

Wie mit PV-Strom durch den Winter?

Der Artikel analysiert zunächst den Energieverbrauch in der Schweiz im Jahresverlauf. Anschliessend wird aufgezeigt, dass für einen massiven Einsatz von Solarstrom in der Schweiz durch eine geschickte Kombination von Photovoltaikanlagen im Flachland und in den Alpen der Bedarf nach gespeicherter Energie massiv gesenkt werden kann. Dadurch wären neben den bestehenden und im Bau befindlichen Pumpspeicherwerken wesentlich geringere zusätzliche Speichermöglichkeiten erforderlich. Auch der temporäre Einsatz von zusätzlichen Gaskraftwerken könnte so deutlich reduziert werden und eventuell würde sogar neben einem gewissen Import von Windstrom die (relativ beschränkte) zusätzliche Energieproduktion von Biomassekraftwerken im Winter ausreichen.

Heinrich Häberlin*

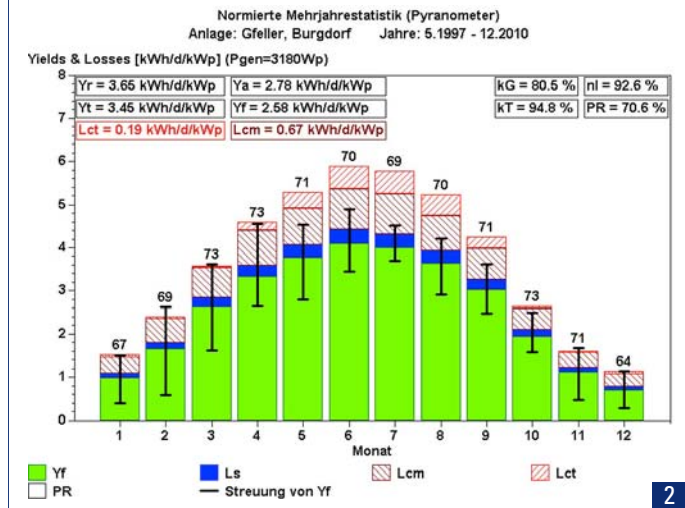
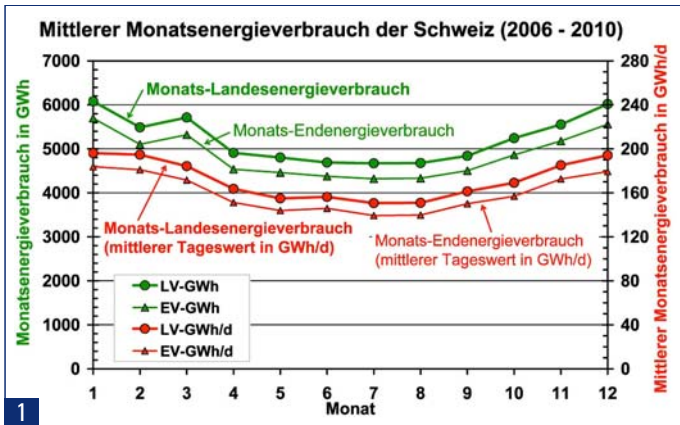
Unter den neuen erneuerbaren Energien hat die Photovoltaik (PV) das grösste Potenzial. In einem zweiteiligen Beitrag in ET 8 und 9/2011 [1] wurde gezeigt, dass man zwar leicht ausrechnen kann, dass für den Ersatz der von den Kernkraftwerken in der Schweiz produzierten Energie von etwa 26 TWh pro Jahr eine installierte PV-Spitzenleistung von etwa 25 GWp ausreichen würde und dass dafür bei einem mittleren Solarmodul-Wirkungsgrad von 15 % eine totale Solargeneratorfläche von etwa 167 km² erforderlich wäre, eine Fläche, die sich vollständig auf den Gebäudedächern der Schweiz unterbringen liesse [1], [2]. Es wurde aber auch gezeigt, dass das vorhandene Netz die dabei auftretende Spitzenleistung nicht absorbieren könnte und dass unbedingt neue Speichermöglichkeiten für die zeitweise auftretenden massiven Energieüberschüsse notwendig wären.

Da Anlagen im Flachland, wo weitaus die meisten Gebäude stehen, im Winter eine viel geringere Produktion als in den Alpen haben, wären für eine kontinuierliche Stromversorgung mit Photovoltaikstrom sehr grosse saisonale Speicher erforderlich. Pumpspeicherwerke sind heute die technisch und ökonomisch



* Prof. Dr. Heinrich Häberlin, Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Photovoltaiklabor, CH-3400 Burgdorf.

Solargenerator der PV-Anlage (4,134 kWp) an der Fassade der Mittelstation Birg der Schilthornbahn auf 2670 m. (Bild: Heinrich Häberlin, Buch Photovoltaik [2])



Mittlerer monatlicher Verbrauch an elektrischer Energie in den Jahren 2006–2010 in der Schweiz. Das Diagramm zeigt jeweils den Landesenergieverbrauch (inkl. Übertragungsverluste) und den von der Gesamtheit der Verbraucher effektiv benötigten Endenergieverbrauch. Da die Produktion von Photovoltaikanlagen oft in Form von spezifischen Tageswerten in kWh/kWp/d angegeben wird, werden neben den Monatswerten (in Grün) auch die mittleren Tageswerte für den jeweiligen Monat (in Rot) angegeben. (Datenquelle: BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistiken 2006–2010).

Normierte Mehrjahresstatistik der Jahre 1997–2010 einer PV-Anlage auf einem Einfamilienhaus in Burgdorf (Anstellwinkel $\beta = 28^\circ$). Die Gesamthöhe der Balken zeigt für jeden Monat das solare Strahlungsangebot in kWh/m² und Tag, die grünen Balken zeigen die mittlere monatliche Energieproduktion in kWh/kWp/d (mittlere Tageswerte) mit eingezeichnetem Streubereich (schwarze I). Es ist zu erkennen, dass besonders in den Monaten November bis Februar die Produktion sehr tief und die Streuung sehr gross ist. Der Winterenergieanteil (Produktion von Oktober bis März) beträgt nur 29,1 %. Detaillierte Beschreibungen zu diesen Diagrammen und zu dieser Anlage sind in [2] zu finden.

misch beste Lösung zur effizienten Speicherung grösserer Energiemengen für einige Stunden bis zu einigen Tagen. Für die Speicherung von 1 kWh zu einem beliebigen Zeitpunkt abrufbarer Energie werden in einem Pumpspeicherwerk dabei typischerweise etwa 1,3 kWh Pumpenergie benötigt, Pumpspeicherwerke sind also energetisch relativ effizient. Die für eine *saisonale Speicherung mit Pumpspeicherwerken* erforderlichen riesigen Speichervolumina sind aber technisch und ökonomisch kaum realisierbar. Andere Speichertechnologien wie Akkumulatoren haben zwar ähnliche energetische Wirkungsgrade wie die Pumpspeicherung, eignen sich aber nur für die Speicherung klei-

nerer Energiemengen während einiger Stunden bis weniger Tage, niemals aber für saisonale Speicherung. Die Speicherung in Form von Wasserstoff oder Methan, die aus überschüssigem Strom erzeugt wurden, ist technisch und ökonomisch noch lange nicht ausgereift. Beide Möglichkeiten haben zudem nur einen relativ geringen Wirkungsgrad, weit geringer als bei der klassischen Pumpspeicherung oder der Speicherung in Akkus.

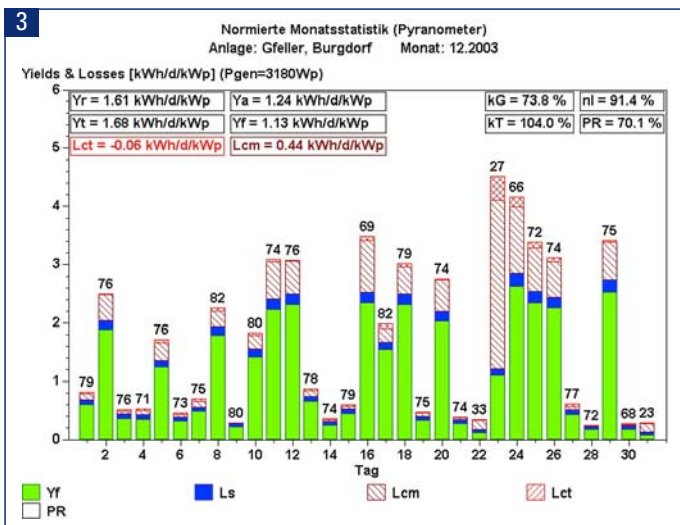
sprechend den kürzeren Tagen und den tieferen Temperaturen ist er im Winterhalbjahr deutlich grösser als im Sommerhalbjahr. Es ist deshalb absolut ungenügend, jeweils nur den Jahresstromverbrauch zu betrachten, denn der benötigte Strom muss zu jeder Jahres- und Tageszeit exakt in dem Moment produziert werden, in dem er gebraucht wird [1], [2]. Bild 1 zeigt den mittleren monatlichen Verbrauch an elektrischer Energie in der Schweiz in den Jahren 2006 bis 2010.

Monatlicher Verbrauch an elektrischer Energie in der Schweiz

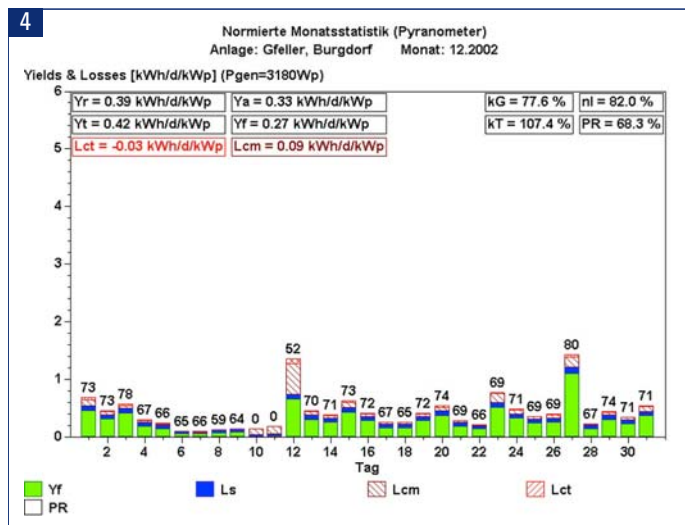
Der Stromverbrauch in der Schweiz variiert nicht nur im Tagesverlauf, sondern auch im Verlauf des Jahres. Ent-

Typischer Verlauf der monatlichen Produktion von PV-Anlagen im Jahresverlauf PV-Anlagen auf Dächern im Mittelland:

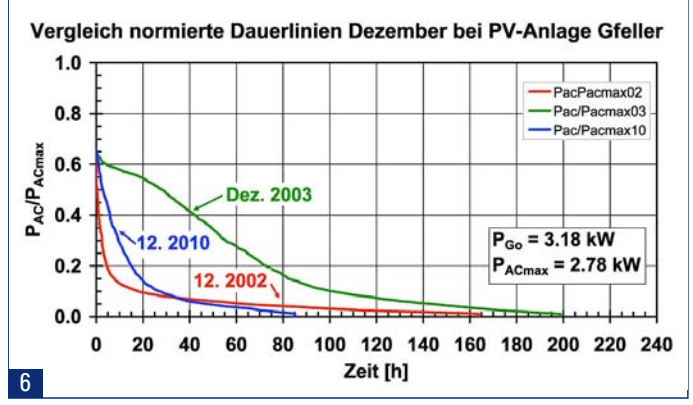
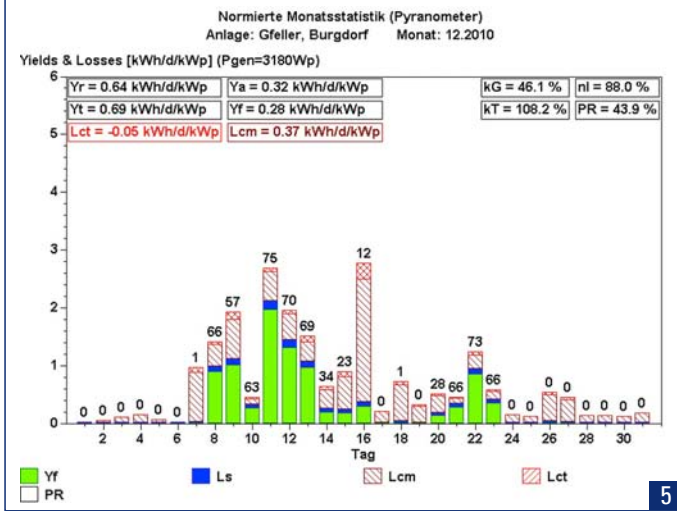
Bei Photovoltaikanlagen auf Dächern



Normierte Monatsstatistik mit Produktionswerten der einzelnen Tage der Anlage von Bild 2 für den relativ guten Dezember 2003. Am 22. und 23. Dezember und am 31. Dezember war der Solargenerator zeitweise schneebedeckt, an den anderen Tagen war die Produktion in diesem strahlungsmässig guten Monat oft relativ hoch. Die Produktion war zudem ziemlich regelmässig über den ganzen Monat verteilt.



Normierte Monatsstatistik mit Produktionswerten der einzelnen Tage der Anlage von Bild 2 für den strahlungsmässig sehr schlechten Dezember 2002. Da sehr oft Nebel- und Hochnebellagen herrschten, war die Einstrahlung sehr tief, dagegen trat ausser vom 10.-12. Dezember 2002 keine Schneebedeckung auf. Dies war der Monat mit der absolut geringsten Produktion.



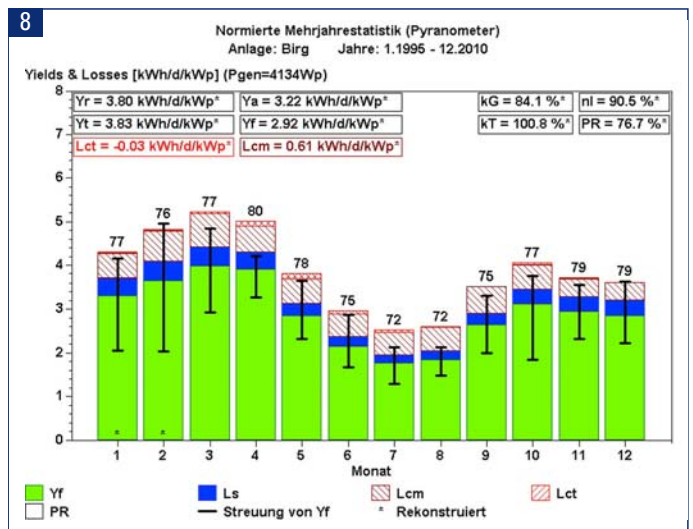
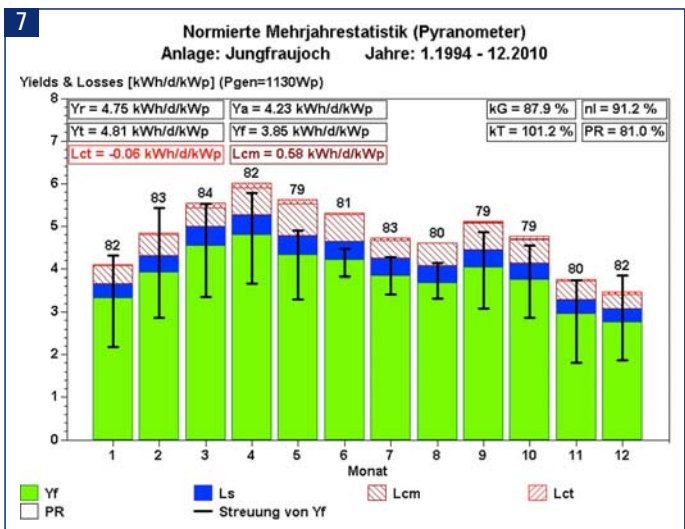
Normierte Monatsstatistik mit Produktionswerten der einzelnen Tage der Anlage von Bild 2 für den strahlungsmässig etwa durchschnittlichen Dezember 2010. In diesem Monat war die Einstrahlung nicht ausserordentlich tief wie in Bild 4, dafür war der Solargenerator sehr oft schneebedeckt (1.–7. Dezember, 14.–20. Dezember und 24.–31. Dezember), sodass die Energieproduktion stark beeinträchtigt war. Die Produktion im ganzen Monat war sehr unregelmässig und nur geringfügig höher als in Bild 4.

Normierte Dauerlinien der Monate Dezember der Jahre 2003 (Bild 3), 2002 (Bild 4) und 2010 (Bild 5) der PV-Anlage von Bild 2 in Burgdorf. Sie sind jeweils bezogen auf die bei dieser Anlage im Jahresverlauf maximal auftretende AC-Leistung $P_{ACmax} = 2,78 \text{ kW}$. Es ist zu erkennen, dass die auftretende maximale Leistung der Anlage in den Wintermonaten deutlich geringer als P_{ACmax} ist, d. h. durch eine allfällige Begrenzung der eingespeisten Leistung auf einen etwas geringeren Wert $P_{ACgrenz} < P_{ACmax}$ zur Erhöhung der möglichen Aufnahmefähigkeit des Netzes für PV-Strom (siehe [1], [2]) geht bei Flachlandanlagen in den Wintermonaten kaum Energie verloren.

von Gebäuden im Mittelland variiert die Energieproduktion im Verlauf des Jahres beträchtlich. Sie ist im Sommer dank der hoch stehenden Sonne und der grösseren Taglängen relativ hoch, im Winter wegen der tief stehenden Sonne, des bei Hochdrucklagen oft herrschenden Nebels und Hochnebels und der kürzeren Taglänge dagegen wesentlich (um Faktoren!) tiefer. Im Winter kann die Produktion bei relativ flach angestellten Solargeneratoren zudem durch temporäre Schneebede-

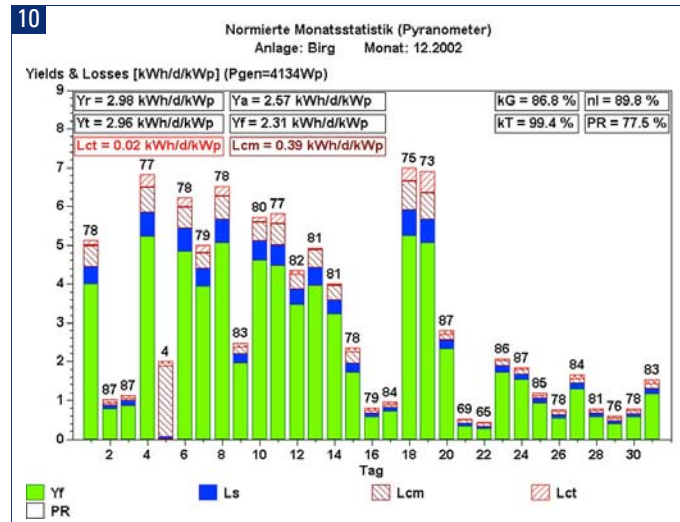
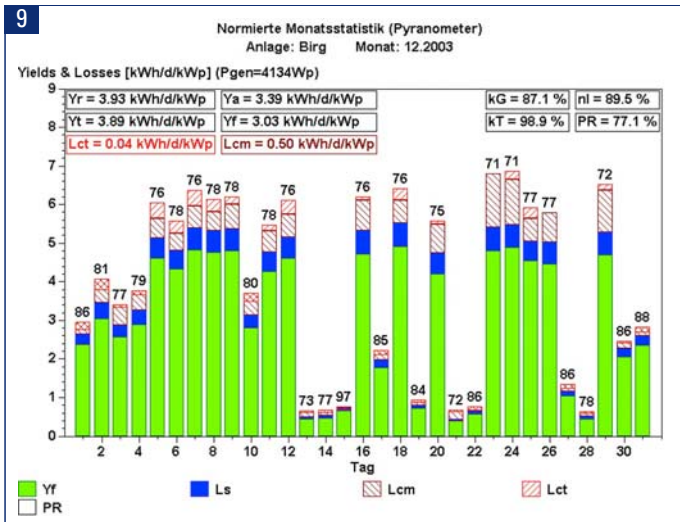
ckung beeinträchtigt werden. Bild 2 zeigt die normierte Mehrjahresstatik der Jahre 1997 bis 2010 mit Angabe der monatlichen Energieproduktion einer typischen Mittellandanlage. Besonders kritisch ist die Situation im Dezember. Bilder 3, 4 und 5 zeigen die normierte Monatsstatistiken (mit den Werten der einzelnen Tage) in einem relativ guten Dezember (Bild 3) und zwei sehr schlechten Dezembermonaten (Bilder 4 und 5). In [1] und [2] wurde auch gezeigt,

dass die Anzahl der AC-Volllaststunden und die insgesamt mögliche ins Netz einspeisbare AC-Energie deutlich erhöht werden kann, wenn die von der Anlage ins Netz eingespeiste AC-Leistung auf einen etwas tieferen Wert ($P_{ACgrenz}$) begrenzt wird, der etwas unter dem Maximalwert P_{ACmax} liegt, den diese Anlage im ganzen Jahr normalerweise kurzzeitig einspeisen würde. Wenn diese Begrenzung nicht allzu markant ist, sind die dabei auftretenden Energieverluste sogar deutlich geringer



Normierte Mehrjahresstatistik der Jahre 1994–2010 der PV-Anlage an der hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch (Anstellwinkel $\beta = 90^\circ$, 3454 m ü. M.). Bei der Anlage Jungfrauoch ist die Situation sehr günstig, da sich vor der Anlage ein Gletscher befindet. Deshalb ist die Produktion auch im Sommer, wenn die Sonne sehr hoch steht, dank reflektierter Strahlung vom Gletscher trotzdem relativ hoch. Die Produktion erreicht im Frühling ein Maximum, ist aber insgesamt relativ gleichmässig übers Jahr verteilt und viel höher als bei Mittellandanlagen. In den Monaten November bis Februar ist die Produktion um Faktoren höher als bei Mittellandanlagen und die Streuung ist viel geringer. Der Winterenergieanteil (Produktion von Oktober bis März) beträgt über 46%. Detaillierte Beschreibungen zu diesen Diagrammen sind in [2] und zu dieser Anlage in [2] und [3] zu finden.

Normierte Mehrjahresstatistik der Jahre 1995–2010 der hochalpinen PV-Anlage Birg (2670 m) an der Fassade der Schilthornbahn (Anstellwinkel $\beta = 90^\circ$). Die Gesamthöhe der Balken zeigt das solare Strahlungsangebot, die grünen Balken zeigen die mittlere monatliche Energieproduktion in kWh/kWp/d (mittlere Tageswerte) mit eingezeichnetem Streubereich (schwarze I). Es ist zu erkennen, dass hier ein eigentliches Sommerloch auftritt und dass in den Monaten November bis Februar die Produktion sehr hoch und die Streuung relativ tief ist. Der Winterenergieanteil (Produktion von Oktober bis März) beträgt hier 56,6%! Detaillierte Beschreibungen zu diesen Diagrammen sind in [2] und zu dieser Anlage in [2] und [3] zu finden.



Normierte Monatsstatistik mit Produktionswerten der einzelnen Tage der Anlage Birg von Bild 8 für den im Mittelland relativ guten Dezember 2003. Auch bei der Anlage Birg ist in diesem Monat die Produktion relativ hoch und gleichmässig über den ganzen Monat verteilt. Die Produktion ist dank des Anstellwinkels von 90° trotz der Höhenlage an keinem Tag durch Schnee beeinträchtigt.

Normierte Monatsstatistik mit Produktionswerten der einzelnen Tage der Anlage Birg von Bild 8 für den im Mittelland strahlungsmässig sehr schlechten Dezember 2002. Am 5. Dezember war der Strom wegen Revisionsarbeiten an der Schilthornbahn ausgeschaltet und deshalb keine Energieproduktion möglich. Da hier Nebel- und Hochnebellagen viel seltener sind, war die Energieproduktion viel höher als bei der Anlage im Mittelland. Vom 21. bis 31. Dezember war die Energieproduktion wegen schlechten Wetters auch deutlich tiefer, aber im Mittel war die Energieproduktion an diesen Tagen immer noch deutlich höher als bei der Anlage im Mittelland.

als bei einer Speicherung der überschüssigen Energie [2].

Diese Leistungsbegrenzung tritt bei Anlagen im Mittelland vor allem im Sommerhalbjahr auf, im Winterhalbjahr geht dabei kaum Energie verloren.

Bild 6 zeigt dies anhand der auf die maximal im Jahr auftretende AC-Leistung normierten Dauerlinien der PV-Anlage in Burgdorf von Bild 2 für diese drei Dezember-Monate gemäss den Bildern 3 bis 5. Die maximal auftretende Leistung

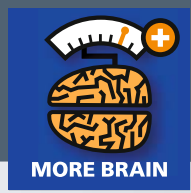
ist immer deutlich kleiner als die maximal im Jahr auftretende Leistung $P_{AC,max}$, d.h. bis hinunter zu Leistungsbegrenzungen von $P_{ACGrenz} \approx 0,6 \cdot P_{AC,max}$ würde im Dezember bei dieser Anlage kaum ein Energieverlust auftreten.

Sitzt, passt – lässt keinen Millimeter Luft.



Unsere Universalabdichtungen mit Segmentringtechnik.

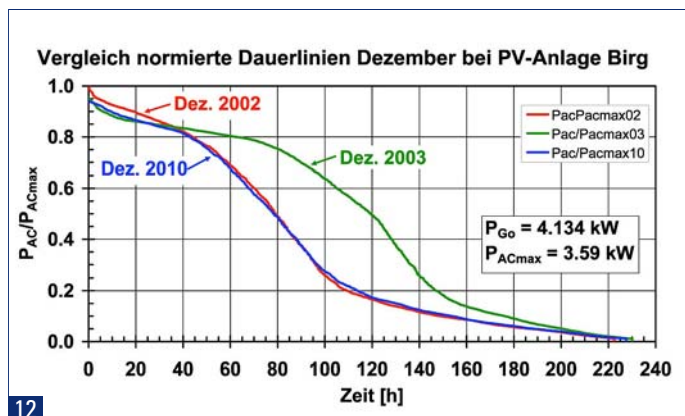
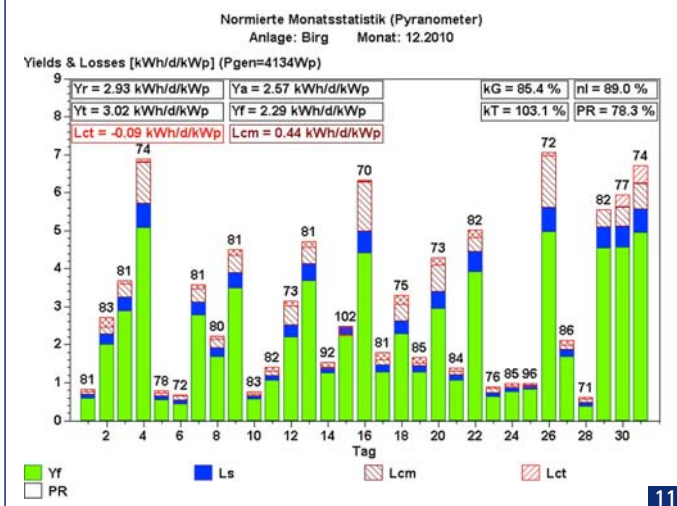
Einfach, schnell, universell.



- Segmentringtechnik – vor Ort an Kabeldurchmesser anpassbar
- Geteilt, für nachträglichen Einbau
- Leicht montierbar
- Für alle gängigen Durchmesser
- Mind. 1 bar gas- und wasserdicht
- Stabile 5 mm Pressplatten
- Edelstahl rostfrei V2A
- Mitgelieferte Blindstopfen
- Informieren Sie sich jetzt: 062 288 82 82

LEONI

The Quality Connection



Normierte Monatsstatistik mit Produktionswerten der einzelnen Tage der Anlage-Birg von Bild 8 für den bei der Mittellandanlage wegen häufiger Schneebedeckung sehr schlechten Dezember 2010. Die Produktion bei der Anlage Birg ist wieder viel höher als bei der Anlage im Mittelland und gleichmässig über den ganzen Monat verteilt. Auch in diesem Monat ist die Produktion dank des Anstellwinkels von 90° trotz der Höhenlage an keinem Tag durch Schnee beeinträchtigt.

Normierte Dauerlinien der Monate Dezember der Jahre 2003 (Bild 9), 2002 (Bild 10) und 2010 (Bild 11) der PV-Anlage Birg von Bild 8. Sie sind jeweils bezogen auf die bei dieser Anlage im Jahresverlauf maximal auftretende AC-Leistung $P_{ACmax} = 3,59 \text{ kW}$.

Steil angestellte PV-Anlagen in den Alpen: Es ist allgemein bekannt, dass im Winterhalbjahr die Produktion von alpinen PV-Anlagen um Faktoren grösser ist als die von PV-Anlagen im Mittelland, wenn ihre Produktion nicht durch

Schneebedeckung beeinträchtigt ist. Dies ist besonders bei hochalpinen Fassadenanlagen mit grossen Anstellwinkeln der Fall. Bild 7 zeigt die normierte Mehrjahresstatistik der Jahre 1994 bis 2010 mit Angabe der monatlichen

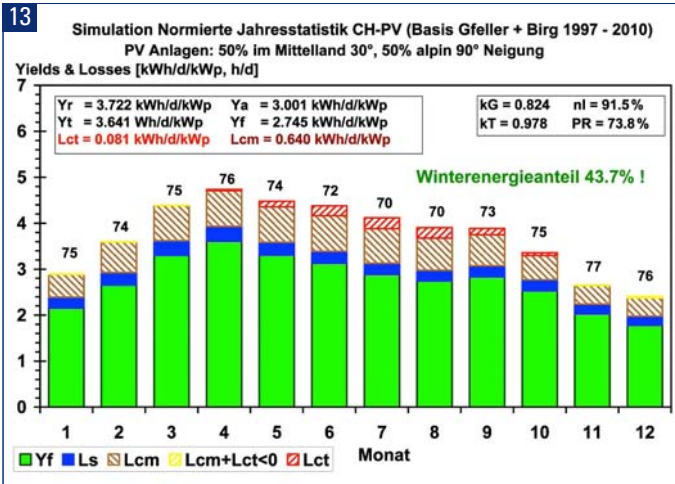
Energieproduktion bei der hochalpinen PV-Anlage auf dem Jungfrauoch. Alpine Standorte mit Netzanschluss in der Nähe von Gletschern sind natürlich relativ selten. Aber auch bei andern Standorten in den Alpen ohne benachbarten Gletscher ist die Energieproduktion im Winterhalbjahr sehr hoch. Bild 8 zeigt eine entsprechende Statistik für 1995 bis 2010 für die PV-Anlage an der Fassade der Zwischenstation Birg der Schilthornbahn. Bei dieser Anlage beträgt der Winterenergieanteil im Mittel über 16 Jahre über 56 %. Die Bilder 9, 10 und 11 zeigen die normierten Monatsstatistiken der hochalpinen PV-Anlage Birg (mit den Werten der einzelnen Tage) für die gleichen Monate wie die Bilder 3, 4 und 5. Bild 12 zeigt die auf die maximal im Jahr auftretende AC-Leistung normierten Dauerlinien der PV-Anlage Birg für die drei in den Bildern 9 bis 11 gezeigten Dezember-Monate. Da bei dieser Anlage der Solargenerator im Vergleich zur Wechselrichter-Nennleistung etwas überdimensioniert ist, wird hier auch mitten im Winter die Maximalleistung oft erreicht und die Dauerlinien sind dank der viel höheren Energieproduktion bei gleichen Leistungen auch viel breiter. Die Anlage Birg weist im Winter im Vergleich zu Dachanlagen im Mittelland nicht nur eine viel höhere, sondern auch eine viel gleichmässige Energieproduktion auf, sodass der Speicherbedarf zur Überbrückung ertragsarmer Tage sehr viel geringer ist.

Idee zur Verstetigung der Jahresproduktion von PV-Anlagen

Ein Vergleich der normierten Jahresstatistiken der Mittelland-Dachanlage von Bild 2 und der alpinen Fassadenanlage von Bild 8 zeigt, dass ihre Produktion zu einem schönen Teil komplementär ist. Eine Kombination beider Anlagentypen würde eine Energieproduktion ergeben, die viel näher am Jahresverlauf des Energieverbrauchs der Schweiz gemäss Bild 1 ist. Bild 13 zeigt die simulierte Energieproduktion von 50 % PV-Dachanlagen im Mittelland mit normierter Produktion gemäss Bild 2 und 50 % alpinen PV-Anlagen mit Anstellwinkel 90° und normierter Produktion gemäss Bild 8. Bei dieser Kombination beträgt der Winterenergieanteil 43,7 % und die minimale tägliche Energieproduktion im schwächsten Monat etwa 1,8 kWh/kWp/d. Würde der Anteil der alpinen PV-Anlagen gar auf 70 % erhöht, ergäbe sich gemäss Bild 14 sogar



Blick auf die eine Hälfte des Solargenerators der PV-Anlage (1,13 kWp) an der Fassade der hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch (HFSJG, 3454 m). (Bild: Heinrich Häberlin, Buch Photovoltaik [2])



Simulation der normierten monatlichen Energieproduktion einer Kombination von 50 % Anlagen im Mittelland mit Neigungen von etwa 30° und 50 % alpinen Anlagen mit 90° Neigung, bei der praktisch nie eine Schneebedeckung auftritt. Mit dieser Kombination wird die Produktion im Jahresverlauf viel gleichmässiger, der Winterenergieertrag ist viel höher und die minimale tägliche Energieproduktion im Dezember beträgt etwa 1,8 kWh/kWp/d. Deshalb ist nur eine viel kurzzeitigere Speicherung der Energie im Bereich von maximal einigen Tagen erforderlich.

ein Winterenergieanteil von 49,1 % und eine minimale tägliche Energieproduktion im schwächsten Monat von etwa 2,2 kWh/kWp/d.

Die für diese Simulationen verwendeten PV-Anlagen haben Module und Wechselrichter aus dem Anfang der 90er-Jahre. Neue Anlagen mit Komponenten nach dem heutigen Stand der Technik dürften bei gleicher installierter Spitzenleistung einen um etwa 15 % höheren Energieertrag haben. In den folgenden Abschätzungen wird mit diesem etwas höheren Ertrag gerechnet.

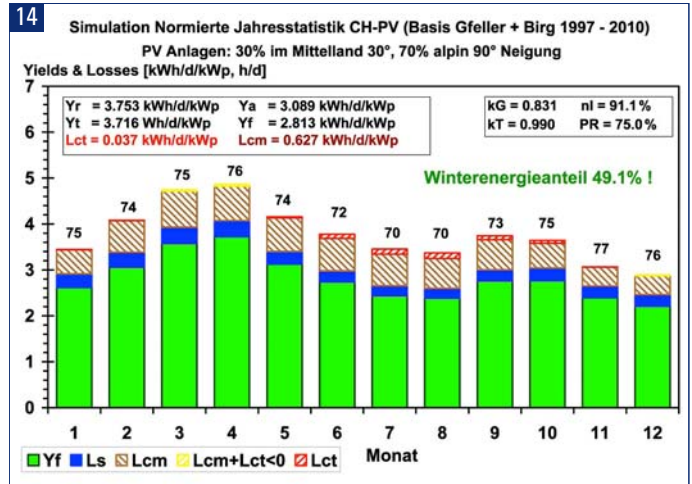
Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit total 20 GWp installierter PV-Spitzenleistung (je 50 % auf Dächern im Mittelland und 50 % um 90° angestellt in den Alpen) dürften sich somit mit den Werten von Bild 13 eine Jahresproduktion von etwa 23 TWh ergeben, wovon im schlechtesten Monat Dezember immerhin pro Tag gut 41 GWh/d oder im ganzen Monat etwa 1,3 TWh zur Verfügung stünden, also etwa 54 % der maximal möglichen Dezember-Produktion der schweizerischen Kernkraftwerke bei Volllast. Dazu würde mit einem rechnerischen Solargenerator-Wirkungsgrad von 15 % eine Solargenerator-Fläche von je etwa 67 km² auf Dächern im Mittelland und in den Alpen benötigt. Mit Pumpspeicherwerken mit einer speicherbaren Energie von einigen 100 GWh dürfte so auch eine Periode mit geringer Produktion wie in den Dezember-Monaten der Jahre 2002 und 2010 überbrückbar sein. Derartige Speicherkapazitäten dürften nach der

Vollendung des gegenwärtig im Gang befindlichen Ausbaus der Pumpspeicherkapazitäten und Pumpenleistungen in der Schweiz in einigen Jahren durchaus vorhanden sein. Natürlich wäre für ein solches Szenario wegen der im Netz auftretenden Spitzenleistungen auch ein deutlicher Ausbau des Hochspannungsnetzes erforderlich [1], [2]. Da sich sowohl die Pumpspeicherwerke als auch die alpinen PV-Anlagen relativ nahe beieinander befinden, wären aber die erforderlichen Leitungslängen kürzer und lägen in weniger dicht besiedelten Gebieten. Die in den kritischen Monaten noch fehlende Energie müsste aus anderen Quellen (z. B. Windstrom, Biomasse und notfalls auch Gas-Kombi-Kraftwerke) bereitgestellt werden.

Durch Verwendung von etwas weniger steilen Anstellwinkeln als 90° könnte bei den alpinen Anlagen sowohl die Sommerproduktion als auch die Jahresproduktion noch erhöht werden, aber dafür würde das Risiko der Schneebedeckung im Winter und von Schneedruckschäden mit flacher werdendem Winkel immer stärker ansteigen [2].

Da in den Alpen niemals genügend Fassadenflächen an Gebäuden zur Verfügung stünden, müssten für ein solches Szenario neben Anlagen an möglichst vielen alpinen Gebäuden auch Freiflächenanlagen gebaut werden. Gewisse Konflikte mit dem Landschaftsschutz wären dabei unvermeidlich, aber jede technische Lösung hat neben Vorteilen eben auch gewisse unvermeidliche Nachteile. Um winterliche Produktionseinbußen durch Schneebedeckung



Simulation der normierten monatlichen Energieproduktion einer Kombination von 30 % Anlagen im Mittelland mit Neigungen von etwa 30° und 70 % alpinen Anlagen mit 90° Neigung, bei der praktisch nie eine Schneebedeckung auftritt. Mit dieser Kombination wird die Produktion im Jahresverlauf viel gleichmässiger, der Winterenergieertrag ist noch höher und die minimale tägliche Energieproduktion im Dezember beträgt etwa 2,2 kWh/kWp/d. Die normierte Energieproduktion einer solchen Kombination verläuft ähnlich wie bei der Anlage Jungfrauoch gemäss Bild 7.

in den Alpen zu vermeiden, müssten die PV-Generatoren in den Alpen so montiert werden, dass sie aus der maximal möglichen Schneehöhe herausragen. Um Konflikte mit dem Landschaftsschutz zu entschärfen, könnten diese Anlagen auch mit Infrastruktur-Anlagen für die Sicherheit (z. B. Lawinerverbauungen), den Verkehr und den Tourismus kombiniert werden. Unter alpinen Freiflächenanlagen wäre durchaus auch noch eine gewisse landwirtschaftliche Nutzung (z. B. Alpweiden) möglich. Eine besondere technische Herausforderung ist dabei die Realisierung grösserer PV-Freiflächenanlagen, die technisch sicher sind, gut gegen die in den Alpen herrschenden Umweltbedingungen (Gewitter [Blitzschutz!], Stürme, Schneedruck, Lawinen) geschützt sind und so kostengünstig und langlebig sind, dass eine ökonomische Energieproduktion möglich ist. Es wäre sinnvoll, diese Fragen in zukünftigen Forschungsprojekten näher zu untersuchen und die gefundenen Lösungen in einigen mittleren und grösseren Pilotanlagen zu erproben.

www.pvtest.ch

Literatur

- [1] Heinrich Häberlin: «Wie viel Solarstrom erträgt das Netz?». ET 8/2011 und ET 9/2011.
- [2] Heinrich Häberlin: «Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen». Electrosuisse-Verlag, Fehrltorf und VDE-Verlag, Berlin, 2010, ISBN 978-3-905214-62-8 und 978-3-8007-3205-0.
- [3] H. Häberlin: «Langzeiterfahrungen mit zwei hochalpinen Photovoltaikanlagen». 20. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/D, 2005.