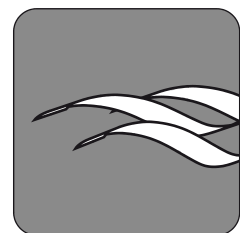
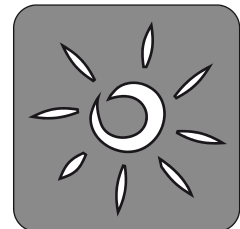
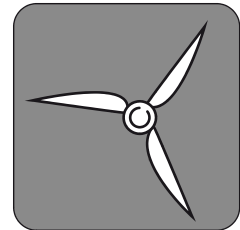


Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und -anlagen

TEIL 4 (TR 4)

**Anforderungen
an Modellierung und Validierung
von Simulationsmodellen
der elektrischen Eigenschaften
von Erzeugungseinheiten und -anlagen,
Speicher sowie deren Komponenten**

Revision 09
Stand 01.02.2019



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

Notifiziert gemäß der Richtlinie (EU) 2015/1535 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (ABl. L 241 vom 17.9.2015, S. 1)

Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie deren Komponenten

Stand 01.02.2019

Herausgeber

FGW e.V.
Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien

Oranienburger Straße 45
10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 30101505-0

Fax +49 (0) 30 30101505-1

E-Mail info@wind-fgw.de

Internet 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 Leistungskennlinien und standardisierten Energieerträgen
- Teil 3:** Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz
- Teil 4:** Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie deren Komponenten
- 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 A1:** Anlagenverantwortung
 - 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, Speicher sowie für deren Komponenten am Stromnetz
- Teil 9:** Bestimmung der hochfrequenten Emissionen von regenerativen Energieerzeugungseinheiten
- Teil 10:** Bestimmung der Standortgüte nach Inbetriebnahme

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.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Abkürzungen	viii
Symbole und Einheiten	xi
Formelzeichen.....	xi
Indizes	xii
Schreibweisen	xiv
Kennzeichnungen	xiv
Begriffe und Definitionen	xvi
1 Allgemeines	1
1.1 Anwendungsbereich.....	1
1.2 Normative Verweisungen	1
2 Zielsetzung der Richtlinie Modellierung/Validierung	2
2.1 Modell der Einheit für die Zertifizierung.....	2
2.2 Modell der Anlage für die Zertifizierung	3
2.3 Aggregierte Simulationsmodelle von EZA und Speichern zur Verwendung in Netzstudien.....	3
2.4 Berechnungsmethoden/Gültigkeit der Modelle.....	3
3 EZE: Umfang der Modellierung und Validierung	7
3.1 Wirkleistungsabgabe.....	7
3.1.1 Wirkleistung	7
3.1.2 Leistungsbegrenzter Betrieb durch den Netzbetreiber (Sollwertvorgabe)	7
3.1.3 Leistungsabgabe bei Netzfrequenzerhöhung.....	7
3.1.4 Leistungsabgabe bei Netzfrequenzabnahme	7
3.2 Blindleistungsbereitstellung.....	7
3.2.1 PQ-Kennlinie	7
3.2.2 Blindleistung nach Sollwertvorgabe.....	8
3.3 Verhalten bei Störungen im Netz	8
3.4 Schutzkomponenten	8
3.5 Fehlererkennung	8
3.6 Gültigkeitsbereich des Modells	8
3.7 Modelldokumentation	9
4 EZE: Grundlagen für die Modellbildung	10
4.1 Erforderliche Informationen aus Prüfberichten und Herstellererklärungen.....	10
4.2 Darstellung primäre Energiewandlung.....	10
4.2.1 Darstellung primäre Energiewandlung Wind.....	10
4.2.2 Darstellung primäre Energiewandlung PV	10

4.3	Darstellung sekundäre Energiewandlung (Wind, Solar, Biomasse, Wasser, Geothermie).....	12
4.3.1	Darstellung sekundäre Energiewandlung Wind (ASM, ASM-Schlupfregelung, DASM, ASM/SM+Vollumrichter, SM)	12
4.3.1.1	Direkt gekoppelte Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer.....	12
4.3.1.2	Direkt gekoppelte Asynchronmaschine mit Schlupfregelung	13
4.3.1.3	Doppeltgespeiste Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter im Läuferkreis.....	13
4.3.1.4	Synchron-/Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter	14
4.3.1.5	Direkte Netzkopplung einer Synchronmaschine	15
4.3.2	Photovoltaik-Erzeugungseinheiten mit Wechselrichter	15
4.4	Zusatzkomponenten (Transformator, passive Kompensation, FACTS...).....	15
4.4.1	Transformator	15
4.4.2	Kabel.....	16
4.4.3	Passive Kompensation	16
4.4.4	Aktive Kompensation	17
4.5	Anforderungen für Standardmodelle (siehe Anhang B).....	17
5	Validierung von Simulationsmodellen (EZE)	18
5.1	Verfahren	18
5.2	Ergebnis.....	19
5.3	Bewertung.....	20
5.3.1	Bewertung für Typ 2 EZE.....	20
5.3.2	Bewertung für Typ 1 EZE	21
5.4	Modellvalidierung für nach TR 3 typgeprüfte EZE des Typ 1.....	21
5.4.1	Zusätzliches notwendiges Bewertungskriterium der Modellgüte in Bezug auf die UVRT-Stabilität	21
5.4.2	Übertragung von Modellen auf nicht nach TR 3 typgeprüfte EZE des Typ 1	22
5.5	Plausibilitätsprüfungen an Simulationsmodellen von EZE Typ2	22
5.5.1	Allgemeines.....	22
5.5.2	Plausibilitätsprüfung des Einzelmodells in Ergänzung zur Validierung.....	23
5.5.2.1	Plausibilisierung des Blindleistungsstellbereiches	29
5.5.2.2	Plausibilisierung des quasistationären Betriebes.....	29
5.5.3	Plausibilitätstests für typische EZA-Konfigurationen (Praxistauglichkeit)	30
5.5.3.1	Einmalige Spannungseinbrüche	32
5.5.3.2	Nachbildung einer erfolglosen AWE.....	34
5.5.4	Wirkleistungsreduktion bei Überfrequenz	35
5.5.4.1	Feste Vorgabe des Frequenzverlaufs (Nachweis nach VDE-AR-N-4110 und 4120)	35
5.5.4.2	Dynamische Vorgabe der Frequenz (Leistungsrückkopplung, Nachweis nach VDE-AR-N-4130)	36
5.6	Plausibilitätsprüfungen an Simulationsmodellen von EZE Typ1.....	37

5.6.1	Allgemeines.....	37
5.6.2	Plausibilitätsprüfung des Einzelmodells.....	38
5.6.2.1	Einmalige Spannungseinbrüche und einmaliger Spannungsanstieg	38
5.6.2.2	Mehrfachfehler	40
5.6.3	Plausibilitätstests für typische EZA-Konfigurationen.....	42
5.6.4	Wirkleistungsreduktion bei Überfrequenz	43
5.7	Nachweis der Kraftwerkseigenschaften: Teststandort.....	44
5.7.1	Teststandort.....	44
5.7.2	Tests	44
5.7.3	Sollwertvorgaben.....	44
5.7.4	Abtastrate, Genauigkeit, Anzahl der Phasen bei Strom & Spannungsmessung.....	44
5.7.5	Messzeitraum.....	44
5.7.6	Vergleichszeitraum für die Validierung	44
5.7.7	Vergleichsverfahren	45
5.8	Übertragbarkeit der Validierung von EZE-Modellen.....	45
5.8.1	Vereinfachter Nachweis der Validierung des EZE-Modells.....	46
5.8.2	Übertragung auf andere EZE.....	46
5.8.3	Übertragung auf andere Netzverhältnisse	47
5.8.4	Übertragung in eine andere Simulationssprache	47
5.8.5	Übertragung in eine andere Abtastrate.....	47
5.8.6	Übertragung von Modellteilen aus dem Peripherie-Teil	48
6	Validierung von Simulationsmodellen (EZA-Regler)	49
6.1	Anforderungen an die stationäre Genauigkeit des EZA-Reglers für Wirk- und Blindleistung am Regelpunkt des EZA-Reglers	49
6.2	Anforderungen an die Regeldynamik des Modells des EZA-Reglers für Wirk- und Blindleistung am Regelpunkt des EZA-Reglers	49
7	Erforderliche Nachweise der EZA.....	50
7.1	Wirkleistungsabgabe.....	50
7.1.1	Wirkleistung	50
7.1.2	Leistungsbegrenzter Betrieb durch den Netzbetreiber (Sollwertvorgabe)	50
7.1.3	Leistungsbegrenzung bei Netzfrequenzerhöhung.....	50
7.2	Blindleistungsbereitstellung.....	50
7.2.1	PQ-Diagramm.....	50
7.2.2	Blindleistung nach Sollwertvorgabe.....	51
7.2.3	Q-Übergangsfunktion	51
7.2.4	Q(U)-Regelung	52
7.2.5	Q(P)-Regelung	52
7.2.6	Blindleistung mit Spannungsbegrenzungsfunktion	52

7.2.7	Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$	52
7.3	Verhalten bei Störungen im Netz	52
7.4	Plausibilitätsprüfung der EZA	52
8	Validierung aggregierter EZA-Modelle nach VDE AR-N 4110 / 4120 Kap.	
10.6	53
8.1	Funktionsumfang und grundsätzliche Eigenschaften	53
8.2	Quasistationärer Betrieb nach VDE AR-N 4110 / 4120 KAPITEL 10.2.1.2.....	54
8.3	Statische Spannungshaltung/Blindleistungsbereitstellung nach VDE AR-N 4110 / 4120 KAPITEL 10.2.2;	54
8.3.1	Generelle Festlegungen	54
8.3.2	Vergleichsverfahren	55
8.3.3	Blindleistungs-Spannungskennlinie $Q(U)$ nach VDE AR-N 4110/4120, 10.2.2.4	56
8.3.4	Kennlinie Blindleistung als Funktion der Wirkleistung $Q(P)$ nach VDE AR-N 4110, 10.2.2.4.....	58
8.3.5	Blindleistung mit Spannungsbegrenzungsfunktion nach VDE AR-N 4110/4120, 10.2.2.4.....	59
8.3.6	Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ nach VDE AR-N 4110/4120, 10.2.2.4.....	62
8.3.7	Blindleistungsbereich (PQ-Diagramm) nach 10.2.2.2 und 10.2.2.3	63
8.4	Dynamische Netzstützung nach VDE AR-N 4110 / 4120 Kapitel 10.2.3	63
8.4.1	Simulationsaufbau.....	64
8.4.2	Durchzuführende Versuche	64
8.4.3	Vergleich der Simulationsergebnisse	67
8.5	Netzsicherheitsmanagement nach VDE AR-N 4110 / 4120 KAPITEL 10.2.4.2 (Sollwertvorgabe Wirkleistung);	67
8.6	Wirkleistungseinspeisung bei Über- und Unterfrequenz nach VDE AR-N 4110 / 4120 KAPITEL 10.2.4.3;.....	67
8.7	Kurzschlussstrombeitrag nach VDE AR-N 4110 / 4120 KAPITEL 10.2.5.2;.....	68
8.8	Schutzeinrichtungen und -einstellungen nach VDE AR-N 4110 / 4120 KAPITEL 10.3.....	68
	Literaturverzeichnis	69
	Inhaltsverzeichnis Anhänge	72
Anhang A	Validierungsbericht (normativ)	77
Anhang B	Beispielmodelle und Anforderungen an Standardmodelle.....	80
Anhang C	Anmerkungen zur Simulation und Validierung	93
Anhang D	(Informativ): Mindestanforderungen an die Modelldokumentation und Vorschlag zur Gliederung (Anwendungsbeschreibung für den Zertifizierer).....	97
Anhang E	Modellierung, Validierung und Konformitätsnachweis netzgekoppelter Stromerzeugungsanlagen mit Synchrongenerator nach dem Einzelnachweisverfahren	99
Anhang F	Gegensystemerweiterung des Modells nach IEC 61400-27-1.....	143

Verwendete Abkürzungen

AC	Wechselstrom bzw. Wechselspannung AC (Alternating Current)
ADC	Analog-nach-Digital Converter
ASM	Asynchronmaschine
AVR	Automatic Voltage Regulator (Spannungsregler)
AWE	Automatische Wiedereinschaltung bei Freileitungen nach Netzfehlern
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BNetzA	Bundesnetzagentur
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
DAkKS	Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
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
EMT-Modell	Momentanwertmodell
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
END	Ersatznetzdarstellung
EZA	Erzeugungsanlage
EZE	Erzeugungseinheit
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)
FRT	Fault Ride-Through
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
MOSFET	MetalOxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point (Solarmodule werden normalerweise im Punkt der maximalen Leistungsabgabe betrieben).
MS	Mittelspannung
MAE	mean absolute error between simulation and measurement [1]
ME	mean error between simulation and measurement [1]
MXE	maximum error between simulation and measurement [1]
NAP	Netzanschlusspunkt: Punkt an dem die Anlage an das Netz des Netzbetreibers angeschlossen ist
NAR	Netzanschlussregeln
NB	Netzbetreiber
NS	Niederspannung
OEL	Over-Excitation-Limiter (Übererregungsbegrenzung des AVR)
OS	Oberschwingung
OVRT	Over-Voltage-Ride-Through bzw. Durchfahren der Überspannung
PSS	Power-System-Stabilizer
PVA	Photovoltaikanlage
RMS-Modell	Effektivwertmodell
SDLWindV	Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen
SL	Schleifringläufer
SS	Sammelschiene
STATCOM	Static Synchronous Compensator
STBR	Stabilitätsreserve der Primärregelung
SVC	Static VAR Compensator
TAB	Technische Anschlussbedingungen
THC	Total Harmonic Current Distortion
TR	Technische Richtlinie
TR 3	Technische Richtlinie 3 der FGW [2]
TR 8	Technische Richtlinie 8 der FGW [3]
UEL	Under-Excitation-Limiter (Untererregungsbegrenzung des AVR)
UVRT	Under-Voltage-Ride-Through bzw. Durchfahren des Spannungseinbruchs

UW	Umspannwerk
VDE FNN	Verband der Elektrotechnik Forum Netztechnik/ Netzbetrieb
VDN	Verband der Netzbetreiber
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VZS	Verbraucher-Zählpeilsystem
WEA	Windenergieanlage
WK	Wasserkraftwerk
WT	Wasserturbine
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.