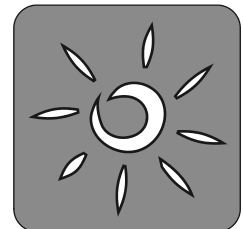
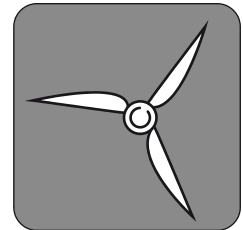


# Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und -anlagen

TEIL 4 (TR 4)

**Anforderungen  
an Modellierung und Validierung  
von Simulationsmodellen  
der elektrischen Eigenschaften  
von Erzeugungseinheiten und -anlagen**

Revision 08  
Stand 01.03.2016



Herausgeber:  
FGW e.V.  
Fördergesellschaft Windenergie  
und andere Erneuerbare Energien



# Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen

Stand 01.03.2016

## **Herausgeber**

FGW e.V.  
Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien

Oranienburger Straße 45  
10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 30101505-0

Fax +49 (0) 30 30101505-1

E-Mail [info@wind-fgw.de](mailto:info@wind-fgw.de)

Internet [www.wind-fgw.de](http://www.wind-fgw.de)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliothek; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrecht zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Herausgebers. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsneutrale Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für beide Geschlechter.

**Folgende Teile der Technischen Richtlinien der FGW sind erhältlich:**

**Teil 1:** Bestimmung der Schallemissionswerte

**Teil 2:** Bestimmung von Leistungskurven und standardisierten Energieerträgen

**Teil 3:** Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen am Mittel- Hoch- und Höchstspannungsnetz

**Teil 4:** Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen

**Teil 5:** Bestimmung und Anwendung des Referenzertrages

**Teil 6:** Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen

**Teil 7:** Betrieb und Instandhaltung von Kraftwerken für erneuerbare Energien

**Rubrik A:** Allgemeiner Teil

**Rubrik B3:** Fachspezifische Anwendungserläuterung zur Überwachung und Überprüfung von Gründungs- und Tragstrukturen (GuT) bei Windenergieanlagen

**Rubrik D2:** Zustands-Ereignis-Ursachen-Schlüssel für Erzeugungseinheiten (ZEUS)

**Rubrik D3:** Globales Service Protokoll (GSP)

**Rubrik D3 – Anhang A:** XML-Schemadokumentation

**Teil 8:** Zertifizierung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen am Mittel- Hoch- und Höchstspannungsnetz

**Teil 9:** Bestimmung der Hochfrequenten Emission von regenerativen Energieerzeugungseinheiten

---

## Vorwort

Die Technischen Richtlinien der FGW dienen dem Ziel, Mess- und Prüfverfahren anzugeben, mit denen verlässliche und vergleichbare Daten über Erzeugungseinheiten (EZE) und Erzeugungsanlagen (EZA) nach dem neuesten Stand der Technik ermittelt werden können.

Die vorliegende Richtlinie beschreibt Anforderungen an die Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen von EZE und EZA zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften am Netz.

Die Beschreibung der Verfahren zur Validierung und Modellierung des elektrischen Verhaltens von EZE und EZA entsprechend dieser Technischen Richtlinie dient dem Nachweis, dass die Simulationsmodelle ausreichend genau das elektrische Verhalten der EZE und EZA hinsichtlich der in der TR 3 aufgeführten Messungen abbilden können.

*Hinweis: Kursive Textstellen müssen übergreifend in der TR 8 geklärt werden und können entfallen, sobald sie dort aufgenommen werden.*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Abkürzungen</b> .....	<b>vii</b>
<b>Symbole und Einheiten</b> .....	<b>x</b>
Formelzeichen.....	x
Indizes .....	xi
Schreibweisen .....	xii
Kennzeichnungen .....	xii
<b>Begriffe und Definitionen</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1 Allgemeines</b> .....	<b>1</b>
1.1 Anwendungsbereich.....	1
1.2 Normative Verweisungen .....	1
<b>2 Zielsetzung der Richtlinie Modellierung/Validierung</b> .....	<b>2</b>
2.1 Modell der Einheit für die Zertifizierung.....	2
2.2 Modell der Anlage für die Zertifizierung .....	3
2.3 Methodik und standardisiertes Modell für Netzberechnungen .....	3
2.4 Berechnungsmethoden/Gültigkeit der Modelle.....	3
<b>3 EZE: Umfang der Modellierung und Validierung</b> .....	<b>7</b>
3.1 Wirkleistungsabgabe.....	7
<b>3.1.1</b> Wirkleistung .....	7
<b>3.1.2</b> Leistungsbegrenzter Betrieb durch den Netzbetreiber (Sollwertvorgabe) .....	7
<b>3.1.3</b> Leistungsbegrenzung bei Netzfrequenzerhöhung .....	7
3.2 Blindleistungsbereitstellung.....	7
<b>3.2.1</b> PQ-Kennlinie .....	7
<b>3.2.2</b> Blindleistung nach Sollwertvorgabe.....	8
<b>3.2.3</b> Q-Übergangsfunktion .....	8
3.3 Verhalten bei Störungen im Netz .....	8
3.4 Fehlererkennung .....	8
3.5 Gültigkeitsbereich des Modells .....	8
3.6 Modelldokumentation .....	8
<b>4 EZE: Grundlagen für die Modellbildung</b> .....	<b>9</b>
4.1 Erforderliche Informationen aus Prüfberichten und Herstellererklärungen.....	9
4.2 Darstellung primäre Energiewandlung (Wind, Solar, Biomasse, Wasser, Geothermie).....	9
<b>4.2.1</b> Darstellung primäre Energiewandlung Wind.....	9
<b>4.2.2</b> Darstellung primäre Energiewandlung PV .....	9
4.3 Darstellung sekundäre Energiewandlung (Wind, Solar, Biomasse, Wasser, Geothermie).....	11

<b>4.3.1</b>	Darstellung sekundäre Energiewandlung Wind (ASM, ASM-Schlupfregelung, DASM, ASM/SM+Vollumrichter, SM) .....	11
4.3.1.1	Direkt gekoppelte Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer.....	11
4.3.1.2	Direkt gekoppelte Asynchronmaschine mit Schlupfregelung .....	12
4.3.1.3	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter im Läuferkreis.....	12
4.3.1.4	Synchron-/Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter .....	13
4.3.1.5	Direkte Netzkopplung einer Synchronmaschine .....	14
<b>4.3.2</b>	Photovoltaik-Erzeugungseinheiten mit Wechselrichter .....	14
4.4	Zusatzkomponenten (Transformator, passive Kompensation, FACTS...).....	14
<b>4.4.1</b>	Transformator .....	14
<b>4.4.2</b>	Kabel.....	15
<b>4.4.3</b>	Passive Kompensation .....	16
<b>4.4.4</b>	Aktive Kompensation .....	16
4.5	Anforderungen für Standardmodelle (siehe Anhang B).....	16
<b>5</b>	<b>Validierung von Simulationsmodellen (EZE) .....</b>	<b>17</b>
5.1	Verfahren .....	17
5.2	Ergebnis .....	18
5.3	Bewertung.....	19
<b>5.3.1</b>	Bewertung für Typ 2 EZE.....	19
<b>5.3.2</b>	Bewertung für Typ 1 EZE .....	20
5.4	Modellvalidierung für nach TR 3 typgeprüfte EZE des Typ 1.....	21
<b>5.4.1</b>	Zusätzliches notwendiges Bewertungskriterium der Modellgüte in Bezug auf die LVRT-Stabilität.....	21
<b>5.4.2</b>	Übertragung von Modellen auf nicht nach TR 3 typgeprüfte EZE des Typ 1 .....	22
5.5	Weitergehende Plausibilitätsprüfungen .....	22
<b>5.5.1</b>	Plausibilitätsprüfung EZE.....	22
<b>5.5.2</b>	Tauglichkeitsnachweis von EZE-Modellen für die Verwendung im Rahmen der Anlagenberechnung/-zertifizierung .....	23
5.6	Nachweis der Kraftwerkseigenschaften: Teststandort.....	23
5.7	Kraftwerkseigenschaften: Test und Messung.....	24
<b>5.7.1</b>	Tests .....	24
<b>5.7.2</b>	Sollwertvorgaben .....	24
<b>5.7.3</b>	Abtastrate, Genauigkeit, Anzahl der Phasen bei Strom & Spannungsmessung: .....	24
<b>5.7.4</b>	Messzeitraum.....	24
<b>5.7.5</b>	Vergleichszeitraum für die Validierung .....	24
5.8	Kraftwerkseigenschaften: Vergleichsverfahren.....	25
5.9	Übertragbarkeit der Validierung von EZE-Modellen.....	25
<b>5.9.1</b>	Vereinfachter Nachweis der Validierung des EZE-Modells.....	26



<b>5.9.2</b>	Übertragung auf andere EZE .....	26
<b>5.9.3</b>	Übertragung auf andere Netzverhältnisse .....	27
<b>5.9.4</b>	Übertragung in eine andere Simulationssprache .....	27
<b>5.9.5</b>	Übertragung in eine andere Abtastrate .....	27
<b>5.9.6</b>	Übertragung von Modellteilen aus dem Peripherie-Teil .....	28
<b>6</b>	<b>EZA: Grundlagen für die Modellierung .....</b>	<b>29</b>
6.1	Komponenten zur EZA-Modellierung .....	29
<b>6.1.1</b>	EZE-Modell .....	29
<b>6.1.2</b>	EZA-Transformatoren .....	29
<b>6.1.3</b>	Kabel .....	29
<b>6.1.4</b>	Kompensationsanlagen .....	29
<b>6.1.5</b>	Externes Netz .....	30
<b>6.1.6</b>	EZA-Regelung .....	30
6.2	EZA-Regler .....	30
<b>6.2.1</b>	Umfang und Dokumentation des Modells des EZA-Reglers .....	30
<b>6.2.2</b>	Eingänge des Modells des EZA-Reglers .....	30
<b>6.2.3</b>	Ausgänge des Modells des EZA-Regler .....	31
<b>6.2.4</b>	Parameter des Modells des EZA-Reglers .....	31
<b>6.2.5</b>	Regelfunktionen des EZA-Modells .....	31
6.3	Anforderungen an die Validierung und Plausibilisierung des EZA-Reglers .....	31
6.4	Anforderungen an die Validierung für einen vereinfachten Nachweis für EZA mit EZA-Regler .....	31
<b>6.4.1</b>	Anforderungen an die stationäre Abweichung zwischen Simulation und Messung des EZA-Reglers für Wirk- und Blindleistung .....	32
<b>6.4.2</b>	Anforderungen an die Regeldynamik des Modells des EZA-Reglers für Wirk- und Blindleistung .....	33
<b>6.4.3</b>	Anforderungen an die stationäre Genauigkeit der Sollwerte des EZA- Reglers an die EZE bzw. für unterlagerte EZA .....	33
6.5	Schutzeinrichtungen der EZA .....	34
6.6	Beispielkonfigurationen von EZA .....	34
<b>7</b>	<b>Erforderliche Nachweise der EZA .....</b>	<b>35</b>
7.1	Wirkleistungsabgabe .....	35
<b>7.1.1</b>	Wirkleistung .....	35
<b>7.1.2</b>	Leistungsbegrenzter Betrieb durch den Netzbetreiber (Sollwertvorgabe) .....	35
<b>7.1.3</b>	Leistungsbegrenzung bei Netzfrequenzerhöhung .....	35
7.2	Blindleistungsbereitstellung .....	35
<b>7.2.1</b>	PQ-Diagramm .....	35
<b>7.2.2</b>	Blindleistung nach Sollwertvorgabe .....	36
<b>7.2.3</b>	Q-Übergangsfunktion .....	36
<b>7.2.4</b>	Q(U)-Regelung .....	37

---

7.3	Verhalten bei Störungen im Netz .....	37
7.4	Plausibilitätsprüfung der EZA .....	37
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>38</b>
	<b>Inhaltsverzeichnis Anhänge .....</b>	<b>40</b>
Anhang A	Validierungsbericht (normativ) .....	45
Anhang B	Beispielmodelle und Anforderungen an Standardmodelle .....	47
Anhang C	Anmerkungen zur Simulation und Validierung .....	61
Anhang D	(Informativ): Mindestanforderungen an die Modelldokumentation und Vorschlag zur Gliederung (Anwendungsbeschreibung für den Zertifizierer) .....	64
Anhang E	(Informativ): Plausibilisierung der EZE-Modelle hinsichtlich EZA- Simulationstauglichkeit .....	66
Anhang F	Bestimmung des Beginns von transienten Bereichen .....	68
Anhang G	Modellierung, Validierung und Konformitätsnachweis netzgekoppelter Stromerzeugungsanlagen mit Synchrongenerator .....	69

## Verwendete Abkürzungen

AC	Wechselstrom bzw. Wechselspannung AC (Alternating Current)
ADC	Analog-nach-Digital Converter
ASM	Asynchronmaschine
AVR	Automatic Voltage Regulator (Spannungsregler)
AWE	Automatische Wieder-Einschaltung bei Freileitungen nach Netzfehlern
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BDEW-MSR	BDEW Mittelspannungsrichtlinie „Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“ [1]
BHKW	Blockheizkraftwerk: EZE mit Verbrennungsmotor, bei dem neben der elektrischen auch die thermische Energie genutzt wird.
BNetzA	Bundesnetzagentur
CISPR	Comité International Spécial Des Perturbations Radioélectriques
DASM	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine
DC	Direct Current: Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DKW	Dampfkraftwerk
DT	Dampfturbine
EB	Eigenbedarf
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
END	Ersatznetzdarstellung
EZA	Erzeugungsanlage: Eine oder mehrere EZE einschließlich aller zum Anschluss und Betrieb erforderlichen elektrischen Einrichtungen, entsprechend BDEW-MSR
EZE	Erzeugungseinheit, einzelne Einheit zur Erzeugung von elektrischer Energie, entsprechend BDEW-MSR
EZS	Erzeuger-Zählpeilsystem
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FGW	FGW e.V. - Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien
FLR	Frequenzgeführter Leistungsregler
FNN	Forum für Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN)
GENSET	Kombination von Generator und Antriebseinheit
GT	Gasturbine
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk

---

HS-Netz	Hochspannungsnetz
HSS-Netz	Höchstspannungsnetz
IBN	Inbetriebnahme
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistors
ISO	International Organization for Standardization
LR	Leistungsregler
LVRT	Low-Voltage-Ride-Through bzw. Durchfahren des Spannungseinbruchs
MOSFET	MetalOxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point (Solarmodule werden normalerweise im Punkt der maximalen Leistungsabgabe betrieben).
MS	Mittelspannung
MS-Netz	Mittelspannungsnetz
MAE	mean absolute error between simulation and measurement [2]
ME	mean error between simulation and measurement [2]
MXE	maximum error between simulation and measurement [2]
NAP	Netzanschlusspunkt: Punkt an dem die Anlage an das Netz des Netzbetreibers angeschlossen ist
NAR	Netzanschlussregeln
NB	Netzbetreiber
NS	Niederspannung
NVP	Netzverknüpfungspunkt: Punkt an dem die Anlage an das Netz des Netzbetreibers angeschlossen ist (Definition gemäß SDL-WindV)
OEL	Over-Excitation-Limiter (Übererregungsbegrenzung des AVR)
OS	Oberschwingung
PSS	Power-System-Stabilizer
PVA	Photovoltaikanlage: Die PVA besteht aus Modulen, die in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung DC-Spannung liefern, sowie den Balance of System (BoS)- Komponenten, zu denen auch der Wechselrichter zählt. Die Einspeisung erfolgt immer über einen Wechselrichter. Der Wechselrichter prägt die elektrischen Eigenschaften der PVA ein. Für die Vermessung ist der Wechselrichter maßgeblich
SDLWindV	Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen
SS	Sammelschiene
STATCOM	Static Synchronous Compensator
STBR	Stabilitätsreserve der Primärregelung
SVC	Static VAR Compensator
TAB	Technische Anschlussbedingungen
TC 2007	Transmission Code 2007 [3]

---

THC	Total Harmonic Current Distortion
TR	Technische Richtlinie
TR 3	Technische Richtlinie 3 der FGW [4]
TR 8	Technische Richtlinie 8 der FGW [5]
UEL	Under-Excitation-Limiter (Untererregungsbegrenzung des AVR)
UW	Umspannwerk
VDE FNN	Verband der Elektrotechnik Forum Netztechnik/ Netzbetrieb
VDN	Verband der Netzbetreiber
VKM	Verbrennungskraftmaschinen
VZS	Verbraucher-Zählpeilsystem
WEA	Windenergieanlage
WK	Wasserkraftwerk
WT	Wasserturbine
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.