

# Arbeitsdokument der FGW- Arbeitsgruppe „Prüfeinrichtungen“

---

Dieses Dokument stellt ein Zwischenergebnis der „Arbeitsgruppe Prüfeinrichtungen“ dar und fasst den momentanen Diskussionsstand zusammen. Die ersten Abschnitte des Dokuments sind dabei als Hintergrundinformationen gedacht, um die Ableitung der Anforderungen transparenter zu machen. Im Anschluss werden allgemeiner Anforderungen aufgestellt und erste spezifische Anforderungen für die alternativen Prüfeinrichtungen formuliert.

## 1 Effekte, die während eines Netzfehlers auftreten

Spannungseinbrüche werden prinzipiell durch

- die Dauer und Tiefe des Spannungseinbruchs sowie
- die Anzahl der betroffenen Phasen

charakterisiert.

Aus Sicht des Prüflings charakterisiert sich ein Netzfehler durch:

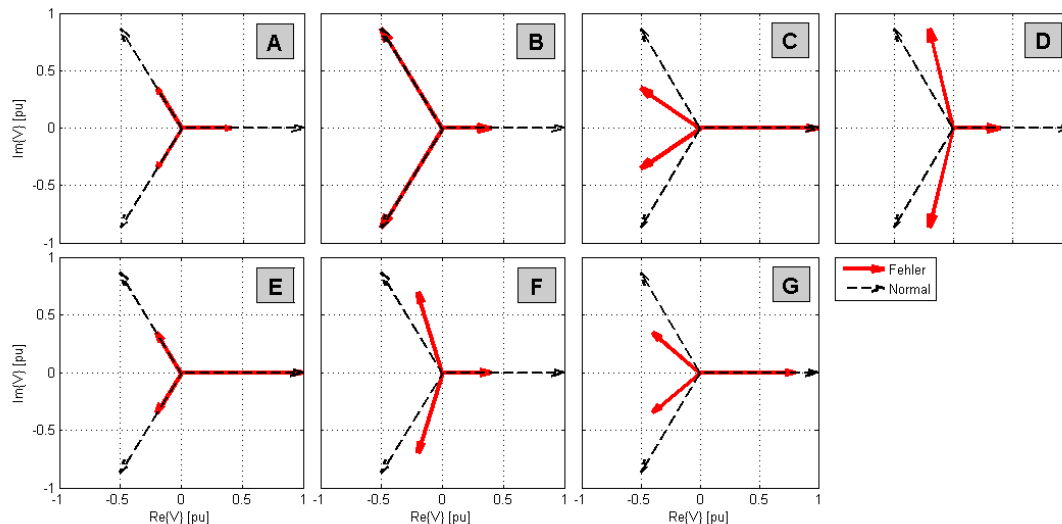
- Die Amplitude mindestens einer Spannung ändert sich.
- Bei Vorliegen von unsymmetrischen Fehlerzuständen ändert sich die Phasenlage der Spannungen sowohl im Vergleich zur ihrer Ausgangslage als auch die Phasenlagen der Spannungen zueinander (vgl. Abbildung 2).
- Durch die Schaltgruppe eines Transformators ändern sich die Phasenbeziehungen (Ausnahme: Yy0).
- Eine gewisse Verdrehung des gesamten Bezugssystems, die durch den Einfluss von Spannungsfällen an den Netzelementen bestimmt wird.
- Durch induktive Bauelemente verursachte, nicht netzfrequente Vorgänge wie Rush-, Sättigungs- oder Demagnetisierungseffekte.

In den folgenden Abschnitten werden diese Effekte eingehender beschrieben. Als einheitlicher Bezug werden stets die Sternspannungen (Phase/Neutral-Spannungen) verwendet

### 1.1 Schaltgruppeneffekte

In [Bollen] werden die Netzfehler systematisch hergeleitet und klassifiziert. Eine Übersicht bietet Abbildung 1, in der die Sternspannungen jeweils vor und während eines Fehlers dargestellt sind.

Nach [Bollen] können die möglichen Netzfehler in sieben Grundkategorien eingeteilt werden.



**Abbildung 1: Netzfehlerklassifizierung. Quelle: M. H. J. Bollen „Understanding Power Quality Problems“**

Erklärung der Netzfehlerklassifizierung:

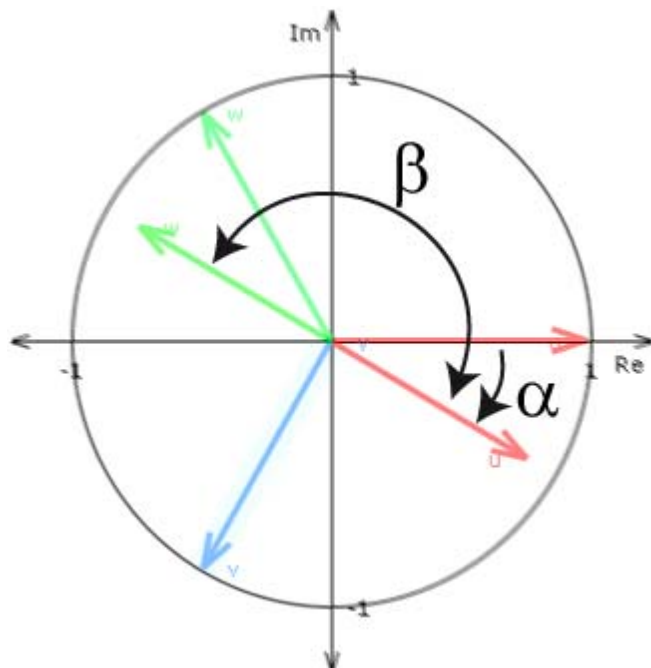
- Typ A: dreipoliger Kurzschluss
- Typ B: einpoliger Kurzschluss mit Erdberührung
- Typ C: zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung
- Typ D: C nach Dy-Trafo
- Typ E: zweipoliger Kurzschluss gegen Erde
- Typ F: E nach Dy-Trafo
- Typ G: E nach Dz-Trafo

Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass unsymmetrische Fehler sowohl ungleiche Spannungsamplituden als auch eine ungleiche Phasenverschiebung der einzelnen Phasen nach sich ziehen. Dabei hängt es sowohl von der Art des Netzfehlers als auch vom Fehlerort (mehrere Transformatoren bis zum Fehlerort) ab, welche Fehlerform an den EZE-Klemmen sichtbar wird.

Die Mittelspannungsprüfeinrichtung stellt Fehler der Typen „A“ und „C“ nach. Liegt Fehlertyp „C“ an den Oberspannungsklemmen eines Dy5<sup>1</sup>-Transformators an, erhält man die Fehlerform „D“ an den Unterspannungsklemmen. Liegt Fehlertyp „D“ an den Oberspannungsklemmen eines Dy5-Transformators an, erhält man die Fehlerform „C“ an den Unterspannungsklemmen.

Für die Bewertung der Anforderungen, ob eine Prüfeinrichtung den Schaltgruppeneffekt für zweipolige Kurzschlüsse ohne Erdberührung geeignet nachbilden kann, werden zwei Winkelbeziehungen beurteilt, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind.

<sup>1</sup> Entscheidend für die Transformation ist, ob die Phasenverschiebungszahl gerade (keine Transformation von „C“ zu „D“) ist oder ungerade (Transformation wie beschrieben).



**Abbildung 2: Änderung der Phasenlage der Spannungen relativ zu ihrer Ausgangslage ( $\alpha$ ) und zueinander im Fehlerfall ( $\beta$ ). Darstellung für den Extremfall eines zweiphasigen Spannungseinbruchs auf 0% verbleibende Spannung**

Effekt 1: Durch den Fehler ändern sich Amplitude und Phasenlage der Spannungszeiger gegenüber dem ungestörten System. Diese äußert sich durch den Winkel  $\alpha$ .

Effekt 2: Während des Fehlers ändert sich die Phasenlage der Spannungsvektoren innerhalb des Drehstromsystems zueinander. Diese wird durch den Winkel  $\beta$  ausgedrückt.

Die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  werden für beide Fehlertypen so gewählt, dass  $\beta$  jeweils den größten Differenzwinkel zwischen den Phasenwinkeln zweier Spannungen während des Fehlers und  $\alpha$  den größten Differenzwinkel zwischen Vorfehler- und Fehlerphasenlage einer Phase bezeichnet.

Beide Effekte sind abhängig von der Tiefe des Spannungseinbruchs. Allgemein muss für den Spannungseinbruch auf 0% verbleibender Spannung der Winkel  $\alpha$  mindestens  $30^\circ$  betragen und der Winkel  $\beta$   $180^\circ$  erreichen (Fehlertyp „D“). Für Fehlertyp „C“ erreicht  $\alpha$   $60^\circ$ .

Prüfeinrichtungen, die frei programmierbare Spannungskurvenverläufe ermöglichen, müssen auf Werte eingestellt werden, die aus Tabelle 1 entnommen werden können.

**Tabelle 1: Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  in Abhängigkeit der verbleibenden Restspannung für den Fehlertyp „D“**

Verbleibende Restspannung [p. u.]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]
1	0	120
0,8	5,2	130,4
0,7	8,0	136,0
0,55	12,4	144,8
0,45	15,4	150,9
0,25	21,8	163,6
0,2	23,4	166,8
0,05	28,3	176,7
0	30	180

Die Werte in Tabelle 1 wurden analytisch gemäß folgender Formel errechnet.

$$\gamma = \arctan \frac{V^*}{\sqrt{3}}$$

$$\alpha = 30^\circ - \gamma; \beta = 2\alpha + 120^\circ$$

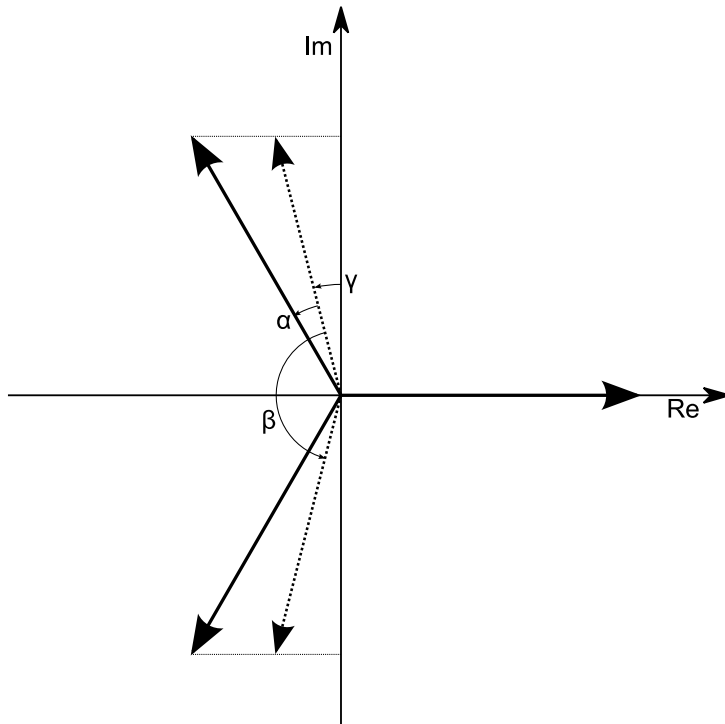


Abbildung 3: Winkelbeziehungen für Fehlertyp „D“

Tabelle 2: Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  in Abhängigkeit der verbleibenden Restspannung für den Fehlertyp „C“

Verbleibende Restspannung [p. u.]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]
1	0	120
0,8	5,8	125,8
0,7	9,5	129,5
0,55	16,4	136,4
0,45	22,1	142,1
0,25	36,6	156,6
0,2	40,9	160,9
0,05	55,1	175,1
0	60	180

Die Werte in Tabelle 2 wurden analytisch gemäß folgender Formel errechnet.

$$\gamma = \arctan \frac{1}{\sqrt{3}V^*}$$

$$\alpha = \gamma - 30^\circ; \beta = \alpha + 120^\circ$$

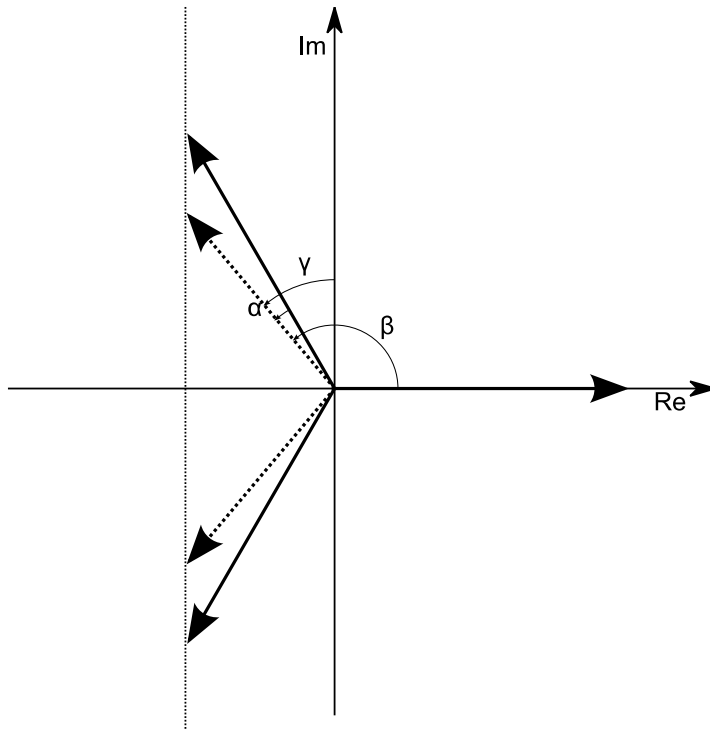
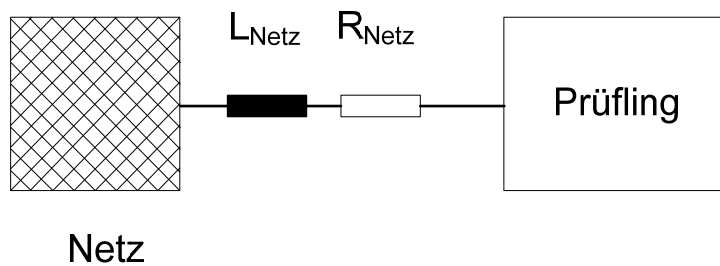
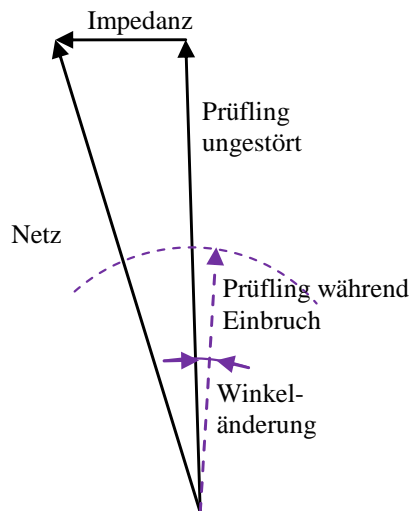


Abbildung 4: Winkelbeziehungen für Fehlertyp „C“

## 1.2 Spannungsfalleffekte

Durch den Spannungsfall an Längselementen im Netz wird bei Stromänderung die Phasenlage des Spannungsvektors an den Klemmen des Prüflings verdreht. Durch die möglicherweise schnelle Stromänderung im Fehlerfall entsteht hierdurch ein Spannungssprung zusätzlich zum Schaltgruppeneffekt. Ebenso ändert sich die Phasenlage der Klemmenspannung, wenn sich die Netzimpedanz im Fehlerfall ändert. Beide Effekte überlagern sich.





**Abbildung 5: Durch sprunghafte Änderung von  $U_{\text{Netzimpedanz}}$  ändert sich die Phasenlage der Prüflingsspannung**

Durch die Einhaltung der Anforderungen an die Impedanzverhältnisse ( $u_k$ -Korridor:  $3\% < u_k < 33\%$ ) wird dieser Effekt berücksichtigt. Weitere Anforderungen an die Nachbildung sind nicht notwendig.

### 1.3 Rush-/Sättigungs-/Demagnetisierungseffekte

Durch Spannungseinbrüche und die anschließende –wiederkehr können durch induktive Elemente Ausgleichsvorgänge unterschiedlicher Frequenzen auftreten. Mit der Forderung nach einem  $u_k$ -Korridor ( $3\% < u_k < 33\%$ ) sowie der Zusammensetzung der Impedanz ( $X/R > 3$ ) wird dieser Effekt berücksichtigt. Weitere Anforderungen an die Nachbildung sind nicht notwendig.

## 2 Prüfstandtests

### 2.1 Einleitung

Die Verwendung von Prüfstandtests anstelle von Freifeldmessungen ist zulässig, wenn mit diesen das Verhalten der EZE in den zu untersuchenden Eigenschaften äquivalent zu Freifeldmessungen, bzw. zur Verwendung einer Freifeldprüfeinrichtung (z. B. der Prüfeinrichtung, die als Beispiel in IEC 61400-21 genannt ist) nachgebildet wird.

Ein Anwendungsfall eines Prüfstandes ist die Nachbildung von Netzfehlern zur Untersuchung des FRT-Verhaltens der EZE. Hierbei ist festzuhalten, dass der in IEC 61400-21 dargestellte Test-Aufbau zum Nachbilden eines Netzfehlers ein Beispiel ist, und andere Topologien zulässig sind. Grundsätzlich gilt, dass es bei der Nachbildung eines Netzfehlers nicht auf das Verhalten zum Netz hin ankommt, sondern auf das Verhalten zum Prüfling hin.

Weitere Anwendungsfälle sind die Überprüfung der Kraftwerkseigenschaften gem. FGW-TR3. Hierzu zählt das Vermessen der Blind- und Wirkleistungsabgabe nach Sollwertvorgabe nach Kapitel 4.2.2 und 4.3.2 der FGW TR3, das Vermessen des Übergangsverhaltens von Wirk- und Blindleistung nach Kapitel 4.2.2 und 4.3.3 der FGW TR3, die Bestimmung des PQ-Diagramms nach Kapitel 4.3.1 der FGW TR3 und die Leistungsreduktion bei Überfrequenz nach Kapitel 4.2.3 der FGW TR3.

Des Weiteren können Prüfstände zur Komponentenzertifizierung oder Nachzertifizierung geänderter Eigenschaften einer bereits zertifizierten EZE verwendet werden, wenn äquivalente Rahmenbedingungen bezüglich aller zu zertifizierenden Eigenschaften auf dem Teststand nachgebildet werden.

### 3 Alternative Prüfeinrichtungen

In diesem Abschnitt werden die alternativen Prüfeinrichtungen detailliert beschrieben. Dieser Abschnitt wird erweitert, sobald neue Topologien erarbeitet wurden.

#### 3.1 Allgemeine Anforderungen

##### 3.1.1 Schnittstellen eines Teststandes für EZE zum Prüfling

###### Prüfstand

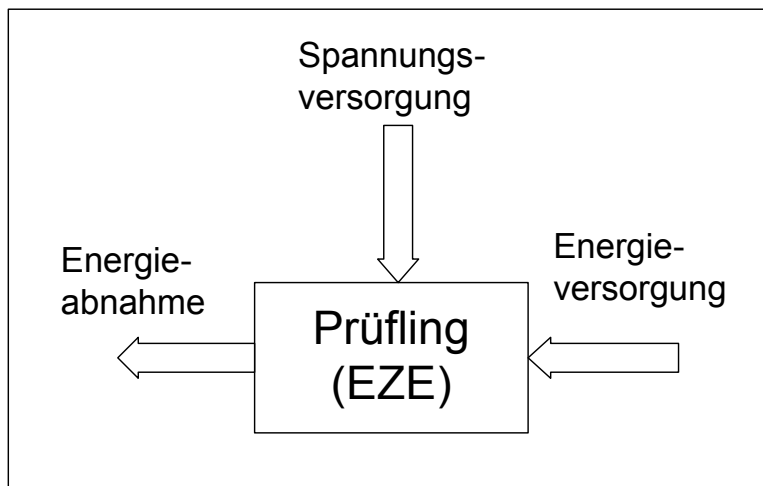


Abbildung 6: Aufgaben des Prüfstandes zur Versorgung des Prüflings

Je nach durchzuführendem Test unterscheiden sich die Anforderungen an die Eigenschaften des Prüfstandes. Die drei grundlegenden Eigenschaften sind die Energieversorgung des Prüflings (Nachbildung des Primärenergiedargebots), die Spannungsversorgung und die Energieabnahme aus dem Prüfling (unterteilt nach Ein- und Ausgangsgrößen; es handelt sich aber um denselben Energiepfad). Die Eigenschaften des Prüfstandes können durch folgende Liste beschrieben werden. Tabelle 3 stellt dar, für welchen Test welche Eigenschaften ausgeprägt sein müssen.

- Energieversorgung des Prüflings (Primärenergiedargebot)
  - Mechanisch (Wind)
    - Trägheitsmomente
  - Elektrisch (PV)
    - DC-Spannungsquelle
- Energieabnahme (Netz, bzw. Netznachbildung)
  - Maximalbelastung
  - Leistungsrichtung
  - Ersatz-Impedanz

- Betrag und Phase
    - Maximum und Minimum
  - Rückwirkung auf Spannungsversorgung
- Spannungsversorgung (Netz, bzw. Netznachbildung), als Eingangsinformation für den Prüfling
  - Spannungsniveau\*
  - Spannungsdynamik (Flanken herab, herauf)
  - Spannungshebung durch Blindstromeinspeisung
  - Frequenz

**Tabelle 3: Welche Eigenschaften des Teststandes sind für welchen Test notwendig**

<b>Eigenschaften des Teststandes</b>	<b>FRT-Tests 4.7</b>	<b>P,Q-Übergang 4.2.2 + 4.3.3</b>	<b>P,Q-Vorgabe 4.2.2+4.3.2</b>	<b>Leistungsreduktion 4.2.3</b>	<b>PQ-Diagramm 4.3.1</b>
<b>Energieversorgung</b>					
Maximalleistung	Nennlast + Verluste + Dynamik	Nennlast + Verluste + Dynamik	Nennleistung+ Verluste	Nennleistung + Verluste	Nennlast + Verluste + Dynamik
Trägheitsmoment (nur für Nicht-PV-EZE)	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
PV-EZE	DC-Quelle				
<b>Energieabnahme</b>					
Maximalstrom an dem EZE Anschluss	FRT-Maximalstrom <sup>2</sup>	Nennstrom + sinnvolle Überlast	Nennstrom	Nennstrom	Nennstrom
Leistungsrichtung	Generatorisch Motorisch	generatorisch	generatorisch	generatorisch	generatorisch
Wirksame Netz-Impedanz aus EZE-Sicht	Max $u_k = 33\%$ Min $u_k = 3\%$ (außer bei Fehlern mit Restspannung $<5\%$ ) $X/R > 3$				
<b>Spannungsversorgung</b>					
Schaltgruppeneffekt (2-phasige Fehler)	Korrekte Nachbildung des Phasensprungs	Nein	Nein	Nein	Nein
Spannungsfalleffekt	Dynamisch richtiger Spannungsfalleffekt	Dynamisch richtiger Spannungsfalleffekt	Dynamisch richtiger Spannungsfalleffekt	Nein	Dynamisch richtiger Spannungsfalleffekt
Niveau	Nieder- oder Mittelspannung				
<b>Eigenschaften des Teststandes</b>	FRT-Tests 4.7	P,Q-Übergang 4.2.2 + 4.3.3	P,Q-Vorgabe 4.2.2+4.3.2	Leistungsreduktion (P(f)) 4.2.3	PQ-Diagramm 4.3.1

<sup>2</sup> Die Energieabnahme muss für den auftretenden Stoßkurzschlussstrom  $I_P$  (gem. IEC 60909) ausgelegt sein.  $I_P$  der EZE-Typen ist stark unterschiedlich. Richtwerte für umrichtergekoppelte Systeme ca.  $2,2 I_N$ , doppelt gespeiste Asynchronmaschinensysteme ca.  $7 I_N$ , direkt gekoppelte Synchronmaschinensysteme ca.  $7 I_N$ .

## 3.2 Prüfungsspezifische Bestandteile des Prüflings

Je nach durchgeführtem Test sind verschiedene Eigenschaften des Prüflings relevant. Der Umfang des Prüflings muss mit dem Zertifizierer abgestimmt werden. Zu den Bestandteilen zählen unter anderem:

- Umrichter / Wechselrichter
- Filter / Netzdrossel
- Schutzeinrichtungen
  - Crowbar
  - Sicherungen
  - Entkupplungsrelais
  - Leistungsschalter
- Transformator (optional)
- USV
- Generator (bei nicht vollgespeisten EZE)
- EZE-Steuerung (wenn außerhalb des Umrichters)

Tabelle 4 stellt dar, für welche Bestandteile des Prüflings für welchen Test vorhanden sein müssen.

**Tabelle 4: Übersicht über die prüfungsspezifischen Bestandteile des Prüflings**

<b>Eigenschaften des Prüflings</b>	FRT-Tests 4.7	P,Q-Übergang 4.2.2 + 4.3.3	P,Q-Vorgabe 4.2.2+4.3.2	Leistungsreduktion 4.2.3	PQ-Diagramm 4.3.1
Umrichter	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Filter	Ja	Ja	Ja	nein	Ja
Schutzeinrichtungen	Alle	Alle	Alle	Nein	Alle
USV	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Transformator	Optional, wenn Test auf Niederspannung. Gleichwertiges $u_k$ zum eigentlichen EZE-Trafo				
Generator (nicht-PV EZE)	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
PV-Feld (PV EZE)	DC-Quelle				
EZE-Steuerung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

## 3.3 Kurzschlussimulator

Ein Kurzschlussimulator nach dem Spannungsteilerprinzip verfügt über Vor- und Kurzschlussdrossel. Die Kurzschlussdrossel wird durch den Schalter aktiviert. Dieser Schalter kann ein mechanischer Leistungsschalter oder ein elektronischer Schalter sein, wenn die Schalteigenschaften mit einem modernen Mittelspannungsschalter vergleichbar sind.

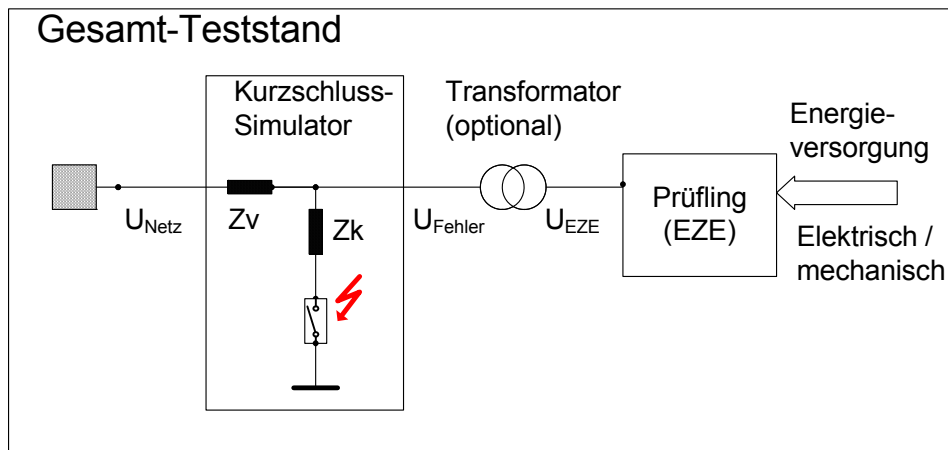


Abbildung 7: Kurzschlussimulator nach Spannungsteilerprinzip

### 3.4 Netzsimulatoren

Netzsimulatoren setzen sich im Wesentlichen aus einer niederohmigen Spannungsquelle sowie einer Netznachbildung zusammen, mit der dem Prüfling geeignete Impedanzen präsentiert werden können. Zum Betrieb des EZE-Prüflings wird darüber hinaus entweder eine rotierende Antriebseinheit oder eine DC- oder AC-Quelle benötigt, die die entsprechende (mechanische oder elektrische) Leistung zur Durchführung der unterschiedlichen Tests bereitstellt. Die Antriebseinheit oder Quelle muss eine Regelung aufweisen, mit der die für die Tests notwendigen stationären und dynamischen Betriebsbedingungen nachgebildet werden können.

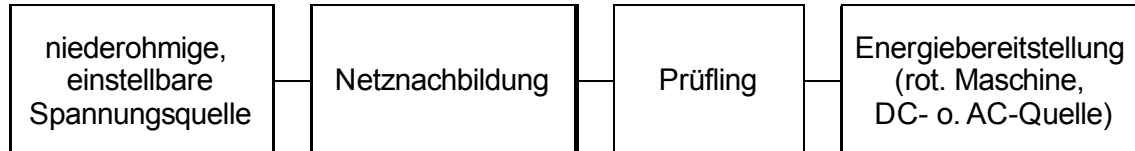


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Netzsimulators

Die niederohmige, programmierbare Spannungsquelle soll hardwaretechnisch und softwaremäßig folgende Kriterien erfüllen:

- Spannungseinbruchstiefen einstellbar gemäß FGW-TR3 Kap 4.7.
- Dauer der Spannungseinbrüche programmierbar gemäß FGW-TR3 Kap 4.7
- Flankensteilheit bei Ein- und Ausleitung von Netzfehlern vergleichbar mit konventionellen Prüfeinrichtungen (FRT Container für Freifeldtests)
- Die für die Tests erforderlichen Phasenbeziehungen sollen gem. Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 nachgebildet werden können
- Einleitung der Netzfehler unabhängig von der Phasenlage der Netzspannung
- Für jede Phase unabhängig einstellbare Spannungsamplitude und Phasenlage

Das Impedanznetzwerk soll sowohl den ohmschen als auch den induktiven Anteil der Netz-Kurzschlussimpedanz für realistische Netzkonfigurationen abdecken. Der ohmsche und der induktive Wert müssen separat einstellbar sein, um sowohl den geforderten  $u_k$ -Korridor als auch einen Netzimpedanzwinkel von 85 Grad bis etwa 30 Grad zu ermöglichen.

### 3.5 Kombination aus Netz- und Kurzschlussimulator

Die Spannungsversorgung und Energieabnahme erfolgt durch die niederohmige Spannungsquelle. Die Versorgung der EZE mit mechanischer und/oder elektrischer Energie erfolgt separat.

Durch einen Kurzschlussimulator wird die Spannung  $U_{\text{Fehler}}$  erzeugt. Durch einen Transformator wird das Spannungsniveau an die normale EZE-Klemmenspannung angepasst. Das Spannungsniveau, auf dem der Fehler erzeugt wird, kann von der späteren Betriebsspannung abweichen, wenn der verwendete Transformator ein gleichwertiges  $u_k$  besitzt, wie der später verwendete.

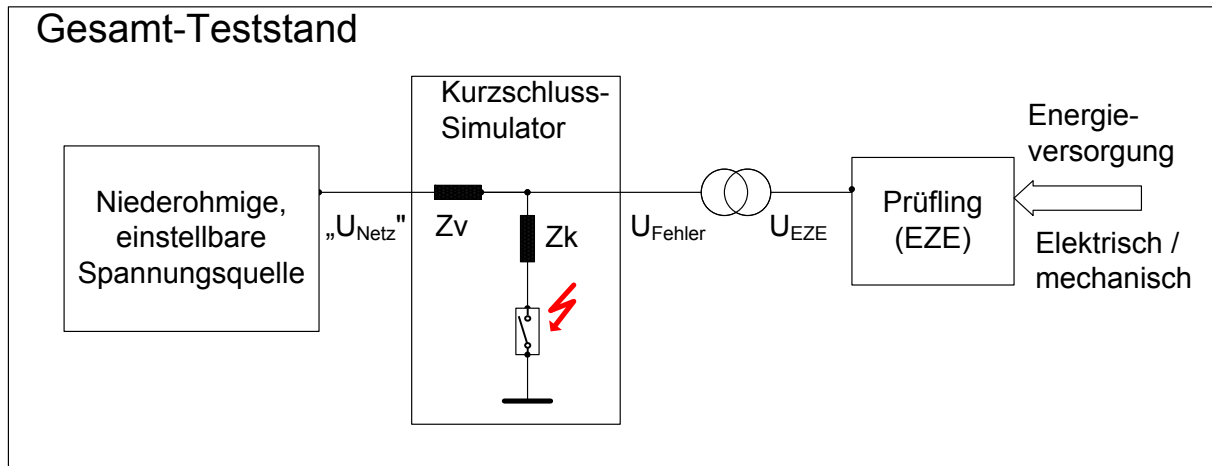


Abbildung 9: Kombination aus Netz- und Kurzschlussimulator

### 3.6 Transformatorbasierte Prüfeinrichtungen

Transformatorbasierte Prüfeinrichtungen haben einen Transformator mit geeignet abgestuften Abgriffen als Basis. Durch den Wechsel auf eine andere Kombination der Abgriffe werden die Fehlerform sowie die Einbruchtiefe bestimmt. Die Einbruchdauer wird durch eine Schalteinheit festgelegt, die zwischen den verschiedenen Abgriffen umschaltet.

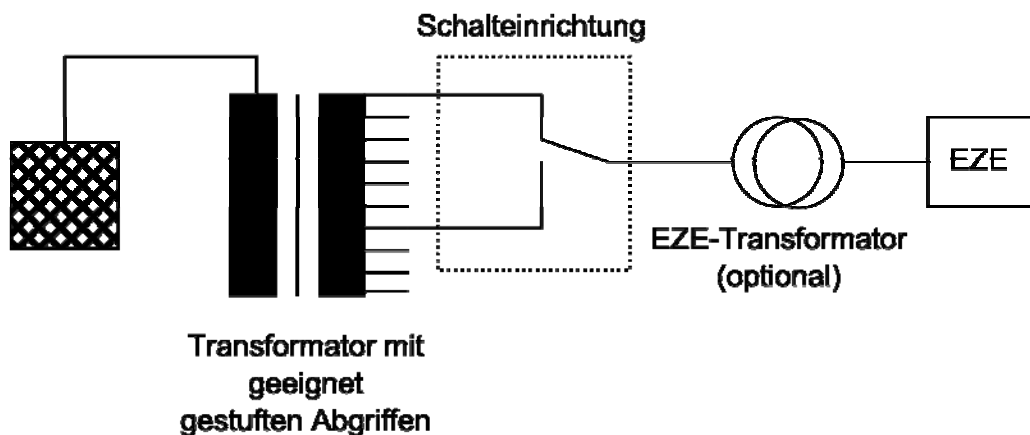
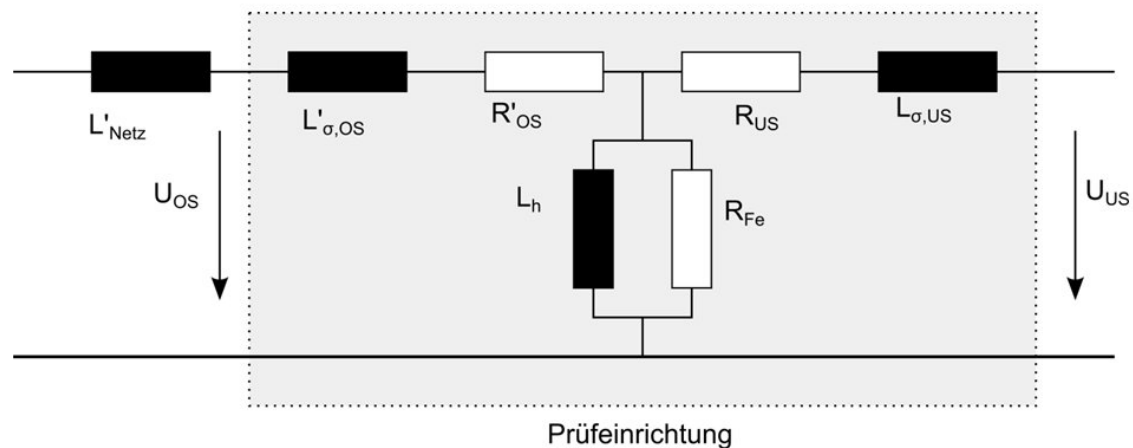


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer transformatorbasierten Prüfeinrichtung

Durch die Umschaltung zwischen den Abgriffen ändert sich das Übersetzungsverhältnis schlagartig. Dies hat auf die Folgende Auswirkungen:

- Der Wicklungswiderstand sowie die Streuinduktivität der US-Seite des Transformators sinken, da nur ein Teil der Unterspannungswicklung zum Einsatz kommt.

- Die auf die Unterspannungsseite umgerechneten Werte der Oberspannungsseite der Prüfeinrichtung (siehe Abbildung 11) sowie der Netzimpedanz sinken mit dem Quadrat der Spannungseinbruchtiefe.
- Durch die Änderung des Übersetzungsverhältnisses der Prüfeinrichtung sinkt der oberspannungsseitige Strom bei vergleichbarem unterspannungsseitigen Strom des Prüflings. Das vorgelagerte Netz wird nicht von hohen Kurzschlussströmen belastet.



**Abbildung 11: Ersatzschaltbild einer transformatorbasierten Prüfeinrichtung mit auf die Unterspannungsseite umgerechneten Werten der Oberspannungsseite**

Detailliertere Betrachtung:

Das Übersetzungsverhältnis wird allgemein als

$$\ddot{u} = \frac{U_{OS}}{U_{US}}$$

definiert.

Unter Vernachlässigung der Impedanzen der Hauptinduktivität sowie der Eisenverluste ergibt sich die Netzimpedanz aus Prüflingssicht zu:

$$Z_{Netz,Prüfling} = jX_{\sigma,US} + R_{US} + R'_{OS} + jX'_{\sigma,OS} + jX'_{Netz}$$

bzw. zu

$$Z_{Netz,Prüfling} = jX_{\sigma,US} + R_{US} + \frac{1}{\ddot{u}^2} (R_{OS} + jX_{\sigma,OS} + jX_{Netz})$$

Durch die Umschaltung der Abgriffe ändert sich das Übersetzungsverhältnis

$$\begin{aligned} \ddot{u}_0(U_{US} = U_{US,n}) &= \frac{U_{OS,n}}{U_{US,n}} \\ \ddot{u}(U_{US} = bU_{US,n}) &= \frac{1}{b} \ddot{u}_0(U_{US} = U_{US,n}); \text{ mit } 0 < b < 1, \end{aligned}$$

sodass sich die wirksame Impedanz zum Prüfling mit dem Quadrat der Einbruchtiefe übersetzt

$$Z_{Netz,Prüfling} = jX_{\sigma,US} + R_{US} + b^2 \frac{1}{\ddot{u}_0^2} (R_{OS} + jX_{\sigma,OS} + jX_{Netz}).$$

Zusätzlich verringern sich die Kupferverluste  $R_{US}$  und die Streuinduktivität  $L_{\sigma,US}$  der Unterspannungswicklung, da nur noch ein kleinerer Teil dieser Wicklung aktiv ist.