

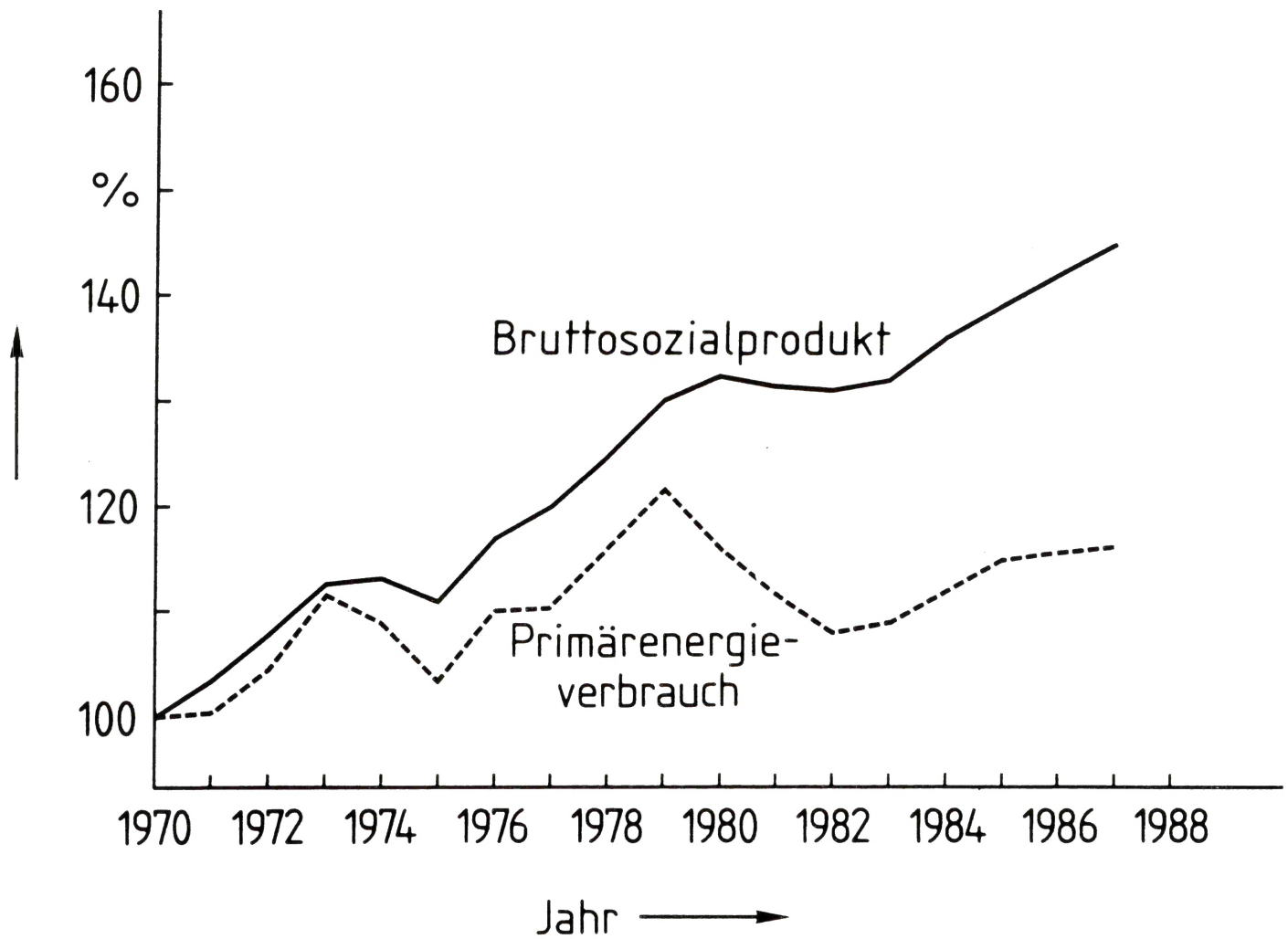
Gedanken zur Entwicklung der Energieübertragung mit hohen Spannungen

K. Feser

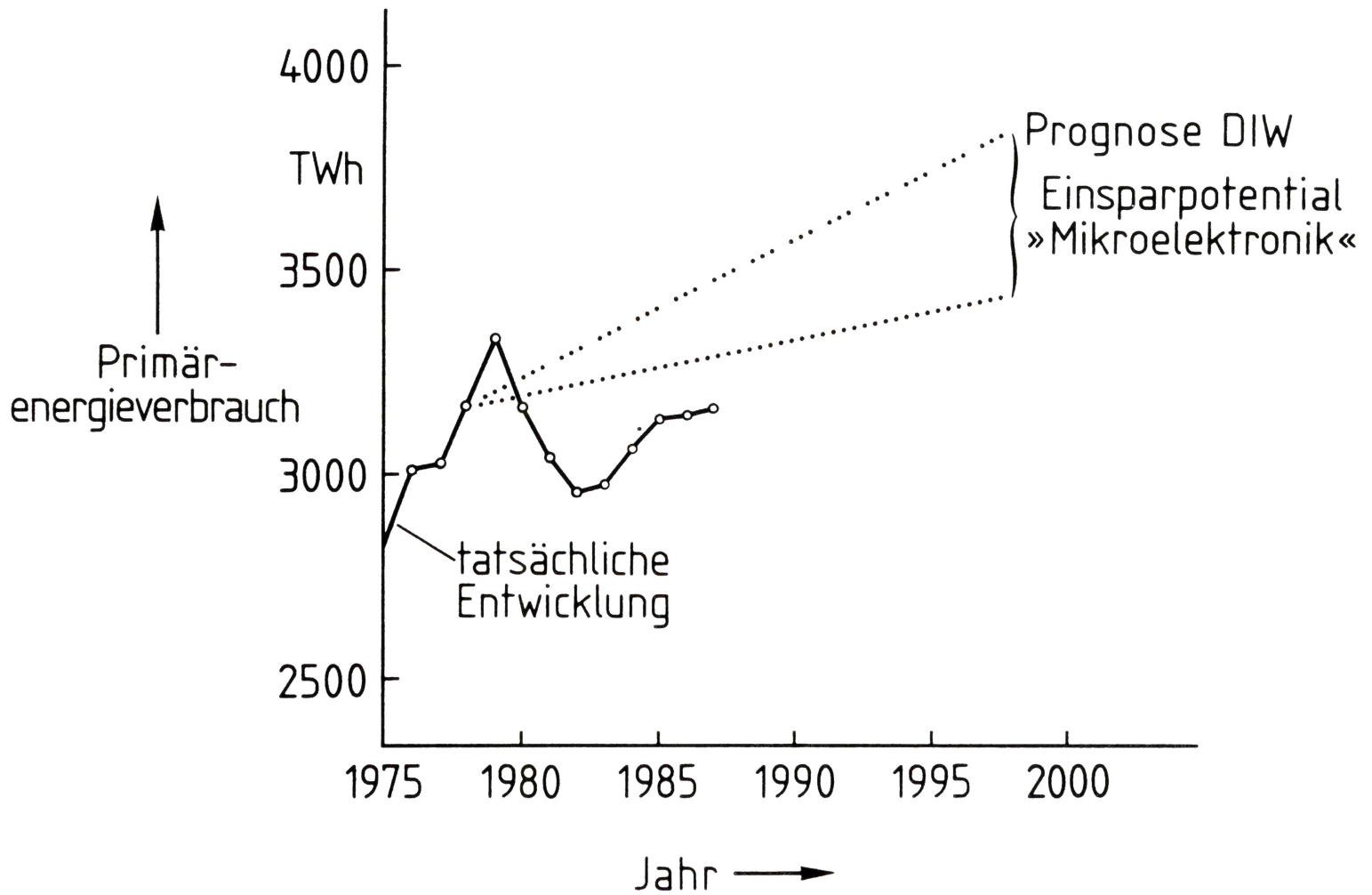
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Universität Stuttgart

Inhaltsübersicht:

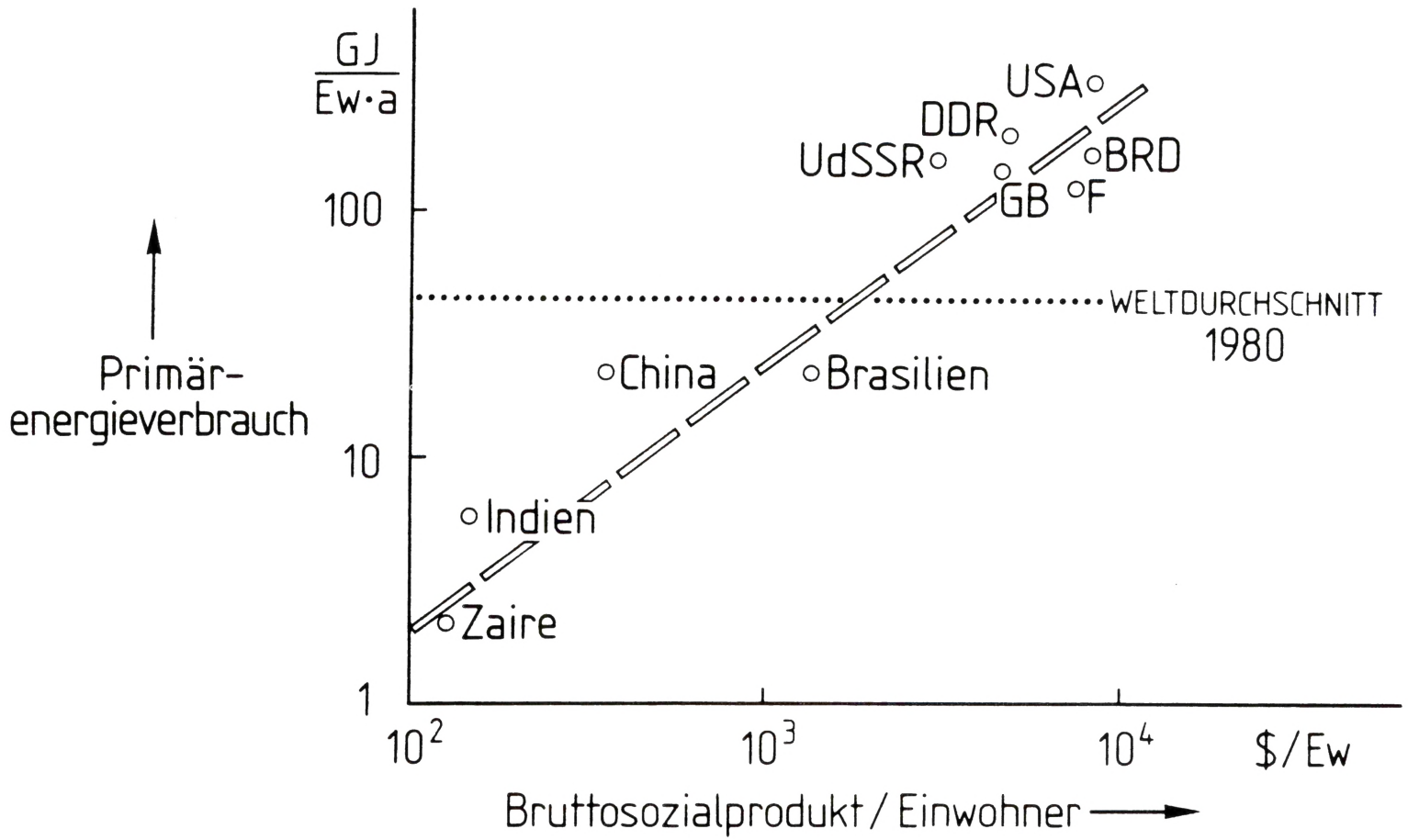
- o allgemeine Entwicklungen
 - Weltbevölkerung
 - Energieverbrauch
- o hochspannungstechnische Entwicklungen ausgelöst durch
 - neue Bauteile, z.B. Halbleiterelemente (GTO)
 - neue Werkstoffe, z.B. Kunststoffe, Isoliergase
 - neue physikalische Effekte, z.B. Supraleitung, Laser
 - die Mikroelektronik, z.B. numerische Berechnungsverfahren, Expertensysteme
 - fertigungstechnische Entwicklungen, z.B. Laserbearbeitung, numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen
- o leittechnische Entwicklungen ausgelöst durch die Mikroelektronik
 - Algorithmen
 - Sensoren, Mikrosystemtechnik
 - Expertensysteme
 - elektromagnetische Verträglichkeit



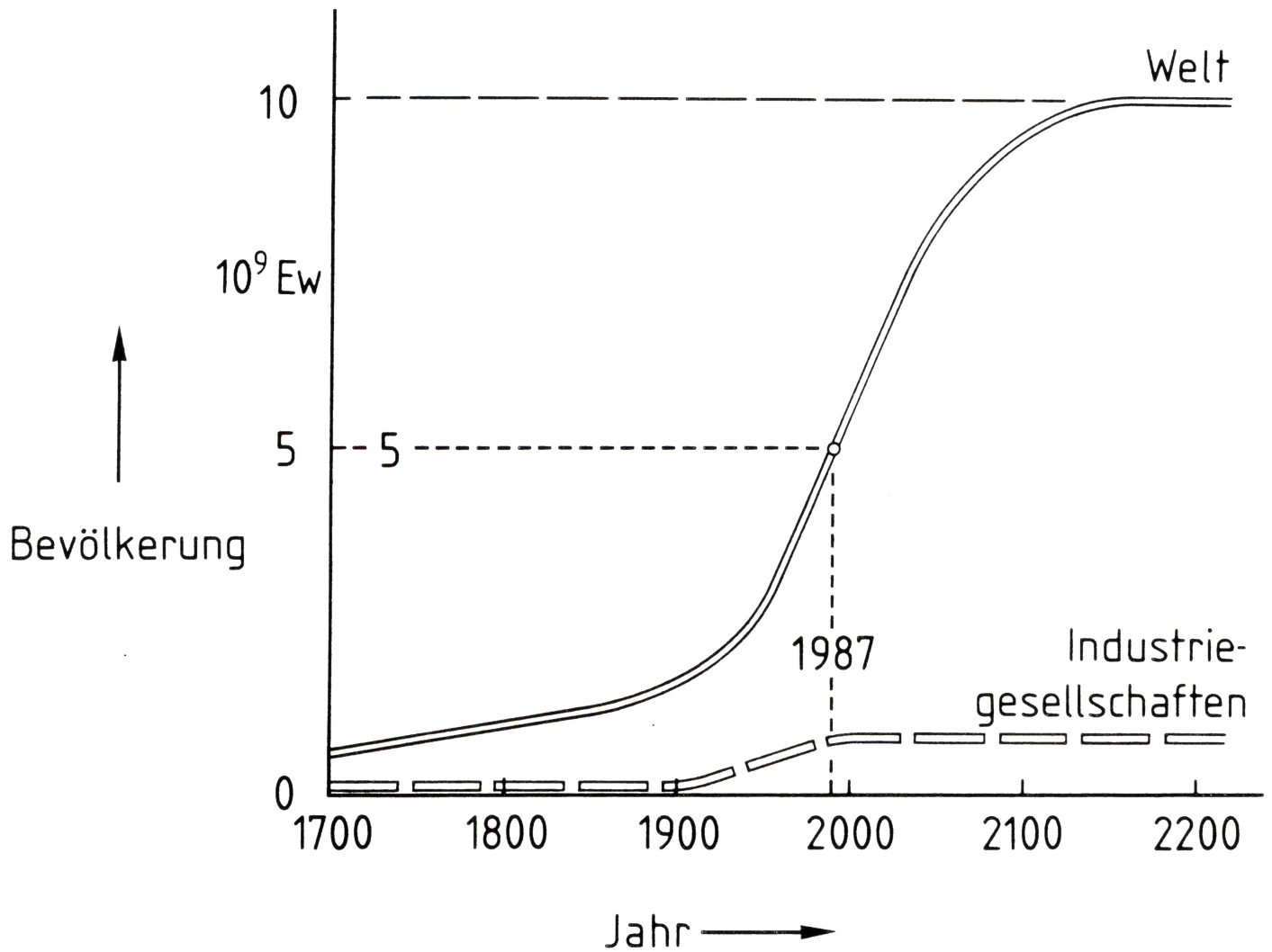
Bruttosozialprodukt
und Primärenergieverbrauch in der BRD



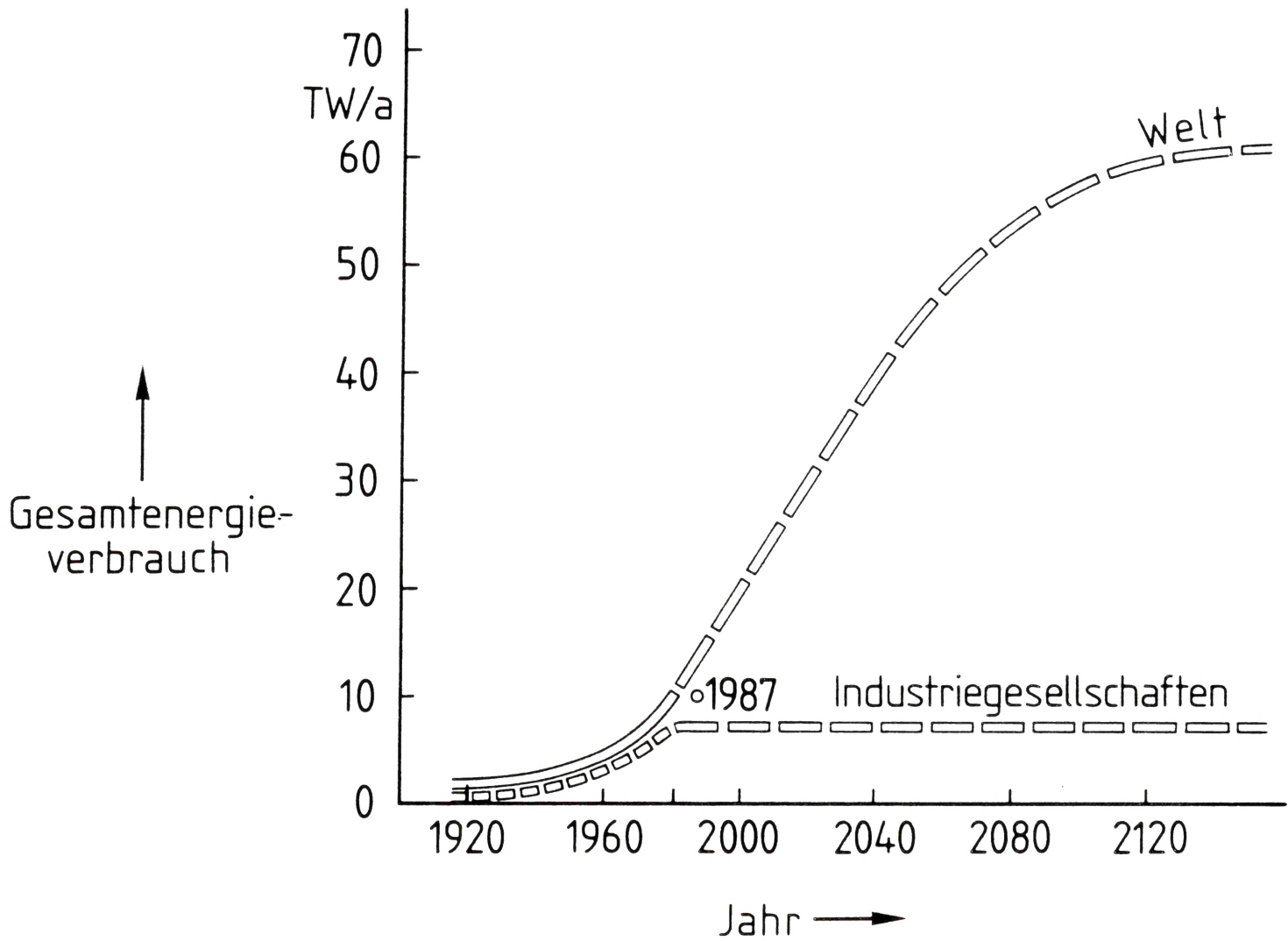
Entwicklung des Primärenergiebedarfs der BRD



Energieverbrauch und Lebensstandard



Entwicklung der Weltbevölkerung



Entwicklung des Gesamtenergieverbrauches

Entwicklung der elektrischen Energieübertragung abhängig von:

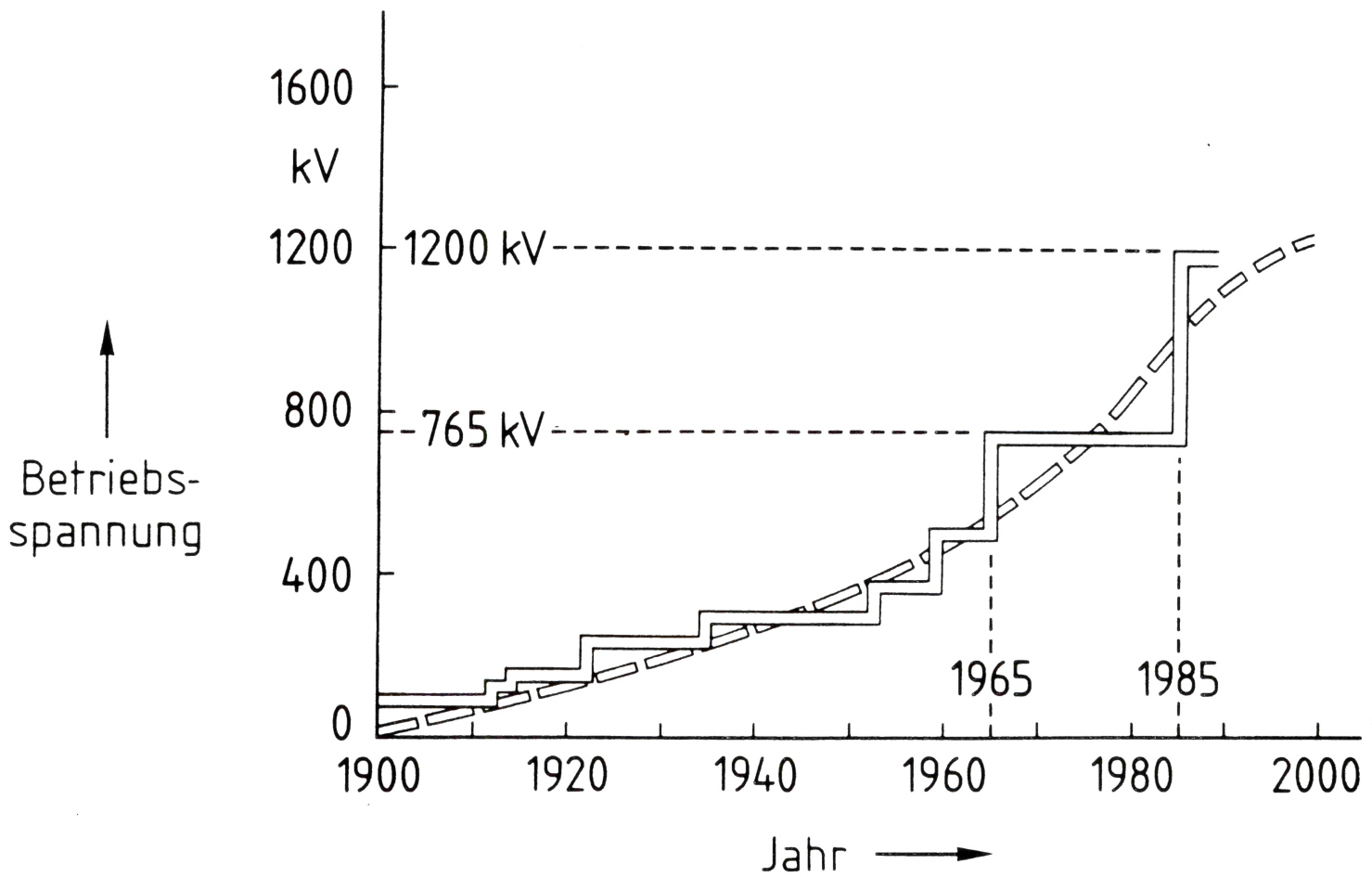
- o Energieverbrauch pro Kopf (max.: wie in Industriegesellschaften)
- o Zuwachs der Weltbevölkerung (vor allem in Entwicklungsländern)
- o proz. Zunahme des elektrischen Energieverbrauches (heute: weltweit ca. 10 %, USA ca. 25 %)
- o Standorte der Erzeugung und des Verbrauches
- o keine wirtschaftlichen Alternativen zur elektrischen Energieübertragung
- o dezentrale Erzeugung und Speicherung

Hochspannungstechnische Entwicklungen ausgelöst durch

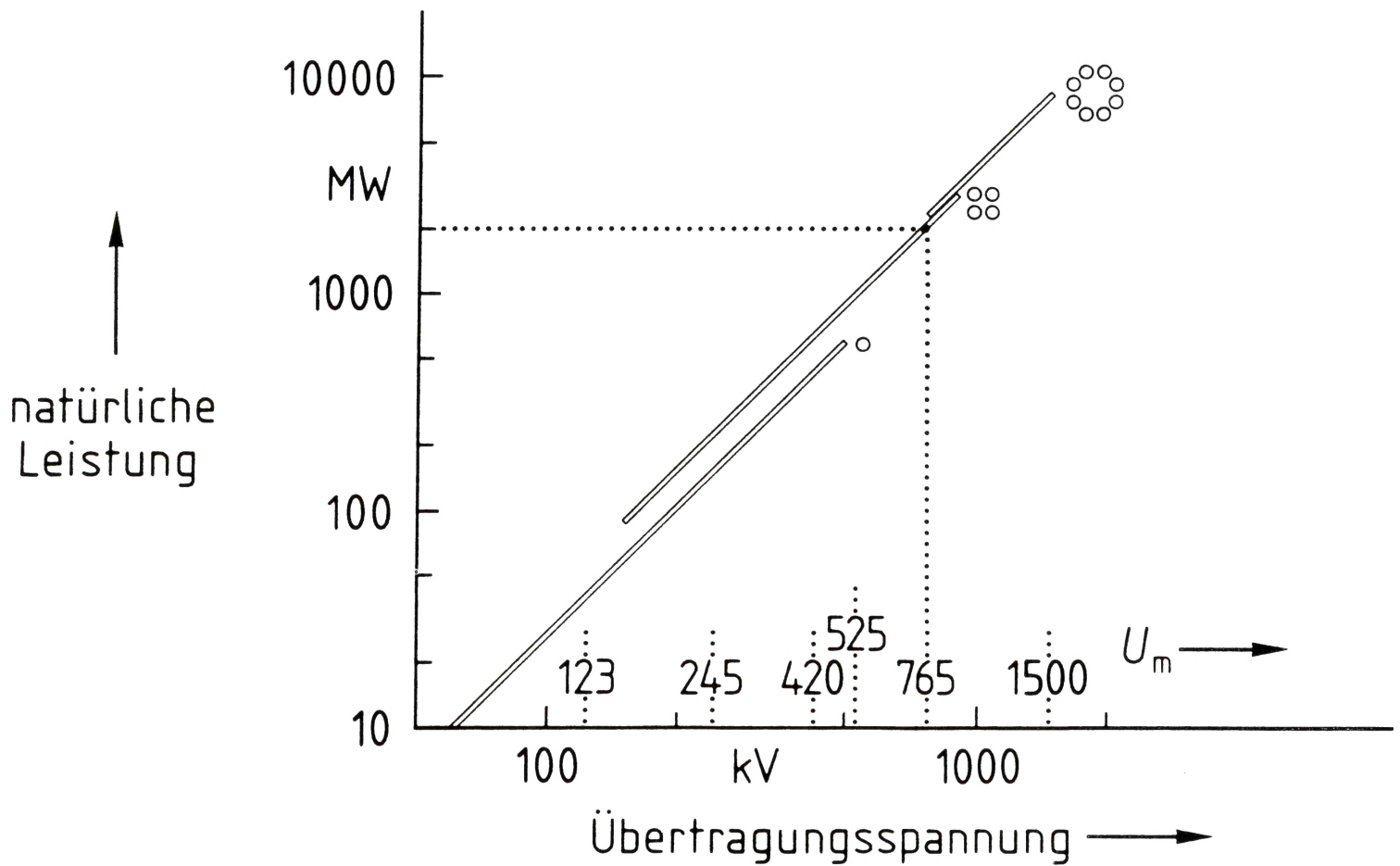
- o neue Bauteile, z.B. Halbleiterelemente
- o neue Werkstoffe, z.B. Kunststoffe, Isoliergase, Metalloxide
- o neue physikalische Effekte, z.B. Supraleitung
- o die Mikroelektronik, z.B. numerische Verfahren, Expertensysteme, CAD
- o fertigungstechnische Entwicklungen, z.B. Laserbearbeitung, CIM

auf folgenden Gebieten:

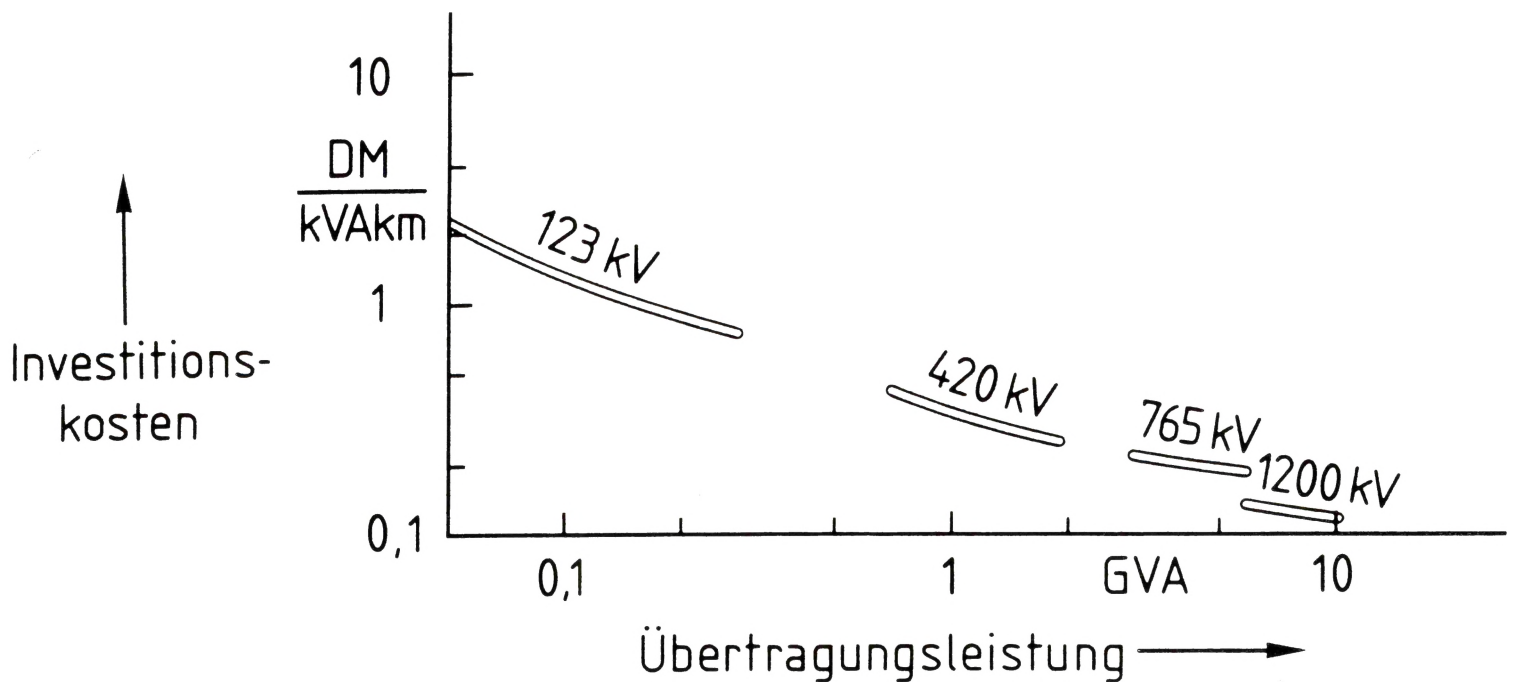
- o Übertragungsspannungen für HDÜ und HGÜ
- o Übertragungswege: Freileitungen, Kabel
- o Schaltanlagen, statische Kompensatoren
- o Transformatoren, Kondensatoren, Schutzgeräte
- o Energiespeicher



Entwicklung der Übertragungsspannungen
in Drehstromnetzen



Natürliche Leistung von Freileitungen



Spezifische Investitionskosten von Freileitungen

Freileitungen

- o neues Leitermaterial (Alu-Legierung) für höhere Dauertemperaturen ($80^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C}$)
- o neue freiluftbeständige Isoliermaterialien
 - Kunststoffisolatoren
 - wegen geringerem Gewicht im Vergleich zu Porzellan
 - o neue leichtere Mastkonstruktionen
 - o Phasenabstandshalter

Kabel

- o Öl/Papier-Dielektrikum bis 765 kV
- o SF₆-isolierte Rohrleitungen bis 1200 kV
(auch flexibel, Lebensdauer der Stützelemente, erste Prototypen für 1200 kV)
- o VPE-Kunststoffkabel bis 420 kV
(erste Prototypen für 420 kV, Water treeing)

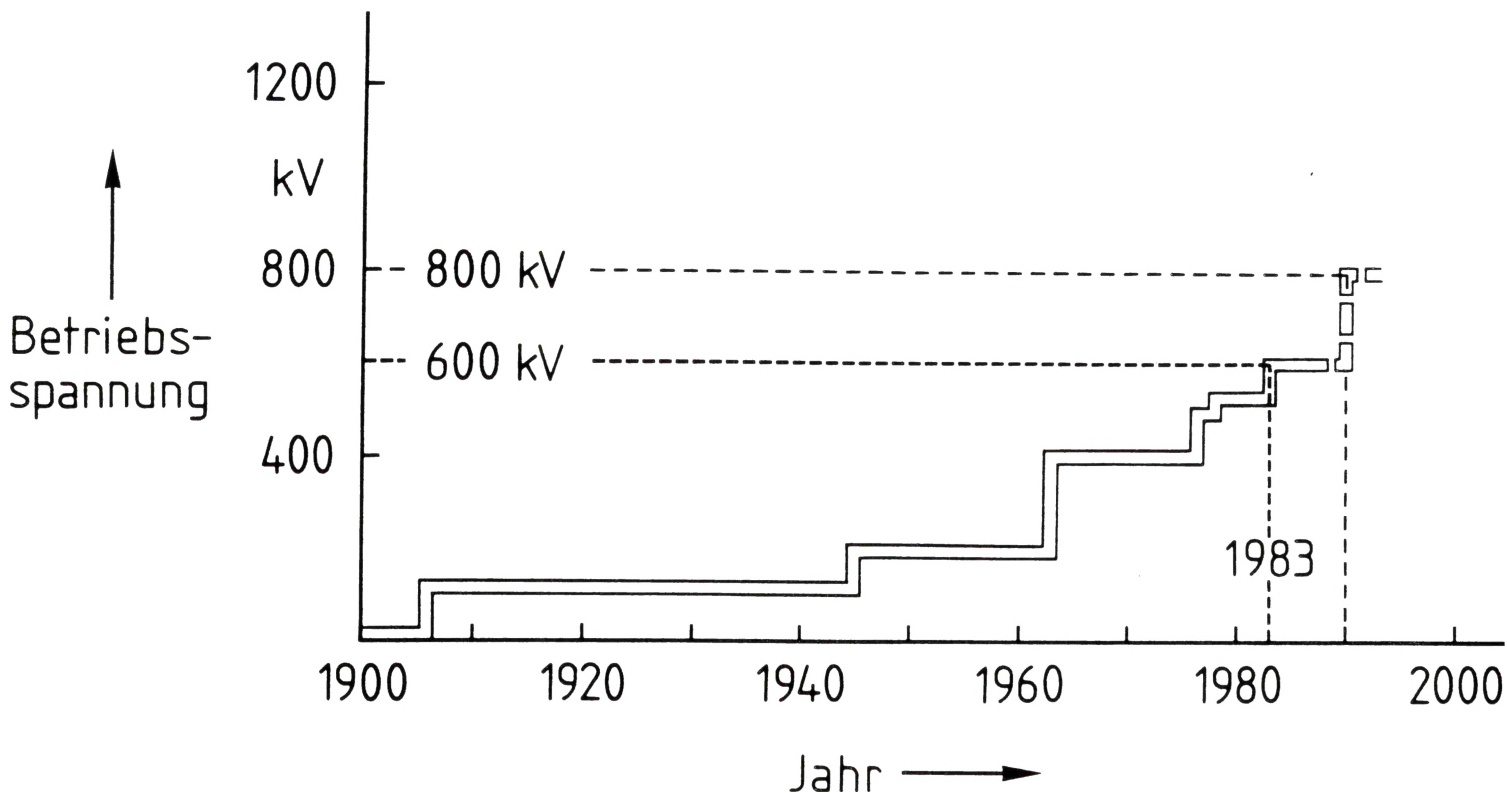
Vorteile der Kunststoffkabel:

- geringere Verluste ($\tan\delta$)
- wartungsfrei
- umweltfreundlich
- leichtere Verlegung und Montage

Aufgaben:

- lunkerfreie, homogene Herstellung bei großen Isolierdicken
- Qualitätskontrolle → Empfindlichkeit der TE-Messung
 - Expertensysteme

Entwicklung der Übertragungsspannungen bei der HGÜ



Vorteile einer HGÜ:

- o Stabilität bei großen Entfernungen
- o Leistungsfluß unabhängig von der Frequenz
- o Begrenzung der Kurzschlußleistung
- o Wirtschaftlichkeit bei hohen Spannungen und großen Entfernungen
- o Umweltvorteile bei gleicher Übertragungsleistung (wie HDÜ)
- o betriebliche Vorteile für unterlagerte HDÜ, z.B. Spannungshaltung, Stabilität, Lastfluß

Einsatzgebiete:

- o Übertragung großer Energiemengen über weite Entfernungen
- o Kopplung asynchroner HDÜ-Netze
- o Seekabelübertragung
- o Kopplung leistungsstarker HDÜ-Netze

Schaltanlagen

bei hohen Spannungen → SF₆-Technik (hervorragende Isolierfähigkeit)

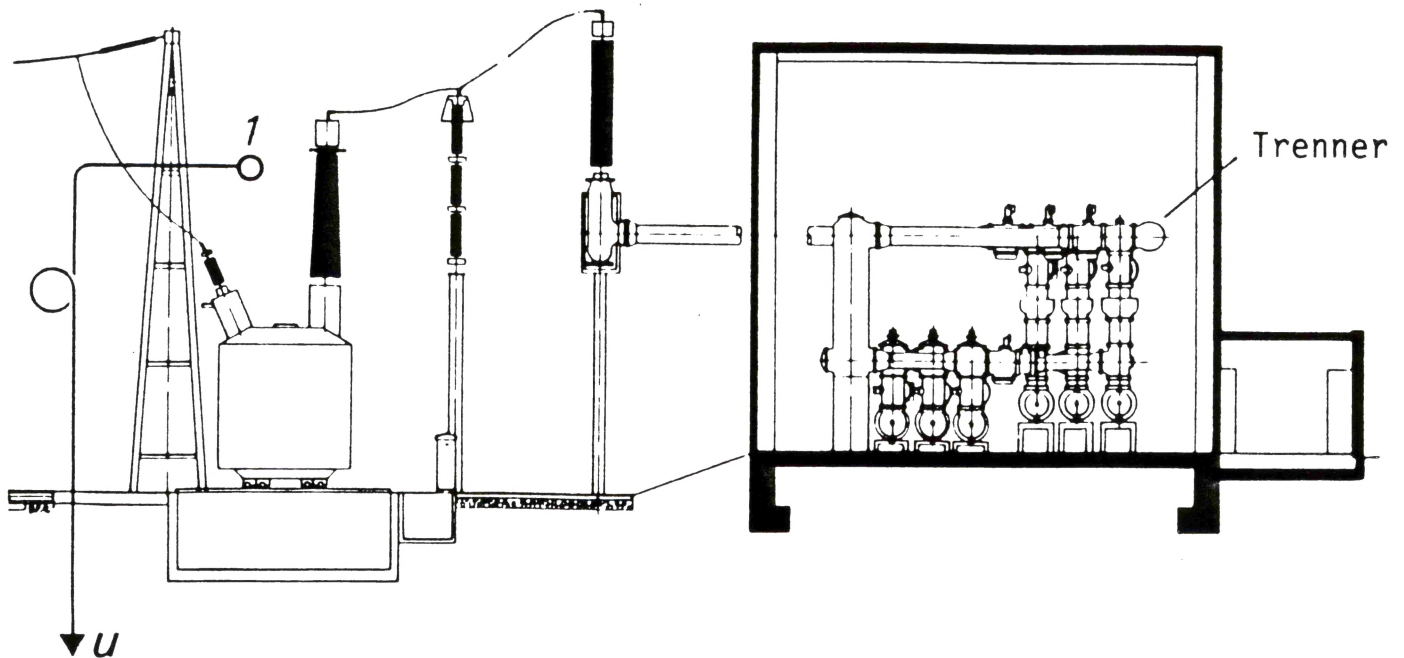
Vorteile:

- o kompakte Bauweise ($E_{dSF6} \sim 3 \cdot E_{dLuft}$, p)
 - geringerer Volumen- und Flächenbedarf, Sicherheitsabstände → Umweltverträglichkeit
 - fabrikfertige, vormontierte Einheiten
 - schnellere und saubere Montage (Zuverlässigkeit), keine Verschmutzung im Betrieb (Wartungsintervalle)

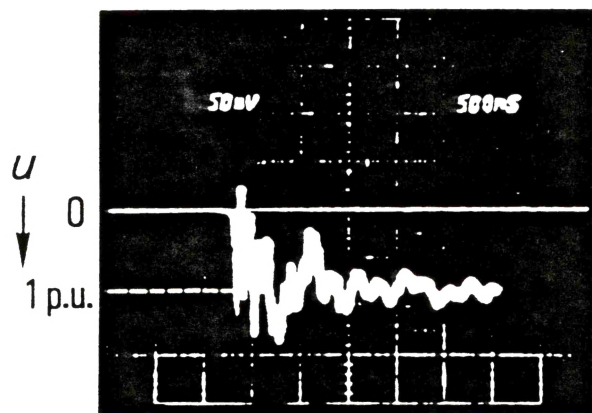
Entwicklungen:

- o Verhalten der SF₆-Isolierungen bei schnellen Transienten (VFT) → Vor-Ort-Prüfmethoden, Isolationskoordination
- o Empfindlichkeit von SF₆-Isolierungen auf Verunreinigungen (Transport, Montage, Betrieb)
- o Langzeitverhalten der Stützelemente
 - Qualitätskontrolle, TE-Messungen
- o Elektromagnetische Vorgänge innerhalb und außerhalb der Kapselung
 - ● Resonanzen mit angeschlossenen gewickelten Apparaten
 - Festigkeit der Isolierung
 - Störfestigkeit der Elektronik (Leittechnik)
- o Geeignete Simulationsverfahren (Berechnungsverfahren)
 - Isolationskoordination bei VFT, Ableiter

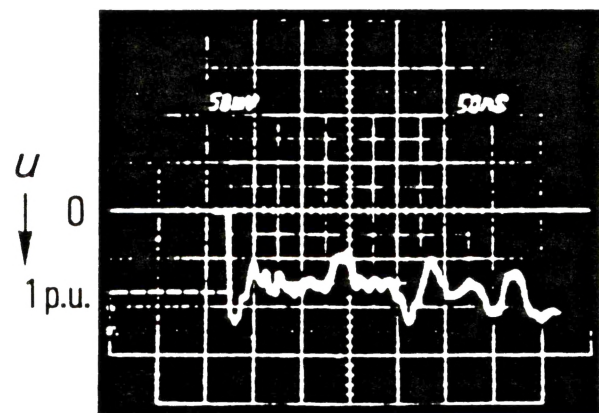
Transiente Überspannung an den Transformatorklemmen beim Schalten eines SF₆-Trennschalters



Ersatzschaltbild



a.



b.

Überspannungen

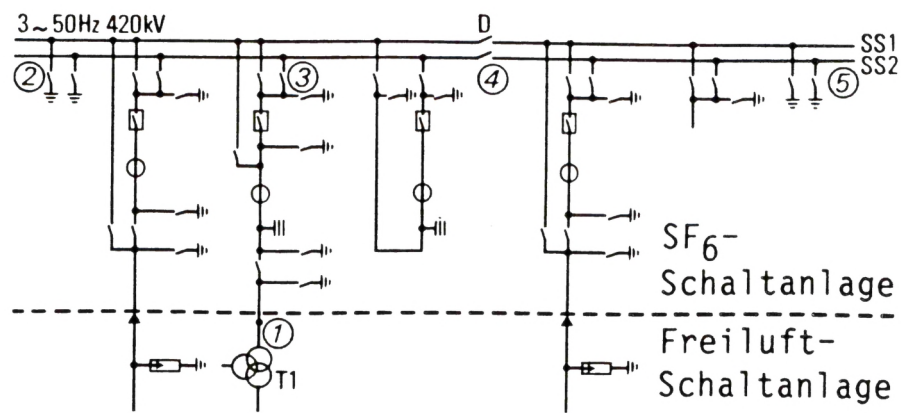
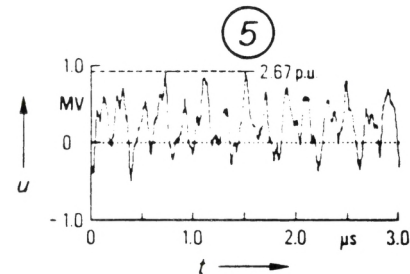
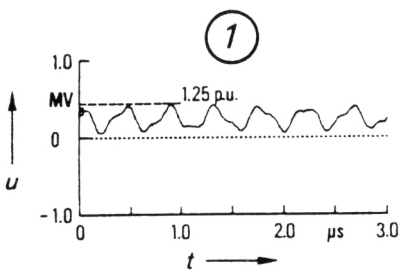
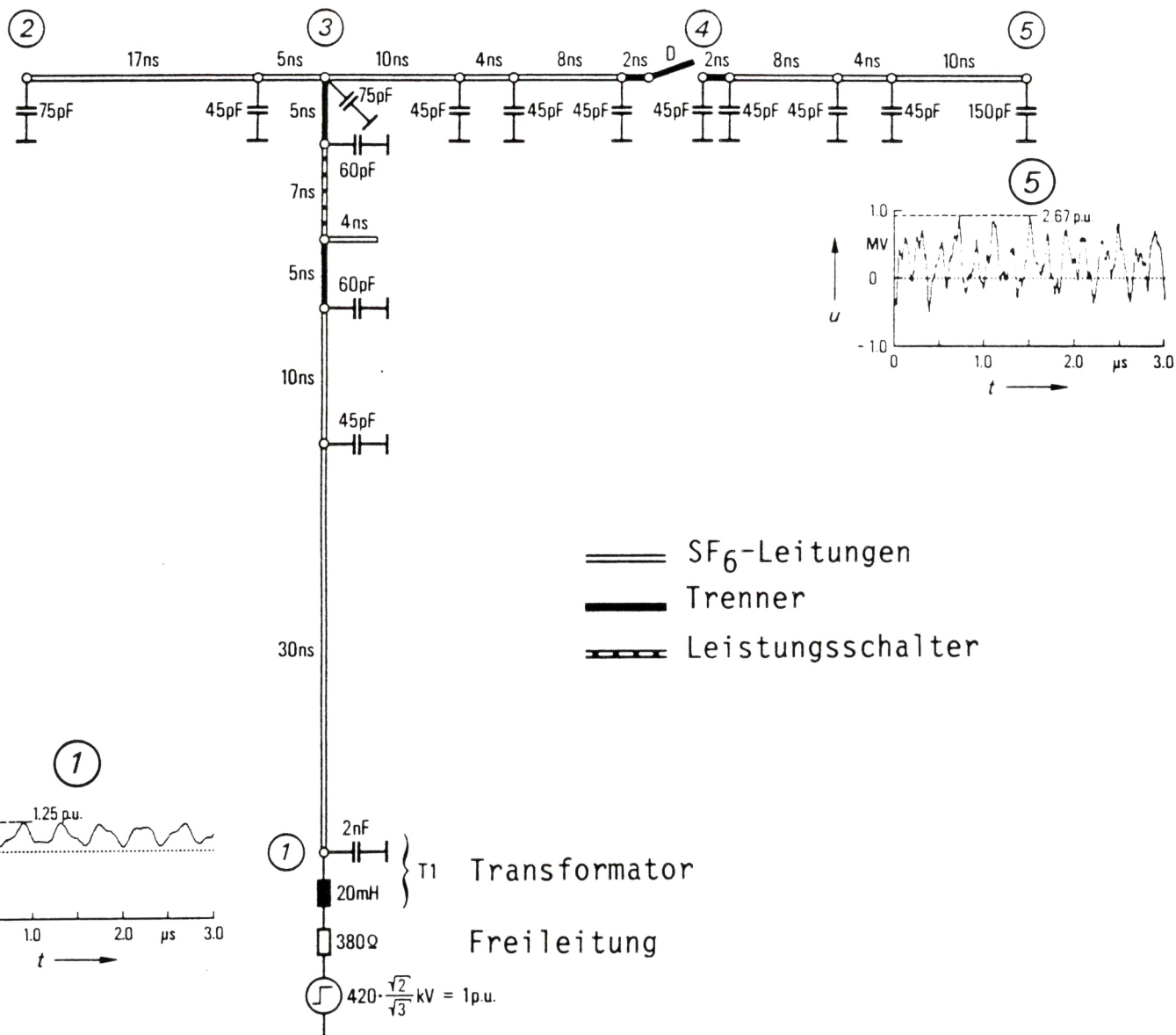
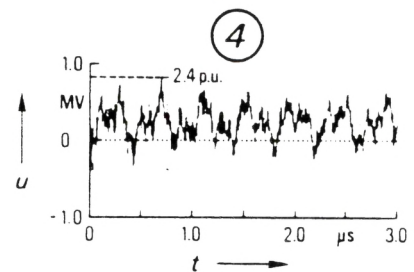
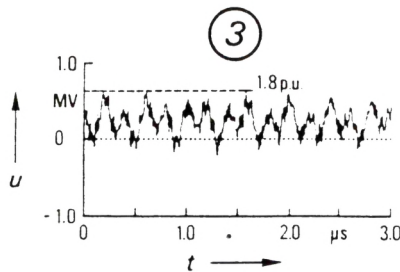
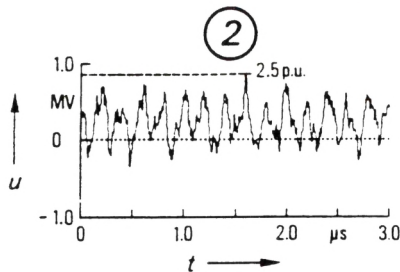


Diagramm einer 420-kV-Schaltanlage



Einphasiges Ersatzschaltbild der 420-kV-Schaltanlage
Berechnete Überspannungen an verschiedenen Punkten in der Anlage nach einer Trennerschaltung (Punkt 4)

Schutzgeräte

Leistungsschalter:

- o SF₆-Technik → hervorragende Isolier- und Lichtbogen-Löscheigenschaften
 - wirtschaftliche Lösungen auch im MS-Bereich durch
 - niedrigen Adiabatenexponent und
 - niedrige Schallgeschwindigkeit von SF₆
 - Selbstblasprinzip
 - neues Düsenmaterial (Polytetrafluorethylen PTFE) und
 - neue Kontaktwerkstoffe (CuW) mit günstigem Abbrandverhalten
 - Entwicklung: Reduzierung der Antriebsenergie
- o Vakuum-Technik bis MS
 - Kontaktwerkstoffe (CuCr)
 - hochreine, gasarme Werkstoffe
- o Halbleiterschalter
 - nur für Spezialaufgaben (Wirtschaftlichkeit, Sicherheit)
- o Supraleitende Schalter (?)

Ableiter:

- o SiC mit Funkenstrecke ersetzt durch MO-Ableiter ohne Funkenstrecke
 - Lebensdauer
 - Teilentladungsverhalten
 - thermische Stabilität
 - Verhalten bei Verschmutzungen (TE, Erwärmung)
 - Ansprechverhalten, Modellbildung
 - Reduzierung von BIL und SIL, Isolationskoordination

Transformatoren

- o Grenzbedingungen gegeben durch
 - Transportmöglichkeiten bestimmen
 - o max. Gewicht
 - o max. Abmessungen
 - Spannung (max 1500 kV)
 - Leistung (max. 1700 MVA)
- o Dielektrika
 - Öl/Zellulose, Preßspan-Formteile (Transformerboard)
 - SF₆/Folien
 - Epoxydharz, PU
- o Wicklungen
 - interne Resonanzen (angeregt durch Trennerschalten)
 - MO-Beschaltung, Dimensionierung
 - Spannungsverteilung (direkter SF₆-Anschluß)
 - Prüfbedingungen
- o Entwicklungsschwerpunkte
 - thermische Überlastbarkeit im Betrieb
 - thermisches Modell, Heißpunkte, Kühlsysteme
 - Geräusch- und Verlustreduzierung
 - - noch dünnere, hochpermeable Kernbleche und
 - moderne Fertigungseinrichtungen
 - Leittechnik für Transformatoren
 - Schutz, z.B. Vergleichsschutz, Buchholzschutz
 - Betriebsführung, z.B. Stufenschalter, Überlastbarkeit
 - Überwachung, z.B. Isolation, Windungsschluß, Wicklungsaufbau

Statische Kompensatoren

- o Verbesserung der Qualität der Energieeinspeisung
- o Unabhängigkeit vom Verbraucher
- o Vorteile:
 - bessere Ausnutzung der Übertragungskapazität vorhandener Leitungen
 - Spannungshaltung
 - Dämpfung von Stabilitätsschwingungen
 - Begrenzung von zeitweiligen Überspannungen
 - Kompensation von Oberschwingungen

Energiespeicher

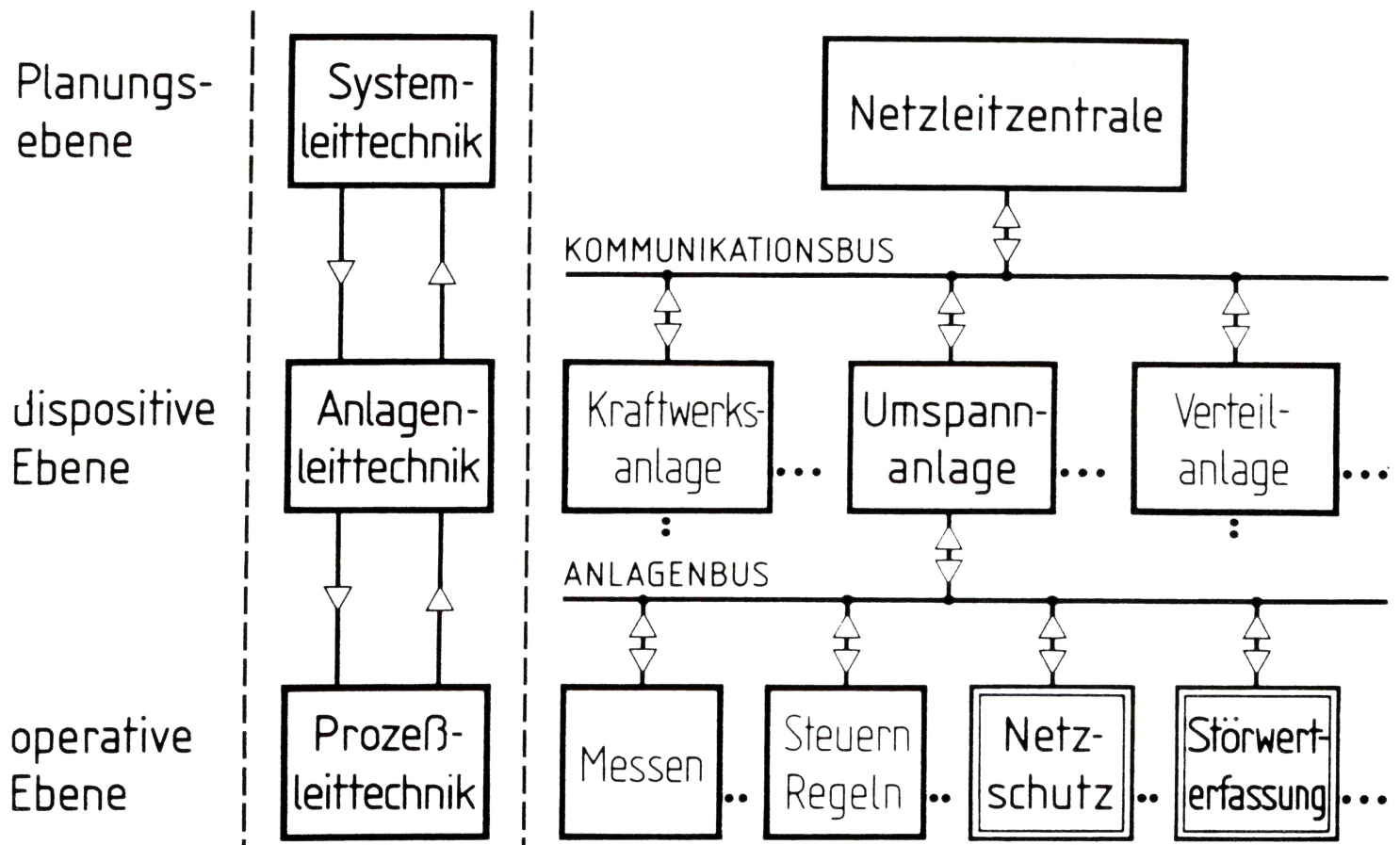
- o dezentrale Energiespeicherung
 - neue Batterien (NaS)
- o Vorteile:
 - Frequenzhaltung (z.B. im Inselnetz, Berlin)
 - Spannungsstützung im NS- und MS-Netz (TWS)
 - verzögerter Ausbau überlasteter Strecken
 - Wirtschaftlichkeit (!)

Supraleitung

- o Anwendungen
 - Generatoren, Synchronmaschine ab 800 MVA (Prototyp (He))
 - Transformatoren
 - Kabel
 - Schalter
- o neue Supraleiter, die sich bei der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs betreiben lassen
 - bisher zu geringe Stromdichten (bis 10^4 A/cm^2)

Aufgabenteilung in der Leittechnik

Hierarchischer Aufbau



auch auf anderen Gebieten:

o Prozentualer Anteil der elektrischen Ausrüstung an:

	1966	1986
Fördermaschinen	25 %	55 %
Walzwerke	20 %	50 %
Werkzeugmaschinen	20 %	40 %

o verbesserte Leittechnik (höhere Intelligenz)

Sensoren, Steuergeräte, Datensichtgeräte, PC

Leittechnik - Entwicklungsmöglichkeiten durch die Mikroelektronik

- o Meßwerterfassung und -verarbeitung
z.B. Betriebsmessung
- o Schutzfunktionen
z.B. Kurzschlußschutz von Leitungen,
Störwerterfassung und Auswertung
Vergleichsschutz von Transformatoren
- o Überwachungseinrichtungen
z.B. Isolationszustand von Transformatoren,
Bauteileüberwachung
- o Netzbetrieb
z.B. alle Steuer- und Automatisierungsaufgaben (KU)
optimaler Leistungsfluß
Zustandserkennung
Einstellen von Netzschutzeinrichtungen
Grenzbelastungen, optimaler Einsatz von Geräten
- o Datenerfassung und Protokollierung
z.B. Stellungsmeldungen von Schaltgeräten
eingestellte Schutzdaten
Zustand des Schutzes
Revisionsintervalle
- o Sensorik, Aktorik (Mikrosystemtechnik)
z.B. Spannungsmessung

Entwicklungsaufgaben:

- o Anpassung der Hardware und Software an die Aufgaben in der elektrischen Energieübertragung
- o Neue Algorithmen bei digitaler Verarbeitung
- o Algorithmen zur Fehlererkennung und Fehlerortung
- o Überwachungsfunktionen für Geräte
- o Auslastung der Geräte, Lebensdauerverbrauch
- o Netzwiederaufbau nach Störungen
- o Expertensysteme für Netzbetrieb
- o Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) mikroelektronischer Schaltungen