

Hadamovsky/Jonas

solarstrom. solarthermie

optimal:
40/30 °C
60/40 °C

 **VOGEL**

mit
CD-ROM

Solarstrom
Solarthermie

Prof. Dr.-Ing. Hans-Friedrich Hadamovsky
Dipl.-Ing. Dieter Jonas

Solarstrom Solarthermie

2., aktualisierte Auflage

Vogel Buchverlag

Prof. Dr.-Ing. habil. **HANS-FRIEDRICH HADAMOVSKY**
Jahrgang 1930, studierte Metallkunde und war nach Promotion und Habilitation 30 Jahre lang auf dem Gebiet der Halbleiterphysik und Halbleitertechnologie in Forschung, Entwicklung und Praxis tätig. Zusätzlich zu seiner Lehrtätigkeit an der Humboldt-Universität Berlin und der TU Chemnitz verfasste er 60 wissenschaftliche Publikationen. Heute ist Prof. Hadamovsky freiberuflicher Berater auf dem Gebiet der Solartechnik, speziell der Photovoltaik.

Dipl.-Ing. **DIETER JONAS**
Jahrgang 1937, studierte Maschinenbau. Er war über Jahrzehnte auf dem Gebiet der Konstruktion und Projektierung von Ausrüstungen und technologischen Prozessen in der Halbleiterfertigung tätig und ist Lehrbrief- und Fachbuchautor.
Seit mehreren Jahren berät Dipl.-Ing. Jonas bei der Projektierung von thermischen Solaranlagen.

Umschlagmotiv: Solarstromerzeugung und Solarthermie auf einem Dach.
Quelle: Wagner & Co., Zimmermannstr. 12, 35091 Cölbe,
www.wagner-solartechnik.de, E-Mail: info@wagner-solartechnik.de.

Haftungsausschluss
Texte, Abbildungen sowie technische Detailangaben zu Produkten wurden mit Sorgfalt bearbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Eine juristische Verantwortung oder Haftung für direkte oder indirekte Folgeschäden aus Anwendungen des Buches wird deshalb von Autoren und Verlag ausgeschlossen.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3088-8

2. Auflage. 2007

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.



Printed in Germany

Copyright 2004 by

Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Das gestiegene Umweltbewusstsein der Gesellschaft hat in den letzten Jahren das Interesse an alternativen Energien verstärkt. Auch die Industrie ist dieser Entwicklung gefolgt und hat mit hohen Investitionen Produktionskapazitäten für die Komponenten von Solaranlagen aufgebaut. Für den Aufbau von entsprechenden Anlagen sind aber auch Fachleute notwendig, die die neue Technik beherrschen und ökonomisch einsetzen können.

Speziell die Technik der Solaranlagen zur Solarstromerzeugung und als Schwerpunkt die thermische Nutzung der Sonnenenergie zur Warmwasserversorgung und Heizungsunterstützung werden hier besonders behandelt. Um die Vielfalt der technischen Details gründlich und ausführlich zugänglich zu machen, ist dem textlichen Grundgerüst des erforderlichen Wissens eine CD-ROM mit PDF-Dateien beigelegt, die mit Acrobat Reader leicht zu lesen sind. Darauf werden die Produkte der Solarindustrie und Dimensionierungsbeispiele nachvollziehbar beschrieben. Buch- und CD-ROM-Inhalte sind über eine Verweissystematik eng miteinander verzahnt. Dabei wird der Leser über das Symbol  mit zugehöriger Pfadangabe (in der Marginalienspalte des Buches) zu den korrespondierenden CD-ROM-Inhalten geführt. So bedeutet z.B. die Verweisangabe «Solarthermie\Schwimmbad\Schwimmbadabsorber», dass die relevanten Informationen auf der Hierarchieebene «Schwimmbadabsorber» zu finden sind. Die aufgenommenen Produkte sind eine kleine Auswahl aus dem Marktsortiment und dienen nur zur Orientierung. Wer Aktuelles benötigt, kann sich über die auf der CD-ROM (Quellenverzeichnis) vorhandenen Internetadressen leicht informieren. Der Onlineservice InfoClick (s. Inhaltsverzeichnis) bietet darüber hinaus zusätzliche Ergänzungen, Aktualisierungen usw.

Praktiker, die mit der Planung und den Aufbau von Solaranlagen beschäftigt sind, erhalten mit diesem Band wichtige Arbeitshilfen. Technisch interessierte Laien, Studenten und Lehrer werden mit technischen Details und der handwerklichen Problematik vertraut gemacht.

Wir bedanken uns beim Team des Vogel Buchverlags für die gewohnt hervorragende Zusammenarbeit bei der Umsetzung des Themas.

Ein besonderer Dank gilt auch den Firmen, die ihr aktuelles Informationsmaterial zur Verfügung stellten.

Kleinmachnow
Teltow

H.-F. Hadamovsky
D. Jonas

Weitere Titel für das Installateur- und Heizungsbauerhandwerk sind im Vogel Buchverlag erschienen:

Anette Becker	Lüftungsanlagen
Hadamovsky / Jonas	Solaranlagen
Hadamovsky / Jonas	Solarstrom/Solarthermie
Roland Nestler	Kalkulation und Angebot
Nestler / Becker / Schenker / Tiator / Reinhold	Prüfungsfragen Sanitär- und Heizungshandwerk
Christian Reinhold	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
Schenker / Tiator / Nestler	Projektplanung versorgungstechnischer Anlagen
Maik Schenker	Sanitäranlagen
Ingolf Tiator	Heizungsanlagen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 Solartechnik – Bedeutung für den Umweltschutz	13
1.1 Energiesituation und Folgen	13
1.2 Erneuerbare Energien	16
1.3 Senkung der CO ₂ -Emission durch Einsatz thermischer Solaranlagen	17
2 Energiequelle Sonne	21
2.1 Strahlungserzeugung	21
2.2 Solarstrahlung	21
2.3 Globalstrahlung	22
3 Solarstromerzeugung und praktische Nutzung	27
3.1 Halbleiter und Photoeffekt	27
3.2 Solarzellen	29
3.2.1 Kristalline Siliziumsolarzellen	29
3.2.2 Silizium-Dünnschichtzellen	34
3.2.3 Spektrale Empfindlichkeit	34
3.2.4 Zellen-Handling	35
3.3 Strom-Spannungs-Kennlinie	36
3.4 Standardbedingungen	38
3.5 Kenndaten und Zellenleistung	39
3.6 Spezielle Solarzellen	39
3.7 Ziel und Trend der Solarzellenforschung	40
3.8 Marktsituation	40
3.9 Solarmodule	41
3.9.1 Verschaltungsprinzipien	41
3.9.2 Modulaufbau und Modulkenndaten	42
3.9.3 Siliziummodule	43
3.9.4 CIS-Module	44
3.10 Solargenerator	45
3.10.1 Generatorverschaltung	45
3.10.2 Fehlermöglichkeiten beim Betrieb	45
3.10.3 Generatorleistung	47

4	Solarstromsysteme – Einteilung	53
5	Autonome Systeme für Inselbetrieb	57
5.1	Einteilung	57
5.2	Solarstrom für Geräte und netzferne Anlagen	57
5.3	Autonome Hausstromversorgung	61
5.4	Komponenten autonomer Solarstromsysteme	62
5.4.1	Solarakku	63
5.4.2	Laderegler	70
5.4.3	Wechselrichter für den Inselbetrieb	72
5.4.4	Gleichstrominstallation und Kabel	77
5.5	Dimensionierungsbeispiel – Autonomer Gleichstrombetrieb	79
6	Solarstromanlagen mit Netzeinspeisung	81
6.1	Grundprinzip	81
6.2	Solarstromanlagen mit zentralem Wechselrichter	82
6.3	Solarstromanlagen mit Strangwechselrichtern	86
6.4	Solarstromanlagen mit Modulwechselrichtern	88
6.5	Netzsicherheit – Netzüberwachung	88
6.6	Komponenten von Solarstromanlagen mit Netzeinspeisung	91
6.7	Wechselrichter für Solarstromanlagen mit Netzeinspeisung	92
6.8	Strangwechselrichter	93
6.9	Zähler und Einspeisung	100
6.10	Die neue Freischaltstelle nach VDE 0126-1-1	102
6.11	Innovative und konfektionierte PV-Systeme	102
7	Aufbau, Betrieb und Wartung der Solarstromanlage	107
7.1	Montage	107
7.2	Elektrische Installation der PV-Anlage	112
7.3	Inbetriebnahme, Betrieb und Wartung von PV-Anlagen	117
8	Anlagendimensionierung, Ertrag und Rentabilität	121
9	Stand und Entwicklung der Photovoltaik	133
10	Physikalische Grundlagen zur Wärmegewinnung aus Sonnenenergie	141
10.1	Umwandlung von Licht in Wärme	141
10.1.1	Elektromagnetische Wellen und deren Umwandlung in Wärme	142
10.1.2	Absorptionsvermögen	144
10.1.3	Emissionsvermögen	144

11 Funktionsprinzipien thermischer Solaranlagen	147
11.1 Eigensicherheit des Solarkreislaufs	149
11.2 Wärmeträgerflüssigkeit	151
11.2.1 Drain-Back-System	153
11.3 Mengenbestimmung des Glykolbedarfs	155
11.4 Umwälzpumpe	156
11.4.1 Dimensionierung der Umwälzpumpe	157
11.5 Dimensionierung des Membran-Druckausdehnungsgefäßes	159
11.6 Regelung der Solarkreislauftemperatur im Kollektorfeld und Speicher	164
11.7 Wärmemengenzähler	165
11.8 Datenfernübertragung	166
12 Funktion und Bauformen von Absorbern	167
12.1 Schwimmbadabsorber	167
12.2 Absorber für Kollektoren	169
12.2.1 Absorberbeschichtung	171
12.2.2 Absorberbauformen	173
13 Funktion, Aufbau und Bauformen von Kollektoren	177
13.1 Funktion und Aufbau von Kollektoren	177
13.1.1 Energieflussbild am Kollektor	177
13.1.2 Optischer Wirkungsgrad	181
13.1.3 Stillstandstemperatur	182
13.1.4 Kollektorgesamtwirkungsgrad	182
13.2 Bauformen von Kollektoren	185
13.2.1 Flachkollektoren	185
13.2.2 Vakuum-Röhrenkollektor	186
14 Solarspeicher	189
14.1 Anforderungen an Solarspeicher	189
14.1.1 Wärmeschichtung	190
14.1.2 Opferanode	191
14.1.3 Reduzierung von Wärmeverlusten durch Wärmedämmung	192
14.1.4 Begrenzung der Speichertemperatur	193
14.2 Speicherbauartausführungen	194
14.2.1 Brauchwasserspeicher	194
14.2.2 Kombispeicher	195
14.2.3 Solar-Pufferspeicher	196
15 Sicherheitstechnische Anforderungen	199
15.1 Blitzschutz und Erdung	199
15.2 Inbetriebnahme und Wartung	200

15.2.1	Inbetriebnahme	200
15.2.2	Wartung	204
16	Planung und Dimensionierung	207
16.1	Brauchwassererwärmung	208
16.1.1	Ermittlung des Wärmebedarfs	209
16.1.2	Ermittlung der Kollektorfeldgröße	211
16.1.3	Ausrichtung und Anordnung des Kollektorfeldes	213
16.1.4	Hydraulische Verbindung von Kollektoren zu Kollektorfeldern	217
16.1.5	Low-flow-Konzept	220
16.2	Festlegungen zur Speichergröße und Nachheizungsanbindung	221
16.3	Schwimmbadwassererwärmung	222
16.3.1	Anordnung des Absorberfeldes	224
16.3.2	Funktionsprinzip einer Solaranlage zur Schwimmbadwassererwärmung	226
16.3.3	Bestimmung der Absorberfeldgröße	230
17	Wirtschaftlichkeit solartechnischer Anlagen	233
17.1	Computer-Berechnungsverfahren	233
17.2	Ermittlung des Investitionsaufwandes	235
17.3	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	235
18	Schema einer interaktiven Projektierung	239
	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Einheiten	243
	Normenverzeichnis (s. CD-ROM)	
	Literatur- und Quellenverzeichnis	247
	Weiterführende Literatur (s. CD-ROM)	
	Glossar (s. CD-ROM)	
	Stichwortverzeichnis	251

Inhaltsverzeichnis der CD-ROM

Ausschreibungsformular

Glossar

Normen

Programme

- f-Chart Demoverision
- GetSolar Demoverision
- Reflex
- Schwimmbad Demoverision
- Solarmaster 3.0
- Polysun 33 Demo
- TSOL 4.03 Demo
- TYFO

Quellenverzeichnis

Solarstrom

Gesetze

Solarstromerzeugung

- Modultechnologie
- Solarmodule

Autonome Systeme für den Inselbetrieb

- Autonome Anlagen
- Solarakkus
- Laderegler und Inselwechselrichter
- Kabelquerschnitte

Solarstromanlagen mit Netzeinspeisung

- Wechselrichter
- Komplettpakete

Aufbau, Betrieb und Wartung der Solaranlage

- Montagesysteme
- Schaltpläne
- Blitzschutz

Anlagendimensionierung, Ertrag und Rentabilität

- Simulationssoftware für Solarstromanlagen

Solarthermie

Computer-Berechnungsverfahren

- Thermische Solaranlagen

Förderung erneuerbarer Energien

- Informationsblatt zur Solarförderung
- Antrag auf Förderung einer Solaranlage
- Länderförderprogramme
- Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien
- Bundesförderprogramme

Kollektoren

- Prüfzertifikate zu Sonnenkollektoren
- Flachkollektoren
- Vakuum-Röhrenkollektoren

Kollektoren-Montagebeispiele

- Aufdach-Montage
- Fassaden-Montage
- Flachdach-Montage
- Indach-Montage

Kollektorschwerkraftanlagen

Schwimmbad

- Solar Dusche
- Solarzelle CS 10
- Schwimmbadabsorber
- Wärmetauscher

Solarkreislauf

- Datenfernübertragung
- Funktionsschemata Beispiele
- Membran-Druckausdehnungsgefäß (MAG)
- Reglungstechnik
- Solar-Pumpen
- Wärmemengenzähler

Solarspeicher

- Brauchwasserspeicher
- Kompispeicher
- Pufferspeicher
- Puffer-Schichtenspeicher
- Zubehör

Wärmeträgerflüssigkeiten

Zubehör Installation

Benutzerhinweise

- readme.pdf

1

Solartechnik – Bedeutung für den Umweltschutz

- Energiesituation und Folgen
- Erneuerbare Energien
- Senkung der CO₂-Emission durch Einsatz thermischer Solaranlagen

1.1 Energiesituation und Folgen

Solaranlagen nutzen die Energie der Sonne. Die Nutzung der Solarenergie ist ein Beitrag zum Umweltschutz durch Einsparung der Verwendung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl.

Im Folgenden werden für die Solarenergie die Argumente «pro Ökologie» behandelt. Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist die Weltenergiesituation. Energie wird in den Formen

- Wärme,
- Licht und
- Kraft

genutzt.

Die Wärme dient vorzugsweise zum Beheizen von Räumen. Licht erfordert elektrischen Strom, der außerdem zum Betreiben elektrischer und elektronischer Systeme erforderlich ist. Die Nutzenergie Kraft wird in Industrie und Verkehrswesen benötigt. Ausgangsbasis für Nutzung und Verbrauch sind die Primärenergien Kohle, Rohöl, Erdgas, Uran und die Solarstrahlung.

Der Anteil der einzelnen Primärenergiearten ist einem ständigen, zeitlichen Wandel unterzogen. Strom wird in Deutschland zu 60% aus fossilen Energieträgern erzeugt. Im Einzelnen ergibt sich folgendes Bild für die Anteile der einzelnen Energieträger [1.1]:

- Steinkohle 22,8%,
- Braunkohle 26,1%,
- Mineralöl 1,6%,
- Erdgas 10,2%,
- Kernenergie 27,5%,
- Windkraft 4,5%,
- Wasserkraft 4,5%
- Sonstige 3,2%.

Vom Gesamtverbrauch benötigt die Industrie 24,9 %, das Verkehrswesen 27 %, die Haushalte 30,5 % sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen zusammen 17,6 % [1.1].

Werden Haushalt und Kleinverbraucher gemeinsam gerechnet, ist festzustellen, dass ca. die Hälfte der Energie in diesem Sektor verbraucht wird.

Basis der gesamten heutigen Energiewirtschaft ist die Nutzung der Primärenergien. Sie sind zu unterteilen in die, die aufgebraucht werden, dazu zählen Kohle, Öl, Erdgas und Uran und jene, die sich ständig erneuern, somit unerschöpflich sind – die regenerativen Energien.

Die radikale Verbrennung der fossilen Energieträger und die Verwendung von Uran kennzeichnen die jetzige Energiesituation.

Die noch vorhandenen Mengen, die Energiereserven für die Zukunft, sind aber endlich. Die Schätzung der weltweiten Vorräte, soweit erfasst und mit heutiger Technologie förderbar – die sog. Ressourcen –, differieren stark. Folgende Reservejahre werden angenommen [1.2]:

Ressourcen	Braunkohle	ca. 550 Jahre
	Steinkohle	ca. 150 Jahre
	Erdgas	ca. 65 Jahre
	Erdöl	ca. 43 Jahre

Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass diese Zahlen nur sehr grobe Schätzungen sind, darf festgestellt werden, dass die Ressourcen Erdgas und Erdöl in absehbarer Zukunft ganz oder teilweise aufgebraucht sind. Zu bedenken ist ferner, dass den Ermittlungen der jetzige Weltenergieverbrauch zugrunde gelegt wurde.

Seit Beginn der Industrialisierung ist der Energieverbrauch ca. um den Faktor 10 gestiegen.

Die prognostizierte, rapide Zunahme der Weltbevölkerung in den nächsten 30 Jahren auf ca. 8 Mrd. Menschen, wird zu einem zusätzlichen Energieverbrauch von ca. 60 % führen. Die Deckung dieses Bedarfs ist umstritten, Erdgas- und Erdölvorräte werden dann aber wahrscheinlich nahezu aufgebraucht sein.

Es verbleiben Kohle und Kernbrennstoffe. Der weitere Ausbau der Kerntechnik ist aus Sicherheitsgründen bedenklich und muss verhindert werden. Jeder Techniker weiß, es gibt kein absolut sicheres und fehlerfreies System. Hinzu kommt, dass die Probleme der Endablagerung der Reaktorabfälle nicht gelöst sind.

So bedenklich auch die Endlichkeit der Brennstoffvorräte ist – von größerer, negativer Bedeutung muss die Auswirkung des bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas entstehenden Kohlendioxids (CO₂) gesehen werden, das die Umwelt in einem bisher nicht bekannten Maß belastet. Die Entstehung von CO₂ wird hauptsächlich durch die

Verbrennung des Hauptbestandteils der fossilen Brennstoffe, des Kohlenstoffs, bedingt.

Weltweit werden jährlich ca. 24 Mrd. t CO₂ durch Verbrennung fossiler Energieträger in die Atmosphäre abgegeben, die außerdem durch weitere Schadstoffe wie Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Methan (CH₄) belastet wird.

Die Industriestaaten mit 25 % Anteil an der Weltbevölkerung verursachen 80 % des gesamten CO₂-Ausstoßes.

Die Erdatmosphäre besteht zu 78 % aus Stickstoff, 21 % Sauerstoff und ca. 1 % Edelgasen sowie aus einer geringen Menge (ca. 0,1 %) von besonderen Gasen, den sog. Treibhausgasen.

Unsere Erdatmosphäre wird aufgrund der Anwesenheit der Treibhausgase vom kurzwelligen Teil der Sonnenstrahlung ungehindert durchdrungen. Die Erdoberfläche absorbiert diese Strahlung. Die dabei entstehende langwellige Wärmestrahlung wird in den Weltraum zurückgestrahlt. Die Treibhausgase reflektieren die Wärmestrahlung. Das führt dazu, dass eine ausreichende Erwärmung der Erdoberfläche erfolgt. Diese Wirkung wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet.

Treibhauseffekt

Das Treibhausgas besteht aus Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Distickstoffoxid und Methan. Die bei der Verbrennung fossiler Energieträger frei werdenden Gase verändern die Zusammensetzung der Atmosphäre und führen zu einem zusätzlichen Treibhauseffekt.

Zusätzlicher Treibhauseffekt

Mit der Zunahme des Energieverbrauchs ist somit eine Erhöhung des CO₂-Gehalts und anderer Schadstoffe in der Atmosphäre verbunden. Dramatisch ist die Tatsache, dass die Treibhausgase eine sehr hohe Lebensdauer haben.

Mann rechnet bei CO₂ mit 100 Jahren, CH₄ mit 10 Jahren und N₂O mit 150 Jahren. Durch die Anreicherung der Atmosphäre mit den Verbrennungsschadstoffen wird die Reflexion der Wärmestrahlung auf die Erdoberfläche verstärkt. Im Ergebnis ist die globale mittlere Temperatur seit 1860 um 0,3...0,6 °C angestiegen. Folgende Fakten lassen die globale Erwärmung deutlich werden:

Globale Erwärmung

- Die Alpengletscher schmelzen zunehmend ab.
- Der Meeresspiegel steigt infolge eines erhöhten Schmelzwasserzuflusses und Wärmeausdehnung der Wassermasse um 1...2 mm pro Jahr, innerhalb der letzten 100 Jahre um 10...20 cm.
- Die tropischen Meere erwärmten sich seit 1994 um 0,3 °C.

Im Resultat führt der zusätzliche Treibhauseffekt zu gravierenden Klimaänderungen. Computersimulationen von Klimamodellen prophezeien, dass innerhalb der nächsten 100 Jahre die globale Lufttemperatur am Erdboden in Abhängigkeit von der CO₂-Emission auf 3 bis 4 °C ansteigen kann.

Die Konsequenzen aus den Klimaänderungen sind teilweise bereits sichtbar. Man denke an die Zunahme der Sturm- und Flutkatastrophen oder an das nachgewiesene Abschmelzen der Nord- und Südpolglotischer sowie der Alpengletscher.

Aus diesen Entwicklungen sind dringende Forderungen abzuleiten; Energieeinsparung ist zunächst die vordringlichste Maßnahme.

Inwieweit eine in der Zukunft zunehmende Verteuerung der fossilen Energieträger wirksam werden könnte, bleibt abzuwarten. Technische Maßnahmen müssen einen entscheidenden Beitrag zur Einsparung leisten. Dazu zählen bessere Wärmedämmung an Gebäuden, Einbau effizienter Heizanlagen und Warmwasserbereitung, Einsatz stromsparender Haushaltsgeräte und Energieeinsparung bei der Erzeugung und Verteilung von Strom, z.B. in Form von Klein-Heizkraftwerken mit kombinierter Erzeugung von Wärme und Elektroenergie. Nicht zuletzt sind alle Formen der Nutzung der regenerativen Energien eine wichtige Alternative.

1.2 Erneuerbare Energien

Ökologisch-ökonomischer Energiemix

Sollen die negativen Auswirkungen der jetzigen Energiepolitik gemindert werden, ist eine verstärkte Umstellung der Energieerzeugung unter Einbeziehung der regenerativen Energiequellen, die Schaffung eines ökologisch-ökonomischen Energiemixes und eine größere Einsparung von Energie dringend geboten. Die erneuerbaren Energien sollten dabei in stärkerem Maße bevorzugt und gefördert werden. Sie können die bestehenden Energiesysteme ergänzen. Deren vollständige Ablösung ist in naher Zukunft nicht möglich, ihre Anwendung wird aber ein fester Bestandteil der Energieversorgung in der Zukunft sein. Der Einführungsprozess verläuft langsam aber stetig, wobei zu bedenken ist, dass es meist mehrere Jahrzehnte braucht, ehe sich im Sinne des Wettbewerbs eine neue Technik vollständig etabliert.

Erneuerbare, regenerative Energiequellen

Erneuerbare, regenerative Energiequellen sind u.a. unterschiedliche Formen der Sonnenenergie, dazu zählt primär die Sonnenstrahlung. Wind, Wasserkraft, Erdwärme und Biomasse sind der Einwirkung der Sonne zu danken. Bild 1.1 zeigt die Varianten der Solarenergienutzung.

Die Stromversorger und Netzbetreiber veröffentlichten für das Jahr 2004 Daten, die das starke Wachstum der regenerativen Energien deutlich machen. Danach wurden insgesamt 15% mehr Strom aus regenerativen Energien gegenüber 2003 eingespeist. Wind- und Wasserkraft und Bioenergie nahmen um 12,8% zu. Photovoltaikanlagen erhöhten die Stromerzeugung um 74,6% [1.3].

Wie wichtig Solarstrom für die Ökologie ist, zeigt die Tatsache, dass eine Solarstromanlage mit einer Leistung von 1 kW_p jährlich den Aus-

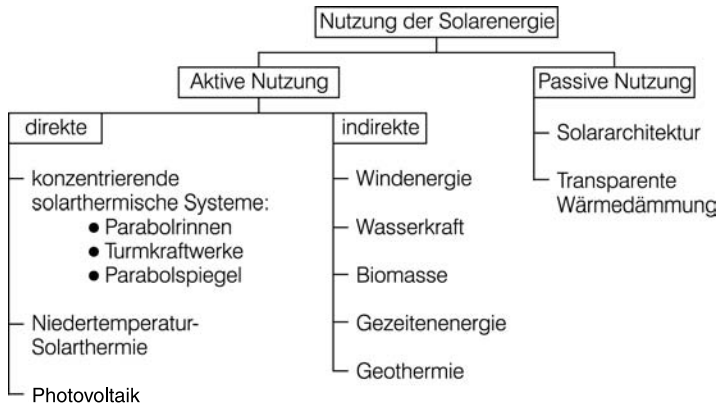


Bild 1.1
Nutzungsmöglichkeiten
der Sonnenenergie

stoß von ca. 500 kg CO₂ erspart. Ein zusätzlicher Nutzeffekt besteht darin, dass im Gegensatz zum konventionellen Kraftwerk keine Müllprobleme entstehen und die Komponenten der Anlage sich nach einer Mindestlebensdauer von mehr als 25 Jahren recyceln lassen. Die für die Herstellung der Solarstromanlage benötigte Energie wird in weniger als 6 Jahren wieder amortisiert. Nach dieser Zeit wird ein Nettoenergiegewinn erzielt und über den Zeitraum der Anlagenlebensdauer ein Mehrfaches der eingesetzten Energie geerntet.

1.3 Senkung der CO₂-Emission durch Einsatz thermischer Solaranlagen

Für die Bereitstellung der Niedertemperaturwärme zur Beheizung der Gebäude sowie der Brauchwassererwärmung werden ca. 40 % der Endenergie in der Bundesrepublik Deutschland eingesetzt [10.1]. Auf den Brauchwasserbedarf entfallen davon ca. 10...15 %. Es besteht also ein hohes Potential für die Sonnenenergienutzung, insbesondere in neueren bzw. rekonstruierten Gebäuden wo ein verbesserter Wärmeschutz bereits Standard ist.

Die Bereitstellung der Niedertemperaturwärme geschieht weitestgehend durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, mit der Folge einer CO₂-Emission und des damit verbundenen Treibhauseffektes.

Aus Tabelle 1.1 ist die CO₂-Emission je erzeugter kWh für die wesentlichen Energieträger, die zur Niedertemperaturwärmeerzeugung eingesetzt werden, ersichtlich.

Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass für die Erzeugung von 1 kWh Wärmeleistung die vorgelagerten Emissionen und die ausrüstungsseitigen Wirkungsgrade wie:

**Niedertemperaturwärme
Treibhauseffekt**

**Vorgelagerte
Emissionen**

Tabelle 1.1 CO₂-Schadstoffemission in kg je erzeugter kWh

Brennstoff	Heizwert H_u	Brennwert H_o	spezif. CO ₂ -Emissionswerte	
			[kg/kWh]	mit Anwendung Brennwerttechnik [kg/kWh]
Heizöl	10,0 kWh/l	10,7 kWh/l	0,26	0,24
Erdgas H	10,4 kWh/m ³	11,5 kWh/m ³	0,2	0,19
Erdgas L	8,8 kWh/m ³	9,8 kWh/m ³	0,2	0,19
Elektroenergie (Strommix 1988)			0,55	

- Förderung des fossilen Brennstoffs,
- Transport vom Förderort zur Veredlungsstelle, z.B. Raffinerie von Erdöl,
- Transport zum Verbraucher,
- Ausnutzung des Brennstoffes bei der Verbrennung in der Heizungsanlage

Primärenergie-nutzungsgrad η_p

zu berücksichtigen sind. Es ist üblich hierbei vom Primärenergienutzungsgrad η_p zu sprechen. Dieser beträgt bei [10.1]

Öl- oder Gasheizung 0,6...0,8 und
elektrische Widerstandsheizung 0,3

Beispiel

Zur Veranschaulichung der auftretenden CO₂-Emission wird ein 4-Personen-Haushalt zugrunde gelegt. Erfahrungsgemäß beträgt der tägliche mittlere Brauchwasserbedarf 50 l/d je Person bei einer Bezugstemperatur von 45 °C. Die Primärnutzungsgrade werden für die zum Einsatz gelangenden Energieträger und den installierten Heizungsanlagen wie folgt gewählt, wobei Leistungsverluste im Speicher sowie Rohrleitungssystem unberücksichtigt bleiben.

η_{PH} Heizöl 0,7
 η_{PE} Erdgas 0,8
 η_{PEL} Elektroenergie 1,0

(Der Primärenergienutzungsgrad von 0,3 ist bereits im Strommix für den spezifischen CO₂-Emissionswert nach Tabelle 10.1 berücksichtigt.)

Nutzwärmemenge

Lösung

Unter Anwendung der Wärmeleichung folgt für den jährlichen Bedarf an Nutzwärmemenge:

$$\begin{aligned} Q_N &= m \cdot c \cdot \Delta T \cdot t \\ Q_N &= V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \cdot t \text{ [kWh / a]} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

mit:

Q_N jährliche Nutzwärmemenge [kWh / a]

m Masse des Energieträgers [kg]

V Brauchwasserbedarf [l; dm³]

ρ Dichte von Wasser = 1 [kg / dm³]

c spezifische Wärmekapazität von Wasser = 0,00116 [kWh / (kg K)]

ΔT Temperaturdifferenz [K]

t Zeitdauer je Jahr [1/a]

$$Q_N = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \cdot t = 4 \cdot 50 \cdot 0,001163 \cdot (45 - 12) \cdot 365$$

$$Q_N = \underline{2802 \text{ kWh/a}}$$

Die CO₂-Schadstoffemission errechnet sich unter Nutzung der in Tabelle 10.1 ausgewiesenen spezifischen CO₂-Emission zu:

CO₂-Schadstoffemission

$$\begin{aligned} S_{\text{CO}_2\text{-Emission}} &= \frac{Q_N \cdot \text{spez. CO}_2\text{-Emissionswert}}{\text{Primärenergienutzungsgrad } \eta_p} \text{ [kg/a]} \\ S_{\text{CO}_2\text{-Emission}} &= \frac{Q_N \cdot c_{\text{CO}_2}}{\eta_p} \text{ [kg/a]} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Die anfallende CO₂-Schadstoffemission beträgt bei:

Heizöleinsatz

$$S_{\text{CO}_2\text{-Emission}} = \frac{2802 \cdot 0,26}{0,7} = 1041 \text{ kg/a}$$

Erdgaseinsatz

$$S_{\text{CO}_2\text{-Emission}} = \frac{2802 \cdot 0,2}{0,8} = 700 \text{ kg/a}$$

Elektroenergieeinsatz

$$S_{\text{CO}_2\text{-Emission}} = \frac{2802 \cdot 0,55}{1} = 1541 \text{ kg/a}$$

Senkung der CO₂-Schadstoffemission

Vollständigkeitshalber ist noch auf die weiteren Schadstoffemissionen hinzuweisen, die bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern freigesetzt werden:

organische Verbindungen,
Kohlenmonoxid CO,
Schwefeldioxid SO₂,
Stickoxide NO_x

und unsere Umwelt belasten.

Bezogen auf das Beispiel kann die Schadstoffemission um ca. 50...60 % beim Einsatz einer thermischen Solaranlage zur Brauchwassererwärmung gesenkt werden.

Aus diesem Wissen und der moralischen Pflicht gegenüber nachfolgenden Generationen ist die Erhaltung unserer Umwelt, d.h. die drastische Senkung des Energieverbrauchs aus der Verbrennung fossiler Energieträger, durch den verstärkten Einsatz regenerativer Energien zu forcieren. In den weiteren Abschnitten soll deshalb das theoretische Know-how über physikalische Gesetzmäßigkeiten, des Aufbaus solarthermischer Komponenten, der Projektierung und Realisierung solarthermischer Anlagen zur Brauchwassererwärmung einschließlich Heizungsunterstützung vermittelt werden.

2

Energiequelle Sonne

- ❑ Strahlungserzeugung
- ❑ Solarstrahlung
- ❑ Globalstrahlung

2.1 Strahlungserzeugung

Die Sonne bestimmt hauptsächlich den natürlichen Energiezustand auf unserer Erde. Sie ist die größte und zugleich sicherste Energiequelle. Die Sonne, von den Römern «sol», von den Griechen «helios» genannt, besitzt einen Durchmesser von ca. 1,392 Mio. km, ihre Masse wurde mit rund $2 \cdot 10^{30}$ kg bestimmt. Ihr Volumen beträgt rund das 333 000fache der Erde. Sie besteht aus 75 % Wasserstoff, 23 % Helium und 2 % schweren Elementen. Die Sonne ist eine glühende Gaskugel mit einer Temperatur im Inneren von ca. 150 Mio. °C und ca. 5700 °C an der Oberfläche. Druck und Temperatur sind so hoch, dass – ähnlich einer Wasserstoffbombe – im Inneren Kernreaktionen ablaufen. Seit 4,5 Mrd. Jahren erfolgt eine Art Super-Gau. Durch Kernverschmelzung (Kernfusion) von Wasserstoff zu Helium wird eine riesige Energiemenge als Folge einer Massendifferenz erzeugt. Erst in ca. weiteren 4 Mrd. Jahren wird aller Wasserstoff aufgebraucht sein.

Kernfusion

2.2 Solarstrahlung

Die Entfernung Erde–Sonne beträgt 149,5 Mio. km. Die Solarstrahlung benötigt mit Lichtgeschwindigkeit 8 min, um diese Strecke zurückzulegen. Eine außerhalb unserer Erdatmosphäre senkrecht zur Sonnenstrahlung stehende Fläche wird mit einer Leistung von 1353 W/m^2 bestrahlt. Dieser Wert wird als Solarkonstante D_0 bezeichnet. Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre, unsere Lufthülle, wird die Solarstrahlung teilweise absorbiert, gestreut und somit geschwächt. Dieses geschieht aber je nach Wellenlänge der Strahlung in unterschiedlichem Maße.

Solarkonstante D_0

Um die verschiedenen Einstrahlungszustände zu definieren, wurden folgende Begriffe eingeführt:

- AM «Air Mass» – Atmosphärische Massenzahl – gibt darüber Auskunft durch wie viel Luftmasse die Strahlung hindurch gegangen ist,
- AM0 gilt für die Strahlung im Weltraum, die sog. extraterrestrische Strahlung,
- AM1 bezeichnet die Strahlung, die senkrecht am Äquator auf Meereshöhe fällt,
- AM1,5 ist der Wert für eine terrestrische Strahlung, die unter einem Winkel von $41,5^\circ$ gegen den Horizont einfällt und damit eine 1,5fache größere Luftmasse durchstrahlt.

Der Wert AM1,5 ist wichtig, weil er eine der Bezugsgrößen ist, die zur normierten Charakterisierung von Solarkomponenten dient.

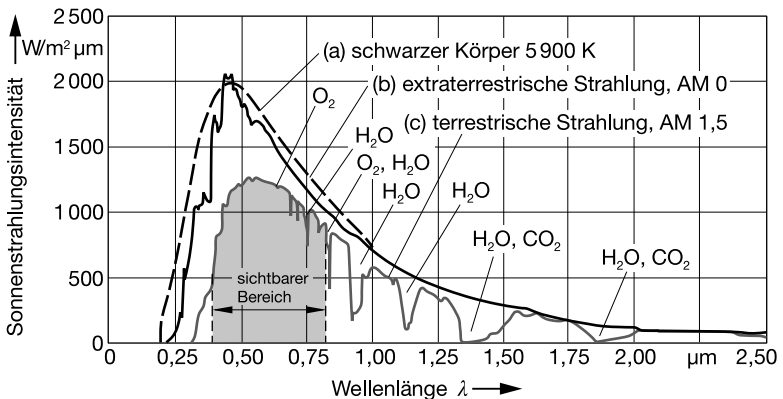
2.3 Globalstrahlung

Spektrum der Intensitätsverteilung

Die Summe der auf eine horizontale Fläche der Erde auftretende Sonnenstrahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Sie besteht aus 2 Anteilen: der direkten und der diffusen Strahlung. Die diffuse Strahlung entsteht durch Reflexion und Streuung an und in der Erdatmosphäre. Die Sonnenenergie gelangt auf die Erde in Form einer elektromagnetischen Strahlung mit einem Spektrum der Intensitätsverteilung, das sich von ca. $0,25 \dots 2,5 \mu\text{m}$ Wellenlänge erstreckt (vgl. Bild 2.1). Beim Durchgang der Sonnenstrahlung durch die Lufthülle der Erdatmosphäre wird ihre Intensität geschwächt. Eine Betrachtung der spektralen Abhängigkeit der Wellenlängen des Sonnenlichts ergibt eine Reihe wichtiger Gesichtspunkte bezüglich der Effizienz von solaren Komponenten.

Die Spektralverteilung enthält zahlreiche Minima, die durch Absorption und Streuung der in der Lufthülle enthaltenen Gase verursacht

Bild 2.1
Das Strahlungsspektrum der Sonne für extraterrestrische (Weltraum-), terrestrische (Erdatmosphäre) Strahlung und für einen schwarzen Körper



werden. Die Strahlungsintensität hat ihre größten Werte im Wellenlängenbereich von $0,38 \mu\text{m}$ bis ca. $0,78 \mu\text{m}$. Das ist zugleich der sichtbare Teil des Spektrums. Die Lage dieses Bereichs hat erhebliche Konsequenzen, wie bei der Betrachtung der Solarkomponenten zu sehen sein wird. Die Globalstrahlung auf der Erde unterliegt mehreren gravierenden Einflussfaktoren:

- Ort der Einstrahlung in Bezug auf die geographische Breite,
- Einfluss der Witterungsbedingungen,
- jahreszeitliche Schwankungen,
- Tagesstand der Sonne.

Die geographische Breite ist ein sehr dominanter Faktor. So kann am Äquator (Breitengrad 0) mit einem Wert der täglichen Globalstrahlung im Jahresdurchschnitt von $5,9 \text{ kWh} / \text{m}^2\text{d}$ (Kilowattstunden pro Quadratmeter und Tag) gerechnet werden. Dagegen lassen sich in Mitteleuropa nur $3,3 \text{ kWh} / \text{m}^2\text{d}$ erhalten.

Die Summe der Einflussfaktoren führt zu einer erheblichen Streuung der lokalen Globalstrahlung. In Deutschland wurden Werte zwischen 1173 und $825 \text{ kWh} / \text{m}^2\text{a}$ gemessen. Der Mittelwert, der auf eine horizontale Fläche auftreffenden Sonnenenergie, beträgt pro Tag $2,9 \text{ kWh} / \text{m}^2\text{d}$, d.h. im Jahr $1045 \text{ kWh} / \text{m}^2\text{a}$. In Tabelle 2.1 sind die Jahresmittelwerte der Globalstrahlung 1998 für einige deutsche Städte angegeben [2.1]. Eine für viele Zwecke ausreichende Angabe der mittleren monatlichen Tagessummen der Globalstrahlung für 17 deutsche und europäische Standorte findet sich auch bei [2.2]. Die Globalstrahlung unterliegt stets Schwankungen als Abweichung vom langjährigen Mittel. 1998 betragen dies maximal $+4 \%$ und -4% bei einigen Standorten [2.1]. Diese Abweichungen sowie der Jahresgang der täglichen und monatlichen Globalstrahlung bringt eine Komplizierung bei der Projektierung von Solaranlagen mit sich. Dramatisch ist die Tatsache, dass in unseren

Summe der
Einflussfaktoren

Tabelle 2.1 Jahresmittel der Globalstrahlung 1998 für einige Städte [2.1]

Standort	Globalstrahlung [kWh / m ² a]	Standort	Globalstrahlung [kWh / m ² a]
Augsburg	1173	Cottbus	1004
München	1171	Erfurt	1000
Freiburg	1154	Chemnitz	989
Ulm	1146	Rostock	965
Stuttgart	1097	Köln	950
Würzburg	1072	Berlin	927
Saarbrücken	1040	Bremen	923
Mannheim	1024	Hamburg	894
Leipzig	1016	Essen	892
Dresden	1007	Dortmund	887

Sonnenenergieangebot und Energiebedarf

Breiten Sonnenenergieangebot und Energiebedarf jahreszeitlich gegenläufig sind. Wird die meiste Energie in den Wintermonaten benötigt, ist das Angebot an Solarenergie am geringsten.

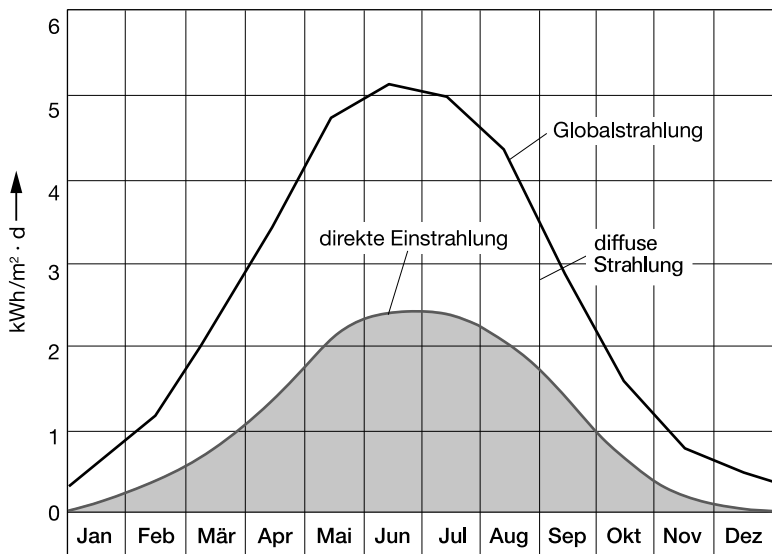
Die Problematik wird deutlich anhand des Jahresgangs der Globalstrahlung für den Standort Berlin (vgl. Bild 2.2) [2.3].

- ❑ Der Anteil der diffusen Strahlung ist größer als derjenige der Direktstrahlung.
- ❑ Die Zeiträume Januar–März und Oktober–Dezember sind bezüglich der Nutzung der Solarstrahlung kritisch und müssen je nach Aufgabe der Solaranlage gesondert betrachtet werden.

Projektierung von Solaranlagen

Allgemein wird bei der Projektierung von Solaranlagen vom langjährigen Mittel der Globalstrahlung des entsprechenden Standorts ausgegangen. Für eine sehr genaue Projektierung empfiehlt es sich, die entsprechenden Daten vom Deutschen Wetterdienst in 22 393 Hamburg, Frahmredder 95, einzuholen. In einigen speziellen Fällen, z.B. bei der Projektierung eines solaren Beleuchtungssystems, das auch in der strahlungsarmen Zeit arbeiten soll, ist es sinnvoll, vom schlimmsten Fall (worst-case) auszugehen, d.h., der Projektierung die niedrigsten Globalstrahlungsdaten für die Wintermonate zugrunde zu legen. In grober Näherung lässt sich feststellen: Das Verhältnis der Globalstrahlung zwischen Winter- und Sommermonaten beträgt ca. 1 : 5 bis 1 : 6. Ca. 75 % der eingestrahlichten Jahresenergie fällt auf den Zeitraum April–September. Die Art und Menge der Bewölkung entscheidet über das Verhältnis von direkter zu diffuser Strahlung. Bei wolkenfreiem Himmel beträgt der

Bild 2.2
Jahresgang der auf eine horizontale Fläche einfallenden Globalstrahlung für den Standort Berlin [2.3]



Anteil der direkten Strahlung ca. 90 %, während bei Nebel oder an einem trüben Wintertag die diffuse Strahlung fast 100 % erreicht. Eine grobe Hilfe und Orientierung für den Fall der Winterprojektierung gibt die Welteinstrahlungskarte der Fa. Solarex [2.4]. Sie enthält die Werte der Globalstrahlung in Anhängigkeit von der geographischen Lage für den strahlungsärmsten Monat bei optimalem Einstrahlungswinkel.

Aus der täglichen Praxis ist bekannt, dass man die größte Menge Sonnenenergie dann erhält, wenn die bestrahlte Fläche senkrecht im Winkel von 90° zur Strahlungsrichtung steht und außerdem exakt nach Süden ausgerichtet ist. Dieses Prinzip nutzt auch die Solartechnik für die Orientierung der Module und Kollektoren, die als geneigte Flächen aufzufassen sind. Zur genauen Beschreibung der Orientierung bedient man sich folgender Parameter (vgl. Bild 2.3):

Orientierung der Module und Kollektoren

- ❑ Die Abweichung der Flächennormale von der Südrichtung wird durch den Azimutwinkel α definiert. $\alpha = 0^\circ$ bei exakter Ausrichtung nach Süden, $\alpha = 180^\circ$, wenn die Fläche nach Norden ausgerichtet ist. Abweichungen von Süd nach West werden mit positivem $+\alpha$ angegeben, solche von Süd nach Ost mit $-\alpha$.
- ❑ Die Neigung der Fläche zur Horizontalen, also zum ebenen Boden der Umgebung, wird durch den Neigungswinkel β charakterisiert.
- ❑ Der Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung bezogen auf die Flächennormale wird mit δ bezeichnet.
- ❑ γ ist der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung, bezogen auf eine horizontale Fläche. Dieser Winkel wird auch als Sonnenhöhe bezeichnet.

Azimutwinkel

Neigungswinkel

Einfallswinkel

Für die Praxis lassen sich aus dem bisher Gesagten folgende Regeln ableiten: Der größte Energiegewinn wird erreicht, wenn die Fläche, auf

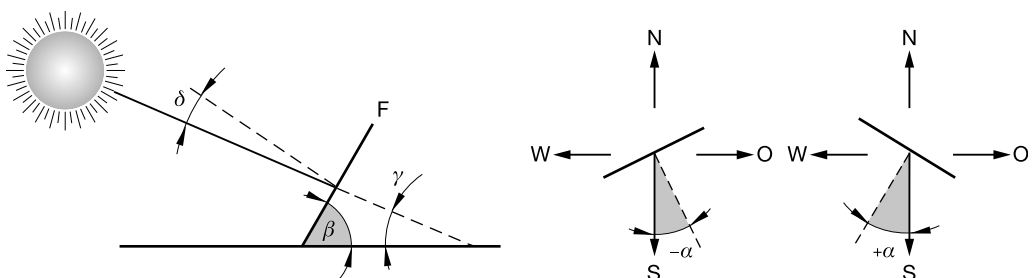


Bild 2.3

Winkel-Bezugsgrößen der Einstrahlung auf eine Fläche

β Neigungswinkel der Fläche zur Horizontalen

γ Einfallswinkel der Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche

δ Einfallswinkel der Sonnenstrahlung, bezogen auf die Flächennormale

α Azimutwinkel zwischen Flächennormale und exakter Südrichtung

$+\alpha$ Abweichung Richtung West

$-\alpha$ Abweichung Richtung Ost