

# **Aufbruch - Prüf- und Meßtechnik für das neue Jahrtausend**

**K. Feser, Institut für Energieübertragung und  
Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart**

## **Zusammenfassung:**

Es werden die Trends in der Prüf- und Meßtechnik im Werk und Vor-Ort aufgezeigt. Neue bzw. überarbeitete Prüfvorschriften und Ihr Einfluß auf die Prüftechnik werden diskutiert. Online und offline Monitoring und Diagnosesysteme beeinflussen die Prüfverfahren. Welche Prüfverfahren sind nach einer Instandhaltung bzw. einem Retrofit Vor Ort einsetzbar?

# Einleitung

Durch die globale Öffnung und Liberalisierung der Märkte ist in der Energieversorgung ein Aufbruch zu spüren, der auch in den Unternehmen, die hochspannungstechnische Produkte und Anlagen herstellen, deutlich veränderte Zielsetzungen bewirkt. Während in früheren Jahren der Entwickler und Techniker die entscheidenden Fortschritte gestaltete, sind heute Kosten- und Umweltgesichtspunkte, die den Produktkreislauf von der Herstellung bis zur Entsorgung berücksichtigen, dominierend.

Im neuen Jahrtausend gilt es bei weiter wachsender Weltbevölkerung eine leistungsfähige und effiziente Energieversorgung sicherzustellen. Hierfür wird die Hochspannungsprüf- und Meßtechnik ihren Beitrag zu leisten haben. Es ist sicherlich nicht mit höheren Übertragungsspannungen zu rechnen, aber die heute vorwiegend verwendeten Drehstromsysteme werden durch Gleichspannungssysteme für die Energieübertragung bei großen Leistungen und für die Energieverteilung im Nieder- und Mittelspannungsbereich ergänzt. Innovationen bei den Leistungshalbleitern, der Optoelektronik und der Informationstechnik und ihre Integration in Geräte und Anlagen werden die Übertragung und Verteilung elektrischer Energie zuverlässiger und wirtschaftlicher gestalten. "Intelligente" Schaltsysteme, die Kurzschlußströme und Überspannungen begrenzen, können in Zukunft zu einer geänderten Dimensionierung der Isolationen von Hochspannungsapparaten führen.

Die elektrische Energietechnik wird oft als konservativ beschrieben. Dies beruht sicherlich auch auf der Tatsache, daß die Hochspannungsisolieretechnik seit über 100 Jahren das Öl/Papier Dielektrikum wegen seiner hervorragenden elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften bevorzugt. Daneben waren und sind die isolierenden Gehäuse der Apparate seit Beginn der Hochspannungstechnik aus Porzellan, das witterungs- und ölbeständig ist. Heute wird das Porzellan in vielen Anwendungen durch glasfaserverstärkte Kunststoffe mit Silikonschirmen ersetzt. Diese Verbundmaterialien sind wesentlich leichter und gestatten auch die Integration von mehreren Funktionen, so daß kompaktere Betriebsmittel entstehen.

Neben der Luft als auch heute noch wichtigstem gasförmigen Isolierstoff der Hochspannungstechnik hat sich in den Betriebsmitteln bei hohen Spannungen das elektronegative Isoliergas Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) bewährt, das zum Isolieren und als Löschgas im Leistungsschalterbau eingesetzt wird. In Zukunft ist aus ökonomischen und umweltspezifischen Aspekten der Einsatz von Gasgemischen ( $\text{N}_2/\text{SF}_6$ ) zu entwickeln.

Gasgemische ( $\text{N}_2/\text{SF}_6$ ) werden neuerdings auch für die Isolierung von gasisolierten Leitungen (GIL) verwendet, die den bewährten Kabeln, die mit Öl/Papier oder Kunststoff (VPE) isoliert sind und für Verbindungen mit großen Leistungen im städtischen Bereich eingesetzt werden, Konkurrenz machen. Isolierungen für supraleitende Betriebsmittel, Vakuumschalter für höhere Spannungen und Isoliermaterialien mit Halbleitereigenschaften sind weitere Forschungs- und Entwicklungsaufgaben der näheren Zukunft.

Neben der Optimierung eines Betriebsmittels wird auch die Optimierung des Gesamtsystems über die Zukunft einer Isolationstechnik entscheiden. Hier sind vor allem Monitoringsysteme für die Isolationen zu entwickeln, die über geeignete Parameter, z.B. das Teilentladungsverhalten, eine Bewertung der Isolierung gestatten. Gelingt die dielektrische, thermische und mechanische Erfassung der Eigenschaften eines Isoliermaterials im Betrieb, so kann eine völlig neuartige Isolationskoordination, die diese Daten berücksichtigt, entwickelt werden und zu wesentlich einfacheren und wirtschaftlicheren Lösungen führen.

Die Entwicklungen in der Isolationstechnik beeinflussen sehr stark die Hochspannungsprüf- und Meßtechnik. Prüfverfahren müssen auf die Isoliersysteme abgestimmt sein, ebenso wie die Meßverfahren und deren Auswertung vom Isoliersystem bestimmt werden. Nur durch die rechtzeitige Erfassung und Bewertung von Veränderungen in einem Isoliersystem kann eine optimale Prüftechnik entwickelt werden.

# Heute:

- **Hochspannungsprüfungen im Werk**
  - Konstruktion, Herstellung, Material
- **Hochspannungsprüfungen (Messungen) Vor-Ort**
  - Transport, Montage Vor-Ort
    - Kabel, GIS
- **Messungen in regelmäßigen Abständen oder nach Fehlern**
  - Wartung, weitere Messungen
  - Zustand eines Betriebsmittels
  - Entscheidung nach weiteren Messungen: Reparatur, weiterer Betrieb, Betriebsende



# in Zukunft:

- adaptive Wartung
  - Optimierung der Betriebsmittel und Systeme
    - on-line und off-line Zustandserfassung (Trend, Fingerprint, Korrelationen)
    - Diagnose, Überlastfähigkeit, Abschätzung der Restlebensdauer
- ↓ notwendig
- Fingerprints, Startwerte aus der Werksprüfung
  - Fingerprints mit Störungen, Empfindlichkeit der Vor-Ort-Meßmethoden, aussagefähige Parameter

# Fortschritte in der HS-Prüf- und Meßtechnik

- Entwicklung der internationalen Normen
- technologische, konstruktive und systemtheoretische Entwicklung von Betriebsmitteln und Energiesystemen
  - Werkstoffe
  - Leistungselektronik
  - Nanoelektronik, Mikroelektronik
  - Mikrosystemtechnik, Sensorik, Aktorik
  - Optoelektronik
  - Informationstechnik
- Qualitätsanforderungen
  - ISO 9000, ISO 45001
  - Akkreditierung von Prüffeldern
  - Rückführbarkeit
  - Meßunsicherheit

# Trends: Energiesysteme

- wirtschaftliche und technologische Grenzen (1200 kV WS,  $\pm 800$  kV GS)
- Supraleitung, Strombegrenzer
- verteilte Energieerzeugung
- Anstieg von Leistungselektronik (GS-Übertragung, FACTS, "intelligente" Schalter)
- weiter entwickelte Schutzsysteme (MOA, digitale Schutzsysteme, Zustandserfassung, Asset-Management)
  - reduzierte Überspannungen
  - begrenzte Kurzschlußströme
  - kompaktere Betriebsmittel

**IEC**



**internationale Normen**



**globaler Markt**



**global handelnde Industrie**



**Konflikt**



**örtlich begrenzt handelnde  
Regierungen**

# **TC 42: Hochspannungsprüftechnik**

- **gegründet am 4. Juli 1955 in London**
- **Aufgabe: Empfehlungen für die Prüftechnik mit Wechselspannungen, Gleichspannungen, Stoßspannungen und Stoßströmen erarbeiten**
- **Sekretariat: Kanada,  
Georges H. Vaillancourt**
- **Mitglieder: 24 Länder**
- **Enge Zusammenarbeit mit  
CIGRE SC 33, WG 33-03**

**Tabelle 1: Themen und Vorsitzende der laufenden WGs und MTs von TC 42  
(Stand: 5.1999)**

	<b>Publikation/Thema</b>	<b>Vorsitzender</b>
WG 08	IEC 61083: Instruments and software used for measurements in high voltage impulse tests Part 1: Requirements for instruments	R. Malewski, Canada
WG 11	IEC 60270: Partial discharge measurement	W. Zaengl, Switzerland
MT 12	IEC 60052: Recommendations for voltage measurements by means of standard gaps	E. Gockenbach, Germany

**Tabelle 2: Vorschriften von TC 42 (Stand: 6.1999)**

Vorschrift	Thema	1. Ausgabe	Letzte Revision
IEC 60052	Recommendations for voltage measurements by means of standard gaps	1960	2. edition 42/151/CD 5.1999
IEC 60060	High voltage test technique Part 1: General definitions and test requirements Part 2: Measuring systems	1973 1976/77	1989 11.1994
IEC 60270	Partial discharge measurements	1968	42/149/CDV 11.1998
IEC 790	Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests	1984	in 42/150/CDV 1.99
IEC 833	Measurements of power-frequency electric fields	1987	
IEC 61083	Instruments and software used for measurements in high voltage impulse tests Part 1: Requirements for instruments Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse wave forms	08.1991 07.1996	2. edition 42/150/CDV 1.1999
IEC 61180	HV test techniques for low voltage equipment Part 1: Definitions, test and procedure requirements Part 2: Test equipment	10.1992 06.1994	
IEC 61321-1 Report 2	HV Testing techniques with very fast impulses Part 1: Measuring systems for very fast front over voltages generated in gas insulated metal-enclosed substations	09.1994	

# IEC 60

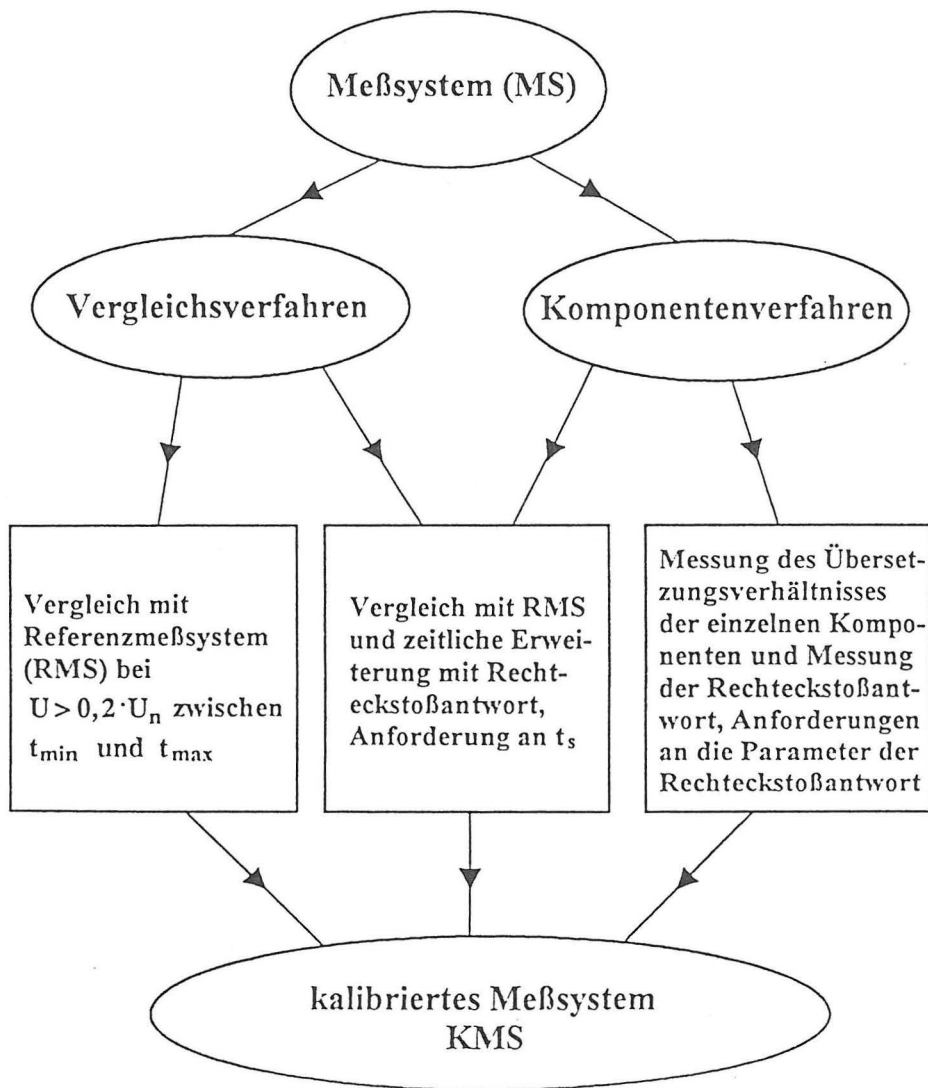
## Hochspannungsprüftechnik

- Teil 2 "Meßsysteme", 1994
  - ◇ Rückführbarkeit
  - ◇ Vergleichsmethode
  - ◇ Linearitätskontrolle
  - ◇ Referenzmeßsysteme
  - ◇ Auswerteverfahren
- Anhang H: "Unsicherheiten bei Hochspannungsmessungen", 1996
  - ◇ Auswertung der Unsicherheiten
    - von Messungen
    - von der Kalibrierung des Meßsystems
- CIGRE WG 33-03
  - ◇ Auswerteverfahren



# Kalibrierung eines Meßsystems für HS-Impulsmessungen

## IEC Publikationen 60-2 (1994)



# **IEC 60270 "TE-Meßtechnik"**

## **1. Ausgabe, 1968**

→ Einführung der "scheinbaren" Ladung

## **2. Ausgabe, 1981**

→ Ausdehnung auf

- die Kalibrierung des Meßkreises
- die Anforderungen an Empfindlichkeit und Genauigkeit der Meßinstrumente
- TE-Meßtechnik bei Gleichspannungen

## **3. Ausgabe, in Bearbeitung (CDV 11.1998)**

→ Ausdehnung auf

- digitale TE-Meßtechnik
- Verbesserungen in der Kalibrierung
- Anforderungen an Instrumente
- Rückführbarkeit

**IEC 1321-1, Report, type 2 (1994):**

**"High Voltage testing with very fast impulses.  
Part 1: Measuring systems for very fast front  
overvoltages (VFFO) generated in GIS"**

- **Steilstoßspannung ist ein neues Gebiet, das durch die Anwendung der GIS-Technologie entstanden ist**
  
- **Aktivitäten innerhalb IEC:**
  - **IEC TC 28, IEC 71-1, 1993  
(Isolationskoordination)**
  - **IEC TC 17 (Prüftechnik für Trenner, EMV)**
  - **IEC TC 77 C (HEMP)**
  - **IEC TC 77 (EMC)**
  - **IEC TC 36 (Durchschlagsprüfung von Isolatoren)**
  
- **andere Aktivitäten**
  - **IEEE TF 15-09**
  - **CIGRE WG 33-03**
  
- **Vorschriften zur Erzeugung und zur Meßtechnik von Steilstoßspannungen (TC 42)**

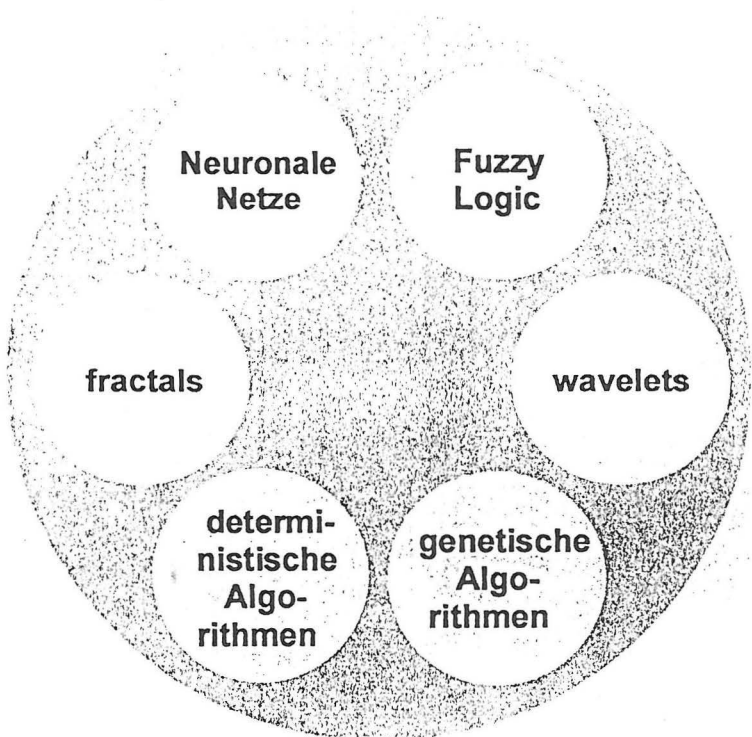
# Trends: HS-Prüftechnik im Werk

- **Stoßspannungen**
  - Nachkreise für Steilstoßspannungen
  - Filter gegen Überschwingungen bei Blitzstoßspannungen
    - größerer Belastungsbereich
  - Referenzmeßsysteme
  - Transientenrekorder (12 bit, 200 MHz)
  - Auswertesoftware für Kalibrierung und Messung
- **Wechselspannungen**
  - Resonanzanlagen
  - Prüfanlagen integriert in Fertigungsablauf
  - digitale TE-Meßgeräte
  - UHF-TE-Meßgeräte
  - "Numerische" Brücke
  - akustische TE-Meßtechnik (Ortung)

# HS - Meßtechnik

- voll automatisierte Prüfsysteme

➔ Bewertung der Ergebnisse mit Expertensystemen



# HS-Prüftechnik Vor-Ort

- Transport
- Montage Vor-Ort
- Amplitude der Prüfspannungen  
80 % des Werkspegels  
(Wiederholungsprüfung, Statistik)
- Kabel, GIS
- Probleme:
  - Leistungsanforderungen  
→ Resonanzanlagen
  - Empfindlichkeit der Meßtechnik  
(Störungen)  
→ digitale Signalverarbeitung
- Neues Prüfverfahren für GIS

# **Trends: Vor-Ort Prüftechnik**

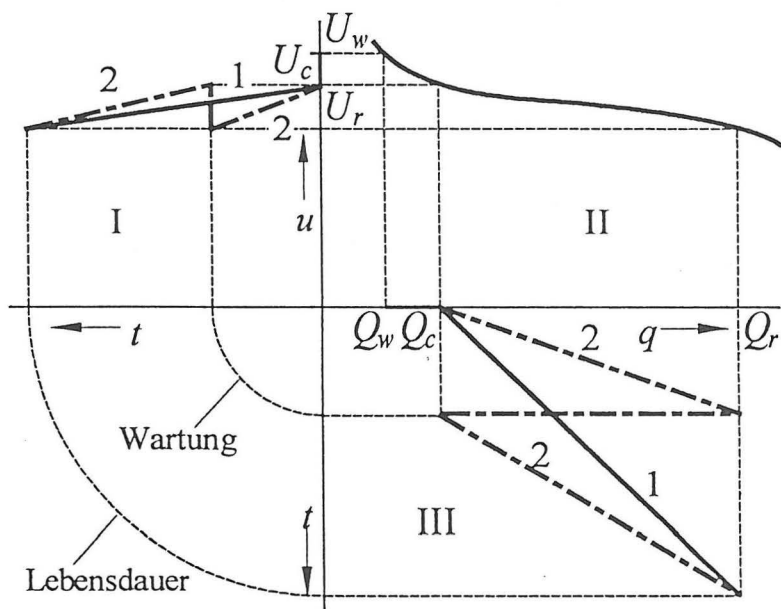
- **mehr Vor-Ort-Prüfungen**
  - viele Betriebsmittel sind über 30 Jahre in Betrieb
  - neue Betriebsmittel, die im Werk nicht geprüft werden (Kabel, GIS)
  - Zustandserfassung (Fingerprints), nach einer Wartung
- **Notwendigkeit einer Vorschrift**
- **Untersuchungen von CIGRE WG 33-03 (seit 1995)**
  - Meßunsicherheit, Toleranzen
  - Impulsformen
  - Verfahren
  - Anhang zu IEC 60-1
- **Prüfanlagen**
  - gekapselte Prüfanlagen
  - leichte Vor-Ort Montage der Prüfanlagen
  - ins System integrierte Prüfanlage (Trennerbetätigung in GIS, Kabelprüftechnik, Übertragungsfunktion von Transformatoren mit Schaltvorgängen)
  - kompakt, einfach, robust

# Warum denn Diagnostik?

- Lebensdauer der Betriebsmittel (> 30 Jahre)
- geringe Ausfallhäufigkeit
- Ausfallwahrscheinlichkeit der Diagnostik
- Diagnostik als Frühwarnsystem  
Aufzeigen von Veränderungen im Isolationssystem  
→ Einleitung von Maßnahmen zur Abwendung größerer Fehler und zur Vermeidung bzw. Begrenzung von Folgeschäden
- Unterstützung von Entscheidungsprozessen:  
Wartung  
Außerbetriebnahme  
Überlast möglich für bestimmte Zeit  
Lebensdauer



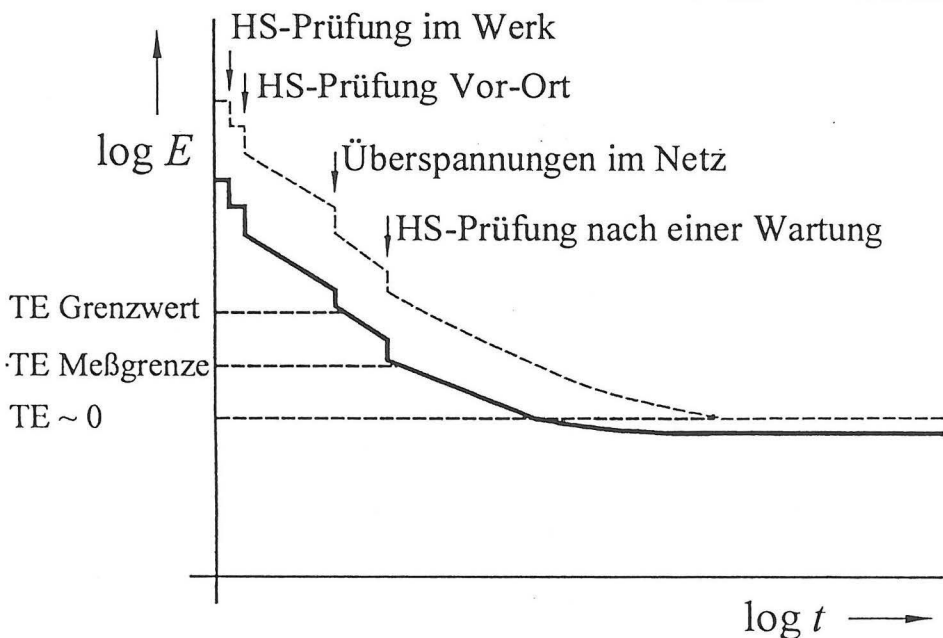
# Isolationskoordination und Zustands- erfassung (nach Carrara)



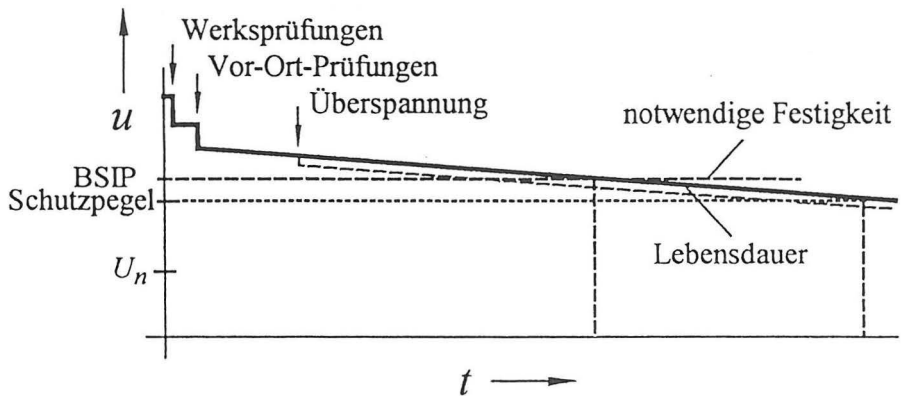
- Welcher Parameter ist meßbar ?
- Grenzwerte der Parameter ?
- mehrere Beanspruchungen gleichzeitig
- Korrelation zwischen Festigkeit und meßbaren Parameter

# Modifiziertes Lebensdauergesetz

$$t \cdot E^n = \text{const}$$



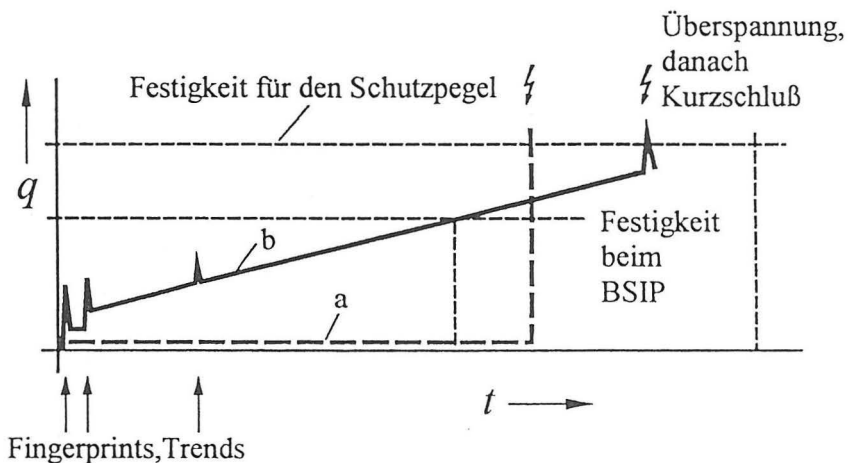
# Zustandserfassung und Hochspannungsprüfungen



→ Prüfspannungen so niedrig wie möglich

● Schutzpegel

● Zustandserfassung, aber welcher Parameter ?



a - SF<sub>6</sub> - Isolation → Meßtechnik, Empfindlichkeit

b - Öl/Papier - Isolation → Degradation mit der Zeit

→ Zustandserfassung von gewissen Parametern

→ Lebensdauer

→ prinzipiell unterschiedliches Verhalten der beiden Isolationssysteme

# Für Isolationsbewertung verwendbare Parameter

- TE - Verhalten
- Impedanz - Verhalten
- thermisches Verhalten
- Auswertung von Zersetzungsgasen

# Hochspannungsprüfungen und Zustandserfassung

- Niedrigere Prüfspannungen im Werk
    - abhängig vom Isolationssystem
  - Prüfspannungen Vor-Ort so niedrig wie möglich
    - abhängig vom Isolationssystem
  - Am besten: Zustandserfassung bei Nennspannung
    - Erkennen von Abweichungen im Frühstadium
    - Empfindlichkeit
    - Wartung ohne HS-Prüfungen, nur mit empfindlichen Meßmethoden
- Reduzierung des Blitzstoßisulationspegels und des Schaltstoßisulationspegels bis zum Schutzpegel
- Fingerprints, Trends, Korrelationen der wichtigsten Parameter während der Zustandserfassung
  - Risikoabschätzung
  - Verantwortlichkeit für Vor-Ort-Prüfungen nach einer Zustandserfassung!