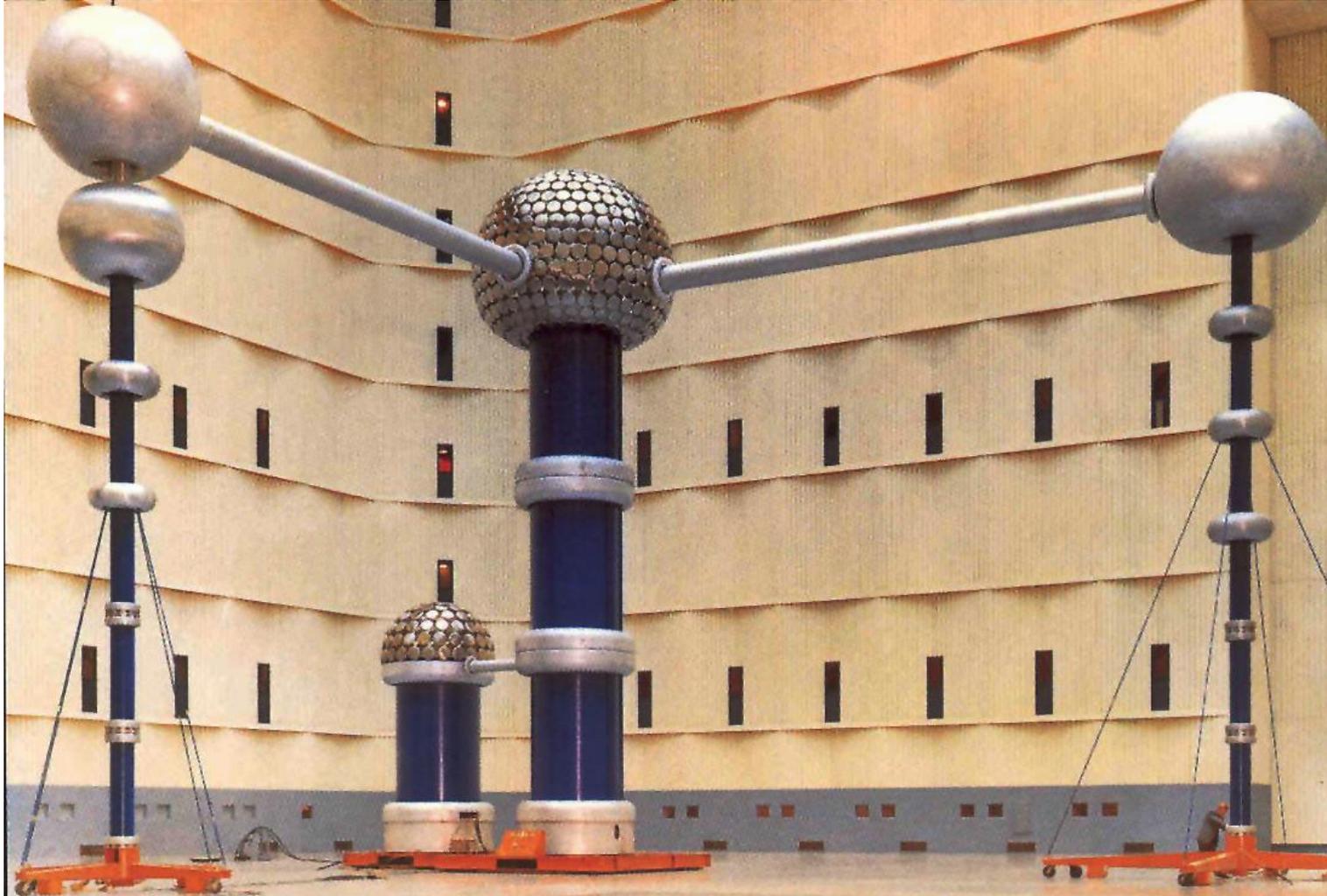


Übersicht

- **Beispiele großer Hochspannungslaboratorien**
- **Erzeugung hoher Wechselspannungen**
- **Erzeugung hoher Gleichspannungen**
- **Erzeugung von Stoßspannungen**

Beispiele großer Hochspannungslaboratorien

Hochspannungslabor der EdF in Les Renardier





Hochspannungslabor der CESI / Mailand

Hochspannungslabor der Fa. HSP Hochspannungsgeräte / Köln



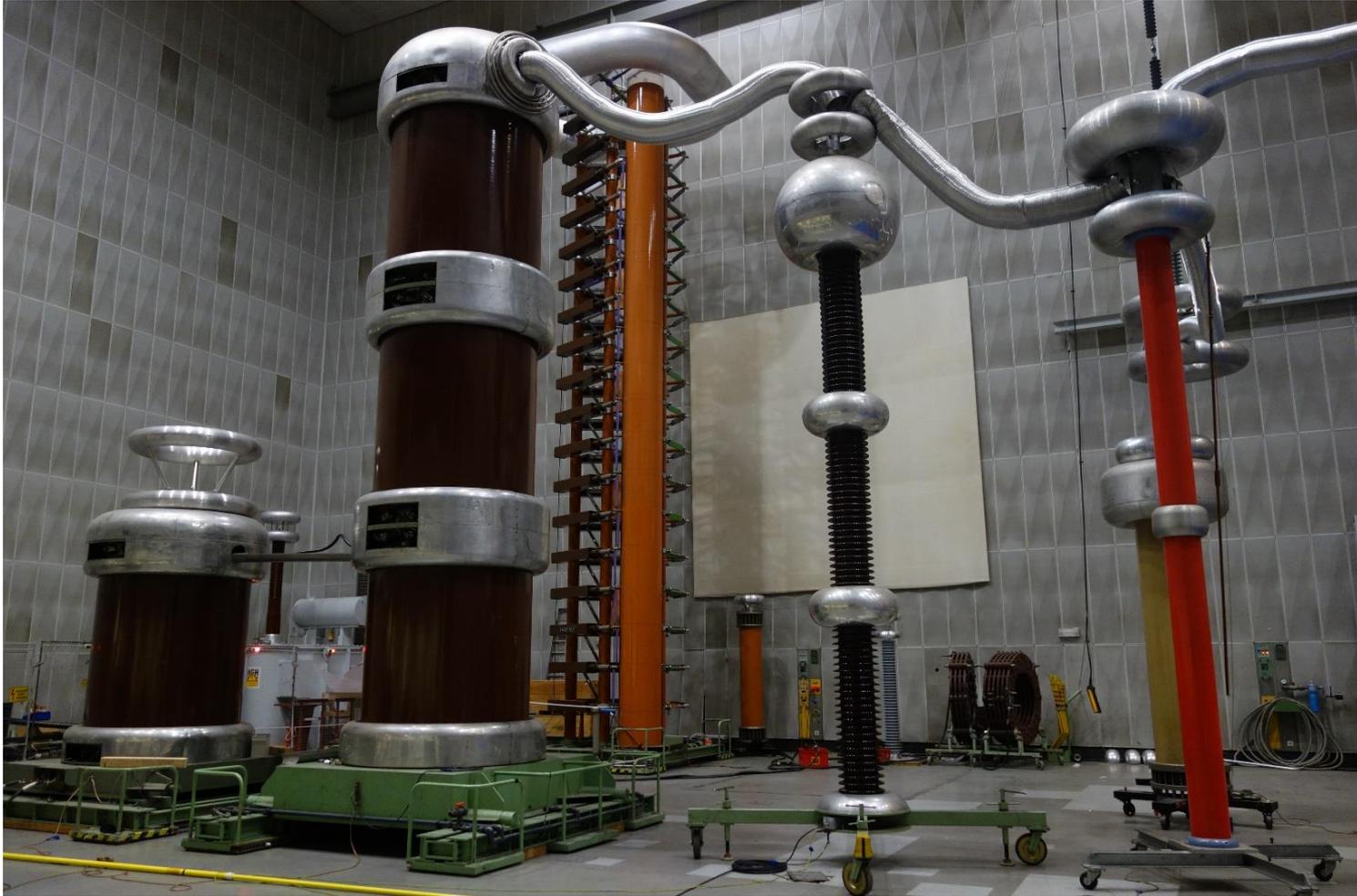
**3-stufige
HS-Kaskade
1,8 MV**

Hochspannungslabor des Siemens-Schaltwerks in Berlin (sog. „Parabelhalle“)





Hochspannungslabor der TU München



Hochspannungslabor des IEH am KIT

Erzeugung hoher Wechselspannungen

AC

Erzeugung hoher Wechselspannungen

- Einphasige Prüftransformatoren relativ kleiner Leistung, wobei die Primärspannung geregelt wird.
- Hoher Isolationsaufwand
 - große Streuinduktivität
 - relativ große u_k -Werte von 15 - 25 %.
- Anforderungen an die Spannungsform (IEC 60 - 2)
Scheitelwert \hat{u} darf um maximal 5 % vom Effektivwert U_{eff} multipliziert mit $\sqrt{2}$ abweichen.

Erforderliche Leistung:

Abhängig von Kapazitäten der Prüflinge (wenige 10 pF bis zu mehreren nF)

Für noch größere Kapazitäten (z.B. Kabelprüfung)

→ spezielle Prüfschaltungen !

Leistungsauslegung von Prüftransformatoren

Kriterium für die erforderliche Leistung:

Kapazitäten der in Frage kommenden Prüflinge

(Isoliersysteme weisen kaum Wirkverluste auf).

→ Trafo-Nennleistung S_n ist proportional zu $U_n^2 \cdot C_n$,

mit

C_n Kapazität der größten vorkommenden Prüfanordnung.

Trafo-Nennleistung S_n :

$$S_n = k \cdot U_n^2 \cdot C_n$$

k = Reservefaktor für die Auslegung des Prüftransformators

Für $k > 1$ → Überdimensionierung (gleichbedeutend mit einer Reserveleistung).
(k bei hohen Spannungen: ca. 2 bis 2,5; k bei niedrigen Spannungen ca. 5 – 10).

Richtwerte für Kapazitäten

Hänge- und Stützisolatoren:	10 - 50 pF
Durchführungen:	100 - 500 pF
induktive Wandler:	200 - 500 pF
Hochspannungskabel:	
gasisoliert (z.B. SF ₆ -Rohrleiter):	~ 60 pF / m
Massekabel und Öl-Papier-Kabel:	200 - 700 pF / m
Leistungstransformatoren:	1 - 10 nF
gekapselte Schaltanlagen (SF₆)	1 - 10 nF

Beispiel für die Leistungsdimensionierung eines Prüftransformators

Geforderte Prüfspannung: $U_n = 300 \text{ kV}$

Frequenz: $f = 50 \text{ Hz}$

Prüflingskapazität: $C_n = 3 \text{ nF}$

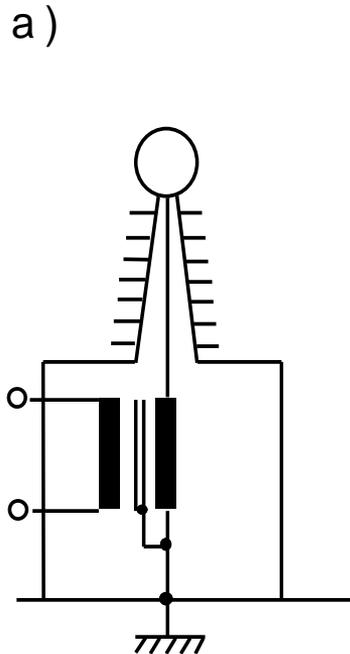
Gewählter Reservefaktor: $k = 2,5$

Erforderliche Trafoleistung:

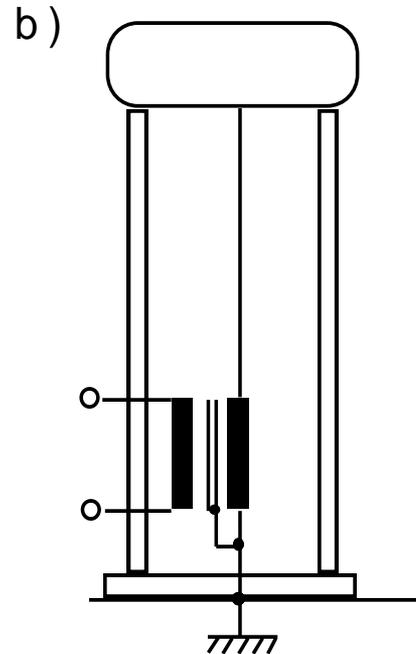
$$S_n = k \cdot U_n^2 \omega C_n = 2,5 \cdot (300 \cdot 10^3)^2 \cdot 3 \cdot 10^{-9} \approx 200 \text{ kVA}$$

oder: **max. Prüflingskapazität bei $k=1$: $2,5 \cdot 3 \text{ nF} = 7,5 \text{ nF}$**

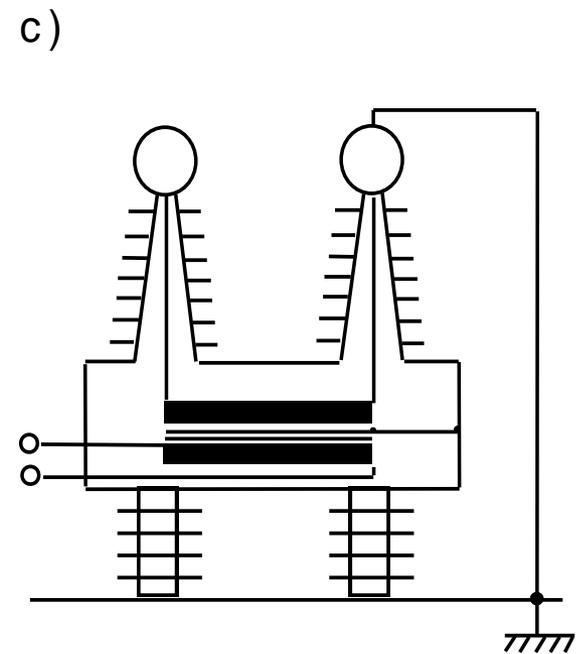
Bauformen und Schaltungen für Prüftransformatoren



a) Kesselbauweise

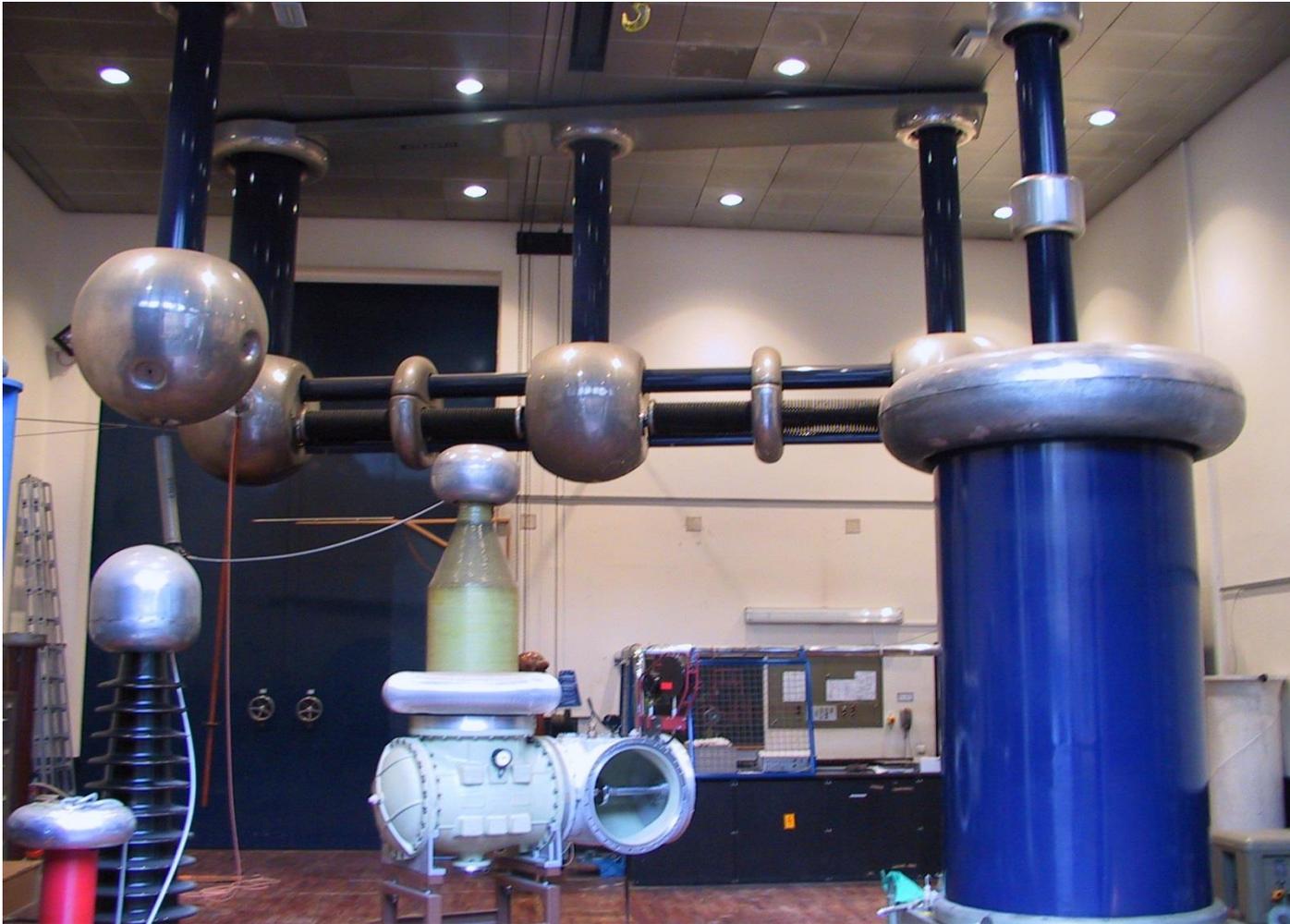


**b) Isoliermantelbauweise
(bis ca. 800 kV)**



**c) Bauweise mit Kern auf
halbem Potential**

Prüftransformator in Isoliermantelbauweise



$U_n = 400 \text{ kV}$

Bauformen und Schaltungen für Prüftransformatoren

a) Kesselbauweise

- Nachteil: Hochspannungsdurchführung erforderlich
- Vorteil: Gute Kühlung über Stahlkessel

b) Isoliermantelbauweise

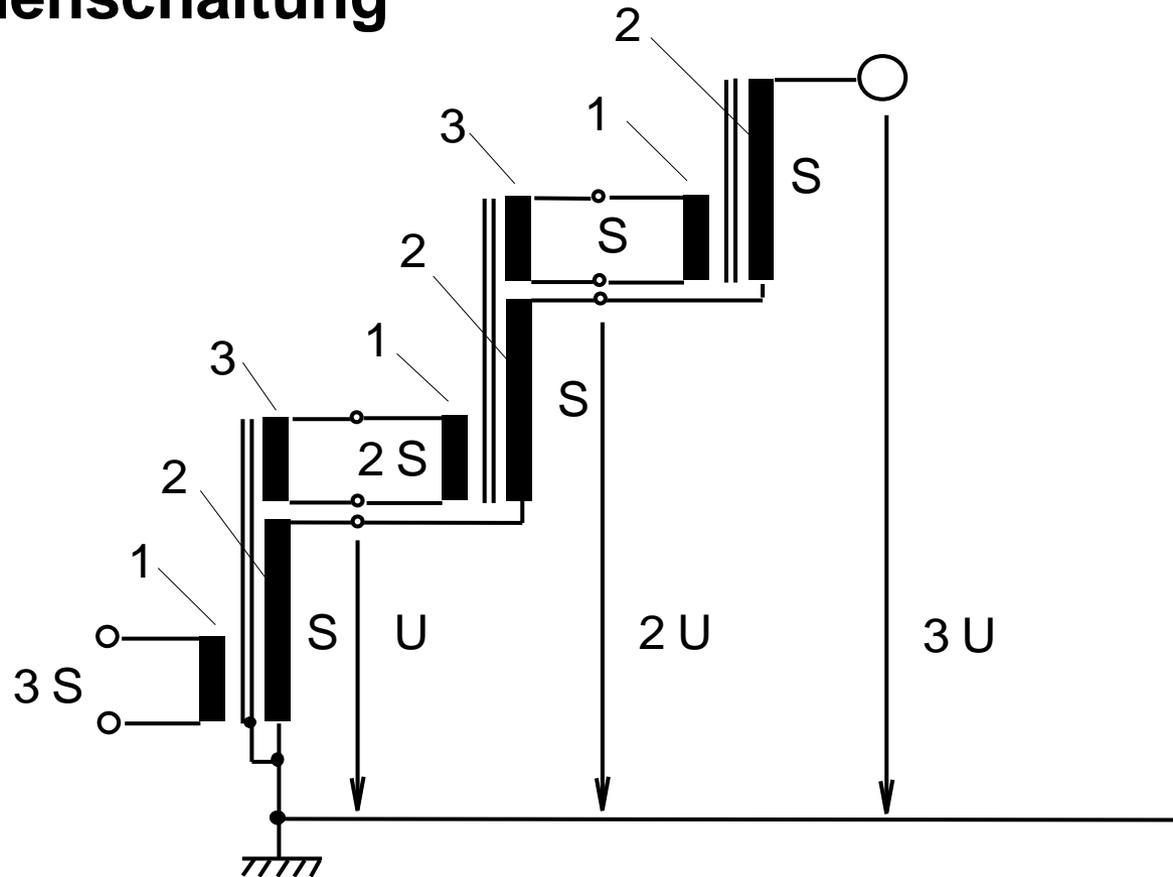
- Nachteil: Ungünstigere Kühlung durch Isolierstoffkessel
- Vorteil: keine separate Hochspannungsdurchführung erforderlich.

c) Bauweise mit Kern auf halbem Potential

Einsatz für sehr hohe Prüfspannungen (meist > 800 kV, max. 4 Stufen)

- Nachteil: hohe rel. Kurzschlussspannung; höherer Preis
- Vorteil: modulare Bauweise; leichter Transport
(Einsatz bis zu Prüfspannungen von ca. 2,5 MV)

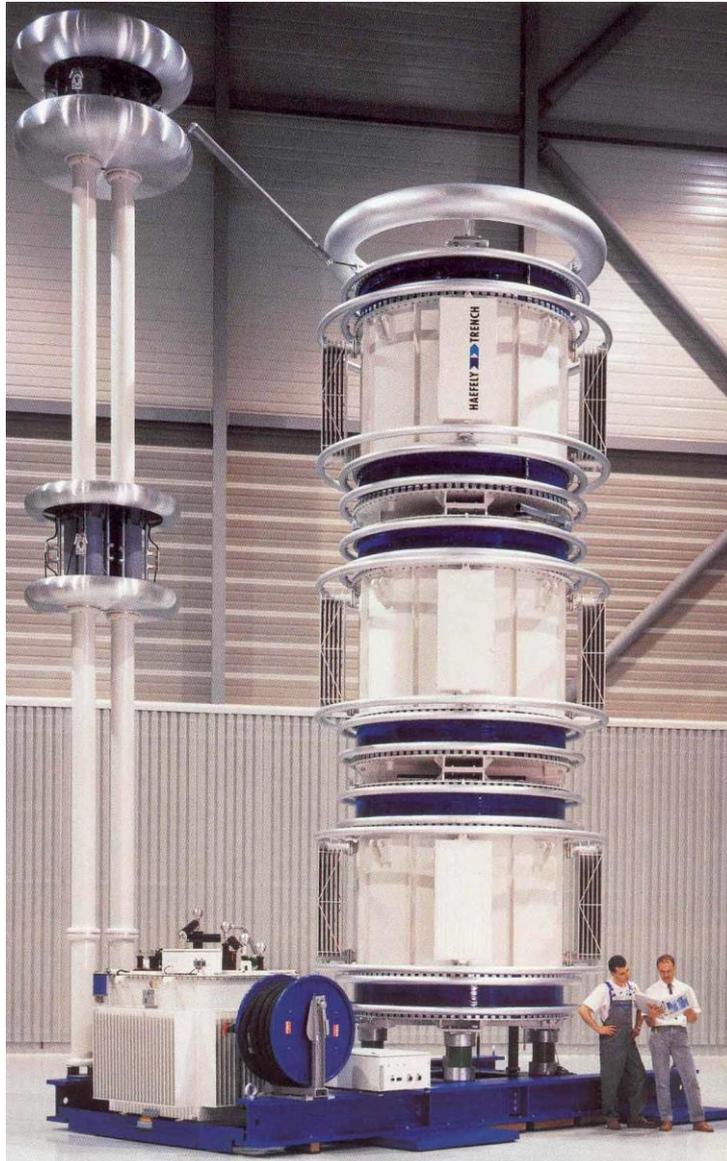
Prinzipieller Aufbau einer dreistufigen Kaskadenschaltung



1 Erregerwicklung

2 Hochspannungswicklung

3 Koppelwicklung



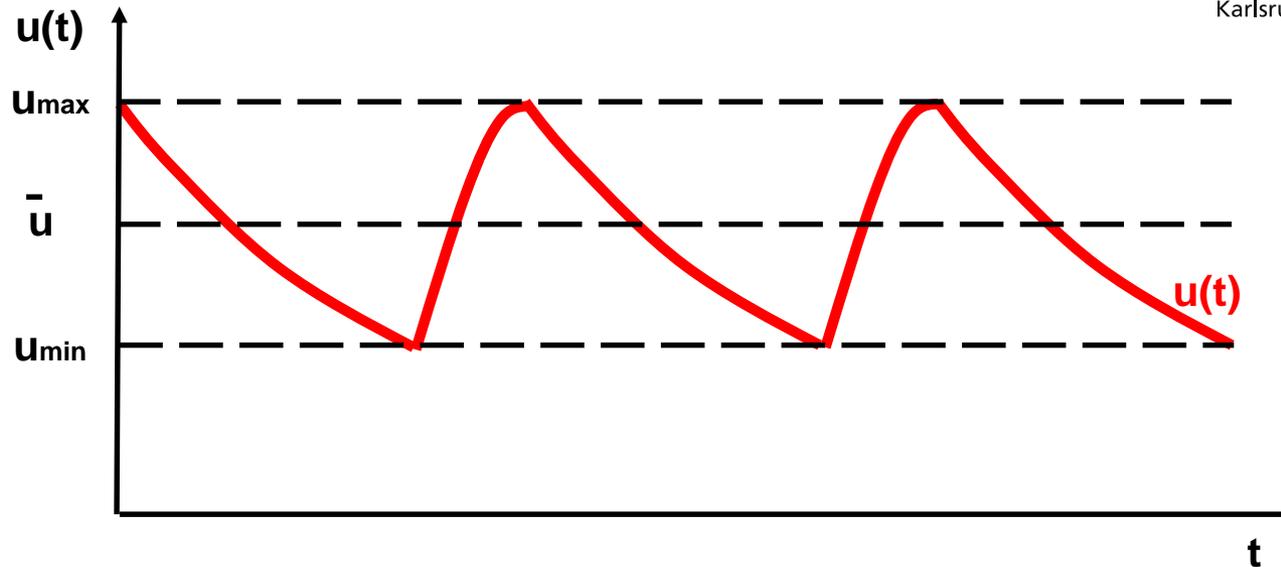
Beispiel einer dreistufigen Kaskadenschaltung

**Wechselspannungs-
prüfsystem 600 kV**

(Fa. Haefely)

Erzeugung hoher Gleichspannungen

DC



Kenngrößen einer Gleichspannung

1. Polarität

(positiv, negativ)

2. Höhe

(arithmetischer Mittelwert)

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

3. Höchstwert

(u_{\max})

4. Überlagerungsfaktor

($\delta u / \bar{u}$) = $0,5 \cdot (u_{\max} - u_{\min}) / \bar{u}$

(engl.: ripple factor)

nach IEC 60-2: $< 5 \%$.

2 Verfahren:

1. Gleichrichtung hoher Wechselspannungen

2. Anwendung elektrostatischer Generatoren

(hier nicht näher behandelt, da prüftechnisch ohne Bedeutung)

Heute in Laborschaltungen:

Ausschließlich Reihenschaltungen von Halbleiterdioden auf Siliziumbasis

Hohe Spannungen → viele Halbleitergleichrichter in Reihenschaltung

Während der Sperrphase darf die Spannung über jedem Element den zulässigen Wert nicht überschreiten!!!

Halbleitermaterialien für Gleichrichter:

1. **Selen** (alte Hochspannungsgleichrichter bis ca. 1970)
2. **Germanium** (für Hochspannungsgleichrichter kaum eingesetzt)
3. **Silizium** (heute eingesetztes Halbleitermaterial)

Vergleich wichtiger Kenndaten:

Halbleitermaterial	Selen	Germanium	Silizium
Scheitelsperrspannung je Zelle in V	30 - 50	150 - 300	1000 - 4000
Belastbarkeit der Sperrschicht in A / cm²	0,1 - 0,5	50 - 150	50 – ca. 200

Hauptnachteile von Germanium und Selen:

Selen:

- sehr geringe Sperrspannung
- kleine Stromdichten
- hohe Durchlassspannung

Germanium:

- geringe Sperrspannung

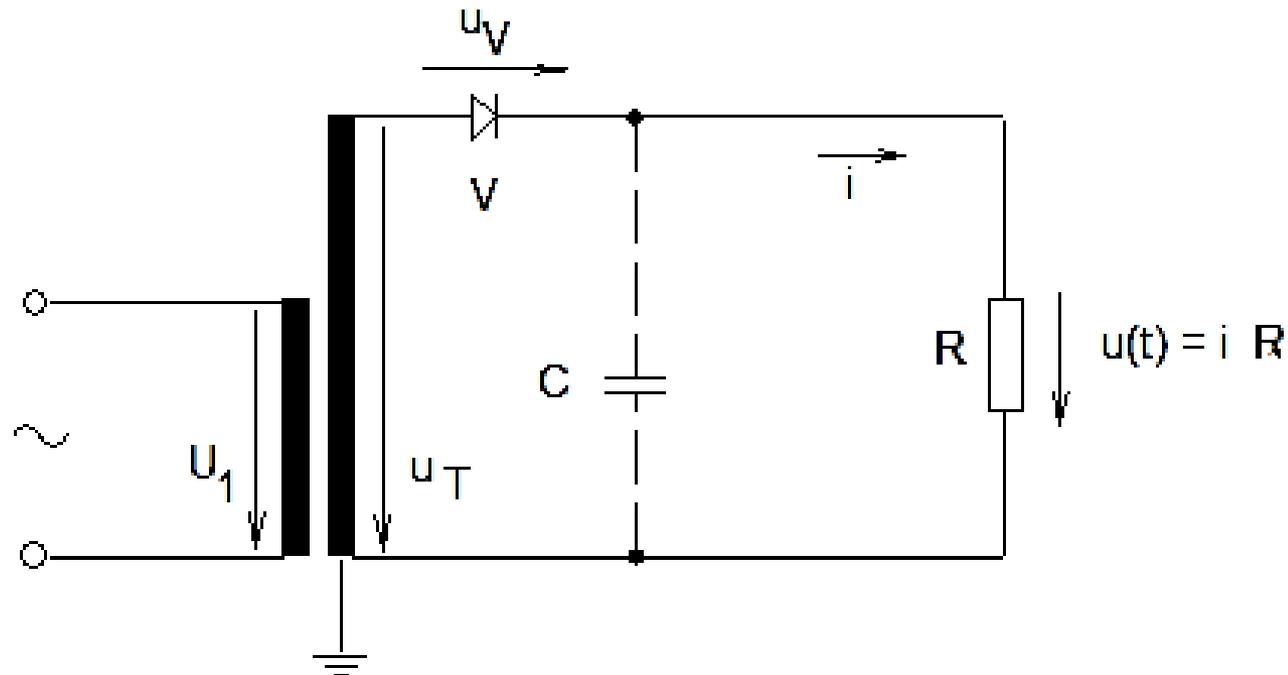
Folge hochohmiger Silizium-Sperrschichten mit relativ geringer Kapazität:

- ➔ **ungleichmäßige Spannungsverteilung durch den Einfluss der Erdkapazitäten in der Sperrphase**
- ➔ **Gefahr der Spannungsüberlastung von Teilen der in Serie geschalteten Dioden**
- ➔ **Notwendigkeit von Zusatzbeschaltungen zur Spannungssteuerung**

Heute: Einsatz von Dioden mit scharfem Zener-Durchbruch

- ➔ Beschaltung zur Linearisierung der Spannungsverteilung weitgehend überflüssig, da die Dioden in Sperrrichtung beim Durchbruch erhebliche Verlustleistung aufnehmen können.
- ➔ Bei ungleichmäßiger Spannungsaufteilung werden die stärker beanspruchten Dioden zuerst in den Zener-Durchbruch angesteuert.
- ➔ Spannungsabfall über der Diode bleibt auch bei Stromsteigerung \approx konst.
- ➔ Eine Erhöhung der angelegten Spannung an der Gleichrichteranordnung wird auf andere weniger beanspruchte Dioden übertragen.
- ➔ Spannungsaufteilung wird linearisiert.

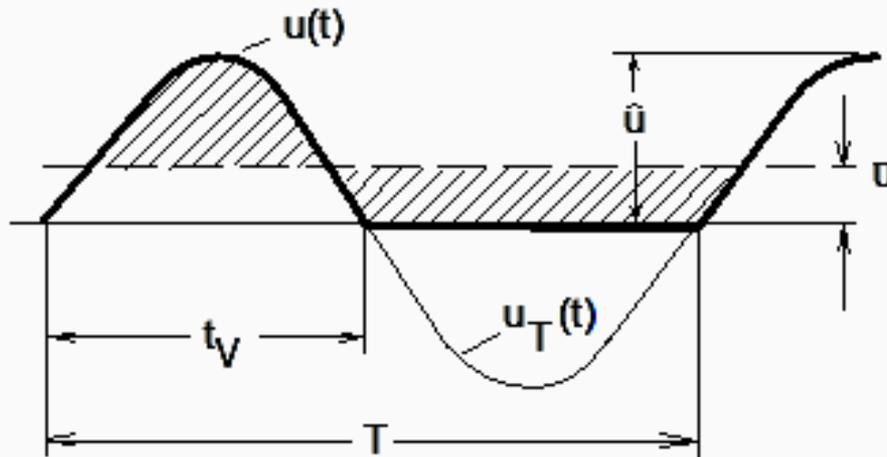
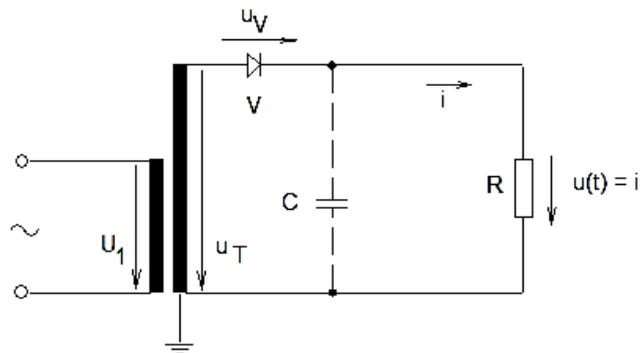
Einweggleichrichter mit idealen Schaltelementen:



Einweggleichrichter mit idealen Schaltelementen:

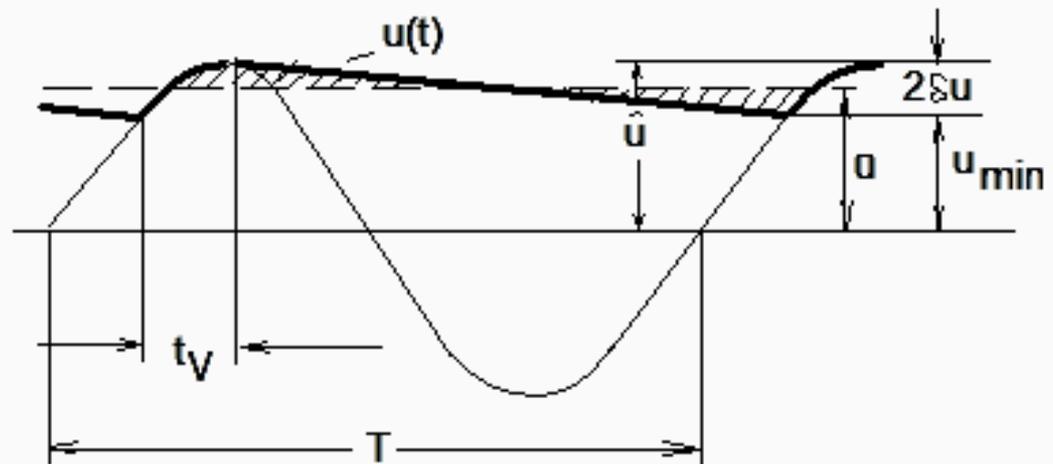
Spannungsverläufe ohne Glättungskondensator

t_V Stromflussdauer



Spannungsverläufe mit Glättungskondensator

t_V Stromflussdauer



Eigenschaften Einweggleichrichterschaltung:

Zeitlicher Verlauf der vom Gleichrichter durchgelassenen Halbschwingung

ist abhängig von

- den Eigenschaften des Transformators,
- des Gleichrichters und
- vor allem des Verbrauchers.

Dimensionierung der Schaltungskomponenten:

Sperrspannung \hat{u}_V des Gleichrichters und des Glättungskondensators :

Mindestens doppelter Scheitelwert der Transformatorspannung \hat{u}_T

$$\hat{u}_V = 2 \cdot \hat{u}_T$$

Ausgangsspannung bei Leerlauf:

$$u = \hat{u}_T$$

Ausgangsspannung bei Belastung:

Kondensatorspannung sinkt lastabhängig über nahezu 20 ms ab, bis während jeder zweiten Halbschwingung die Durchlassspannung der Diode überschritten und der Glättungskondensator wieder bis zum Scheitelwert der Transformatorspannung nachgeladen wird.

Eigenschaften Einweggleichrichterschaltung:

- Schlecht für größere Leistungen, da Spannungsquelle nur während einer Halbschwingung belastet wird.
- Brücken (Graetz)-Gleichrichterschaltungen weisen diesen Nachteil nicht auf. Jedoch kein Einsatz in der Hochspannungsprüftechnik da
 - großer Platzbedarf und
 - hohe Kosten

Einfache Einweggleichrichterschaltungen werden in der Hochspannungsprüftechnik mit Wechselfspannungskaskaden bis zu höchsten Spannungen im MV-Bereich eingesetzt!

Für die Erzeugung hoher Gleichspannungen bis in den Bereich mehrerer MV werden auch Spannungsvervielfacherschaltungen eingesetzt

→ Greinacher-Kaskade (s. Vorlesung „**Hochspannungsprüftechnik**“).

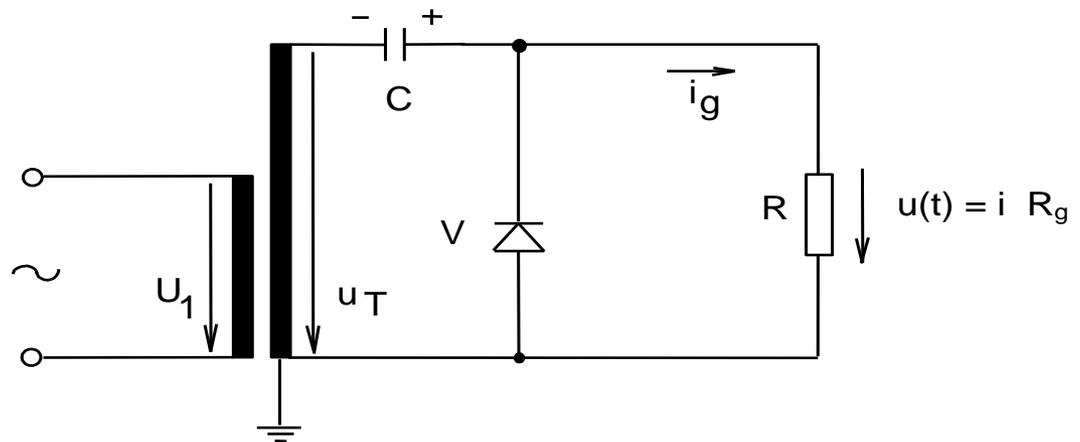
Spannungsverdopplungsschaltungen: (zur Erzeugung von Spannungen bis ca. 300 kV)

Villard-Schaltung

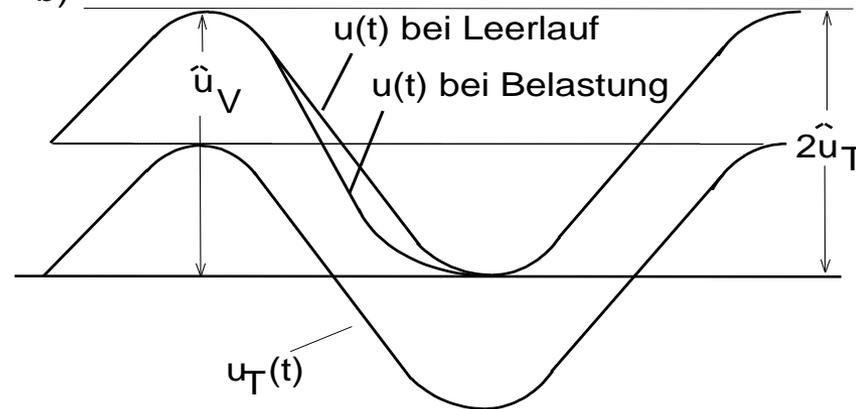
a) Schaltbild

b) Spannungsverläufe

a)

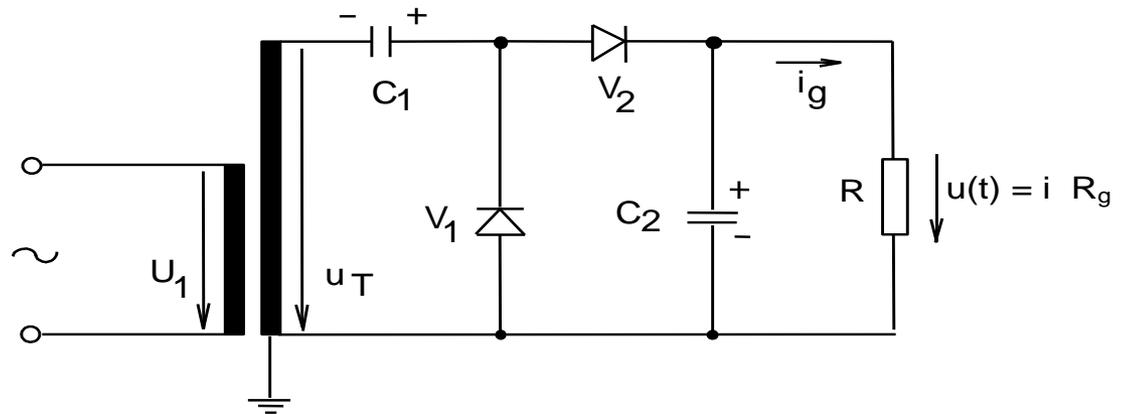


b)



Spannungsverdopplungsschaltungen: (zur Erzeugung von Spannungen bis ca. 300 kV)

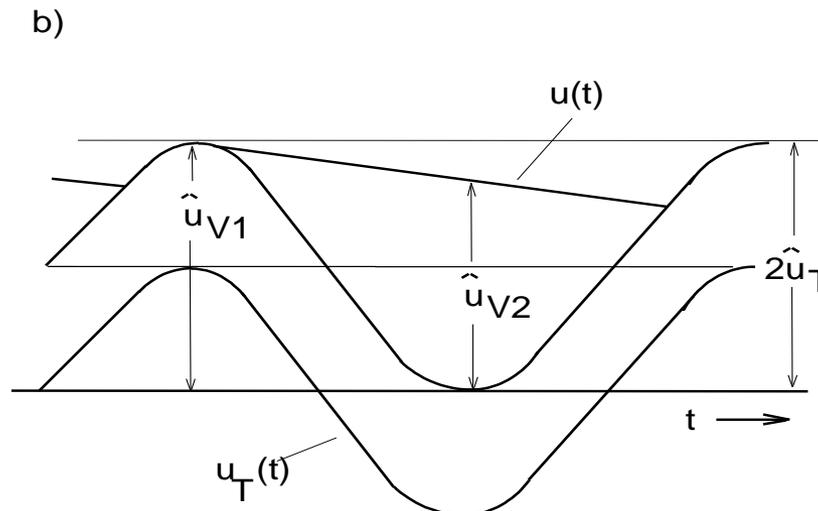
a)



Greinacher- Verdopplungsschaltung

a) Schaltbild

b) Spannungsverläufe



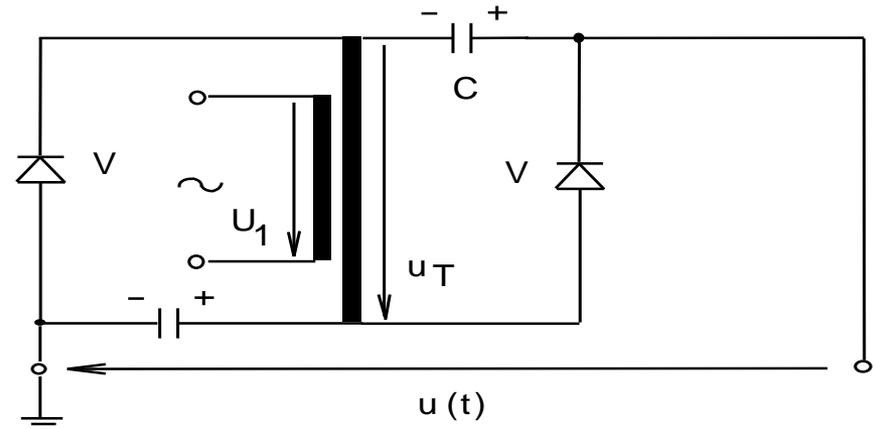
Spannungsverdreifungsschaltung:

Zimmermann-Wittka-Schaltung

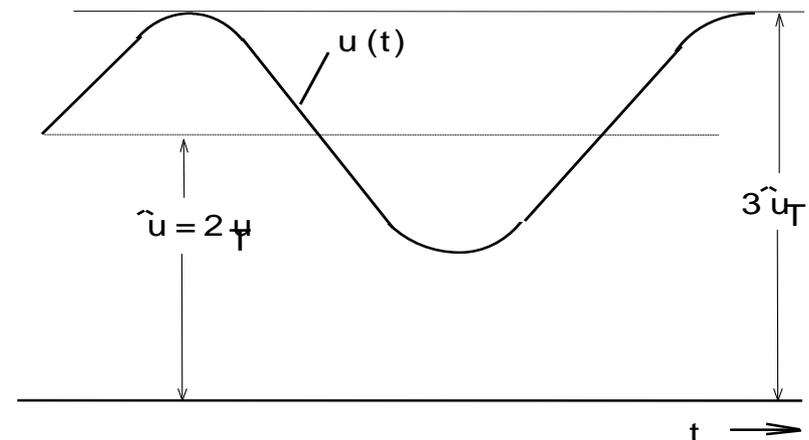
a) Schaltbild

b) Spannungsverläufe

a)

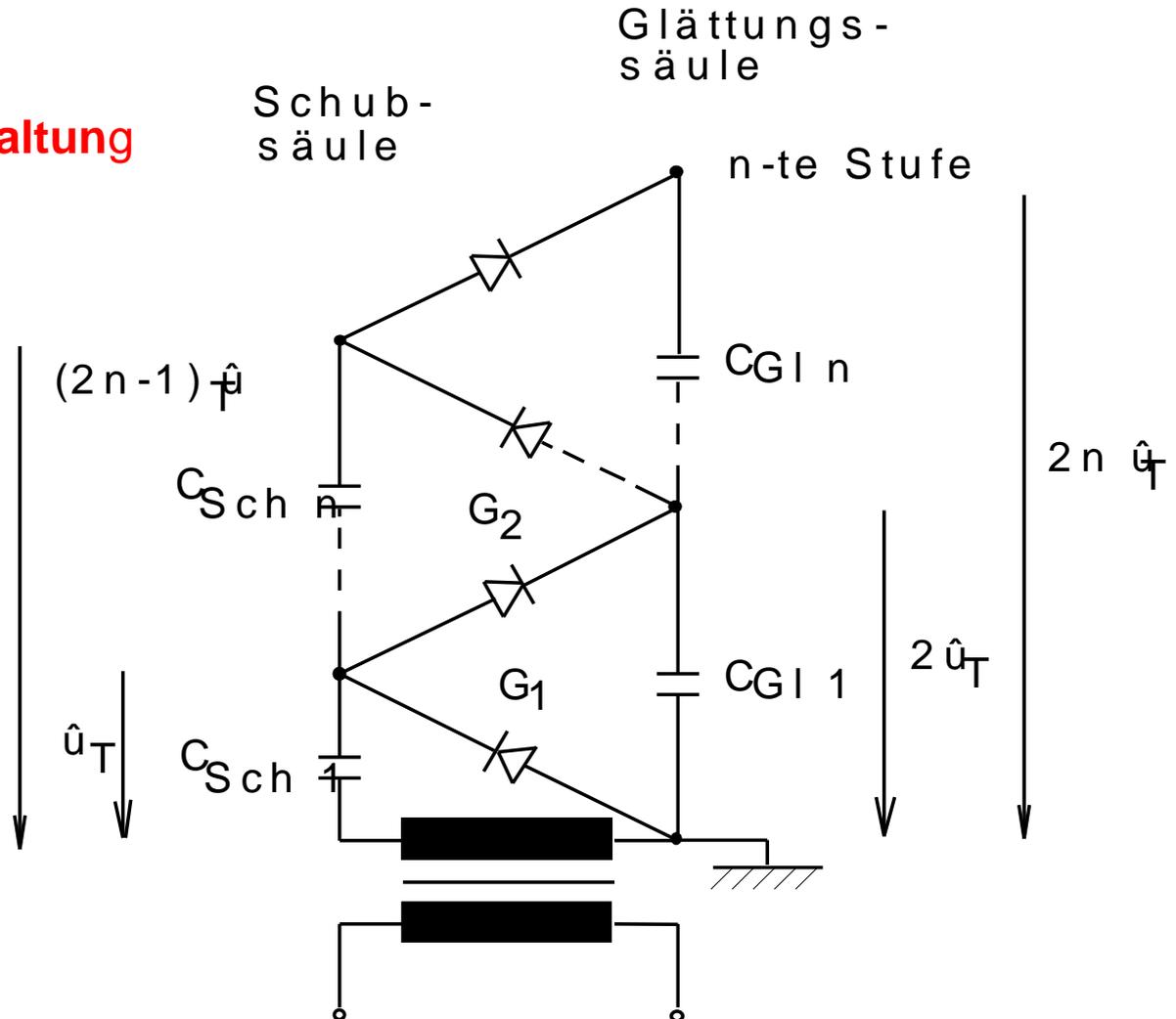


b)



Spannungsvervielfacherschaltung:

Greinacher-Kaskadenschaltung



Spannungsvervielfacherschaltung

Funktionsweise:

- Aus mehreren Greinacher-Spannungsverdopplerschaltungen aufgebaut.
- Kondensatoren an der geerdeten Seite bilden die Glättungssäule,
- Kondensatoren auf der nicht geerdeten Seite bilden die Schubsäule.
- Grundstufe, bestehend aus dem Transformator, dem Gleichrichter G_1 und dem Schubkondensator $C_{Sch,1}$ ist im Prinzip eine Einwegschaltung, bei der die Spannung jedoch nicht über dem Kondensator, sondern über dem Gleichrichter abgenommen wird (Villard-Schaltung).
- Im Leerlauf lädt sich $C_{Sch,1}$ auf die einfache Transformator-Scheitelspannung \hat{u}_T auf. Über G_2 wird der Glättungskondensator $C_{Gl,1}$ auf $2 \hat{u}_T$ aufgeladen.
- In der nächsten Stufe wiederholt sich der Vorgang,
 - ➔ im Leerlauf pulsiert die Spannung an jedem Punkt der Schubsäule um den Betrag $2 \hat{u}_T$
 - ➔ über jedem Glättungskondensator liegt die Gleichspannung $2 \hat{u}_T$
 - ➔ Bei n Stufen entsteht am Ausgang eine Hochspannung $2 n \hat{u}_T$.

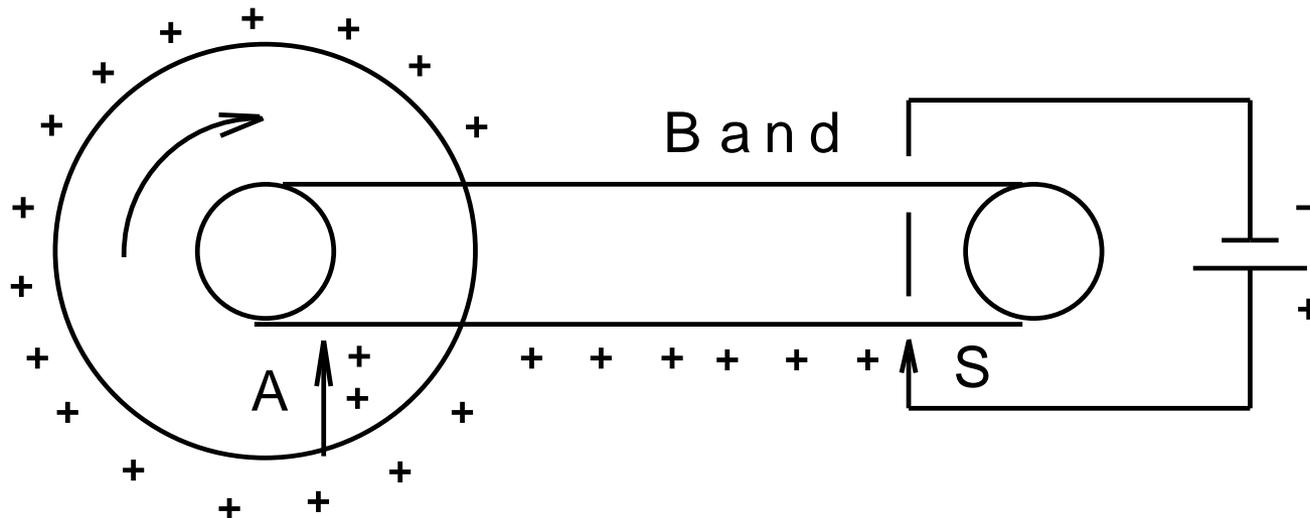
Spannungsvervielfacherschaltung

Eigenschaften:

- Kondensatoren und Gleichrichter werden nur mit der doppelten Scheitelspannung, nicht aber mit der Ausgangsspannung beansprucht.
- Der unterste Kondensator der Schubsäule $C_{\text{Sch } 1}$ kann sogar für die einfache Scheitelspannung \hat{u}_T ausgelegt werden.
- Bei Belastung sinkt der Wert der Ausgangsspannung,
- Mit zunehmender Belastung tritt eine von der Art der Belastung abhängige Welligkeit auf.
- Für die Stufenzahl n gibt es ein Optimum, da bei vorgegebener Belastung die Hochspannung mit wachsender Stufenzahl wegen der anwachsenden Spannungsabfälle über den Kondensatoren wieder abnimmt.

Elektrostatische Generatoren

- Älteste Gleichspannungserzeuger
- Prinzip geht auf die von Guericke im 17. Jahrhundert erfundene Elektrisiermaschine zurück.
- Heutige Ausführungen basieren auf der Weiterentwicklung von Van de Graaf.



Elektrostatische Generatoren:

Funktionsweise:

- Von einer verhältnismäßig kleinen Gleichspannungsquelle werden über die Spitzen eines Kamms S Ladungen auf ein Band aus isolierendem Material aufgesprüht.
- Mechanischer Transport der Ladungen ins Innere der Hochspannungselektrode.
- Zwischen Band und Abnahmekamm A entsteht ein elektrisches Feld,
 - Ionisation des Gasvolumens vor dem scharfkantigen Abnehmerkamm A
- Entsprechend ihrer Polarität werden die entstehenden Ladungsträger im elektrischen Feld getrennt,
 - die positiven Ionen vom Kamm A aufgenommen und
 - ihre Ladung nach dem Faraday-Effekt an die Elektrodenoberfläche abgeben.

Elektrostatische Generatoren

Eigenschaften:

- **Begrenzung der Höhe der Hochspannung** durch
 - **Verlustströme**, die über das Transportband und die Tragkonstruktion abfließen,
 - **Glimmentladungen** an der Elektrodenoberfläche
 - Größe der **Belastung**.
- Bei für praktische Ausführungen unzulässiger Vernachlässigung aller Verlustströme könnte das Potential der Hochspannungselektrode bis zu einem Durchschlag zum nächsten Erdpotential anwachsen.
- Bei kleinen Strömen ($< 1 \text{ mA}$) sind mit diesem Prinzip **Spannungen bis ca. 30 MV** erreichbar.

Erzeugung von Impulsspannungen

Impuls

Begriffe und Definitionen (VDE-Norm 0433 Teil 3)

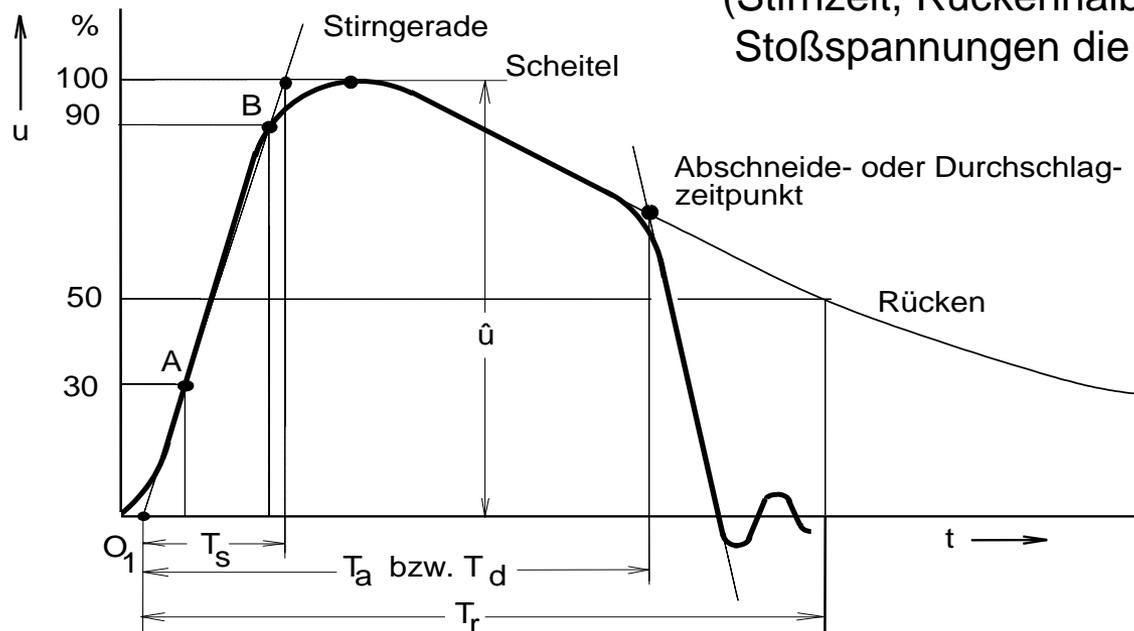
Stoßspannung:

Einzelne, kurze Zeit bestehende Spannung einheitlicher Polarität, die ohne wesentliche Schwingungen rasch auf einen Höchstwert ansteigt und dann auf Null abfällt.

Charakterisierung durch

- **Scheitelwert**,
- **Polarität** und
- **Zeitkennwerte**

(Stirnzeit, Rückenhalbwertszeit und bei abgeschnittenen Stoßspannungen die Zeit bis zum Abschneiden)



(T_a, T_d Zeit bis zum Abschneiden bzw. Durchschlag)

Begriffe und Definitionen (VDE-Norm 0433 Teil 3)

Volle Stoßspannung:

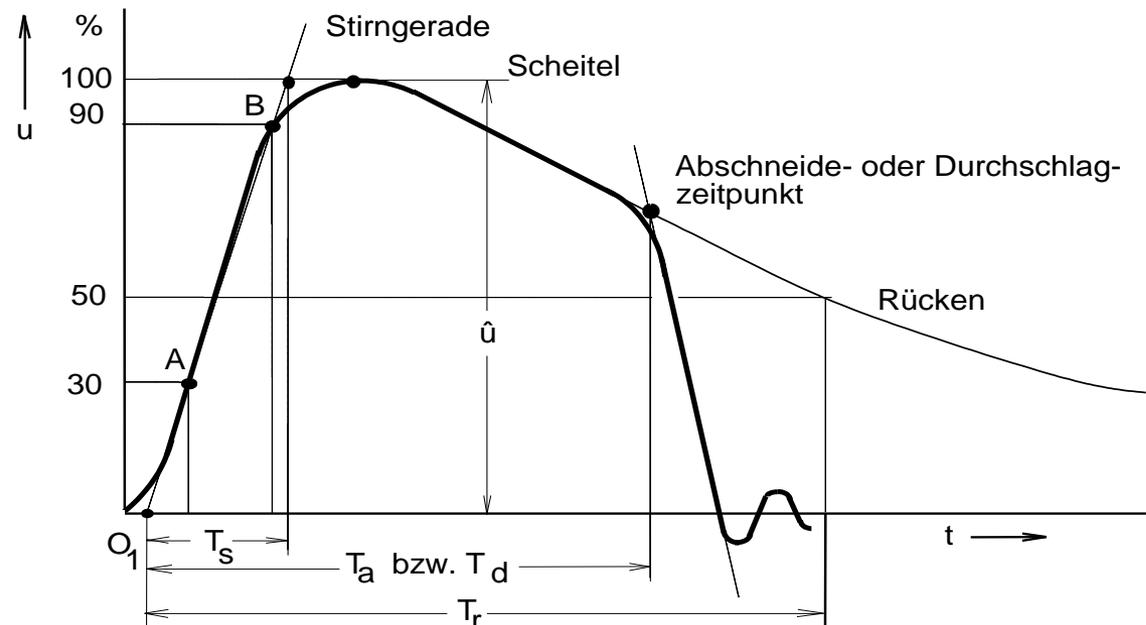
Stoßspannung, die nach Erreichen des Scheitelwertes langsam und angenähert exponentiell auf Null abfällt.

Keil-Stoßspannung:

In der Stirn abgeschnittene Stoßspannung, bei welcher der Spannungszusammenbruch so früh in der Stirn erfolgt, dass die Spannung bis zum Zusammenbruch annähernd linear ansteigt.

Abgeschnittene Stoßspannung:

Stoßspannung, die plötzlich im Rücken oder in der Stirn zusammenbricht.



Begriffe und Definitionen (VDE-Norm 0433 Teil 3)

Keil-Stossspannung:

Eine in der Stirn abgeschnittene Stoßspannung, bei welcher der Spannungszusammenbruch so früh in der Stirn erfolgt, dass die Spannung bis zum Zusammenbruch annähernd linear ansteigt.

Scheitelwert \hat{u} :

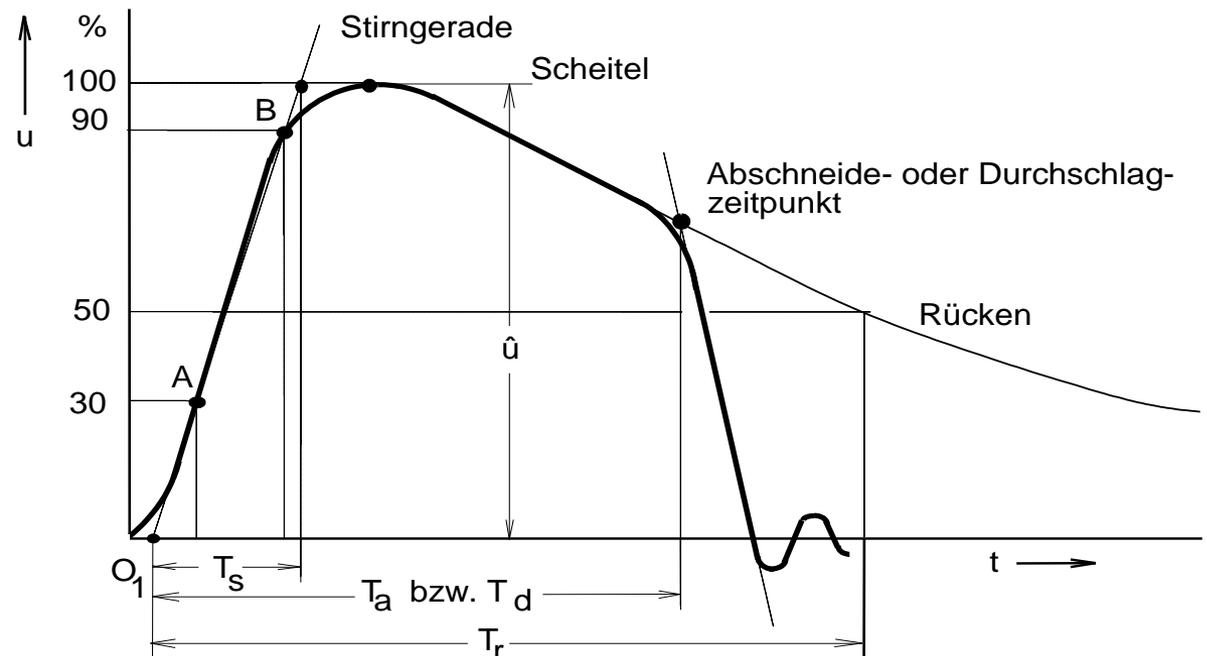
Höchstwert der vollen oder im Rücken abgeschnittenen Stoßspannung.

Stirn:

Ansteigender Teil einer Stoßspannung

Stirnsteilheit:

Quotient aus Scheitelwert U_m und Stirnzeit T_s .



Begriffe und Definitionen (VDE-Norm 0433 Teil 3)

Stehstoßspannung

Scheitelwert der höchsten Stoßspannung, dem die Isolierung eines Prüflings unter festgelegten Bedingungen gerade noch standhält.

Nenn-Stehstoßspannung

Scheitelwert, der für die jeweilige Prüfung nach den einschlägigen VDE-Bestimmungen festgelegten Stoßspannung, dem die Isolierung eines Prüflings unter festgelegten Bedingungen standhalten muss.

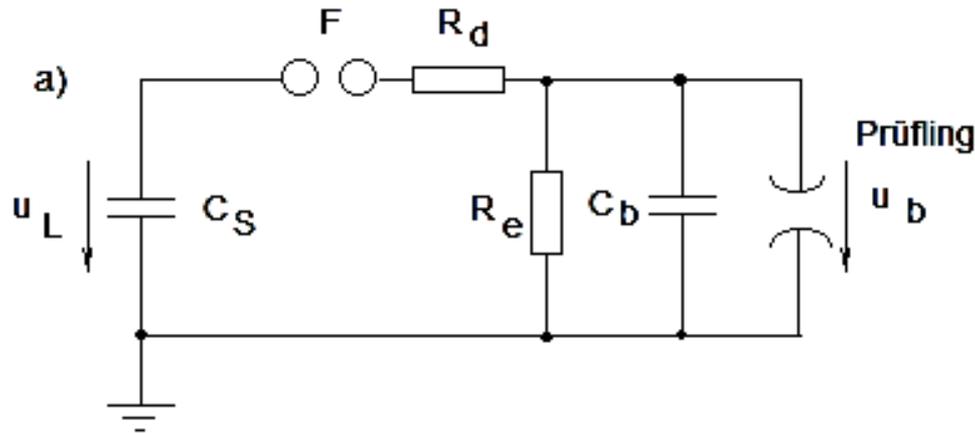
50 % - Durchschlag-Stoßspannung

Scheitelwert derjenigen Stoßspannung, bei dem unter festgelegten Bedingungen 50 % aller Stöße zu Durchschlägen am Prüfling führen.

Stoßspannung 1,2 / 50 (Blitzstoßspannung)

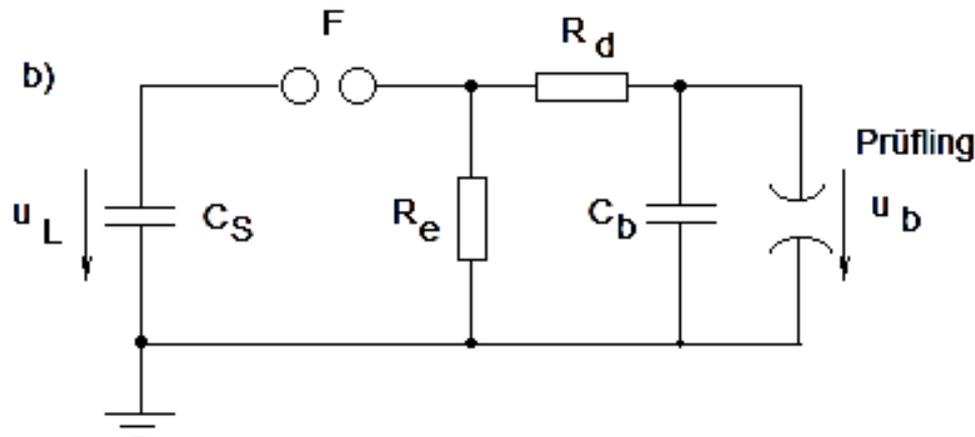
Stoßspannungsprüfung mit einer Stoßspannung , deren Stirnzeit $1,2 \mu\text{s}$ und deren Rückenhalbwertszeit $50 \mu\text{s}$ beträgt.

Schaltungen zur Erzeugung von Stoßspannungen



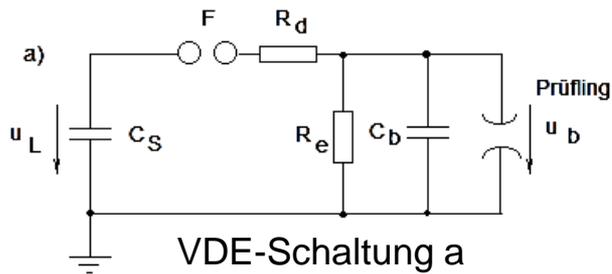
a) VDE-Schaltung a

C_S = Stoßkapazität
 R_d = Dämpfungswiderstand
 C_b = Belastungskapazität
 R_e = Entladewiderstand
 F = Schaltfunkenstrecke

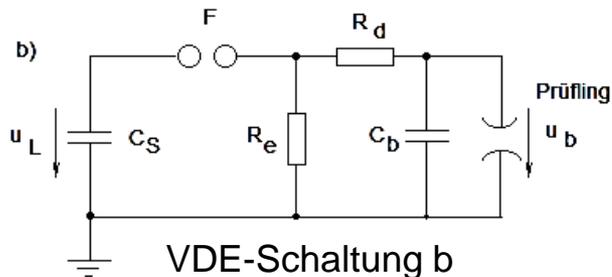


b) VDE-Schaltung b

Funktionsweise der Schaltungen zur Erzeugung von Stoßspannungen



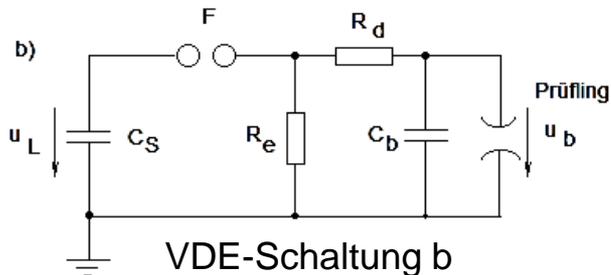
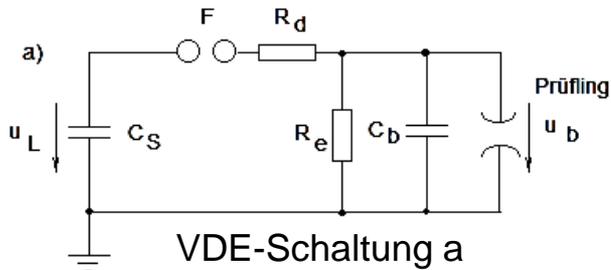
C_S = Stoßkapazität
 R_d = Dämpfungswiderstand
 C_b = Belastungskapazität
 R_e = Entladewiderstand
 F = Schaltfunkenstrecke



Prinzip:

- Übertragung der in der Stoßkapazität C_S gespeicherten Ladung auf die Belastungskapazität C_b (inkl. Prüflingskapazität).
- C_S wird mit Gleichspannung auf die Ladespannung u_L aufgeladen.
- Nachdem die Spannung an C_S einen voreingestellten Wert erreicht Triggerung der Funkenstrecke $F \rightarrow$ Verbindung von C_S mit C_b und Prüfling.
- Spannung u_L an Stoßkapazität C_S wird auf rechten Schaltungsteil mit Prüfling geschaltet (R_e ; R_d ; C_b)

Funktionsweise der Schaltungen zur Erzeugung von Stoßspannungen



C_S = Stoßkapazität
 R_d = Dämpfungswiderstand
 C_b = Belastungskapazität
 R_e = Entladewiderstand
 F = Schaltfunkenstrecke

- Ladungsausgleich zwischen den beiden Kapazitäten C_S und C_b
 - ➔ Spannungsgleichheit auf beiden Seiten der Funkenstrecke F (d. h. $\Delta u_F = 0$),
 - ➔ Lichtbogenlöschung
 - ➔ Trennung der elektrischen Verbindung
- Exponentielles Abklingen der Spannung am Prüfling im Rücken der Stoßspannung über die Parallelwiderstände (R_e bzw. R_e und R_d) zu C_b

Spannungsgleichung und Parameter

$$u_b(t) = u_L \frac{C_s}{C_s + C_b} \left(e^{-\frac{t}{\tau_r}} - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right)$$

VDE-Schaltung a

mit τ_r und τ_s :

$$\tau_r \approx (R_d + R_e) \cdot (C_b + C_s)$$

$$\tau_s \approx \frac{R_d \cdot R_e}{R_d + R_e} \cdot \frac{C_b \cdot C_s}{C_b + C_s}$$

und

VDE-Schaltung b

mit τ_r und τ_s :

$$\tau_r \approx R_e \cdot (C_b + C_s)$$

$$\tau_s \approx R_d \cdot \frac{C_b \cdot C_s}{C_b + C_s}$$

Für eine 1,2 / 50 - Stoßspannung kann die Stirnzeit und die Rückenhalbwertszeit berechnet werden aus $T_s = 2,96 \cdot \tau_s$ und $T_r = 0,73 \cdot \tau_r$

Stoßausnutzungsfaktor η_s

$$\eta_s = \frac{\hat{u}}{u_L} = f(C_b / C_s)$$

mit \hat{u} Scheitelwert der Stoßspannung am Prüfling
 u_L Ladespannung der Stoßkapazität

Damit die Form der Stoßspannung nicht wesentlich von der Eigenkapazität $C_{\text{Prüfling}}$ des Prüflings beeinflusst wird, muss für die Belastungskapazität C_b gelten:

$$C_b > 5 \dots 10 \times C_{\text{Prüfling}}$$

Mit üblichen Werten für den Stoßausnutzungsfaktor η_s (0,8 ... 0,95), liegt auch die Größe der erforderlichen Stoßkapazität C_s fest.

**Stoßausnutzungsfaktoren η_s bei Blitzstoßspannung
1,2 / 50 für die VDE-Schaltungen a und b:**

C_b / C_s	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
η_s für VDE-Schaltung a:	0,75	0,82	0,81	0,80	0,77
η_s für VDE-Schaltung b:	0,932	0,899	0,868	0,837	0,810

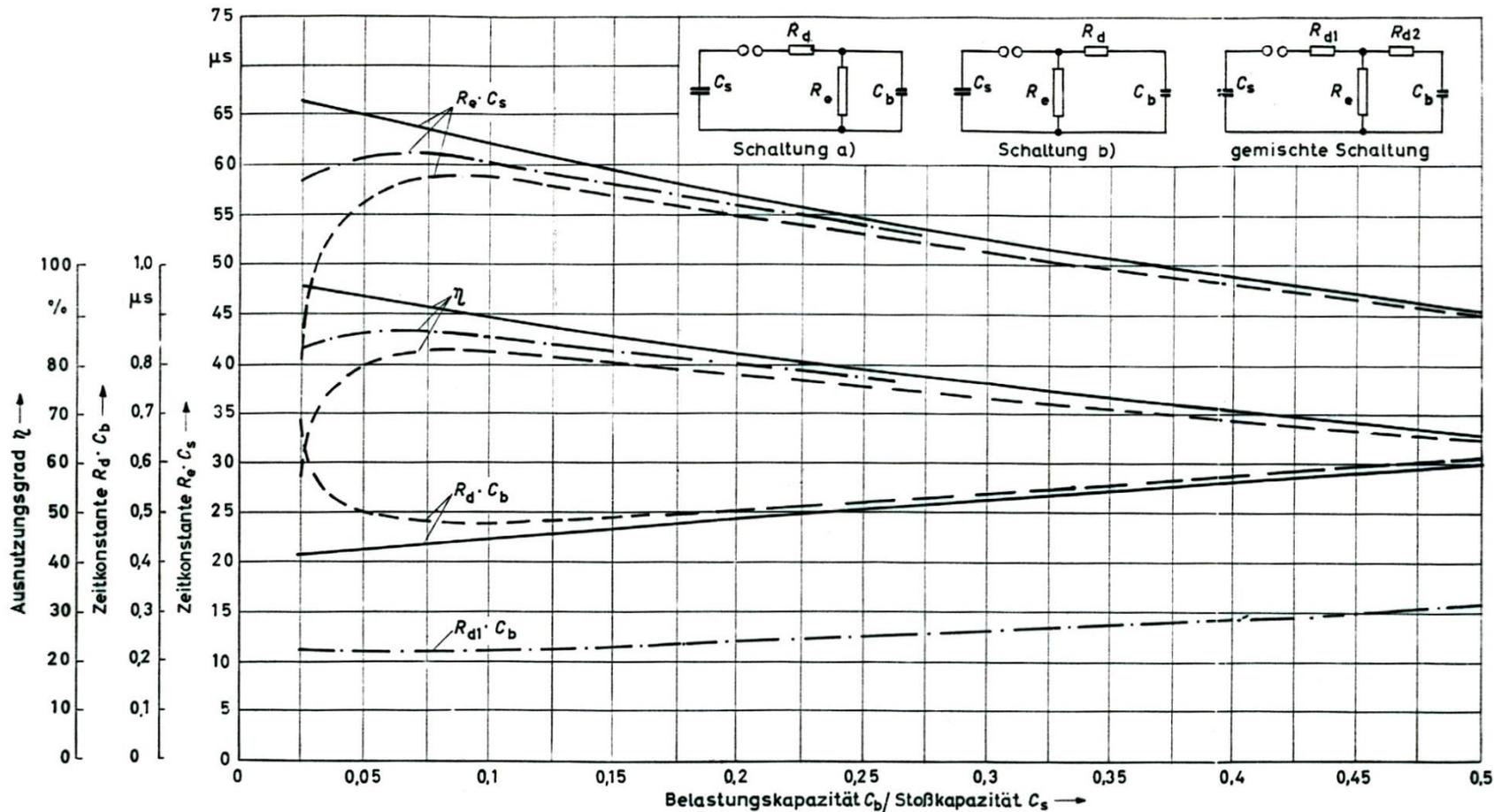
Zur **Vermeidung hochfrequenter Schwingungen** sollte für den Dämpfungswiderstand R_d möglichst nachstehende Bedingung eingehalten werden:

$$R_d > 2 \cdot \sqrt{L \cdot (C_b + C_s) / (C_b \cdot C_s)}$$

mit L = Stoßkreisinduktivität

4. Erzeugung hoher Spannungen

Verlauf der Stoßausnutzungsfaktoren η_s für die VDE-Schaltungen



$R_d \cdot C_b$ und $R_e \cdot C_s$ sowie η abhängig von C_b / C_s für die Stoßspannung 1,2 / 50

--- Schaltung a) — Schaltung b) - · - · gemischte Schaltung für $R_{d1} = R_{d2}$

Abschätzung der Werte für R_d und R_e für Blitzstoßspannung 1,2 / 50:

$$R_d \approx \frac{333}{\eta_s} \cdot \frac{T_s}{C_b / 1000}$$

$$R_e \approx 1410 \cdot \eta_s \cdot \frac{T_r}{C_s / 1000}$$

wobei einzusetzen sind:

T_s, T_r in [μ s]

C_b, C_s in [pF]

R_d, R_e in [Ω]

Vielfachschtung zur Erzeugung hoher Stoßspannungen nach Marx

Ziel:

Erzeugung sehr hoher Stoßspannungen

Vorteile:

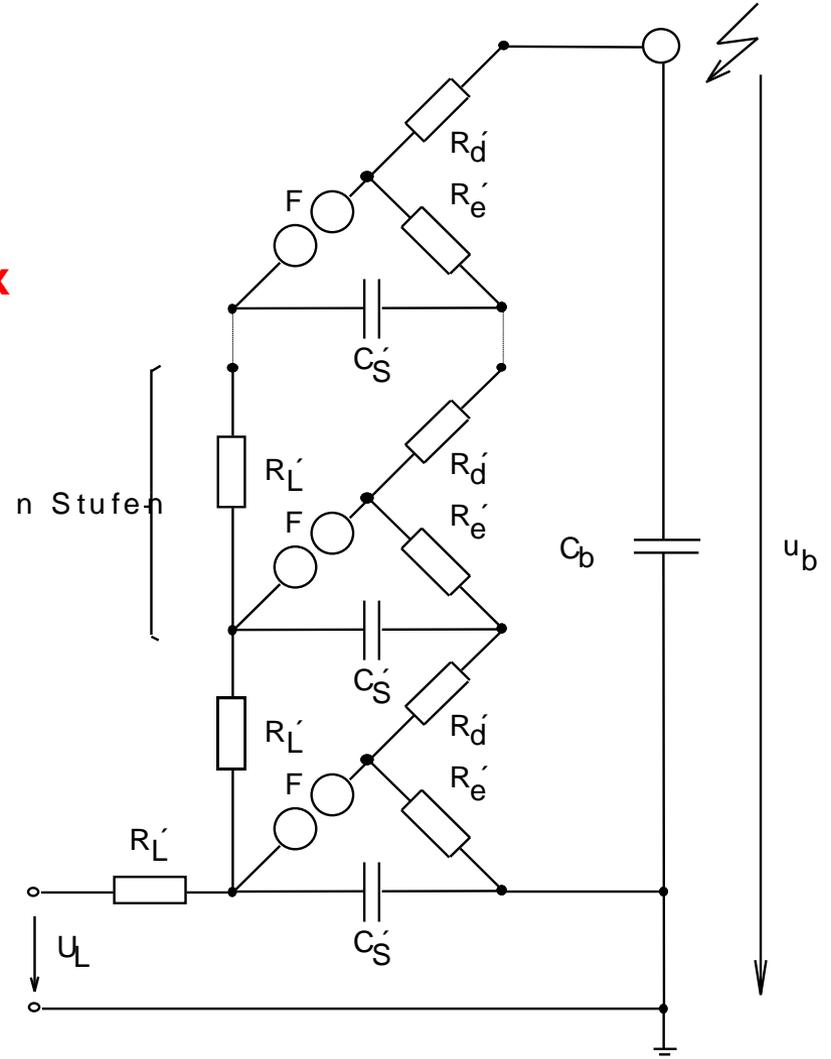
- Benötigte Ladespannung beträgt nur einen Bruchteil der erzeugten Stoßspannung.
- Hochspannungstransformator, Gleichrichter und Stoßkondensatoren brauchen nur für die maximale Ladespannung bemessen zu werden.

Prinzip:

- Aufladung von Kondensatoren in Parallelschaltung über hochohmige Vorwiderstände,
- Anschließend selbsttätige Reihenschaltung dieser Kondensatoren durch das Ansprechen von Schaltfunkenstrecken.

Vielfachschtung zur Erzeugung hoher Stoßspannungen nach Marx

Vervielfachungsschaltung nach Marx



Vielfachschtung zur Erzeugung hoher Stoßspannungen nach Marx

Spannungsverlauf am Prüfling:

$$u_b(t) \approx \sum U \frac{R_e \cdot C_s}{\tau_r - \tau_s} \left(e^{-\frac{t}{\tau_r}} - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right)$$

Stosskapazität(en): $C_S = C'_S / n$

Summenladespannung: $\Sigma U = n \cdot U_L$

Stufenspannung: $U_{Stufe} = \frac{\sum U}{n}$

Stufenwiderstände: $R_d' = R_d / n$

$R_e' = R_e / n$

Energie des Stoßgenerators:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot C_s (\sum U)^2 \quad (kWs)$$

mit C_s in pF

U in MV

Abschätzung der mittleren Ladeleistung:

$$P_{mittel} \approx 2 \cdot \frac{k_s}{60} \cdot W_e \quad (kW)$$

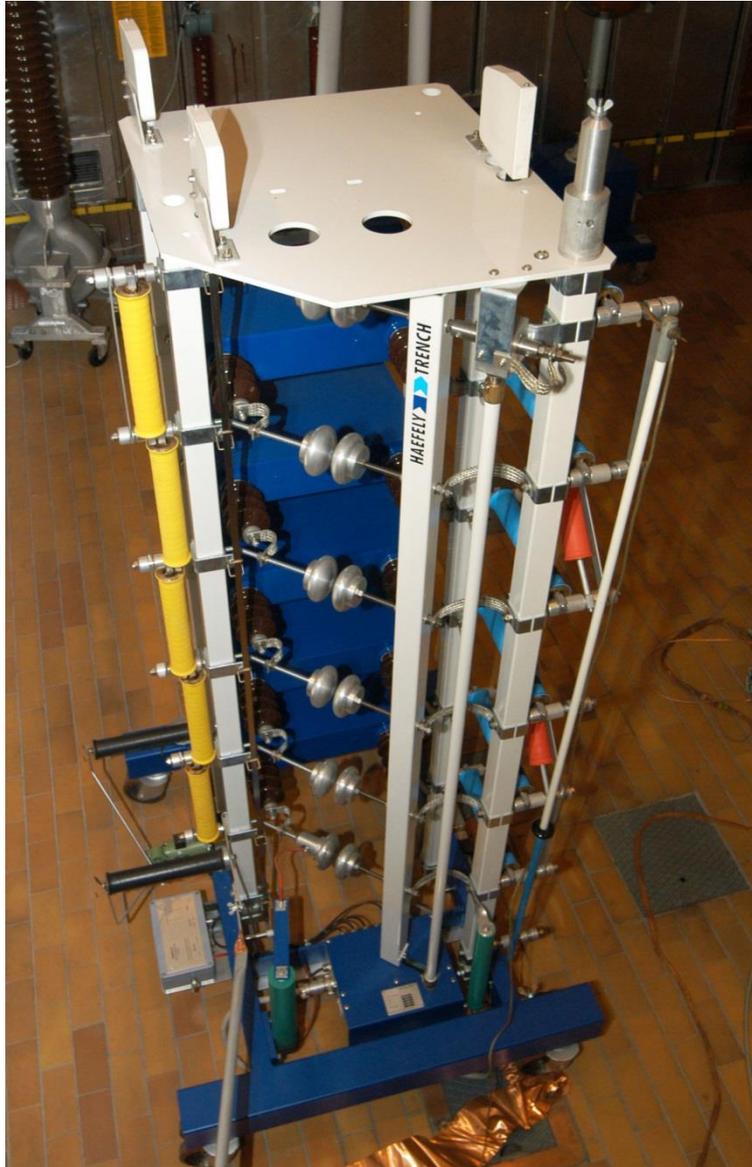
mit W_e in kWs

$k_s =$ Stoßfolge (Anzahl Stöße / min)

Nach diesem Prinzip werden Stoßspannungsgeneratoren mit n Stufen (20 ... 30 in Sonderfällen bis über 100) bis ca. 10 MV und einem üblichen Energiebereich bis ca. 1000 kWs gebaut.

1-stufiger 140-kV–Stoßgenerator





6-stufiger 600-kV–Stoßgenerator



20-stufiger 4-MV- Stoßgenerator



CESI Mailand

24-stufiger 3,6-MV-Stoßgenerator



**Höchstspannungshalle der
Electricité de France (EdF)**

6-MV-Stoßgenerator / 450 kW



**16-stufiger Stoßgenerator
der Fa. HSP / Köln**

**3,2-MV-Stossgenerator
(350 kW)**

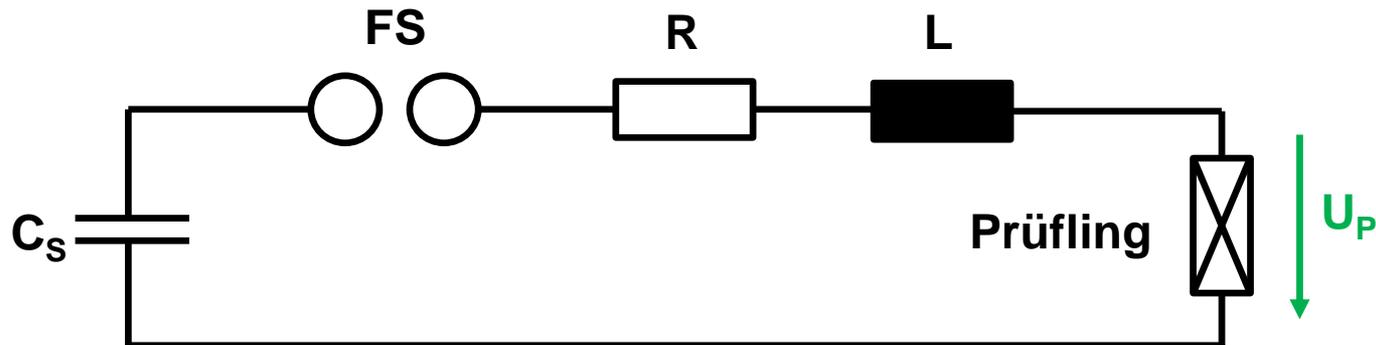
Erzeugung

Impuls- ströme

Grundsätzliche Aufgabe und Schaltung zur Erzeugung von Stoßströmen

Ziel: Prüfung von Betriebsmitteln auf Ihre thermische und mechanische Festigkeit und / oder ihre Fähigkeit hohe Spannungen zu begrenzen. (z. B. Überspannungsableiter)

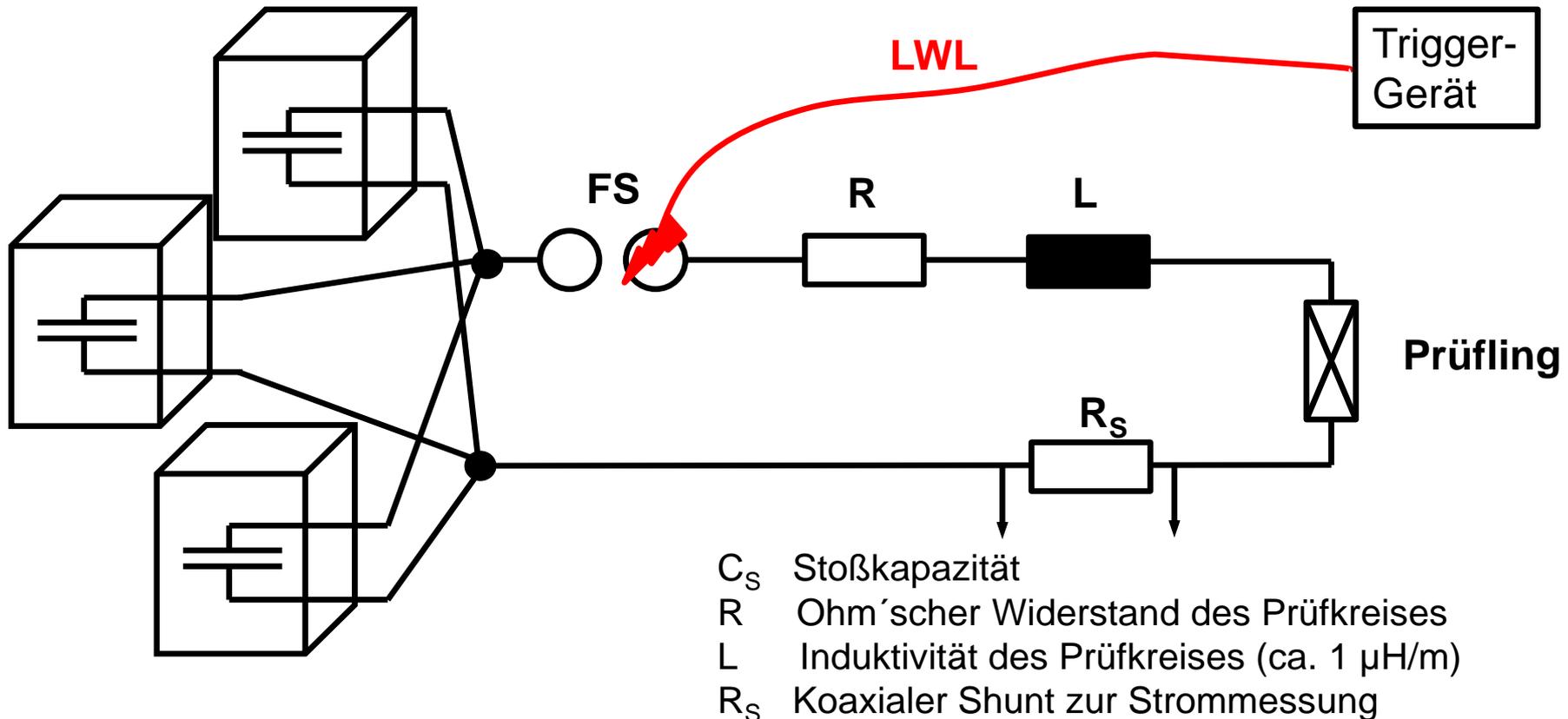
Prinzip: Erzeugung eines doppelt exponentiellen Stromverlaufs (z. B. 8 / 20) durch Um- bzw. Entladen von Kondensatoren



- C_S Stoßkapazität
- R Ohm'scher Widerstand des Prüfkreises
- L Induktivität des Prüfkreises (ca. 1 $\mu\text{H}/\text{m}$)
- U_P Spannung am Prüfling

Ausführung von Schaltungen zur Erzeugung von Stoßströmen

- **Paralleles Aufladen von stoßstromfesten Kondensatoren C_S (bis ca. 100 kV)**
- **Parallele Entladung über den Prüfling**
(möglichst kurze und gleichlange sowie induktivitätsarme Verbindungen)



Ausführung von Schaltungen zur Erzeugung von Stoßströmen

**Stoßstromlabor
des Hochspannungslabors
der TU München**



***Erzeugung kombinierter
Impulsströme und -
spannungen***

Synthetische Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern Beispiel einer Hochstromprüfung mit Versagen des Prüflings

Prüfhalle des
Siemens-
Hochleistungs-
prüffelds / Berlin



Synthetische Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern

Problemstellung:

- **Eine direkte Prüfung des Leistungsschalters im Netz ist nicht möglich**
 - fehlende Verfügbarkeit der erforderlichen Kurzschlussleistung
 - zu hohe Belastung des Netzes
(Spannungseinbruch für alle Verbraucher)

Problemlösung durch:

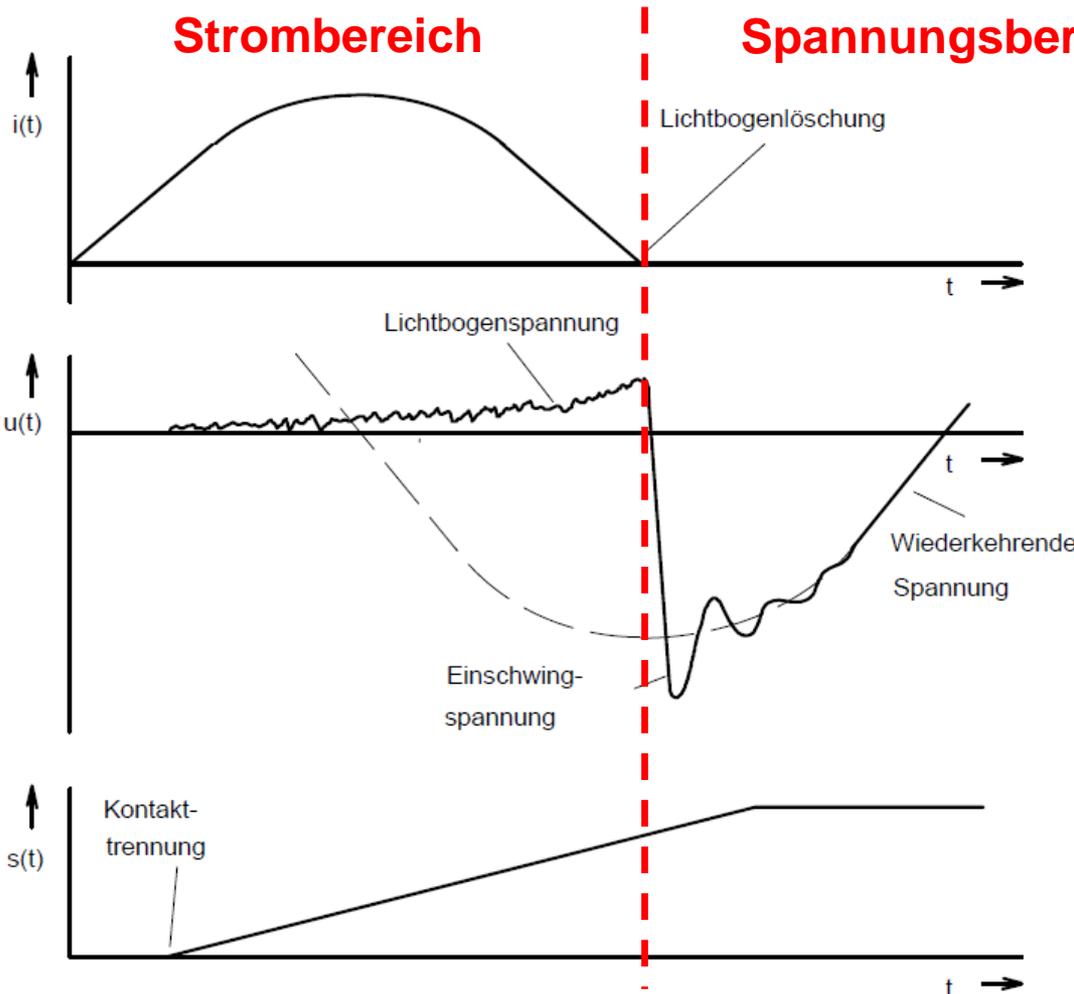
- **Zwischenspeicherung der erforderlichen Prüfenergie in**
 - **rotierender Masse** (zur Prüfstromerzeugung) und
 - **Kondensatoren** (zur Erzeugung der „Wiederkehrenden Spannung“)

Synthetische Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern

Der Ausschaltvorgang

Strombereich

Spannungsbereich



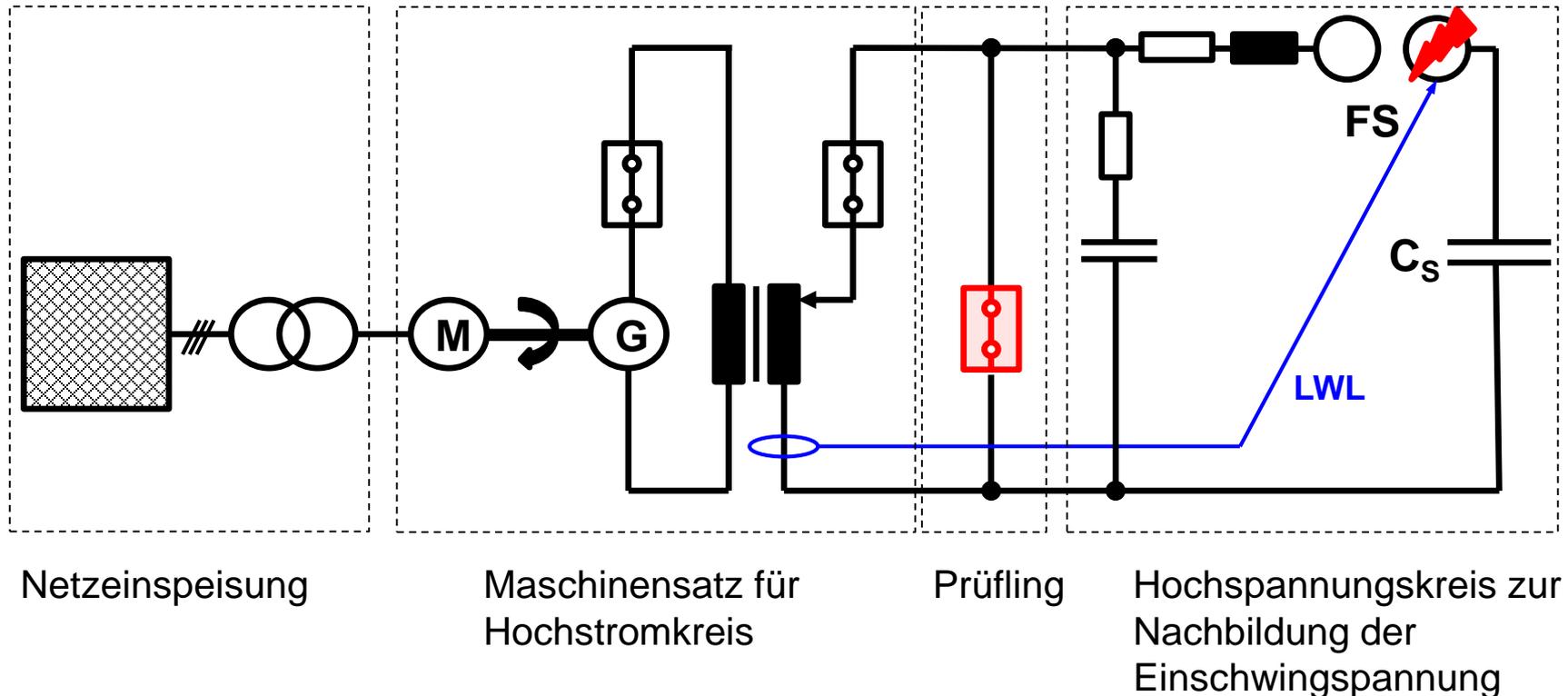
$i(t)$ Stromverlauf

$u(t)$ Spannungsverlauf

$s(t)$ Kontaktentfernung

Synthetische Prüfung von Hochspannungsleistungsschaltern

Schematischer Aufbau des Prüfkreis



→ Triggerung des Hochspannungskreises nach Stromlöschung des LS im Nulldurchgang

Synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

Technische Daten des Siemens-Hochleistungsprüffelds / Berlin:

Maximale Generatorleistung:	6400 MVA
Generatornennspannung (Stern / Dreieck):	19 / 11 kV
Höchste Betriebsspannung:	21 kV
Bezugsleistung:	200 MVA
Nenndrehzahl:	750 U/min
Betriebsfrequenz:	50 Hz
Maximaler Kurzschlussstrom: (1- und 3-phasig)	270 / 100 kA
Maximaler Kurzzeitstrom (3-phasig bei 170 kV) für 3s:	80 kA
Ständergewicht:	390 t
Läufergewicht:	225 t
Gesamtgewicht:	680 t
Schwungmoment:	13.000 knm²
Maximale Spannung für synthetische Prüfungen:	1.150 kV

Synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

Technische Daten des Siemens-Hochleistungsprüffelds / Berlin:

**Hochstromgenerator
mit
Antriebsmaschine**
(3-MW-Asynchronmotor)

(Anfahren über
schützgesteuerte
Anlasswiderstände

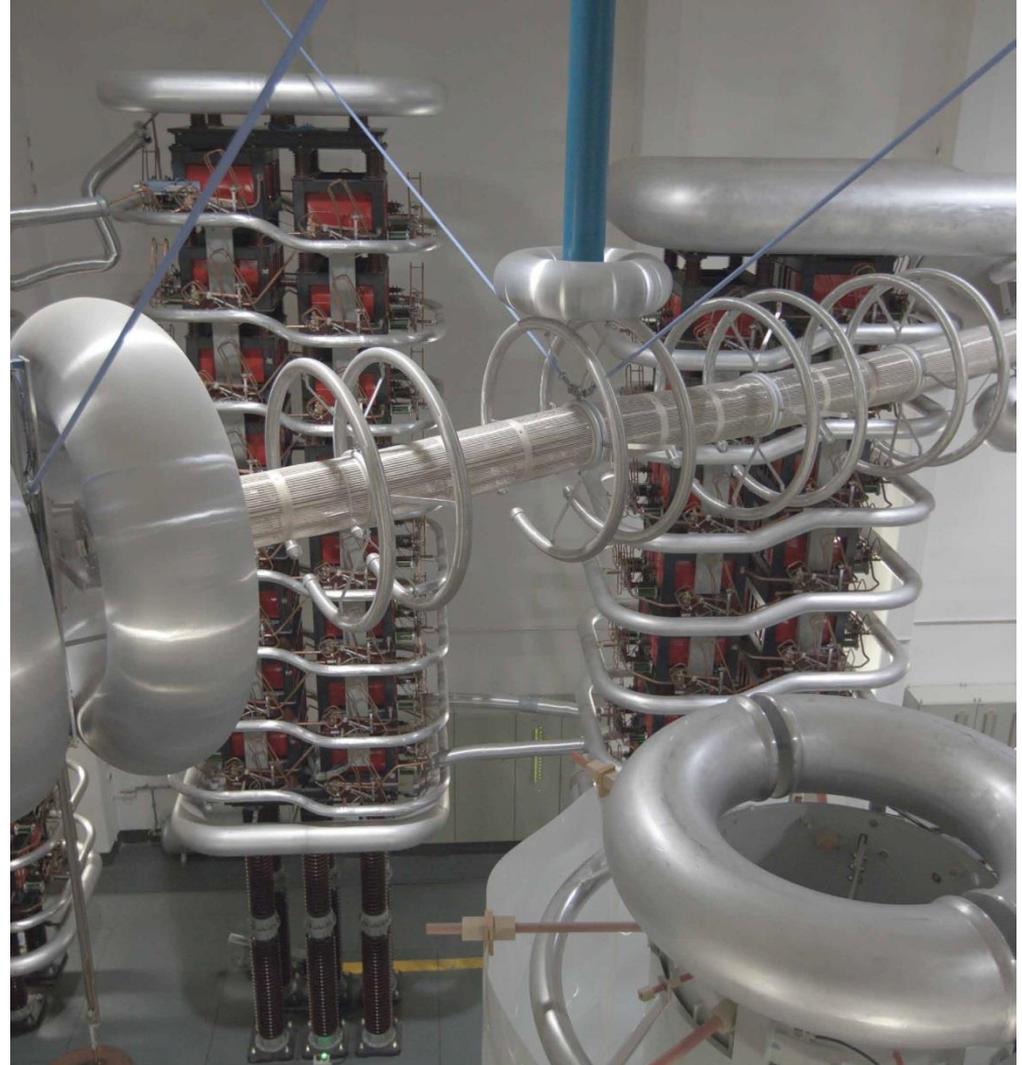
Hochfahrzeit ca. 15 Min.
Bremszeit bis Stillstand
ca. 30 Min.)



Synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

Technische Daten des Siemens-Hochleistungsprüffelds / Berlin:

Hochspannungskondensatoren des Hochspannungskreises zur Nachbildung der Einschwingspannung



Synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

Ausstattung des Siemens-Hochleistungsprüffelds / Berlin:

Weitere Komponenten des Hochleistungsprüffelds:

- **Kurzschlussstrombegrenzungs-drosseln**
- **Stoßleistungstransformator**
- **Sicherheitsschalter**
- **Draufschalter**



Synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

Messtechnische Ausstattung des Siemens-Hochleistungsprüffelds / Berlin:

- **Messwertaufzeichnung mit digitalem Transientenrekorder-Messsystem**
- **2 baugleiche Transientenrekorder-Messsysteme**
- **20 Kanäle je Messsystem**
- **Abtastrate: 100 MSamples bei 14 Bit Auflösung**
- **Datenübertragung über Lichtwellenleiter (LWL)
(bis zu 120 m zwischen Prüfhalle und Kommandoraum mit
digitalem Transientenrekorder-Messsystem)**

Synthetische Prüfung von Leistungsschaltern

Messtechnische Ausstattung des Siemens-Hochleistungsprüffelds / Berlin:

Verfügbare Zusatztechnologien zu Analysezwecken

- Videodokumentationen,
- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen
- Aufnahmen von Wärmebildkameras

*Akkreditierung
von
Prüflaboratorien*



Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

Beliehene gemäß § 8 Absatz 1 AkkStelleG i.V.m. § 1 Absatz 1 AkkStelleGBV
Unterzeichnerin der Multilateralen Abkommen
von EA, ILAC und IAF zur gegenseitigen Anerkennung

Akkreditierung



Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH bestätigt hiermit, dass das Prüflaboratorium

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH)
Engesserstraße 11, 76128 Karlsruhe

die Kompetenz nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 besitzt, Prüfungen in folgenden Bereichen durchzuführen:

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Elektrotechnik (Hochspannung)
Kabel und Leitungen

Die Akkreditierungsurkunde gilt nur in Verbindung mit dem Bescheid vom 10.07.2014 mit der Akkreditierungsnummer D-PL-11068-09 und ist gültig bis 09.07.2019. Sie besteht aus diesem Deckblatt, der Rückseite des Deckblatts und der folgenden Anlage mit insgesamt 21 Seiten.

Registrierungsnummer der Urkunde: D-PL-11068-09-00

Frankfurt am Main, 10.07.2014


Im Auftrag Dipl.-Ing. (FH) Ralf Egner
Abteilungsleiter

Siehe Hinweise auf der Rückseite

Akkreditierung einer Prüfinstitution am Beispiel des IEH- KIT



Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11068-09-00
nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Gültig ab: 16.02.2021

Ausstellungsdatum: 16.02.2021

Urkundeninhaber:

Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Standort:

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH)
Engesserstraße 11, 76128 Karlsruhe

Prüfungen in den Bereichen:

**Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Elektrotechnik (Hochspannung),
Kabel und Leitungen**

Fachbereich	Norm oder Hausverfahren / Ausgabestand	Titel der Norm oder des Hausverfahrens	Einschränkungen zum Prüfverfahren
Elektrotechnik (Hochspannung)	IEC 60034-15:2009 DIN EN 60034-15:2010 VDE 0530-15:2010	Drehende elektrische Maschinen - Teil 15: Steh-Stoßspannungspegel von Formspulen im Ständer drehender Wechselstrommaschinen	

Die Anforderungen an das Managementsystem in der DIN EN ISO/IEC 17025 sind in einer für Prüflaboratorien relevanten Sprache verfasst und stehen insgesamt in Übereinstimmung mit den Prinzipien der DIN EN ISO 9001.

Die Urkunde samt Urkundenanlage gibt den Stand zum Zeitpunkt des Ausstellungsdatums wieder. Der jeweils aktuelle Stand des Geltungsbereiches der Akkreditierung ist der Datenbank akkreditierter Stellen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) zu entnehmen. <https://www.dakks.de/content/datenbank-akkreditierter-stellen>

Seite 1 von 22

Akkreditierung einer Prüfinstitution am Beispiel des Prüffelds am IEH-KIT:

Prüfberichte

- müssen hohen Qualitätsansprüchen genügen
- müssen normgerecht ausgeführt sein
- erleichtern den Herstellern erfolgreich geprüfter Produkte den Marktzugang erheblich (→ gehen an Kunden, oft wesentliches Verkaufsargument)
- können Prüfungen nach Kundenspezifikation enthalten und ggf. nach Art und Umfang der Dokumentation selbst definiert werden.
- sollten weitgehend automatisiert nach vordefinierten Formaten erstellt werden, um bereits kurz nach Abschluss der Prüfungen verfügbar zu sein.

E N D E