

# Gliederung

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>GLIEDERUNG</b> .....	<b>V</b>
<b>SYMBOLE</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 EINFÜHRUNG ZU PHOTOVOLTAIK-SYSTEMEN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANWENDUNGSBEREICHE UND KONFIGURATIONEN .....	2
1.2 ENERGIEFLUSSPFADE UND WIRKUNGSZUSAMMENHÄNGE .....	4
1.3 VERLUSTMECHANISMEN .....	7
1.3.1 Standort und Aufstellung des PV-Generators .....	7
1.3.2 Mismatch-Verluste im PV-Generator .....	7
1.3.3 Wirkungsgrad des PV-Generators .....	8
1.3.4 Spannungsfehlanpassung des PV-Generators.....	8
1.3.5 Spannungsabfälle an Leitungen, Sicherungen und Halbleitern .....	9
1.3.6 Direkte und indirekte Verluste bei Einsatz eines Energiespeichers .....	9
1.3.7 Verluste in Zusammenhang mit fossil betriebenem Zusatzgenerator .....	10
1.3.8 Direkte und indirekte Verluste eines Wechselrichters.....	11
1.3.9 Eigenverbrauch von Systemkomponenten .....	12
1.3.10 Verluste bei den Energieverbrauchern .....	12
1.3.11 Fehleranfälligkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten.....	12
1.4 ABSICHT, METHODE UND AUFBAU DER VORLIEGENDEN ARBEIT .....	14
<b>2 PV-GENERATOREN: BETRIEBSVERHALTEN UND OPTIMIERUNG</b> .....	<b>17</b>
2.1 EIGENSCHAFTEN VON PV-ZELLEN UND PV-MODULEN .....	17
2.1.1 Charakterisierende Kenngrößen bei verschiedenen Zellenmaterialien .....	18
2.1.2 Verschaltung einzelner PV-Zellen zu Modulen und Generatoren .....	20
2.2 EINSTRAHLUNGSVERHÄLTNISSE AN VERSCHIEDENEN STANDORTEN .....	21
2.2.1 Messungen in Freiburg für verschiedene Neigungswinkel .....	21
2.2.2 Auswertung der Testreferenzjahre für Deutschland .....	26
2.2.3 Vergleich der Monitoring-Daten verschiedener europäischer Standorte .....	29
2.2.4 Einfluß unterschiedlicher Mittelungszeiträume bei der Datenerfassung.....	30
2.3 BETRIEBSTEMPERATUREN AN VERSCHIEDENEN STANDORTEN .....	33
2.3.1 Energetische Häufigkeitsverteilungen der PV-Generator-Temperatur .....	34
2.3.2 Korrelation der Temperatur mit Einstrahlung und Batteriespannung .....	35
2.4 ENERGIEERTRAG: EINFLUSS VON NEIGUNGSWINKEL UND ORIENTIERUNG .....	37

2.4.1	Jahresverlauf des Energieertrages: Abhängigkeit vom Neigungswinkel .....	37
2.4.2	Energieertrag als Funktion des Neigungswinkel.....	40
2.4.3	Optimaler Neigungswinkel .....	41
2.5:	<b>EINFLUSS DER SPANNUNGSANPASSUNG AUF DEN ENERGIEERTRAG .....</b>	<b>42</b>
2.5.1	MPP-Spannung: Tagesgang, Jahresverlauf, und energetische Verteilung .....	42
2.5.2	Konstantspannungsanpassung im Vergleich zu MPP-Tracking .....	45
2.5.2.1	Ermittlung des spannungsbedingten Anpassungswirkungsgrades .....	45
2.5.2.2	Energieertrag, Anpassungswirkungsgrad und optimale Konstantspannung .....	46
2.5.3	Batterie-Spannungsanpassung im Vergleich zu MPP-Tracking .....	48
2.5.3.1	Batterie-Spannungsverteilungen unter verschiedenen Bedingungen .....	48
2.5.3.2	Berechnung des Wirkungsgrades der Batterie-Spannungsanpassung .....	51
2.5.3.3	Optimales Verhältnis der Nennspannungen von Batterie und PV-Generator .....	52
2.5.4	MPP-Tracking: Erzielbarer Gewinn und nötiger Spannungs-Stellbereich .....	53
2.6	<b>ERGEBNISBEWERTUNG UND ANWENDUNGSBEZOGENE OPTIMIERUNG .....</b>	<b>54</b>
<b>3</b>	<b>BETRIEB VON SPEICHERBATTERIEN .....</b>	<b>56</b>
3.1	KONVENTIONELLE VERFAHREN DER BATTERIE-BETRIEBSFÜHRUNG .....	56
3.2	ZELLEN AUSGLEICH: SCHALTUNGSTECHNISCH STATT DURCH ÜBERLADUNG .....	56
3.3	SPANNUNGSBEGRENZUNG STROMABHÄNGIG KOMPENSIEREN.....	58
3.4	SPANNUNGSBEGRENZUNG TEMPERATURABHÄNGIG KOMPENSIEREN .....	58
3.5	ELEKTROLYTUMWÄLZUNG: MECHANISCH STATT DURCH GASUNG .....	59
3.6	SCHÄTZWERT DER ENTNOMMENEN ENERGIEMENGE ANZEIGEN .....	59
3.7	ZUSAMMENFASSUNG .....	60
<b>4</b>	<b>WECHSELRICHTER: BETRIEBSVERHALTEN UND OPTIMIERUNG .....</b>	<b>61</b>
4.1	FÜR PHOTOVOLTAIK: EINSATZBEDINGUNGEN UND ANFORDERUNGEN .....	61
4.1.1	Unterschiede: PV-Kontext und konventionelle Anwendungen .....	61
4.1.2	Wechselrichter zur Netzeinspeisung .....	61
4.1.2.1	Eingangsspannungsregelung .....	62
4.1.2.2	Vergleich von dreiphasiger und einphasiger Einspeisung .....	62
4.1.2.3	Verhalten bei geringen Leistungen sowie beim Ein- und Ausschalten .....	62
4.1.2.4	Verhalten bei Leistungs-Überangebot .....	62
4.1.2.5	Qualität und Verzerrungsfreiheit der abgegebenen Leistung .....	63
4.1.2.6	EMV- und Störfestigkeit sowie Fehlerverhalten.....	63
4.1.2.7	Schutz vor Gleichstromspeisung.....	63
4.1.3	Wechselrichter für den Inselbetrieb.....	64
4.1.3.1	Vergleich von Inselbetrieb und Netzeinspeisung.....	64
4.1.3.2	Impulsbelastbarkeit und Überlastfähigkeit .....	64
4.1.3.3	Stabilität der Spannungsformenform und Stromdynamik .....	64
4.1.3.4	Lasterkennung und Standby-Modus.....	64

4.1.3.5	Eigenschaften des Gleichspannungseinganges .....	65
4.1.3.6	Rückspeisefähigkeit und Betrieb als Batterie-Ladegleichrichter .....	65
4.1.3.7	Wechselrichter für Einzelverbraucher wie zum Beispiel Pumpenmotoren .....	65
4.2	WECHSELRICHTERKONZEPTE.....	65
4.3	VERLUSTE, WIRKUNGSGRADKURVE UND VERLUSTMODELL.....	67
4.3.1	Ermittlung und Interpretation von Wirkungsgradkurven.....	67
4.3.2	Definition eines geeigneten Modells und seiner Parameter .....	69
4.3.3	Betriebsarten Inselbetrieb und Netzeinspeisung: Prinzipieller Vergleich .....	71
4.3.3.1	Wechselrichter im Inselbetrieb .....	71
4.3.3.2	Wechselrichter zur Netzeinspeisung.....	72
4.3.4	Ermittlung der Modellparameter aus verfügbaren Daten.....	74
4.3.5	Diskussion der ermittelten Parameterwerte.....	75
4.4	ENERGIEVERLUSTE: EINFLUß DER VERLUSTPARAMETER.....	77
4.4.1	Energetischer Jahresnutzungsgrad: Abschätzung aus Verlustparametern.....	78
4.4.2	Energetischer Nutzungsgrad bei variierten Verlustparametern .....	79
4.4.3	Energetischer Nutzungsgrad: Einfluß des Standortes (der Einstrahlung).....	80
4.4.4	Energetischer Nutzungsgrad: Einfluß der Lastleistungscharakteristik.....	81
4.5	WECHSELRICHTER UND PV-GENERATOR: NENNLEISTUNGS AUSLEGUNG.....	82
4.5.1	Energetischer Nutzungsgrad je nach Nennleistungsverhältnis WR/PV .....	82
4.5.1.1	Einfluß des Jahresganges: Vergleich einzelner Monate .....	85
4.5.1.2	Einfluß des Standortes .....	86
4.5.1.2.1	Analyse der Testreferenzjahre für Deutschland .....	86
4.5.1.2.2	Analyse von Meßdaten europäischer PV-Anlagen .....	86
4.5.1.3	Einfluß verschiedener Mittelungszeiträume bei der Datenerfassung .....	87
4.5.1.4	Einfluß des Neigungswinkels des PV-Generators .....	88
4.5.1.5	Einfluß der Verlustparameter des Wechselrichters .....	88
4.5.1.5.1	Einfluß des Eigenverbrauchs im Betrieb .....	89
4.5.1.5.2	Einfluß des Eigenverbrauchs im Standby .....	89
4.5.1.5.3	Einfluß der linear leistungsabhängigen Verluste .....	89
4.5.1.5.4	Einfluß der quadratisch leistungsabhängigen Verluste.....	89
4.5.1.5.5	Einfluß der Eingangsleistungs-Begrenzung des Wechselrichters.....	90
4.5.1.5.6	Zusammenfassung der Parametereinflüsse .....	90
4.5.2	Energiekosten als Funktion des Nennleistungsverhältnisses WR/PV .....	92
4.6	ZUSAMMENFASSENDE AUSLEGUNGSEMPFEHLUNGEN.....	95
5	ZUSAMMENFASSUNG .....	96
	ANHANG.....	99
	LITERATUR.....	118