

Photovoltaik – Grundlagen, Montage und Einspeisung

**Kurs für Elektroinstallateure,
Kader der Elektrobranche,
Lehrer an Fachschulen**

Konzept, Gestaltung und Redaktion:

Alpha Real AG

Energy System und Engineering

Feldeggstrasse 89, 8008 Zürich

- H. Prinz, dipl. El. Ing. ETH
- M.G. Real, dipl. El. Ing. ETH
- S. Kessler, dipl. Masch. Ing. ETH

Trägerschaft:

VSEI Verband Schweizerischer Elektro-
Installationsfirmen

SBHI Schweizerische Beratende Haustechnik-
und Energie-Ingenieure

SOFAS Sonnenenergie-Fachverband Schweiz

SSIV Schweizerischer Spenglermeister- und
Installateur-Verband

Copyright Bundesamt für Konjunkturfragen
3003 Bern, Juni 1991

Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe
erlaubt. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen-
und Materialzentrale, Bern (Best.Nr. 724.242 d)

Autorenverzeichnis

Kapitel 1

M. Real Alpha Real AG, Zürich

Kapitel 2-4

H. Prinz Alpha Real AG, Zürich

Kapitel 5-6

G. Hefti IBG Hefti, Allschwil

Kapitel 7

M. Real Alpha Real AG, Zürich

Kapitel 8

H. Kunz Elektrizitätswerk des Kanton Zürich
(EKZ), Zürich

Kapitel 9

H. Prinz Alpha Real AG, Zürich

Kapitel 10

M. Real Alpha Real AG, Zürich

Kapitel 11

R. Brun, Alternative Technik, Tamins

M. Real Alpha Real AG, Zürich

Anhang I-IV

H. Prinz Alpha Real AG, Zürich

M. Real Alpha Real AG, Zürich

Anhang V

H. Bersinger Aargauisches Elektrizitätswerk
(AEW), Aarau

An dieser Stelle sei allen weiteren Fachleuten, die wertvolle Beiträge in Form von Stellungnahmen zum Vernehmlassungsentwurf geleistet haben, bestens gedankt.

Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf sechs Jahre befristet (1990–1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- IP BAU – Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL – Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER – Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringen Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von PACER steht die Förderrung verstärkter Nutzung erneuerbarer Energien. Bis heute ist der Beitrag der erneuerbaren Energien mit Ausnahme der Wasserkraft trotz des beträchtlichen Potentials sehr gering geblieben. Das Programm PACER soll deshalb

- die Anwendungen mit dem besten Kosten-/Nutzenverhältnis fördern,
- den Ingenieuren, Architekten und Installateuren die nötigen Kenntnisse vermitteln,
- eine andere ökonomische Betrachtungsweise einführen, welche die externen Kosten (Umweltbelastung usw.) mit einbezieht sowie
- Behörden und Bauherren informieren und ausbilden.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos, etc.

Umgesetzt werden sollen die Ziele von PACER durch Aus- und Weiterbildung sowie Information. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Zielpublikum sind vor allem Ingenieure, Architekten, Installateure sowie Angehörige bestimmter spezialisierter Berufszweige aus dem Bereich der erneuerbaren Energien.

Die Verbreitung allgemeiner Information ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil des Programmes. Sie soll Anreize geben bei Bauherren, Architekten, Ingenieuren und Behördenmitgliedern.

InteressentInnen können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie

erscheint zwei- bis dreimal jährlich und ist (im Abonnement, auch in französisch und italienisch) beim Bundesamt für Konjunkturfragen 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem/r Kurs- oder VeranstaltungsteilnehmerIn wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Diese Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen direkt bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

Zuständigkeiten

Um das ambitionöse Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch SpezialistInnen auch die Beachtung der Schnittstellen sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus VertreterInnen der ininteressierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programmes fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten zur Förderung der erneuerbaren Energien sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Jean-Bernard Gay, Dr. Charles Filleux, Jean Graf, Dr. Arthur Wellinger, Irene Wuillemin, BfK) begleitet durch Eric Mosimann, BfK, verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Arbeitsgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben zu lösen haben.

Dokumentation

Der zweitägige Kurs ist in einen Theorie- und in einen Praktikumstag aufgeteilt. Die vorliegende Publikation bildet die Kursunterlage. Die Gliederung der Publikation ist mit derjenigen des Theoretages identisch. Die während des Kurses verwendeten Folien findet der Kursteilnehmer im Handbuch wieder. Unter der Abbildung jeder Folie folgen die dazugehörigen Erläuterungen.

Am zweiten Tag werden die theoretischen Erkenntnisse an einem Praxisbeispiel in die Tat umgesetzt. Mit verschiedenen Solarzellenmodulen werden Felder aufgebaut, welche ausgemessen, getestet und an einen Wechselrichter angeschlossen wer-

den. Am Ende des Praktikumtages wird die Einspeisung ins lokale Netz geübt.

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungstest in einer Pilotveranstaltung ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatten die AutorInnen freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Bei der Anwendung der Publikation sich zeigende Unzulänglichkeiten können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anre-

gungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen oder der/die verantwortliche RedaktorIn/KursleiterIn (vgl. S. 2) entgegen.

Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

August 1991

Dr. H. Kneubühler
Stv. Direktor des Bundesamtes für Konjunkturfragen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einleitung 11
1.1	Solarstrom: unermessliche Möglichkeiten 12
1.2	Aufbau des Kurses 12
1.3	Besonderheiten der Solarzellenanlagen 13
1.4	Potential in der Schweiz 13
1.5	Ästhetik von Solarzellenanlagen 13
1.6	Baueingabe 14
1.7	Solarzellenmodule 14
1.8	Netzverbundanlagen 15
1.9	Bezug und Abgabe 16
1.10	Netzverbundanlagen: 2 Beispiele 17
<hr/>	
2	Meteorologische Grundlagen 19
2.1	Globalstrahlung = direkte und diffuse Strahlung 20
2.2	Zeitliche Verteilung der Solareinstrahlung 21
2.3	Neigungswinkel 21
2.4	Ausrichtungs- und Neigungswinkel 23
2.5	Beschattung von Solarzellenanlagen 24
2.6	Reihenabstand auf Flachdächern 25
<hr/>	
3	Gefahren des Gleichstroms 27
3.1	Gleichstrom: Gefahr von Lichtbogenbildung 28
3.2	Gleichstrom-Brandrisiko 29
3.3	Elektrochemische Korrosion 30
<hr/>	
4	Solarzellentechnologie 31
4.1	Funktionsweise von Solarzellen 32
4.2	Aufbau von Solarmodulen 33
4.3	Elektrische Eigenschaften von Modulen 34
4.4	Wirkungsgrad und Zelltemperatur 35
4.5	Solarmodul: Generator ohne Kurzschlussleistung 36
4.6	Anschlussbox und Antiparalleldiode 36
<hr/>	
5	Solarzellenfeld 39
5.1	Solarzellenfeld: Serie- und Parallelschaltung 40
5.2	Serieschaltung mehrerer Solarmodule 41
5.3	Parallelschaltung mehrerer Stränge 41
5.4	Folgen bei Über- bzw. Unterdimensionierung 42
5.5	Kleiner Schatten-grosser Verlust 42
5.6	Teilbeschattung: Gefahr für die Solarzelle 43
5.7	Klemmenkasten: Verbindung von Solarzellenfeld und Wechselrichter 43
5.8	Beispiel eines Klemmenkastens 44
5.9	Klemmen 44

5.10	Sicherungen/Dioden	44
5.11	Überspannungsableiter	44
5.12	Gleichstrom-Leitungstrenner	45
5.13	Montage des Klemmenkastens	45
5.14	Blitzschutzanlage	45
5.15	Äusserer Blitzschutz	45
5.16	Innerer Blitzschutz	45
5.17	Erdungskonzept – Blitzschutz – Systemerde	46
5.18	Gebäude ohne Blitzschutz	46
5.19	Gebäude mit Blitzschutz	46
<hr/>		
6	Mechanischer Aufbau des Solarzellenfeldes	47
6.1	Handhabung der Solarmodule	48
6.2	Technische Aspekte bei der Auswahl einer Unterkonstruktion	48
6.3	Die verschiedenen Dachtypen	48
6.4	Schrägdach	48
6.5	Beispiel einer Tragstruktur für Schrägdächer	49
6.6	Zwei Schrägdachanlagen	49
6.7	Flachdachanlagen	50
6.8	Beispiel Montagevorgang Flachdach	51
6.9	Fassadenanlagen	51
6.10	Verkabelung	51
<hr/>		
7	Solarwechselrichter	53
7.1	Wechselrichter	54
7.2	Solarwechselrichter: netzgeführt	55
7.3	Solarwechselrichter: pulsweitenmoduliert	55
7.4	Solarwechselrichter mit Hochfrequenztransformator	56
<hr/>		
8	Vorschriften	59
8.1	Einleitung	60
8.2	Erlangen einer Bewilligung für den Parallel-Betrieb von Energieerzeugungsanlagen (EEA)	60
8.3	Zu beachtende Vorschriften für die elektrische Installation von PV-Anlagen	63
8.4	Messvorrichtung und Abnahmekontrolle	64

9	Arbeiten auf Dächern	67
----------	-----------------------------	-----------

10	Unterhalt	69
10.1	Unterhalt und Kontrollen	70

11	Inselanlagen	73
11.1	Elemente einer Inselanlage	74
11.2	Inselanlagen: Relais-Sender	75
11.3	Inselanlagen: Alpstromversorgungen	75
11.4	Inselanlagen: Schwimmbadpumpe	76
11.5	Laderegulation/Akku-Überwachung/Verteilung	76
11.6	Der Akkumulator als Energiespeicher	77
11.7	Ladung und Entladung des Bleiakкумуляtors	77
11.8	Aufbau des Bleiakкумуляtors	78
11.9	Akkumulator: Kapazität	79
11.10	Akkumulator: Selbstentladung	79
11.11	Akkumulator: Ladeendspannung	80
11.12	Vier «Todsünden» im Umgang mit Blei-Akkus	80
11.13	Wechselrichter	80
11.14	Niederspannungssystem	81

12	Anhang I: Leitfaden zum Praktikum	83
12.1	Einleitung	84
12.2	Praktikumsaufbau Solarzellenanlage	85
12.3	Messungen am Solarmodul	86
12.4	Aufbau des Solarzellenfeldes	86
12.5	Anschluss des Klemmenkastens	87
12.6	Anschluss des Solarwechselrichters	87
12.7	Anschluss an das Schaltungstableau	87
12.8	Inbetriebnahme	88
12.9	Kontrollanzeige	88
12.10	Versuch	88
12.11	Messprotokolle	89

13	Anhang II: Begriffe	91
13.1	Allgemeine Begriffe und Kurzerläuterungen	92
13.2	Begriffe Akkumulatoren	93

14	Anhang III: Berechnungsbeispiel	95
14.1	Flächenbedarf	96
14.2	Jährlicher Energieertrag	96
14.3	Kosten und Energiepreis (Stand Frühjahr 1991)	97

15	Anhang IV: Anschlussgesuch VSE	99
<hr/>		
16	Anhang V: Neue Vorschriften SEV/ESTI	103
	Photovoltaische Energieerzeugungsanlagen, ESTI	104
	Vorlage- und Kontrollpflicht	104
	Installationsberechtigung	105
	Installation der Anlage	105
	Blitzschutz, Erdung	107
	Anlagen im Parallelbetrieb	107
	Inbetriebnahme	108
	Messung der Energie	108
	Gesetze, Verordnungen und Vorschriften	108

1 Einleitung

1.1	Solarstrom: unermessliche Möglichkeiten	12
1.2	Aufbau des Kurses	12
1.3	Besonderheiten der Solarzellenanlagen	13
1.4	Potential in der Schweiz	13
1.5	Ästhetik von Solarzellenanlagen	13
1.6	Baueingabe	14
1.7	Solarzellenmodule	14
1.8	Netzverbundanlagen	15
1.9	Bezug und Abgabe	16
1.10	Netzverbundanlagen: 2 Beispiele	17

1 Einleitung

1.1 Solarstrom: unermessliche Möglichkeiten

Die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Elektrizität mit Solarzellen ist eine der aussichtsreichsten Optionen, langfristig von umweltbelastenden Energieträgern wegzukommen. Solarzellenanlagen sind einfach in der Montage, ohne bewegliche Teile, sofort funktionsfähig, praktisch wartungsfrei und damit von äusserst langer Lebensdauer.

Die Faszination der Photovoltaik liegt darin, dass mit dieser Technologie erstmals Strom im grossen Massstab ohne rotierende Maschinen erzeugt werden kann. Damit unterscheidet sich die elektrische Energieerzeugung mit Solarzellen in ganz entscheidender Weise von den Energieerzeugungsanlagen herkömmlicher Kraftwerke, wo grosse rotierende Turbinen eingesetzt werden.

Ebenso neu in der Geschichte der Elektrizitätsgewinnung ist die Tatsache, dass die Stromgestehungskosten aus Solarzellenanlagen praktisch nicht von der Anlageleistung abhängen. Bei konventionellen Kraftwerken ergibt sich ein Zwang zu grossen Leistungen, weil damit die Wirtschaftlichkeit erheblich gesteigert werden kann. Die Modularität der Photovoltaik durchbricht mit ihrer neuen Technologie diese Gesetzmässigkeit.

Im Klartext heisst das, dass die Stromgestehungskosten einer Solarzellenanlage auf einem Hausdach mit 3 kW Leistung nicht grösser sind als in einer Grossanlage von zum Beispiel 500 kW Leistung. Aufgrund des heutigen Wissensstandes kann man im Gegenteil davon ausgehen, dass Solarzellenanlagen im Gebäudebereich günstigeren Strom erzeugen werden als solche, welche mit grösseren Leistungen abseits bereits bestehender Infrastrukturen und elektrischer Anschlüsse realisiert werden.

Damit zeigt sich nun plötzlich eine faszinierende Möglichkeit, im Gebäudebereich auch mit Anlagen kleiner Leistung kostengünstigen Solarstrom zu produzieren. Kostengünstig bezieht sich dabei auf den obigen Vergleich zwischen Anlagen kleiner und grosser Leistung. Im Vergleich zu andern Stromerzeugungsarten besteht allerdings noch ein grosser Unterschied.

Weil das Potential und die Möglichkeiten der Solarstromerzeugung in Solarzellenanlagen erkannt

sind, wird die weitere Entwicklung und Förderung der Technik zum Teil von der öffentlichen Hand unterstützt. Wenn auch diese Unterstützung in keiner Weise vergleichbar ist mit der Unterstützung, welche die öffentliche Hand für andere Energietechnologien gewährt hat, hat sie doch dazugeführt, dass nun ausgereifte Standardsysteme entwickelt wurden. Die Entwicklungsarbeit, welche in den letzten Jahren von einigen Pionierfirmen auf diesem Gebiet geleistet wurde, hat dazu geführt, dass nun einfache einphasige Solarzellenanlagen bis zu einer Leistung von rund 3 kW durch das Installationsgewerbe ohne die Mithilfe eines planenden Ingenieurs ausgeführt werden können. Damit sind direkt die Fachkräfte im Baubereich, insbesondere natürlich die Elektroinstallateure angesprochen. Es ist das Ziel des Kurses, dieser neuen faszinierenden Tatsache Rechnung zu tragen und die Elektroinstallateure soweit auszubilden, dass sie in der Lage sind, normgerecht und einwandfrei funktionsfähige Anlagen zu installieren, in Betrieb zu setzen und allenfalls zu warten.

1.2 Aufbau des Kurses

Der Kurs richtet sich vor allem an jene Elektroinstallateure, welche netzverbundene Solarzellenanlagen realisieren möchten. Deshalb nimmt dieser Teil im Kurs den grössten Raum ein. In bescheidenem Umfang wird der Kursteilnehmer in die Möglichkeiten und Probleme von Inselanlagen eingeführt.

Solarzellenanlagen sind elektrische Energieerzeuger. In jedem Falle, aber insbesondere bei der Rückspeisung dieser Energie ins öffentliche Netz sind eine Reihe von Normen und Vorschriften zu beachten. Diese werden in einfacher und verständlicher Weise dem Kursteilnehmer vermittelt.

Gebäudeintegrierte Solarzellenanlagen werden im Normalfall auf Dächern oder seltener auch in der Fassade eingebaut. Damit bewegt sich der Elektromonteur von seinem gewohnten sicheren Arbeitsplatz weg in eine Umgebung, die erhöhte Sicherheitsmassnahmen erfordert. Deshalb werden die wichtigsten Verordnungen der SUVA über das Arbeiten auf Dächern dargestellt.

Das notwendige Wissen wird von ausgewiesenen Experten vermittelt. Die mündliche Darstellung

wird mittels Projektionsfolien illustriert. Der Aufbau der Kursunterlagen ist so gestaltet, dass entsprechend der Abfolge des Kurses diese Folien auch in den Kursunterlagen wiedergegeben sind. Der Text dazu bezieht sich immer auf die jeweilige Folie.

1.3 Besonderheiten der Solarzellenanlagen

Solarzellen erzeugen Gleichstrom. Solarzellenanlagen unterscheiden sich deshalb in einigen Punkten ganz wesentlich von den bisher in der Haustechnik verwendeten Wechselstrom-Techniken. Dazu gehören unter anderem die erhöhte Neigung

1. zur Bildung von Lichtbogen. Damit ist eine nicht zu unterschätzende Gefahr für Brandursachen gegeben.
2. zur Bildung von Korrosionsschäden, da durch Leckströme galvanische Elemente an Kontaktübergangsstellen aktiviert werden.
3. zu irreparablen Schäden bei Elektrounfällen. Gleichstromunfälle zeichnen sich neben Verbrennungen durch elektrolytische Zersetzungen am menschlichen Gewebe aus.

Im Gegensatz zu dem in der Haustechnik eingesetzten Wechselstrom generieren Solarzellen im Kurzschlussfall keine genügende Kurzschlussleistung, welche handelsübliche Sicherungselemente ansprechen lassen. Solarzellenanlagen brauchen andere, neue Schutzeinrichtungen. Solarzellenanlagen erzeugen Strom, wenn die Sonne scheint. Der Stromfluss in einem Solarzellenfeld lässt sich nicht ohne weiteres unterbrechen. Es gibt keinen «Hauptschalter» zur Sonne. Wenn diese scheint, ist das elektrische Potential vorhanden.

Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Elektroinstallateure, welche sich mit dieser Technologie auseinandersetzen möchten, einen erhöhten Informationsbedarf haben. Hier Hemmschwellen gegenüber der unbekanntem Technik abzubauen, ist das Anliegen dieses Kurses. Die Kursunterlagen sind so aufgebaut, dass die ausführliche Darstellung zu jeder Projektionsfolie auch als Nachschlagewerk verwendet werden

kann. Sie soll als Stütze dafür dienen, dass möglichst keine Fehler bei der Installation von Anlagen entstehen, und dass damit die Solarzellentechnik von Beginn an einen Ruf erhält, eine einfache und problemlose Technik zu sein.

1.4 Potential in der Schweiz

Das Bundesamt für Energiewirtschaft hat zwei Studien veröffentlicht, welche zeigen, dass mit Solarzellenanlagen rund 10% des Stromkonsums der Schweiz abgedeckt werden können. Das grösste Potential liegt auf ungenutzten Gebäudeflächen, auf Parkplätzen oder entlang von Eisenbahnlinien und Autobahnen brach. Mit zunehmendem Markt steigt das industrielle Volumen für die Herstellung der Solarzellen und Wechselrichter derart an, dass nochmals drastische Preisreduktionen zu erwarten sind. Allerdings kommen diese Entwicklungen nicht von alleine. Man muss sie machen. Es braucht Pioniere, welche die Technologie entwickeln und marktreif machen. Diese Phase ist schon beinahe abgeschlossen. Es braucht aber auch weitere Pioniere, die das Potential und die Möglichkeiten der Photovoltaik erkennen und bereit sind, mit dem Bau von Solarzellenanlagen den ersten Schritt zu tun. Wir können mit der Realisierung des Potentials nicht früh genug beginnen. Die Studienresultate zeigen, dass etwa dreissig bis vierzig Jahre benötigt werden, um die hunderttausende von kleineren und grösseren Solarzellenanlagen in der Schweiz zu realisieren, welche zusammen die oben zitierten 10% Eigenstromanteil ergeben werden.

1.5 Ästhetik von Solarzellenanlagen

Ein Haus besteht aus sehr vielen Komponenten. An jedes einzelne Bauteil hat sich unser Auge gewöhnt. So verfügt zum Beispiel jedes Haus über eine Dachrinne und ein Regenwasserrohr. Dieses durchquert zum Teil die schönsten Fassaden. Niemand stört sich offenbar an diesem Rohr, das an sich ein Fremdkörper in der Fassade darstellt. Im Gegenteil: Die Baubewilligungsbehörde würde ein Bauwerk nicht abnehmen, wenn ein solches Regenwasserrohr am Hause fehlen würde.

Die Gewöhnung des Auges und die Erkenntnis der Nützlichkeit von Solarzellenanlagen wird auch hier helfen, die Akzeptanz für solche Systeme zu erhöhen. Es ist wahrscheinlich, dass es einmal zum Standard eines Hauses gehört, dass auf dem Dach eine Solarzellenanlage ist. Bevor dieser Zustand der Gewöhnung und Akzeptanz einer Solarzellenanlage erreicht ist, werden wahrscheinlich noch viele Diskussionen im Rahmen von Baugesuchen mit den Baubewilligungsbehörden und den Gremien des Heimatschutzes notwendig sein. Solarzellenanlagen können nicht nur schön sein, sie sind auch umweltschonend. Die heutigen Auseinandersetzungen zwischen Heimatschutz gegen Solarzellen auf dem Dach und Umweltschutz für die Realisierung von umweltgerechten Energieerzeugungsanlagen dürften sich in Zukunft vermehrt zu Gunsten des Baus von Solarzellenanlagen verschieben.

1.6 Baubewilligung

Solarzellenanlagen benötigen eine Baubewilligung. Im Kurs werden deshalb die Formalitäten für eine Baueingabe besprochen, damit der Elektroinstallateur auch diese Hemmschwelle abbauen kann.

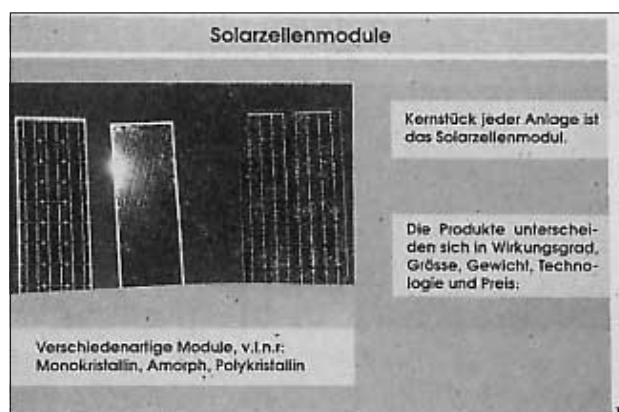
Mit dem vorliegenden Kurs wird der Elektroinstallateur in die elektrischen Eigenschaften und Besonderheiten der Solarzellentechnologie eingeführt. Er wird damit noch nicht zum «Solateur». Ein Solateur wäre eine Berufsgattung, welche alle erforderlichen handwerklichen Eigenschaften umfassen würde. Dazu gehören auch jene Arbeiten, welche in die Fachkompetenz des Dachdeckers gehören. Es sei dem Elektroinstallateur deshalb dringend geraten, für die Realisierung von Solarzellenanlagen mit Dachdeckern oder Spenglern zusammenzuarbeiten, welche die nötige Ausbildung besitzen, auf Dächern zu arbeiten. Das Dach der Zukunft hat zwei Funktionen:

1. Es muss wasserfest sein und
2. es erzeugt elektrische Energie.

Ohne fachkundigen Dachdecker oder Spengler fehlt jedoch die Gewähr, dass die Solarzellenanlage auch wasserdicht und sturmfest mit der Dachkonstruktion verbunden ist.

Diese handwerklichen Aufgaben werden in diesem Kurse nicht detailliert erläutert, da das Anbringen der Haltestrukturen für die Solarzellenfelder zum normalen Stand der Technik der Dachdecker und Spengler gehören. Die Zusammenarbeit mit diesen Fachkräften ist im Schrägdachbau unumgänglich.

Projektionsfolie 1



1.7 Solarzellenmodule

Solarzellenmodule werden auch Photovoltaikmodule genannt. Diese ermöglichen die direkte Umwandlung von eingestrahelter Sonnenenergie in elektrischen Strom. Dazu notwendig sind großflächige Halbleiter mit ähnlicher Struktur, wie sie in jedem Transistor zu finden ist.

Zurzeit werden für die Herstellung handelsüblicher Solarmodule hauptsächlich monokristalline, polykristalline oder amorphe Siliziumzellen verwendet. Diese verschiedenen Solarzellentypen unterscheiden sich zum Teil wesentlich in ihren elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Die monokristallinen Zellen entstehen durch Trennschleifen aus einem Siliziumeinkristall, der unter gleichmässiger Rotation aus einer Siliziumschmelze gezogen worden ist. Polykristalline Zellen dagegen werden mit Trennschleifen aus gegossenen Siliziumblöcken erzeugt.

Amorphe Solarzellen werden durch Aufdampfen von verschiedenen Schichten auf eine Trägersubstanz hergestellt. Dadurch unterscheidet sich die

Fertigungstechnik der amorphen Solarzellen ganz wesentlich von jener der kristallinen Solarzelle.

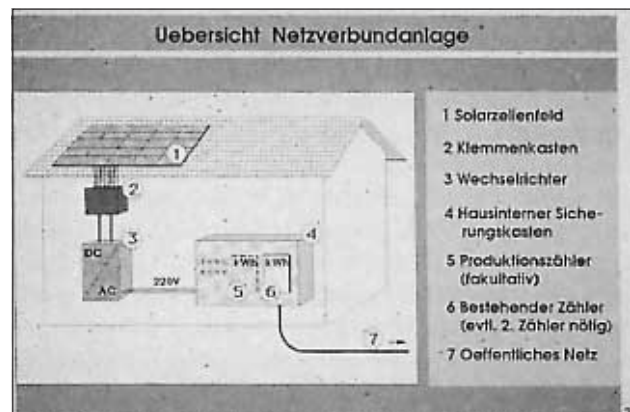
Die verschiedenen Solarzellen unterscheiden sich aber nicht nur durch die Art der Fabrikation und damit auch durch ihre elektrische Eigenschaften, sondern auch durch ihr Aussehen. Wie der Name andeutet, bestehen die monokristallinen Solarzellen aus Scheibchen, welche aus einem einzigen Kristall herausgesägt wurden. Damit weisen diese Zellen ein einheitliches Farbbildmuster auf, welches nur durch die elektrischen Kontaktbahnen unterbrochen wird.

Bei der polykristallinen Solarzelle dagegen kann man die Vielzahl der Kristalle an ihren Korngrenzen erkennen. Es ergibt sich ein gemustertes Erscheinungsbild. Neben den vielen Kristallen sind Leiterbahnen ebenfalls ersichtlic.

Die amorphe Zelle dagegen besteht aus einem einheitlichen gleichgetönten Erscheinungsbild, welches einzig durch hauchdünne Bahnen unterbrochen wird. Je nach Fabrikationstechnik können die Farbtöne variiert werden.

Um die empfindlichen Schichten, welche das Sonnenlicht absorbieren und dieses in elektrischen Strom umwandeln, gegen Umwelteinflüsse zu schützen, werden diese hinter Glas versiegelt. Damit ist dann meist auch die Form und die Grösse des Solarmoduls bestimmt. Bei den heute marktüblichen Solarmodulen wird das Modul in einem Alurahmen eingefasst. Es ist denkbar, dass für die Integration in Gebäuden in näherer Zukunft Module ohne derartige Rahmen gebraucht werden könnten.

Projektionsfolie 2



1.8 Übersicht Netzverbundanlage

Es mag auf den ersten Blick unsinnig erscheinen, den Vorteil dezentraler Energiesysteme mit dem Nachteil zentraler Energieversorgungsnetze zu verknüpfen. Man könnte meinen, es wäre doch sinnvoller, netzunabhängige, dezentrale Energiesysteme für die autarke Energieversorgung von Gebäuden anzustreben. Es gibt nun aber gute Gründe, warum der Netzverbund auch dezentraler kleinerer Anlagen überaus sinnvoll ist.

Die Sonnenenergie fällt zeitlich wegen der Tag-Nacht-Schwankungen und den saisonalen Unterschieden nicht mit gleichmässiger Verfügbarkeit an. Um diesen Nachteil bei ungefähr gleichbleibendem Verbrauch auszugleichen, wären grosse Speicher notwendig. Der Verbund mit dem elektrischen Netz erlaubt es aber gerade, ohne internen Speicher auszukommen und die «Speicherwirkung» des Netzes auszunützen.

Durch den Netzverbund werden Energiebeiträge, welche zum Beispiel nicht unmittelbar im eigenen Gebäude verbraucht werden, in das Netz eingespiessen und stehen dem Nachbarn zur weiteren Nutzung zur Verfügung. Dies ist zum Beispiel auch dann der Fall, wenn ein Solarstromerzeuger einige Wochen in die Ferien fährt und den erzeugten Strom gar nicht gebrauchen könnte.

Mit dem Netzverbund soll erreicht werden, dass langfristig das Netz von Produktionsanlagen mit umweltbelastenden Abfallstoffen entlastet wird.

Bei jeder Kilowattstunde, welche durch eine Solaranlage eingespiessen wird, geht irgendwo ein Schieber in einem Wasserkraftwerk zurück, um das gespeicherte Wasser zu Zeiten höheren Bedarfs und niedrigerer Sonneneinstrahlung wieder zu nutzen. In einem grösseren Szenario, wo namhafte Energiebeiträge aus Solarstrom auch im Sommer eingespiessen werden, substituiert die Solarenergie direkt Strom, welcher in einem thermisch erzeugten Kraftwerk generiert wird. So wird jede Kilowattstunde, welche im Sommer eingespiessen wird, indirekt dafür sorgen, dass z.B. irgendwo ein Schieber in einem Kohlekraftwerk zurückgeht.

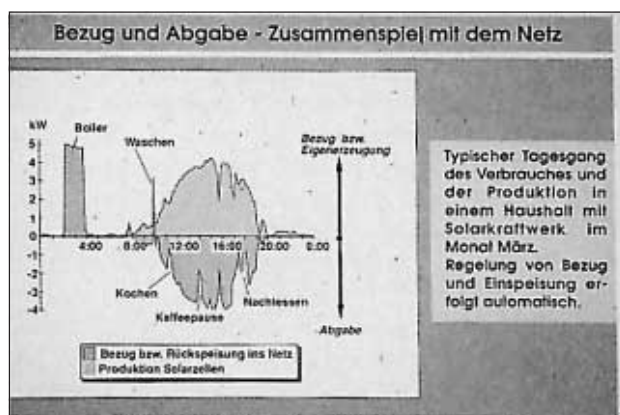
Berechnungen zeigen, dass auf diese Weise in der Schweiz rund 10% Solarstrom im Verbundnetz realisierbar sind. Das ist für die Schweiz alleine noch nicht die Lösung des Energieproblems, aber ein bedeutender und absolut umweltverträglicher Beitrag für eine langfristige Energieversorgung. Durch den Verbund mit dem Netz ergeben sich eine Reihe von zusätzlichen Komplikationen für die Solarzellenanlage. Die Erschwernisse ergeben sich daraus, dass die gegenseitige Beeinflussung «Netz und Solaranlage» durch die Auslegung minimal gehalten werden sollte. Diese Anforderung wird heute in modernen Wechselrichtern weitgehend erfüllt, wo eine Mikroprozessorsteuerung die Energieflüsse von der Solaranlage in das Netz regelt.

Neben den Einwirkungen, welche die Solaranlage auf das Netz haben kann, sind auch Rückwirkungen vom Netz auf die Solaranlage denkbar. Diese können für die Anlage schädigende Wirkung haben und es ist darauf zu achten, diese Einflüsse zu unterdrücken.

Eine Netzverbundanlage besteht im wesentlichen aus vier einfachen Subsystemen:

- dem Solarzellenfeld, welches auf ein Gebäude, Dach oder in die Fassade integriert werden muss,
- dem Klemmenkasten, in dem einzelne Teile des Solarzellenfeldes zusammengefasst werden,
- dem Wechselrichter, welcher den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt und
- dem hausinternen (bereits vorhandenen) Sicherungskasten, in den der Wechselstrom eingeleitet wird und wo auch der Sicherungsabgang für die Solarzellenanlage und ein Energiezähler eingebaut sind.

Projektionsfolie 3



1.9 Bezug und Abgabe – Zusammenspiel mit dem Netz

Das Zusammenspiel zwischen der Solarzellenanlage, den Hausverbrauchern und dem Netz ist sehr einfach. Der Bezüger konsumiert vom Netz elektrische Energie, ohne dass er über das Vorhandensein einer solaren Netzeinspeisung etwas merkt. Ebenso wird erzeugte Solarenergie in das Netz eingespiessen, ohne dass es der Netzbetreiber oder der Konsument merkt.

In der Grafik ist ein Tagesgang über 24 Stunden dargestellt. Am Morgen wird in diesem Beispiel zwischen 2 und 4 Uhr der Warmwasserboiler des Einfamilienhauses mit Strom aufgeladen. Um ca. 7.30 Uhr erfolgt ein Energiebezug, welcher wahrscheinlich zur Zubereitung des Frühstücks notwendig war. Um 8 Uhr erfolgt die erste Produktion der Solarzellenanlage. Der Energiebeitrag, welcher zwischen 8 und 9 Uhr erfolgt, wird ins Netz eingespiessen. Die Produktion steigt im Laufe des Tages kontinuierlich an, wobei die Rückspeisung ca. um 10 Uhr unterbrochen wird, weil ein grösserer Energiebezug über eine kurze Zeit erfolgte. Man kann vermuten, dass dort zum Beispiel die Waschmaschine angeschaltet wurde. Die Produktion steigt an, wobei man zum Beispiel um 11.30 Uhr eine Einbusse in der Abgabeleistung ins Netz erkennen kann. Es ist möglich, dass dort zum Beispiel das Mittagessen zubereitet wurde. Man

erkennt ferner, dass die Tagesspitze um etwa 14 Uhr für diese Anlage erfolgt. Das ergibt sich daher, dass die Anlage etwa 30° aus der Südachse nach Westen abgedreht ist.

Die Regelung über Bezug und die Abgabe von solar erzeugtem Strom erfolgt vollständig automatisch. Die Steuerung im Wechselrichter sorgt dafür, dass die Normen über Spannungs- und Frequenzabweichungen eingehalten werden und dass die Rückspeisung bei Stromausfall unterbunden wird.

Ob die oben geschilderten Verhältnisse über Abgabe und Bezug von Energie einzeln im Zähler ausgewiesen werden müssen oder ob nur ein Zähler verwendet wird, welcher vor- und rückwärts laufen kann, ist von Versorgungsgebiet zu Versorgungsgebiet verschieden. Voraussichtlich werden in den nächsten Jahren die Elektrizitätswerke zusätzlich einen Zähler einbauen, um auch die produzierten Energieerträge registrieren zu können.

wird in das interne Hausnetz eingespeist. Nicht selbst genutzte Energie geht ins Netz.

Die beiden Beispiele zeigen eine 6 kW und eine 45 kW Anlage. Beide Anlagen sind aus modularen Einheiten von je 3 kW aufgebaut. Damit wird demonstriert, dass auch grössere Kraftwerksleistungen kostengünstig durch eine Vielzahl von standardisierten 3 kW Einheiten realisiert werden können. Der Gewinn dieses Verfahrens besteht im minimalen Planungsaufwand. Es kann heute aber noch nicht abschliessend beurteilt werden, ob bei der Markteinführung grösserer Wechselrichterleistungen im Dreiphasenbetrieb nicht die gesamte Solarzellenleistung über einen Wechselrichter ins Netz eingespeisen werden sollte.

Das Bild der Solarzellenanlage in Uetendorf zeigt, dass Photovoltaik und Solarzellenkollektoren durchaus miteinander in Ergänzung stehen können. Auf dem abgebildeten Einfamilienhaus wurden nach dem Bau des Hauses zuerst die Warmwasserkollektoren und einige Jahre später noch die Solarzellen montiert. Obwohl nicht als Einheit geplant, zeigt das Beispiel doch, dass bei geschickter Anordnung der Solarzellen auf einem Dach ein ästhetisch befriedigender Gesamteindruck erreicht werden kann.

Aufgrund der Spiegelungen der Bäume im Hintergrund auf den Warmwasserkollektoren und den Solarzellen kann man feststellen, dass Solarzellen weniger spiegeln als Kollektoren oder die auf vielen Schrägdächern anzutreffenden Dachfenster. Die Spiegelung des Sonnenlichtes auf einer Solarzelle ist daher etwa vergleichbar mit der Spiegelung der Sonne in einem See. Das Abbild der Sonne in der Spiegelung wird als heller Fleck ohne klar sichtbare Konturen erkenntlich. Damit dürfte aber auch klar sein, dass die Störung durch Spiegelung der Sonne für die umliegenden Nachbarn vernachlässigbar ist. Die Erfahrung mit beinahe zweihundert Solarzellenanlagen belegen dies. Die guten Erfahrungen, welche mit dem optisch befriedigenden Eindruck von Solarzellenanlagen auf Hausdächern gewonnen werden konnten, helfen, dass die Baubewilligungsbehörden positiver auf Gesuche reagieren.

Während auf Schrägdächern die Solarzellen wegen der Dachneigung besser für die Einsammlung des Sonnenlichtes geeignet sind, müssen auf Flachdächern zu diesem Zwecke Gestelle aufgebaut werden. Damit sind diese Gestelle auch den

Projektionsfolie 4



1.10 Netzverbundanlagen: Zwei Beispiele

Die Technik von Netzverbundanlagen ist 100fach bewährt. Bereits arbeiten auf ungefähr zweihundert Schweizer Hausdächern Solarzellenanlagen im Netzverbund. Arbeiten heisst in diesem Zusammenhang: sie sind auf den Dächern fest montiert und wandeln einen Teil des einfallenden Sonnenlichtes in elektrischen Strom um. Dieser Strom

Belastungen des Windes und des Sturmes ausgesetzt. Durch feingliedrige Aufteilung der Anlage können diese Windlasten minimal gehalten werden. Zudem verbessert sich das optische Erscheinungsbild, da die Anlage in der Regel von unten praktisch nicht oder nur schwer sichtbar ist.

Die Gestelle sollten allerdings auf keinen Fall mit durchgehenden Schrauben durch die wasserdichte Haut mit dem Gebäude verbunden werden. Es empfiehlt sich vielmehr, diese Verankerung mit sogenannten Schwerkraftankern durchzuführen. Diese bestehen aus Gewichten, welche so ausgelegt sein müssen, dass sie die Windlasten aufnehmen können.

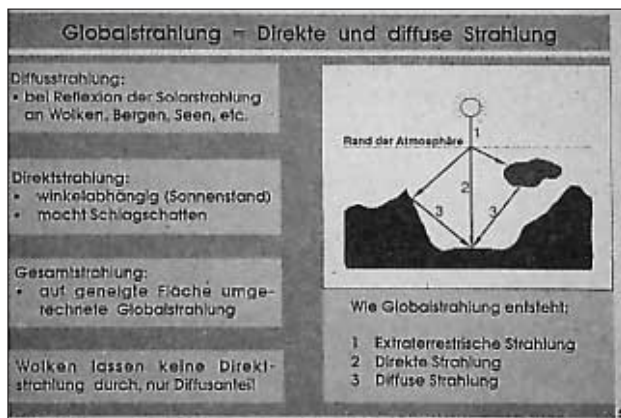
Auch das Arbeiten auf Flachdächern bedingt die Zusammenarbeit mit dem Spezialisten. Nur so ist Gewähr geboten, dass nach beendeter Installation die Dachhaut noch immer wasserdicht ist.

2 Meteorologische Grundlagen

2.1	Globalstrahlung = direkte und diffuse Strahlung	20
2.2	Zeitliche Verteilung der Solareinstrahlung	21
2.3	Neigungswinkel	21
2.4	Ausrichtungs- und Neigungswinkel	23
2.5	Beschattung von Solarzellenanlagen	24
2.6	Reihenabstand auf Flachdächern	25

2 Meteorologische Grundlagen

Projektionsfolie 5



2.1 Globalstrahlung = direkte und diffuse Strahlung

Die Sonne ist der Energielieferant unseres Planeten. Die Temperatur der weissleuchtenden Oberfläche beträgt rund sechstausend Grad Celsius. Dieser enorm heisse Feuerball sendet pausenlos Energie aus.

Ein Bruchteil der von der Sonne ausgestrahlten Energie trifft auf die Erde. Weil die Strahlung von einer extrem heissen Oberfläche stammt, besitzen die Lichtteilchen eine hohe Energiewertigkeit. Die gesamte Sonneneinstrahlung, die sogenannte Globalstrahlung, lässt sich in drei Komponenten aufteilen:

- Die als paralleles Licht von der Sonne einfallende Direktstrahlung.
- Die von Wolken und Staubteilchen der Luft gestreute in alle Richtungen austretende Himmelsstrahlung.
- Die von der nahen Umgebung zurückgestrahlte Reflexstrahlung.

Himmelsstrahlung und Reflexstrahlung werden als diffuse Strahlung bezeichnet. Die direkte und die diffuse Strahlung ergeben zusammen die Globalstrahlung.

Direkte Sonnenstrahlung liegt dann vor, wenn ein Gegenstand einen klaren Schattenwurf abbildet. Dagegen erzeugt die aus allen Richtungen einfallende diffuse Sonnenstrahlung keinen Schatten.

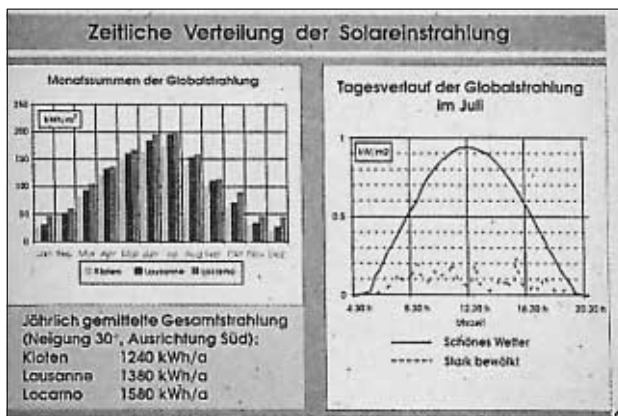
Man spricht von Globalstrahlung, wenn die gesamte einfallende Strahlenmenge bezogen auf eine horizontale Fläche gemessen wird. Die auf eine geneigte Ebene einfallende Strahlung nennt man die Gesamtstrahlung.

Der Anteil der Diffusstrahlung ist in erster Näherung für horizontale und geneigte Flächen gleich. Das bedeutet zum Beispiel, dass eine Solarzellenanlage mit flachem Neigungswinkel (z.B. 25°) während einem Nebeltag etwa gleich viel Energie erzeugt, wie eine Solarzellenanlage mit steilem Anstellwinkel (z.B. 45°).

Der direkte Strahlungsanteil dagegen ändert sich sehr stark mit dem Neigungswinkel der Fläche beziehungsweise des Solarmoduls.

Die Sonnenstrahlung kann verstanden werden als ein wahres Trommelfeuer von Lichtteilchen, den sogenannten Photonen. Nicht alle Teilchen dieser Sonnenstrahlung besitzen die gleiche Energie; eine Gliederung nach Energien beziehungsweise Wellenlängen erfolgt in der Darstellung der spektralen Lichtverteilung der Sonnenenergie. Dort wo die Intensität dieser Lichtteilchen am stärksten ist, was ungefähr der Wellenlänge von grün entspricht, ist auch das menschliche Auge am empfindlichsten. Strahlung mit kurzer Wellenlänge, wie sie im blauen beziehungsweise im ultravioletten Bereich vorhanden ist, hat einen höheren Energieinhalt. Energiearme Teilchen befinden sich im roten bis infraroten Bereich des Spektrums.

Projektionsfolie 6



2.2 Zeitliche Verteilung der Solareinstrahlung

Die Erde dreht sich einmal pro Tag um ihre eigene Achse. Für die Bewohner der Nordhalbkugel bedeutet dies, dass die Sonne am Morgen im Osten aufgeht, am Mittag im Süden den höchsten Stand erreicht und am Abend im Westen wieder untergeht. Während der übrigen Zeit der Erddrehung ist es Nacht. Dies ist gleichzeitig ein grosser Nachteil der Sonnenenergienutzung: die Sonnenenergie fällt täglich mit grossen Schwankungen an.

Während des jährlichen Umlaufes der Erde um die Sonne ändert sich deren Einstrahlwinkel. Das Resultat sind in unseren Breitengraden die vier Jahreszeiten. Die grosse saisonale Schwankung des Sonnenenergieangebotes ist damit ein weiterer Nachteil der Sonnenenergienutzung.

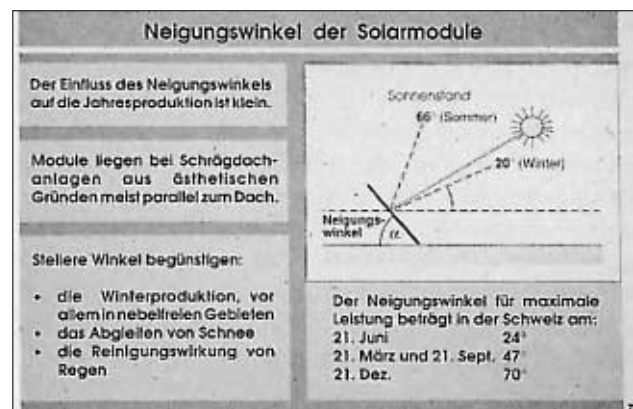
In Zürich beträgt die Strahlung auf eine 30° geneigte, nach Süden ausgerichtete Fläche von einem Quadratmeter rund 1240 kWh pro Jahr. In Lausanne sind es immerhin 1380 und in Locarno 1580 kWh pro Jahr und Quadratmeter. Die Grafik auf der linken Seite zeigt die jährliche Variation der Energiebeiträge, welche monatlich aufgetragen sind. Locarno hat das ganze Jahr über mehr Einstrahlung als Lausanne und Kloten. Lausanne übertrifft Kloten vor allem in den Wintermonaten, da Lausanne häufiger nebelfrei ist.

Interessant ist auch der Tagesverlauf der Globalstrahlung. Aufgetragen sind Messwerte der Leistung in Kilowatt pro Quadratmeter über der Ta-

geszeit. Dick ausgezogen ist der Verlauf der Einstrahlung für einen Schönwettertag, gestrichelt jener eines bewölkten Himmels.

Die Leistung der Solarenergie wird in Kilowatt (kW) angegeben. Die eingestrahelte Energiemenge in Kilowattstunden pro Quadratmeter (kWh/m²). Durch den Verbund der Solarzellenanlage mit dem Netz wird der Nachteil des schwankenden Sonnenenergieangebotes ausgeglichen. Am Tag wird oft mehr Strom produziert, als im Haus verbraucht wird. Die Differenz geht ins Netz. Nachts wird die fehlende Solarleistung durch Bezug aus dem Netz ausgeglichen.

Projektionsfolie 7



2.3 Neigungswinkel der Solarmodule

Kurgäste, welche ein Sonnenbad nehmen, «wissen», welches der beste Neigungswinkel ist, um optimale Bräunung zu erhalten. Im Winter werden die Liegestühle steil angestellt, im Sommer dagegen eher flach. Ebenso fangen Solarzellenmodule im Winter bei steiler Anstellung und im Sommer bei flacher Anstellung mehr Energie ein.

Dieser Unterschied ist allerdings nur für den Anteil der direkten Sonneneinstrahlung wesentlich. Die Intensität der diffusen Sonnenstrahlung ist dabei weitgehend richtungsunabhängig. Wie oben gefolgert, erwartet man in Gebieten mit hohem Diffusanteil (Nebelgebiete) einen kleinen Einfluss des Neigungswinkels der Solarmodule auf die Ener-

gieproduktion. In Gebieten mit viel Direkteinstrahlung (Berggebiete) ist die Energieproduktion und das Verhältnis der Winter- zur Sommerproduktion stark vom Neigungswinkel abhängig.

Der Neigungswinkel des Solarmoduls ist definiert als der Winkel zwischen der Horizontalen und dem Solarmodul. Die maximale Leistung wird dann erreicht, wenn die Sonnenstrahlung senkrecht auf das Solarmodul fällt.

Für eine nach Süden ausgerichtete Solarzelle ist dies bei Mittagszeit unter folgenden Bedingungen der Fall: Im Juni müsste der Neigungswinkel 24° betragen, bei der Tag- und Nachtgleiche im Frühjahr und im Herbst 47° und im Dezember 70° . Wie sich in Berechnungsmodellen zeigen lässt, ist der optimale Anstellwinkel in den Gebieten des Mittellandes rund 30° bis 40° und in Berggebieten rund 35° bis 45° .

Allerdings sollte man mit Hinblick auf eine mögliche Optimierung der Energieerträge im Winterhalbjahr vor allem in nebefreien Gebieten mit steilen Anstellwinkeln von 45° und darüber arbeiten. Damit wächst zwar nicht die Jahresenergieproduktion, aber der Winteranteil wird positiv beeinflusst. Berechnungen und Messungen haben gezeigt, dass im Berggebiet bei steilen Anstellwinkeln von 55° bis 60° die Energieproduktionsanteile für das Winter- und das Sommerhalbjahr praktisch gleich gross sind (45% im Winter-, 55% im Sommerhalbjahr).

Nach den obigen Darstellungen ergäbe sich eigentlich das Ertragsoptimum, wenn die Solarzellen dem wechselnden Sonnenstand nachgeführt würden. Das wurde auch in mehreren Anlagen, vor allem im Ausland an Orten mit einem hohen Anteil an direkter Sonneneinstrahlung, realisiert. Man nimmt dabei allerdings zwei Nachteile in Kauf:

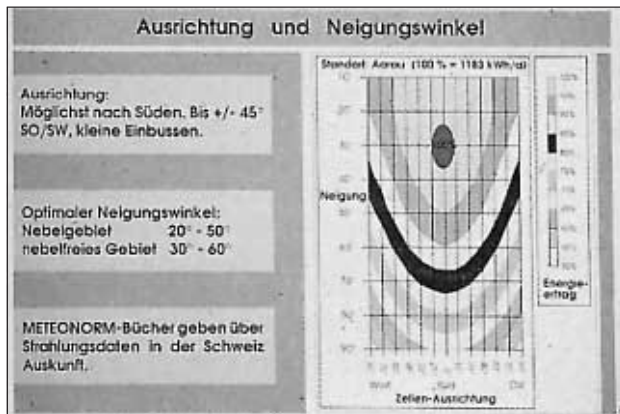
a) Die Ästhetik des Solarzellenfeldes leidet. Insbesondere bei Schrägdächern empfiehlt es sich, die Module parallel zur Dachfläche aufzubauen. Damit lässt sich das Solarzellenfeld am ehesten als homogener Bestandteil in die Gebäudehülle integrieren. Eine zusätzliche Anstellung der Solarmodule gegenüber einer flachen Schrägdachneigung mag wohl den Energieertrag geringfügig erhöhen und die Anteile der Wintererträge verbessern. Neben dem Verlust an Ästhetik ist diese Konstruktionsvariante auch sehr viel teurer, da zusätzlich zu den Schneelasten nun

vermehrt auch Windlasten durch die mechanische Unterkonstruktion aufgefangen werden müssen.

b) Durch die variable Nachführung, die den Neigungswinkel der Solarmodule dem wechselnden Sonnenstand anpasst, wird aus einem System ohne mechanisch bewegte Teile plötzlich eine Anlage, wo wieder mechanisch bewegte Strukturen verwendet werden. Höhere Investitionskosten, Abnutzung und damit erhöhter Wartungsaufwand sind die Folgen.

Der Einfluss des Anstellwinkels auf die Jahresproduktion ist verhältnismässig klein. Geringere Neigungswinkel als 20° sollten vermieden werden, damit der Regen für die Moduloberfläche noch immer die reinigende Wirkung erzielt. Zudem ist es so, dass bei flachen Anstellwinkeln der Schnee länger liegenbleibt als bei steileren. Länger dauernde Versuche in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Schnee- und Lawinenforschung in Davos haben gezeigt, dass bei Neigungswinkeln über 60° der Schnee praktisch bei allen Witterungen abrutscht. Allerdings gilt das für ein relativ trockenes Gebiet wie Davos, wo die Neigung zur Bildung von Eiskristallen gering ist. Im Voralpengebiet können Situationen auftreten, wo der Schnee auch bei 60° nicht abrutschen wird. Bekannt dürften die Bilder der schneeüberwehten Messstation auf dem Säntisturm sein.

Projektionsfolie 8



2.4 Ausrichtung und Neigungswinkel

Neben dem Neigungswinkel spielt auch die Ausrichtung nach Süden, bzw. die Abweichung aus der Südachse eine Rolle für den Energieertrag einer Solarzellenanlage. Eine genaue Optimierung für jeden Standort ist mit speziellen Simulationsprogrammen oder mit den Meteonorm-Handbüchern möglich. Die Berechnungen werden in der Regel von spezialisierten Ingenieurbüros durchgeführt. Die in Projektionsfolie 8 gezeigte Faustformel für den Neigungswinkel wird im folgenden auch für die Ausrichtung abgeleitet.

Während die Änderung des Neigungswinkels vor allem die saisonalen Unterschiede der Sonneneinstrahlung berücksichtigt, ist der Wunsch nach einer Nachführung der Ausrichtung durch die tägliche Bewegung der Sonnenbahn gegeben. Die Sonne steigt am Morgen im Osten auf, steht am Mittag im höchsten Punkt und geht am Abend im Westen unter. Eine optimale Ausrichtung würde demnach bedeuten, dass die Solarzellen am Morgen nach Osten, am Mittag nach Süden und am Abend nach Westen ausgerichtet werden müssten. Auch dazu wäre eine mechanische Einrichtung notwendig, welche die Drehung des Solarmoduls bewerkstelligen würde. Die Nachteile einer solchen Mechanik sind die gleichen wie bei einer Vorrichtung, welche den Neigungswinkel ändert: erhöhte Investitionen, Einbußen bei der Ästhetik und ein erhöhter Wartungsaufwand.

Eine erhöhte Energieproduktion durch Nachführen der Module ist nur an Orten mit hohem Direktstrahlungsanteil zu erzielen (Berggebiete). In Lagen mit häufigem Winternebel und somit hohem Diffusanteil (Mittelland) lohnt sich der Aufwand für die Nachführung nicht.

Bei fester Aufständigung ergibt die Ausrichtung nach Süden optimale Energieerträge. Allerdings müssen in der Realität auch hier Abweichungen vom Optimum in Kauf genommen werden. Schrägdächer sind nun einmal nicht immer genau nach Süden ausgerichtet. Das wäre dann der Fall, wenn der Dachgiebel genau Richtung Ost-West verlaufen würde. Es zeigt sich nun aber, dass die Abweichungen aus der Ideallage auf den Energieertrag einer Solarzellenanlage wenig Einfluss haben. Abweichungen von $\pm 45^\circ$ aus der Südachse sind zulässig. Die Einbußen bei der Energieproduktion sind relativ klein.

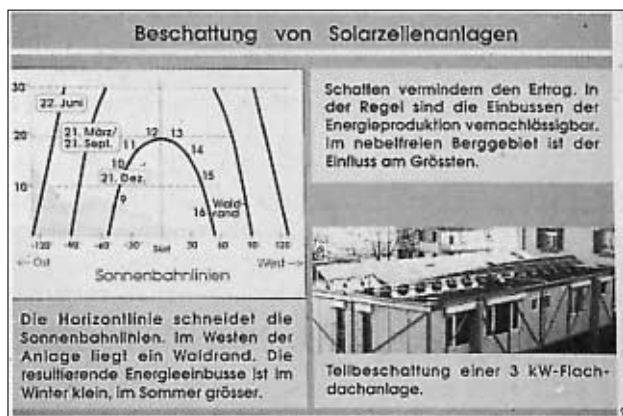
Der Ausrichtungswinkel wird auch Azimuth genannt. In der Ortskunde wird dieser Winkel zwischen dem rechtweisenden Nord und dem einfallenden Sonnenstrahl gemessen. In der Meteonorm-Buchreihe sowie auch allgemein im Bereich der Sonnenenergienutzung wird der Azimuth als Winkel-Abweichung aus der Südachse angegeben. Eine genaue Ausrichtung nach Ost bedeutet folglich einen Winkel von -90° , eine genaue Ausrichtung nach Süden einen Winkel von 0° und eine genaue Ausrichtung nach Westen einen Winkel von $+90^\circ$.

Ertragseinbußen aufgrund einer Abweichung vom idealen Ausrichtungs- und Neigungswinkel können mit Hilfe der Graphik in Projektionsfolie 8 abgeschätzt werden. Die Parameter auf den beiden Achsen sind die Ausrichtung bzw. deren Abweichung aus der Südrichtung und der Neigungswinkel (zwischen 10° und 90°). Ein Anstellwinkel von 90° entspricht dem Einbau eines Solarmoduls in eine senkrechte Fassade. Aus der Grafik kann die prozentuale Einstrahlung bezüglich des Optimums für beliebige Neigungswinkel und Ausrichtungen abgeschätzt werden. So kann man zum Beispiel erkennen, dass eine Ausrichtung des Daches von 45° nach Osten und einem Neigungswinkel von 60° noch einen Energieertrag zwischen 80% und 85% des Maximums erwarten lässt (Maximum: Ausrichtung nach Süden, Neigungswinkel 30°). Die Grafik wurde für Daten ausgearbeitet, welche in Aarau gemessen wurden. Sie gilt also

streng genommen nur für Orte mit gleicher Nebelhäufigkeit und gleicher Sonneneinstrahlcharakteristik wie in Aarau. Sie zeigt aber, dass gerade in Nebelgebieten die Einbussen gegenüber optimal ausgerichteten Anlagen mit optimalem Neigungswinkel (30°) relativ gering sind. Erst steile Neigungswinkel (Fassaden) mit grosser Abweichung aus der Südrichtung ergeben massive Einbussen in der Energieproduktion.

Eine genauere Abschätzung lässt sich mit einem speziellen Verfahren relativ leicht erarbeiten, welches in der Meteonorm-Bücherreihe zusammengestellt ist. Diese Meteonorm-Bücher, welche speziell für Solarplaner durch das Bundesamt für Energiewirtschaft in Bern herausgegeben werden, ermöglichen in relativ einfacher Art und Weise, für jede Gemeinde in der Schweiz die Einstrahlungsverhältnisse für jede Ausrichtung und jeden Neigungswinkel zu berechnen. Die Bezugsquelle für diese Unterlagen ist Infosolar, Postfach 311, 5200 Brugg.

Projektionsfolie 9



2.5 Beschattung von Solarzellenanlagen

Neben der zeitlichen Variation der Sonneneinstrahlung, bedingt durch die Erdrotation, durch die Erdumlaufbahn und durch die klimatischen Gegebenheiten von Wolken und klarem Himmel, gibt es noch das Problem der Beschattung von Solarzellenanlagen zu berücksichtigen. Die Teilbeschattung

einer Anlage hat einen grossen Einfluss auf die momentane Leistung der Solarzellenanlage.

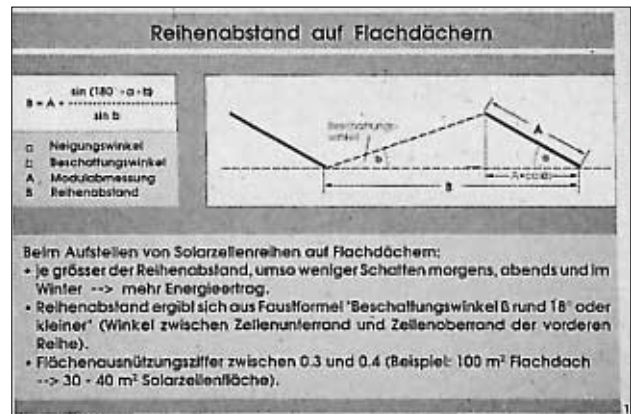
Die Schweiz ist kein flaches Wüstenland, wo ein freistehendes Haus unbeschattet von morgens früh bis abends spät der Sonne ausgesetzt ist. Die Ertragsminderungen beginnen damit, dass der Horizont das einfallende Sonnenlicht abhält. Bekannt sind jene Gemeinden in Alpentälern, wo zum Beispiel der Kirchturm während Monaten im Winter keine direkte Sonnenstrahlen erhält. Offensichtlich ist dort der Horizont in jedem Augenblick des Tages höher als der Sonnenstand. Im Volksmund spricht man von einem «Schattenloch». Dort dürften die Erträge vor allem im Winter bescheiden sein.

Eine Abschätzung, ob der Horizont den Ertrag mindert oder nicht, erfordert einen erhöhten rechnerischen Aufwand. Die in der Projektionsfolie 9 dargestellte Grafik zeigt den Verlauf der Sonnenbahn für den Winteranfang am 21. Dezember, für die Tag- und Nachtgleiche im März und im September und für den längsten Tag am 21. Juni. Das Beispiel zeigt eine gemessene Horizontlinie für eine Anlage an einem Waldrand. Aus der Messung ist ersichtlich dass der Horizont von Osten über Süd bis ungefähr 50° nach Westen unter 10° liegt. Erst bei noch westlicherer Orientierung steigt die Horizontlinie stark an. Es ist zu erwarten, dass die Anlage im Wintermonat in ihrem Ertrag durch den Horizont nicht beeinträchtigt ist und dass im Frühjahr und vor allem im Sommer am späteren Nachmittag mit Schatten zu rechnen ist. In diesem Beispiel hat die Berechnung gezeigt, dass die Energieeinbusse aufgrund dieser Horizontlinie für die Anlage klein ist.

Als Regel sollte beachtet werden, dass im Bereich von $\pm 45^\circ$ gegenüber Süden der Winkel zum Horizont unter 15° liegt. Dann dürften die Energieeinbussen in jedem Falle relativ bescheiden sein. Bei hohen Horizontlinien ist allerdings Vorsicht geboten. In solchen Fällen ist es ratsam, die Einbussen der Produktion genauer untersuchen zu lassen. Die Horizontlinie wird am genauesten mit einem Vermessungsgerät aufgenommen. Ob dies ein teurer Theodolit ist oder ein einfaches Handgerät, spielt für die erforderliche Genauigkeit der Solarenergie keine Rolle. Man setzt sich in der Nähe des zukünftigen Standortes der Solaranlage und richtet das Gerät zuerst nach Osten. Dann wird der Höhenwinkel gemessen. In Abständen von rund

10° bis 20° bewegt man sich mit dem Gerät nach Süden und misst dann jeweils die zugehörigen Höhenwinkel. Man erhält so die Beschattungslinie. Dieses Verfahren dürfte allerdings nur dann notwendig sein, wenn durch umliegende Berge die Gefahr einer längeren Beschattung der Anlage besteht. In der Regel dürfte in einem solchen Fall der Hausbesitzer jedoch recht gut Bescheid wissen, wann bei ihm die Sonne aufgeht und ob die Berge einen massgeblichen Einfluss auf seine Sonnenscheindauer haben. Eine direkte Sonnenbestrahlung im Berggebiet von vier Stunden im Dezember dürfte das zulässige Minimum sein. Eine viel grössere Schattenwirkung als der Horizont bewirken oft nahestehende Häuser und Bäume. Es gibt praktische keine realisierte Anlage, wo nicht zu einer bestimmten Tageszeit irgend ein Haus oder ein Baum einen Schatten auf die Anlage wirft. Die Einbussen rechnerisch zu erfassen ist aufwendig. Meist genügt es, sie abzuschätzen. Wiederum dürfte der Hausbesitzer recht gut die Besonnung seines eigenen Daches und die Schattenwirkung umliegender Gebäude und Bäume kennen. Diese Informationen genügen meist zur Abschätzung der Einbussen. Vorsicht ist geboten, wenn die Anlage im Winter zwischen 10 und 14 Uhr, bzw. im Sommer zwischen 7 und 17 Uhr von der Schattenwurf tangiert wird. Die Beschattung am Morgen, bzw. am Abend hat wenig Einfluss auf den Ertrag.

Projektionsfolie 10



2.6 Reihenabstand auf Flachdächern

Auf Flachdächern oder im Felde werden die Solarmodule in sogenannten Reihen aufgestellt. Während die vorderste Reihe in der Regel ganz besonnt ist, lässt sich kaum vermeiden, dass bei tiefen Sonnenständen am Morgen und am Abend sowie im Winter, die hintere Reihe durch die vordere Reihe beschattet wird. Als Faustformel gilt: die Horizontüberhöhung b zwischen Unterkante der hinteren Solarzellenreihe und Oberkante der vorderen Reihe sollte maximal 18° betragen. Tiefere Winkel wie etwa 15° sind zu bevorzugen, wenn das Dach gross genug ist und die Reihenabstände entsprechend gewählt werden können. Im Bild ist dieser Horizontüberhöhungswinkel, auch Beschattungswinkel genannt, mit b bezeichnet. Sind Neigungswinkel a und Horizontüberhöhung b gegeben, lässt sich der Abstand zwischen den einzelnen Reihen auf sehr einfache Art und Weise berechnen.

Man kann folgende Faustformeln für das Aufstellen von Solarzellenreihen auf Flachdächern formulieren:

- a) Je weiter die Reihen auseinander liegen, desto weniger besteht die Gefahr von Schatten am Morgen, am Abend und zur Winterszeit. Die Gefahr der gegenseitigen Beschattung darf nicht unterschätzt werden. Sie ist in der Regel

viel häufiger als die Beschattung der Solarzellenfelder durch den Horizont.

- b) Als Horizontüberhöhungswinkel b sollte ein Winkel von maximal 18° angenommen werden. Sollte die vorhandene Dachfläche klein sein, empfiehlt es sich vor allem im Mittelland, zuerst den Neigungswinkel des Solarzellenfeldes von zum Beispiel 35° auf 30° zu reduzieren. Damit sinkt der Einfluss der gegenseitigen Beschattung.

Lassen sich wegen Platzmangel die Reihen nicht weit genug voneinander montieren, muss mit Beschattung der hinteren Reihen gerechnet werden. Dies mindert vor allem die Produktion im Winter. Es empfiehlt sich dann, die elektrische Verschaltung der Solarzellen so vorzunehmen, dass die untersten Module in einem Strang liegen. Sie werden dann alle gleichzeitig durch die vordere Reihe abgeschattet. Auf diese Weise kann erreicht werden, dass innerhalb der Reihe die oben liegenden Module immer noch ihre volle Energie produzieren können.

3 Gefahren des Gleichstroms

3.1	Gleichstrom: Gefahr von Lichtbogenbildung	28
3.2	Gleichstrom-Brandrisiko	29
3.3	Elektrochemische Korrosion	30

3 Gefahren des Gleichstroms

Solarzellen erzeugen bei der Umwandlung von Lichtteilchen eine elektrische Gleichspannung, welche bei der Schliessung des äusseren Strompfades einen Gleichstrom zur Folge hat. Es ist wichtig, zu realisieren, dass Gleichstrom in vielen Belangen eine andere Wirkung hat als Wechselstrom. Es ist das Ziel dieses Kapitels, den Elektroinstallateur, der vor allem in der Wechselstromtechnik zu Hause ist, auf die besonderen Eigenschaften von Gleichstrom aufmerksam zu machen. Zu den ganz wesentlichen Eigenschaften gehört die erhöhte Gefahr von Lichtbogenbildung und damit ein nicht zu unterschätzendes Brandrisiko. Fliesst Gleichstrom über eine Kontaktstelle verschiedener oder gleichartiger Metalle, erhöht sich die Korrosionswirkung an der Kontaktstelle drastisch, sofern ein Elektrolyt (Feuchtigkeit) die Kontaktstelle umgibt. Damit können in kürzester Zeit korrosive Schäden induziert werden, die ohne das Vorhandensein eines Gleichstromes Jahre benötigen würden, um Elemente zu schädigen oder zu zerstören. Gleichstrom hat auf den menschlichen Körper ausserdem eine andere gefährdende Wirkung als Wechselstrom.

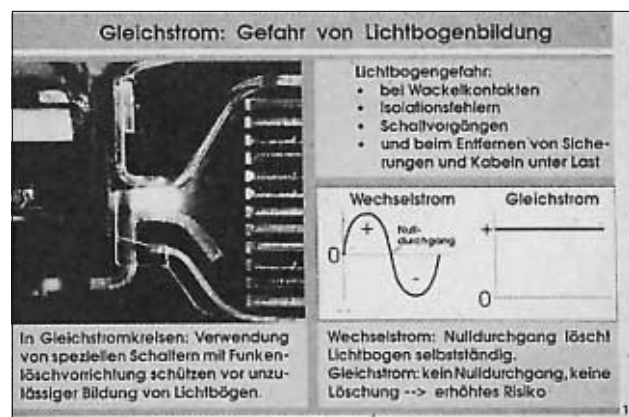
Im 18. Jahrhundert wurden elektrische Entladungen bei Bernsteinen und anderen Elementen als Kuriosität an barocken Festen zur Belustigung vorgeführt. «Aus einem lebendigen Körper fahrende Funken machen einen Hauptteil der Belustigung der Herren- und Frauenzimmer aus». Diese elektrischen Entladungen sind trotz der stets hohen Spannungen von einigen 1000 V harmlos, weil die damit verbundenen Ströme sehr klein sind. Nimmt dagegen die Stromstärke zu, steigt das Gefährdungspotential für Personen. Die Wirkungen von Gleich- und Wechselstrom auf den menschlichen Körper sind verschieden. Wechselströme von mehr als 20 mA können zu Veränderungen im Herzrhythmus führen. Wird der Herzmuskel durch die 50 Hz zu einer so schnellen Folge von Kontraktionen angeregt, dass das sogenannte «Herzkammerflimmern» eintritt, setzt die Pumpenwirkung des Herzens aus. Wird der Stromfluss unterbrochen, hört das Herzkammerflimmern meist auf oder kann durch einen Sanitätseingriff mittels Massage wieder rückgängig gemacht werden. Gleichströme dagegen verursachen wesentlich stärkere elektrochemische Vorgänge im Körper, vor allem im Nervensystem. Höhere Stromstärken führen ausserdem zu Verbrennun-

gen. Anlagen, die mit einer Gleichspannung unter 50 V arbeiten, sind prinzipiell ungefährlich. Bei Spannungen über 120 V sind spezielle Schutzmassnahmen notwendig.

Es ist darauf zu achten, dass das Tageslicht zurzeit der Dämmerung oder während eines bedeckten Himmels durchaus genügen kann, bei Solarzellenanlagen die volle Betriebsspannung zu erzeugen. Man muss deshalb bei der Verdrahtung der Solarzellenanlagen besondere Vorsicht walten lassen, weil die Betriebsspannung praktisch immer vorhanden ist.

Die Montage von Photovoltaikmodulen wird im allgemeinen während der hellen Tageszeit durchgeführt. Somit erfolgt die Verschaltung des Solarzellenfeldes unter anstehender Spannung.

Projektionsfolie 11



Gleichstrom: Gefahr von Lichtbogenbildung

Lichtbogenefähr:
 • bei Wackelkontakten
 • Isolationsfehlern
 • Schaltvorgängen
 • und beim Entfernen von Sicherungen und Kabeln unter Last

Wechselstrom Gleichstrom

In Gleichstromkreisläufen: Verwendung von speziellen Schaltern mit Funkenlöschvorrichtung schützen vor unzulässiger Bildung von Lichtbögen.

Wechselstrom: Nulldurchgang löscht Lichtbogen selbstständig.
 Gleichstrom: kein Nulldurchgang, keine Löschung -> erhöhtes Risiko

3.1 Gleichstrom: Gefahr von Lichtbogenbildung

Zwischen Leitern, welche unter Spannung stehen, herrscht ein elektrisches Feld. Diese Feldstärke nimmt mit steigender Spannung und mit abnehmender Distanz zwischen den Leitern zu. Wird die Distanz zwischen den Leitern sehr klein, wird die dazwischenliegende Luft durch das erhöhte Feld ionisiert. Bei Wechselstrom ändert sich das Feld 100 Mal in der Sekunde und verschwindet beim Nulldurchgang. Bei Gleichstrom dagegen ist die ionisierende Wirkung ununterbrochen. Damit ist die Gefahr der Lichtbogenbildung bei Gleichstrom

viel grösser. Bei gewöhnlichen Gleichstromanwendungen wäre dies nicht weiter schlimm, da Lichtbogenbildung die Charakteristik eines Kurzschlusses hat. Überstromschutzschalter wie zum Beispiel Sicherungen sprechen in diesen Fällen an. Bei einem Solarfeld gibt es diese Sicherungen nicht, da der Kurzschlussstrom gleich gross ist wie der Betriebsstrom und es daher keine Sicherungen geben kann, welche den Kurzschluss detektieren könnten.

Es ist wichtig, nochmals festzuhalten: Durch den Gleichstrom besteht eine viel grössere Gefahr der Lichtbogenbildung. Wegen der besonderen Charakteristik der Solarzellen (Stromquellen) ist es nicht möglich, diesen Lichtbogenstrom durch normale Sicherungen zu unterbinden.

Der Lichtbogen erreicht Temperaturen von einigen 1000°C. Die leitenden Metallteile beginnen zu schmelzen, die umliegende Isolation beginnt zu brennen, der Lichtbogen wandert der Isolation und den Leitern entlang. Es kann nicht stark genug auf diese Gefährdung hingewiesen werden. Die Installationsarbeiten an einer Solarzellenanlage erfordern eine erhöhte Aufmerksamkeit.

Lichtbogengefahr besteht insbesondere bei Wackelkontakten, bei Fehlern in der Isolation, bei Schaltvorgängen, beim Entfernen von Sicherungen unter Last und bei Verdrahtung des Feldes im geschlossenen Stromkreis.

Projektionsfolie 11 zeigt einen Lichtbogen in einem Schalter mit Funkenlöschvorrichtung. Durch die spezielle Anordnung der Kontakte wird der Lichtbogen beim Öffnen des Schalters gezwungen in einen Raum hineinzuwandern, wo er durch sogenannte Löschkammern unterdrückt wird.

Projektionsfolie 12





3.2 Gleichstrom-Brandrisiko

Bildet sich bei einer voll besonnten Solarzellenanlage erst einmal ein Lichtbogen, ist mit grosser Wahrscheinlichkeit mit Zerstörungen zu rechnen. Im vorgegebenen Beispiel war es eine kleine Ursache, die in einem Wechselstromkreis wahrscheinlich jahrelang zu keinen nennenswerten Betriebsstörungen geführt hätte. Im schlimmsten Fall wäre wahrscheinlich der Stromdurchfluss unterbrochen worden und man hätte bei der Fehlersuche die Ursache leicht entdeckt. Wegen den besonderen Eigenschaften von Solargeneratoren und von Gleichstrom entstand wegen eines Wackelkontaktes ein kleiner Lichtbogen. Dieser brannte die Kontaktstelle ab, wobei sich der Lichtbogen noch verstärkte. Ein derartiger Lichtbogen in einem Solarzellenfeld, das unter voller Sonne steht, kann zu einer enormen Hitzequelle werden. Der Schutzplastik der Klemme beginnt zu schmelzen, die Isolation der Zuleitungskabel beginnt zu brennen. Im vorliegenden Fall wurde der Fehler zufälligerweise vor Ausbrennen des Wechselrichters entdeckt.

Eine der grössten Anlagen der Welt, die Leistung liegt im Megawattbereich, fing in einem der Betriebsgebäude aufgrund eines Lichtbogens zwischen der Plus- und Minusleitung Feuer. Bei einem Megawatt Gleichstromleistung entsteht ein Lichtbogen von ungeheurem Energieinhalt. Dieser setzte innert kürzester Zeit das gesamte Betriebsgebäude in Brand. Die gesamte Umwandlungs- und Überwachungsanlage erlitt Totalschaden.

Projektionsfolie 13

Elektrochemische Korrosion	
 <p>Solarzellenfeld</p> <p>Streuströme</p>	<p>Elektrochemische Korrosion bei Solaranlagen kann entstehen durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Streuströme, welche z.B. durch Feuchtigkeit zwischen einem Plus- und einem Minuspol auf Modul-erde entstehen. • Kontaktkorrosion aufgrund von Lokalelementbildung.
 <p>Elektrolyt</p> <p>Kontaktkorrosion</p> <p>Korrosionsstelle</p> <p>Lokalelement</p>	<p>Massnahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Kontaktstellen vor Feuchtigkeit schützen. • Mechanische Verbindungen zwischen Metallen mit stark unterschiedlichen Standardpotenzialen vermeiden. • Schutzanstriche, Galvanisieren

Kommt neben der treibenden Kraft, welche normalerweise durch die Potentialdifferenz der beiden Metalle gegeben ist, noch eine äussere Gleichspannung dazu, kann die elektrochemische Reaktionsgeschwindigkeit um das 100fache gesteigert werden.

Die Verhinderung der elektrochemischen Korrosion in Solaranlagen geschieht indem die Kontaktstellen vor Feuchtigkeit geschützt werden und indem bei nicht geerdeten Gleichstromanlagen die Erdschlussüberwachung, sofern vorhanden, regelmässig überprüft wird.

3.3 Elektrochemische Korrosion

An den Berührungsstellen zweier verschiedener Metalle kann sich bei Zutritt von Feuchtigkeit ein galvanisches Element bilden. Der dabei fliessende Strom verursacht sogenannte Berührungs- oder Kontaktkorrosion.

Korrosion ist eine von der Oberfläche ausgehende Zerstörung eines Metalls durch chemische Umwandlung. Für das Zustandekommen einer elektrochemischen Korrosion müssen mindestens drei Voraussetzungen gegeben sein:

- a) ein Lokalelement, welches durch zwei verschiedene Metalle gebildet wird,
- b) eine leitende Verbindung zwischen den beiden Metallen und
- c) ein Elektrolyt, der mit dem Metall unter Ionenbildung in chemische Reaktion treten kann. Dabei muss die gefährdete Kontaktstelle nicht in eine grössere Flüssigkeitsmenge eingetaucht sein. Es genügt bereits ein Feuchtigkeitsfilm, der in der normalen Atmosphäre zum Beispiel durch Kondensation entstehen kann.

Die Geschwindigkeit der Korrosion hängt massgebend vom Elektrolyt ab. Ist die Luft salzhaltig, korrodieren die Elemente schneller. Dies ist auch der Grund, warum in Meeresnähe oder im Winter bei Salzanwendung auf Strassen die Korrosion besonders stark auftritt.

4 Solarzellentechnologie

4.1	Funktionsweise von Solarzellen	32
4.2	Aufbau von Solarmodulen	33
4.3	Elektrische Eigenschaften von Modulen	34
4.4	Wirkungsgrad und Zelltemperatur	35
4.5	Solarmodul: Generator ohne Kurzschlussleistung	36
4.6	Anschlussbox und Antiparalleldiode	36

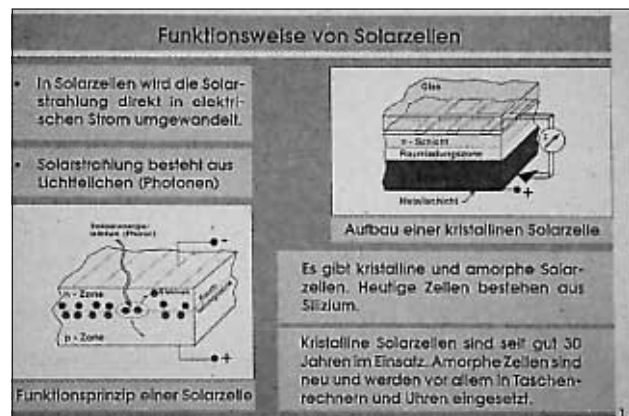
4 Solarzellentechnologie

Solarzellen sind das Kernstück der photovoltaischen Solarzellenkraftwerke. Aufgrund ihrer speziellen Struktur sind sie in der Lage, Lichtenergie direkt, das heisst ohne mechanische Wandler in elektrischen Strom umzusetzen. Neben der Funktionsweise sollen hier auch der Aufbau und die elektrischen Eigenschaften von Solarmodulen besprochen werden.

Die Solarzelle ist ein typisch industrielles Produkt. Die Fabrikation der Elemente wirft sehr komplexe Probleme auf. Ist dagegen das Element einmal fertig verpackt und zur Auslieferung bereit, sind nachfolgend keine Schwierigkeiten mehr auf der Baustelle zu erwarten.

Heute werden Solarzellen bzw. ganze Solarmodule mit sehr viel Handarbeit gefertigt. Eine Fertigungsstrasse von Solarzellen erinnert deshalb recht stark an einen Handwerksbetrieb und weniger an ein hochindustrialisiertes Produkt. Es ist aber schon heute abzusehen, dass sich diese Handproduktion in einen industriellen Prozess einbetten lässt, der weitgehend automatisiert wird. Spätestens zu jenem Zeitpunkt werden auch die Solarzellenpreise nochmals drastisch fallen. Die Geschwindigkeit dieser Entwicklung hängt nicht zuletzt auch von der Höhe der Förderungsbeiträge der öffentlichen Hand ab, die Technologie zu entwickeln. Etwa so, wie andere Energietechnologien auch bei ihrer Entwicklung gefördert werden.

Projektionsfolie 14

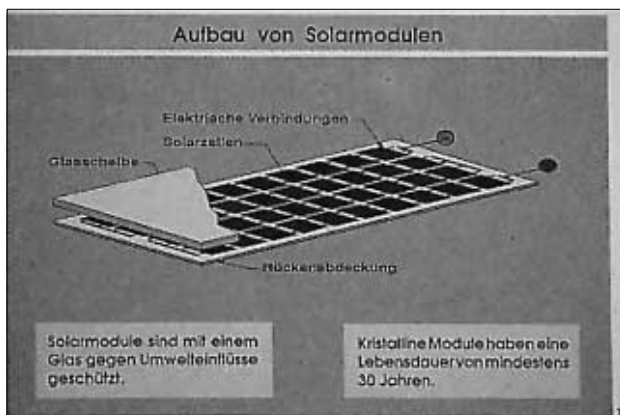


4.1 Funktionsweise von Solarzellen

Es gibt heute eine Vielzahl von verschiedenen Techniken, welche ermöglichen, die einfallenden Lichtteilchen in elektrische Energie umzuwandeln. Man kann sich vorstellen, dass die Sonnenenergie einem wahren Trommelfeuer von kleinen Lichtteilchen, den sogenannten Photonen, entspricht. Fällt ein Lichtteilchen in einer Solarzelle auf ein Atom und wird dort absorbiert, dann ist es aufgrund seiner abgegebenen Energie in der Lage, ein Elektron aus seiner ursprünglichen Bahn herauszuwerfen. Dieses Elektron ist nun frei. Durch die spezielle Anordnung der Solarzellen entsteht an der Grenzfläche der verschiedenen Schichten ein elektrisches Feld, welches dieses Elektron anzieht. Bei einer Solarzelle mit p- und n-dotierter Siliziumschicht entsteht das innere elektrische Feld im angrenzenden Bereich beider Schichten durch deren unterschiedlichen Eigenschaften. Sie werden erzeugt durch Legierungen von hochreinem Silizium mit Fremdatomen in sehr geringer Konzentration. p-Dotierung bedeutet das Einfügen von Boratomen in den Siliziumatomverband, n-Dotierung das Einfügen von Phosphoratomen. An der Grenzschicht zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Siliziumschichten bildet sich das oben erwähnte elektrische Feld aus. Fällt nun Licht auf diese Solarzelle, werden paarweise Ladungsträger (positive Löcher und negative Elektronen) erzeugt. Gelingt es den Ladungsträgerpaaren in den Be-

reich des elektrischen Feldes zu gelangen, ohne zu rekombinieren (das heisst sich zu vereinigen und sich damit gegenseitig zu neutralisieren), werden die Ladungsträgerpaare durch das elektrische Feld getrennt. Die Elektronen bewegen sich zur Frontseite der n-dotierten Schicht, werden über metallische Kontaktfinger gesammelt und fliessen in den äusseren Gleichspannungsstromkreis weiter. Die Löcher bewegen sich zur p-dotierten Schicht und tragen so zu einem Strom bei, der über den vollflächigen, metallischen Rückkontakt in den Stromkreis zum Frontgitter fliesst.

Projektionsfolie 15



4.2 Aufbau von Solarmodulen

Die eigentliche Solarzelle besteht aus einer hauchdünnen Schicht Silizium, in welcher die Umwandlung des Sonnenlichtes in elektrische Energie stattfindet. Diese empfindlichen kristallinen Schichten müssen gegen die Einwirkungen der Umwelt geschützt werden. Dies sind vor allem mechanische Belastungen und korrosive Wirkungen der Luft. Heutige kristalline Solarzellenmodule bestehen in der Regel aus mehreren Solarzellen, welche meist seriell verschaltet sind und rund 10 x 10 cm messen. Dieser Verbund von einzelnen Solarzellen muss nun so verpackt werden, dass er

a) optimal gegen schädliche Umwelteinflüsse geschützt ist und

b) das Sonnenlicht ungehindert durchlässt, und so die Sonnenenergie möglichst effizient zur elektrischen Stromerzeugung genutzt werden kann.

Für Solarmodule, welche in ortsfesten Energieanlagen installiert werden, hat sich die Verwendung von Glas auf der Frontseite durchgesetzt. Damit wird erreicht, dass das Sonnenlicht mit nur wenigen Prozenten Verlust auf die Solarzelle auftrifft. Gleichzeitig wird ein langlebiger Schutz der Module erreicht.

Um auch die Rückseite der Zellen vor Feuchtigkeit und Umwelteinflüssen zu schützen, werden dort Kunststofffolien (in der Regel sind es Tedlarfolien) oder Glasabdeckungen verwendet. Um zwischen den drei Schichten – Frontglasabdeckung, Solarzellen und rückseitige Schutzschicht – einen stabilen und langlebigen Verbund herzustellen, wird in einem speziellen Verfahren ein robustes und langlebiges Laminat hergestellt. Als verbindende Kunststoffmasse wird vorzugsweise eine vernetzbare Äthylvinylchlorid (EVA)-Folie verwendet. Verletzungen der Schutzschichten können nicht nur zu Funktionseinbussen, sondern auch zu drastischer Reduktion der Lebensdauer führen.

Die verschiedenen Schichten sind sandwichartig aufgebaut. Die Schichtfolge sieht von der Sonnen- seite aus betrachtet, wie folgt aus: Glas als obere Abdeckungsschicht, eine EVA-Folie, die Solarzellen, ein Glasgewebe als Luftevakuierungsschicht, eine EVA-Folie und rückseitig entweder eine Tedlarkunststoffolie oder wiederum eine Glasschicht. Der Verarbeitungsprozess läuft in der Regel so ab: In einem speziellen Laminiergerät wird vorgängig die Luft aus den einzelnen Schichten entfernt, um zu erreichen, dass möglichst wenig korrosive Einflüsse nach dem Laminierprozess noch in Kontakt mit den empfindlichen Solarzellen sind. Nach dem Evakuierungsprozess wird der Verbund auf rund 150° erwärmt und unter Druck werden nun die Rück- und die Frontseite leicht zusammengedrückt. Die dazwischenliegende Kunststoffolie ist unter der Wärmeeinwirkung praktisch flüssig geworden und füllt alle Poren und Hohlräume zwischen den Zellen und den Verbindungsleitern. Beim nachfolgenden Erstarren wird sie glasklar und damit durchsichtig für das Sonnenlicht.

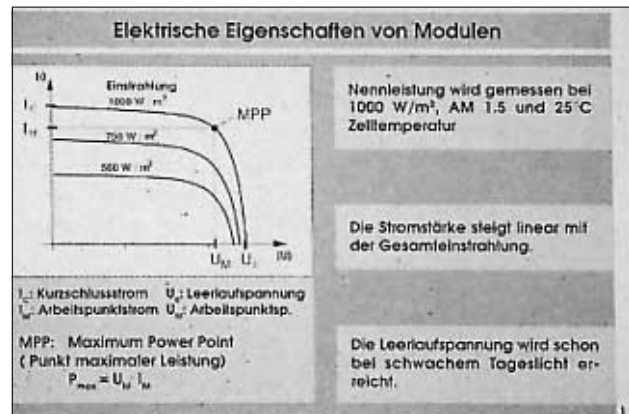
Ein kritischer Punkt des Verfahrens ist die Herausführung der elektrischen Anschlüsse aus dem Modul. Die Modulhersteller entwickeln dazu spe-

zielle Anschlusstechniken, welche garantieren, dass entlang den Zuleitungen keine Feuchtigkeit und Luftmoleküle in den Verbund hineingelangen. Bei den Modulen mit Kunststoffabdeckungen wird diese Kunststoffolie auf der Rückseite meist durchbrochen, um die Leiterbahnen herauszuführen. Die Plus- und Minusleitungen werden in der Anschlussbox auf Klemmen geführt. Die Anschlussboxen werden meist auf die Modulrückseite geklebt. Eine nachträgliche Versiegelung der Anschlussboxen mit einem speziellen Kunststoff verhindert weitgehend den Zutritt der korrosiven Stoffe aus der Luft zu den Zellen.

Bei Glas-Glas-Modulen werden die Anschlüsse meist am Modulrand herausgeführt. Diese elektrische Anschlussführung ist für das Modul selber sehr unkritisch, hat aber oft zum Nachteil, dass die Spannungsfestigkeit gegenüber einem Metallrahmen, welcher das Modul einfasst, zu einem kritischen Punkt wird.

Die Spannungsfestigkeit eines Modules ergibt sich aus dem Isolationswiderstand zwischen einem der beiden leitenden Teile und dem einfassenden Aluminiumrahmen bzw. anderen metallischen Strukturen zur Befestigung des Moduls, welche geerdet sind. Die internationalen Testspezifikationen legen in der Regel eine Prüfspannung von zwei Mal der Leerlaufspannung des Feldes plus 1000 V fest. Die Problematik der Prüfspannung hängt wesentlich von der Konstruktion der Anschlüsse der Plus- und Minusleitungen und der Anschlussboxen ab. In der Regel darf jedoch vorausgesetzt werden, dass die bekannten Fabrikate die Tests bestanden haben und die Spannungsfestigkeit gegeben ist. Bei amorphen Siliziumzellen, welche zurzeit noch nicht in grösserem Massstab für ortsfeste Anlagen zur Energieerzeugung eingesetzt werden, wird die Solarzellenschicht durch den Herstellungsprozess direkt auf die Glasplatte der Frontseite aufgebracht. Die Rückseite dieser einfachen Zelle wird entweder mit einem Lackanstrich oder einem Verbund mit einer zweiten Glasscheibe gegen die rückseitigen Umwelteinflüsse geschützt.

Projektionsfolie 16



4.3 Elektrische Eigenschaften von Modulen

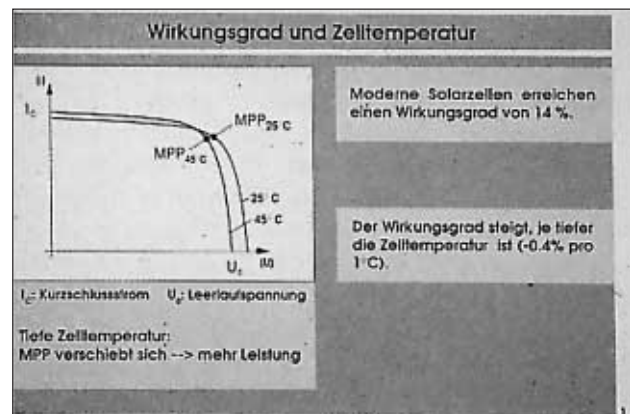
Der photovoltaische Effekt erzeugt vorerst an den Plus- und Minusklemmen der Solarzellen eine Gleichspannung. Erst wenn eine äussere Last angeschlossen wird, fliesst ein Gleichstrom. Je nach Stärke der Einstrahlung, der Solarzellentemperatur und der Charakteristik der angeschlossenen Last wird sich eine Betriebsspannung und ein Betriebsstrom einstellen. Aus der Fülle der möglichen Betriebszustände, bei welchen die Solarzelle Energie liefert, gibt es gerade einen Strom-Spannungs-Zustand, bei welchem die Zelle ihre maximal mögliche Leistung abgibt. Es ist eine wichtige Aufgabe des Solaringenieurs, die Anlage so zu planen, dass die Solarzellen bzw. die Module und das gesamte Feld immer möglichst in diesem Arbeitspunkt maximaler Leistungsabgabe arbeiten.

Die heute auf dem Markt käuflichen Solarwechselrichter verfügen deshalb meist über einen eingebauten «Max-Power-Tracker». Dieser regelt den Stromfluss derart, dass das Produkt von Spannung und Strom aus dem Solarzellenfeld immer maximal ist.

Die elektrische Eigenschaft des Solargenerators wird in der Regel in einem Strom-Spannungskennlinienfeld dargestellt. Dabei wird auf der Horizontalachse die Spannung, auf der vertikalen Achse der Strom aus der Solarzelle aufgetragen. Es ergeben sich einige Besonderheiten:

- Fließt kein Strom aus der Solarzelle, so ergibt sich auf der x-Achse die Leerlaufspannung U_0 der Solarzelle, welche in erster Linie von der Zelltemperatur und in zweiter Näherung von der augenblicklichen Einstrahlung abhängt.
- Werden die Anschlüsse einer Solarzelle bzw. eines Solarmoduls kurzgeschlossen, ergibt sich auf der vertikalen Achse der sogenannte Kurzschlussstrom I_c .
- Zwischen den Betriebszuständen «Leerlauf» und «Kurzschluss» ergibt sich eine Fülle von möglichen Lastzuständen, wobei sich Strom- und Spannungswerte entsprechend der Solarzellen-Kennlinie einstellen werden. Wird die Solarzelle gerade so belastet, dass sich die Spannung U_{max} und der Strom I_{max} einstellt, dann ist die abgegebene Leistung $P = U_{max} * I_{max}$ maximal.
- Sinkt die Einstrahlung, so verringert sich in erster Linie der verfügbare Solarzellenstrom. Der Zusammenhang zwischen Kurzschlussstrom und Einstrahlung ist praktisch linear.
- Sinkt die Solarzellentemperatur, dann steigt die Leerlaufspannung. Die Strom-Spannungs-Charakteristik verschiebt sich nach rechts und die verfügbare mögliche Leistung steigt. Anders ausgedrückt: bei Erwärmung sinkt die Leistung. Es ist deshalb wichtig, bei der Installation dafür zu sorgen, dass die Solarmodule optimal hinterlüftet werden.

Projektionsfolie 17



4.4 Wirkungsgrad und Zelltemperatur

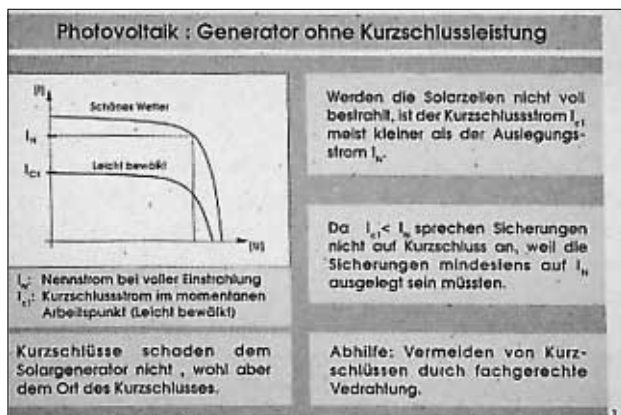
Die maximale Nennleistung, die eine Solarzelle im Max-Power-Point (MPP) abgeben kann, wird bei einer Solareinstrahlungsstärke von 1000 W/m^2 senkrechtem Lichteinfall, einer Zelltemperatur von 25°C und einem Sonnenlichtspektrum von AM 1,5 angegeben. Die Grösse AM 1,5 bezeichnet dabei die geometrische Länge, welche das Sonnenlicht bei schrägem Einfall auf die Erdatmosphäre durchquert. AM = 1 bedeutet dabei, dass die Sonne senkrecht zur Erdoberfläche steht und der Pfad durch die Lufthülle minimal ist. Bei schrägem Lichteinfall durchquert das Sonnenlicht eine grössere Luftmasse in der Erdatmosphärenhülle und damit steigt der Verlust des eingefallenen Sonnenenergie-Angebotes. Die Dämpfung ist dabei jedoch nicht für sämtliche Wellenlängen genau gleich. Die Definition AM 1,5 definiert deshalb ein ganz spezifisches Sonnenspektrum, welches auch in einer Norm definiert ist. Man spricht dann von einer Nennleistung bei «Standard Test Conditions – STC».

In Abweichung zu den meist verwendeten STC-Angaben findet man häufig auch die Angabe NOCT. Diese entspricht der Temperatur, welche das Solarmodul unter folgenden Umweltbedingungen einnehmen würde: 800 W/m^2 senkrechter Lichteinfall, eine Windgeschwindigkeit von 1 m/sec und eine Umgebungstemperatur von 25°C . Typische NOCT-Werte (Normal Operating Cell

Temperature) betragen 45° bis 48°. Das bedeutet, dass die eigentliche Solarzellen rund 45° bis 48° warm werden, wenn das Modul den obigen Umweltbedingungen ausgesetzt ist.

In der Regel geben Solarzellenhersteller und -lieferanten 10 Jahre Betriebsgarantie auf die Solarmodule. Je nach Produkt wird diese Angabe mit einer Streuung der Leistung von ±10% behaftet. Das heisst im Klartext, dass ein Solarmodul mit einer Nennleistung von 50 W nach 10 Jahren noch mindestens 45 W elektrische Leistung abgeben muss.

Projektionsfolie 18



Photovoltaik : Generator ohne Kurzschlussleistung

Werden die Solarzellen nicht voll bestrahlt, ist der Kurzschlussstrom I_{sc} meist kleiner als der Auslegungsstrom I_n .

Da $I_{sc} < I_n$ sprechen Sicherungen nicht auf Kurzschluss an, weil die Sicherungen mindestens auf I_n ausgelegt sein müssten.

I_n : Nennstrom bei voller Einstrahlung
 I_{sc} : Kurzschlussstrom im momentanen Arbeitspunkt (Leicht bewölkt)

Kurzschlüsse schaden dem Solargenerator nicht, wohl aber dem Ort des Kurzschlusses.

Abhilfe: Vermeiden von Kurzschlüssen durch fachgerechte Verdrahtung.

4.5 Photovoltaik: Generator ohne Kurzschlussleistung

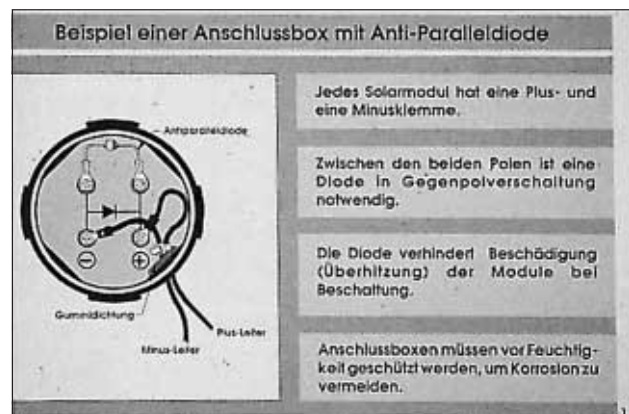
Überall, wo elektrische Spannung erzeugt bzw. durch die Verdrahtung gegeben ist, besteht die Gefahr eines Kurzschlusses. Bei normalen Generatoren steigt in einem Kurzschlussfall der Kurzschlussstrom auf das Vielfache des normalen Nennstromes. Dieser überhöhte Kurzschlussstrom wird in der Elektrotechnik mit einfachen Sicherungen oder Sicherungsautomaten unterbrochen. Die Auslösung dieser Sicherungselemente geschieht durch den überhöhten Kurzschlussstrom selber.

Eine Solarzelle ist ein Novum in der Art der elektrischen Energieerzeugung. Neu ist, dass der Kurz-

schlussstrom bei maximaler Einstrahlung nur etwa 10% über dem Nennstrom liegt. Wenn die Sonne nicht mit 1000 W/m² senkrecht auf das Solarzellenfeld auftrifft, und das ist meist der Fall, ist der Kurzschlussstrom sogar kleiner als der Nennstrom. Damit ist klar, dass die üblichen Sicherungselemente versagen, da der Solarzellengenerator die notwendige Kurzschlussleistung nicht liefern kann.

Neu ist auch, dass der Kurzschluss für die Solarzelle einen erlaubten Betriebszustand darstellt. Die Solarzelle erleidet in diesem Betriebszustand keinen Schaden. Sie wird also im Falle eines Kurzschlusses zwischen zwei Leitungen weiterhin den Kurzschlussstrom entsprechend dem einfallenden Sonnenlicht liefern. Entsteht an der Stelle des Kurzschlusses ein Lichtbogen, bildet dieser eine nicht zu unterschätzende Brandgefahr. Die einzige Abhilfe zur Vermeidung dieser Situation ist das fachgerechte Verlegen der Verdrahtungen.

Projektionsfolie 19



Beispiel einer Anschlussbox mit Anti-Parallel-diode

Jedes Solarmodul hat eine Plus- und eine Minusklemme.

Zwischen den beiden Polen ist eine Diode in Gegenpolverschaltung notwendig.

Die Diode verhindert Beschädigung (Überhitzung) der Module bei Beschaltung.

Anschlussboxen müssen vor Feuchtigkeit geschützt werden, um Korrosion zu vermeiden.

4.6 Beispiel einer Anschlussbox mit Anti-Parallel-diode

Das Solarmodul verfügt über eine Plus- und eine Minus-Klemme, von welchen aus die Verdrahtung weiter geführt wird. Im Laufe der Entwicklung der Solarmodule wurden eine Vielzahl von verschiedenen Anschlussboxen entwickelt. Bei den heute gebräuchlichen Boxen ist darauf zu achten,

- dass die Anschlüsse von unten in die Box hineingeführt werden können. So wird verhindert, dass Wasser den Kabeln entlang einlaufen kann.
- dass genügend Raum zum sauberen Anschließen der Kabel vorhanden ist.
- dass genügend Raum für eine Antiparalleldiode vorhanden ist.
- dass die Anschlussschrauben festsitzen und nicht leicht verdreht werden können, so dass die Solarzelle immer noch elektrisch einwandfrei mit der Anschlussklemme verbunden ist.
- dass ein Deckel gegen unerlaubtes Berühren schützt. In der Regel sollte die Box so ausgeführt werden, dass der Deckel nur mit Hilfe eines Werkzeuges entfernt werden kann. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn höhere Betriebsspannungen eingesetzt werden.

Die zwischen dem Plus- und Minuspol liegende Diode wird in Antiparallelschaltung eingebaut (Anode der Diode auf Minus des Solarzellenmoduls, Kathode der Diode auf Plus des Solarmoduls). Die Diode verhindert das Erwärmen bzw. Zerstören der Solarmodule bei teilweiser Beschattung.

Das Ansammeln von Wasser in den Anschlussboxen soll auf alle Fälle verhindert werden. Bei Wasserrückständen findet eine sehr schnelle Korrosion zwischen den stromführenden Teilen statt. Aber auch die Feuchtigkeit alleine kann schon Ursache von erheblichen Korrosionsschäden sein. Deshalb müssen die Anschlussboxen so gestaltet sein, dass möglichst keine Feuchtigkeit eindringen kann.

Die Antiparalleldioden sind immer einzusetzen. Bei manchen Modulen sind sie schon eingebaut, bei anderen werden sie lose mitgeliefert oder sind separat zu kaufen.

5 Solarzellenfeld

5.1	Solarzellenfeld: Serie- und Parallelschaltung	40
5.2	Serieschaltung mehrerer Solarmodule	41
5.3	Parallelschaltung mehrerer Stränge	41
5.4	Folgen bei Über- bzw. Unterdimensionierung	42
5.5	Kleiner Schatten, grosser Verlust	42
5.6	Teilbeschattung: Gefahr für die Solarzelle	43
5.7	Klemmenkasten: Verbindung von Solarzellenfeld und Wechselrichter	43
5.8	Beispiel eines Klemmenkastens	44
5.9	Klemmen	44
5.10	Sicherungen/Dioden	44
5.11	Überspannungsableiter	44
5.12	Gleichstrom-Leitungstrenner	45
5.13	Montage des Klemmenkastens	45
5.14	Blitzschutzanlage	45
5.15	Äusserer Blitzschutz	45
5.16	Innerer Blitzschutz	45
5.17	Erdungskonzept – Blitzschutz – Systemerde	46
5.18	Gebäude ohne Blitzschutz	46
5.19	Gebäude mit Blitzschutz	46

5 Solarzellenfeld

Unter dem Solarzellenfeld verstehen wir die Gesamtheit aller einzelnen Solarzellenmodule, welche mechanisch und elektrisch zu einer Einheit zusammengeschaltet sind.

Die Anzahl der in Reihe zu schaltenden Solarmodule richtet sich nach der Höhe der Eingangsspannung des Wechselrichters. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die grösstmögliche Leerlaufspannung des Solarzellenfeldes ungefähr 1,5 mal höher als die Betriebsspannung (auch Nennspannung genannt) betragen kann.

Diese grösstmögliche Leerlaufspannung des Solarzellenfeldes legt zugleich die Anforderungen an die Spannungsfestigkeit der Verdrahtung und der Photovoltaikmodule fest. Diese ergibt sich aus 2 mal der Leerlaufspannung plus 1000 V. Beträgt zum Beispiel die Betriebsspannung einer 3 kW-Solarzellenanlage 100 V, so muss bei tiefen Ausentemperaturen und klarer Einstrahlung von 1000 W/m² mit einer Leerlaufspannung von bis zu 150 V gerechnet werden. Die Testspannung für die Verdrahtung und die Module errechnet sich dann zu $2 \times 150 + 1000 = 1300$ V.

Durch die Parallelschaltung der Stränge werden die einzelnen Strombeiträge addiert. Bei Kurz- und Erdschlüssen können verschiedene Fehlerströme auftreten, welche zu Lichtbogenbildung und damit zu Brandursachen führen können. Es ist deshalb bei allen Arbeiten auf fachgerechte Verkabelung zu achten.

Werden die Solargeneratoren (über der Dachebene) auf ein bestehendes Dach montiert (retrofit), ergeben sich zusätzliche Belastungen für das Dach. Diese resultieren einerseits aus dem Eigengewicht der Module und der metallischen Tragkonstruktion und andererseits aus den möglichen induzierten Windlasten.

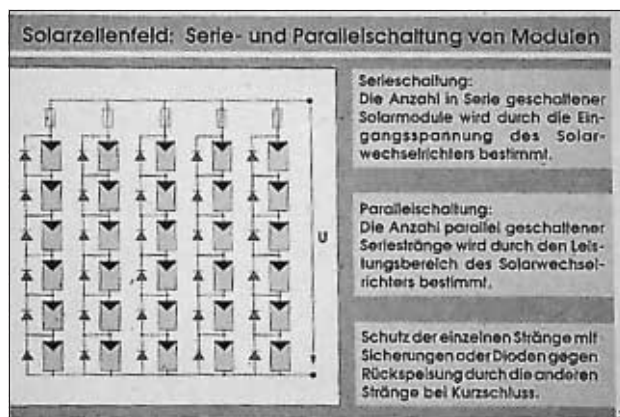
Die Zusatzlasten von rund 15 kg/m² Modulfläche dürfte in der Regel 15% der Gesamtlast nicht überschreiten, für welche die Dachkonstruktion ausgelegt ist.

Die induzierten Windlasten können aber erheblich sein und müssen bei der Auslegung der Stütz- und Tragstrukturen berücksichtigt werden. Selbstverständlich werden die Zusatzgewichte der Schneelasten ebenfalls in die Berechnung der Unterkonstruktion miteinbezogen.

Das Solarzellenfeld ist dem Sonnenlicht ausgesetzt. Damit sind auch die meisten Solarzellenfelder für aussenstehende Beobachter einsehbar. Es

ist deshalb auf eine möglichst geeignete Integration der Felder in die Haushülle zu achten. So wird man zum Beispiel bei Schrägdächern auf ein Anwinkeln der Module aus der Dachebene heraus zugunsten einer besseren Ästhetik verzichten. Ebenso wird man auf Flachdächern versuchen, nicht allzu hohe Gestelle zu installieren, um mit einer feingliedrigen Struktur weniger Aufsehen zu erregen.

Projektionsfolie 20

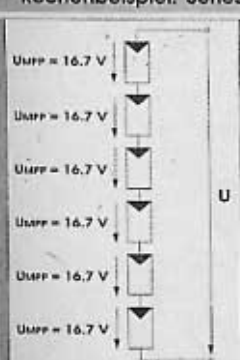


5.1 Solarzellenfeld: Serie- und Parallelschaltung von Modulen

Bei der elektrischen Zusammenschaltung unterscheiden wir jeweils zwischen Serie- und Parallelschaltung.

Projektionsfolie 21

Rechenbeispiel: Serieschaltung mehrerer Solarmodule



Gegeben:

- Solarwechselrichter Typ WR 1 mit
 - Eingangsspannungsbereich 80-120 VDC
- Solarmodul Typ VOLT 1 mit
 - Leerlaufspannung 25 VDC
 - optimale Arbeitsspannung 16.7 VDC

Gesucht:

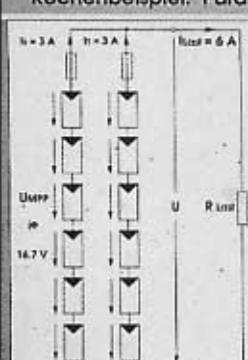
- Anzahl Module in Serieschaltung

Lösung:

- Mittlere Eingangsspannung des Wechselrichters dividiert durch die optimale Arbeitsspannung eines Moduls ergibt gerundet sechs Module in Serie.

Projektionsfolie 22

Rechenbeispiel: Parallelschaltung mehrerer Stränge



Gegeben:

- Wechselrichter Typ WR 1 mit
 - Nennleistung $P_{WR} = 3 \text{ kW}$
 - maximaler Eingangstrom $I_{WR} \approx 30 \text{ A}$
- Solarmodul Typ VOLT 1 mit
 - Nennleistung bei STC $P_{Modul} = 50 \text{ W}$
 - optimaler Arbeitsstrom $I_{opt} = 3.0 \text{ A}$

Gesucht: Anzahl parallele Stränge

Lösung 1:

- Leistung P_{WR} des Wechselrichters dividiert durch die Leistung P_{Modul} eines Moduls: $3 \text{ kW} / 50 \text{ W} = 60 \text{ Module}$.
 --> 10 Stränge à 6 Module

Lösung 2:

- Eingangsstrom I_{WR} des WR dividiert durch den gemittelten Strangstrom I_{opt} : $30 \text{ A} / 3 \text{ A} = 10 \text{ Stränge}$

5.2 Serieschaltung mehrerer Solarmodule

Werden einzelne Module in Serie miteinander verbunden, so addieren sich die Spannungen der einzelnen Module. Die Serieschaltung erreichen wir durch Verbinden des negativen Pols des ersten Moduls mit dem positiven Pol des zweiten Moduls. Die Anzahl der Module in Serie hängt von der Betriebsspannung des Wechselrichters ab. Bei jedem Wechselrichter ist immer ein Eingangsspannungsbereich angegeben, z. B. 80-120 V. Mit den Modulen des obigen Beispiels könnten wir somit dazu verleitet werden, nur fünf oder allenfalls sieben Module in Serie zu schalten. Da die Modulspannung aber stark mit der Zellentemperatur schwankt, ist unbedingt darauf zu achten, die Betriebsspannung der Serieschaltung auf den mittleren Spannungsbereich des Wechselrichters (also ca. 100 V) auszulegen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass sich der Wechselrichter wegen Unter- bzw. Überspannung automatisch vom Netz trennt. Die Modulspannung ändert sich dagegen kaum mit der Einstrahlungsstärke. Eine Berücksichtigung der verschiedenen Einstrahlungsstärken der verschiedenen Standorte in Bezug auf die Modulanzahl ist somit nicht notwendig.

5.3 Rechenbeispiel: Parallelschaltung mehrerer Stränge

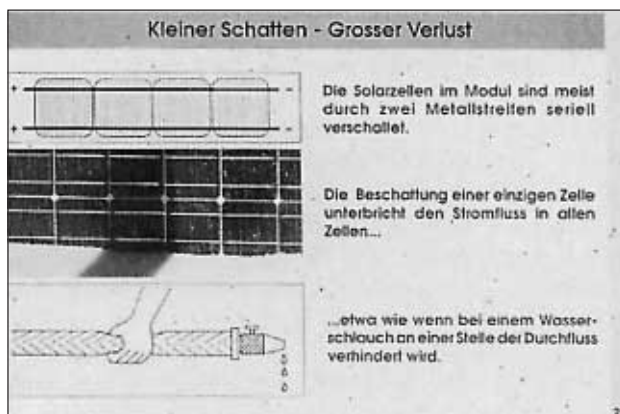
Werden die einzelnen Module parallel miteinander verbunden, so addieren sich die Leistungen der einzelnen Modulstränge bei gleichbleibender Modulspannung. Die Parallelschaltung einzelner Solarmodule erreichen wir durch Verbinden der gleichen Pole, also positiv mit positiv bzw. negativ mit negativ. Die Anzahl parallel zu verbindender Stränge hängt von der Leistung bzw. der Größe des Eingangstromes des Wechselrichters ab. Bei jedem Wechselrichter ist neben der Nennleistung immer auch der höchstzulässige Eingangstrom angegeben. Somit besteht die Möglichkeit, die Anzahl Parallelschaltungen nach dem höchstzulässigen Eingangstrom auszulegen. Der Zellenstrom steigt linear zur Einstrahlungsstärke an. Diese ist wiederum abhängig von den Anlageparametern, den meteorologischen Verhältnissen und den geographischen Randbedingungen. Wenn nun ein Solarzellenfeld eine ungünstige Ausrichtung aufweist und dazu noch in einem nebligen Gebiet gebaut wird, so muss die Größe des Solarzellenfeldes resp. die Anzahl der parallelen Stränge erhöht werden. Eine optimal ausgerichtete Anlage in den Bergen kann demgegenüber kleiner ausgelegt werden.

5.4 Folgen bei Über- bzw. Unterdimensionierung

Wird das Solarzellenfeld überdimensioniert, so wird sich der Wechselrichter bei Überstrom, Überspannung oder zu hoher Kühlblechtemperatur automatisch vom Netz trennen. Moderne Wechselrichter haben für solche Fälle eine Regelelektronik, welche aus dem optimalen Arbeitspunkt herausführen und so ein Überschreiten der Grenzwerte verhindern.

Wird eine Anlage unterdimensioniert, so werden die Einschaltkriterien bei nebligem oder schlechtem Wetter zu häufig unterschritten. Über ein Jahr gesehen, kann somit ein beträchtlicher Teil der Energie verloren gehen, da der Wechselrichter nicht arbeiten kann.

Projektionsfolie 23



5.5 Kleiner Schatten – grosser Verlust

In netzverbundenen Solarzellenanlagen werden Module in Serie geschaltet, um die notwendige Betriebsspannung zu erreichen. Soll zum Beispiel eine Betriebsspannung von 100 V erreicht werden, werden wie in Projektionsfolie 21 dargestellt, sechs Module in Serie geschaltet. Das heisst, dass ein Elektron, welches im ersten Modul erzeugt wird, durch alle sechs Module durchlaufen muss, um am Schluss einen Beitrag zum Strangstrom zu leisten.

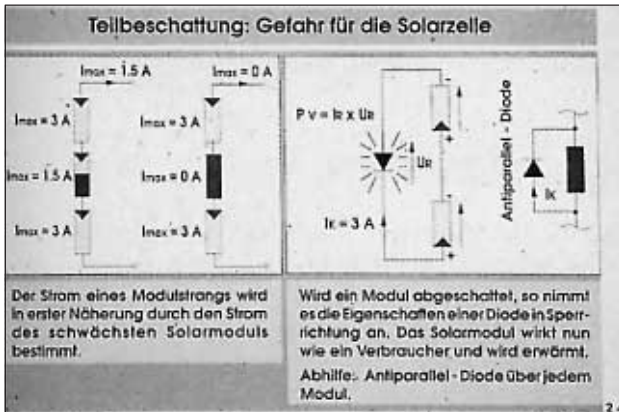
Ein analoges Beispiel wäre die Hintereinanderschaltung von sechs Wasserpumpen. Durch jede folgende Pumpe wird der Gesamtdruck erhöht. Das in der ersten Pumpe beförderte Wasserteilchen muss dabei jedoch notgedrungen durch alle sechs Pumpen durchlaufen, auch wenn damit der Druck im Wasser nach jeder Pumpe nochmals ansteigt. Blockiert eine einzige Pumpe in einem solchen System, kann damit der ganze Wasserfluss versiegen. Um für einen solchen Fall die Arbeit der andern Pumpen nicht zu stören, wird über jede einzelne Pumpe ein Bypass-Ventil geschaltet. Blockiert nun eine Pumpe, kann das Wasser wenigstens durch dieses Bypass-Ventil weiterströmen, wenn damit auch der Gesamtdruck etwas niedriger ist als wie wenn alle sechs Pumpen einwandfrei arbeiten würden.

Ähnlich verhält es sich bei der Serieschaltung der Solarmodule. Wird ein einziges Modul beschattet, hat dies eine Reduktion des Gesamtstromes zur Folge. Durch Bypass-Dioden (auch Antiparalleldiode genannt) kann verhindert werden, dass der Strom total versiegt. Zudem sorgt die Bypass-Diode dafür, dass das beschattete Solarmodul nicht zu einem Verbraucher wird und sich dadurch sogar erwärmen würde. Nicht nur die Serieschaltung von Modulen, sondern auch die Serieschaltung von Zellen hat selbstverständlich in obiger Darstellung die Konsequenz, dass bei einer Teilbeschattung einer oder mehrerer Zellen der Gesamtfluss durch den Strang drastisch gesenkt werden kann. Bildlich entspricht dies ungefähr der Situation, wie wenn an einem langen Schlauch an einer einzigen Stelle der Wasserfluss behindert wird. Auch wenn der andere Teil des Schlauches noch vollständig intakt und zur Wasserführung bereit wäre, genügt das Einschnüren an einer Stelle, um den Gesamtdurchfluss zu unterbinden.

Die Teilbeschattung kann selbstverständlich in Realität nicht immer unterbunden werden. Dazu reichen meist schon Kamine oder Nachbargebäude. Die Teilbeschattung während bestimmten Tageszeiten lässt sich in realen Anlagen kaum verhindern. Es ist daher um so wichtiger, die vorgeschlagenen Antiparalleldioden auch immer fachgerecht in die Anschlussbox miteinzubauen.

Projektionsfolie 24

Teilbeschattung: Gefahr für die Solarzelle



Der Strom eines Modulstrangs wird in erster Näherung durch den Strom des schwächsten Solarmoduls bestimmt.

Wird ein Modul abgeschattet, so nimmt es die Eigenschaften einer Diode in Sperrrichtung an. Das Solarmodul wirkt nun wie ein Verbraucher und wird erwärmt. Abhilfe: Antiparalleldiode über jedem Modul.

5.6 Teilbeschattung: Gefahr für die Solarzelle

Um das Modul vor einer Zerstörung durch Beschattung zu schützen, schalten wir über jedes Modul eine Antiparalleldiode. Somit kann bei einer Beschattung, wie oben beschrieben, der Seriestrom der übrigen Module durch diese Antiparalleldiode fließen. Über dieser Diode fällt nun statt wie normal +17 V eine Spannung von ca. -1 V ab. Die restlichen in Serie geschalteten Solarmodule versuchen nun diese Spannungsverminderung zu kompensieren. Sie erhöhen ihren Spannungsbeitrag und gemäss der I-U Kennlinie resultiert ein kleinerer Seriestrom. Das Produkt von Spannung und Strom ist in diesem Falle immer kleiner als im optimalen Arbeitspunkt. D.h. ein abgeschattetes Modul vermindert nicht nur seinen eigenen Leistungsbeitrag, sondern auch denjenigen der übrigen in Serie geschalteten Module.

Projektionsfolie 25

Klemmenkasten: Verbindung von Zellen und Wechselrichter



Funktion: elektrisches Interface zwischen Solarzellensträngen und Solarwechselrichter.

Spezifikation:

- Jeder Strang an je eine +/- Klemme
- Pro Abgang eine Sicherung und/oder Diode
- Ein Trennschalter zwischen Zelle und Hauptkabel

Zwischen Plus und Minus wird je ein Überspannungsableiter gegen Erde geschaltet.

Der Kasten soll gross sein, um die Verkabelung sauber ausführen zu können und um die Wartung zu erleichtern.

Verwenden Sie für die Plus und Minus - Leitungen verschiedene Farben. Sie vermeiden Fehler und erleichtern den Unterhalt.

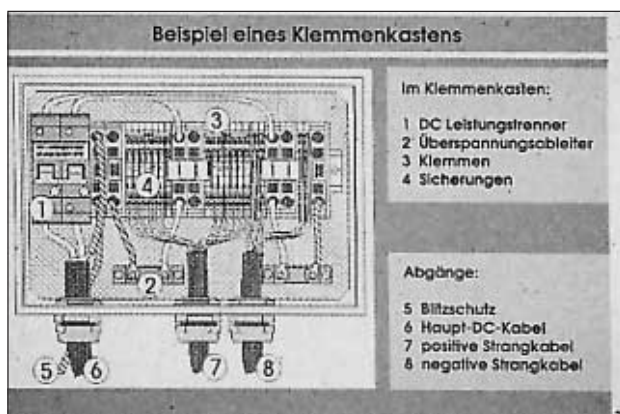
5.7 Klemmenkasten: Verbindung von Zellen und Wechselrichter

Bei der mechanischen Befestigung der Solarmodule auf dem Gebäude werden diese gleichzeitig auch verdrahtet. Es entsteht dabei eine Vielzahl von Strängen. Die Plus- und die Minuspole eines Stranges werden in den Klemmenkasten geführt. Der Klemmenkasten ist einerseits Schnittstelle zwischen den Solarzellensträngen und dem Solarwechselrichter und vereinigt andererseits die vielen parallelen Stränge zu einer einzigen Plus-Minus-Leitung. Jeder Strang ist mit einer Sicherung gegen Rückspeisung aus anderen Strängen (im Kurzschlussfall) zu schützen. Die Sicherungen dürfen nicht unter Last ausgewechselt werden. Die Weiterführung zum Wechselrichter sollte über einen Leitungsschalter abgesichert sein. Strangsicherungen dienen dazu, den Leiterquerschnitt eines Stranges gegen Rückspeisung aus den anderen Strängen abzusichern. Es gelten diesbezüglich die Hausinstallationsvorschriften (HV), die sinngemäss angewandt werden. Zum Schutze der Module werden vor allem bei höheren Spannungen zusätzlich Strangdioden eingesetzt. Bei tiefen Spannungen werden sie wegen ihren Verlusten und dem kleineren Gefährdungspotential der Module oft weggelassen. Der Klemmenkasten sollte so ausgeführt werden, dass eine übersichtliche und saubere Verdrahtung möglich ist. Diese hilft aber auch Kurzschlüsse und

damit gefährliche Lichtbogen zu unterbinden. Die Verwendung von verschiedenen Farben von Plus- und Minusleitern schafft dabei zusätzliche Klarheit.

Zwischen dem Plus- und dem Minuspol wird jeweils ein Überspannungsableiter gegen Erde geschaltet. Oft werden dafür Metalloxid-Varistoren eingesetzt. Diese haben eine spannungsabhängige Widerstandskurve, wobei der Widerstandswert mit steigender Spannung abnimmt und so den weiteren Aufbau einer allfälligen Überspannung kurzschliesst.

Projektionsfolie 26



5.8 Beispiel eines Klemmenkastens

Im vorherigen Kapitel wurde die Serie- bzw. die Parallelschaltung von Solarmodulen beschrieben. Die serielle Verdrahtung der einzelnen Module geschieht direkt auf dem Dach. Die Verbindungen der rückseitigen Anschlussboxen werden direkt von Modul zu Modul geführt. Demgegenüber wird für die Parallelschaltung der Stränge ein Klemmenkasten benötigt. Auf den Projektionsfolien 25 und 26 ist ein solcher Klemmenkasten dargestellt. In diesem werden die Anschlusskabel der Stränge über Sicherungen (nur im positiven Pfad) auf zwei Sammelschienen (positiver und negativer Pol) geführt. Um die Anlage vor den Folgen möglicher Überspannungen zu schützen, werden zusätzlich Überspannungselemente zwischen Erdpotential

und den beiden Sammelschienen montiert. Damit die Verbindungsleitung und der Wechselrichter spannungsfrei geschaltet werden können, wird zwischen Sammelschiene und Wechselrichter ein DC-Leitungstrenner eingebaut.

5.9 Klemmen

Zur Verbindung der einzelnen Strangkabel des Solarzellenfeldes sollten möglichst Klemmen verwendet werden, welche einen langfristig einwandfreien Kontakt gewährleisten. Es gilt zu bedenken, dass bei Gleichstromanlagen im Falle eines schlechten Kontaktes mit weitaus grösseren Schäden zu rechnen ist, als bei Wechselstromanlagen. Klemmen, die untereinander verbunden werden können, erlauben es, die einzelnen Strangströme in einem einzigen Abgangspunkt zu sammeln, ohne dass allfällige und arbeitsaufwendige Verkabelungen nötig sind.

5.10 Sicherungen / Dioden

Jeder Strang ist mit einer Sicherung oder mit einer Sicherung und einer Diode zu schützen. Als Sicherungen müssen Typen verwendet werden, welche allfällige Lichtbogen löschen können. Es ist unbedingt ein Hinweis anzubringen, dass die Sicherungen nicht unter Last eingesetzt oder entfernt werden dürfen. Dies gilt vor allem bei Systemen mit Strangspannungen von weit über 50 V. Die in der Strangdiode entstehende Wärme aufgrund der Verlustleistung «Strangstrom mal Spannungsabfall über Diode» muss abgeführt werden.

5.11 Überspannungsableiter

Zum Schutz von Personen und Gebäuden und zum Schutz der Anlage ist ein Überspannungsschutz erforderlich. Die Überspannungsableiter gegen Erde sind ein Teil davon. Natürlich wird es nie möglich sein, einen absoluten Schutz von Mensch und Material bei direkten Blitzeinschlägen zu gewährleisten. Die Ableiter bieten jedoch für die meisten Einschläge in unmittelbarer Nähe der Anlage einen ausreichenden Schutz.

Sollten Spuren eines Einschlages in den Gebäudeblitzschutz oder in die Unterkonstruktion entdeckt werden, ist es nötig, die Überspannungsableiter durch eine Fachperson auf allfällige Beschädigungen hin prüfen zu lassen.

5.12 Gleichstrom-Leitungstrenner

Herkömmliche elektrische Anlagen können abgeschaltet werden, indem im Netztableau oder an der Anlage selber der Wechselstrom unterbrochen wird (normaler Sicherungsautomat oder Netzschalter). Bei Photovoltaikanlagen ist dies anders. Der Wechselrichter ist Bestandteil eines Kraftwerkes, das gleichzeitig an zwei möglichen Energiequellen angeschlossen ist, nämlich am Solarzellenfeld und am öffentlichen Stromnetz. Um den Wechselrichter ohne Gefahr anschliessen oder reparieren zu können, ist es deshalb unumgänglich, die Leitungen auf beiden Seiten unterbrechen zu können. Zu diesem Zweck wird auch auf der Gleichstromseite ein Leitungstrenner eingebaut, der als leistungsfähiger Gleichstromschalter zu verstehen ist. Wird der Klemmenkasten an einem gut zugänglichen Ort platziert, der nicht allzuweit vom Wechselrichter entfernt liegt, kann er ebenfalls dazu dienen, diesen Leitungstrenner aufzunehmen. Andernfalls wird der Trenner direkt neben dem Wechselrichter oder an beiden Orten montiert.

5.13 Montage des Klemmenkastens

Klemmenkästen aus Kunststoff sind nur bedingt für die Montage im Freien geeignet. Wenn immer möglich sollte ein Standort im Hausinnern gefunden werden. Ist eine Montage im Freien unumgänglich, muss je nach Produkt darauf geachtet werden, dass der Kasten vor Regen und direkter UV-Strahlung geschützt ist.

Der Klemmenkasten sollte aus schwer entflammbarem Material bestehen. Trotzdem sollte vor allem in feuergefährdeten Objekten darauf geachtet werden, dass er an einem sicheren Ort montiert

wird. Es sind allenfalls besondere Massnahmen, wie das Anbringen einer feuerfesten Grundplatte (Asbestersatz) zu treffen.

Aus Blitzschutzgründen ist auch darauf zu achten, dass sich der Klemmenkasten möglichst in der direkten, kürzesten Verbindung zwischen dem Solarzellenfeld und dem Wechselrichter befindet. Der Klemmenkasten sollte für Kinder unerschwingbar platziert werden. Er sollte so konzipiert sein, dass er nur mit Werkzeugen zu öffnen ist.

5.14 Blitzschutzanlage

Unter einer Blitzschutzanlage für bauliche Anlagen wird das ganze System zum Schutz vor den Auswirkungen des Blitzes verstanden. Sie besteht aus einer äusseren Blitzschutzanlage und einer inneren Blitzschutzanlage.

5.15 Äusserer Blitzschutz

Der äussere Blitzschutz besteht im wesentlichen aus den Fangeinrichtungen, den Ableitungen und der Erdungsanlage. Die Fangeinrichtungen sind metallene Leitungen oder Flächen, welche die Blitze auffangen sollen. Die Ableitungen sind die Verbindungen zwischen den Fangeinrichtungen und der Erdungsanlage. Das können metallene Fassadenteile, Stahlarmierungen, Kupferablaufrohre aber auch ganz gewöhnliche Kupferdrähte sein. Die Erdungsanlage ist schliesslich derjenige Teil, welche die Blitzströme in die Erde einleitet und dort verteilt. Die Erdungsanlage kann als Fundamenterder, Tiefenerder oder als Oberflächenerder (Bänderer, mindestens 0,7 m unter Erde) ausgeführt werden.

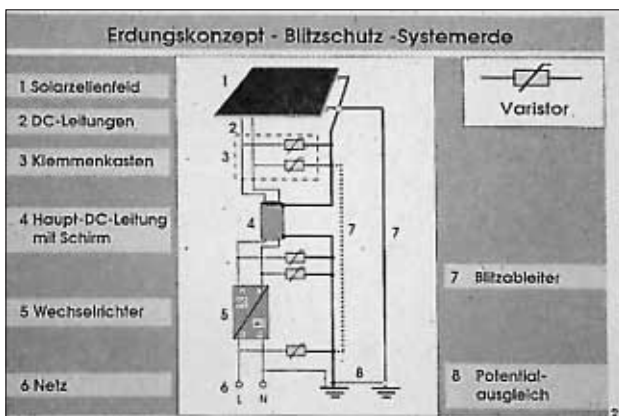
5.16 Innerer Blitzschutz

Der innere Blitzschutz beinhaltet alle zusätzlichen Massnahmen, welche die elektrischen und magnetischen Auswirkungen des Blitzstromes innerhalb des zu schützenden Objektes reduzieren. Als wichtigste Massnahme gilt der Blitzschutz-Potentialausgleich.

Der Blitzschutz-Potentialausgleich umfasst jene

Teile der inneren Blitzschutzanlage, die zur Reduktion der vom Blitzstrom hervorgerufenen Potentialunterschiede erforderlich sind. Dazu gehören u.a. Armierungen, Potentialausgleichsleiter, Überspannungsableiter und Wasserrohre etc. Die leitenden Strukturen im Haus sollten möglichst engmaschig miteinander verbunden werden.

Projektionsfolie 27



5.17 Erdungskonzept – Blitzschutz – Systemerde

Nach den neuen, provisorischen Richtlinien für Photovoltaikanlagen (SEV 233.0690d) wird ein Gebäude ohne Blitzschutz durch die Installation einer Solarzellenanlage **nicht** blitzschutzpflichtig. Somit können Solarzellenanlagen auch auf Gebäuden ohne Blitzschutz ausgeführt werden.

5.18 Gebäude ohne Blitzschutz

Die Unterkonstruktion einer Solarzellenanlage besteht meist aus metallischen und somit elektrisch leitenden Materialien. Die Solarzellen sind mit einem Aluminium-Rahmen versehen, welcher direkt auf diese metallische Unterkonstruktion zu liegen kommt. Von dieser Unterkonstruktion führen wir nun einen Leiter mit einem minimalen Querschnitt von $25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ durch das Dach in den Klemmen-

kasten. In diesem Klemmenkasten befinden sich die Überspannungselemente, welche bei einem allfälligen Spannungsanstieg auf dem positiven bzw. negativen Pfad ansprechen und den Blitzstrom auf den dafür dimensionierten Ableiter (mind. $25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) führen. Die Ableiter müssen auf dem kürzesten Weg zum Erder geführt werden, damit der Blitzstrom so schnell wie möglich zur Erdungsanlage geführt und in das Erdreich abgeleitet werden kann. Enge Richtungsänderungen sollen wegen Überschlagsgefahr vermieden werden. Trotz allen Sicherheitsvorkehrungen kann jedoch ein durch den Blitzstrom verursachter Spannungsanstieg nicht verhindert werden. Durch Vermaschung sämtlicher metallischer Struktur im Hausinnern erreichen wir jedoch, dass die verschiedenen Potentiale gleichmässig angehoben werden. Somit vermindert sich die Gefahr eines Spannungsdurchschlags an der schwächsten Stelle der Gebäude-Elektroinstallation.

5.19 Gebäude mit Blitzschutz

Bei Gebäuden mit einem bestehenden Blitzschutz ist das Blitzschutzkonzept im Prinzip ähnlich. Zuerst wird die Unterkonstruktion des Solarzellenfeldes mit der äusseren Blitzschutzanlage verbunden. Das Feld sollte an allen vier Ecken mit dem äusseren Blitzschutz verbunden werden. Bei grösseren Solarzellenfeldern wird eine Verbindung alle zehn Meter nötig.

Je mehr Verbindungen bestehen, desto grösser ist die Schutzwirkung bei einem Blitzeinschlag. Wie bei Gebäuden ohne Blitzschutz wird die Unterkonstruktion mit dem Klemmenkasten durch einen Potentialausgleichsleiter (mind. $25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) verbunden. Im Gegensatz zu Gebäuden ohne Blitzschutz ist vom Klemmenkasten bis zum Gebäudeerder nur eine Leitung von mindestens $10 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ vorgeschrieben. Die Ableitungen zur Erdungsanlage bilden nämlich angenähert einen faradayschen Käfig, der die Eigenschaft besitzt, die Ströme vor allem über die äusseren Blitzableiter zur Erde zu führen.

6 Mechanischer Aufbau des Solarzellenfeldes

6.1	Handhabung der Solarmodule	48
6.2	Technische Aspekte bei der Auswahl einer Unterkonstruktion	48
6.3	Die verschiedenen Dachtypen	48
6.4	Schrägdach	48
6.5	Beispiel einer Tragstruktur für Schrägdächer	49
6.6	Zwei Schrägdachanlagen	50
6.7	Flachdachanlagen	50
6.8	Beispiel Montagevorgang Flachdach	51
6.9	Fassadenanlagen	51
6.10	Verkabelung	51
6.10.1	Schrägdach	52
6.10.2	Flachdach	52

6 Mechanischer Aufbau des Solarzellenfeldes

Beim Bau von Photovoltaikanlagen werden bei der Montage der Solarmodule die meisten Fehler begangen. Vielfach werden die Anlagen von unqualifizierten Leuten gebaut, welche wenig oder überhaupt keine Kenntnisse über die Besonderheiten von Solarmodulen haben. Um eine Solaranlage möglichst fachgerecht zu installieren, müssen verschiedene Punkte beachtet werden, welche entweder die Solarmodule, die Montagestruktur oder das Dach betreffen.

6.1 Handhabung der Solarmodule

Ein Solarmodul besteht aus sehr empfindlichen Materialien. Die Siliziumscheiben sind spröde und daher bruchempfindlich. Das gleiche gilt für die Glas-Abdeckung. Bei der Montage ist mit gleicher Sorgfalt vorzugehen wie bei der Handhabung von Fensterglas. Kleinste Risse im Deckglas oder Verletzungen der rückseitigen Tedlarfolie durch Werkzeuge können eine Oxidation der Siliziumscheiben und schliesslich deren Zerstörung zur Folge haben.

Im weiteren muss berücksichtigt werden, dass die Solarmodule im Betrieb neben elektrischer Energie auch Wärme erzeugen. Diese Wärme wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad und auf die Lebensdauer der Solarmodule aus. Daher muss bei der Montage unbedingt darauf geachtet werden, dass die Solarzellen gut hinterlüftet sind. Die auf der Rückseite der Solarmodule produzierte Wärme kann so laufend abgeführt werden kann.

6.2 Technische Aspekte bei der Auswahl einer Unterkonstruktion

Die Unterkonstruktion muss so ausgelegt werden, dass sie den zu erwartenden Wind- und Schneelasten standhalten kann. Die Berechnungsgrundlagen dazu liefern die SIA-Normen 160 «Einwirkungen auf Tragwerke». Ferner muss bei der Wahl der Unterkonstruktion unbedingt auf die Korrosionsbeständigkeit der einzelnen Materialien geachtet werden. Aus Sicherheitsgründen dürfen nur solche

Materialien verwendet werden, welche eine minimale Lebensdauererwartung von 25 Jahren besitzen. Wegen Korrosionsgefahr sollte vermieden werden, unterschiedliche Metalle zu verwenden, die in der elektrochemischen Spannungsreihe weit auseinanderliegen. Die heutige, aggressive Luft lässt in dieser Beziehung keinen Spielraum mehr offen.

Eine weitere Anforderung an die Unterkonstruktion ist die Austauschbarkeit der Module. Bei Defekten müssen einzelne Module oder Modulpakete ohne grossen Aufwand auswechselbar sein. Dies gilt insbesondere auch für die rückseitige, elektrische Verkabelung. Sie muss so ausgelegt sein, dass bei Demontage eines Moduls die Anschlussbox gut zugänglich ist.

Eine Solaranlage bringt in den meisten Fällen eine mehr oder minder grosse Veränderung des Erscheinungsbild des Gebäudes. Es soll daher eine möglichst flache Unterkonstruktion verwendet werden, die nur eine geringe Dachüberhöhung zur Folge hat. Denn bei vielen Baukommissionen stehen die ästhetischen Aspekte stärker im Vordergrund als diejenigen des Umweltschutzes.

6.3 Die verschiedenen Dachtypen

Einfachheitshalber unterteilen wir die vorhandenen Dachtypen in zwei Hauptgruppen. Die erste und gleichzeitig auch die grösste Hauptgruppe besteht aus den verschiedensten Arten von Schrägdächern. Fast neun von zehn Häusern in der Schweiz besitzen ein sogenanntes Schrägdach. Als zweite Hauptgruppe haben wir die Flachdächer. Sie sind relativ bescheiden in ihrer Anzahl, doch ist ihre durchschnittliche Fläche einiges grösser als die der Schrägdächer.

6.4 Schrägdach

In der Schweiz existieren unzählige Typen von verschiedenen Schrägdächern. Diese Verschiedenartigkeit verunmöglicht eine Standardlösung für die Solarzellenfeldbefestigung. Die Module können zudem ins Dach integriert oder aber darauf montiert werden.

Projektionsfolie 28

Beispiel einer Tragstruktur für Schrägdächer



Funktion: Mechanische Verbindung Dachstock - Solarzellenträgerkonstruktion

Spezifikation: Sturmsicher, schneelastsicher, wasserdichter Abschluss, korrosionsfest

Normen:

- SIA 160 für Wind- und Schneelast.
- SUVA - Verordnung zum Arbeiten auf Dächern.

Ausführung: Immer durch gelernten Dachdecker oder Spengler. Jeder Fachmann wird seine Lösung realisieren.



Wenn Solarmodule zur direkten Dachintegration auf dem Markt erscheinen, wird die Verbindung zum Dach anders aussehen. In jedem Fall ist ein Dachdecker oder Spengler notwendig.

6.5 Beispiel einer Tragstruktur für Schrägdächer

Bei der Auf-Dach-Montage der Solaranlage wird zuerst die Tragstruktur montiert. Diese Träger dienen zur Befestigung der Unterkonstruktion am Dachstock. Sie stellen auch die Verbindung zwischen dem Dach und der Solaranlage dar. Die auftretenden Windkräfte und Schneelasten werden über diese Träger auf die Holzsparren des Dachstockes übertragen. Eine fachgerechte Auslegung und Montage dieser absolut wasserdichten Träger ist unabdingbar und darf nur von gelernten Spenglern oder Dachdeckern durchgeführt werden. Je nach Dachart werden diese Fachleute ihre eigenen, an das jeweilige Dach angepasste Tragkonstruktion montieren.

Projektionsfolie 29

Schrägdachanlagen



Vollständig in die Dachebene integrierte Anlage in Thun. Die Leistung beträgt 2.7 kW.

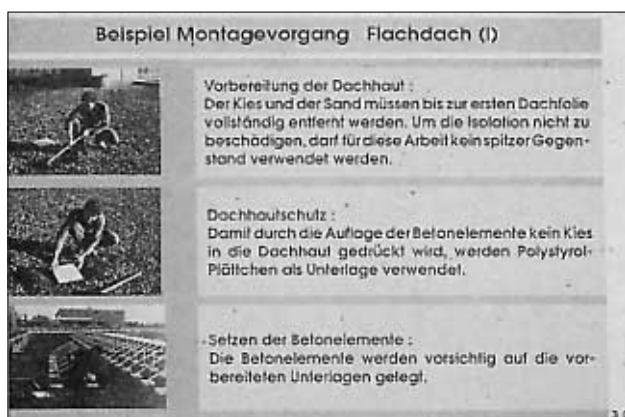


3 kW-Anlage in Hambrechtikon. Das Solarzellenfeld ist mit Blechziegeln am Dachstock befestigt.

6.6 Schrägdachanlagen

Bei der Integration der Solarzellenanlage werden die einzelnen Solarmodule anstelle der Ziegel direkt in die Dachhaut eingebaut. Der Dacheinbau ist vom ästhetischen Gesichtspunkt aus betrachtet sicherlich die schönste Möglichkeit, eine Schrägdachanlage zu bauen. Nur gibt es bei dieser Einbauart verschiedene Schwierigkeiten zu berücksichtigen. So muss z.B. eindringlichst davor gewarnt werden, die Solarmodule zu nahe auf die Dachhaut zuzubauen. Es muss unbedingt ein kleiner Luftspalt ($> 2 \text{ cm}$) zwischen der Dachhaut und der Modulfläche offen gelassen werden, damit die Luft unter den Modulen zirkulieren kann. Ansonsten erwärmen sich die Solarmodule im Betrieb zu stark. Dies hätte eine starke Leistungsverminderung und eine Lebensdauerverkürzung zur Folge. Die Integration von Solaranlagen bietet im Vergleich zur Auf-Dach-Montage mehr Schwierigkeiten. Besonders in Bezug auf die Wasserdichtheit existieren noch Schwachstellen, da im Vergleich zu den Ziegeldächern nicht auf eine tausendjährige Erfahrung zurückgegriffen werden kann. Unerlässlich ist ein vom Spengler montierter Eindeckrahmen, welcher dichte Anschlüsse um das Solarmodul gewährleistet.

Projektionsfolien 30 und 31



6.7 Beispiel Montagevorgang Flachdach

In der Schweiz gibt es riesige, noch ungenutzte Flachdächer, die für Photovoltaikanwendungen geeignet wären. Die meisten Flachdächer haben aber eine sehr heikle, wasserdichte Dachhaut. Bei der Aufständering darf diese Haut unter keinen Umständen verletzt werden. Es empfiehlt sich auch nicht, für die Befestigung der Unterkonstruktion spezielle Durchführungen durch die wasserdichte Isolation zu machen. In den meistens Fällen dringt das Wasser nach einigen Jahren doch durch und es bedarf dann einer aufwendigen und teuren Dachsanierung.

Eine einfache Art, eine Flachdachanlage zu bauen, ist das Schwerlastprinzip. Beim Schwerlastprinzip wird die Unterkonstruktion der Solaranlage auf

vorgefertigte Betonelemente montiert, welche vorgängig auf dem Dach plziert worden sind. Die Betonelemente dienen dazu, um bei starken Windlasten eine genügend hohe Sicherheit gegen Verschieben und Abheben der Anlage zu gewährleisten. Folien 30 und 31 zeigen uns das Beispiel eines Montageablaufes. Zuerst muss die Dachhaut vorbereitet werden. Dort wo die Betonelemente gesetzt werden, müssen die Steine und der Sand entfernt werden. Es muss unbedingt darauf geachtet werden, dass keine Steine mehr auf der Dachfolie liegen. Dann legen wir auf diese gesäuberte Dachfolie ein Plättchen aus extrudiertem Polystyrol. Auf dieses Polystyrolplättchen wiederum wird nun vorsichtig ein Betonelement gesetzt. Sollte sich trotzdem ein Steinchen unter dem Betonelement befinden, so würde es nicht in die Dachfolie, sondern ganz einfach in das Polystyrolplättchen gedrückt.

Nachdem nun alle Betonelemente an den vorgesehenen Platz gesetzt wurden, werden die Metallkonsolen montiert. Es wurden Gewindehülsen in die Betonelemente eingegossen. So können die Konsolen sehr einfach mittels Schrauben befestigt werden. Sind alle Konsolen auf den Betonelementen verschraubt, werden die Solarmodule befestigt. Erst nach diesem Arbeitsgang werden die Steine wieder mit dem angehäuften Sand resp. mit den Steinen zugeschüttet.

Verschiedene Flachdächer besitzen über keine genügend grosse Tragfähigkeit für eine Aufständering nach dem Schwerlastprinzip. Es muss somit abgeklärt werden, ob allenfalls doch eine Verbindung mit dem Dach möglich ist. Es gibt Flachdächer, welche anstelle von Kies schon mit Betonplatten ausgelegt wurden. Es wäre somit möglich, die Konsolen direkt auf diese Betonplatten zu verschrauben. Bei dieser Art von Aufständering übernimmt die Dachhaut bzw. übernehmen die Betonplatten die auftretenden Windlastkräfte und verhindern so ein Abheben der Solaranlage.

Projektionsfolie 32



6.8 Flachdachanlagen

Am Beispiel des Neubaus einer modernen Fensterfabrik in Arisdorf werden die Möglichkeiten einer Mehrfachnutzung von Photovoltaik-Elementen demonstriert. Der besondere Vorteil einer multifunktionalen Nutzung der Photovoltaik-Panels liegt in der erheblich verbesserten Wirtschaftlichkeit. Die Nutzung bzw. Funktionen sind im einzelnen:

- Die direkte Umwandlung der Sonnenenergie in elektrischen Strom.
- Die Nutzung der bei der Stromerzeugung entstehenden Abwärme für die direkte Beheizung der Produktions- und Lagerhallen sowie die Weiterleitung der überschüssigen Wärmeenergie in einen Langzeitspeicher (Erdspeicher) zur späteren Wärmerückgewinnung.
- Die volle Integration der Photovoltaik-Stromgeneratoren in der Fassaden- und Dachkonstruktion. Die Panels ersetzen damit konventionelle Bauteile. Diese Substitution bedeutet eine direkte Kosteneinsparung.

Die Befestigung der Flachdachanlage auf einem Lagerhaus in Zürich-Herdern ist mit Schwerkraftsockeln gelöst. Die Betonelemente sind so ausgelegt, dass sie durch Windkräfte, die an den Modulreihen angreifen, nicht verschoben werden können.

Projektionsfolie 33



6.9 Fassadenanlagen

Jedes Jahr werden in der Schweiz einige Millionen Quadratmeter neue Fassadenflächen montiert. Das Angebot reicht von einigen Tausend Franken teuren Steinfassaden zu ganz billigen Metallfassaden mit Kosten von nur einigen Franken pro Quadratmeter. Vielerorts werden die Gebäudehüllen auch schon ganz in Glas gehüllt. Es wäre somit naheliegend, auch in diesem Bereich die Solarzellentechnologie anzuwenden. In der Schweiz wurden bereits mehrere Fassaden gebaut, welche teilweise aus Solarmodulen bestehen.

Bei einer Solarfassade, wie sie z.B. bei der Anlage Rütihof II in Zürich-Höngg realisiert wurde, betragen die Kosten für die fertig installierte Solarzellenanlage ca. 1500 bis 1800 Fr./m². Im Vergleich dazu kostet eine Steinfassade heute zwischen 1000 und 3000 Fr.

Beim Industriegebäude «Windmühle» in Biel wurden Solarzellenmodule mit den exakt gleichen Abmessungen wie die vorgehängten Steinfassadenelemente hergestellt. So konnte eine optisch perfekte Integration in die Fassade erreicht werden.

6.10 Verkabelung

Für die Verkabelung der Solarmodule untereinander und für die Verkabelung der Solarmodule zum Klemmenkasten sollte auf jeden Fall doppelman-

teliges und feuerfestes Kabel verwendet werden. Es gibt auf dem Markt bereits spezielle Solarkabel, welche erstens einen doppelten Mantel bzw. Isolation aufweisen und zweitens der Umwelt zu liebe PVC-frei sind.

6.10.1 Schrägdach

Die meisten Solarzellenanlagen werden heute aus vormontierten Modulpaketen gebaut. D.h., es werden vorgängig ca. drei Module am Boden auf spezielle Profile vormontiert und bereits elektrisch verdrahtet. Somit entfallen einige Arbeitsgänge, welche sonst in ungemütlicher Lage ausgeführt werden müssen. Bei der Verkabelung der Modulpakete ist darauf zu achten, dass sie relativ eng am Modul anliegt. Teilweise muss noch mit speziellen Kabelbindern nachgeholfen werden. Auf dem Dach werden somit nur noch die einzelnen Modulpakete zu einem ganzen Strang zusammenverdrahtet. Die elektrische Verkabelung sollte möglichst eine Überlänge aufweisen. Diese sollte so bemessen sein, dass nach mechanischer Demontage eines Moduls oder eines Modulpaketes die Anschlussdose zum Abklemmen der Leitungen gut zugänglich ist. Ferner sollte die Verkabelung nicht direkt auf dem Dach liegen, um so bei Regen nicht vom ablaufenden Wasser auf den Dachpfannen umspült zu werden. Auch ist darauf zu achten, dass kein Wasser in die Anschlussdosen gelangen kann. Das kann z.B. mit einer Tropfnase vor dem Einführen der Kabel in die Anschlussdose geschehen. Eine wasserdichte Einführung ist nicht zu empfehlen, da sonst das entstehende Kondenswasser im Innern der Anschlussdose nicht ablaufen kann. Die Folge wäre eine zerstörerische Korrosionswirkung, verursacht durch die Gleichspannungspotentiale zwischen den Kontakten. Die Dacheinführung für die Strangkabel sollte unbedingt vom Dachdecker oder Spengler realisiert werden. Denn auch dort gilt es wegen möglichen Wassereintritten verschiedene Regeln zu beachten.

6.10.2 Flachdach

Bei Flachdächern ist das Problem bedeutend kleiner. Doch auch hier muss die schädliche Wirkung des Wassers unbedingt berücksichtigt werden. Es empfehlen sich ebenfalls Tropfnasen und eventuell sogar eine Entwässerungsbohrung von ca. 2 mm Durchmesser am tiefsten Punkt der Anschlussdose. Die Kabelführung von den Solarzellen zum Klemmenkasten erfolgt in einfachen Rohren (z.B. ALU-AGRO), welche direkt auf die Betonelemente befestigt werden können.

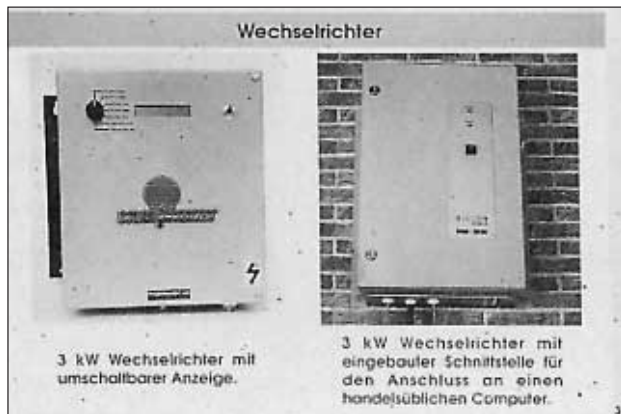
Auf die Gefahren bei den Arbeiten auf Dächern wird in Kapitel 9 eingegangen.

7 Solarwechselrichter

7.1	Wechselrichter	54
7.2	Solarwechselrichter: netzgeführt	55
7.3	Solarwechselrichter: pulsweitenmoduliert	55
7.4	Solarwechselrichter mit Hochfrequenztransformator	56

7 Solarwechselrichter

Projektionsfolie 34



7.1 Wechselrichter

Die Solarwechselrichter haben die Aufgabe, die im Solarzellenfeld erzeugte Gleichspannung in eine netzkonforme Wechselspannung umzuformen. Diese Solarwechselrichter werden in der Praxis häufig auch Inverter genannt. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat sich eine Vielzahl von verschiedenen Wechselrichterkonzepten durchgesetzt. Nicht alle Konzepte sind für die Anwendung im Bereich der photovoltaischen Stromerzeugung optimal. Aufgrund der Nennleistung lassen sich zwei Gruppen von Invertern unterscheiden. Die Inverter auf Transistorbasis werden eingesetzt bis zu Leistungen von rund 100 kW, bzw. bei neueren Typen bis zu 500 kW. Die Inverter mit Thyristor-Schaltelementen haben zur Zeit noch markante Preisvorteile, da diese Technologie in anderen Umrichter-Anwendungen in grosser Stückzahl eingesetzt wird. Insbesondere eignet sich diese Technik auch für ganz grosse Leistungsklassen.

Bei der Einbindung der Solaranlage in das öffentliche Netz (Netzverbundanlage) ist ein Solarwechselrichter mit erhöhten Qualitätsanforderungen notwendig. Diese sind:

- Synchronlauf mit dem Netz
- automatisches Abschalten bei Netzausfall und fehlerhaftem Netz
- hoher Wirkungsgrad (typisch > 90%)
- selbstständiges Ein- und Ausschalten der Anlage
- geringer Oberwellengehalt

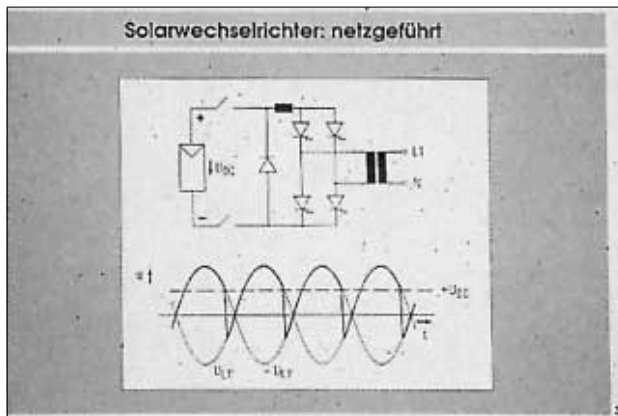
- Keine elektromagnetische Beeinflussung (Radiostörfreiheit)
- hohe Zuverlässigkeit
- geringe Abmessungen bzw. geringes Gewicht

Es müssen dabei die von den Elektrizitätswerken geforderten Normen und Vorschriften eingehalten werden. Diese betreffen vor allem das Mass der zugelassenen Netzurückwirkungen wie Oberwellengehalt und die Verhinderung von Selbstlauf bei Netzausfall.

Für Inselanlagen ist das Marktangebot für Wechselrichter noch grösser als für netzverbundene Anlagen. Der einfachste Inselwechselrichter ist sicher der Rechteckwechselrichter, welcher sich durch extrem hohe Wirkungsgrade auszeichnet und für die Versorgung von rein ohmschen Verbrauchern durchaus genügt. Probleme bei diesem Wechselrichtertyp treten vor allem dann auf, wenn Geräte angeschlossen werden, welche empfindlich auf die enormen Oberwellen reagieren, welche der Rechteckwechselrichter als Nebeneffekt mitproduziert. Daneben gibt es aber auch im Inselbetrieb Solarwechselrichter, welche mit den unterschiedlichsten Konzepten arbeiten und eine beinahe ideale Sinusspannung liefern.

Zurzeit existieren drei verschiedene Grundtypen von Netzverbund-Wechselrichtern, welche in der Schweiz in Betrieb sind und die oben erwähnten Vorschriften erfüllen. Diese drei Typen werden nachfolgend für einphasige Systeme erläutert. Selbstverständlich können mit den beschriebenen Techniken auch Dreiphasenanlagen realisiert werden. Allerdings sind bis heute keine Dreiphasenwechselrichter mit Hochfrequenzzwischenkreis erhältlich, wie sie in der dritten Variante vorgestellt werden.

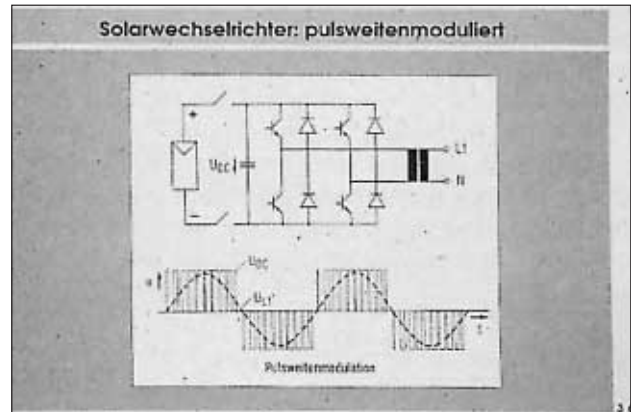
Projektionsfolie 35



7.2 Solarwechselrichter: netzgeführt

Netzgeführte Wechselrichter haben meistens Thyristoren als Schaltelemente. Der Name «netzgeführt», oft auch «fremdkomutiert» genannt, drückt die Eigenschaft dieses Konzeptes aus, dass im Normalbetrieb der Nulldurchgang der Netzspannung zum Wechsel (Komutierung) des Gleichstromes von einem Schalterzweig auf den andern genutzt wird. Eines der Probleme liegt darin, dass zu einem vollständigen Abschalten der von den Thyristoren geführte Strom für ca. 30 μsec zu Null werden muss. Dies hat seine Schwierigkeiten, wenn die Eingangsspannung von einer Gleichspannungsquelle stammt. Thyristorgeschaltete Wechselrichter weisen in der Regel einen hohen Oberwellengehalt aus und verursachen eine Phasenverschiebung.

Projektionsfolie 36



7.3 Solarwechselrichter: pulsweitenmoduliert

Die Pulsweitenmodulation wird oft auch Pulsbreitenmodulation genannt. Sie basiert auf der Eigenschaft, dass eine Sinuswelle durch verschieden breite Pulse nachgebildet werden kann, wenn die Schaltfrequenz für diese Impulse um mindestens einen Faktor 20 oder mehr über der zu erzeugenden Grundfrequenz von 50 Hz liegt. Unter dieser Randbedingung ist der erzeugte Oberwellengehalt einer pulswit modulierten Sinusspannung gering. Bei der Pulsbreitenmodulation erscheint dabei die Ausgangsspannung vor dem Filter wie ein Lattenzaun mit mehr oder weniger breiten Zwischenräumen.

Inverter mit Pulsbreitenmodulation sind erst möglich geworden, nachdem Transistoren mit hoher Schaltgeschwindigkeit und kleiner Verlustleistung erhältlich waren. Da diese schnellen Schalttransistoren noch relativ teuer sind, sind diese Geräte in der Regel teurer als thyristorbeschtete Wechselrichter. Auch der Ansteuerungsaufwand ist grösser, wobei dieser Anteil mit steigender Stückzahl abnimmt.

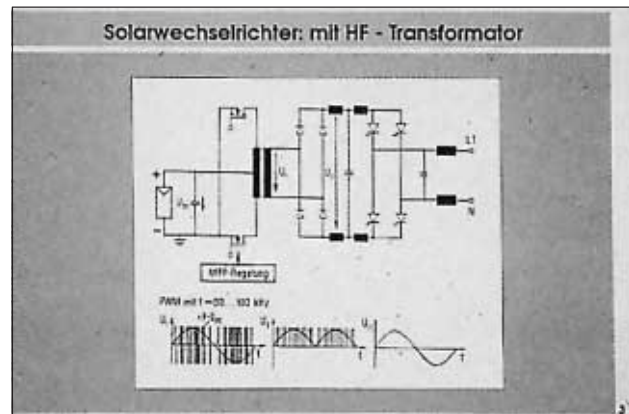
Die Kombination von hohem Wirkungsgrad und einer schnellen Reaktionszeit auf wechselnde Lasten machen pulsbreitenmodulierte Wechselrichter empfindlich gegen Kurzschluss und Überlast. Deshalb werden üblicherweise solche Inverter bei Überlast abgeschaltet, statt nur den Strom zu begrenzen, weil diese Strombegrenzung in der Regel

nicht schnell genug ist, um die Leistungsglieder zu retten.

Liegt die minimale Betriebsspannung des Solarzellenfeldes höher als der Scheitelwert der zu erzeugenden 50 Hz Wechselspannung, dann lassen sich mit der Pulsbreitenmodulation auch transformatorlose Wechselrichter herstellen. Transformatorlose Solarwechselrichter sind in der Regel kostengünstiger und haben gegenüber moderneren Typen gleicher Bauart einen um einige Prozente höheren Wirkungsgrad. Nachteilig bei diesem Konzept ist

- a) die erhöhte Gefahr, Gleichstrom in das Wechselstromnetz einzuspeisen, bzw. bei Kurzschliessen der Leistungsschalter im Störfalle Wechselstrom auf das Solarzellenfeld zu leiten.
- b) Da transformatorlose Solarwechselrichter auf der Gleich- und Wechselspannungsseite einen gemeinsamen Erdpunkt besitzen, ist eine Floating-Anordnung des Solarzellenfeldes nicht möglich. Diese Anordnung jedoch, wo weder Plus noch Minus des Solarzellenfeldes an einer Systemerde angeschlossen ist, trägt ganz wesentlich zum Personenschutz bei. Zudem hat die Auftrennung der Erdungsverhältnisse den nicht zu unterschätzenden Vorteil, dass über das Erdungssystem keine vagabundierenden Leckströme aus dem Solarzellenfeld fließen können. Diese sind besonders im Hinblick auf die erhöhte korrosive Wirkung des Gleichstromes unerwünscht.

Projektionsfolie 37



7.4 Solarwechselrichter mit HF-Transformator

Beim selbstgeführten Wechselrichter mit Hochfrequenztransformator wird die Gleichspannung in einem DC-Leistungsteil mit Pulsweitenmodulation (20 bis 50 kHz) in Gleichstromimpulse variabler Frequenz und/oder variabler Pulsbreite umgeformt. Die Frequenzvariation erfolgt sinusförmig. Die notwendige Max-Power-Point-Regelung ist bei der Beschaltungsregelung mitintegriert. Der Vorteil der Aufstückelung der Energie in eine Vielzahl von Impulsen mit hoher Frequenz liegt darin, dass der nachgeschaltete Transformator für die Hochfrequenz sehr klein ausfällt. Insbesondere sind auch die Verluste viel geringer als bei einem Transformator von 50 Hz Wechselspannung gleicher Leistung. Mit dem Transformator lassen sich Gleich- und Wechselstromseite potentialmässig trennen. Diese Geräte arbeiten insbesondere auch bei Solarzellenfeldspannungen, die unter dem Scheitelwert der Netzspannung liegen. Deshalb werden diese Wechselrichter auch in Solarzellenfeldspannungsbereichen von 50 bzw. 100 V realisiert.

Im nachfolgenden Gleichrichter wird das Hochfrequenzpulsmuster in eine umhüllende Wechselspannung umgewandelt. In einem nachfolgenden Umklapper wird dabei jede zweite Halbwelle nach unten geklappt, so dass daraus ein netzkonformer 50-Hz-Sinusstrom entsteht.

Heutige moderne Solarwechselrichter erfüllen nicht nur sämtliche Normen und Anforderungen der Elektrizitätswerke, sondern zeichnen sich durch einen extrem guten Wirkungsgrad und einen niedrigen Gehalt an Oberwellen aus.

8 Vorschriften

8.1	Einleitung	60
<hr/>		
8.2	Erlangen einer Bewilligung für den Parallel-Betrieb von Energieerzeugungsanlagen (EEA)	60
8.2.1	Gesetze, Verordnungen, Vorschriften	60
8.2.2	Ablauf des Bewilligungsverfahrens	61
8.2.3	Schutzeinrichtungen	61
8.2.4	Energieerzeugungsanlage im Parallelbetrieb mit dem Netz	62
8.2.5	Technische Anschlussbedingungen	62
<hr/>		
8.3	Zu beachtende Vorschriften für die elektrische Installation von PV-Anlagen	63
8.3.1	Allgemeine Vorschriften	63
8.3.2	Überspannungs- und Überstromschutz	63
8.3.3	Ausführung der Erdung und des Potentialausgleiches	64
8.3.4	Solaranlage mit äusserem Blitzschutz	64
8.3.5	Solaranlage ohne äusseren Blitzschutz	64
<hr/>		
8.4	Messvorrichtung und Abnahmekontrolle	64
8.4.1	Messeinrichtung	64
8.4.2	Zähleranordnungen bei Rücklieferungsanlagen	65
8.4.3	Abnahmekontrolle des Werkes	65
8.4.4	Ablauf der Abnahmekontrolle	65

8 Vorschriften

8.1 Einleitung

Es freut mich natürlich ganz besonders, dass auch ein Vertreter der Elektrizitätswerke seinen Beitrag aus Sicht der EW's leisten darf.

Der Ablauf des Anschluss-Bewilligungsverfahrens und die Anschlussbedingungen für Photovoltaik-Anlagen, nachfolgend PV-Anlagen genannt, sind nicht bei allen der rund 1200 EW's der Schweiz bis in alle Einzelheiten identisch.

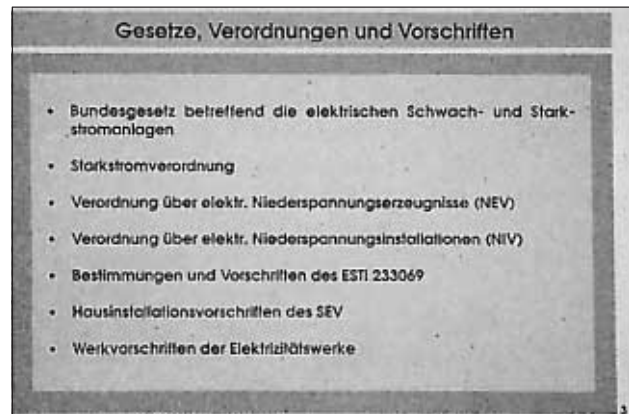
So kann ich in meinem Referat vor allem über die Anschlussbedingungen und den Ablauf des Erlangens einer Anschluss-Bewilligung für das Detail-Versorgungsgebiet der EKZ berichten. Hingegen sollten die Ausführungen bezüglich der Installationsvorschriften für alle EW's Gültigkeit haben.

8.2 Erlangen einer Bewilligung für den Parallel-Betrieb von Energieerzeugungsanlagen (EEA)

Der Ablauf des Bewilligungsverfahrens von PV-Anlagen wird bei den EKZ den Verfahren anderer EEA-Arten gleichgestellt. Ja man verwendet sogar das gleiche Formular, um ein Gesuch für den Betrieb einer solchen Anlage zu stellen. Da schon seit Jahrzehnten immer wieder vereinzelt Gesuche für den Netz-Parallelbetrieb von Energieerzeugungsanlagen an uns gestellt werden, ist das Bewilligungsverfahren auch nichts Neues. Neuen Datums ist lediglich, dass anstelle eines rotierenden Generators Solarzellen verwendet werden, um die elektrische Energie zu erzeugen.

Was für Gesetze, Verordnungen und Vorschriften müssen nun beachtet werden, um solche Anlagen zu erstellen?

Projektionsfolie 38



8.2.1 Gesetze, Verordnungen und Vorschriften

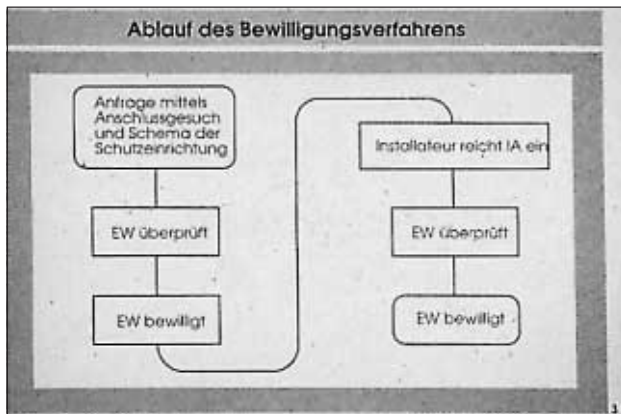
Gemäss NIV Art. 2 gelten EEA's aller Art als Installationen. Demzufolge dürfen die elektrischen Installationen von PV-Anlagen nur von Personen und Unternehmen erstellt oder geändert werden, die eine Installationsbewilligung der kontrollpflichtigen Unternehmung oder eine Anschlussbewilligung des eidgenössischen Starkstrominspektors, nachfolgend ESTI genannt, besitzen.

Auch für diesen Installations-Bereich gilt: Keine Regel ohne Ausnahme. Ohne Bewilligung dürfen Installationen für PV-Anlagen nur von fachkundigen Personen (berufskundliche Fächer der Meisterprüfung bestanden), Elektrokontrolleuren oder Elektromonteuren mit eidgenössischem Fähigkeitsausweis erstellt werden. Dies gilt allerdings nur für Installationen in selbstbewohnten und in ihrem Eigentum stehenden Gebäude. Die genannten Erleichterungen für die Installation befreien den Installateur jedoch nicht von der Meldepflicht.

Nun aber zum Speck der Geschichte:

Was muss ein Interessent unternehmen, wenn er eine PV-Anlage betreiben möchte?

Projektionsfolie 39



8.2.2 Ablauf des Bewilligungsverfahrens

Die einzuhaltenden Bestimmungen sind aus den technischen Bedingungen für den Parallelbetrieb von EEA's mit dem Netz des EW's ersichtlich. Diese werden dem Interessenten zusammen mit dem Anschlussgesuch für den Betrieb einer EEA zugestellt.

Sie finden je ein Muster-Exemplar des Anschlussgesuches und der technischen Bedingungen der EKZ im Anhang zu diesem Vortrag.

Zudem werden Sie Gelegenheit haben, im praktischen Teil dieses Kurses ein Anschlussgesuch auszufüllen.

Nachdem das Anschlussgesuch bezüglich der technischen Bedingungen überprüft und als in Ordnung befunden wurde, bewilligt das Elektrizitätswerk das Anschlussgesuch.

Nun kann der künftige Anlagebesitzer einen Installateur mit der Ausführung beauftragen.

Dieser reicht nun dem EW kurz vor Baubeginn die nötige Installationsanzeige ein und gibt somit dem EW bekannt, dass die angefragte Installation tatsächlich auch zur Ausführung gelangt.

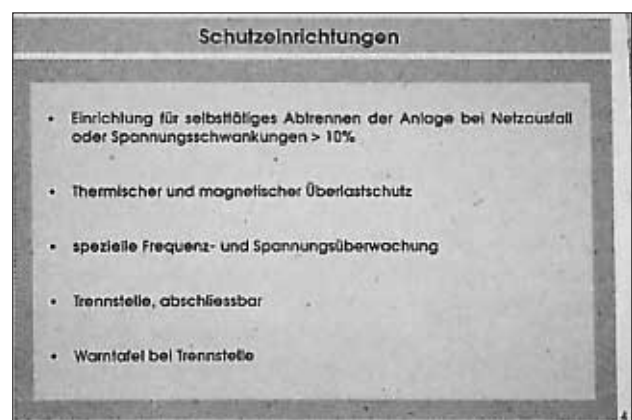
Das EW überprüft die eingereichte Installationsanzeige und gibt dem Installateur unter Umständen nähere Bestimmungen bekannt (z.B. Zugänglichkeit der Trennstelle, Ausführung der Energie-Messung, etc.).

In den technischen Bestimmungen, welche dem Antragsteller zusammen mit dem Anschlussgesuch zugestellt werden, werden zwei Arten der einzuhaltenden Bedingungen unterschieden:

- Schutzeinrichtungen und
- technische Bedingungen

Für die Einhaltung der Schutzeinrichtungen muss auf folgende Punkte geachtet werden:

Projektionsfolie 40



8.2.3 Schutzeinrichtungen

Die Einrichtung für selbsttätiges Abtrennen der Anlage bei Netzausfall, bei Spannungs-Schwankungen von mehr als 10% oder bei Störungen in der Steuerung der PV-Anlage, muss die PV-Anlage unverzüglich vom Netz trennen.

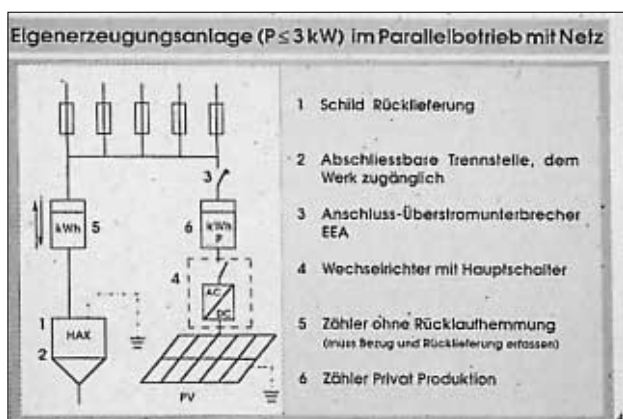
Die Anlage muss mit einer thermischen Auslösung als Überlastschutz und einer magnetischen Auslösung als Kurzschluss-Schutz ausgerüstet sein.

Natürlich muss der Kurzschluss-Schutz zudem in der Lage sein, netzseitig gespeiste Kurzschluss-Ströme sicher abzuschalten. Auf die PV-Anlage muss eine Frequenzüberwachung mit einem Ansprechwert von 50 Hz +/- 1% und ein Spannungsrelais mit einem Ansprechwert von +/- 10% wirken. Die vorgeschriebene Trennstelle muss eine sichtbare Trennung gewähren, abschliessbar und dem Werkpersonal oder der Feuerwehr jederzeit zugänglich sein. Befindet sich diese Trennstelle im Gebäudeinnern, kann die Zugänglichkeit evtl. mit einem Schlüsselrohr bewerkstelligt werden.

Um bei Arbeiten am Netz auf das Vorhandensein von EEA-Anlagen aufmerksam zu machen, muss in der Trafo-Station beim entsprechenden NS-Strang-Abgang, bei der Trennstelle der PV-Anlage zum Netz und beim Anschluss-Überstromunter-

brecher mit einer Tafel «Vorsicht Rücklieferungsanlage» gewarnt werden.
Bitte erschrecken Sie nicht, wenn sich die gemachten Erläuterungen allzu technisch anhören.
Die nachfolgende Folie soll Ihnen zeigen, wie solche Sicherheitsbarrieren bei einem EFH in der Praxis etwa realisiert werden könnten.

Projektionsfolie 41



8.2.4 Energieerzeugungsanlage ($P \leq 3$ kW) im Parallelbetrieb mit dem Netz

Die technischen Anschlussbedingungen für PV-Anlagen sind schnell einmal aufgezählt.
Für Spannungsschwankungen oder Netzurückwirkungen, die durch die PV-Anlage erzeugt werden, gelten folgende Grenzwerte:

Projektionsfolie 42

Technische Anschlussbedingungen			
<ul style="list-style-type: none"> max. Spannungsschwankungen beim Schalten der PV-Anlage: 3 % erzeugte Oberschwingungen am Verknüpfungspunkt mit dem Netz gemäss SEV Norm 3600 			
ungerade Ordnungszahl		gerade Ordnungszahl	
3.	0,65 %	2.	0,3 %
5.	0,65 %	4. - 40.	0,2 %
7.	0,6 %		
9., 11.	0,4 %		
13.	0,3 %		
15. - 39.	0,25 %		

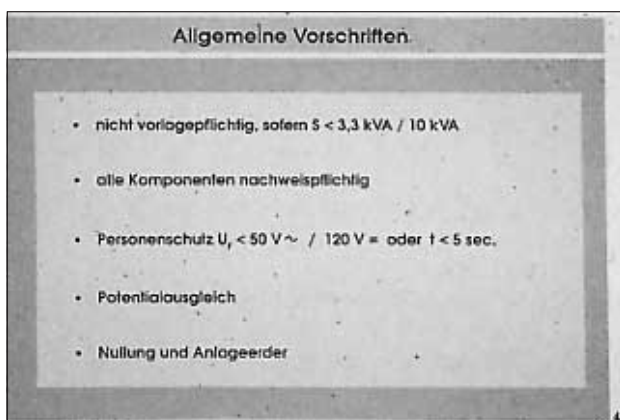
8.2.5 Technische Anschlussbedingungen

Die Spannungsschwankungen dürfen beim Ein- resp. Ausschalten der PV-Anlage höchsten 3% erreichen.

Die zulässigen Oberschwingungs-Spannungsbeiträge dürfen die in den SEV-Normen 3600 oder in der Tabelle 10.43 der Werkvorschriften der EKZ aufgeführten Werte nicht übersteigen.

8.3 Zu beachtende Vorschriften für die elektrische Installation von PV-Anlagen

Projektionsfolie 43



8.3.1 Allgemeine Vorschriften

Eine wesentliche Erleichterung für das Erlangen einer Betriebsbewilligung schafft uns die Tatsache, dass Anlagen mit Leistungen bis zu 3,3 kVA einphasig oder 10 kVA dreiphasig den Hausinstallationen gleichgestellt werden, sofern sie auf eigenem Grund und Boden installiert werden und demzufolge nicht vorlagepflichtig sind.

Für den Installateur gilt es in diesen Fällen zu beachten, dass sämtliche Anlagekomponenten für PV-Anlagen der NEV unterliegen und in Bezug auf Sicherheit und Vermeidung von Störungen nachweispflichtig sind.

Schutzelemente sind ausserdem auch zulassungspflichtig. Das heisst, sie müssen mit dem Sicherheitszeichen versehen sein.

Auch für PV-Anlagen gilt der Grundsatz für den Personenschutz. Umgemünzt heisst das, dass die Berührungsspannung für Zeiten über 5 Sekunden nicht mehr als 50 Volt Wechsel- resp. 120 Volt Gleichspannung betragen darf. Sollten die Module vom Boden aus berührbar sein, ist eine Umzäunung der Anlage zum Schutz von Personen und Tieren anzubringen. Kann diese Massnahme nicht realisiert werden, müssen die Geräte der Schutzklasse 2 entsprechen (Sonderisolierung).

Das gesamte Solarzellenfeld ist in den Potentialausgleich zu integrieren.

Wird mit der PV-Anlage Starkstrom ($I > 2A$) erzeugt, muss diese auf jeden Fall auch mit dem Erder der Installation verbunden und in den Blitzschutz des Gebäudes integriert werden. Grundsätzlich muss jedoch an dieser Stelle erwähnt werden, dass ein Gebäude infolge seiner PV-Anlage nicht blitzschutzpflichtig wird.

Da nicht alle Gebäude über einen Erder verfügen, ist es beim Bau von PV-Anlagen für bestehende Gebäude möglich, dass noch ein Erder erstellt werden muss (z.B. Band- oder Tiefenerder).

8.3.2 Überspannungs- und Überstromschutz

Bei der Gebäude-Einführung seitens des Solarzellenfeldes sind Überspannungsschutzelemente anzubringen. Diese Überspannungsableiter müssen in schwerbrennbaren Gehäusen platziert werden. Befindet sich dieser Klemmenkasten aussen am Gebäude, muss er mindestens der Schutzart IP 54 entsprechen.

Auf der Primärseite des Wechselrichters müssen wiederum Überspannungsableiter vorgesehen werden. Bei sehr kurzen Verbindungsleitungen zwischen Gebäudeeinführung und Wechselrichter kann allerdings auf diese Ableiter verzichtet werden.

Sowohl primärseitig (Gleichstrom) wie sekundärseitig (Wechselstrom) sind die Leitungen vor Überstrom und Kurzschluss zu schützen. Dem mechanischen Schutz und der Lichtbeständigkeit der Kabel ist besondere Bedeutung beizumessen. Da der elektrische Kabelschutz im Kurzschlussfall nicht gewährleistet werden kann, ist die Verkabelung in Sonderisolierung auszuführen und erd- und kurzschlussicher zu verlegen.

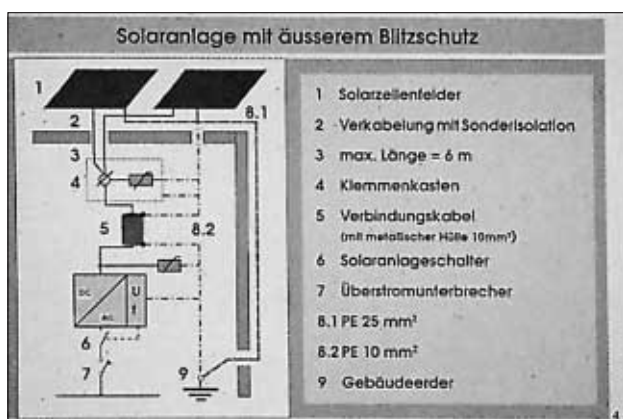
Die Verbindungsleitung vom Klemmenkasten zum Wechselrichter muss mit einer metallischen Hülle versehen oder in einem metallenen, mechanisch widerstandsfähigen Rohr verlegt sein. Der Leitwert dieser metallenen Ummantelung muss mindestens demjenigen eines Kupfer-Leiters mit einem Querschnitt von 10 mm^2 entsprechen.

8.3.3 Ausführung der Erdung und des Potentialausgleiches

Auf der Seite des Wechselrichters ist die Hülle der Verbindungsleitung zwischen Klemmenkasten und Wechselrichter zu erden.

Auf der Seite des Klemmenkastens ist je nach Vorhandensein eines äusseren Blitzschutzes wie folgt zu verfahren:

Projektionsfolie 44



8.3.4 Solaranlage mit äusserem Blitzschutz

Die metallene Hülle des Verbindungskabels oder das Rohrende ist mit den metallenen Rahmen der Module und mit der Blitzschutzanlage zu verbinden (Querschnitt: mind 10 mm² Cu).

Generell kann gesagt werden, dass bei Gebäuden mit äusserem Blitzschutz die Verbindung von den Modulen bis zum Gebäudeerde im Gebäudeinnern mindestens einem Querschnitt von 10 mm² Cu entsprechen muss. Die Verbindung ausserhalb des Gebäudes via Blitzschutz zwischen Modulen und Gebäudeerde muss mindestens einem Querschnitt von 25 mm² entsprechen.

Projektionsfolie 45



8.3.5 Solaranlage ohne äusseren Blitzschutz

Da bei Gebäuden ohne äusseren Blitzschutz die Verbindung zwischen Modulrahmen und Gebäudeerde nur im Gebäudeinnern realisiert wird, muss diese Verbindung durchgehend einen mindestens 25 mm² Cu Querschnitt aufweisen.

In diesen Fällen kann im Bereich der Verbindungsleitung zwischen Klemmenkasten und Wechselrichter ein Schutzleiter mit einem Querschnitt von mindestens 16 mm² Cu verlegt werden, da ja die metallene Ummantelung der Verbindungsleitung bereits schon einen Querschnitt von 10 mm² aufweist.

Natürlich ist es besser, wenn die Verbindung vom Modulrahmen direkt zum Gebäudeerde durchgehend mit einem Querschnitt von 25 mm² ausgeführt wird.

8.4 Messvorrichtung und Abnahmekontrolle

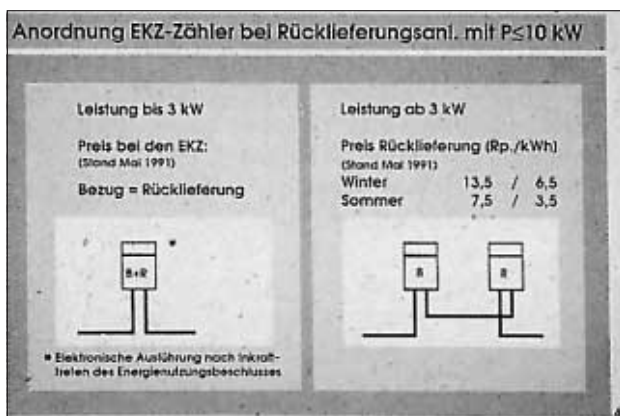
8.4.1 Messeinrichtung

Die Anordnung der Zähler kann je nach EW anders ausfallen. Die folgend aufgezeigten Beispiele gelten speziell für PV-Anlagen im Detail-Versorgungsgebiet der EKZ. Es empfiehlt sich, mit dem EW vor der Installation oder noch besser schon zum Zeitpunkt der Projektierung Fühlung aufzunehmen und sich über die Art und Ausführung der Messstelle zu informieren. Am einfachsten ist es natür-

lich, wenn sich der Interessent bei der ersten Kontaktierung, d.h. bei der Anforderung des Anschlussgesuches über die Art der Messstelle erkundigt. In vereinzelt EW's ist es sogar üblich, dem Anfragenden generell mit der Zustellung des Anschlussgesuches auch ein Infoblatt über die verschiedenen Zähleranordnungen beizulegen. Für die Zähleranordnung bei Rücklieferungsanlagen werden bei den EKZ vier verschiedene Fälle unterschieden.

Da wir in unserem Kurs nur über PV-Anlagen mit einer Leistung bis zu 10 kVA berichten, unterscheiden wir nur zwei Arten der Zähleranordnung.

Projektionsfolie 46



8.4.2 Anordnung EKZ-Zähler bei Rücklieferungsanlagen mit $P \leq 10$ kW

Bei PV-Anlagen mit einer Leistung bis zu 3 kW wird nur ein Zähler gesetzt. Dieser besitzt keine Rücklaufhemmung, so dass der Zähler bei Bezug von elektrischer Energie aus dem Netz des EW vorwärts und bei Abgabe von elektrischer Energie aus der PV-Anlage an das EW rückwärts zählt.

Bis der Energienutzungsbeschluss, der verlangt, das Bezug und Rücklieferung separat gemessen werden, in Kraft tritt, sind die EKZ im Besitze von elektronischen Zählern, die es ermöglichen, Bezug und Rücklieferung festzuhalten. Das heisst, dass die bis anhin in solchen Anlagen montierten Zähler ersetzt werden.

Um bei solchen Anlagen die Produktion der PV-Anlage ermitteln zu können, ist deshalb mit Vorteil ein Privatzähler oder Schreiber zu empfehlen.

Liegt die Nennleistung der PV-Anlage zwischen 3 kW und 10 kW, muss in Serie zum Zähler für den Energiebezug aus dem Netz ein Rücklieferungszähler montiert werden.

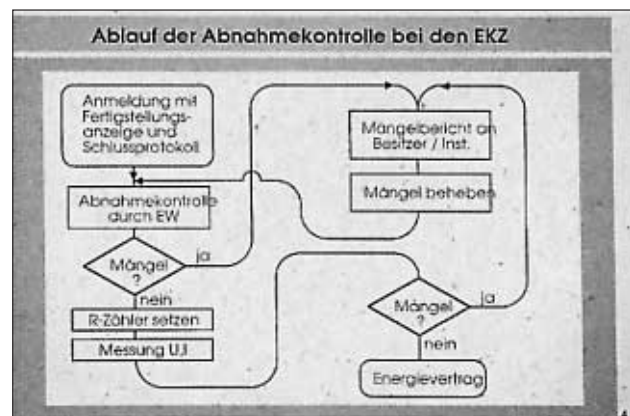
Es empfiehlt sich jedoch auch für diese Anwendungen, einen privaten Zähler für die Produktion zu installieren, da sonst lediglich die Rücklieferung, nicht aber die Produktion der Anlage festgestellt werden kann.

8.4.3 Ablauf der Abnahmekontrolle bei den EKZ

Der Vorgang der Abnahmekontrolle lässt sich unterteilen in

- eine technische Abnahmekontrolle
- eine Abnahmekontrolle betreffend Ausführung der Installation

Projektionsfolie 47



8.4.4 Ablauf der Abnahmekontrolle

Der Installateur meldet mit einer Fertigstellungsanzeige und einem Schlussprotokoll die Arbeiten dem EW bereit zur Kontrolle.

Bei der technischen Abnahmekontrolle wird geprüft, ob die technischen Bedingungen eingehalten werden. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Abschalten der PV-Anlage bei Netzausfall sowie den Oberschwingungs-Spannungsbeiträgen geschenkt.

Bei der Abnahmekontrolle der Installation wird ein spezielles Auge auf die Dimensionierung des Potentialausgleiches und der Erdleitungen gewor-

fen. Natürlich werden auch alle anderen Komponenten überprüft, ob sie den Anforderungen der Hausinstallations- und den Werkvorschriften entsprechen.

Treten bei der Abnahmekontrolle Mängel auf, werden diese dem Anlagebesitzer und dem Installateur schriftlich mitgeteilt.

Weist die Anlage keine Mängel mehr auf, wird der Zähler für die Rücklieferung montiert und die Anlage zusammen mit dem Werk provisorisch in Betrieb gesetzt.

Die EKZ messen nun während mindestens einer Woche Spannung, Oberwellen und Strom, welche die PV-Anlage in das EW-Netz einspeist.

Wenn die gemessenen Grössen die bewilligten Werte nicht überschreiten, erhält der Anlagebesitzer die Betriebsbewilligung zum Parallel-Lauf mit dem Netz, sowie den Energielieferungsvertrag für die Rücklieferung.

Nun sind alle Bedingungen eingehalten und der Energielieferungsvertrag mit dem Anlagebesitzer wird unterzeichnet.

8.5 Checkliste Inbetriebnahme

Nachdem sämtliche Elektroinstallationen fachgerecht und nach den genannten Sicherheits- und Installationsvorschriften ausgeführt worden sind, ist die Anlage technisch bereit zur Inbetriebnahme.

Vor der Parallelschaltung mit dem öffentlichen Netz muss die Anlage vom zuständigen Elektrizitätswerk abgenommen werden.

Wenn die Anlage keine Mängel aufweist, darf sie in Betrieb genommen werden. Dies geschieht in folgender Reihenfolge:

1. Beim Netztableau wird der Sicherungsautomat eingeschaltet. Am Wechselrichterausgang muss nun 230 V Netzspannung anliegen.
2. Falls der Klemmenkasten mit Sicherungen arbeitet, müssen diese jetzt eingesetzt werden.
3. Der Gleichstromtrenner wird eingeschaltet. Am Wechselrichtereingang sollte somit die Solarzellenfeldspannung anliegen.
4. Als vierten und letzten Schritt schalten Sie den Wechselrichter-Hauptschalter ein.

Ist am Wechselrichter ein sehr schwaches «Geräusch» hörbar, lässt sich am Kühlkörper nach einiger Zeit eine leicht Erwärmung fühlen oder dreht sich ein zusätzlich installierter kWh-Zähler, so arbeitet der Wechselrichter ordnungsgemäss.

9 Arbeiten auf Dächern

Absturzunfälle bilden noch immer einen Schwerpunkt bei den Bauunfällen. Aus Unachtsamkeit oder um vermeintlich Zeit beziehungsweise Geld zu sparen, werden Absturzsicherungen oft nicht oder zu spät angebracht. Praktisch alle heute in der Schweiz im Betrieb befindlichen Photovoltaikanlagen wurden auf bestehenden Dächern montiert. Der Einbau der Tragkonstruktion ins Dach, die Montage der Solarmodule, sowie die Blitzschutzverbindungen und die Verkabelung der Module erfordert vom Dachdecker, Spengler, Elektriker ein Arbeiten auf dem Dach. Umso wichtiger ist es deshalb, vom leitenden Handwerker Schutzmassnahmen gegen Absturz vorzusehen.

Nachfolgend sind die wichtigsten von der SUVA geforderten Massnahmen zusammengefasst:

- a) Bei Arbeitshöhen von über 3m sind sowohl auf Schräg- wie auf Flachdächern immer Sicherungsmassnahmen erforderlich. Mögliche Sicherungsmassnahmen sind:
- Schutzgerüst
 - Schutzwand
 - Seilsicherung
 - Schutzgeländer
- b) Dächer mit beschränkt tragfähigem Material (besonders Asbestzementplatten «Eternitdächer») dürfen nur unter Anwendung von Schutzmassnahmen wie
- Laufstegen (Bretter)
 - Fangnetze

betreten werden.

Detaillierte Auskunft geben folgende SUVA-Schriften:

SUVA 1805.d Verordnung über die Verhütung von Unfällen bei Arbeiten an und auf Dächern

SUVA 44002.d Sicherheit durch Anseilen

SUVA 44009.d Auffangnetze

SUVA 22024 Sicherheit beim Arbeiten an und auf Dächern

10 Unterhalt

10.1 Unterhalt und Kontrollen

70

10 Unterhalt

Solarzellenkraftwerke erzeugen elektrische Energie ohne rotierende Maschinen. Deshalb ist zu erwarten, dass diese Art von Kraftwerken besonders wartungsfrei ist. Über den Einsatz von Solarzellen in terrestrischer Anwendung bestehen zur Zeit rund zwanzigjährige Erfahrungen. Aus diesen Erfahrungen lässt sich schliessen, dass die Solarzellen selber keine Wartung benötigen.

Im Bereich der übrigen Anlagekomponenten, welche für das gesamte Solarkraftwerk notwendig sind, bestehen zur Zeit noch wenig Erfahrungen. Die Erfahrungen sind auch deshalb besonders klein, weil sich die Technik im pausenlosen Wandel befindet. In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, dass vor allem die Solarelektronik störungsempfindlich ist, da ein ausgeprägtes High-tech-Produkt mit ganz neuen technischen Eigenschaften in einem sehr anspruchsvollen Umfeld einem automatischen Eigenbetrieb überlassen wird. Die Entwicklung der letzten Jahre zeigt allerdings auch, dass hier grosse Fortschritte erzielt wurden, und dass noch ein ebenso grosses Feld von Verbesserungen offen ist.

Projektionsfolie 48

Unterhalt und Kontrollen	
Betreiber	Elektrofachmann
<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich Produktion/Erwartung • Optische Kontrolle : <ul style="list-style-type: none"> - Verkabelung - mechanische Befestigung • Wartung am Wechselrichter nur bei Störung <p>Das Reinigen der Solarzellen ist in der Regel nicht notwendig.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfung der Nennspannung und des Nennstromes • Prüfung der Sicherungen und der Ueberspannungselemente • Prüfung des Isolationswiderstandes

10.1 Unterhalt und Kontrollen

Beim Unterhalt und bei den Kontrollen der Solarzellenanlagen in Gebäuden muss unterschieden werden, welche Art von Kontrollen durch den Betreiber der Anlage und welche durch den Elektrofachmann durchgeführt werden müssen. Die

Überwachung des laufenden Betriebes fällt dem Betreiber der Anlage zu. Er sollte dabei folgende Eigenschaften der Anlage laufend im Auge behalten:

- a) Vor allem in den ersten Wochen nach Inbetriebnahme der Anlage sollte täglich die Produktion mit den Erwartungen verglichen werden.
- b) Es ist sinnvoll, wenn der Betreiber die monatlich erzeugte elektrische Arbeit der Photovoltaikanlage registriert. Das gibt ihm auch das Gefühl dafür, ob die Anlage korrekt arbeitet, und ob allenfalls Störungen auftreten, welche eine Kontrolle durch den Elektrofachmann notwendig machen.

Neben diesen Kontrollen sollte der Betreiber mindestens jährlich eine optische Kontrolle seiner Anlage durchführen. Dabei werden folgende Komponenten kontrolliert: die Verkabelung und die mechanische Befestigung der Module. Bei der Verkabelung ist auf allfällige Witterungsschäden, auf defekte Kabelhalter und auf lose hängende Kabel zu achten. Bei der mechanischen Befestigung ist zu kontrollieren, ob allfällige Korrosionsschäden aufgetreten sind. Flugrost, welcher im Prinzip eine harmlose Flächenoxydation mit Rotfärbung bedeutet, gefährdet die Konstruktion nicht.

Nicht notwendig ist das regelmässige Reinigen der Zellen. Die mögliche Reduktion der Energieerträge ist in Ballungsgebieten mit hoher Luftverschmutzung grösser als in ländlichen Gebieten. Auch in Ballungsgebieten dürfte aber die Reduktion einige Prozent nicht übersteigen.

Wartungen am Wechselrichter beschränken sich auf Störungsfälle. Die meisten Wechselrichter besitzen dafür eine Anzeige. Für den Elektrofachmann ergeben sich noch zusätzliche Prüfungsmöglichkeiten, um die korrekte Funktionsweise der Anlage zu überprüfen. Dies sind zum einen die Prüfungen der Nennspannungen und Ströme der einzelnen Stränge. Zu diesem Zwecke werden die einzelnen Strangsicherungen entfernt, oder, falls Dioden verwendet werden, die Stränge abgehängt. Gemessen werden die einzelnen Leerlaufspannungen und die Kurzschlussströme der Stränge.

Es ist sinnvoll, bei Verwendung von Strangsicherungen und anderen Sicherungselementen, diese zu prüfen. Defekte Sicherungen sind nicht nur zu

ersetzen; es ist auch die Ursache ihres Defektes zu analysieren. Defekte Sicherungen im Gleichstromkreis sind ein Alarmzeichen und die Ursache muss eruiert werden. Falls der Fehler nicht gefunden werden kann, ist ein spezialisiertes Beratungsbüro beizuziehen. Ebenfalls durch den Elektrofachmann sind allfällige Überspannungselemente zu prüfen. (Besonders nach einem starken Gewitter mit Verdacht auf direkten oder sehr nahen Blitzeinschlag). Die vier verbreitetsten Überspannungsschutzelemente sind: Metalloxid-Varistoren (SIOV), edelgasgefüllte Überspannungsableiter (ÜsAg), Surpresserdioden, Z-Dioden. Edelgasgefüllte Überspannungsableiter (ÜsAg) dürfen auf der Gleichstromseite nicht eingesetzt werden, da ein Funken nach einem Durchschlag nicht auslöscht (kein Nulldurchgang des Stromes). In der Regel werden in den Datenblättern die ableitbaren Stossströme (Rechteckwelle 20 μ sec) in Abhängigkeit des verfügbaren Schutzpegels angegeben.

Besonders häufig werden Varistoren eingesetzt. Aufgrund des Leitungsmechanismus im Varistorelement, so wie es heute nach 15 Jahren Einsatz aufgeklärt ist, kann gefolgert werden, dass Varistoren aufgrund wiederholter Belastung im Schutzbereich altern. Es können leitende Pfade im Varistor gebildet werden, welche einen Leckstrom und damit eine allmähliche Erwärmung des Varistors zur Folge haben. Ein derart durch Überspannungen bereits stark geschädigter Varistor kann deshalb zu einer nicht unbedeutenden Brandgefahr werden. Es werden deshalb oft auch Varistoren verwendet, welche sich aufgrund dieser unzulässigen Erwärmung selbst den Strompfad «auslöten». Meist wird dieser Vorgang auch optisch angezeigt, so dass eine einfache Kontrolle von aussen möglich ist.

Aufgrund der erhöhten Kosten werden nicht überall solche Varistoren eingesetzt. In der Regel sind jedoch Ausfälle aufgrund von Varistordefekten selten.

Ebenfalls in den Fachbereich des Elektroinstallateurs gehört die Prüfung des Isolationswiderstandes. Die Messung dieses Isolationswiderstandes erfolgt am kurzgeschlossenen Solarzellenfeld. Der Kurzschluss ist erforderlich, damit die Prüfspannung eventuell vorhandene Strangdioden nicht zum Durchschlagen bringt und damit der Isolationszustand beider aktiver Leiter (Plus- und Minuspol) mit einer Prüfung erfasst werden kann.

Dabei sollten die Stränge einzeln oder paarweise ausgemessen werden, damit der Kurzschlussstrom nicht zu hohe Werte annimmt. Die Höhe der Prüfgleichspannung sollte rund 15% unterhalb des Wertes liegen, den der Modulhersteller für die Typenprüfung ausweist.

Bei der Dokumentation der Isolationsmessung sollte nicht nur der Wert des Isolationswiderstandes, sondern auch das Wetter während der Messung festgehalten werden. Dabei von Interesse ist die relative Feuchtigkeit in der Luft.

11 Inselanlagen

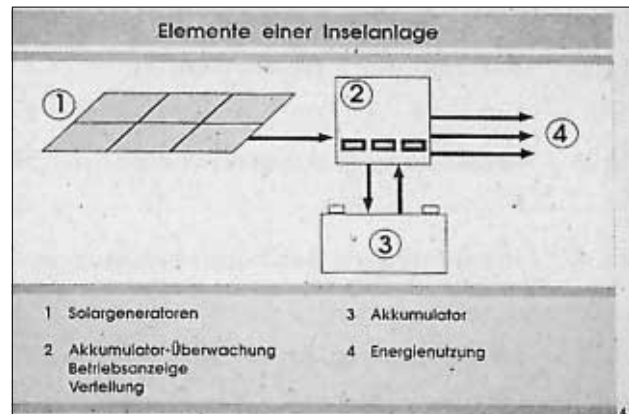
11.1	Elemente einer Inselanlage	74
11.2	Inselanlagen: Relais-Sender	75
11.3	Inselanlagen: Alpstromversorgungen	75
11.4	Inselanlagen: Schwimmbadpumpe	76
11.5	Laderegulierung/Akku-Überwachung/Verteilung	76
11.6	Der Akkumulator als Energiespeicher	77
11.7	Ladung und Entladung des Bleiakkumulators	77
11.7.1	Ladung	77
11.7.2	Entladung	78
11.8	Aufbau des Bleiakkumulators	78
11.9	Akkumulator: Kapazität	79
11.10	Akkumulator: Selbstentladung	79
11.11	Akkumulator: Ladeendspannung	80
11.12	Vier «Todsünden» im Umgang mit Blei-Akkus	80
11.13	Wechselrichter	80
11.14	Niederspannungssystem	81

11 Inselanlagen

Unter einer Inselanlage versteht man eine unabhängige Stromerzeugungsanlage, die nicht mit dem öffentlichen Netz verbunden ist. In der Regel wird man Inselanlagen dort bauen, wo das öffentliche Netz nicht mehr hinreicht. Dies ist z.B. bei der Versorgung von abgelegenen Wohn- und Ferienhäusern, Bergrestaurants, Ski- und Klubbhütten, land- und alpwirtschaftlichen Objekten der Fall. Daneben werden heute eine Vielzahl von mess- und regeltechnischen Einrichtungen in den Bereichen Wasserwirtschaft, Flussbau, Schnee- und Lawinenforschung und Wetterbeobachtung mit Solarzellenanlagen versorgt. Ebenso arbeiten Telekommunikationseinrichtungen, fernsteuerbare Verkehrsschilder, Reklamebeleuchtungen, Betrieb von Pumpen und Regeleinrichtungen in solarthermischen Anlagen, Pumpen von Trinkwasser- und Bewässerungssystemen mit photovoltaischen Solarzellenanlagen. Neben diesen ortsfesten Anwendungen gibt es eine Reihe von mobilen Anwendungen wie in solargespeisten Uhren, Taschenrechnern, Solarradios, Solarlampen und Elektrozaungeräte.

Die nun folgenden Beispiele sollen den Bereich der möglichen Anwendung aufzeigen. In aller Regel werden solch dezentrale Systeme mit kleinen Leistungen realisiert, wobei sich die Gefahr für das Gebäude und die Anlage selber vor allem in unsachgemäßer Handhabung der Batterie ergeben.

Projektionsfolie 49

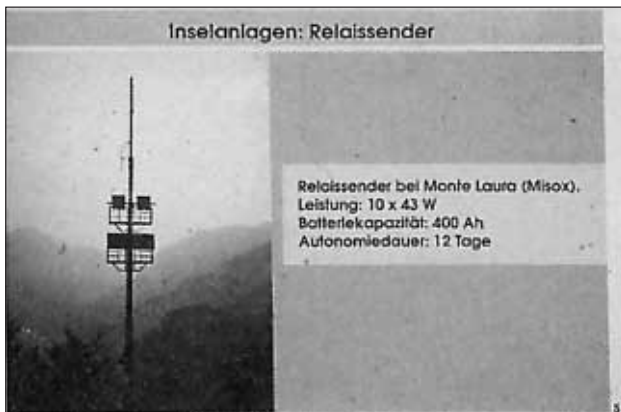


11.1 Elemente einer Inselanlage

Eine photovoltaische Inselanlage besteht aus dem Solargenerator, einem Laderegler für die Batterie und den Verbrauchern. Im Idealfalle sind diese Verbraucher auf Gleichspannung ausgelegt. Werden spezielle Geräte eingesetzt, welche nur in Wechselstromausführung auf dem Markt erhältlich sind, muss ein Wechselrichter dazwischengeschaltet werden. Der Wechselrichter für Inselanlagen unterscheidet sich allerdings in seinen Kontrollfunktionen und in seinen Ansprüchen an Klirrfaktor und Überwachungseinrichtungen wesentlich von Solarwechselrichtern, welche zur Netzeinspeisung dienen. Zudem muss ein Wechselrichter in einer Inselanlage in der Lage sein, auch Blindstromanteile zu liefern.

In Inselanlagen sollte soweit möglich versucht werden, Systeme zu entwerfen, wo auf den Einsatz eines Solarwechselrichters verzichtet werden kann. Damit können Verluste reduziert werden. Zudem entfällt mit dem Wechselrichter ein wartungsanfälliges Gerät.

Projektionsfolie 50



11.2 Inselanlagen: Relais-Sender

Relais-Sender sind Anlagen, welche im Bereich der Fernmeldeübermittlung und Radio- und Fernsendeder eine wichtige Rolle spielen. Sie sind von Natur aus in recht unwegsamem Gelände stationiert und daher nur mit enormen Kostenfolgen am elektrischen Netz anschliessbar. Sie bilden deshalb einen idealen Anwendungsfall für Photovoltaikanlagen. Das Bild zeigt eine Anlage bei Monte Laura im Gebirge. Ähnliche Stationen sind weltweit auch zur Autobahnsicherung in grosser Stückzahl eingesetzt. Die zu erbringende Leistung ist meist bescheiden. Da diese jedoch rund um die Uhr sichergestellt werden muss, erfordert dies in der Regel eine Überdimensionierung des Solarzellenfeldes, um auch bei längeren Schlechtwetterperioden eine 100%-ige Verfügbarkeit der Energieversorgung zu gewährleisten. Neben dem Anspruch an hohe Betriebssicherheit ist bei der Auslegung solcher Anlagen vor allem auf die erhöhte Blitzschutzgefahr Rücksicht zu nehmen.

Projektionsfolie 51



11.3 Inselanlagen: Alpstromversorgung

Die Alpen im Gebirge sind zum grössten Teil nicht am elektrischen Netz angeschlossen. Je nach Energiebedarf ist eine entsprechend grosse Solarzellenanlage notwendig. Bei kleineren Anlagen, wie sie zum Beispiel für eine einfache Beleuchtung angewendet werden, genügen ein bis zwei Solarmodule. Müssen elektrische Maschinen mit Solarstrom versorgt werden, wird das Solarzellenfeld entsprechend grösser. Um bei wechselnder Alpbewirtschaftung nicht an jedem Ort eine Solarzellenanlage aufbauen zu müssen, sind schon diverse mobile Alpstromversorgungen realisiert worden. Bei mobilen Anlagen wird vorteilhaft mit niedriger Systemspannung gearbeitet, weil davon ausgegangen werden muss, dass die Erdungsverhältnisse meist ungenügend sind.

In der Schweiz werden zur Zeit über 10 000 abgelegene Alpen und Ferienhäuschen mit Solarstrom versorgt. Da sich der Energiebedarf in der Regel auf die Beleuchtung beschränkt, genügen meist ein bis zwei Solarpaneele.

Projektionsfolie 52



11.4 Inselanlagen: Schwimmbadpumpe

Thermische Kollektoren benötigen in aller Regel eine entsprechende Umwälzpumpe, um das Wärmeträgermedium zirkulieren zu lassen. Diese Pumpenleistungen sind in der Regel recht bescheiden. Eine Energieversorgung dieser Zirkulationspumpe durch eine Photovoltaikanlage ist sinnvoll. Je stärker die Sonne scheint, desto mehr wird das Wasser in den Warmwasserkollektoren erhitzt und desto schneller muss das Wärmeträgermedium im Kollektor zirkulieren. Selbstverständlich erzeugen in diesem Moment die Solarzellen auch entsprechend mehr Strom, welcher die notwendige Leistungssteigerung der Umwälzpumpe zur Folge hat. Damit können solche Systeme ohne Akkumulator betrieben werden.

Projektionsfolie 53

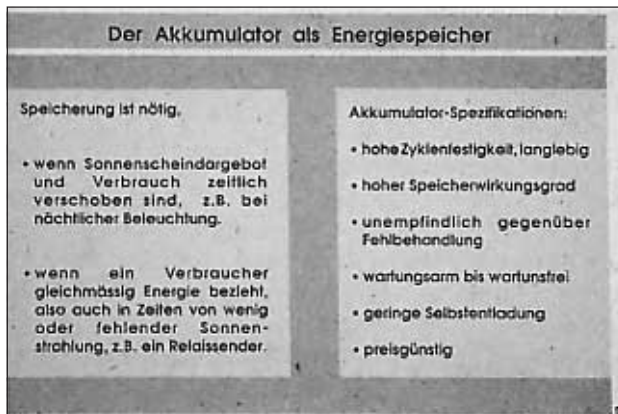


11.5 Laderegulierung / Akku-Überwachung / Verteilung

Praktisch sämtliche Inselanlagen enthalten einen Regler, welcher die entsprechenden Energieflüsse von der Solarzelle in die Batterie bzw. zum Verbraucher regelt. Ein solcher Solarenergieregler erfüllt die vier folgenden Funktionen:

- Der Regler registriert den Zustand der Akkumulatorenbatterie.
- Aufgrund des Solarenergieangebotes, des Zustandes der Akkumulatoren und des Energiebedarfes in den Lasten wird der Ladestrom geregelt.
- Übersteigt der Verbrauch der angeschlossenen Lasten das Energieangebot des Solarzellenfeldes (z.B. nachts), dann werden die Verbraucher aus der Batterie gespiesen. Um eine Tiefentladung der Batterien zu verhindern, trennt dieser die Lasten von der Batterie. Je nach Komfort des Reglers wird dies vorher signalisiert, um dem Verbraucher Gelegenheit zu geben, seinen Verbrauch zu drosseln.

Projektionsfolie 54



11.6 Der Akkumulator als Energiespeicher

Wann muss eine Speicherung vorgesehen werden? Man kann zwei Fälle unterscheiden, wo Speicherung nötig wird:

- Wenn Ernte und Gebrauch zeitlich verschoben sind, zum Beispiel bei nächtlicher Beleuchtung. Der Ladestrom liegt meist in der ähnlichen Größenordnung wie der Entladestrom.
- Wenn die Ernte, wie bei Solaranlagen der Fall, unregelmässig erfolgt und ein gleichmässiger Bedarf gedeckt werden muss (z.B. Relais-Sender; Siehe Projektionsfolie 50). Der maximale Ladestrom ist ca. 8mal grösser als der Dauerentladestrom.

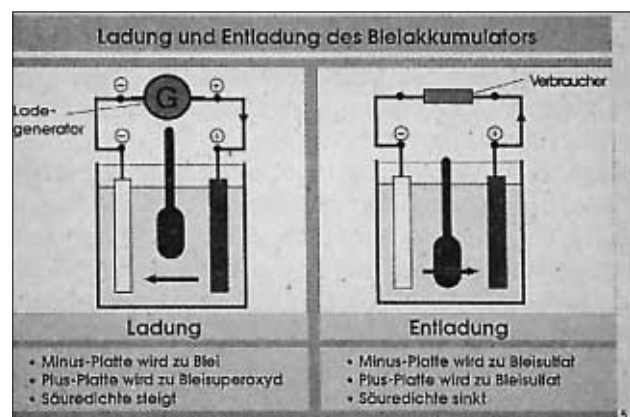
Die Autonomiedauer, das heisst der Ausgleich der zeitlichen Unregelmässigkeiten sollte etwa 10 Tage betragen, so dass Schlechtwetterperioden überbrückt werden können.

Der ideale Akkumulator hat folgende Eigenschaften:

- hohe Zyklenfestigkeit, langlebig
- hoher Speicherwirkungsgrad
- kleine Selbstentladung
- unempfindlich gegen Fehlbehandlung
- wartungsarm bis wartungsfrei
- preisgünstig

All diese Forderungen können nicht optimal gleichzeitig erfüllt werden. Einige Typen von Bleiakkulatoren kommen diesen Anforderungen aber sehr nahe.

Projektionsfolie 55



11.7 Ladung und Entladung des Bleiakkulators

11.7.1 Ladung

Bei der entladenen Bleizelle besteht sowohl die positive als auch die negative Elektrode aus Bleisulfat. Der Elektrolyt ist verdünnte Schwefelsäure (Dichte etwa 1,12 kg/l), die zu etwa zu 17% aus unverdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4) und zu etwa 83% aus Wasser besteht. Durch diesen Schwefelsäure-Anteil ist eine genügende Leitfähigkeit des Elektrolyten gewährleistet; reines Wasser würde den elektrischen Strom nicht leiten. Soll die Bleizelle geladen werden, so verbindet man ihre beiden Elektroden mit einem Gleichstromgenerator (Solarzelle, Laderegler) und zwar wird die positive Elektrode der Bleizelle mit dem Pluspol der Gleichstromquelle, die negative mit dem Minuspol verbunden. Der Ladevorgang verläuft – im Gegensatz zu dem später beschriebenen Entladevorgang – nicht freiwillig, sondern wird durch die Zufuhr elektrischer Energie erzwungen, so dass die Zelle nach der Ladung ein höheres Energie-Niveau erreicht. Beim Ladevorgang entsteht an der Minus-Elektrode Blei, an der Plus-Elektrode Bleisuperoxyd. Die Elektrolyt-Dichte hat beim Ladevorgang

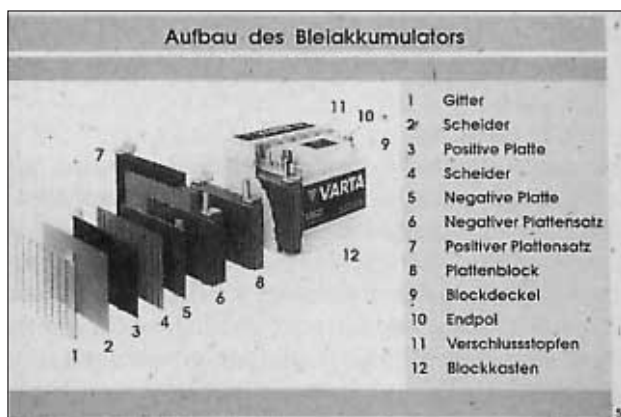
zugenommen. Sie beträgt jetzt etwa 1,28 kg/l (37% Schwefelsäure, 63% Wasser).

11.7.2 Entladung

Der Ausgangszustand bei der Entladung ist die geladene Bleizelle. Werden die beiden Pole einer Bleizelle über einen Verbraucher (z.B. Glühlampe) miteinander verbunden, so fließen infolge der zwischen den Polen vorhandenen Potentialdifferenz (Zellenspannung) Elektronen von der Minus-Elektrode über den Verbraucher zur Plus-Elektrode. Beim Entladevorgang entsteht an beiden Elektroden Bleisulfat.

Beide Elektroden haben jetzt wieder den Ausgangszustand erreicht: Die in der Zelle gespeicherte *chemische* Energie wurde durch den Entladevorgang wieder in *elektrische* Energie umgewandelt und als solche von dem Verbraucher entnommen.

Projektionsfolie 56



11.8 Aufbau des Bleiakкумуляtors

Bei der Beschreibung des Lade- und Entladevorgangs wurde bisher immer nur von einer Zelle mit einer positiven und einer negativen Elektrode gesprochen. In Wirklichkeit umfasst eine Batterie in der Regel mehrere hintereinandergeschaltete Zellen mit je einem positiven und einem negativen Plattensatz. Durch hintereinanderschalten der Zellen erhält man eine höhere Spannung; z.B. hat eine

12-Volt-Batterie je 6 Zellen mit je 2 Volt.

Die einzelnen Teile eines Akkumulators haben folgende Funktionen:

Das **Gehäuse** besteht heute meist aus Polypropylen. Es trägt die inneren Elemente, schützt sie vor äusseren Einwirkungen und dient als Behälter für den Elektrolyt.

Die **Kontakt- und Tragstruktur der Elektroden** besteht aus Hartblei. Sie stellt die niederohmige Verbindung zur aktiven Masse der Elektroden her und soll sich möglichst nicht an den chemischen Umwandlungen beteiligen.

Die **aktive Masse** besteht an der Plus-Elektrode aus Bleidioxid und an der Minus-Elektrode aus Bleischwamm. Sie hat eine schwammige Struktur und ist elektrolytdurchlässig.

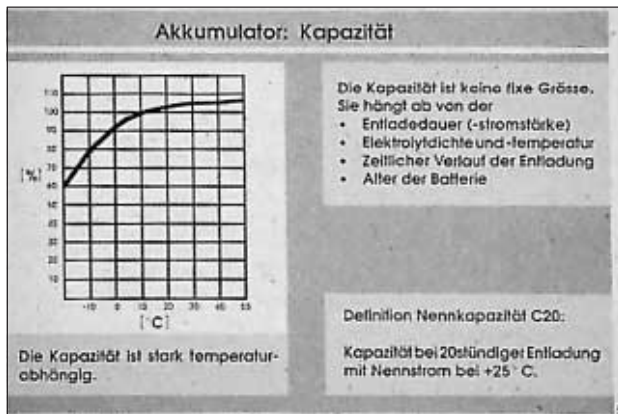
Die **Scheider** (Separatoren) zwischen den Elektroden verhindern Kurzschlüsse und fixieren die aktive Masse in ihren Trag- und Kontaktstrukturen.

Der **Elektrolyt** ist verdünnte Schwefelsäure und ist für den Ionentransport zwischen den Elektroden, d.h. für die Stromleitung verantwortlich.

Es gibt je nach Anwendung und Qualität beträchtliche Unterschiede in der Konstruktion von Bleiakkumulatoren. Die hauptsächlichen Unterschiede beziehen sich auf

- die **Ausbildung der positiven Platte**. Es werden einfache Gitterplatten, verstärkte Gitterplatten, Stabplatten und Panzerplatten eingesetzt.
- das **Bleigewicht** pro Amperestunde. Es variiert zwischen 0,2 kg bis 0,4 kg pro Ah (C_{10}). Durch ein hohes Bleigewicht wird bei korrektem Betrieb eine hohe Lebensdauer erzielt.
- den **Säureinhalt** pro Amperestunde. Dieser variiert zwischen 65 cm² bis 120 cm² pro Ah (C_{10}). Ein grosser Säureinhalt erlaubt lange Wartungsintervalle.

Projektionsfolie 57



11.9 Akkumulator: Kapazität

Die einer Batterie entnehmbare Elektrizitätsmenge, «Kapazität» genannt, dient zur Kennzeichnung der Grösse der Batterie, sie wird in Amperestunden (Ah) gemessen. Die Kapazität ist jedoch keine konstante Grösse, sondern hängt unter anderem ab von der Entladestromstärke, der Dichte und der Temperatur des Elektrolyten, dem zeitlichen Verlauf der Entladung (Kapazität ist bei Entladung mit Pausen grösser als bei ununterbrochener Entladung) und dem Alter der Batterie (Kapazitätsabnahme gegen Ende der Lebensdauer infolge Massenverlustes der Platten).

Um eine Vergleichsmöglichkeit für die Kapazität zu haben, bezieht man die Kapazität oft auf die Entladestromstärke, die man bei 20stündiger Entladezeit und einer Elektrolyttemperatur von +27°C erhält. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Für eine bestimmte Batterie war ein Entladestrom von 4,2 A erforderlich, damit sie nach 20 Stunden die Entladeschlussspannung erreicht (1,75 V je Zelle). Die Kapazität dieser Batterie beträgt dann $4,2 \text{ A} \cdot 20 \text{ h} = 84 \text{ Ah}$ (C₂₀). Würde man die gleiche Batterie mit dem doppelten Entladestrom (8,4 A) belasten, so wäre ihre Kapazität kleiner als 84 Ah, d.h. die mögliche Entladezeit läge unter 10 Stunden. Die bei «Solarbatterien» immer häufiger anzutreffende 100stündige Kapazitätsangabe (C₁₀₀) ist irreführend, da eine wiederholte Ausnützung der 100stündigen Kapazität nur dann zulässig ist, wenn anschliessend sofort eine 10stündige Aufla-

dung erfolgt. Dies ist bei einer Photovoltaikanlage meist nicht möglich.

Wichtig: Kapazitätsvergleiche immer bei gleicher Entladedauer vornehmen!

Bei vollständiger Entladung eines Bleiakkus beginnt sich das Hartblei der Plattengitter in Bleisulfat umzuwandeln. Hält dieser Zustand einige Zeit an, kristallisiert dieses Bleisulfat zu grossen, harten Kristallen, welche die Stromleitung behindern und den Akku durch Volumenzunahme aufblähen.

Wichtig: Tiefentladung schadet dem Akku. Nach Tiefentladung immer sofort aufladen!

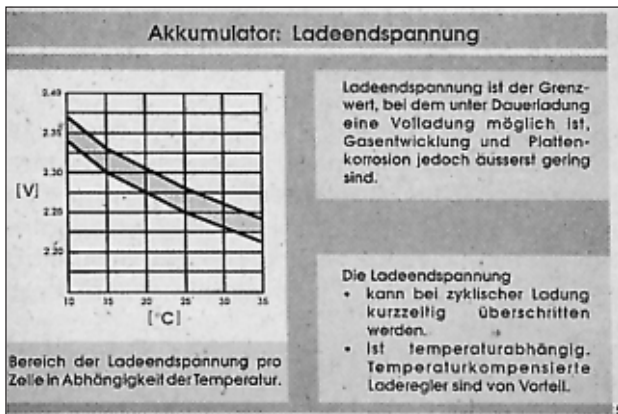
Besonders wichtig ist der Einfluss der Temperatur. Die Kapazität und Entladespannung einer Batterie nehmen mit sinkender Temperatur unter anderem wegen der geringeren Viskosität der Säure und des dadurch bedingten höheren inneren Widerstandes ab. Die richtige Planung des Aufstellortes eines Akkumulators ist deshalb wichtig.

11.10 Akkumulator: Selbstentladung

Geladene Blei-Batterien verlieren im Laufe der Zeit ihre Ladung, ohne dass der äussere Stromkreis geschlossen, d.h. ohne dass die Batterie belastet ist. Man bezeichnet diese Erscheinung Selbstentladung. Sie ist vor allem auf chemische Vorgänge im Innern der Batterie zurückzuführen. Für die Bleigitter wird kein reines Blei, sondern eine Blei-Antimon-Verbindung verwendet (Festigkeitsgründe). Infolge Antimon-Abscheidung an den Minusplatten bilden sich bei einer gealterten Batterie zwischen dem Antimon und der aktiven Masse der Minusplatte zahlreiche, sehr kleine kurzgeschlossene galvanische Lokalelemente, welche die Ladung der Platte abbauen.

Die Selbstentladung beträgt bei Batterien, die aus antimonarmen Blei-Legierungen hergestellt wurden – je nach Alter der Batterie – monatlich etwa 3% C₁₀ der Kapazität. Bei hohen Temperaturen ist die Selbstentladung grösser als bei tiefen Temperaturen; ebenso wird die Selbstentladung durch Erhöhung der Säurekonzentration beschleunigt.

Projektionsfolie 58



11.11 Akkumulator: Ladeendspannung

Die Ladeendspannung ist der Grenzwert, bei dem unter Dauerladung eine 100%ige Vollladung möglich ist, Gasentwicklung und Plattenkorrosion jedoch noch äusserst gering sind. Bei zyklischer Ladung kann dieser Wert kurzzeitig überschritten werden. Weil sie temperaturabhängig ist, empfiehlt es sich, einen temperaturkompensierten Laderegler zu verwenden.

11.12 Vier «Todsünden» im Umgang mit Blei-Akkus

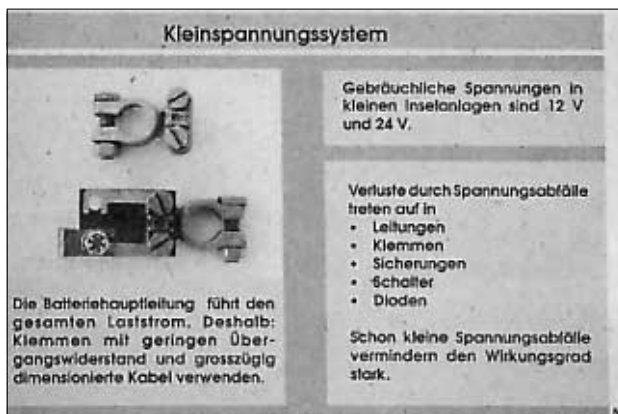
1. **Dauerndes Überladen:** Wasserverlust / Korrosion der Plattengitter / Kapazitätsverlust / Ausfall.
2. **Wiederholte Tiefentladungen** über 100% von C_{20} : Plattengitter werden in Bleisulfat umgewandelt / Kapazitätsverlust und steigender Innenwiderstand / Ausfall.
3. **Lagern in entladene Zustand:** Aktive Massen kristallisieren zu grossen, harten Bleisulfatkristallen / Aufblähung der Zellen / Kapazitätsverlust / Ausfall.
4. **Tiefe Temperaturen bei entladener Batterie:** Elektrolyt kann gefrieren / Zerstörung des Akku-Kastens / Ausfall.

Explosionsgefahr! Bei der Ladung entsteht Wasserstoff und Sauerstoff. Elektrische Funken und offenes Feuer vermeiden (Knallgas!). Wenn möglich in separaten Räumen installieren, mit entsprechender Frischluftzirkulation.

11.13 Wechselrichter

Vielfach ist in Inselanlagen die Umwandlung des im Akkumulator gespeicherten Gleichstromes in Wechselstrom oder die Umsetzung in ein anderes Spannungsniveau erforderlich. Dieser Vorgang ist mit Verlusten behaftet und sollte deshalb wenn irgendwie möglich vermieden werden. In manchen Fällen wird zum kurzzeitigen Betrieb von Elektrowerkzeugen oder Haushaltapparaten die Bereitstellung einer Wechselspannung von 220 V / 50 Hz gefordert. Der Auswahl solcher Wechselrichter ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Sobald ein namhafter Teil des Energieumsatzes in einer Inselanlage über den Wechselrichter läuft, ist dessen Wirkungsgrad besonders wichtig. Zudem ist zu beachten, dass jeder Wechselrichter auch im Leerlauf eine bestimmte Leistung aufnimmt, so dass der Wirkungsgrad bei schwacher Belastung besonders schlecht ist. Die Leistung eines Wechselrichters ist möglichst so zu dimensionieren, dass diejenigen Verbraucher mit dem grössten Anteil am Energieverbrauch im Punkt des grössten Wirkungsgrades liegen. Es ist ausserdem zu überlegen, ob induktive Verbraucher mit einem gewissen Blindstromanteil angeschlossen werden sollen. Die meisten angebotenen Geräte sind nicht in der Lage, z.B. Induktionsmotoren mit einem Leistungsfaktor von kleiner 0,8 einwandfrei zu versorgen. Auch in dieser Hinsicht lohnt es sich, für ein tauglicheres Gerät etwas mehr zu bezahlen.

Projektionsfolie 59



11.14 Kleinspannungssystem

In kleinen Inselanlagen wählt man meistens Systemspannungen von weniger als 50 Volt. Die heute gebräuchlichste Spannung ist 24 oder bei Kleinstanlagen 12 Volt. In einem 12-Volt-System macht ein Spannungsabfall von 0,6 V (z.B. über einer Diode) allerdings schon einen Verlust von 5% aus. Es soll also sorgfältig darauf geachtet werden, dass die Spannungsverluste in Leitungen, Klemmen, Sicherungen, Schaltern und Dioden möglichst gering bleiben. Ein besonderes Augenmerk verdient die lastführende Batteriehauptleitung von Akkumulator zur Verteilung. Diese führt die Summe aller Verbraucherströme und muss deshalb reichlich dimensioniert sein. Zudem muss diese Leitung direkt auf dem Batteriepol abgesichert sein («Batteriepol­sicherung»).

Bei der Energieanwendung lohnt es sich, Apparate mit sehr hohem Wirkungsgrad einzusetzen, weil man dadurch hohe Investitionen bei der Stromversorgung einspart. Für sehr viele Anwendungszwecke sind heute gute Elektrogeräte für 12 bzw. 24 V erhältlich, die bedeutend bessere Wirkungsgrade aufweisen, als vergleichbare 220-V-Geräte (Beleuchtung, Kühlung, Television, Wasserförderung, Umwälzung, Melkaggregate).

12 Anhang I: Leitfaden zum Praktikum

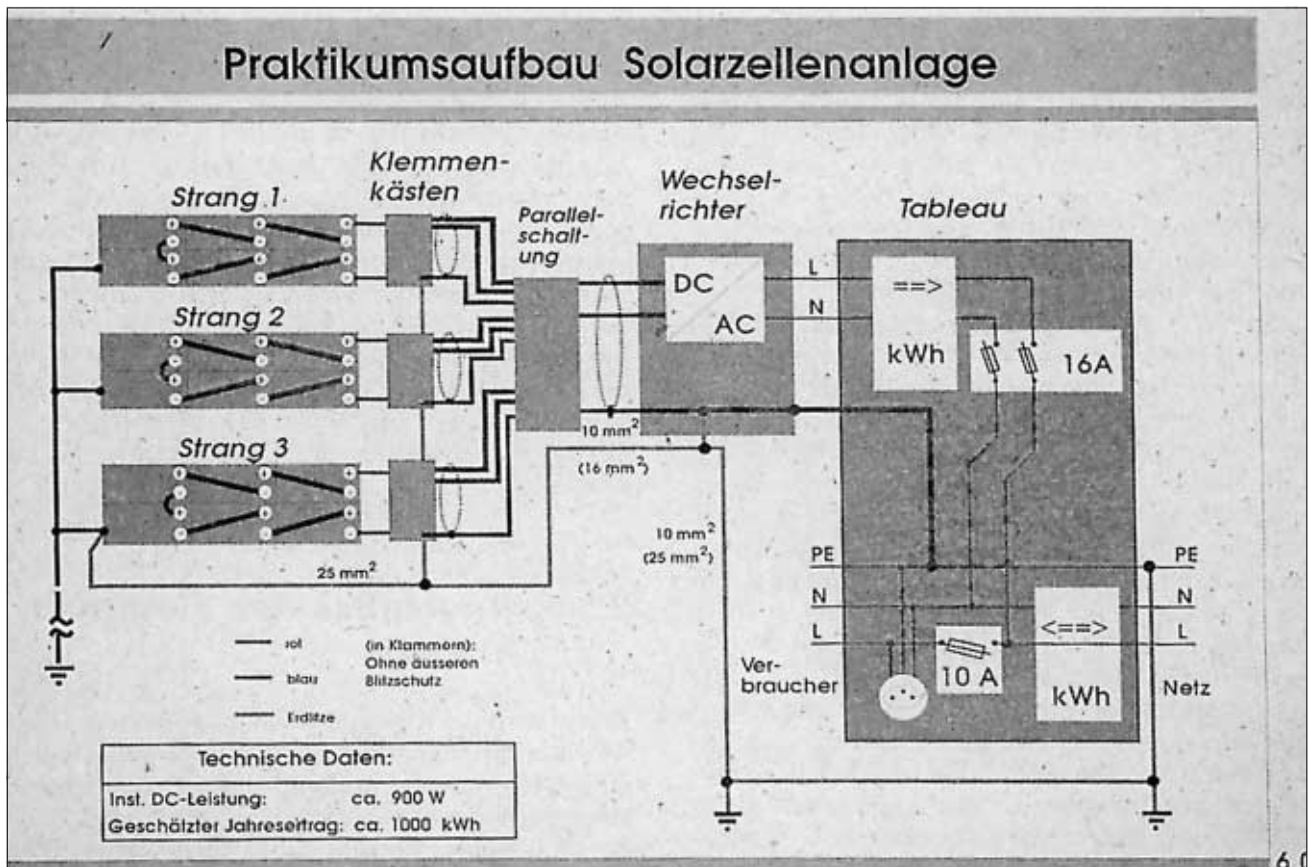
12.1	Einleitung	84
<hr/>		
12.2	Praktikumsaufbau Solarzellenanlage	85
<hr/>		
12.3	Messungen am Solarmodul	86
<hr/>		
12.4	Aufbau des Solarzellenfeldes	86
<hr/>		
12.5	Anschluss des Klemmenkastens	87
<hr/>		
12.6	Anschluss des Solarwechselrichters	87
<hr/>		
12.7	Anschluss an das Schaltungstableau	87
<hr/>		
12.8	Inbetriebnahme	88
<hr/>		
12.9	Kontrollanzeige	88
<hr/>		
12.10	Versuch	88
<hr/>		
12.11	Messprotokolle	89
12.11.1	Messungen am Modul	89
12.11.2	Messungen am Klemmenkasten	89
12.11.3	Messungen am Modul, Beispiel	90
12.11.4	Messungen am Klemmenkasten, Beispiel	90

12 Anhang I: Leitfaden zum Praktikum

12.1 Einleitung

Der Praktikumskurs ist Bestandteil des Photovoltaikkurses für Elektroinstallateure. Hier sollen die in Theorie und in Beispielen dargestellten Zusammenhänge und Eigenschaften von netzgebundenen Photovoltaikanlagen an einem praktischen Beispiel erläutert werden. Zu diesem Zweck werden vorgängig mit den Modulen einfache Messungen durchgeführt und anschliessend wird ein kleines Solarzellenfeld mit einer Netzeinspeisung aufgebaut.

Projektionsfolie 60



12.2 Praktikumsaufbau Solarzellenanlage

Während dem Praktikum werden mit einzelnen Solarmodulen drei Stränge aufgebaut, welche je eine Betriebsspannung von 100 V ergeben. Um den Aufbau der Stränge, die Verkabelung und die Anschlüsse am Klemmenkasten in möglichst kleinen Gruppen ausführen zu können, wird, in Abweichung zu realen Anlagen, jeder Strang in einen separaten Klemmenkasten geführt. Die drei Stränge werden dann erst in einem weiteren Kasten parallel geschaltet und zu einem kleinen Solarzellenfeld zusammengefasst. Der Kursteilnehmer wird also mit «echtem» Solarmaterial konfrontiert. Um ihm ein möglichst breites Spektrum von dargebotenem Material offerieren zu können, wurden verschiedene Solarzellentypen ausgewählt. Es soll jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden,

dass mit diesem Kursangebot nicht die ganze Palette von möglichen Zulieferern abgedeckt werden konnte. Eine umfassende neutrale Dokumentation über Zulieferer von Solarzellenmodulen, Systemkomponenten und Solarwechselrichter ist bei der neutralen Informationsstelle «Infosolar» in 5200 Brugg erhältlich.

Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass mit dem vorgegebenen Wechselrichter eine Strangspannung von rund 100 V Gleichstrom notwendig ist. Damit können Leerlaufspannungen von rund 150 V bei tiefen Zellentemperaturen und vollem Sonnenschein erzeugt werden. Diese Gleichspannung ist gefährlich. Deshalb müssen auch im Praktikum die Verdrahtungen mit grösster Sorgfalt durchgeführt werden.

12.3 Messungen am Solarmodul

Der Aufbau des Solarmoduls soll nochmals diskutiert werden. Je nach Fabrikat ist die rückseitige Abdeckung entweder mit Kunststoff oder mit Glas ausgeführt. In jedem Falle sind die einzelnen Zellen in einem Kunststofflaminat zwischen Front- und Rückseite eingebettet. In Projektionsfolie 15 ist die serielle Verdrahtung der Zellen und die Verbindung der Anschlussbox sichtbar.

Unter 12.11 am Schluss dieses Kapitels befindet sich ein Messprotokoll. Es werden dort zuerst die Daten des Solarmoduls eingesetzt, an dem die folgenden Messungen durchgeführt werden. Die Werte werden dem Datenblatt des Herstellers entnommen. Durch Messung der momentanen Leerlaufspannung U_{0M} , des momentanen Kurzschlussstromes I_{CM} und der momentanen Einstrahlung I_M kann der Wirkungsgrad des Moduls verifiziert werden. Durch Messungen am Klemmenkasten soll ausserdem die momentane Einstrahlung rechnerisch abgeschätzt werden.

Entsprechend den Projektionsfolien 7 und 8 wird der Einfluss des Neigungswinkels und der Ausrichtung gemessen. Ist der Himmel während des Praktikumstages bewölkt, so dürfte praktisch keine Winkel- und Ausrichtungsabhängigkeit feststellbar sein. Gibt es im Augenblick der Messung jedoch einen Direktstrahlungsanteil (welcher sich an der Bildung von Schlagschatten erkennen lässt), dann ist die Winkelabhängigkeit bezüglich Neigung und Ausrichtung aufgrund der Variation des Kurzschlussstromes festzustellen.

In der Projektionsfolie 24 wurde der Einfluss des Schattens auf die Produktionsleistung analysiert. Dieser Einfluss kann im Versuch mit einer einfachen Messung des Kurzschlussstromes leicht veranschaulicht werden. Dazu wird der Kurzschlussstrom von einem unbeschatteten Modul gemessen und anschliessend wird bei stetigem Registrieren des Kurzschlussstromes zuerst nur ein Teil, und anschliessend eine ganze Solarzelle eines Solarmodules abgeschattet.

12.4 Aufbau des Solarzellenfeldes

Der Aufbau des Solarzellenfeldes erfolgt wie der Aufbau auf ein Flachdach. Dazu sind Stützen vorgesehen, welche zuerst in einer Linie aufgebaut und nach Süden ausgerichtet werden. Anschliessend werden, wo nötig, die Dioden in die Anschlussboxen der Module eingebaut. Die Module werden auf die Gestelle montiert. Die Solarkabel (vorzugsweise Doppelmantelkabel) werden vor-konfektioniert. Bei der Verdrahtung muss darauf geachtet werden, dass die Kabel von unten her in die Anschlussboxen eingeführt werden. Die Kabel werden in einem Kabelkanal verlegt, welcher lose auf den Boden gelegt wird. Die einzelnen Stützen sind zu erden.

12.5 Anschluss des Klemmenkastens

Zuerst wird der Klemmenkasten kontrolliert. Dazu wird optisch die interne Verdrahtung geprüft und eine Widerstandsmessung über dem Varistor zeigt, dass dieser hochohmig ist.

Projektionsfolie 26 zeigt dabei das Beispiel eines Klemmenkastens, so wie er auch im Praktikum eingesetzt wird. Wenn die optische Kontrolle des Klemmenkastens befriedigend ausgefallen ist, kann mit der Verdrahtung begonnen werden. Wie in der Projektionsfolie 22 gezeigt, werden die Stränge parallel zusammengefasst. Dabei wird der Pluspol des Stranges auf den Pluspol des Klemmenkastens und der Minuspol des Stranges auf den Minuspol des Klemmenkastens geführt. Es ist darauf zu achten, dass die Solarkabel in den Klemmenkontakten festsitzen. Anschliessend an den Anschluss des jeweiligen Plus- und Minusleiters eines Stranges wird immer sofort die Strangspannung gemessen. Da zu diesem Zeitpunkt die Sicherungen noch nicht eingesetzt sind, kann die Strangspannung verifiziert werden.

Anschliessend wird das abgeschirmte Kabel vor-konfektioniert. Die Abisolierung und die Vorbereitung des Erdmantels, entsprechend der Zeichnung in Projektionsfolie 26, Position 6, erfordert einige Geduld. Es ist jedoch wichtig, beim Anschliessen

dieses Hauptstrangkabels, welches den Klemmenkasten mit dem Solarwechselrichter verbindet, auf saubere Verdrahtung zu achten. Insbesondere muss die Erdlitze fest in der Erdungsklemme sitzen.

12.6 Anschluss des Solarwechselrichters

Noch vor Einsetzen der Strangsicherungen und insbesondere mit ausgeschaltetem DC-Leistungstrenner im Klemmenkasten wird das abgeschirmte Kabel zwischen Klemmenkasten und Wechselrichter verlegt. Nun erfolgt der Anschluss des abgeschirmten Kabels im Wechselrichter. Dabei wird der Plusleiter des abgeschirmten Kabels auf die Plusklemme des Wechselrichters und der Minusleiter auf die Minusklemme des Wechselrichters gelegt. Anschliessend muss eine korrekte Erdung des Solarwechselrichters erfolgen.

12.7 Anschluss an das Schaltungstableau

Im hausinternen Sicherungskasten wird ein Abgang mit Sicherungen erstellt. Je nach Anweisung des Elektrizitätswerkes bzw. entsprechend den Wünschen des Kunden wird ein Energieproduktionszähler auf das Schalttableau montiert. Dann wird der Abgang mit dem Ausgang des Solarwechselrichters verbunden.

12.8 Inbetriebnahme

Die Verdrahtung wird nochmals kontrolliert, die Strangspannungen und die Strangströme gemessen. Entspricht die Kontrolle den Erwartungen, werden die einzelnen Sicherungen im Klemmenkasten für jeden Strang eingesetzt. Dann wird der DC-Leitungstrenner im Klemmenkasten eingeschaltet und die Gleichspannung an den Klemmen des Solarwechselrichters nochmals verifiziert. Der wechselstromseitige Abgang wird durch Einschalten des Schalters unter Spannung gesetzt. Die Spannung am Solarwechselrichterausgang wird verifiziert. Wenn die gemessenen Grössen den Erwartungen entsprechen, kann der Solarwechselrichter eingeschaltet werden. Damit beginnt die Solaranlage elektrische Energie ins Netz abzugeben. *Achtung:* Es muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Netzeinspeisung nicht durch Lärm oder rotierende Teile wahrnehmbar ist. Einzig am elektromechanischen Zähler und an den Betriebslampen des Solarwechselrichters ist der Zustand der Netzeinspeisung direkt erkennbar.

12.9 Kontrollanzeige

Um den Betriebszustand der Anlage zu erkennen, verfügen Solarwechselrichter entweder über eingebaute Anzeigeinstrumente oder über die Möglichkeit, mit Hilfe von Zusatzterminals den Betriebszustand des Solarwechselrichters zu analysieren. In dem im Praktikum eingesetzten Solarwechselrichter wird dieser Zustand mit einem einfachen tragbaren Computer analysiert. Damit kann nicht nur der Betriebszustand kontrolliert, sondern auch die Kühlblechtemperatur, die Netzfrequenz, die DC-Spannung, die AC-Spannung, der AC-Strom und die abgegebene Leistung abgelesen werden.

12.10 Versuch

An der nun aufgebauten Anlage können noch Versuche bezüglich der Abschattung und des Einflusses auf die Produktion nachvollzogen werden. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass das im Praktikum aufgebaute Solarzellenfeld sehr klein ist und dass die benötigten Leistungen nur bei genügend starker Sonneneinstrahlung erreicht werden.

12.11 Messprotokolle

12.11.1 Messungen am Modul

Modul-Daten:

Modul-Typ		
Spannung im MPP		V
Strom im MPP		A
Spitzenleistung P		W
Leerlaufspannung U_0		V
Kurzschlussstrom I_c		A
Füllfaktor FF	0,75	
Aktive Fläche		m ²
Modulfläche A		m ²
Wirkungsgrad = $\frac{\text{Spitzenleistung}}{1000 \text{ W/m}^2 * \text{Fläche A}} * 100 =$		%

Messungen / Berechnungen:

Momentane Leerlaufspannung U_{0M}		V
Momentaner Kurzschlussstrom I_{cM}		A
Momentane Leistung $P_M = FF * U_{0M} * I_{cM} =$		W
Momentane Einstrahlung I_M , (Messung Solarimeter)		W/m ²

Wirkungsgrad (η) verifizieren:

$$\eta = \frac{\text{Momentane Leistung } P_M}{\text{Mom. Einstrahlung } I_M * \text{Fläche A}} * 100 = \quad \%$$

12.11.2 Messungen am Klemmenkasten

Momentane Leerlaufspannung (Strang) U_{0M}		V
Momentaner Kurzschlussstrom (Strang) I_{cM}		A
Momentane Leistung $P_M = FF * U_{0M} * I_{cM} =$		W
Momentane Einstrahlung I_M , gemessen		W/m ²
Prozentuale Einstrahlung = $\frac{\text{Mom. Leistung } P_M}{\text{Spitzenleistung P}} =$		%
Momentane Einstrahlung I_M , berechnet = $\text{Proz. Einstr.} * 1000 \text{ W/m}^2 =$		W/m ²

12.11.3 Messungen am Modul, Beispiel

Modul-Daten:

Modul-Typ	BP 255		
Spannung im MPP	17,0		V
Strom im MPP	3,23		A
Spitzenleistung P	55		W
Leerlaufspannung U_0	21,2		V
Kurzschlussstrom I_c	3,54		A
Füllfaktor FF	0,75		
Aktive Fläche	0,39		m ²
Modulfläche A	0,44		m ²
Wirkungsgrad = $\frac{\text{Spitzenleistung}}{1000 \text{ W/m}^2 * \text{Fläche A}} * 100 = \frac{55}{1000 * 0,44} * 100 =$		12,5	%

Messungen / Berechnungen:

Momentane Leerlaufspannung U_{0M}	20,1	V
Momentaner Kurzschlussstrom I_{cM}	2,4	A
Momentane Leistung $P_M = FF * U_{0M} * I_{cM} = 0,75 * 20,1 * 2,4 =$	36,2	W
Momentane Einstrahlung I_M , (Messung Solarimeter)	630	W/m ²

Wirkungsgrad (η) verifizieren:

$$\eta = \frac{\text{Momentane Leistung } P_M}{\text{Mom. Einstrahlung } I_M * \text{Fläche A}} * 100 = \frac{36,2}{630 * 0,44} = \boxed{13,0} \%$$

12.11.4 Messungen am Klemmenkasten, Beispiel

Momentane Leerlaufspannung (Strang) U_{0M}	117,1	V
Momentaner Kurzschlussstrom (Strang) I_{cM}	2,8	A
Momentane Leistung $P_M = FF * U_{0M} * I_{cM} = 0,75 * 117,1 * 2,8 =$	245,9	W
Momentane Einstrahlung I_M , gemessen	800	W/m ²
Prozentuale Einstrahlung = $\frac{\text{Mom. Leistung } P_M}{\text{Spitzenleistung P}} = \frac{245}{330} =$	ca. 75	%
Momentane Einstrahlung I_M , berechnet = Proz. Einstr. * 1000 W/m ² =	ca. 750	W/m ²

13 Anhang II: Begriffe

13.1	Allgemeine Begriffe und Kurzerläuterungen	92
13.2	Begriffe Akkumulatoren	93

13 Anhang II: Begriffe

13.1 Allgemeine Begriffe und Kurzerläuterungen

Solarzellen

Runde oder eckige Kristallscheiben, meist aus Silizium. Fällt Licht auf diese Kristallscheiben, werden Elektronen freigesetzt. Werden die Kontakte auf der Unter- und Oberseite der Zelle über eine Last miteinander verbunden, fließt ein Strom. Kontakte an der Unter- und Oberseite der Zelle nehmen diesen Strom ab. Im Zusammenhang mit diesen Vorgängen spricht man oft von Photovoltaik: die Erzeugung einer (voltaischen) Spannung mittels Photonen (Lichtteilchen).

Solarmodule

In sich geschlossene Einheit. Enthält eine oder mehrere Solarzellen, welche fertig verdrahtet sind und durch eine transparente Frontplatte gegen schädliche Umwelteinflüsse geschützt sind. Solargeneratoren sind für eine Lebensdauer von rund 30 Jahren ausgelegt, wobei Garantien für die spezifizierten elektrischen Leistungen von 10 Jahren üblich sind.

Wirkungsgrad

Verhältnis zwischen erzeugter elektrischer Energie und auf das Solarmodul eingestrahelter Sonnenenergie. Der Wirkungsgrad wird meist in Prozenten angegeben und nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei kristallinen Silizium-Solarzellen wurde im Labor ein Umwandlungs-Wirkungsgrad von 24% erreicht. Amorphe Solarzellen erreichen mit maximal 10% bedeutend niedrigere Wirkungsgrade. Im Gegensatz zu den kristallinen Solarzellen nimmt bei heutigen amorphen Solarzellen der Wirkungsgrad mit der Zeit ab. Den höchsten Wirkungsgrad von über 30% erreichen die teuren Mehrschichtzellen (sog. Tandem- oder Multilayer Solarzellen).

Verwendetes Symbol für Wirkungsgrad: η

Lebensdauer

Die Dauer in Jahren, während der eine Solarzellenanlage die spezifizierte Leistung abgibt. Kritische Komponenten einer Solarzellenanlage sind die

Batterien und je nach Technik die Solargeneratoren. Je nach Betrieb und Wartung hält eine Solarbatterie 5-10 Jahre. Kristalline Solarzellen haben zum Teil Garantien von 10 Jahren. Eine der Hauptschwierigkeiten amorpher Zellen liegt heute noch in der kurzen Lebensdauer.

Solarzellenanlagen existieren heute in Leistungen von einigen Watt bis zu einigen MW. Allen Anlagen gemeinsam ist ihre hohe Zuverlässigkeit und der geringe Aufwand für Wartung und Betrieb.

Systemkomponenten sind die Gesamtheit aller Elemente, welche für eine Solarzellenanlage notwendig sind. Es sind dies u.a. die Solargeneratoren, Laderegler, Batterien, Entladeregler, Wechselrichter, Klemmenkasten, Blitzschutzeinrichtung usw.

Hybridkollektoren sind Systeme, welche sowohl Wärme wie elektrische Energie erzeugen.

Energiespeicher für Solarstrom sind Batterien, auch Akkumulatoren genannt. Diese Speicher werden mit Solarstrom geladen. Bei Bedarf geben die Batterien wieder elektrische Energie ab. Andere Systeme, wie zum Beispiel rotierende Schwungräder, sind sehr teuer.

Gleichstrom

Solargeneratoren generieren Gleichstrom. Damit eignet sich der Verbund mit einer Speicherbatterie, die ebenfalls mit Gleichstrom arbeitet (Plus- und Minuspole). Für abgelegene Anlagen empfiehlt es sich, Gleichstromverbraucher einzusetzen. Sollen trotzdem Geräte mit Wechselstromanschluss betrieben werden, ist ein Wechselrichter notwendig. Dieser wandelt den Gleichstrom in Wechselstrom um.

Netzstrom

Der elektrische Strom im Schweizer Verbundnetz ändert seine Polarität 100 Mal in der Sekunde. Um generierte Solarelektrizität, die nicht direkt verbraucht wird, in das öffentliche Netz einzuspeisen,

muss deshalb aus dem Solarzellen-Gleichstrom ein Wechselstrom gemacht werden. Neben lösba- ren sicherheitstechnischen Problemen sind es ins- besondere die Fragen der hohen Stromgeste- hungskosten, welche heute einer breiten Anwen- dung solcher netzgekoppelter Anlagen hinderlich sind.

Leistung entspricht dem Arbeitsvermögen pro Zeit. Ein Automotor zum Beispiel verfügt über eine bestimmte Leistung, unabhängig davon, ob er sich in voller Fahrt befindet oder parkiert ist. Werden in einer Solarzellenanlage die Spannung (U) in Volt und Strom (I) in Ampere angegeben, resultiert eine Leistung in Watt (W) entsprechend dem Produkt Strom mal Spannung. Eine Leistung von 1000 Watt entspricht einem Kilowatt (kW).

Energie entspricht dem Arbeitsvermögen. Fährt zum Beispiel ein Auto eine gewisse Zeit, hat es Energie (Benzin) verbraucht. Ist eine elektrische Anlage mit der Leistung (P) während der Zeitdauer (t) in Betrieb, erzeugt oder verbraucht die Anlage P mal t an Energie. Die Einheit heisst Wattsekunde (Ws) oder Joule. Für den praktischen Gebrauch wird die Zeit oft in Stunden statt in Sekunden angeben. Damit folgt die Energieangabe in Wattstunden (Wh). 1000 Wh entsprechen einer Kilowattstunde (kWh), die gleiche Grösse, mit welcher die Elektrizitätswerke ihren Kunden den Energiebezug verrechnen. Eine Kilowattstunde Energie entspricht zum Beispiel dem Betrieb eines 1-kW-Zimmerofens während einer Stunde.

13.2 Begriffe Akkumulatoren

Akkumulatortyp:

- Blei
- Nickel-Cadmium
- Silber-Zink
- Natrium-Schwefel

Eigenschaften:

hochentwickelt, relativ kostengünstig
robust, wartungsfrei, entladungsfest
teuer
hohtemperatur, noch in Entwicklung

Kapazität

Wird angegeben in Ah (Amperestunden). Hängt von Temperatur sowie Lade- und Entladestrom ab. Beispiel: $C_{10} = 80$ Ah bedeutet, dass bei 10-stündiger Entladung ein Strom von 8 A zur Verfügung steht, ohne die Entladeschlussspannung zu unterschreiten. Statt C_{10} auch die Bezeichnung K_{10} verwendet.

Die **Entladeschlussspannung** ist die Spannung, bis zu der eine Batterie entladen werden darf. Bei Entladung mit dem 20stündigen Entladestrom beträgt sie 1,75 V je Zelle.

Die **aktive Masse** ist derjenige Bestandteil der Batterieplatten, der bei Durchgang des Stromes, d.h. bei der Ladung und Entladung, chemischen Umsetzungen unterworfen ist.

Gespeicherte Energie $W_N = K_N * U_N$,
wo U_N = Nennspannung

Ah-Wirkungsgrad $\eta_{Ah} = \text{zugeführte Ladung} / \text{entnommene Ladung}$
Typischer Wert: 90%

Energetischer Wirkungsgrad $\eta_{Wh} = \text{zugeführte Energie} / \text{entnommene Energie}$
Typischer Wert: 80%

Ladungsgrad $= Q / K_N$,
wo Q = enthaltene Ladung

Zyklentiefe $= Q_E / K_N$,
wo Q_E = der geladenen Batterie entnommene Ladung

Zyklenlebensdauer

Anzahl Lade-/Entladezyklen, bis Kapazität auf 80% der Anfangskapazität abgefallen ist. Hängt stark von der Zyklientiefe ab.

Selbstentladerate

Selbstentladung in der Batterie, in Ah/Monat oder % pro Monat

Bleiakkumulator

Relativ kostengünstig (etwa 10 bis 20% der Gesamtkosten einer autonomen Anlage) und deshalb in PV-Anlagen am meisten verbreitet.

- Stationäre Industriebatterien
Bis 1000 Zyklen bei 50% Zyklientiefe. Wartungsintervalle ca. 2 Jahre. Max. Lebensdauer ca. 10 Jahre. Kosten ca. Fr. 550.-/kWh.
- Modifizierte Autobatterien
Bis 500 Zyklen bei 50% Zyklientiefe. Wartungsintervalle ca. 1 Jahr. Max. Lebensdauer ca. 6 Jahre. Kosten: ca. Fr. 300.-/kWh.
- Gel-Batterien («Dryfit»)
Verschlossene Zellen mit gelartigem Elektrolyt. Bis 300 Zyklen bei 50% Zyklientiefe. Wartungsfrei, max. Lebensdauer ca. 4 Jahre. Kann im Gegensatz zu obigen Typen ohne bleibenden Schaden tiefentladen werden. Kosten: ca. Fr. 400.-/kWh.

14 Anhang III: Berechnungsbeispiel

14.1	Flächenbedarf	96
14.2	Jährlicher Energieertrag	96
14.3	Kosten und Energiepreis (Stand Frühjahr 1991)	97

14 Anhang III: Berechnungsbeispiel

14.1 Flächenbedarf

gesucht: Flächenbedarf A
 gegeben: Zellenwirkungsgrad $\eta = 11.5 \%$
 Zu installierende Spitzenleistung $P = 3 \text{ kW}$
 Maximale Strahlung $I = 1 \text{ kW/m}^2$

$$\text{Flächenbedarf } A = \frac{P}{I * \eta} = \frac{3 \text{ kW}}{1 \text{ kW/m}^2 * 0.115} = 26 \text{ m}^2$$

14.2 Jährlicher Energieertrag

gesucht: Geschätzter jährlicher Energieertrag E_{AC}
 gegeben: Anlagewirkungsgrad $\eta = 9,5 \%$
 Solarzellenfläche $A = 26 \text{ m}^2$
 Dachneigung 25°
 Ausrichtung 30° Ost
 Strahlungsdaten Aarau G (Aarau: extremes Nebelgebiet im Winter)

METEONORM V1.00 (C) 1988 OFEN/BWE P. BREMER / J.-C. STRITT STRAHLUNG AUF GENEIGTE FLÄCHEN [kWh/m2] AARAU / HÖHE : 385 m / STRAHLUNGSREGION : 15													
Fläche No: 1					Neigung: 25.0°					Orientierung: -30,0°			
	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	TOTAL
G:	30.1	51.2	88.7	127.1	151.2	160.9	174.3	144.4	112.0	69.1	33.1	23.0	1165

G: Globalstrahlung

Jährlicher Energieertrag:

$$E_{AC} = G * A * \eta = 1165 \text{ kWh/m}^2 * 26 \text{ m}^2 * 0,095 = 2878 \text{ kWh}$$

14.3 Kosten und Energiepreis (Stand Frühjahr 1991)

Bemerkung:

- Die folgenden Zahlen sollen die Grössenordnung wiedergeben. So können die Installations- / Montagekosten je nach Dachtyp, die Modul- und Wechselrichterkosten je nach Hersteller beträchtlich variieren.

Solarmodule	60 mal 53 W à 490.–	29400.–
Wechselrichter		7500.–
Installation komplett		10000.–
<hr/>		
Total		46900.–

Bemerkung:

- Die Höhe des errechneten Energiepreises hängt vom gewählten Berechnungsmodell ab. Welches man auch immer wählt, wichtig ist, dass die Kapitalzinsen mit in die Rechnung einfließen. Im folgenden Beispiel wurde bei der Festlegung der Kapitalzinsen von der Erhöhung einer bestehenden Althypothek (Zins 5,5%) ausgegangen.

Amortisation in 30 Jahren, Kapitalzins 5,5% (Stand Frühjahr 1991)

Kosten pro Jahr (Annuität: ≈ 6,9%)	3236.–
Unterhalt pro Jahr (Teuerung 3,5%)	344.–
<hr/>	
Jahreskosten	3580.–

Bei der Annuitätsmethode sind die absoluten Jahreskosten über die Lebensdauer von 30 Jahren immer gleich gross, nämlich Fr. 3580.–. Mit steigender Lebensdauer werden diese Jahreskosten real immer kleiner, da die Teuerung das Geld entwertet und u.a. die Strompreise steigen.

Strompreis:

Jahreskosten	3580.–
Jahresertrag	2878 kWh
Strompreis	3580.– / 2878 kWh = Fr. 1,24

15 Anhang IV: Anschlussgesuch VSE

Anschlussgesuch

100

15 Anhang IV: Anschlussgesuch VSE

Anschlussgesuch

für elektrische Energieerzeugungsanlagen im Parallelbetrieb mit dem Netz und den Energiebezug bzw. Rücklieferung in das Netz des Elektrizitätswerkes
(nachstehend Werk genannt)

1. Name, Adresse und Tel.-Nr. _____
des Gesuchstellers: _____

2. Name, Adresse und Tel.-Nr. _____
des Eigentümers der Anlage: _____

Ort der Energieerzeugung: _____

Adresse: _____

Katasterplan Nr.: _____

Parzelle Nr.: _____

Gebäude-Versicherungs-Nr.: _____

3. Datum der vorgesehenen Inbetriebnahme: _____

4. Technische Angaben

4.1 Antriebssystem: _____

4.2 Hersteller/Lieferant: _____

4.3 Erzeugung der elektrischen Energie
(zutreffendes mit X bezeichnen)

Synchronmaschine:

Asynchronmaschine:

Blindleistungskompensation

(Art, Leistung): _____

4.4 Nenndaten des Generators bei Dauerbetrieb (Vollast)

Wirkleistung: _____ kW

Scheinleistung: _____ kVA

Kurzschlussleistung: _____ kVA

Leistungsfaktor $\cos\vartheta$: _____

Spannung: _____ V

Frequenz: _____ Hz

Schaltung ($\Delta < \Lambda$): _____

4.5 Vorgesehene Schutzeinrichtungen

a) für Generator (Überlast, Kurz- und Erdschluss, Schiefast, Rückleistung, usw.):

b) für Parallelbetrieb mit Netz (Minimal- und Maximalspannungs- sowie Frequenz-Überwachung, Einschalt- und Wiedereinschaltverriegelung gegen spannungsloses Netz, Synchronisierung und Zuschaltung, usw.):

c) gegen Netzurückwirkungen:

4.6 Bei Asynchrongenerator, vorgesehene Zuschaltung (Direkt, Stern-Dreieck, usw.):

4.7 Sternpunktbehandlung:

5. Betriebsart (zutreffendes mit X bezeichnen)

5.1 Inselbetrieb mit Noteinspeisung aus dem Netz:

Leistungsbedarf: _____ kW

5.2 Notstromanlage mit zeitlich beschränktem Parallelbetrieb:

Leistungsabgabe an das Netz: _____ kW

5.3 Parallelbetrieb mit dem Netz:

5.3.1 Voraussichtliche Energierücklieferung

a) im Sommerhalbjahr: _____ kWh

b) im Winterhalbjahr: _____ kWh

Leistungsbedarf bei Ausfall der Anlage: _____ kW

5.3.2 Voraussichtlicher Energiebezug

a) im Sommerhalbjahr: _____ kWh
b) im Winterhalbjahr: _____ kWh

zu 5.2 und 5.3

vorgesehene Betriebszeit(en): _____
eventuell Schaltprogramm: _____

6. Periodische Kontrolle der elektrischen Anlagen durch:

Wichtig:

Energieerzeugungsanlagen, die mit Stromversorgungsnetzen parallel betrieben werden können, sind vorlagepflichtig (Bundesgesetz betreffend die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen, Art. 13 und 15). Vor Erstellung der Anlagen ist dem Eidg. Starkstrominspektorat eine Vorlage gemäss Art. 21 der Verordnung über die Vorlage für elektrische Starkstromanlagen einzureichen.

Vor Genehmigung der Planvorlage durch das Eidg. Starkstrominspektorat, des Anschlussgesuches und Abnahme des elektrischen Anlageteiles durch das Werk, sowie der gegenseitigen Genehmigung allfälliger Betriebsvereinbarungen zwischen dem Betreiber der Anlage und dem Werk, darf die Anlage nicht mit dem Netz des Werkes parallel geschaltet werden.

Ort und Datum:

Unterschrift des Gesuchstellers:

Beilagen:

Technischer Beschrieb der Anlage

Detailschema des elektrischen Anlageteils

Durch das Eidg. Starkstrominspektorat genehmigte Planvorlage

16 Anhang V: Neue Vorschriften SEV/ESTI

Photovoltaische Energieerzeugungsanlagen, ESTI	104
Vorlage- und Kontrollpflicht	104
Installationsberechtigung	105
Installation der Anlage	105
Blitzschutz, Erdung	107
Anlagen im Parallelbetrieb	107
Inbetriebnahme	108
Messung der Energie	108
Gesetze, Verordnungen und Vorschriften	108

16 Anhang V: Neue Vorschriften SEV/ESTI

Referat von H. Bersinger
 Chef der Installationskontrolle
 Aargauisches Elektrizitätswerk
an der Informationstagung für Elektro-
 installateure und Projektierungs-
 büros
 am 16. Januar 1991 in der Aula der
 HTL, Windisch
Titel: Neue Vorschriften SEV/ESTI: – Pho-
 tovoltaische Energieerzeugungs-
 anlagen

(Hinweis der Redaktion: Die folgende Numerierung bezieht sich auf die entsprechenden Positionen der SEV-Vorschrift 233.0690d)

Photovoltaische Energieerzeugungsanlagen, ESTI

Mit der zunehmenden Installation von photovoltaischen Energieerzeugungsanlagen, auch unter dem Begriff Solarenergie- oder Sonnenenergie-Anlagen bekannt, hat das Eidg. Starkstrominspektorat (ESTI) besondere provisorische Sicherheitsvorschriften erlassen, welche beim SEV unter Nr.233.0690d, Ausgabe Juni 1990, bestellt werden können. Im folgenden werden im besonderen die für den Installateur wichtigen Punkte behandelt. Für die Gesamtanlage sind die erwähnten Vorschriften massgebend.

Vorlage- und Kontrollpflicht

Bereits vor den Sicherheitsvorschriften wurde festgelegt, dass entgegen den Auflagen über die Vorlagepflicht kleine Anlagen im Parallelbetrieb nicht mehr der Vorlage an das ESTI bedurften. Dies wurde in die Vorschriften übernommen und unter Punkt 4 ist nun folgende Regelung enthalten.

4.1 Anlagen ohne Verbindung zu einem Niederspannungsverteilstromnetz

4.1.1 Einzelanlagen jeglicher Grösse auf eigenem Grund und Boden, welche die für Hausinstallationen zulässige Maximalspannungen nicht überschreiten und die

nicht zufolge der Nähe anderer elektrischer Anlagen Betriebsstörungen oder Gefährdungen veranlassen können, sind nicht vorlagepflichtig (ELG, Art. 13).

4.1.2 Anlagen auf fremdem Grund und Boden sind immer vorlagepflichtig (ELG, Art. 15).

4.1.3 Die Anlagebesitzer sind selber kontrollpflichtig. Sie müssen ihre Anlagen dem Eidg. Starkstrominspektorat melden und sich über die sicherheitstechnischen Kontrollen diesem gegenüber ausweisen können.

4.2 Anlagen mit Verbindung zu einem Niederspannungsverteilstromnetz

4.2.1 Anlagen mit Leistungen bis zu 3,3 kVA einphasig oder 10 kVA dreiphasig auf eigenem Grund und Boden, werden den Hausinstallationen gleichgestellt. Sie sind nicht vorlagepflichtig (ELG, Art. 13).

4.2.2 Anlagen mit Leistungen über 3,3 kVA einphasig oder 10 kVA dreiphasig auf eigenem Grund und Boden oder verschiedene parallel betriebene Anlagen kleinerer Leistungen, deren Gesamtleistung diese Werte überschreitet, werden nicht den Hausinstallationen gleichgestellt. Sie können elektrische Anlagen wesentlich stören oder gefährden und sind somit vorlagepflichtig (ELG, Art. 15). Sämtliche Unterlagen sind dem Starkstrominspektorat zur Genehmigung einzureichen. Mit dem Bau der Anlagen darf erst begonnen werden, wenn eine rechtsgültige Genehmigung des Eidg. Starkstrominspektors vorliegt.

4.2.3 Anlagen auf fremdem Grund und Boden sind immer vorlagepflichtig (ELG, Art. 15).

4.2.4 Gebührenpflichtig sind grundsätzlich die gesamten Anlagekosten. Sofern der Gleichstromanlagenteil mit weniger als 120 V= Leerlaufspannung betrieben wird, wird für das Solarzellenfeld keine Gebühr erhoben.

4.2.5 Sämtliche Anlagen müssen dem Eigentümer des Netzes gemeldet werden. Dieser ist kontrollpflichtig.

- 4.3 Hochspannungsanlagen mit oder ohne Verbindung zu einem Hochspannungsnetz**
Solche Anlagen sind immer vorlagepflichtig. Die Kontrolle obliegt dem ESTI.

Installationsberechtigung

Die Berechtigung für die Installation der Anlagen wie auch die Bedingungen für die Anlagekomponenten bezüglich des Normnachweises ist im Punkt 3 wie folgt festgehalten:

- 3.1 Installationsberechtigung**
Photovoltaische Energieerzeugungsanlagen für Spannungen bis 1000 V bzw. 1500 V= mit oder ohne Verbindung zu einem Niederspannungsverteilnetz unterliegen der Niederspannungs-Installations-Verordnung (NIV). Sie dürfen nur durch Personen entsprechend den Bestimmungen der NIV installiert werden.
- 3.2 Anlagekomponenten**
Anlagekomponenten photovoltaischer Energieerzeugungsanlagen bis 1000 V bzw. 1500 V= unterliegen der Niederspannungs-Erzeugnis-Verordnung (NEV) und sind in Bezug auf die Sicherheit und Vermeidung von Störungen nachweislichpflichtig.
- 3.3 Hochspannungsanlagen**
Anlagen für Spannungen über 1000 V bzw. 1500 V= unterliegen der Starkstromverordnung (StV).

Installation der Anlage

Bei der Installation der Anlage sind für den Installateur im besonderen die Vorschriften über die Erdung, den Blitzschutz, die Verkabelung mit den Kabelarten, Kabelschutz und die Verbindungskasten von Bedeutung, weshalb diese im folgenden im Wortlaut wiedergegeben sind:

- 2.1.5 Erdung von Anlagen ohne Gebäude**
Die Erdung ist gemäss Starkstromverordnung und den Normen SEV 3569 auszuführen.
Für das gesamte Solarzellenfeld ist ein Potentialausgleich vorzusehen und die Erdung ist so auszuführen, dass die Berührungs- und Schrittspannungen für Zeiten über 5 s 120 V= nicht überschreiten.
Bei grösseren Anlagen mit einem wechselstromseitigen Hochspannungsanschluss sind die Erdungsverhältnisse mit dem Eigentümer des Netzes abzuklären. Eine örtliche Trennung der Erdung der Gleichstromseite von derjenigen der Wechselstromseite zwecks Vermeidung gegenseitiger Beeinflussung kann sinnvoll sein.
- 2.1.6 Erdung und Blitzschutz von Anlagen auf Gebäuden**
Für die Erdung gelten die Hausinstallationsvorschriften SEV 1000. Eine photovoltaische Energieerzeugungsanlage für Starkstrom bedingt in jedem Fall eine Erdung.
Für den Blitzschutz von Gebäuden gilt die Norm SEV 4022. Grundsätzlich gilt, dass ein Gebäude zufolge einer Solarzellenanlage nicht blitzschutzpflichtig wird.
Bei auf Gebäuden montierten Modulen ist die Installation den lokalen Gegebenheiten anzupassen (siehe Beilage 1). Das Verbindungskabel vom Wechselrichter zum Klemmkasten auf dem Dach muss mit einer metallischen Hülle (z.B. abgeschirmtes Kabel oder Metallrohr) versehen sein, wobei der Querschnitt derselben mind. 10 mm² (Cu) betragen muss. Auf der Seite des Wechselrichters ist diese Hülle zu erden. Auf der Klemmenkastenseite ist wie folgt zu verfahren:
a) Bei Gebäuden mit einem äusseren Blitzschutz ist die metallische Hülle des Verbindungskabels am oberen Ende mit den metallenen Rahmen der Module und der Blitzschutzanlage zu verbinden.
b) Bei Gebäuden ohne Blitzschutz ist die metallische Hülle des Verbindungskabels

am oberen Ende mit den metallenen Rahmen der Module und einem allfälligen Blitzschutzfangleiter der Module zu verbinden. Zusätzlich ist parallel und örtlich eng zum Verbindungskabel eine isolierte Blitzschutzverbindung von den Modulrahmen zur Gebäudeerdung zu verlegen. Alternativ kann die metallische Hülle des Verbindungskabels verstärkt werden. Der Gesamtquerschnitt der metallischen Hülle und der Blitzschutzverbindung muss mind. 25 mm² (Cu) betragen.

c) Bei Gebäuden ohne Blitzschutz und mit Modulen ohne metallene Rahmen und ohne Fangleiter wird das obere Ende der metallischen Hülle des Verbindungskabels nur an die Überspannungsschutzelemente und evtl. metallische Strukturen angeschlossen. Es empfiehlt sich aber trotzdem, parallel und örtlich eng zum Verbindungskabel eine isolierte Blitzschutzverbindung wie bereits beschrieben zu verlegen und diese oben mit der metallischen Hülle zu verbinden. Bei einem allfälligen Blitzschlag bietet diese Anordnung einen zusätzlichen Schutz. Ebenso besteht für zukünftige Installationsänderungen am Gebäude bereits eine Erdungsmöglichkeit. Zwischen den beiden Polleitern und der metallischen Hülle sind bei der Gebäudeeinführung Überspannungsschutzelemente einzubauen. Diese sind in schwer brennbaren Gehäusen unterzubringen.

Beim Eingang zum Wechselrichter sind zwischen den beiden Polleitern und der metallischen Hülle ebenfalls Überspannungsschutzelemente einzubauen. Diese sind mit demjenigen bei der Gebäudeeinführung zu koordinieren. Die Dimensionierung erfolgt entsprechend den Empfehlungen der Fabrikanten. Bei kurzen Verbindungsleitungen zwischen der Dacheinführung und dem Wechselrichter kann eine Gruppe von Überspannungsschutzelementen genügen.

Befinden sich auf dem Gebäude im Bereich von einem Meter der Modulrahmen andere metallische Strukturen, so sind diese mit den Modulrahmen im Sinne

eines Potentialausgleichs zu verbinden. Sofern es sich dabei um grössere Metallflächen, z.B. ganze Blechdächer handelt, so empfiehlt sich in Gegenden mit Gewittern, diese Flächen im Sinne einer Blitzschutzvorrichtung zusätzlich direkt zu erden.

- 2.1.7 **Modulabgänge**
 Die Verwendung und Anordnung von Schaltern, Sicherungen, Trenn- und Erdungsglaschen, Kurzschlussvorrichtungen, usw. bei den Modulabgängen und in der Verkabelung ist Sache des Anlagekonzeptes. Dieses muss so angelegt sein, dass Arbeiten an der Anlage ohne Gefährdung von Personen und Sachen ausgeführt werden können. Dabei ist zu beachten, dass Module bei Licht immer Strom führen. Gegebenenfalls ist nach den Regeln für Arbeiten unter Spannung vorzugehen.
 Das Sicherheitskonzept muss in den Betriebsvorschriften festgelegt sein. Trennvorrichtungen und Sicherungen, die nicht unter Last betätigt werden dürfen, sind besonders zu kennzeichnen. Unter Last zu betätigende Trenn- und Kurzschlussvorrichtungen müssen die vorkommenden Ströme sicher und ohne Gefahr für Personen schalten können.
- 2.1.8 **Schutz gegen thermische Überlast (Hot-spoteffect)**
 Seriegeschaltete Module sind durch Bypass Dioden gegen thermische Überlast zu schützen. Zusätzlich wird bei höheren Spannungen der Einbau von Strangdioden empfohlen.
- 2.1.9 **Leitungsschutz**
 Bei parallel geschalteten Strängen sind deren Verbindungsleitungen durch geeignete Überstromschutzelemente zu schützen.

Verkabelung

- 2.2.1 **Kabelarten und Kabelschutz**
 Die Kabel sind entsprechend den Umgebungsbedingungen zu wählen und zu verlegen. Dem mechanischen Schutz

und der Lichtbeständigkeit der Kabel ist besondere Bedeutung beizumessen. Da der elektrische Kabelschutz im Kurzschlussfall nicht gewährleistet werden kann, ist die Verkabelung in Sonderisolierung auszuführen und erd- und kurzschlussfest zu verlegen.

Isolationsmessungen der gesamten Anlage werden vorteilhaft in der Nacht ausgeführt oder dann im kurzgeschlossenen, ungeerdeten Zustand der Gleichstromanlage.

- 2.2.2 **Verbindungskästen**
Sammelschränke für Kabel mit Trennstellen, Schaltern, Kurzschlussvorrichtungen, Erdunglaschen, Messstellen, usw., sind entsprechend den Umgebungsbedingungen auszuführen. Alle elektrischen Anlageteile im Freien sind in der Schutzart IP54 oder höher auszuführen.

Blitzschutz, Erdung

Dem Blitzschutz muss bei den Installationen in allen Teilen die nötige Beachtung geschenkt werden, um Überspannungen zum Erder abzuleiten, ohne dass sie Schäden an der Anlage und vor allem auch am Gebäude anrichten können. Selbstverständlich ist ein absoluter Schutz im besonderen des Wechselrichters mit der eingebauten Elektronik nicht möglich.

Für den Installateur ist es im besonderen wichtig, dass der innere Blitzschutz fachgerecht ausgeführt wird. Neben dem Mindestquerschnitt von 25 mm² (Cu) des Erdleiters ist vor allem von grösster Wichtigkeit, dass derselbe möglichst auf dem direktesten Weg mit grossen Radien zum Erder geführt wird. Schlaufungen über Verteilungen und damit über mehrere Klemmen sind zu vermeiden. Bei Verlegungen auf brennbaren Gebäudeteilen oder Durchführungen durch solche ist der Erdleiter in nicht oder schwerbrennbare Rohre einzuziehen. Dementsprechend sind auch die Verbindungskästen der Umgebung anzupassen.

Anlagen im Parallelbetrieb

Bei Anlagen mit Parallelbetrieb mit dem Versorgungsnetz kann bei einem Netzausfall eine grosse Gefahr entstehen, wenn die Energieerzeugungsanlage nicht automatisch vom versorgenden Netz abgetrennt wird. Durch die Rückspannung aus der Installation würden Personen, die im Netz Arbeiten ausführen, gefährdet. In den Sicherheitsvorschriften sind deshalb die nachfolgenden Auflagen enthalten:

- 2.4.5 **Für Netzparallelbetrieb**
Ein Netzparallelbetrieb darf nur mit der Zustimmung des Eigentümers des Netzes erfolgen, der die notwendigen Bedingungen hierfür festlegt. Erdung und Nullpunktbehandlung müssen entsprechend dem Netz so konzipiert werden, dass der Personen- und Sachschutz gewährleistet ist. Sämtliche Anlageteile müssen mit den Netzsteueranlagen kompatibel sein (z.B. rundsteuerfest). Eine Zuschaltung an das Netz darf nur möglich sein, wenn die Netzspeisung innerhalb der genormten Werte unter Spannung steht. Synchronisation bzw. Zuschaltung muss ohne wesentliche Netzbeeinflussung möglich sein. Leistungsfaktorregulierung hat den Vorschriften des Eigentümers des Netzes zu entsprechen. Bei Netzausfall muss eine sichere Abschaltung des Wechselrichters innert 5 Sekunden in jedem Fall gewährleistet sein. Es ist eine allphasige Schutzeinrichtung, die auf Abweichungen von den genormten Spannungs- und Frequenzwerten anspricht und die die Energieerzeugungsanlage vom Netz trennt, vorzusehen. Die Funktion dieser Schutzeinrichtung ist durch den Eigentümer der Anlage periodisch zu prüfen. Die Wiedereinschaltung darf erst nach erfolgter definitiver Wiederherstellung des Netzbetriebes erfolgen. Während der Zeit standardisierter versuchsweiser Netz-wiedereinschaltungen muss die Zuschaltung der Wechselrichter blockiert bleiben. Die relevanten Kriterien sind mit

dem Eigentümer des Netzes abzusprechen.

Inbetriebnahme

Um die Sicherheit bei der Inbetriebnahme voll zu gewährleisten, muss die Abnahmekontrolle durch das energieliefernde Werk zwingend vor der Inbetriebsetzung im Parallelbetrieb erfolgen.

Messung der Energie

Bei allen Energieerzeugungsanlagen im Parallelbetrieb mit dem Netz muss neben dem normalen Bezugszähler noch ein Rücklieferungszähler installiert werden. Dieser wird, wie dies in Beilage 2 ersichtlich ist, in Serie zum Bezugszähler eingebaut, wobei Ein- und Ausgang vom Netz her gesehen, umgekehrt angeschlossen werden. Dabei müssen beide Zähler mit einer Rücklaufhemmung ausgerüstet sein, damit der Energiefluss in der verlangten Richtung gemessen wird.

Um die von der Solaranlage effektiv erzeugte Energie messen zu können, ist ein separater Zähler gemäss dem Schema in der Beilage 2 zu installieren.

Gesetze, Verordnungen und Vorschriften

Neben den speziellen Sicherheitsvorschriften sind für die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt noch folgende Gesetze, Verordnungen, Vorschriften usw. zu beachten:

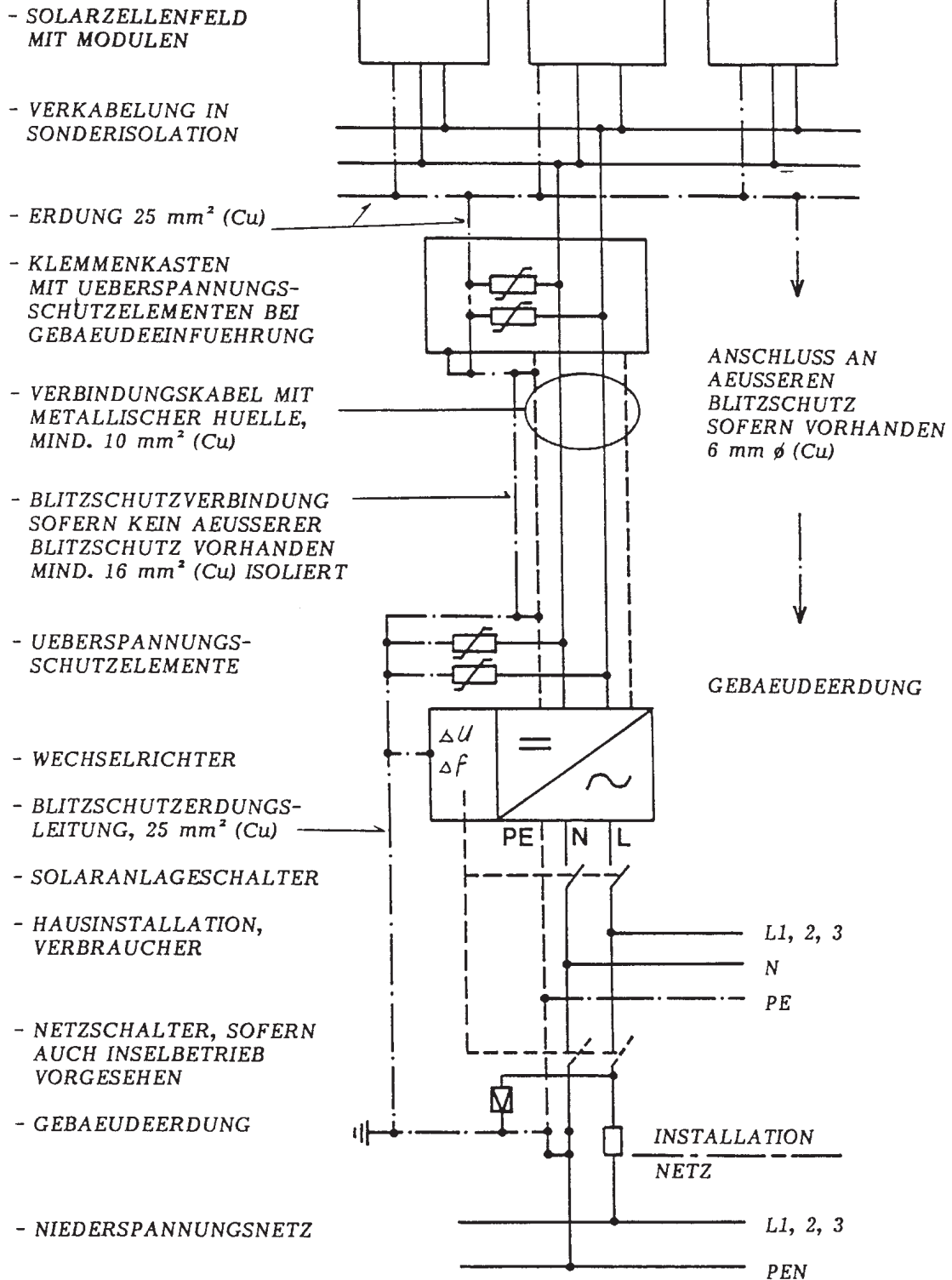
• Elektrizitätsgesetz	EIG, SR	743.0
• Planvorlagenverordnung	PVV, SR	734.25
• Starkstromverordnung	StV, SR	734.2
• Niederspannungs-Erzeugnis-Verordnung	NEV, SR	734.26
• Niederspannungs-Installations-Verordnung	NIV, SR	734.27
• Störschutzverordnung	SSV, SR	743.35
• Unfall-Versicherungsgesetz	UVG,SR	832.20

- Unfall-Verhütungs-Verordnung VUV, SR 832.30
- Verordnung für Arbeiten auf Dächern SUVA, Form. 1805
- Prov. Sicherheitsvorschriften STI 233.0690
Ausgabe Juni 1990
- Parallelschaltung von Niederspannungs-Energieversorgungsanlagen mit Stromversorgungsnetzen Eidg. Starkstrominspektorat STI Nr. 219.1081 d/f, Okt. 1981
- Niederspannungs-Eigenenergieerzeugungsanlagen Eidg. Starkstrominspektorat, Bulletin SEV 78 (1987) 17, 5. September
- Leitsätze des SEV über Blitzschutzanlagen SEV 4022.1987
- Leitsätze des SEV/Empfehlungen des VES für die Begrenzung von Beeinflussungen in Stromversorgungsnetzen SEV 3600 – 1./2./1987 für die Beurteilung der Oberschwingungen, Spannungsänderungen und Störfestigkeiten gegen Rundsteuersignale (Meisterkurve).
- Werkvorschriften des örtlichen EW bezüglich zulässige Unsymmetrien (z.B. Leistung, die einphasigen Anschluss erlaubt).

Im weiteren sind vom VSE zu vermerken:

- Merkblatt für elektrische Eigenenergieerzeugungsanlagen im Parallelbetrieb mit dem Netz und den Energiebezug bzw. Rücklieferung in das Netz des Elektrizitätswerkes. VSE 2.24d Oktober 1981
- Anschlussgesuch für elektrische Eigenenergieerzeugungsanlagen im Parallelbetrieb mit dem Netz und den Energiebezug bzw. Rücklieferung in das Netz des Elektrizitätswerkes. VSE 2.24d Oktober 1981
- Empfehlungen zur Tarifierung von photovoltaischen Anlagen. VSE 2.37d

Beilage 1



PHOTOVOLTAISCHE ENERGIEERZEUGUNGSANLAGE AUF GEBAEUDE

Beilage 2

