

# **Flexibles Simulationswerkzeug für PV-Hybridsysteme**

Peter Beckhaus, Gerhard Krost  
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Elektrische Anlagen und Netze  
47048 Duisburg; Tel: 0203-379 1030; Fax: -2749; E-Mail: beckhaus@uni-duisburg.de  
<http://www.uni-duisburg.de/FB9/EAN/solar>

Zur Modellierung von Solar-Hybrid-Systemen wurde am Fachgebiet für Elektrische Anlagen und Netze der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg ein Simulationssystem entwickelt, welches das Verhalten komplexer PV-Hybridanlagen mit quasi-beliebiger Konfiguration detailgenau und mit hoher Zeitauflösung wiedergibt. Über Prozessschnittstellen kann online in den Simulationsablauf wie auf eine reale Anlage eingewirkt werden. Dies erlaubt den Einsatz zur Auslegung neuer sowie zur Optimierung bestehender Anlagen einschließlich deren Regelung unter betriebsrealistischen Bedingungen.

## **Motivation**

Mit Beginn des PHOEBUS-Projektes am Forschungszentrum Jülich im Jahre 1992 hatte das Fachgebiet Elektrische Anlagen und Netze der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg die Aufgabe übernommen, eine detaillierte Simulation dieser speziellen Anlagenkonfiguration zu entwickeln und damit projektbegleitende Studien zur Optimierung der Anlage und ihrer Betriebsweise durchzuführen. Dazu wurden Modelle für die dort installierten Anlagenkomponenten erstellt, welche deren Klemmenverhalten mit hoher Zeitauflösung wiedergeben, und diese mit einem überlagerten Simulationsalgorithmus kombiniert, der eine exakte Strom- und Spannungsgenauigkeit der Berechnungen für das Gesamtsystem zulässt; die Zeittaktung kann dabei variabel zum Beispiel zu einer Minute gewählt werden. Die hohe Detailauflösung, die feine mögliche Zeitrasterung sowie nicht zuletzt auch die variable Parametrier- und Steuerbarkeit der Modellierung hat zu interessanten Ergebnissen bezüglich der Optimierung der Jülicher Anlage beigetragen [1].

Die letztgenannten Eigenschaften der Flexibilität und Interaktivität legten es nahe, das Simulationsprogramm durch Ergänzung mit einer großen Anzahl zusätzlicher Modelle elektrischer und auch thermischer Komponenten zu einem variablen Werkzeug zur Modellierung beliebiger Anlagen-Konfigurationen auszubauen. Das somit entstandene Simulationssystem („DUress“ – Duisburger regenerative Energie-System-Simulation) erlaubt eine detailgenaue und flexible Simulation elektrischer und thermischer Energiesysteme als Inseln oder auch mit Netzanbindung; insbesondere kann auch das Zusammenspiel elektrischer und thermischer Versorgungskreisläufe demonstriert werden, und dies unter Nutzung der vollen Eingriffs- und Visualisierungsmöglichkeiten eines prozessleittechnischen Systems.

## **Komponentenmodelle**

Das Spektrum der mit jeweils einem eigenständigen Modell nachgebildeten Einzelkomponenten umfasst auf elektrischer Seite:

elektrochemisch-physikalische Modelle für:

- Bleiakkumulator
- Elektrolyseur (alkalisch)
- Brennstoffzelle
  - Alkalisch: AFC
  - Polymerelektrolyt: PEFC / PEM
  - Oxydkeramisch: SOFC (inklusive interner und externer Gasreformierung)

#### Sonstige Modelle für:

- Fotovoltaikmodule
- Windgeneratoren
- Dieselgeneratoren
- Gleichrichter / Wechselrichter / Stromsteller
- Netzanschluß

Die Komponenten können je nach Anforderung direkt oder über entsprechende Stromsteller (als Bestandteil der Komponenten-Modellierung) miteinander gekoppelt werden; dabei werden auch Zuleitungswiderstände berücksichtigt. Elektrischer Eigenbedarf einzelner Komponenten (z.B. der Steller) kann berechnet und später in die Leistungsbilanz des Gesamtsystems mit einbezogen werden. Durch die besonders hohe Zeitauflösung von bis zu einer Minute werden kurzzeitige Extremsituationen (Strahlungseinbruch, Lastspitzen, Zu- und Abschalten von Komponenten) ausreichend genau wiedergegeben. Auch das transiente Verhalten einzelner Komponenten, hier insbesondere das der Bleibatterie [2], kann durch die flexible Simulationstaktung und die detaillierten physikalischen Modelle realistisch wiedergegeben werden.

Ergebnis der Modellierung der einzelnen Komponenten sind auf der elektrischen Seite Strom-Spannungs-Kennlinien (I-U-Kennlinien), welche im Betriebsbereich der jeweiligen Komponente unter Berücksichtigung von Grenzwerten und Temperaturgradienten gültig sind und in die Simulation des elektrischen Gesamtsystems eingehen, siehe unten.

Die Modellierung umfasst in relevanten Fällen neben dem elektrischen auch das Temperaturverhalten einzelner Komponenten. Dadurch kann unter anderem zusätzlich die Auskopplung von Abwärme (z.B. aus Brennstoffzellen) in Zusammenhang mit weiteren thermischen Komponenten berücksichtigt werden, für die ebenfalls entsprechende Modelle entwickelt wurden:

- Wärmetauscher
- Solarkollektoren
- Wärmespeicher (Schichtspeicher)
- Brauchwasserversorgung und Heizungssysteme
- Rohrsysteme

Die Leistung eventuell vorhandener Pumpen wird dabei als Eigenbedarf berechnet und in der Modellierung des elektrischen Systems berücksichtigt.

Alle Einzelmodelle wurden nach Möglichkeit mit Hilfe von Messwerten realer Betriebsmittel verifiziert. Als Eingaben werden in der Simulation soweit vorhanden Messwerte (z.B. Strahlung, Temperatur, Lasten) verwendet, um ein möglichst genaues Abbild der Realität liefern zu können. Die Modellierung von Strahlungswerten einschließlich etwaiger Modulverschattung ist alternativ möglich.

Die Kopplung aller an der jeweils betrachteten Anlage beteiligten Komponenten erfolgt durch einen überlagerten Algorithmus, welcher die Betrachtung und Steuerung des Gesamtsystems ermöglicht.

## **Algorithmik für das Gesamtsystem**

Um eine möglichst exakte Berechnung des Gesamtverhaltens bei beliebiger Verschaltung verschiedenster Komponenten zu ermöglichen, wurde ein spezieller Algorithmus entwickelt. Dabei wird für jeden Zeitschritt zuerst die aktuelle Topologie der Gesamtanlage aus der Prozeßdatenbank analysiert. Alle an einer Sammelschiene (einem Knoten) zusammengeschalteten Komponenten müssen gemäß der Physik gleiche Spannung bei gleichzeitiger Erfüllung der Kirchhoff'schen Knotenbedingung haben. Dazu werden die in der Modellierung der einzelnen Komponenten berechneten I-U-Kennlinien addiert und daraus theoretische Sammelschienen-Kennlinien ermittelt, die aussagen, welcher Strom bei welcher Spannung über die jeweils angeschlossenen Leitungen zu- oder abfließt. Bei Vorhandensein impedanzbehafteter Leitungen werden die Spannungen der verschiedenen Sammelschienen (Knoten) und die Zweigströme mittels eines Lastflussalgorithmus berechnet. Das elektrische Gesamtsystem kann dabei beliebig als Inselsystem, radial oder vermascht, oder als netzgekoppelte Anlage vorliegen.

Die Ergebnisse für jeden einzelnen Knoten werden iterativ durch wiederholten Aufruf der Sammelschienen-, Komponenten- und Lastflussberechnungen verifiziert, bis ein innerhalb der vorgegebenen Rechengenauigkeit korrekter Gesamtanlagenzustand ermittelt worden ist.

Im Anschluß an die Berechnung der elektrischen Anlagenteile werden gegebenenfalls vorhandene thermische Teilsysteme berechnet. Dazu werden etwaige Wärme-Auskopplungen elektrischer Komponenten (zum Beispiel von Brennstoffzellen oder Blockheizkraftwerken) aus der Komponenten-Modellierung übernommen und deren Auswirkungen auf das Verhalten des gesamten thermischen Systems zusammen mit dem der übrigen thermischen Komponenten (Kollektoren, Brenner usw. einschließlich eines evtl. vorhandenen Speichers) berechnet. Elektrischer Eigenbedarf (zum Beispiel von Pumpen) wird dann erst im nächsten Zeitschritt bei der Berechnung des elektrischen Teils berücksichtigt. Diese Vereinfachung ist einerseits aufgrund der Trägheit des thermischen Systems möglich, andererseits unproblematisch, da der Energiebedarf insgesamt in jedem Falle korrekt berücksichtigt wird.

## **Simulationsumgebung**

Die Simulationsumgebung basiert auf einem speziellen, sehr effizient parametrierbaren Datenbanksystem mit einer integrierten Online-Prozessverarbeitung. Dieses aus netzleit-technischen Anwendungen entlehnte System erlaubt einen direkten Eingriff in die Simulation durch Schalthandlungen und Sollwertvorgaben. Dabei können diese Eingriffe sowohl indirekt über Prozess-Schnittstellen als auch manuell über ein Steuerungsfenster erfolgen. Diese automatisch aus den aktuellen und potentiellen topologischen Daten der Anlage generierte Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI) erlaubt zudem die ständige Beobachtung des aktuellen Betriebsverhaltens der behandelten Anlage. Weiterhin kann mit Hilfe einer zeitkontinuierlichen Darstellung von Prozessgrößen (Messwertfenster) deren Verlauf online, aber auch retrospektiv, in frei wählbarer Zeitauflösung dargestellt werden. Als dritte Visualisierungsmöglichkeit kann eine aus dem Simulationsalgorithmus gewonnene Darstellung der aktuell errechneten Strom-Spannungs-Kennlinien der einzelnen Gleichstromkomponenten aufgeschaltet werden. Diese erlaubt bei der Planung von Systemen die Analyse von kritischen Situationen.

## Modellierungsbeispiel

Anhand zweier fiktiver Systeme soll das Leistungsspektrum des Simulationssystems „DUress“ beispielhaft veranschaulicht werden. Das erste verdeutlicht die Möglichkeiten der beliebigen elektrischen Verschaltung von Systemkomponenten über Kabelverbindungen, das zweite die zusätzliche Option der Kraft-Wärme-Kopplung.

In Bild 1 ist eine Übersichtsdarstellung der ersten Beispielanlage gezeigt. Die Darstellung zeigt insgesamt 6 verschiedene Knoten, die über Leitungen miteinander verbunden sind. Durch Maus-Anwahl läßt sich die einfache Box-Darstellung der Sammelschienen zur detaillierteren Knotenpunktdarstellung öffnen, in welcher die Sammelschienen in DC2, AC-M und AC2 gezeigt sind; Lasten werden dort als ausgefüllte Vierecke, Einspeisungen jeglicher Art durch Generatorsymbole dargestellt. Diese Ansicht dient zur Gewinnung einer schnellen topologischen Übersicht über das Gesamtsystem, Messwerte werden hier nicht dargestellt. Die Verbindung zwischen den beiden zentralen Sammelschienen DC-M und AC-M beinhaltet einen Wechselrichter und ist deswegen gestrichelt gezeichnet.

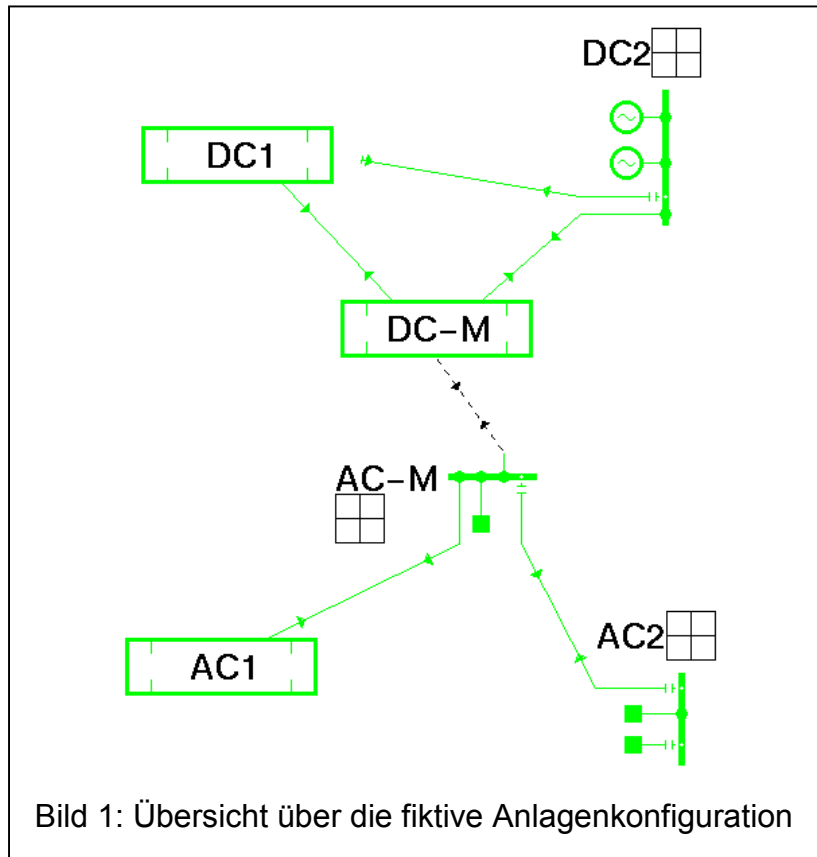


Bild 1: Übersicht über die fiktive Anlagenkonfiguration

Die Verbindung zwischen den beiden zentralen Sammelschienen DC-M und AC-M beinhaltet einen Wechselrichter und ist deswegen gestrichelt gezeichnet.

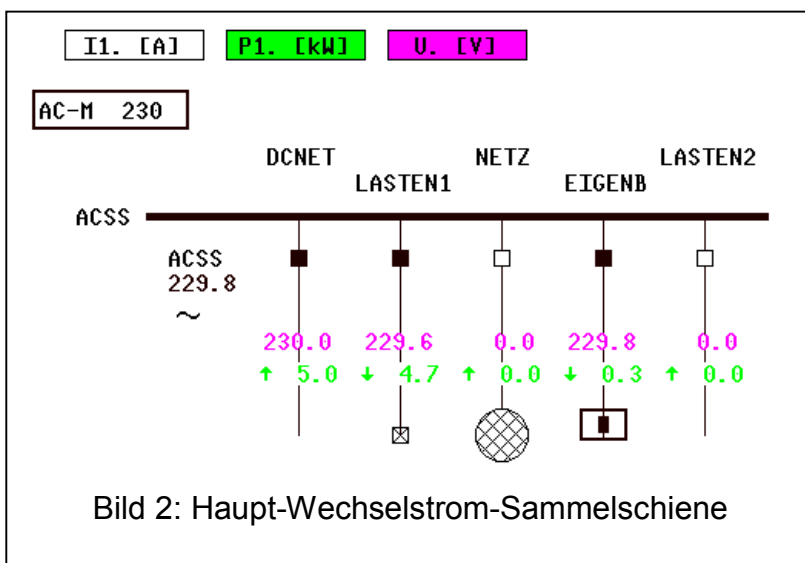


Bild 2: Haupt-Wechselstrom-Sammelschiene

Durch weitere Maus-Anwahl werden die einzelnen Sammelschienen in vollem betrieblichen Detail aufgeschaltet. Bild 2 zeigt als Beispiel die Haupt-Wechselstromsammelschiene AC-M (230 V Nennspannung). Hier befindet sich eine nicht zugeschaltete Notkuppelung zum Netz, die Eigenbedarfsversorgung, zwei Leitungsverbindungen zu den verteilten Lastsammelschienen (AC1 und AC2) und die Kabelverbindung zur DC-Sammelschiene (DCNET), über die aktuell 5 kW elektrischer Leistung bei einer Spannung von etwa 230 V zugeführt werden.

über die aktuell 5 kW elektrischer Leistung bei einer Spannung von etwa 230 V zugeführt werden.

Die Haupt-Gleichstromsammelschiene (DC-M mit 240 V Nennspannung) ist im Bild 3 gezeigt. Im Feld ACNET findet sich die Gegenseite der DC-AC Verbindung zur Wechselstrom-Sammelschiene. Als Leistungsübertrager dient ein Wechselrichter mit Spannungsvorgabe. Die leicht unterschiedlichen Leistungs- und Spannungswerte werden durch Leitungsimpedanzen bzw. -verluste verursacht. Weitere Verbindungen aus dieser Sammelschiene sind zu den Unteranlagen DC1 und DC2 vorhanden. Außerdem befinden sich hier als Komponenten zur Leistungsbereitstellung ein PV-Feld (PVF1\_SW), welches direkt an die Sammelschiene, und eines (PVF4\_SO), welches über einen MPP-Steller angeschlossen ist, sowie eine kleine Windkraftanlage im Leerlauf. Zur Energiespeicherung dienen eine Akkumulator-Batterie und die Komponenten des Wasserstoffpfades: Elektrolyseur und PEM-Brennstoffzelle. Das kleine interaktive Zusatzfenster dient zur Zuschaltung des Elektrolyseurs und wurde durch Maus-Anwahl des entsprechenden Leistungsschalters (rot umrandet in Bild 3) geöffnet.

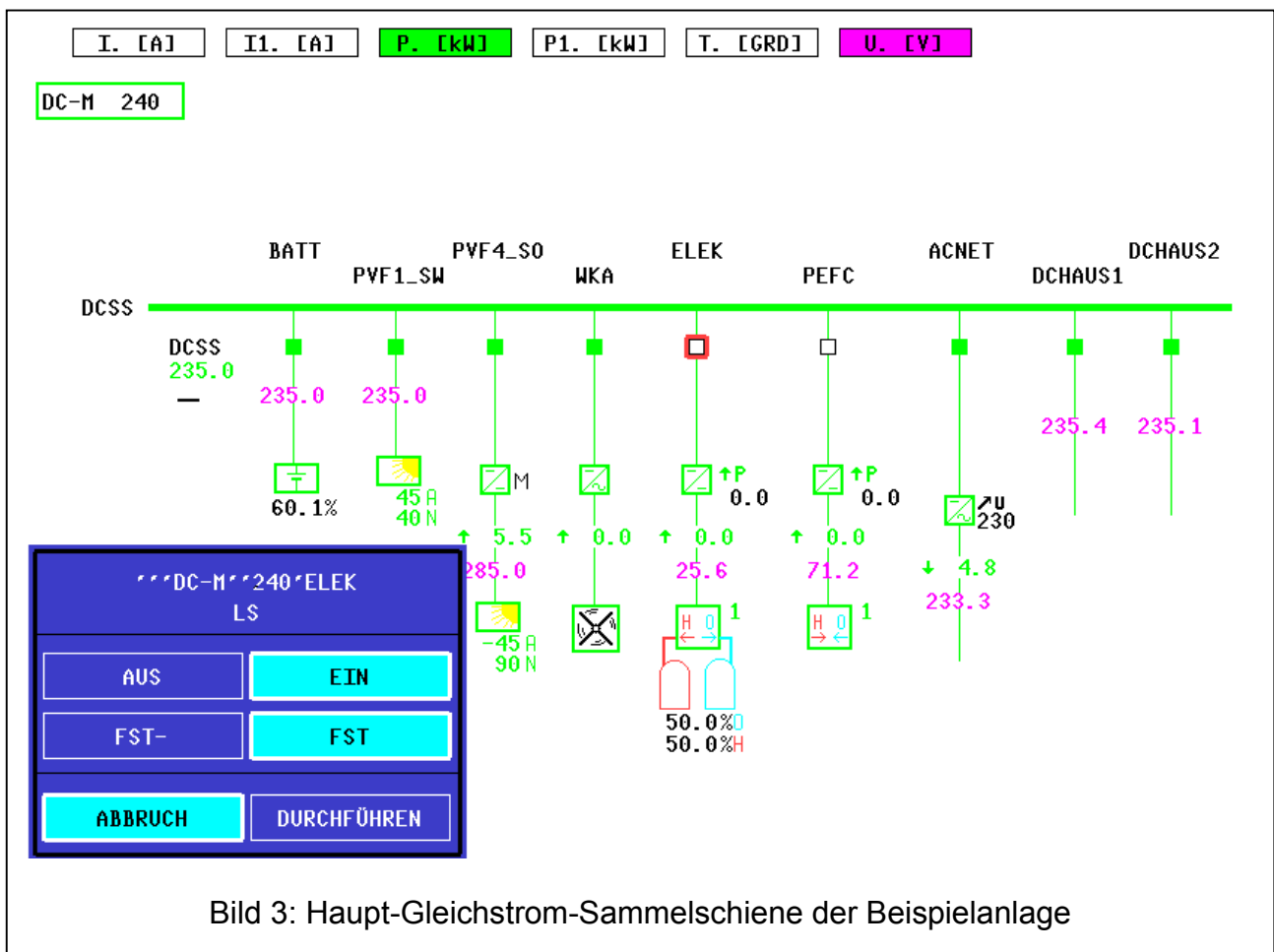
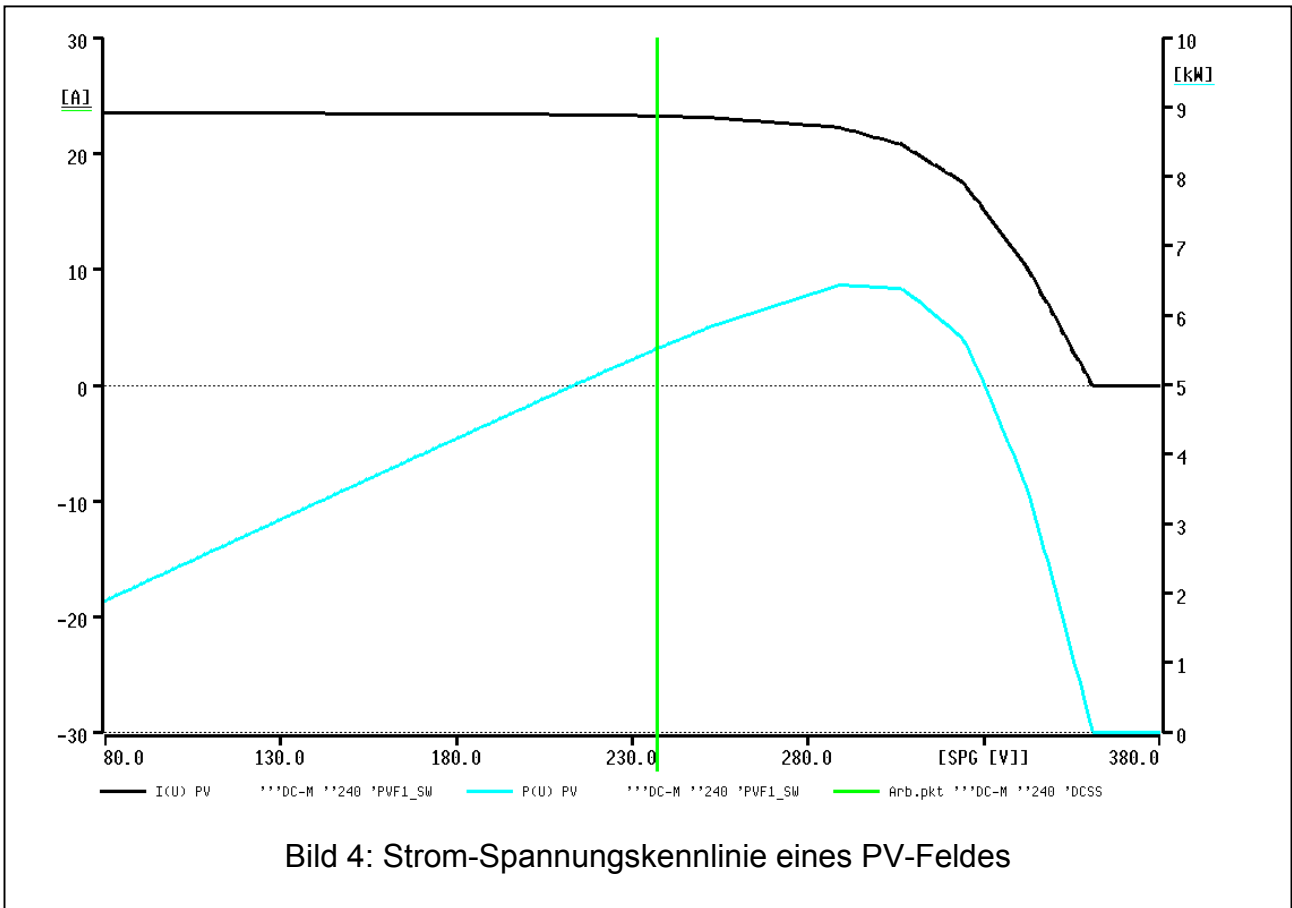


Bild 3: Haupt-Gleichstrom-Sammelschiene der Beispielanlage

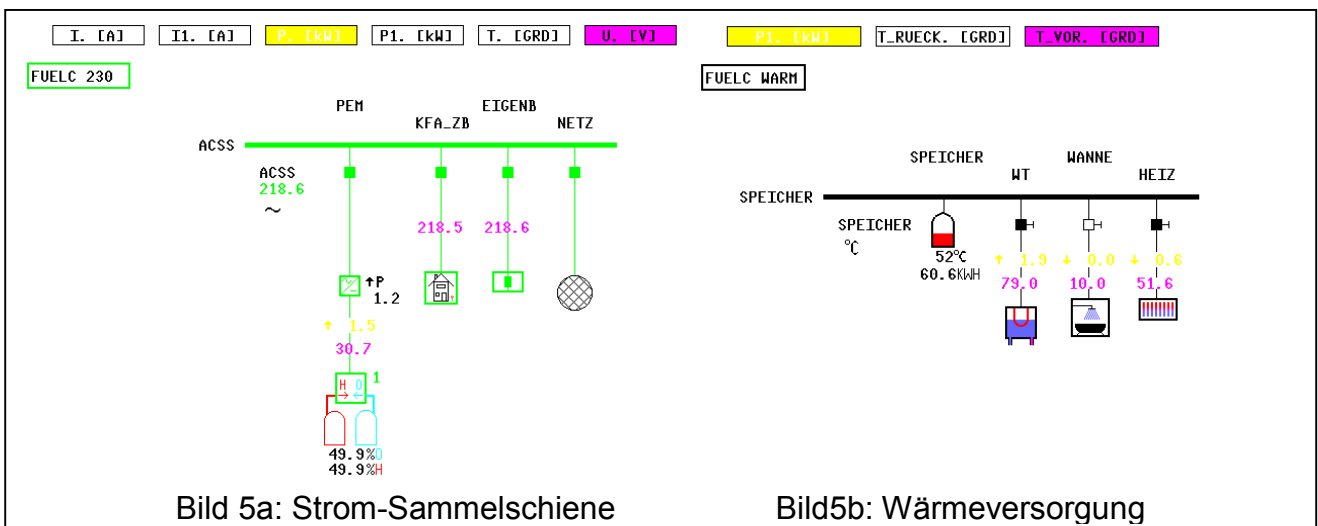
Hinter den gezeigten Symbolen verbirgt sich jeweils die Modellierung der entsprechenden Komponente; alle betrieblich einstellbaren Konfigurationen, zum Beispiel durch Zu- und Abschalten oder Sollwertvorgaben, werden korrekt berechnet und die resultierenden Ergebnisse als „aktuelle Messwerte“ auf der Bedienoberfläche wiedergegeben, Bild 3.

Durch den beschriebenen Simulationsalgorithmus ist es möglich, für jede aktuell berechnete Anlagenkonfiguration die effektiven I-U-Kennlinien aller zugeschalteten Komponenten darzustellen. Dazu dient das Kennlinien-Fenster, welches optional aufgeschaltet werden kann.

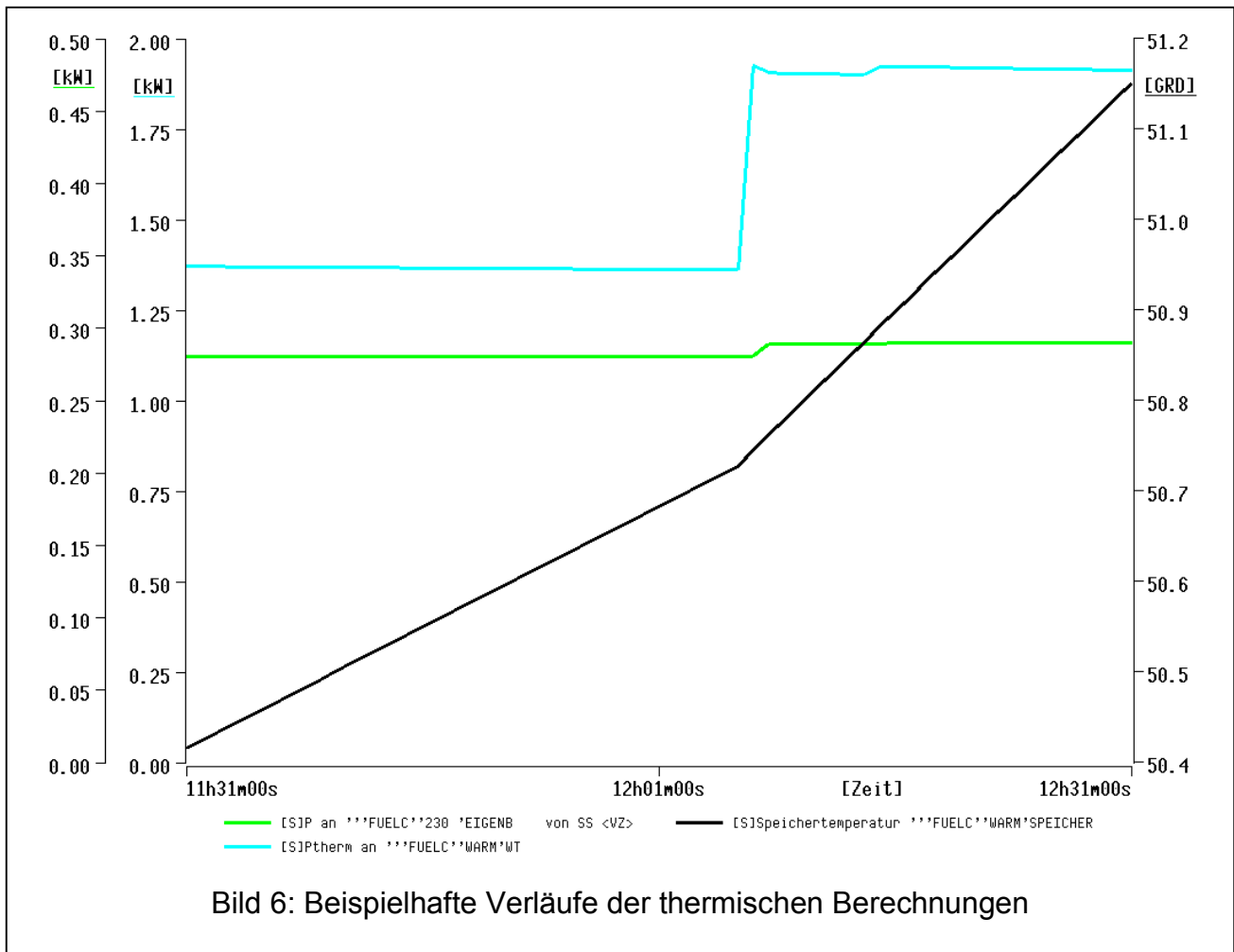


In Bild 4 ist eine solche Kennliniendarstellung für das direkt an die Sammelschiene angeschlossene PV-Feld (PVF1\_SW) gezeigt. Zusätzlich wurde die Darstellung der Abhängigkeit der Leistung von der Spannung (Leistung in kW, Achse rechts) ebenfalls angewählt. Die für ein Fotovoltaik-Modul typische Kennlinie wird sichtbar, und bei Betrachtung der Leistungskurve wird auch der Punkt Maximaler Leistung (MPP) deutlich. Die senkrechte Linie charakterisiert die sich aktuell einstellende Sammelschienen-Spannung. Durch eine ca. 50 V höhere Spannung könnte also aus dem betrachteten PV-Feld ca. 1 kW mehr an elektrischer Leistung gewonnen werden.

Mit der zweiten Beispiel-Anlage soll die Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung im Simulationssystem DÜress gezeigt werden. Dazu wurde eine einfache Konfiguration aus einer elektrischen Sammelschiene (Bild 5a), an der eine Brennstoffzelle (gepuffert über eine



externe Einspeisung) einspeist, und einem Wärmeversorgungs-kreislauf (Bild 5b), bestehend aus einem Speicher, dem Wärmetauscher der Brennstoffzelle (WT) und zwei thermischen Lasten, modelliert. In Bild 6 ist beispielhaft ein Ausschnitt aus dem Simulationsverlauf dargestellt, in welchem die Auswirkungen einer Veränderung des elektrischen Sollwertes der Brennstoffzelle auf die thermische Abgabe des Wärmetauschers (blaue Kurve, 2. Achse links) und damit direkt auf den Temperaturgradienten des Wärmespeichers (schwarz, Achse rechts) gezeigt werden. Gleichzeitig muss durch eine erhöhte Durchflussmenge des Wärmeträgermediums im Wärmetauscher zur Abfuhr der thermischen Leistung mehr elektrische Pumpenergie aufgebracht werden, was sich in einer Veränderung des elektrischen Eigenbedarfs widerspiegelt (grüne Kurve, linke Achse).



## Praktischer Einsatz

Das Simulationstool wurde erfolgreich eingesetzt für die modellmäßige Begleitung der Solar-Wasserstoffanlage Phoebus in Jülich und hat dabei wichtige Beiträge zu deren Optimierung geleistet. Dazu gehörte unter anderem auch die Nutzung als Entwicklungs- und Testumgebung für ein neuartiges, intelligentes Anlagenmanagement auf Basis eines Expertensystems [3, 4]. Durch die flexible Parametrierbarkeit sowie die hohe Detailgenauigkeit der Simulation konnten auch Vorstudien zu anderen Wasserstoffprojekten (z.B. das geplante PV-Home-Projekt KonWerl) durchgeführt werden. Weitere Anwendungen werden die Entwicklung nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen unter Einschluss von Kraft-Wärme-Kopplung im Rahmen von kompletten Gebäude- oder Siedlungsstrukturen (unter anderem auch Projekte im Rahmen der 50 Solarsiedlungen in NRW) sein.

Insbesondere auch die Erfahrungen mit verschiedenen Typen von Brennstoffzellen und deren Integration in Gesamtsysteme werden hier zukünftig im Vordergrund stehen. Die aufwendige Modellierung von Bleiakkumulatoren erlaubt darüber hinaus auch detaillierte Untersuchungen von Systemen, bei welchen insbesondere das Kurzzeitverhalten der Akkumulatoren von Interesse ist; dazu gehören die Anlage „Mont Cenis“ in Herne sowie ein Projekt in Bochum/Gelsenkirchen, bei welchem ein PV-System mit Akkumulator für die Pufferung des stark schwankenden Leistungsbezuges des Straßenbahn-Gleichstromnetzes eingesetzt werden soll.

### **Weiterführende Literatur**

- [1] Krost, G.; Beckhaus, P.; Müller, Ch.: Simulation Tool for Planning and Verification of Autonomous Photovoltaic Systems; Proc. of the 33rd UPEC 1998, Edinburgh, 08.-10.09.1998, Vol.2 pp. 655-658
- [2] Müller, Ch.: Interaktives Modell für den Betrieb von Photovoltaikanlagen mit Energiespeicherpfaden, Dissertation, Universität Duisburg, September 1997
- [3] Krost, G.; Beckhaus, P.: Intelligentes vorausschauendes Management von PV-Hybridsystemen; 15. Symposium 'Photovoltaische Solarenergie', Kloster Banz Staffelstein, 15.-17.03.2000
- [4] Krost, G.; Beckhaus, P.: Eine optimierte Regelung von Solar-Wasserstoff Anlagen; 7. Symposium 'Nutzung regenerativer Energie', Fachhochschule Stralsund, 4.-6.11.1999
- [5] Berichte zum Projekt unter: <http://www.ag.-solar.de>

*Dieses Projekt der „AG-Solar Nordrhein-Westfalen“ [5] wird vom Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen unterstützt.*