

Eine optimierte Regelung von Solar-Wasserstoff Anlagen

Prof. Dr.-Ing. G. Krost, Dipl. Ing. Peter Beckhaus
7. Symposium „Nutzung regenerativer Energieträger“, Stralsund 4.-6.11.1999

Dipl.-Ing. Peter Beckhaus
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg
Elektrische Anlagen und Netze
Bismarckstr. 81
D-47048 Duisburg

Tel.: 0203-379-1030
Fax.: 0203-379-2749
Email: beckhaus@uni-duisburg.de
<http://www.uni-duisburg.de/FB9/EAN>

English Abstract

Autonomous regenerative energy systems are presently under widespread propagation and development. For the Jülich PHOEBUS plant an energy management expert system was developed. PHOEBUS is an isolated photovoltaic plant using an accumulator set for short time energy storage and a hydrogen path for seasonal storage. Both limit control and device commitment have jointly been incorporated into an expert system which was tested and validated successfully on the basis of a simulation program, modelling the plant under regard in high detail and time resolution.

The expert system cyclically checks the whole plant for boundary violations. This especially includes the accumulator state of charge, the plant voltage and device overload. To avoid critical situations, an optimisation has been included that uses load scheduling and weather forecasts to avoid forced actions. This allows an increased energy harvest with reduced operating times under boundary conditions of the particular components, and results in a smooth overall plant operation.

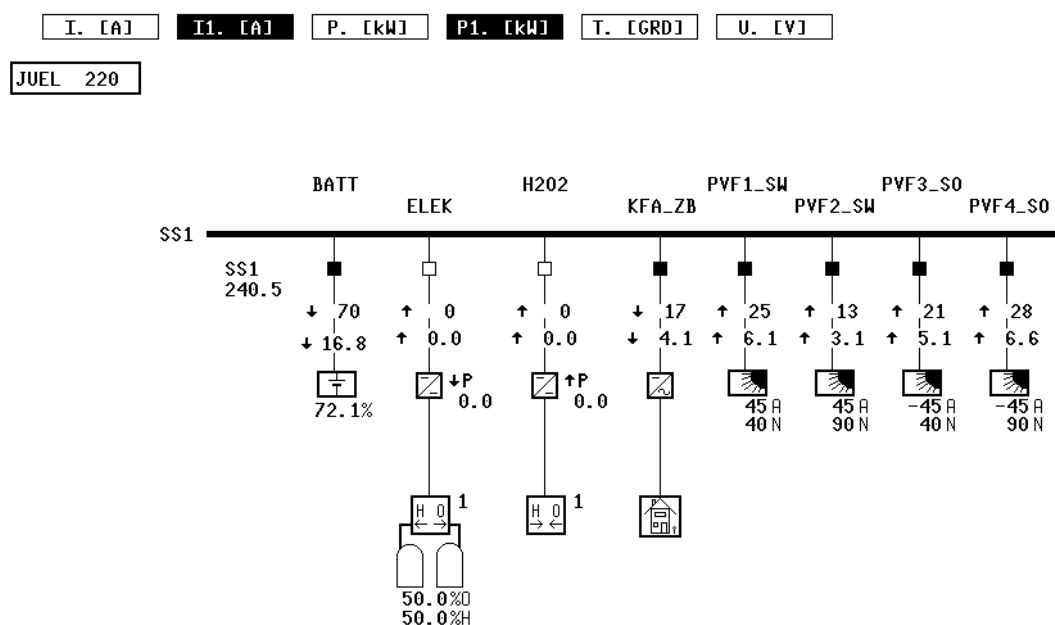


Bild 1: Die Solar Wasserstoff-Anlage PHOEBUS im Steuerungsfenster MMI

Einführung

Angesichts der zunehmenden Verknappung fossiler Energievorräte und der ständig zunehmenden Umweltbelastung wird zunehmend der Einsatz regenerativer Energieversorgungstechniken wie Photovoltaik und Windkraft diskutiert. Insbesondere bei der Versorgung netzferner Verbraucher, wie beispielsweise Höfe und Gasthäuser in Gebirgen oder Anlagen in Entwicklungsländern, werden regenerative Energieanlagen in sogenannten **Hybrid-Systemen** bereits vielfach eingesetzt. Als Hybrid-Systeme werden hierbei Anlagen bezeichnet, die verschiedenartige Energieerzeugungs- und Speicherungssysteme miteinander kombinieren. Beispielsweise werden bei einigen Alpenhütten Photovoltaik und Windkraftkonverter zusammen mit einem **Batteriespeicher** eingesetzt. Für einen Großteil des Jahres kann hierdurch die Versorgung einer solchen Inselanlage gesichert werden. Die Batterie wird zur Überbrückung kurzzeitiger Wetter- und Leistungsschwankungen eingesetzt und kann - je nach Auslegung - die Anlage mehrere Tage versorgen. In längerfristigen wind- und sonnenarmen Zeiten kann in einem solchen System ein **Dieselmotor** zur Unterstützung der Versorgung angefahren werden.

Um völlig autarke Versorgung herzustellen, ist es notwendig, Energie auch langfristig zu speichern. Hierzu wird in einigen Testanlagen mit überschüssigem Strom in einem Elektrolyseverfahren **Wasserstoff** gewonnen und gespeichert. In Schlechtwetterperioden oder bei hoher Belastung kann das gespeicherte Wasserstoffgas in einer Brennstoffzelle direkt wieder in Gleichstrom umgewandelt werden.

In einem so komplexen Hybrid-System ist eine möglichst genaue Abstimmung der einzelnen Anlagenkomponenten aufeinander Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb. Sowohl muss von vorne herein die Anlagenkonfiguration so **geplant** sein, dass eine unterbrechungsfreie Versorgung der Verbraucher gewährleistet ist, als auch im Betrieb der Anlage diese dauernd **überwacht und gesteuert** werden, um möglichst optimale Betriebszustände für die gesamte Anlage und die einzelne Komponente zu erhalten.

An der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg werden für die Solar-Wasserstoff-Anlage **PHOEBUS** des Forschungszentrums Jülich zahlreiche Untersuchungen zur Optimierung des Anlagenverhaltens gemacht. Dabei wird ein selbstentwickeltes Simulationstool verwendet, das ein sehr detailliertes Abbild der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems gibt. Um den Betrieb der Anlage zu optimieren, kommt ein Expertensystem zur Regelung zum Einsatz. Aus den am Beispiel des PHOEBUS gewonnenen Erfahrungen wurden Simulation und Expertensystem Schritt für Schritt erweitert, so dass beliebige Anlagenkonfigurationen auch neuer Systeme entwickelt und erprobt werden können.

Simulation

Zur Simulation von Solar-Hybrid-Systemen wurde am Fachgebiet für Elektrische Anlagen und Netze (EAN) der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg ein Simulationssystem entwickelt, welches das Verhalten komplexer Hybridanlagen mit **quasi-beliebiger Konfiguration** detailgenau wiedergibt. Dabei wird jede einzelne Komponente mit einem eigenständigen Modell nachgebildet und das Zusammenspiel innerhalb der Anlage durch einen überlagerten Algorithmus berechnet, welcher die Ergebnisse der verschiedenen Teilmodelle in Beziehung zueinander bringt. Die Simulation arbeitet dabei mit der besonders hohen Zeitauflösung von nur einer Minute. Dies ist notwendig, um auch kurzzeitigen Extremsituationen (Strahlungseinbruch, Lastspitze, Zu- und Abschalten von Komponenten) ausreichend gerecht zu werden. Alle Einzelmodelle wurden nach Möglichkeit mit Hilfe realer Messwerte **verifiziert**. Als Eingaben werden in der Simulation **reale** Strahlungs-Temperatur- und Lastmesswerte verwendet. Somit kann ein realistisches Anlagenverhalten simuliert werden.

Das Spektrum der simulierten **Einzelkomponenten** umfasst auf elektrischer Seite Photovoltaikmodule, Windgeneratoren, Bleiakkumulatoren, Elektrolyseur und verschiedene Brennstoffzellentypen (AFC, PEFC, SOFC). Die Komponenten können je nach Stromart direkt oder über entsprechende Stromsteller miteinander gekoppelt werden. Die Modellierung umfasst neben dem rein elektrischen Verhalten auch das Temperaturverhalten. In einem parallel operierenden Algorithmus kann die Auskopplung von Wärme aus den entsprechenden elektrischen Komponenten in Zusammenhang mit weiteren **thermischen Komponenten** (Speicher, Kollektoren, Heizungssysteme) simuliert werden. Somit kann eine komplette Haus- oder Siedlungsenergieversorgung durch dieses Simulationstool detailgenau wiedergegeben werden.

Die Simulationsumgebung basiert auf einem speziellen Datenbanksystem mit einer integrierten **Online-Prozessverarbeitung**. In einer künstlichen Beschreibungssprache („GDL“) werden alle topologischen und physikalischen Anlagendaten beschrieben und automatisch in das Datenbankformat übersetzt. Dieses aus netzleitetechnischen Anwendungen entlehnte System erlaubt einen direkten **Eingriff** in die Simulation durch Schalthandlungen und Sollwertvorgaben. Dabei können diese Eingriffe sowohl indirekt über Softwareschnittstellen als auch manuell über ein Steuerungsfenster (Bild 1) erfolgen. Dieses Steuerungsfenster als Mensch-Maschine Schnittstelle (MMI) erlaubt zudem eine ständige Beobachtung des aktuellen Betriebsverhaltens der behandelten Anlage. Die dargestellten Anlagenbilder werden **automatisch** aus den topologischen Daten der Anlage generiert.

Zusätzlich zu der Online-Visualisierung durch das MMI können zwei weitere Darstellungen genutzt werden: In einer **zeitkontinuierlichen** Darstellung des Messwertfensters (Bild 3) können im laufenden Simulationsprozess oder retrospektiv alle archivierten Modell- und Messwerte dargestellt werden. Durch eine variable Zeitachse können sowohl langfristige Tendenzen als auch kurzfristige Extrema detailliert analysiert werden. In einer zusätzlichen **Strom-Spannung-Darstellung** werden die aktuell vom Simulationsalgorithmus errechneten Modellkennlinien dargestellt. Hierdurch kann das Verhalten jeder einzelnen Komponente im Vergleich zu den anderen visualisiert werden und beobachtet werden, welche Auswirkungen beispielsweise Schalthandlungen auf die Komponenten haben.

Expertensystem-Anlagenmanagement

Je **komplexer** ein Hybrid-System für eine Inselversorgung ist, um so schwieriger ist es, eine gute Regelung einer solchen Anlage durchzuführen. Einflussfaktoren auf das Verhalten einer Hybrid-Anlage mit regenerativen Energieerzeugern sind neben dem aktuellen tatsächlichen Energieverbrauch insbesondere die herrschenden Witterungsbedingungen (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Windstärke). Um eine solche Anlage unterbrechungsfrei ganzjährig versorgen zu können, ist es notwendig, eine Regelung aufzubauen, die drei verschiedene Anforderungen erfüllt:

1. Die Energieversorgung des aktuellen Tages und der folgenden Tage muss gesichert sein (**Kurzzeit-Energiemanagement**): Der Energievorrat der Batterie muss hoch genug sein, damit auch bei plötzlichem Ausfall der Einspeisungen unterbrechungsfrei weiterversorgt werden kann.
2. Die Energieversorgung der kommenden Monate muss gesichert sein (**Langzeit-Energiemanagement**): Der Vorrat an Wasserstoff (ggf. Diesel) muss groß genug sein, um auch lange Perioden ohne Einspeisung überbrücken zu können.
3. Die Komponenten müssen eine möglichst hohe **Lebensdauer** haben (Komponenten-Management): Da die einzelnen Teile solcher Hybrid-Systeme sehr teuer und wartungsintensiv sein können, muss die Regelung so konzipiert sein, dass keine Komponente über Gebühr verschlissen oder geschädigt wird.

Um diese teilweise **konträren** Anforderungen an das Energiemanagement einer Hybrid-Anlage erfüllen zu können, wurde ein **Expertensystem** zur Regelung komplexer Energiesysteme entwickelt. Wegen der Vielzahl **logischer** Entscheidungen, die im Rahmen eines solchen Anlagen-Managements unter diesen zum Teil kontradiktorischen Anforderungen zu treffen sind, ist der Einsatz eines Expertensystems für diese Aufgabe sinnvoll. Dieses Expertensystem erlaubt es, durch die Verschachtelung von logischen Regeln die verschiedenen Zielrichtungen des Energiemanagements zu kombinieren und somit sowohl die einzelnen Komponenten als auch die komplette Anlage möglichst optimal zu betreiben. Transparenz, Flexibilität und Modularität sind deutliche Vorteile gegenüber einer Lösung auf Basis konventioneller Regelungstechnik.

Die in der Wissensbasis des Expertensystems abgelegten Regeln beinhalten die eigentliche "Strategie" der Betriebsweise der Anlage, d.h. welche Entscheidungen z.B. zum Einsatz der einzelnen Komponenten der Anlage in welcher Situation getroffen werden. Die "taktische" Anpassung dieser Strategie an die gegebenen Bedingungen der Anlage selbst bzw. an äußere Bedingungen wird dadurch erreicht, dass die Regeln auf unterlagerte auswertende Programme zugreifen, deren Eingangsdaten ihrerseits aus der Anlage (z.B. Messwerte) oder von außen (z.B. Wetter) stammen.

Diese Modularität ermöglicht beispielsweise die flexible Integration von **Vorhersagen** bezüglich Witterung und Verbrauch. Bei der Wetterprognose werden durch ein speziell entwickeltes Programm Wetterberichte verschiedenster Internet-Anbieter ständig ausgewertet. Durch statistische Auswertung und ständigen Vergleich der prognostizierten Werte mit aktuellen Messdaten ist hierdurch eine verhältnismäßig sichere Abschätzung der kurz- und mittelfristig gewinnbaren Energie im Voraus möglich. Dies erleichtert es dem Expertensystem, Entscheidungen über den Einsatz der einzelnen Anlagen-Komponenten zu treffen.

Durch das Anlagenmanagement wird zyklisch zuerst eine Überprüfung auf Verletzung von Betriebsmittel-Grenzwerten vorgenommen und sofern notwendig und möglich entsprechende Um- oder Abschaltungen vorgenommen. Im Folgenden wird eine **Optimierung** der Anlage vorgenommen, wobei darunter die Maximierung der Energieausbeute bei gleichzeitig möglichst schonungsvoller Fahrweise der Komponenten verstanden wird. Die Entscheidungen des Expertensystems führen zur autonomen Ausführung von Schalthandlungen bzw. zur Vorgabe von Sollwerten an die Komponenten der Anlage.

Das Expertensystem wird entwickelt und getestet mit Hilfe der oben beschriebenen Prozesssimulation. Die Entscheidungen des Expertensystems werden durch die Online-Datenbank-Schnittstelle verarbeitet und die veränderten Vorgaben von der Simulation entsprechend berücksichtigt. Somit steht mit der Kombination dieser beiden Tools ein Paket zur Verfügung, das zur Planung neuer aber auch zur Optimierung bestehender Hybridsysteme herangezogen werden kann.

Optimierung des PHOEBUS

Als **Referenzanlage** wurde für dieses Projekt die Solar-Wasserstoff-Versuchsanlage PHOEBUS des Forschungszentrums Jülich gewählt. Durch die umfangreiche Messtechnik bestand hier die Möglichkeit, die Simulation an realen Betriebsmesswerten zu verifizieren. Umgekehrt konnten durch Simulationsrechnungen auch Verbesserungen an der Anlagentopologie vorgeschlagen und überprüft werden. So wurden beispielsweise inzwischen die DCDC-MPP-Steller der Photovoltaikfelder der Anlage überbrückt, da gezeigt werden konnte, dass die Stellerverluste insgesamt größer gewesen sind als die Verluste durch den nicht-optimalen Betrieb der PV-Felder. Eine Erhöhung der Batteriespannung, die zu einer nochmaligen Annäherung an die „mittlere“ MPP-Spannung der Module führen wird, ist in Planung.

Da die realisierte konventionelle Grenzwertregelung der Anlage jedoch nicht in der Lage ist, frühzeitig zu agieren, wurde ein spezielles Expertensystem-Anlagenmanagement für den PHOEBUS entwickelt. Allein durch das prognostische Verhalten führt dieses, wie sich auf Basis der Simulation gezeigt hat, zu einem wesentlich verbesserten Anlagenverhalten. Deutlich wird dies an den Abbildungen 2 und 3. Dargestellt ist ein typischer Frühjahrsstag mit hoher Einstrahlungsleistung. Der Akkumulator ist relativ hoch aufgeladen. Die bisher implementierte **Grenzwertregelung** (Abbildung 2) schaltet bei Überschreitung des Grenzwertes (Ladezustand 77%) die Elektrolyse zu und regelt diese so, dass der Batteriestrom ungefähr Null ist. Am frühen Abend ist nicht mehr genügend Einspeiseleistung vorhanden, so dass zur Bereitstellung der Mindestleistung des Elektrolyseurs die Batterie entladen wird, bis der Abschalt-Grenzwert unterschritten wird. Im Gegensatz dazu schaltet die **prognostische Regelung** auf Basis des Expertensystems bereits am Vormittag die Elektrolyse zu und regelt diese so, dass auch gleichzeitig die Batterie mäßig aufgeladen wird. Rechtzeitig wird am Abend der Elektrolyseur abgeschaltet. Durch dieses vorausschauende Verhalten wird

- die Umladung von Energie aus dem Kurzzeitspeicher in den Langzeitspeicher verhindert,
- eine höhere und somit MPP-nähere Systemspannung erreicht
- Lade-/Entladezyklen der Batterie bei sehr kleinen Strömen vermieden und
- ein insgesamt höherer Batterieladezustand und eine höhere Wasserstoffproduktion bilanziert.

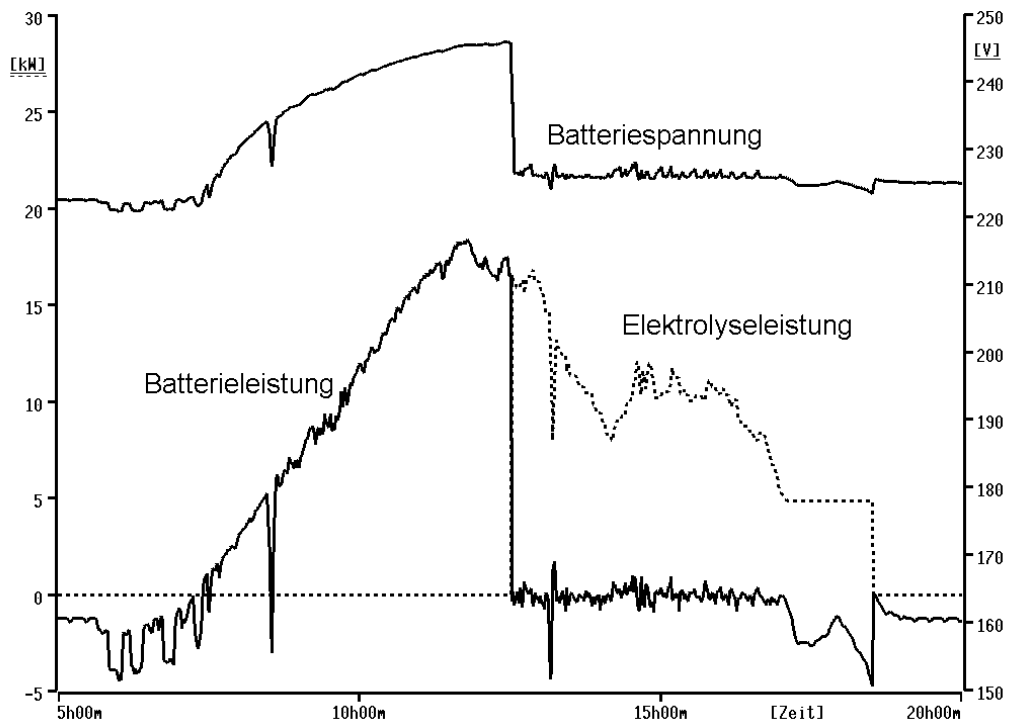


Bild 2: zeitlicher Verlauf der Grenzwertregelung

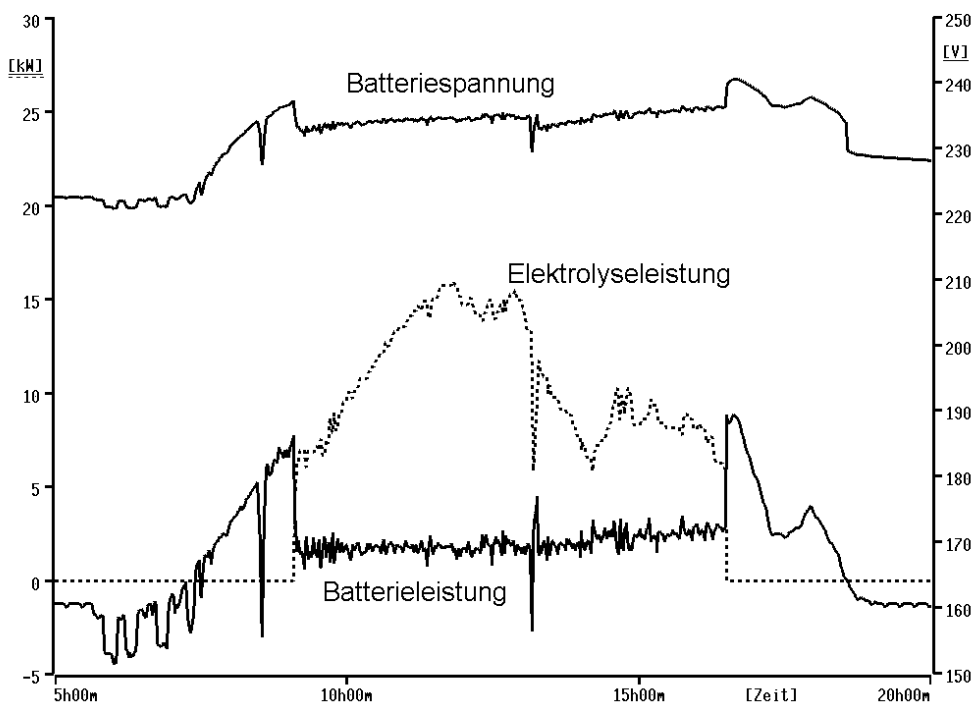


Bild 3: zeitlicher Verlauf der prospektiven Regelung

Aus dem kritischen Vergleich vieler solcher Szenarien lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das Expertensystem-Anlagenmanagement gegenüber konventioneller Grenzwertregelung

- die Energieausbeute insgesamt durch das prospektive Verhalten deutlich erhöht;
- eine kombinierte Komponenten- und Anlagensicht erlaubt;
- die einzelnen Komponenten erheblich schonender betreibt, indem unnötige Betriebszyklen vermieden werden.

Einsatz an anderen Systemen

Wegen seiner Flexibilität und Transparenz lässt sich das Expertensystem im Prinzip verhältnismäßig leicht auch an beliebige andere Anlagen-Konfigurationen anpassen. Es erscheint somit sinnvoll, ein solches intelligentes und prospektives Management auch für PV-Hybridanlagen mit Backup-(Diesel-)Generator einzusetzen; die umfangreichen Erfahrungen, die bei der Entwicklung der Regelung des PV-Wasserstoff-Systems mit seinen empfindlichen Anlagenkomponenten gemacht wurden, können auch für die Regelung solcher verhältnismäßig einfacher Anlagen hilfreich sein. Zudem erscheint die Kopplung von Wärme- mit Stromerzeugung gerade bei dezentralen und Inselsystemen notwendig. Hier ist eine integrative und prospektive Regelung erforderlich, die die einzelne Komponente im Gesamtsystem unter allen gegebenen Randbedingungen möglichst optimal betreibt. Solche Anlagen-Konfigurationen werden zum Beispiel im Rahmen des 50-Solarsiedlungen-Programmes (NRW) realisiert; auch hier lässt sich das Expertensystem-basierte Anlagen-Management sinnvoll einsetzen.

Literaturhinweise

1. Beckhaus, P.; Krost,G.; Müller,C.; Simulation Tool for Planning and Verification of Autonomous Photovoltaic Systems; UPEC98, Edinburgh, Sept. 1998
2. Krost,G.; Rumpel,D.; Spanel,U.; Müller,C.; Ju,K.: Autonomous Expert System Operation in Electric Energy Systems; Engineering Intelligent Systems, vol.6(1998)no.1, S.19-27 (invited paper)
3. Christof Müller: Interaktives Modell für den Betrieb von Photovoltaikanlagen mit Energiespeicherpfaden, Dissertation, Universität Duisburg, 26.09.1997
4. Krost,G.; Ju,K.; Spanel,U.; Salek,K.; Müller,C.: Expertensysteme im Netzbetrieb: Beispiele realisierter Anwendungen; Elektrische 51(1997)H.5/6, S.209-219
5. Meurer, H. C.: Energetische Analyse einer Photovoltaik-Elektrolyse-Brennstoffzellen-Anlage; Diplomarbeit RWTH Aachen 1997

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen der **Arbeitsgemeinschaft Solar** des Ministeriums für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.

