

Dipl.-Ing. Rudolf Pötter, Essen

**Untersuchung
netzunabhängiger
Photovoltaikanlagen mit
Speichersystemen**

Reihe **6**: Energietechnik

Nr. **376**

Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	3
2 Ganglinien der Last und der Strahlung	5
2.1 Lastganglinien.....	5
2.1.1 Aufbau des Meßwerterfassungssystems.....	5
2.1.2 Messung der Lastganglinie eines Privathaushaltes.....	5
2.1.3 Lastganglinien eines Bürogebäudes.....	8
2.1.4 Vergleich der Lastganglinien eines Privathaushaltes und eines Bürogebäudes.....	9
2.2 Ganglinie der Strahlung.....	11
2.2.1 Solarkonstante.....	11
2.2.2 Sonnenstand.....	11
2.2.3 Modelle zur Berechnung der terrestrischen Bestrahlungsstärke auf geneigte Flächen.....	14
2.2.4 Berechnung der diffusen und direkten Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche.....	14
2.2.5 Berechnung der diffusen und direkten Bestrahlungsstärke auf die geneigte Fläche.....	15
2.2.6 Berechnung der diffusen und direkten Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche mit einer zeitabhängigen Albedo.....	16
2.2.7 Vergleich der beiden Berechnungsverfahren mit Messungen.....	17
2.2.8 Regression der Ganglinie der Bestrahlungsstärke.....	19
2.2.9 Vereinfachte Berechnung der Jahressumme der Bestrahlung.....	22
2.3 Exergie der Solarstrahlung.....	25
2.3.1 Einleitung.....	25
2.3.2 Spektrale Entropiedichte.....	26
2.3.3 Berechnung der Entropie für verdünnte Schwarzkörperstrahlung.....	26
2.3.4 Vereinfachte Formel zur Berechnung der Strahlungsentropie.....	27
2.3.5 Spektren der Solarstrahlung.....	28
2.3.6 Entropie der Strahlung.....	29

2.3.7	Energie und Entropie der atmosphärischen Eigenstrahlung.....	30
2.3.8	Exergie der Solarstrahlung.....	32
2.3.9	Jahressumme der Exergie.....	33
3	Solargenerator	35
3.1	Strom-Spannungs-Kennlinie.....	35
3.2	Modell zur Beschreibung des thermischen Verhaltens.....	35
3.3	Berechnung der MPP-Leistung eines Solargenerators.....	37
3.4	Weitere Daten zu Solargeneratoren.....	39
4	Elektronische Stromrichter	40
5	Energiespeicher für Elektrizität	42
5.1	Mögliche Energiespeicher.....	42
5.2	Wasserstoffspeicher-System.....	43
5.2.1	Aufbau des Wasserstoff-Speichersystems.....	43
5.2.2	Thermodynamik des Wasserelektrolyseurs und der H ₂ /O ₂ -Brennstoffzelle.....	44
5.2.3	Aufbau und Wirkungsweise eines Niedertemperatur-Elektrolyseurs.....	45
5.2.4	Kompression der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff.....	49
5.2.5	Aufbau und Wirkungsweise einer Brennstoffzelle mit alkalischem Elektrolyten.....	50
5.2.6	Alterung und Kosten der Anlagenkomponenten des Wasserstoff-Systems.....	53
5.3	Blei-Akkumulator.....	55
5.3.1	Thermodynamik des Blei-Akkumulators.....	55
5.3.2	Modelle zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens von Blei- Akkumulatoren.....	57
5.3.3	Alterung und Kosten des Blei-Akkumulators.....	61
6	Simulation von PV-Anlagen	63
6.1	Berechnungsmethoden.....	63
6.1.1	Grundlagen.....	63
6.1.2	Schematischer Ablauf und Größen der dynamischen Optimierung.....	65
6.1.3	Bestimmung der zulässigen Ladegradfelder und der optimalen Entscheidungsvektoren.....	66

6.1.4	Simulationsrechnung unter Vorgabe der optimalen Entscheidungsvektoren.....	68
6.1.5	Verbesserung durch Einführung eines Mindestladegrades des Akkumulators.....	70
6.1.6	Daten für die Wirtschaftlichkeitsrechnung von PV-Anlagen.....	71
6.2	Untersuchung einer netzgekoppelten PV-Anlage.....	72
6.3	PV-Anlage mit einem Energiespeicher.....	75
6.3.1	Energetische Untersuchung nach der analytischen Methode.....	75
6.3.2	Abhängigkeit des Speicheranteils von dem Solarvielfachen bei sinusförmigen Last- und Leistungsganglinien.....	78
6.3.3	Energetische Untersuchung auf der Basis gemessener Ganglinien (numerische Methode).....	79
6.3.4	Wirtschaftliche Auslegung einer PV-Anlage mit Akkumulator.....	82
6.3.5	Vereinfachte Auslegung einer PV-Anlage mit einem Blei-Akkumulator als Energiespeicher auf der Basis von Monatssummen.....	84
6.4	PV-Anlage mit zwei Energiespeichern.....	87
6.4.1	Lösung bei Beschreibung der Ganglinien durch analytische Funktionen.....	87
6.4.2	Berechnung einer PV-Anlage mit zwei Energiespeichern.....	90
6.4.3	Bestimmung der Betriebsfahrweise auf der Basis der dynamischen Optimierung für eine ausgewählte Anlagenkonfiguration zur Elektrizitätsversorgung des Bürogebäudes (gemessene Ganglinien).....	92
6.4.4	Einfluß der Anlagenkonfiguration und des Standortes auf das Solarvielfache zur Elektrizitätsversorgung des Bürogebäudes.....	99
6.4.5	Vergleich der Energieflüsse einer PV-Anlage zur Versorgung eines Privathaushaltes mit denen zur Versorgung eines Bürogebäudes.....	105
6.4.6	Einfluß der Anlagenkonfiguration und des Standortes auf das Solarvielfache zur Elektrizitätsversorgung des Privathaushaltes.....	107
6.4.7	Wirtschaftliche Auslegung einer PV-Anlage mit Akkumulator und H ₂ - System.....	109
7	Zusammenfassung	113
	Literatur	117