Inhaltsverzeichnis

1 Ziel und Herausforderungen der Netzintegration	1
2 Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	7
2.1 Windenergieanlagen	8
2.1.1 Windcharakteristiken	9
2.1.2 Elektrische Leistung	15
2.1.3 Leistungskennlinien	16
2.2 Photovoltaik-Anlagen	19
2.2.1 Charakteristiken räumlicher Orientierung	20
2.2.2 Elektrische Leistung	22
2.2.3 Verschaltungsformen von Modulen	23
2.3 Wasserkraftwerke	27
2.3.1 Arten von Wasserkraftwerken	28
2.3.2 Elektrische Leistung von Wasserkraftwerken mit Staudamm ...	28
2.3.3 Stromerzeugung aus der Energie von Gezeiten, Wellen und Meeresströmungen	29
2.4 Kraft-Wärme-Kopplung-Anlagen	31
2.4.1 Biomassekraftwerke	32
2.4.2 Biogaskraftwerke	33
2.4.3 Blockheizkraftwerke	34
2.4.4 Geothermie – Elektroenergie und Nutzwärme aus der Erdwärme	35
Literatur	36
3 Elektrotechnisches Basiswissen zur Netzintegration der Erzeugungsanlagen	39
3.1 Gleich-, Wechsel- und Drehstromsysteme	39
3.1.1 Gleichstromsysteme	40
3.1.2 Wechselstromsysteme	42
3.1.3 Drehstromsysteme	45

3.2	Charakteristiken von elektrischen Netzen und Erzeugungsanlagen	47
3.2.1	Spannungen	48
3.2.2	Normfrequenz	49
3.2.3	Bemessungsstrom	50
3.2.4	Wirkleistung.	50
3.2.5	Blindleistung	53
3.2.6	Verzerrungsleistung	55
3.2.7	Verschiebungswinkel.	56
3.2.8	Scheinleistung	57
3.2.9	Kosinus- und Tangens-Verschiebungsfaktor	60
3.2.10	Leistungsfaktor	65
3.2.11	Unsymmetrie von Strömen und Spannungen	65
3.2.12	Verzerrte Ströme und Spannungen	68
3.3	Verbraucherzählpeilsystem.	70
3.4	Kurzschlussströme und Kurzschlussverlauf	73
3.4.1	Definitionen der Kurzschlussströme	73
3.4.2	Kurzschlussstromverlauf	74
3.4.3	Arten von Kurzschlüssen	79
3.5	Kurzschlussleistung und Netzimpedanzwinkel am Netzpunkt	82
3.5.1	Definitionen der Kurzschlussleistungen	84
3.5.2	Netzimpedanzwinkel.	89
3.5.3	Kennwerte weltweit.	91
3.6	„Externes Netz“ als Äquivalent eines realen Netzes	94
3.7	„Elektrische Entfernung“	98
3.8	Spannungsänderungen	103
3.8.1	Berechnungsverfahren und Zeigerdiagramme.	104
3.8.2	Vereinfachte Berechnungsverfahren für die Praxis	111
3.9	Blindleistungskompensation und Blindleistungsbereitstellung	114
3.9.1	Blindleistungskompensation	116
3.9.2	Blindleistungsbereitstellung	119
3.9.3	Anlagen für Blindleistungskompensation und -bereitstellung	121
	Literatur.	125
4	Elektrische Netze mit dezentralen Erzeugungsanlagen Erneuerbarer Energien	129
4.1	Verbundnetz mit zentralen und dezentralen Erzeugungsanlagen.	130
4.2	Spannungsebenen im Verbundnetz	133
4.3	Höchst- und Hochspannungsübertragungsnetze	136
4.3.1	Drehstromnetze	137
4.3.2	Gleichstromnetze.	141
4.3.3	Hybridnetze	146

4.3.4	Netze mit Betriebsfrequenzen kleiner 50 Hz.	153
4.3.5	Freileitungen, Kabel und gasisolierte Leitungen	159
4.4	Mittel- und Niederspannungsverteilungsnetze.	164
4.4.1	Struktur und technische Charakteristiken	165
4.4.2	Anbindung der Mittelspannungsnetze an ein Hochspannungsnetz	170
4.4.3	Anbindung der Niederspannungsnetze an ein Mittelspannungsnetz	172
4.4.4	Maximale Länge der Leitungen.	174
4.5	Uni- und bi-direktionaler Leistungsfluss im elektrischen Netz.	183
4.6	Spannungsregelung in Übertragungs- und Verteilungsnetzen.	188
4.6.1	Grenzwerte der Spannungen	190
4.6.2	Synchrongeneratoren mit direktem Netzanschluss	192
4.6.3	Kondensatoren, Induktivitäten, FACTS und Phasenschieber.	198
4.6.4	Leistungstransformatoren	204
4.6.5	Zwei- und Dreiwicklungstransformatoren.	208
4.6.6	Verteilungstransformatoren	214
4.6.7	Erzeugungsanlage und regelbarer Ortsnetztransformator	219
4.6.8	Erzeugungsanlage und regelbarer Längsspannungsregler.	226
4.7	Verlustleistung, Blindleistungsbezug, Elektroenergieverluste und Blindarbeit im Netz	229
4.7.1	Definitionen	230
4.7.2	Berechnung der Verlustleistung und des Blindleistungsbezuges	232
4.7.3	Einfluss der dezentralen Erzeugungsanlagen auf Verlustleistung und Blindleistungsbezug im Netz.	233
4.8	Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie auf offener See	238
4.8.1	Erzeugungsanlagen auf dem Meeresboden und Windenergieanlagen auf See	239
4.8.2	Übertragungsnetze für verteilte Erzeugungsanlagen auf dem Meeresboden	240
4.8.3	Gleich- und Drehstromsysteme in Übertragungsnetzen auf See	249
4.8.4	Anbindungskonzepte der Offshore-Windparks an das Verbundnetz	253
4.8.5	Mittelspannungsnetz im Offshore-Windpark.	257
4.8.6	Umspannwerk auf Seeplattform	261
4.8.7	Konverter auf Seeplattform	273
4.8.8	Leistungsbilanz im Offshore-Übertragungsnetz	275
4.8.9	Übertragungskapazität der Seekabel	286

4.8.10	Erforderliche Kapazität des Netzverknüpfungspunktes an Land zur Aufnahme der auf See erzeugten Elektroenergie	290
4.9	Länderspezifische Netzeigenschaften	292
4.9.1	Netzstruktur	293
4.9.2	Kabel und Freileitungen	294
4.9.3	Netz- und Anlagenschutz	294
4.9.4	Sternpunktbehandlung	296
4.9.5	Blindleistungskompensation	297
	Literatur	299
5	Erzeugungsanlagen mit Nutzung erneuerbarer Energien	309
5.1	Begriffe „Erzeugungseinheit“ und „Erzeugungsanlage“	310
5.2	Rotierende und statische Generatorsysteme	311
5.3	Klassifikation der Generatorsysteme	314
5.4	Erzeugungseinheiten mit rotierenden Generatorsystemen	318
5.4.1	Asynchrongeneratoren mit Kurzschlussläufer	319
5.4.2	Asynchrongeneratoren mit externem Läuferwiderstand	323
5.4.3	Doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren	324
5.4.4	Asynchrongeneratoren mit Netzanschluss über Umrichter	326
5.4.5	Synchrongeneratoren mit direktem Netzanschluss	327
5.4.6	Synchrongeneratoren mit Netzanschluss über Umrichter	329
5.4.7	Synchrongeneratoren mit Permanentmagnet im Rotor	330
5.4.8	Marktanteile unterschiedlicher Generatorsysteme	332
5.5	Erzeugungseinheiten mit statischen Stromquellen	334
5.6	Hybridanlagen	336
5.7	Systemtechnische Anforderungen an Erzeugungsanlagen	338
5.7.1	Frequenzabhängige Wirkleistungsabgabe	340
5.7.2	Netz- und Anlagenschutz	341
5.7.3	Entgegenwirkung dem Spannungskollaps	344
5.7.4	Statische Spannungshaltung im ungestörten Netzbetrieb	360
5.7.5	Dynamische Spannungsstützung bei Netzfehlern	367
5.7.6	Beitrag zur Kurzschlussleistung am Netzanschlusspunkt	375
5.7.7	Inselbetriebsfähigkeit	379
5.7.8	Blindleistungsbereitstellung am Netzanschlusspunkt	383
5.7.9	Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung	389
5.8	Elektrische Betriebe der Erzeugungsanlagen	393
5.8.1	Betrieb mit konstanter Scheinleistung	394
5.8.2	Betrieb mit konstanter Wirkleistung	396
5.9	Volatilität der ins Netz eingespeisten Leistung	397
5.9.1	Typische Leistungsfluktuation	397
5.9.2	Mathematische Analyse der Leistungsfluktuation	398

5.9.3	Leistungsdauerkennlinie	401
5.9.4	Volllaststundenzahl	405
5.10	Verlustleistungen und Blindleistungsbezüge in Betriebsmitteln der Erzeugungsanlage	407
5.10.1	Netzanschluss der Erzeugungsanlage über eine Leitung	409
5.10.2	Maschinentransformator der Erzeugungseinheit	415
5.10.3	Netztransformator und Hochspannungsleitung	420
5.10.4	Minimierung der Verlustleistungen und Blindleistungsbezüge	426
5.11	Netzurückwirkungen der Erzeugungsanlagen	439
5.11.1	Arten der Netzurückwirkungen	442
5.11.2	Grenzwerte	444
5.11.3	Positive und negative Netzurückwirkungen	452
5.11.4	Internationale Standards zur Messung der Netzurückwirkungen	455
5.11.5	Messgeräte und Messverfahren	457
5.11.6	Beurteilung der Messergebnisse	469
5.11.7	Berechnung und Analyse der Netzurückwirkungen	473
	Literatur	474
6	Netzanschluss dezentraler Erzeugungsanlagen	481
6.1	Dezentrale Erzeugungsanlagen im Verbundnetz	482
6.2	Elektrische Charakteristiken des Netzanschlusspunktes	483
6.3	Fachbegriffe von Spannungen	488
6.4	Einflussfaktoren auf die Spannung am Netzanschlusspunkt	490
6.4.1	Leistungsflussrichtung im Netz	492
6.4.2	Wirkleistungseinspeisung	495
6.4.3	Blindleistungsbereitstellung	496
6.4.4	Kurzschlussleistung und Netzimpedanzwinkel	498
6.5	Berechnung der Kurzschlussleistung und des Netzimpedanzwinkels am Netzanschlusspunkt der Erzeugungsanlage	506
6.5.1	Allgemeine mathematische Grundsätze	507
6.5.2	Netzanschlusspunkt im Hochspannungsnetz	512
6.5.3	Netzanschlusspunkt im Mittelspannungsnetz	521
6.5.4	Netzanschlusspunkt im Niederspannungsnetz	531
6.6	Änderungen im Verbundnetz bei der Netzintegration dezentraler Erzeugungsanlagen	538
6.6.1	Folgen der Ersetzung konventioneller Kraftwerke	541
6.6.2	Beiträge zum Kurzschlussstrom	547
6.6.3	Auswirkungen auf den Netzbetrieb	550
6.6.4	Mangel und Importpotenzial der Kurzschlussleistung	551
6.6.5	Verteilung und Phänomen der Kurzschlussströme	553

6.7	„Valov-Spannungsdiagramm“ zur Beurteilung der Spannungsänderungen am Netzanschlusspunkt infolge der Wirkleistungseinspeisung und der Regelung der Erzeugungsanlage.	561
6.8	Spannungshaltung und Spannungsstützung am Netzanschlusspunkt	569
6.8.1	Begriffe „Spannungshaltung“ und „Spannungsstützung“	570
6.8.2	Spannungshaltung durch Regelung der Erzeugungsanlage mit konstanter Wirkleistung.	575
6.8.3	Spannungsstützung durch Regelung der Erzeugungsanlage mit konstanter Scheinleistung	578
6.8.4	Spannungshaltung und Spannungsstützung durch kombinierte Regelung der Erzeugungsanlage	582
6.8.5	Vermögen der Erzeugungsanlagen zur Spannungshaltung und Spannungsstützung	584
6.9	Gemeinsame Auswirkungen dezentraler Erzeugungsanlagen auf die Spannungen im Verbundnetz	592
6.10	Auswirkung der Spannungsregelung am Netzanschlusspunkt der Erzeugungsanlage auf die Spannungen an anderen Netzpunkten	599
6.11	Maximale Leistung der anzuschließenden Erzeugungsanlage am geplanten Netzanschlusspunkt.	603
6.12	Mindestanforderungen an elektrische Charakteristiken des Netzanschlusspunktes für den Anschluss der Erzeugungsanlage geplanter Leistung	608
6.13	Generische Netze mit Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien	614
6.13.1	Anforderungen an generische Netze	614
6.13.2	Höchst- und Hochspannungsnetz	618
6.13.3	Mittelspannungsnetz	626
6.13.4	Niederspannungsnetz.	636
	Literatur.	646
7	Glossar	651
	Literatur.	666
8	Zwölfsprachiges Wörterbuch der Stichwörter und Fachbegriffe	669
8.1	Englisch (GB) – Deutsch (DE) – Japanisch (JP)	670
8.2	Französisch (FR) – Griechisch (GR) – Nepali (NP)	674
8.3	Spanisch (ES) – Arabisch (Marokko MA) – Türkisch (TR)	678
8.4	Portugiesisch (Brasilien BR) – Russisch (RU) – Chinesisch (CN)	682
9	Anhang	689
9.1	Windenergieanlagen.	689
9.2	Photovoltaikanlagen.	690
9.3	Freileitungen	692
9.4	Erdkabel.	697

9.5	Seekabel	702
9.6	Verteilungstransformatoren	704
9.7	Regelbare Ortsnetztransformatoren	707
9.8	Aktive Spannungsregler	708
9.9	Zwei- und Dreiwicklungsleistungstransformatoren	711
9.10	Sparleistungstransformatoren	715
9.11	Rotierende Phasenschieber	717
9.12	„Valov-Spannungsdiagramm“	717
9.13	Windgeschwindigkeiten in unterschiedlicher Höhe	720
	Literatur	720
	Stichwortverzeichnis	723