j(\varphi_u - \frac{2\pi}{3})} = \underline{a}^2 \underline{U}_a; \quad \underline{U}_c = U e^{j(\varphi_u + \frac{2\pi}{3})} = \underline{a} \underline{U}_a$ $\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c = 0$	<p>an jeder Stelle herrscht Spannungs- und Stromsymmetrie</p>
$\underline{I}_a = I e^{j\varphi_i}; \quad \underline{I}_b = I e^{j(\varphi_i - \frac{2\pi}{3})} = \underline{a}^2 \underline{I}_a; \quad \underline{I}_c = I e^{j(\varphi_i + \frac{2\pi}{3})} = \underline{a} \underline{I}_a$ $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$	

Univ. Hannover

Symmetrisches Drehstromsystem

Grdl. der EV

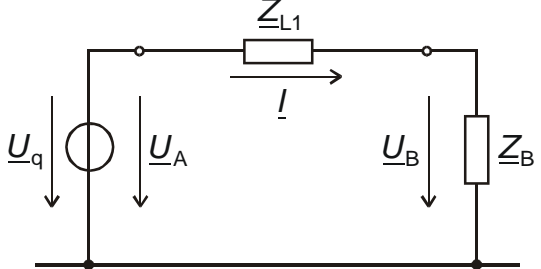
Prof. Oswald

EV-C/04

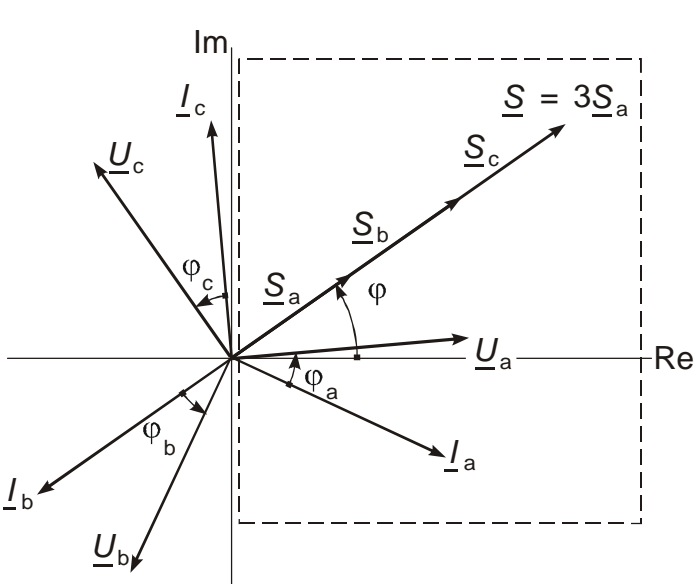
Leistungen im symmetrisches Drehstromsystem

$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = \underline{u}^T \underline{i}^* =$ $= \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{a}^2 \underline{U}_a \underline{a} \underline{I}_a^* + \underline{a} \underline{U}_a \underline{a}^2 \underline{I}_a^* = 3 \underline{U}_a \underline{I}_a^* = P + jQ$	komplexe Leistung
$p = u_a(t) i_a(t) + u_b(t) i_b(t) + u_c(t) i_c(t) =$ $= \operatorname{Re}\{\underline{U}_a \underline{I}_a^*\} + \operatorname{Re}\{\underline{U}_b \underline{I}_b^*\} + \operatorname{Re}\{\underline{U}_c \underline{I}_c^*\} +$ $+ \operatorname{Re}\{\underline{U}_a \underline{I}_a e^{j2\omega t}\} + \operatorname{Re}\{\underline{U}_a \underline{I}_a e^{j2\omega t}\} + \operatorname{Re}\{\underline{U}_a \underline{I}_a e^{j2\omega t}\} =$ $= \operatorname{Re}\{3 \underline{U} \underline{I}^*\} = \operatorname{Re}\{\underline{S}\} = UI \cos \varphi = P$	Momentanwertleistung (im Gegensatz zum Wechselstromsystem tritt kein schwingender Anteil auf)

Strangersatzschaltung/Leiterersatzschaltung (Leiter a = Bezugsleiter)

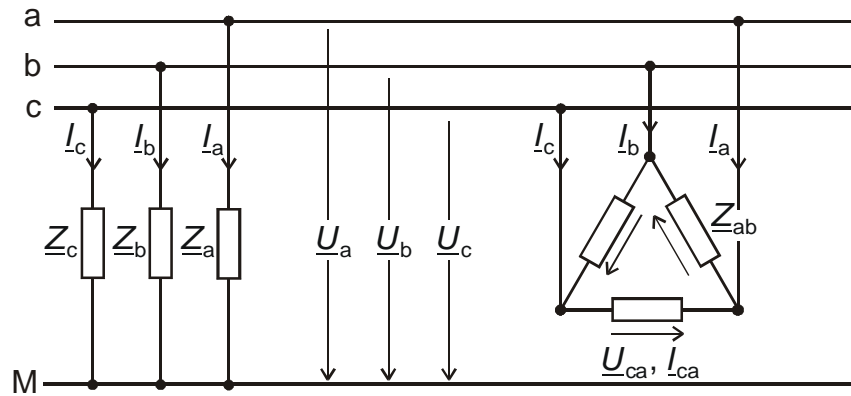
	Strangersatzschaltung
$\underline{U}_A = \underline{U}_q; \quad \underline{U}_B = \underline{Z}_B \underline{I}$ $\underline{U}_q = \underline{Z}_{L1} \underline{I} + \underline{U}_B = (\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_B) \underline{I}$	Spannungsgleichung der 3 Leiter (ohne Index)

Zeigerbild

	<p>Die Ströme und Spannungen der 3 Leiter (Stränge) sind untereinander gleichermaßen phasenverschoben: $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$</p> <p>Es genügt die Betrachtung eines Leiters (Stranges)</p> <p>Die Leistungen werden stets als Systemleistung = dreifache Strangleistung angegeben</p>
-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Univ. Hannover	Symmetrisches Drehstromsystem	Grdl. der EV
Prof. Oswald	(Fortsetzung)	EV-C/05

Allgemeiner Fall



$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \frac{\underline{Z}_a \underline{Z}_b}{\underline{Z}_c}$$

$$\underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + \frac{\underline{Z}_b \underline{Z}_c}{\underline{Z}_a}$$

$$\underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_a + \frac{\underline{Z}_c \underline{Z}_a}{\underline{Z}_b}$$

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{ab} \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}$$

$$\underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_{bc} \underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}$$

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{ca} \underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}$$

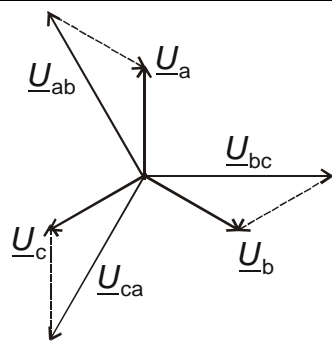
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{ab} \\ \underline{U}_{bc} \\ \underline{U}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{ab} \\ \underline{I}_{bc} \\ \underline{I}_{ca} \end{bmatrix}$$

Symmetrie

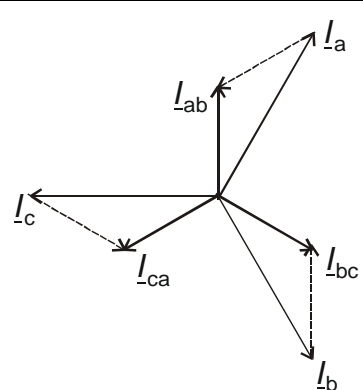
$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_Y = \frac{1}{3} \underline{Z}_\Delta$$

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\Delta = 3 \underline{Z}_Y$$



$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{ab} \\ \underline{U}_{bc} \\ \underline{U}_{ca} \end{bmatrix} = \sqrt{3} e^{j30^\circ} \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}$$

$$U_\Delta = \sqrt{3} U_Y$$



$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \sqrt{3} e^{-j30^\circ} \begin{bmatrix} \underline{I}_{ab} \\ \underline{I}_{bc} \\ \underline{I}_{ca} \end{bmatrix}$$

$$I_Y = \sqrt{3} I_\Delta$$

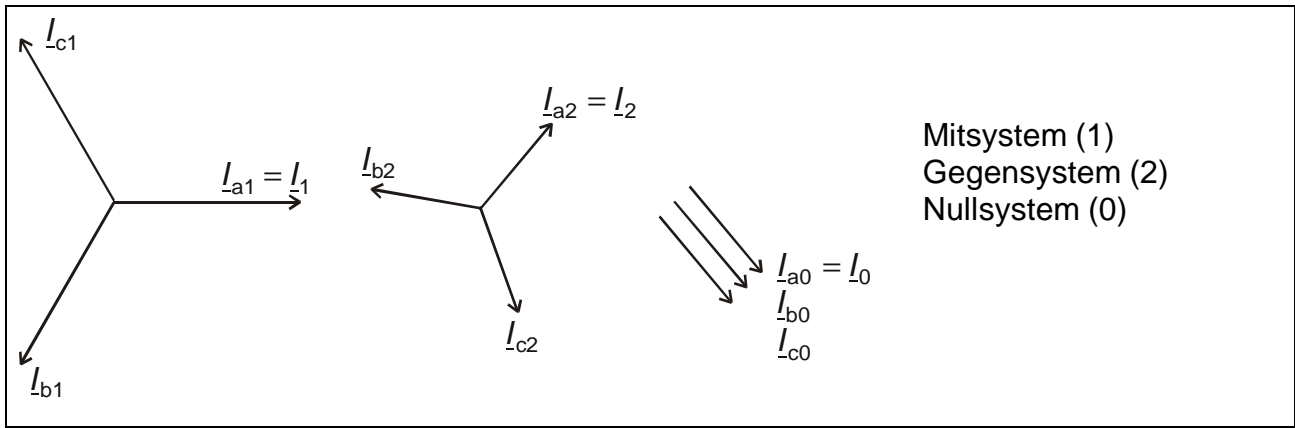
Univ. Hannover

Umrechnung zwischen Stern- und
Dreieckschaltung

Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-C/06



Mitsystem (1)
Gegensystem (2)
Nullsystem (0)

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_a \\ \underline{i}_b \\ \underline{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{a1} \\ \underline{i}_{b1} \\ \underline{i}_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{i}_{a2} \\ \underline{i}_{b2} \\ \underline{i}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{i}_{a0} \\ \underline{i}_{b0} \\ \underline{i}_{c0} \end{bmatrix}$$

jede Größe lässt sich aus den symmetrischen Komponenten zusammensetzen bzw. in diese zerlegen

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_a \\ \underline{i}_b \\ \underline{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_1 \\ \underline{a}^2 \underline{i}_1 \\ \underline{a} \underline{i}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{i}_2 \\ \underline{a} \underline{i}_2 \\ \underline{a}^2 \underline{i}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{i}_0 \\ \underline{i}_0 \\ \underline{i}_0 \end{bmatrix}$$

die Größen b und c der symmetrischen Komponenten lassen sich durch die Größen a (Bezugsgrößen) ausdrücken

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_a \\ \underline{i}_b \\ \underline{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_1 \\ \underline{i}_2 \\ \underline{i}_0 \end{bmatrix}; \quad \underline{i} = \underline{T}_S \underline{i}_S$$

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_1 \\ \underline{i}_2 \\ \underline{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_a \\ \underline{i}_b \\ \underline{i}_c \end{bmatrix}; \quad \underline{i}_S = \underline{T}_S^{-1} \underline{i}$$

Matrizenschreibweise der Beziehungen zwischen den Drehstromgrößen und symmetrischen Komponenten (Index S)
(Hin- und Rücktransformationsbeziehungen)

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ \underline{U}_{qb} \\ \underline{U}_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ls} & \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Lg} \\ \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Ls} & \underline{Z}_{Lg} \\ \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Lg} & \underline{Z}_{Ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_a \\ \underline{i}_b \\ \underline{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}$$

$$\underline{u}_q = \underline{Z}_L \underline{i} + \underline{u}$$

$$\underline{T}_S \underline{u}_{qS} = \underline{Z}_L \underline{T}_S \underline{i}_S + \underline{T}_S \underline{u}_S$$

$$\underline{u}_{qS} = \underline{T}_S^{-1} \underline{Z}_L \underline{T}_S \underline{i}_S + \underline{u}_S = \underline{Z}_{LS} \underline{i}_S + \underline{u}_S$$

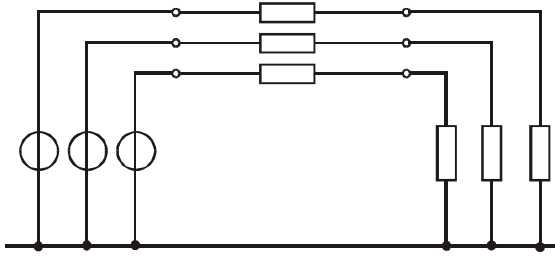
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{qa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{L2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{L0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_1 \\ \underline{i}_2 \\ \underline{i}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix}$$

Transformation der Spannungsgleichungen eines symmetrischen Drehstromsystems in symmetrische Komponenten

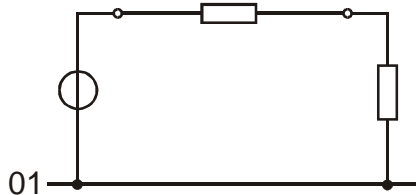
Ersetzen der Drehstromgrößen durch ihre symmetrische Komponenten
transformierte Spannungsgleichung

$\underline{Z}_{L1} = \underline{Z}_{Ls} - \underline{Z}_{Lg}$ Mitimpedanz
 $\underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{L1}$ Gegenimpedanz
 $\underline{Z}_{L0} = \underline{Z}_{Ls} + 2\underline{Z}_{Lg}$ Nullimpedanz

Symmetrisches Drehstromnetz



Ersatzschaltung

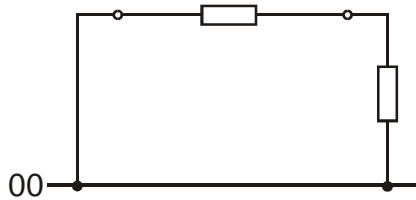


Ersatzschaltung für die symmetrischen Komponenten.

Mitsystem (aktiv)

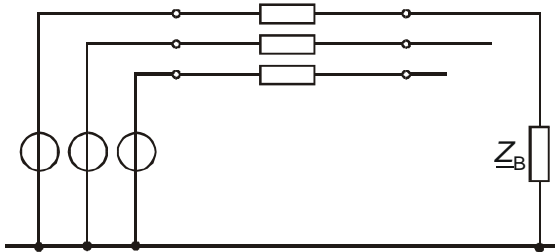


Gegensystem (passiv)

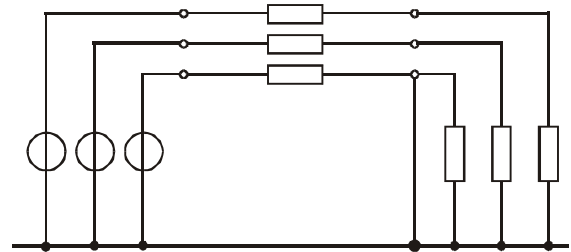


Nullsystem (passiv)

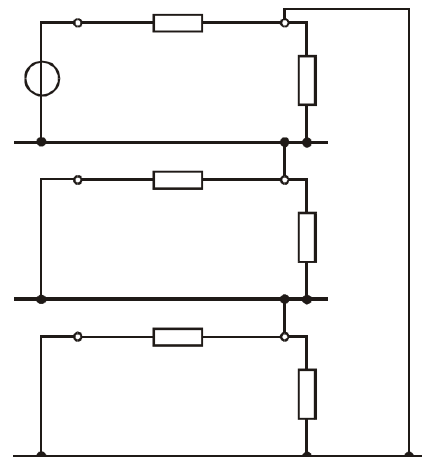
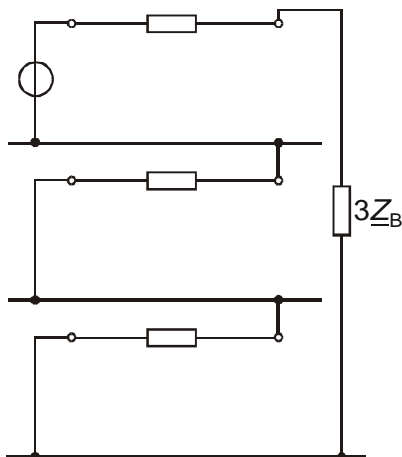
Symmetrische Komponenten für zwei spezielle Unsymmetriefälle



unsymmetrische Belastung (Leiter a)




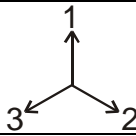
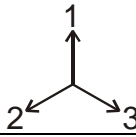
einpoliger Kurzschluss (Leiter a)



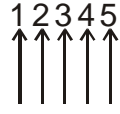
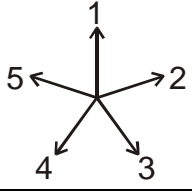
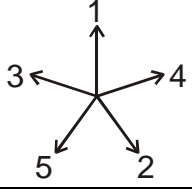
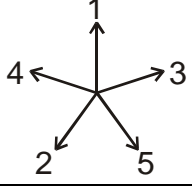
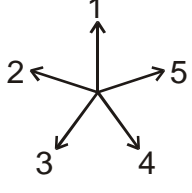
Allgemeiner Zeiger für die Komponenten eines Mehrphasensystems

$\underline{G}_{k,i} = G_{k,i} e^{j(i\vartheta_{k0} - \frac{(i-1)k}{m}2\pi)}$	m Phasenzahl
	$k = 0 \dots m-1$ Index des Systems
	$i = 1 \dots m$ Index der Komponente im System

Beispiel $m = 3$ (Dreiphasensystem)

k	i	$-\frac{(i-1)k}{m}2\pi$	Art des Systems
0	1	0	Nullsystem 
	2	0	
	3	0	
1	1	0	Mitsystem 
	2	$-2\pi/3$	
	3	$-4\pi/3$	
2	1	0	Gegensystem 
	2	$-4\pi/3$	
	3	$-2\pi/3$	

Beispiel $m = 5$ (Fünfphasensystem)

k	i	$-\frac{(i-1)k}{m}2\pi$	Art des Systems
0	1	0	Nullsystem 
	2	0	
	3	0	
	4	0	
	5	0	
1	1	0	Mitsystem 
	2	$-2\pi/5$	
	3	$-4\pi/5$	
	4	$-6\pi/5$	
	5	$-8\pi/5$	
2	1	0	gemischtes System 
	2	$-4\pi/5$	
	3	$-8\pi/5$	
	4	$-2\pi/5$	
	5	$-6\pi/5$	
3	1	0	gemischtes System 
	2	$-6\pi/5$	
	3	$-2\pi/5$	
	4	$-8\pi/5$	
	5	$-4\pi/5$	
4	1	0	Gegensystem 
	2	$-8\pi/5$	
	3	$-6\pi/5$	
	4	$-4\pi/5$	
	5	$-2\pi/5$	

Univ. Hannover

Mehrphasensysteme

Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-C/09

Synchronmaschine

Außenpol-Maschine
(kleine Leistung)

Innenpol-Maschine
große Leistung

Turbo-/Vollpol-Generator

Schenkelpol-Generator

Schnelläufer:

$$p = 1 \text{ oder } 2$$

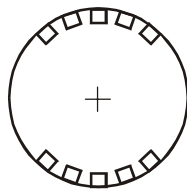
$$n = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$1500 \text{ min}^{-1}$$

Langsamläufer:

$$p > 2$$

$$n = 1000 \dots 75 \text{ min}^{-1}$$



Induktor / Rotor

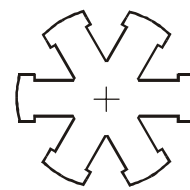
$$l \gg d$$

Transportprobleme

$$d_{\max} = 1,3 \dots 1,8 \text{ m}$$

$$l_{\max} = 9 \text{ m}$$

$$S_{\max} = 1,8 \dots 2,5 \text{ GVA}$$



Polrad

$$d \gg l$$

Montage vor Ort

$$d_{\max} = 20 \text{ m}$$

$$n_0 = \frac{\Omega_0}{2\pi} = \frac{\omega_0}{p2\pi};$$

$$\omega_0 = 2\pi f$$

synchrone Drehzahl

$$\frac{n}{\text{min}^{-1}} = 60 \frac{f/\text{s}^{-1}}{p} = \frac{3000}{p}$$

bei 50 Hz

$$S_r = k \underbrace{A' B'}_c \underbrace{d l^2}_V n$$

Bemessungscheinleistung

c Ausnutzungsfaktor
 V aktives Läufer Volumen
 A' Ankerstrombelag
 B' Induktionsbelag

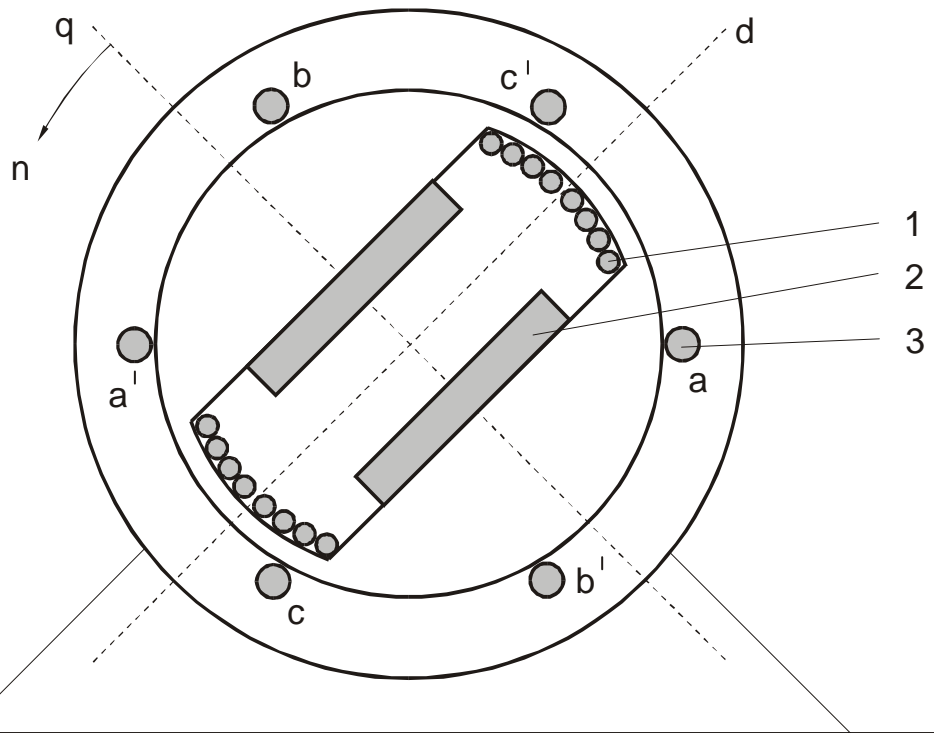
Univ. Hannover

Bauarten von Synchrongeneratoren

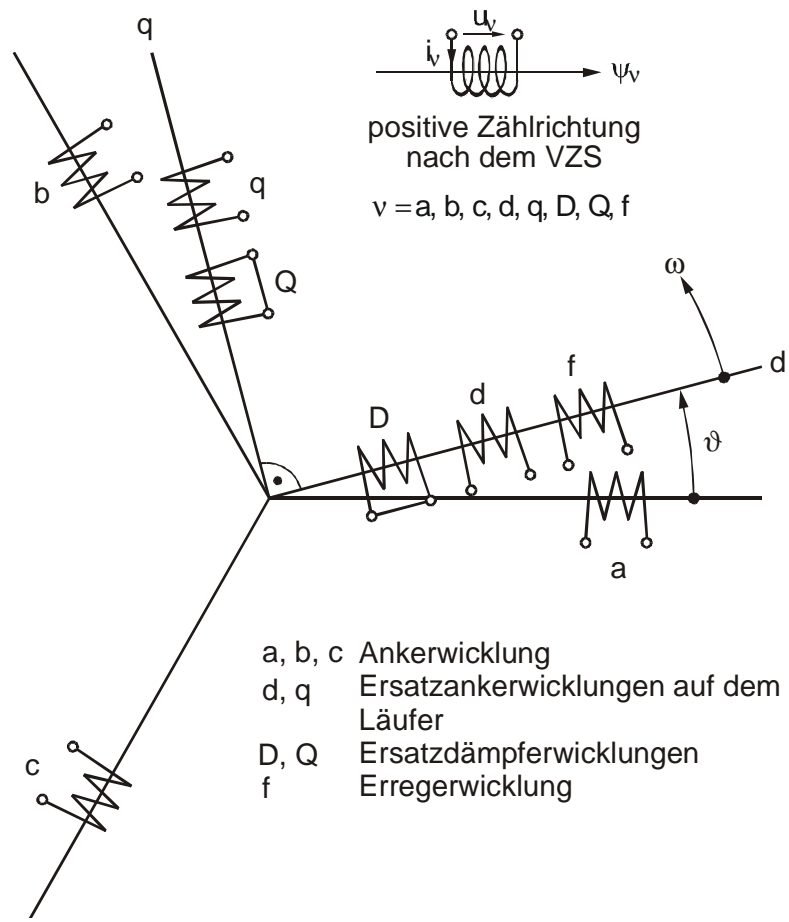
Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-D/01

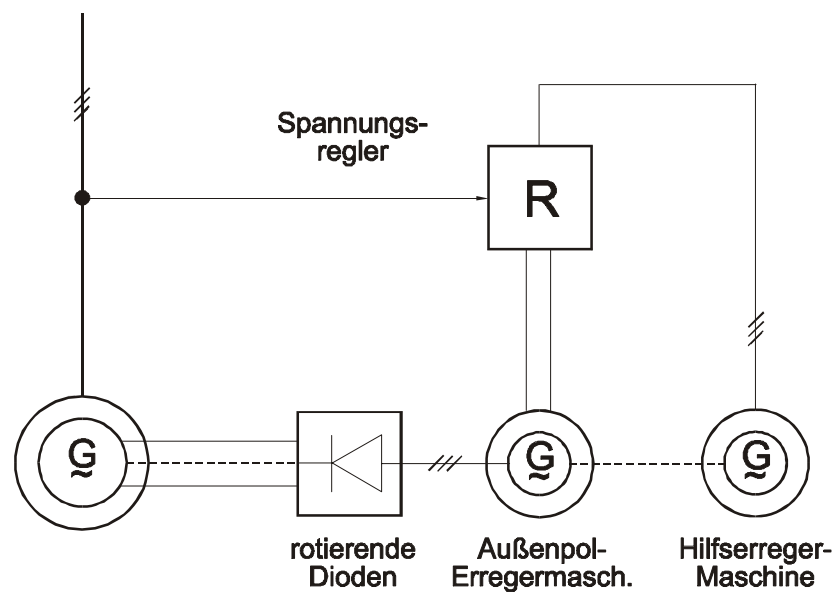
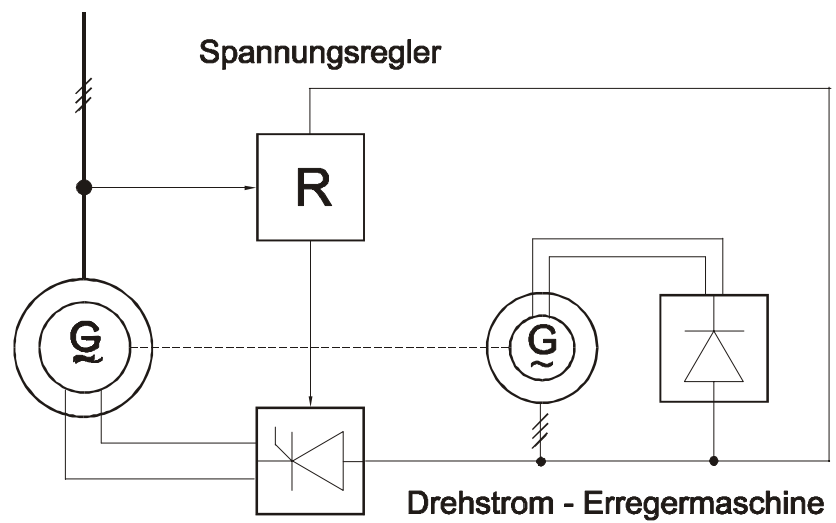
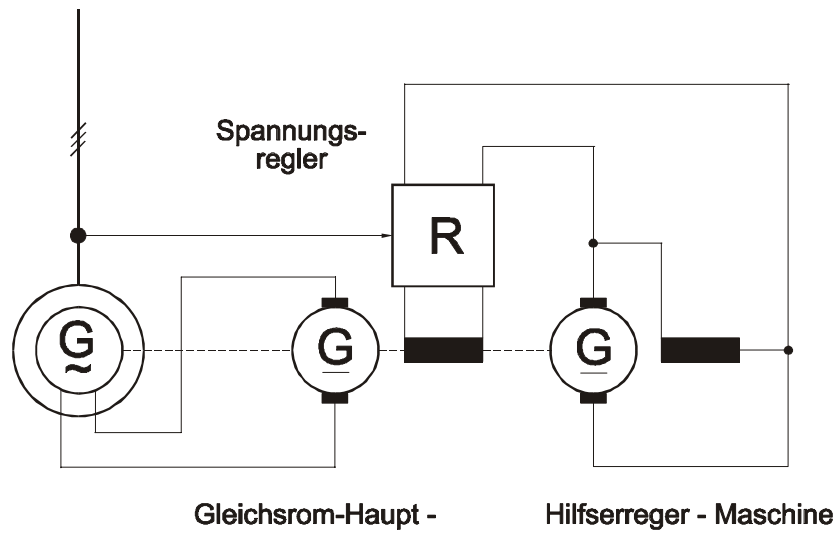


1 Dämpferwicklung, 2 Erreger- oder Feldwicklung, 3 Ankerwicklung

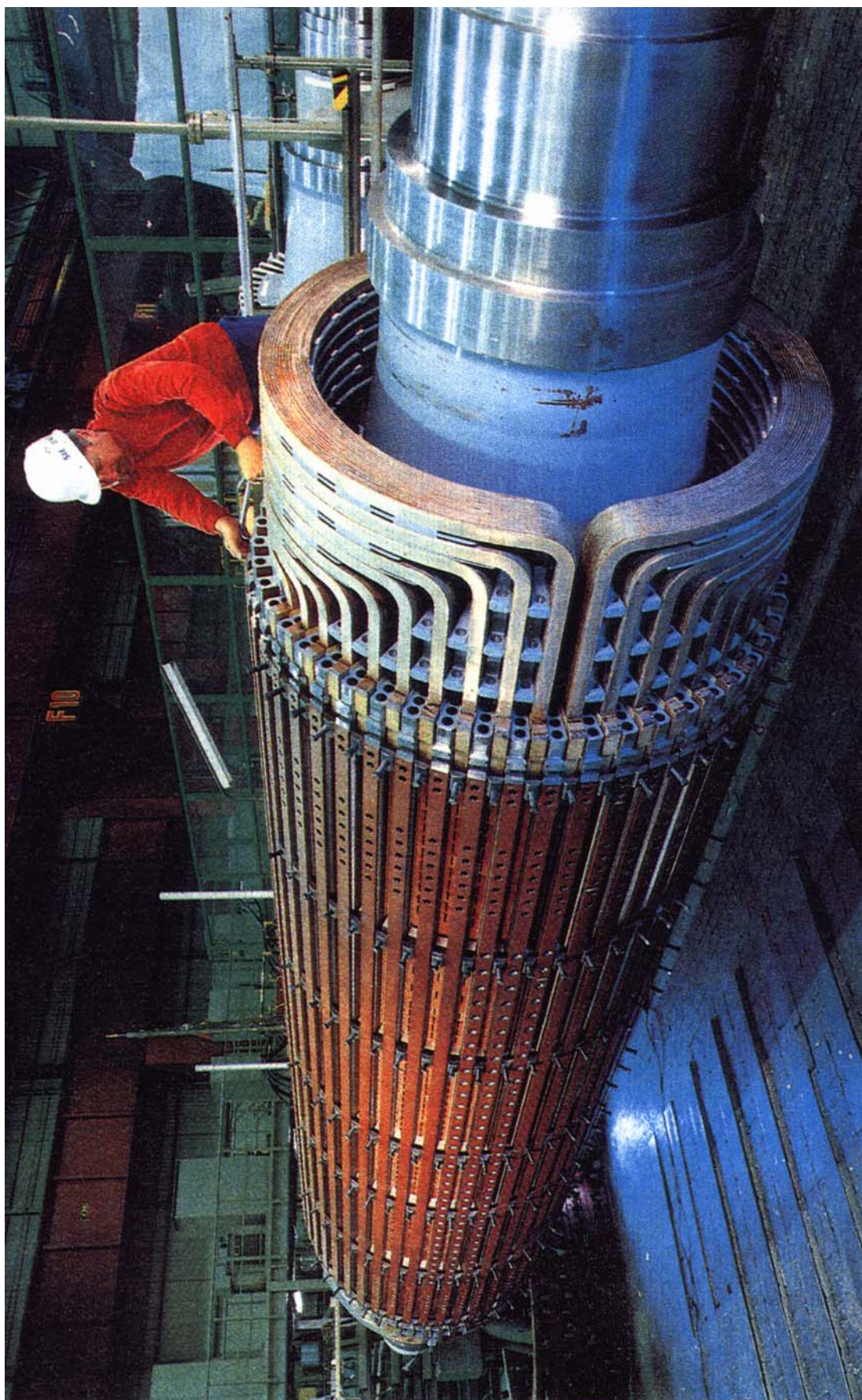


- a, b, c Ankerwicklung
- d, q Ersatzankerwicklungen auf dem Läufer
- D, Q Ersatzdämpferwicklungen
- f Erregerwicklung

Univ. Hannover	Prinzipieller Aufbau eines Synchron- generators und Wicklungschema	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-D/02



Univ. Hannover	Erregersysteme von Synchrongeneratoren	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-D/03



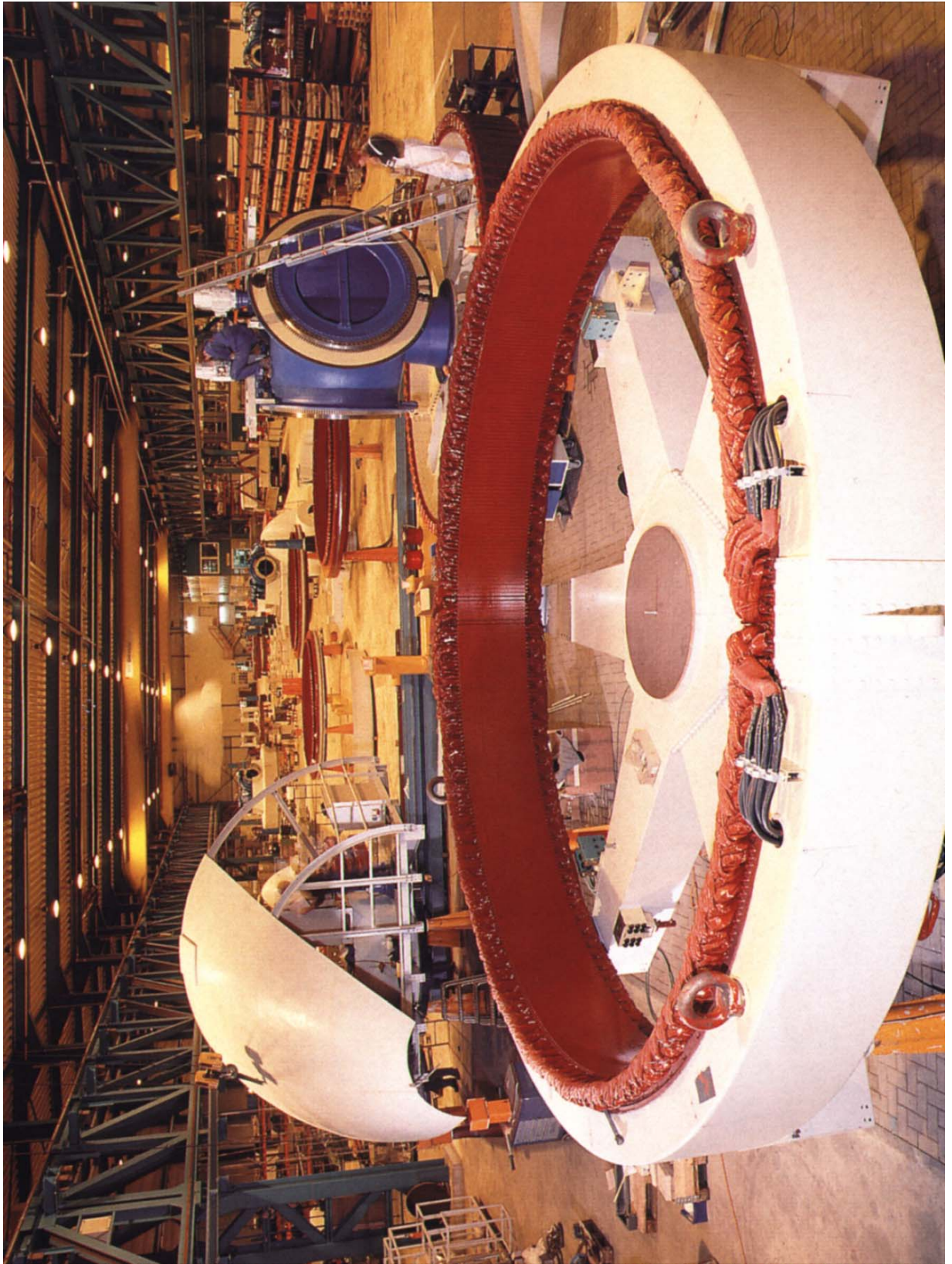
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Läufer eines 2-pol. Turbogenerators
in der Montage

Grdl. der EV

EV-D/04



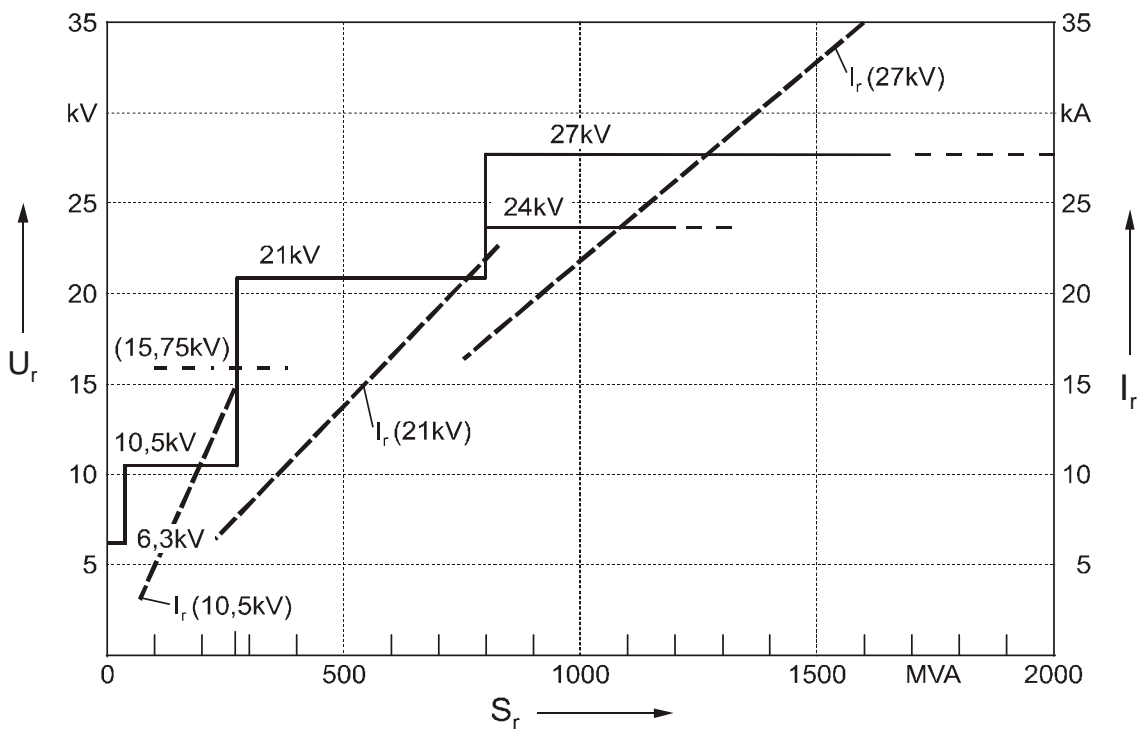
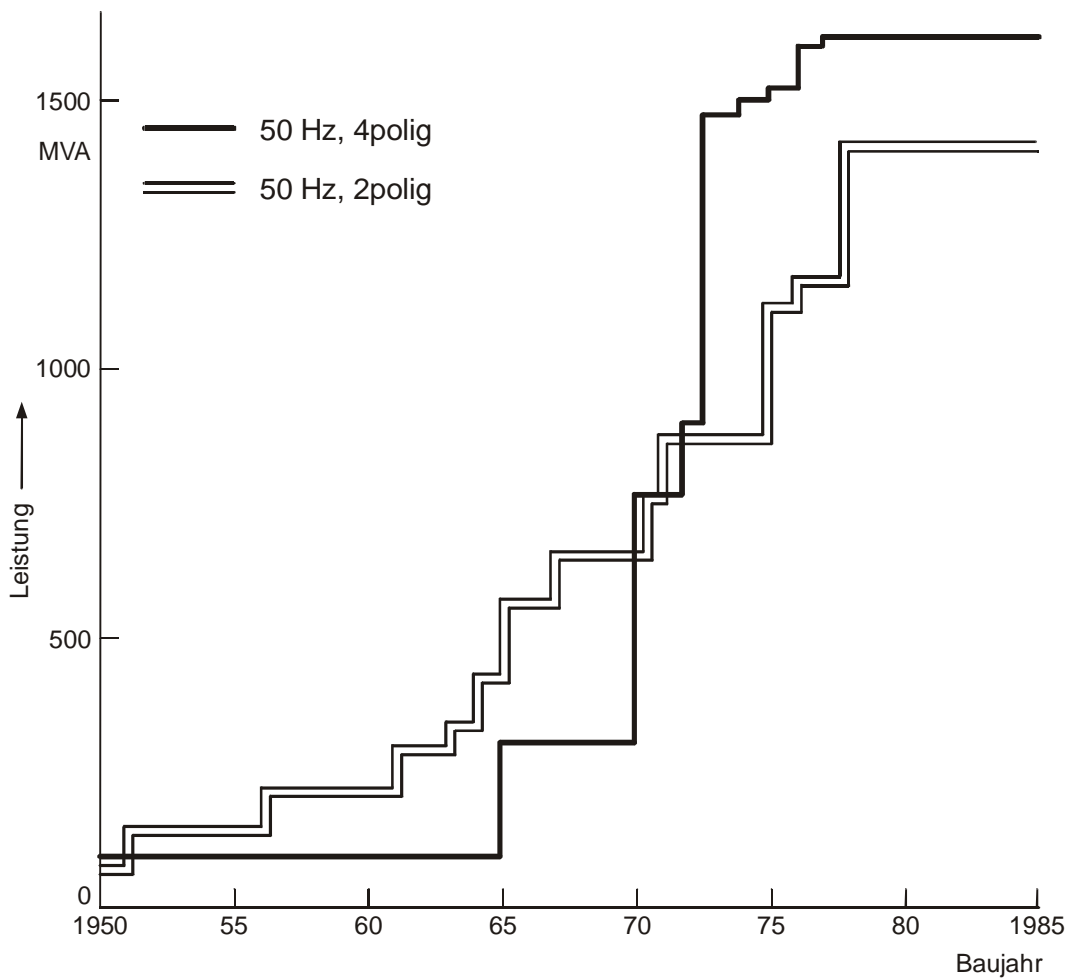
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Ankerwicklung eines getriebelosen
WEA-Generators

Grdl. der EV

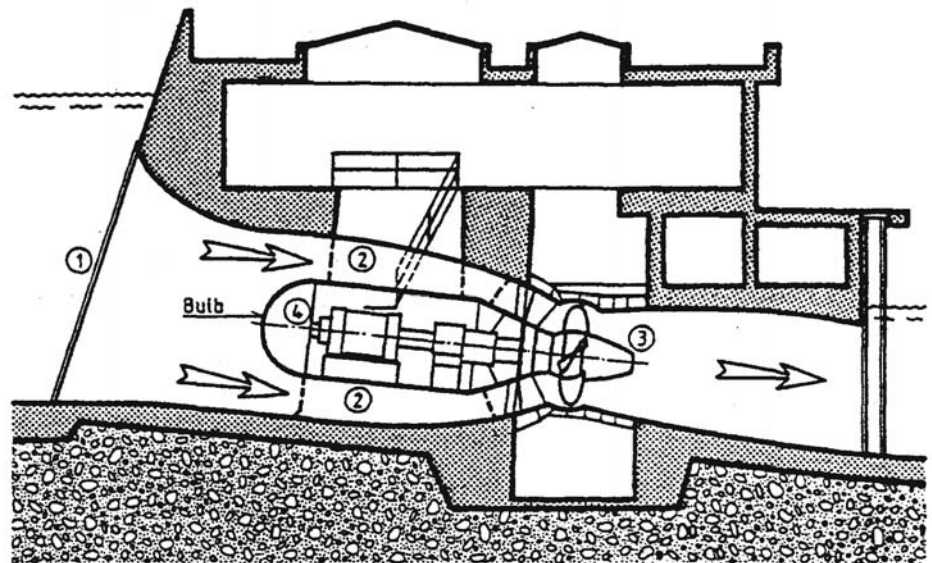
EV-D/05



Univ. Hannover	Blockgröße und Bemessungsgrößen von Turbogeneratoren	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-D/06

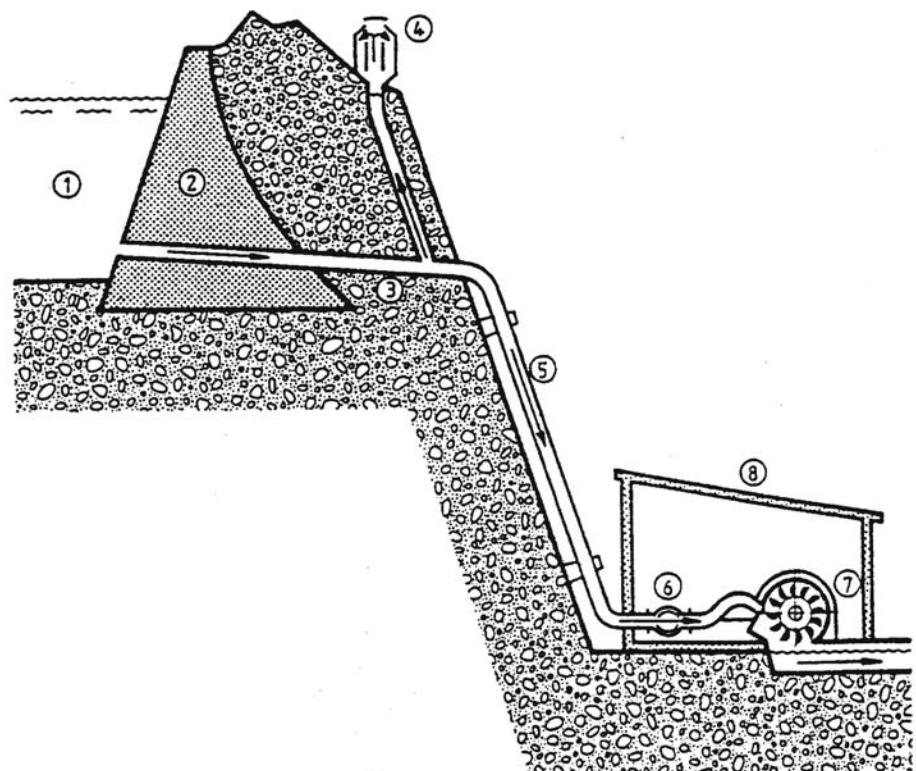
Laufwasser-Kraftwerk mit Rohrturbine

- ① Einlaufrechen
- ② Laufwasserstrom
- ③ Kaplan-Turbine
- ④ Generator



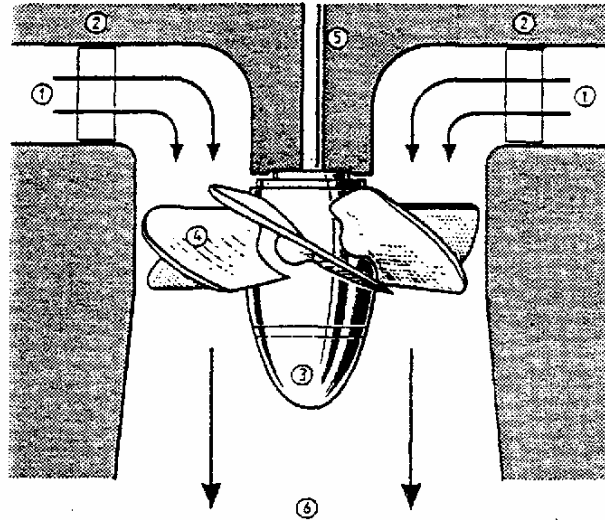
Speicher-Kraftwerk mit Pelton-Turbine

- ① Stausee
- ② Staumauer
- ③ Druckstollen
- ④ Wasserschloß
- ⑤ Druckleitung
- ⑥ Kugelschieber
- ⑦ Pelton-Turbine mit Generator
- ⑧ Maschinenhaus



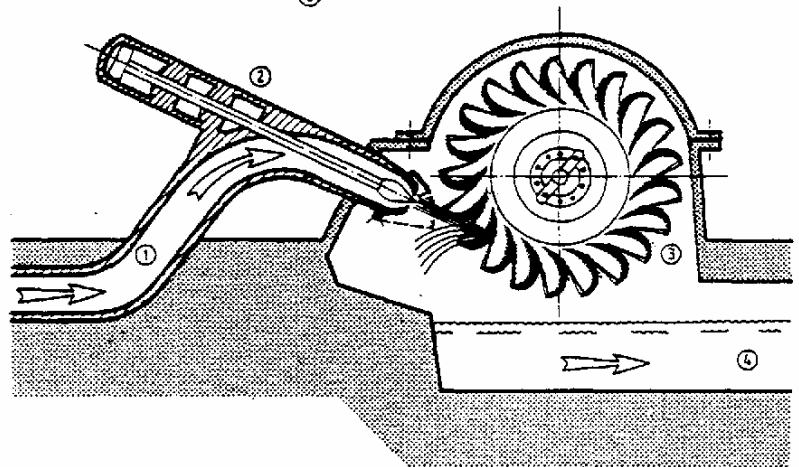
Kaplanturbine

- ① Wasserzufluß
- ② Leitapparat mit verstellbaren Schaufeln
- ③ Laufradnabe
- ④ Laufschaufeln verstellbar
- ⑤ Turbinenwelle
- ⑥ Wasserabfluß



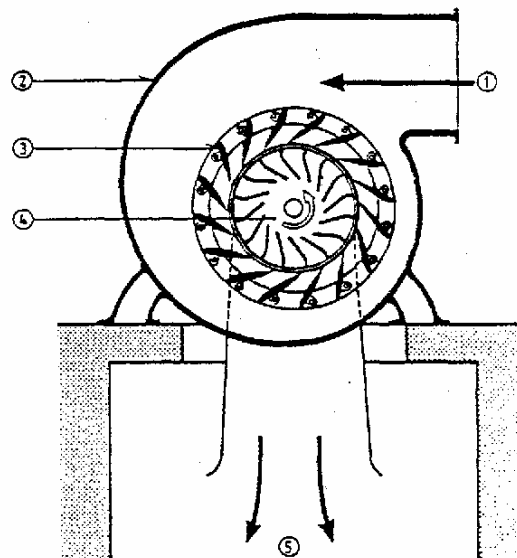
Pelton turbine

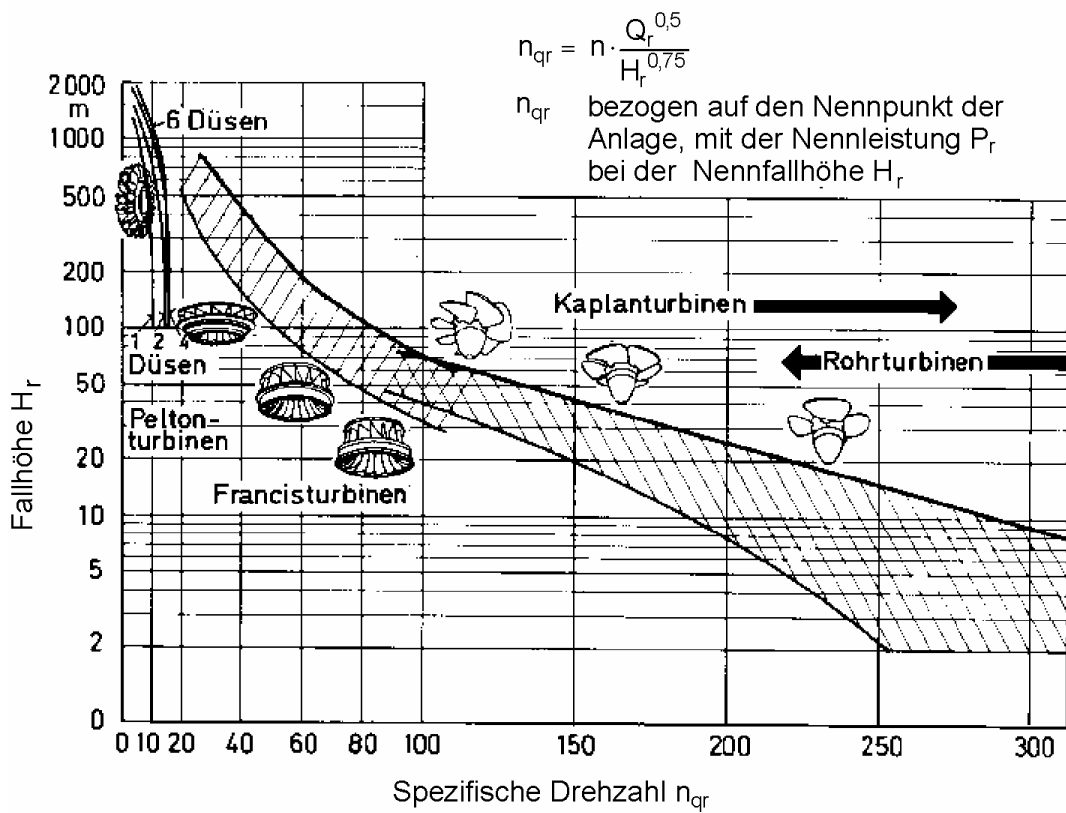
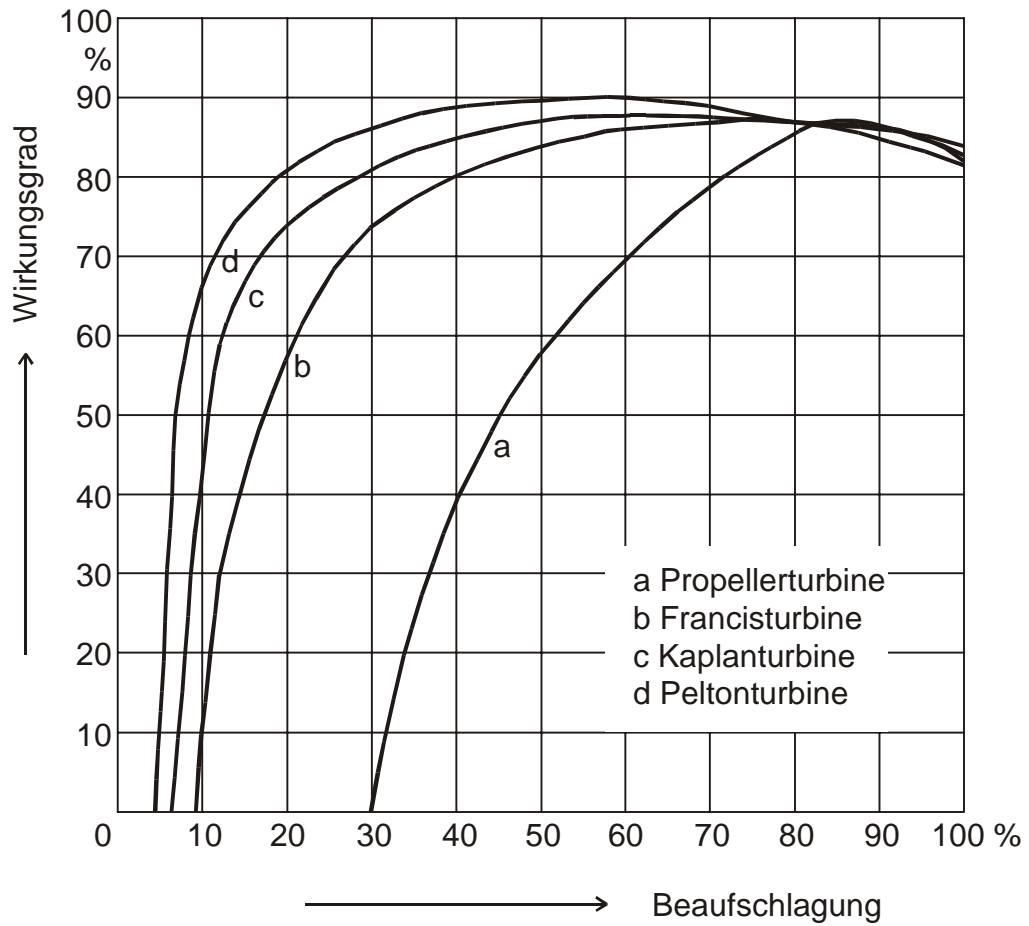
- ① Wasserzufluß
- ② Einlauf
- ③ Laufrad
- ④ Wasserabfluß



Francisturbine

- ① Wasserzufluß
- ② Gehäuse
- ③ Leitrad mit verstellbaren Schaufeln
- ④ Laufrad
- ⑤ Wasserabfluß





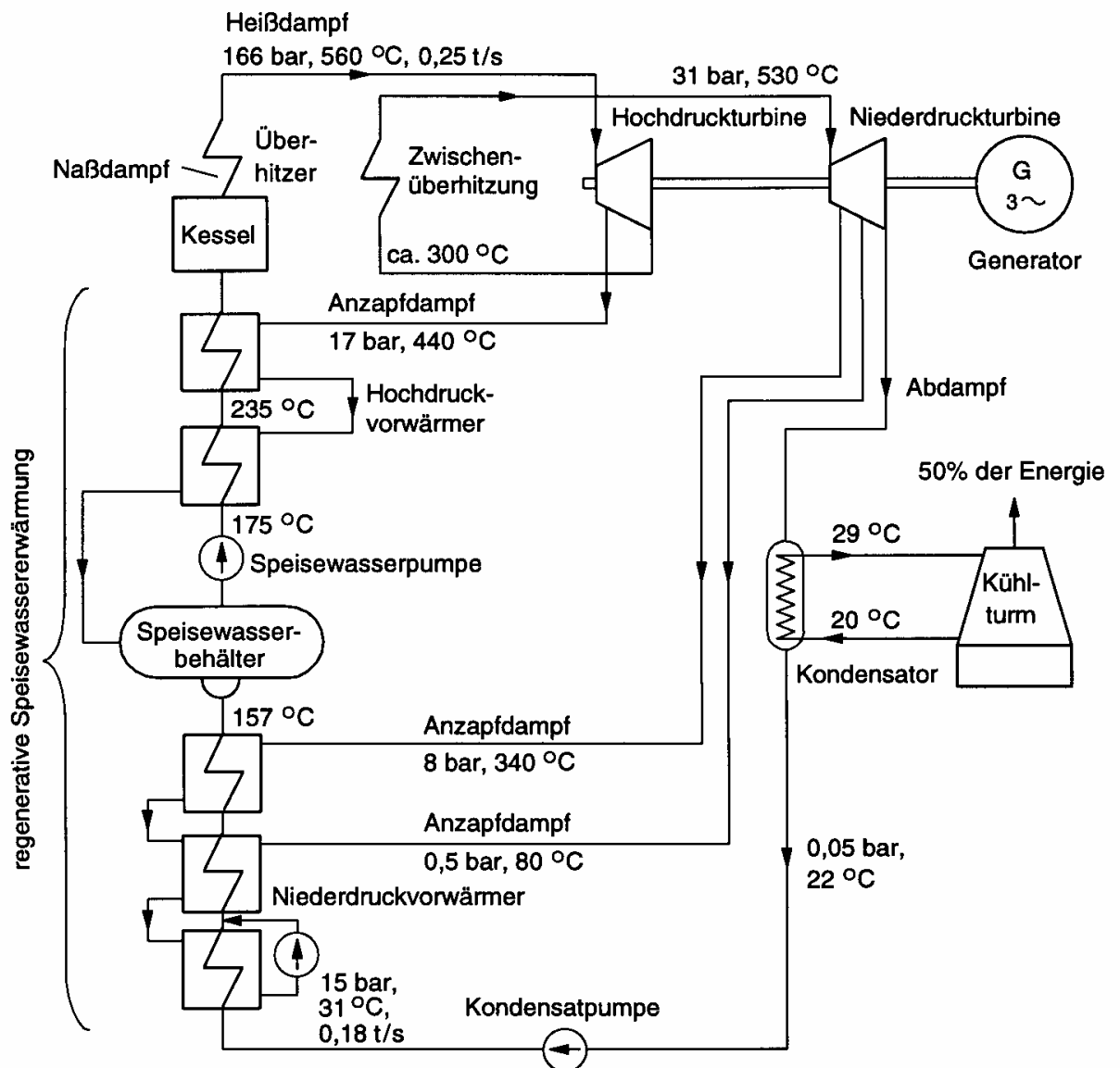
Univ. Hannover

Prof. Oswald

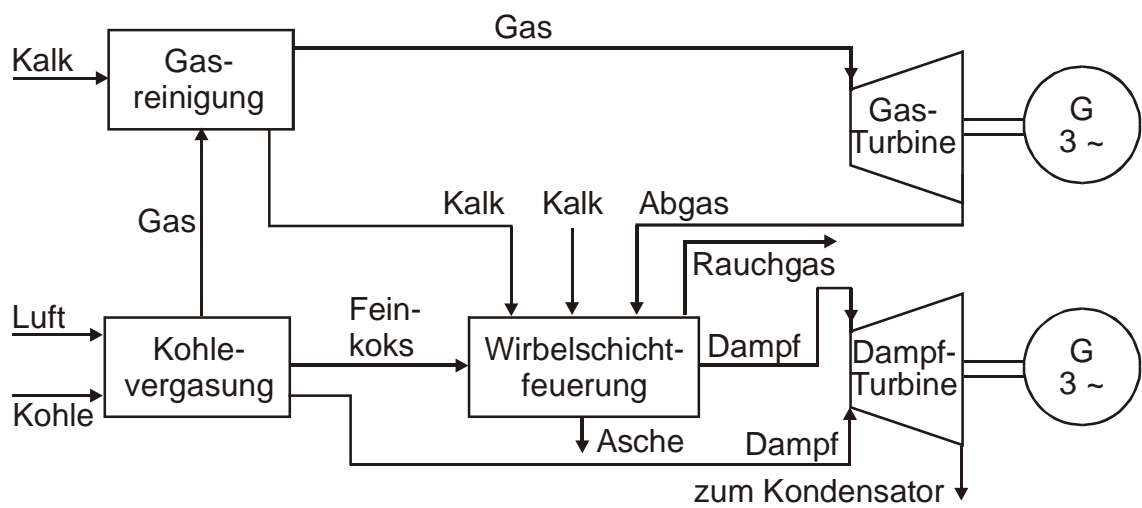
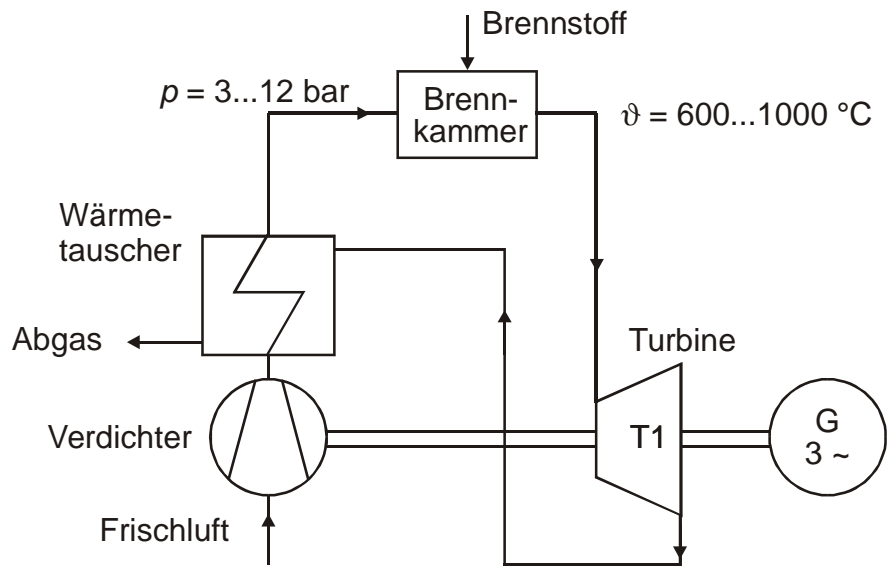
Wirkungsgrad und spezifische Drehzahl von Wasserturbinen

Grdl. der EV

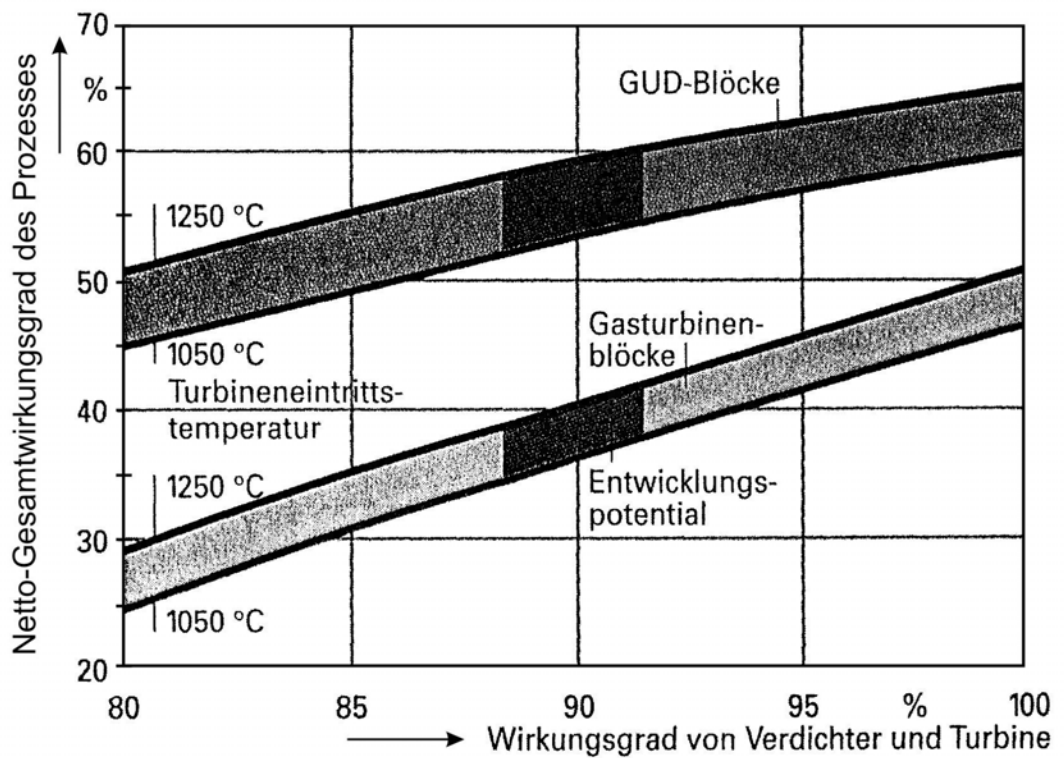
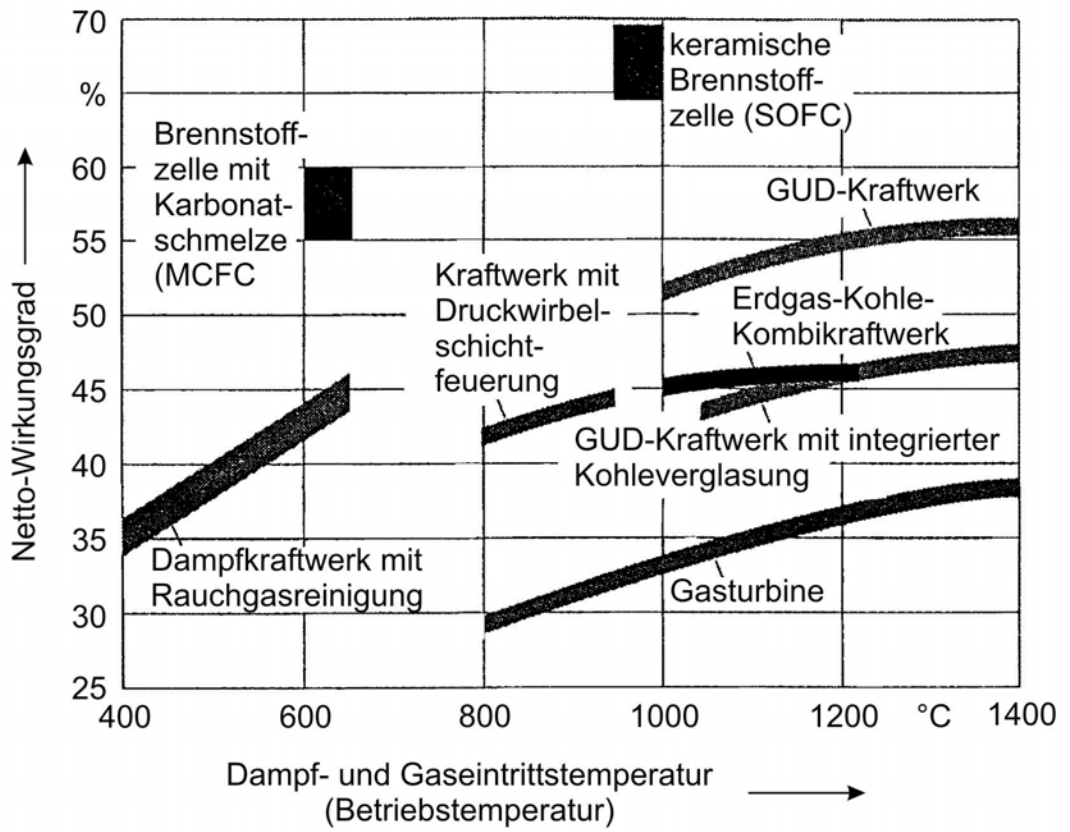
EV-D/09



Univ. Hannover	Wärmeschaltplan eines 300-MW-Kondensationskraftwerkes	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-D/10



Univ. Hannover	Funktionsschema einer Gasturbinen- und GUD-Anlage mit Kohlevergasung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-D/11



Univ. Hannover

Netto-Wirkungsgrade

Grdl. der EV

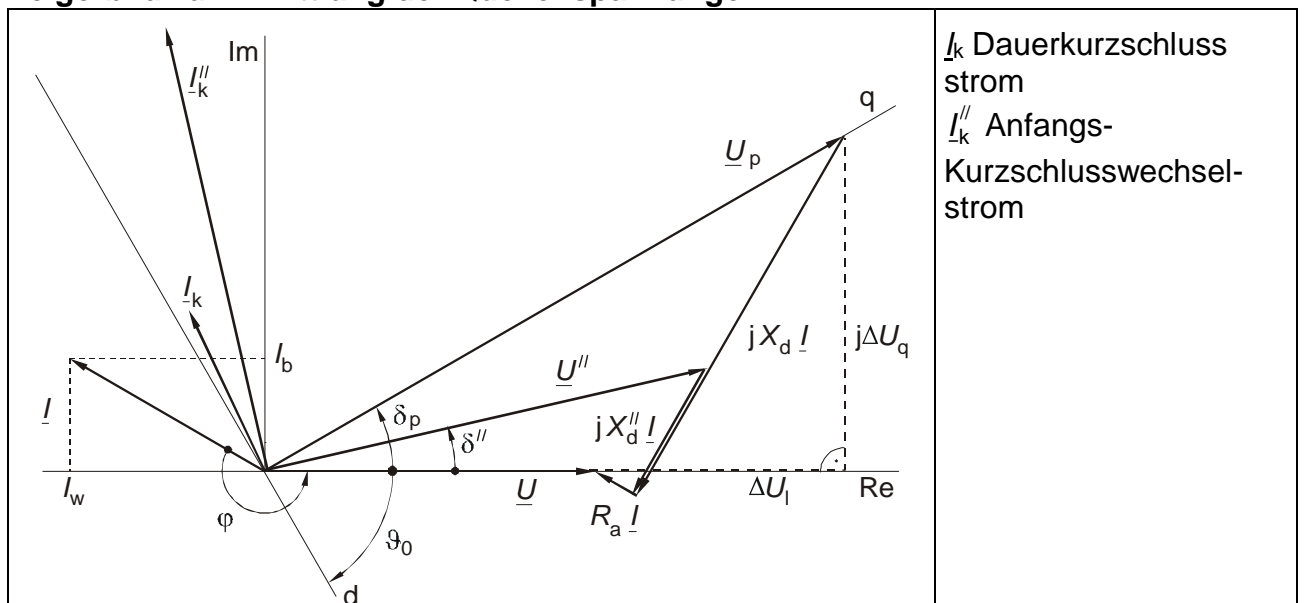
Prof. Oswald

EV-D/12

Generatorersatzschaltungen

	<p>Ersatzschaltung für den stationären Zustand</p> <p>\underline{U}_p Polradspannung R_a Ankerwiderstand X_d synchrone Längsreaktanz</p>
	<p>Ersatzschaltung für den subtransienten Zustand</p> <p>\underline{U}'' Polradspannung X_d'' subtransiente Längsreaktanz</p>

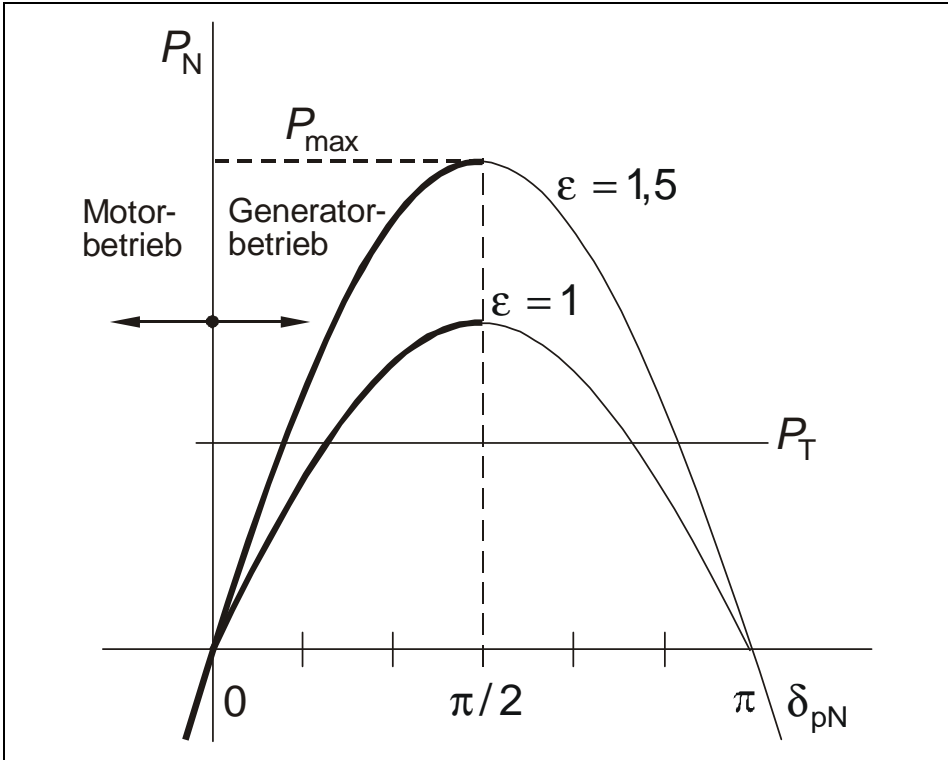
Zeigerbild zur Ermittlung der Quellenspannungen



Größenordnung der Parameter in p.u.

$x_d = 1,0 \dots 2,5$	große Werte für große Maschinen
$x_d'' = 0,1 \dots 0,25 \approx \frac{1}{10} x_d$	große Werte für große Maschinen
$r_a = 0,003 \dots 0,03$	große Werte für kleine Maschinen
$Z_B = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}$	Bezugswert

Univ. Hannover	Generator-Ersatzschaltungen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-D/13



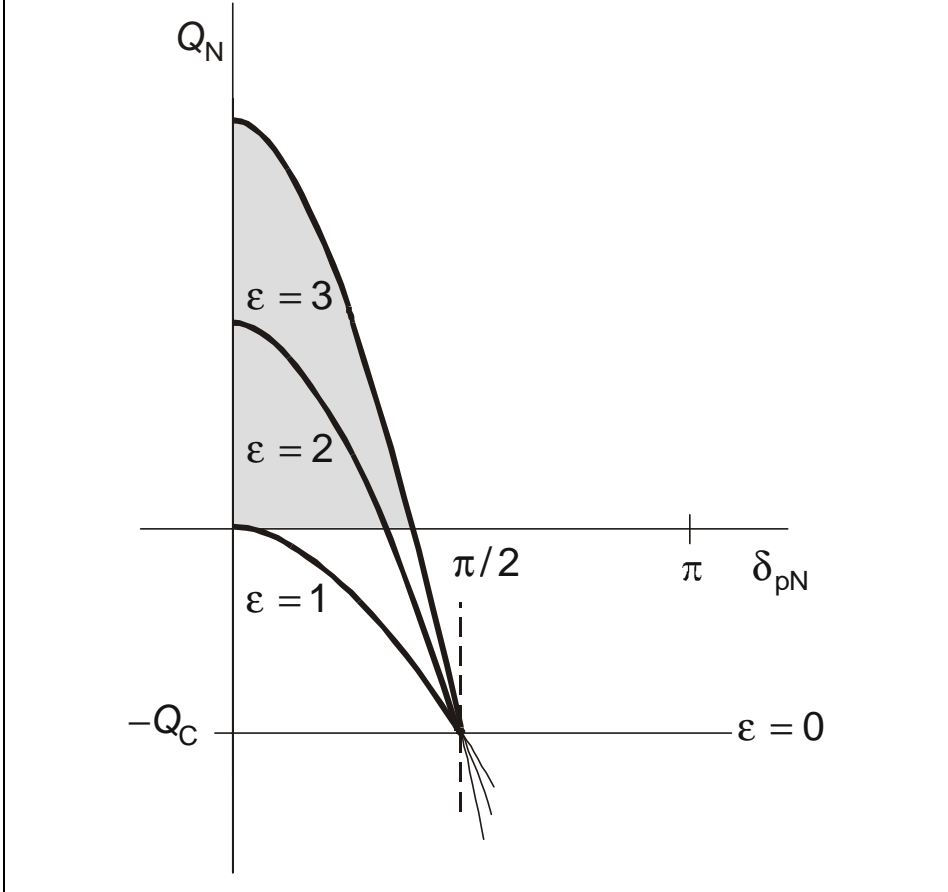
Wirkleistungs-Kennlinie bei Betrieb am starren Netz über eine Vorreaktanz X_N

$$\varepsilon = \frac{U_p}{U_N} \text{ Erregergrad}$$

$$\delta_{pN} = \angle(U_p, U_N)$$

$$P_{\max} = \frac{3U_p U_N}{X_d + X_N}$$

$$= 3 \frac{\varepsilon U_N^2}{X_d + X_N}$$

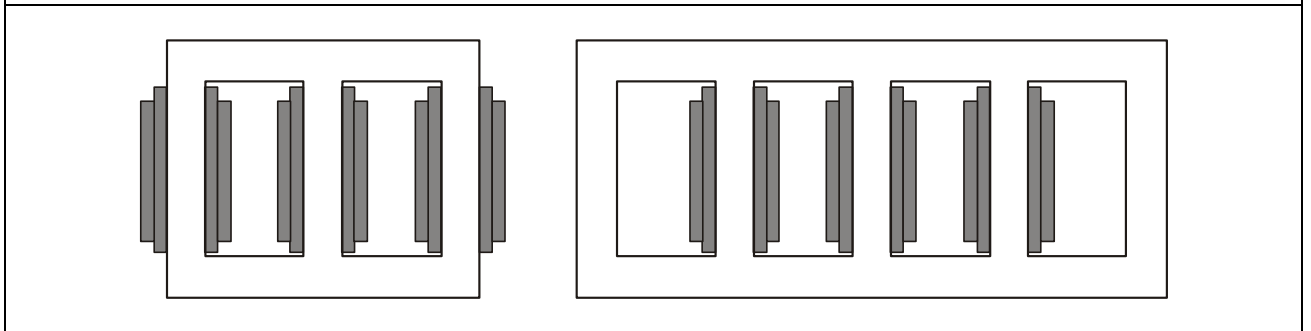
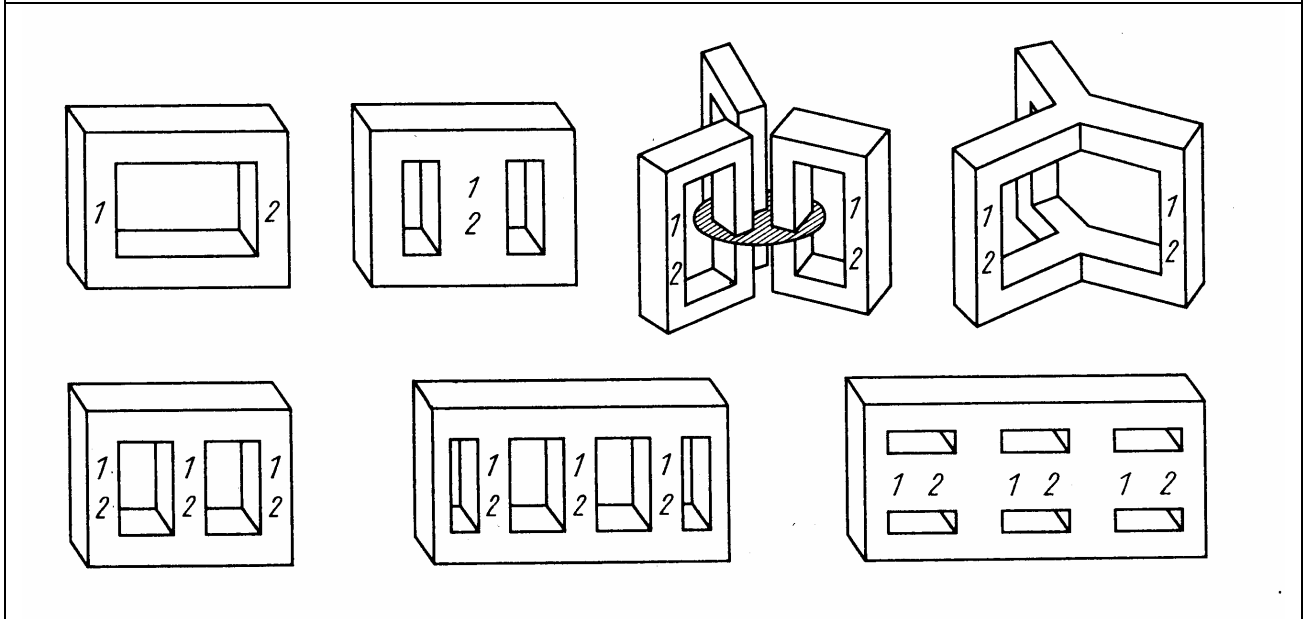
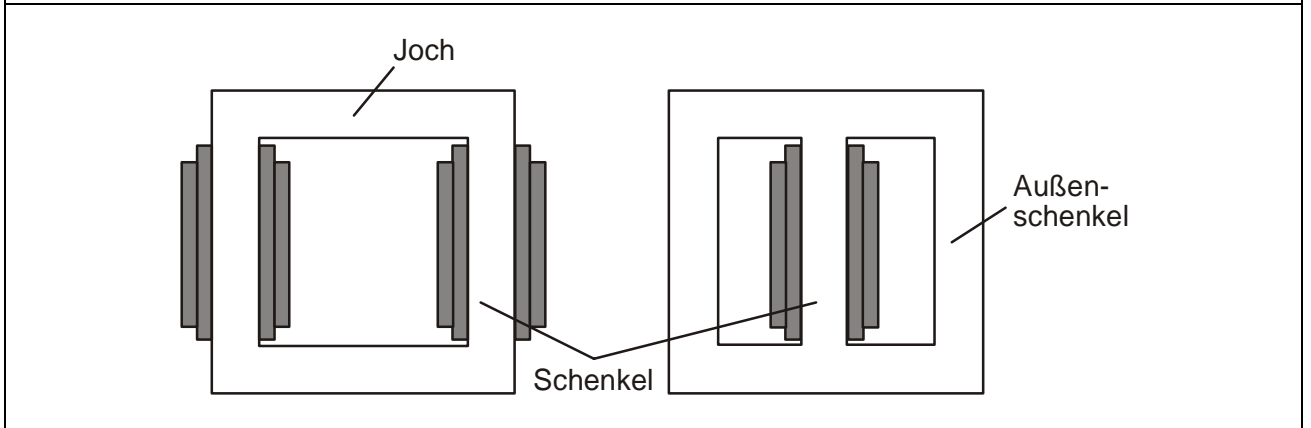
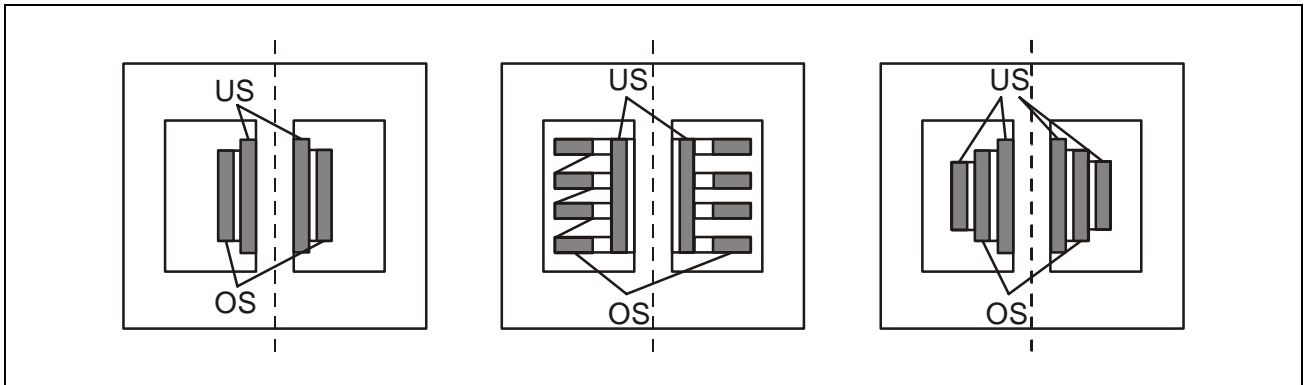
$$= \varepsilon Q_C$$


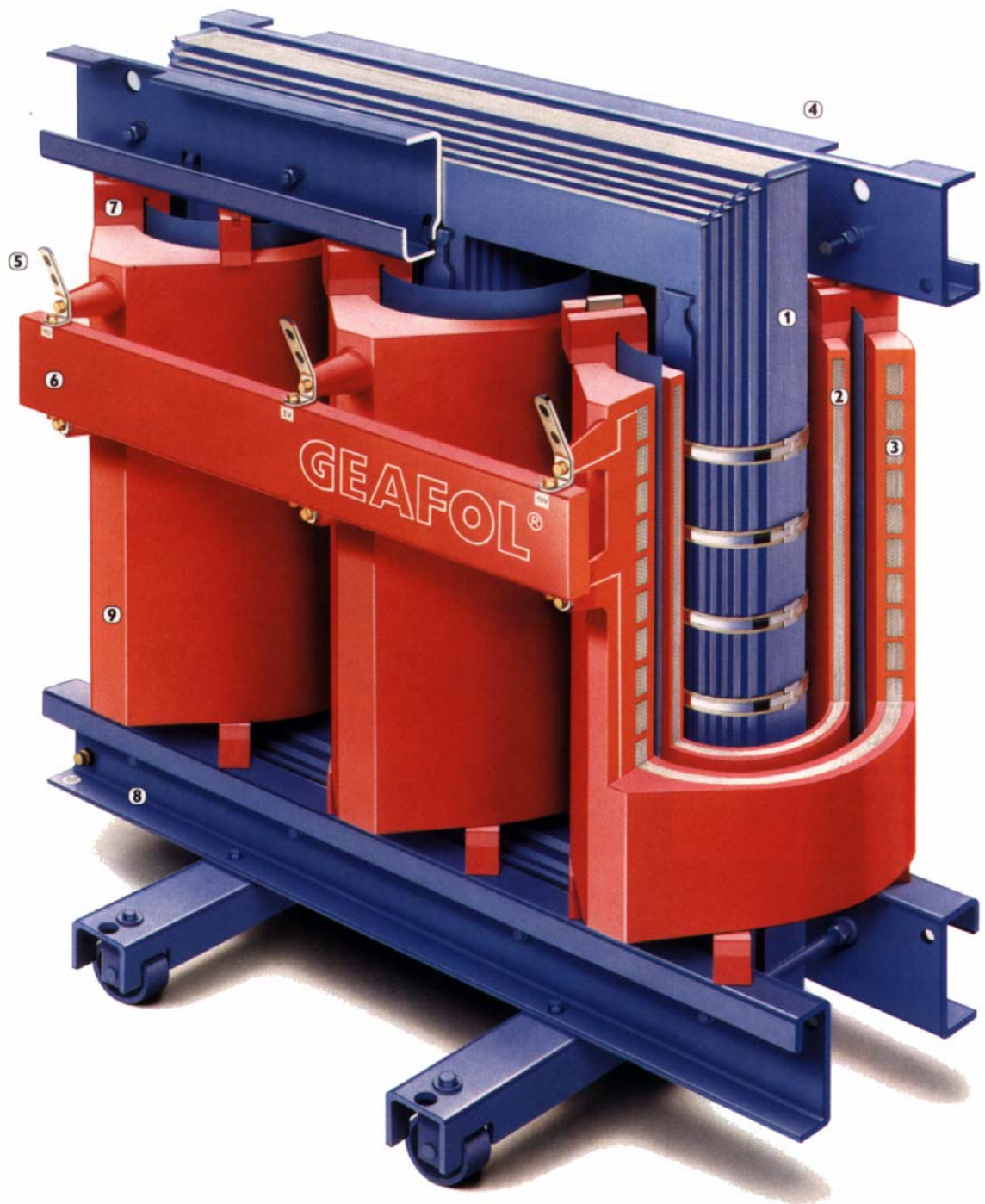
Blindleistungs-Kennlinie bei Betrieb am starren Netz über eine Vorreaktanz X_N

$$Q_C = \frac{3U_N^2}{X_d + X_N}$$

maximale kapazitive Leistung

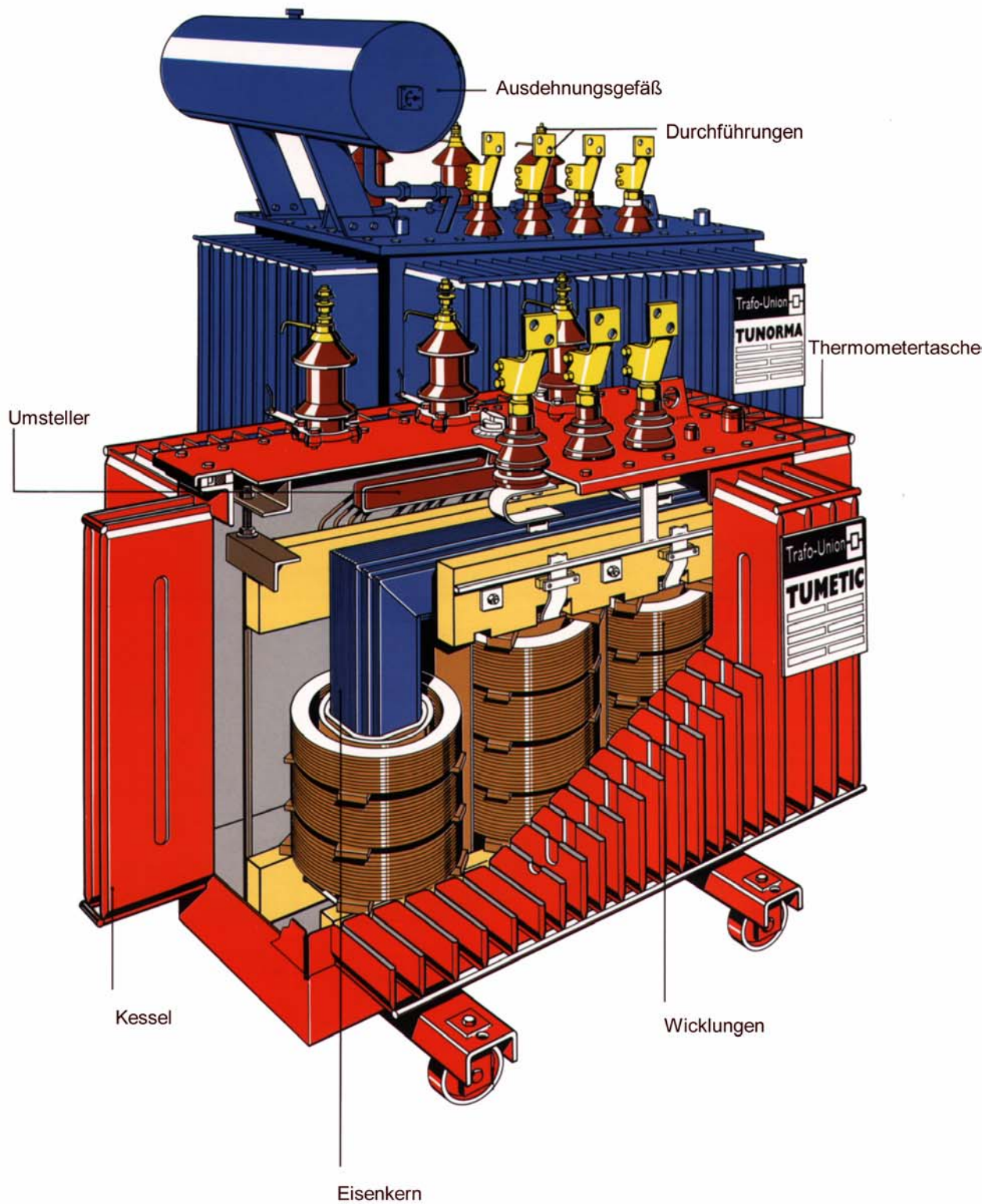
Blindleistungsabgabe





- | | | |
|--------------------|-----------------|------------------------------------------------|
| 1 Dreischenkelkern | 4 US-Anschlüsse | 7 Elastische Distanzstücke |
| 2 US-Wicklung | 5 OS-Anschlüsse | 8 Preßrahmen und Fahrgestell |
| 3 OS-Wicklung | 6 Schaltleiste | 9 Isolierung aus Epoxidharz/Quarzmehl-Mischung |

Univ. Hannover	630-kVA-Gießharztransformator	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-E/02



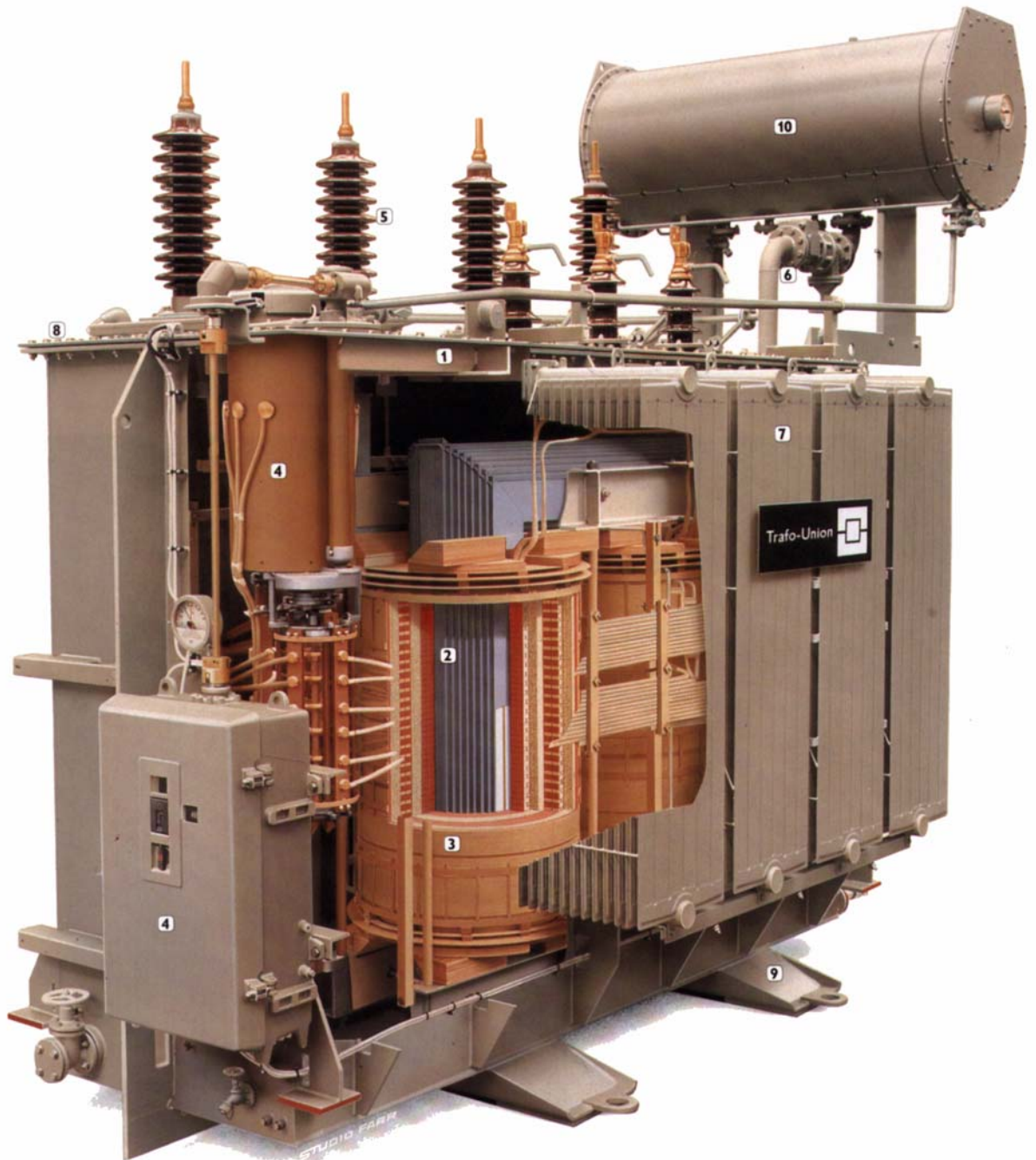
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Öl-Verteilungstransformator

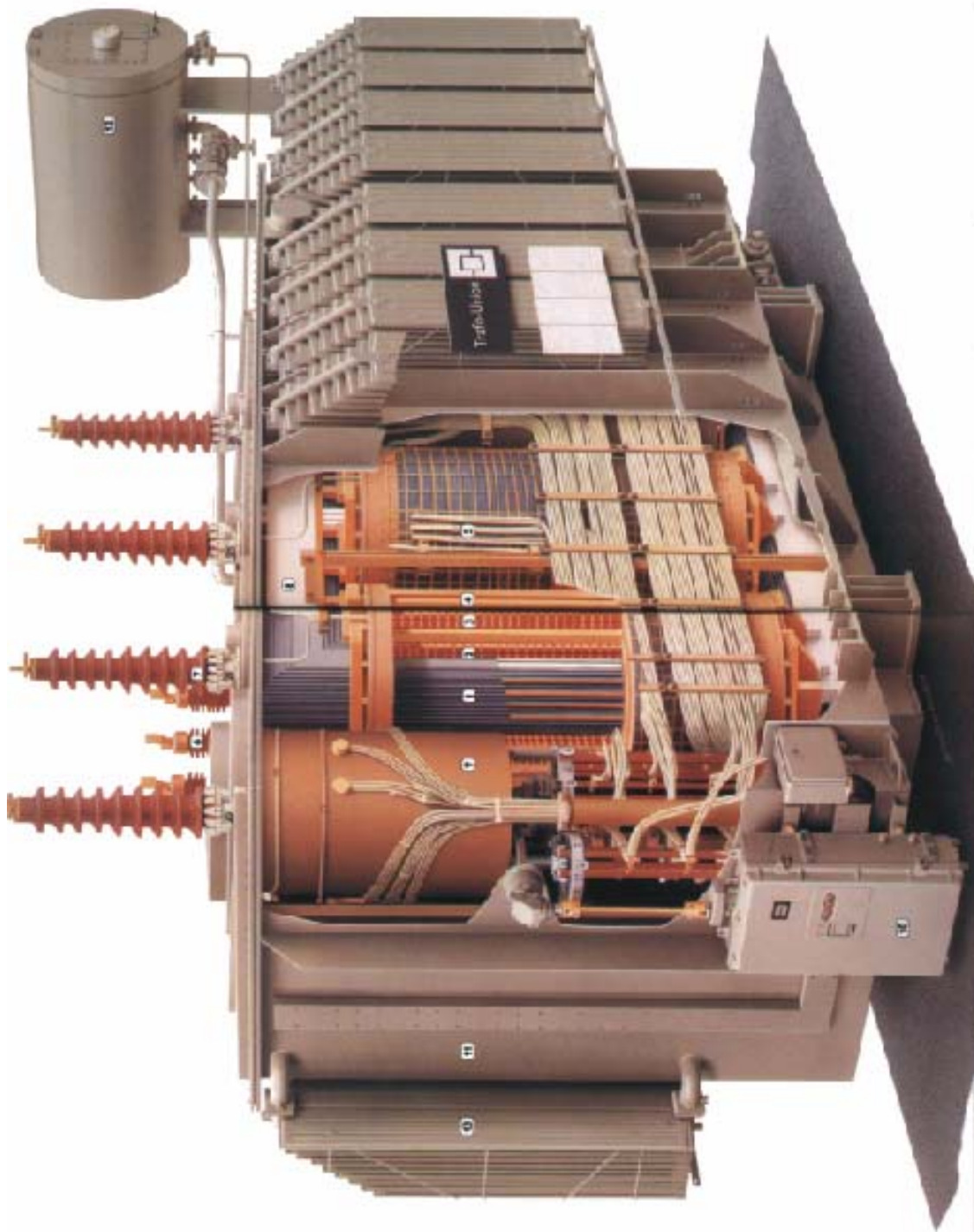
Grdl. der EV

EV-E/03



- | | | |
|-----------------------------------|------------------|---------------------|
| 1 Aktivteil | 5 Durchführungen | 9 Fahrgestell |
| 2 Eisenkern | 6 Buchholzrelais | 10 Ausdehnungsgefäß |
| 3 Wicklungen | 7 Kessel | |
| 4 Stufenschalter für Motorantrieb | 8 Kesseldeckel | |

Univ. Hannover	10-MVA-Leistungstransformator	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-E/04



- 1 Dreischenkeln
- 2 US-Wicklung
- 3 OS-Wicklung
- 4 Stufenwicklung
- 5 Leitungsführung
- 6 US-Durchführungen
- 7 OS-Durchführungen
- 8 P reißrahmen
- 9 Stufenschalter
- 10 Motorantrieb
- 11 Kessel
- 12 Ausdehnungsgefäß
- 13 Radiatoren

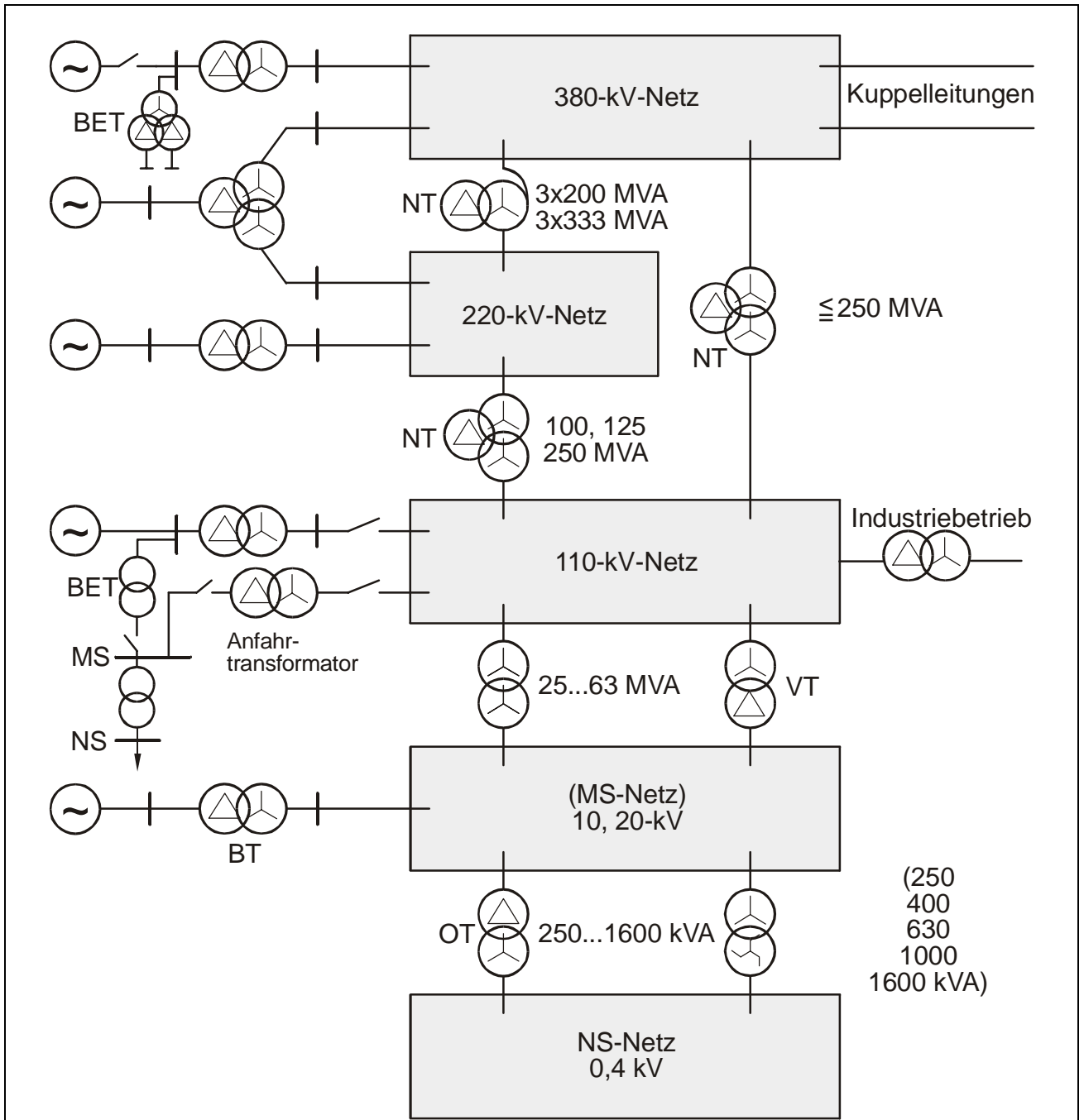
Univ. Hannover	40-MVA-Netztransformator 110 ± 16% / 21 kV	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-E/05

Schaltgruppe = {Kennbuchstabe OS} {Kennbuchstabe US} {Kennzahl k}

Kennzahl	Schaltgruppe	Zeigerbild		Schaltungsbild	
		OS	US	OS	US
0	D d 0				
	Y y 0				
	D z 0				
5	D y 5				
	Y d 5				
	Y z 5				
6	D d 6				
	Y y 6				
	D z 6				
11	D y 11				
	Y d 11				
	Y z 11				

Schaltung	Δ			offen
OS-Wicklung	D	Y	Z	III
US-Wicklung	d	y	z	iii

Univ. Hannover	Schaltgruppen nach DIN VDE 0532	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-E/06



BT	Block- oder Maschinentransformatoren	Yd5
BET	Blockeigenbedarfstransformatoren	Ydd
NT	Netzkuppeltransformatoren	Yy0
VT	Verteiltransformatoren	Yy0, Yd5
OT	Ortsnetztransformatoren	Dy5, Yz5

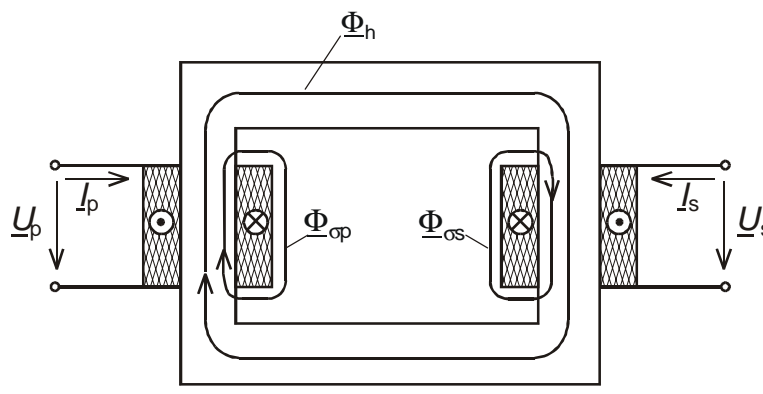
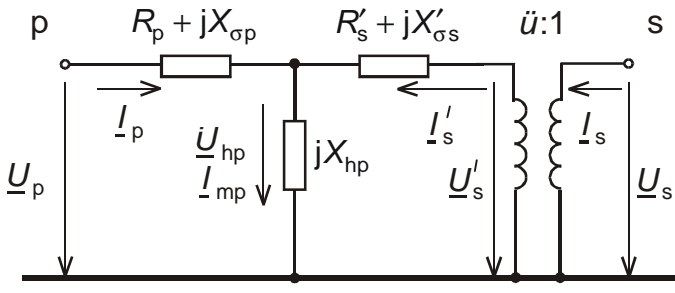
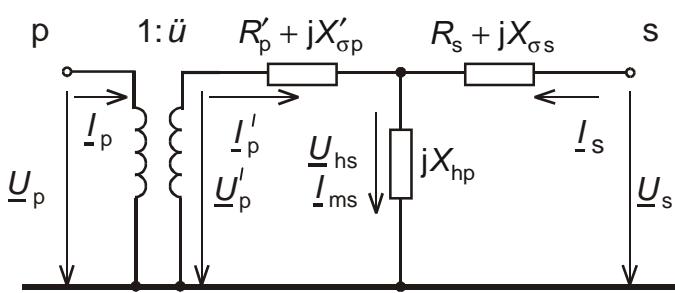
Univ. Hannover

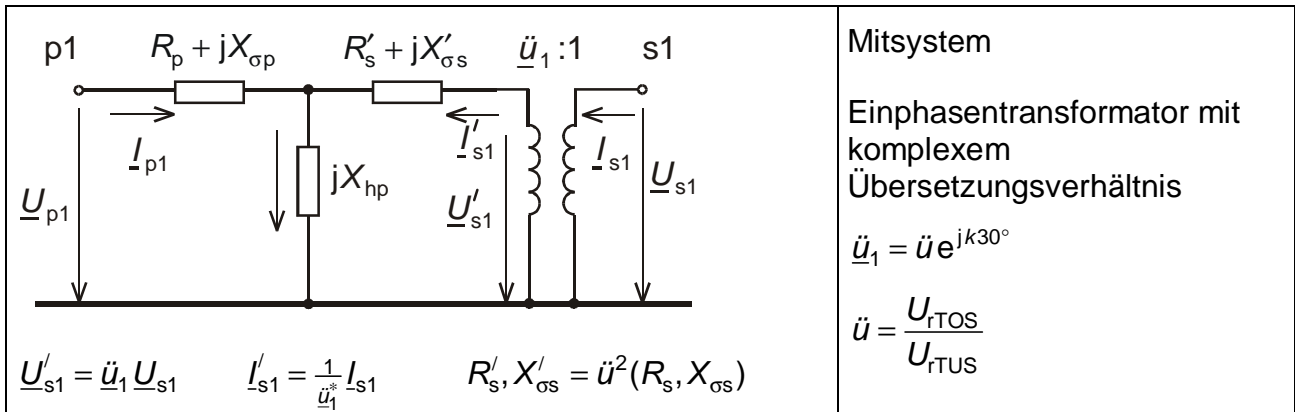
Prof. Oswald

Einsatz der Transformatoren in
Elektroenergieversorgungsnetzen

Grdl. der EV

EV-E/07

	Wicklungsanordnung
$\underline{U}_p = (R_p + jX_{\sigma p}) I_p + \underline{U}_{hp}$ $\underline{U}_s = (R_s + jX_{\sigma s}) I_s + \underline{U}_{hs}$	Spannungsgleichungen
$\underline{U}_{hp} = j\omega w_p \Phi_h = j\omega w_p \frac{w_p I_p + w_s I_s}{R_{mh}} = j\omega \frac{w_p^2}{R_{mh}} (I_p + \frac{w_s}{w_p} I_s) = jX_{hp} I_{mp}$ $\underline{U}_{hs} = j\omega w_s \Phi_h = j\omega w_s \frac{w_p I_p + w_s I_s}{R_{mh}} = j\omega \frac{w_s^2}{R_{mh}} (\frac{w_p}{w_s} I_p + I_s) = jX_{hs} I_{ms}$	Hauptfeldspannungen und Magnetisierungsströme
$\frac{w_s}{w_p} \underline{U}_p = \frac{w_s^2}{w_p^2} (R_p + jX_{\sigma p}) \frac{w_p}{w_s} I_p + \frac{w_s}{w_p} \underline{U}_{hp}$ $\underline{U}'_p = (R'_p + jX'_{\sigma p}) I'_p + \underline{U}'_{hp}; \quad \underline{U}'_{hp} = \underline{U}_{hs}$	Primärgrößen auf Sekundärseite umgerechnet
$\frac{w_p}{w_s} \underline{U}_s = \frac{w_p^2}{w_s^2} (R_s + jX_{\sigma s}) \frac{w_s}{w_p} I_s + \frac{w_p}{w_s} \underline{U}_{hs}$ $\underline{U}'_s = (R'_s + jX'_{\sigma s}) I'_s + \underline{U}'_{hs}; \quad \underline{U}'_{hs} = \underline{U}_{hp}$	Sekundärgrößen auf Primärseite umgerechnet
	Ersatzschaltung mit auf die Sekundärseite umgerechneten Primärgrößen $\ddot{u} = \frac{w_p}{w_s}$
	Ersatzschaltung mit auf die Primärseite umgerechneten Sekundärgrößen

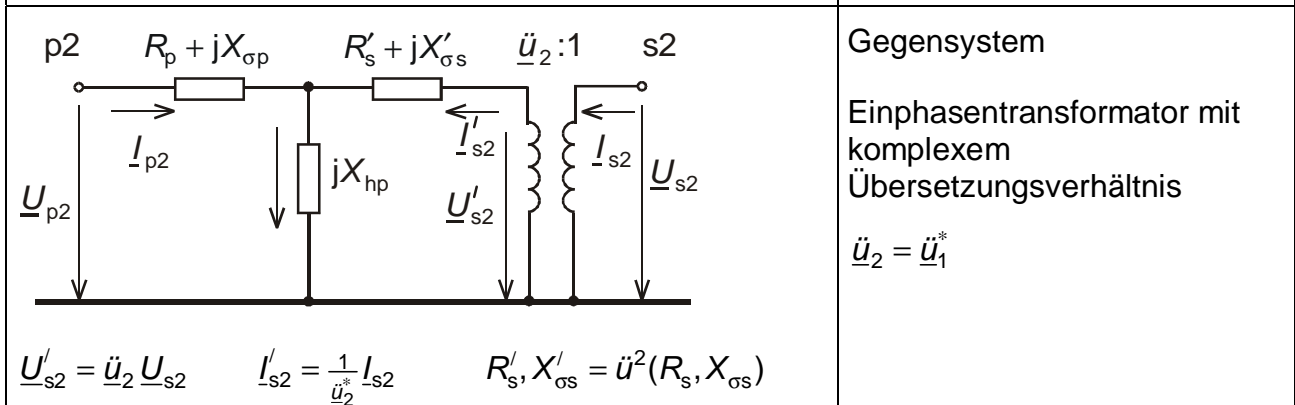


Mitsystem

Einphasentransformator mit komplexem Übersetzungsverhältnis

$$\underline{\ddot{u}}_1 = \underline{\ddot{u}} e^{jk30^\circ}$$

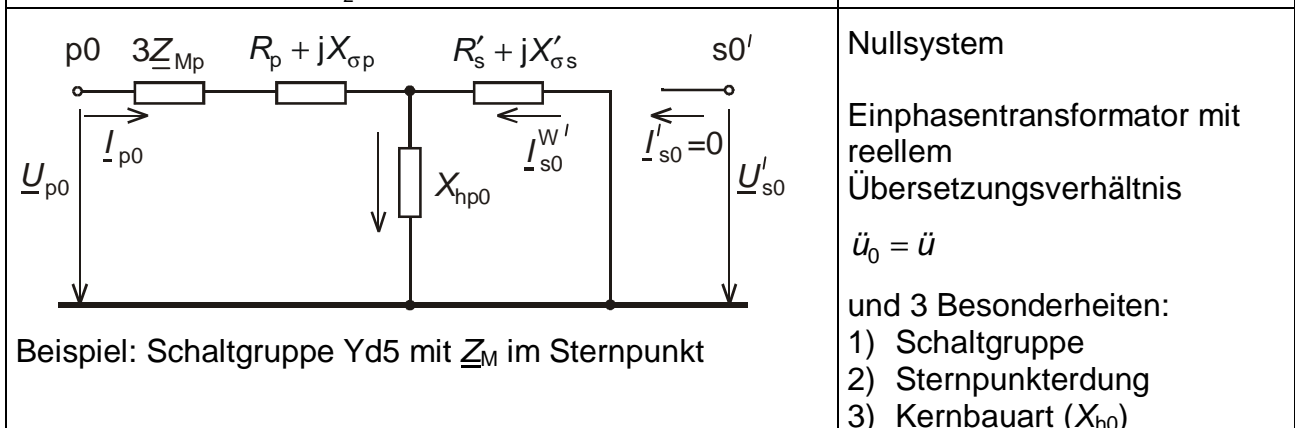
$$\underline{\ddot{u}} = \frac{U_{rTOS}}{U_{rTUS}}$$



Gegensystem

Einphasentransformator mit komplexem Übersetzungsverhältnis

$$\underline{\ddot{u}}_2 = \underline{\ddot{u}}^*$$



Nullsystem

Einphasentransformator mit reellem Übersetzungsverhältnis

$$\underline{\ddot{u}}_0 = \underline{\ddot{u}}$$

und 3 Besonderheiten:

- 1) Schaltgruppe
- 2) Sternpunktterdung
- 3) Kernbauart (X_{h0})

Parameter

$$u_k = z_T = \frac{Z_{TOS}}{U_{rTOS}^2 / S_{rT}} = \frac{Z_{TUS}}{U_{rTUS}^2 / S_{rT}}$$

$$Z_{TOS} = \sqrt{(R_p + R'_s)^2 + (X_{\sigma p} + X'_{\sigma s})^2} = z_T \frac{U_{rTOS}^2}{S_{rT}} = \underline{\ddot{u}}^2 Z_{TUS}$$

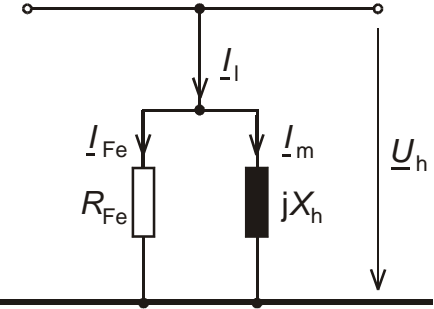
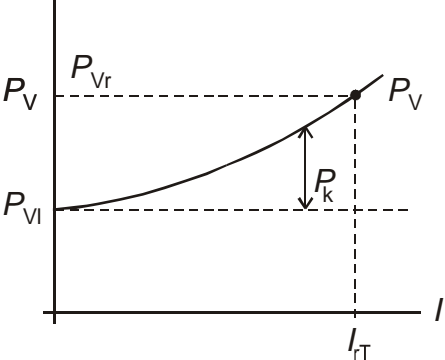
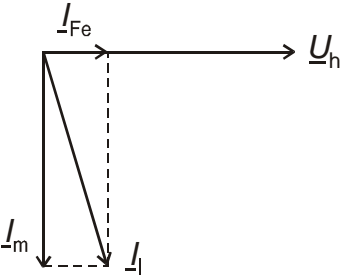
$$Z_{TUS} = \sqrt{(R'_p + R_s)^2 + (X'_{\sigma p} + X_{\sigma s})^2} = z_T \frac{U_{rTUS}^2}{S_{rT}} = \frac{1}{\underline{\ddot{u}}^2} Z_{TOS}$$

$$R_{rTOS} = \frac{P_{kr}}{3 I_{rTOS}^2} = \frac{P_{kr}}{S_{rT}} \frac{U_{rTOS}^2}{S_{rT}} = r_T \frac{U_{rTOS}^2}{S_{rT}} = \underline{\ddot{u}}^2 R_{rTUS}$$

$$R_{rTUS} = \frac{P_{kr}}{3 I_{rTUS}^2} = \frac{P_{kr}}{S_{rT}} \frac{U_{rTUS}^2}{S_{rT}} = r_T \frac{U_{rTUS}^2}{S_{rT}} = \frac{1}{\underline{\ddot{u}}^2} R_{rTOS}$$

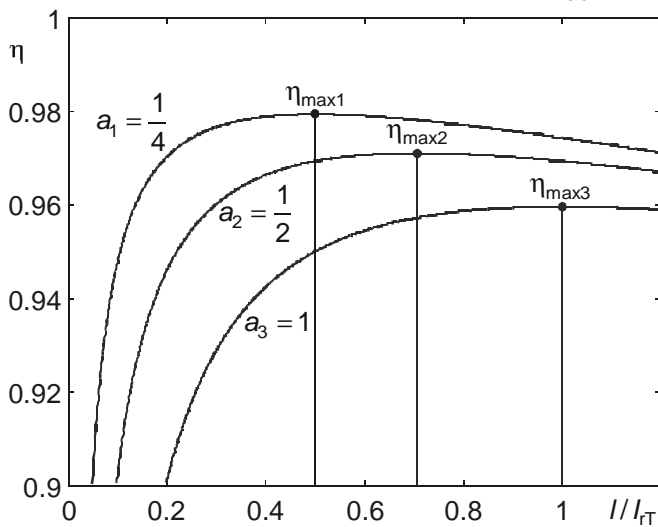
$x_T = 0,04 \dots 0,12 \rightarrow S_{rT} \uparrow$
 $r_T = 0,01 \dots 0,002 \rightarrow S_{rT} \uparrow$

Univ. Hannover	Ersatzschaltungen der Drehstromtransformatoren	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-E/09

<p style="text-align: center;">Verluste</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Eisenverluste Leerlaufverluste (spannungsabhängig)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Wicklungsverluste Kurzschlussverluste (stromabhängig)</p> </div> </div>	<p>Einteilung der Verluste in Leerlauf- und Kurzschlussverluste</p>
$P_k = 3R_T I^2 = 3R_T I_{rT}^2 \left(\frac{I}{I_{rT}}\right)^2 = P_{kr} \left(\frac{I}{I_{rT}}\right)^2 \sim I^2$	<p>Wicklungs- oder Kupfer- oder Kurzschlussverluste (k)</p>
<p>Wirbelstrom und Hystereseverluste. Interpretation durch Eisenverlustwiderstand parallel zu Hauptfeldreaktanz in der Ersatzschaltung:</p>  $P_l = 3 \frac{U_h^2}{R_{Fe}} = \frac{U_{rT}^2}{R_{Fe}} \left(\frac{\sqrt{3}U_h}{U_{rT}}\right)^2 = P_{lr} \left(\frac{\sqrt{3}U_h}{U_{rT}}\right)^2 \sim U^2$	<p>Eisen- oder Leerlaufverluste (l)</p> <p>Praktisch ist:</p> $P_l = P_{lr} = \frac{U_{rT}^2}{R_{Fe}}$
$P_V = P_{lr} + P_k = P_{lr} + P_{kr} \left(\frac{I}{I_{rT}}\right)^2 = P_{kr} \left[\frac{P_{lr}}{P_{kr}} + \left(\frac{I}{I_{rT}}\right)^2\right] = P_{kr} \left[a + \left(\frac{I}{I_{rT}}\right)^2\right]$ 	<p>Gesamtverluste</p> $a = \frac{P_{lr}}{P_{kr}} \text{ Verlustverhältnis}$
 $I_l = I_{Fe} + I_m \approx I_m$	<p>Leerlaufstrom und Magnetisierungsstrom</p> $i_m = \frac{I_m}{I_{rT}} = \frac{1}{x_h} = 3 \dots 1\% \rightarrow S_{rT} \uparrow$

<p>Univ. Hannover</p>	<p>Verluste und Leerlaufstrom von Drehstromtransformatoren</p>	<p>Grdl. der EV</p>
<p>Prof. Oswald</p>		<p>EV-E/10</p>

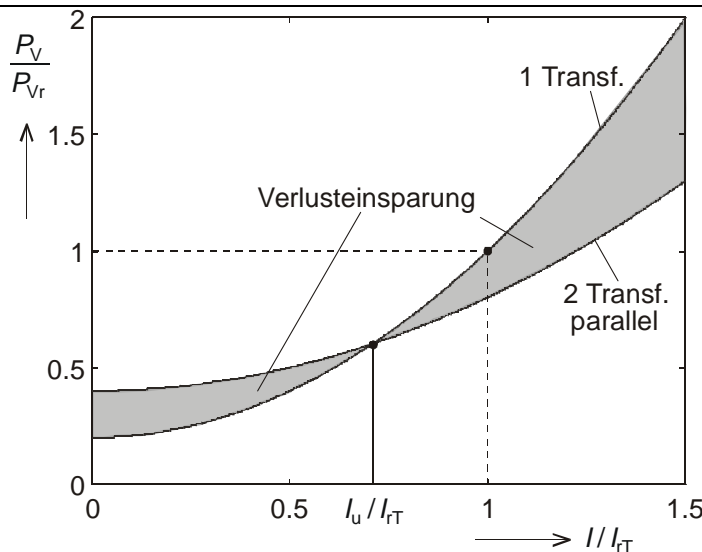
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_V} = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_{kr} \left[a + \left(\frac{I}{I_{rT}} \right)^2 \right]} = \frac{1}{1 + \frac{P_{kr}}{P_{ab}} \left[a + \left(\frac{I}{I_{rT}} \right)^2 \right]} = f(a, I)$$



Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verlustverhältnis und der Belastung

- 1) gleiche Schaltgruppe
- 2) gleiche Übersetzungsverhältnisse
- 3) annähernd gleiche Kurzschlussspannungen
- 4) Verhältnis der Bemessungsleistungen nicht größer als 3:1 (Lastaufteilung)

Bedingungen zum Parallelschalten von Transformatoren

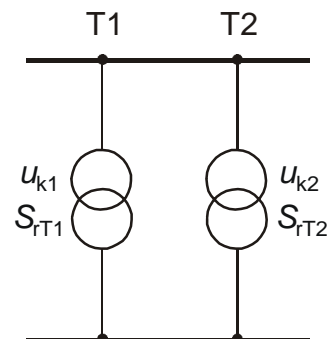


$$P_{V1} = P_{lr} + P_{kr} \left(\frac{I}{I_{rT}} \right)^2$$

$$P_{V2} = 2P_{lr} + 2P_{kr} \left(\frac{I_{ges}}{2I_{rT}} \right)^2$$

$$I_u = I_{rT} \sqrt{2 \frac{P_{lr}}{P_{kr}}} = I_{rT} \sqrt{2a} \quad \text{bei } P_{V1} = P_{V2}$$

Wirtschaftlicher Parallelbetrieb



Verluste im Einzelbetrieb

Verluste im Parallelbetrieb

Umschaltstrom

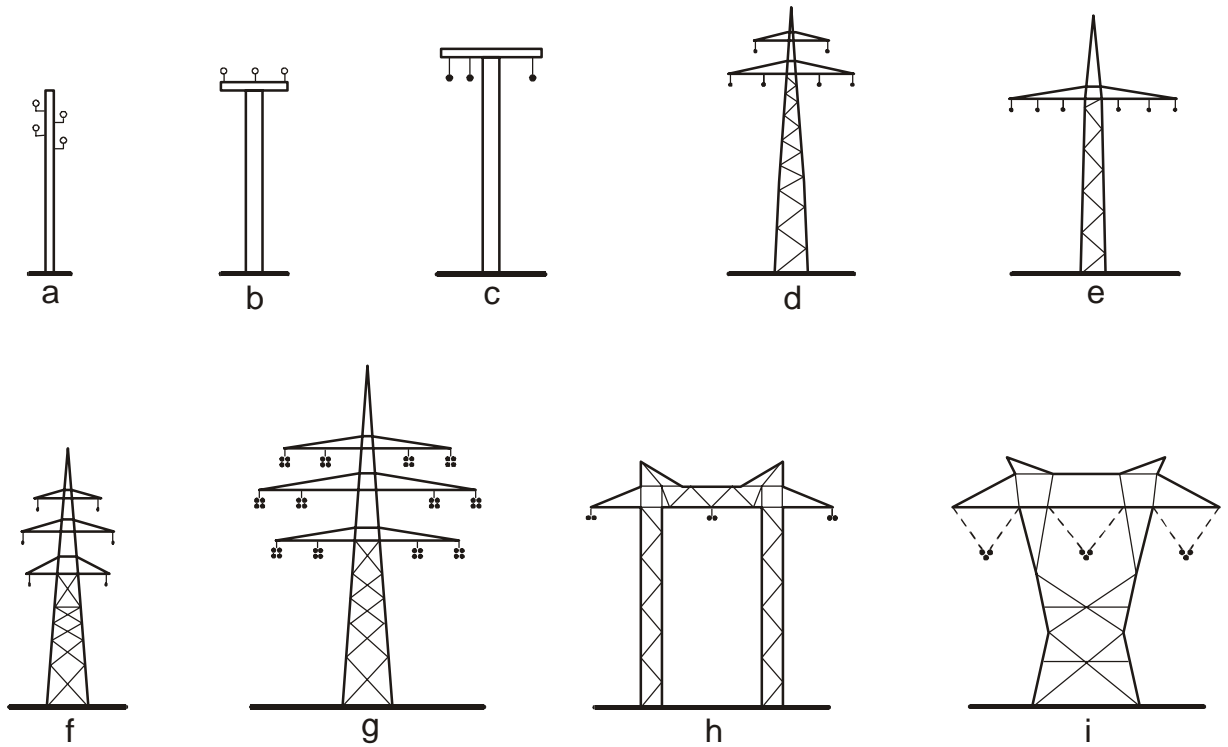
Univ. Hannover

Prof. Oswald

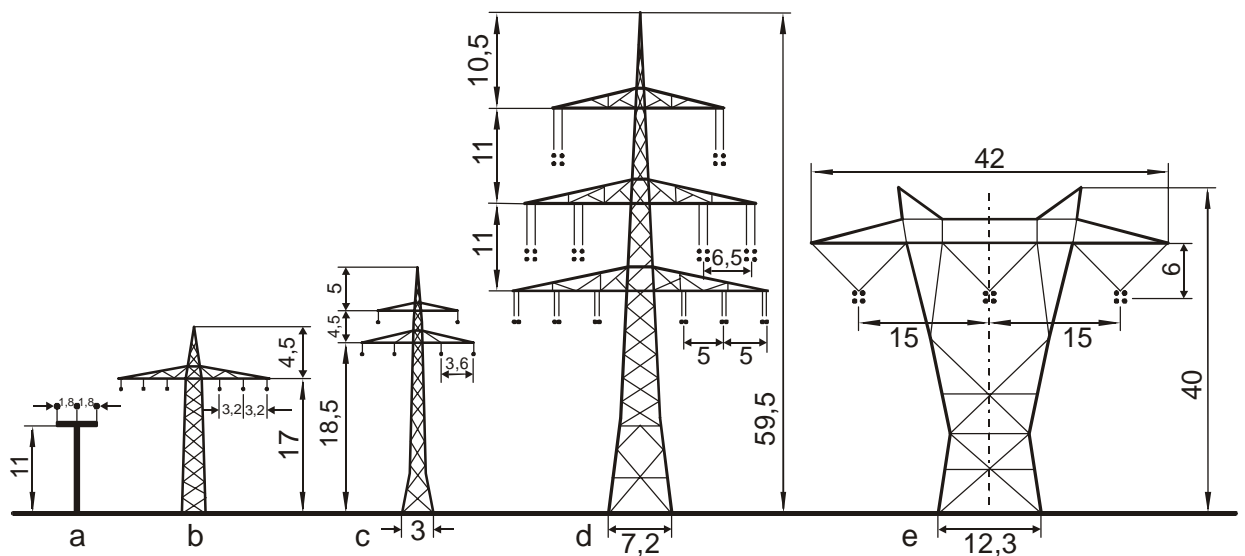
Wirkungsgrad von
Drehstromtransformatoren

Grdl. der EV

EV-E/11

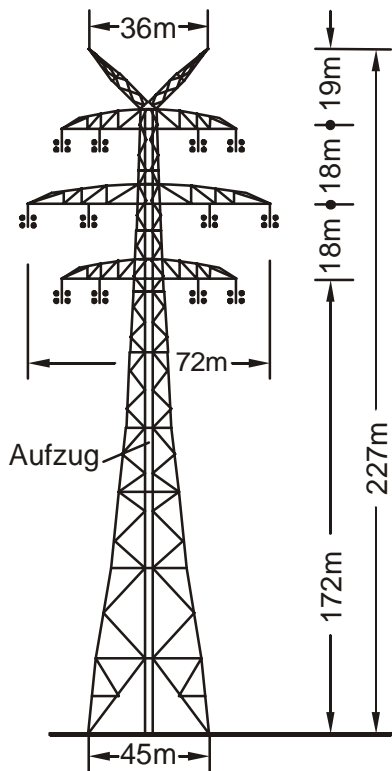


a) Niederspannungsleitung (Holzmast) mit Nulleiter b) Mittelspannungsleitung mit Stützenisolatoren
 c) Betonmastleitung (Mittelspannung bis 100 kV) d) Donaumastbild (110 bis 380 kV und bis 1150 kV möglich)
 e) Einebenenmastbild (110 kV bis 220 kV) f) Tonnenmastbild (110 kV bis 1150 kV) g) Mehrfachleitung hier für vier Stromkreise 380 kV h) Portalmast, u. U. abgespannte Konstruktion (110 kV bis 750 kV)
 i) Y-Mastbild (110 kV bis 1500 kV)

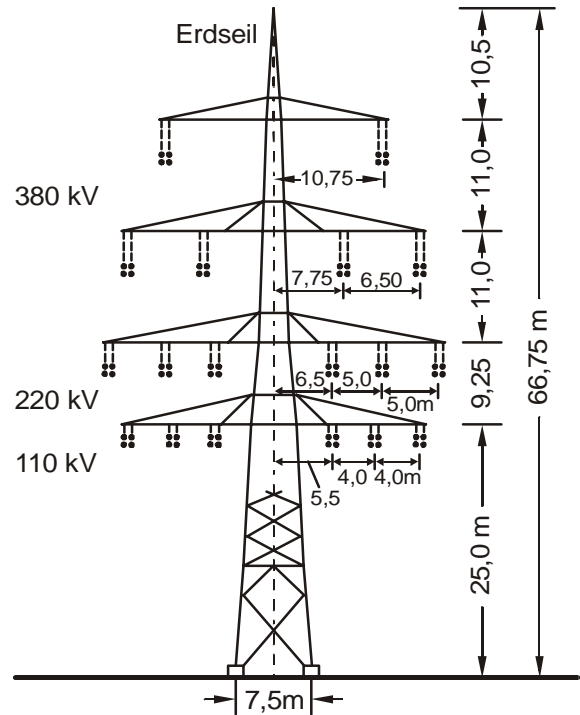


a) 20-kV-Tragmast mit Stützenisolatoren b) 110-kV-Einebenen-Tragmast c) 110-kV-Tragmast (Donautyp)
 d) Tragmast mit 2x220 kV-Zweibündelleitung und 2x380-kV-Viererbündelleitung e) 735-kV-Tragmast (Kanada) mit V-Ketten und Viererbündelleitung

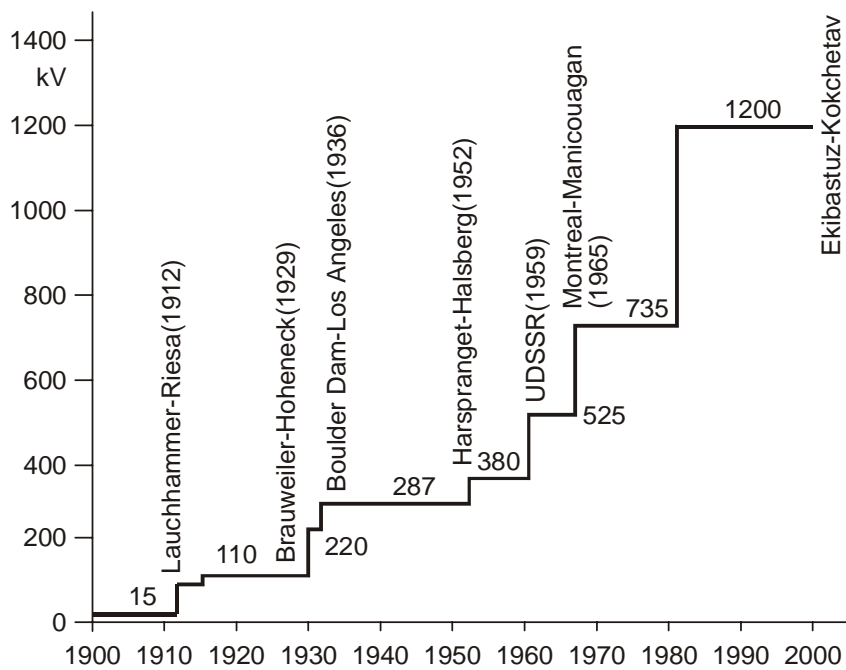
Univ. Hannover	Freileitungsmaste I	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/01



Hauptabmessungen des Tragmastes der Elbekreuzung

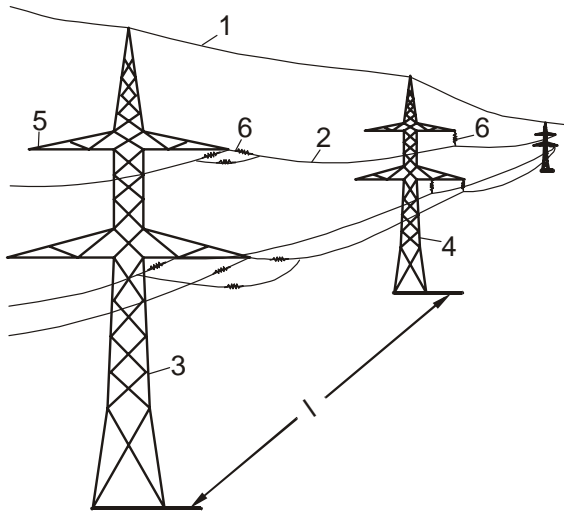


Freileitung mit 6 Stromkreisen bestehend aus
380-kV-Doppelleitung (oben)
220-kV-Doppelleitung (mitte)
110-kV-Doppelleitung (unten)

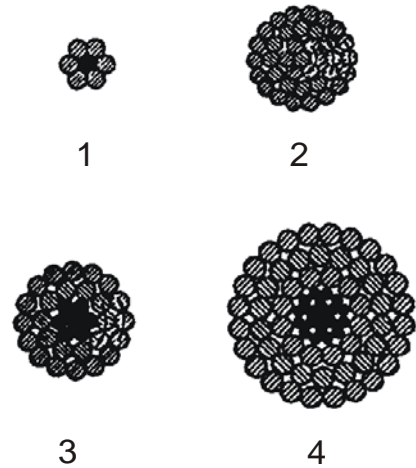


Entwicklung der Übertragungsspannung von Freileitungen

Univ. Hannover	Freileitungsmaste II	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/02



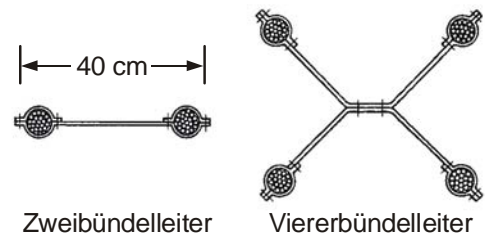
1 Erd- oder Blitzschutzseil, 2 Leiterseil,
3 Abspannmast, 4 Tragmast, 5 Traverse,
6 Isolator, 7 Spannfeldlänge



1 Al/St-Seil (eine Lage Al), 2 Al- oder Cu-Seil
(3 Lagen 37 Drähte), 3 Al/St-Seil (2 Lagen Al),
4 Al/St-Seil (3 Lagen Al)

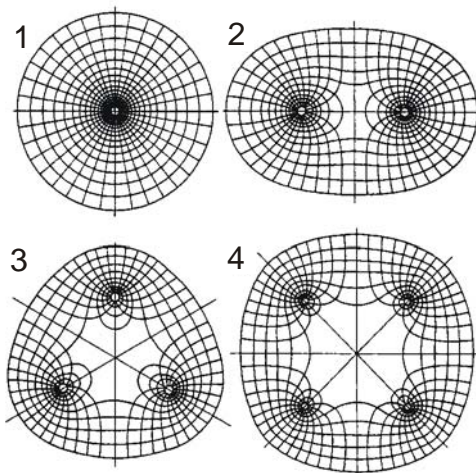
Nennspannung	Spannweite	minimale Höhe
110 kV	220...350 m	6 m
220 kV	300...400 m	6,73 m
380 kV	350...450 m	7,8 m

Spannweiten und Leiterseilhöhen von Freileitungen

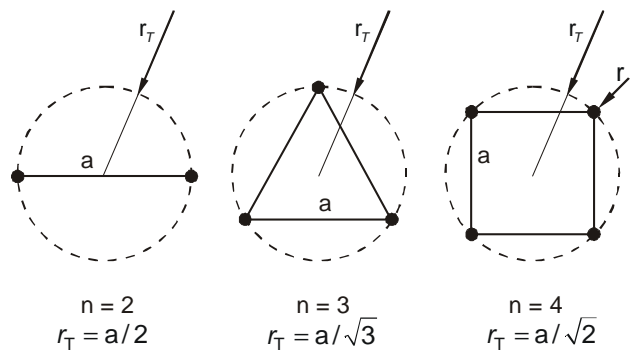


Zweibündelleiter Viererbündelleiter

Bündelleiter mit Abstandhalter



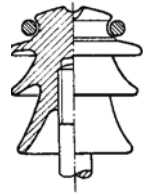
Feldbilder eines 1 Einseil- 2 Zweierbündel-
3 Dreierbündel- 4 Viererbündelleiters



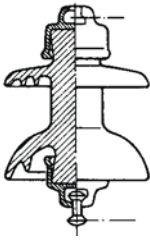
Bündelleiter-Ersatzradius

$$r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_T^{n-1}}$$

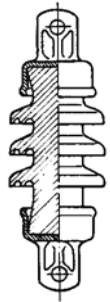
Univ. Hannover	Freileitungsseile	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/03



a) Stützen-

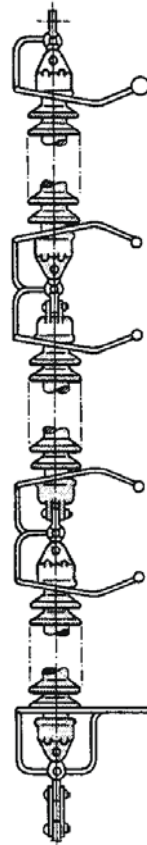


b) Vollkern-



c) Stabilisator

Stützen- (a) und Hängeisolatoren (b, c)



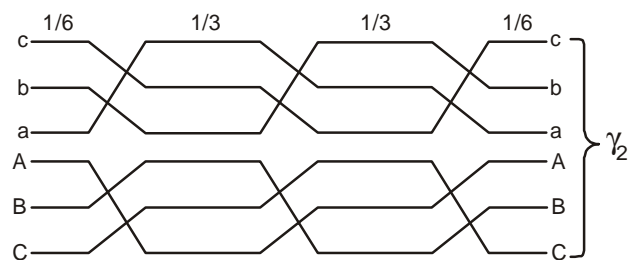
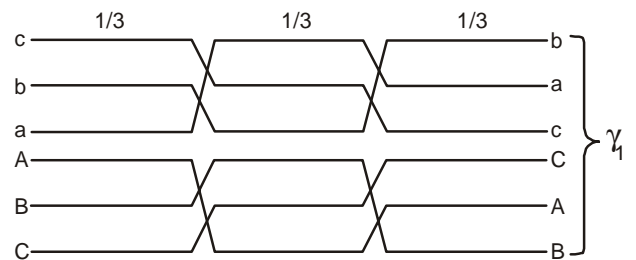
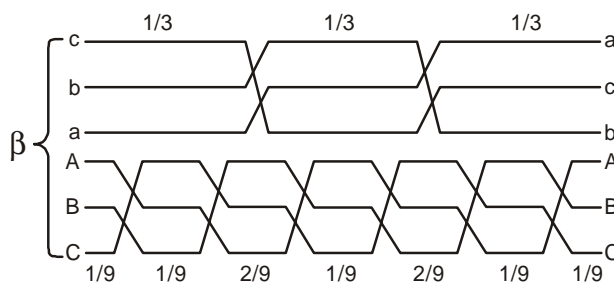
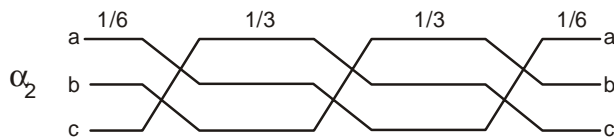
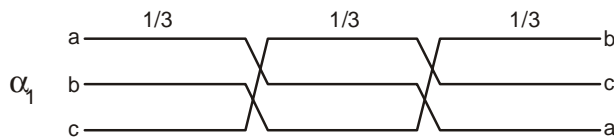
obere Schutzarmatur

Zwischenarmatur

Zwischenarmatur

Schutzring

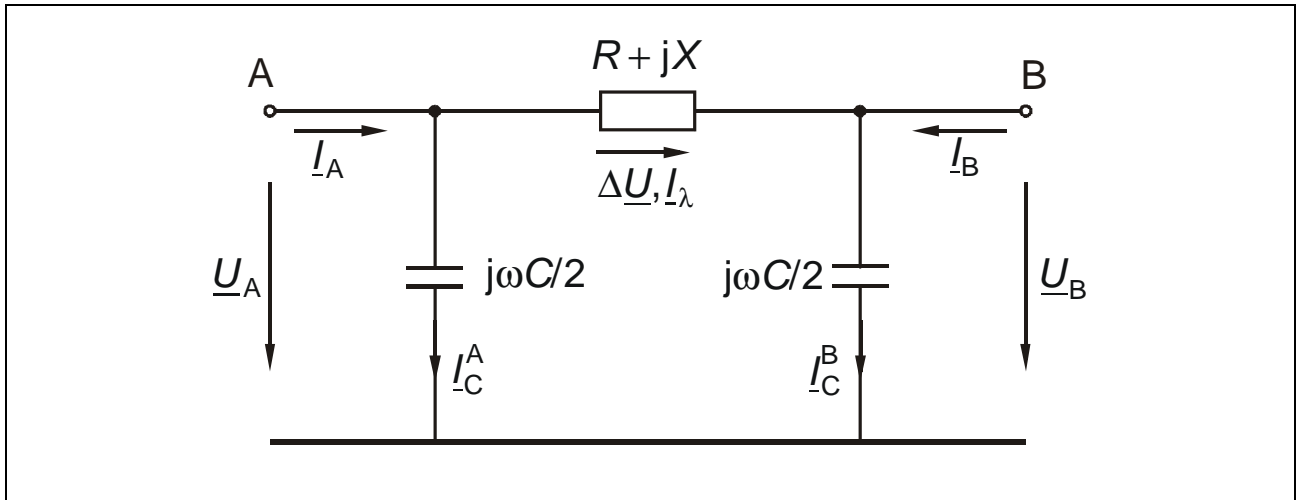
Isolatorkette mit Einhorn-Lichtbogen-
schutzarmaturen



Verdrillungsarten von Freileitungen

Univ. Hannover	Freileitungsisolatoren und Verdrillungsschemata	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/04

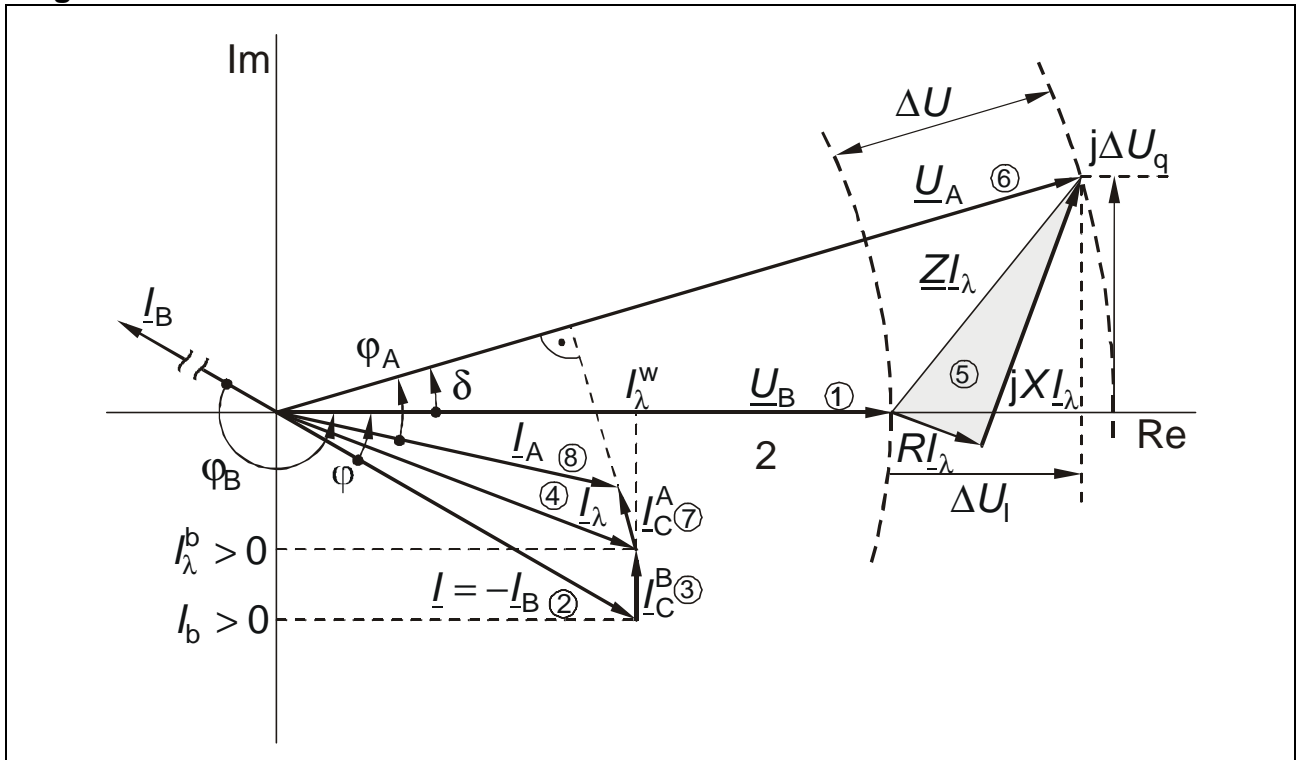
Pi-Ersatzschaltbild



Richtwerte für die Freileitungsparameter

U_n /kV	n	R' /Ω/km	X' /Ω/km	C' /nF/km
1 ... 30	1	0,6 ... 0,5	0,3 ... 0,35	12 ... 10
110	1	0,2 ... 0,15	0,4	9
220	2	0,08	0,32	11,5
380	3 oder 4	0,03	0,25	13

Zeigerbild



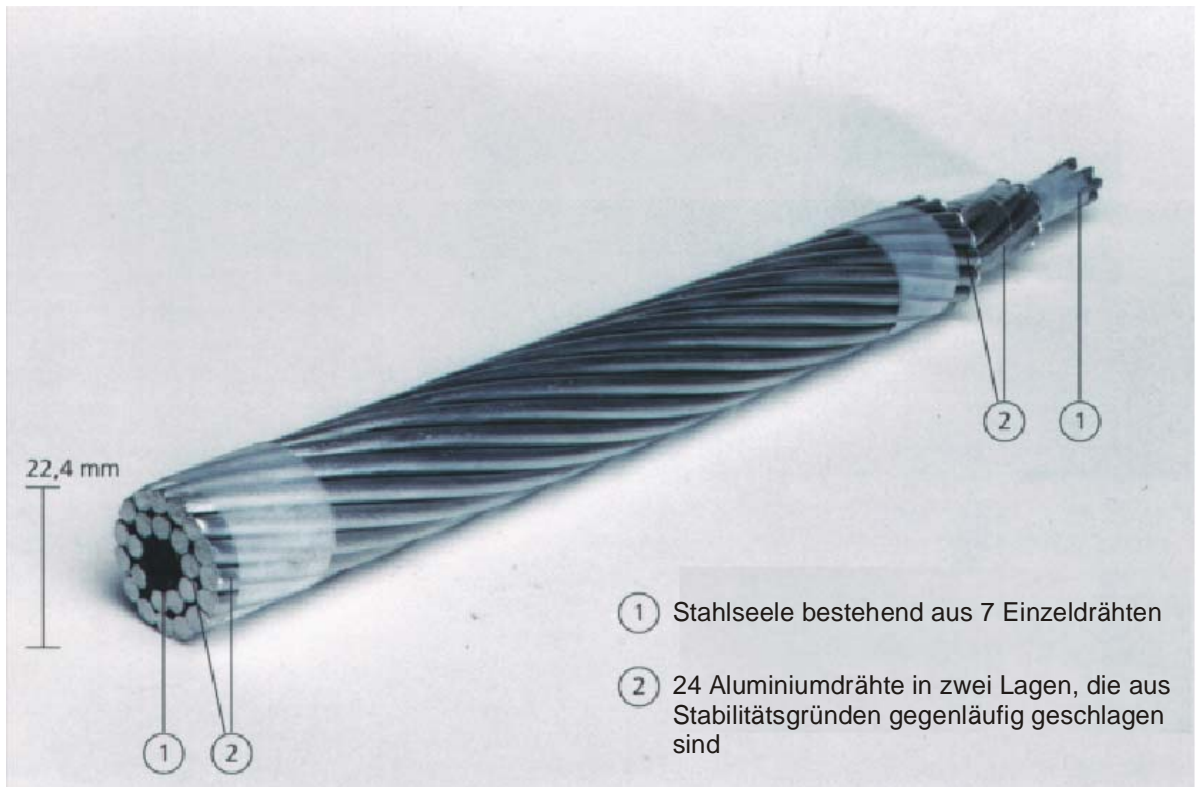
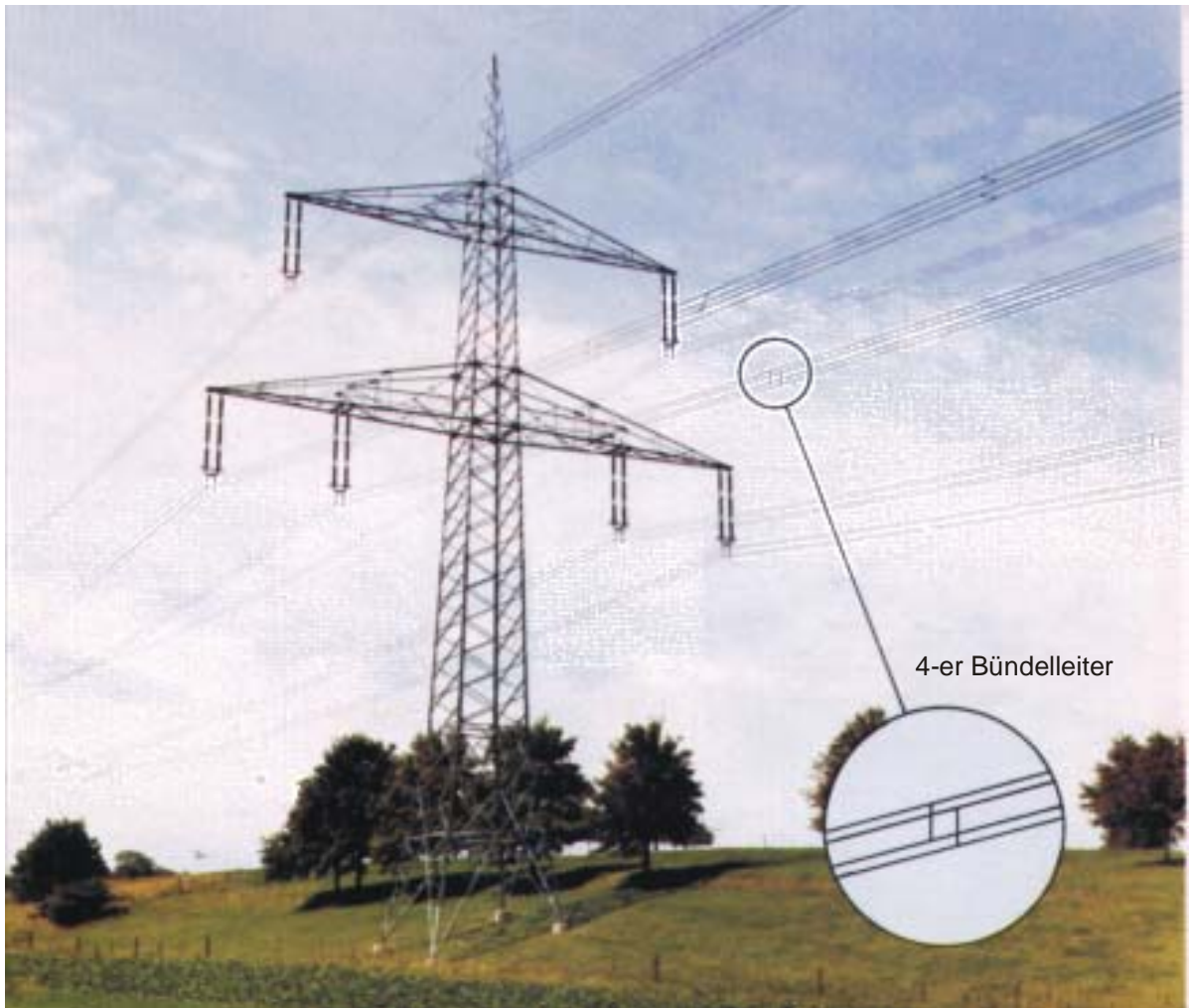
Univ. Hannover

Prof. Oswald

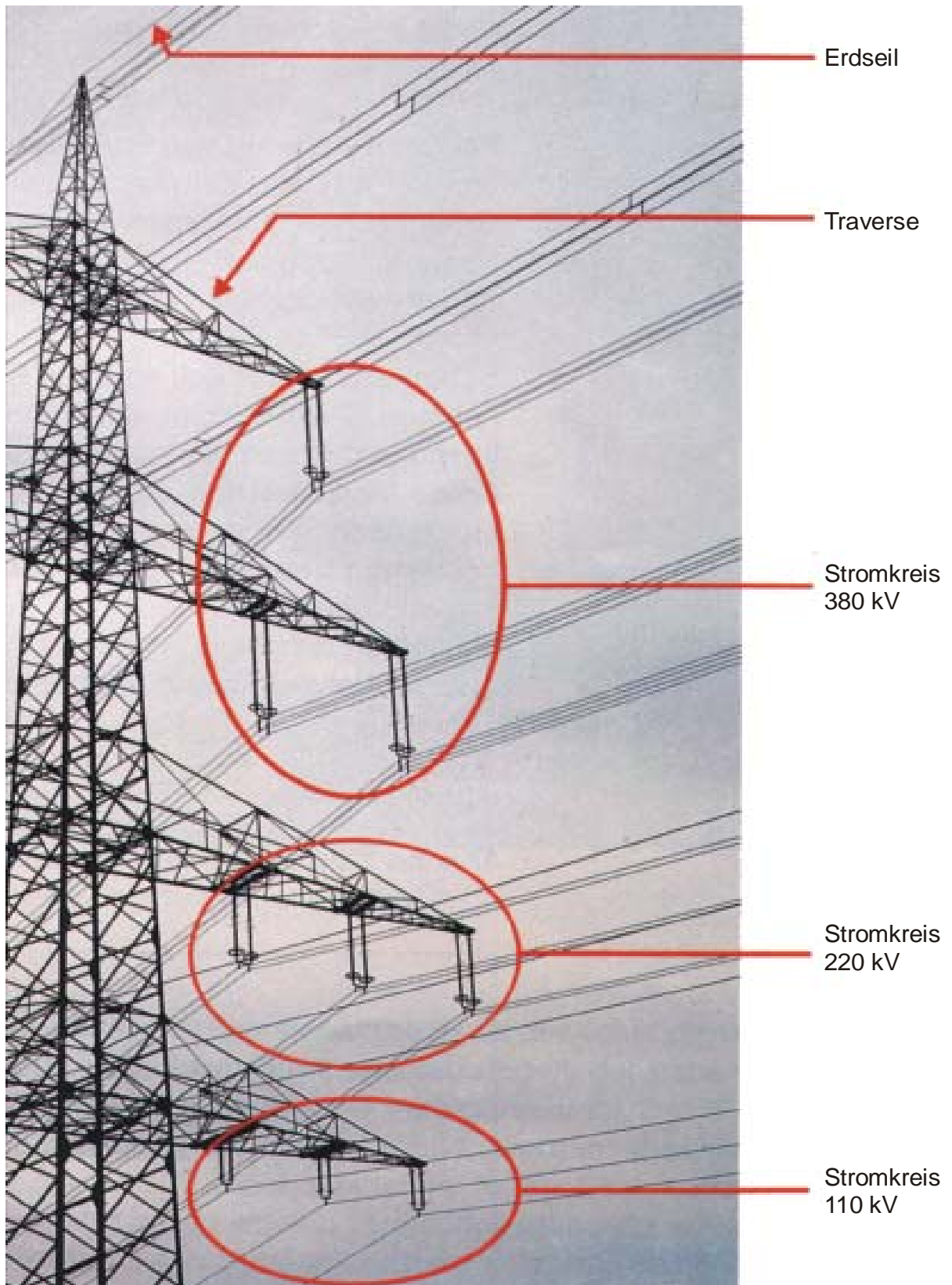
Ersatzschaltung und Zeigerbild
der Freileitung

Grdl. der EV

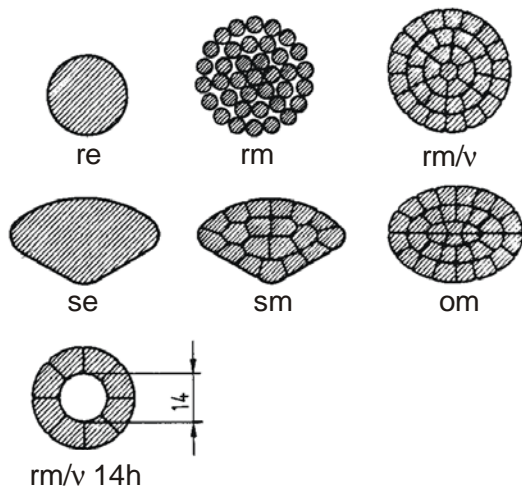
EV-F/05



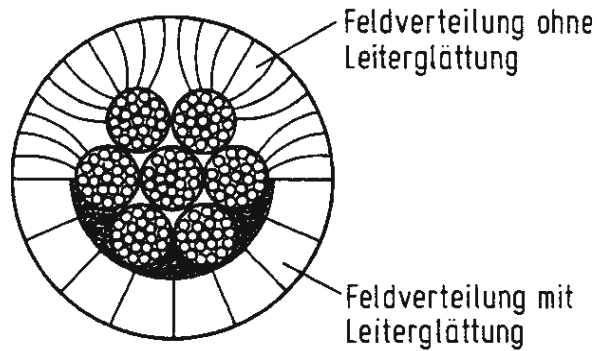
Univ. Hannover	380-kV-Freileitung und Stahl-Aluminium-Leiterseil Al/St 265/35	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/06



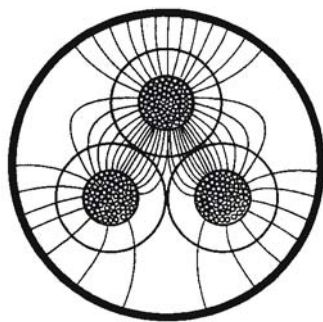
Univ. Hannover	Freileitungstragmast mit je 2 110-kV-, 220-kV- und 380-kV-Stromkreisen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/07



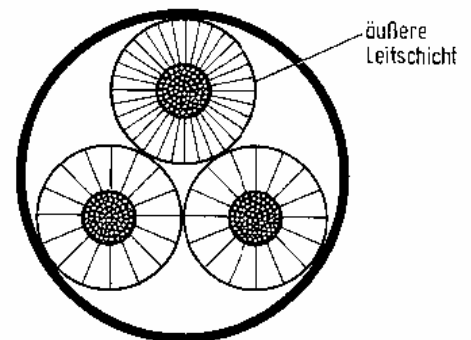
- e eindrätiger Leiter
- m mehrdrätiger Leiter
- o ovalförmiger Leiterquerschnitt
- r kreisförmiger Leiterquerschnitt
- s sektorförmiger Leiterquerschnitt
- /v verdichteter Leiter
- 14h Hohlleiter mit 14mm Ölkanaldurchmesser



Prinzip der Leiterglättung

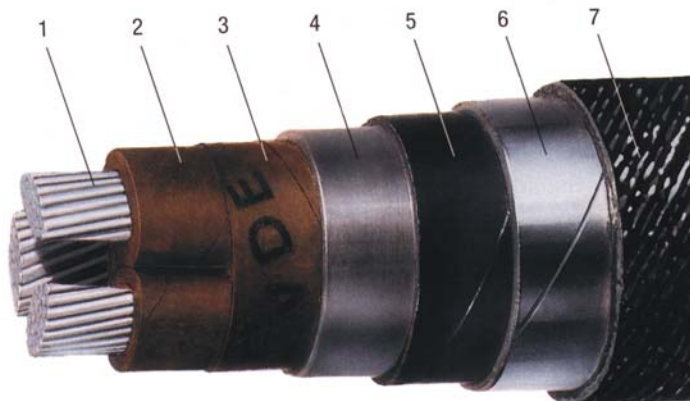


Feldverteilung eines Dreileiter-Gürtel-Kabels zu einem bestimmten Zeitpunkt einer Periode



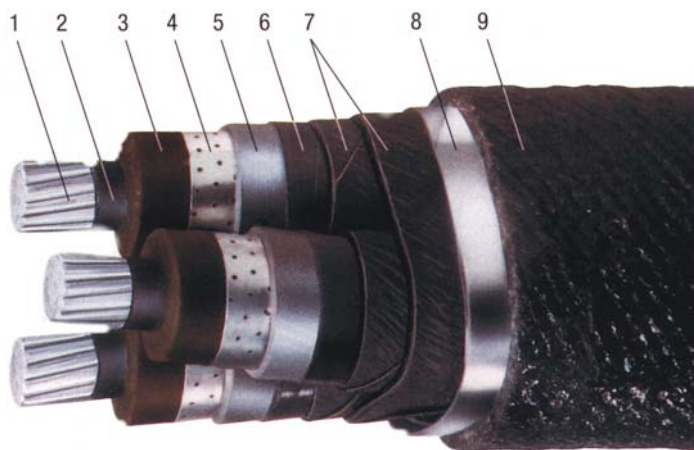
Feldverteilung bei einem Radialfeldkabel zu einem bestimmten Zeitpunkt einer Periode

Univ. Hannover	Leiterformen und Feldbilder von Kabeln	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/08



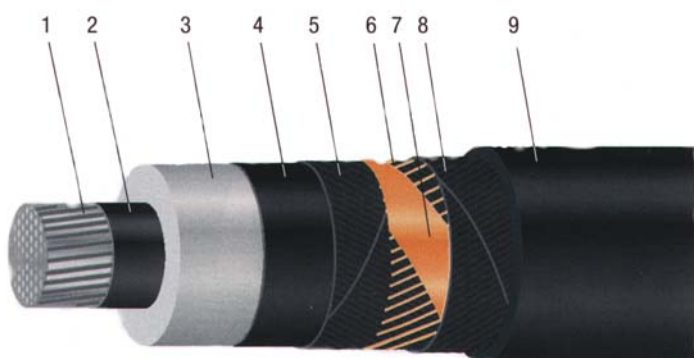
- 1 mehrdrähtiger Leiter aus Aluminium
- 2 massegetränkte Papierisolierung
- 3 Gürtelisolierung
- 4 Bleimantel
- 5 innere Schutzhülle
- 6 Stahlbandbewehrung
- 7 äußere Schutzhülle aus Faserstoffen

Gürtelkabel NAKBA, dreiadriges papierisoliertes Kabel für 10 kV



- 1 mehrdrähtiger Leiter aus Aluminium
- 2 innere Leitschicht (Rußpapierlage)
- 3 massegetränkte Papierisolierung
- 4 äußere Leitschicht (Höchstädterfolie)
- 5 Bleimantel
- 6 Korrosionsschutz
- 7 innere Schutzhüllen
- 8 Stahlbandbewehrung
- 9 äußere Schutzhülle aus Faserstoffen

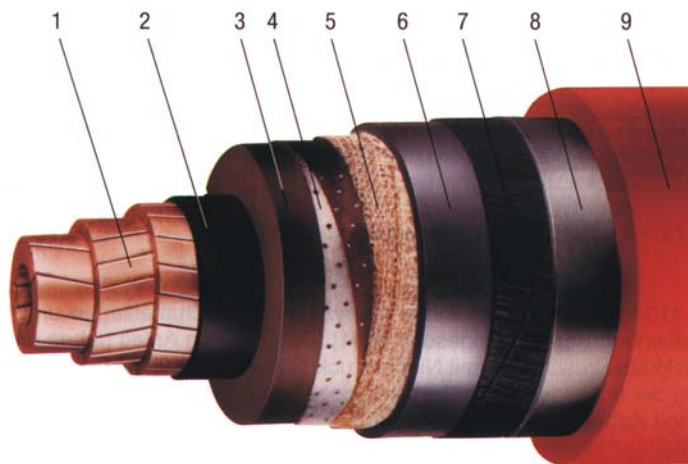
Dreibleimantelkabel NAEKEBA, dreiadriges Mittelspannungskabel



- 1 mehrdrähtiger Leiter aus Aluminium
- 2 innere Leitschicht
- 3 VPE-Isolierung
- 4 äußere Leitschicht
- 5 leitfähige Polsterung
- 6 Schirm aus Kupfer
- 7 Querleitwendel aus Kupfer
- 8 Trennschicht
- 9 PE-Außenmantel

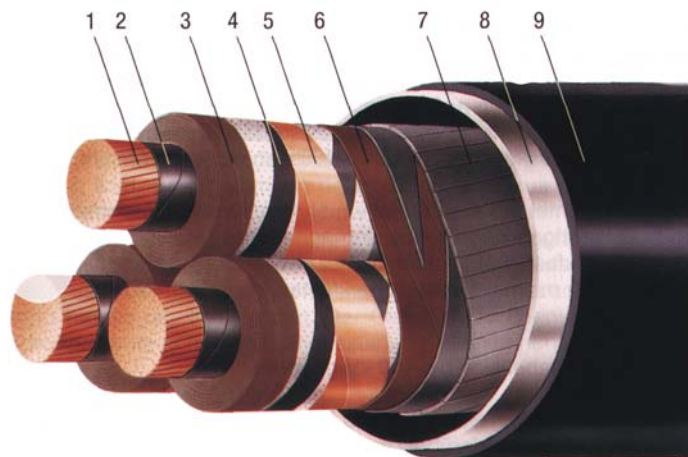
Kunststoffkabel NA2XS2Y für Mittelspannung

Univ. Hannover	Bauarten von Hochspannungskabeln I	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/09



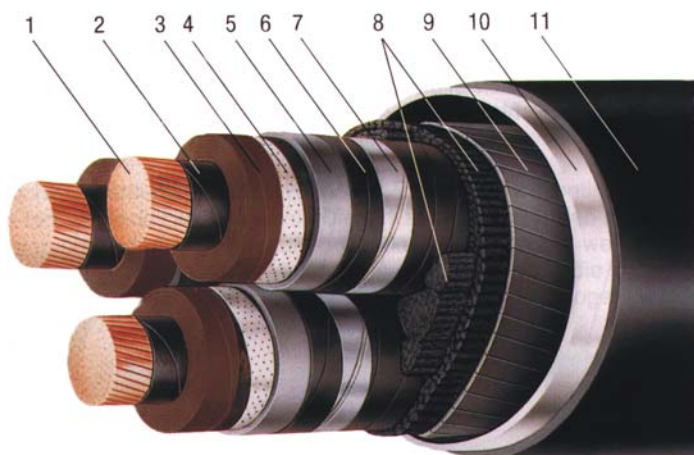
- 1 Kupfer-Hohlleiter aus Profildrähten
- 2 innere Leitschicht (Rußpapier)
- 3 Papierisolierung, getränkt mit dünnflüssigem Isolieröl
- 4 äußere Leitschicht (Höchstädterfolie)
- 5 Zwischenschicht (Fertigungshilfsmittel)
- 6 Bleimantel
- 7 Polster
- 8 unmagnetische Druckschutzbandage
- 9 PVC-Außenmantel

Einadriges Niederdruck-Ölkabel
NÖKUDEY für 110kV



- 1 mehrdrähtiger Leiter aus Kupfer
- 2 innere Leitschicht (Rußpapier)
- 3 massegetränkte Papierisolierung
- 4 äußere Leitschicht (Höchstädterfolie und Rußpapier)
- 5 Querleitwendel (Kupferband)
- 6 Polster
- 7 Bewehrung (Einziehhilfe)
- 8 Stahlrohr
- 9 Schutzhülle (PE)

Dreiadriges Gasinnendruckkabel
NIVFSt2Y für 110 kV



- 1 mehrdrähtiger Leiter aus Kupfer
- 2 innere Leitschicht Rußpapier)
- 3 massegetränkte Papierisolierung
- 4 äußere Leitschicht (Höchstädterfolie und Rußpapier)
- 5 Bleimantel
- 6 Korrosionsschutz
- 7 unmagnetische Druckschutzbandage
- 8 Zwickelfüllung und Polster
- 9 Bewehrung (Einziehhilfe)
- 10 Stahlrohr
- 11 Schutzhülle (PE)

Dreiadriges Gasaußendruckkabel
NPKDVFSt2Y für 110 kV

Univ. Hannover

Prof. Oswald

Bauarten von
Hochspannungskabeln II

Grdl. der EV

EV-F/10

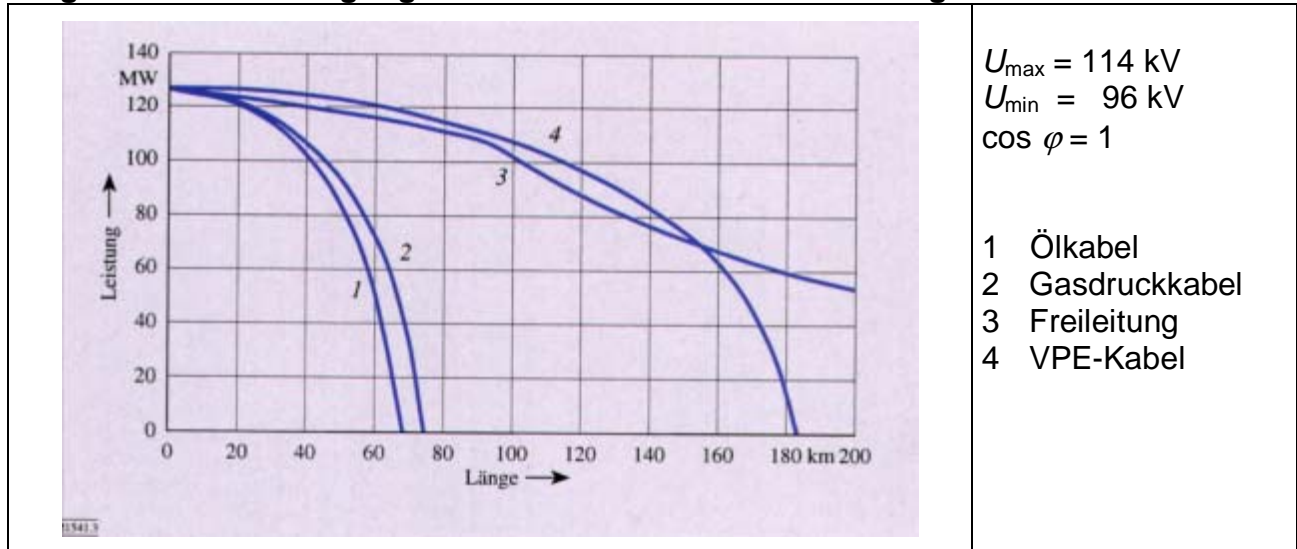
Vergleich der Parameter von Freileitungen und Kabeln

Nennspannung	20 kV		110 kV		380 kV	
	Freileitung	VPE-Kabel	Freileitung	VPE-Kabel	Freileitung	Ölkabel
Leitermaterial	Al/St	Al	Al/St	Cu	Al/St	Cu
q /mm ²	120/20	240	265/35	630	4x265/35	2000
S_{th} /MVA	14	14	130	124	1800	900
R' (20°C)/Ω/km	0,24	0,125	0,109	0,029	0,028	0,01
C' /nF/km	10	290	9,5	180	14	280
X' /Ω/km	0,36	0,1	0,38	0,13	0,25	0,22
P_{nat} /MW	1,2	12	34	254	600	2900

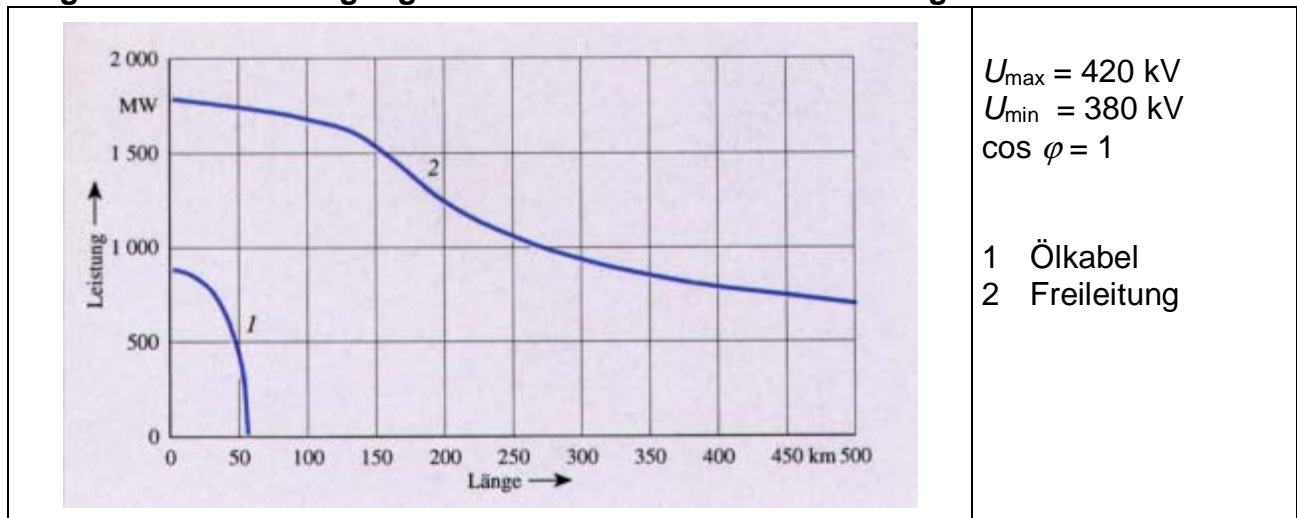
S_{th} = thermisch zulässige Leistung

P_{nat} = natürliche Leistung

Vergleich des Übertragungsverhaltens von 110-kV-Freileitungen und -Kabeln



Vergleich des Übertragungsverhaltens von 380-kV-Freileitungen und -Kabeln



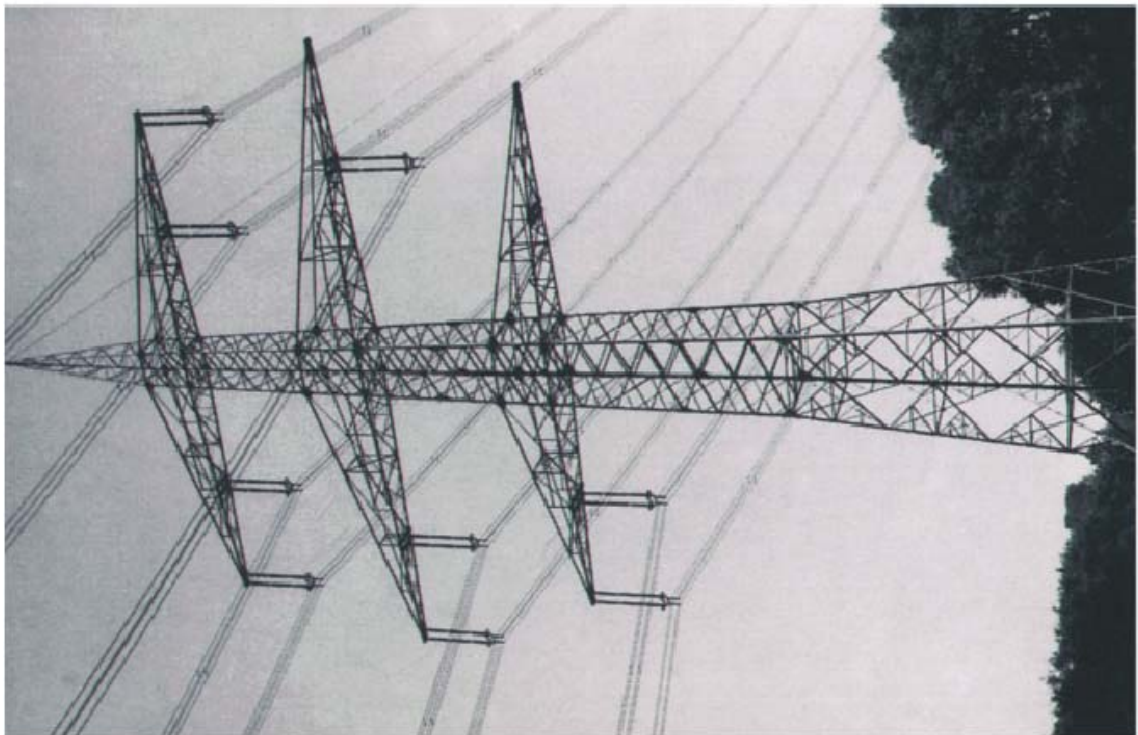
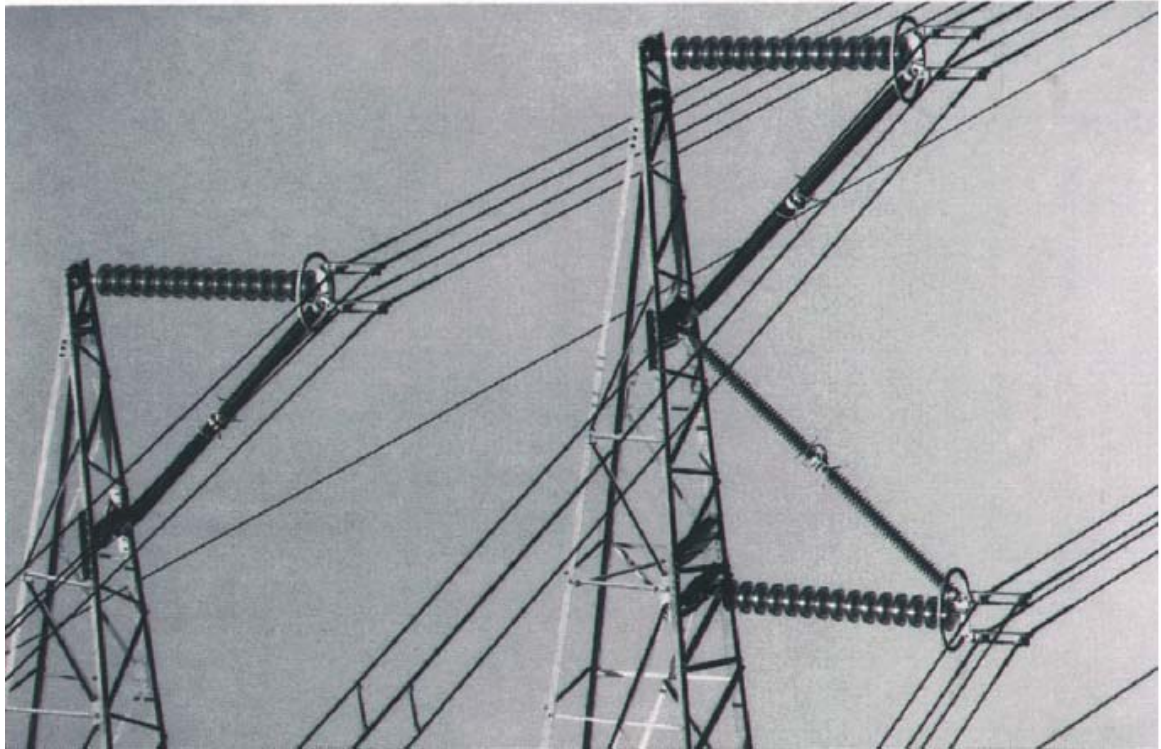
Univ. Hannover

Parameter und Übertragungsverhalten
von Freileitungen und Kabeln

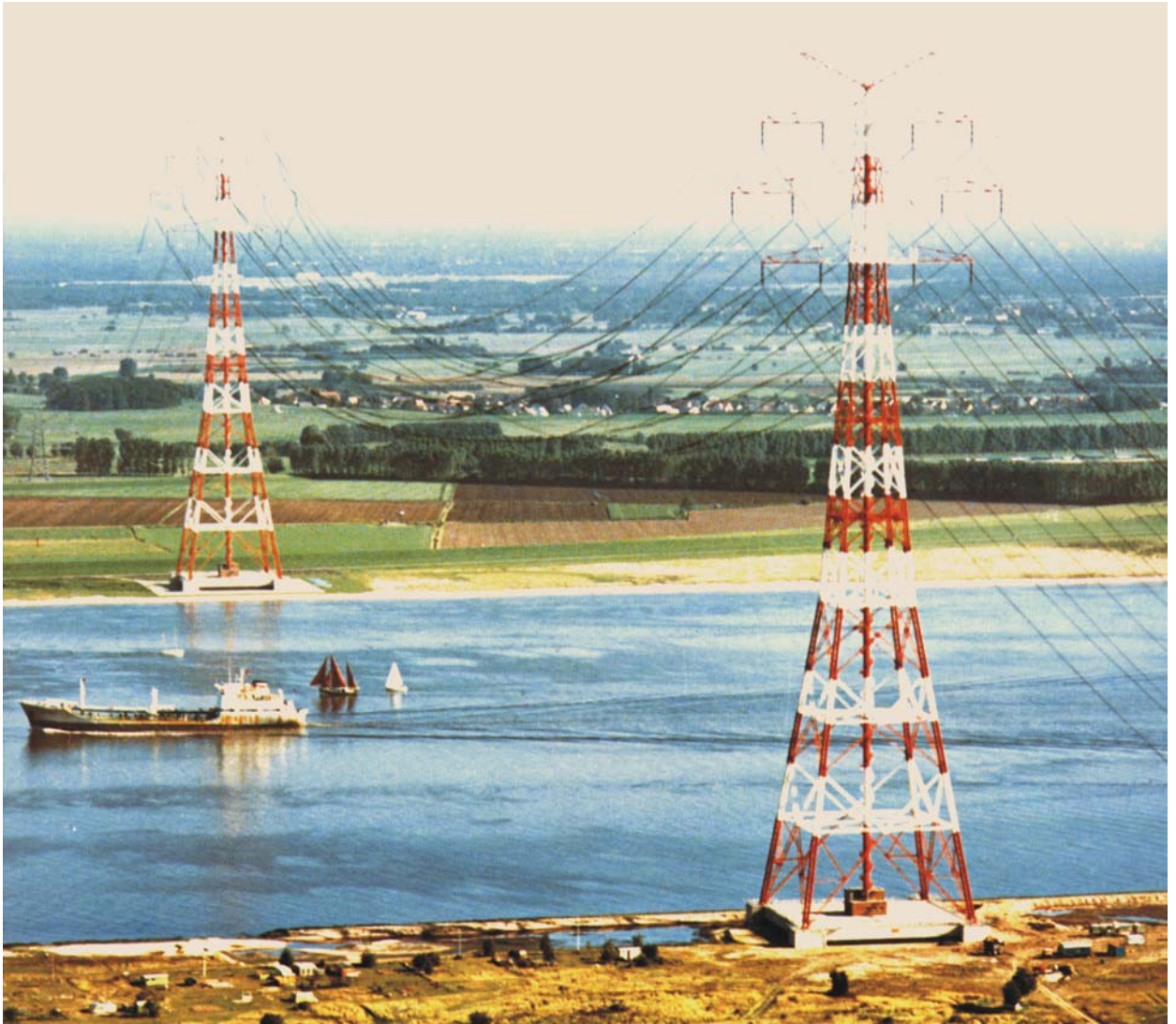
Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-F/11



Univ. Hannover	Tragmast einer 380-kV-Vierfachleitung asymmetrische V-Ketten an einem 380-kV-Tragmast	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/12



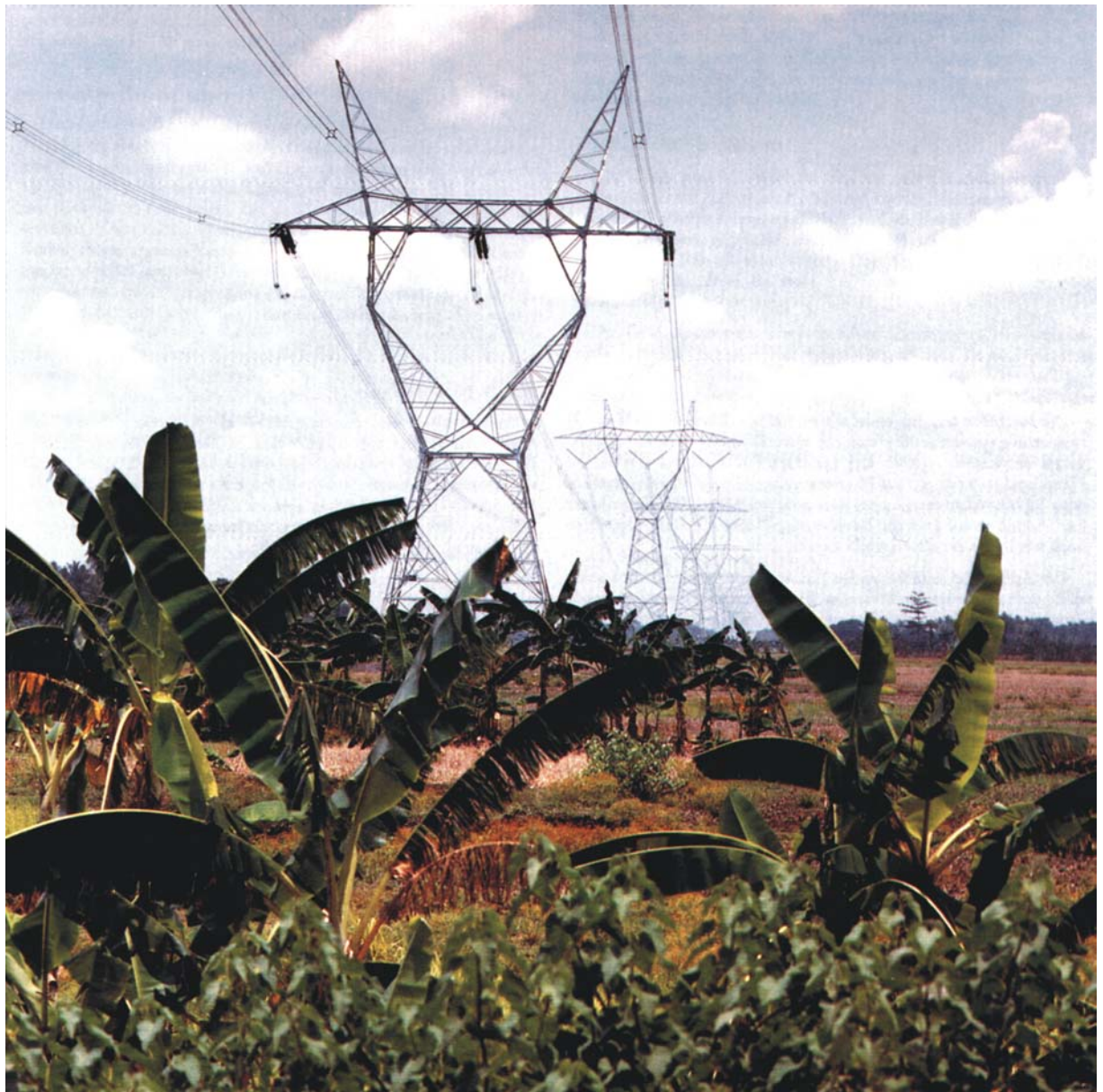
Univ. Hannover

Prof. Oswald

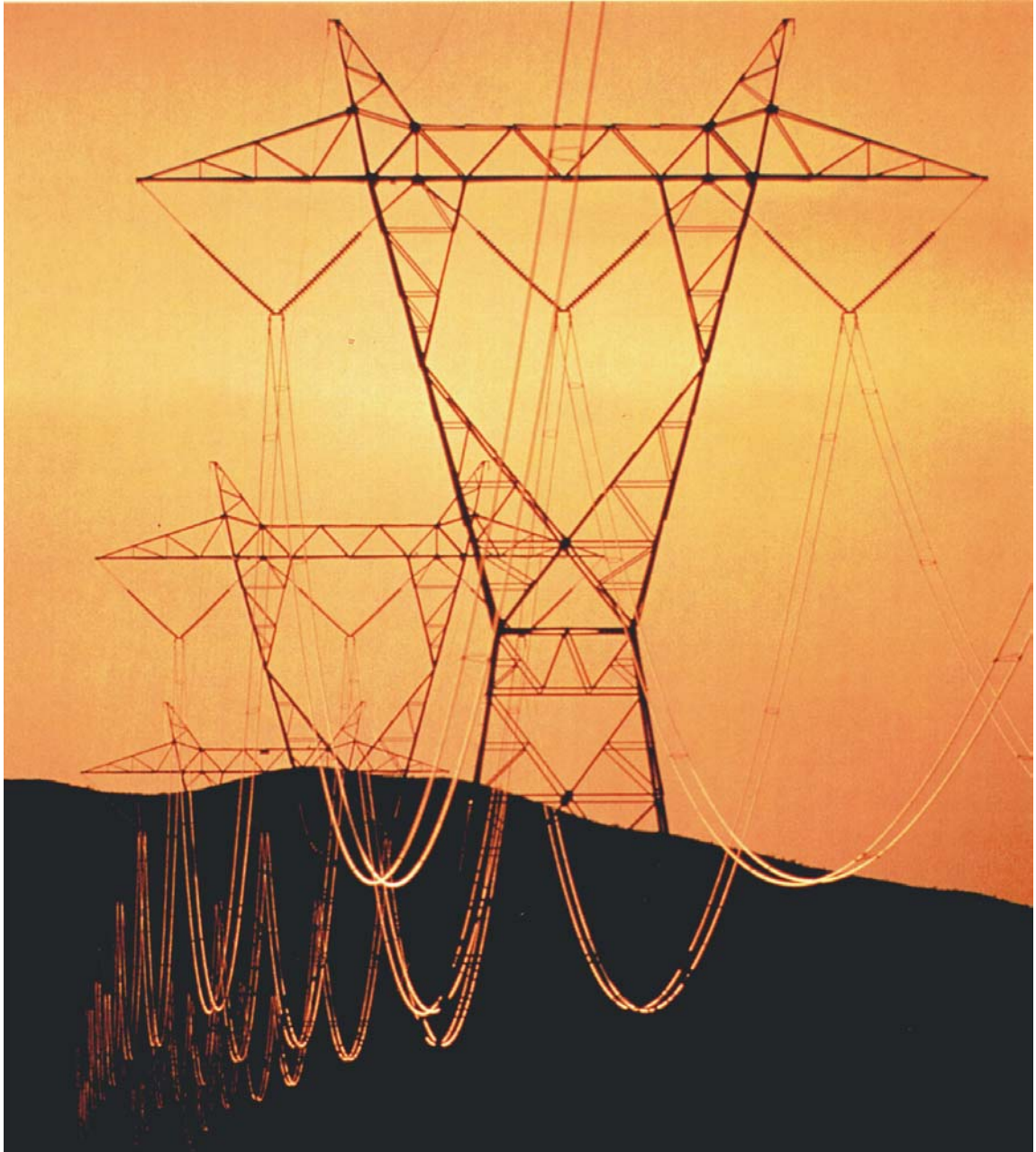
Freileitungsmaste (227 m) der
380-kV-Elbekreuzung bei Stade

Grdl. der EV

EV-F/13



Univ. Hannover	500-kV-Freileitung in Ost-Java	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/14



Univ. Hannover

Prof. Oswald

500-kV-Freileitung

Grdl. der EV

EV-F/15



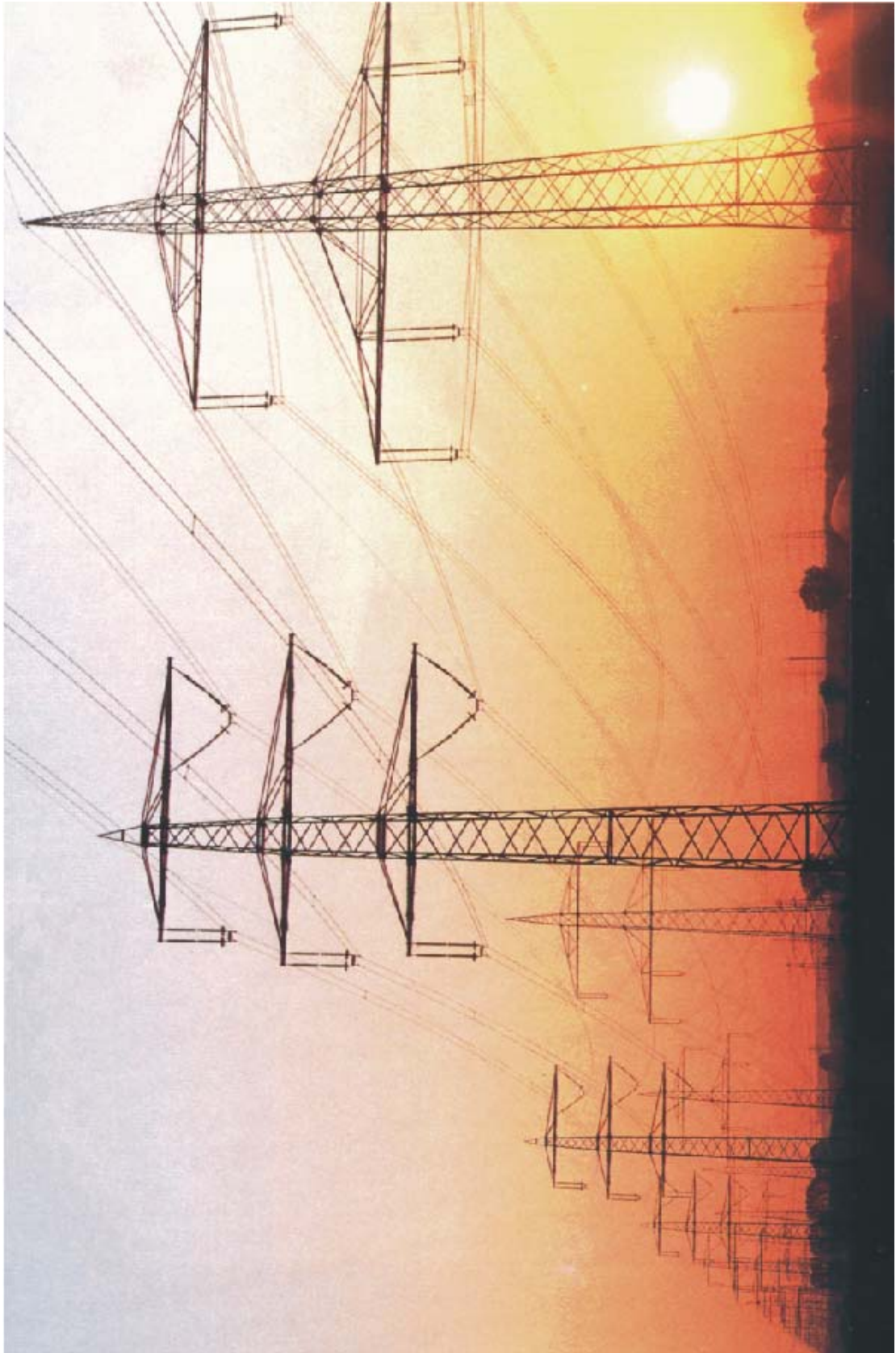
Univ. Hannover

Prof. Oswald

380-kV-Winkelabspannmast

Grdl. der EV

EV-F/16



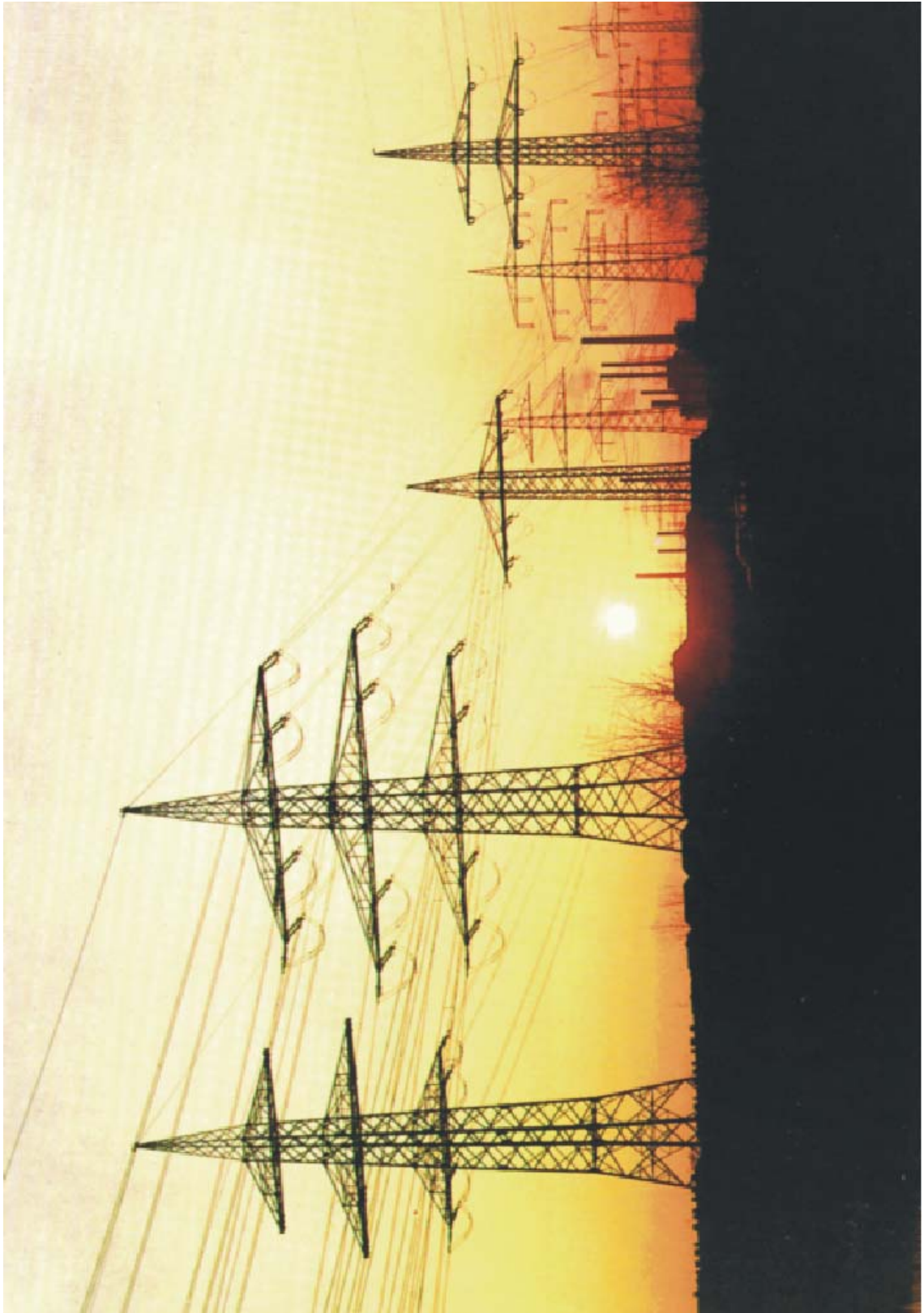
Univ. Hannover

Prof. Oswald

220- und 380-kV-Freileitungen

Grdl. der EV

EV-F/17



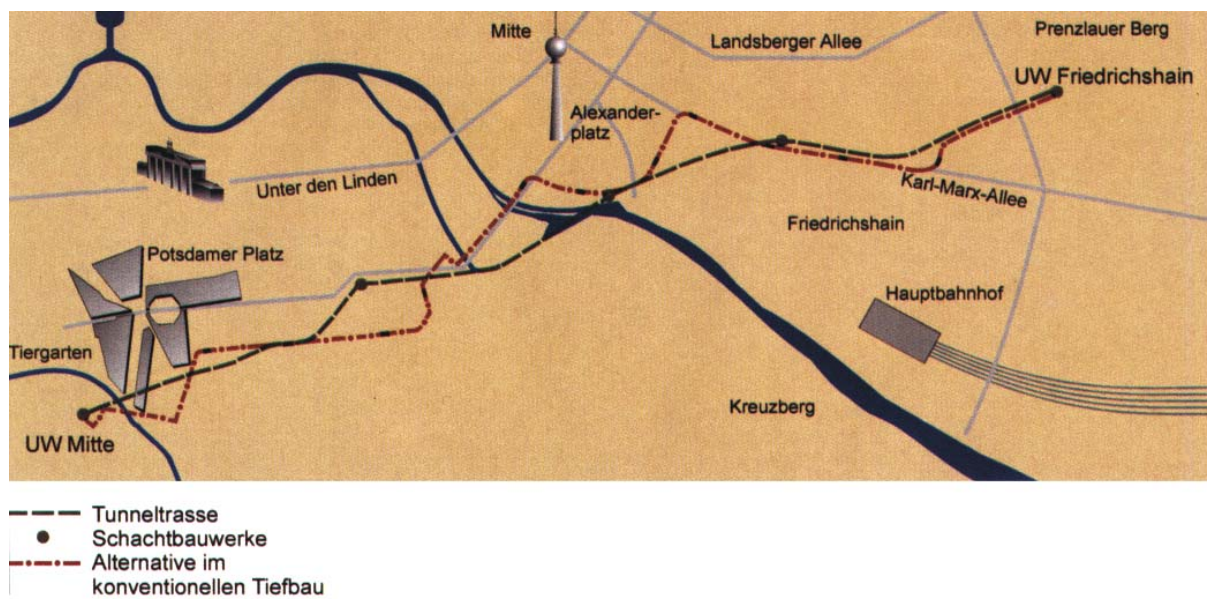
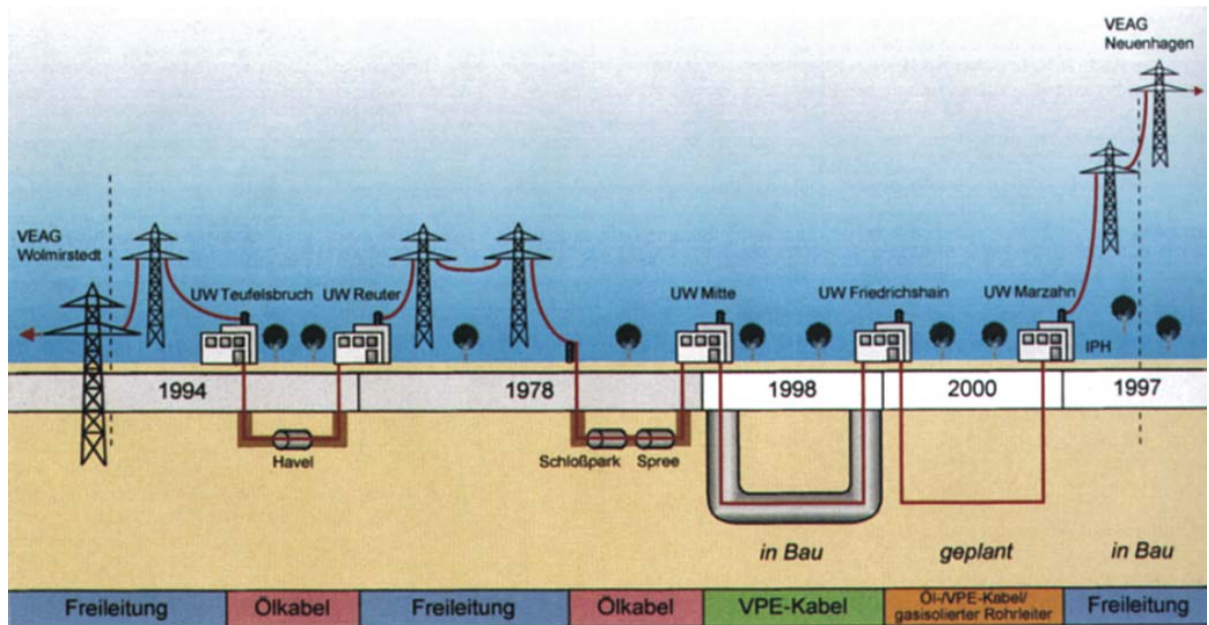
Univ. Hannover

Prof. Oswald

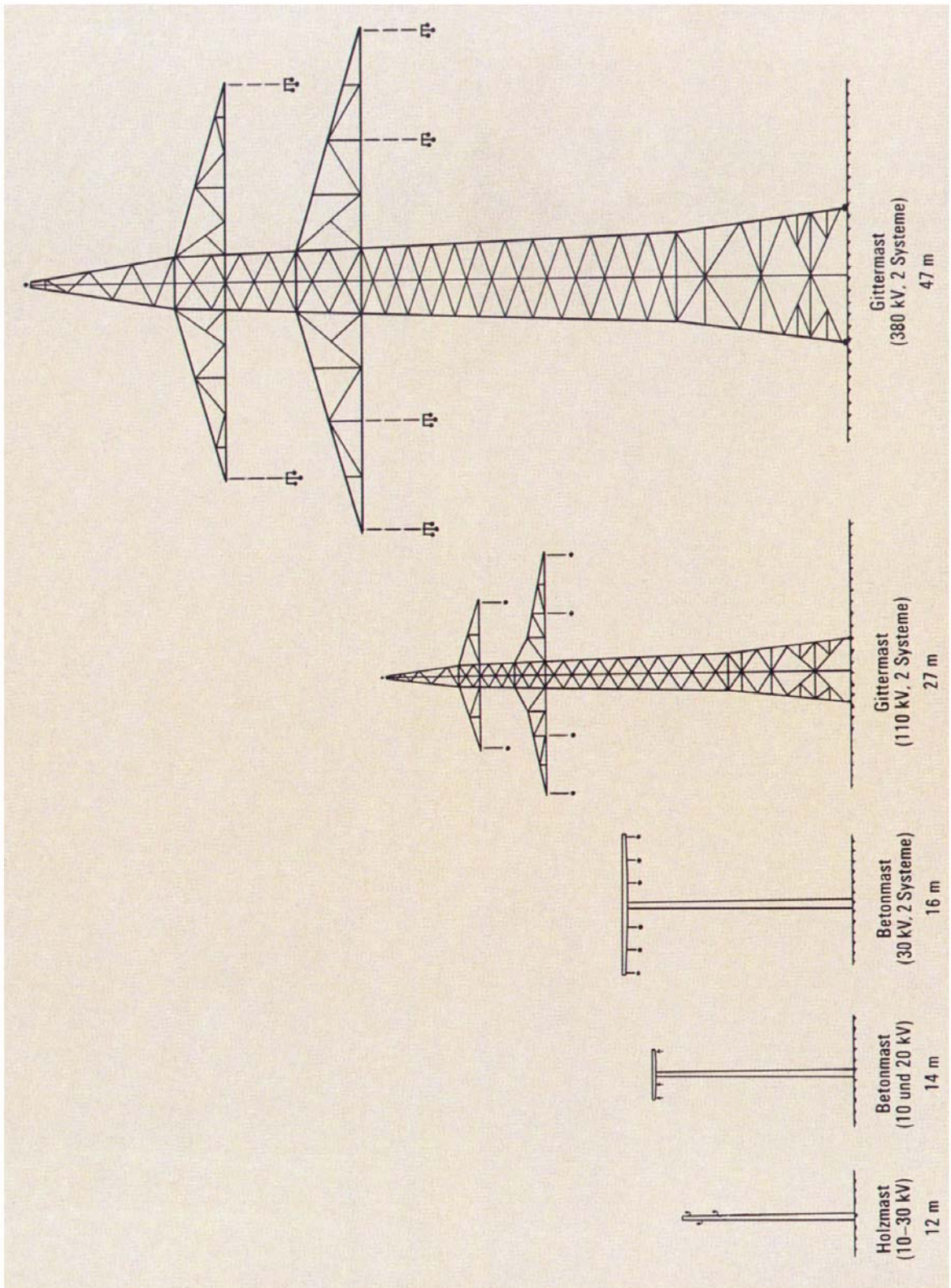
Freileitungstrasse

Grdl. der EV

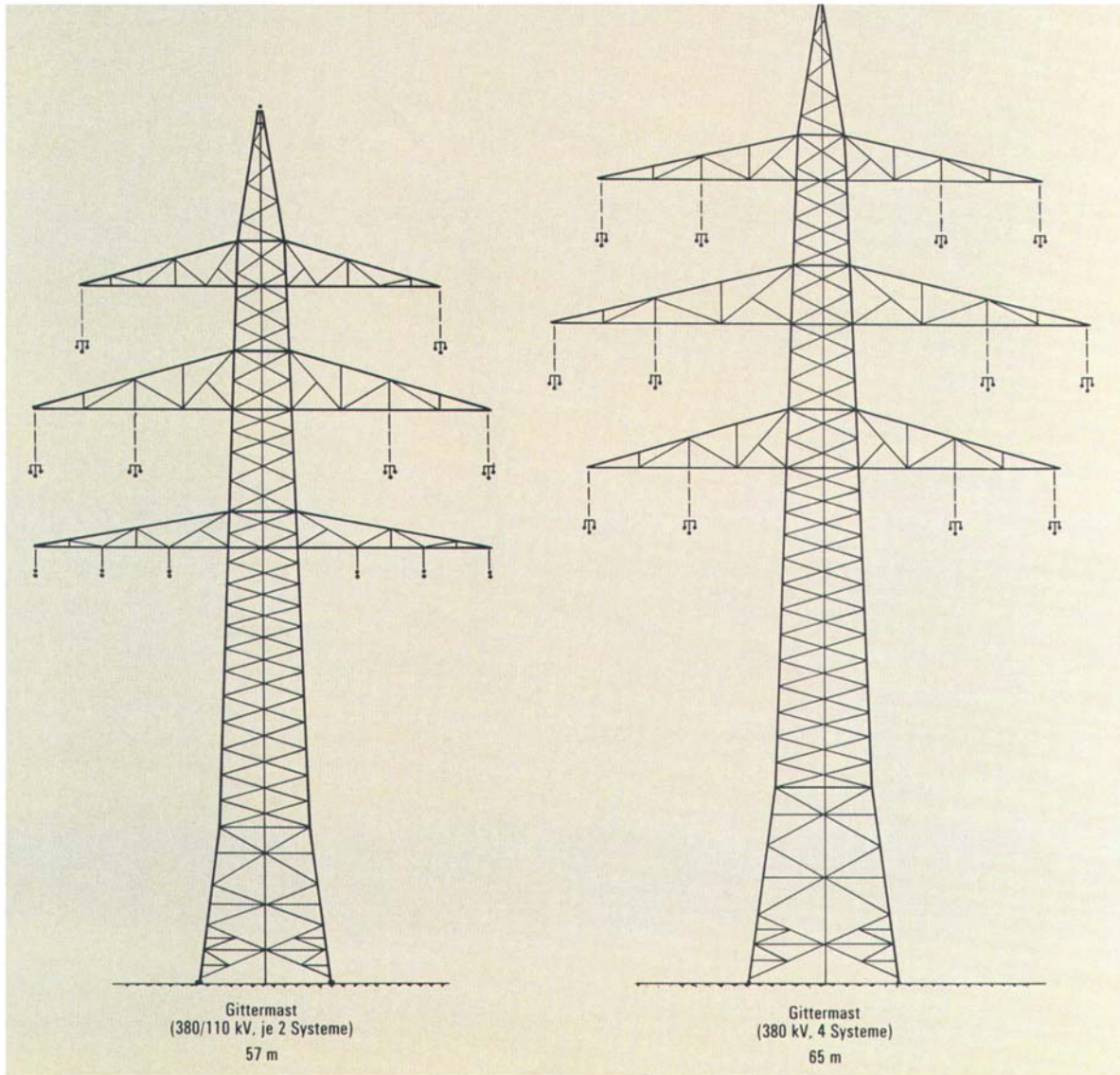
EV-F/18



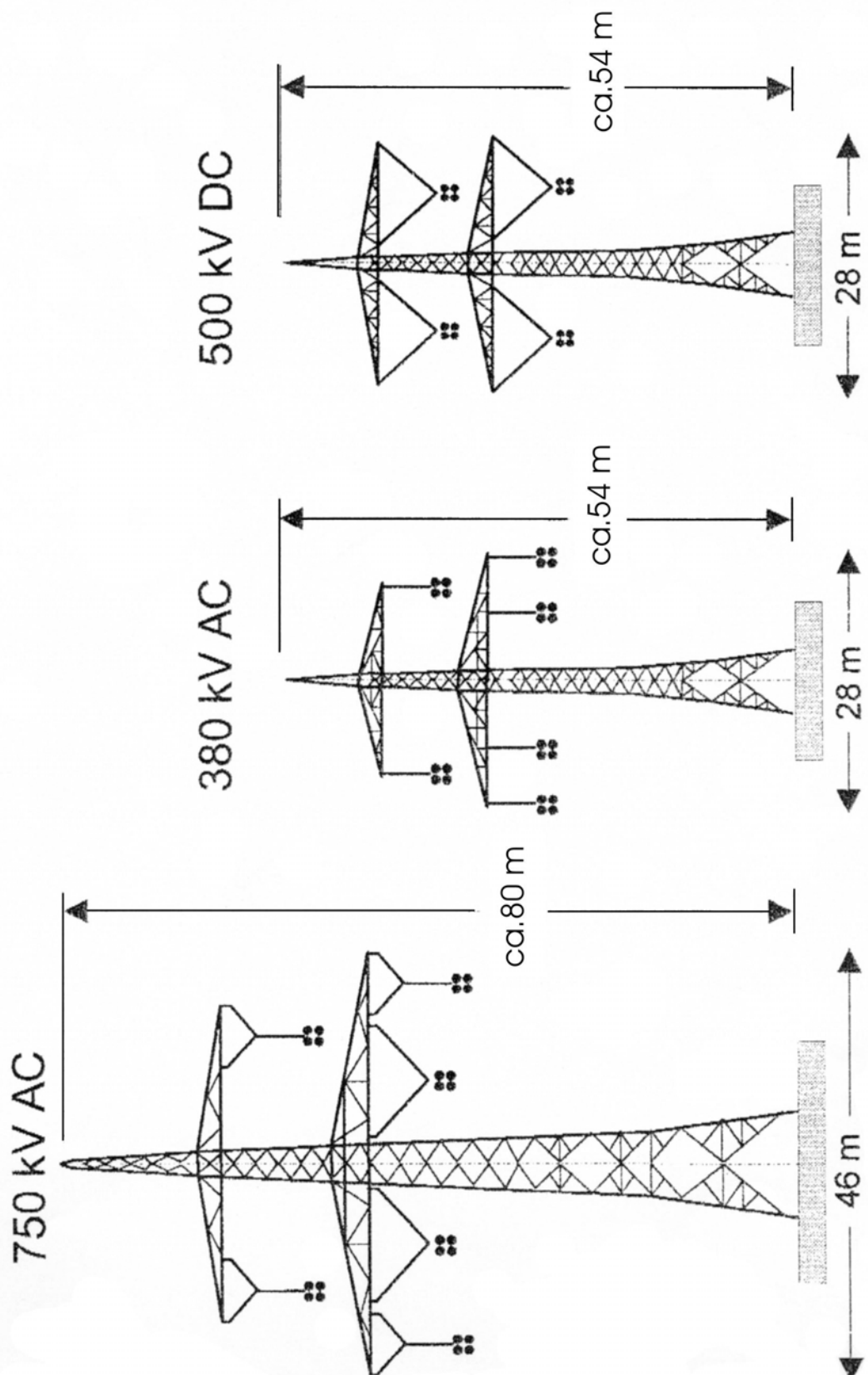
Univ. Hannover	Tunnelprojekt der BEWAG mit 380-kV-VPE-Kabeln	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/19



Univ. Hannover	Baugrößen von Freileitungsmasten	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-F/20



Univ. Hannover	110/380-kV-Mast mit je 2 Systemen	Grdl. der EV
Prof. Oswald	380-kV-Vierfachleitungsmast	EV-F/21



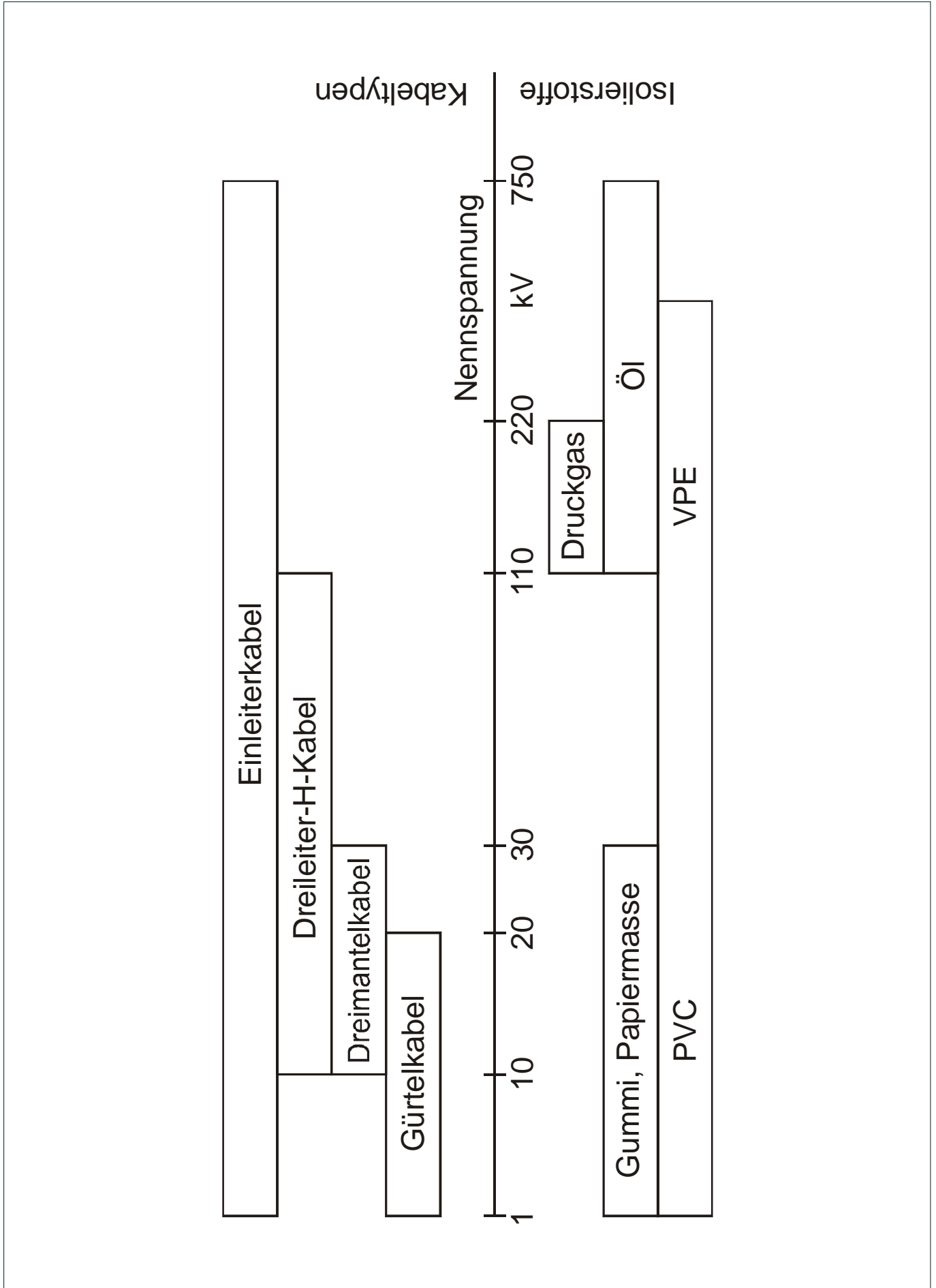
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Größenvergleich von
HDÜ- und HGÜ-Systemen

Grdl. der EV

EV-F/22

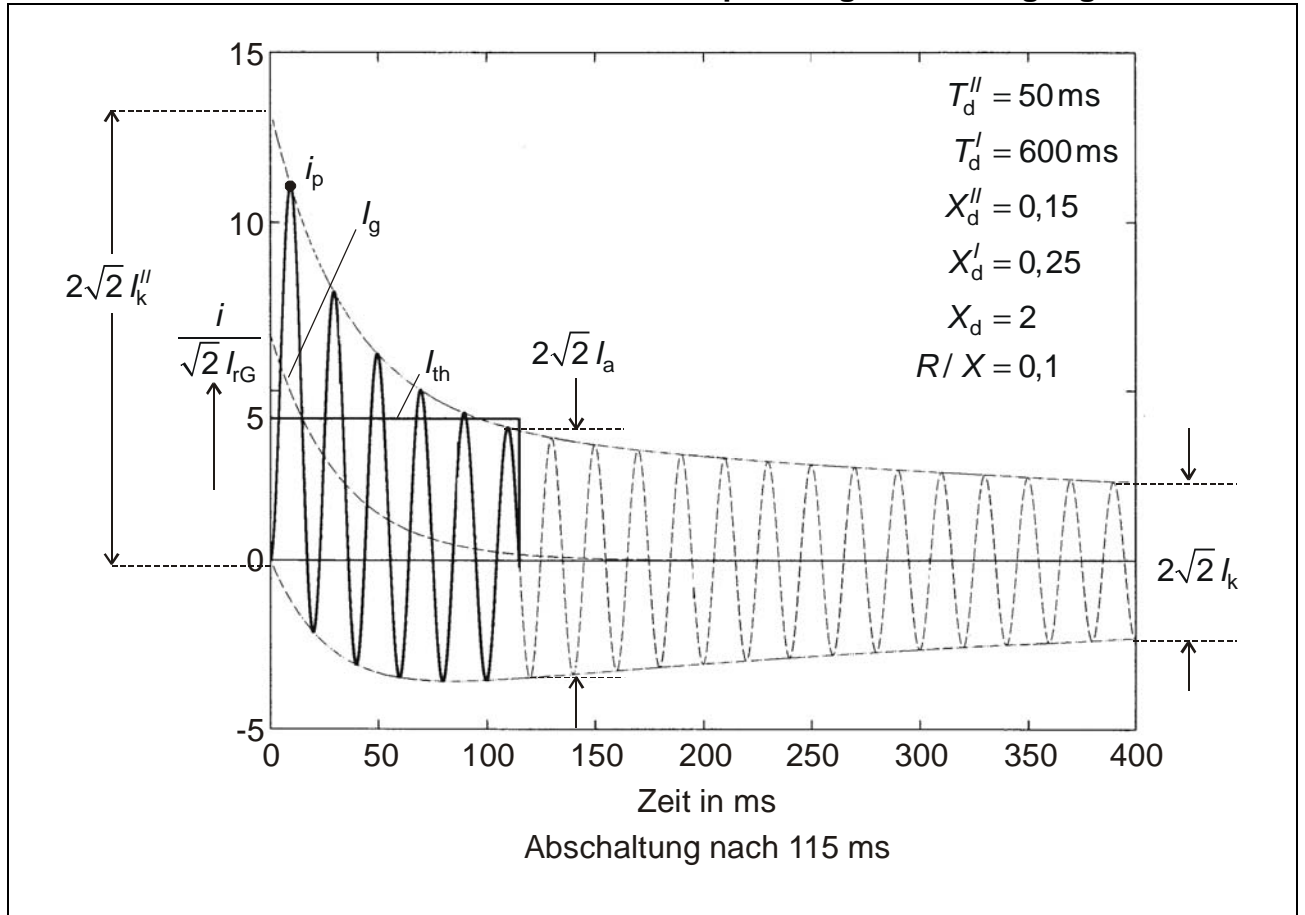


Univ. Hannover
 Prof. Oswald

Einsatzbereiche von Kabeln

Grdl. der EV
 EV-F/23

Kurzschlussstromverlauf bei Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang



Charakteristische Kurzschlussstromgrößen

i_p	Stosskurzschlussstrom (höchster möglicher Momentanwert bei maximalem Gleichglied)
$I_k'' = \frac{U''}{Z_k''}$	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom (fiktiver Höchstwert des Effektivwertes des Wechselanteils)
I_a	Ausschaltstrom (Effektivwert des Wechselanteiles unmittelbar vor Ausschaltung)
I_{th}	thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom
$I_k = \frac{U_p}{Z_k}$	Dauerkurzschlussstrom
$I_{g \max}$	maximaler Gleichanteil

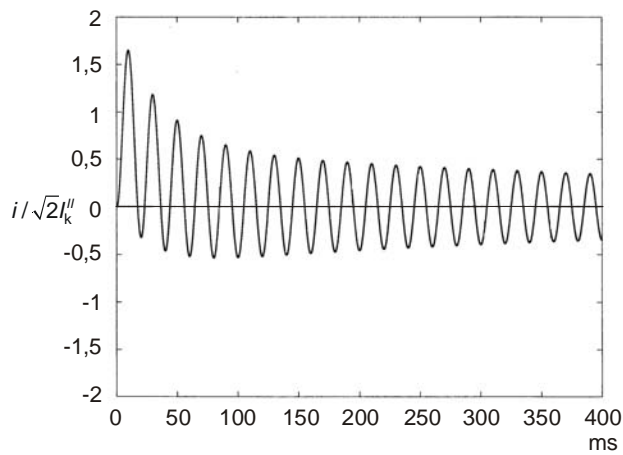
Kurzschlussleistung

$S_k'' = \sqrt{3} U_{nN} I_k'' = \frac{1,1 U_{nN}^2}{Z_k''}$	Anteil eines Netzes am dreipoligen Kurzschluss
--------------------------------------------------------------	------------------------------------------------

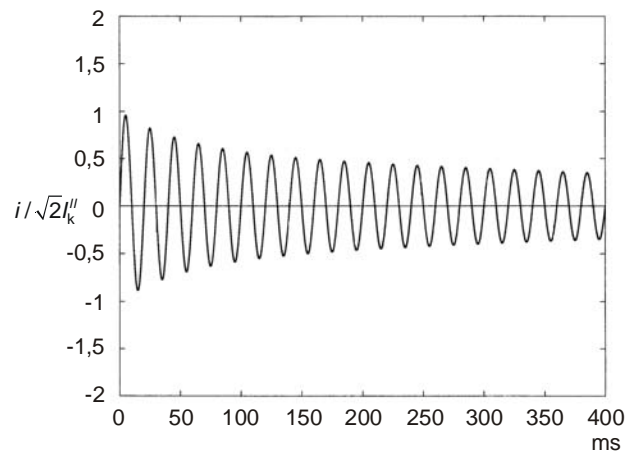
Univ. Hannover	Charakteristische Kurzschlußstromgrößen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-K/01

Generatornaher Kurzschluss

Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang
(maximales Gleichglied)

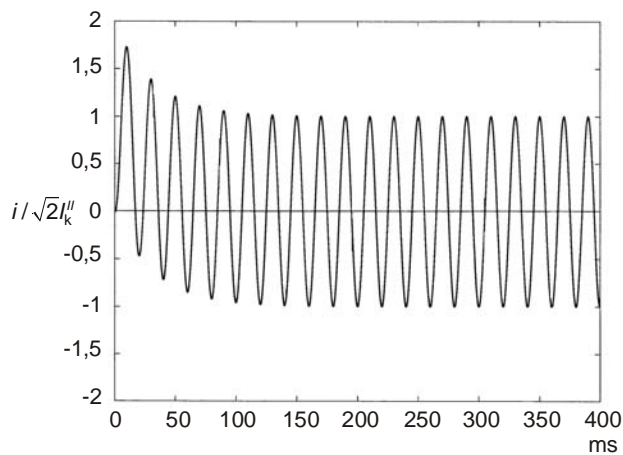


Kurzschluss im Spannungsmaximum
(kein Gleichglied)

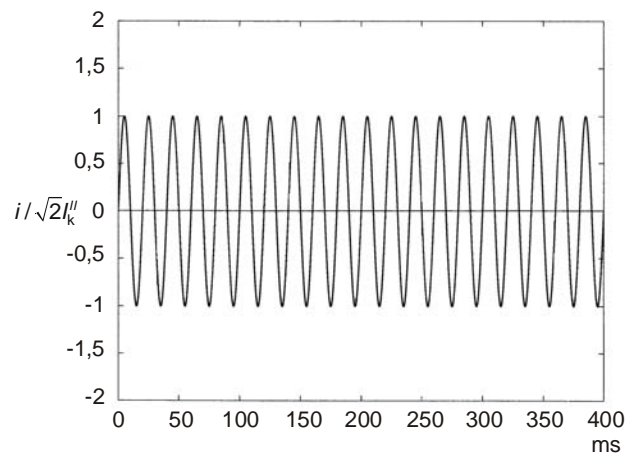


Generatorferner Kurzschluss

Kurzschluss im Spannungsnulldurchgang
(maximales Gleichglied)



Kurzschluss im Spannungsmaximum
(kein Gleichglied)



Univ. Hannover

Prof. Oswald

Generatornaher und generatorferner
Kurzschluss

Grdl. der EV

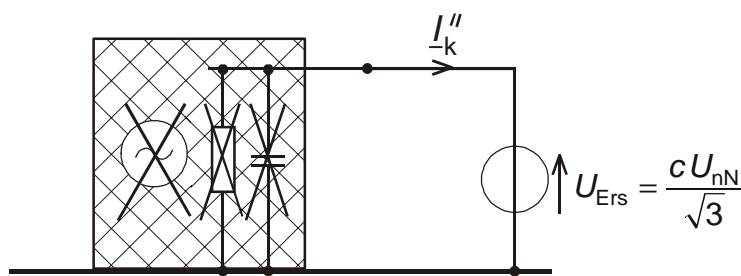
EV-K/02

Überlagerung von stationärem und Änderungszustand



Der Änderungszustand wird auch als Zustand der Rückwärtseinspeisung an der Kurzschlussstelle bezeichnet. Da Quellen keine Änderung erfahren ist das Netz in diesem Zustand passiv (alle Spannungsquellen sind kurzzuschließen und alle Stromquellen sind zu öffnen). Da der Strom an der Kurzschlussstelle vor dem KS Null ist, liefert der Änderungszustand exakt den Kurzschlussstrom. Für alle anderen Netzzweige liefert der Änderungszustand allein nur Näherungswerte, da sie vor dem KS i.a. nicht stromlos sind.

Methode der Ersatzspannung an der Kurzschlussstelle



alle nichtmotorischen Lastimpedanzen und alle Kapazitäten werden vernachlässigt. Dadurch und durch die Einführung der Ersatzspannung anstelle $U_F(0)$ wird die Kurzschlussberechnung unabhängig vom unsicheren Lastzustand vor dem Kurzschluss.

$c = 1,1$ Berechnung größter Kurzschlussströme
 $c = 1,0$ Berechnung kleinster Kurzschlussströme

Spannungsbeiwert

Univ. Hannover

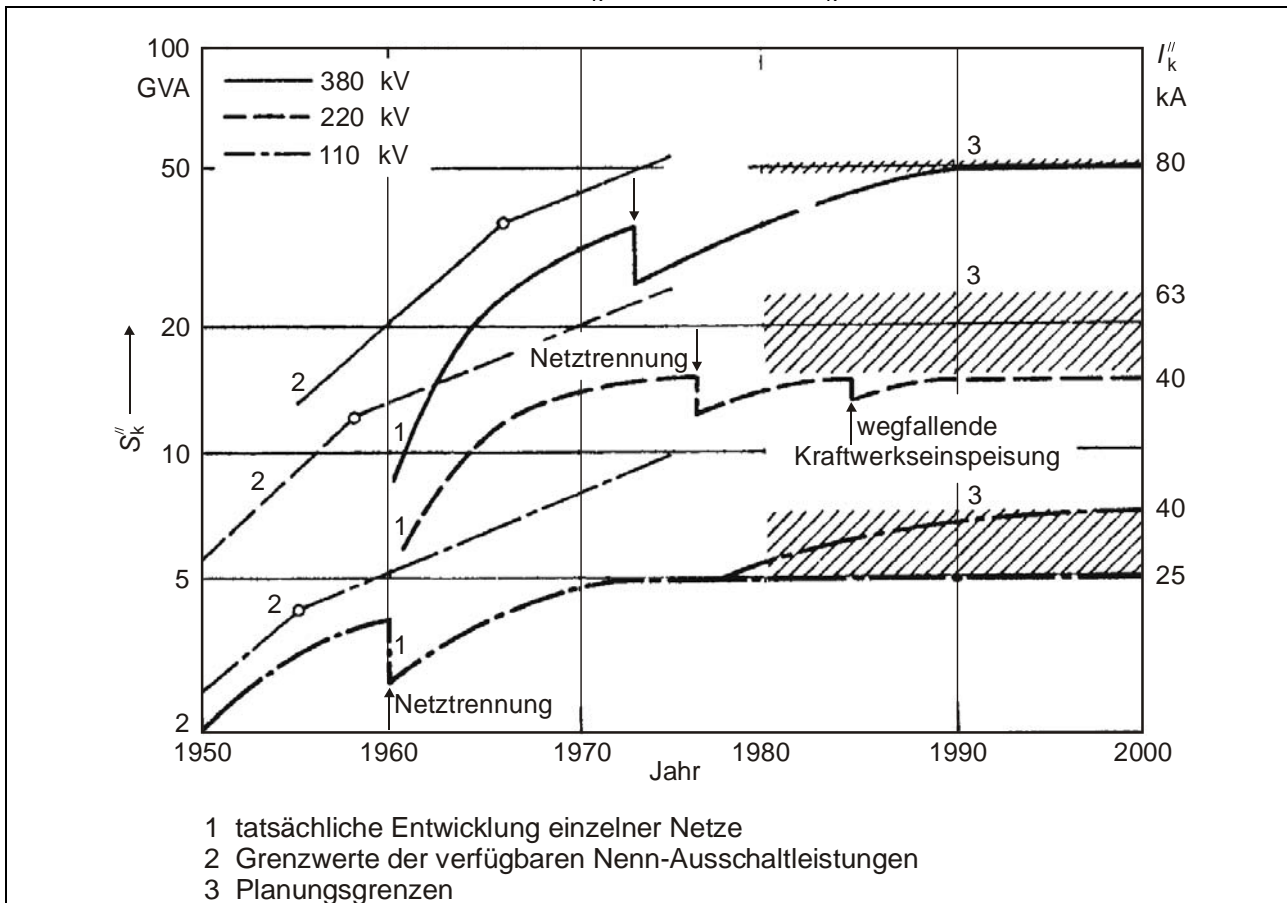
Überlagerungsverfahren zur
Kurzschlussberechnung

Grdl. der EV

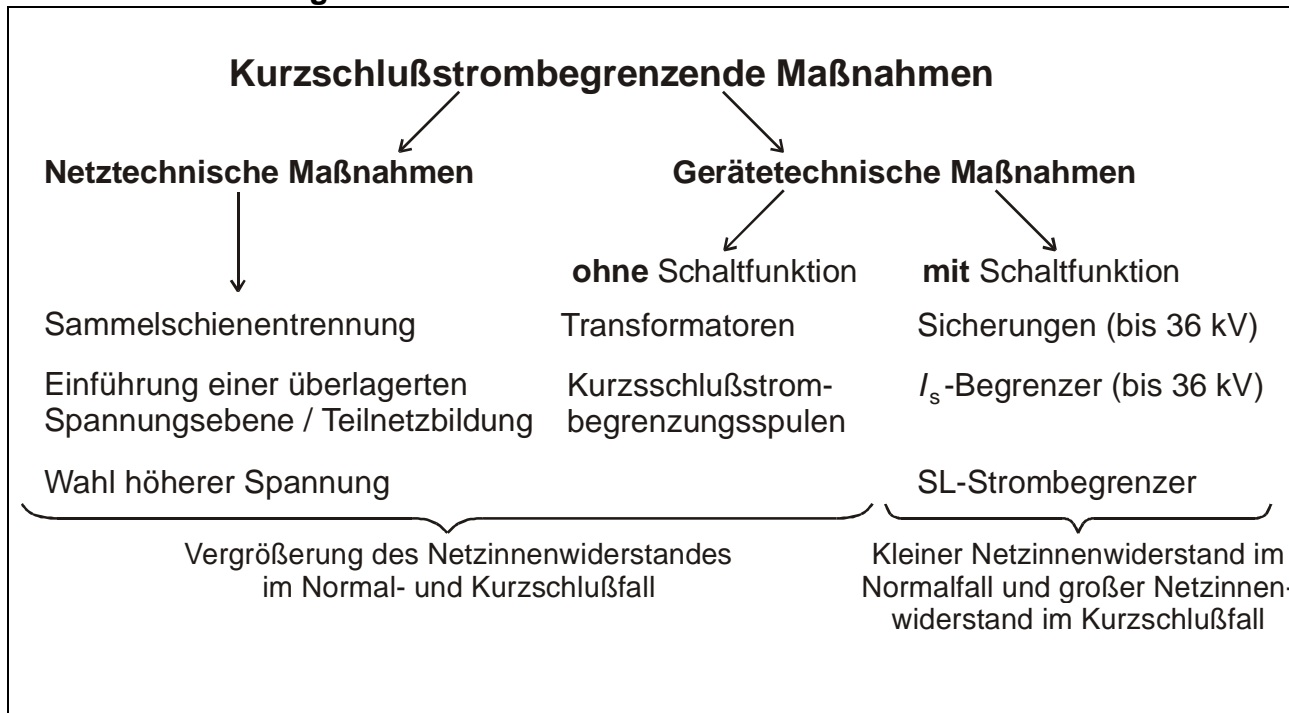
Prof. Oswald

EV-K/03

Entwicklung der Kurzschlußleistung S_k'' und -ströme I_k'' im westdeutschen Netz



Kurzschlußstrombegrenzende Maßnahmen



Univ. Hannover	Kurzschlußleistung und Kurzschlußstrombegrenzung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-K/04

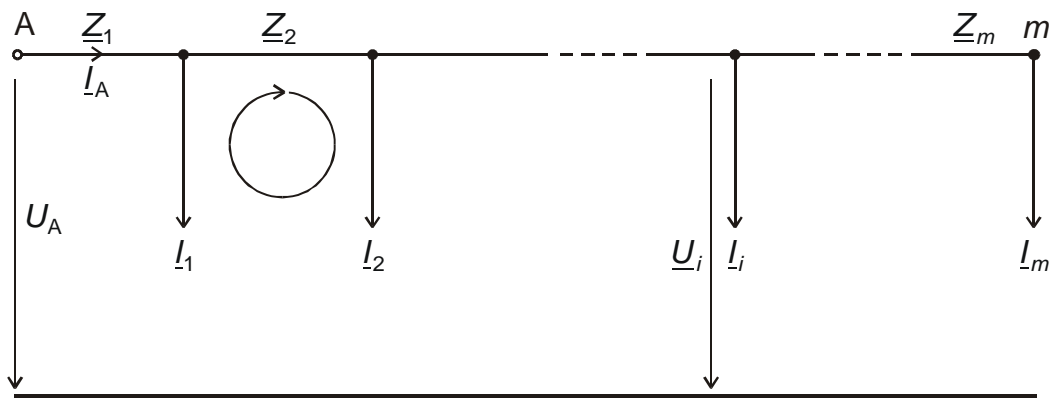
Abnehmercharakteristik

$P = f(U) = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^p$ $Q = g(U) = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^q$	Wirk- und Blindleistung als allgemeine Exponentialfunktion von der Spannung
	spezielle Abnehmercharakteristika: 1: $p=0, q=0 \rightarrow P$ und $Q = \text{const.}$ 2: $p=1, q=1 \rightarrow I_w$ und $I_b = \text{const.}$ 3: $p=2, q=2 \rightarrow R$ und $X = \text{const.}$

Spannungsabfall über einer Leitung

	Ersatzschaltung
	Zeigerbild mit Reihenfolge der Konstruktion □ $\underline{U}_A = \underline{U}_B + (R_L + jX_L)I_L$
$\underline{S}_A = 3\underline{U}_A I_A^* = P_A + jQ_A; \quad \underline{S}_B = 3\underline{U}_B I_B^* = P_B + jQ_B$ $\underline{S}_L = \underline{S}_A - \underline{S}_B = 3(\underline{U}_A - \underline{U}_B) I_L^* = 3\Delta\underline{U}_L I_L^* = 3\underline{Z}_L I_L^2 = 3R_L I_L^2 + 3jX_L I_L^2 = P_L + jQ_L$	komplexe Leistungen Leitungsverluste und Blindleistungsbedarf

Univ. Hannover	Abnehmercharakteristik und Zeigerbild	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-L/01



U_A gegeben

$$\underline{U}_1 = U_A - \underline{Z}_1 \underbrace{(I_1 + I_2 + \dots + I_m)}_{I_A} \quad (1)$$

$$\underline{U}_2 = U_1 - \underline{Z}_2 (I_2 + \dots + I_m) \quad (2)$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\underline{U}_m = U_{m-1} - \underline{Z}_m I_m \quad (m)$$

Die Maschensätze liefern m Gleichungen, die von oben nach unten gelöst werden können.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \\ \underline{U}_1 \\ \vdots \\ \underline{U}_{m-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & \underline{Z}_1 & \dots & \underline{Z}_1 \\ & \underline{Z}_2 & \dots & \underline{Z}_2 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \underline{Z}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix}$$

Ordnung der Maschensätze zu einer Matrixgleichung

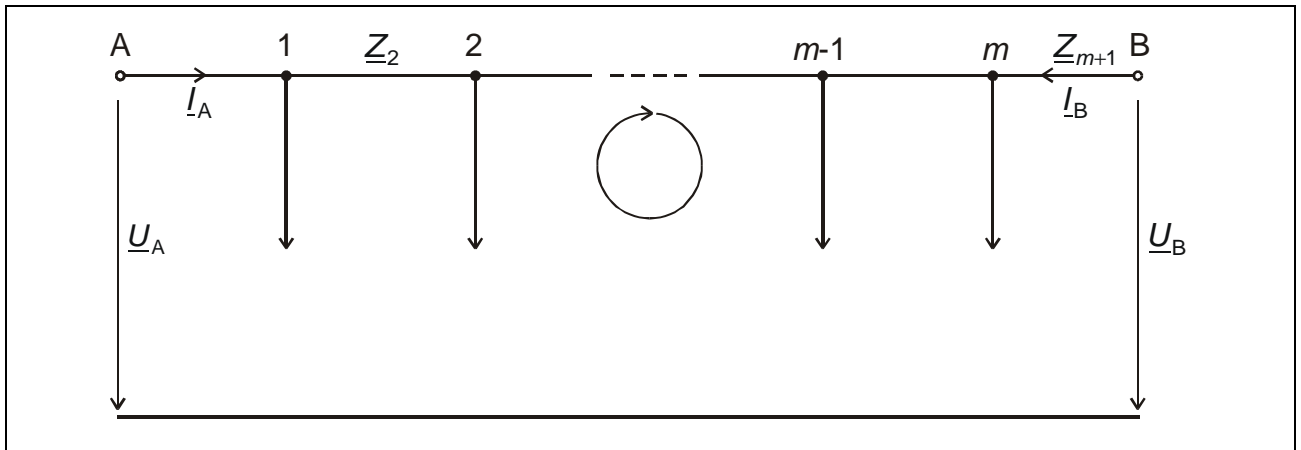
Univ. Hannover

Einseitig gespeiste Leitung
mit mehreren Abnahmen

Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-L/02



$\underline{U}_A - \underline{U}_B = \sum \Delta \underline{U} = \underline{Z}_1 (I_1 + I_2 + \dots + I_m - I_B) + \underline{Z}_1 (I_2 + \dots + I_m - I_B) + \dots + \underline{Z}_{m+1} (-I_B)$	Maschenumlauf A - B
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------

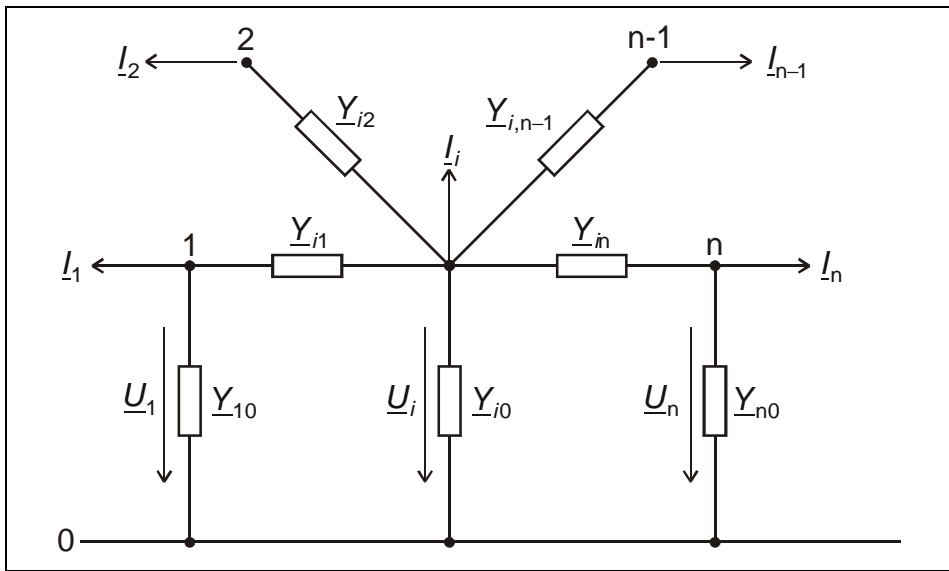
$0 = \underline{Z}_1 I_1 + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) I_2 + \dots + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_m) I_m - (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_m + \underline{Z}_{m+1}) I_B$	Fall a) $\underline{U}_B = \underline{U}_A$
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $I_B = \frac{\underline{Z}_1 I_1 + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) I_2 + \dots + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_m) I_m}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_m + \underline{Z}_{m+1}}$ </div>	„Drehmomentensatz“ mit Drehung um A
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $I_A = \frac{\underline{Z}_{m+1} I_m + (\underline{Z}_{m+1} + \underline{Z}_m) I_{m-1} + \dots + (\underline{Z}_{m+1} + \underline{Z}_m + \dots + \underline{Z}_2) I_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_m + \underline{Z}_{m+1}}$ </div>	„Drehmomentensatz“ mit Drehung um B

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> 1) Berechnung einer vorläufigen Stromverteilung wie unter Fall a) 2) Überlagerung eines Ausgleichstromes | Fall b) $\underline{U}_B \neq \underline{U}_A$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|

Geschlossen betriebene Ringnetze und offen betriebene Ringnetze mit gleichen Speisespannungen werden wie Fall a) behandelt.

Offen betriebene Ringnetze mit unterschiedlicher Speisespannung werden wie Fall b) behandelt.

Univ. Hannover	Zweiseitig gespeiste Leitung mit mehreren Abnahmen	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-L/03



Umgebung des i -ten Knotens

$$\underline{Y}_{i0}\underline{U}_{i0} + \underline{Y}_{i1}(\underline{U}_i - \underline{U}_1) + \underline{Y}_{i2}(\underline{U}_i - \underline{U}_2) + \dots + \underline{Y}_{in}(\underline{U}_i - \underline{U}_n) + I_i = 0$$

Strombilanz am i -ten Knoten:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Y}_{12} & \dots & -\underline{Y}_{1i} & \dots & -\underline{Y}_{1n} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \dots & -\underline{Y}_{2i} & \dots & -\underline{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -\underline{Y}_{i1} & -\underline{Y}_{i2} & \dots & \underline{Y}_{ii} & \dots & -\underline{Y}_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\underline{Y}_{n1} & -\underline{Y}_{n2} & \dots & -\underline{Y}_{ni} & \dots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_i \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_1 \\ -I_2 \\ \vdots \\ -I_i \\ \vdots \\ -I_n \end{bmatrix}$$

Knotenadmittanzmatrix (gegeben)
Knoten-spannung (gesucht)
Knoten-ströme (gegeben)

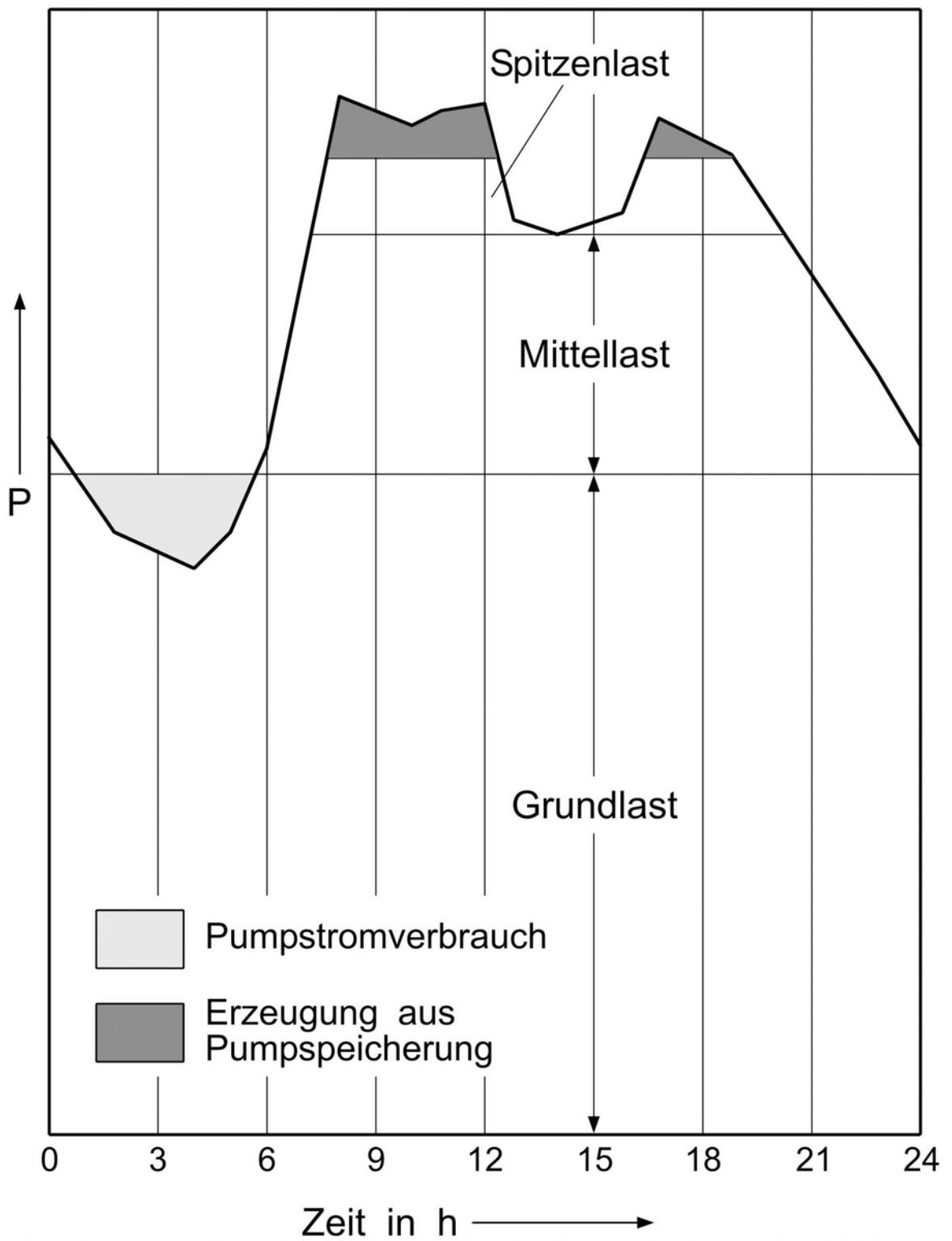
vollständiges Knoten-spannungsgleichungssystem

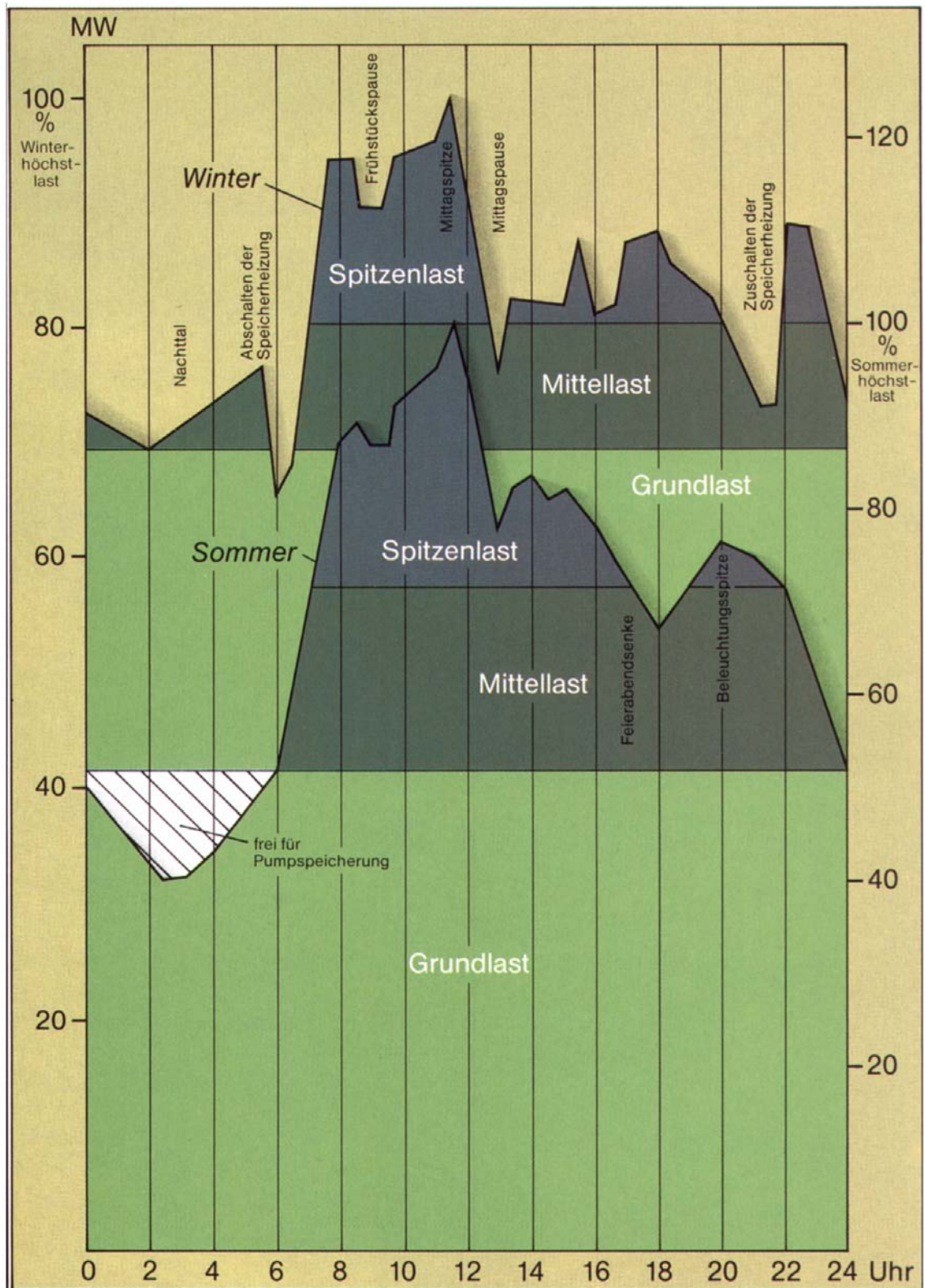
$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{i0} + \underline{Y}_{i1} + \underline{Y}_{i2} + \dots + \underline{Y}_{in}$$

Diagonalelemente

- 1) auf einem der Nichtdiagonalplätze i, k steht die negative Summe der zwischen den Knoten i und k liegenden Admittanzen.
 - 2) auf dem Diagonalplatz i steht die positive Summe der zwischen den Knoten i und dem Bezugsknoten liegenden Admittanzen und die negative Summe der Nichtdiagonalelemente der i -ten Zeile (Spalte).
- Die Knotenadmittanzmatrix ist gewöhnlich symmetrisch und schwach besetzt.
- Zur Lösung des Knotenspannungsgleichungssystems wird eine Spannung vorgegeben.

Bildungsgesetz für die Knotenadmittanzmatrix





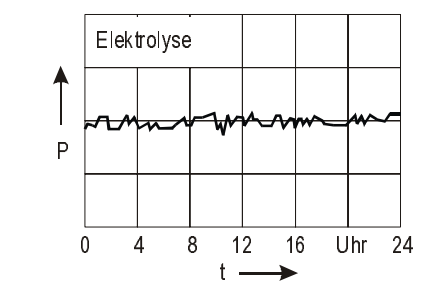
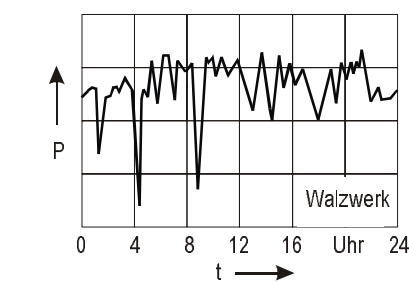
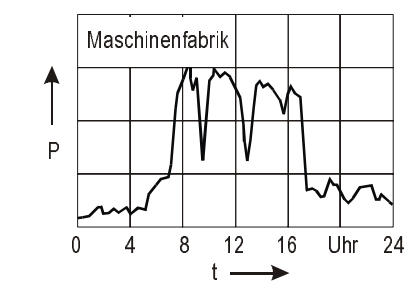
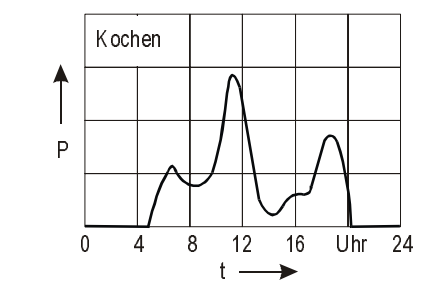
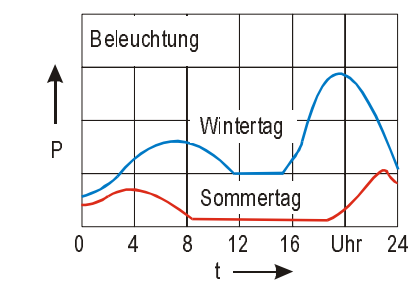
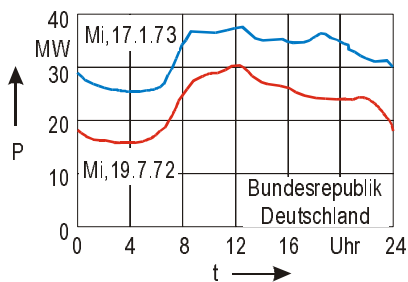
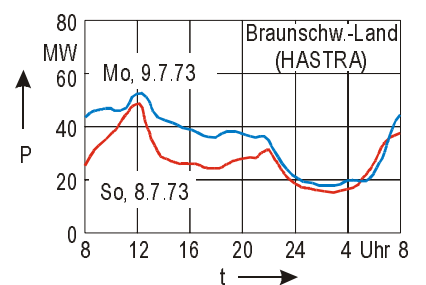
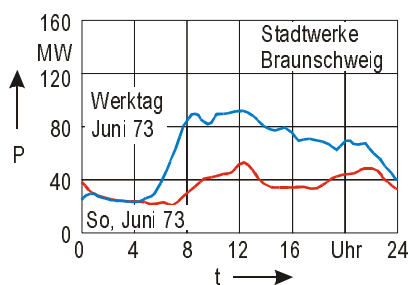
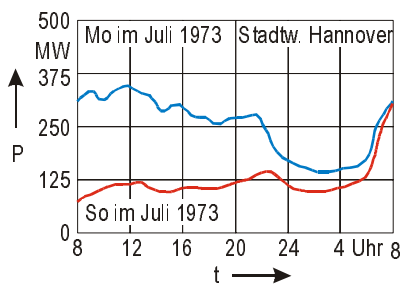
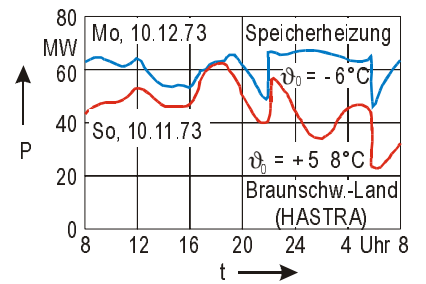
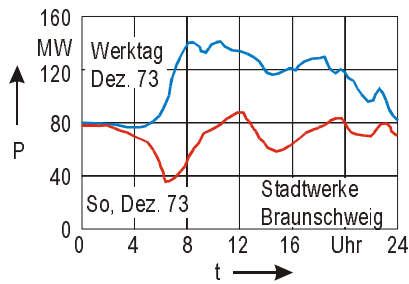
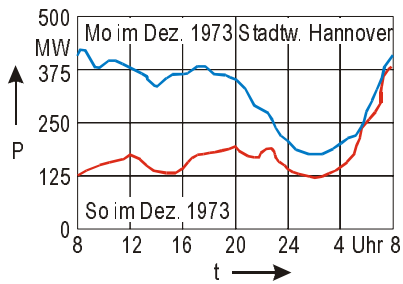
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Tagesbelastungslinie

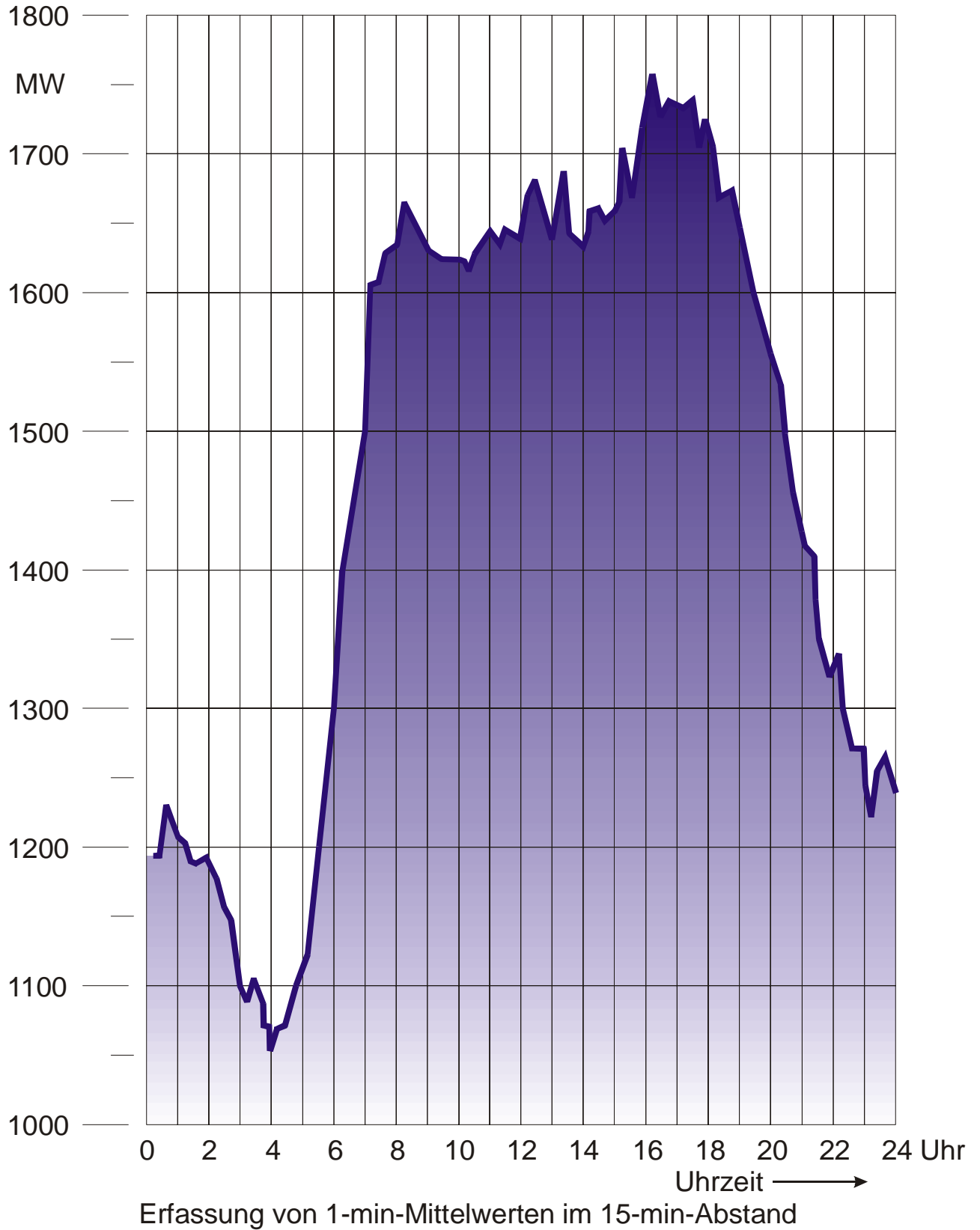
Grdl. der EV

EV-R/01a

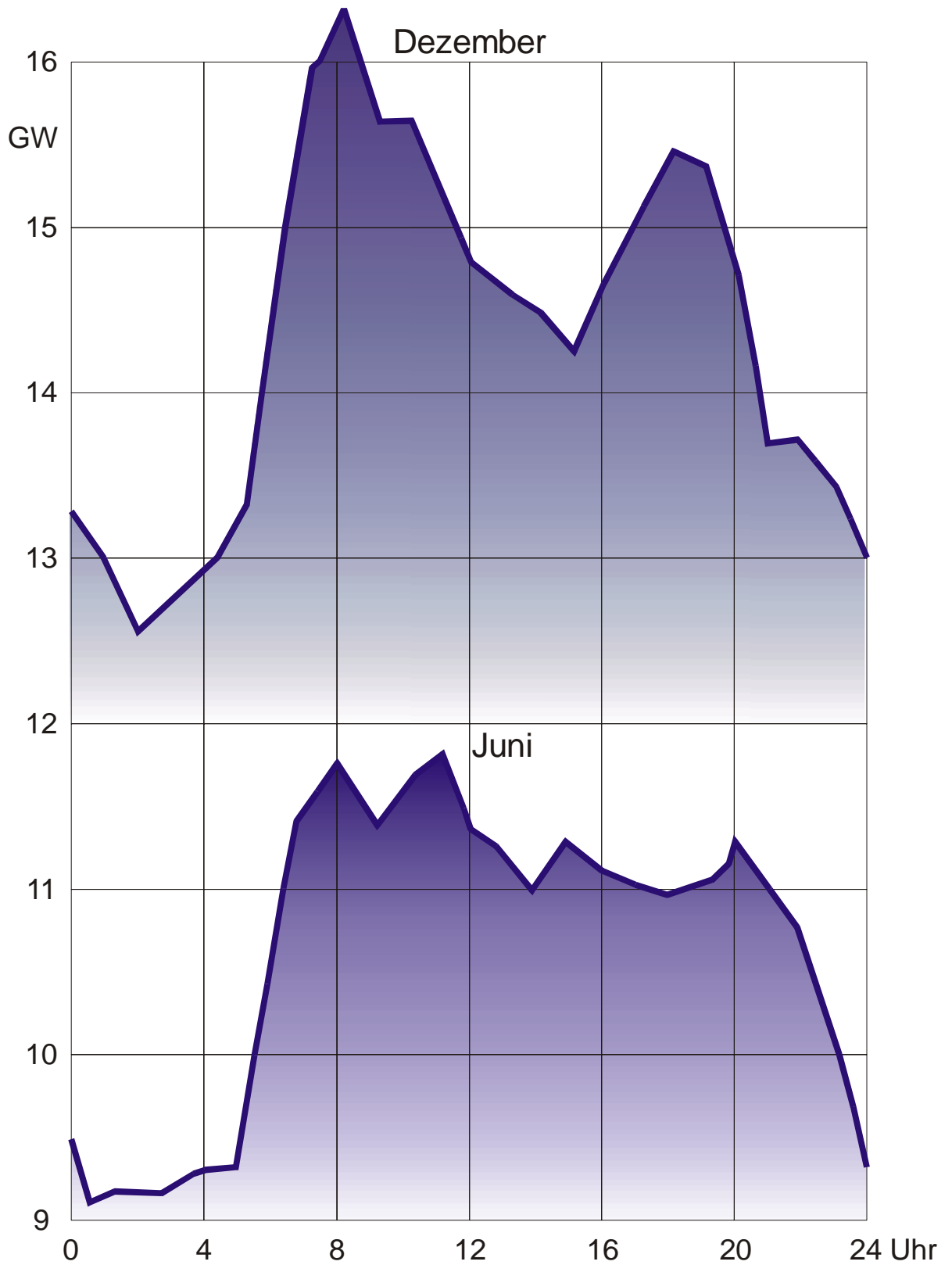


Univ. Hannover	Beispiele für Tagesbelastungskurven	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/02

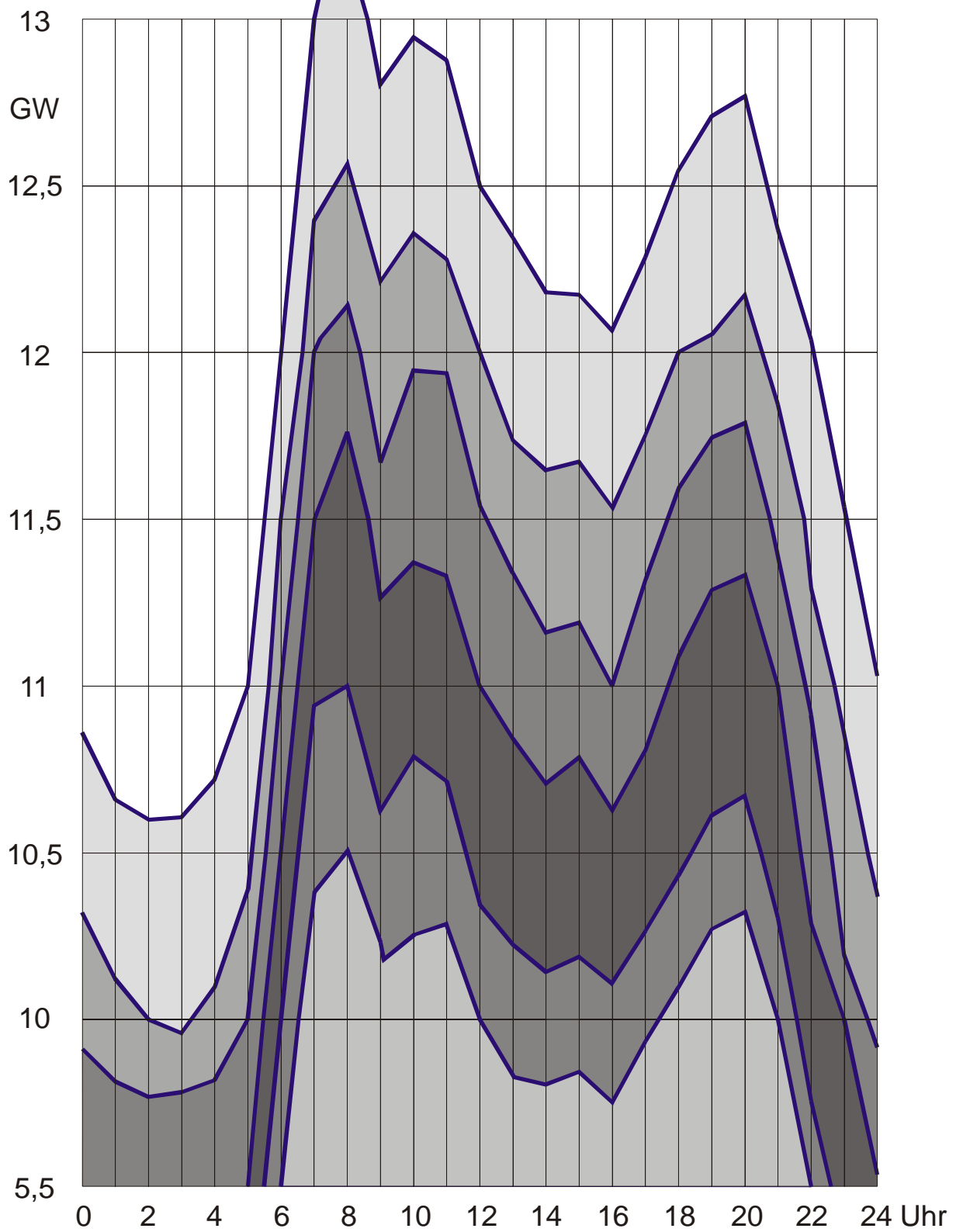
Datum Wotg Temp Vorm Nacm P_{max} Zeit MWh
 08.12.88 DO 1.0 KLAR BEDT 1763 16:30 35862.9



Univ. Hannover	Tagesbelastungskurve der BEW AG	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/03



Univ. Hannover	Winter- und Sommertagesbelastungskurve	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/04



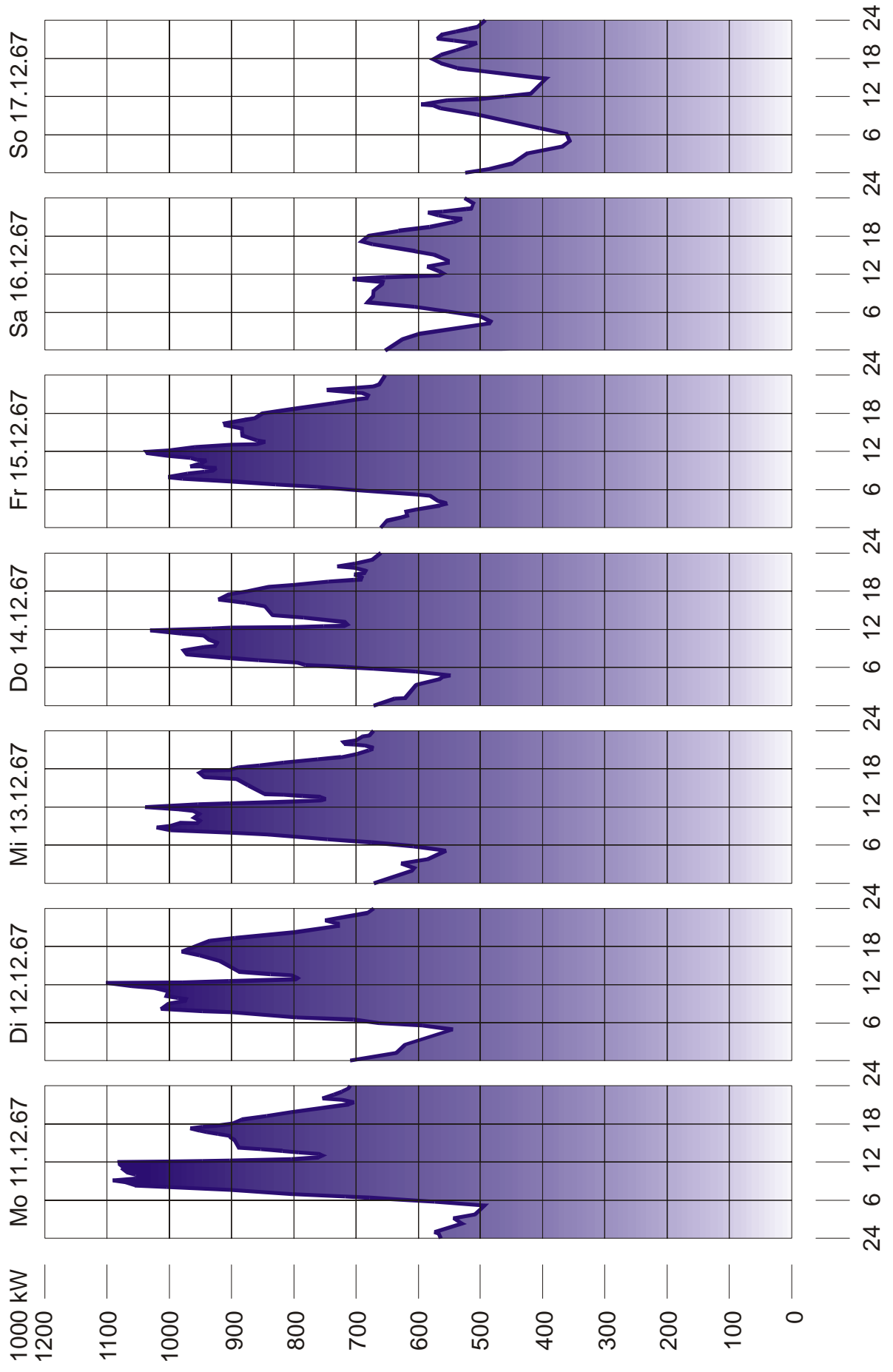
Univ. Hannover

Prof. Oswald

Mittlere 3. Mittwoch-Kurven

Grdl. der EV

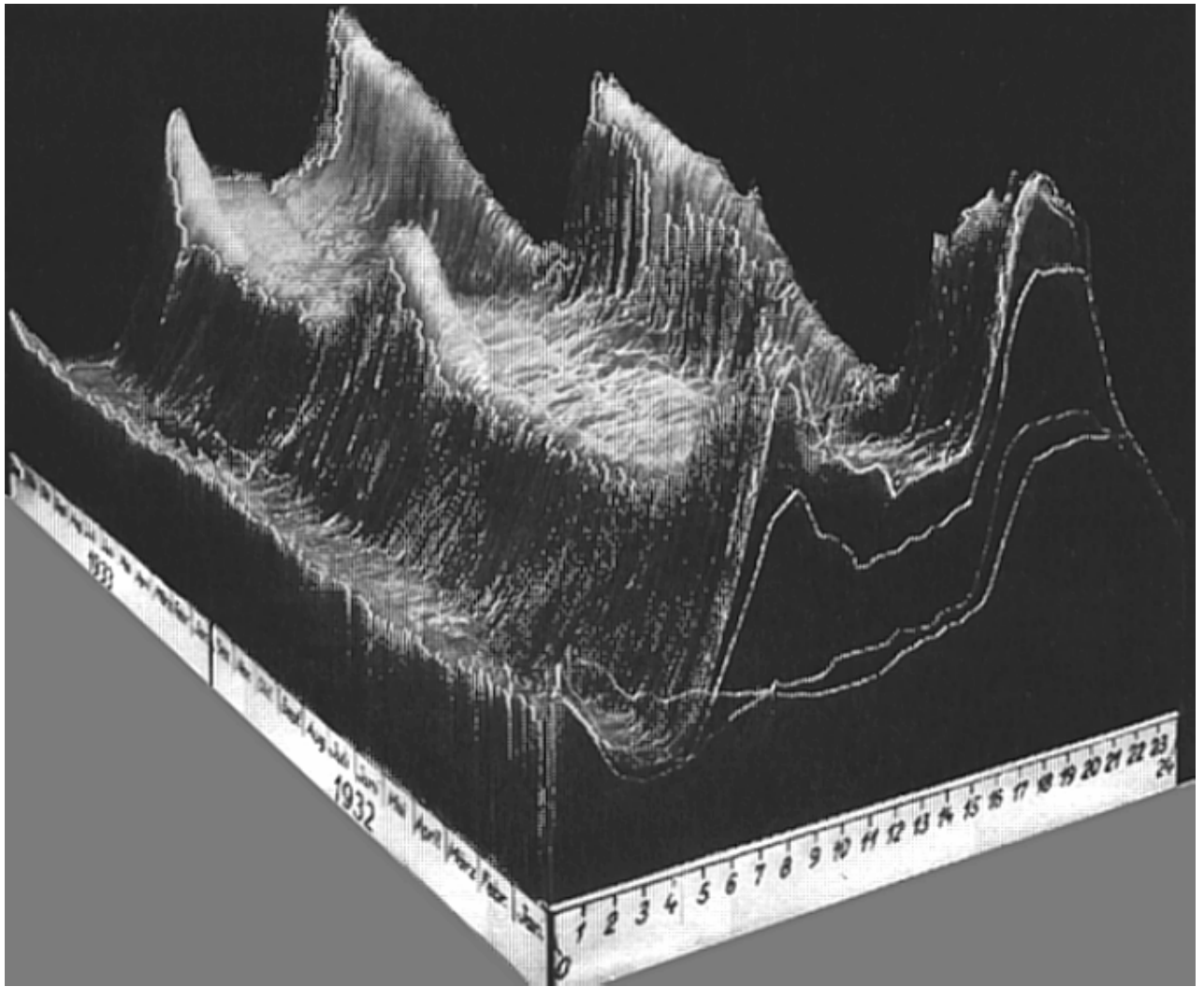
EV-R/05



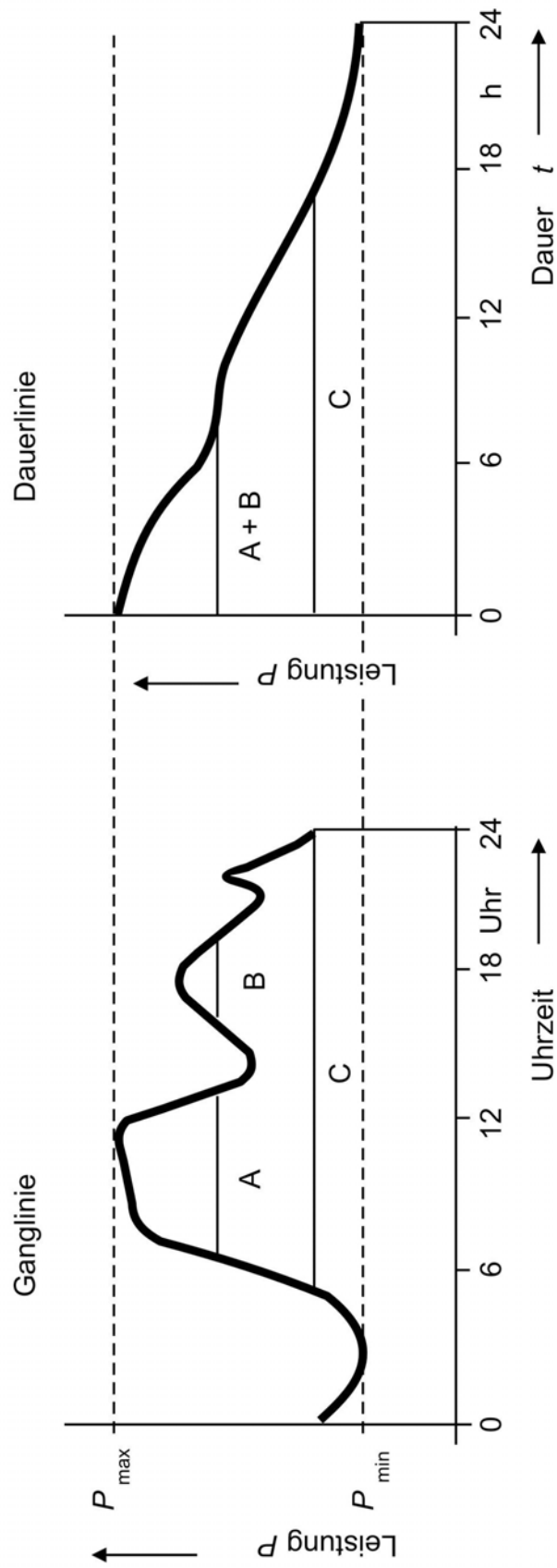
Univ. Hannover
 Prof. Oswald

Winterbelastungskurven einer
 Woche

Grdl. der EV
 EV-R/06



Univ. Hannover	Belastungsgebirge	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/07



P_{\max} ... Höchstleistung (Höchstlast)
 P_{\min} ... Tiefstleistung (Tiefstlast)
 P_{mittel} ... mittlere Leistung während T
 P_n ... Nennleistung

W ... Elektrische Arbeit
 T_n ... Nenn-Betriebsdauer
 T_d ... Ausnutzungsdauer
 T_m ... Benutzungsdauer
 m ... Belastungsgrad

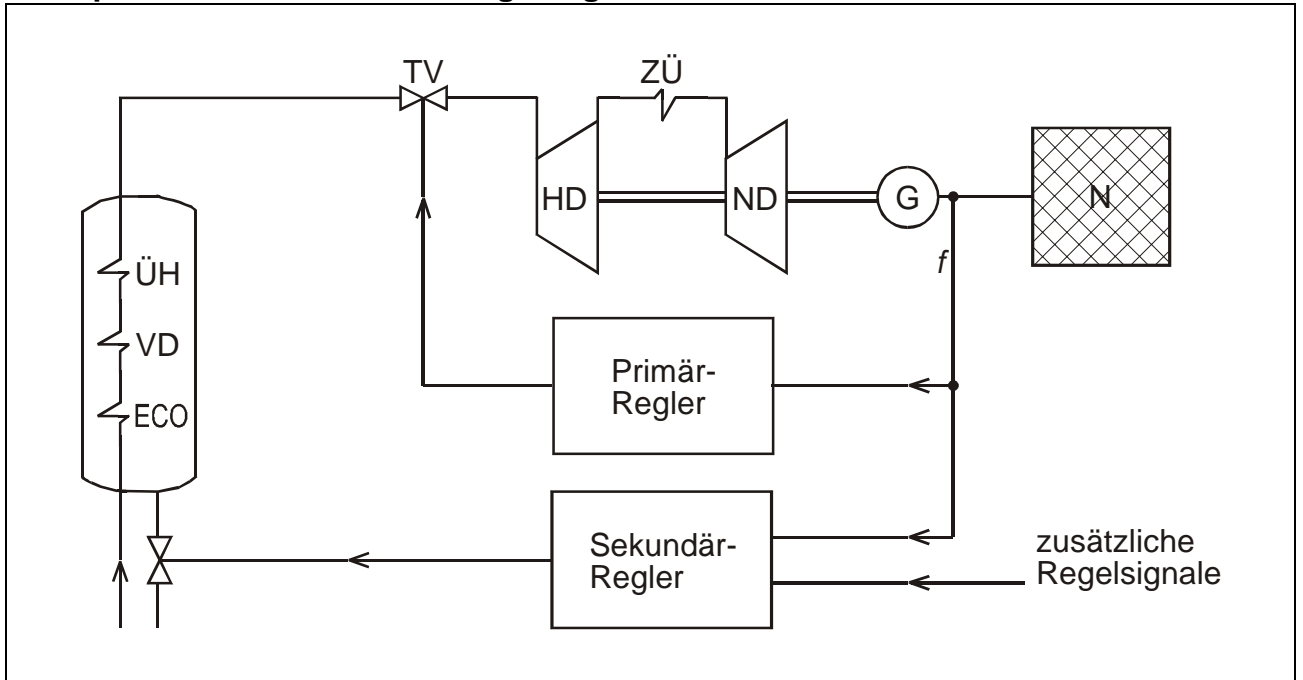
Univ. Hannover
 Prof. Oswald

Konstruktion der Leistungsdauerlinie

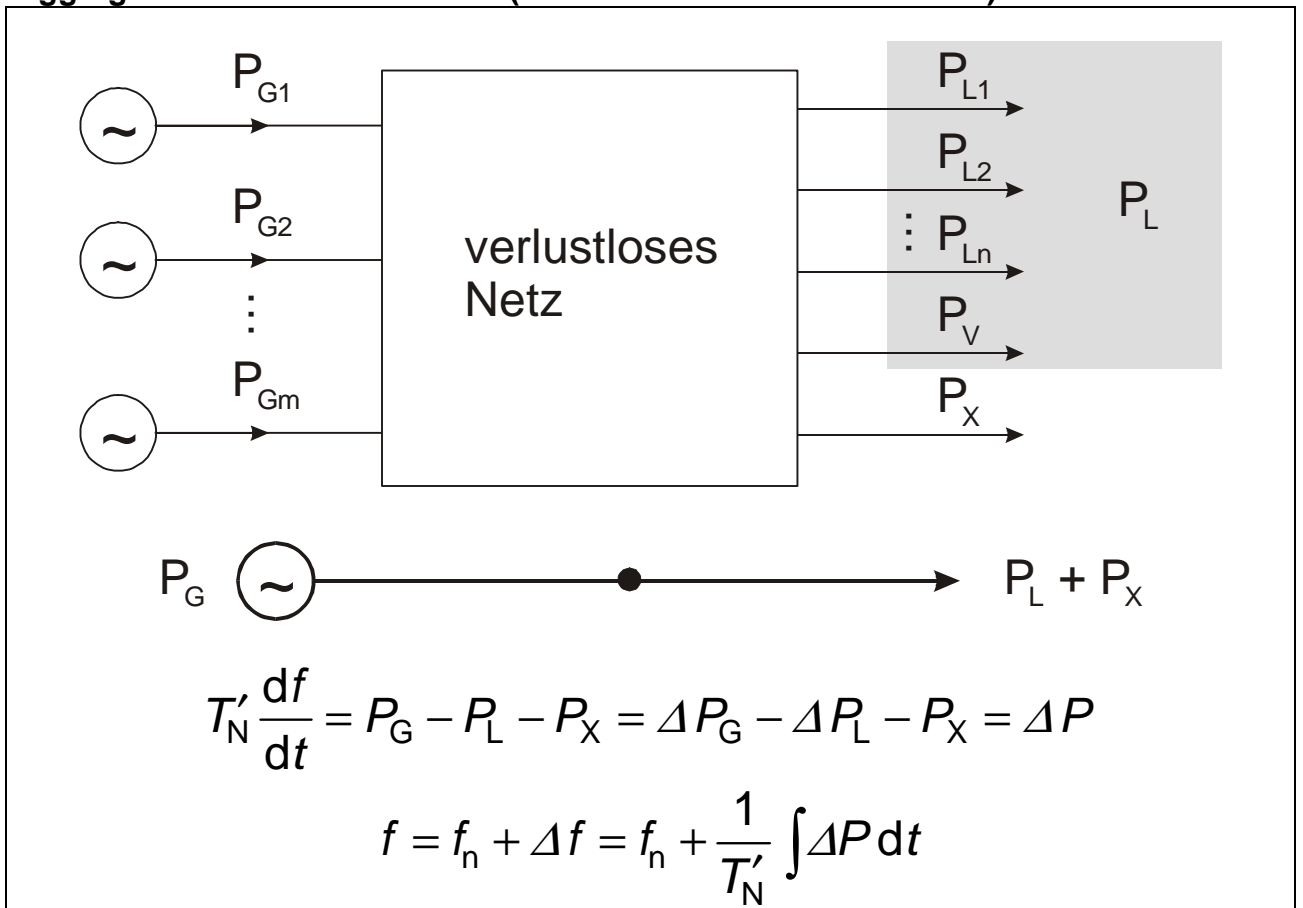
Grdl. der EV
 EV-R/08

Erzeuger		Verbraucher	
<p>P_E Engpassleistung</p>		<p>P_m mittlere Leistung</p>	
Arbeit während der Nennzeit T_N :			
$A = \int_0^{T_N} P dt$			
mittlere Leistung während der Nennzeit T_N :			
$P_m = \frac{1}{T_N} \int_0^{T_N} P dt$			
Leistungsverhältnis (Ungleichförmigkeitsgrad):			
$m_0 = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$			
Ausnutzungsdauer:		Benutzungsdauer:	
$T_n = \frac{A}{P_E}$		$T_m = \frac{A}{P_{\max}}$	
Ausnutzungsgrad:		Benutzungsgrad:	
$n = \frac{P_m}{P_E} = \frac{A}{P_E T_N} = \frac{T_n}{T_N}$		$m = \frac{P_m}{P_{\max}} = \frac{A}{P_{\max} T_N} = \frac{T_m}{T_N}$	
Reservefaktor:		$r = \frac{P_E}{P_{\max}} = \frac{T_m}{T_n} = \frac{m}{n} > 1$	
tatsächlicher Reservefaktor:		$r_v = \frac{P_v}{P_{\max}} < r$	
P_v verfügbare Leistung = P_E – Leistungsdefizit durch Reparatur und Instandhaltung			
Univ. Hannover	Kenngrößen für Erzeugung und Verbrauch		Grdl. der EV
Prof. Oswald			EV-R/09

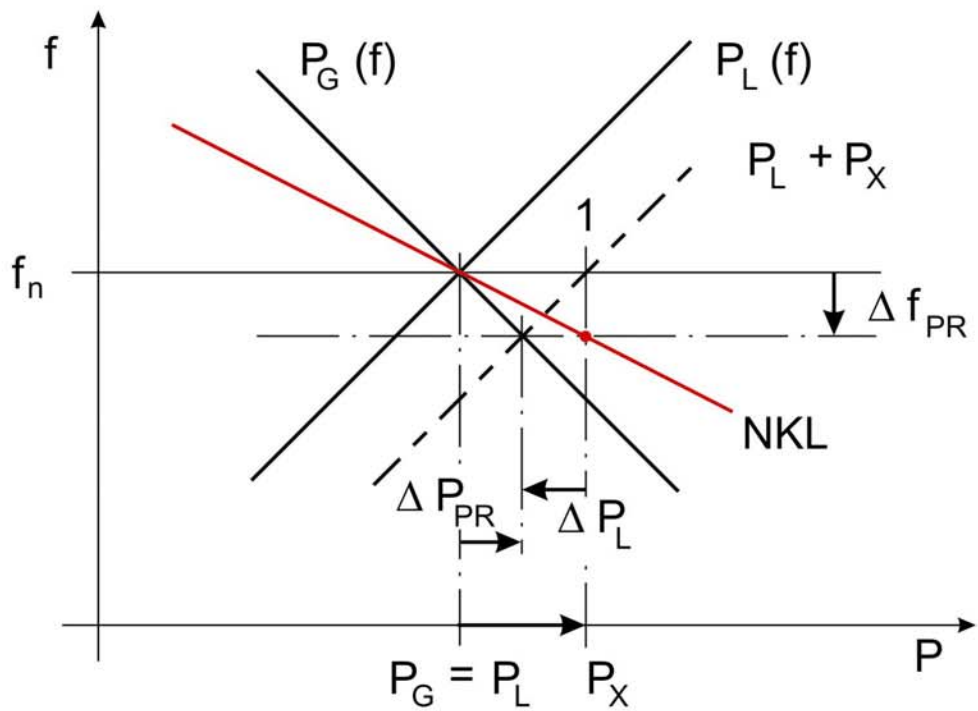
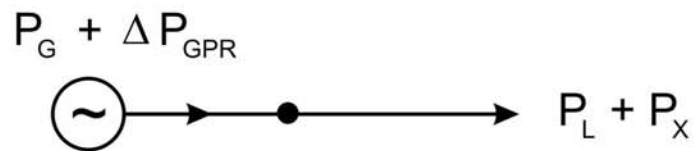
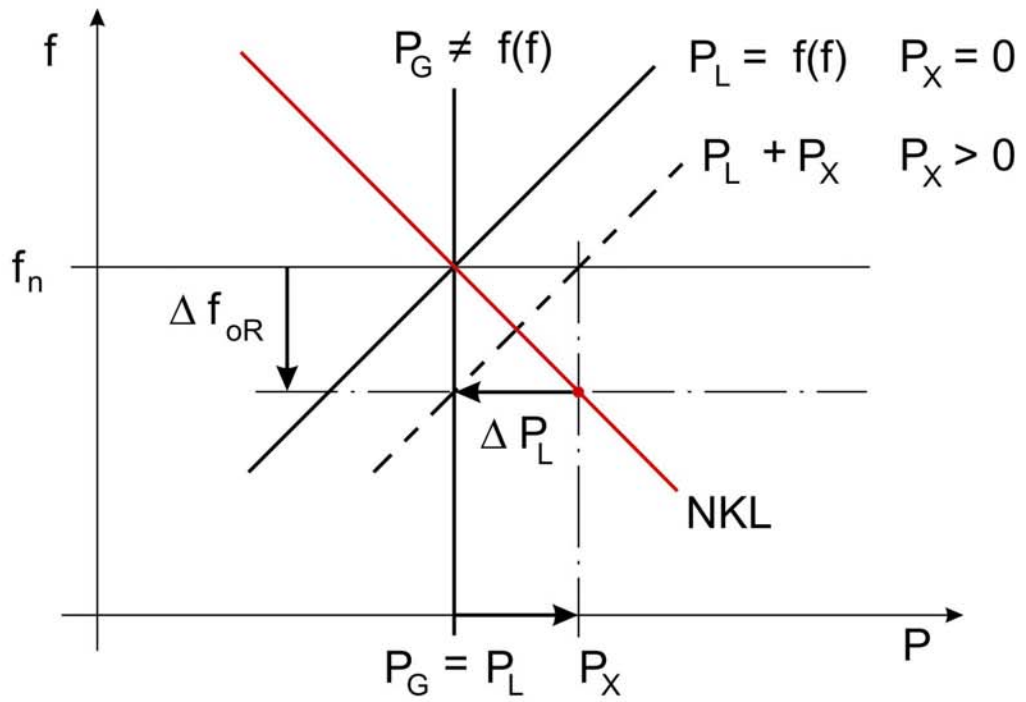
Prinzipschaltbild der Turbinenregelung

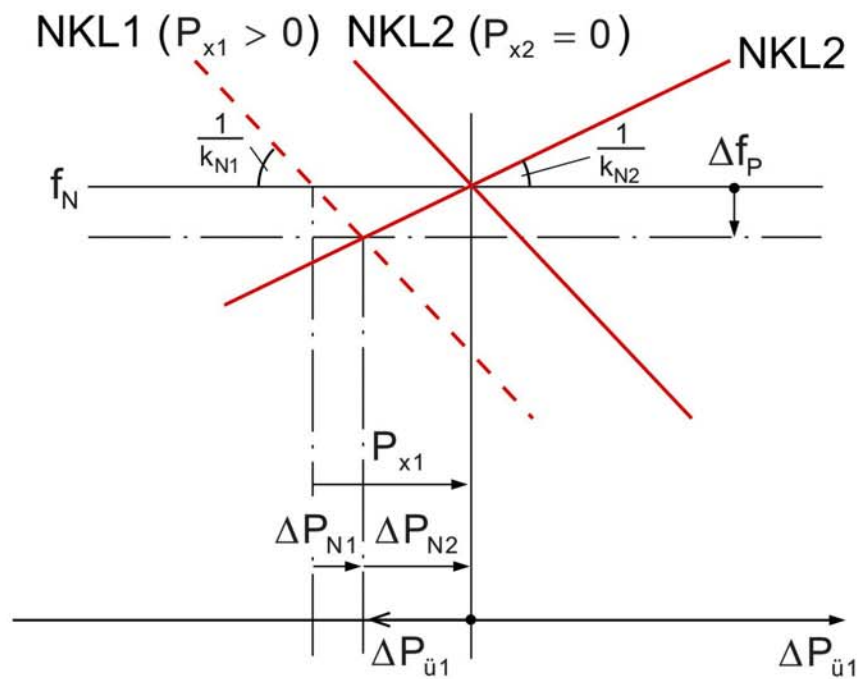
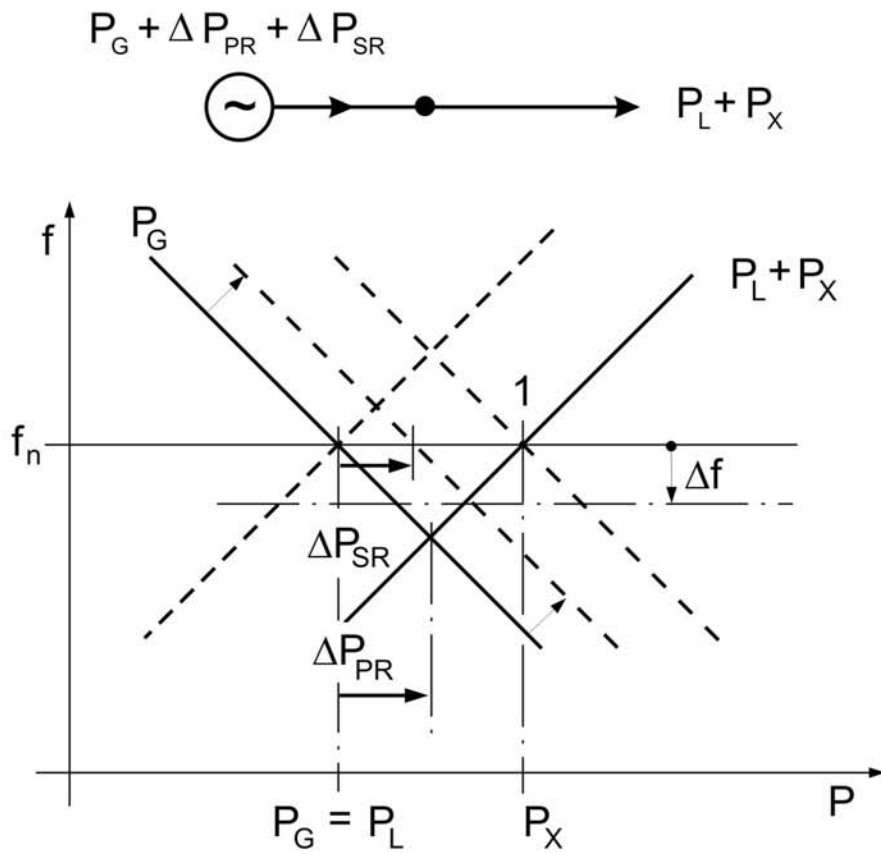


Aggregiertes Modell des Netzes (auch Punkt- oder Bilanzmodell)

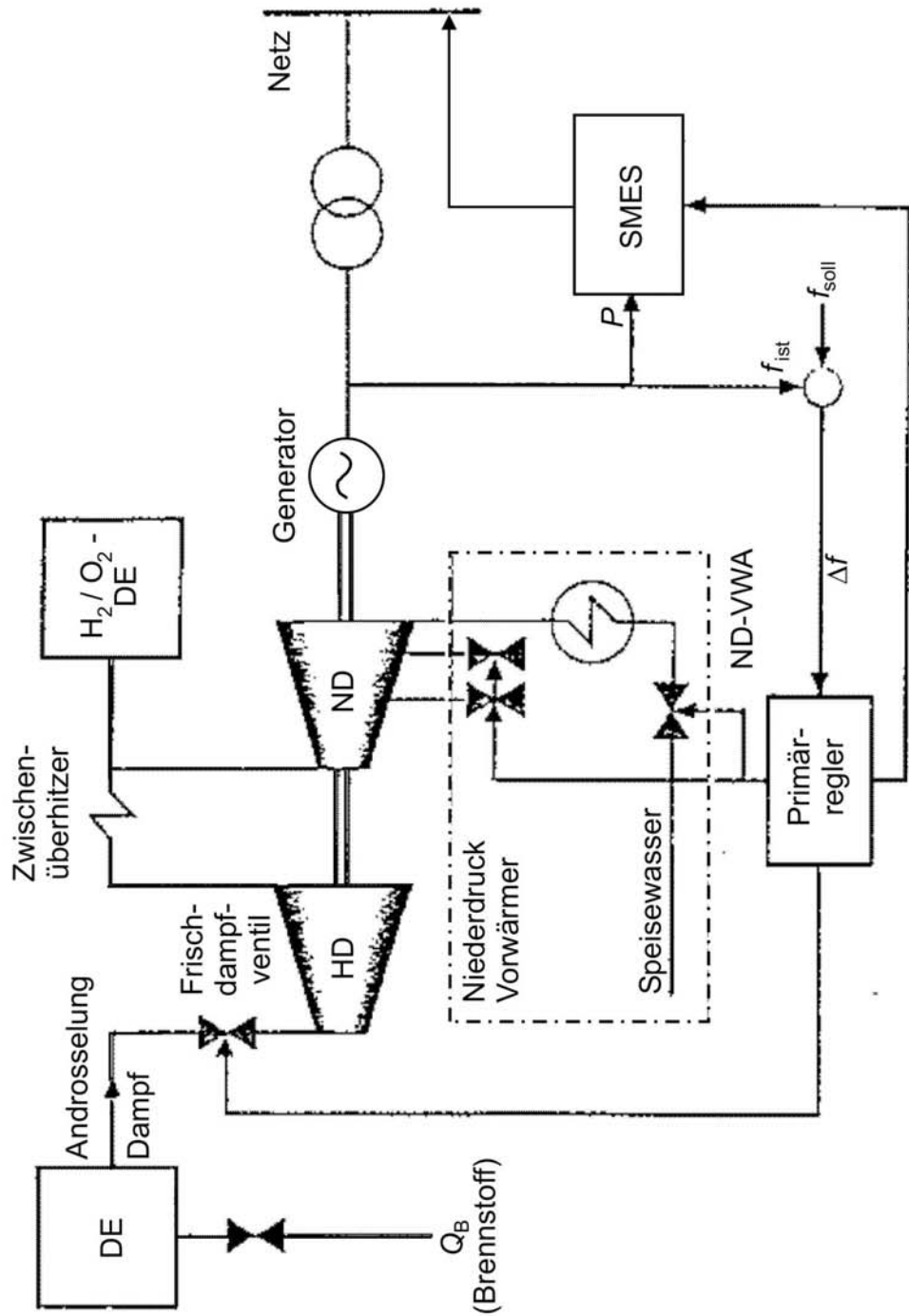


Univ. Hannover	Prinzipbild der Turbinenregelung und aggregiertes Modell	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/11



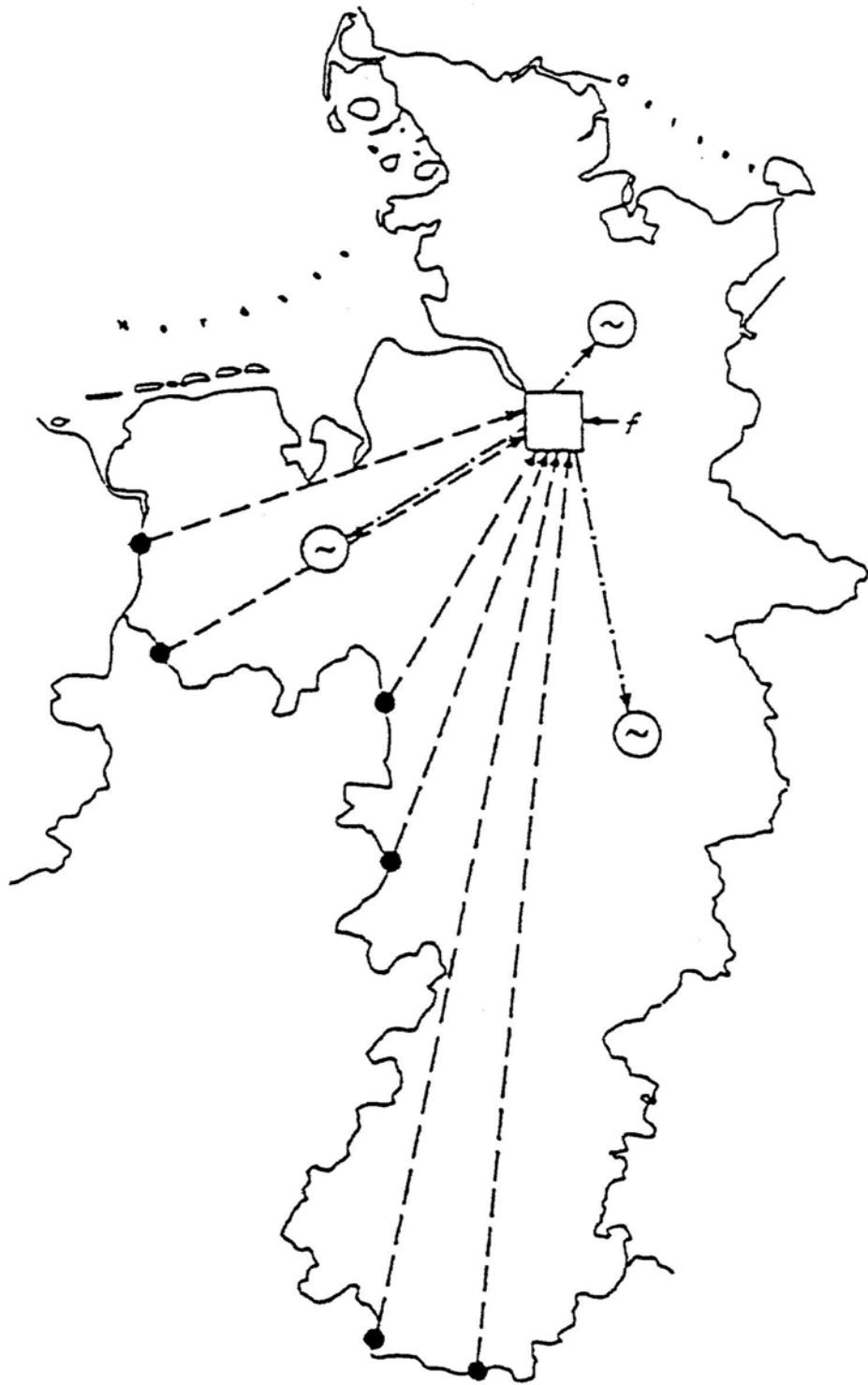


Univ. Hannover	Sekundärregelung im Insel- und Verbundnetz	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/13



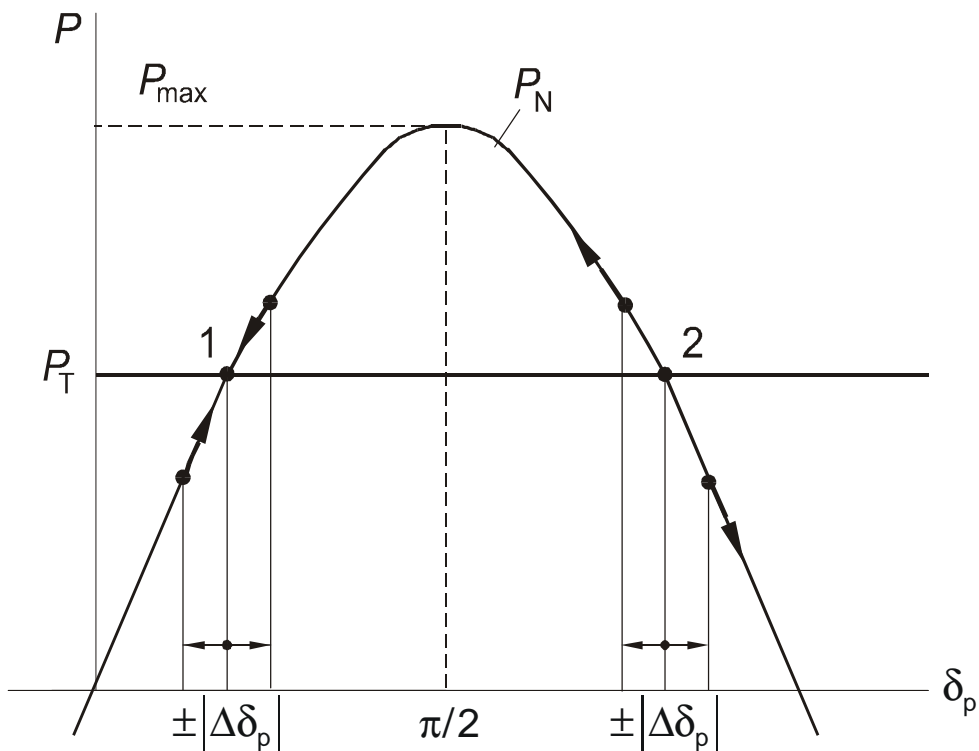
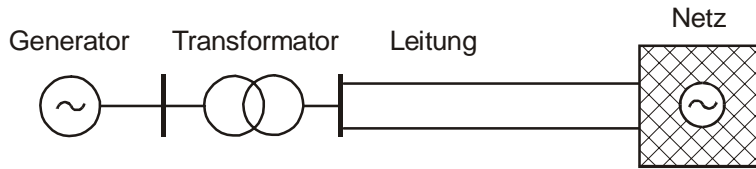
ND Niederdruck HD Hochdruck SMES supraleitender magnetischer Energiespeicher DE Dampferzeuger

Univ. Hannover	Bereitstellung der Primärregelleistung durch SMES, Androsselung, Vorwärmerabschaltung (VWA) und H_2/O_2 -Dampferzeuger	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/14

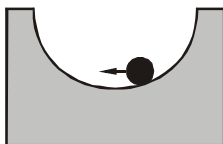


- Übergabewirkleistungs-Istwerte von den Kuppelstellen zum Verbund
- Regelbefehle zu den Regelblöcken
- lokaler Istwert der Netzfrequenz

Univ. Hannover	Meß- und Stellglieder für die Übergabewirkleistungs-Frequenzregelung	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-R/15



$$\frac{d^2 \Delta \delta_p}{dt^2} = -k_m \Delta P_N; \quad \Delta P_N = \left. \frac{dP_N}{d\delta_p} \right|_{AP} \Delta \delta_p; \quad P_{\max} = 3 \frac{U_p U_N}{X_d + X_N}$$



Punkt 1: stabil



Stabilitätsgrenze: indifferent



Punkt 2: instabil

mechanisches Analogon

$$\frac{dP_N}{d\delta_p} = 3 \frac{U_p U_N}{X_d + X_N} \cos \delta_p > 0 \quad \text{d.h.:} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \delta_p \leq \frac{\pi}{2}$$

Stabilitätskriterium

aus möglichst großer Maximalleistung P_{\max} leiten sich ab:

1. möglichst große Polradspannung (Übererregung, schnelle Spannungsregelung → künstliche Stabilität)
2. möglichst kleine Netzreaktanz (gut vermaschtes Netz, Reihenkompensation)

Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung

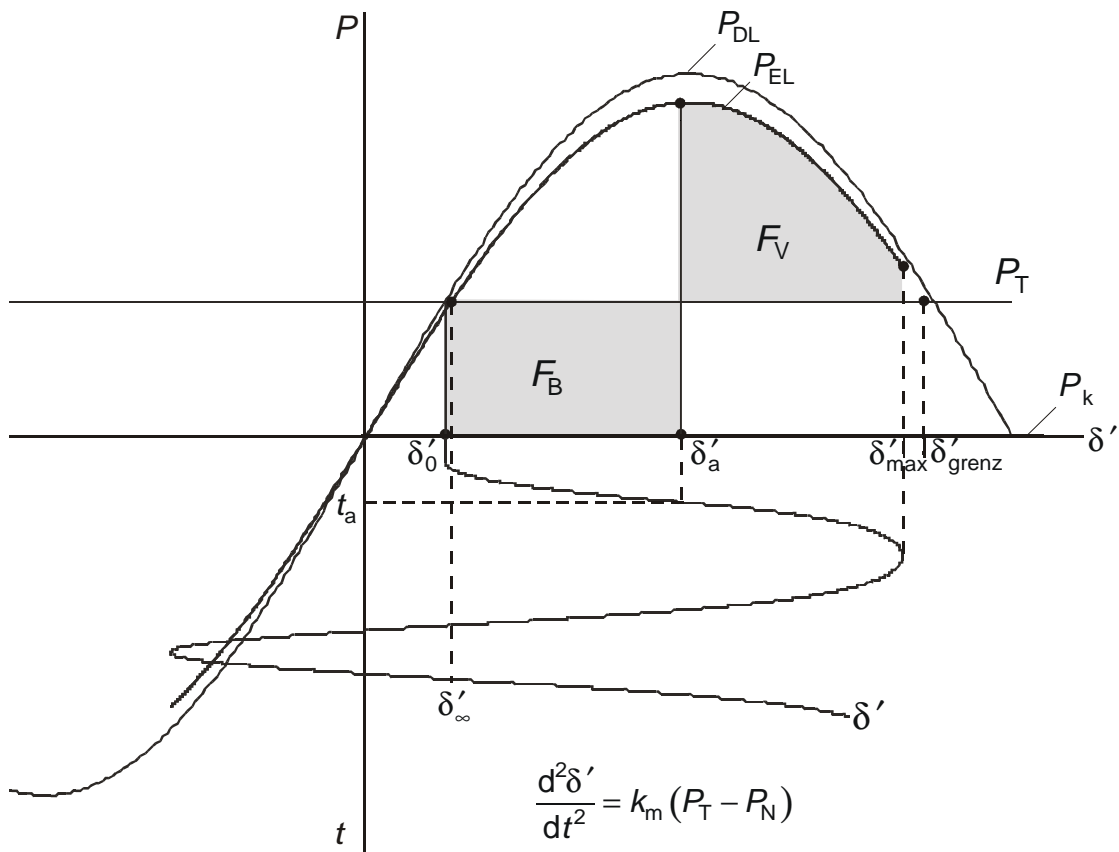
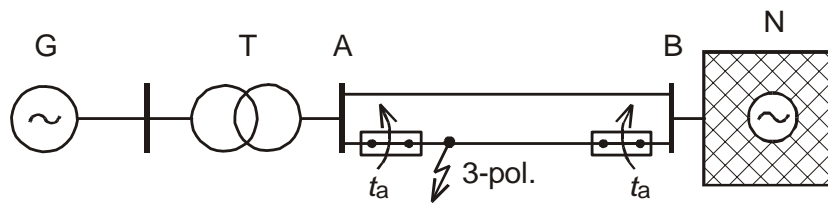
Univ. Hannover

Statische Stabilität

Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-S/01



$$P_{DL} = 3 \frac{U' U_N}{X'_d + X_{NDL}} \sin \delta' = P_N \quad \text{für den Betrieb mit Doppelleitung}$$

$$P_{EL} = 3 \frac{U' U_N}{X'_d + X_{NEL}} \sin \delta' = P_N \quad \text{für den Betrieb mit Einfachleitung}$$

$$P_k = 0 = P_N \quad \text{für dreipoligen Kurzschluss}$$

Flächensatz: $F_V = F_B$

Stabilitätskriterium

aus der Forderung nach möglichst großer verfügbarer Verzögerungsfläche F_V leiten sich ab:

Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung

1. schnelle selektive Kurzschlussabschaltung
2. möglichst großes U' (Übererregung, Spannungsregelung)
3. möglichst kleines X_N (gut vermaschtes Netz, Reihenkompensation)

Univ. Hannover

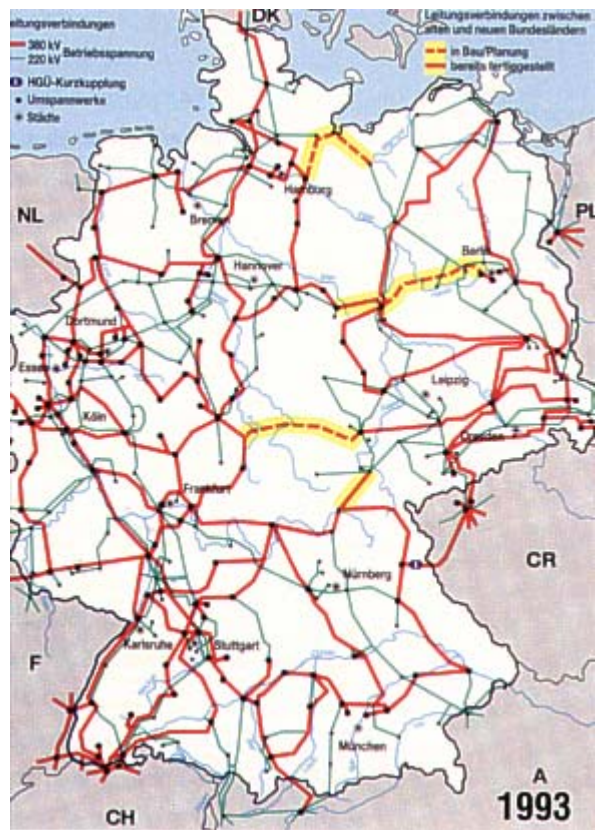
Flächensatz

Grdl. der EV

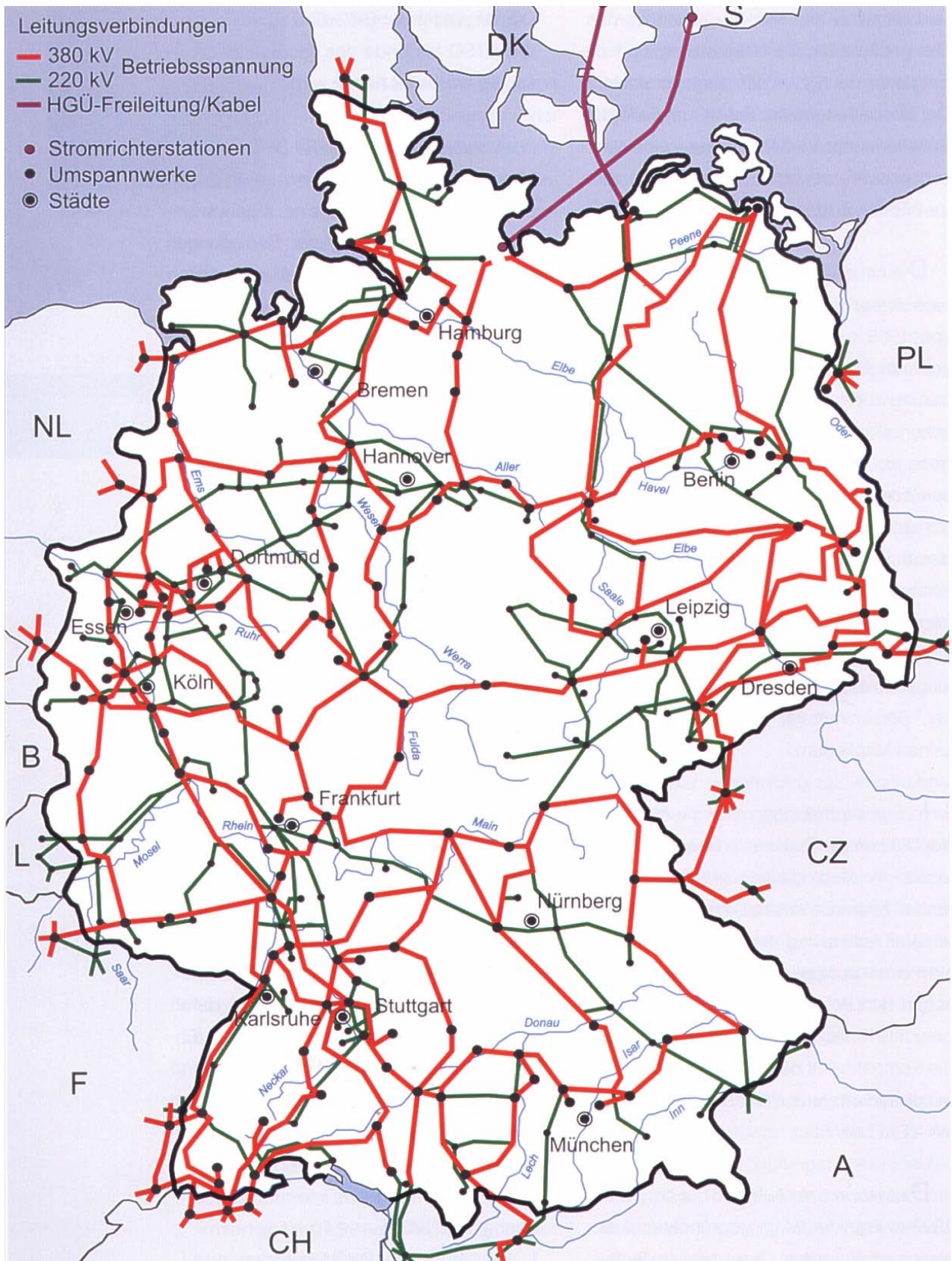
Prof. Oswald

zur transienten Stabilität

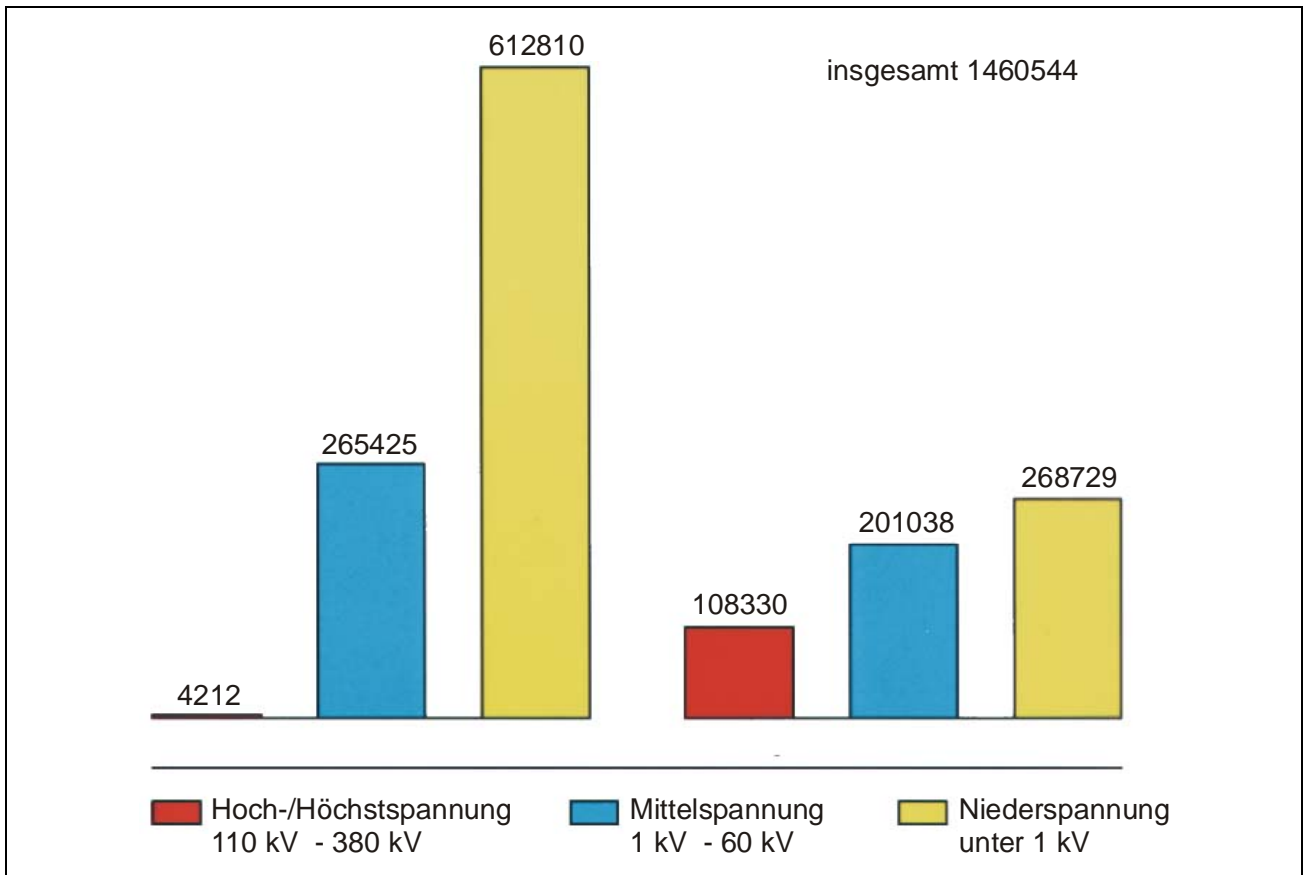
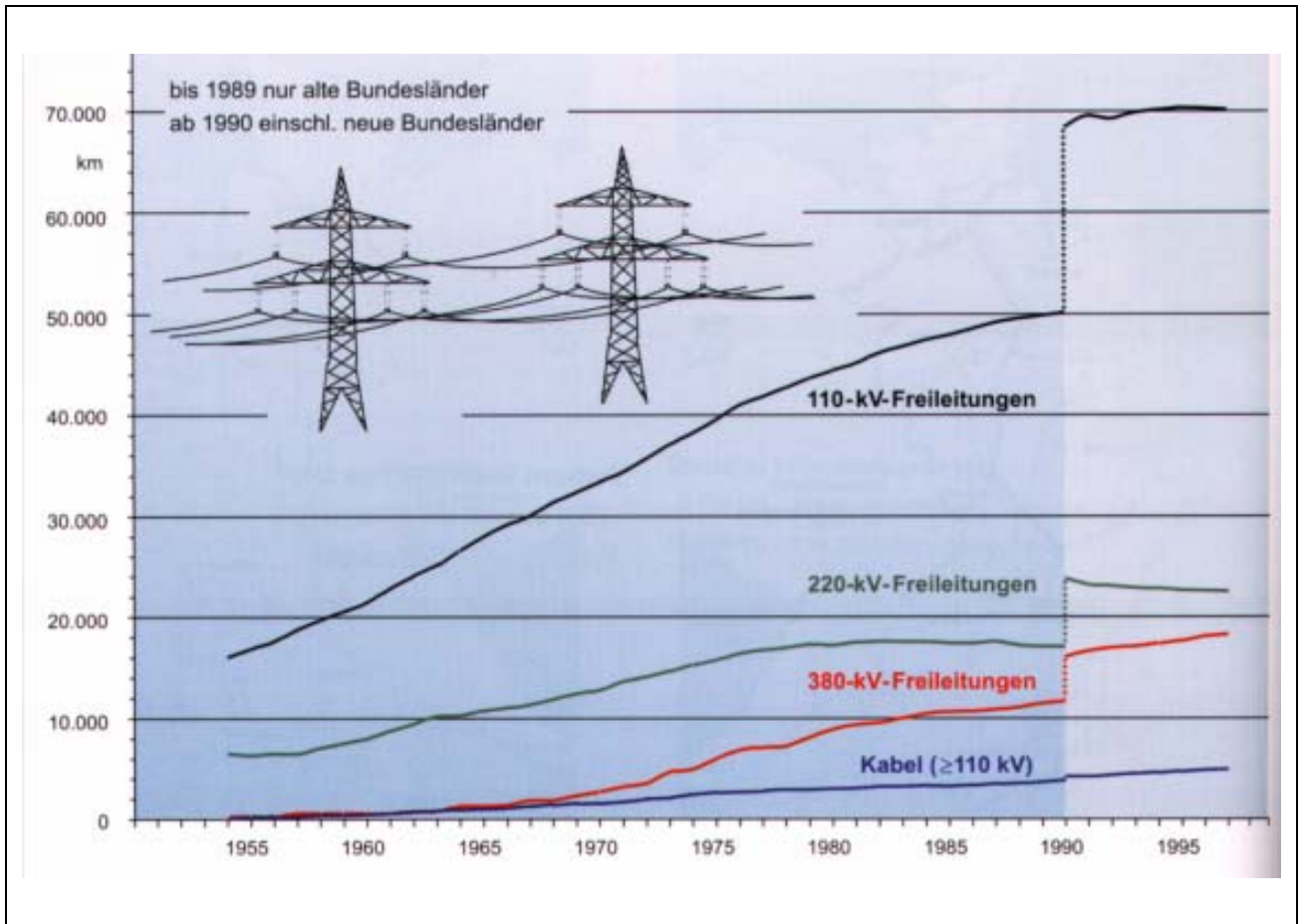
EV-S/02



Univ. Hannover	Entwicklung des deutschen Verbundnetzes	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/01



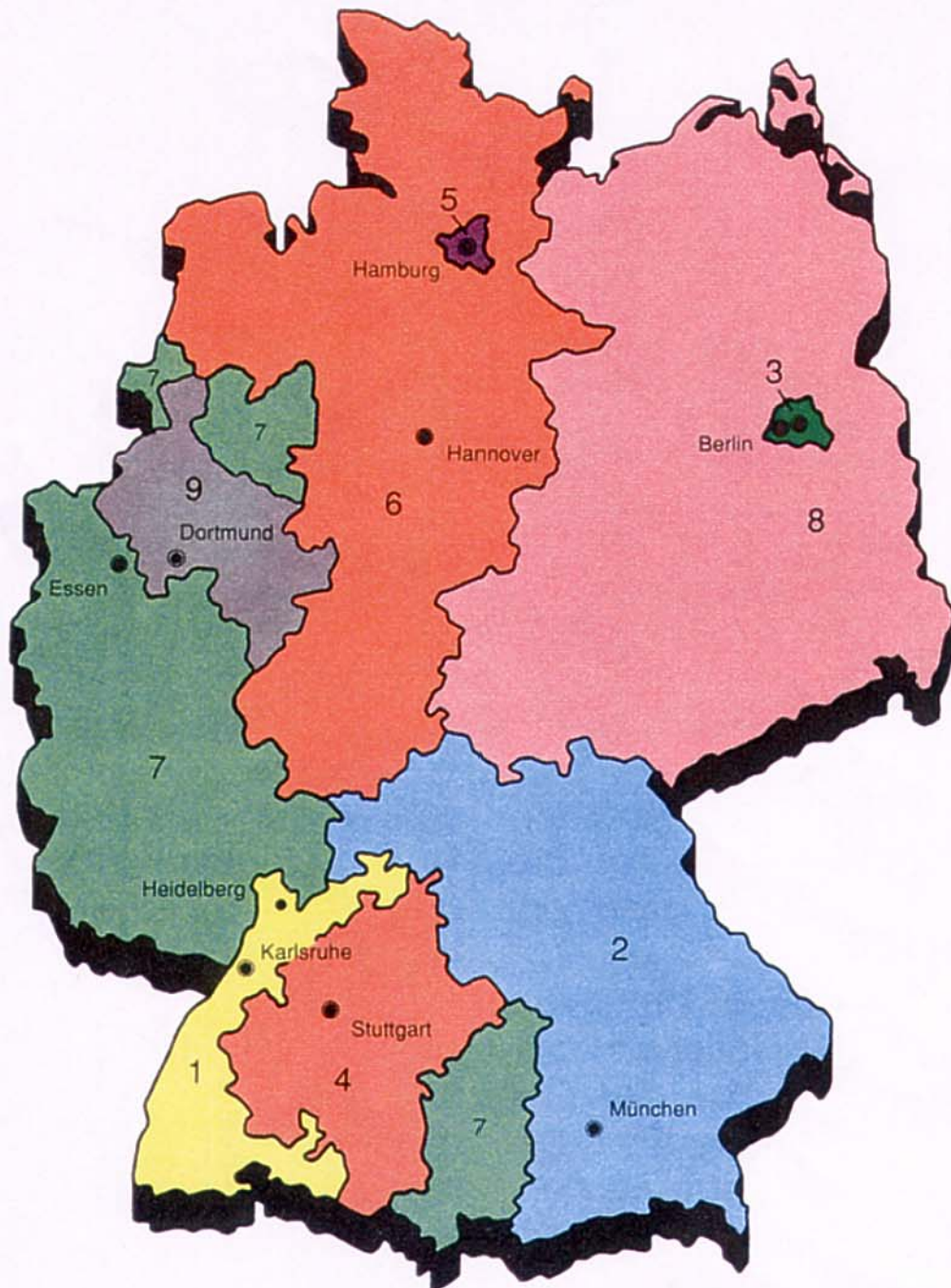
Univ. Hannover	Deutsches Verbundnetz 1999	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/02



Univ. Hannover	Stromkreislängen (km) der öffentlichen Versorgung in Deutschland	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/03

Arbeitsbereiche der DVG-Mitglieder

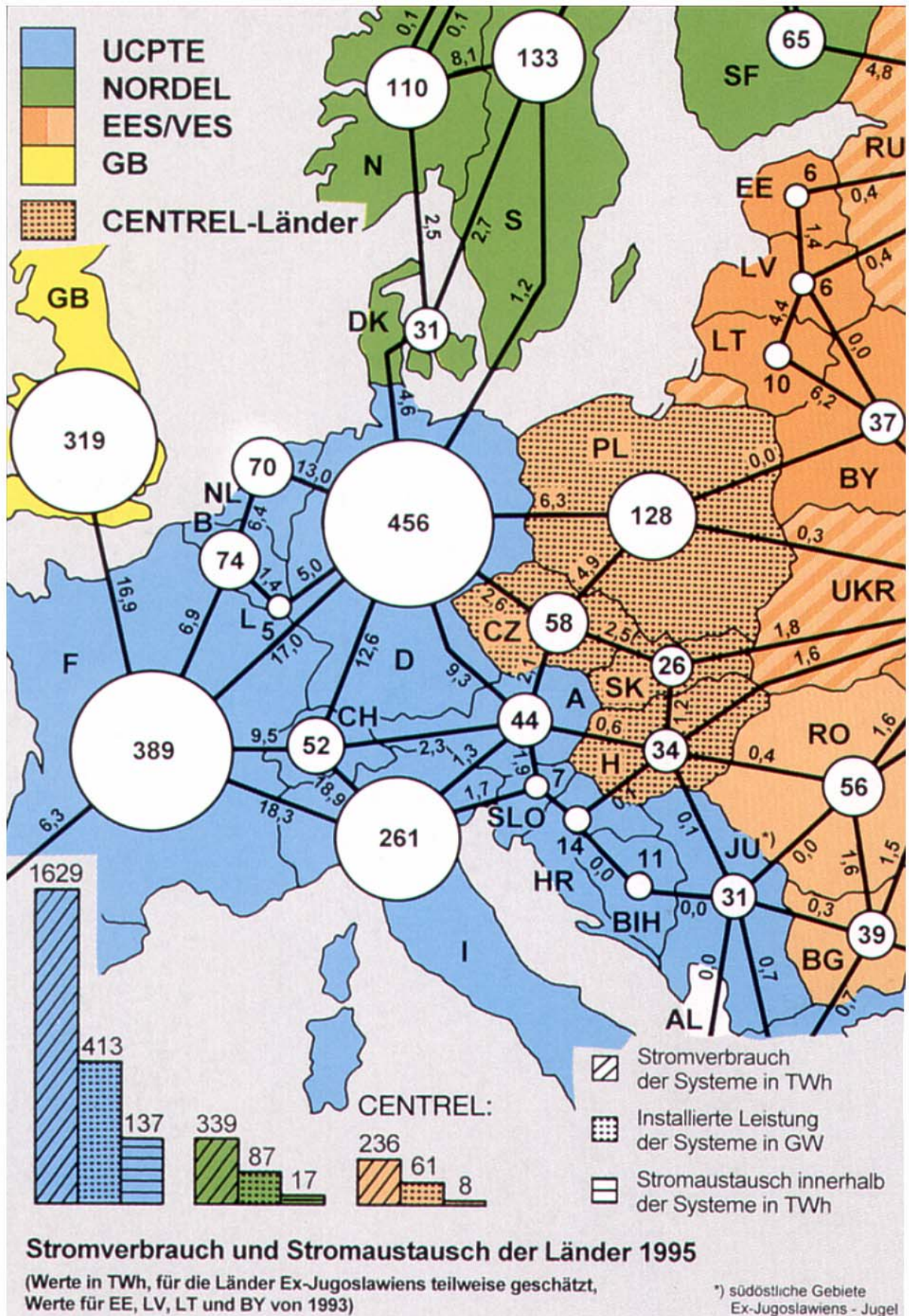
- Sitz der DVG-Mitglieder
- Sitz der DVG-Geschäftsführung



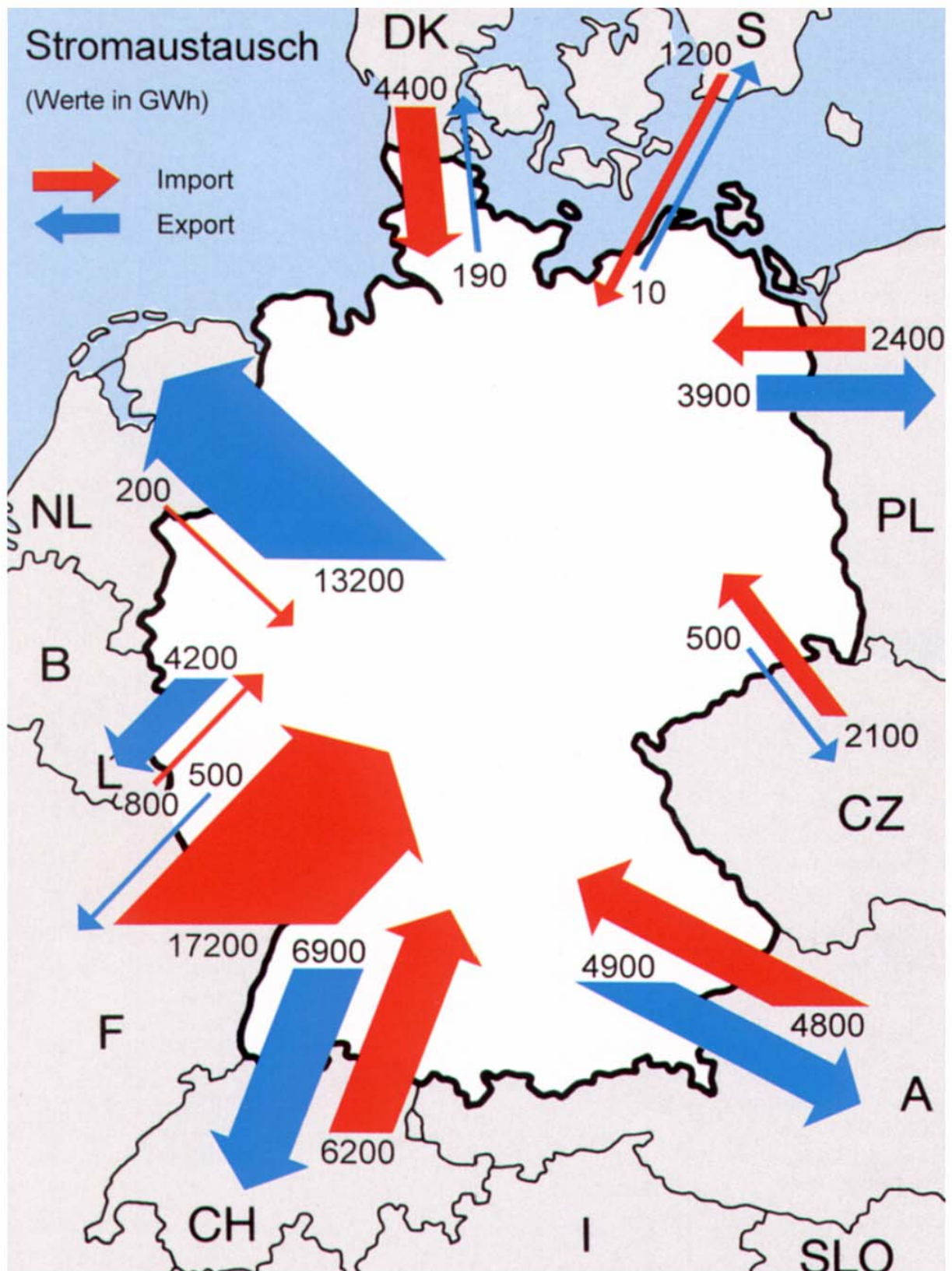
- 1 Badenwerk AG
- 2 Bayernwerk AG
- 3 Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-AG
- 4 Energie-Versorgung Schwaben AG
- 5 Hamburgische Electricitäts-Werke AG

- 6 PreussenElektra Aktiengesellschaft
- 7 RWE Energie Aktiengesellschaft
- 8 VEAG Vereinigte Energiewerke AG
- 9 Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG

Univ. Hannover	Arbeitsbereiche der DVG-Mitglieder	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/04

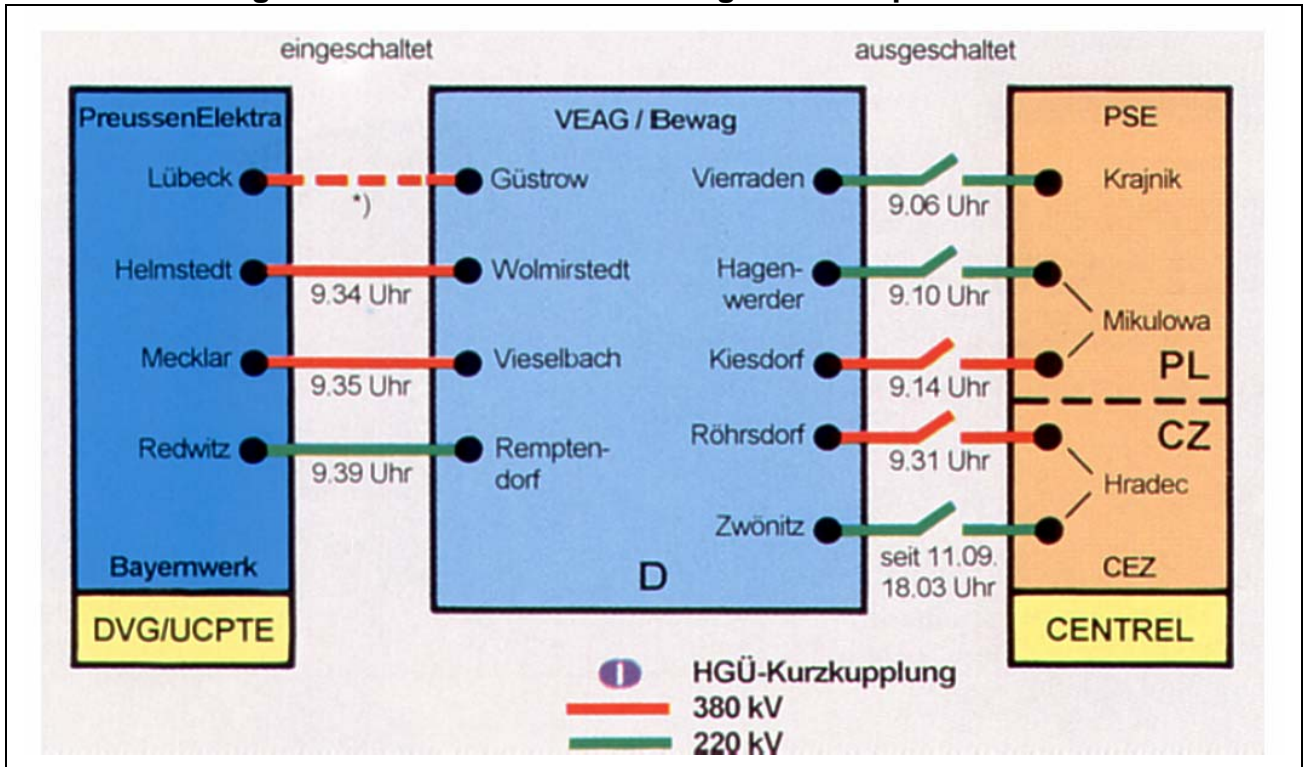


Univ. Hannover	Verbundsystem in Europa 1996	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/05

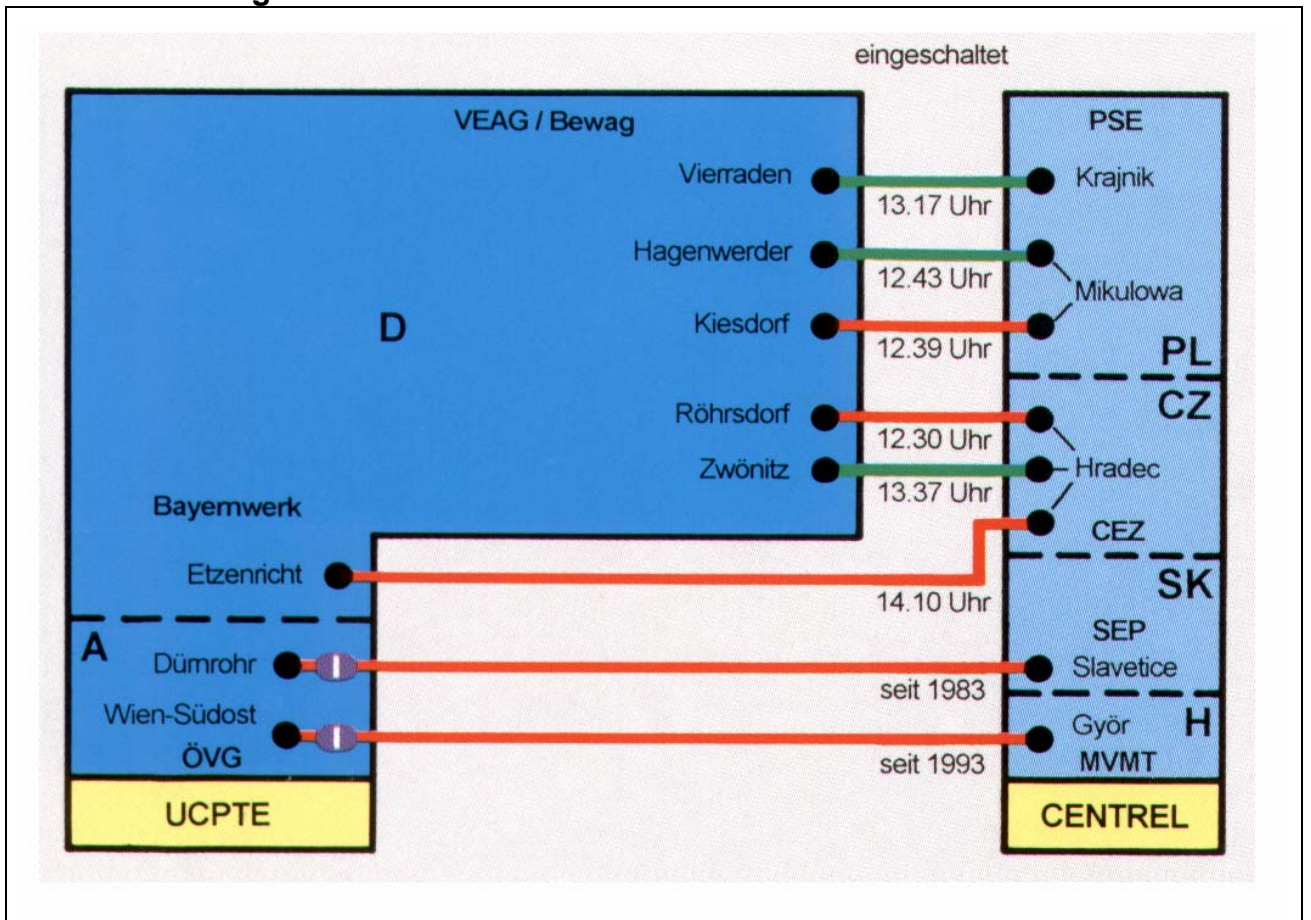


Univ. Hannover	Strom austausch Deutschlands mit den Nachbarländern 1995	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/06

Parallelschaltung DVG/UCPTE mit VEAG/Bewag am 13. September 1995



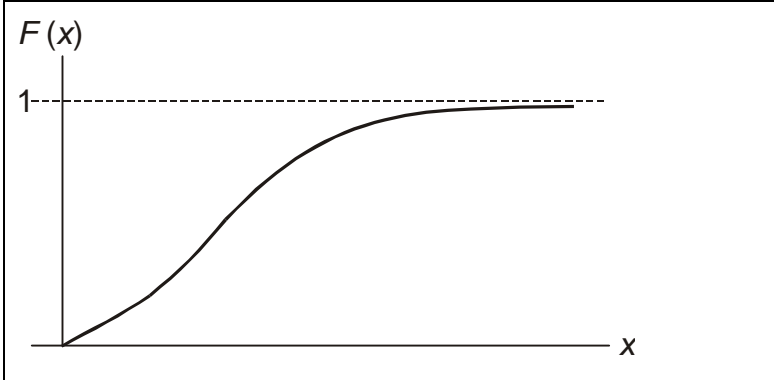
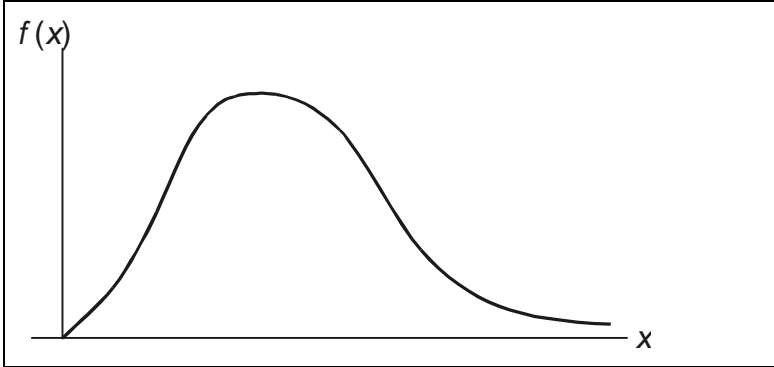
Parallelschaltung UCPTE-CENTREL am 18. Oktober 1995



Univ. Hannover	Parallelschaltungen 1995	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-V/07

Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung unter bestimmten Bedingungen	Netzicherheit
Ausfall eines Betriebsmittels führt mit Sicherheit nicht zu einer Versorgungsunterbrechung. Das (n-1)-Kriterium ist erfüllt wenn sich die Sytemgrößen und der Kurzschluss-Ausschaltstrom im zulässigen Bereich befinden: $U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}$, $I_{jk} \leq I_{zul}$, $I_a \leq I_{a,zul}$	(n-1)-Kriterium
Online-Ausfallsimulationsrechnung (Aufgabe der Netzführung zur Überwachung des (n-1)-Kriteriums)	Netzicherheitsrechnung
Fähigkeit einer Betrachtungseinheit (Komponente, System) seine Funktion für eine festgelegte Zeitdauer zu erfüllen	Zuverlässigkeit
Wahrscheinlichkeit mit der ein Verbraucher zeitgerecht mit elektrischer Energie versorgt wird	Versorgungszuverlässigkeit
Wahrscheinlichkeit dafür, ein Netz (oder Teilnetz) im Zustand der Unterbrechung anzutreffen	Unterbrechungswahrscheinlichkeit (Q_u)
Anzahl der Unterbrechungen bezogen auf den Betrachtungszeitraum (z.B. 1 a)	Unterbrechungshäufigkeit (H_u)
Zeitspanne vom Beginn bis Ende der Unterbrechung $T_u = \frac{Q_u}{H_u}$	Unterbrechungsdauer (T_u)
Unzulässige Abweichung von Funktions- und Leistungsmerkmalen einer Komponente oder eines Systems	Fehler
Beeinträchtigung der Funktion von Komponenten, die aber noch kein Ausfall zur Folge haben muss	Störung
Verletzung von Grenzbedingungen bezüglich der Zuverlässigkeit	Ausfall
Gleichzeitiger Ausfall mehrerer Komponenten	Common-mode-Ausfall
Netzausfall beim Verbraucher	Unterbrechung
Summe der nicht lieferbaren Leistungen bei Unterbrechungen, bezogen auf den Betrachtungszeitraum	unterbrochene Leistung
Summe der nicht lieferbaren Energien bei Unterbrechungen, bezogen auf den Betrachtungszeitraum	nicht zeitgerecht gelieferte Energie
Stochastischer Prozess, bei dem die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Systemzuständen (Betrieb, Aus, Reparatur,...) durch Exponentialverteilungen und damit durch konstante Übergangsraten beschrieben werden	MARKOFFscher Prozess
Wahrscheinlichkeiten für die Systemzustände im eingeschwungenen Zustand (nach genügend langer Zeit)	Grenz-Wahrscheinlichkeiten

Univ. Hannover	Definitionen zur Versorgungszuverlässigkeit	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-Z/01

	<p>X Zufallsgröße F(x) Verteilungsfunktion von X die Verteilungsfunktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der X kleiner oder gleich x ist. $F(x) = P(X \leq x)$ oder $1 - F(x) = P(X > x)$ (Komplement) mit: $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ und $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$</p>
$P(x_1 < X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$	<p>Wahrscheinlichkeit, dass X zwischen x_1 und x_2 liegt</p>
$F(x_1, x) = \frac{P[(X \leq x) \wedge X > x_1]}{P(X > x_1)} = \frac{P(x_1 < X \leq x)}{P(X > x_1)}$ $= \frac{F(x) - F(x_1)}{1 - F(x_1)}$	<p>Restverteilungsfunktion Wahrscheinlichkeit, mit der die Komponente innerhalb des Zeitraumes (x_1, x) ausfällt, unter der Bedingung, dass sie bis x_1 ($x_1 < x$) noch in Betrieb ist (bedingte Wahrscheinlichkeit)</p>
	<p>Dichtefunktion $f(x) = \frac{dF(x)}{d(x)}$</p>
$f(x_1, x) = \frac{dF(x_1, x)}{dx} = \frac{f(x)}{1 - F(x_1)}$	<p>Restdichtefunktion</p>
$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$	<p>Zusammenhang zwischen Dichte- und Verteilungsfunktion</p>
$m = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F(x)] dx$	<p>Erwartungs- oder Mittelwert</p>
$E(x_1, x) = \int_{x_1}^{\infty} x f(x_1, x) dx = \frac{1}{1 - F(x_1)} \int_{x_1}^{\infty} x f(x) dx$	<p>Mittlere Restlebensdauer im Zeitbereich (x_1, ∞)</p>
$a(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} P(x < X \leq x + \Delta x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{1 - F(x)}$ $= \frac{1}{1 - F(x)} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \frac{1}{1 - F(x)} \frac{dF(x)}{dx} = \frac{f(x)}{1 - F(x)}$	<p>Übergangsrate = bedingte Wahrscheinlichkeit eines Zustandsüberganges im Zeitraum $(x, x + \Delta x)$ bezogen auf Δx mit $\Delta x \rightarrow 0$.</p>

Univ. Hannover

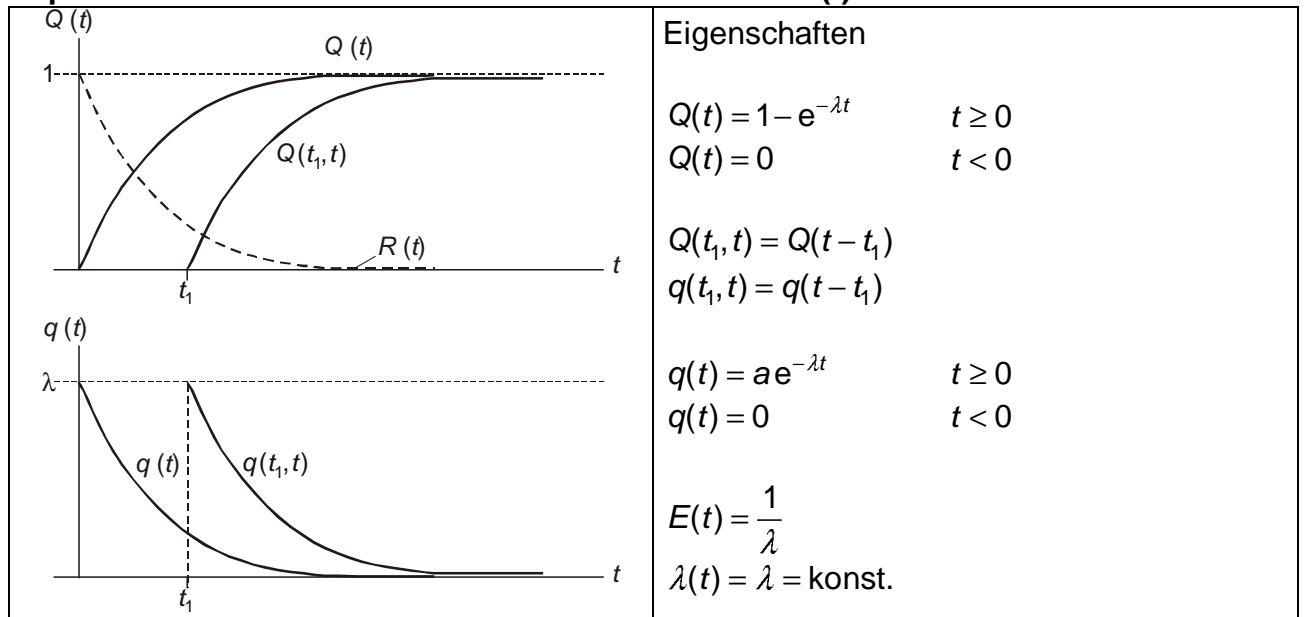
Verteilungs- und Dichtefunktion
von Zufallsgrößen

Grdl. der EV

Prof. Oswald

EV-Z/02

Exponentialfunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$



Stochastischer Prozess

$P(Z)$	Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich ein stochastischer Prozess im Zustand Z befindet
$T(Z) = \frac{1}{ r_{ii} }$	mittlere Aufenthaltsdauer im Zustand Z
$H(Z) = \frac{P(Z)}{T(Z)}$	mittlere Zustandshäufigkeit
$P(Z) = H(Z)T(Z)$	grundlegender Zusammenhang

Zweistufiger stochastischer Prozess mit den Zuständen B (Betrieb) und A (Aus)

$T(B) = \frac{1}{\lambda}$	mittlere fehlerfreie Betriebsdauer (MTTF)
$T(A) = \frac{1}{\mu}$	mittlere Ausdauer (MTTR)
$P(B) = \frac{T(B)}{T(B) + T(A)}$	Wahrscheinlichkeit des Betriebszustandes
$P(A) = \frac{T(A)}{T(B) + T(A)}$	Wahrscheinlichkeit des Auszustandes
$H(B) = \frac{P(B)}{T(B)} = \frac{1}{T(B) + T(A)}$	mittlere Häufigkeit des Betriebszustandes
$H(A) = \frac{P(A)}{T(A)} = \frac{1}{T(B) + T(A)} = H(B)$	mittlere Häufigkeit des Auszustandes

Univ. Hannover	Exponentiale Verteilungsfunktion Stochastische Prozesse	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-Z/03

<pre> graph TD 1[1 normal] -- alpha12 --> 2[2 verletzbar] 2 -- beta21 --> 1 1 -- alpha13 --> 3[3 gestört] 3 -- beta31 --> 1 2 -- alpha23 --> 3 3 -- beta32 --> 2 </pre>	Zustandsdiagramm	
<p>$\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{13}$: Fehler, Störungen (stochastisch), Abschaltungen (deterministisch)</p> <p>$\beta_{21}, \beta_{32}, \beta_{31}$: Netzführungsmaßnahmen (Einspeisungen, Netzschaltungen)</p>	Zustandsübergänge	
<p><u>1 normal</u>: (n-1)-Kriterium erfüllt</p>	Zustände	
<p><u>2 verletzbar</u>: (n-1)-Kriterium <u>nicht</u> erfüllt, Versorgung aller Abnehmer noch sichergestellt</p>		
<p><u>2 gestört</u>: Versorgungsunterbrechungen, ggf Netzauftrennungen</p>		
<p>Hochspannungsnetze werden nach dem (n-1)-Kriterium geplant und ausgeführt (die Netze werden redundant ausgeführt).</p> <p>Im Netzbetrieb wird das (n-1)-Kriterium durch die Netz-sicherheitsrechnung überwacht, um verletzbare Zustände möglichst schnell durch geeignete Führungsmaßnahmen in den Normalzustand zurückzuführen.</p> <p>In seltenen Fällen (Mehrfachausfälle und common-mode-Ausfälle) kann das Netz direkt vom Zustand normal in den Zustand gestört übergehen. Die Versorgungszuverlässigkeit von Netzen, die das (n-1)-Kriterium erfüllen ist deshalb stets kleiner als 1. Im mitteleuropäischen Netz muss im Mittel mit Unterbrechungsdauern von einigen Minuten pro Jahr gerechnet werden.</p>	Netzplanung und Netzbetrieb	
Univ. Hannover	Netzicherheit	Grdl. der EV
Prof. Oswald		EV-Z/04

<p>Zustände</p> <p style="text-align: center;">Zustandsübergänge</p> <p style="text-align: center;">Zustandsdauer</p>	<p>Stochastischer Prozess</p> <p>Beispiele für Zustände:</p> <p>Betrieb (B) Aus (A) Reparatur (R) Wartung (W)</p>	
<p>$P(Z)$ Zustandswahrscheinlichkeit $H(Z)$ Zustandshäufigkeit (Erwartungswert) $T(Z)$ Zustandsdauer (Erwartungswert)</p>	<p>Bewertungsgrößen</p> <p>es gilt stets: $P(Z) = H(Z) T(Z)$</p>	
	<p>Zustandsdiagramm</p>	
$ \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1i} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2i} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ii} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{ni} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad r_{ii} = - \sum_{j=1, \neq i}^n r_{ij} $	<p>Matrix der Zustandsübergänge mit konstanten Übergangsraten r_{ik}</p> <p>Die Diagonalelemente r_{ii} sind die sog. Abgänge (s. Zustandsdiagramm). Aus ihnen ergibt sich die Dauer des i-ten Zustandes zu: $T(i) = \frac{1}{ r_{ii} }$</p>	
$ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P(1,t) \\ P(2,t) \\ \vdots \\ P(i,t) \\ \vdots \\ P(n,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1i} & \cdots & r_{1n} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{i2} & \cdots & r_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{2i} & \cdots & r_{ii} & \cdots & r_{ni} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{in} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(1,t) \\ P(2,t) \\ \vdots \\ P(i,t) \\ \vdots \\ P(n,t) \end{bmatrix} $	<p>Zustandsdifferentialgleichungssystem</p> <p><i>Beachte:</i> Die Koeffizientenmatrix ist die <u>transponierte</u> Matrix der Zustandsübergänge \mathbf{R}^T</p>	
$ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \cdots & r_{i1} & \cdots & r_{n1} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{i2} & \cdots & r_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1i} & r_{2i} & \cdots & r_{ii} & \cdots & r_{ni} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{in} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(1) \\ P(2) \\ \vdots \\ P(i) \\ \vdots \\ P(n) \end{bmatrix} $	<p>homogener MARKOFFscher Prozess Grenz-Zustandswahrscheinlichkeiten für $t \rightarrow \infty$</p> <p>Nebenbedingung für die Lösung: $P(1) + P(2) + \cdots + P(i) + \cdots + P(n) = 1$</p>	
<p>Univ. Hannover</p>	<p>MARKOFFscher Prozess Zustandswahrscheinlichkeiten</p>	<p>Grdl. der EV</p>
<p>Prof. Oswald</p>		<p>EV-Z/05</p>



Univ. Hannover

Prof. Oswald

Sturmschaden an einer
110-kV-Freileitung

Grdl. der EV

EV-Z/09