



## **Impressum**

### **Herausgeber**

Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET)  
Verein an der Universität Gesamthochschule Kassel e.V.

### **Vorstand**

Prof. Dr.-Ing. J. Schmid. (Vors.)  
Prof. Dr.-Ing F.-B. Frechen  
Dr. rer. nat. O. Führer

### **Anschrift**

Königstor 59  
D-34119 Kassel  
Telefon: (0561) 7294-0  
Telefax: (0561) 7294-100  
e-mail: [mbox@iset.uni-kassel.de](mailto:mbox@iset.uni-kassel.de)

Abt. Prozeß- und Verfahrenstechnik  
Rodenbacher Chaussee 6  
D-63457 Hanau  
Telefon: 06181-58-2701  
Telefax: 06181-58-2702  
e-mail: [iset\\_hanau@internetdienste.de](mailto:iset_hanau@internetdienste.de)

Internet: [www.iset.uni-kassel.de](http://www.iset.uni-kassel.de)

### **Redaktion**

R. Schwarz

Gedruckt auf 100% Recyclingpapier

Kassel 1999



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Impressum</b>	<b>2</b>
<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Einführungsvortrag: Leistungs- und Mikroelektronik – unentbehrlich für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen</b>	<b>7</b>
Prof. em. Dr. Dr. h.c. Werner Leonhard, TU Braunschweig	
<b>Computer simulations of the power supply and the protection system for the superconducting coils of the fusion reactor</b>	<b>18</b>
Dr. Lutz Zacharias, SIMEC, Prof. A. Wieczorek, FH Regensburg	
<b>Rechnergestützter Regler-Entwurf für einen bidirektionalen DC-DC-Wandler</b>	<b>27</b>
Alfred Engler, ISET	
<b>Pvcad – Entwicklung eines Programms zur Auslegung von Photovoltaikfassaden</b>	<b>48</b>
Michael Viotto, ISET	
<b>Vermarktung von Photovoltaik - Fassaden mit Hilfe von Pvcad</b>	<b>55</b>
Oussama Chehab, Pilkington	
<b>Simulationen zu Netzurückwirkungen von Photovoltaikinvertern am Beispiel des Olympischen Dorfes in Sydney</b>	<b>58</b>
Dr. Peter Zacharias, ISET	
<b>Multimediale Ausbildung – Vorlesungen und virtuelle Labore im Internet</b>	<b>70</b>
Efstratios Tapanlis, J. Bard, GhK	
<b>Regelung und Zustandsüberwachung von Windkraftanlagen – Methoden des Rapid Prototyping</b>	<b>81</b>
Dr. Manfred Mevenkamp, Josef Petschenka, ISET	



<b>Finite - Elemente - Modellierung von Rotorblättern für Windkraftanlagen</b>	<b>91</b>
Rainer Osthorst, Aerodyn	
<b>Online - Ermittlung der eingespeisten Windleistung für definierte Versorgungsgebiete</b>	<b>101</b>
Cornel Enßlin, Martin Hoppe-Kilpper, Kurt Rohrig, ISET	
<b>Erfahrungen mit dem Einsatz von Modellbildung und Simulation in der Kraftwerkseinsatzplanung der PreussenElektra</b>	<b>110</b>
Markus Bredow, PreussenElektra	
<b>Netzspezifische Filterauslegung</b>	<b>118</b>
Dr. Siegfried Heier, GhK, Michael Durstewitz, ISET	
<b>Energetische Simulation zur Auslegung kleiner Wind-Diesel Systeme</b>	<b>130</b>
Dr. Thomas Degner, ISET	
<b>ISET-LAB – Software zur Simulation von Bleibatterien</b>	<b>142</b>
Peter Caselitz, Dr. Ralf Juchem, ISET	
<b>Simulation einer Kläranlage</b>	<b>150</b>
Peter Maurer, Bodo Lamberth, ISET	



## Vorwort

Sein Jubiläumsjahr zum zehnjährigen Bestehen beschloß das ISET 1998 mit dem nun bereits 3. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik – Erneuerbare Energien und Rationelle Energieverwendung. Fachgebietsübergreifend wurde zu den Themen Modellbildung und Simulation in Bereichen wie Windenergie, Photovoltaik, Hybridsysteme oder Abwasserbehandlung referiert. Das rege Interesse der Teilnehmer unterstreicht die Bedeutung, die die Modellierung von Zuständen oder Prozessen in der Systementwicklung bei den erneuerbaren Energien inzwischen gewonnen hat.

Der Kern einer jeden Simulation ist die Integration der systembeschreibenden Differentialgleichungen. Eigenschaften des Systems können in einfacher Weise variiert und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem untersucht werden. Kritische Zustände können entdeckt und in der Entwicklung der Hardware entsprechend berücksichtigt werden. Fehler im Komponentendesign werden vermieden und die Entwicklungskosten erheblich reduziert.

Mit der bewährten Unterstützung des FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE und des VDE Bezirksvereins Kassel konnte auch beim 3. Kasseler Symposium eine gelungene Mischung an Vortragsthemen angeboten werden. Die behandelten Forschungsgebiete wurden bewußt breit gefaßt, um einen möglichst umfassenden Eindruck von der Vielfalt der Fragestellungen zu Modellbildung und Simulation in den erneuerbaren Energien vermitteln zu können.

Der vorliegende Tagungsband gibt einen idealen Überblick über die behandelten Themenkomplexe während des Symposiums. Den Referenten, die ihre Themen kompetent und engagiert vertreten haben, sei an dieser Stelle nochmals herzlich für Vortrag und Manuskript gedankt.

Das nun schon obligatorische gesellige Beisammensein am ersten Abend des Symposiums fand erstmals im Designzentrum Modulare Versorgungstechnik - DeMoTec - statt, das zur Zehnjahresfeier des ISET im Sommer 1998 eingeweiht wurde. Die Atmosphäre im Demonstrations - und Experimentierzentrum des ISET zwischen Anlagen und Exponaten der modularen Systemtechnik erwies sich als sehr stimulierend und hat manches Fachgespräch nachhaltig geprägt. Für das leibliche Wohl hatte der VDE Bezirksvereins Kassel gesorgt, was es ermöglichte, den Tag in gemütlicher Runde Revue passieren zu lassen. Vielen Dank an den Bezirksverein des VDE !



Bereits jetzt möchten wir Sie ganz herzlich zum 4. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik am 4. und 5. November 1999 nach Kassel einladen. Schwerpunkte in diesem Jahr werden *Stromrichter und Konzepte der Drehzahlvariabilität* für erneuerbare Energien sein.

Kassel, Juli 1999



*J. Schmid*

*W. Kleinkauf*

Prof. Dr. -Ing. J. Schmid

Prof. Dr. -Ing. W. Kleinkauf



## Leistungs- und Mikroelektronik - unentbehrlich für die Nutzung sich erneuernder Energiequellen

Prof. Werner Leonhard  
Institut für Regelungstechnik  
Technische Universität Braunschweig  
e-mail: Leonhard@ifr.ing.tu-bs.de

### 1 Flächendeckende elektrische Energieversorgung mit Drehstrom und sinusförmigen Spannungen - auch künftig die beste Lösung?

Nach einem historischen Wettstreit der Gleichstrom- und Drehstromsysteme am Ende des vergangenen Jahrhunderts hat sich Drehstrom konstanter Frequenz für die Übertragung und Verteilung elektrischer Energie weltweit durchgesetzt. Seitdem sind kontinent-



Abb.1: Europäisches Hochspannungs -  
Verbundnetz,  $U > 220 \text{ kV}$

überspannende Drehstromnetze mit hunderten von GW Leistung entstanden, während Gleichstrom bei speziellen Anwendungen, etwa in der Verkehrs- und Verfahrenstechnik, bei der Punkt- zu- Punkt Übertragung hoher Leistungen zwischen Netzen verschiedener Frequenz oder, am anderen Ende des Leistungsspektrums, in nachrichtentechnischen Geräten aller Art Verwendung findet. Abb. 1 zeigt als Beispiel das aus mehreren synchronen Gebieten bestehende europäische Hochspannungs-Verbundnetz. Dabei kommt Drehstrom mit

sinusförmigen Spannungen zum Einsatz, der heute fast ausschließlich mit turbinengetriebenen Synchrongeneratoren aus verschiedenen Primärenergiequellen erzeugt wird, Abb. 2; die Drehzahlen werden entsprechend der Netzfrequenz geregelt. Wegen der

wachsenden Bedeutung sich erneuernder und nicht unmittelbar steuerbarer Energiequellen und der Möglichkeit, die Kurvenform der Spannungen und Ströme durch Leistungselektronik verlustarm nahezu beliebig zu verändern, stellt sich die Frage, wie ein künftiges elektrisches Versorgungssystem aussehen könnte, das die gewohnten Vorteile bietet und alle verfügbaren Energiequellen nutzen kann.

Wegen des bei erneuerbaren Quellen stark fluktuierenden und mit dem wechselnden Bedarf nicht korrelierten Energieangebotes, sowie zum Ausgleich von Störungen, erscheint eine Versorgung im Verbund nach wie vor sinnvoll. Einfache physikalische Überlegungen zeigen, daß die Übertragung und Verteilung mit sinusförmigem Drehstrom weiterhin die flexibelste Lösung darstellt, ganz abgesehen von den immensen

*Magnetische Flußverkettung:*

$$\mathbf{a} = \mathbf{p}/2$$

$$\Phi(t) = rl \int B(\mathbf{a} - \mathbf{e}(t)) d\mathbf{a}$$

$$\mathbf{a} = -\mathbf{p}/2$$

*Induzierte Spannung:*

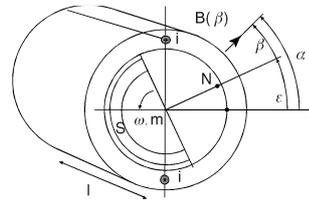
$$e(t) = \frac{d\Phi}{dt} = 2rl\omega B(\mathbf{p}/2, t)$$

*Drehmoment :*

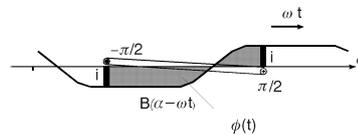
$$m(t) = 2rlB(\mathbf{p}/2, t)i$$

*Leistung :*

$$\begin{aligned} \underline{m\omega} &= 2rlB(\mathbf{p}/2, t)i\omega \\ &= 2rl\omega B(\mathbf{p}/2, t)i = ei \end{aligned}$$

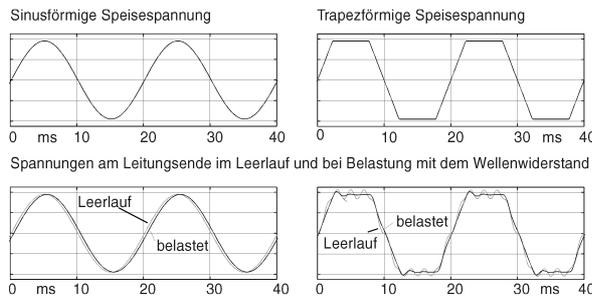


Radiale Flußwelle  $B(\beta)$  bewegt sich mit dem Rotor



**Abb. 2: Elektromechanische Energiewandlung mit rotierendem Generator**

Investitionen in das bestehende Versorgungssystem. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auf Freileitungen und Kabeln gehorcht den Gesetzen der Elektrodynamik, d.h. linearen partiellen Differentialgleichungen, wo Spannungen und Ströme nach Zeit und Ort differenziert werden; da sinusförmige Größen die einzigen periodischen Funktionen sind, die im stationären Zustand durch diese Gleichungen in sich abgebildet werden, bleibt die Sinusform auch im Zeitalter der Leistungselektronik eine Voraussetzung für die Bildung ausgedehnter Netze. In Abb. 3 ist dies anhand eines Beispiels demonstriert, wo eine 100 km lange Freileitung mit sinus- oder trapezförmiger Spannung gespeist wird; im einen Fall ergibt sich eine

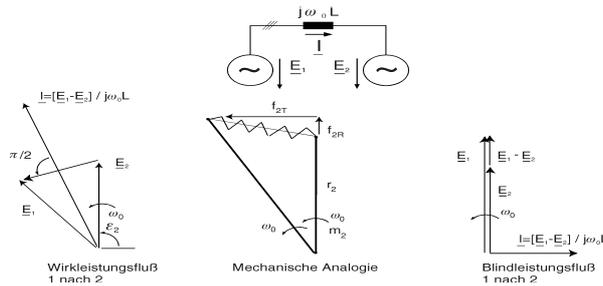


**Abb. 3: Spannung am Ende einer Freileitung bei Speisung mit sinus- und trapezförmiger Spannung**

sinusförmige Ausgangsspannung, deren Betrag und Phase sich bei Belastung nur geringfügig ändern, im anderen Fall entstehen last- und ortsabhängige Verzerrungen, die eine Netzbildung erschweren oder unmöglich machen würden.

Ein wichtiger Gesichtspunkt ist auch die Stabilität der Übertragung, was anhand von Abb. 4 im Prinzip deutlich wird.

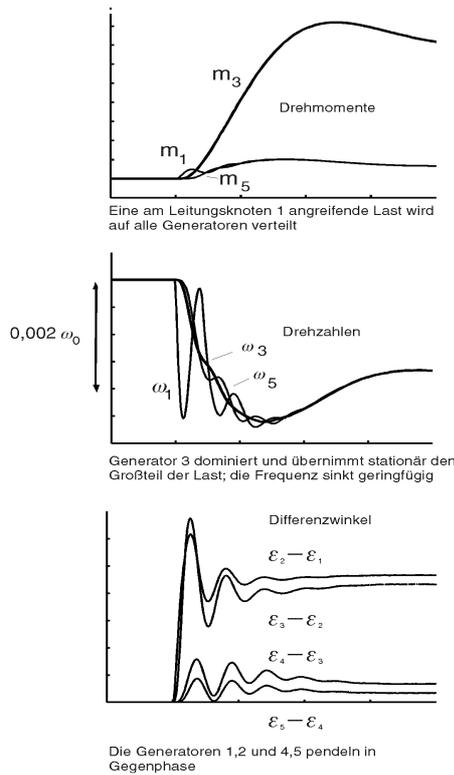
Wenn zwei eingepreßte sinusförmige Generatorspannungen  $E_1, E_2$  über eine Induktivität, z.B. eine kurze Freileitung, verbunden sind, wird bei einer antriebs- oder lastbedingten Winkelverdrrehung der voreilende Generator generatorisch, der nacheilende motorisch belastet, sodaß eine stabilisierende Wirkung entsteht, die die Generatoren "in Tritt" hält.



**Abb. 4: Wirk- und Blindleistungsaustausch bei induktiv gekoppelten Synchrongeneratoren**

Diese synchronisierenden Drehmomente sind eine Voraussetzung der (statisch für  $\epsilon_1 - \epsilon_2 < \pi/2$  stabilen) Energieübertragung mit Drehstrom; ähnliches gilt für die Blindleistung, wo Leitungs- und Transformator – Reaktanzen die Ausgleichsströme verlustarm begrenzen, anders als dies bei niederohmigen Verbindungen der Fall wäre.

Schließlich bietet das Drehstromnetz mit geregelten Synchrongeneratoren auch eine einfache Lösung, um die im Netz angreifenden elektrischen Lasten nach technischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten auf die Generatoren und Teilnetze zu verteilen. Dies ist die Aufgabe der proportional wirkenden Drehzahlregler aller Antriebsmaschinen, die auch dem Schutz bei Überlastung und im Störfall dienen, sowie der übergeordneten Netzregelung. Da stationär die Frequenz im gesamten Verbundnetz gleich ist, läßt sich über die sog. Statikkennlinie jedes Reglers die Leistung des zugehörigen Generators



**Abb. 5: Lastverteilung im Netz mit drehzahlgeregelten Synchrongeneratoren**

einstellen, er beteiligt sich dann auch bei unerwarteten Störungen nach Kräften an der Deckung des veränderten Bedarfs; ähnlich ist es in einem längeren Zeitmaßstab auf der nächst höheren Netzregelebene. Dieses Verfahren der sog. Primär- und Sekundär- Regelung, das sich seit Jahrzehnten bewährt hat, sei anhand eines Rechenbeispiels illustriert, Abb. 5. Dabei ist vereinfacht angenommen, daß mehrere drehzahlgeregelte Generatoren unterschiedlicher Leistung über eine Leitung verbunden sind; am Leitungsende, bei Generator 1, greife eine Last an, die auf alle Generatoren verteilt werden soll. Im Beispiel übernimmt der leistungsmäßig dominierende Generator 3 den größten Teil der Last, die Maschinen an den Enden der Leitung pendeln dabei in Gegenphase (ähnliche Schwingungsvorgänge wurden kürzlich zwischen dem spanischen und polnischen Teilnetz beobachtet). Im Endzustand stellt sich nach Maßgabe aller Regler eine geringfügig reduzierte Frequenz ein. Der Ausgleichsvorgang wird wesentlich durch die kinetische Energie aller rotierenden Maschinen bestimmt. Sollte

eines Tages ein nennenswerter Leistungsanteil über unverzögert reagierende elektronische Umrichter ohne mechanische Zwischenstufe in das Netz eingespeist werden, so entfielen die Stützung durch die rotierenden Massen und müßte durch Regelung ersetzt werden; es ist keineswegs sicher, daß sich damit ausgedehnte Netze ähnlich stabil betreiben ließen, wie das beim heutigen Netz der Fall ist. Als vor einigen Jahren im europäischen Verbundnetz infolge größerer Störungen ein vorübergehendes Leistungsdefizit von über 8 GW entstand, führte dies zu einer Frequenzänderung von weniger als 0,5 Hz, was die außerordentliche Robustheit des Verbundnetzes deutlich macht. Aus allen diesen Gründen ist es höchst unwahrscheinlich, daß man das bewährte Dreh-



stromsystem künftig durch ein anderes Übertragungs- und Verteilverfahren ersetzen kann.

## 2 Verlustarme elektrische Energiewandlung mit Leistungselektronik

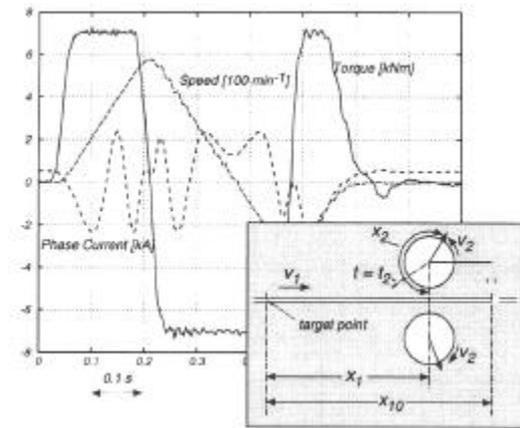


Abb. 6: Bewegungsverlauf eines Scherenantriebs, 500 kW Drehstrommotor (Messung Ansaldo)

Sinusförmiger Drehstrom ist zwar ideal für eine flächendeckende Energieversorgung; bei der Anwendung sind aber häufig, wie in Abb. 6 anhand des Antriebs für eine "fliegende Schere" in der Walzwerkstechnik gezeigt, ganz andere Verläufe nötig. Zur "Rendez-vous" Bewegung der Schere gehört ein ganz bestimmter nichtsinusförmiger Verlauf der Motorströme, deren Sollwerte von Reglern in Echtzeit zu berechnen sind. Die Ströme selbst werden durch leistungselektronische Umrichter auf der Basis von Halbleiter-Schaltelementen bereitgestellt, Abb. 7. Es zeigt die verlustarme Steuerung von Strömen mittels peri-

odisch betätigter elektronischer Schalter, wobei die Schaltfrequenz je nach Art und Leistung der Bauelemente zwischen einigen hundert Hz und einigen hundert kHz liegen

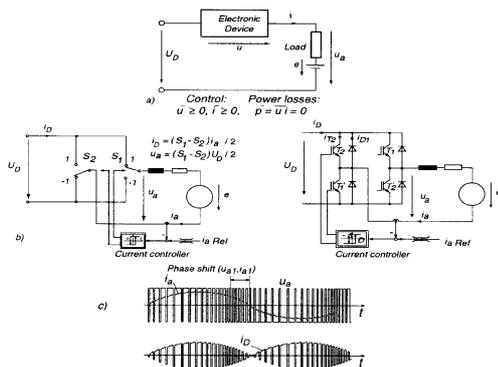


Abb. 7: Leistungssteuerung mit elektronischen Schaltern

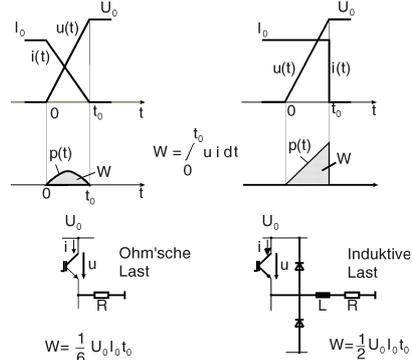


Abb. 8: Dynamische Schalterverluste

kann. Natürlich sind solche Schalter nicht völlig verlustfrei, die statischen und dynamischen Leistungsverluste müssen durch intensive Kühlung der Bauelemente abgeführt werden. Die momentane Leistungsdichte in den aktiven Elementen erreicht sehr hohe Werte ( $\text{MW}/\text{cm}^3$ ), was kürzeste Schaltzeiten und eine sichere regelungstechnische Begrenzung der wesentlichen Systemgrößen erfordert.

Leistungselektronische Umrichter stehen heute von wenigen Watt bis zu vielen Megawatt in großer Vielfalt zur Verfügung. Sie sind immer dann unentbehrlich, wenn Erzeuger oder Verbraucher mit nichtsinusförmigen Strömen und Spannungen oder mit Spannungen veränderlicher Frequenz an das Verbundnetz gekoppelt werden sollen; sie stellen damit auch eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung sich erneuernder Energiequellen dar.

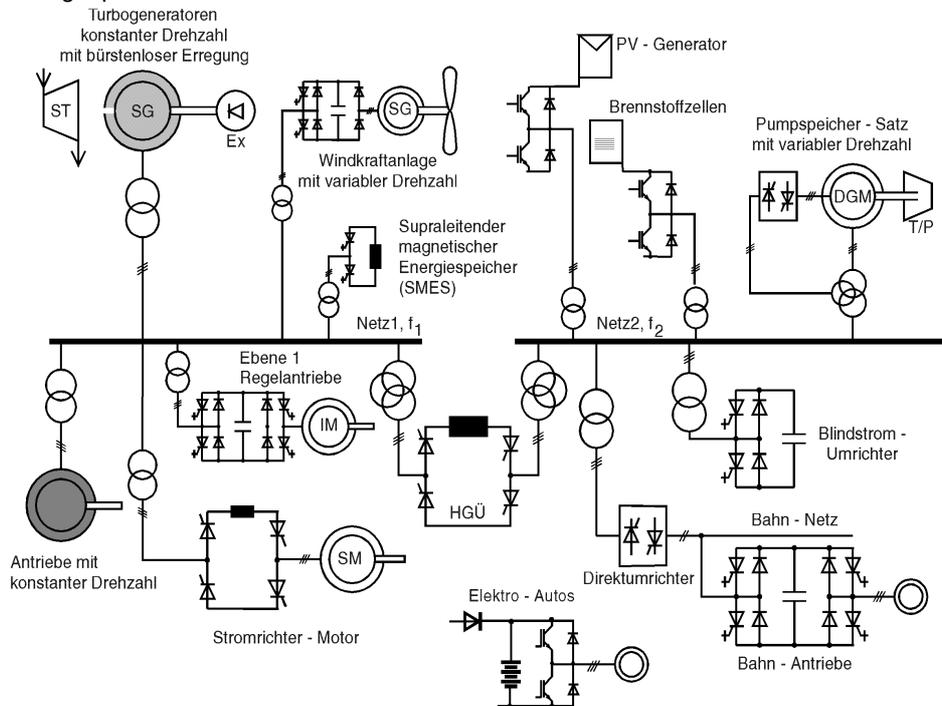


Abb. 9: Leistungselektronik im Drehstromnetz



Die Vielfalt leistungselektronischer Anwendungen im Verbundnetz ist in Abb. 9 angedeutet. Als Beispiel einer solchen Aufgabe zeigt Abb. 10 die Prinzipschaltung eines netzgekoppelten Photovoltaik (PV) -Generators; er umfaßt eine zweistufige Leistungs-umformung zur Anpassung der einstrahlungsabhängigen Kennlinie des Solargenerators im leistungsoptimalen Betriebspunkt an einen Gleichspannungs-Zwischenkreis konstanter Spannung sowie einen pulsweitenmodulierten Umrichter zur Kopplung des Zwischenkreises an das Drehstromnetz. Der Umrichter kann, wie im nächsten Abschnitt gezeigt, auch als Blindstromkompensator dienen, um die Spannung im lokalen Drehstrom-Abzweig zu stützen; es wäre im Prinzip auch möglich, mit dem Umrichter beide Aufgaben zu lösen.

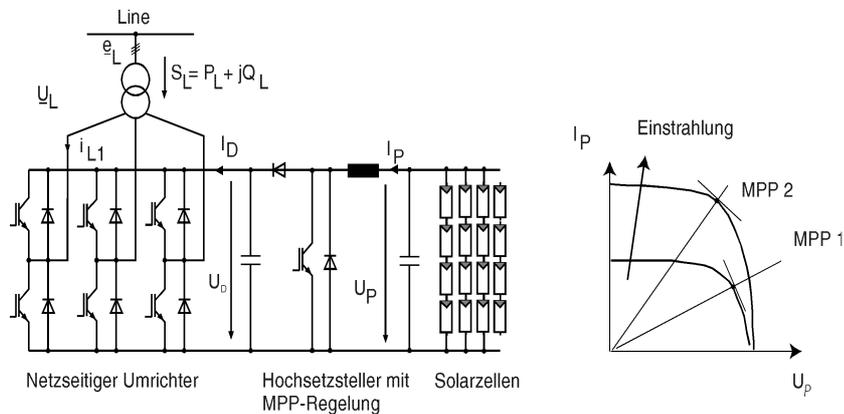
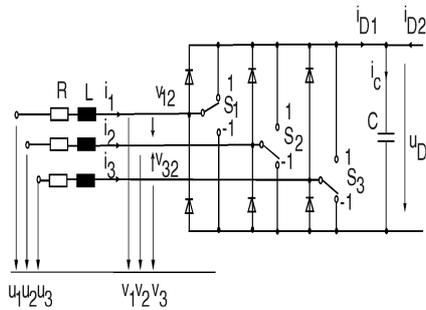


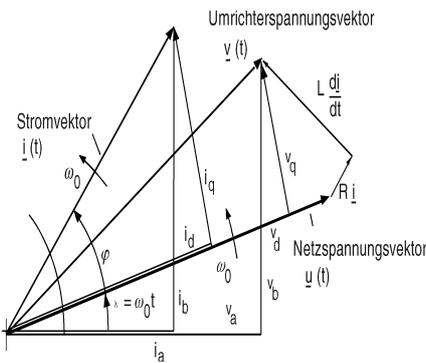
Abb. 10: Prinzip eines netzgekoppelten Photovoltaik - Generators

### 3 Mikroelektronische Regelung eines Umrichters, am Beispiel eines Photovoltaik-Wandlers mit Blindstromkompensation

Die Regelung des netzseitigen Umrichters in Abb. 10 sei nunmehr im Detail betrachtet. Abb. 11 zeigt die idealisierte Schalteranordnung mit genau acht möglichen Zuständen, darunter zwei, wo alle Schalter an die obere oder untere Gleichstromsammelschiene gelegt sind und die Netzimpedanz auf der Umrichterseite kurzschließen. Mit  $a = e^{j2\pi/3}$ ,  $\omega_0 t = \lambda$  und dem Effektivwert  $U$  der sinusförmigen Netzspannung ist der Augenblickswert des Netzspannungsvektors



**Abb. 11: Schaltermodell des Umrichters**



**Abb. 12: Vektordiagramm des Umrichters**

Blindstrom-Sollwert durch einen übergeordneten Netzspannungs-Regler vorgegeben werden kann. Der Strom  $i_{D1}$  im Zwischenkreis folgt mit der Nebenbedingung  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$  aus den Netzströmen und dem Schaltzustand des Umrichters  $i_{DL} = S_1 i_1 + S_2 i_2 + S_3 i_3 = 1/3 [ (2 S_1 - S_2 - S_3) i_a + \sqrt{3} (S_2 - S_3) i_b ]$ ; entsprechendes gilt für die Spannung am Eingang des Umrichters  $\underline{v} = u_D/2 [ S_1 + a S_2 + a^2 S_3 ] = u_D/4 [ 2 S_1 - S_2 - S_3 ] + j \sqrt{3} (S_2 - S_3) = v_a + j v_b$ . Damit entsteht das Blockschaltbild 13 des Netzspannungs – koordinatengeregelten Umrichters.

$\underline{u}(t) = u_1 + a u_2 + a^2 u_3 = u_a + j u_b = 3\sqrt{2}/2 U e^{j\lambda}$   
 und entsprechend der Vektor der geschalteten Spannungen am Umrichtereingang

$$\underline{v}(t) = v_1 + a v_2 + a^2 v_3 = v_a + j v_b.$$

Die gleiche Definition gilt für den netzseitigen Strom im Verbraucher-Zählpeilsystem,

$$\underline{i}(t) = i_1 + a i_2 + a^2 i_3 = i_a + j i_b$$

Damit lautet die vektorielle Spannungsgleichung für die gewöhnlich durch einen Transformator gebildete Netzimpedanz

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \underline{u} - \underline{v}.$$

Multiplikation mit  $e^{-j\lambda}$  bewirkt die Transformation in ein mit  $\underline{u}(t)$  umlaufendes Koordinatensystem und liefert

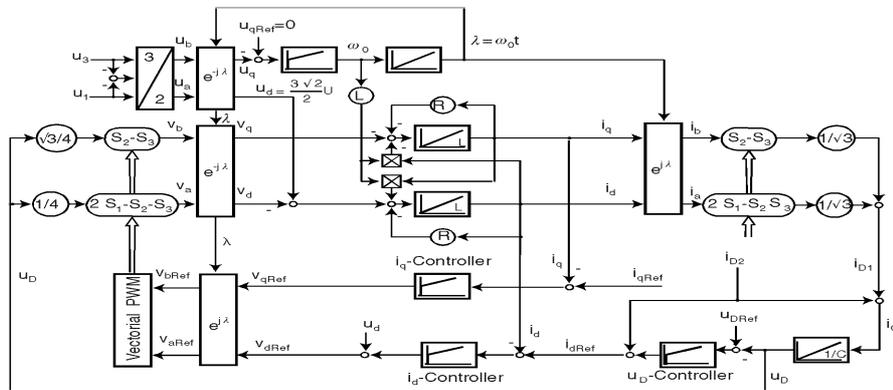
$$\underline{v} e^{-j\lambda} = v_d + j v_q, \quad \underline{i} e^{-j\lambda} = i_d + j i_q$$

ein Modell in Netzspannungs-Koordinaten

$$L di_d/dt + Ri_d = 3\sqrt{2}/2 U - v_d + \omega_0 L i_q$$

$$L di_q/dt + Ri_q = -v_q - \omega_0 L i_d, \text{ entsprechend dem Vektordiagramm, Abb. 12.}$$

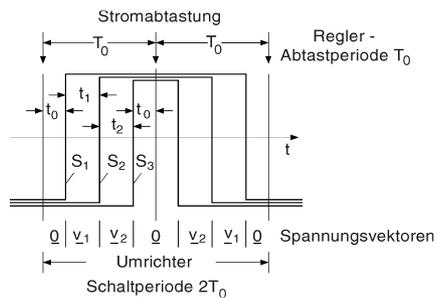
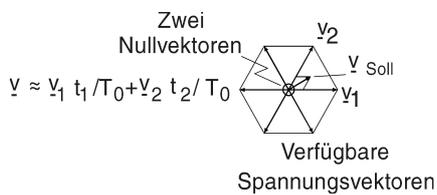
Die Regelung des Umrichters erfolgt am einfachsten in diesem rotierenden Koordinatensystem über die (stationär zeitlich konstanten) Wirk- und Blindstromkomponenten des Netzstromvektors. Der Wirkstromregelung ist dabei eine Regelung für die Zwischenkreisspannung zu überlagern, um einen verlustarmen Betrieb des Umrichters zu ermöglichen, während der



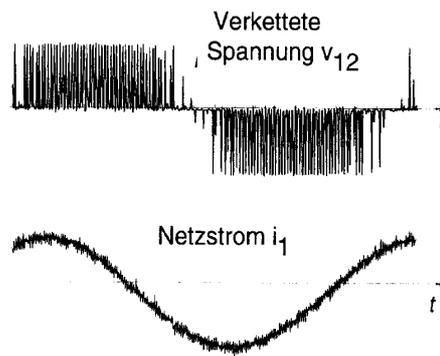
**Abb. 13: Blockschaltbild des in Netzspannungs – koordinaten geregelten Umrichters**

Die vektorielle Pulsweiten-Modulation des Umrichters ist eine besonders systematische Methode, um, wie in Abb. 14a vereinfacht gezeigt, die von den Stromreglern berechneten vektoriellen Sollspannungen  $V_{asoll}$ ,  $V_{bsoll}$  unmittelbar in der Schalt-Zustandsebene des Umrichters in die Schaltsignale  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  für den Umrichter umzurechnen; die

Schaltfrequenz des Umrichters ist dabei mit der Abtastfrequenz der digitalen Regler synchronisiert. Bei den heute vorkommenden Solargeneratoren mit Leistungen von unter 1 kW bis zu einigen hundert kW und bei



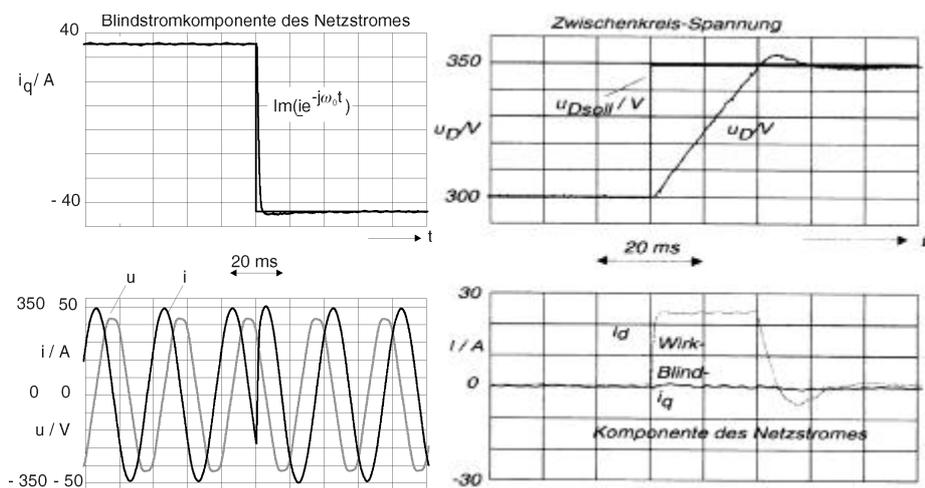
**Abb.14: Vektorielle Pulsweiten-modulation**



**Abb. 15: Gemessene Spannungen Und Ströme am Umrichter (Messung Klassen)**

Verwendung von IGBT-Schaltern sind Frequenzen von einigen kHz erreichbar. In Abb. 15 sind gemessene typische Verläufe einer pulsweitenmodulierten Spannung und eines Stromes am Umrichtereingang dargestellt; aus Genauigkeitsgründen muß praktisch die Fläche jedes einzelnen Spannungsimpulses berücksichtigt werden.

In Abb. 16 sind abschließend einige an einer 20 kW Laboranlage gemessene Sprungantworten mit der in Abb. 13 dargestellten Regelung gezeigt, wobei im einen Fall (a) der zeitliche Verlauf eines netzseitigen Blindstromes, im anderen (b) eine Änderung der Zwischenkreisspannung über die netzseitige Wirkstromkomponente dargestellt ist. Die Schaltfrequenz des IGBT- Umrichters ist 4 kHz, die dazu synchrone Abtastfrequenz der Regler 8 kHz. Wie die Messungen zeigen, sind die Regelgrößen gut gedämpft, die Ströme erreichen nach wenigen Millisekunden ihre neuen stationären Werte, die Regelung erfolgt dabei mit einem Signalprozessor.



**Abb. 16: Messergebnisse an netzseitigem IGBT – Umrichter (Messung Heller)**  
**a) Umsteuerung des Blindstromes**      **b) Änderung der Zwischenkreis-Spannung**

#### 4 Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß eine flächendeckende elektrische Energieversorgung auch bei stärkerer Nutzung dezentraler Energiequellen nur mit einem durch leistungselektronische Schnittstellen ergänzten Drehstromsystem möglich ist, da, abgesehen vom Vorhandensein der Anlagen und der verfügbaren Technologie, nur dieses - definierte Betriebsbedingungen dank last- und ortsunabhängiger Spannungsform,



- natürliche Stabilität bei beliebiger flächenmäßiger Ausdehnung und  
- die Möglichkeit einer lokal und regional koordinierten Lastverteilung  
bietet. Die Mittel der Leistungselektronik gestatten die effektive Nutzung auch solcher  
Energiequellen, die zunächst nur ungesteuerten und schwankenden Gleichstrom (Photo-  
voltaik) oder Drehstrom veränderlicher Frequenz (Wind) liefern. Schutz und Be-  
triebsführung im Sinne optimaler Energiegewinnung erfordern allerdings hochentwickelte  
Regelverfahren, die sich nur digital durch Mikroelektronik verwirklichen lassen.  
Am Beispiel eines Photovoltaik-Wandlers mit geregelter Netzeinspeisung ist dies illu-  
striert.

## 5 Schrifttum

- /HELLER 1998/ M. Heller; Die doppelt gespeiste Drehstrommaschine für dreh-  
zahlvariable Pumpspeicherkraftwerke, Dissertation TU Braun-  
schweig 1998
- /KRANENBURG 1995/ R. Kranenburg, H. Klaassen, G. Torri, E. Gatti; High Perfor-  
mance  
Inductionmachine drive from a flying shear, Proceedings  
EPE'95, Sevilla 1995
- /LEONHARD 1997/ W. Leonhard; Control of electrical drives, 2nd ed., Springer  
Verlag 1997



## **Computer simulations of the power supply and the protection system for the superconducting coils of the fusion reactor**

Dr.-Ing. Lutz Zacharias  
SIMEC GmbH & Co. KG  
Blankenauer Straße 74  
09113 Chemnitz  
Tel.: (0371) 450-3450, Fax: (0371) 450-3466  
email: zacharia@simec.com  
www.simec.com

Prof. A. Wieczorek  
FH Regensburg  
FB Elektrotechnik  
93025 Regensburg

### **1 Abstract**

The goal of HELIAS fusion power plant, developed at Max-Planck-Institut für Plasmaphysik is to deliver electric power in the range of about 1 GW to the grid. The magnetic confinement system consists of fifty superconducting coils, arranged in five toroidal periods. These five coil groups, each of them consisting of ten coils connected in series, are magnetically coupled to each other.

The power supply is to provide coil charge before the beginning and discharge at the end of operation and to stabilise current at a specified level during the energy production. For this purpose twelve-pulse AC/DC converters are foreseen.

The purpose of the safety system is the protection of the coils in case of faults. The stored magnetic energy of about 110 GJ must be sure transfer to a set of dump resistors.

The computer simulations of the power supply and the protection system for this reactor have been done with the SIMPLORER code. It has been possible to study the design of the whole system with a real model of the twelve pulse thyristor power supplies and to simulate the different kinds of faults that may occur in the confinement system and in the power supply units.



## 2 Summary

For more than three decades, world-wide efforts have been made to investigate the fusion of the hydrogen isotopes deuterium and tritium for energy production. A number of principles are available for the experimental devices serving this purpose. One of the most favourable is the toroidal confinement of the reaction components, called plasma, a gas which is heated to several tens of millions of degrees centigrade and confined in a vacuum chamber in the field of huge magnets. The goal of HELIAS fusion power plant, developed at Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching (Germany) in a long phase of analytic and numerical studies, is to deliver electric power in the range of about 1 GW to the grid. The magnetic confinement system consists of fifty nonplanar coils, modularly arranged in five toroidal periods and generates the field configuration. Due to the steady-state plasma operation the superconducting coils will be used (fig. 1).

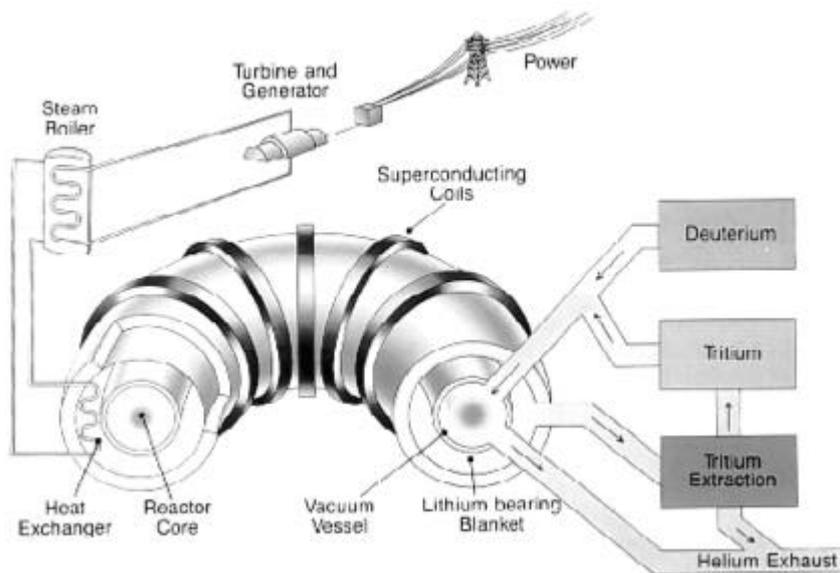


Figure 1: Fusion Power Plant

The electric circuit of the reactor comprises five superconducting coil groups, each consisting of ten coils electrically connected in series. These coil groups are magnetically coupled by the toroidal mutual reactance.

The inductance matrix  $L_{\text{HELIAS}}$  (in H), dim 5 x 5, describes the whole system.

$$L_{\text{HELIAS}} = \begin{bmatrix} 19,48 & 5,94 & 2,46 & 1,17 & 0,79 \\ & 15,81 & 4,48 & 1,78 & 1,03 \\ & & 15,38 & 4,00 & 1,83 \\ & & & 15,54 & 4,40 \\ & & & & 18,32 \end{bmatrix}$$

The magnetic energy  $W_m$  stored in the coil system of HELIAS is:

$$W_m = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T L_{\text{HELIAS}} \mathbf{i},$$

where  $\mathbf{i}^T = [i_1, i_2, i_3, i_4, i_5]$  is the 5-dimensional vector of the coil currents.

These five coil systems will be powered individually by five power supplies of the thyristor type (figure 2). The function of the power supplies is to provide the necessary time variations of the HELIAS magnetic field, i.e. to charge the coils with a ramp rate of  $\leq 10$  A/s, to discharge them after the operation and to stabilise currents at a specified level during the energy production (steady-state operation).

The power supplies units must generate currents of up to 40 kA and positive and negative voltages (two-quadrant operation). For this purpose twelve-pulse AC/DC converters are projected. These converters enforce a non sinusoidal line current, whose harmonics are causing corresponding line voltage distortions. To evaluate the extent of these distortions, the reaction of the harmonic currents on the AC line, is investigated by numerical network analysis.

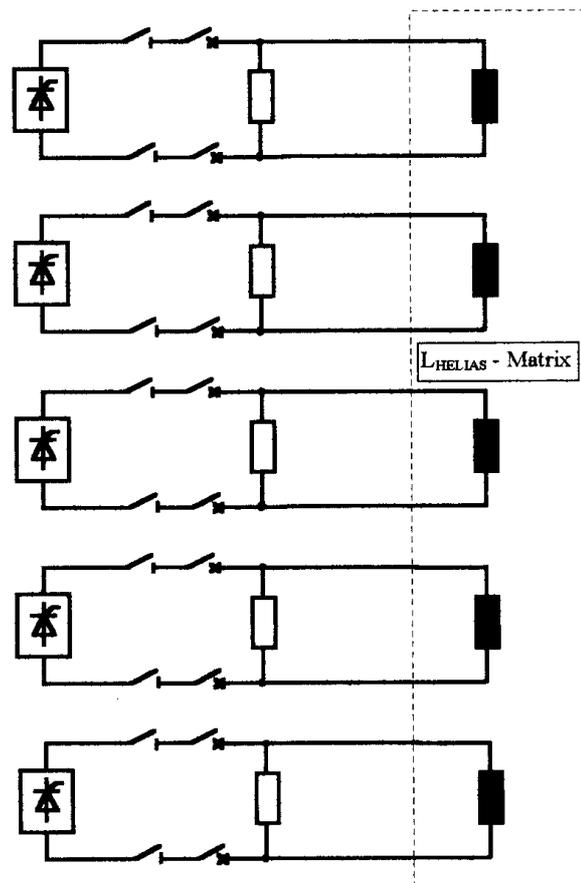


Figure 2: Electrical Scheme of HELIAS

A safety system, inserted between each power supply unit and the coil group (fig. 3), protects the superconducting coils in case of faults in the coils or in the power supply units. This system transfers the stored magnetic energy in the coils (max. 110 GJ) to a set of dump resistors. The dump resistor is composed of stainless-steel elements which, in the event of fault, absorb the magnetic energy stored in the magnets, thus heating up ( $\Delta\vartheta \approx 700^\circ\text{C}$ ). If this happens, a cooling interval is necessary.

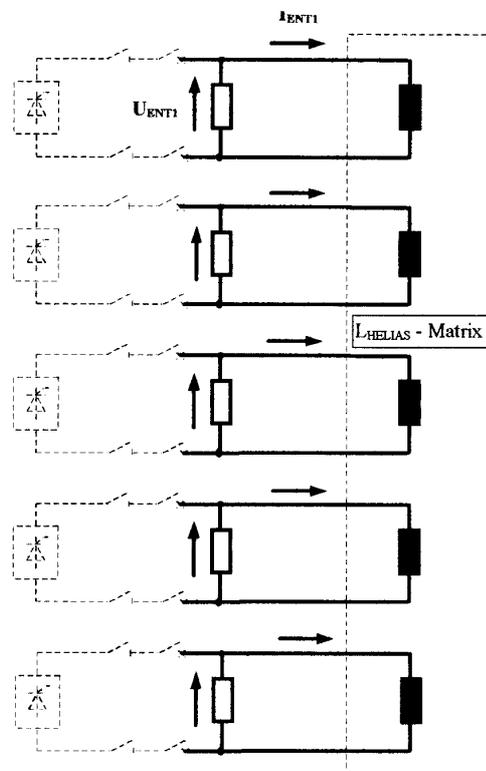


Figure 3: Quench Protection System



If a fault occurs in one of the superconducting magnet groups, the coil current must be lowered as fast as possible. Since the HELIAS coil systems are magnetically strongly coupled to each other, the dumping of current in only one magnetic group induces over-currents in the other groups, so that simultaneous dumping of currents in all systems is necessary.

After the fault detection, the coil-current is commutated from the superconducting circuit breaker to the dump resistor, thus causing a voltage ( $R_{dis} * I_{coil}$ ) to build up between the coil terminals which forces the coil current to decay with a time constant  $\tau$  of approx. 110 s.

The paper deals with the computer simulations of the power supply and protection system for HELIAS reactor. Investigation of the behaviour of the equivalent electric schemes for the machine circuits was conducted with real models of the twelve-pulse thyristor power supply with the SIMPLORER code, which was developed at SIMEC GmbH & Co KG, Chemnitz.

The design of the whole system could be studied through many computer simulations. The electrical circuit supplying the coil system has been modelled to enable modifications and enhancements to be analysed prior to installation. The goal of the investigation is an optimised magnet power supply especially for low losses in the components and low reactive power consumption from the grid.

Also it has been possible to simulate the different kinds of faults that may occur in the confinement system and power supply units. Particularly, the behaviour of the coil in case of quench must be studied carefully and the energy dissipated inside that coil will be limited to an acceptable level.

### 3 Results

Three examples of the simulations are shown in figures 4, 5 and 6 .

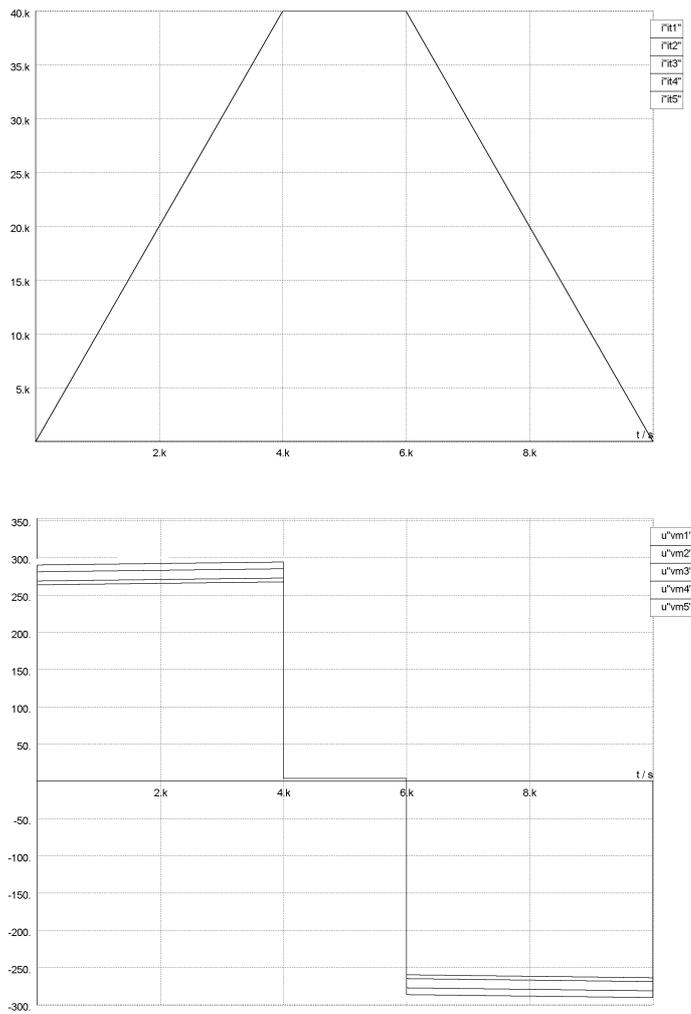
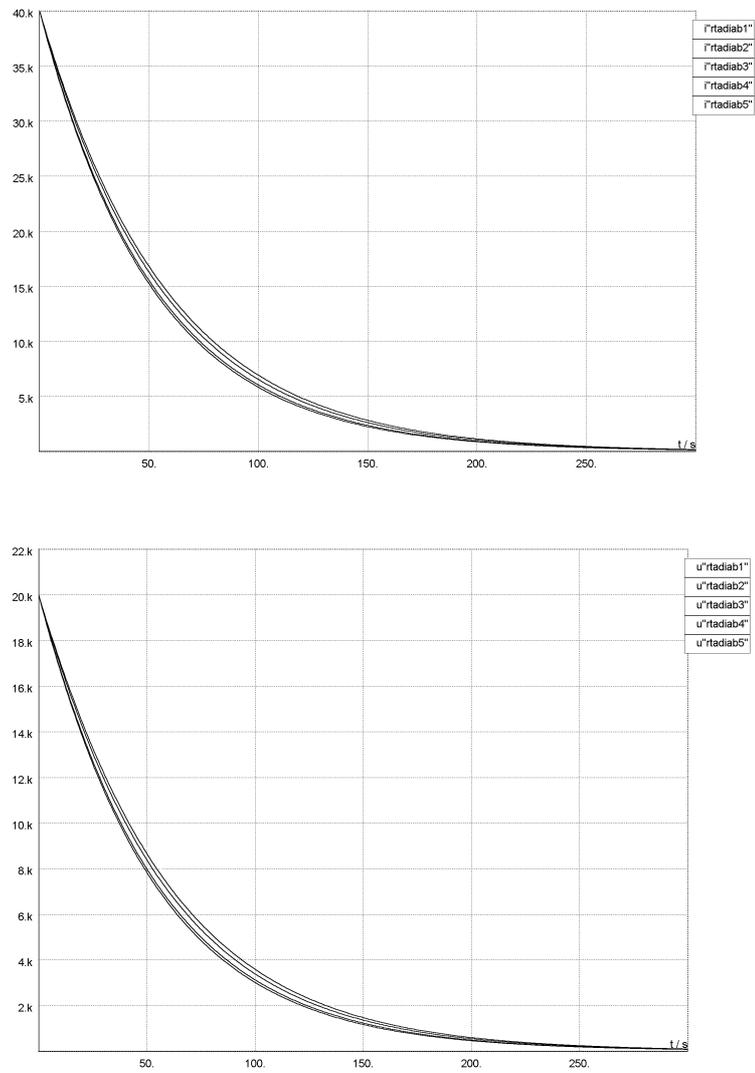
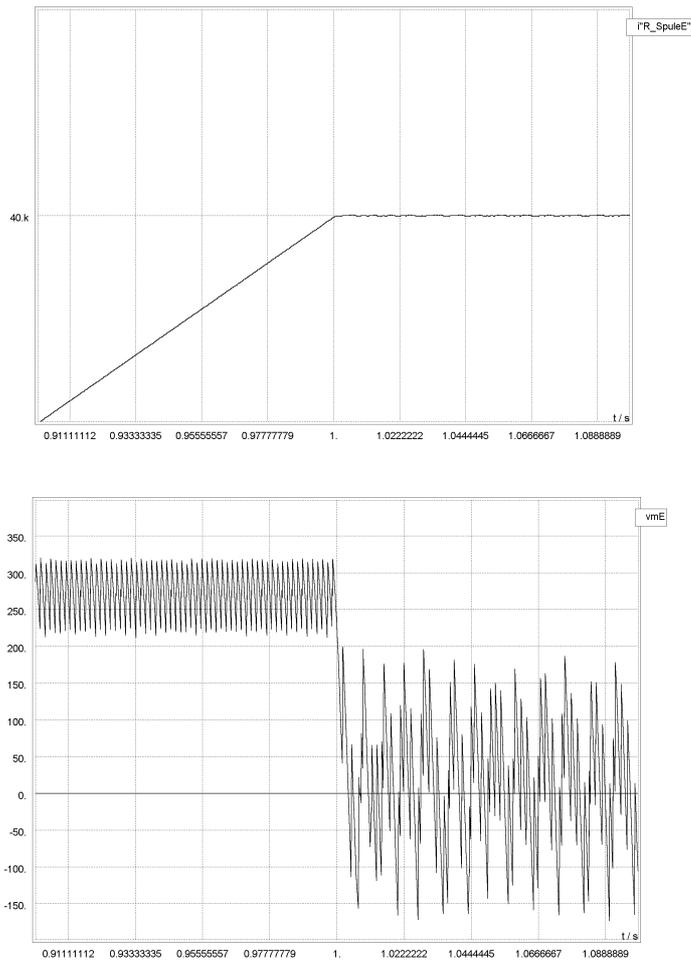


Figure 4: Currents and voltages in the powersupply of HELIAS with a real model of the twelve-pulse thyristor converter



**Figure 5: Currents and voltages in the power supply for HELIAS with a real model of the twelve-pulse thyristor converter**



**Figure 6: Quench protection system of HELIAS, voltages and currents in the coil system**



## **Rechnergestützter Regler-Entwurf für einen bidirektionalen DC/DC-Wandler**

Dipl.-Ing. A. Engler  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-222, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: aengler@iset.uni-kassel.de

### **1 Werkzeuge und Vorgehensweise bei der Simulation**

Dem Entwickler stehen heute zahlreiche Werkzeuge für das Design elektronischer Schaltungen oder elektrischer Systeme zur Verfügung. Im einfachsten Fall ermöglichen solche Werkzeuge die Überprüfung eines vorhandenen Designs, aber auch Auslegung und Dimensionierung (z. B. von Reglern) werden unterstützt.

In der Regel verfügen die Werkzeuge über eine grafische Eingabe, Bibliotheken und mehrere Ausgabemöglichkeiten (Bildschirm, Datei, Drucker). Für verschiedene Einsatzbereiche wie z. B. Schaltungsentwicklung, Leistungselektronik oder Reglerdimensionierung sind bestimmte Softwaretools zu bevorzugen. Jedoch in der Zeit immer leistungsfähigerer PCs werden diese Programme allgemeiner einsetzbar und mächtiger, so daß sich die Tools mit ihren Funktionen immer stärker überdecken.

In diesem Beitrag wird am Beispiel eines bidirektionalen DC/DC-Wandlers (Cuk-Wandler) gezeigt, wie eine Regelung mit Rechnerunterstützung entworfen und verifiziert werden kann. Dazu werden folgende Programme verwendet:

- C (Programmiersprache)
- SIMPLORER (Simec)
- PSPICE (MicroSim)
- MATLAB (Mathworks Inc.).

Natürlich sind nicht alle oben aufgeführten Programme für den Reglerentwurf notwendig, vielmehr soll gezeigt werden wie man mit Hilfe der Simulation einen Entwurf unterstützen kann.



Das Problem bei der Simulation getakteter Stromversorgungen ist das Vorhandensein sehr unterschiedlicher Zeitkonstanten, nämlich Millisekunden (Speicher und Filter) und Mikrosekunden (Taktung und Schaltflanken). Das führt zu sehr langen, eventuell nicht tragbaren Simulationszeiten oder sogar zu numerischen Fehlern /EDEL 1992/. Deshalb empfiehlt es sich, geeignete Modelle (z. B. State Space Averaging) der Schaltung her-zuleiten und mit ihnen den Reglerentwurf durchzuführen. Am Ende jedoch sollte der Entwurf mit einer Simulation verifiziert werden, bei der die spätere Implementation (ins-besondere die Taktung) nachvollzogen wird.

## 2 Der Cuk-Wandler

### 2.1 Allgemeines

Während seiner Arbeiten an der Universität in Pasadena/USA beschäftigte sich S. Cuk mit der Analyse und Modellierung von getakteten Stromversorgungen /CUK 1977/. Bei der Betrachtung der Reihenschaltung von hoch- und tiefsetzenden Konvertern ent-deckte er den Cuk-Wandler<sup>1</sup>. Dabei handelt es sich um einen *hoch- und tiefsetzenden bidirektionalen* DC/DC-Wandler, dessen Grundschaltung in Abb. 1 dargestellt ist. Er besteht aus je zwei Drosseln und Kondensatoren (System vierter Ordnung). Weiterhin werden noch zwei Schalttransistoren<sup>2</sup> benötigt. Diese werden komplementär geschaltet. In der Literatur wird der Cuk-Wandler aufgrund der wenigen benötigten Bauteile als "optimales System" bezeichnet. Durch geeignete Kopplung der magnetischen Bauteile kann der Schaltrippel des Stroms unterdrückt werden. Auch ohne magnetische Kopp-lung ist der Rippel im Ein- und Ausgang gering, da bedingt durch die Topologie jeweils eine Serieninduktivität vorhanden ist.

### 2.2 Der gesteuerte Betrieb

Wird der Cuk-Wandler mit einem Pulsweitenmodulator gesteuert, ergibt sich eine Gleichspannungsverstärkung in Abhängigkeit des Tastverhältnisses wie folgt:

$$U_{aus} = -U_{ein} \frac{D}{1-D} \quad \text{mit } D: T_{ein}/(T_{aus}+T_{ein}).$$

---

<sup>1</sup> Der Cuk-Wandler wurde 1980 patentiert (Patent ist aufgelaufen).

<sup>2</sup> Ersetzt man einen Schalter durch eine Diode, so ist nur ein unidirektionaler Energiefluß möglich.

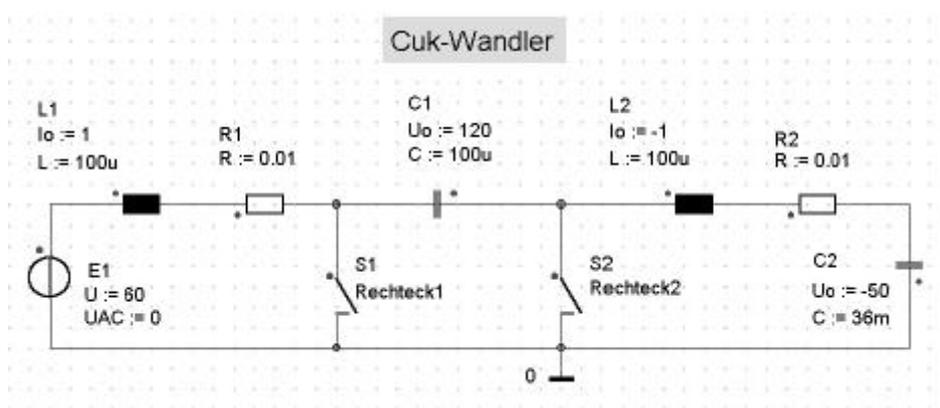


Abb. 1: Prinzip des Cuk-Wandlers (SIMPLORER Eingabe)

Die Spannungsabfälle innerhalb der Schaltung sind vernachlässigbar, d. h. die Ausgangsspannung bleibt unter Belastung weitgehend konstant. Inwieweit der gesteuerte Betrieb jedoch geeignet ist, soll im folgenden untersucht werden. Dazu wurde zunächst ein Pulsweitenmodulator und ein Abtastautomat für eine geglättete Bereitstellung von Strom- und Spannungswerten entworfen. Hierzu bot sich die Verwendung von Zustandsautomaten (Petri-Netze) an (s. Abb. 2). Ziel ist eine quasi digitale Modellierung, die Rückschlüsse auf eine spätere Implementation des Algorithmus auf einem Mikro-Controller zulässt. Der "Takt" der Steuerung wird durch die Frequenz des DREIECKSsignals bestimmt. Die Abtastzeitpunkte für Strom und Spannung sind so gewählt, daß man einen geglätteten<sup>3</sup> Mittelwert erhält, der unverzögert ist. Außerdem ist die Abtastung (Abb. 2; Z11\_7) - sie erfolgt nur einmal während einer Periode des Dreiecksignals - zur PWM und Steuerung (Regelung) synchronisiert. Die "abgetasteten" Werte bleiben so bis zur nächsten Abtastung konstant, sind also quasi zeitdiskret<sup>4</sup>. Die PWM wird in bekannter Weise mit einem Dreieckvergleich durchgeführt - hier mit dem Wert 0, so daß sich ein Tastverhältnis von  $D = 0.5$  einstellt. Mit den in Abb. 2 erzeugten Ansteuersignalen (Rechteck 1,2) wird der Cuk-Wandler (s. Abb. 1) angesteuert. Zusätzlich wird er mit einem rechteckförmigen Laststrom beaufschlagt, um Rückschlüsse auf sein Verhalten ziehen zu können.

<sup>3</sup> Der Schaltrippel wird eliminiert!

<sup>4</sup> Die Verwendung von "discrete-Blöcken" erlaubt eine zusätzliche Amplitudendiskretisierung.

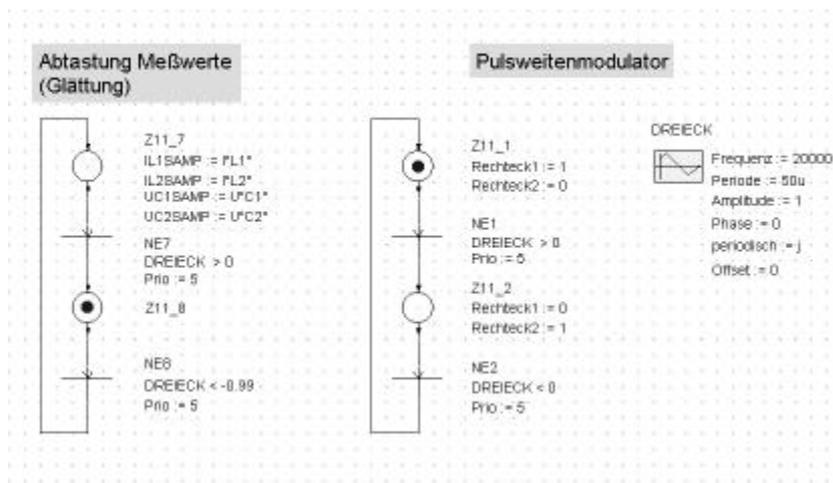


Abb. 2: Pulsweitenmodulator (SIMPLORER)

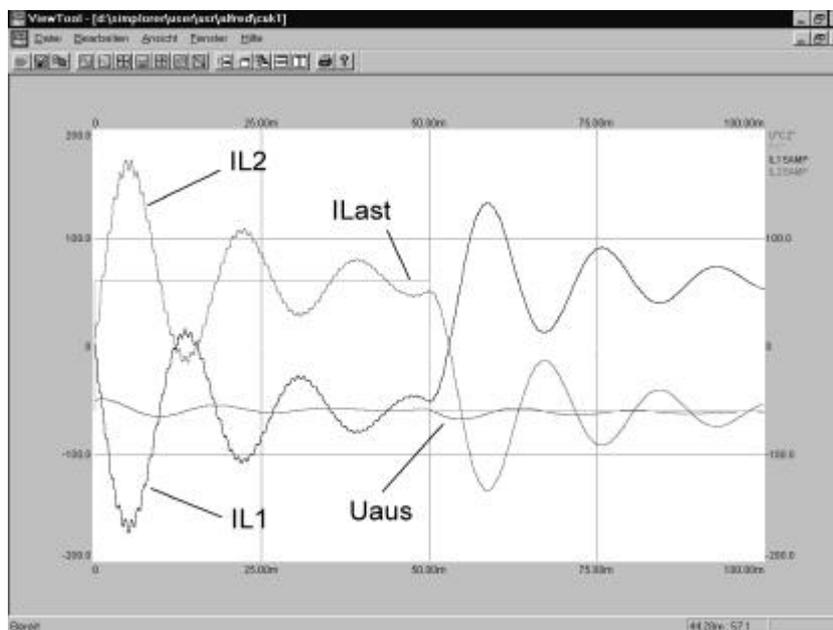


Abb. 3: Sprungantwort des Cuk-Wandlers



Wird der Cuk-Wandler gesteuert betrieben so neigen die Ströme (IL1samp, IL2samp) zu schwach gedämpften Schwingungen (s. Abb. 3). Dies ist auf die Dominanz von reaktiven Bauelementen in der Schaltung zurückzuführen. Ohmsche Anteile sind kaum enthalten, was für einen hohen Wirkungsgrad des Konverters eine Voraussetzung ist. Die geringe Dämpfung der Schaltung macht den Entwurf einer Regelung notwendig.

In den zwei folgenden Plots (Abb. 4, Abb. 5) wird die mit SIMPLORER simulierte Schaltung und eine Messung gegenübergestellt. Dabei wird bei der entladenen Schaltung die PWM sprunghaft von 0 auf 25 % gesteuert. Es soll gezeigt werden, wie aussagekräftig die Simulation ist. Um die Messung am Versuchsaufbau und die Simulation vergleichbar zu machen, wurden die ohmschen Widerstände der Simulation an den Wirkungsgrad der Versuchsschaltung angepaßt. Die Verläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung. Das größere Schwingen der Spannung an der Koppelkapazität (UC1) ist darin begründet, daß die Verluste in der Simulation konzentriert (in L1, L2) angenommen wurden.

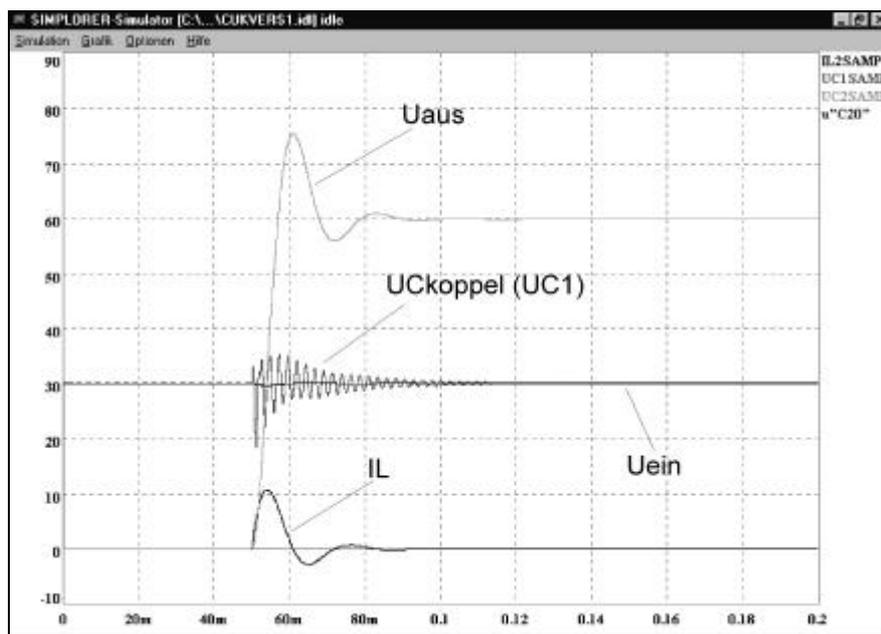


Abb. 4: Simulierter Einschaltspung (Simplorer)

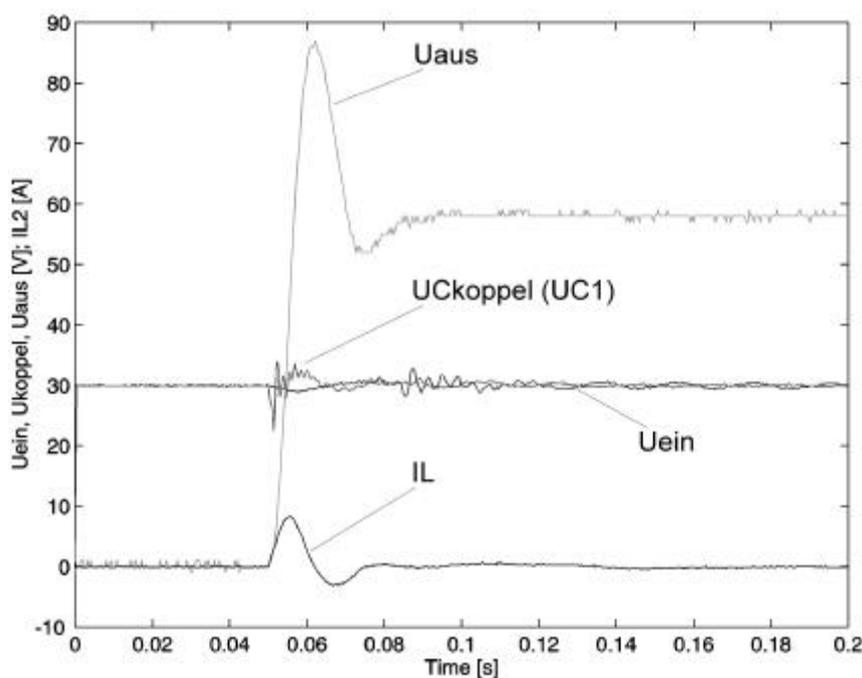


Abb. 5: Gemessener Einschaltsprung (PWM 0 -> 25 %)

Grundsätzlich ist an dieser Stelle anzumerken, daß bei der Simulation insbesondere auf die Einstellung der Integrationsparameter (Verfahren, Integrationsschrittweite) geachtet werden muß, da Fehleinstellungen zu falschen Ergebnissen führen. Deshalb müssen die Ergebnisse auch immer einer kritischen Prüfung unterzogen werden.

### 3 State-space Averaging

Die Grundidee dieses Verfahrens ist - wie der Name sagt -, die zu beschreibende Schaltung in die zwei durch die Schaltzustände bestimmten Teilsysteme zu zerlegen und entsprechend dem eingestellten Tastverhältnis zu gewichten.

#### 3.1 Anwendung auf den Cuk-Wandler

Abb. 6 zeigt die beim Cuk-Wandler abhängig von der Schalterstellung entstehenden Teilsysteme.

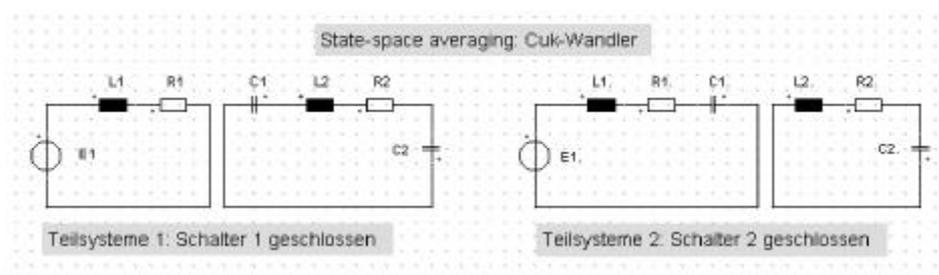


Abb. 6: State-space Averaging; Anwendung auf den Cuk-Wandler im Leerlauf

Ziel des State Space Averaging ist die Beschreibung der Schaltung in der Zustandsdarstellung :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx}$$

mit  $\mathbf{x}$ : Zustandsvektor,  $\mathbf{y}$ : Ausgangsvektor,  $\mathbf{u}$ : Steuervektor,  
 $\mathbf{A}$ : Systemmatrix,  $\mathbf{B}$ : Steuermatrix,  $\mathbf{C}$ : Ausgangsmatrix.

Die Beschreibung erfolgt für den Leerlauf, da hier aufgrund der geringen Dämpfung die größten Schwierigkeiten für die Auslegung einer Regelung zu erwarten sind. Zunächst müssen die Gleichungen der beiden Teilsysteme 1 und 2 entsprechend der Abb. 6 aufgestellt werden:

$$A1 = \begin{bmatrix} -R1/L1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R2/L2 & -1/L2 & -1/L2 \\ 0 & 1/C1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/C2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} -R1/L1 & 0 & -1/L1 & 0 \\ 0 & -R2/L2 & 0 & -1/L2 \\ 1/C1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/C2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad x = \begin{bmatrix} IL1 \\ IL2 \\ UC1 \\ UC2 \end{bmatrix} \quad u = [Ubatt].$$

Das oben aufgestellte Gleichungssystem beschreibt den Cuk-Wandler bei Anregung durch die Eingangsspannung (E1). Als Ausgangsgröße wurde lediglich die Spannung der Ausgangskapazität (UC2) gewählt. Die Steuermatrix B und die Ausgangsmatrix C unterscheiden sich für die Teilsysteme nicht und wurden deshalb nicht getrennt aufgeschlüsselt. Um zur endgültigen Form der Zustandsdarstellung zu gelangen, werden die Teilmatrizen - hier A1 und A2 - entsprechend dem Tastverhältnis<sup>5</sup> D gewichtet (*State-space averaging*):

$$\mathbf{A} = \mathbf{A1} * D + \mathbf{A2} * (1 - D)$$

Das so hergeleitete Modell ist für konstantes Tastverhältnis und Eingangsspannung linear. Die Taktung der Schaltung ist eliminiert. Aus der Zustandsbeschreibung kann direkt ein regelungstechnisches ESB abgeleitet werden (Abb. 7).

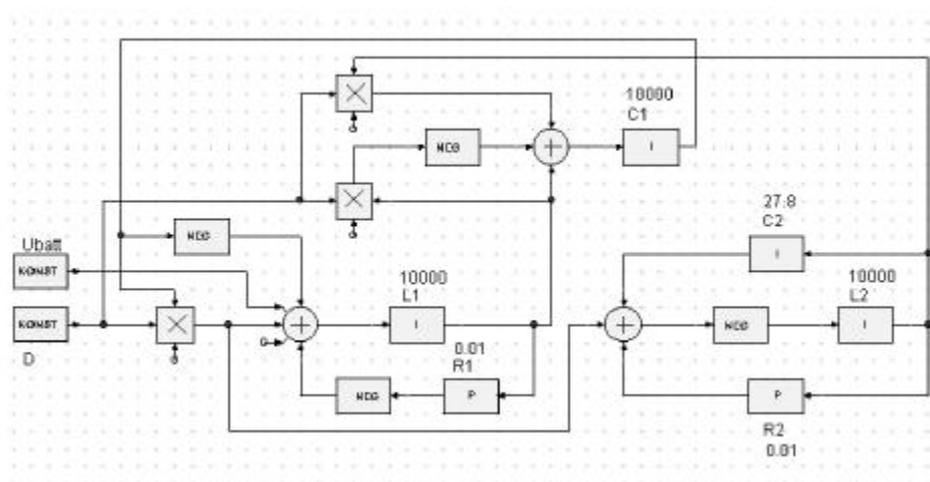


Abb. 7: Regelungstechnische Darstellung des Cuk-Wandlers (SIMPLORER)

Die Herleitung der Steuermatrix B für die Variation des Tastverhältnisses D (Kleinsignalverhalten) ist nicht so offensichtlich. An dieser Stelle soll deshalb lediglich auf /CUK 1977/ verwiesen werden.

<sup>5</sup> Achtung: D beschreibt hier das Tastverhältnis und nicht - wie in der Zustandsdarstellung üblich - die Durchgangsmatrix!



### 3.2 Übertragungsfunktion des Cuk-Wandlers

Das in Matrizenform vorliegende Modell ohne Taktung vereinfacht die Analyse erheblich, da sie direkt mit einer relativ großen Schrittweite erfolgen kann. Die untenstehende Übertragungsfunktion PWM/Ausgangsspannung (Abb. 8) wurde mit Hilfe von *Matlab* (Mathworks Inc.) errechnet (Schaltung aus Abb. 2 mit  $D=0.6$ ). Die Phasenverschiebung von  $180^\circ$  bei niedrigen Frequenzen ist auf die Umkehr von Ein- und Ausgangsspannung zurückzuführen. Die Übertragungsfunktion enthält zwei konjugiert komplexe Polstellen und eine konjugiert komplexe Nullstelle. Grundsätzlich hätte die Analyse des Frequenzganges auch mit dem *SIMPLORER*-Tool *Experimenteller Frequenzgang* bei der getakteten Schaltung oder mit der regelungstechnischen Beschreibung durchgeführt werden können.

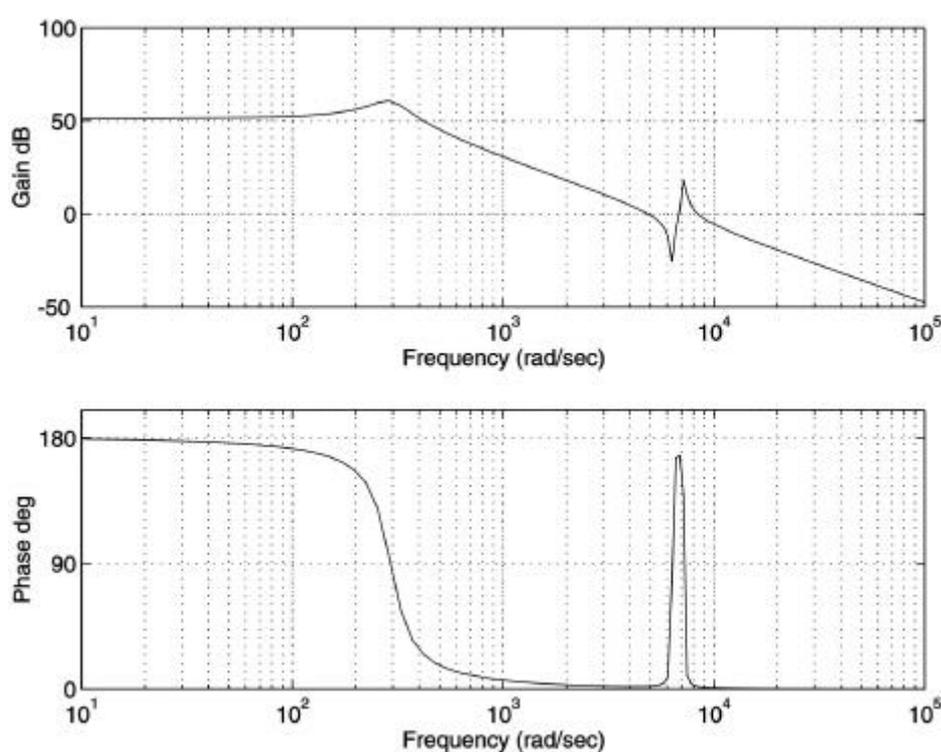


Abb. 8: Übertragungsfunktion Cuk-Wandler (PWM- $U_{\text{aus}}$ ; MATLAB)

### 3.3 Verwendung von Ersatzstrom- und Spannungsquellen zur Beschreibung

Im vorangehenden Kapitel wurde der Cuk-Wandler mit seinen Differentialgleichungen beschrieben und daraus ein regelungstechnisches ESB mit eliminierter Taktung abgeleitet (State-space averaging).

In /CUK 1977/, /EDEL 1992/, /GIESELMANN 1997/ wird auch die Möglichkeit ausgeführt, ein elektrisches ESB mit gesteuerten Strom- und Spannungsquellen herzuleiten. So kann z. B. die Sekundärseite des Cuk-Wandlers prinzipiell wie in Abb. 9 dargestellt werden.

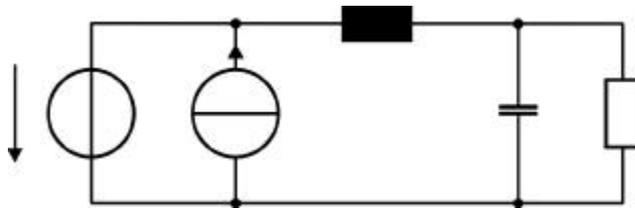


Abb. 9: Cuk-Wandler mit ersetzten Schaltern; Prinzip Sekundärseite

Dabei gilt für die Spannungsquelle:

$$U = -U_{CKoppel} * D$$

und für die Stromquelle

$$I = I(\text{Spannungsquelle}) * D$$

mit D: Tastverhältnis.

$I(\text{Spannungsquelle})$  entspricht der Summe von  $I_{L1}$  und  $I_{L2}$  (Abb. 1). In dem Beitrag von M. Giesselmann /GIESELMANN 1997/ für das EPE-Tutorial'97 wurde das oben skizzierte Verfahren mit Hilfe des Simulationstools PSPICE umgesetzt (Abb. 10). Dabei wurde der Cuk-Wandler als diskrete Schaltung und mit Strom- u. Spannungsquellen eingegeben. Abb. 11 (ein Subsheet) zeigt das „averaged Switch Model“, mit dessen Hilfe die Taktung eliminiert wird. So ist ein direkter Vergleich der Modelle mit einer Simulation möglich. Ein Simulationsergebnis ist in Abb. 12 dargestellt. Die Verläufe des Eingangsstroms, der Spannung der Koppelkapazität und die Ausgangsspannung verlaufen für beide Modelle identisch. Natürlich sind den Verläufen der getakteten Schaltung die typischen Dreieckanteile überlagert.

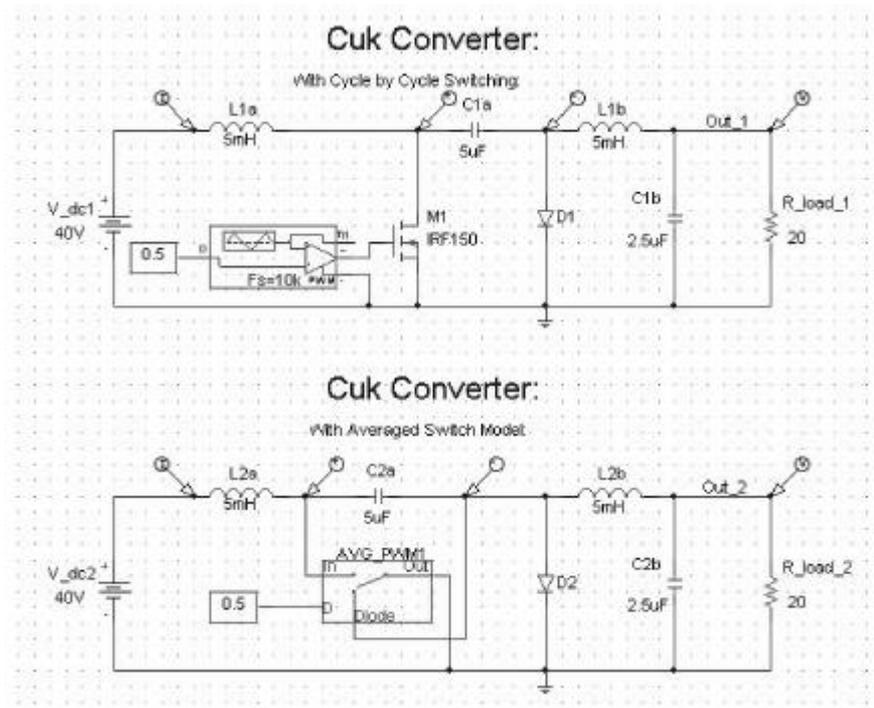


Abb. 10: Vergleich geschaltetes Modell, Linearisierung (PSPICE, aus /GIESELMANN 1997/)

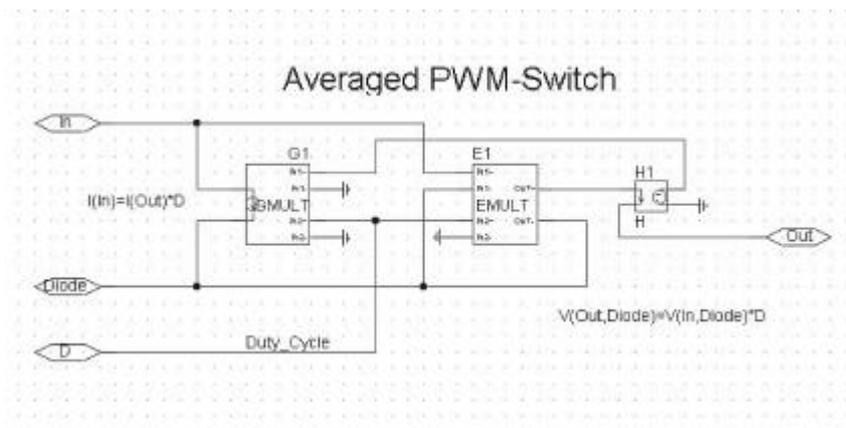


Abb. 11: Linearisierung des Cuk-Wandlers mit PSPICE (aus /GIESELMANN 1997/)

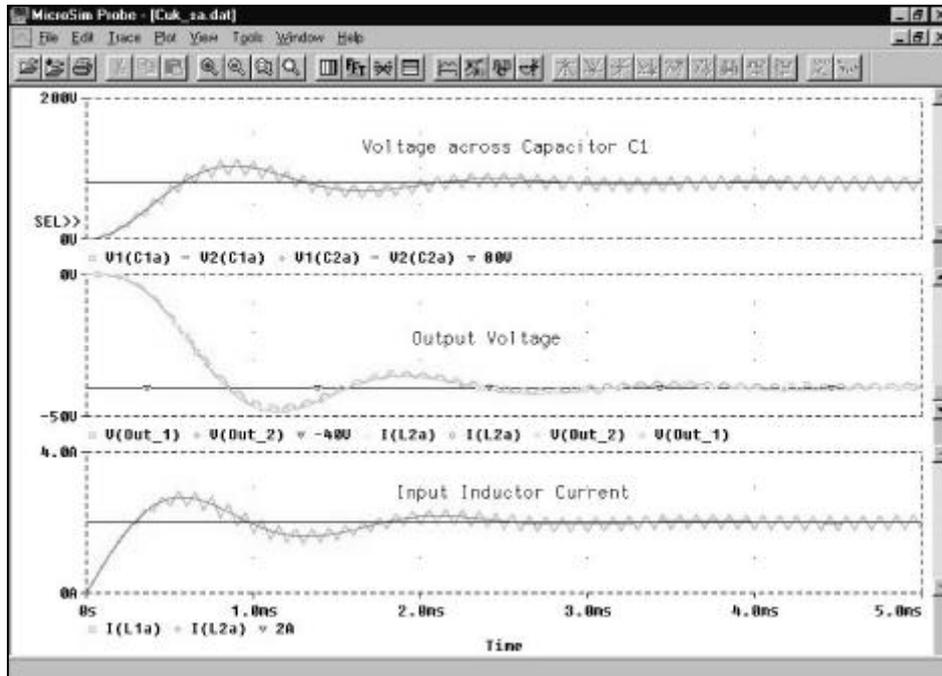


Abb. 12: Einschwingvorgang Cuk-Wandler (MsimProbe-Ausgabe; aus /GIESELMANN 1997/)

#### 4 Simulation des Cuk-Wandlers mit C

Die Motivation trotz leistungsfähiger Tools eine Simulation zu programmieren kann vor allem drei Gründe haben:

- Geschwindigkeitsvorteil
- Flexibilität (hardwarenahe Simulation)
- Exportierbarer Softwarecode.

Diese Vorgehensweise kann nur dann empfohlen werden, wenn ein überschaubares System mit einer begrenzten Anzahl von Zustandsgrößen vorliegt. Die Motivation einer C-Implementation im vorliegenden Fall war die Berücksichtigung eines prozessorspezi-



fischen Timings. Da einzelne Schaltvorgänge betrachtet werden sollen, wurde das State-space Averaging nicht angewendet.

Kern einer Simulation ist das Integrieren der systembeschreibenden Differentialgleichungen. Diese sind im folgenden dargestellt (Ausschnitt aus Quellcode):

```
void
calc_derivatives( double x[],
                  double k[] )
{
  if (Switch1 == 1) /* switch 1 closed */
  {
    k[0] = (Ubatt - Non_St_s.Ur1) / L_1;      /* d il1 / dt */
    k[1] = (- Non_St_s.Ur2 - x[2] - x[3]) / L_2; /* d il2 / dt */
    k[2] = x[1] / C_1;                       /* d uc1 / dt */
    k[3] = (x[1] - Iload) / C_2;             /* d uc2 / dt */
  };

  if (Switch2 == 1) /* switch 2 closed */
  {
    k[0] = (Ubatt - x[2] - Non_St_s.Ur1) / L_1; /* d il1 / dt */
    k[1] = (-Non_St_s.Ur2 - x[3]) / L_2;      /* d il2 / dt */
    k[2] = x[0] / C_1;                       /* d uc1 / dt */
    k[3] = (x[1] - Iload) / C_2;             /* d uc2 / dt */
  };

  if ((Switch1 != 1) && (Switch2 != 1)) /* no switch closed */
  {
    k[0] = (Ubatt - x[2] - x[3]
            - Non_St_s.Ur1 - Non_St_s.Ur2) / (L_1 + L_2); /* d il1 / dt */
    k[1] = k[0]; /* d il2 / dt */
    k[2] = x[0] / C_1; /* d uc1 / dt */
    k[3] = (x[0] - Iload) / C_2; /* d uc2 / dt */
  };
} /* calc_derivatives */
```

**Abb. 13: Listing der Differentialgleichungen (C-Code)**

Wie man dem obenstehenden Listing entnehmen kann werden der Funktion die Zustandsgrößen  $x[ ]$  übergeben und damit deren zeitliche Ableitungen berechnet. Die Werte  $k[ ]$  werden anschließend einer Integrationsfunktion übergeben, die die neuen Zustände errechnet. Dies könnte im einfachsten Fall eine *Euler-Integration* sein:

$$x(n+1) = x(n) + h * k(n)$$

mit  $h$ : Integrationsschrittweite und  $t = n * h$ .

Aufgrund der Taktung des Cuk-Wandlers liegen drei verschiedene Topologien vor, für die eine Fallunterscheidung getroffen wird:

- Schalter 1 geschlossen oder Freilauf (Schalter 2)
- Schalter 2 geschlossen oder Freilauf (Schalter 1)
- kein Schalter angesteuert / kein Freilauf.

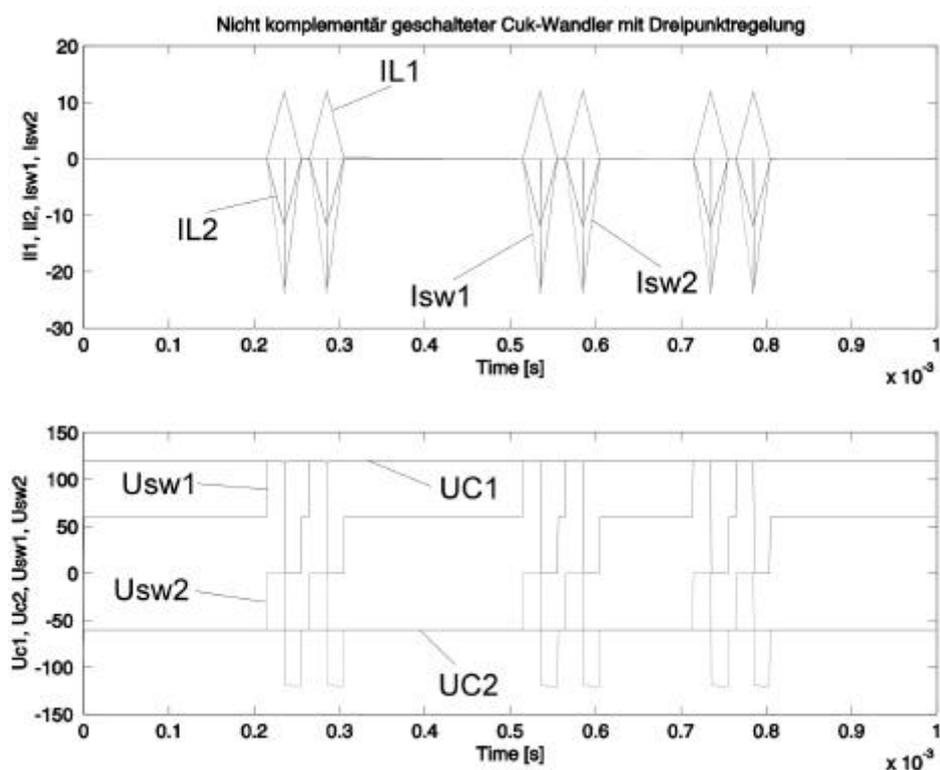


Abb. 14: Ausgabe der C-Simulation; nicht komplementäre Taktung

Die Ergebnisse aus Abb. 14 zeigen den Cuk-Wandler mit Dreipunktregelung. Hierbei wurden die Differentialgleichungen mit dem Runge-Kutta Verfahren 4. Ordnung gelöst.



Die Doppelimpulse entsprechen der prozessorspezifischen Implementation der Versuchsschaltung.

## 5 Current-mode Regelung

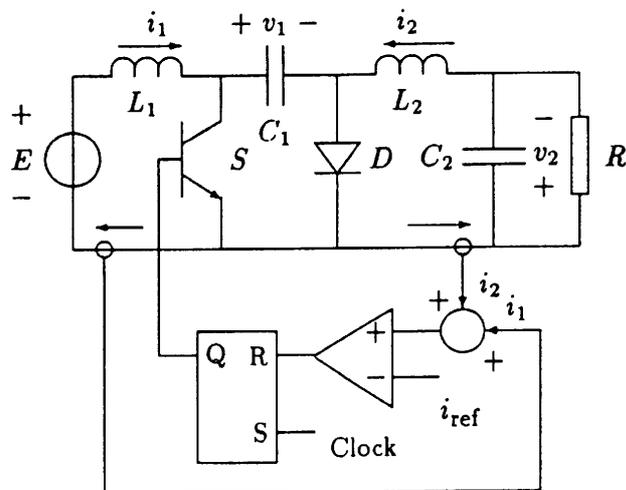


Abb. 15: Current-mode Regelung (aus /TSE 1995/)

Eine sehr verbreitete und pragmatische Methode getaktete Stromversorgungen zu regeln, ist die sogenannte Current-mode-Regelung (s. Abb. 15). Dabei wird der Strom in den Drosseln mit Hilfe einer (synchronisierten) Zweipunktregelung schnell eingeregelt. Hierfür werden meistens spezielle Schaltkreise (z. B. CS3842) eingesetzt. Die Verzögerungen durch die Induktivitäten werden so eliminiert und überlagerte Spannungsregelungen vereinfacht. Eine Current-mode-Regelung ist aber nicht immer unproblematisch. Bei Tastverhältnissen  $> 0.5$  treten vom Referenzwert abweichende und streuende Ausgangsströme (s. Abb. 16) auf. Zwar hat dies keinen Einfluß auf eine eventuell implementierte überlagerte Spannungsregelung (geschlossener Regelungskreis) wohl aber auf die Stromform, die sich dann verschlechtert. Zur Entschärfung dieses Problems wird häufig eine Slope-Kompensation, bei der dem Referenzwert (Abb. 15:  $i_{ref}$ ) ein Sägezahn überlagert wird /BILLINGS1998/, verwendet. Die Current-mode-Regelung

soll hier nicht weiter untersucht werden, sollte aber im Rahmen eines Beitrages zur Regelung eines Cuk-Wandlers nicht unerwähnt bleiben.

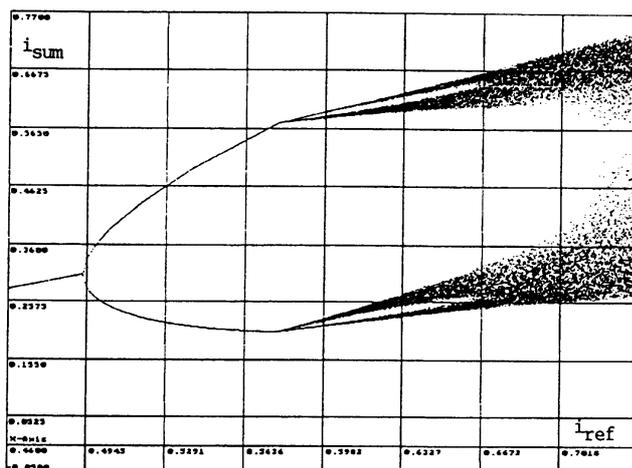


Abb. 16: Mehrdeutige und streuende Ausgangsströme bei der Current-mode Regelung (aus /TSE 1995/)

## 6 Zustandsregelung

Sowohl Stabilität als auch die Geschwindigkeit von Einschwingvorgängen werden ausschließlich von der Lage der Pole einer Übertragungsfunktion bestimmt. Es liegt nun nahe, einen Regler so zu entwerfen, daß die Pole des geschlossenen Kreises bestimmte Werte in der linken Halbebene annehmen. Man spricht in diesem Fall von *Polvorgabe* oder von *Polverschiebung*. Eine einfache und elegante Vorgabe von Polen kann mit einem Zustandsregler erfolgen /MÜLLER 1996/. Dabei werden keine neuen Pole hinzugefügt. Die Zustandsgrößen - sie kennzeichnen oftmals einen Energieinhalt - eines Systems beschreiben den jeweiligen "Zustand" vollständig, in dem sich die Strecke befindet.

Ein Cuk-Wandler enthält vier Energiespeicher (je zwei Drosseln und Kondensatoren). Da diese bekannt und weitgehend konstant sind, bietet es sich an, eine Zustandsregelung zu entwerfen. Die Regelung beruht auf dem Prinzip der Rückführung der Zustandsgrößen (s. Abb. 17) und wird eigentlich bei linearen Systemen angewendet. Beim Cuk-Wandler muß also die Gültigkeit eines linearen Ansatzes geprüft werden.

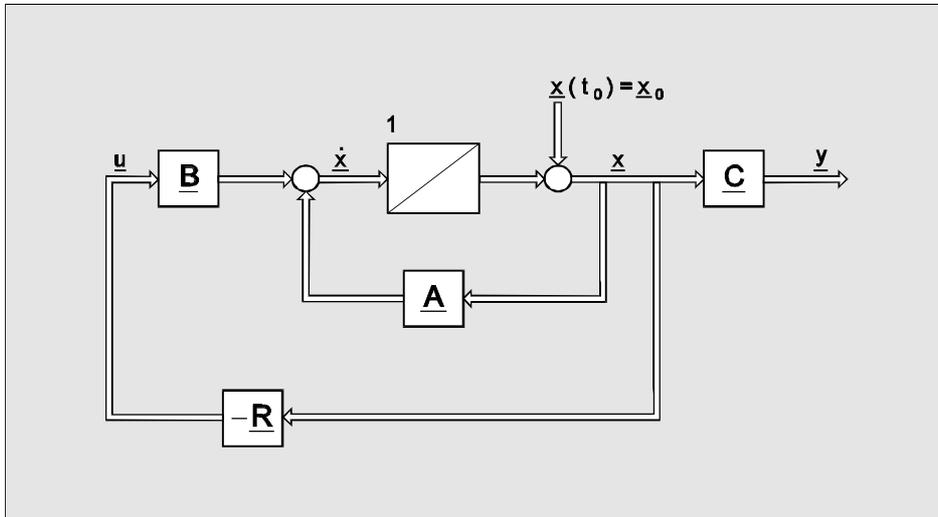


Abb. 17: Zustandsregelung

Die Zustandsgrößen werden entsprechend der Schaltung wie folgt gewählt:

- die Ströme der zwei Drosseln (Abb. 1: L1 u. L2)
- die Spannung des Koppelkondensators (Abb. 1: C1) und
- des Ausgangskondensators (Abb. 1: C2).

Da die vier Zustandsgrößen beim Cuk-Wandler mit vertretbarem Aufwand (Sensoren) erfaßt werden können, wird eine vollständige Zustandsrückführung untersucht (s. Abb. 18). Ziel einer Reglerauslegung ist also die Bestimmung der geeigneten Rückführungskoeffizienten (in diesem Beitrag für den kontinuierlichen Betrieb).

In /FÖLLINGER 1994/ wird für die Bestimmung der Rückführungskoeffizientenmatrix  $\mathbf{R}$  z. B. das Verfahren von *J. Ackermann* vorgeschlagen. Da dieses auch in *Matlab* implementiert ist, werden die Koeffizienten mit diesem Programm ermittelt. Die Wirkungsweise der Rückführung ergibt sich aus dem folgenden Zusammenhang:

$$\mathbf{A}_g = [\mathbf{A} - \mathbf{B} * \mathbf{R}]$$

Hierbei beschreibt die Systemmatrix  $\mathbf{A}_g$  das zustandsgeregelte System. Aus vorstehend genannter Beziehung ist nur  $\mathbf{R}$  unbekannt. Bei dem Verfahren von *J. Ackermann* wird nicht  $\mathbf{A}_g$  vorgegeben, sondern die Pole ( $\mathbf{P}$ ) der geregelten Strecke, so daß der

entsprechende *Matlab*-Befehl " $R=acker(A,B,P)$ " lautet<sup>6</sup>. Nachdem die Vorgehensweise zur Bestimmung der Pole bekannt ist, bleibt noch die Frage offen, wohin die Pole verschoben werden sollten. Auch hier gibt es Optimierungsverfahren (z. B. Ricatti), wofür geeignete Kriterien formuliert werden müßten. Geht man davon aus, daß die im System enthaltenen Zeitkonstanten für den jeweiligen Anwendungsfall ausreichend sind, so besteht die einfache Möglichkeit durch Linksverschiebung der dominanten Pole das System "aktiv zu dämpfen".

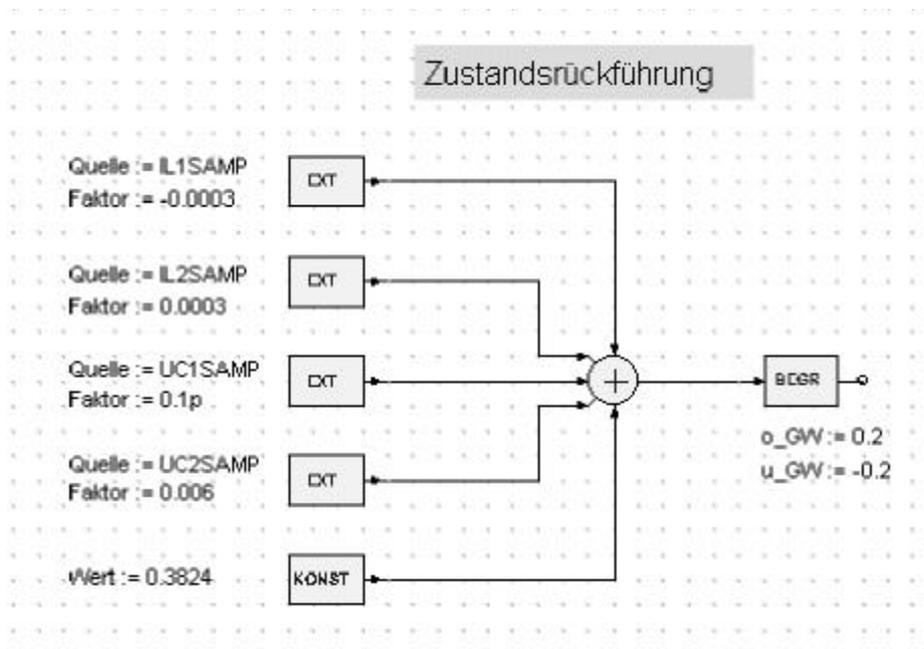


Abb. 18: Realisierung einer vollständigen Zustandsrückführung mit Simplerer

<sup>6</sup> Die hier verwendete Steuermatrix **B** beschreibt das Kleinsignalverhalten bei Variation des Tastverhältnisses!



Dies wurde für das Beispielsystem aus Abb. 2 wie folgt realisiert:

**Tabelle 1: Polverschiebung beim Beispielsystem**

Pole ohne Zustandsrückführung (D=0.5)	Pole mit Zustandsrückführung (D=0.5)
-50+7084i	-50+7084i
-50-7084i	-50-7084i
-50+359i	-450+359i
-50-359i	-450-359i

Daraus resultieren die Rückführungskonstanten aus Abb. 18, in der die vollständige Zustandsrückführung abgebildet ist. Die zusätzliche Konstante stellt den Arbeitspunkt ein. Berücksichtigt man nur das langsame konjugiert komplexe Polpaar, so müßte der Cuk-Wandler laut der Berechnung nach Abb. 19 seinen eingeschwungenen Zustand nach 14 ms erreicht haben. Um dies zu überprüfen, wird die Simulation mit rechteckförmiger Strombelastung wiederholt (s. auch Abb. 3). Es wird jedoch ein kleinerer Laststrom gewählt, um in der Nähe des Arbeitspunktes der Linearisierung zu bleiben.

Das durch die Polvorgabe zu erzielende Ergebnis wird mit der Simulation der getakteten Schaltung (s. Abb. 20) gut getroffen. Auch hier wird nach ca. 14 ms der stationäre Zustand erreicht. Daß hier eine stärkere Dämpfung als bei der analytischen Berechnung (Abb. 19) vorhanden ist, liegt an der nachgebenden Spannung; der Arbeitspunkt wird verlassen. Eine Veränderung des Systemverhaltens ist auch bei größeren Lastströmen zu erkennen, wohingegen eine geringere Dämpfung auftritt.

Die Überprüfung (*SIMPLORER*; "Experimente") des für unsere Anwendung relevanten Eingangsspannungsbereiches ergab, daß eine Adaption der Rückführungskoeffizienten für die Stabilität der Regelung nicht notwendig ist. Um die Ausgangsspannung jedoch bei Lastschwankungen in einem vernünftigen Band zu halten, muß die Regelung um einen Integrator erweitert werden, z. B. parallel zum Zustandsregler.

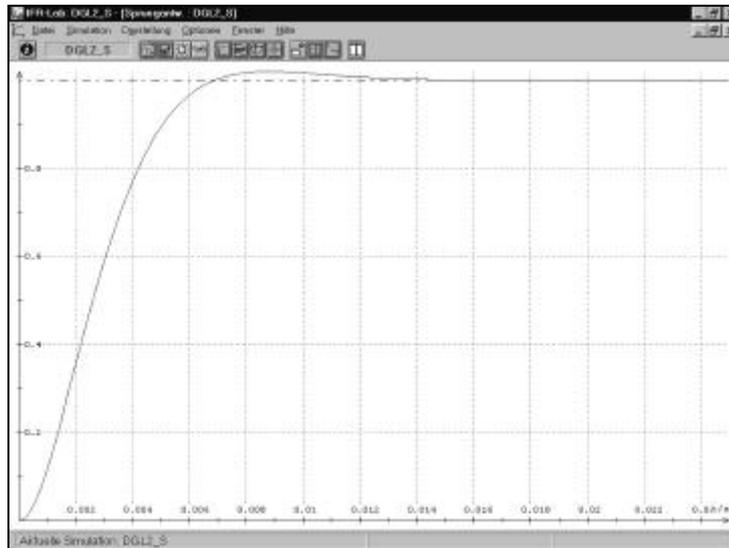


Abb. 19: Analytische Berechnung der zu erwartenden Sprungantwort

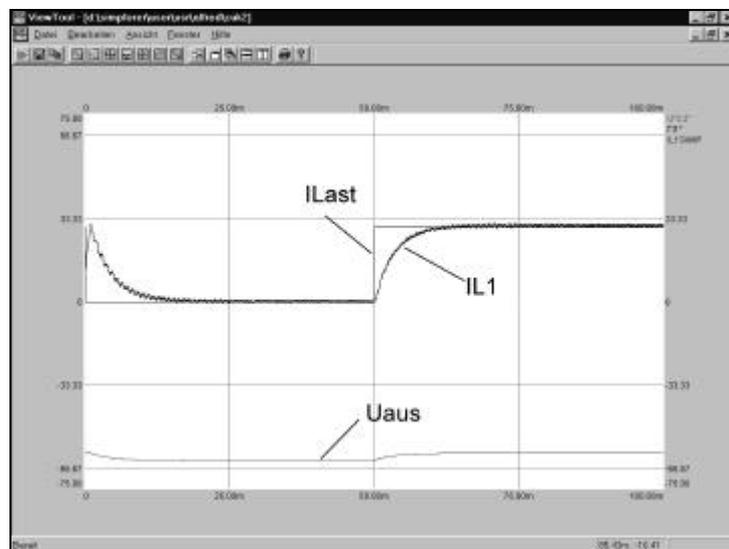


Abb. 20: Simulation der getakteten Schaltung (Abb. 1) mit Zustandsrückführung nach Abb. 18



## 7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde der Cuk-Wandler vorgestellt. Es ist ein bidirektionaler, hoch- u. tiefsetzender DC/DC-Wandler. Er besticht durch seinen einfachen Aufbau, ist aber dennoch nicht einfach zu regeln. Mit verschiedenen Werkzeugen und einer mathematischen Beschreibung des Wandlers (State-space averaging) wurde eine Zustandsregelung entwickelt. Gezeigt wurde, daß verschiedene Werkzeuge (SIMPLO-RER, PSPICE, Matlab, C) und Methoden (diskrete Simulation, State-space averaging) den Reglerentwurf unterstützen. Dabei wurden die Ergebnisse mit Vergleichsrechnungen (Simulationen) verifiziert. Dieses ist wichtig, da die Ergebnisse einer Simulation immer auf Plausibilität geprüft werden sollten, um Einstellungsfehler des Programms oder eine fehlerhafte Modellierung zu vermeiden. Obwohl die einzelnen Simulationstools über spezifische Vorteile verfügen, überdecken sie sich aufgrund ihrer rasanten Entwicklung in der Funktionalität immer stärker. Welches Simulationstool daher für ein bestimmtes Problem eingesetzt wird hängt stark von subjektiven Kriterien des Benutzers ab, z. B. ob er das Programm kennt oder eine einfache, möglichst intuitive Bedienung möglich ist.

## 8 Literatur

- /BILLINGS 1989/ Billings K.: Switchmode Power Supply Handbook, McGraw-Hill, Inc., 1989.
- /CUK 1977/ Cuk S.: Modelling, Analysis and Design of Switching Converters, Thesis at California Institute of Technology, Pasadena California 1977.
- /EDEL 1992/ Edel. H: Allgemeiner Ansatz zur Linearisierung von Schalt-  
netzteilen. ELEKTRONIK 1992, Heft 12, S. 76 .. 81.
- /FÖLLINGER 1994/ Föllinger O.: Regelungstechnik, Einführung in die Methoden  
und ihre Anwendung, 8. überarbeitete Auflage, Hüthig Buch  
Verlag Heidelberg 1994.
- /GIESELMANN 1997/ Giesselmann, M. et. al: Simulation of Power Electronics, EPE  
Tutorial, Trondheim 9/97
- /MÜLLER 1996/ Müller K.: Entwurf robuster Regelungen, B. G. Teubner,  
Stuttgart 1996.
- /TSE 1995/ C. K. Tse and W. C. Y. Chan: Chaos from a Current-  
Programmed Cuk Converter, International Journal of Circuit  
Theory and Applications, 1995.



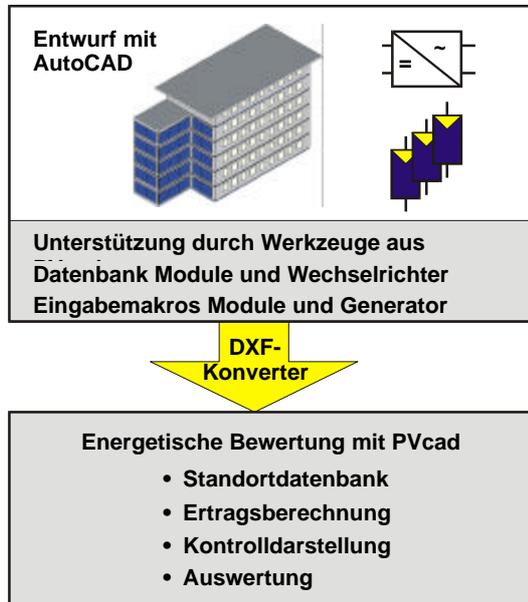
## **PVcad - Entwicklung eines Programms zur Auslegung von Photovoltaikfassaden**

Michael Viotto  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-219, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: m.viotto@iset.uni-kassel.de

### **1 Einleitung**

Die bisherigen Erfahrungen mit installierten Anlagen zeigen, daß die Integration von Photovoltaikmodulen in die Fassade eines Gebäudes eine sinnvolle Möglichkeit zur Bereitstellung regenerativer elektrischer Energie ist /BENDEL 1997/. Gegenüber anderen netzgekoppelten Anwendungen der Photovoltaik weist eine photovoltaische Fassade weitere Vorzüge auf. Die Solarmodule werden mit Hilfe einer ohnehin notwendigen Pfosten-Riegel-Konstruktion am Gebäude angebracht. Bei Einsatz von rahmenlosen Modulen lassen sich herkömmliche Befestigungssysteme verwenden, die bereits in großen Stückzahlen produziert werden. Die Solarmodule einer Photovoltaikfassade ersetzen herkömmliche Baustoffe, die für den Aufbau der Fassade zum Einsatz gekommen wäre. Ein Ersatz von teuren Werkstoffen wie z.B. Marmor oder Granit durch eine Solarfassade ist daher schon heute ohne Mehrkosten möglich.

Aufgrund der geringen Leistungsdichte des solaren Energieangebots ist die Photovoltaik eine Technik mit relativ hohem Flächenbedarf. In dicht besiedelten Regionen stehen gesondert nutzbare Flächen jedoch nicht bzw. nur unter großen Kosten zur Verfügung. Bei der Integration von Photovoltaik in Gebäuden fällt kein Aufwand zur Bereitstellung und Erschließung spezieller Flächen an. PV-Fassaden werden vorwiegend in Bürogebäuden Anwendung finden. An Tagen mit geringer Bewölkung deckt sich der elektrische Energiebedarf gut mit dem Angebot eines entsprechend dimensionierten Solargenerators. Der Solarstrom wird also zu einem hohen Anteil direkt im Gebäude genutzt.



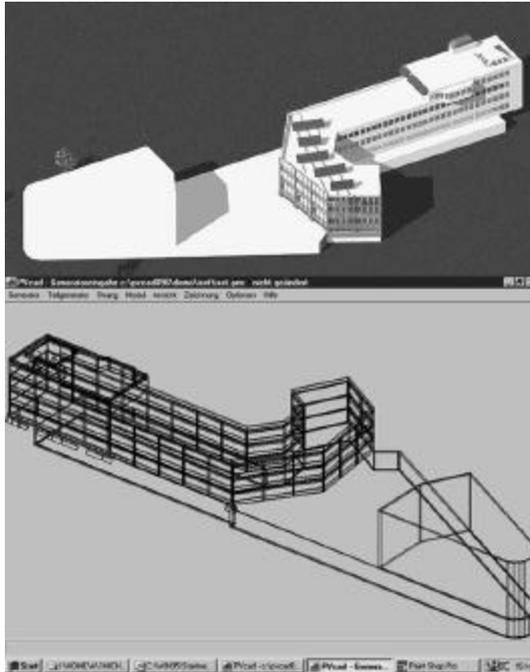
**Abb. 1: Typischer Arbeitsablauf beim Entwurf einer PV-Fassade**

Nachteil einer PV-Fassade ist die Komplexität des Systems. Im Gegensatz zu herkömmlichen Anlagen weisen die Module häufig unterschiedliche Ausrichtungen und Neigungen auf. Eine Abschattung der Anlage durch Nachbargebäude oder eine Eigenverschattung bei gebäudeintegrierten PV-Anlagen (Fassade ebenso wie Dach) kann auftreten. Das thermische Verhalten ist bei der Gebäudeintegration ebenfalls in Betracht zu ziehen, da hier höhere Temperaturen als bei freier Aufständigung der Module auftreten können. Installation und Betrieb einer PV-Fassade berühren zwei Fachgebiete - Bauwesen und Elektrotechnik - an deren Schnittstelle Fehler im Entwurf und bei der Realisierung entstehen können.

Zur Zeit bestehen noch Unsicherheiten bei der Auslegung von PV-Fassaden hinsichtlich dem elektrischen Energiegewinn unter Berücksichtigung von Abschattung und Temperaturverhalten der Fassadenmodule sowie von unterschiedlichen elektrischen Anlagenkonzepten. Zur Unterstützung der Planer von Photovoltaikfassaden wurde daher mit Förderung des BMBF das Programm Pvcad entwickelt. Dieses Werkzeug fügt sich durch entsprechende Schnittstellen nahtlos in moderne CAD-Arbeitsumgebungen ein. Es ermittelt den Energieertrag der Anlage unter Berücksichtigung von inhomogener Einstrahlung und Abschattung, Temperaturverhalten der Fassadenmodule sowie unterschiedlichen elektrischen Anlagenkonzepten.

## 2 CAD-Integration

Der Entwurf der Fassade ist Teil der meist CAD-unterstützten Planung des gesamten Gebäudes. Die Planung einer Solarfassade muß sich daher nahtlos in den üblichen Entwurfsvorgang eines Gebäudes integrieren. Pvcad unterstützt die Planung einer Solarfassade bereits bei der grafischen Eingabe des Gebäudes in ein CAD-System (s. Abb. 1).



**Abb. 2: Funktion des CAD-Konverters**

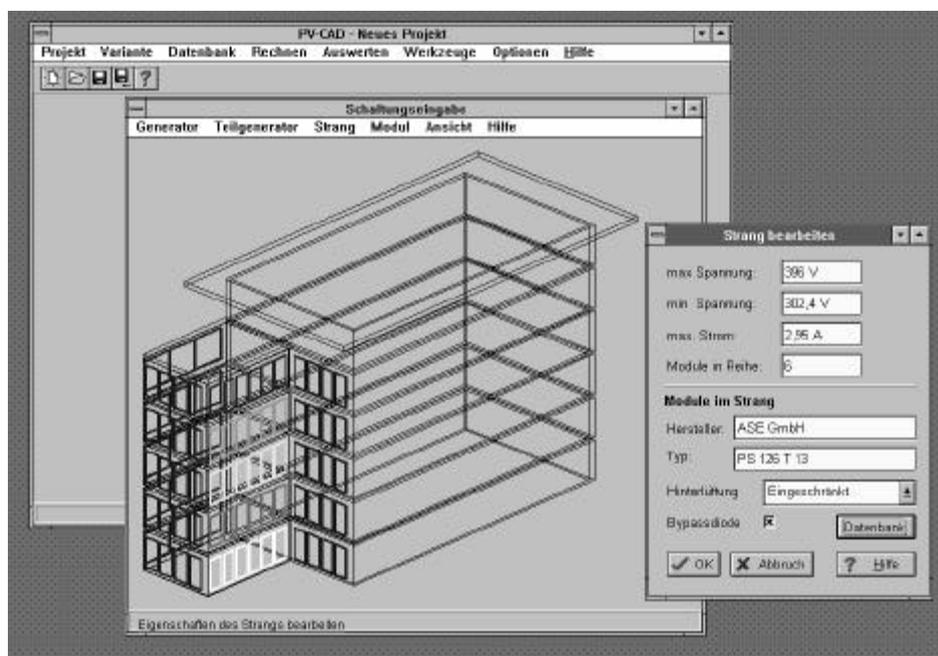
Für das weit verbreitete Programm AutoCAD wurden Werkzeuge zur Auswahl und Platzierung von Solarmodulen erstellt, die auch große Generatoren mit vielen Modulen schnell in die Gebäudezeichnung einfügen. Eine weitere Möglichkeit ist die Eingabe der Generatorschaltung mit den bereitgestellten Werkzeugen unter AutoCAD direkt in die Gebäudezeichnung.

In Abhängigkeit von der Komplexität des Gebäudes können auch preiswerte CAD-Programme eingesetzt werden. Der Gebäudeplaner arbeitet daher auch beim Entwurf der Solarfassade mit dem gewohnten CAD-System. PVcad liest die Gebäudezeichnung im weit verbreiteten DXF-Format ein und extrahiert die für die Berechnung wesentlichen Daten. Der Nutzer

kann wählen, welche Zeichnungsebenen bzw. Farben als PV-Module oder Gebäudeflächen konvertiert werden.

Abbildung 2 zeigt als Beispiel das Gebäude des ISET im CAD-Programm und nach der Konvertierung durch PVcad. Die Reduktion der Details führt zu einer deutlich verkürzten Rechenzeit.

Für Planer, die nicht über Auto-CAD verfügen, bietet PVcad eine 3D-Ansicht des Gebäudes zur Eingabe des Generators an. Mit diesem Werkzeug werden die Module in einer projizierten 3D-Ansicht des Gebäudes zu Strängen und Generatoren verbunden. Die Eingabe der Schaltung wird durch Datenbanken für Solarmodule und Wechselrichter unterstützt. Die elektrischen Daten des Generators werden mit Hilfe dieser Datenbank berechnet und stehen dem Planer zur Verfügung.



**Abb. 3: Generatoreingabe in PVcad**

Die vielfältigen Eingabemöglichkeiten für das Gebäude und die elektrische Schaltung sichern einen flexiblen Einsatz von PVcad in unterschiedlichen Konstellationen der Zusammenarbeit von Gebäude- und Elektroplaner. Die einfache Bedienung von PVcad und die Kompatibilität zur gewohnten CAD-Umgebung sichern die Akzeptanz des Programms bei Architekten und Bauingenieuren und führen insgesamt zu verringerten Planungskosten.

### 3 Datenbanken

Einstrahlungs- und Temperaturdaten am Gebäudestandort bilden die Basis der Energieertragsberechnung. Diese Informationen sind häufig nicht verfügbar oder sie liegen lediglich in gedruckter Form vor, so daß die Werte manuell in den Rechner übertragen werden müssen. Das Computerprogramm PVcad enthält daher für weltweit etwa 2000 Standorte Monatsmittelwerte der benötigten Eingangsdaten. Aus den Angaben dieser Datenbank synthetisiert PVcad für den gewählten Ort Zeitreihen mit stündlicher Auflösung von Einstrahlung und Umgebungstemperatur /HEINEMANN 1996/. Die Datenbank verfügt über Suchfunktionen, die das Auffinden von Daten aus der Nähe eines Anlagen-



standortes erleichtern. Sie entstammt dem Simulationssystem INSEL /SCHUMACHER 1993/ und läßt sich einfach durch den Anwender um weitere Standorte erweitern.

Die integrierte Datenbank für Solarmodule und Wechselrichter baut auf dem Informationssystem Erneuerbare Energie (ISEE) /ROHRIG 1997/ auf und bietet eine umfangreiche und aktuelle Basis für die Auslegung von Anlagen. Die Benutzeroberfläche ist auf einfache und intuitive Bedienung optimiert. Sie erleichtert dem Anwender die schnelle Auswahl des passenden Moduls über die Angabe der gewünschten elektrischen und geometrischen Eigenschaften. Außer den für die Simulation benötigten Informationen können weitere Daten, z.B. die elektrische Schutzklasse oder die Herstelleradresse, zu einem ausgewählten Modul oder Wechselrichter dargestellt werden.

#### **4 Berechnungsmethoden**

Aus der Gebäudegeometrie sowie der geographischen Lage und den Wetterdaten werden die Einstrahlungsverläufe auf die einzelnen Module der Fassade berechnet. Die Abschattung durch benachbarte Bebauung oder das Gebäude selbst wird berücksichtigt. Verluste aufgrund der richtungsabhängigen Reflexion an der Moduloberfläche und Einschränkungen der Diffusstrahlung gehen ebenfalls in die Berechnung ein. Dies ermöglicht es, Ertrag und Betriebsverhalten des PV-Generators genau zu berechnen und die Auswirkung von unterschiedlichen Varianten der Generatorschaltung zu ermitteln. Die Umrechnung der meteorologischen Einstrahlungswerte auf geneigte Flächen erfolgt mit dem Diffus-Strahlungsmodell nach Perez /STELLBOGEN 1996/.

Die Zeitreihen der Einstrahlung auf die Module und der Umgebungstemperatur sind die Grundlagen der Berechnung des PV-Generators. Die elektrischen Kennlinien einzelner PV-Module werden mit einem vereinfachten Modell /PUKROP 1997/ beschrieben. Zur Charakterisierung eines Solarmoduls genügen übliche Datenblattangaben, die in der integrierten Komponentendatenbank vorliegen. Dieses Modell leistet die geforderte Geschwindigkeit bei der Berechnung der resultierenden elektrischen Charakteristik eines Photovoltaikgenerators. Bei der Addition der Modulkennlinien zur Generatorcharakteristik werden die individuellen Modultemperaturen und -bestrahlungsstärken berücksichtigt. Zur Beschreibung des im Generator verwendeten Wechselrichters sind ebenfalls nur Angaben erforderlich, die Datenblättern entnommen werden können: Nennleistung, Wirkungsgrad, Mindesteingangsleistung, Maximalstrom sowie die minimale und maximale Eingangsspannung.

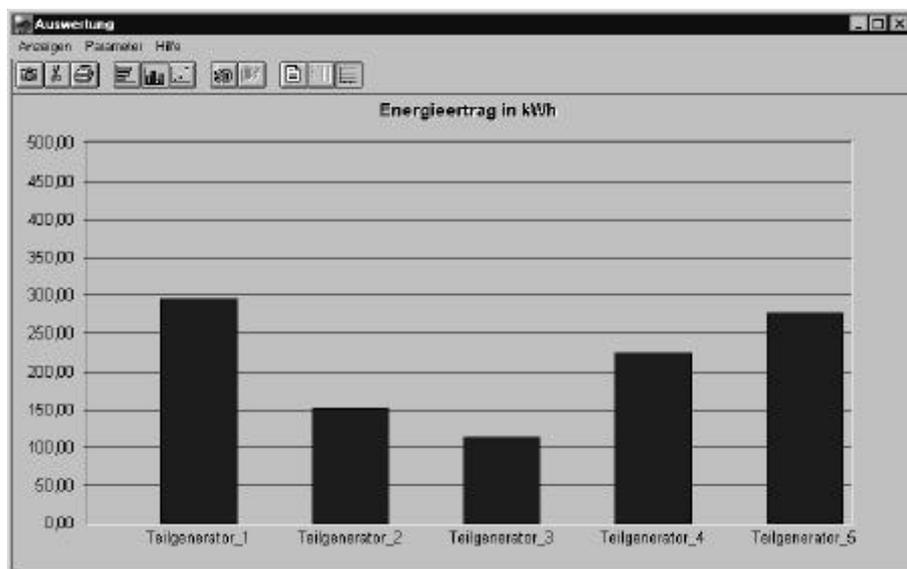


Abb. 4: Ergebnisdarstellung einer PV-Fassade mit 5 Teilgeneratoren

## 5 Darstellung

Der Benutzer kann mit einer Bildschirmdarstellung der Gebäudegeometrie und der Platzierung der Module die Dateneingaben kontrollieren. In einem entsprechenden Menü können der Blickwinkel und der Bildausschnitt gewählt werden. In der Geometriedarstellung werden die Bestrahlungssummen für die PV-Elemente mit einer Farbcodierung wiedergegeben und die jeweils zu einem seriellen Strang gehörenden PV-Module angezeigt. Diese Darstellung unterstützt den Planer bei der Optimierung des PV-Generators, da er Schwachstellen in der Anordnung und Verkabelung der Module unmittelbar erfassen und Verbesserungsmöglichkeiten erkennen kann. Die Energieerträge unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen werden grafisch aufbereitet (s. Abb. 3) und dienen dem Nutzer zur Optimierung der Anlagenauslegung. Das Einlesen und die Ausgabe der Ergebnisse in Standardprogrammen wie z.B. Word oder Excel ist ebenfalls möglich.



## 6 Zusammenfassung

PVcad unterstützt als anwendungsorientiertes Werkzeug eine rationelle Auslegung von PV-Fassaden. Es läßt sich mit CAD-Systemen kombinieren, so daß hier getätigte Investitionen ebenso genutzt werden, wie die mit diesen Systemen erworbenen Erfahrungen. Offene Schnittstellen gestatten die Einbindung weiterer Entwurfswerkzeuge. PVcad arbeitet unter Microsoft-Windows (95, NT4) und verfügt über die entsprechende grafische Benutzerschnittstelle. Die Kompatibilität zum PC-Standard eröffnet eine sehr breite Anwenderbasis und sichert den Einsatz des Programms auch auf preiswerten Rechnern. PVcad ermöglicht eine effiziente Planung von Solarfassaden und erleichtert so dem Architekten und Bauingenieur den Einstieg in die Anwendung dieser umweltfreundlichen Technik.

## 7 Literatur

- /BENDEL 1997/ C. Bendel: PV-Experimentalfassade – Untersuchungsergebnisse und Kostenreduktionspotentiale“, 12. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1997
- /HEINEMANN 1996/ D. Heinemann, C. Langer, J. Schumacher: Synthesis of hourly ambient temperature time series correlated with solar radiation, Proc. Eurosun, Freiburg 1996
- /PUKROP 1997/ D. Pukrop: Numerische Simulation größerer Photovoltaik-Generatoren - Grundlagen der Modellierung und Untersuchung von Anwendungsbeispielen, Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg 1997
- /ROHRIG 1997/ K. Rohrig: ISEE – Informationssystem für Erneuerbare Energien im Internet“, 12. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1997
- /SCHUMACHER 1993/ J. Schumacher: Das Simulationsprogramm INSEL, 8. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1993
- /STELLBOGEN 1996/ D. Stellbogen: Auslegung von gebäudeintegrierten PV-Generatoren mit Shade und PVNode“, 11. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1996



## **Vermarktung von Photovoltaik-Fassaden mit Hilfe von PVcad**

O. Chehab  
Pilkington Solar International GmbH  
Mühlengasse 7, 50667 Köln  
Tel.: (0221) 92-597041, Fax.: (0221) 92-25-81117

### **1 Einleitung**

Fassaden von Bürogebäuden eignen sich besonders gut für die architektonische Integration von multifunktionalen Fassadenmodulen. Dafür muß man die entsprechende Anforderung respektieren, die der Architekt wünscht und versuchen, durch geeignete Hilfswerkzeuge bei der Projektierung und Komponentenauswahl die Betriebsbedingung zu erfüllen. PVcad stellt ein solches Hilfsmittel dar, das die flexible Definition von Modulen und Verschaltungen zu Strings und die Zuordnung von Wechselrichtern erlaubt.

### **2 Anforderung des Projekts**

Ein Verwaltungsgebäude mit vorgelagerter Galerie soll in eine Photovoltaikanlage integriert werden mit den Anforderungen Sonnenschutz bei gewünschter Teiltransparenz und Stromerzeugung.

Die Anordnung der PV-Elemente soll so erfolgen, daß die Tragekonstruktion in der Galerie zur Halterung genutzt wird, ohne daß die PV-spezifischen Konstruktionselemente aus der vorhandenen Galerie hervorstehen. Die PV-Elemente sollen als Verschattungselemente in der Ebene oberhalb der Gebäude-Isolierverglasung mit einer Ausrichtung nach Süden integriert werden.

### **3 Einsatz von PVcad**

Als Hilfsmittel für die Vermarktung des Einsatzes von den PV-Elementen als Verschattungselemente für das Projekt waren folgende Schritte notwendig:

- Festlegung der Generatorverschaltung
- Festlegung der Modulanordnung



- Berechnung mit PVcad
- Vergleichsrechnung mit einem anderen Auslegungsprogramm
- Erstellen der Gebäudestruktur im CAD-Format
- Konvertierung der CAD-Zeichnung für die Berechnung mit PVcad

#### **4 Einbaumöglichkeiten für die Module**

Im Rahmen der architektonischen Anordnung waren drei Optionen zu berücksichtigen und mit PVcad die daraus resultierenden technischen und systemspezifischen Konsequenzen zu ermitteln.

- 1) Module in Galerieebene
- 2) Module in Galerieebene unverschattet
- 3) Module außerhalb der Galerieebene unverschattet

#### **5 Ertragsprognose**

Unter Berücksichtigung der Verschattung, optimaler Leitungsführung und einfacher Verkabelung der Module ergaben sich nachvollziehbare Unterschiede in den errechneten Erträgen. Die Berechnung des unverschatteten Generators ergab annähernd identische Werte wie Vergleichsrechnung mit der Software PV-Calc.

Dieser Beitrag wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Geosolar erstellt.



PV- System	Südtrakt	Ostrakt	Westtrakt	Summe
<b>Generator</b>				
Fläche	92,4 m <sup>2</sup>	382,8 m <sup>2</sup>	224,4 m <sup>2</sup>	699,6 m <sup>2</sup>
Leistung	8,216 kWp	34,037 kWp	19,953 kWp	62,206 kWp
Neigung	30°	30°	30°	
Orientierung	180° (Süd)	180° (Süd)	180° (Süd)	
Modultyp	Optisol P025084 K	Optisol P025084 K	Optisol P025084 K	
Solarzelle	Typ Shell	Typ Shell	Typ Shell	
Reihenschaltung	a) 4 Stränge a'17 Module  b) 1 Strang a' 9 Module	18 Stränge a'17 Module  1 Strang a'13 Module	11 Stränge a'17 Module	
Anzahl Module	77 Stck.	319 Stck.	187 Stck.	583 Stck.
erwartete jährliche PV- Stromerzeugung	6.528 kWh/a	23.860 kWh/a	13.033 kWh/a	43.421 kWh/a
erwartete jährliche PV- Stromerzeugung /kWp	795 kWh/kWp*a	701 kWh/kWp*a	653 kWh/kWp*a	698 kWh/kWp*a
<b>Wechselrichter</b>				
Nennleistung	a) 1500 W b) 850 W	1500 W	1500 W	
Hersteller	SMA Regel- systeme	SMA Regel- systeme	SMA Regel- systeme	
Typ	SWR 1500 SWR 850	SWR 1500	SWR 1500	

**Abb.1: Kenndaten der PV- Fassade. Die Verschattung durch den Südtrakt wurde berücksichtigt, die der Galeriepfosten nicht.**



## **Simulationen zu Netzurückwirkungen von Photovoltaikinvertern am Beispiel des Olympischen Dorfes in Sydney**

Dr.-Ing. habil. Peter Zacharias  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-242, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: pzacharias@iset.uni-kassel.de  
Edward D. Spooner, University of New South Wales, Sydney, Australia

### **1 Ausgangssituation im Olympischen Dorf**

Im Jahr 2000 werden in der Stadt Sydney die Olympischen Sommerspiele stattfinden. Erklärtes Ziel der Veranstalter ist die Etablierung der Spiele in Sydney als "Grüne Spiele". Zu vielen anderen Gestaltungsmaßnahmen der Olympischen Stätten gehört auch die Nutzung regenerativer Energiequellen. Im Olympischen Dorf bzw. in den Teilsiedlungen sind daher sowohl die thermische Nutzung als auch die photovoltaische Nutzung von Solarenergie in den 675 Gebäuden integriert. Im Dach eines jeden Wohngebäudes sind so 1kWp elektrisch und 2kWp thermisch integriert (Abb. 1). Die Ausrüstung der Gebäude wird von BP Solar Australia unter der wissenschaftlichen Begleitung der University of New South Wales durchgeführt. Für den Zeitraum nach den Olympischen Spielen ist der Verkauf der Gebäude und Grundstücke an private Nutzer zu Wohnzwecken vorgesehen.



**Abb. 1: Integration der thermischen und elektrischen Nutzung von Solarenergie in die Gebäude des Olympischen Dorfes in Sydney**

Da es sich bei der Installation der 675 netzgekoppelten Anlagen um ein Novum in der öffentlichen Energieversorgung in Australien handelt, besteht großes Interesse an dem Projekt seitens der lokalen und nationalen Energieversorgungsunternehmen Pacific Power und Energy Australia. Mit der Installation wird ein Präzedenzfall geschaffen, dessen Langzeitwirkungen diese Unternehmen natürlich als für die Versorgungssicherheit und Qualität verantwortliche Institutionen in besonderer Weise interessiert. Bislang erlauben die Elektroenergie-Versorgungsunternehmen in Australien eine dezentrale Energieeinspeisung durch "Independent Power Producer (IPP)" in ihre Netze nicht.

Dabei werden folgende Fragen gestellt:

- Welche Auswirkungen haben die dezentralen elektronischen Energieeinspeiser auf die Qualität der elektrischen Energie beim Kunden?
- Sind konkret beim Olympischen Dorf Probleme durch die Dimensionierung der Niederspannungsverteilung hinsichtlich der Netzrückwirkungen von PV-Invertern zu befürchten?
- Was ist bei stärkerer Durchsetzung öffentlicher Elektroenergieverteilungsnetze mit dezentralen elektronischen Einspeisern zu erwarten?



- Welche Möglichkeiten gibt es, die Auswirkungen von derartigen Energielieferanten in komplexeren Verteilungssystemen quantitativ vorherzusagen, um rechtzeitig in der Planungsphase Entscheidungen treffen zu können?

Diese Fragestellungen wurden gemeinsam von der University of New South Wales / Faculty of Electrical Engineering und dem Institut für Solare Energieversorgungstechnik untersucht.

## 2 Netzurückwirkungen eines PV-Inverters

Netzgekoppelte PV-Inverter können als Wechselstromquellen betrachtet werden, die sich auf die Netzspannung am Einspeisepunkt synchronisieren und dann mit einem  $\cos\phi = 1$  einen Strom ins Netz einprägen. Dieser Strom enthält jedoch auch Harmonische der Grundschwingung, die dann ihrerseits zu Spannungsabfällen im Oberschwingungsbereich am Einspeisepunkt führen. Sowohl für die Oberschwingungen der Spannungen als der Ströme sind durch Normen (IEC1000, DIN EN 61000, VDE0839) Maximalwerte verbindlich vorgegeben. Sie sind Bestandteil der Normung für öffentliche Niederspannungsnetze.

Bei der Installation im Olympischen Dorf Sydney wird der String-Inverter der Firma SMA Regelsysteme Niestetal eingesetzt. Eine Vermessung mehrerer Exemplare ergab übereinstimmend das in Abb. 2 gezeigte Verhalten hinsichtlich der Netzurückwirkungen. Sowohl bei den zusammenfassenden Kennwerten Klirrfaktor und effektiver Oberschwingungsstrom als auch bei den im einzelnen durch die Normen vorgegebenen Grenzwerte der Strom-Oberschwingungen liegt der Inverter sehr deutlich unter den zulässigen Grenzwerten, so daß aus dieser Sicht kein Problem bei ihrem Einsatz besteht. Es bleibt jedoch die Frage, ob durch die große Zahl gleichzeitig in einem Versorgungsgebiet arbeitender Inverter durch Überlagerung der Wirkungen oder Besonderheiten in der Installation Normverletzungen möglich sind. Gegebenenfalls müßten Maßnahmen zu einer Korrektur ergriffen werden.

Die Amplituden der Spannungs-Harmonischen am Einspeisepunkt sind von denen der Strom-Harmonischen und der Impedanz am Einspeisepunkt abhängig. Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 3 die Veränderung der Spannungsform bei gleichzeitigem Einspeisen von 10 Invertern und unterschiedlicher Kabellänge.

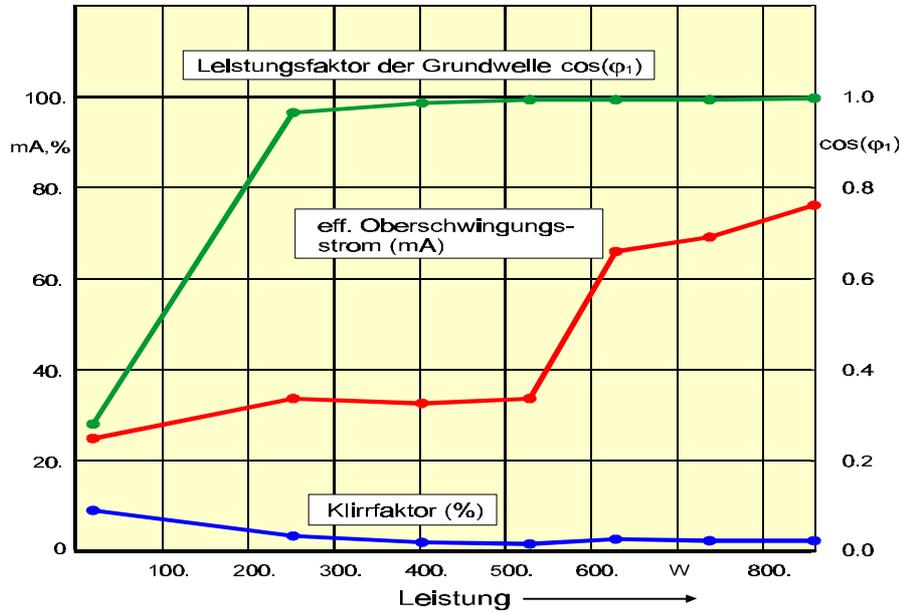


Abb. 2: Leistungsfaktor der Grundschwingung, effektiver Oberschwingungsstrom und Klirrfaktor beim SWR850

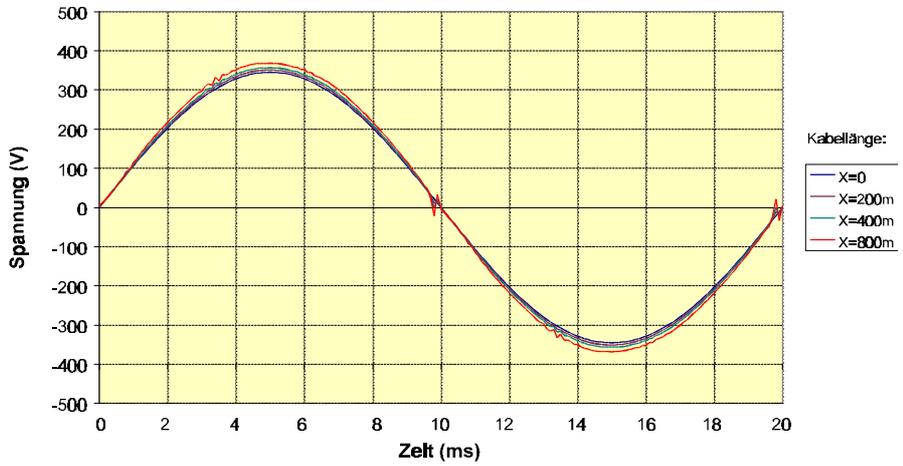


Abb. 3: Spannung am Einspeisepunkt von 10 parallelen Invertern SWR850 bei unterschiedlichen Kabellängen (Erdkabel 16mm<sup>2</sup> AL, Leistung 860W je Inverter)

Bei dem in Abbildung 3 dargestellten Szenario werden in 800 m Entfernung die zulässigen Werte der Spannungs-Harmonischen auch im Einzelfall noch nicht überschritten. Im praktisch vorliegenden Fall wurden jedoch nur maximale Leitungsabstände des Einspeisepunktes von der Transformatorstation von ca. 380 m erreicht, wie Abb. 4 verdeutlicht.

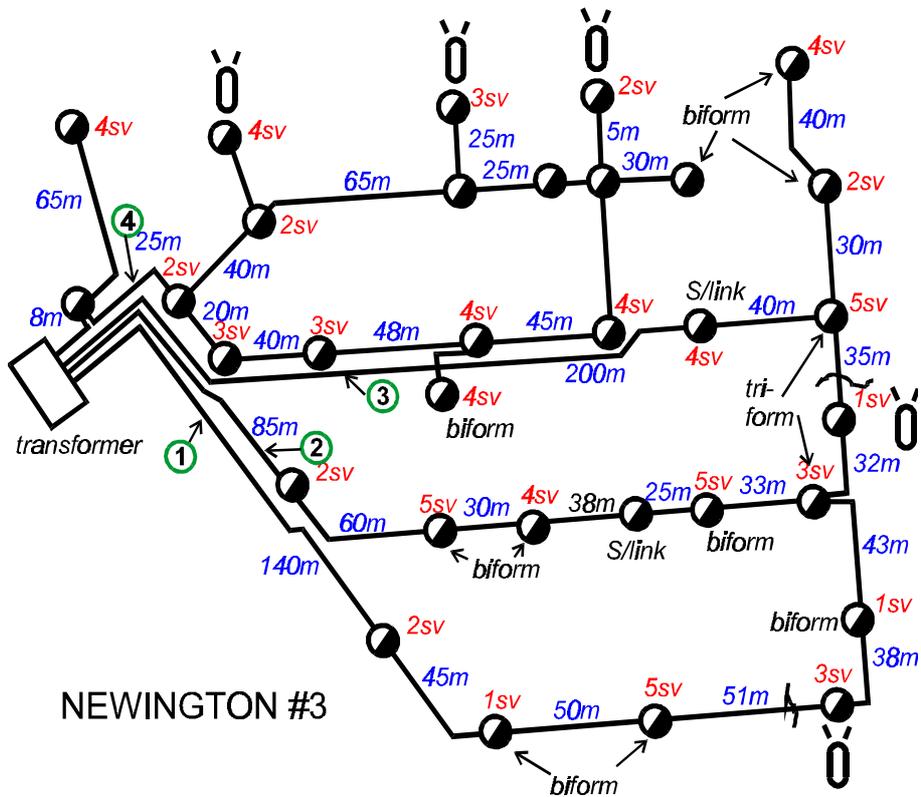


Abb. 4: Ausschnitt aus dem Anschlußplan der Gebäude im Olympischen Dorf mit den zugehörigen Erdkabeln und der Anzahl der Inverter (sv) pro Einspeisepunkt ins Hauptkabel.

In diesem Bild wurde der Fall mit den größten Kabellängen und meisten angeschlossenen Invertern ausgewählt. Die Kennwerte der Installation sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.



	X-Section	R'	X <sub>L</sub> ' (50Hz)	L'	C'
	mm <sup>2</sup>	Ohm/km	Ohm/km	mH/km	µF/km
Hausinstallation	3 x 1,5 Cu	13,5	0,113	0,36	0,2...0,25
Hausinstallation	3 x 2,5 Cu	8,11	0,104	0,33	0,2...0,25
Hausanschluß	4 x 16 Al	2,16	0,099	0,31	0,25...0,3
Haupterkabel	4 x 240 Al	0,144	0,084	0,27	0,55...0,7

Der Transformator hat dabei die folgenden Kennwerte:

Typenscheinleistung	600 kVA
Nennspannung	433 V
Schaltgruppe	Dy
Spannungsverhältnis	11000/433 V/V
Nennstrom I <sub>2</sub>	400 A
Kurzschlußspannung	6 %

Abbildung 4 und die Tabellen zeigen, daß bei einer solchen Situation die Frage nach der Überlagerung der Einzelwirkungen und die Auswirkungen auf die Versorgungsqualität nicht mehr so einfach zu beantworten sind.

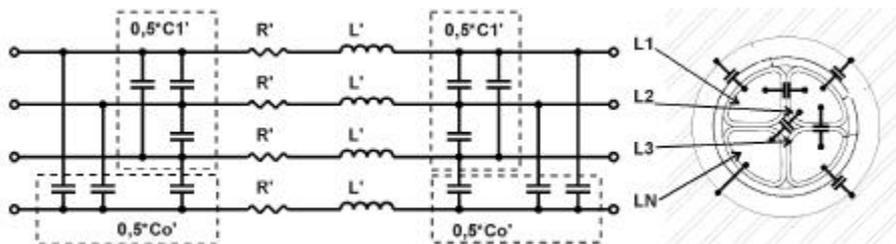


Abb. 5: Ersatzschaltbild und Querschnitt eines Erdkabels

Die Phasenlage der Netzspannung kann an jedem Anschlußpunkt etwas anders sein, so daß keine einfache Summation der Oberschwingungen erfolgt. Hinzu kommt, daß Erdkabel auch einen beträchtlichen kapazitiven Anteil in ihrer Impedanz aufweisen (Abbildung 5), der gerade bei den höheren Harmonischen eine Wirkung erwarten läßt.

### 3 Abschätzungen und Berechnungen der Netzzrückwirkungen von PV-Invertern in Netzen

#### 3.1. Abschätzungen auf Grund der Leitungstheorie

Die Anwendung der Leitungstheorie liefert einfache Möglichkeiten, die Einflüsse bestimmter Parameter abzuschätzen. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus einer Doppelleitung mit einem homogenen Widerstands-, Induktivitäts-, Kapazitäts- und Leitwertbelag. Mit diesem Modell lassen sich die stationären und instationären Vorgänge bei der Übertragung elektrischer Energie über die Leitungen beschreiben.

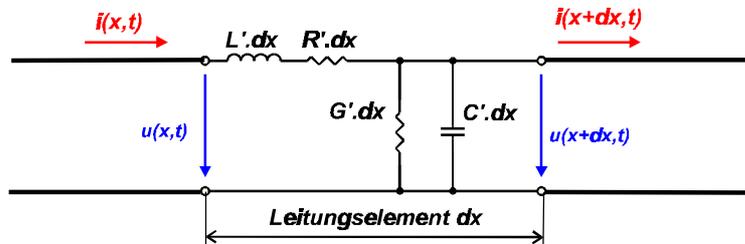


Abb. 6: Ausschnitt aus einer homogenen Doppelleitung mit Strom- und Spannungswerten

Die Anwendung der Kirchhoff'schen Regeln führt auf die Leitungsgleichung und schließlich nach Separierung auf die bekannten Telegraphengleichungen /DIN/:

**Leitungsgleichungen:**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + R' i + L' \frac{\partial i}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} + G' u + C' \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

**Telegrafengleichung:**

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \frac{u}{i} \right] + \left( \frac{R'}{L'} + \frac{G'}{C'} \right) \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{u}{i} \right] + \frac{R' G'}{L' C'} \left[ \frac{u}{i} \right] = \frac{1}{L' C'} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ \frac{u}{i} \right]$$

Aus diesen Gleichungen lassen sich eine Reihe von Kennwerten ableiten, die für die Einschätzung der Situation im oben beschriebenen Fall genutzt werden können. Es sind dies:



<b>Ausbreitungskoeffizient</b>	$\gamma \approx \omega \sqrt{L' C'} = \beta$
<b>Ausbreitungsgeschwindigkeit</b>	$v \approx \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} = 54,6 \cdot 10^3 \text{ km/s}$
<b>Wellenlänge</b>	$\lambda_{50\text{Hz}} = \frac{2\pi}{\beta} = 1093 \text{ km} \quad \lambda_{5\text{kHz}} = 10,9 \text{ km}$
<b>Wellenwiderstand</b>	$Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 29,5 \Omega$
<b>induktiver Anteil</b>	$\frac{X_{L,50\text{Hz}}}{R} \approx 0,7$
<b>Reaktanzverhältnis</b>	$\frac{X_{L,5\text{kHz}}}{X_{C,5\text{kHz}}} = \omega^2 L' C' l^2 = 0,165 / \text{km}^2 \cdot (0,4 \text{ km})^2 = 0,026$

Für die Berechnung der Orientierungswerte wurden die Parameter des Haupterdkabels verwendet. Die Wellenausbreitung in der betrachteten Doppelleitung erfolgt offenbar sehr schnell. Aus den Wellenlängen bei 50Hz und 5kHz ergibt sich, daß im vorliegenden Fall mit  $l < 400\text{m}$  eine "elektrisch kurze Leitung" vorliegt und somit Laufzeiteffekte nicht betrachtet werden müssen. Auf Grund des Verhältnisses zwischen induktiver und kapazitiver Reaktanz kann davon ausgegangen werden, daß auch bei maximaler Leitungslänge von 400m die kapazitiven Querströme in der Leitung selbst bei der höchsten untersuchten Frequenz von 5kHz geringer als 3% der eingespeisten Harmonischen ist. Für den vorliegenden Fall braucht der kapazitive Anteil also wegen der Kürze der Leitungen nicht bei der Modellbildung berücksichtigt werden. Dies führt zu beträchtlichen Verkürzungen bei der Eingabe der Werte wenn man das Ersatzschaltbild in Abbildung 5 betrachtet. Die Frage nach einer quantitativen Aussage zur Überlagerung der einzelnen PV-Inverter läßt sich mit dem oben dargestellten Differentialgleichungssystem zwar beantworten. Die Auswertung ist jedoch sehr aufwendig. Daher wurden die hier ermittelten prinzipiellen Aussagen benutzt, um eine Simulation durchzuführen.

### 3.2. Simulation der Netzurückwirkungen

Für die nachfolgend beschriebenen Simulationen wurde das Simulationssystem SIMPLORER verwendet /ZACHARIAS 1997/. Wie bereits dargestellt, handelt es sich bei PV-Invertern um selbstsynchronisierende Wechselstromquellen mit Oberschwingungsanteil. Letzterer ist relativ stabil, so daß im Prinzip eine Nachbildung des Inverters durch eine zeitgesteuerte Stromquelle möglich ist. Sinnvoll ist dies jedoch nur, wenn die Phasenlage der Grundwelle am Einspeisepunkt bekannt ist. Eine Nachbildung der Funktion des Regelkreises für jeden Inverter erscheint jedoch wegen der relativ hohen Zahl der Inverter im System als wenig praktikabel. Die oben erwähnten grundsätzlichen Überlegungen führten daher zu einer Simulation der Verhältnisse in zwei Schritten:

1. Simulation des Netzwerkes nur für den Fall der Grundschwingung mit spannungsgesteuerten Stromquellen. Dabei wird die Steuergröße direkt aus der Spannung am Einspeisepunkt abgeleitet und ggf. verzögert der Stromquelle zugeführt.
2. Simulation des Netzwerkes mit überschwingungshaltigen zeitgesteuerten Stromquellen. Für die Phasenlage der einzelnen Inverter werden die Lösungen für die Grundschwingung herangezogen.

Diese Vorgehensweise ist an einem einfachen Beispiel in Abbildung 7 dargestellt. Ein Leitungsabschnitt wird durch die ohmschen und induktiven Komponenten dargestellt. Für die Lasten ist ein entsprechendes begründetes Ersatzschaltbild einzusetzen. In Schritt 1 findet man dann die Phasenlage der eingespeisten Grundschwingung des Stromes, die dann Basis für die Simulation in Schritt 2 ist. Voraussetzung hierfür ist ein hinreichend kleiner Oberschwingungsanteil in den Strömen.

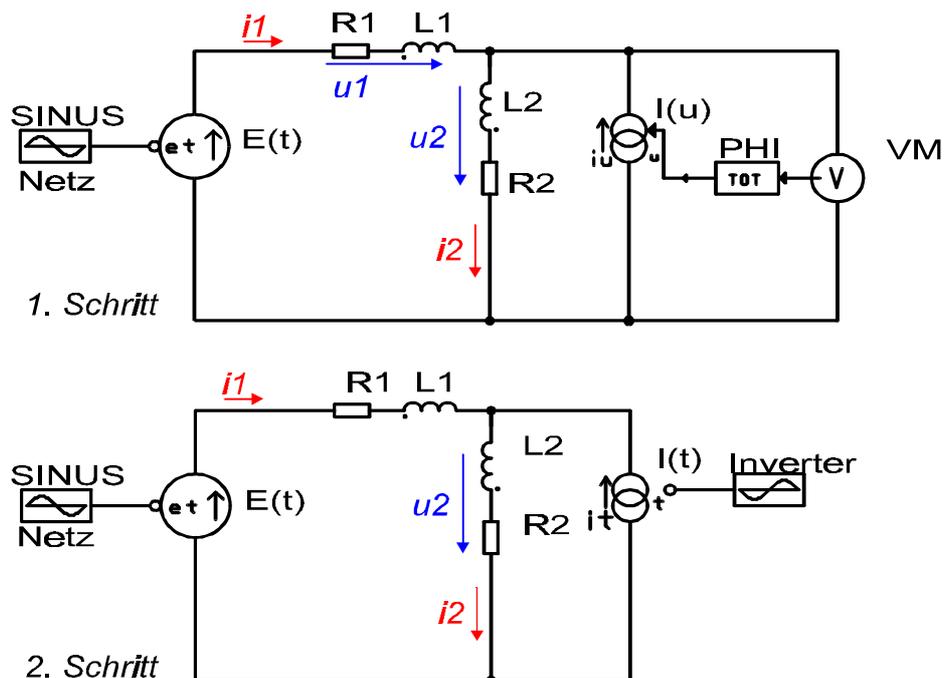
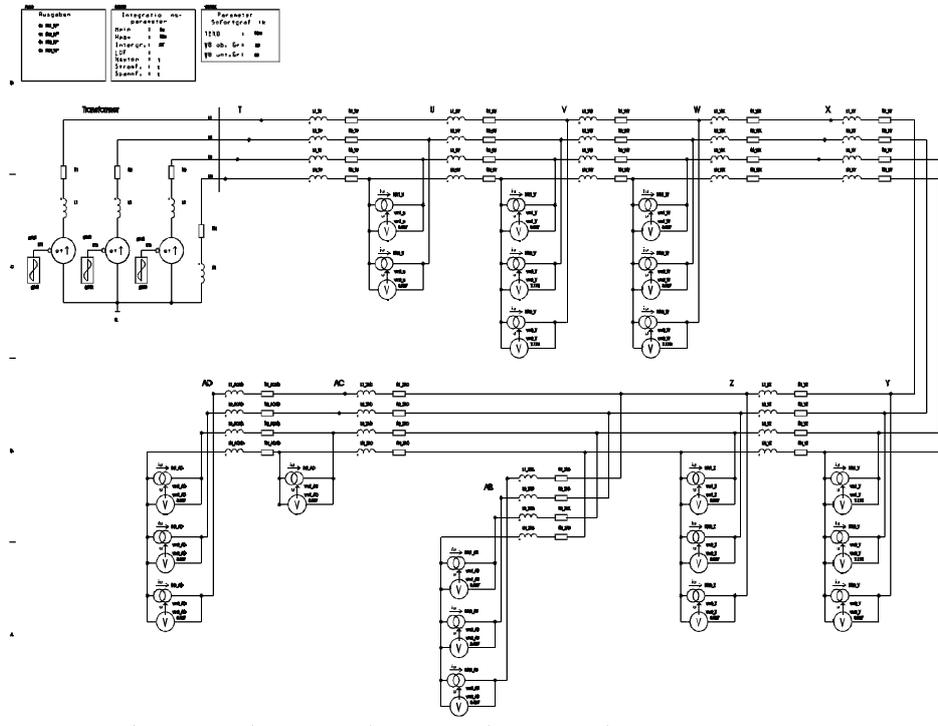


Abb. 7: Vorgehensweise bei der Simulation netzgekoppelter PV-Inverter mit SIMPLORER

Die beschriebene Vorgehensweise ist relativ einfach, führt aber dennoch im realen Problem zu bereits umfangreicheren Netzwerken für die Ersatzschaltung mit PV-Invertern, wie Abbildung 8 zeigt. Dabei wurden Lasten in diesem Bild nicht dargestellt.



**Abb. 8: Ersatzschaltbild für Strang #2 in Abb. 4 für die Ausführung des ersten Simulationsschrittes**

Die Simulation zeigte, daß für die untersuchten Topologien der Leitungen die Überlagerung der Stromüberschwingungen der einzelnen Inverter auf ihre Addition in den einzelnen Leitungen hinausläuft, wenn keine weiteren Verbraucher angeschlossen sind. Hauptgrund hierfür ist, daß die installierte maximal mögliche Gesamtleistung der PV-Inverter weniger als 10% der installierten Nennleistung des Versorgungssystems beträgt.

Die Situation ändert sich, wenn größere Verbraucher im Netz zugeschaltet werden. An den Längsreaktanzen der Kabel kommt es dann zu Spannungsabfällen mit entsprechenden Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Einspeisepunkten. Dies verursacht insbesondere bei den Harmonischen höherer Ordnung eine Überlagerung, die bis zur Auslöschung reichen kann. Um eine Vorstellung von diesem Effekt zu vermitteln, wurden die Ergebnisse einer einfachen Beispielrechnung in Abbildung 10 dargestellt. Hier sind zwei Inverter in einem Abstand von 300 m an dem Erdkabel ange-

geschlossen. Wenn nur die beiden Inverter einspeisen, kommt es zu einer direkten Überlagerung der Oberschwingungen, so daß der resultierende Klirrfaktor des Gesamtstromes 2,2% beträgt. Beim Anschließen einer Last von 36 kW hinter dem 2. Inverter verursacht die Phasenverschiebung durch die Spannungsabfälle an den induktiven Komponenten des Kabels eine teilweise Schwächung bzw. Auslöschung von Oberschwingungen höherer Ordnung. Der Klirrfaktor sinkt auf 1,76%. Allgemein ist folglich bei stärkerer Durchdringung der Versorgungsnetze mit PV-Invertern und/oder der gleichzeitigen Einspeisung von PV-Invertern und dezentral angeschlossenen Lasten mit einer Verringerung der Stromklirrfaktors gegenüber dem eines einzelnen Inverters zu rechnen. Wie die Ergebnisse zeigen, gilt dies auch, wenn man von völlig identischen Invertern ausgeht.

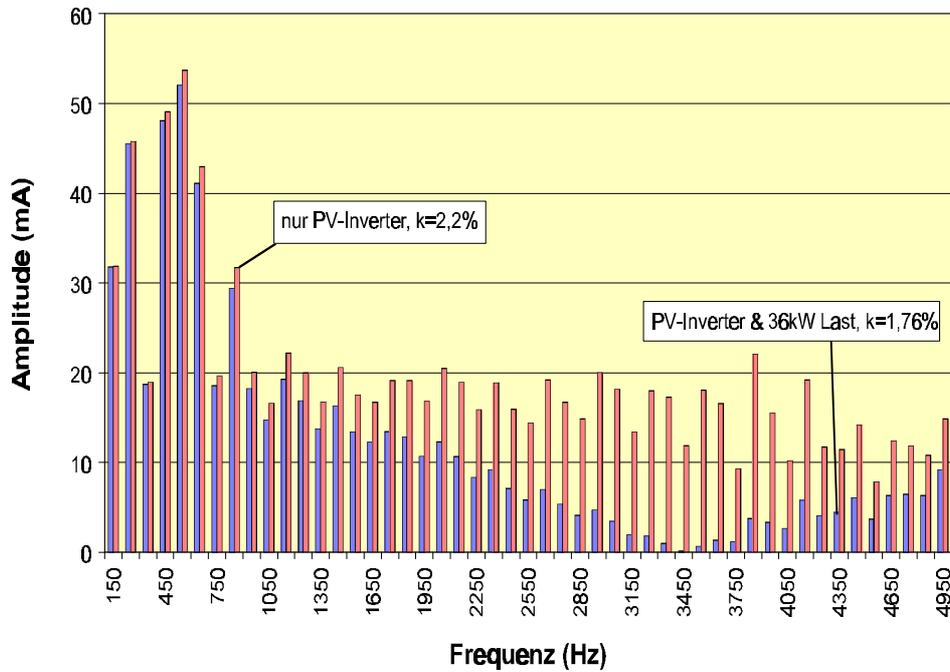


Abb. 10: Überlagerung der Strom Oberschwingungen von 2 SWR850 in 300 m Entfernung bei 860 W pro Inverter.



#### 4 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Der ohmsche Anteil der Leitungen führt zur Anhebung der Spannung durch PV-Inverter.
- Insbesondere durch den induktiven Anteil der Kabel kommt es zu einem größeren Oberschwingungsanteil mit wachsender Kabellänge.
- Das Oberschwingungsspektrum der Ströme und Spannungen in einem Verteilungsnetz ist bei räumlich verteilter Einspeisung auch bei konstanter eingespeister Leistung nicht konstant. Es ändert sich auch bei linearen Lasten mit der Lastverteilung.
- Dezentrale netzgekoppelte PV-Anlagen führen tendenziell zu einer Verringerung im Bereich des effektiven Oberschwingungsgehalts der Netzspannung im Vergleich zu zentralen Anlagen.
- Simulation ist eine geeignete Methode um auch bei komplexen Systemen mit nicht-linearen Lasten eine quantitative Aussage zu möglichen Netzurückwirkungen zu treffen.
- Durch den geringen Oberschwingungsanteil der Ströme und die Dimensionierung des Verteilungsnetzes bleibt der Oberschwingungsanteil der Spannung im Verteilungsnetz des Olympischen Dorfes überall weit unterhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte.

#### 5 Literatur

- /DIN/ Normen: DIN VDE 0838/EN60555, DIN VDE 0839/EN6100
- /RINT 1981/ C. Rint; Handbuch für den Hochfrequenz- und Elektrotechniker, Bd.1, (1981) 330 – 337, Hüthig Verlag Heidelberg
- /SIMPLORER 1997/ Handbuch SIMPLORER 3.3, SIMEC GmbH, Chemnitz 1997
- /SPOONER 1998/ E. D. Spooner, P. Zacharias, D. Morphett, G. Grunwald, J. Mackay; Solar Olympic Village, Design and Testing Experience, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien 1998
- /ZACHARIAS 1997/ P. Zacharias; Netzurückwirkungen bei der Parallelschaltung von 600 PV - Wechselrichtern zur Netzeinspeisung. Studie für die Mont-Cenis-Entwicklungsgesellschaft mbH/Herne, Kassel 1997



## Multimediale Ausbildung - Vorlesungen und virtuelle Labore im Internet

Efstratios Tapanlis, Jochen Bard  
Fachgebiet Rationelle Energiewandlung  
Fachbereich Elektrotechnik, Gh Kassel  
Tel.:(0561) 804-6203  
e-mail: bard@re.e-technik.uni-kassel.de

### 1 Einleitung

In dem 1995 neugeschaffenen Fachgebiet „Rationelle Energiewandlung“ werden die Energiewandlungsprozesse auf dem gesamten Pfad zwischen Bereitstellung und Anwendung integral behandelt. Im Gegensatz zu den bisherigen Methoden einer getrennten Betrachtung von Bereitstellung und Verbrauch von Energie ergeben sich dabei Lösungen, die zu einer deutlichen Verbesserung des Gesamtumwandlungswirkungsgrades führen. Die integrale Behandlung von Energiewandlungsprozessen wird zur entscheidenden Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg erneuerbarer Energien. Thematische Schwerpunkte liegen bei Energieversorgungskonzepten für Inselnetze (z.B. für Alpenhütten), im Bereich der Wasserkraft, Gebäudesystemtechnik, der Simulation und Visualisierung von Energiewandlungsprozessen und der Entwicklung von Energiemanagementverfahren in den genannten Bereichen.

Das Lehrangebot des Fachgebiets Rationelle Energiewandlung ergänzt die traditionellen Vorlesungsinhalte der Elektrotechnik durch drei interdisziplinäre Vorlesungen:

1. **Rationelle Energiewandlung:** thermodynamische Grundlagen, Kreisprozesse, Energiewandlungsverfahren (mit Schwerpunkt auf Erneuerbaren): mechanische, chemische sowie Strahlungsenergie in elektrische Energie
2. **Energiemanagement in Gebäuden:** Heizen und Kühlen, Energiespeicher, Beleuchtungssysteme, elektrische Energie, Energiemanagementsysteme, Kosten



### 3. Thermodynamik von Strömungsmaschinen

Viele physikalisch-technische Phänomene können mit teilanimierten Simulationen auf dem Rechner erheblich transparenter und anschaulicher dargestellt werden, als es ein statisches Medium (Buch, Folie) kann. Daher werden im Rahmen der Vorlesungen einzelne Experimente am Rechner vorgeführt, die das Verständnis z.B. der kinetischen Gastheorie erleichtern sollen. Zu den Vorlesungen werden schriftliche Skripte im ‚klassischen‘ Format angeboten. Darüber hinaus wurden auf Grundlage dieser Skripte Hypertextversionen auf html-Basis erstellt. Diese ermöglichen das Lesen der Skripte mit den üblichen Browsern (von der homepage des Fachgebiets oder von CDRom) und die Einbindung von Animationen, Simulationsprogrammen etc.

Thematisch eng begrenzte Lehreinheiten z.B. zum Thema kinetische Gastheorie werden vollständig auf dem Rechner realisiert und ermöglichen einen automatischen oder schrittweisen Ablauf.

Zur Ergänzung der Vorlesung und der begleitenden Übungen, die im Wesentlichen auf der Vertiefung des Stoffes durch Bearbeitung von Übungsaufgaben bestehen, wird ein Virtuelles Labor entwickelt, das die eigenständige Vertiefung der Lehrinhalte in kleinen Gruppen oder einzeln ermöglicht. Dabei werden am Computer kleine Lehreinheiten zu bestimmten Themen der Vorlesungen durchgearbeitet.

## 2 Konzepte zum Einsatz von Multimedia

**Virtuelles Labor:** Ein Forschungsschwerpunkt des Fachgebiets ist die Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur Visualisierung komplexer Energiewandlungsprozesse. Geplant ist die Erstellung eines virtuellen Labors, in dem in einer Multimediaumgebung zahlreiche Experimente durchgeführt werden. Der Benutzer kann unabhängig von einem „realen“ Labor und einem Laborassistenten Versuche am Computer ausprobieren und experimentell in einer intuitiven Benutzeroberfläche Erkenntnisse sammeln. Die inhaltlichen Schwerpunkte liegen in den Bereichen regenerative Energien, Energiewandlungsprozesse, umweltspezifische Aspekte und Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

Ein solches virtuelles Labor kann durchaus ein „reales“ Praktikum ergänzen und teilweise sogar ersetzen: die realen Eingabegeräte (Meßaufbau, Steuerung) werden grafisch dargestellt und können wie in der Realität manipuliert werden, die Messungen selbst (elektrische, optische, thermische Eigenschaften etc.) werden simuliert und die Ergeb-



nisse wie im realen Fall visualisiert. Dieses Konzept, die grafische Manipulation von Modellparametern zusammen mit einer intuitiven Oberfläche, die in Echtzeit die Auswirkungen der Benutzeraktionen visualisiert, nennen wir parametrische Visualisierung. Das virtuelle Labor kann zu Hause oder in einem Rechnerpool durchgeführt werden, allein oder in Gruppen, zu beliebigen Zeitpunkten und in verschiedenen Schwierigkeitsgraden. Es entsteht eine Studienwerkstatt zur Förderung des selbständigen Studiums. Gerätekosten und Personalmittel werden reduziert.

Kernstück des virtuellen Labors ist eine Studiensoftware, die wissenschaftliche Praktikumsversuche in einer virtuellen Umgebung simuliert, ein Höchstmaß an Interaktivität anbietet und die Auswirkungen der Benutzermanipulation in Echtzeit visualisiert. Das virtuelle Labor fördert damit den Einsatz neuer Medien zur Verbesserung von Lehre und Studium. Das virtuelle Labor wird mit der Programmierumgebung LabView (National Instruments) erstellt, die seit Jahren erfolgreich im Fachgebiet eingesetzt wird. Die Vorteile von LabView liegen zum einen in der Kommunikationsfähigkeit zu dynamischen Programmbibliotheken und OLE-Schnittstellenanbindung, die ein offenes, also von Dritten erweiterbares Programmprodukt ermöglichen und bei der Programmierung Zugriff auf viele bereits vorhandene Routinen ermöglicht.

Mit LabView lassen sich grafisch äußerst ansprechende, intuitive Benutzeroberflächen erstellen, die durch eine Vielzahl grafischer Kontrollinstrumente (Buttons, Schieberegler, Meter, Grafiken, Controls) und virtuellen Anzeigegeräten (Indikatoren, Sliders, Charts, Gauges etc.) ein Höchstmaß an Interaktivität ermöglichen. Der Benutzer kann nicht nur durch verschiedene Seiten blättern (ähnlich wie in Hypertext Dokumenten), sondern aktiv eine Vielzahl von Parametern grafisch - nicht lediglich durch numerische Zahleneingabe - manipulieren und die Auswirkung seiner Manipulation durch visualisierte Grafiken, Animationen, Charts etc. in Echtzeit verfolgen. Damit wird ein spielerischer und dennoch detaillierter Erkenntnisserwerb erzielt.

Ein wichtiger Grundsatz bei der Entwicklung dieser Software ist die Modularität. Durch die Bildung kompakter, thematischer Lehreinheiten, die jede für sich genommen wieder unterschiedliche Schwierigkeitsgrade enthalten, wird der flexible Einsatz der Module im Lehrangebot des Fachgebiets aber auch in der Aus- und Weiterbildung ermöglicht. Vorträge und Kurse lassen sich damit generisch auf Grundlage der beschriebenen Konzepte entwickeln. Unter anderen werden folgende Themen bearbeitet:

- Aufbau des solares Spektrums
- Solarthermische Konversion



- Photovoltaik
- Hybridsysteme
- Windenergie

Jedes dieser Fachthemen gliedert sich wiederum in Schwierigkeitsgrade, ausgehend von den physikalisch - technischen Grundlagen bis hin zu komplexen wissenschaftlichen Simulationen und der Einbeziehung von Verlustfaktoren bei der technischen Realisierung der Wandlungsverfahren. Durch den variablen Schwierigkeitsgrad ermöglicht die Software das allmähliche Einarbeiten und Vertiefen des Stoffes mit dem Fortschritt der Vorlesung, Übung oder des Praktikums.

### 3 Ausgewählte Beispiele

#### 3.1 Hypertext Skript

Als erstes Beispiel einer multimedialen Anwendung wird ein Hypertext-Skript der Vorlesung *Rationelle Energiewandlung* vorgestellt. Die Vorlesung wird an der Universität Kassel im Sommersemester von Prof. Dr. Jürgen Schmid gehalten und behandelt die verschiedenen Energiewandlungsverfahren.

Das Skript ist in HTML-Format geschrieben und kann sowohl mit Hilfe eines Internet-Browsers (Netscape, Internet Explorer) unter der WWW-Adresse <http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/re/vorlesung/rew/re/> gelesen oder übers Internet auf den lokalen Rechner heruntergeladen werden.

Die Oberfläche enthält zwei Rahmen; im linken steht das Inhaltsverzeichnis und auf dem rechten die aktuelle Seite. Durch einen Mausklick auf ein Stichwort des Inhaltsverzeichnisses wird die rechte Seite aktualisiert. Durch die Navigationsschalter "zurück", "home" und "vor" kann das Hypertext-Skript wie ein normales Buch durchgeblättert werden. Eine Suchfunktion ist selbstverständlich auch eingebaut.

Das Skript enthält Texte, Diagramme, Tabellen, Grafiken und Hyperlinks. In einige Seiten laufen Animationen, komplizierte Berechnungen können über die WWW-Seiten geführt und Simulation physikalischer oder technischer Prozessen können abgerufen werden. Alle Elemente können selbstverständlich heruntergeladen und lokal gestartet werden.

**Einführung**

Angesichts einer ständig steigenden Weltbevölkerung wird die Frage nach umweltverträglichen Möglichkeiten zur Deckung des Energiebedarfs immer dringender. Weltweit beruht die Energieversorgung derzeit zu etwa 90% auf fossilen Brennstoffen. Abgesehen davon, daß deren Vorräte begrenzt sind, entstehen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe umweltschädigende Gase. Hiervon ist besonders das CO<sub>2</sub> von Bedeutung. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind für den Treibhauseffekt und die damit einhergehende Klimaveränderung mit verantwortlich. In Deutschland wird jährlich die Energie von rund 500Mio Tonnen SKE (Steinkohleeinheiten) verbraucht. Auf jeden Einwohner entfallen somit etwa 6 t SKE pro Jahr. Das entspricht der Emission von 12 t CO<sub>2</sub> pro Kopf jährlich. Da unter den fossilen Brennstoffen die Mineralöle den größten Anteil haben, werden rund 50% des Energiebedarfs durch Importe gedeckt.

Kategorie	Anteil (%)
Kraftwerke	36%
Verkehr	23%
Industrie	23%
Haushalte	13%
Kleinverbrauch	6%

**Abb. 1:** Einführungsseite des Hypertext-Skripts Rationelle Energiewandlung  
<http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/re/vorlesung/rew/re/>

### 3.2 Multimedia- Präsentationen in der Vorlesung

Ein Fachvortrag ist das zweite Feld zur Anwendung multimedialer Techniken. Durch einen rechnergesteuerten Overhead-Projektor oder einen Beamer kann eine Bildschirmpräsentation (MS- Powerpoint) auf eine große Fläche projiziert werden. Die Vorlesung Rationelle Energiewandlung (Universität Kassel / FB Elektrotechnik / Prof. Jürgen Schmid / Sommersemester) erfolgt zum großen Teil über die o.g. Technik.

Während der Powerpoint-Präsentation erscheinen die Objekte in einer vorher festgelegten Reihenfolge. Optische Animationseffekte und akustische Signale können das Erscheinen der Objekte begleiten. Audio- und Videosequenzen können vorgespielt



werden. Dateien bzw. Programme können während der Präsentation abgerufen bzw. ausgeführt werden.

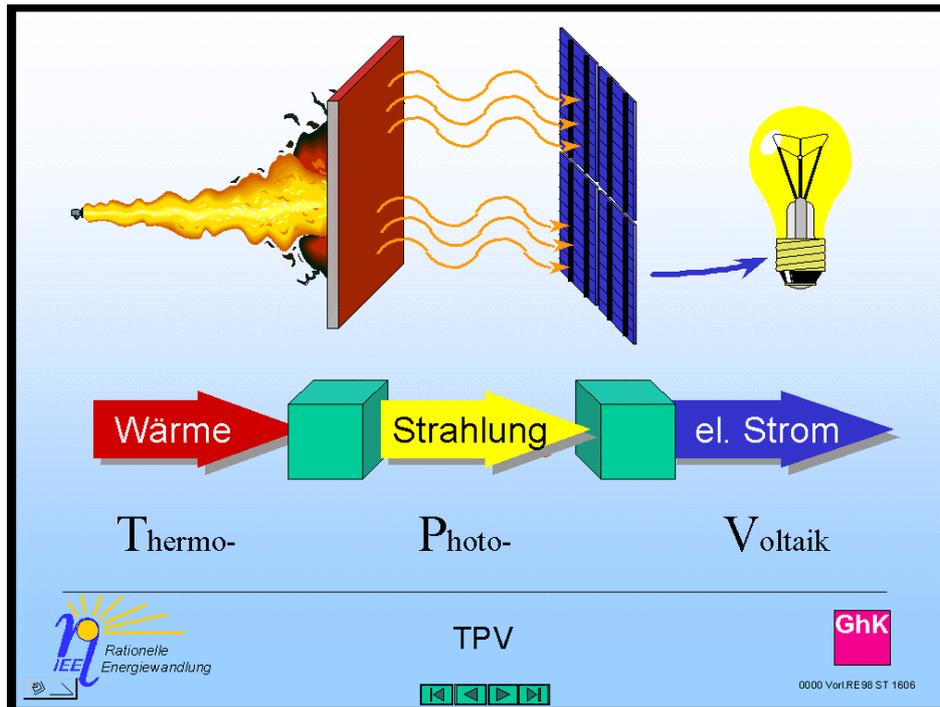


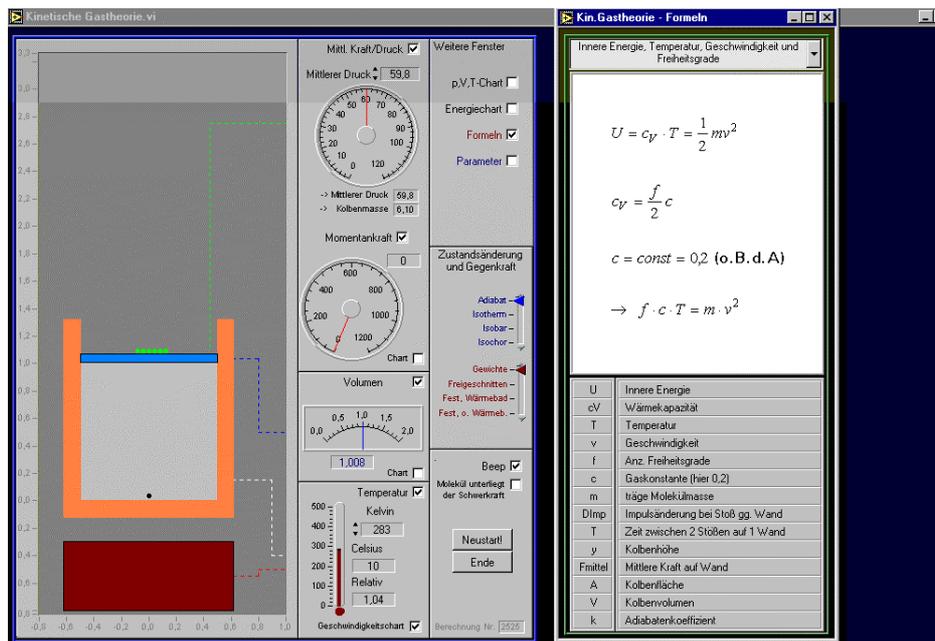
Abb. 2: Auszug aus der Vorlesungspräsentation Rationelle Energiewandlung  
Thema : Thermophotovoltaik

### 3.3 Simulation

Zahlreiche Programme, die technische und physikalische Prozesse erläutern, simulieren und visualisieren, werden im Rahmen der Lehrtätigkeiten des Fachgebiets programmiert. Die Programme werden mit der Software LabView erstellt und können sowohl von dem LabView-Programm (.vi, .llb Dateien) oder als eigenständige Programme (.exe Dateien) ausgeführt werden.

Die Software basiert auf dem neuen Prinzip der „Parametrischen Visualisierung“, die von unseren Mitarbeitern entwickelt wurde. Im Gegensatz zu bisher existierenden Lernprogrammen bestimmt der Benutzer aktiv den Ablauf des Programms, indem er virtuelle

Geräte bedient und virtuelle Anlagen dimensioniert, konstruiert und prüft. Der spielerische Aufbau der Software garantiert aus pädagogischer Sicht ein besonders schnelles, effektives und unkompliziertes Erlernen komplexer Sachverhalte.



**Abb. 3:** Simulationsprogramm zur kinetische Gastheorie nach dem Prinzip der Parametrischen Visualisierung. Links wird das Verhalten ideale Gase simuliert und visualisiert In der Mitte können die Anzeigen mit Hilfe des Mauszeigers, vom Benutzer geändert werden und den Ablauf der nebenstehenden Simulation beeinflussen. Rechts werden die entsprechenden Formeln angezeigt und theoretische Grundlagen erläutert.

### 3.4 Tools und Applikationen

Zahlreiche Anwendungen werden zur Unterstützung des Lernens programmiert. Diese Applikationen sind kleine Programme (.exe Dateien), die Hilfsfunktionen, Kalkulationen, Umrechnungen, Übersetzungen usw. verwirklichen.

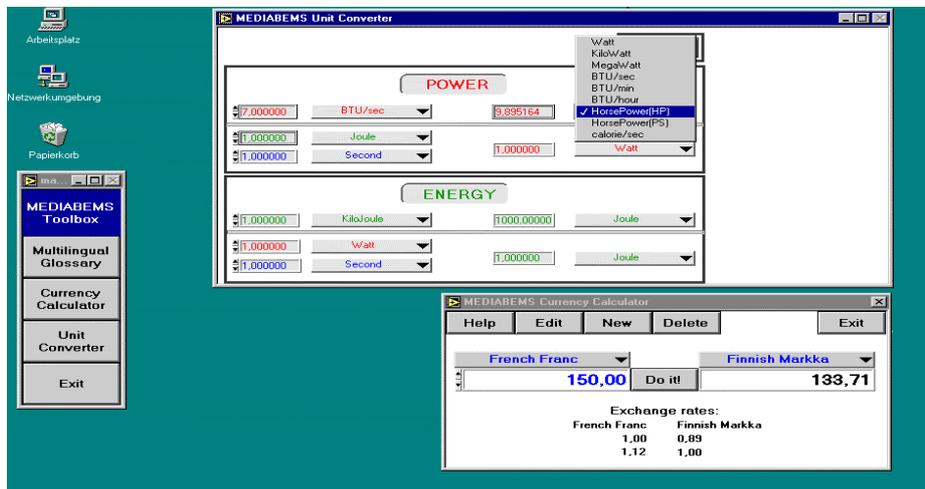


Abb. 4: Die Applikation *Toolbox* begleitet die Lehrsoftware "Mediabems" und beinhaltet drei Tools: Englisch-Französisch-Deutsch-Griechisches Glossar, Währungsumrechner, Energieeinheitenumrechner

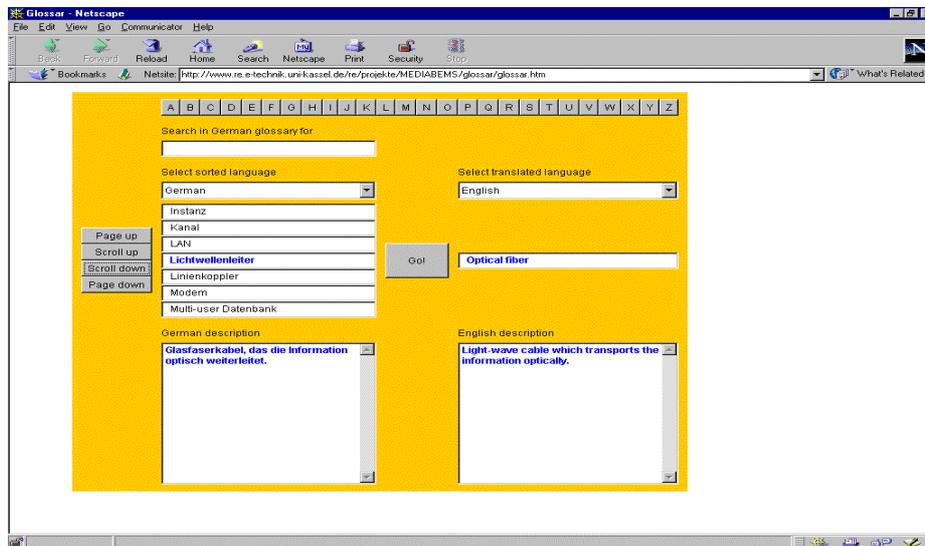


Abb. 5: Java-Applikation "Mehrsprachiges Glossar"  
<http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/re/projekte/MEDIABEMS/glossar/glossar.htm>



### 3.5 Internet-Anwendungen

Die o.g. Anwendungen können auch als Java- Applikationen programmiert werden, so daß sie vom Internet Browser ausgeführt werden können. Dabei lädt der Browser die Applikation automatisch beim Aufruf der Seite und führt sie auf dem lokalen Rechner aus.

## 4 Entwicklung von Lehreinheiten - Beispiel "HERMES"

Ziel des Projektes war die Erstellung einer multimedialen Lehrsoftware für die verschiedenen regenerativen Energietechnologien und -systeme. Zielgruppe sind in erster Linie Gymnasialschüler und -lehrer. Die Lehrsoftware wird in Form einer CD publiziert.

Die Software besteht aus mehreren Modulen, die Technologien aus den Gebieten Photovoltaik, Solarthermie, Solare Architektur, Windenergie, Geothermische Energie, Wasserkraft und Biomasse erläutern. Ein letztes Modul behandelt die allgemeine Problematik *Energie und Umweltbelastung*.

Für jede der o.g. Technologien existiert eine autonome Lehreinheit (Modul). In jedem Modul werden einheitlich folgende Aspekte berücksichtigt:

- Historische Entwicklung
- Theoretische Grundlagen
- Weltpotential und Wirtschaftlichkeit
- Umweltaspekte
- Technische Konzepte
- Anwendungsbeispiele
- Simulation

Die Benutzeroberfläche ist in vier Bereiche geteilt :

- Der Titel des aktuellen Kapitels



- Der zentrale und größte Teil enthält den Inhalt der Lehreinheit (Texte, Bilder, Animationen, Videos, Hot-Shots, Hyperlinks etc.)
- Der rechte Teil der Oberfläche enthält Schalter, die durch einen Mausklick zu einem anderen Modul der Software führen.
- Der untere Teil enthält die Navigations-, Glossar-, Bookmarks- und Hilfeknöpfe.

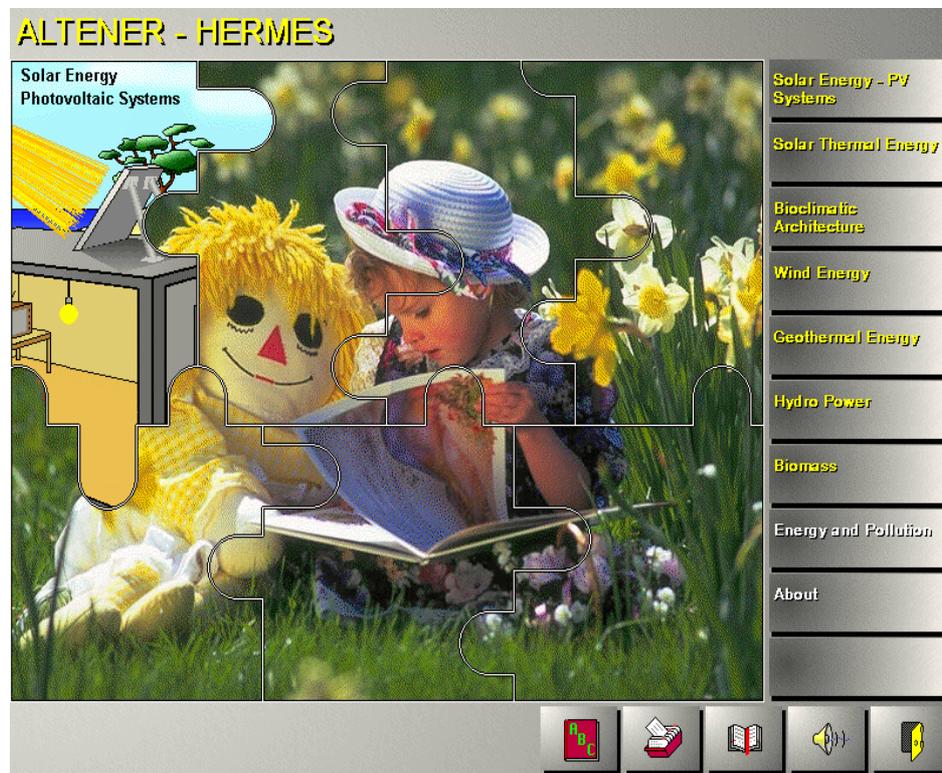


Abb.6: Einführungssequenz der HERMES-CD



## **5 Laufende Aktivitäten**

### **5.1 MEDIABEMS**

Eine multimediale Lehrinheit zum Thema Energiemanagement im Gebäude wird gerade programmiert. Die Aktion findet im Rahmen des SAVE - Programms der Europäischen Union (DG XVII) statt. Die Universität Gesamthochschule Kassel/Rationelle Energiewandlung, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat/Laboratoire Sciences de l'Habitat (Frankreich), Universität Athen/Group of Building Environment Studies (Griechenland) und Sigma Consultants (Frankreich) nehmen an dem Projekt teil.

### **5.2 AVALANCHE**

Die Universität Gesamthochschule Kassel/Rationelle Energiewandlung und zehn andere Europäische Partner aus der Industrie und der Forschung organisieren eine globale Simulation regenerativer Energiesysteme basierend auf "Internet-weit" verteilten Datenbanken. Das Projekt wird im Rahmen des EU-Programms JOULE (DG XII) durchgeführt.

### **5.3 VIRTUELLES LABOR**

Die Programmierung eines virtuellen Labors und die Ausbildung von Ingenieuren und Wissenschaftlern in dem Bereich der regenerativen Energien an der Universität Gesamthochschule Kassel/Rationelle Energiewandlung wird durch das EU-Programm ADAPT (DG V) unterstützt.



## **Regelung und Zustandsüberwachung von Windkraftanlagen - Methoden des Rapid Prototyping -**

Manfred Mevenkamp, Josef Petschenka  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-0, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: jpet@iset.uni-kassel.de

### **1 Einleitung**

Die Windenergienutzung hat in Europa seit Ende der achtziger Jahre eine boomartige Entwicklung genommen. In Deutschland wurden in den letzten 10 Jahren rund 5000 Anlagen mit einer installierten Leistung von inzwischen deutlich über 2000 MW errichtet. Dabei hat sich auch die Konstruktion und die Technik der Anlagen mit einer enormen Dynamik entwickelt. Abb. 1 zeigt die Entwicklung der Baugrößen der am Markt verfügbaren Anlagen in den neunziger Jahren. Die heutigen Anlagen der Megawattklasse haben bei etwa dreifachem Rotordurchmesser eine um den Faktor zehn höhere Leistung als die vor 10 Jahren verfügbaren. Dabei wurden zum Teil neue Triebstrangkonzepete entwickelt und am Markt etabliert. Diese dynamische Entwicklung der Anlagentechnik wurde u. a. durch den breiten Einsatz von Simulationswerkzeugen ermöglicht.

Generell ist in der modernen Geräteentwicklung, speziell im Bereich der Steuergeräte und Regelungssysteme, die Verkürzung der Entwicklungszeit zu einem entscheidenden Faktor für die erfolgreiche Markteinführung eines Systems geworden. Dabei gehört die Simulationstechnik zu einem der wichtigsten Entwicklungswerkzeuge. Sie bietet vielseitige Entwurfsunterstützung und ermöglicht die Fehlerminimierung und Qualitätssicherung durch einfache, reproduzierbare Testroutinen, so daß einsatzfähige Prototypen schneller verfügbar werden. Im folgenden wird die Methodik des *Rapid Prototyping* am Beispiel der Entwicklung eines Steuerungs- und Regelungssystems für moderne Großwindkraftanlagen dargestellt.

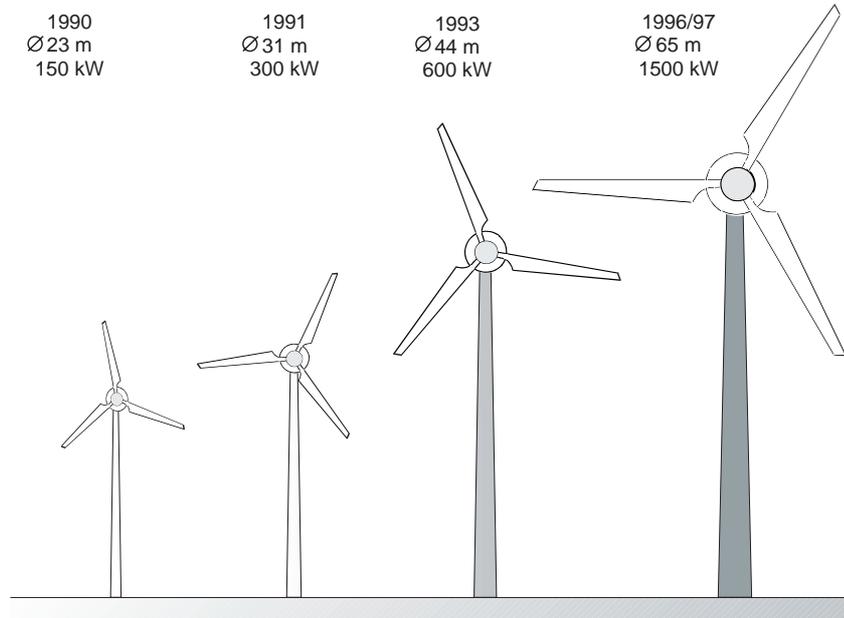


Abb. 1: Entwicklung der Baugröße moderner Windkraftanlagen

## 2 Simulationsgestützte Geräteentwicklung

Die simulationsgestützte Geräteentwicklung erfordert Entwicklungsumgebungen, die flexibel, leistungsfähig und einfach handhabbar sein müssen. Für den theoretischen Entwurf und die Methodenentwicklung ist dabei eine möglichst nahtlose Verbindung von Simulationsumgebung und mathematisch-regelungstechnischen Werkzeugen unerlässlich. Moderne Entwicklungsumgebungen erlauben nach Abschluß des Reglerentwurfs außerdem die Extraktion und direkte Umsetzung der Regelalgorithmen in C-Code. Die Schnittstelle für die C-Routinen sollte dabei für Simulationsumgebung und Zielsystem kompatibel sein, so daß der Code später ohne Änderungen in das Zielsystem eingebunden werden kann. Abb. 2 zeigt die Schritte vom Entwurf eines Reglers bis zur Software-in-the-loop-Simulation.

Für den Test von Prototypen sollte ein Entwicklungssystem darüber hinaus auch Hardware-in-the-loop-Simulationen unterstützen (Abb. 3). Hierzu muß das Simulationssystem über ein entsprechendes I/O-Interface verfügen (siehe Abschnitt 4), mit dem eine Verbindung zum Mikrocontroller-Regelungssystem hergestellt werden kann.

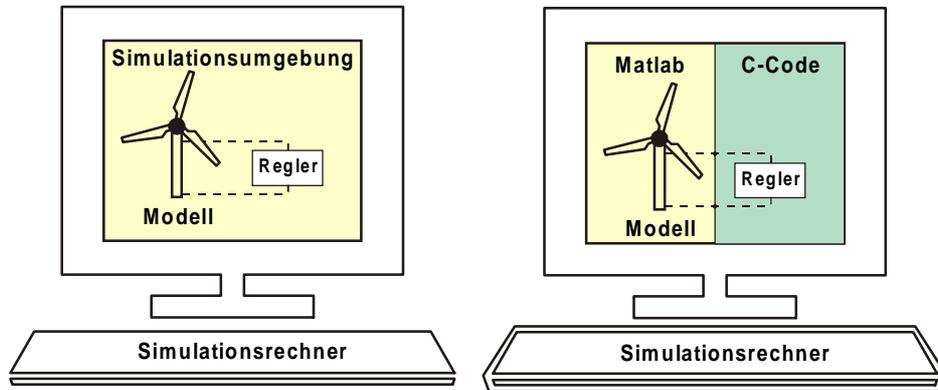


Abb. 2: Reglerentwurf und Software-in-the-Loop-Simulation

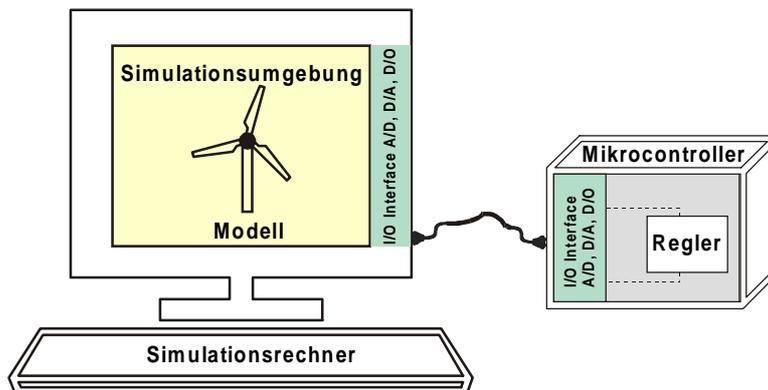


Abb. 3: Hardware-in-the-Loop-Simulation des Steuerungs- und Regelungssystems

In dieser Umgebung kann sowohl die Funktion als auch das Zeitverhalten des gesamten Steuerungs- und Regelungssystems in allen relevanten Betriebssituationen relativ schnell unter Echtzeitbedingungen getestet werden. Für bestimmte Teile der Betriebsführung eines Systems, z.B. einer Windkraftanlage, ist dies sogar die einzige Testmöglichkeit, da einige Betriebszustände oder bestimmte Störungen während der Inbetriebnahme normalerweise überhaupt nicht auftreten.

Nach Abschluß dieser Entwicklungsphase kann das Regelungssystem unmittelbar, ohne weitere Konfigurationsänderungen in der realen Anlage eingebaut und getestet werden. (Abb. 4). Hier besteht die Möglichkeit, das Verhalten des geregelten Systems durch Messungen zu dokumentieren und mit den Off-line-Simulationen zu vergleichen.

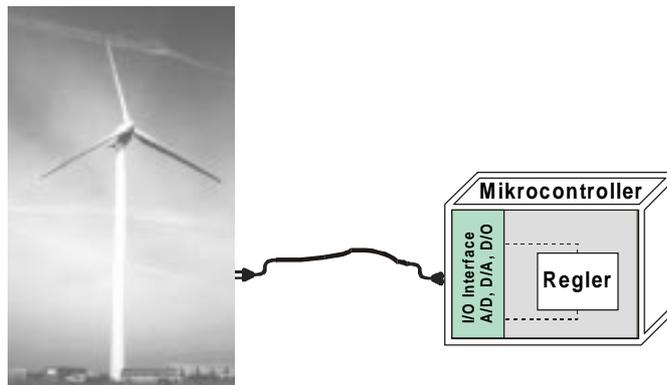


Abb. 4: Test des Steuerungs- und Regelungssystems an der realen Anlage

### 3 Regelung einer Großwindkraftanlage

Neben der Konstruktionstechnik spielt für die weitere Entwicklung von Windkraftanlagen besonders die Regelungstechnik eine große Rolle. Dies gilt vor allem für die Anlagen der Megawattklasse, bei denen man von der rein aerodynamischen Leistungsbegrenzung (Stall-Effekt) zunehmend zu einer Anlagentechnik übergeht, die durch aktive Blattverstellung und drehzahlvariable Generatorsysteme sehr weitgehende regelungstechnische Eingriffsmöglichkeiten eröffnet.

Aus der Sicht der Regelungstechnik stellen sich Anlagen dieser Art als nichtlineare Mehrgrößensysteme dar (Abb. 5). Der Entwurf hat dabei unter Berücksichtigung des Kurzzeitverhaltens der unterlagerten Regelkreise verschiedenste Optimierungskriterien bezüglich des Betriebsverhaltens der Anlage zu erfüllen, wie etwa

- die Maximierung der Energielieferung
- die Begrenzung der Leistung im Volllastbereich (Überlastschutz des Generatorsystems)



- die Begrenzung der Drehzahl (Auswirkung auf aerodynamische Kräfte und Geräusch)
- die Reduktion der mechanischen Beanspruchungen

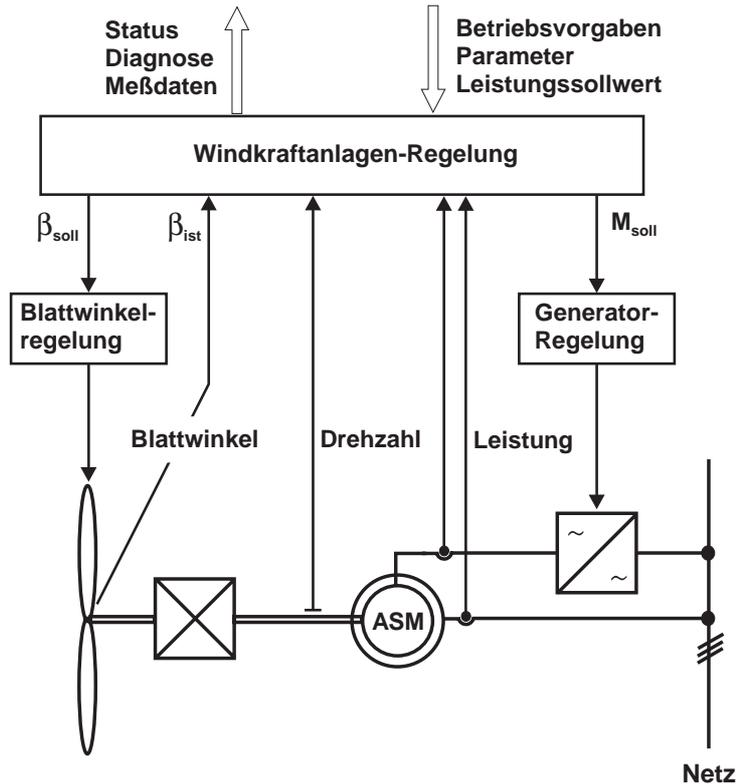


Abb. 5: Regelungsstruktur einer Windkraftanlage

Aufgabe der Regelung ist die entsprechend dieser Kriterien optimierte Sollwertvorgabe für die Blattwinkelverstellung und das Generatormoment sowie die Überwachung diverser Sicherheitskriterien in den verschiedenen Betriebszuständen. Hinzu kommt die Umsetzung externer Vorgaben, wie Leistungsbegrenzung u. ä. In modernen Windkraftanlagen werden für diese Regelungsaufgaben Mikrocontroller eingesetzt.

Die Großwindkraftanlage TW 1.5 der Tacke Windenergie GmbH ist eine moderne Anlage der Megawattklasse mit einer Nabhöhe von 67 – 80 m, 65 m Rotordurchmesser und einem Generatorsystem mit einer doppeltgespeisten Asynchronmaschine von 1500 kW Nennleistung.

Für diese Anlage wurde eine neuartige Regelung entworfen, die eine gezielte Reduktion der mechanischen Beanspruchungen ermöglicht /CASELITZ 1997/, /KRÜGER 1998/. Kern des neu entwickelten Regelalgorithmus ist ein Schätzfilter zur Bestimmung der nicht direkt meßbaren Kräfte und Momente am Rotor (Abb. 6). Die wesentlichen Belastungsgrößen der Anlage werden dadurch direkt als Regelgrößen verfügbar und können entsprechend den jeweiligen Entwurfsanforderungen beeinflußt und begrenzt werden. Analytische Verfahren sind bei diesem stark nichtlinearen System nur sehr beschränkt einsetzbar.

Somit basiert die Entwicklung der Reglerstruktur und die Auslegung der Reglerparameter wesentlich auf einer detaillierten Modellbildung und der Simulation repräsentativer Lastfälle.

Als Hardwareplattform der Regelung dient ein VMEbus-System bestehend aus einem 68k-Prozessorboard, diversen I/O-Modulen und einem VMEbus-IndustriePC für die Meßdatenerfassung und Visualisierung. Das System ist so konzipiert, daß es für FuE-Zwecke parallel zu einer vorhandenen Anlagensteuerung eingesetzt werden kann und durch Umschaltung zwischen beiden Controllern vergleichende Untersuchungen bezüglich der Regelziele ermöglicht.

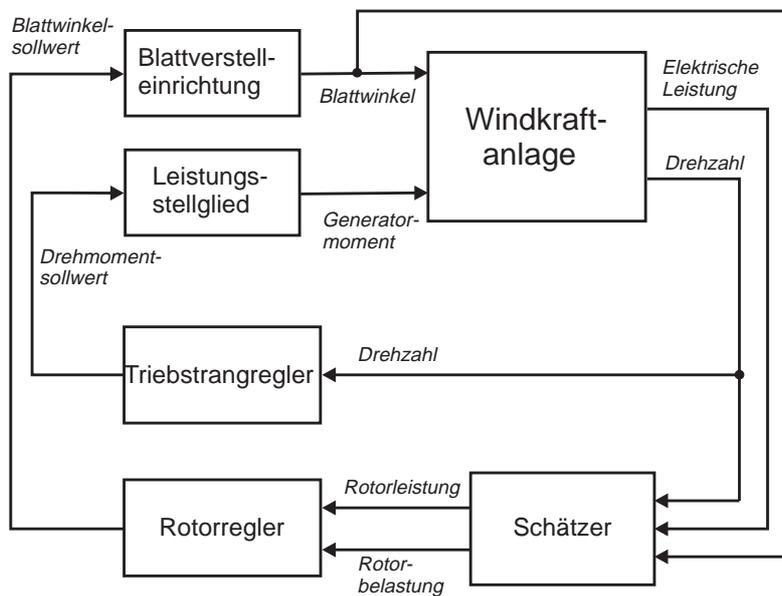


Abb. 6: Prinzip einer WKA-Regelung mit Belastungsschätzer

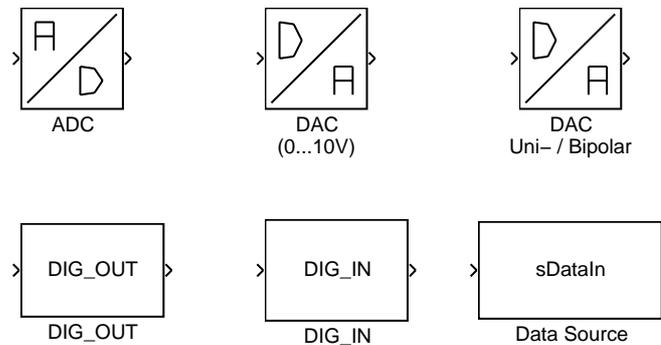


Abb. 7: Blockbibliothek der I/O-Schnittstellen

#### 4 Simulationsbasierte Entwurfs- und Testumgebung

Die zum Test von Mikrocontrollern aufgebaute Simulations- und Testumgebung basiert auf einem VMEbus-System des Typs HP 9000/748i. Das Prozessorboard stellt eine Workstation der HP 9000/700-Serie dar, auf der unter HP-UX jede für diese Familie verfügbare Standardsimulationssoftware betrieben werden kann. Ein zweites Board enthält die I/O-Module für die Ein- und Ausgabe analoger und digitaler Signale.

Als Simulationssystem ist Matlab 5.2/Simulink 2.2 installiert, so daß neben der grafischen Oberfläche für die Modellbildung und Simulation eine breite Palette von mathematisch-regelungstechnischen Funktionen und Optimierungsroutinen zur Verfügung steht. Die Simulationsschnittstellen zu den I/O-Modulen wurden in C geschrieben und in Form einer Blockbibliothek angelegt (Abb. 7). Die Signalausgabe erfolgt also durch Einfügen entsprechender Blöcke in ein Simulink-Modell. Es wird kein zusätzliches echtzeitfähiges Prozessorsystem für die Hardware-in-the-Loop – Simulation benötigt.

Die Einhaltung der Echtzeitbedingung bei der Berechnung der Simulationsschritte wird in den Schnittstellenroutinen durch Vergleich der Simulationszeit mit der Systemzeit (Auflösung: 1 µsec) erzwungen. Einschränkungen ergeben sich allerdings aus den Eigenschaften des UNIX-Betriebssystems, bei dem sich sporadische, kurze Prozeßunterbrechungen nicht vermeiden lassen. Diese bewegen sich im Millisekundenbereich. Dem steht der Vorteil gegenüber, daß der gesamte Entwurf – Modellentwicklung und Validierung, Softwareeinbindung und Hardwaretest – hier unter derselben Simulations- und Analysesoftware durchgeführt wird.

Trotz der eingeschränkten Echtzeiteigenschaften läßt sich mit dem System ein weiter Anwendungsbereich abdecken. Beispielsweise lassen sich bei allen extern getakteten Geräten die Softwarefunktionen ohne Probleme testen, da die Abtastfolge durch den Takt vorgegeben wird und keine zeitlich äquidistante Verarbeitung vorausgesetzt wird. Das ist auch bei der oben beschriebenen WKA-Regelung der Fall, die von der vorhandenen Anlagensteuerung getriggert wird. Den Testaufbau für die Prototypentwicklung dieser Regelung zeigt Abb. 8.



**Abb. 8: HIL-Simulationsumgebung zum Test der Regelung einer Windkraftanlage**

Bei dem hier entwickelten Regelsystem wird parallel zum Mikrocontroller ein PC-basiertes Meßsystem eingesetzt, mit dem neben den Meß- und Stellsignalen auch die internen Größen der implementierten Regelung visualisiert werden können. Abb. 9 zeigt als Beispiel den Verlauf der wesentlichen Stell- und Regelgrößen eines simulierten Lastfalls, wobei die Werte für das Biegemoment an den Rotorblättern aus dem implementierten Schätzfilter ausgelesen werden. Die durch die Regelung erreichte Reduktion der Spitzenbelastungen an den Rotorblättern läßt sich anhand solcher Testläufe aussagekräftig darstellen.



## 5 Ausblick

Die hohe Bedienerfreundlichkeit der dargestellten Entwicklungsumgebung wird in erster Linie dadurch erreicht, daß der Zugriff auf die I/O-Hardware aus demselben Betriebssystem heraus erfolgt, unter dem auch die Simulationsoberfläche läuft. Die hierfür entwickelten Schnittstellenroutinen (C MEX S-Functions) sind soweit portabel gestaltet, daß eine Portierung auch auf eine PC-Plattform möglich ist.

Die Vorteile derartiger HIL-Simulationsumgebungen bestehen in der einfachen Handhabung, in kurzen Einarbeitungszeiten und in der Minimierung von Fehlerquellen beim Übergang von der Offline-Simulation zum Hardwaretest. Dabei ist die Anwendung nicht auf die Controllerentwicklung beschränkt. Die beschriebene Umgebung wird derzeit z. B. auch zur Generierung von Testsignalen für die Auslegung und Konfiguration eines Fehlerfrüherkennungssystems für Windkraftanlagen eingesetzt.

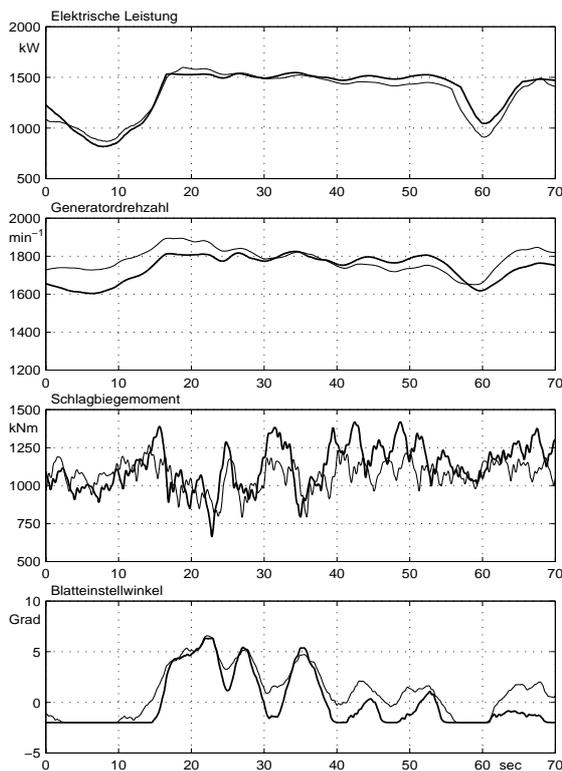


Abb. 9: Ergebnis eines HIL-Tests des Prototypen der Windkraftanlagenregelung



## Literatur

- /CASELITZ 1997/ P. Caselitz, J. Giebhardt, T. Krüger, M. Mevenkamp, J. Petschenka, M. Reichardt, "Neue Verfahren zur Regelung von Windkraftanlagen", "Forschungsverbund Sonnenenergie – Themen 96/97: Energie aus Sonne und Wind, Köln, 1997
- /CASELITZ 1998/ P. Caselitz, T. Krüger, J. Petschenka, M. Reichardt, „Regelung von Großwindkraftanlagen für Standorte in Mittelgebirgslagen“, Abschlußbericht
- /KRÜGER 1998/ T. Krüger, „Regelungsverfahren für Windkraftanlagen zur Reduktion der mechanischen Belastung“, Dissertation, Universität Gh Kassel, 1998
- /KRÜGER 1998/ T. Krüger, M. Mevenkamp, J. Petschenka, M. Reichardt, „Simulationsgestützte Prototypentwicklung der Regelung einer Großwindkraftanlage“, 12. ASIM-Symposium Simulationstechnik in Zürich, Posterband, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998



## **Finite-Elemente-Modellierung von Rotorblättern für Windkraftanlagen**

Rainer Osthorst  
aerodyn Energiesysteme GmbH  
Proviahausstr. 9  
24768 Rendsburg  
Tel.: (04331) 1275-22, Fax: (04331) 1275-55  
e-mail: aerodyn@t-online.de  
www.aerodyn.de

### **1 Einleitung**

Windenergieanlagen sind anspruchsvolle technische Anlagen, die nur mit modernsten Konstruktionsmethoden zu hoher Wirtschaftlichkeit weiterentwickelt werden können. Die genaue Simulation des gesamten Systems als auch einzelner Bauteile mit ihren speziellen Fragestellungen ist daher von großer Bedeutung.

Am Beispiel des Rotorblattes von Windenergieanlagen wird in diesem Artikel die besondere Problematik eines Bestandteils der Gesamtanlage aufgezeigt und die Modellbildung der verschiedenen Aufgabenstellungen, die sich im Konstruktionsablauf ergeben, dargestellt.

### **2 Das Bauteil Rotorblatt**

#### **2.1 Anforderungen an Rotorblätter**

Windenergieanlagen sind Investitionsgüter, deren statische Tragfähigkeit und Betriebsfestigkeit in der Regel für zwanzig Jahre nachgewiesen werden. Steigender Kostendruck und kürzere Entwicklungszeiträume führen zum Einsatz aufwendiger Berechnungsmethoden. Die Finite Elemente Methode wird für zahlreiche Bauteile angewendet. Hervorzuheben sind Rotornaben, Maschinenträger, kraftübertragende Maschinenbauteile und Detailuntersuchungen. Diese Konstruktionen werden als Guß- oder Schweißkonstruktion ausgeführt, deren statische Sicherheit und ausreichende Lebensdauer nachgewiesen werden.



Neben den genannten Bauteilen hat das Rotorblatt eine besondere Stellung. Es ist die aerodynamische Komponente der Anlage. Dadurch hat die äußere Form einen hohen Stellenwert und erfordert Werkstoffe und Fertigungsverfahren, die entsprechende Formbarkeit zulassen.

Die Konstruktion der Rotorblätter muß verschiedenen Anforderungen genügen. Diese lassen sich in die Gruppen Funktion und Struktur trennen.

### **2.1.1 Funktionale Aspekte**

- Energieertrag
- Geräuschemission
- Regelverhalten bei *Stall*-Anlagen
- Anschlußvorgaben zur Rotornabe
- Blitzschutz
- Fertigung
- Kosten

### **2.1.2 Strukturelle Erfordernisse**

- Statische Tragfähigkeit in extremen Situationen (z.B. 50-Jahresboe)
- Betriebsfestigkeit bei einer Lebensdauer von 20 Jahren
- Eigenfrequenzen
- Verformungen
- Beulstabilität

Es ist leicht verständlich, daß sich beide Gruppen nicht getrennt konstruktiv betrachten lassen, da starke Wechselwirkungen bestehen. So hängt der Biege­widerstand maßgeblich von den gewählten Profilen ab, die wiederum den Energieertrag bestimmen. Ein weiteres Beispiel sind die Fertigungsvorgaben, die Materialwerte der Faserverbundstrukturen wesentlich beeinflussen, aus denen sich Festigkeit und Steifigkeit der Konstruktion ergeben.



## 2.2 Geometrie

Das Rotorblatt wird in die geometrischen Bereiche Profilnase, Profilhahne, Gurt, Steg und Blattwurzel unterteilt. Die wesentliche tragende Komponente ist der Gurt. Er besteht weitgehend aus längsorientierten Fasern und stellt über 90% des Biege widerstandes dar.

Bei der Fertigung werden Ober- und Unterschale, Blattspitze sowie Stege einzeln gefertigt. Dabei dominiert das Laminieren von Hand. Nach dem flächigen Verkleben der Einzelteile werden noch Nacharbeiten zum verbessern der Oberfläche notwendig.

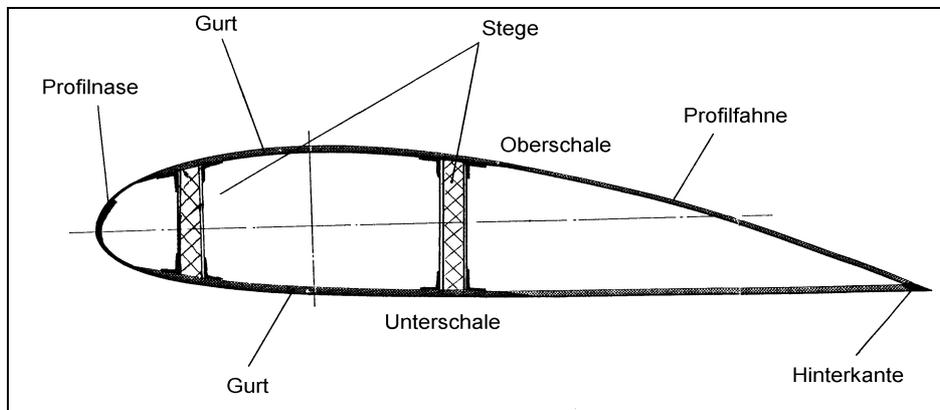


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Rotorblattes

## 2.3 Belastungen

Die auftretenden Belastungen werden in Lastfallsimulationen nach den Richtlinien von Prüfbehörden wie dem Germanischen Lloyd ermittelt. Dabei wird eine große Anzahl extremer Situationen unterschieden. Diese einzelnen Lastfälle werden am Bauteil untersucht und dimensionieren die verschiedenen Bereiche, deren einzelne Aufgaben im statischen System folgendermaßen definiert sind:

- Profilnase: Übertragung von Querkräften
- Profilhahne: nur aerodynamische Bedeutung
- Gurt: Übertragung der Biegemomente über Zug- und Druck
- Steg: Übertragung von Querkräften
- Blattwurzel: Übertragung der Biegemomente in die Rotornabe



Das statische System des Rotorblattes ist vereinfacht betrachtet nur ein Biegebalken mit verschiedenen Querschnitten und einer Streckenlast, die meistens einen etwa parabelförmigen Momentenverlauf ergibt. Als Anhaltspunkt für die auftretenden Belastungen dienen die Eckwerte für zwei Rotorblätter bei statischen extremen Lastfällen:

- $\approx 20$  m Blattlänge: Biegemoment an der Blattwurzel ist  $\approx 1000$  kNm
- $\approx 30$  m Blattlänge: Biegemoment an der Blattwurzel ist  $\approx 4000$  kNm

#### **2.4 Werkstoffe**

Die Forderung nach sehr guter Formbarkeit und geringem Gewicht des Rotorblattes führt zu einer Leichtbaukonstruktion in Schalenbauweise. Nutzt man die Kenntnisse aus der Belastungssituation, wird eine in Blattlängsrichtung abgestufte Steifigkeit erforderlich. Faserverbundwerkstoffe finden hier ideale Einsatzvoraussetzungen.

Faserverbundwerkstoffe für Rotorblätter werden vorwiegend aus Glas- und Kohlenstoff in Polyester- oder Epoxidharz eingesetzt, wobei sich Kohlenstoffasern (CFK) bei großen Windenergieanlagen trotz der hohen Kosten durchsetzen. Die Fasern der Verstärkungsmaterialien werden meistens in Gelegen mit unidirektionaler oder multiaxialer Ausrichtung verarbeitet. Bei den multiaxialen Gelegen sind dem Konstrukteur kaum Grenzen in Bezug auf die Kombination verschiedener Faserorientierungen gesetzt. Als Standard haben sich  $\pm 45^\circ$ -Gelege durchgesetzt, die optimal zur Aufnahme von Schubspannungen geeignet sind. Die Steifigkeiten und Festigkeiten der einzelnen Gelege werden berechnet und in Laborversuchen überprüft.

Als Kernwerkstoff wird teilweise PVC-Schaum benutzt. Die Schalen und die Stege werden einzeln laminiert und anschließend verklebt.

### **3 Konstruktionsprozess**

#### **3.1 Auslegungsphase: Querschnitts- & Balkenmodelle**

Mit den beschriebenen Anforderungen und den weiteren Randbedingungen beginnt ein iterativer Prozess, der vielfältige Untersuchungen beinhaltet. Unter den gegebenen Voraussetzungen wird eine Vorauslegung festgelegt, die als Eingangsgröße für die Berechnung der Belastungen genutzt wird. Für die Lastfallberechnungen werden aerodynamische Daten, Blattsteifigkeiten und die Massenverteilung benötigt. Äußere Kontur, verwendete Materialien und Fertigungsverfahren werden in dieser Phase der Konstruktion entschieden.



Die nun erneut berechneten statischen und dynamischen Belastungen werden für eine verfeinerte Konstruktion des Rotorblattes verwendet, wobei im wesentlichen der Laminatplan noch Änderungen erfährt.

In dieser Auslegungsphase werden einfache Rechenmodelle mit geringen Rechenzeiten, z.B. Balkenmodelle und analytische Ansätze benutzt. Speziell auf diesen Anwendungsfall zugeschnittene Programme erlauben eine einfache Eingabe der Geometrie, des Laminatplanes und der Werkstoffdaten. Die analytischen Ansätze lösen die Fragestellungen der Statik, Betriebsfestigkeit und der Beulstabilität sehr schnell. Zusätzlich generierte Balkenmodelle, die aus den vorhandenen Eingaben automatisch erzeugt werden, erlauben die Berechnung von Frequenzen und nichtlinearen Verformungen.

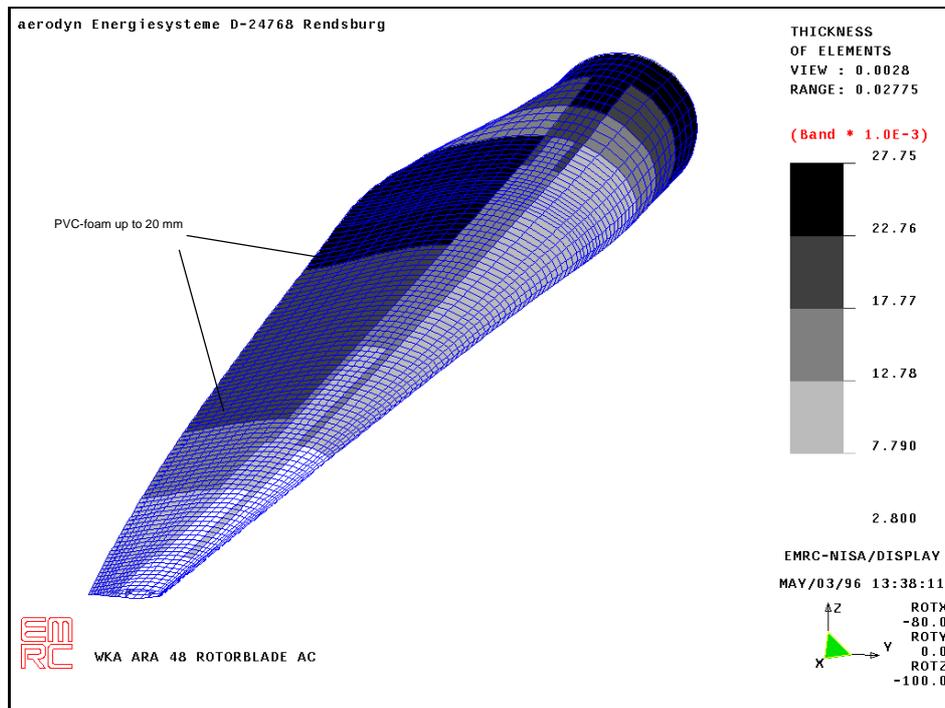


Abb. 2: Dicke der Elemente [m]



### 3.2 Nachweise und Optimierung: Schalenmodelle

Nach Abschluß der Auslegung sind die Unterschiede zur endgültigen Konstruktion nur noch gering. Anschließende Untersuchungen mit FEM Schalenmodellen dienen der Optimierung und auch der Nachweisführung von Fragestellungen, für die analytische Ansätze nicht mehr gültig oder zu konservativ sind. Dies betrifft z.B. Bereiche mit mehrdimensionalen Spannungszuständen und Beulfelder, deren Einspannbedingungen an den Rändern nicht eindeutig beschrieben sind.

Um die genauer zu untersuchenden Bauteilbereiche abzubilden, könnte man FEM Modelle von Teilen der Gesamtstruktur erstellen. Dabei entstehen jedoch Probleme bei der Wiedergabe der Anschlußsteifigkeiten sowie der Lasteinleitung. Es hat sich als praktikabel erwiesen, das komplette Rotorblatt abzubilden und nur die Netzfeinheit regional zu variieren.

Wird bei Balkenmodellen das Finite Element noch über seine Steifigkeiten für Biegung und Torsion, die Querschnittsfläche, den E-Modul des Werkstoffes und die Koordinaten der Endknoten beschrieben, so müssen für Schalenelemente nur die Koordinaten der Elementknoten (Eckpunkte), die Dicke und der Werkstoff angegeben werden. Die vorausgehende Berechnung von Steifigkeiten bzw. Trägheitsmomenten entfällt. Schalenmodelle werden stärker als Balkenmodelle über ihre Geometrie beschrieben.

Faserverbundstrukturen bestehen aus einer großen Anzahl von Gelegelagen die übereinander geschichtet sind. Im Blattanschlußbereich können dies mehr als 50 Lagen sein. Moderne FEM Systeme bieten Composite Schalenelemente an, die auf die besonderen Erfordernisse bei Eingabe, Berechnung und Auswertung der Ergebnisse abgestimmt sind.

Das FEM Modell besteht aus regional verschiedenen Lagenabfolgen und es werden für jede einzelne Lage an jedem Punkt in der Struktur Spannungen und Dehnungen berechnet. Die hohe Anzahl an Eingabewerten für die Beschreibung von Geometrie und Laminatplan macht aufwendige Kontrollen notwendig. Bei aerodyn wurde eine eigene Software zur grafischen Kontrolle geschaffen. Diese stellt regionale Laminatdicken farblich dar und ermöglicht auch die Auswertung einzelner Gelegearten. Auf diese Weise ist eine Überprüfung der großen Datenmenge des Rechenmodells möglich.

Es wird deutlich, dass diese Berechnungen durch die genaue geometrische Beschreibung und die Angabe der örtlichen Lagenabfolge vielfach komplexer sind. Dabei ist die eigentliche Berechnung zumindest für lineare statische Untersuchungen, denen das Hauptaugenmerk gilt, ohne Mehraufwand. Dies gilt jedoch nicht für nichtlineare Berechnungen und Beulberechnungen, da Schalenelemente empfindlicher auf die einzelne Elementform und die Netzfeinheit reagieren. Daher sind die Ergebnisse kritisch zu



betrachten. Ein Einsatz im iterativen Auslegungsprozess ist aus diesen Gründen nur bedingt sinnvoll.

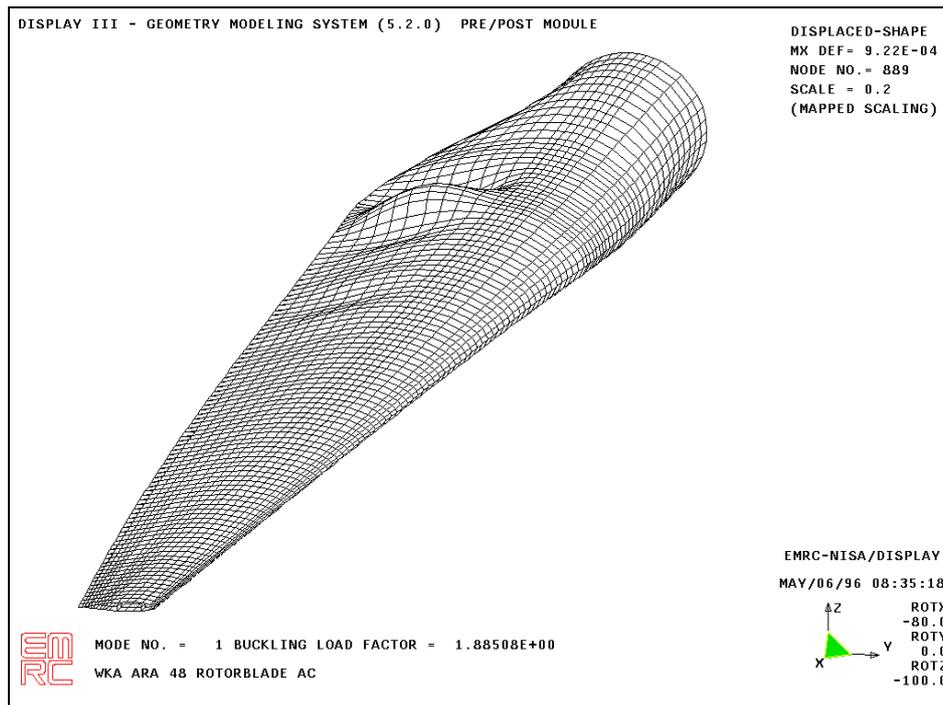
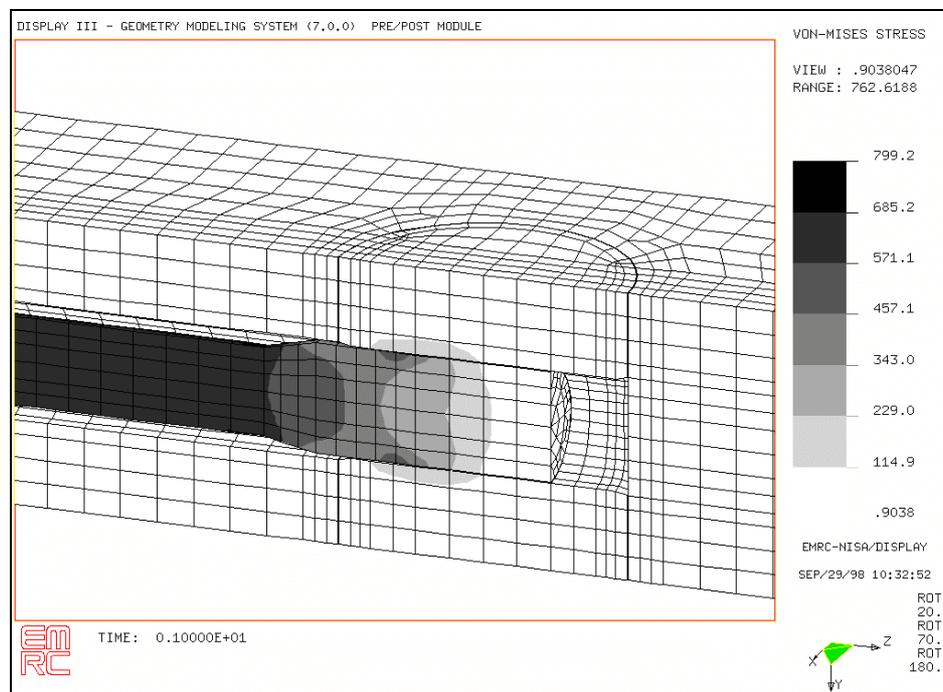


Abb. 3: Beulform mit kleinstem Lastfaktor

Beulberechnungen sind die besondere Stärke der Schalenmodelle. Durch die Wiedergabe der gesamten Struktur werden die Steifigkeiten im Bauteil vollständig dargestellt, so daß die Abschätzung von Randbedingungen und Stützwirkungen wie bei analytischen Ansätzen hinfällig wird. Weiterhin kann der wirkliche Kraftverlauf berücksichtigt werden, während bei herkömmlichen Ansätzen vereinfachte Annahmen getroffen werden müssen, die zu Unsicherheiten führen und daher auf der konservativen Seite liegen müssen. Durch die Verringerung von unnötigen Sicherheiten macht sich der Vorteil des aufwendigeren Modells direkt bezahlt.

### 3.3 Detailuntersuchungen: Volumenmodelle

Eine Analyse der dickwandigen Bereiche sowie von Verklebungen wird mit FEM-Volumenmodellen durchgeführt. Diese erlauben eine realitätsnahe Wiedergabe regionaler geometrischer Besonderheiten und Details sowie die Auswertung von dreidimensionalen Spannungszuständen.



**Abb. 4:** Spannungsbild eines /kea-Blattflansches

Anwendungen sind bei Rotorblättern z.B. die Blattanschlußbereiche. Eine Darstellung der Struktur über Linien (Balken) oder Ebenen (Schalen) ist kaum noch möglich und würde die Spannungen und Verformungen nicht ausreichend genau berechnen lassen. In der abgebildeten Berechnung wird der Querbolzen mit Kontaktelementen mit dem Laminat verbunden, wodurch sich die Unterscheidung des Kraftverlaufs bei Zug- und Druckbelastungen darstellen läßt.



### 3.4 Weitere Rechenmodelle

Die o. g. Balkenmodelle finden bei der Beschreibung der Gesamtanlage eine weitere Verwendung. Das FEM-Modell des Rotorblattes wird in das aerolastische Modell der Windenergieanlage übernommen, in dem auch alle anderen Komponenten (Nabe, Triebstrang, Turm, Fundament) abgebildet sind. Mit diesem Modell werden Dynamikuntersuchungen zur Beurteilung der aerolastischen Stabilität der Anlage sowie die Lastfallberechnungen durchgeführt.

Vervollständigt wird die Vielfalt der Rechenmodelle für das Bauteil Rotorblatt durch zwei- und dreidimensionale Fluidmodelle, die teilweise auf FEM und auch auf anderen Ansätzen beruhen. Modelle für die Strömungsrechnung beschreiben die Umgebung des Körpers und nicht das Bauteil selbst und stellen somit ein Außenmodell dar. aerodyn führt Fluiduntersuchungen in Zusammenarbeit mit der FH Kiel durch.

In einem weiteren Schritt ist die Integration von Fluid- und Strukturanalysen durchführbar, um die Auswirkungen von Verformungen auf die Umströmung und umgekehrt zu berücksichtigen. Dies wurde von aerodyn bisher jedoch nicht praktiziert.



**Bild 5:** Rotorblatt im statischen Belastungstest



#### **4 Zusammenfassung**

Aus der Kenntnis der vielfältigen konstruktiven Anforderungen an Rotorblätter werden Rechenmodelle erarbeitet, die den verschiedenen Fragestellungen mit eigens darauf abgestimmten Ansätzen gerecht werden.

Es kommen Balken- und Schalenmodelle sowie detailgetreue Volumenmodelle für verschiedene Zwecke zum Einsatz. Der Aufwand bei der Nutzung genauerer Modelle steigt erheblich. Deshalb ist die Anwendung dieser Modelle im täglichen Konstruktionsprozess nur sinnvoll, wenn Hilfsroutinen vorhanden sind, die wesentliche Arbeitsschritte bei Eingabe und Auswertung vereinfachen oder die Bauteildimensionierung verändert wird, wodurch ein Kostenvorteil den höheren Aufwand rechtfertigt.

Die Pflicht, getroffene Annahmen stets genau zu überprüfen, wird dem Konstrukteur bei keinem dieser Modelle abgenommen. Hier führt nur der Vergleich zwischen Versuchen an Probekörpern und Bauteilen mit den Berechnungen zu realistischen Annahmen und Ergebnissen.



## Online-Ermittlung der eingespeisten Windleistung für definierte Versorgungsgebiete

Cornel Enßlin, Martin Hoppe-Kilpper, Kurt Rohrig  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-0, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: krohrig@iset.uni-kassel.de

### 1 Einleitung

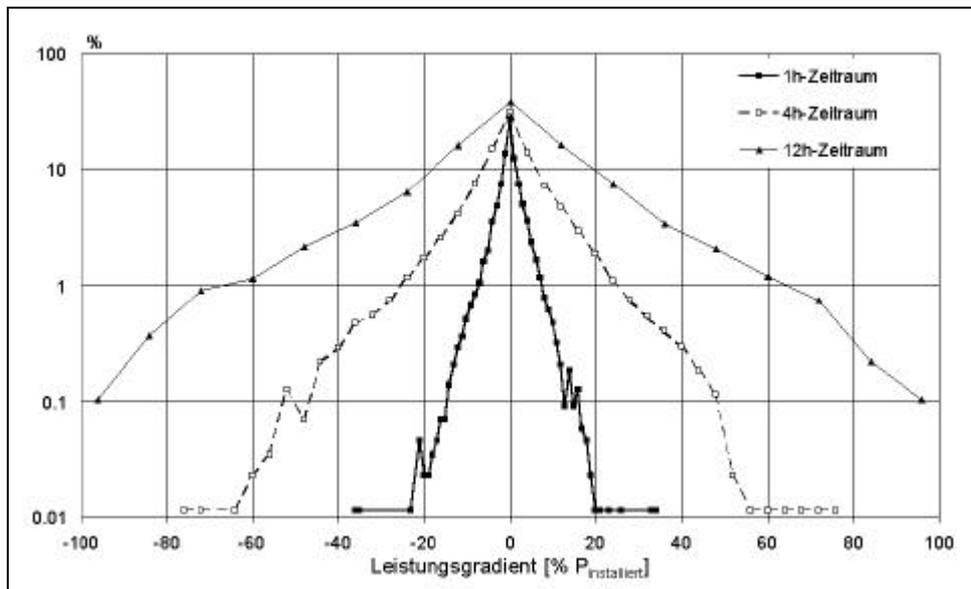
Bei einigen Energieversorgungsunternehmen (EVU) erreicht bereits heute die installierte Windleistung die Höhe der Minimallast der Netze. Bei Fortsetzung der jährlichen Installationsraten auch in den nächsten Jahren, wird die installierte Windleistung in weiteren Regionen Deutschlands diese Größenordnung erreichen und zum Teil sogar erheblich überschreiten. Bei dieser Entwicklung rücken Fragen zum Leistungsbeitrag der Windenergie und zu ihrem Einfluß auf den Betrieb thermischer Kraftwerke zunehmend in den Vordergrund.

Auch wird die Kraftwerkseinsatzplanung der Energieversorgungsunternehmen durch den Anstieg der installierten Windleistung zunehmend beeinflusst. Trotz der großen Bedeutung für das Lastmanagement und das Regelverhalten des thermischen Kraftwerksparks ist jedoch der tatsächliche, aktuelle Verlauf der eingespeisten Windleistung bislang wenig bekannt.

Der Zeitverlauf der Leistungserzeugung einzelner WEA wird im Minutenbereich ganz wesentlich von lokalen meteorologischen Gegebenheiten und dem individuellen Betriebsverhalten der Anlagen beeinflusst. Sehr große Leistungsgradienten ergeben sich beispielsweise, wenn während des Betriebs mit Maximalleistung die WEA-Betriebsführung automatisch eine Abschaltung aufgrund zu hoher Windgeschwindigkeiten auslöst. Solche kurzfristigen und individuellen Ereignisse spielen jedoch im großräumigen WEA-Verbund im allgemeinen eine untergeordnete Rolle. Der Zeitverlauf der WEA-Summenleistung ist geprägt durch das großräumige Wettergeschehen und, vor allem in den Sommermonaten, durch die tageszeitliche Erwärmung der Atmosphäre.

## 2 Bisherige Untersuchungen

Um das Zeitverhalten der Windeinspeisung in weiträumigen Versorgungsgebieten genauer zu untersuchen, wurde vom ISET 1996 im Auftrag eines großen Energieversorgungsunternehmens eine auf Meßdaten des „250 MW-Wind“ Programms gestützte repräsentative Summenganglinie für das gesamte Versorgungsgebiet berechnet und statistischen Analysen unterzogen. Durch eine gesonderte Untersuchung wurde die Zuverlässigkeit dieser Ergebnisse und ihre Stabilität hinsichtlich der zugrunde gelegten Meßstandortdichte für den Untersuchungszeitraum belegt. Die berechneten Summenganglinien wurden für erste energietechnische Untersuchungen sowohl hinsichtlich der Leistungsdauer als auch im Hinblick auf die Gradienten zwischen einzelnen Stundenwerten betrachtet.



**Abb. 1: Mehrstündige Leistungsänderungen der Windstromeinspeisung in Deutschland**

Die Ergebnisse einer entsprechenden Gradientenanalyse der Summenganglinie der über ganz Deutschland verteilten WEA sind in Abb. 1 zusammengefaßt. Sie zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gradienten zwischen Stundenwerten sowie die Leistungsänderungen in der längerfristigen Tendenz als 4 Stunden- bzw. 12 Stundenregression. Die Häufigkeitsverteilung aller Leistungsgradienten zwischen den einzelnen Stundenwerten dokumentiert die im Vergleich zu Einzelanlagen ausgeprägte Persistenz ("Gleichförmigkeit") der Summenleistung. Als maximale Gradienten wurden im Jahres-



gang ein Anstieg um 16 Prozent der installierten WEA-Leistung (29.10.96, 11 bis 12 Uhr) sowie ein Leistungsabfall um 15 Prozent (15.12.96, 12 bis 13 Uhr) ermittelt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 30 Prozent bleibt die Summenleistung von einem Stundenmittel zum nächsten in einem schmalen Band von einigen Prozent der installierten Leistung. Ein solches persistentes Verhalten ist auch für die mehrstündigen Regressionswerte zu erkennen, wobei die Aufspreizung der Gradientenintervalle zu beachten ist. Für den Anstieg oder Abfall der Summenleistung um 40 Prozent werden 4 Stunden benötigt.

### 3 Extrapolationsmodell

Die weitere Gültigkeit der allein aus gemessenen Leistungsdaten berechneten Summenganglinie ist abhängig von der Entwicklung der räumlichen Verteilung der Windenergieanlagen (WEA) im Versorgungsgebiet und der Weiterentwicklung der zum Einsatz kommenden WEA-Technik. Da aber eine fortlaufende Anpassung eines Fernmeßnetzes an die sich schnell ändernde Anlagenstruktur im Versorgungsgebiet aus Kostengründen nicht möglich ist, wurde am ISET ein Modell entwickelt, daß die zeitgleich eingespeiste Windleistung über berechnete Einzelleistungen aller WEA in frei definierbaren Versorgungsgebieten ermittelt. Dafür werden an ausgewählten Standorten gemessene Wind- und Leistungsdaten auf sämtliche, in der näheren Umgebung betriebenen Windenergieanlagen übertragen. Auf diese Weise wird für jede im Versorgungsgebiet betriebene Windenergieanlage ein Leistungssignal berechnet und zu einer Summenganglinie vereinigt.

Die Entwicklung und Verifizierung dieses Modells basiert auf langjährigen Erfahrungen und dem umfangreichen Bestand an Meßdaten und Auswertungen des „250 MW-Wind“ Programms. Bei der Berechnung der Leistungssignale der einzelnen Anlagen durch räumliche Ausbreitungsrechnungen von umliegenden Meßstandorten werden insbesondere zwei Fälle unterschieden:

- 1) Steht die Anlage in unmittelbarer Nähe einer Anlage gleichen Typs, die mit ISET-Fernmeßtechnik ausgestattet ist, wird die dort gemessene Leistung direkt zugeordnet. Bei Ausfall des Leistungssignals wird dieses über die gemessene Windschwindigkeit und die im „250 MW-Wind“ Programm bestimmte Leistungscharakteristik der betreffenden Anlage ermittelt.

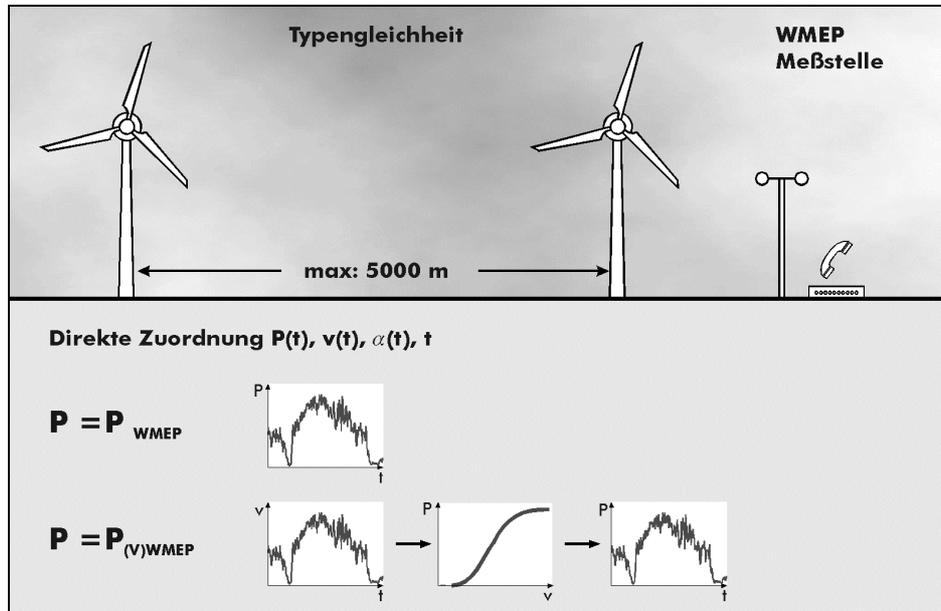
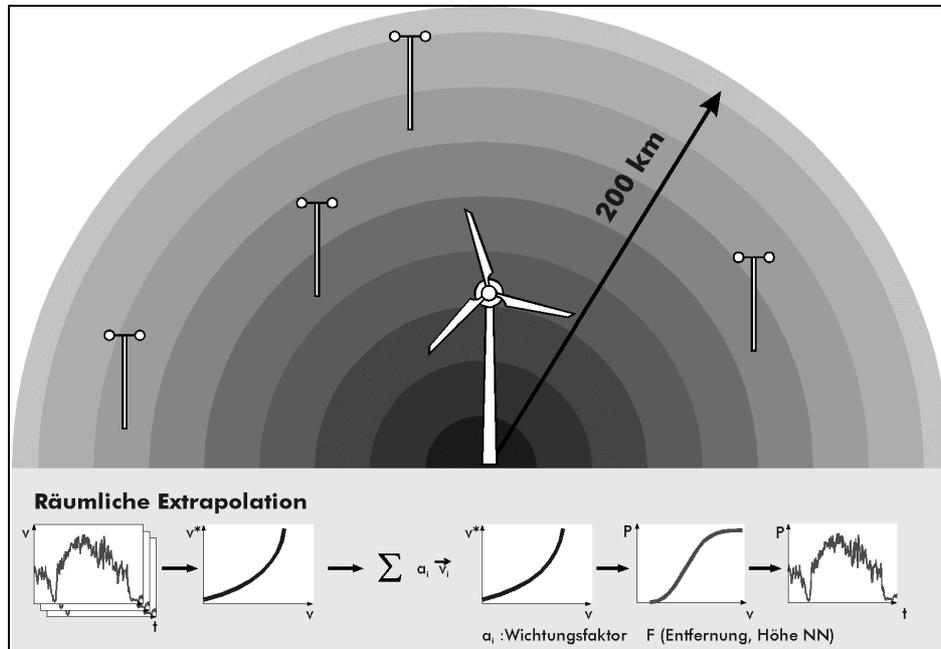


Abb. 2: ISET-Modell Fall 1 – direkte Zuordnung der Leistung

- 2) Ist eine direkte Zuordnung des Leistungssignals nicht möglich, wird auf drei benachbarte Windmeßstationen zurückgegriffen. Die dort gemessenen Windsignale werden über das logarithmische Höhenwindprofil auf eine störungsfreie Höhe (500 m) transformiert und durch räumlich gewichtete, vektorielle Addition auf den WEA-Standort extrapoliert. Diese Windgeschwindigkeit wird wiederum unter Berücksichtigung der zum WEA- Standort gehörigen Rauigkeitsparameter auf Nabenhöhe der Windenergieanlage transformiert.

Die von der Anlage abgegebene elektrische Leistung wird dann über die Leistungscharakteristik oder zertifizierte Leistungskennlinien berechnet. Durch die genaue Kenntnis des Betriebsverhaltens der im „250 MW-Wind“ Programm erfaßten Anlagentypen können insbesondere standortspezifische und saisonale Besonderheiten berücksichtigt werden.



**Abb. 3: ISET-Modell Fall 2– räumliche Extrapolation der Windgeschwindigkeit**

Hierzu werden die aus den Wind- und Leistungsmessungen des ISET gewonnenen Leistungscharakteristiken für jeden der im „250 MW-Wind“ Programm vermessenen WEA-Typen herangezogen. Dabei werden die folgenden Unterscheidungen getroffen:

- Standortkategorie: Zur Klassifizierung der Standortbedingungen werden diese in die Kategorien Küste, Norddeutsche Tiefebene und Mittelgebirge unterteilt.
- Jahreszeit: Zur saisonalen Differenzierung der Kennlinien wird in Sommer-(April – September) und Winterzeit unterschieden (Oktober – März).

Neben der genauen Kenntnis des WEA-Betriebsverhaltens (Leistungscharakteristik) ist die Ermittlung der Umgebungseinflüsse an den WEA-Standorten für die Modellbildung von großer Bedeutung. Dazu werden an allen ISET Meßstationen die Rauigkeitsparameter bestimmt und sämtliche anderen WEA- Standorte entsprechend klassifiziert.

Die Verifizierung des Modells geschieht vor allem durch Vergleich mit den Ganglinien aus gemessenen Leistungsverläufen sowie den monatlichen Energielieferungsberichten von über 1500 Windenergieanlagen. So zeigt Abb. 4 eine ausschließlich aus gemessenen Leistungssignalen erzeugte Summenganglinie ( $P_{gem}$ ) im Vergleich mit einer über das Berechnungsmodell durch räumliche Extrapolation berechneten Summenganglinie

(Pmod). Dem Beispiel liegen 130 weiträumig verteilte Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von jeweils 5 bis 500 kW und einer Gesamtleistung von 23,5 MW zugrunde. Bei der Modellrechnung wurden die Einzelleistungen der berücksichtigten Anlagen durch räumliche Extrapolation der Windsignale (Fall 2) ermittelt. Für den gesamten Betrachtungszeitraum von einem Monat beträgt die mittlere Abweichung der Modellganglinie lediglich 2,8 % bezogen auf die Gesamtleistung. Die maximale Abweichung beträgt dabei 1,9 MW unterhalb bzw. 1,5 MW oberhalb der gemessenen Ganglinie.

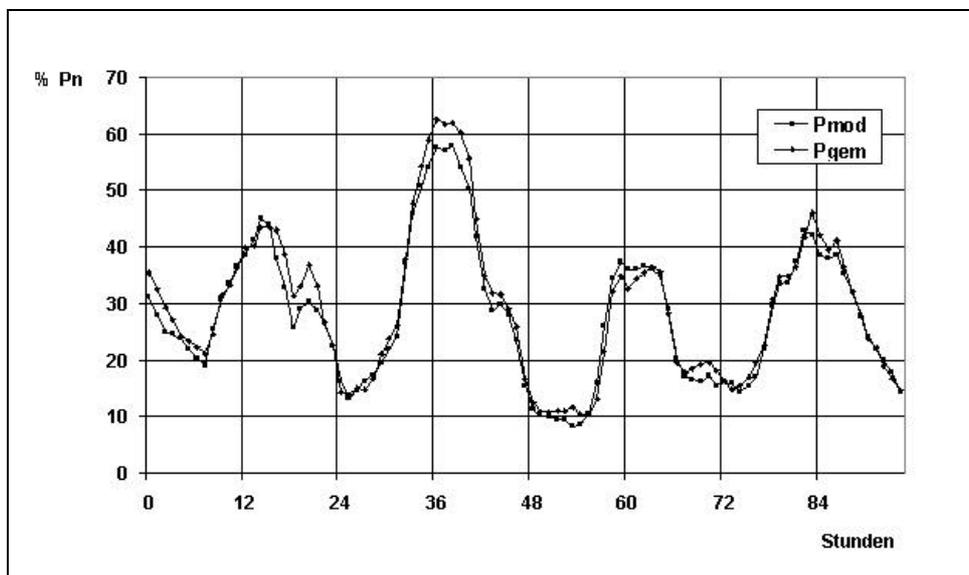


Abb. 4: Summenganglinie von 130 WEA 10.- 13. März 1996

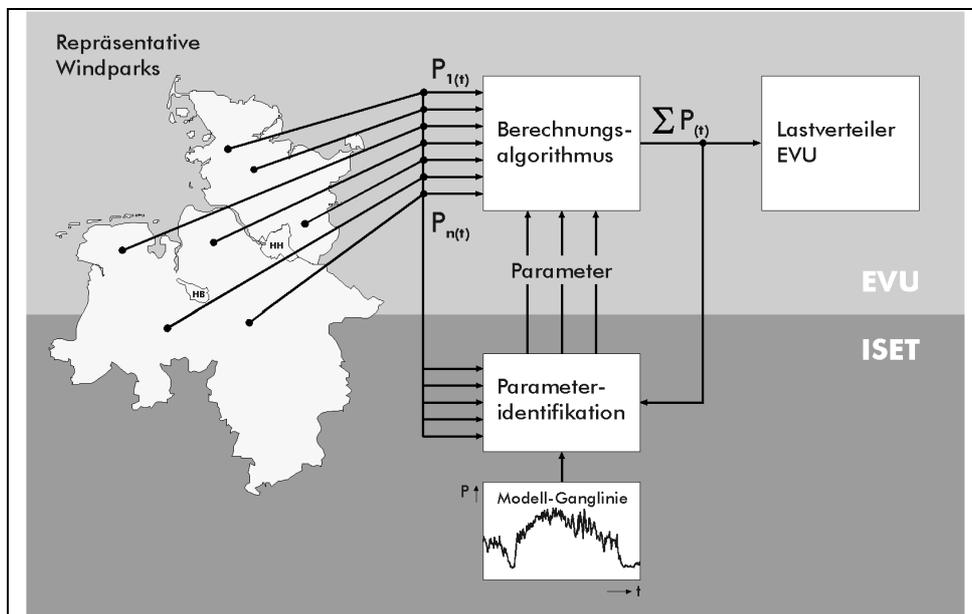
Für das Modell und die daraus berechneten Summenganglinien bestehen vielfältige Einsatzmöglichkeiten wie z.B. zur zeitnahen Ermittlung der eingespeisten elektrischen Arbeit aus Windenergie für beliebige Versorgungsgebiete, die Simulation von Ausbauszenarien, die Optimierung von Prognosemodellen für die Kraftwerkseinsatzplanung sowie für Modellrechnungen zur Online-Ermittlung der Windeinspeisung auf Grundlage ausgesuchter Referenzmessungen.

#### 4 Online-Ermittlung der eingespeisten Windleistung

Wichtige Ausgangsgrößen für die Kraftwerkseinsatzplanung größerer Energieversorgungsunternehmen sind neben meteorologischen Parametern die aktuelle bzw. zu erwartende Last, die Verfügbarkeit der Kraftwerke, die Bilanz des Stromaustausches mit



anderen Versorgungsunternehmen sowie die Berücksichtigung der notwendigen Reserverleistungen. Die Online-Erfassung der abgegebenen Leistung aller in einem Versorgungsgebiet betriebenen Windenergieanlagen kann als genauestes Verfahren zur Gewinnung von Basisdaten zur Lastprognose angesehen werden, wobei jedoch die meßtechnische Ausstattung sämtlicher WEA kaum zu realisieren ist. Da das in Kapitel 3 vorgestellte Berechnungsmodell die zeitgleich eingespeiste Windleistung mit relativ hohem Rechenaufwand ermittelt, ist es für die zeitnahe (online) Bestimmung ebenfalls nicht geeignet.



**Abb. 5: Online-Erfassung und Hochrechnung**

Diese Online-Ermittlung macht ein weiteres Berechnungsmodell notwendig, das die Übertragung von gemessenen Zeitverläufen der Leistung repräsentativer Windparks auf die Gesamteinspeisung aus Windenergieanlagen eines größeren Versorgungsgebietes ermöglicht.

Über umfangreiche Gleichungssysteme und Parameter, die auch die räumliche Verteilung der Windenergieanlagen berücksichtigen, wird die aktuell eingespeiste Windleistung für das betreffende Versorgungsgebiet ermittelt. Die Meßdaten der ausgewählten Windparks werden dazu über Standleitungen der Leitwarte übermittelt (vergl. Abb.5). Die für den Lastverteiler online berechnete Summenganglinie wird rückwirkend in regelmäßigen Abständen mit der über Extrapolation (vergl. Kapitel 3) von Wind- und Lei-

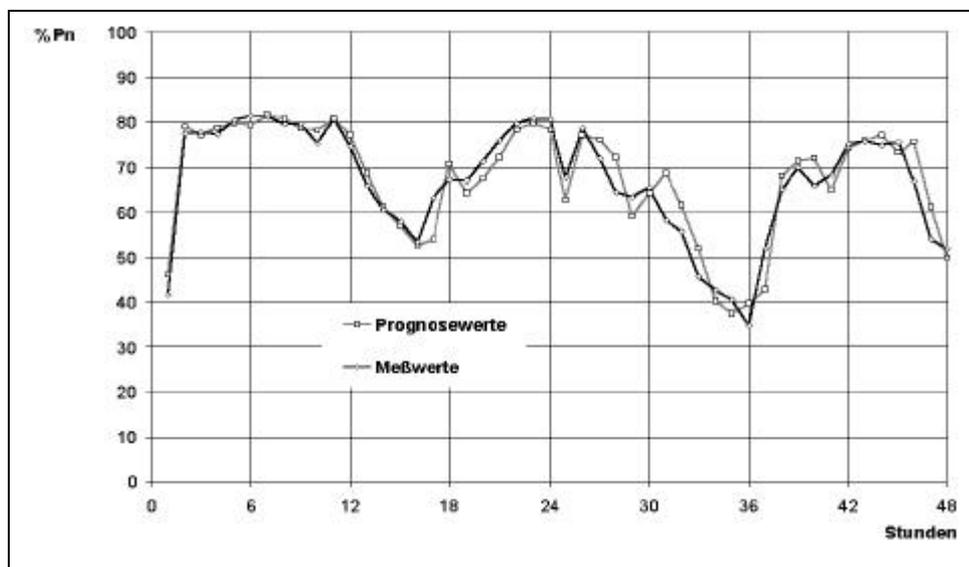


stungsdaten berechneten Summenganglinie verglichen und mittels Parameteroptimierung fortlaufend angepaßt und verbessert. Über diese regelmäßige Prüfung und Parameteranpassung ist eine sehr hohe Genauigkeit für das beschriebene Verfahren zu erzielen, das in Zusammenarbeit mit einem Energieversorgungsunternehmen entwickelt wird.

## **5 Ausblick**

Neben der genauen Kenntnis des statistischen Verhaltens der eingespeisten Windleistung ist die Vorhersage der kurz- bis mittelfristig zu erwartenden Leistung für die Kraftwerkseinsatzplanung und das Lastmanagement von Energieversorgungsunternehmen von zunehmender Bedeutung. Für die Prognose der Windleistung existieren bereits verschiedene Ansätze und Verfahren. Dabei basieren die Ansätze zur Windleistungsprognose mit Hilfe von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) auf der Fähigkeit, nicht-lineare Zusammenhänge zu approximieren und verrauschte, unvollständige oder sogar widersprüchliche Daten zu verwenden. Weiter sind bei der Modellierung keine Kenntnisse der physikalischen oder meteorologischen Zusammenhänge des Problems erforderlich.

Aufbauend auf der Online-Ermittlung der Windeinspeisung ist die Kurzzeitprognose für Zeiträume von einer bis zu vier Stunden, z.B. mittels KNN, ein weiterer wichtiger Schritt für eine verbesserte Integration der Windenergie in die Laststeuerung und Kraftwerkseinsatzplanung von Energieversorgungsunternehmen mit hohem Windenergieanteil. In einer ersten Studie des ISET wurde die grundsätzliche Möglichkeit der Vorhersage der Summenleistung von großräumig verteilten WEA- Verbundsystemen mit Hilfe von Künstlichen Neuronalen Netzen aufgezeigt.



**Abb. 6: Realer und prognostizierter Zeitverlauf der Windeinspeisung**

Abb. 6 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer mittels KNN durchgeführten Windleistungsprognose auf der Basis von 1 Stunden Mittelwerten. Der Prognosezeitraum betrug dabei ebenfalls eine Stunde. Trotz der insgesamt befriedigenden Ergebnisse stellt ein plötzlicher Wechsel des Leistungsverlaufs (z. B. in der 16. Stunde in Abb. 6) das Verfahren noch vor besondere Probleme. Es ist jedoch zu erwarten, daß aufgrund des insgesamt persistenten Verhaltens der Summenleistung großräumig verteilter Systeme, auch eine Prognose über mehrere Stunden mit KNN mit hinreichender Genauigkeit gelingen kann. Für längere Zeiträume wird man jedoch vermutlich die Gesamteinspeisung aus Windenergieanlagen nicht ohne die Verwendung meteorologischer Daten voraussagen können.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß durch den Einsatz moderner Datentechnik und Informationssysteme sowie der vorgestellten Berechnungsmodelle die Windenergienutzung nicht nur eine sinnvolle Ergänzung sondern ein Bestandteil der elektrischen Stromversorgung sein kann.



## **Erfahrungen mit dem Einsatz von Modellbildung und Simulation in der Kraftwerkseinsatzplanung der PreussenElektra**

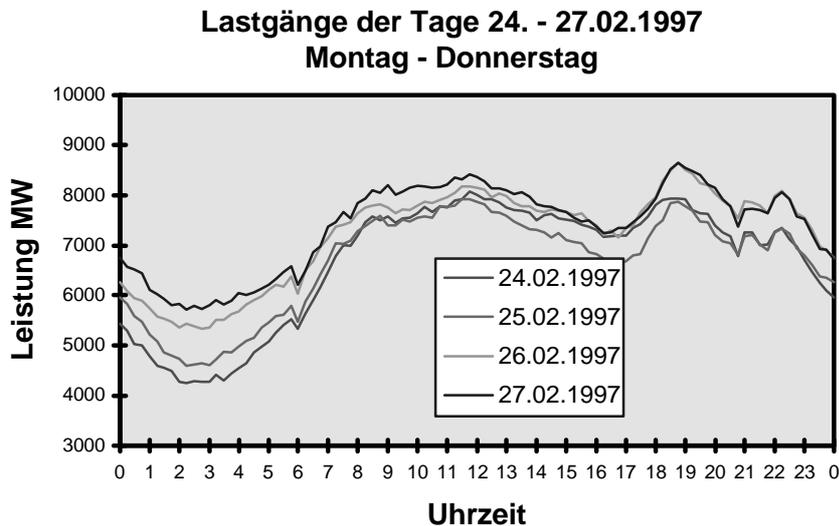
Markus Bredow  
PreussenElektra Netz GmbH & CoKG  
Hauptschaltleitung und Lastverteilung Lehrte  
Vor dem Nordwald 14  
Tel.: (05321) 89 2295, Fax: (05321) 89 2270

### **1 Einleitung**

Die Prognose der aus Windkraft eingespeisten elektrischen Leistung, im folgenden kurz Windeinspeisung genannt, ist der wichtigste Faktor bei der Erstellung der Lastprognose für den Folgetag. Da der Lastverteilung bis dato praktisch keine online-Meßdaten für die Windeinspeisung vorliegen, ist die Windeinspeisung nur in ihrem Einfluß auf die zu deckende Last abschätzbar. Das bedeutet, daß es derzeit nicht möglich ist, die Qualität der Windeinspeiseprognose durch den Vergleich mit der gemessenen Windeinspeisung zu beurteilen. Abbildung 1 zeigt die Lastverläufe von vier Wochentagen, die bezüglich Helligkeit und Temperatur sehr ähnlich sind, sich aber in den vom Deutschen Wetterdienst gemessenen Windgeschwindigkeiten erheblich unterscheiden. Die Notwendigkeit für eine hinreichend genaue Ermittlung und Prognose der Windeinspeisung erfährt durch die Liberalisierung des Strommarktes in Deutschland zusätzlichen Nachdruck. Der Transport von elektrischer Energie erfordert in diesem Rahmen die Inanspruchnahme einer Übertragungsdienstleistung für die ein Fahrplan anzugeben ist. Bei der Abweichung von diesem Fahrplan wird Regelleistung in Anspruch genommen.

### **2 Aktuell eingesetztes Modell**

Die Ermittlung bzw. Prognose der Windeinspeisung beruht auf Windgeschwindigkeitswerten aus dem Deutschlandmodell des Deutschen Wetterdienstes für acht Standorte im Gebiet der PreussenElektra Netzgesellschaft: Leck, Husum, Hohn, Puttgarden, Wittmund, Cuxhaven, Emden und Warburg.



**Abb. 1: Lastgänge windreicher Tage**

Für diese Standorte werden sowohl Meß- als auch Prognosewerte für eine Höhe von 30 m in einem dreistündigen Raster aus einer Mail-Box abgerufen. Die Werte werden zweimal am Tag (ca. 9:00 und 21:00 Uhr) zur Verfügung gestellt, der Prognosehorizont erstreckt sich auf zwei Tage. Die Weiterverarbeitung der Windgeschwindigkeitswerte zeigt Abbildung 2.

Nach dem Einlesen werden die Windgeschwindigkeitswerte zunächst auf die durchschnittliche Nabenhöhe des jeweiligen Standortes umgerechnet. Über die Stützstellen einer für das gesamte PreussenElektra Netzgebiet angenommenen Kennlinie wird der Geschwindigkeit eine relative Einspeiseleistung bezogen auf die installierte Nennleistung zugeordnet. Durch Multiplikation mit der installierten Leistung, die an den entsprechenden Standorten angenommen wird, ergibt sich die Einspeisung je Standort. Die Summation über alle Standorte führt zu einer Abschätzung der Gesamteinspeisung wie sie Abbildung 3 zeigt. Der durchgezogene Teil der Kurve beruht dabei auf gemessenen Windgeschwindigkeiten, der gestrichelte Teil auf prognostizierten Daten.

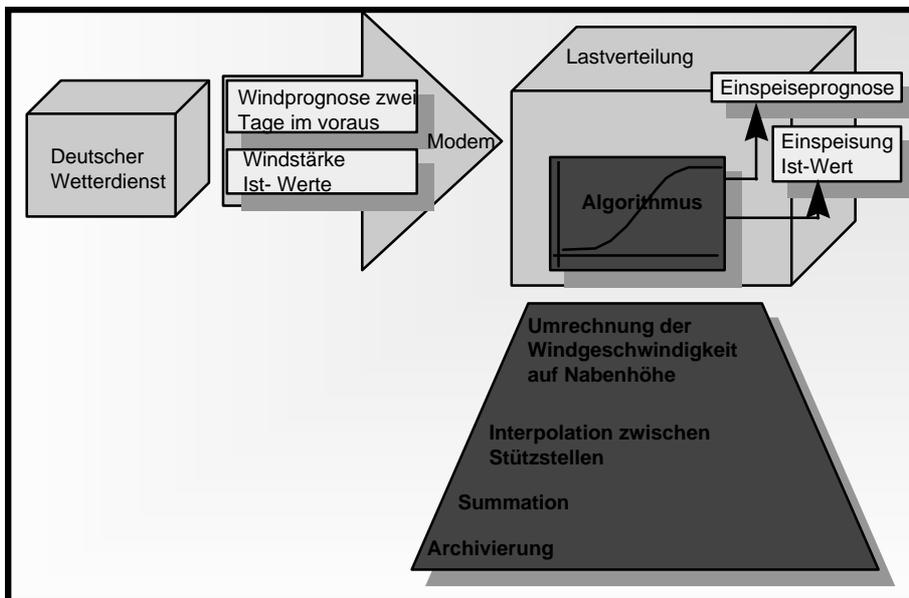
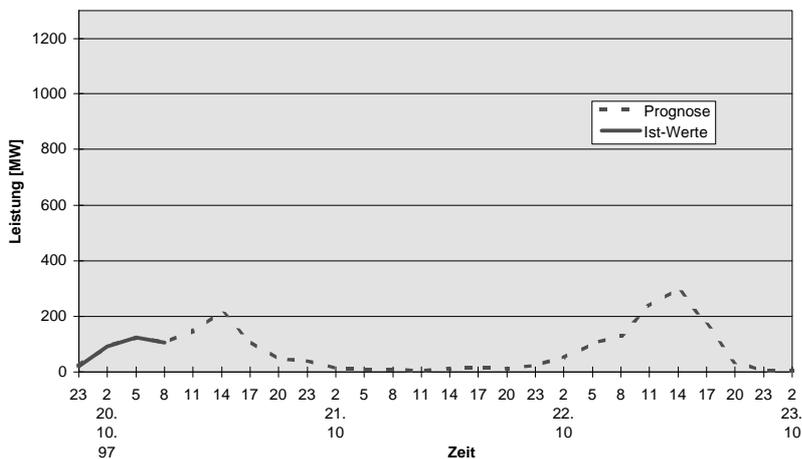


Abb. 2: Erstellung der Windeinspeiseprognose

Einspeisung aus Windenergie





**Abb. 3: Output des aktuell eingesetzten Verfahrens**

### **3 Erfahrungen mit dem aktuell eingesetzten Verfahren**

Das Fehlen von online-Windeinspeisungsdaten macht die Beurteilung des zur Zeit praktizierten Verfahrens sehr schwer und erfordert die Unterteilung in zwei Fragestellungen:

Wie ungenau ist das beschriebene Verfahren zur Ermittlung von Windeinspeiseleistungen aus Windgeschwindigkeiten; ist es überhaupt sinnvoll?

Wie groß ist die Prognoseunsicherheit des Deutschlandmodells und wie wirkt sich diese auf die vorhergesagte Windeinspeisung aus?

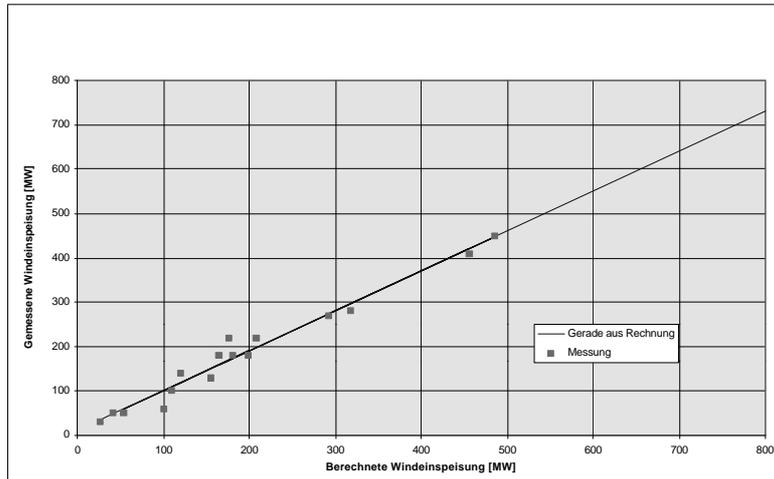
#### **3.1 Qualität der Ermittlung von Windeinspeiseleistungen aus Windgeschwindigkeiten**

Um einen Eindruck davon zu bekommen, ob das beschriebene Vorgehen überhaupt sinnvoll ist, wurden die verfügbaren Lastdaten ausgewählter Umspannstationen mit hohem Anteil an Windeinspeisung näher untersucht. Aus einer Reihe von Lastkurven vergleichbarer Wochentage mit ähnlichem Temperatur- und Helligkeitsverlauf wurde die Maximalkurve als Lastkurve für den Fall Windeinspeisung = 0 MW bestimmt. Die Differenz der anderen betrachteten Lastkurven zu dieser Referenzlastkurve wurde der aus Windgeschwindigkeitsmeßwerten ermittelten Windeinspeiseleistung gegenübergestellt. Das überraschend gute Ergebnis zeigt Abbildung 4.

Zumindest bis geeigneter Verfahren zur Verfügung stehen, erscheint das beschriebene Vorgehen also durchaus als sinnvoll.

#### **3.2 Prognoseunsicherheit der Windgeschwindigkeitswerte und die Auswirkung auf die Windeinspeisung**

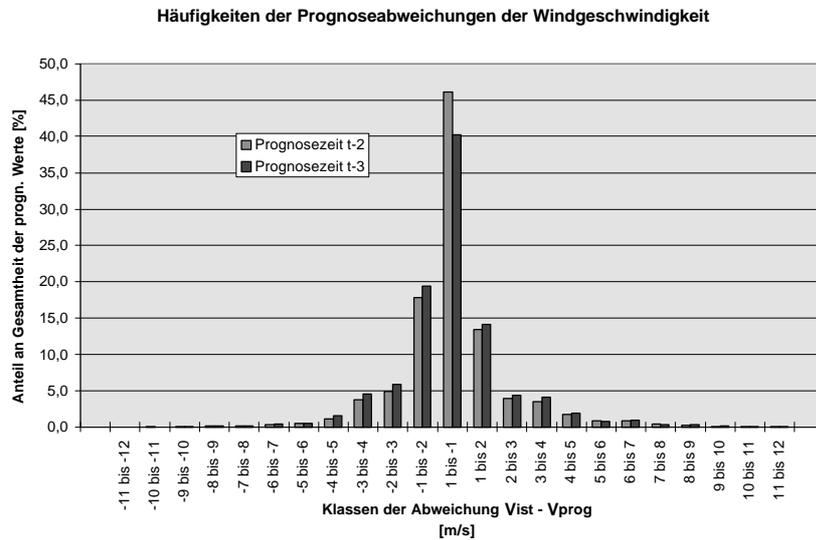
Betrachtet werden Windgeschwindigkeitsmeß- und Prognosewerte aus dem Zeitraum 1.1.98 bis 31.8.98. Im Interesse der Aktualität wurde in Kauf genommen, daß aufgrund von technischen Ausfällen oder Fehlbedienungen entstandene Lücken noch nicht nachgepflegt wurden, sondern durch die nächst aktuelleren Daten gefüllt wurden. Es ist zu erwarten, daß die Prognosequalität durch dieses Vorgehen eher zu gut beurteilt wird.



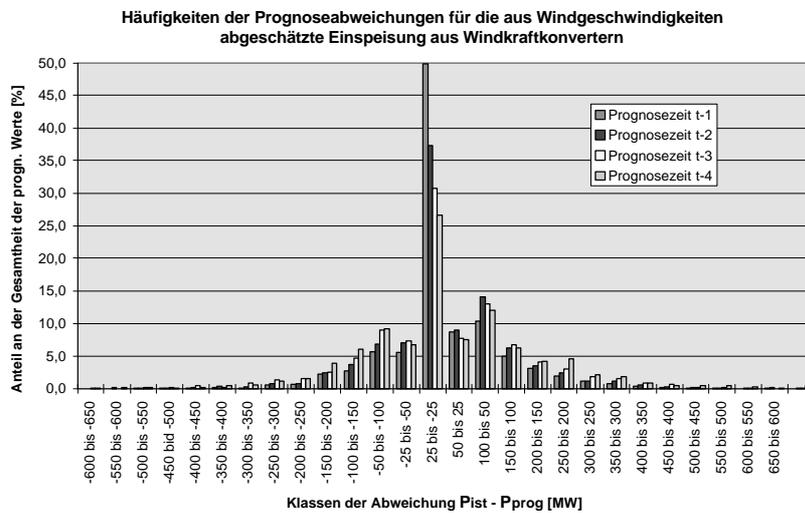
**Abb. 4: Zusammenhang der errechneten Windeinspeisung mit der Last an ausgewählten Stationen, Bestimmtheitsmaß der Regression: 98,5 %**

Abbildung 5 zeigt, daß ca. 46 % der Prognosen (t-2) bzw. 40 % der Prognosen (t-3) in einem Bereich von +1 bis -1 m/s um den späteren Meßwert liegen. "(t-2)" soll dabei andeuten, daß es sich um die vorletzte der Lastverteilung zugängliche Prognose vor Eintritt des Meßzeitpunktes handelt. Die Zeitspanne zwischen Prognose und Meßzeitpunkt beträgt in diesem Falle ca. 24 Stunden, wohingegen die Prognose (t-3) ca. 36 Stunden vor dem Meßzeitpunkt zur Verfügung steht. Bei der Betrachtung der Auswirkungen auf den Kraftwerkseinsatz spielt die Prognose (t-1) nur eine untergeordnete Rolle, weil sie zum Zeitpunkt der Einsatzplanung noch nicht vorliegt.

Wie sich diese Abweichungen auf die prognostizierte Windeinspeisung im Netzgebiet der PreussenElektra auswirken, zeigt die Abbildung 6. Ca. 37 % bzw. 30 % der Einspeiseprognosen liegen in einem Bereich von 25 MW um die aus dem Windgeschwindigkeitsmeßwert ermittelte Windeinspeisung. Über 7 % der Prognosen (t-2) und über 10 % der Prognosen (t-3) verursachen eine über 200 MW liegende Fehleinschätzung der am nächsten Tag zu deckenden Last. Das sind Größenordnungen, die häufig zu unnötigen Kraftwerksanfahrten bzw. zu teuren Zwangszukäufen führen. Hier sind neue Werkzeuge gefordert.



**Abb. 5: Abweichungen der Windgeschwindigkeitsprognose**

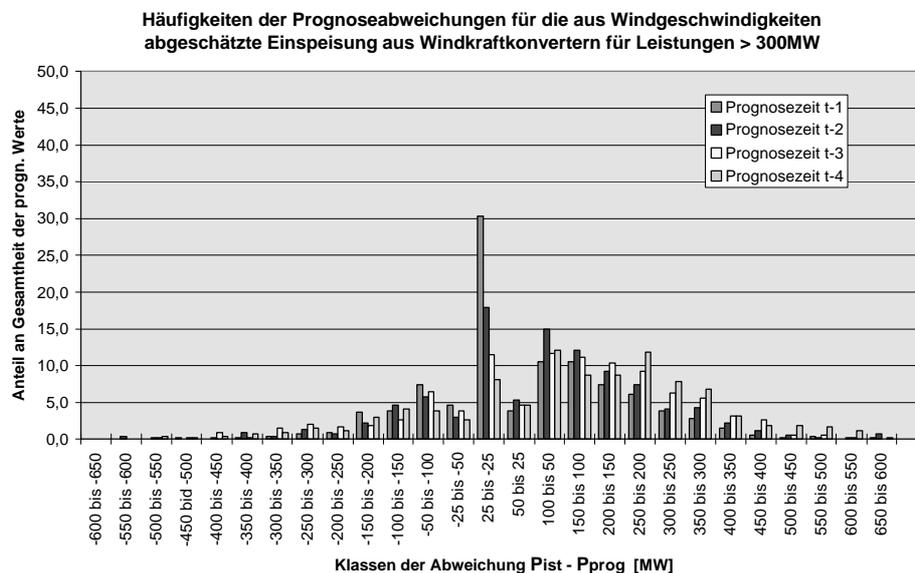


**Abb. 6: Abweichungen der Windeinspeiseprognose**

Daß sich die Prognosequalität im betrachteten Zeitraum bei höheren Windgeschwindigkeiten verschlechtert, zeigt Abbildung 7. Statt 37 % bzw. 30 % sind es jetzt nur noch



18 % bzw. 12 % im Korridor von 25 MW um die aus dem Windgeschwindigkeitsmeßwert ermittelte Einspeiseleistung. 18 % bzw. 25 % der Prognosen weichen jetzt um mehr als 200 MW ab. Je höher die prognostizierte Windeinspeisung ist, desto flexibler muß die Einsatzplanung ausfallen, ist eine Faustregel, die sich in den letzten Jahren bewährt hat. Darüberhinaus ist zu erkennen, daß die Prognosewerte häufiger unter den Meßwerten liegen als darüber, es also eher zu ungewolltem Teillastbetrieb von Kraftwerksblöcken kommt als zu Leistungsengpässen.



**Abb. 7: Abweichungen der Windeinspeiseprognosen für Leistungen > 300 MW**

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das zur Zeit von der PreussenElektra Netz eingesetzte Verfahren zur Prognostizierung der Windeinspeisung unter Nutzung des Deutschlandmodells des Deutschen Wetterdienstes liefert wertvolle Entscheidungshilfen bei der Energieeinsatzplanung. Im Interesse eines optimalen wirtschaftlichen und ökologischen Energieeinsatzes und unter dem Blickwinkel eines fahrplanbasierten Strommarktmodells kann man damit jedoch nicht zufrieden sein.



Eine wesentliche Verbesserung wird sich aus der geplanten online-Messung repräsentativ ausgewählter Windkraftanlagen ergeben. Sie erlaubt erstmals die Ermittlung einer windbereinigten Last im Netzgebiet und macht eine "Kalibrierung" des bisher genutzten Modells möglich. Darauf aufsetzen werden Prognoseverfahren, die das Deutschlandmodell des Deutschen Wetterdienstes verfeinern und zusätzliche Informationen über die Prognosequalität in Abhängigkeit von der Gesamtwetterlage geben.



## Netzspezifische Filterauslegung

Michael Durstewitz  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59, 34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-0, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: mdurst@iset.uni-kassel.de

Siegfried Heier  
Universität Gesamthochschule Kassel, FB 16  
FG Elektrische Energieversorgungssysteme  
Wilhelmshöher Allee 71, 34109 Kassel  
Tel.: (0561) 804-6344, Fax: (0561) 804-6521  
e-mail: evs@iset.uni-kassel.de

### 1 Problemstellung

Die Nutzung der Windenergie hat in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung genommen. In windreichen Regionen, die vielfach relativ schwache Netzstrukturen aufweisen, können dadurch hohe Netzauslastungen entstehen, die zukünftig auch Übertragungsengpässe zur Folge haben können. Daher kommen Wechselwirkungen zwischen Windkraftanlagen und dem Netz besondere Bedeutung zu. Das im folgenden vorgestellte Verfahren ist für den weiteren Ausbau der Windenergie von großer Bedeutung, da die beschriebene Technik es ermöglicht, die an den Netzausläufern anschließbare Leistung wechselrichterbestückter Windenergieanlagen wesentlich zu erhöhen, ohne störende Netzurückwirkungen zu verursachen.

Bei der Windenergienutzung ist ein deutlicher Trend zu großen Anlagen mit technisch aufwendigeren und innovativen Konfigurationen zu erkennen. Dabei kommen drehzahlvariablem Betrieb mit neuartigen Regelungsverfahren und Netzankopplung über Umrichtersysteme besondere Bedeutung zu. Mit der Inbetriebnahme der 1,2 MW Windkraftanlage WKA 60/2 (mit Wechselrichtereinspeisung) im Windpark Westküste entstand an diesem schwachen Netzausläufer eine neue Dimension von Netzeinwirkungen, die weitgehend auf Netzresonanzen zurückzuführen waren. Bereits bei Probelaufen ergaben sich trotz eingebauter Netzfilter, die nach herkömmlichen Methoden als Saugkreise für die fünfte und siebte Oberschwingung ausgelegt waren, hohe Ober-



schwingungspegel in der Nähe einer dort vorhandenen Netzresonanzstelle bei der 25-ten Ordnungszahl. Dieses Phänomen war nicht primär auf die Einwirkungen durch die Windenergieanlage zurückzuführen, sondern im wesentlichen durch die besondere Netzkonstellation begründet, so daß die Anlage an einem anderen Netzanschlußpunkt mit höherer Netzkurzschlußleistung durchaus problemlos hätte betrieben werden können /HEIER 1996 und 1998/.

Auch an anderen Standorten (z. B. mit der Installation von 10 Windkraftanlagen auf den Golanhöhen) traten ebenfalls Resonanzerscheinungen im Netz auf und verursachten Betriebsprobleme. Beim Einsatz von heute üblichen Pulswechselrichtern ist zu bedenken, daß im Bereich der Pulsfrequenz ähnliche Auswirkungen möglich sind.

## 2 Maßnahmen

Um die vom Energieversorgungsunternehmen vorgegebenen Verträglichkeitspegel für die Oberschwingungen an der Übergabestelle zum Versorgungsnetz einzuhalten, war der Einbau von speziell dimensionierten Filtern notwendig, die auf das gesamte elektrische System d. h. den schwachen Netzausläufer, das Verhalten des Stromrichters sowie die übergeordnete Netzstruktur abgestimmt waren.

Dies wurde dadurch erreicht, daß mit Hilfe einer systemtechnischen Nachbildung und Simulation der Netz- und Anlagenkonfiguration in Verbindung mit einer Auslegung für alle Last- und Netzzustände die Filter anwendungsorientiert definiert sowie anschließend gefertigt und eingebaut wurden. Durch anlagen- und standortspezifische Auswahl der Komponenten läßt sich so mit der Verbindung von Netz und Filtern ein Gesamtsystem schaffen, das alle geforderten Ansprüche erfüllt. Falls Netz- und Anlagendaten genau spezifiziert werden können, lassen sich mit dieser Methode die zu erwartenden Netzzurückwirkungen am Netzanschluß oder an anderen Betrachtungspunkten mit großer Genauigkeit vorherbestimmen bzw. lassen sich – falls erforderlich – bereits im Vorfeld Abhilfemaßnahmen definieren und durch den Einbau von geeigneten Filtern ausführen.

Somit können bei problembehafteten Netzanschlüssen mit Hilfe von Computersimulationen Filtersysteme ausgelegt werden, die es erlauben, unter Berücksichtigung der standortspezifischen Verhältnisse die Netzanschlußbedingungen wie z. B. Verträglichkeitspegel, Leistungsfaktor etc. bei geringen Kosten einzuhalten. Nach Einbau der ausgelegten und realisierten Filteranlage – zum Einsatz kam eine Kombination aus Saugkreisen und breitbandigen Filtern – bestätigten am Einspeisepunkt der WKA 60/2 durchgeführte Messungen die Simulationsergebnisse in vollem Umfang (Abb. 8).



### 3 Netzwerkanalyse mit den Programmen IMPSIM und SISON

Die Softwaretools IMPSIM und SISON wurden während des Forschungsvorhabens „Meßtechnische Untersuchungen im Windpark Westküste“ /DURSTEWITZ 1992/ im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten am Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme erstellt. Das Akronym IMPSIM steht für **Impedanz-Simulation**, hinter SISON verbirgt sich die Abkürzung für **Strom-, Impedanz- und Spannungsverhalten bei Oberschwingungen in Netzwerken**. Mit IMPSIM werden die frequenzabhängigen Beträge der Impedanzen beliebiger Netzstrukturen in der Form  $|Z| = f(\omega)$  berechnet. Das Programm SISON benötigt als Eingangsgrößen die zunächst mit IMPSIM erstellten Netzstrukturen und kann hieraus für jeden Knoten im Netzwerk Oberschwingungsströme und Oberschwingungsspannungen berechnen und darstellen.

#### 3.1 IMPSIM

IMPSIM ist ein Programm, das zur Berechnung der frequenzabhängigen Impedanz elektrischer Netzwerke dient. Der berechnete Impedanzverlauf wird grafisch dargestellt. Eventuell auftretende Resonanzstellen werden besonders kenntlich gemacht. Somit können durch Einsatz von IMPSIM Frequenzbereiche erkannt werden, in denen durch Oberschwingungserzeuger z. B. Stromrichter verursachte, unzulässig hohe Spannungen oder Ströme auftreten können. Weiterhin ist es möglich, IMPSIM bei der Einbindung zusätzlicher Betriebsmittel, z. B. Kompensationseinrichtungen, hinsichtlich einer der Netzsituation angepaßten Dimensionierung sowie den hieraus resultierenden Einflüssen einzusetzen /GOETZE 1990/.

#### Berechnungsbeispiel

Für die Simulation ist es erforderlich, daß das zu analysierende Netzwerk als Übersichts- bzw. als Ersatzschaltbild einschließlich aller relevanten Kenngrößen vorliegt. IMPSIM ermittelt die Ersatzreaktanzen der Betriebsmittel entsprechend den Regeln für Kurzschlußstromberechnungen und stellt die resultierende Netzimpedanz in Abhängigkeit der Frequenz dar. Ein typischer Netzaufbau ist exemplarisch in Abb.1 dargestellt. Das Netzwerk besteht hier aus den folgenden Komponenten:

- einem übergeordnetem Netz mit einer Kurzschlußleistung  $s_k = 1.000 \text{ MVA}$ ,
- zwei Transformatoren mit 2,5 MVA und 10 MVA Nennleistung und jeweils 10 % relativer Kurzschlußspannung  $u_k$ ,
- einer Asynchronmaschine mit 2,5 MVA Scheinleistung und dem Verhältnis Anlaufstrom/Nennstrom von 5,



- einer Kompensationseinrichtung mit 1 MVA Scheinleistung, sowie
- einem sechspulsigen Stromrichter mit 2 MVA Anschlußleistung.

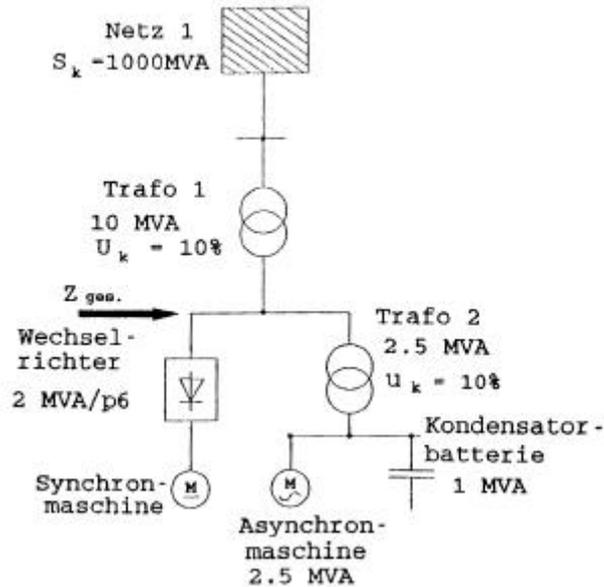


Abb. 1: Netzaufbau (Beispiel)

Der gegebene Netzaufbau resultiert vom Anschlußpunkt des Stromrichters aus betrachtet (s. Pfeil) in dem dargestelltem Ersatzschaltbild (Abb. 2). Die Ersatzschaltung besteht aus zwei parallelen Zweigen, die zu einem Hauptzweig miteinander verschaltet sind.

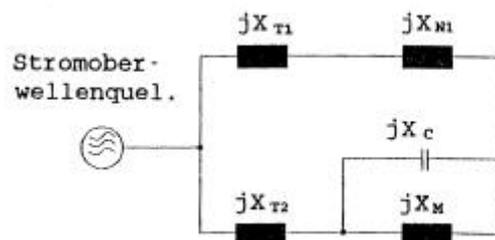


Abb. 2: Ersatzschaltbild zum Netzaufbau gem. Abb. 1



Das Ergebnis der Simulation der frequenzabhängigen Impedanz ist in Abb. 3 dargestellt. Dieser exemplarische Impedanzverlauf ist durch zwei kritische Bereiche bzw. zwei Resonanzstellen charakterisiert. Die erste Resonanzstelle ist als Parallelresonanz erkennbar, die zu einem Anstieg des Scheinwiderstands mit Maximum bei etwa 280 Hz führt. Die zweite Resonanzstelle ergibt sich in einem Impedanzminimum bei etwa 310 Hz und wird durch Reihenresonanz verursacht. Oberhalb dieses Punktes verläuft die Impedanz ohne weitere Resonanzstellen durchgehend induktiv. Die ideale Netzstruktur aus der Sicht eines Netzbetreibers ist rein induktiv.

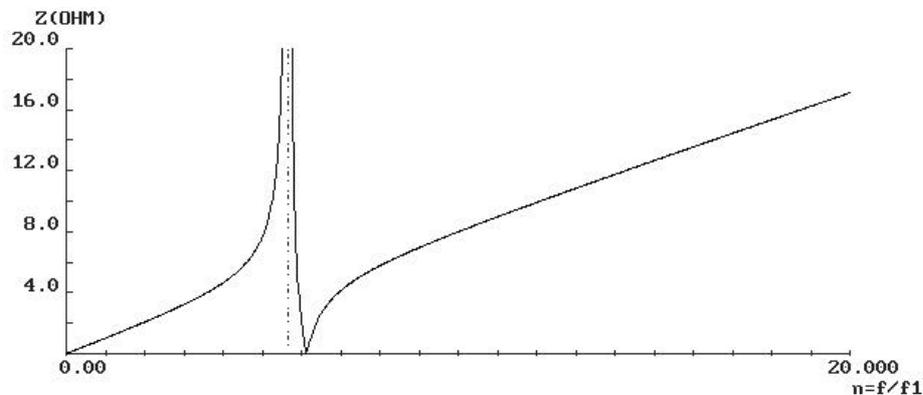


Abb. 3: Impedanzverlauf zum Berechnungsbeispiel

### 3.2 SISON

Das Programm SISON wird zur Netzwerkanalyse eingesetzt und ermöglicht genaue Aussagen zu treffen im Hinblick auf

- die Entstehung von Resonanzstellen bei verschiedenen Netzkonstellationen,
- die Ausbreitung von Oberschwingungsspannungen und -strömen innerhalb eines gegebenen Netzwerkes bei unterschiedlichen Stromrichtertypen sowie
- die Wirksamkeit geplanter Abhilfemaßnahmen bei Netzurückwirkungen durch Oberwellenerzeuger.

SISON baut auf dem zuvor beschriebenen Programm IMPSIM auf. Mit IMPSIM erstellte Netzwerke müssen zunächst nach SISON importiert werden. Bei der Netzanalyse werden dann für typische Stromrichter, die vom Anwender interaktiv auswählbar sind, die jeweiligen Stromüberschwingungen am Betrachtungspunkt in das Netzwerk



eingepägt. Die hieraus resultierenden Strom- und Spannungsverteilungen werden für alle Knoten des Netzwerks frequenzabhängig bestimmt. Die Darstellung erfolgt in zwei- bzw. dreidimensionalen Übersichtsdiagrammen.

**Berechnungsbeispiel**

Für das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Beispielnetzwerk liefert SISON z.B. die folgende Grafik (Abb. 3) als Übersichtsbild. Das Simulationsergebnis zeigt hier für die beiden parallelen Zweige jeweils Strom und Spannung für typische Oberschwingungsfrequenzen eines Sechspulsumrichters. Strom und Spannung werden als Säulen in einer zweidimensionalen Matrix im logarithmischen Maßstab dargestellt. Je nach Darstellung kann jeder beliebige Zweig, jedes Bauteil bzw. jeder Knoten des Netzwerks in allen relevanten Frequenzbereichen analysiert werden /SCHÄFER 1992/.

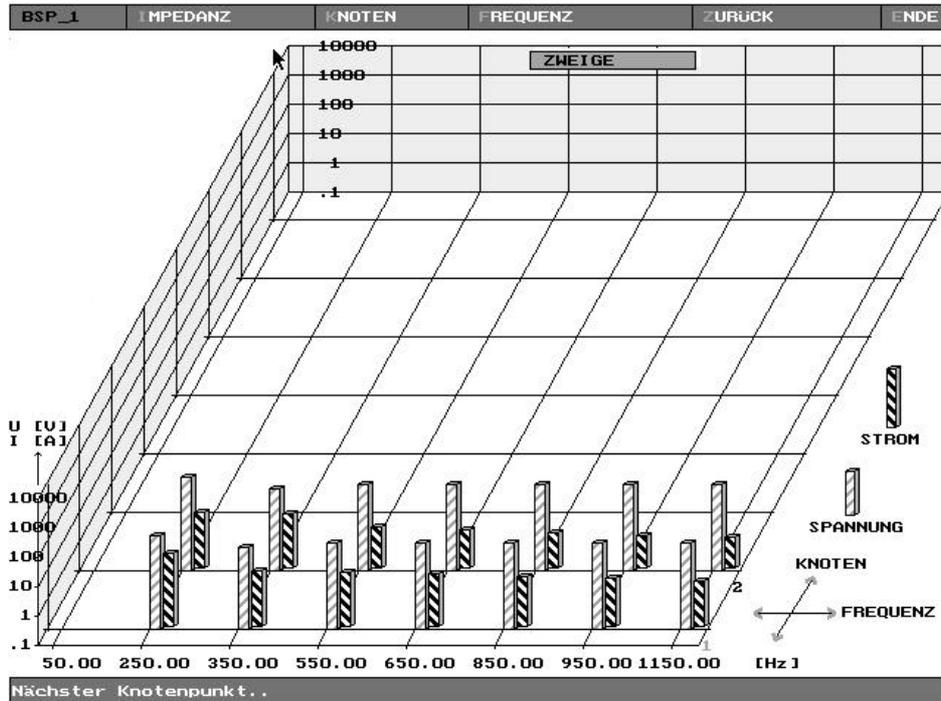
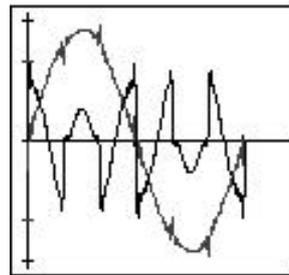


Abb. 3: 3D-Übersichtsdarstellung der Strom- und Spannungsverteilung in einzelnen Zweigen für das Beispiel nach Abb. 2

Weiterhin kann in der Grafik ein „Oszilloskop“ eingeblendet werden, mit dem der rechnerisch ermittelte Zeitverlauf von Spannung und Stromoberwellen für die einzelnen Knotenpunkte des Netzwerks betrachtet werden kann.



$\hat{u} = 8506 \text{ V}$   
 $U = 5788 \text{ V}$   
 $\hat{I}_v = 74 \text{ A}$   
 $I_v = 36 \text{ A}$   
 $D : 8.00\%$

Abb. 4: Oszillogramm von Spannung und Stromoberwellen für einen ausgewählten Knotenpunkt (Simulation)

#### 4 Netzspezifische Filterauslegung

In der Praxis sind die zu untersuchenden Netzstrukturen von höherer Komplexität als im vorangegangenen Beispiel dargestellt. Für die Untersuchungen der Netzimpedanz im Hinblick auf kritische Frequenzbereiche im Windpark Westküste selbst sowie in seiner Anbindung an das Umspannwerk in Marne war es erforderlich, eine wesentlich größere Zahl von Komponenten zu erfassen und bei der Berechnung zu berücksichtigen. Das betreffende Ersatzschaltbild des Windparks Westküste (WPW) einschließlich seiner Anbindung an das übergeordnete Netz ist in Abb.5 dargestellt. Bei der hier dargestellten Netzstruktur am Einspeisepunkt des Stromrichters handelt es sich im wesentlichen um drei parallel geschaltete Netzzweige (Schaltanlage – Windpark Leitung 1, Schaltanlage – Windpark Leitung 2, Schaltanlage – Umspannwerk Marne), die in sich jedoch noch weiter untergliedert und verzweigt sind.

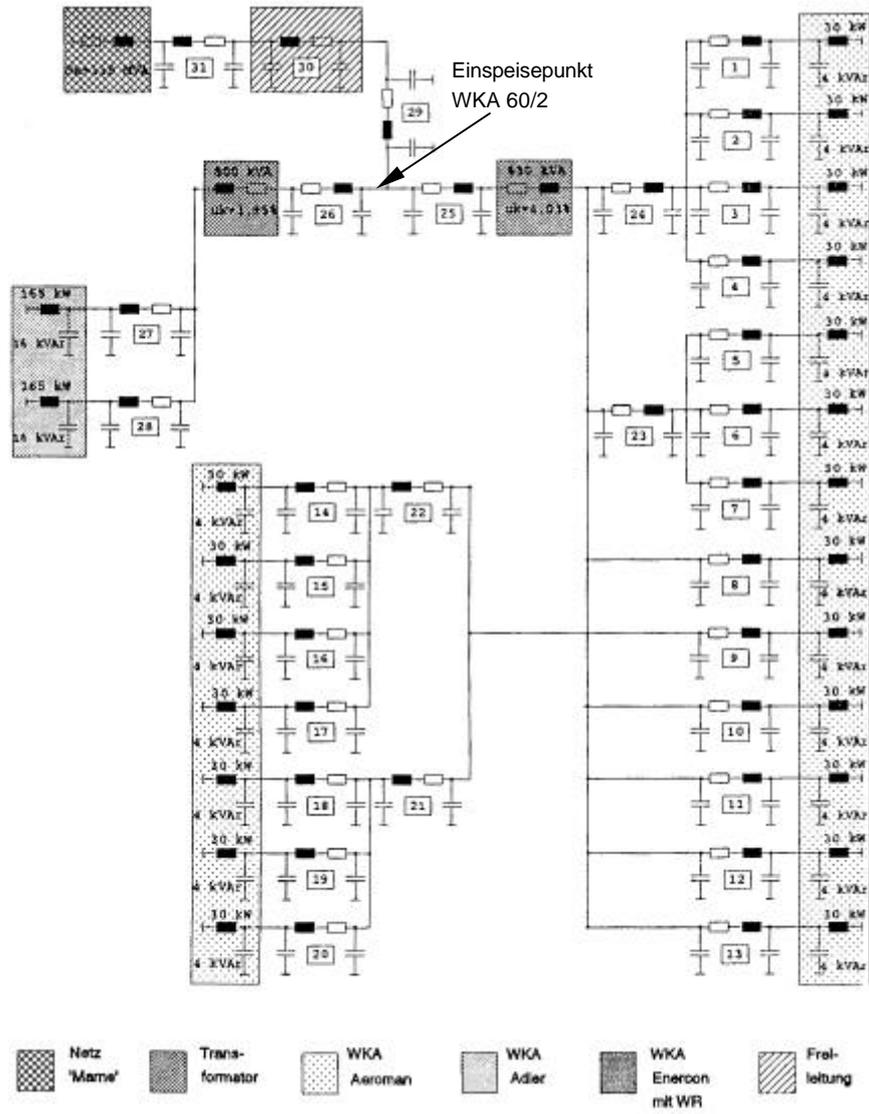


Abb. 5: Ersatzschaltbild Windpark Westküste

Um die von den Energieversorgungsunternehmen vorgegebenen Verträglichkeitspegel an der Übergabestelle einhalten zu können, müssen speziell auf das gesamte elektrische System abgestimmte Filter ausgelegt werden. Beim Filterentwurf wird der Frequenzverlauf der Filterimpedanz sukzessive so optimiert, daß die zulässigen Oberschwingungspegel an der Netzübergabestelle, d. h. an der aus Filter- und Netzimpedanz resultierenden Gesamtimpedanz nicht überschritten werden.

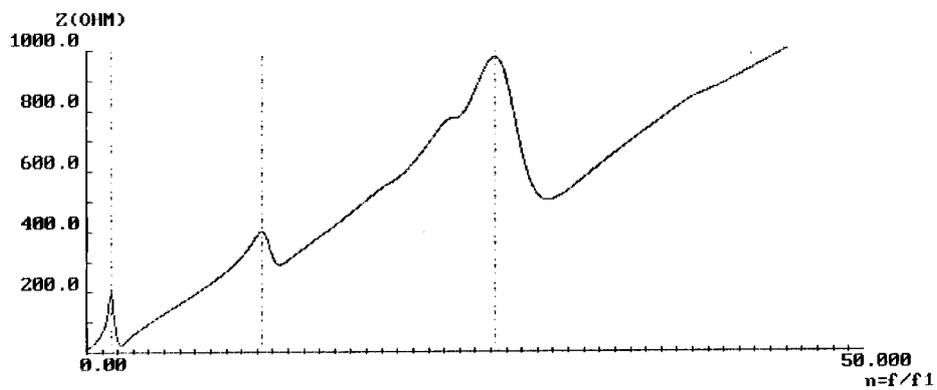


Abb. 6: Netzimpedanz am Einspeisepunkt WKA 60/2 ohne Filter (Simulation)

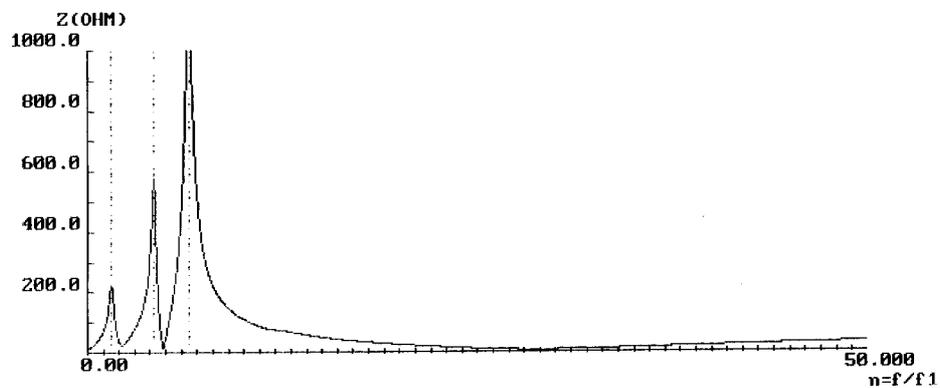


Abb. 7: Resultierende Gesamtimpedanz am Einspeisepunkt WKA 60/2 (Simulation)

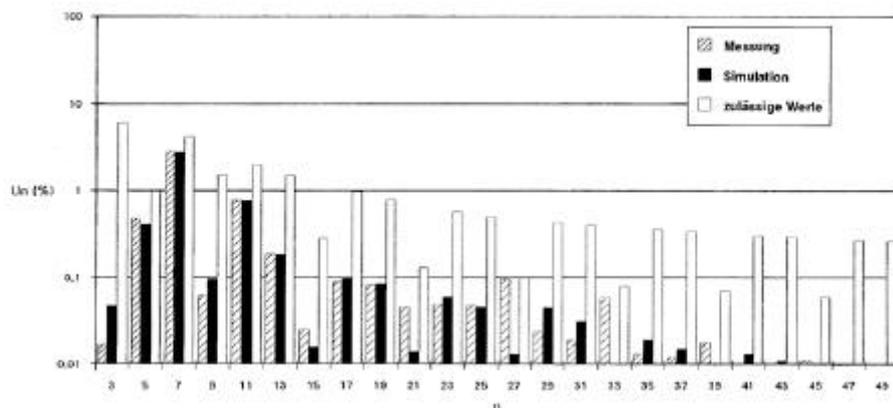
Die zulässigen Oberschwingungspegel bestimmen in Verbindung mit der Netzimpedanz die maximal zulässigen Oberschwingungsströme in diesem Netzweig. Speist eine Oberschwingungsquelle größere als die zulässigen Ströme ein, so muß die Fil-



tereinrichtung den Differenzstrom übernehmen. Somit läßt sich für jede auftretende Frequenz eine geeignete Filterimpedanz errechnen.

Die mit IMPSIM berechnete Netzimpedanz am Einspeisepunkt der WKA 60/2 betrachtet ist in Abb. 6 dargestellt. Der Impedanzverlauf zeigt deutlich die Resonanzstelle im Frequenzbereich um etwa 1250 Hz, die durch den Netzzweig zum Umspannwerk verursacht wird.

Der durch Simulation mit IMPSIM berechnete resultierende Impedanzverlauf mit parallelgeschaltetem Oberschwingungsfilter am Einspeisepunkt WKA 60/2 ist in Abb. 7 dargestellt. Man kann deutlich erkennen, daß durch die Charakteristik des eingesetzten Breitbandfilters die Impedanzwerte insbesondere im Bereich ab etwa 500 Hz ganz erheblich reduziert werden. Allerdings werden durch den Einsatz des Filters zwei andere Resonanzstellen in das System eingefügt, die durch die kapazitiven bzw. induktiven Anteile der Saugkreis- und Breitbandfilterkreise hervorgerufen werden. Dennoch konnten für alle Frequenzbereiche die maximal zulässigen Störpegel eingehalten werden.



**Abb. 8: Vergleich der berechneten, gemessenen und zulässigen Oberschwingungspegel am Netzeinspeisepunkt WKA 60/2**

Die mit Hilfe der Programme IMPSIM und SISON ermittelten Kennwerte für Kapazitäten, Induktivitäten und ohm'sche Widerstände der Filterkomponenten wurden mit hoher Genauigkeit angefertigt. Nach Einbau und Inbetriebnahme wurde am Windpark Westküste eine Meßkampagne zur Überprüfung der Wirksamkeit der neuen Filtereinrichtungen durchgeführt. Der Vergleich der gemessenen und der per Simulation berechneten Oberschwingungspegel haben Wirksamkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens vollauf



bestätigt. Die geforderten maximalen Oberschwingungspegel wurden im gesamten Frequenzbereich eingehalten, die Abweichungen von berechneten zu gemessenen Spektralanteilen waren vernachlässigbar gering (Abb. 8).

## 5 Fazit

Der Einsatz der Softwareprogramme IMPSIM und SISON bietet die Möglichkeit schnell und kostengünstig auch komplexe Netzwerke im Hinblick auf ihr frequenzabhängiges Verhalten zu untersuchen. Kritische Frequenzbereiche, die durch Resonanz von schwingungsfähigen Betriebsmitteln verursacht werden, können einfach und Zuverlässig erkannt werden. Die Programme ermöglichen weiterhin die möglichen Auswirkungen von geplanten Netzwerkmodifikationen per Simulation in Betracht zu ziehen und stehen als Hilfswerkzeug für eine netzspezifische Auslegung z. B. von Filtern zur Verfügung.

Bei der Anwendung dieser Programme muß jedoch stets berücksichtigt werden, daß die Simulationsergebnisse immer nur einen (quasi-) stationären Zustand widerspiegeln können. Elektrische Netze müssen jedoch als dynamische Systeme betrachtet werden, deren Charakteristika z. B. Resonanzstellen je nach Schalt- bzw. Betriebszustand stark variieren können. Daher müssen alle Folgerungen des Simulationsprozesses, z. B. Dimensionierung von Filtereinrichtungen, auf ihre Robustheit bezüglich der Auswirkungen von Veränderungen wesentlicher Parameter überprüft werden.

## 6 Literatur

- /CLEMENS 1990/ Clemens, M.: Maßnahmen gegen Oberschwingungseinflüsse, VDE-Seminar Netzurückwirkungen, Mannheim, 1990
- /DURSTEWITZ 1992/ Durstewitz, M., Heier, S., Hoppe-Kilpper, M., Kleinkauf, W.: Meßtechnische Untersuchungen am Windpark Westküste. Untersuchung der elektrischen Komponenten und ihrer Integration in schwache Netze, BMFT-Abschlußbericht, 1992.



- /GOETZE 1990 /      Goetze, F., Schäfer, H., Schulz, D.: Impedanz-Simulation beliebiger Netzkonfigurationen, Programmsystem zur graphischen und tabellarischen Darstellung frequenzabhängiger Impedanzen beliebiger Netzanordnungen; Projektarbeit II, Kassel, 1990
- /HEIER 1996/        Heier, S.: Windkraftanlagen im Netzbetrieb. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Teubner, Stuttgart, 1996
- /HEIER 1998/        Heier, S.: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 1998.
- /SCHÄFER 1992/     Schäfer, H.: Ausbreitung von Oberschwingungen in Windparks und Untersuchung von Systemvereinfachungen, Diplomarbeit I, Kassel, 1992



## **Energetische Simulation zur Auslegung kleiner Wind-Diesel Systeme**

Thomas Degner  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-0, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: tdegner@iset.uni-kassel.de

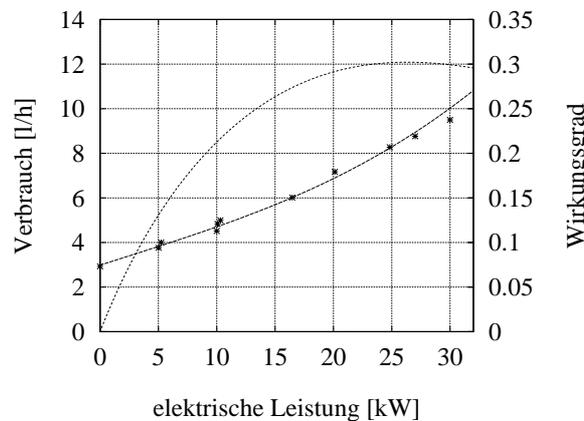
### **1 Einleitung**

Kleine autonome Stromversorgungen, z.B. zur Versorgung von Siedlungen oder Höfen, werden häufig mit Dieselgeneratoren realisiert. An windgünstigen Standorten kann die Integration von Windenergie in das Versorgungssystem zu einer deutlichen Verringerung des Treibstoffverbrauchs des Dieselmotors führen. Sogenannte "Wind-Diesel" Systeme werden an vielen Orten auf der Welt, die keinen Anschluß an die großen elektrischen Versorgungsnetze haben, getestet, z.B. in Kanada /LAVALLEE 1987/ und China /WANG 1991/.

Ein großes technisches Problem ergibt sich bei diesen Systemen durch die Fluktuationen in der Leistungsabgabe der Windanlage, da in der Regel die Leistungsabgabe der Windanlage nicht mit der Verbrauchernachfrage korreliert ist. Wenn keine Energiespeicher in das System integriert sind, müssen die Fluktuationen in der Leistungsabgabe der Windenergieanlage durch den Dieselgenerator kompensiert werden. In einfachen Wind-Diesel Systemen wird der Dieselmotor kontinuierlich betrieben, um die Differenz zwischen der Leistungsabgabe der Windanlage und dem momentanen Verbrauch zu decken. Dadurch kann es sein, daß der Dieselgenerator häufig im ungünstigen Teillastbereich oder sogar ohne Last betrieben wird. Die Installation einer Blindlast wird unter Umständen nötig sein, um den andauernden Betrieb des Dieselmotors bei kleinen Lasten zu vermeiden. Aufgrund des schlechten Wirkungsgrads des Dieselmotors bei geringen Lasten ist insgesamt die Treibstoffersparnis durch die Windenergie in solchen Systemen sehr begrenzt, siehe Abb. 1 sowie z.B. /MANWELL 1988/ und /CRAMER 1989/.



Um dies zu vermeiden, kann der Dieselmotor in Zeiten mit gutem Windangebot ausgeschaltet werden. Dies setzt allerdings u.a. eine geeignete Systemsteuerung voraus: Einfache Steuerungen, die etwa auf der momentanen Leistungsbilanz zwischen Windenergie und Verbrauch arbeiten, führen zur einer großen Zahl von Dieselschaltzyklen, verbunden mit einer hohen Belastung für das Dieselaggregat, siehe z.B. /INFIELD 1988/.



**Abb. 1:** Typische Verbrauchskurve eines kleinen Dieselgenerators. Die Kreuze sind Meßwerte an einem Dieselgenerator mit 30 kW<sub>n</sub> Nennleistung, die durchgezogene Linie ist eine Approximation an diese Werte.

Durch die Integration eines Energiespeichers in das System kann die Anzahl der notwendigen Schaltzyklen des Dieselaggregats deutlich reduziert und die Versorgungssicherheit des Systems erhöht werden. Allerdings wird das System durch den Energiespeicher technisch komplexer und aufwendiger.

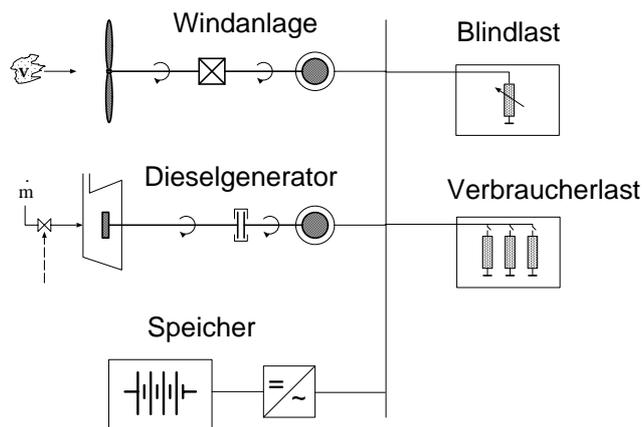
Die Integration von Windenergie in das Versorgungssystem soll vor allem zu einer Einsparung von Dieseltreibstoff und damit zu einer Verringerung der Betriebskosten führen. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen kann für einen Standort das langfristige Treibstoffsparepotential für verschiedene Systemkonfigurationen und unterschiedliche Betriebsführungsstrategien auf einfache Weise abgeschätzt werden.

In diesem Beitrag werden einige Ergebnisse von Auslegungsrechnungen für einfache Wind-Diesel Systeme vorgestellt. Insbesondere werden verschiedene Betriebsführungsstrategien diskutiert und es werden Untersuchungen zur Dimensionierung des Energiespeichers vorgestellt.

## 2 Simulation von Wind-Diesel Systemen

Ziel der "energetischen Simulation" des Systembetriebs ist hier vor allem die Bestimmung des langfristigen Treibstoffeinsparpotentials durch den Einsatz von Windenergie unter Berücksichtigung der Windverhältnisse am Standort, der gewählten Systemkonfiguration und der Betriebsführung. Neben dem Windangebot am betrachteten Standort, gegeben etwa durch die Verteilungsfunktion der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit, sind auch die turbulenten Schwankungen der Windgeschwindigkeit von großer Bedeutung für den Systembetrieb. Die kleinsten Zeitkonstanten, die berücksichtigt werden müssen, liegen in der Größenordnung von Sekunden.

Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen sind einfache Wind-Diesel Systeme, bestehend aus einem Dieselgenerator, einer Windanlage und optional einem Energiespeicher, die eine mittlere Verbraucherlast in der Größenordnung von 10 – 100 kW versorgen (siehe Abb. 2).



**Abb. 2:** Skizze der hier untersuchten Systeme, der Energiespeicher ist optional

Die Simulation dieses Systems kann durch eine Simulation im Zeitbereich erfolgen. Dazu werden Gleichungen für die Momentenbilanz der Drehsysteme "Rotor der Windanlage - Asynchronmaschine" und "Dieselmotor - Synchronmaschine" aufgestellt und gelöst. Mögliche Vereinfachungen der Modellbeschreibungen sind:

- Annahme einer konstanten Netzfrequenz: Es entfällt die Berechnung der Bewegungsgleichung für das System "Dieselmotor - Synchronmaschine".



- Annahme einer konstanten Netzfrequenz und Annahme einer drehzahlstarren Windanlage: Damit reduziert sich die Simulationsaufgabe auf eine einfache Leistungsbilanzierung.

Je nach Fragestellung muß man im Einzelfall rechtfertigen, welche Vereinfachungen zulässig sind.

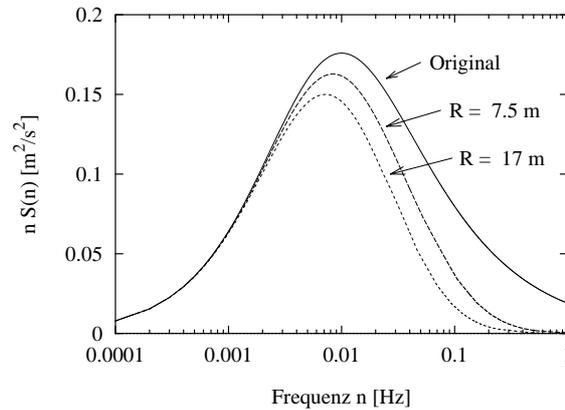
### 3 Eingangsdaten der Windgeschwindigkeit

Der zeitliche Verlauf der horizontalen Komponente der Windgeschwindigkeit ist gekennzeichnet durch Schwankungen, die auf allen Skalen von Sekunden über Stunden bis zu Monaten auftreten. Diese Schwankungen verursachen entsprechende Fluktuationen in der Leistungsabgabe einer Windenergieanlage. Damit bestimmen sie den Energieertrag der Windanlage und haben dann besonders große Auswirkungen auf den Systembetrieb, wenn die Verbraucher unterbrechungsfrei ausschließlich aus Windenergie versorgt werden sollen.

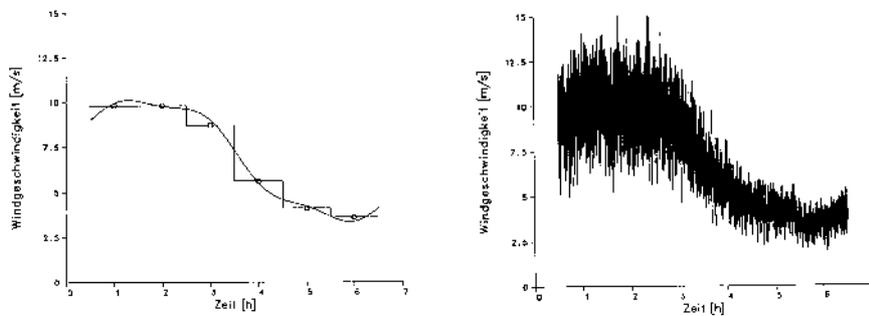
Zur Durchführung von Simulationsrechnungen für einen Standort werden Zeitreihen der Windgeschwindigkeit benötigt, die einerseits eine hohe zeitliche Auflösung haben (typischerweise 1 Sekunde), andererseits sich über einen klimatisch repräsentativen Zeitraum erstrecken. Solche Datenreihen sind nur für wenige Standorte verfügbar.

Für Zeitreihen von Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit kann hingegen auf Datensammlungen, wie sie z.B. mit dem europäischen Windatlas gegeben sind, zurückgegriffen werden /TROEN 1989/. Beyer und Nottebaum /BEYER 1995a/ stellen ein Verfahren vor, mit dem aus den dort gegebenen Daten Zeitreihen von Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit erzeugt werden können.

Die turbulenten Fluktuationen der Windgeschwindigkeit (Frequenzen  $> 1 \text{ h}^{-1}$ ) können gut durch empirische Modelle beschrieben werden (wie z.B. in /MADSEN 1986/ angegeben). Diese Modelle beschreiben das Leistungsdichtespektrum der Windgeschwindigkeit, wie es sich bei Messungen der Windgeschwindigkeit an einem Punkt ergibt. Da für einen Windenergiekonverter das ganze Windfeld in der vom Rotor überstrichenen Fläche wirksam ist werden die höheren Frequenzen im effektiv wirksamen Windfeld gedämpft. Dieser Effekt kann durch die Anwendung einer geeigneten Filterfunktion berücksichtigt werden /MADSEN 1986/, siehe auch Abb. 3). Mit diesen Informationen können Zeitreihen der turbulenten Windgeschwindigkeitsfluktuationen synthetisiert werden, die geeignete Eingangsdaten für Modelle von Windenergiekonvertern sind /SHINOZUKA 1972/.



**Abb. 3:** Spektrale Leistungsdichte der Windgeschwindigkeitsfluktuationen. Das Bild zeigt die Funktion für das Punktspektrum, sowie modifizierte Spektren, die für Anlagen mit 7.5 m bzw. 17 m Rotorradius zugrunde gelegt werden. Die Spektren gelten für eine mittlere Windgeschwindigkeit von  $6 \text{ ms}^{-1}$ , eine Turbulenzintensität von 0.15 sowie eine Meß- bzw. Nabenhöhe von 30 m.



**Abb. 4:** Beispiel zur Synthese von Hybridzeitreihen der Windgeschwindigkeit: Zwischen Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit (linkes Bild, Treppenfunktion) wird zunächst mittelwerterhaltend interpoliert (linkes Bild, glatte Funktion). Entsprechend den aktuellen Stundenmittelwerten werden Windgeschwindigkeitsfluktuationen synthetisiert, die zu der interpolierten Kurve addiert werden (Bild rechts). Das Verfahren ist ausführlich in /BEYER 1995b/ wiedergegeben.



Zwischen Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit kann eine mittelwerterhaltende Interpolation eingeführt werden (siehe Abb. 4). Zu den interpolierten Werten können zuvor synthetisierte turbulente Fluktuationen der Windgeschwindigkeit addiert werden. Die schließlich resultierende Zeitreihe besitzt sowohl die geforderte zeitliche Auflösung und sie erstreckt sich über einen klimatisch repräsentativen Zeitraum.

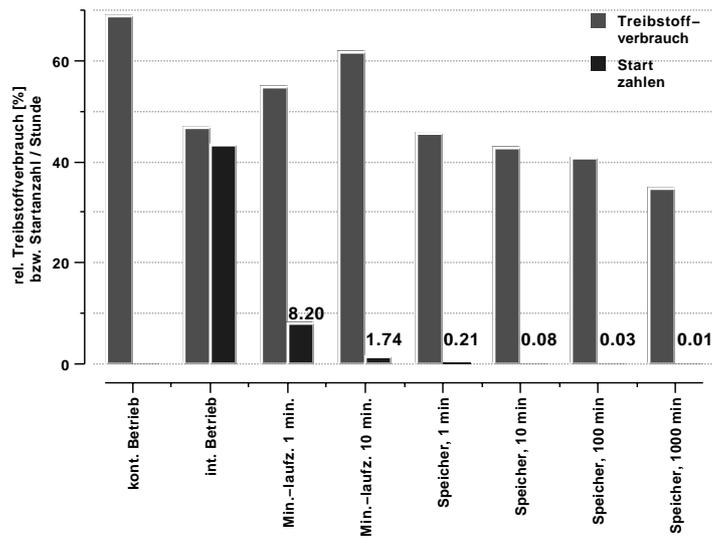
#### 4 Vergleich verschiedener Systemkonfigurationen und Steuerungen

Beispielhaft für einen Standort an der Nordsee werden im folgenden die Ergebnisse von Simulationsrechnungen für ein Wind-Diesel System (Windanlage, Dieselgenerator, optional Energiespeicher) vorgestellt. An dem betrachteten Standort beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe der Windanlage  $6.2 \text{ ms}^{-1}$ . Die Windanlage ist so dimensioniert, daß der brutto Energieertrag der Windanlage an diesem Standort gleich der mittleren Verbraucherlast ist.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für verschiedene Systemauslegungen und Betriebsarten des Dieselmotors sind in Abb. 5 dargestellt.

Bei den Systemen mit Energiespeicher kann ein hohes Treibstoffeinsparpotential zusammen mit einer geringen Schaltzyklenzahl des Dieselaggregates realisiert werden. Dies ist schon mit Speichern sehr kleiner Kapazität (hier: wenige Lastminuten) möglich. Für diese Art von Systemen sind also Speicher mit kleiner Kapazität aber großer Leistung gefragt. Weitere Simulationsrechnungen haben gezeigt: Der Speicher muß so dimensioniert sein, daß alleine aus dem Speicher die maximale Last versorgt werden kann. Die Speichergröße selbst hat nur einen geringen Einfluß auf die erzielten Treibstoffeinsparungen, nennenswert größere Einsparungen lassen sich nur mit Speichern sehr großer Kapazität erreichen.

Mit Systemen ohne Energiespeicher können generell nur geringere Treibstoffeinsparungen erzielt werden, als bei den Systemen mit Energiespeicher. Eine Betriebsführung, die auf der momentanen Leistungsbilanz zwischen Windanlage und Verbraucherlast beruht (intermittierender Betrieb des Dieselmotors) führt zu einer sehr großen Zahl von Dieselschaltzyklen (im Jahresmittel etwa alle 1,5 Minuten ein Dieselstartvorgang). Betriebsarten, die eine Mindestlaufzeit für den Dieselgenerator vorsehen, können die Zahl der notwendigen Dieselschaltvorgänge deutlich reduzieren, gleichzeitig reduzieren sich aber auch die erzielten Treibstoffeinsparungen deutlich. Dies ändert sich auch dann nicht wesentlich, wenn die Nennleistung der Windanlage vergrößert wird.



**Abb. 5:** Vergleich verschiedener Systemkonfigurationen und Steuerungen. Dargestellt sind die Ergebnisse von Simulationsrechnungen für einen Standort an der Nordsee ( $u = 6.2 \text{ ms}^{-1}$ ). Die Windanlage ist so dimensioniert, daß die mittlere Leistung aus der Windanlage gleich der mittleren Verbraucherlast ist. Der Treibstoffverbrauch des Dieselmotors ist relativ zu dem Treibstoffverbrauch in einem System ohne Windanlage und ohne Speicher angegeben. Im einzelnen bedeuten:

- kont. Betrieb:** kontinuierlicher Betrieb des Dieselmotors.
- int. Betrieb:** intermittierender Betrieb des Dieselmotors, Steuerung aufgrund der momentanen Leistungsbilanz.
- Min.-laufz. 1 min.:** intermittierender Betrieb des Dieselmotors mit der Vorgabe einer Mindestlaufzeit von einer 1 Minute für den Dieselmotor.
- Min.-laufz. 10 min.:** intermittierender Betrieb des Dieselmotors mit der Vorgabe einer Mindestlaufzeit von 10 Minuten.
- Speicher, 1 / 10 / 100 / 1000 Min.:** intermittierender Betrieb des Dieselmotors, zusätzlich ein Energiespeicher. Die Speicherkapazität ist hier als die Zeit angege-

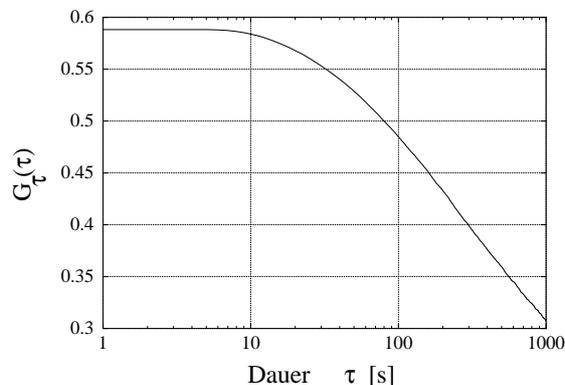


**ben, in der die mittlere Verbraucherlast alleine aus dem Speicher versorgt werden kann.**

Durch die Integration eines Energiespeichers in das Versorgungssystem läßt sich das Treibstoffeinsparpotential deutlich erhöhen - andererseits vergrößern sich mit dem Energiespeicher auch die technische Komplexität des Systems und die notwendigen Investitionen. Daher stellt sich die Frage, wie hoch die Treibstoffeinsparungen sind, die maximal mit Systemen ohne Energiespeicher erzielt werden können und wie eine Steuerung für den Dieselmotor formuliert werden kann, die hohe Treibstoffeinsparpotentiale realisiert, andererseits aber die notwendigen Dieselschaltvorgänge auf eine technisch zulässige Anzahl begrenzt.

## 5 Systeme ohne Energiespeicher

In Wind-Diesel Systemen ohne Energiespeicher kann der Dieselmotor sinnvollerweise nur dann ausgeschaltet werden, wenn die Leistung aus der Windanlage mindestens so groß wie die Verbraucherlast ist. Betrachtet man die Leistungsbilanz "Leistungsabgabe Windanlage - Verbrauch" ( $P_{\text{diff}}(t)$ ) kann man die Dauern der Zeitintervalle mit positiver Leistungsbilanz statistisch analysieren. Ein Beispiel für eine Wahrscheinlichkeitsfunktion der Dauern mit positiver Leistungsbilanz ist in Abb. 6 gezeigt. In dem gezeigten Beispiel ist in etwa 58 % der Betriebszeit die Leistungsbilanz positiv; in etwa 40 % der Zeit ist die Bilanz positiv in Zeitintervallen, die eine Dauer von 5 Minuten oder länger haben.



**Abb. 6:** Beispiel für  $G_\tau(\tau)$ : Die Funktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß (1) die Verbraucher alleine aus Windenergie versorgt werden können ( $P_{\text{diff}} > 0$ ) und (2) daß dieser Zustand eine Dauer von mindestens  $\tau$  Sekunden hat.

Das Ziel einer "optimalen" Steuerung für den Dieselmotor soll nun sein, bei einer vorgegebenen maximalen Anzahl von Dieselschaltvorgängen den Treibstoffverbrauch des Dieselmotors zu minimieren (Eine allgemein gültige, maximal zulässige Anzahl der Dieselschaltzyklen ist schwer anzugeben, da diese Zahl u.a. stark von dem verwendeten Maschinentyp und der Methode zum Starten des Motors abhängt.). Mit der Kenntnis der Statistik von  $P_{\text{diff}}$  kann eine optimale Steuerung so formuliert werden:

$$s_{\text{opt}}(t): \text{Dieselmotor nur "aus", wenn } P_{\text{diff}}(t') > 0 \quad \forall t' \in [t, t + \tau_{\text{opt}}]$$

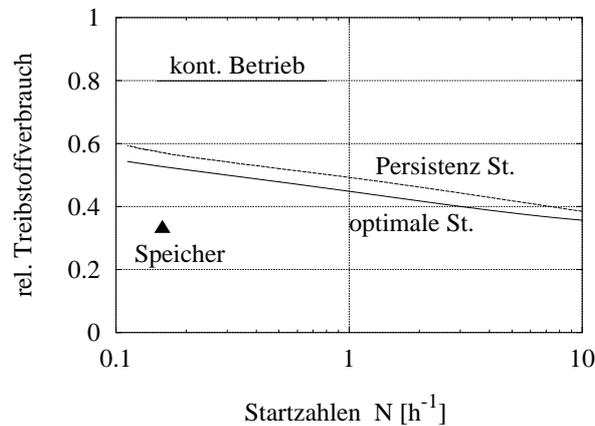
Der Parameter  $\tau_{\text{opt}}$  kann hierbei aus der Statistik von  $P_{\text{diff}}$  bestimmt werden (Für weitere Details siehe /BEYER 1997/). Diese Steuerung benötigt allerdings eine optimale Vorhersage für die Größe der Bilanz  $P_{\text{diff}}(t)$ . Diese läßt sich nur in Simulationsrechnungen verwirklichen. Eine Steuerung, die eine Persistenzvorhersage für  $P_{\text{diff}}(t)$  verwendet, und daher auch in realen Systemen anwendbar ist, kann wie folgt formuliert werden:

$$s_{\text{per}}(t): \text{Dieselmotor nur "aus", wenn } P_{\text{diff}}(t') > 0 \quad \forall t' \in [t, t - \tau_{\text{opt}}]$$

Diese Steuerungen können nun in Simulationsrechnungen angewendet werden um die Treibstoffeinsparpotentiale, die sich unter diesen Steuerfunktionen ergeben, zu bestimmen. Dazu muß eine maximal erlaubte Schaltzyklenzahl für den Dieselmotor vorgegeben und der Parameter  $\tau_{\text{opt}}$  berechnet werden (Anm.: Die zu erwartenden Treibstoffeinsparpotentiale können auch direkt aus den statistischen Eigenschaften der Bilanzzeitreihe  $P_{\text{diff}}$  bestimmt werden, siehe /BEYER 1997/.).

Abb. 7 zeigt beispielhaft die Ergebnisse von Rechnungen für ein einfaches Wind-Diesel System an einem Standort mit sehr guten Windbedingungen. Zum Vergleich wurde auch ein System mit kleinem Energiespeicher berechnet.

Den Rechnungen ist zu entnehmen, daß bei vorgegebener maximaler Schaltzyklenzahl der Unterschied zwischen dem Treibstoffverbrauch, der sich bei optimaler Steuerung des Dieselmotors ergibt und der einfachen Steuerung, die auf einer Persistenzvorhersage für die Leistungsbilanz basiert, erstaunlich gering ist. Im Vergleich zu dem System mit kleinem Energiespeicher haben die hier untersuchten Systeme bei gleichen Dieselschaltzahlen ein geringeres Treibstoffeinsparpotential. Die Unterschiede im Treibstoffeinsparpotential zwischen Systemen mit oder ohne Energiespeicher werden allerdings gering an Standorten mit sehr guten Windbedingungen und bei großzügiger Dimensionierung der Windanlage.



**Abb. 7:** Treibstoffverbrauch für einfache Wind-Diesel Systeme als Funktion der maximal zulässigen Dieselstartzahlen für die optimale und die Persistenz Steuerung. Das zugrundegelegte System besteht aus einem Dieselgenerator mit 30 kW<sub>el</sub> Nennleistung und einer Windanlage (30 kW<sub>el</sub>). Die mittlere Verbraucherlast beträgt 13 kW<sub>el</sub>. Die Ergebnisse beziehen sich auf den Standort Las Palmas, mit einer mittleren Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von 10.2 ms<sup>-1</sup>. Unter diesen Windbedingungen beträgt die mittlere Leistung der Windanlage 20 kW. Zusätzlich eingetragen ist der Wert, der sich für ein System mit einem kleinen Speicher (10 Lastminuten) und einer einfachen Steuerung für den Dieselmotor ergibt.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Untersuchungen zur Auslegung und Steuerung von Wind-Diesel Systemen vorgestellt. Im Vordergrund standen dabei Untersuchungen zur energetischen Optimierung des Systems, d.h. die Maximierung der erzielbaren Treibstoffeinsparungen, unter der Randbedingung, daß die dafür notwendige Schaltzyklenzahl für den Dieselmotor einen vorgegebenen Wert nicht überschreitet. Große Treibstoffeinsparpotentiale lassen sich mit Systemen, die einen Energiespeicher haben, erzielen. Es wurde gezeigt, daß Energiespeicher geringer Kapazität (wenige Lastminuten) dafür ausreichend ist. Für Systeme ohne Energiespeicher wurde eine optimale Steuerfunktion für den Dieselmotor vorgestellt: Die Treibstoffeinsparungen, die sich bei Anwendung dieser optimalen Steuerung ergeben, kennzeichnen das maximal mögliche Einsparpotential für diese Systeme. Die Unterschiede in der Treibstoffeinsparung, die sich bei Anwendung der optimalen Steuerung ergeben im Vergleich zu den Einsparungen, die sich bei einer einfachen Steuerung, die eine Persistenzvorhersage für die Leistungsbilanz "Windener-



gieranlage - Verbrauch" verwendet, sind erstaunlich gering. Die Treibstoffeinsparungen in den Systemen ohne Energiespeicher sind für die beiden untersuchten Steuerungen in der Regel geringer, als die Einsparungen, die sich bei Systemen mit Energiespeicher ergeben. Der nächste Schritt zur Auswahl einer geeigneten Systemkonfiguration müßte die Einführung einer ökonomischen Bewertungsfunktion für diese Systeme sein.

Dieser Beitrag zeigt die Ergebnisse von Arbeiten, die ich an der Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg und dem Deutschen Windenergie Institut DEWI, Wilhelmshaven durchgeführt habe. Für die große Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeiten durch die genannten Institutionen möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

## 7 Literatur

- /BEYER 1995a/ H.G. Beyer, K. Nottebaum: Synthesis of Long Term Hourly Wind Speed Time Series on the Basis of the European Wind Atlas Data. *Solar Energy*, 54(5) 351-355, 1995.
- /BEYER 1995b/ H.G. Beyer, T. Degner, H. Gabler: Operational Behaviour of Wind Diesel Systems Incorporating Short-Term Storage – an Analysis via Simulation Calculations. *Solar Energy*, 54(6) 429-439, 1995.
- /BEYER 1997/ H.G. Beyer, T. Degner: Assessing the Maximum Fuel Savings Obtainable in Simple Wind-Diesel Systems. *Solar Energy*, 61(6) 5-10, 1997.
- /CRAMER 1989/ G. Cramer, B. Hanna: Design, Experience and Economics of the Wind/Diesel/Batterie System on the Irish Island of Cape Clear. In Proc. European Community Wind Energy Conference, Glasgow, 708-712, 1989.
- /INFIELD 1988/ D.G. Infield: A Wind/Diesel System Operating with Flywheel Storage. In Proc. European Community Wind Energy Conference, Herring, 367-372, 1988.
- /LAVALLEE 1987/ M. Lavallee, L. Martell, R. Reid, R.A. Rouleau, B. Saulnier: Wind-Diesel Coupling: Developments at Hydro-Quebec. In Proc. British Wind Energy Association, 1987.



- /MADSEN 1986/ P.H. Madsen: Simplified Rotor Loads from Wind Turbulence. In Proc. European Community Wind Energy Conference, Rom, 377-382, 1986.
- /MANWELL 1988/ J.F. Manwell, J.G. McGowan, W. Jeffries: Experimental Data from the Block Island Wind/Diesel Project. Wind Engineering, 13(3) 111-131, 1988.
- /SHINOZUKA 1972/ M. Shinozuka, C.-M. Jan: Digital Simulation Of Random Processes and its Applications. Journal of Sound and Vibration, 25(1) 111-128, 1972.
- /TROEN 1989/ I. Troen, E.L. Peterson: European Wind Atlas. Riso National Laboratory, 1989.
- /WANG 1991/ Cheng Xu Wang: A Study of the Technical and Economic Aspects of Wind-Diesel Systems for Rural Areas, Pastoral Areas and Islands in the People's Republic of China. Forschungsbericht 032-4444-E, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1991.



## **ISET - LAB – Software zur Simulation von Bleibatterien**

Peter Caselitz, Ralf Juchem  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59  
34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-0, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: dce@iset.uni-kassel.de

### **1 Einleitung**

Bleibatterien werden in unterschiedlichen Bereichen verwendet, z.B. zur Notstromversorgung, zur Traktion, in autonomen PV-Anlagen oder als Starterbatterie im Bordnetz von Kraftfahrzeugen. Die Modellierung und Simulation solcher Akkumulatoren ist daher nicht nur ein wichtiges Hilfsmittel bei der Entwicklung der Batterien selbst: Auch zur Speicherdimensionierung, bei der Entwicklung von Laderegler, Batterie-Stromrichtern, Überwachungseinheiten usw. haben gute Batteriemodelle und eine flexibel einsetzbare Simulationssoftware einen hohen Nutzen. In den vergangenen Jahren wurde am ISET daher ein Modell und ein Software-Paket zur Simulation von Bleibatterien entwickelt, das für die genannten Zwecke sehr gut geeignet ist. Im vorliegenden Beitrag werden die wichtigsten Eigenschaften von ISET-LAB beschrieben und einige Anwendungsmöglichkeiten skizziert.

### **2 Struktur und Implementierung des Modells**

Eine Beschreibung des in ISET-LAB implementierten Modells findet man z.B. in /Caselitz 1994/. An dieser Stelle mögen einige Bemerkungen zur Struktur des Modells daher ausreichen.

Die dynamischen Eigenschaften einer Bleibatterie werden vorwiegend durch die physikalischen und elektrochemischen Prozesse in den Elektroden einer Batterie bestimmt. Das in ISET-LAB implementierte Modell bildet diese Vorgänge weitgehend nach. Es kann daher auf einfache Weise parametrisiert werden.

Die Zellen einer Bleibatterie lassen sich in fünf Bereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften einteilen: die beiden Elektroden, zwei Separatoren und der Bereich zwischen



den Separatoren. Die Elektroden lassen sich als mikroheterogene Systeme betrachten, die aus mehreren festen und einer flüssigen Phase bestehen. Z.B. bestehen die festen Phasen der positiven Elektrode aus Bleidioxid und Bleisulfat, das beim Entladen gebildet wird /Caselitz 1996/. Die flüssige Phase ist wäßrige Schwefelsäure.

Zur mathematischen Beschreibung des Verhaltens einer Bleibatterie müssen in allen Bereichen für verschiedene Größen Bilanzgleichungen formuliert werden. Dazu gehören besonders verschiedene Stoffmengendichten, die elektrische Ladungsdichte und die Entropiedichte. Die Bilanzgleichungen haben die allgemeine Form

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} = -\text{div } \mathbf{J}_k + \mathcal{J}_k,$$

in der die zeitliche Änderung der Dichte  $x$  mit der Divergenz der Transportstromdichte  $\mathbf{J}$  und der Quellstromdichte  $\mathcal{J}$  verbunden ist. Beide Stromdichten hängen von allen Dichten und allen Dichtegradienten ab.

$$\mathbf{J}_k = \mathbf{J}_k(x_i, \text{grad } x_i)$$

$$\mathcal{J}_k = \mathcal{J}_k(x_i, \text{grad } x_i)$$

Im Prinzip sind in diesen Funktionen die kompletten lokalen Eigenschaften des Systems enthalten. Allerdings werden die notwendigen Daten in der Literatur nicht immer als Funktion der Dichten angegeben. In manchen Fällen erhalten die konjugierten Potentiale aus meßtechnischen Gründen den Vorzug, z.B. verwendet man anstelle der Entropiedichte besser die Temperatur als lokale Zustandsvariable. Die lokalen Differentialgleichungen haben dann nicht mehr die einfache Form eines Systems reiner Bilanzgleichungen. Für das in ISET-LAB implementierte Batteriemodell wurden die Stoffkonzentrationen, die Temperatur und die Elektrodenpotentiale als Zustandsgrößen gewählt.

Zur Implementierung des Modells wurde das vorliegende System partieller Differentialgleichungen in der Dimension reduziert und räumlich diskretisiert. Die geometrische Dimension konnte ohne größere Fehler auf eine Raumrichtung verringert werden, da die wesentlichen Prozesse in einer Zelle nur orthogonal zu den Elektroden ablaufen. Für den Anwender bietet ISET-LAB die Möglichkeit, die Diskretisierung oder Segmentierung der fünf Bereiche einer Zelle interaktiv zu wählen, um so eine bestmögliche Anpassung an die Belastungsprofile einer Batterie zu erreichen.

Das aus der Reduktion der räumlichen Dimension und der Segmentierung resultierende System nichtlinearer gewöhnlicher impliziter Differentialgleichungen 1. Ordnung läßt sich sehr übersichtlich als Netzwerk darstellen /CASELITZ 1996a/, /CASELITZ 1998/. In Abbildung 1 ist das Batteriemodell dagegen als Black-Box mit den Eingangsgrößen

*Batteriestrom und Umgebungstemperatur* und der Ausgangsgröße *Klemmenspannung* dargestellt. Außerdem stellt ISET-LAB bei Bedarf auch alle internen Größen, wie Stromdichten, Elektrodenpotentiale usw. zur Verfügung.

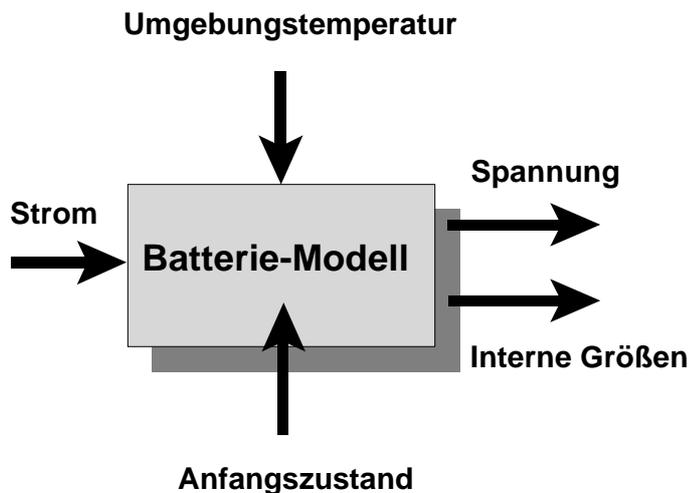


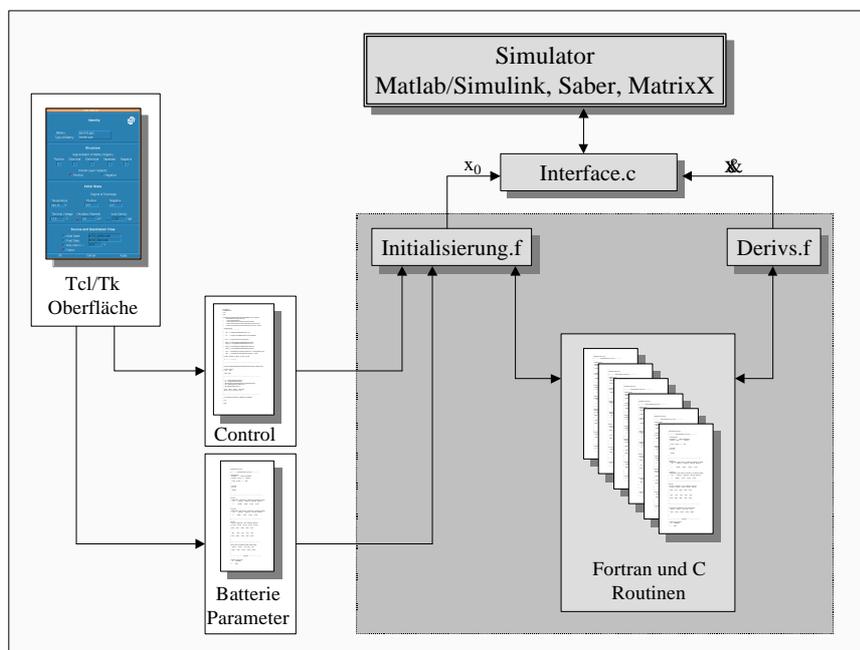
Abb. 1: Batteriemodell ISET-LAB in Blockdarstellung

Die Parameter des Modells werden in die beiden Gruppen *charakteristische Parameter* und *konstruktive Parameter* eingeteilt. Zu den charakteristischen Parametern gehören die Parameter, die für alle Bleibatterien gleich sind, z.B. Molvolumina, Reaktionsentropien oder Standardaustauschstromdichten der Haupt- und Nebenreaktionen. Die konstruktiven Parameter sind spezifisch für die zu simulierende Batterie, also z.B. für eine bestimmte Starterbatterie eines bestimmten Herstellers. Zu diesen Parametern gehören die geometrischen Abmessungen der Elektroden, die Massen der aktiven und passiven Substanzen und die Porositäten der formierten Elektroden. Die Daten sind bei Batterie-Herstellern im allgemeinen gut bekannt und können erfragt werden. Messungen sind daher zur Parametrierung des Modells nicht notwendig.



Die Struktur der Software ISET-LAB ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Kern des Modells besteht aus etwa 50 C und FORTRAN Routinen. Diese werden von zwei Hauptroutinen aufgerufen, die den Anfangszustand und die zeitlichen Ableitungen der Zustandsgrößen über eine Interfacerroutine an die Simulationsumgebung übergeben. Durch den modularen Aufbau kann ISET-LAB in der Regel durch kleinere Änderungen dieser Routine an unterschiedliche Simulationsumgebungen angepaßt werden. Zur Zeit sind Schnittstellen für die Simulatoren Matlab / Simulink, MatrixX und Saber implementiert.

Der Anfangszustand und die konstruktiven Parameter der Batterie können mit Hilfe eines Tcl / Tk – Programmes abgelegt und modifiziert werden. Diese Werte werden zu



**Abb. 2: Implementierung des Batteriemodells ISET-LAB**

Beginn einer Simulation über die Initialisierungsroutine eingelesen.

Die Verwirklichung eines Softwarepakets wie ISET-LAB in einer Hochsprache bringt gegenüber der Implementierung in einer Simulatorsprache einige Vorteile mit sich, z.B.

- die Unabhängigkeit von der Simulationsumgebung



- die hohe Rechengeschwindigkeit
- die Möglichkeit der strukturierten und objektorientierten Programmierung
- die leichte Einbindung existierender Routinen

In manchen Fällen kann die Anbindung von Hochsprachmodulen an die Simulationsumgebung sehr aufwendig sein. Auch können bei neuen Versionen der Simulationsumgebungen Inkompatibilitäten auftreten. Trotzdem verlieren diese Nachteile der Hochsprachimplementierung mit steigender Komplexität eines Softwarepakets gegenüber den Vorteilen schnell an Bedeutung. Die Implementierung des Batteriemodells in Fortran und C hat sich gut bewährt.

### 3 Anwendungsbeispiele

#### 3.1 Kleinsignalverhalten einer Bleibatterie

Für viele Anwendungen ist das Kleinsignalverhalten einer Bleibatterie interessant.

Mit Hilfe von ISET-LAB können für jeden Zustand einer Bleibatterie die Matrizen **A**, **B**, **C** und **D** des lokal linearisierten Systems

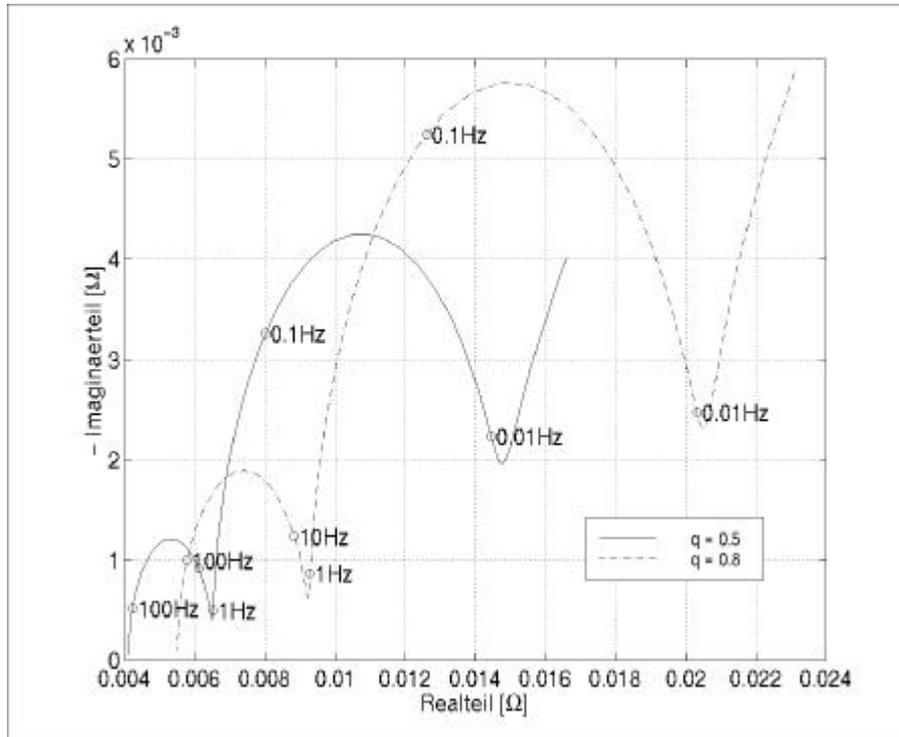
$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{B} \cdot (i - i_o) \\ u - u_0 &= \mathbf{C} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{D} \cdot (i - i_o)\end{aligned}$$

numerisch ermittelt werden. In diesen Gleichungen ist  $x_0$  der Zustand der Batterie,  $i_0$  der Mittelwert des Klemmenstroms und  $u_0$  der Mittelwert der Klemmenspannung. Kleine Abweichungen des Stroms vom Mittelwert verursachen geringe Änderungen des Batteriezustands und entsprechende Änderungen der Klemmenspannung.

Aus den Matrizen können eine ganze Reihe weiterer Größen berechnet werden. Beispielsweise erhält man die Impedanz einer Bleibatterie aus

$$Z(j\omega) = \mathbf{D} + \mathbf{C}(j\omega\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$$

Abbildung 3 zeigt die Ortskurvendarstellung für zwei verschiedene Entladegrade  $q = 0.5$  und  $q = 0.8$  im Frequenzbereich von einigen Millihertz bis zu einigen hundert Hertz. Dabei wurden die Batteriezustände durch eine Vorsimulation ermittelt, bei der eine voll geladene Batterie mit  $I_{20}$  entladen wurde.



**Abb. 3: Ortskurve für die Impedanz einer Bleibatterie bei zwei verschiedenen Entlade-graden und konstanter Temperatur**

Die beiden Ortskurven zeigen eine charakteristische Form, die von zwei Halbkreisen geprägt ist. Der kleinere Halbkreis repräsentiert die Durchtrittsreaktionen an der negativen Elektrode, der größere Halbkreis die Elektrodenreaktion an der Positiven. Der Verlauf der Ortskurve im Bereich kleiner Frequenzen wird im wesentlichen durch die Säurediffusionseffekte in den Zellen bestimmt. Diese Ortskurven sind außerdem sehr stark von der Temperatur abhängig.

### 3.2 Langzeitverhalten von Bleibatterien

Im folgenden wird eine Anwendung des Batteriemodells vorgestellt, bei der das Batterieverhalten über einen Zeitraum von mehreren Tagen berechnet wird. ISET-LAB wird dazu in ein kleines elektrisches Netz mit Generator und Verbrauchern eingebunden, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist. Das Beispiel kann z.B. als ein vereinfachtes Modell für

ein Solar-Home-System angesehen werden. Der Generatorblock symbolisiert dann einen Photovoltaikgenerator und die Lasten die für ein solches System typischen elektrischen Verbraucher.

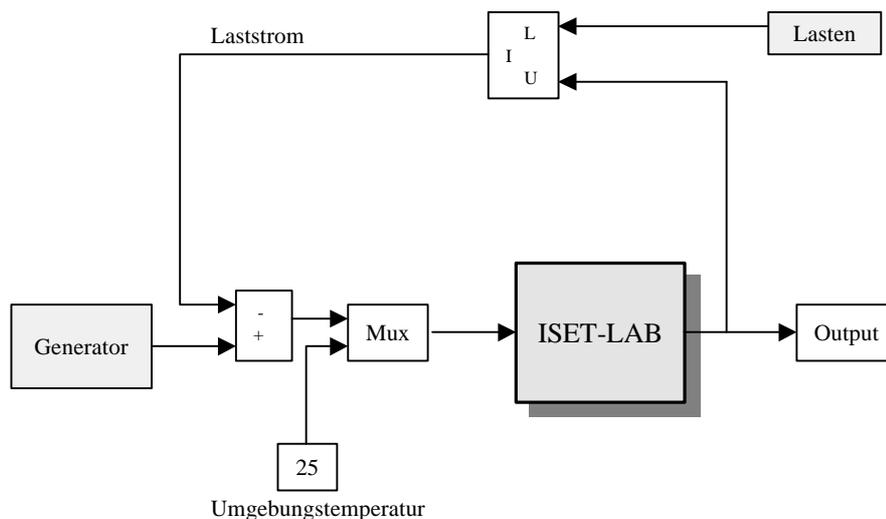


Abb. 4: ISET-LAB in der blockorientierten Simulationsumgebung Matlab/Simulink

Mit einem vereinfachten Tagesgang des Generators und der Lasten wurde ein zehntägiger Zyklus mit sechs verschiedenen Starterbatterien simuliert. Für den elften Tag wurde ein Generatorausfall angenommen, so daß die Verbraucher aus der Batterie versorgt werden müssen. In Abbildung 5 ist der Verlauf der Klemmenspannung an diesem Tag für die verschiedenen Batterien dargestellt.

Die Batterie mit der höchsten Kapazität (110 Ah) hält der Belastung problemlos stand. Die Batterien kleinerer Kapazität (55 Ah und 60 Ah) brechen unter der vorgegebenen Belastung zusammen. Die beiden 70 Ah Batterien verhalten sich unterschiedlich. Während die Klemmenspannung der einen Batterie unter der Belastung ebenfalls zusammenbricht, verkraftet die andere das vorgegebene Belastungsprofil noch gut. Bei den beiden Batterien handelt es sich um verschiedene Modelle des gleichen Herstellers, die sich im konstruktiven Aufbau aber unterscheiden.

Ergebnisse dieser Art sind mit einfachen Ladebilanzrechnungen nicht zu erhalten.

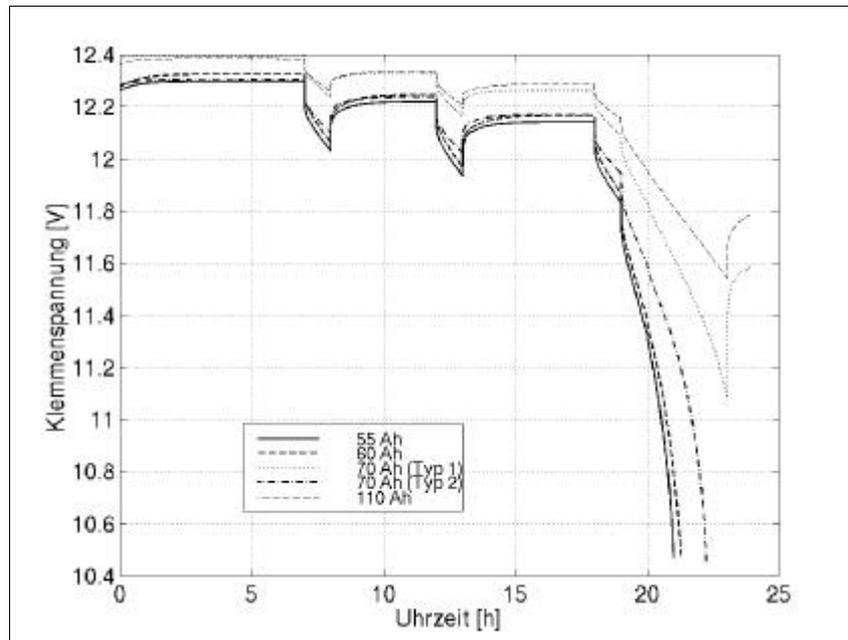


Abb. 5: Verhalten verschiedener Bleibatterien in einem vereinfachten Solar-Home-System bei Ausfall des PV-Generators

#### 4 Literatur

- /CASELITZ 1994/ P. Caselitz: Simulation des dynamischen Verhaltens elektro chemischer Speicher, Forschungsverbund Sonnenenergie, Themenheft 94/95
- /CASELITZ 1996/ P. Caselitz: Physikalisches Modell für Starterbatterien zur Bordnetzsimulation von Kraftfahrzeugen, VDI-Berichte Nr. 1287, 1996
- /CASELITZ 1996a/P. Caselitz: Batteriemodelle – Aussagekraft und Einsatzmöglichkeiten, Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik 1996
- /CASELITZ 1998/ P. Caselitz, R. Juchem: Computer Aided Design of Battery Management Systems for Automobiles – A Model for Lead Acid Batteries, SAE Technical Paper Series No. 980309, ISSN 0148-7191



## Simulation einer Kläranlage

Peter Maurer, Bodo Lamberth  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Rodenbacher Chaussee 6, 63457 Hanau  
Tel.: (06181) 58-2705, Fax: (06181) 58-2702  
e-mail: iset\_hanau@internetdienste.de

### 1 Einleitung

Simulation ist die Darstellung oder Nachbildung von technischen oder biologischen Systemen durch mathematische Modelle. Dabei soll die Untersuchung des Modells einfacher, schneller und billiger sein als eine Untersuchung am Original oder Untersuchungen an Modellen. Die Untersuchungen am Modell müssen aber Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Originals zulassen. Die dynamische Simulation berücksichtigt sowohl zeitabhängige externe Größen wie Tagesgänge, saisonale Variationen, als auch Prozeßsteuerungen, usw. Dadurch ist es möglich, zeitabhängige Prognosen über das Verhalten des Systems zu machen, sowie verschiedene Betriebsstrategien mit ihren Auswirkungen zu testen und anschließend die beste Konzeption im Betrieb des Originals zur Anwendung zu bringen.

### 2 Modellgrundlagen

Die hier vorgestellte dynamische Simulation basiert auf der mathematischen Modellierung der IAWPRC Arbeitsgruppe, die diesen Ansatz 1987 erstmals veröffentlichte. Das Modell simuliert das Verhalten einer kommunalen Kläranlage nach dem Belebungsverfahren anhand des Abbaus der gelösten und partikulären organischen Substanzen, der Nitrifikation und Denitrifikation sowie der Schlammproduktion und des Sauerstoffbedarfs.

Dabei werden 13 Stoffgruppen durch acht Prozesse miteinander verknüpft. Die Verknüpfungen bilden die Elemente einer stöchiometrischen Matrix, die einen Prozeß  $j$  mit den Stoffgruppen  $i$  verbindet. Eine Übersicht darüber gibt Abbildung 1 wieder.



Das Modell gibt Umsatzraten (Reaktionsgeschwindigkeiten  $r_{ij}$ ) für jede Substanz an. Berechnet wird ein System von linearen Differentialgleichungen bei dem jede Substanz mit der dazugehörigen Umsatzrate berücksichtigt wird. Die Differentialgleichung hat die Form:

$$\frac{dc_i}{dt} = r_i \cdot c_{0i} + f_i$$

und das Gleichungssystem für alle Komponenten

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{B}\bar{y} + \bar{f}$$

$$\text{mit } \bar{B} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \Lambda & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & & r_{2j} \\ M & & O & M \\ r_{i1} & r_{i2} & \Lambda & r_{ij} \end{bmatrix} \text{ und } \bar{y} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ M \\ c_i \end{pmatrix} \text{ und mit der rechten Seite } \bar{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ M \\ f_i \end{pmatrix}$$

Dieses Gleichungssystem wird ausgehend von einem Ausgangszustand bis zu einem Beobachtungszeitpunkt durch Integration der Stoffumsätze über der Zeit berechnet.

Einige der stöchiometrischen und kinetischen Parameter sind stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Deshalb muß das Modell durch Anpassen der Parameter auf die ortsspezifischen Bedingungen kalibriert werden. Dazu werden Tagesganglinien der wichtigen Prozeßgrößen für die einzelnen Reinigungsstufen benötigt. Die Abbildung 2 zeigt typische Meßstellen auf einer kommunalen Kläranlage.

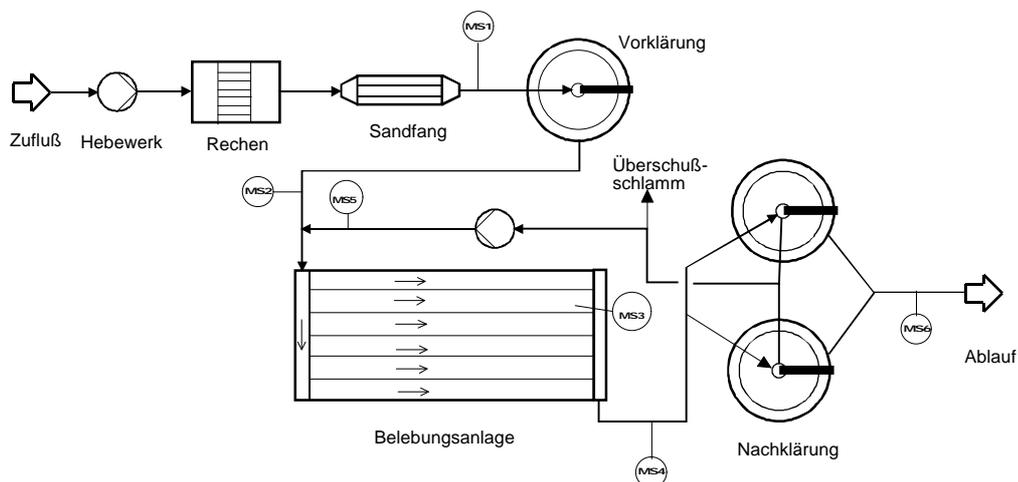
Für eine Simulation werden nicht alle Daten als Tagesgang benötigt. Wenigstens an den Meßstellen 1 und 6 sollten aber Tagesgänge (Zwei-Stunden Mischproben) von CSB, BSB5, NH4-N, Nges und Phosphat vorliegen. Werden auf einer Kläranlage nur Tagesmischproben oder Stichproben erhoben, so müssen die Daten mit einem mehrtägigen Meßprogramm ergänzt werden. Je mehr Daten vorliegen desto vollständiger kann eine Anpassung des Modells durchgeführt werden.

	S <sub>I</sub>	S <sub>S</sub>	X <sub>I</sub>	X <sub>S</sub>	X <sub>B,H</sub>	X <sub>B,A</sub>	X <sub>P</sub>	S <sub>O</sub>	S <sub>N<sub>O</sub></sub>	S <sub>N<sub>H</sub></sub>	S <sub>N<sub>D</sub></sub>	X <sub>N<sub>D</sub></sub>	S <sub>ALK</sub>	Umsatz Rate P <sub>i</sub>
aerobes Wachstum der heterotrophen		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-f_p}{Y_H}$		$-i_{kS}$			$\frac{-f_d}{t_d}$	$\hat{\mu}_H \left( \frac{S}{K_{S,H}} \right) \left( \frac{S_p}{K_{S,P}} \right) X_{B,H}$
anaerobes Wachstum der heterotrophen		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-f_p}{2.86 Y_H}$		$-i_{kS}$			$\frac{1-f_p}{1+2.86 Y_H} - \frac{f_d}{t_d}$	$\hat{\mu}_H \left( \frac{S}{K_{S,H}} \right) \left( \frac{S_p}{K_{S,P}} \right) \left( \frac{S_{NH}}{K_{S,NH}} \right) \eta_f X_{B,H}$
aerobes Wachstum der autotrophen						1		$-\frac{4 Y_H - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{kS} - \frac{1}{Y_A}$			$\frac{f_d}{t_d} - \frac{1}{Y_A}$	$\hat{\mu}_A \left( \frac{S}{K_{S,A}} \right) \left( \frac{S_p}{K_{S,P}} \right) X_{B,A}$
Absterben der heterotrophen				$1-f_p$	$-1$		$f_p$					$i_{dH} - f_p - i_{dP}$		$b_H X_{B,H}$
Absterben der autotrophen				$1-f_p$	$-1$	$-1$	$f_p$					$i_{dH} - f_p - i_{dP}$		$b_A X_{B,A}$
Ammoniumbildung aus gelöstem organischen N										1	$-1$		$\frac{1}{t_d}$	$k_a S_{ND} X_{B,H}$
Hydrolyse der gebundenen Kohlenwasserstoffe				$-1$										$k_h \frac{X_{ND}}{K_X} \left( \frac{S}{K_S} \right)^{n_H} \left( \frac{S_p}{K_{S,P}} \right)^{n_H} \left( \frac{S_{NH}}{K_{S,NH}} \right)^{n_H} \left( \frac{S_{ND}}{K_{S,ND}} \right)^{n_H} X_{ND}$
Hydrolyse des gebundenen organischen N												$-1$		$P_f \left( \frac{X_{ND}}{X_S} \right)$

**Stöchiometrische Parameter:**  
 Y<sub>H</sub> heterotrophe Ausbeute  
 Y<sub>A</sub> autotrophe Ausbeute  
 f<sub>p</sub> Biomassefraktion, die zu partikulären Produkten führt  
 i<sub>kS</sub> Verhältnis von Stickstoff zu CSB in der Biomasse  
 i<sub>kP</sub> Verhältnis von Stickstoff zu CSB in den Produkten der Biomasse

**Kinetische Parameter:**  
 heterotrophes Wachstum und Absterben  $\hat{\mu}_H$ , K<sub>S</sub>, K<sub>O,H</sub>, K<sub>N,O</sub>, b<sub>H</sub>  
 autotrophes Wachstum und Absterben  $\hat{\mu}_A$ , K<sub>N,H</sub>, K<sub>O,A</sub>, b<sub>A</sub>  
 Korrekturfaktor für anaerobes Wachstum der Heterotrophen  $\eta_f$   
 Ammoniumbildung k<sub>a</sub>  
 Hydrolyse k<sub>h</sub>, K<sub>X</sub>  
 Korrekturfaktor für anaerobe Hydrolyse  $\eta_H$

Abb. 1: Biokinetisches Modell als stöchiometrische Matrix /HENZE 1987/



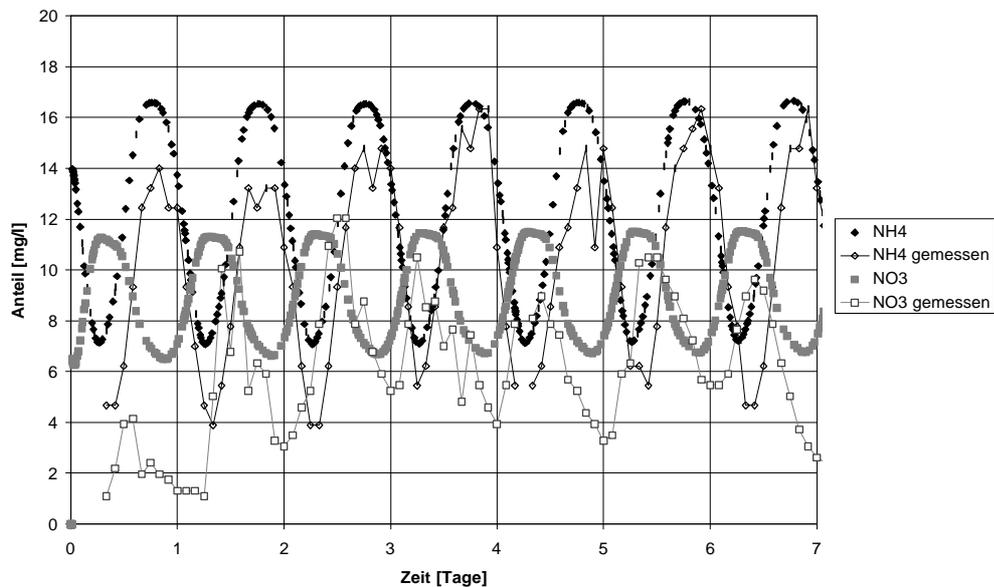
**Abb. 2: Typische Meßstellen auf einer Kläranlage**

Außerdem ist es notwendig, die kinetischen Eigenschaften der Reaktionsräume richtig zu erfassen und im Modell geeignet zu berücksichtigen. Das Modell geht von ideal durchmischten Becken aus. In der Praxis wird dies aber in den seltensten Fällen in reiner Form vorgefunden. Meistens kann das reale Verhalten durch eine Kaskadenschaltung von mehreren ideal durchmischten Reaktoren angenähert werden. Ist das Modell geeignet an die Realität angepaßt, weichen die gerechneten Werte nur wenig von den gemessenen Werten ab.

### 3 Durchführung einer Simulation

Am Beispiel einer Kläranlage, deren Verfahrensschema Abbildung 2 entspricht und für die ein umfangreiches Meßprogramm durchgeführt wurde, werden im folgenden die Möglichkeiten einer Simulation gezeigt. In Abbildung 3 ist eine Modellanpassung mit einem Vergleich von berechneten und gemessenen Werten dargestellt.

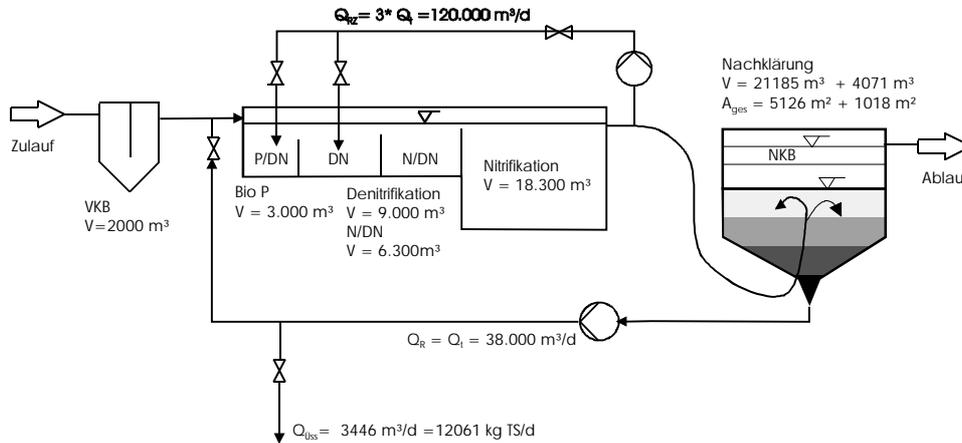
In Abbildung 3 sind die Ammonium- und Nitratwerte im Ablauf des Belebungsbeckens im Vergleich zu den berechneten Werten als Wochenganglinie gezeigt. Die Kurven liegen zwar nicht exakt aufeinander, die Abweichung ist aber im Rahmen der Meßgenauigkeit der chemischen Analysen.



**Abb. 3: Vergleich von gemessenen und berechneten Daten**

Hat man das Modell an die Realität angepaßt, dann ist es möglich, an der im Computer implementierten Anlage Veränderungen durchzuführen, um den Reinigungsprozeß zu verbessern. So kann die Erweiterung einer bestehenden Anlage vorweggenommen werden und gleichzeitig die für den Reinigungsprozeß am besten geeignete Beckenkonfiguration herausgefunden werden. Abbildung 4 zeigt eine solche neue Anlagenkonzeption nach dem Prinzip der vorgeschalteten Denitrifikation. Die bestehende Kläranlage entspricht der Verfahrenskonzeption aus Abbildung 2.

Das neue Schema sieht die Beibehaltung der bestehenden Vorklärung (VKB) zur mechanischen, sowie des bestehenden Belebungsbeckens zur anoxischen (unter Ausschluß von Luftsauerstoff) Wasserreinigung vor. Das Becken zur Nitrifikation sowie ein drittes Nachklärbecken müßten neu gebaut werden. Ein Teil der anoxischen Zone wird als Wechselzone eingerichtet (N/DN), so daß je nach Bedarf eine Begasung mit Sauerstoff durchgeführt werden kann.



**Abb. 4: Anlagenschema der geplanten Kläranlage**

Die Verschaltung der Becken und der in einem Becken durchgeführte Reinigungsschritt hat in Abhängigkeit des gewählten Prozesses einen großen Einfluß auf die Reinigungsleistung der Anlage. Die eingetragene Sauerstoffmenge wird über einen PID-Regler eingestellt. Als Meßgröße dazu dient der Sauerstoffgehalt am Abfluß der Belebung (Meßstelle 3, Abbildung 2). Die folgende Abbildung zeigt wie sich die Erniedrigung des Sauerstoffgrenzwertes und eine anschließende Vergrößerung des Denitrifikationsvolumens (Wechselzone wird ausschließlich als DN-Zone genutzt) auf die Ammonium- und Nitratwerte im Verlauf des Reinigungsprozesses auswirken.

Die Simulation wurde von einem stationären Zustand aus gestartet. Es stellte sich innerhalb kurzer Zeit ein neuer, dem veränderlichen Zufluß entsprechender Betriebspunkt ein. Allerdings war der Nitratgehalt im Ablauf der Anlage zu hoch. Durch Erniedrigen des Sauerstoffgehalts im Ablauf der Belebung und durch Vergrößern des Denitrifikationsvolumens konnte der Nitratgehalt im Ablauf der Anlage auf im Mittel 10 mg/l begrenzt werden.

Außerdem kann mit Hilfe der Simulation getestet werden, wie die zu errichtende Anlage auf Zulaufveränderungen wie zum Beispiel Regenfälle reagieren wird. Dies ist für die in Abbildung 4 skizzierte Anlage in Abbildung 6 anhand der Feststoffgehalte im Verlauf der Kläranlage dargestellt.

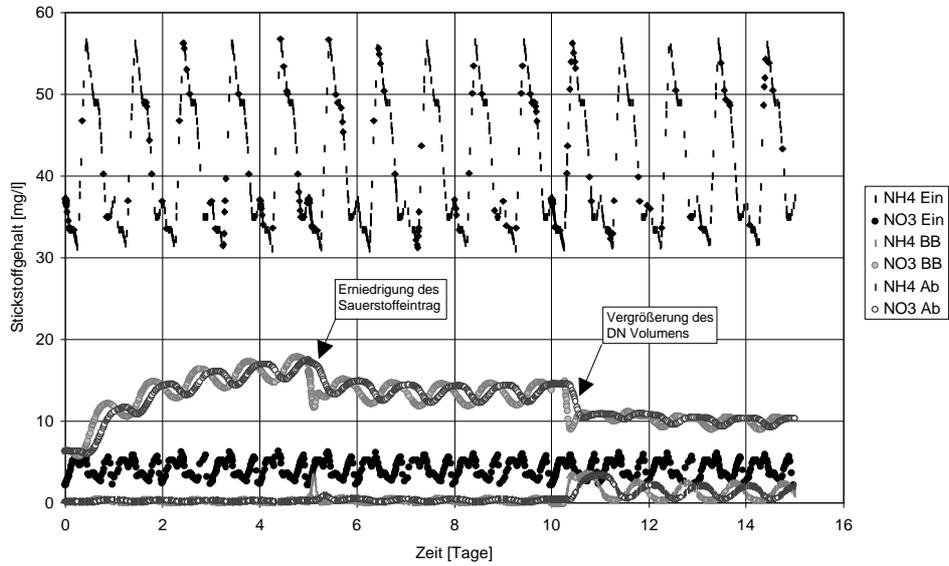
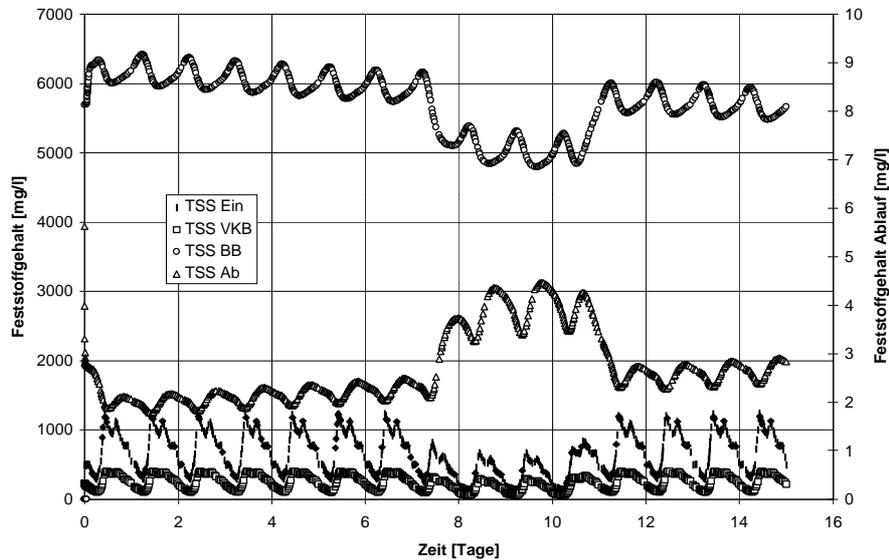


Abb. 5: Einfluß der Beckenkonfiguration auf die Reinigungsleistung



**Abb. 6: Auswirkung eines Regenfalls auf die Feststoffkonzentration**

Im Zulauf schwankt der Feststoffgehalt zwischen 400 und 1100 mg/l. Durch das Vorklärbecken wird die Feststoffkonzentration auf unter 500 mg/l begrenzt. Durch die für die biologische Reinigung notwendige Bakterienmasse steigt die Konzentration im Ablauf der Belebung auf im Mittel 6000 mg/l an. Der Großteil wird aber durch die Nachklärbecken abgeschieden, so daß im Ablauf weniger als 3 mg/l zurückbleibt (rechte Ordinate, Abbildung 6). Die Anlage befindet sich zu Beginn in einem quasistationären Zustand. Am siebten Tag regnet es, so daß innerhalb weniger Stunden der Kläranlage die doppelte Wassermenge wie bei Trockenwetter zufließt ( $\text{Mischwassermenge} = \text{Trockenwetterzufluß} + \text{Regenwasser} = 2 \cdot Q_t$ ). Dieses Ereignis wiederholt sich jeweils an den folgenden vier Tagen. Der Regen führt zu einer Verdünnung der Feststoffe im Zulauf (mehr Wasser bei gleichvielen Feststoffen), allerdings wird das durch das Vorklärbecken ausgeglichen. Aber der Volumenstoß wandert weiter durch die Kläranlage und führt zu einer Ausschwemmung der Feststoffe aus dem Belebungsbecken (Absinken der Feststoffkonzentration am Ablauf Belebung). Das bedeutet, daß die Nachklärbecken bei einem größeren Volumenstrom eine höhere Feststoffkonzentration abscheiden müssen. Wie erwartet führt das zu einer deutlichen Erhöhung der Feststoffmenge im Ablauf der Gesamtanlage (auf ca. 4 mg/l). Eine Grenzwertüberschreitung ist allerdings nicht zu beobachten. Dies heißt, daß die Nachklärbecken für diese Regenbelastung ausreichend bemessen sind. Weitere Auswirkungen zum Beispiel auf die Reinigungsleistung durch Abtrieb der aktiven Biomasse, oder eine Regelung zum Kon-



stanthalten des Biomassegehalts im Belebungsbecken können in ähnlicher Weise betrachtet werden.

#### **4 Zusammenfassung**

Die Simulation von Kläranlagen gewinnt bei Neuplanungen, Erweiterungen, Umbauten und Betriebsoptimierungen immer mehr an Bedeutung. In den Niederlanden, der Schweiz und in Nordrhein-Westfalen ist die Simulation als kostengünstiges Instrument bei diesen Prozessen vorgeschrieben.

Simulation ist die Darstellung oder Nachbildung von technischen oder biologischen Systemen durch mathematische Modelle, wobei:

- Die Untersuchung des Modells rascher, einfacher und billiger sein sollte als die Untersuchung des Originals und
- die Erkenntnisse aus dieser Untersuchung Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Originals zulassen sollen.

Dabei werden zeitabhängige externe Größen berücksichtigt.

An einem Beispiel wird die Anpassung eines Modells an eine reale Kläranlage gezeigt. Durch die Optimierungsmöglichkeiten konnte der verfahrenstechnische Ablauf verbessert und die neu zu bauende Anlage kleiner gestaltet werden.

Auf dem Markt sind bereits sehr brauchbare Simulationsprogramme verfügbar, die bei ständiger Weiterentwicklung bald unverzichtbare Instrumente bei Planung und Betriebsoptimierungen von Kläranlagen sein werden.

#### **5 Literatur:**

- |                         |                                                                                                                |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| /BEVER 1995/            | Bever, Stein, Teichmann, Weitergehende Abwasserreinigung, Oldenbourg 1995                                      |
| /HENZE 1987/            | Henze et al. Model for single-sludge wastewater treatment systems, Wat. Res. Vol. 21, No. 5, pp. 505-515, 1987 |
| /IFAK MAGDEBURG/        | Benutzerhandbuch zu SIMBA 3.0+, IFAK Magdeburg                                                                 |
| /UNIVERSITÄT STUTTGART/ | Übung zur Vertiefung Abwassertechnik, Simulation von Belebungsanlagen, Universität Stuttgart                   |