

# **INSTITUT FÜR WASSERWESEN**

**Schlußbericht**

**Bau eines Pumpen Inverters der  
Neuesten Generation  
- BEPING -**

**September 1998**

---

**Universität  
der  
Bundeswehr  
München**

**UniBw**

**Werner - Heisenberg - Weg 39**

**D - 8014 Neubiberg**



**Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen**

**Institut für Wasserwesen**

**Universitätsprofessor Dr.-Ing. W. Bechteler  
Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrologie**

**Schlußbericht**

**Bau eines Pumpen Inverters der  
Neuesten Generation  
- BEPING -**

**September 1998**

**“Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit  
Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter  
dem Förderkennzeichen 0329737 gefördert. Die Verantwortung  
für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor”.**

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK  
HANNOVER  
TECHNISCHE  
INFORMATIONSBIBLIOTHEK

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. M. Klemt, Dr.-Ing. O. Mayer  
Dipl.-Ing. H.P. Zängerl, Dipl.-Ing. O. Dauer

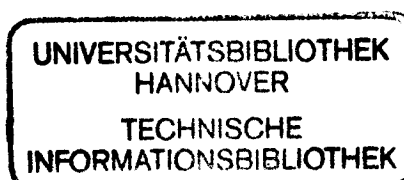
UB/TIB Hannover  
118 635 557

89



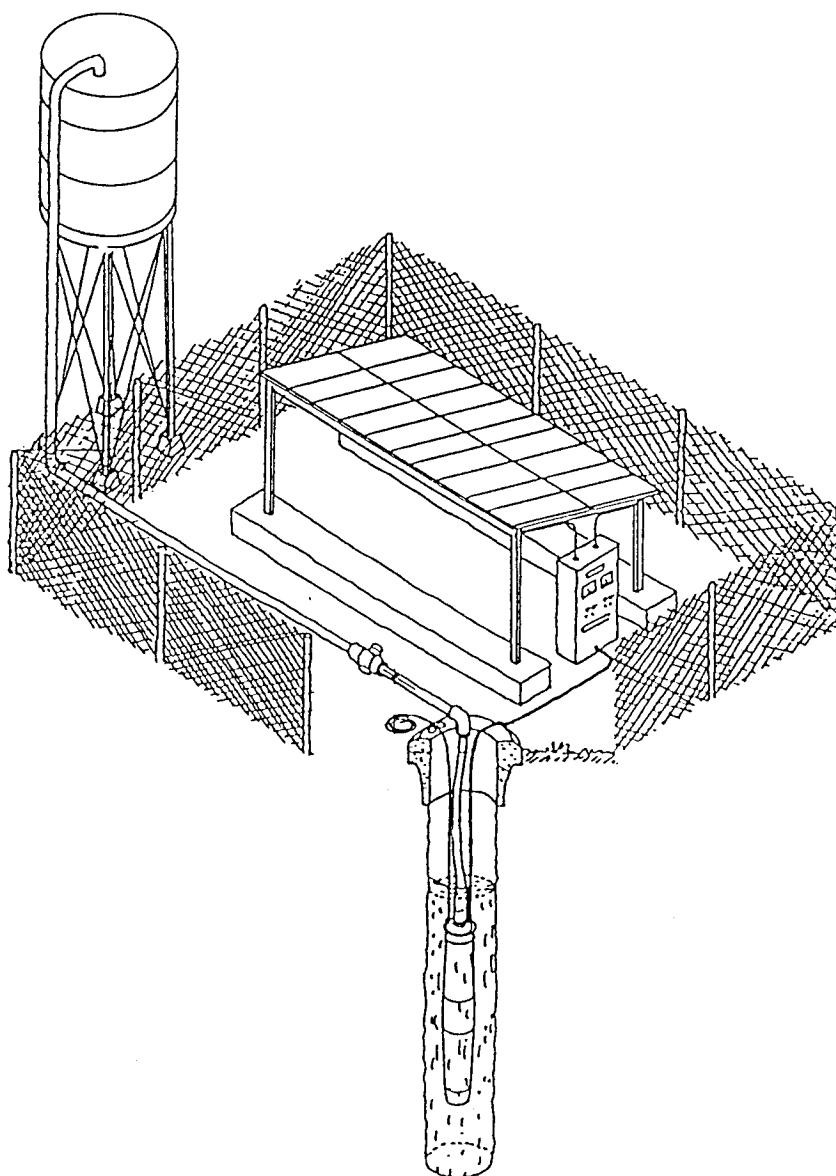
## Inhaltsverzeichnis

1. Anlaß und Zielsetzung	2
2. Komponenten eines photovoltaischen Pumpensystems (UniBw)	6
2.1. Verfügbare Komponenten	6
2.1.1. Solargenerator	7
2.1.2. Asynchronmotor	9
2.1.3. Pumpe	15
2.1.3.1. Kreiselpumpe	15
2.1.3.2. Exzentrerschneckenpumpe	16
2.1.3.2.1. Funktion	16
2.1.3.2.2. Betriebsigenschaften	17
2.1.3.2.3. Eigenschaften beim Anlauf	18
2.1.3.2.4. Einsatzbereich	20
2.1.4. Wechselrichter	21
3. Ablauf der Entwicklung (UniBw)	22
4. Anlaufsteuerung (UniBw)	26
4.1. Anlaufenergie	26
4.2. Energiespeicher für die Anlaufenergie	27
4.3. Anlaufstrategie	28
5. MPP-Regelung (UniBw)	33
6. Wechselrichter „BEPING“ (ATPE)	40
6.1. Kurzbeschreibung der Funktion	40
6.2. Einsatz des Wechselrichters in PVPS	41
6.3. Allgemeine Daten	44
6.4. Technische Daten	44
7. Zusammenfassung	46
Anhang:	
A1. Literaturverzeichnis	48



### **1. Anlaß und Zielsetzung**

Die Förderung von Wasser aus Tiefbrunnen ist in vielen Gegenden ohne Netzanschluß von zentraler Bedeutung. Erstrebenswert ist hierbei ein umweltfreundliches und möglichst wartungsfreies System mit einer hohen Verfügbarkeit und Lebensdauer. Die meist eingesetzten Dieselaggregate erfüllen diese Kriterien nicht. Sie benötigen zum Betrieb laufend Treibstoff, der meist schwer zu beschaffen ist, genauso wie Ersatzteile. Ferner besteht die Gefahr, daß Treibstoff oder Altöl die Umgebung und die Brunnen verschmutzen. Eine umweltfreundliche Alternative stellen die photovoltaischen Pumpensysteme (PVPS, Abb.1.1) dar.



*Abb.1.1: Schema eines photovoltaischen Pumpensystems (PVPS)*

---

Bei PVPS handelt es sich um Tauchpumpenanlagen ohne Batteriepufferung, bei denen die Sonnenenergie als Energiequelle dient und ein spezieller Wechselrichter die Anpassung zwischen Solargenerator und Antriebsaggregat vornimmt. Die Anlagen werden im Inselbetrieb (ohne Netzanbindung) eingesetzt und bestehen aus den Komponenten Solargenerator, Wechselrichter, Pumpe, Motor und hydraulisches System. Der Antriebsstrang besteht aus einer Kreisel- oder Exzentrerschneckenpumpe.

Bei Untersuchungen an der Universität der Bundeswehr München zur Wasserversorgung in abgelegenen Gebieten im Inselbetrieb zeigte sich, daß durch den Einsatz von Exzentrerschneckenpumpen in PVPS im Vergleich mit Kreiselpumpen der Einsatzbereich erweitert und die Tagesfördermengen im Teillastbereich und bei größeren Brunntiefen (ab ca. 50m) erhöht werden können. Hindernis dabei sind die bisher zur Verfügung stehenden Wechselrichter, welche für den Anlauf von Exzentrerschneckenpumpen meist nicht ausgelegt sind. Ausgehend von den Erfahrungen mit PVPS wurde ein Wechselrichter entwickelt, mit dem sowohl Kreisel- als auch Exzentrerschneckenpumpen in PVPS ohne Batteriepufferung zuverlässig betrieben werden können. Ein solches System stellt eine betriebstechnisch und ökologisch optimale Wasserversorgung dar.

Der wesentliche Grund für die Entwicklung des Wechselrichters besteht in der Erweiterung des Einsatzbereiches von PVPS durch die Verwendung von Exzentrerschneckenpumpen.

### **Welche Verbesserungen entstehen durch den Einsatz von Exzentrerschneckenpumpen?**

Exzentrerschneckenpumpen besitzen eine wesentlich steilere Pumpenkennlinie (Abb. 1.2) als Kreiselpumpen. Der Förderdruck steigt bei ihnen schon im niedrigen Drehzahlbereich stark an und sorgt dafür, daß im Teillastbereich bei geringer Einstrahlung Wasser gefördert werden kann. Aufgrund ihrer Konstruktion besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Drehzahl und Förderstrom, der in einem weiten Bereich unabhängig von der Förderhöhe ist. Exzentrerschneckenpumpen besitzen eine höhere Beständigkeit gegenüber abrasiven Medien. Mit steigender Verunreinigung erhält man eine immer größere Lebensdauer der Pumpe im Verhältnis zur Kreiselpumpe. Problematisch ist jedoch das Anlaufverhalten.

### **Anlaufproblematik**

Die Schwierigkeit beim Einsatz von Exzentrerschneckenpumpen in PVPS liegt im Anlaufverhalten. Da der Motor unter Last anläuft und die Reibung zwischen Stator und Rotor im Stillstand am größten ist, wird ein wesentlich höheres Anlaufmoment benötigt als bei der Kreiselpumpe. Deshalb beträgt die Leistungsaufnahme während der Anlaufphase ein

Vielfaches (ca. 4 bis 8-fache) der Kreiselpumpe. Da der Solargenerator für den stationären Betrieb ausgelegt ist, muß der größte Teil der benötigten Anlaufenergie aus einem Speicher (Kondensator) bezogen werden. Bei einer speziell auf Exzentrerschneckenpumpen abgestimmten Anlaufstrategie kann die benötigte Kapazität des Kondensators verringert und gleichzeitig ein zuverlässiges Anlaufverhalten erreicht werden. Beim derzeitigen Stand der Technik gelingt ein Anlauf teilweise nur bei einer Überdimensionierung hinsichtlich Leistung und Energiespeicher, wobei die spezifischen Parameter für jede Pumpe neu von einem qualifizierten Personal eingestellt werden muß.

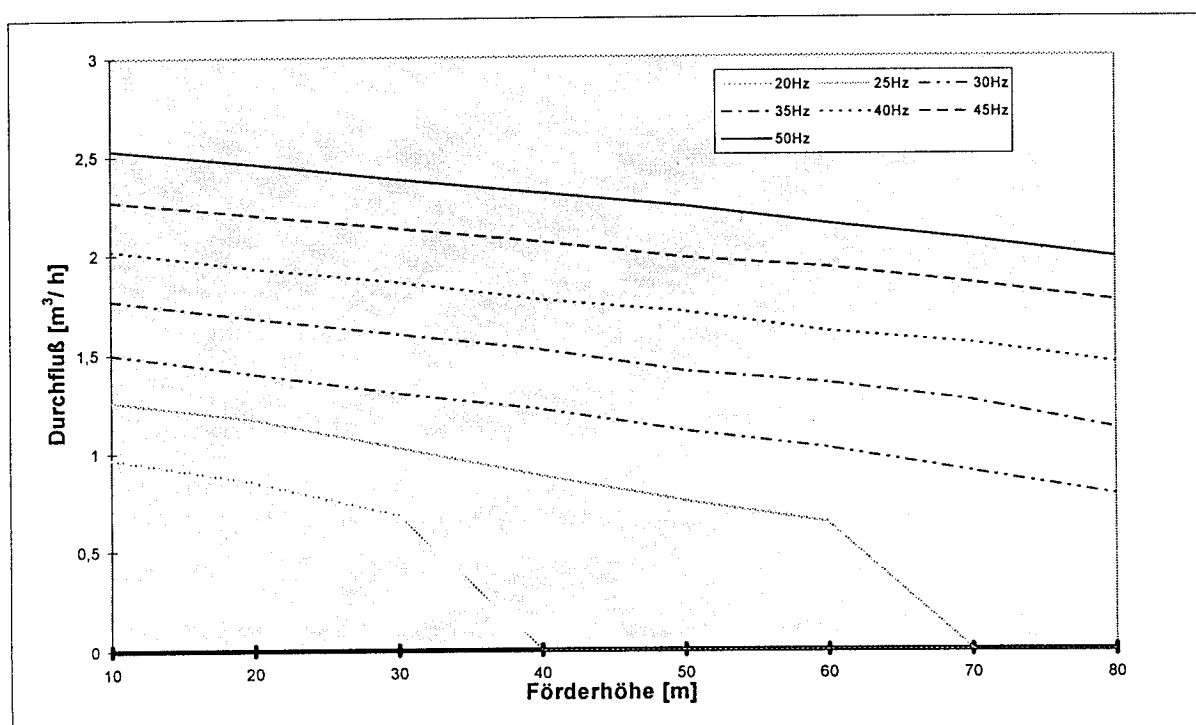


Abb. 1.2: Kennlinien der Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 bei verschiedenen Frequenzen der Ausgangsspannung des Wechselrichters

Der entwickelte Wechselrichter enthält eine spezielle Anlaufsteuerung, die den Schweranlauf von Exzentrerschneckenpumpen sicher und mit minimaler Energie durchführt. Somit wird kein Servicepersonal benötigt, das spezifischen Startparameter für den jeweiligen Antrieb und die Förderhöhe von Hand am Gerät einstellen muß.

Die Entwicklung des Wechselrichters wurde in einer Kooperation zwischen der Universität der Bundeswehr München (UniBw), Institut für Wasserwesen, Prof. Dr.-Ing. W. Bechteler und der Firma ATPE GmbH durchgeführt. Der Projektteil der UniBw wurde vom BMBF unter der Nummer 329737 gefördert, die Firma ATPE von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter der No. Az01243

**Die Aufgaben bei der Entwicklung des Wechselrichters verteilen sich folgendermaßen auf die Projektpartner:**

ATPE GmbH:

- Entwicklung der Hardware mit den Komponenten Leistungsplatine und Steuerplatine
- Softwaremodule für die Wechselrichtersteuerung
- Fertigung eines Laborprototypen
- Fertigung zweier Demonstrationsgeräte

Detaillierte Beschreibung der Komponenten im Anhang A2

UniBw:

- Softwaremodul Anlaufsteuerung für Exzentrerschnecken- und Kreiselpumpen (Kapitel 4)
- Softwaremodul „MPP-Regelung“ (Kapitel 5)
- Softwaremodul „Externe Steuerung“ (Kapitel 3)
- Entwicklung einer Platine zur Durchführung der Tests der Softwaremodule (Kapitel 3)

Die verschiedenen Entwicklungsschritte und die bei der Entwicklung auftretenden Probleme und deren Lösung werden in Kapitel 3 beschrieben.

## 2. Komponenten eines Photovoltaischen Pumpensystems (PVPS)

Ein PVPS (Abb. 2.1) besteht aus den Komponenten Solargenerator, Wechselrichter, Asynchronmotor, Kreis- oder Exzentrerschneckenpumpe und dem hydraulischen System (Förder- und Verteilerrohrleitungen, Armaturen, Behälter, etc.).

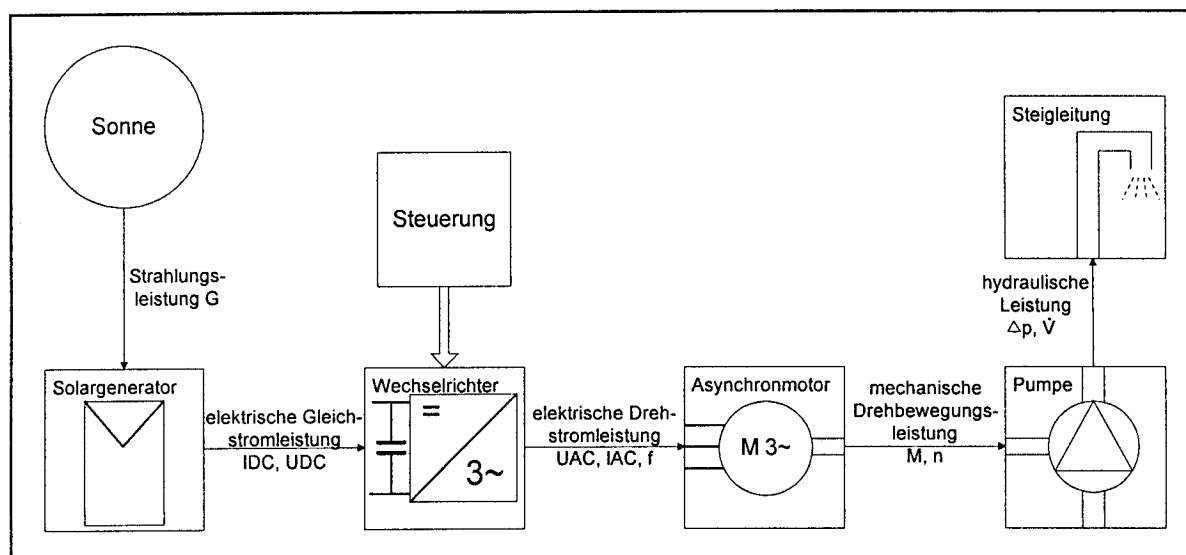


Abb.2.1: Komponenten eines photovoltaischen Pumpensystems

### 2.1. Die verfügbaren Komponenten

Das Pumpensystem wird an den Komponenten, die für diese Entwicklung an der UniBW zur Verfügung stehen, erläutert:

**Solargenerator:** 36 Module des Modell M55 von Siemens Solar Industries:

Jedes Modul hat folgende Daten ( bei 25°C Zelltemperatur und 1000 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung):

im MPP: 53 W / 3,05 A / 17,4 V

Kurzschlußstrom = 3,35 A / Leerlaufspannung = 21,7 V

max. System-Leerlaufspannung = 600 V, bis 10 A abgesichert

Jeweils 18 Module werden in Serie, die beiden Blöcke parallel verschaltet.

Daraus ergibt sich eine Leerlaufspannung von ca. 380V, Kurzschlußstrom 6.7A

**Asynchronmotor:** Tauchmotor von Franklin Electronic: 1,1 kW / 50 Hz / Y220 V

1,5kW / 50Hz / Y220V

2,2kW / 50Hz / Y220V

**Pumpen:** Exzentrerschneckenpumpe: Netzsch Mohno 2NQ14



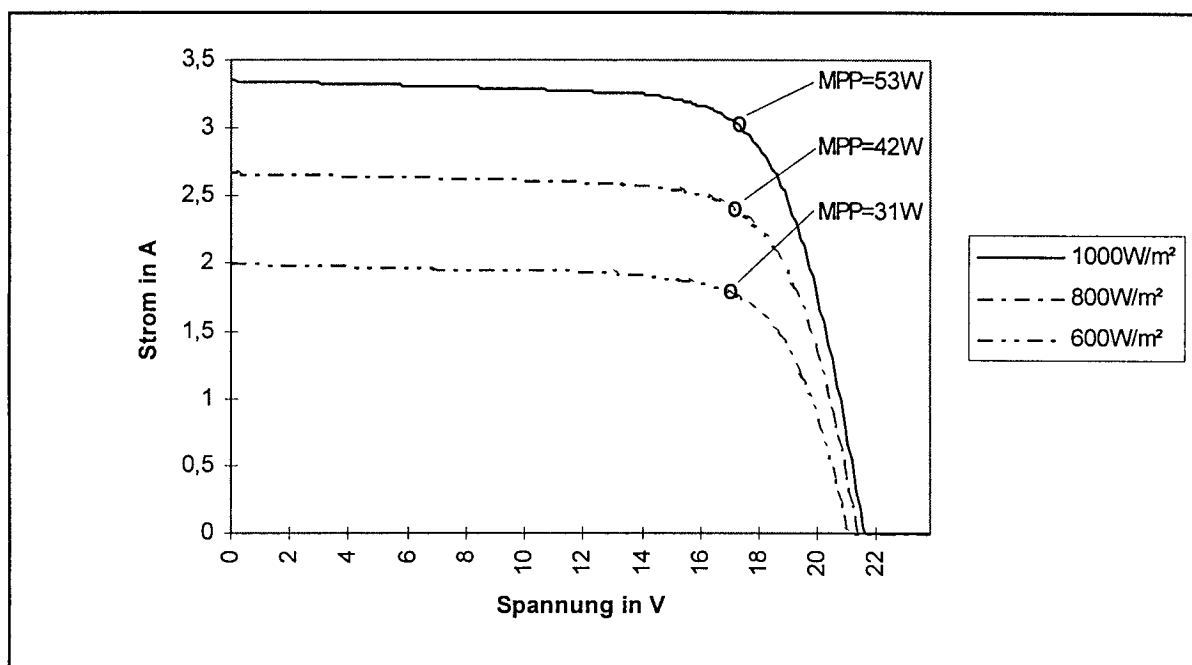
Kreiselpumpe:                    Netzsch Mohno 2NQ18  
   Grundfoss 8A12, Grundfoss 5A6  
   Grundfoss 3A8

Wechselrichter: Eigenentwicklung: BEPING  
   Siemens Solar:       Simovert

### 2.1.1. Solargenerator

Der Solargenerator stellt die Energiequelle in unserem System dar, der aus 36 M55-Modulen zu je 36 Zellen besteht. Das Betriebsverhalten eines solchen Moduls beschreiben die Strom-Spannungs-Kennlinien, die im Prinzip Diodenkennlinien entsprechen, die um den Betrag des Photostroms in die Sperr-Richtung verschoben sind. Der Photostrom ist direkt im Schnittpunkt der Kurve mit der Stromachse ablesbar (= der Kurzschlußstrom der Solarzelle  $I_{KS}$ ).

#### a) Einfluß der Einstrahlungsleistung



*Abb.2.2: Betriebskennlinie des Solarmoduls M55 bei 25°C Zelltemperatur und unterschiedlicher Solarstrahlung G*

Daraus erklärt sich die Abhängigkeit der Leistung, die eine Solarzelle liefern kann, von der eingestrahlten Sonneneinstrahlung  $G$  (s. Abb 2.2).

## b) Einfluß der Temperatur

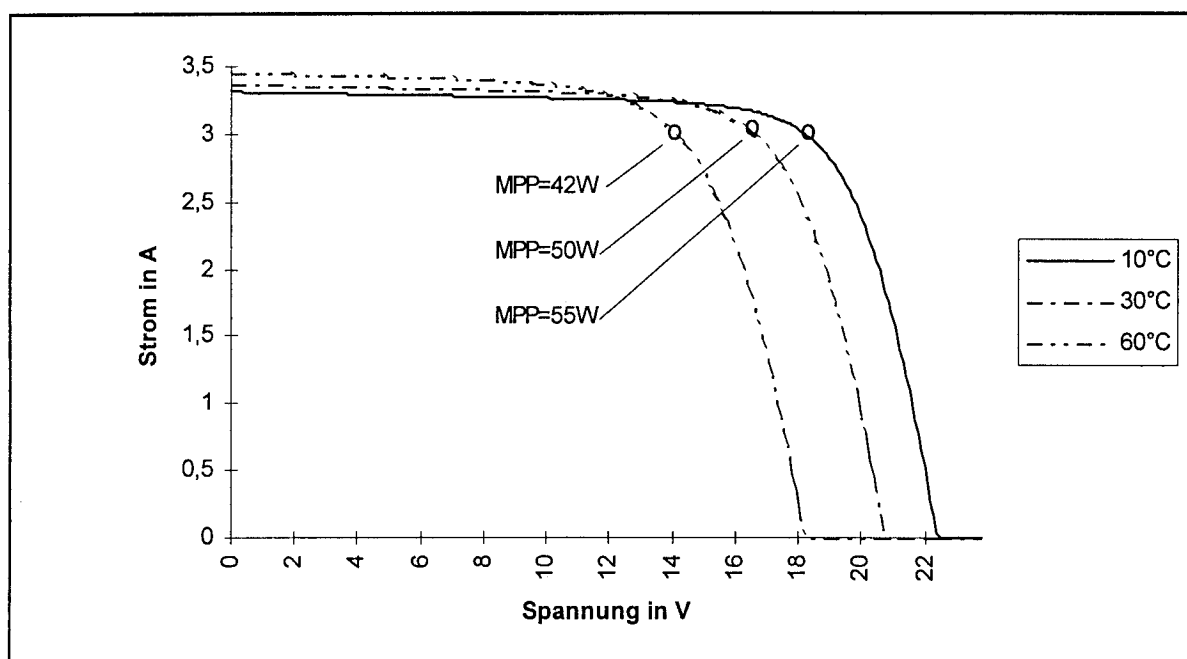
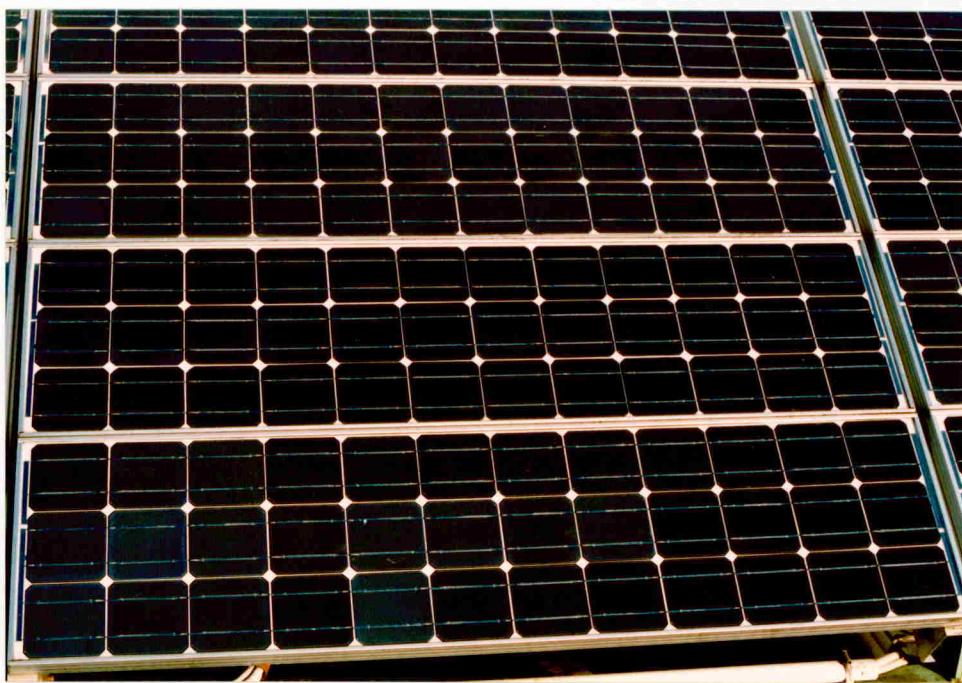


Abb. 2.3: Betriebskennlinie eines Solarmoduls M55 bei  $1000 \text{ W/m}^2$  Solarstrahlung und unterschiedlichen Zelltemperaturen  $\vartheta$

Leider schmälert die hohe Temperatur, die die Zellen dabei oft erreichen (sie kann klimabedingt sogar bei  $80^\circ\text{C}$  liegen!), die Energieausbeute wieder, da der Widerstand der Halbleitersperrschicht mit zunehmender Temperatur abnimmt, so daß die Diodensperrspannung zurückgeht. Damit verschieben sich auch die Schnittpunkte der Kurven mit der Spannungsachse (die Leerlaufspannung des Solarmoduls  $U_0$  nimmt ab: s. Abb. 2.3).

Wichtig für die Nutzung der Photovoltaik ist die Lage des Zustandes der höchsten Leistung. Dieser Maximum-Power-Point (MPP) ist in den beiden obigen Diagrammen für jede Kurve durch einen Kreis gekennzeichnet. Da man die gelieferte Energie optimal ausnutzen will, um Solarzellenfläche zu minimieren, ist es von großer Bedeutung die Anlage so oft, so lange und so nahe wie möglich am optimalen Arbeitspunkt zu betreiben. Das ermöglicht eine spezielle Regelung, das sogenannte MPP-Tracking.



*Abb.2.4: Solargenerator*

Der Solargenerator (*Abb. 2.4.*) wurde als Parallelschaltung aus zwei Serienschaltungen von je 18 Modulen realisiert, so daß die gesamte MPP-Leistung 1,9 kW bei 6,1 A und 313 V, die Leerlaufspannung 390,6 V und der Kurzschlußstrom 6,7 A (bei Standard-Test-Conditions STC) beträgt.

### **2.1.2. Asynchronmotor**

Als Motor, der die erzeugte elektrische Energie in mechanische Drehbewegung zum Antreiben der Pumpe umwandelt, wurde eine bürstenlose Asynchronmaschine mit Käfigläufer eingesetzt, da sie sich durch ihre Wartungsfreiheit auszeichnet. In der Ausführung als Tauchmotor ist er direkt an die Pumpenwelle angeflanscht. Das folgende Bild (*Abb. 2.5*) zeigt den Motor links unten mit dem Spannungsversorgungskabel. Das mittlere verjüngte Rohr ist die Exzentrerschneckenpumpe mit einem Langloch als Ansaugöffnung. Bis mindestens zu dieser Stelle muß die Fördereinheit senkrecht stehend versenkt sein. Rechts schließt sich die Steigleitung an, die dann nach oben führt.



*Abb. 2.5: Die Einheit Motor-Pumpe-Steigleitung*

Das kalte Grundwasser, das bei der Förderung angesaugt wird und am Motor vorbeiströmt, sorgt für die Kühlung des Motors. Dieses optimale Kühlungsverfahren wirkt sich sehr positiv auf die ohnehin hohe Lebensdauer der Käfigläufer-Asynchronmaschine aus.

#### **Betriebseigenschaften der Asynchronmaschine:**

Die Betriebseigenschaften eines Asynchronmotors werden durch das Ersatzschaltbild (*Abb. 2.6*) repräsentiert. Es gleicht dem eines Trafos, wobei sich die mechanische Last durch den Schlupf  $s$  als Vergrößerung des Widerstands  $R'_2$  bemerkbar macht.

Im folgenden wird die Theorie der Asynchronmaschine näher erläutert:

Für den magnetischen Hauptfluß  $\Phi_h$  gilt mit der induzierten Quellspannung  $U_q$  und der Ständerfrequenz  $f_1$ :

$$\Phi_h = \frac{U_q}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_1 \cdot k_{w1} \cdot f_1} \sim \frac{U_q}{f_1} \quad (2.1)$$

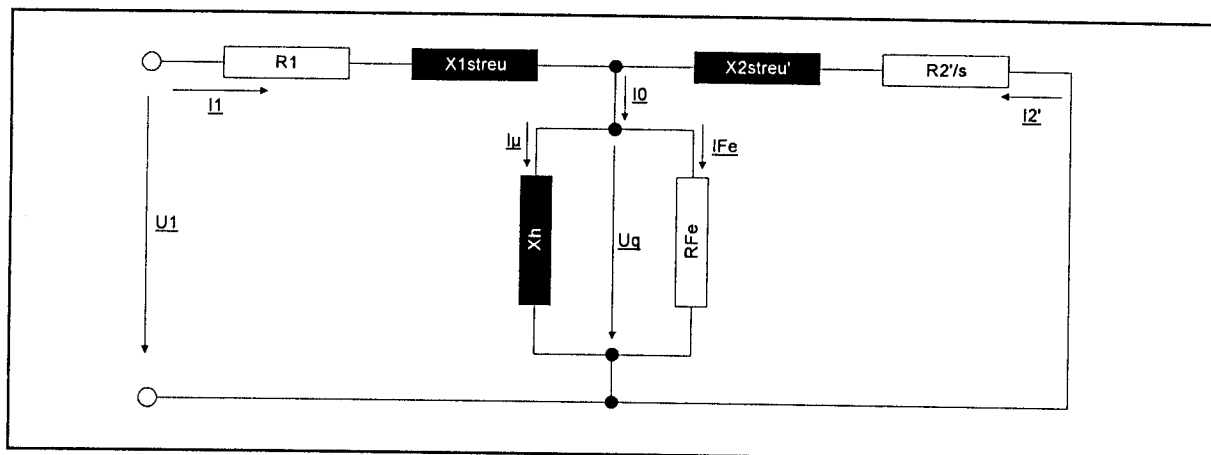


Abb. 2.6: Das vollständige Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine [Fischer 1992]

Aus dem Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine (Abb. 2.6) geht hervor:

$$\underline{U}_q = \underline{U}_1 - \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_{1\sigma}) \quad (2.2)$$

Bei kleiner Streuimpedanz und kleinem Wicklungswiderstand gilt:

$$\Phi_h \sim \frac{U_q}{f_1} \approx \frac{U_1}{f_1} \quad (2.1.a)$$

Der magnetische Fluß  $\Phi$  bleibt daher bei frequenzproportionaler Spannungsänderung konstant. Die Beaufschlagung der Spannung um den Faktor der Spannungsüberhöhung steigert auch den magnetischen Fluß um diesen Faktor.

Das Drehmoment  $M$  ergibt sich aus der Drehzahl  $n$  und der Leistung an der Welle  $P_2$  zu:

$$M = \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.3)$$

Die Klossche Gleichung kennzeichnet den Zusammenhang zwischen Drehmoment  $M$ , Kippmoment  $M_K$ , Schlupf  $s$  und Kippschlupf  $s_K$ :

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (2.4)$$

Mit der Drehzahl  $n$  bei dem Schlupf  $s$  und der synchronen Drehzahl  $n_0$

$$n = (1 - s) \cdot n_0 \quad (2.5)$$

$$n_K = (1 - s_K) \cdot n_0 \quad (2.5.a)$$

erhält man nach Umformung als Funktion für das Moment:

$$M = M_K \cdot \frac{2}{\frac{n_0 - n}{n_0 - n_K} + \frac{n_0 - n_K}{n_0 - n}} \quad (2.4.a)$$

Da der Abstand  $\Delta n_K$  ( $\Delta n_K = n_0 s_K$ ) zwischen der synchronen Drehzahl  $n_0$  und der Schlupfdrehzahl  $n_K$  wegen

$$(2.5) \quad s_K = \frac{R'_2}{\underbrace{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}_{X_\sigma}} = \frac{R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_\sigma} \sim \frac{1}{f_1} \quad \left. \vphantom{s_K} \right\} \Rightarrow \Delta n_K = \text{konst.}$$

$$(2.6) \quad n_0 = \frac{f_1}{p} \sim f_1$$

konstant ist, erhält man bei frequenzproportionaler Anpassung der Spannung  $U_1$  die Steuerkurven für das Moment  $M$  über die Drehzahl  $n$  bei unterschiedlichen Frequenzen  $f_1$  (s. Abb. 2.7).

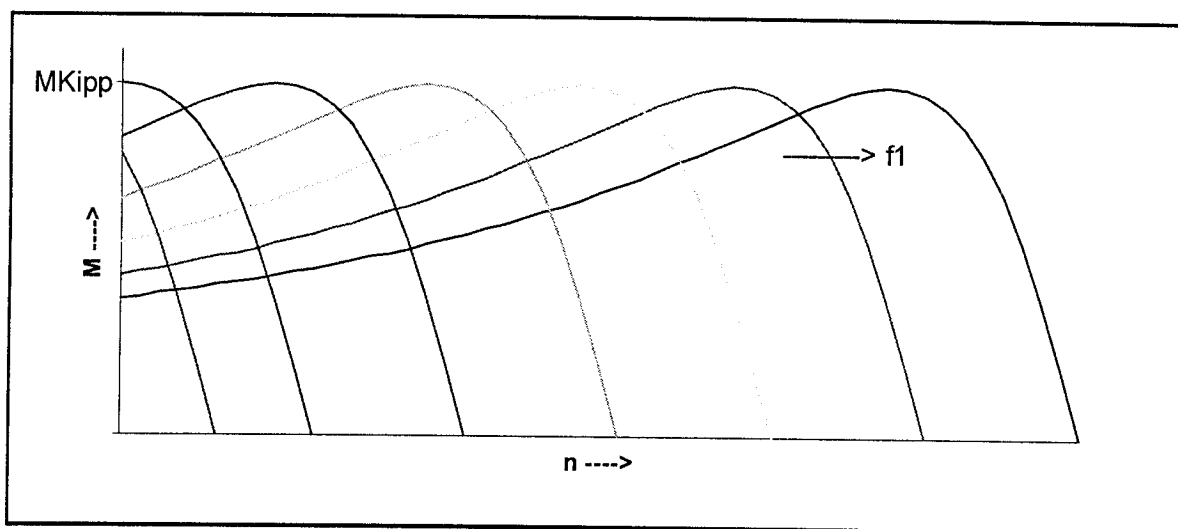


Abb. 2.7: Betriebskennlinien einer Asynchronmaschine: Drehmoment  $M$  über die Drehzahl  $n$  bei unterschiedlichen Ständerfrequenzen  $f_1$  und frequenzproportionaler Spannung

Das Diagramm (Abb. 2.7) zeigt: je kleiner die Frequenz der versorgenden Spannung ist, desto größer ist das Moment bei  $n = 0$  (also das Anlaufmoment). Es existiert genau eine Frequenz  $f_1$ , bei der das Anlaufmoment dem Kippmoment entspricht und somit maximal ist. Unterhalb dieser Frequenz nimmt das Anlaufmoment wieder ab.

Die Frequenz des maximalen Anlaufmoments ist auch die maximale Anlauffrequenz  $f_{a,max}$ , bis zu der es sich lohnen würde, Anlaufversuche durchzuführen.

### **Theoretische Bestimmung des Anlaufparamters “maximale Anlauffrequenz $f_{a,max}$ ”:**

Mit der Gl. 2.5 und 2.6 für  $\Delta n_K$  könnte die Ständerfrequenz  $f_1(M_a=M_K)$  berechnet werden, bei der das Anlaufmoment gleich dem Kippmoment ist. Da beim Anlauf  $s=1$  ist, berechnet sich die theoretisch maximale Anlauffrequenz  $f_{a,max}$  aus den Motorgrößen sekundärer Wicklungswiderstand  $R'_2$ , der Polpaarzahl  $p$  und der Summe der beiden Streuinduktivitäten  $L_\sigma$  zu:

$$f_{a,max} = f_1(M_a = M_K) = p \cdot \Delta n_K \quad (2.6.a)$$

$$\Rightarrow f_{a,max} = \frac{R'_2}{2 \cdot \pi \cdot L_\sigma} \quad (2.5.a)$$

Genauso läßt sich der Wert des Kippmoments  $M_K$  mit den Motorgrößen Strangzahl  $m=3$  (3-Leitersystem) und  $L_\sigma$  als Funktion der Frequenz  $f$  und Höhe der Speisespannung  $U$ , die der Wechselrichter liefern muß berechnen:

$$M_K = \frac{m \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot n_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot X_\sigma} = \frac{p \cdot m}{8 \cdot \pi^2 \cdot L_\sigma} \cdot \left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2 \quad [\text{Fischer 1992}] \quad (2.7)$$

Da es beim Einsatz einer Exzentrerschneckenpumpe gerade auf ein hohes Anlaufmoment ankommt, muß die Strategie des Anlaufs darin bestehen, sich stufenweise von kleinen Frequenzen an den Zustand des maximalen Anlaufmoments heranzutasten. Wenn aber das System nicht bis  $f_{a,max}$  angelaufen ist, lohnt es sich nicht, eine weitere Frequenz zu testen.

### **Einfluß der Spannungsüberhöhung auf das Drehmoment:**

Um das maximale Moment noch zu erhöhen, wird die Spannung  $U_1$  um den Faktor der Spannungsüberhöhung  $\Delta U_1$  vergrößert.

In der folgenden Messung (Abb. 2.8) wurde an der Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 (mit der 1,1 kW-Asynchronmaschine betrieben) Anlaufversuche durchgeführt. Dabei wurde die Frequenz, mit der der Motor betrieben wurde, langsam stufenweise immer um 1 Hz erhöht. Der

Punkt, an dem das Losbrechmoment überwunden wird, zeigt sich im Einbruch der Leistung. Diese Messung wurde - bezüglich der frequenzproportionalen Nennbedingung des Motors - mit unterschiedlichen Spannungsüberhöhungen durchgeführt.

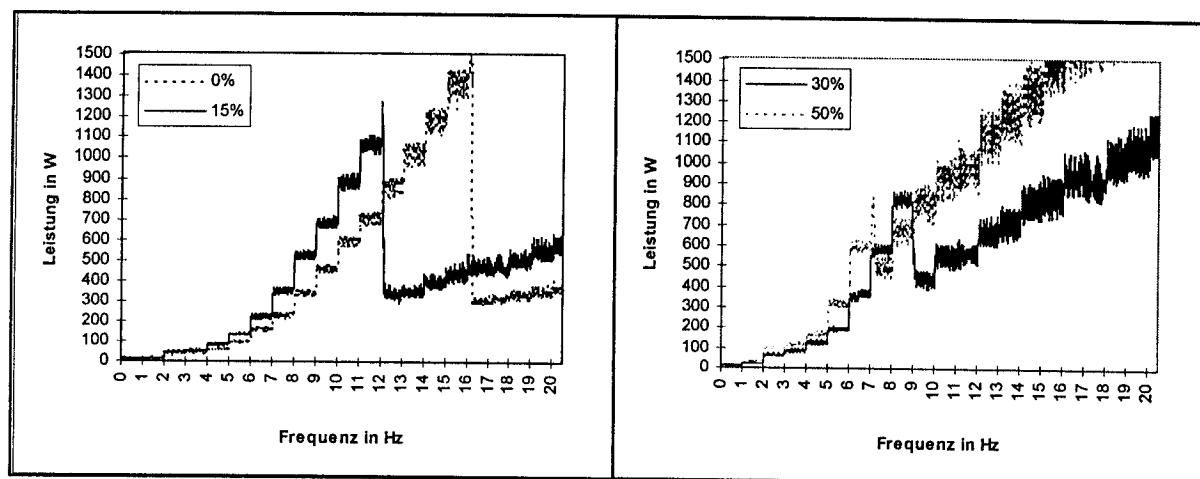


Abb. 2.8: Loslaufversuche der Motor-Pumpen-Einheit durch langsam stufenweise Frequenzsteigerung bei 4 bar und unterschiedlichen Spannungsüberhöhungen [nach Mayer 1994]

Es bestätigt sich das Verhalten der Anlaufmoment-Vergrößerung bei größerer Spannungsüberhöhung (zu erkennen am Loslauf bei einer kleineren Frequenz). Weiter zeigt sich, daß sich zwischen  $\Delta U = 30\%$  und  $50\%$  die Losauffrequenz (von 9 Hz auf 8 Hz) weniger stark verkleinert als zwischen der Steigerung von  $15\%$  auf  $30\%$  der Spannungsüberhöhung (von 13 Hz auf 10 Hz). Der Grund dafür ist: Der magnetische Fluß im Motor ist nicht beliebig steigerbar, denn das Eisen nähert sich dem Zustand der magnetischen Sättigung an, und die Eisenverluste werden immer größer. Deshalb ist eine zu hohe Spannungsüberhöhung nicht mehr sinnvoll. Wir haben uns für  $\Delta U = 30\%$  entschieden.

$$M_K \sim \left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2 \quad (2.7.a)$$

$$M_{K\Delta U_1} = M_K \cdot \frac{\left( \frac{U_1 \cdot (1 + \Delta U_1)}{f_1} \right)^2}{\left( \frac{U_1}{f_1} \right)^2} = M_K \cdot (1 + \Delta U_1)^2 \quad \left. \vphantom{M_{K\Delta U_1}} \right\} \Rightarrow M_{K30\%} = 1,69 \cdot M_K$$

$$\Delta U_1 = 30\% = 0,3$$



Solange der magnetische Fluß noch im proportionalen Bereich ist, steigt also das Kippmoment  $M_K$  quadratisch mit der Spannung und erhöht sich bei Überspannung  $\Delta U = 30\%$  um fast 70%. Um den gleichen Faktor streckt sich der gesamte Drehmomenten-Drehzahl-Verlauf (von Abb. 2.7) in Richtung der Momentenachse, da nach der Kloßschen Gleichung  $M \sim M_K$  ist.

Nach der Anlaufphase ist dafür zu sorgen, daß die Ausgangsspannung wieder auf Nennfluß reduziert wird, da sich sonst der Motor wegen der hohen Wirbelstromverluste im Eisen auf die Dauer unzulässig erwärmen würde.

### **2.1.3. Pumpe**

Der Motor gibt sein Drehmoment direkt an die Welle einer Pumpe weiter, die einen tieferliegenden Wasservorrat gegen den hydrostatischen Druck nach oben befördern soll.

Heute werden am häufigsten Kreiselpumpen eingesetzt, da sie in vielfältigen Ausführungen als Serienprodukte kostengünstig zur Verfügung stehen. Gerade weil im Solarbetrieb die zur Verfügung stehende Leistung stark variieren kann, ist es sinnvoll - besonders bei tiefen Brunnen (>50 m) - Exzentrerschneckenpumpen einzusetzen, die während eines breiten Drehzahlspektrums einen sehr stabilen hohen Wirkungsgrad aufweisen.

#### **2.1.3.1. Kreiselpumpe**

Die Kreiselpumpe arbeitet nach dem Strömungsprinzip. Das durch das Saugrohr in axialer Richtung zum Rotor ankommende Wasser wird vom Flügelrad in Drehung versetzt. Die so entstehende Zentrifugalkraft drückt das Fördermedium an den Rand des Stators, wo es durch eine Öffnung gegen die Schwerkraft nach oben fließen kann. Ihr einfacher Aufbau macht die Herstellung der Kreiselpumpe preiswert und führt so zu ihrem weit verbreiteten Einsatz.

Das Loslaufmoment der Kreiselpumpe besteht lediglich darin, daß die Rotorflügel das Wasser im Statorgehäuse in Drehung versetzen müssen. Damit kann die Pumpe, ohne daß erst ein Losbrechwiderstand überwunden werden muß, sofort anlaufen, sobald die Solarleistung für den Betrieb ausreicht. Ist die Drehzahl jedoch zu klein, reicht die Zentrifugalkraft zur Überwindung der Förderhöhe nicht aus, das eingebaute Rückschlagventil bleibt geschlossen, es findet keine Förderung statt. Um den Förderdruck zu erhöhen, kann theoretisch eine beliebige Anzahl von Stufen in einer Kreiselpumpe hintereinandergeschaltet werden. Allerdings multipliziert sich damit der Strömungswiderstand, so daß der Förderstrom bei sinkender Drehzahl noch schneller abnimmt. Diese Eigenschaft der Kreiselpumpe erweist sich in PVPS als äußerst ungünstig. Im häufig vorkommenden Teillastbereich bei geringer Einstrahlungsleistung erreicht die Pumpe nur

eine geringe Drehzahl, was zur Folge hat, daß der zur Überwindung der Förderhöhe erforderliche Druck nicht erreicht wird, d.h. die zur Verfügung stehende Generatorleistung nicht in Förderleistung umgesetzt werden kann.

### **2.1.3.2. Die Exzentrerschneckenpumpe**

Als Verdrängerpumpe hat die Exzentrerschneckenpumpe eine zu ihrer Drehzahl fast direkt proportionale Förderleistung.



*Abb.2.9: Schnitt durch eine Exzentrerschneckenpumpe*

#### **2.1.3.2.1. Funktion**

Die beiden Hauptbestandteile der Exzentrerschneckenpumpe sind der schneckenförmige Rotor aus Metall, der in das mit einem Elastomerkunststoff ausgeleitete Statorgehäuse eingebettet ist. Das Elastomer ist ähnlich wie das Innengewinde einer zweigängigen Schraubmutter geformt, mit der doppelten Steigung der Metallschnecke. Zwischen Stator und Rotor entstehen so abgeschlossene Förderräume  $V_0$ , die bei der exzentrischen Drehbewegung des Rotors schraubenförmig um die Drehachse vorwärts geschoben werden. Der theoretische Förderstrom  $V_{th}$  ist also direkt abhängig von diesen geometrischen Abmessungen und der Drehzahl [Vetter, 1990]. Der tatsächliche Volumenstrom unterscheidet sich nur durch einen kleinen Leckstrom vom theoretischen. Je größer der Gegendruck ist, desto größer ist der Leckstrom, d. h. der Wasserstrom, der entlang der Grenzflächen zwischen Rotor und Stator durchgepreßt wird.

### 2.1.3.2.2. Betriebseigenschaften

(Am Beispiel einer Netzsch Mohno Industripumpe NE 20)

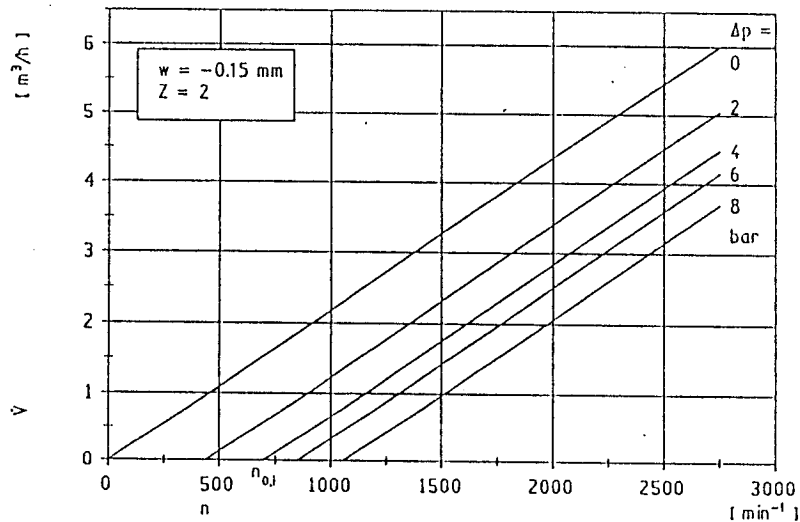


Abb. 2.10: Förderstrom in Abhängigkeit der Drehzahl (mit Überdeckung  $w = -0,15 \text{ mm}$ ) [Vetter, 1990]

Der Leckstrom bewirkt die Verschiebung der Kennlinien aus dem Schnittpunkt der Achsen um den Betrag  $n_0$  nach rechts (Abb. 2.10); d. h. unterhalb der Drehzahl  $n_0$  bringt die Pumpe noch keine Förderleistung. Um diesen negativen Effekt zu minimieren (Abb. 2.11), wird der Rotor etwas größer gewählt als das Elastomer des Pumpengehäuses Platz läßt. Diese Überdeckung  $w$  (in der Größenordnung von zehntel Millimetern) erschwert jedoch die Bewegung des Rotors durch die Reibung.

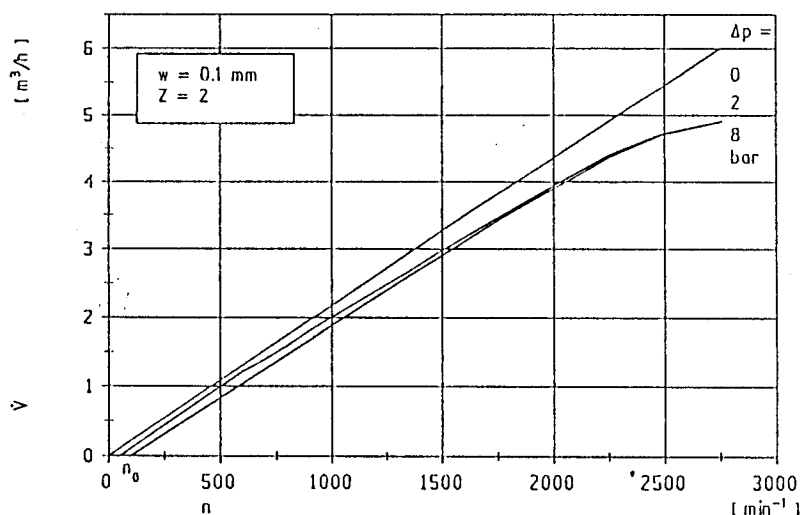


Abb. 2.11: Förderstrom in Abhängigkeit der Drehzahl (mit Überdeckung  $w = 0,1 \text{ mm}$ ) [Vetter, 1990]

Die Pumpe kann also mit unterschiedlichen Überdeckungen  $w$  gefertigt werden:

Ist  $w$  negativ, ist zwischen Rotor und Stator ein Spalt von der Größe  $w$ . Je größer die Überdeckung ist, desto kleiner wird der Leckstrom, der durch zusätzliches Pumpen mit  $n_0$  ausgeglichen werden muß.

### 2.1.3.2.3. Eigenschaften beim Anlauf

(Am Beispiel einer Netzsch Mohno Industripumpe NE 20)

#### a) Einfluß der Drehzahl $n$

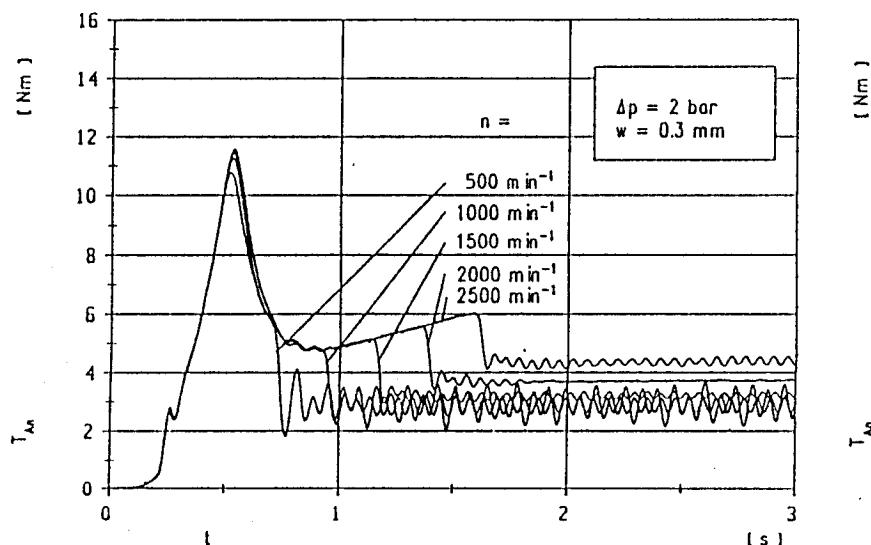


Abb. 2.12: Losbrechmoment gegen die Zeit bei unterschiedlichen Drehzahlen [Vetter, 1990]

Die Drehzahl hat also keinen Einfluß auf die absolute Höhe des maximalen Anlaufmoments, jedoch verlängert sich die Zeit, bis das Moment auf den niedrigen Wert des stationären Betriebs zurückgeht erheblich (Abb. 2.12). Der Grund hierfür ist die längere Beschleunigungszeit für ein schnelleres Drehen der Welle.

#### b) Einfluß des Gegendrucks $\Delta p$

Die Größe des Druckes beträgt pro 10 Meter Wassersäule 0,981bar, gegen die die Pumpe sowohl beim Anlauf, wie auch im stationären Betrieb arbeiten muß. Die verschiedenen Kennlinien (Abb. 2.13) unterscheiden sich nur durch einen konstanten Faktor, der proportional zum anliegenden Gegendruck ist.

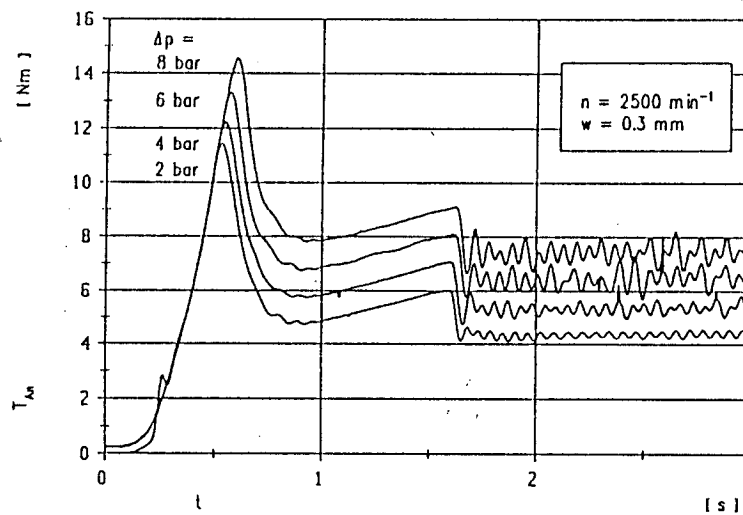


Abb. 2.13: Losbrechmoment gegen die Zeit bei unterschiedlichen Druckdifferenzen [Vetter, 1990]

### c) Einfluß der Überdeckung $w$

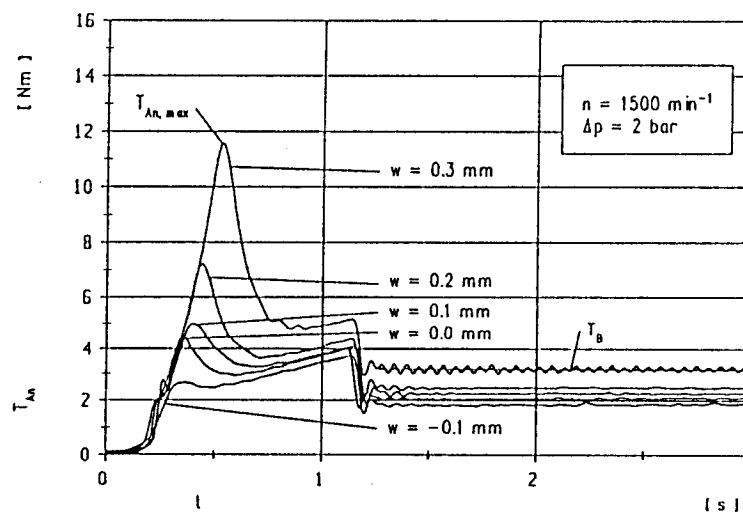


Abb. 2.14: Losbrechmoment gegen die Zeit bei unterschiedlichen Überdeckungen [Vetter, 1990]

In Abb. 2.14 zeigt sich die Zunahme der Reibung und damit das steigende Losbrechmoment der Exzentrerschneckenpumpe bei zunehmender Überdeckung, während das Moment im Dauerbetrieb, wenn sich der Wasserfilm zwischen Rotor und Stator aufgebaut hat, kaum beeinflusst wird.

### **Fazit**

In den drei Diagrammen (*Abb. 2.12, 2.13, 2.14*) ist ein starker Rückgang des Moments bei beginnender Drehung der Pumpe zu erkennen. Der Anlauf wird also erfolgreich sein, sobald der Motor das Anlaufmoment der Pumpe aufgebracht hat.

### **2.1.3.2.4. Einsatzbereich (Fördermedium, Reinheit, Förderhöhe)**

Der direkt proportionale Zusammenhang zwischen Drehzahl und Förderstrom (*s. Abb. 2.11*), der nur durch den Leckstrom und ein leichtes Abknicken der Kurve bei hohen Gegendrücken und hohen Drehzahlen ( $n > 40$  Hz) gestört wird, bietet der Exzentrerschneckenpumpe einen äußerst stabilen Wirkungsgrad über einen weiten Drehzahlbereich. Dieses vorteilhafte Verhalten kommt der Versorgung des Antriebs mit Sonnenenergie vor allem im Teillastbetrieb und bei großen Förderhöhen ( $> 50$  m) sehr entgegen und macht die Überlegenheit der Exzentrerschneckenpumpe gegenüber der Kreiselpumpe aus, zumal durch jede Wirkungsgradverbesserung teure Solargeneratorfläche eingespart werden kann.

Ein weiterer großer Vorteil der Verdrängerpumpe gegenüber Kreiselpumpen ist der hohe Förderdruck bis weit über 15 bar, der die Förderung aus mehr als 150 m tiefen Brunnen ermöglicht.

Die relativ flexible Statorauskleidung mit einem Elastomer kann auch größeren Festkörpern ausweichen. Somit kann Wasser, das mit Sand und sogar größeren Fremdkörpern stark verunreinigt ist, ohne Filterung gefördert werden. [nach Vetter, 1990]

Der Vorteil des Elastomerstators wird jedoch mit dem hohen Loslaufmoment erkauft, bis sich ein Wasserfilm zwischen den Berührungsflächen von Stator und Rotor ausbilden kann.

Das Diagramm in *Abb. 2.15* verdeutlicht den hohen Leistungsbedarf beim Anlauf der Exzentrerschneckenpumpe gegenüber der Kreiselpumpe. Was aus den Kurven jedoch nicht hervorgeht ist die Tatsache, daß die Exzentrerschneckenpumpe im Gegensatz zur Kreiselpumpe Wasser fördert, da sie den nötigen Druck bereits bei niedrigen Drehzahlen aufbaut. Da die Leistung des Solargenerators begrenzt ist, muß ein Weg gefunden werden, die zur Überwindung des hohen Anlaufmoments nötige Leistung für die Dauer des Anlaufs aufzubringen. Die großen Vorteile der Exzentrerschneckenpumpe (Förderleistung über einen sehr weiten Drehzahlbereich, Störunanfälligkeit bei Verschmutzung) rechtfertigen den höheren Steuerungsaufwand, der bei der Kreiselpumpe nicht nötig ist.

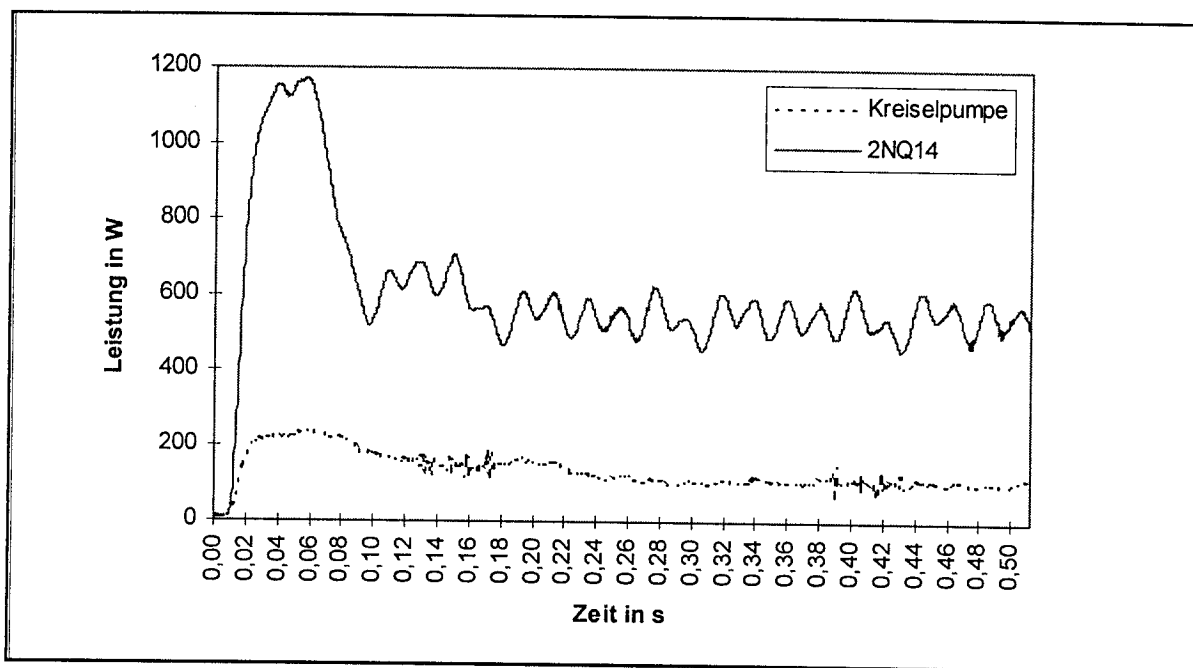


Abb. 2.15: Vergleich zwischen Kreiselpumpe und Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 beim Anlauf mit 8Hz und einem Gegendruck von 4 bar

#### **2.1.4. Wechselrichter "BEPING"**

Der Wechselrichter ist in einem Photovoltaischen Pumpensystem von zentraler Bedeutung. Er hat die Aufgabe aus der Gleichspannung des Solargenerators eine dreiphasige Wechselspannung mit geeigneter Frequenz und Amplitude zu erzeugen. Eine spezielle Anlaufsteuerung ermöglicht den zuverlässigen Anlauf und Betrieb von Exzentrerschneckenpumpen (Kapitel 4). Die MPP-Regelung regelt die Leistungsanpassung zwischen Solargenerator und Antrieb. Sie sorgt dafür, daß der Betriebspunkt auf der Kennlinie des Solargenerators sich so nahe wie möglich am MPP (Maximum Power Point) befindet (Kapitel 5). Die detaillierte Beschreibung der Funktion und des Aufbaus erfolgt im Anhang A2. Einsatzmöglichkeiten, Inbetriebnahme, sowie allgemeine und technische Daten werden im Kapitel 6 beschrieben.

---

### **3. Ablauf der Entwicklung (UniBw)**

#### **1) Entwicklung einer Anlaufstrategie**

Für die Wechselrichtersteuerung wird eine Anlaufstrategie entwickelt, die den Schweranlauf von Exzentrerschneckenpumpen zuverlässig gewährleistet (Kapitel 4).

#### **2) Generierung des Quellcodes**

Aus dem Signalflußplan für die Anlaufsteuerung wird ein ANSI-C-Programmmodul erstellt. Als Programmiersprache wird ANSI-C gewählt, da es im Bereich der Softwareentwicklung für Mikrocontroller neben Assembler die einzig sinnvolle Programmiersprache ist. Neben Assembler kann nur in der Sprache C schneller und hardwarenaher Code erzeugt werden. Auch gibt es für die Programmiersprache C umfangreiche Entwicklungstools. Als C-Compiler wird das Softwarepaket von der Firma Keil verwendet.

#### **3) Entwicklung eines Simulationsprogramms für die Anlaufsteuerung am PC**

Das Softwaremodul für die Anlaufsteuerung „ANLAUF-PC“ wird zunächst am PC getestet. Dafür müssen die für die Anlaufsteuerung benötigten Meßdaten Solargeneratorspannung und Wechselrichtereingangstrom simuliert werden. Die in Vorversuchen ermittelten Anlaufkurven (Abb. 4.2) werden durch das Simulationsprogramm nachgebildet. Die verschiedenen Zustände beim Ablauf des Simulationsprogramms werden am Bildschirm des PCs angezeigt.

#### **4) Anpassung des Softwaremoduls „ANLAUF-PC“ an den Mikrocontroller 80C537**

Das fehlerfreie Programm „ANLAUF-PC“ wird in das Softwaremodul „ANLAUF-MK“ für den Mikrocontroller 80C537 auf der Steuerplatine transformiert. Dieses Modul unterscheidet sich von dem Modul „ANLAUF-PC“ nur in wenigen Punkten. Die Variablen beispielsweise müssen auf dem 8051-kompatiblen Prozessor anders deklariert werden.

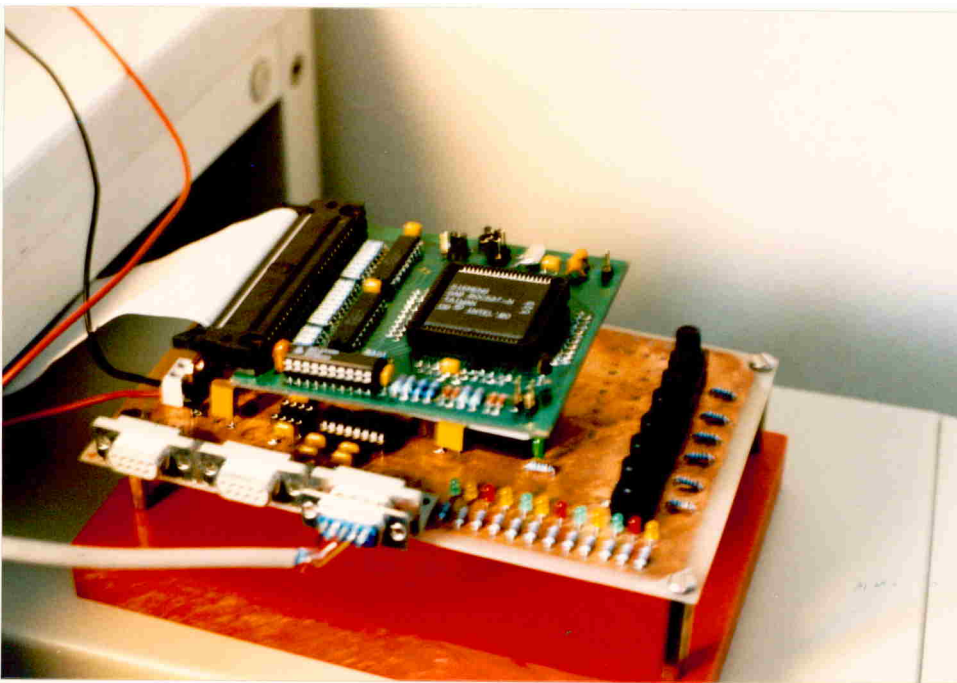
#### **5) Entwicklung der Steuerplatine**

Für die Tests der Anlaufsteuerung, der MPP-Regelung und des gesamten Betriebsverhaltens des Wechselrichters am Pumpenprüfstand wird eine spezielle Steuerplatine (Abb.3.1) erstellt, die sich durch folgende Merkmale von der Steuerplatine im Gerät unterscheidet:

- 15 Leuchtdioden werden zusätzlich angebracht, die an freie Ports des Controllers angeschlossen werden. Diese Leuchtdioden signalisieren ganz bestimmte Betriebszustände im Wechselrichterbetrieb. Somit können Fehler im Testbetrieb erkannt und die entsprechenden Routinen ausgebessert werden.



- Der Mikrocontroller 80C537 auf der Steuerplatine wird durch einen Pod des In-Circuit-Emulators von der Firma AppliWare ersetzt. Der Pod ist ein prozessorspezifisches Teil des Emulators, auf dem sich der Mikrocontroller befindet, und der in den Sockel der Steuerplatine eingesteckt wird. Der Emulator ist geeignet für das Debuggen aller 8051-Prozessoren. Von der Einschubkarte des Emulators im Rechner wird über ein Schnittstellenkabel eine Verbindung zum Pod hergestellt. Der In-Circuit-Emulator ermöglicht ein „Debuggen“ der Software vom PC aus. Dabei stehen dem Entwickler umfangreiche Debug Möglichkeiten zur Verfügung. Mit dem Befehl „RUN“ läuft die Software auch in Echtzeit ab, so daß die selben Verhältnisse wie im späteren Betrieb mit externem Eprom gegeben sind.
- Über die serielle Schnittstelle wird die Steuerplatine mit der Leistungsplatine verbunden.



*Abb.3.1: Steuerplatine mit dem Pod des In-Circuit-Emulator und dem Schnittstellenkabel zum PC*

Das Layout für die zweilagige Platine und der Schaltplan wurden mit dem Softwarepaket PADS erstellt. Die verschiedenen Softwaremodule werden mit dem In-Circuit-Emulator am Pumpenprüfstand getestet und optimiert.

## **6) Software für Betriebsdatenerfassung und externe Steuerung**

Für die externe Steuerung des Wechselrichters vom PC und die Anzeige wichtiger Signale im Wechselrichter (Solargeneratorspannung und -strom, Kühlkörpertemperatur und Innentemperatur des Gehäuses, Motorfrequenz) wurde eine Software entwickelt. Insbesondere durch die Anzeige der Motorfrequenz im Testbetrieb konnte das Verhalten der MPP-Regelung untersucht werden. Das Softwaremodul ermöglicht auch eine Betriebsdatenerfassung im späteren Einsatz.

## **7) Test des Softwaremoduls „ANLAUF-MK“ am Pumpenprüfstand**

Am Pumpenprüfstand (Abb. 3.2) wurden die verschiedenen Softwaremodule getestet. Der Teststand erlaubt den parallelen Betrieb von zwei verschiedenen Pumpen. Durch Schließen eines Ventils und Öffnen des anderen kann für die gewünschte Pumpe ein geschlossener Wasserkreislauf hergestellt werden. An dem elektronisch gesteuerten Regler wird der gewünschte Druck eingestellt, der die Brunntiefe simuliert. Druck und Durchfluß werden an den entsprechenden Sensoren gemessen und über die Datenerfassungskarte eingelesen. Der Wechselrichter „BEPING“ kann wahlweise an den Solargenerator oder an ein Netzgerät angeschlossen werden. Ein spezieller Meßumformer wandelt die Wechselrichtersignale  $U_{DC}$ ,  $I_{DC}$ ,  $U_{AC}$  und  $I_{AC}$  in galvanisch getrennte Signale für den Meßbereich der Datenerfassungskarte um.

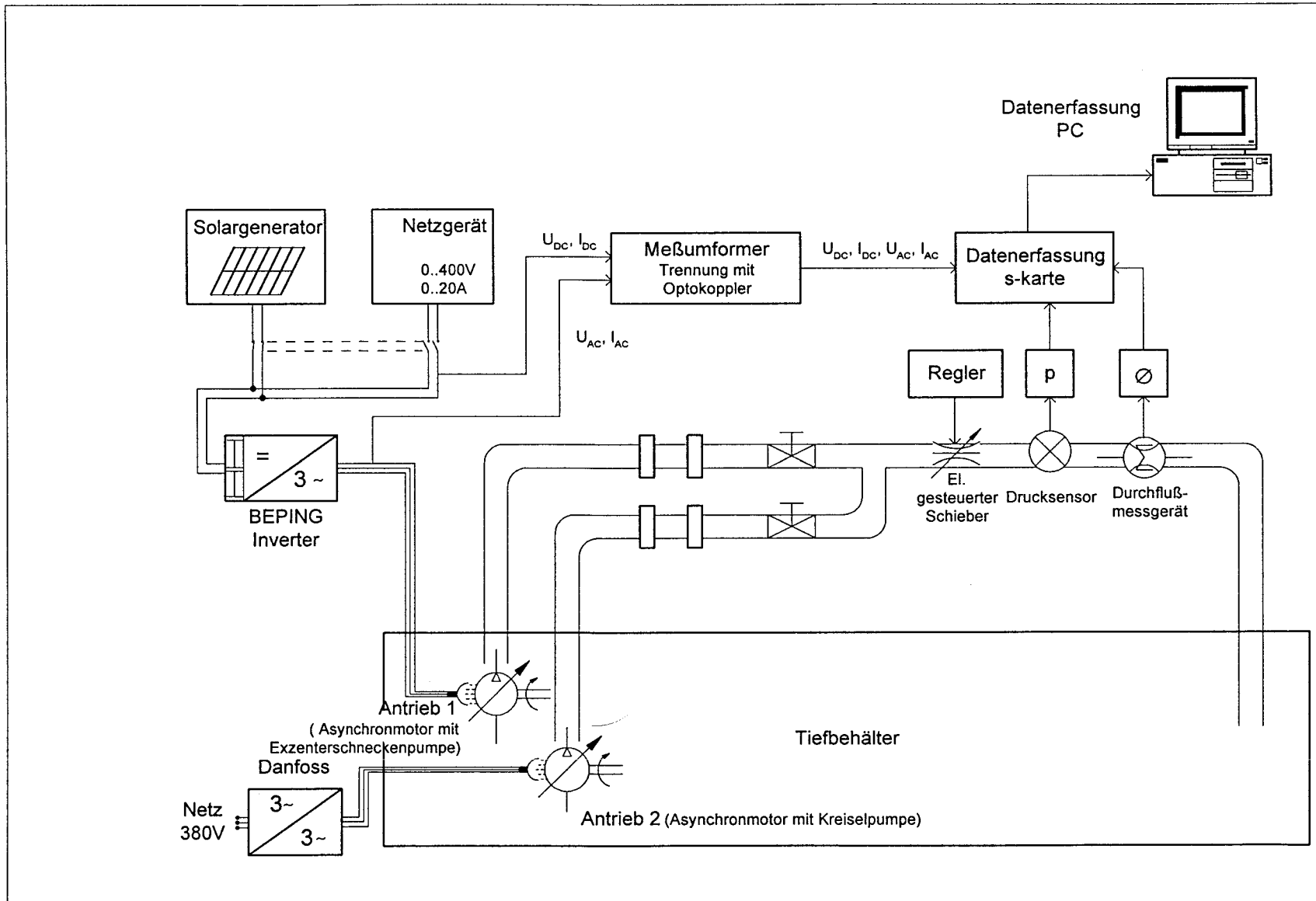
## **8) Entwicklung des Algorithmus für die MPP-Regelung und Erstellung des C-Programms für den Mikrocontroller 80C537**

Aus dem Signalflußplan für die MPP-Regelung (Kapitel 5, Abb. 5.1) wird das C-Programm „MPP-REGELUNG“ für den Mikrocontroller entwickelt. Dieses Programm wird am Pumpenprüfstand mit dem In-Circuit-Emulator getestet. Um das Verhalten des Systems bei den verschiedenen Betriebszuständen analysieren zu können, werden zwei weitere Hilfsmittel verwendet. Mit dem Softwaremodul zur Betriebsdatenerfassung kann die aktuelle Motorfrequenz beobachtet werden. Zur graphischen Darstellung der aktuellen Solargeneratorleistung wurde das Softwaretool „Labview“ von der Firma National Instruments verwendet. Damit wurde mit den zur Verfügung stehenden Pumpenantrieben über einen längeren Zeitraum die Solargeneratorleistung aufgenommen (s. Abb. 5.2)

## **9) Abschließende Tests des kompletten Gerätes**

Das komplette Gerät wurde im Klimaschrank bei einer Temperatur von 55°C einem Dauertest von 2 Tagen unterzogen. Dabei wurde das automatische Abschalten bei Übertemperatur und das erneute Einschalten bei Unterschreiten der Temperaturschwelle überprüft.

Abb. 3.2: Pumpenprüfstand an der UniBW



#### **4. Anlaufsteuerung**

In photovoltaischen Pumpensystemen (PVPS) ist die für den Anlauf zur Verfügung stehende Energie, bedingt durch die Kennlinie des Solargenerators und die Kapazität des Anlaufkondensators, begrenzt. Im Gegensatz zur Kreiselpumpe benötigt die Exzentrerschneckenpumpe aufgrund ihrer Konstruktion (Kapitel 2.1.3.2) ein wesentlich höheres Anlaufmoment. Zusätzliche Energie wird benötigt, um das Wasser in der Pumpe zu beschleunigen, da die Exzentrerschneckenpumpe ab der ersten Umdrehung bereits fördert. Die Strategie für einen sicheren Anlauf mit minimaler Energie besteht nun darin, eine möglichst geringe Startfrequenz am Wechselrichter einzustellen, bei welcher der Pumpenantrieb zuverlässig losläuft, da dann die benötigte Energie zur Beschleunigung des Wassers minimal wird.

Die Anlaufenergie wird teilweise direkt aus dem Solargenerator und dem Speicherkondensator, der einige tausend Microfarad betragen kann, bezogen. Die Kapazität des im Wechselrichter eingebauten Kondensators beträgt  $3300\mu\text{F}$ . Mit dieser Konfiguration liefen die verwendeten Exzentrerschneckenpumpen 2NQ14 und 2NQ18 zuverlässig an.

#### **5.1. Anlaufenergie**

Die Anlaufenergie  $W_a$  wird definiert als das Integral der Wechselrichtereingangsleistung  $P_e$  über der Anlaufzeit  $T_a$  von  $t=0$  bis zum stationären Zustand  $t_{st}$ , d.h. bis der Antrieb nicht mehr beschleunigt wird.

$$W_a = \int_0^{T_a} P_e \cdot dt \quad (4.1)$$

Im folgenden Diagramm (Abb. 4.1) wurde die Anlaufzeit  $T_a$  grafisch ermittelt. Nach  $t=0,16\text{s}$  kann der Anlauf der Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 als abgeschlossen betrachtet werden. Die Anlaufenergie beträgt  $W_a 118\text{Ws}$

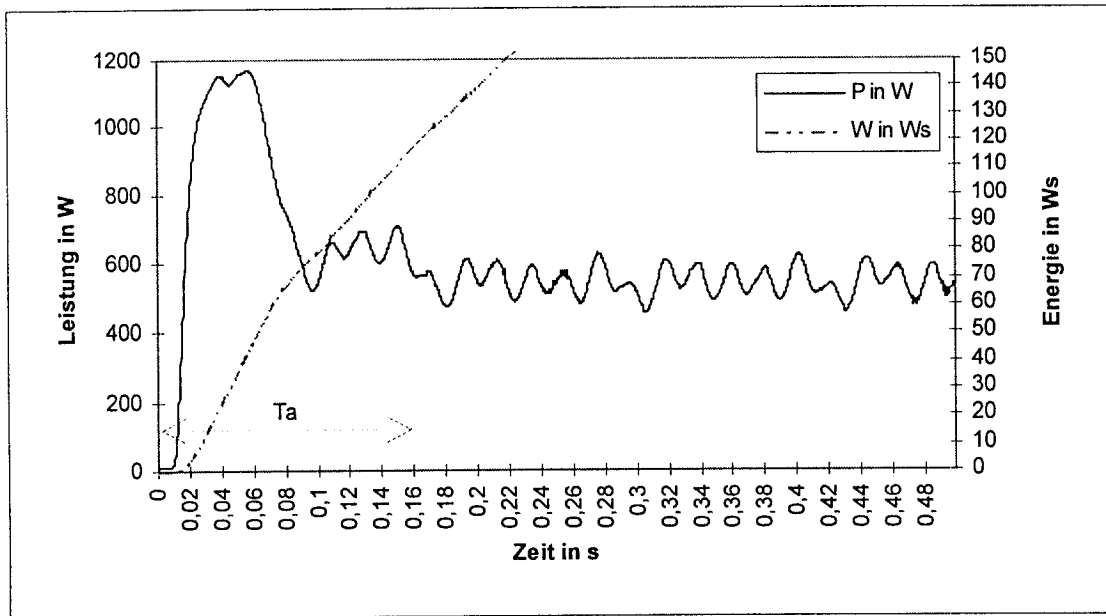


Abb. 4.1: Eingangsleistung  $P$  und Energie  $W$  des Wechselrichters während des Anlaufs der Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 bei der Startfrequenz von 8Hz, einer Spannungserhöhung  $\Delta U$  von 30% und einem Gegendruck von 4bar

#### **4.2. Energiespeicher für die Anlaufenergie**

Als Energiespeicher wird ein Kondensator verwendet, der an den Gleichspannungszwischenkreis angeschlossen wird. Bei der Dimensionierung der Kapazität wird vom ungünstigsten Fall ausgegangen, das bedeutet, die Anlaufenergie wird nur aus dem Kondensator bezogen. Die Tatsache, daß der Solargenerator auch einen Teil zu dieser Energie beiträgt, soll unberücksichtigt bleiben. Der Energieinhalt  $W_c$  eines Kondensators berechnet sich zu:

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (4.2)$$

Während des Anlaufvorgangs entlädt sich der Kondensator von der Leerlaufspannung  $U_L$  auf eine Spannung  $U_1$  und stellt dabei die Energie  $\Delta W$  zur Verfügung:

$$\Delta W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_L^2 - U_1^2) \quad (4.3)$$

Die kleinste Spannung  $U_1$  auf die sich der Kondensator entladen darf beträgt 150V. Bis zu dieser Spannung funktioniert die Steuerelektronik und die Leistungsstufe. Die obere Schwelle stellt die Leerlaufspannung  $U_L$ , die bei dem verwendeten Solargenerator einen Wert von 360V hat, dar. Die Kapazität des Kondensators berechnet sich aus der benötigten Anlaufenergie  $W_a$  für die Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 und den beiden Spannungswerten  $U_1$  und  $U_L$  zu:

$$C \geq 2 \cdot \frac{W_a}{U_L^2 - U_1^2} \quad (4.4)$$

$$C \geq 2 \cdot \frac{118Ws}{(360V)^2 - (150V)^2} \Rightarrow C \geq 1100\mu F \quad (4.5)$$

Der im Wechselrichter eingesetzte Kondensator hat eine Kapazität von 3300 $\mu$ F und erfüllt diese Anforderung.

### **4.3. Anlaufstrategie**

Für eine sinnvolle Anlaufstrategie müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

- 1) Das Motormoment beim Start muß größer als das Losbrechmoment der Pumpe sein.
- 2) Um die Größe und den Preis des Anlaufkondensators möglichst gering zu halten, muß die Kapazität und somit die Energie für den Anlaufvorgang möglichst klein sein. Die Energie für den Anlaufvorgang verringert sich bei einer Verkleinerung der Startfrequenz des Wechselrichters, da das Fördermedium auf eine kleinere Geschwindigkeit beschleunigt werden muß. Die Startfrequenz sollte daher möglichst klein gewählt werden.

Die in Vorversuchen durchgeführten Messungen an Exzentrerschneckenpumpenantrieben (Kapitel 2.1.2 und Kapitel 2.1.3.2) ergaben, daß für einen zuverlässigen Anlauf mit minimaler Energie die Motorfrequenz des Wechselrichters von entscheidender Bedeutung ist. Das maximale Moment des Motors (Kippmoment  $M_K$ ) verschiebt sich bei einer Verringerung der Motorfrequenz hin zu kleineren Drehzahlen. Es existiert eine minimale Motorfrequenz  $f_1$ , bei der das Anlaufmoment dem Kippmoment entspricht. Bei einer weiteren Verkleinerung der Motorfrequenz nimmt das Anlaufmoment wieder ab. Aus der Forderung 2) ergibt sich, daß die maximal sinnvolle Startfrequenz die Motorfrequenz  $f_1$  darstellt.

In Kapitel 2.1.2 wurde gezeigt, daß sich das Kippmoment durch eine Spannungserhöhung vergrößern läßt. Als vernünftiger Wert wurde in Vorversuchen eine Erhöhung der

Motorspannung um 30% ermittelt. Dies hat den Vorteil, daß der Motor kleiner dimensioniert werden kann. Bisher mußten die Motoren beim Betrieb von Exzentrerschneckenpumpen überdimensioniert werden, um das hohe Anlaufmoment zu erreichen. Ein zweiter Vorteil der Spannungserhöhung besteht darin, daß ein Loslaufen des Antriebs sich noch weiter zu kleineren Frequenzen verschiebt.

Aus den Forderungen 1) und 2) ergibt sich: die optimale Startfrequenz des Motors ist die kleinste Frequenz bei der ein Hochlaufen des Antriebs stattfindet.

**Folgende Anlaufstrategie wurde aus den Forderungen 1) und 2) entwickelt:**

- Einstellung einer prozentualen Spannungserhöhung von 30%
- Als Startfrequenz wird eine Frequenz von 6Hz eingestellt. Diese Frequenz liegt unterhalb der Motorfrequenz  $f_1$ .
- Ein Anlaufversuch wird durchgeführt. Die Steuerelektronik überprüft, ob der Antrieb angelaufen ist.
- Falls der Antrieb nicht angelaufen ist, wird die Startfrequenz und somit das Anlaufmoment erhöht und anschließend einer neuer Anlaufversuch durchgeführt. Dies wird solange fortgesetzt, bis entweder der Anlauf erfolgreich war oder eine Startfrequenz eingestellt wurde, die oberhalb der Motorfrequenz  $f_1$  liegt.
- Ist ein Anlauf des Motors bis zur Frequenz  $f_1$  nicht erfolgt, beendet die Steuerung die Anlaufroutine. Nach 5 Minuten wird ein neuer Anlaufversuch unternommen.

**Zuverlässiges Kriterium für einen erfolgreichen Anlauf:**

Um einen erfolgreichen Anlaufversuch zu erkennen, benötigt man ein zuverlässiges Kriterium. Ein Drehzahlmesser, der an der Motorwelle angebracht wird, ist im einem PVPS zu aufwendig und steht somit nicht zur Verfügung. Um ein Kriterium zu finden werden die Anlaufkurven der Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 (Abb. 4.2), die für verschiedene Startfrequenzen des Motors die benötigte Eingangsleistung des Wechselrichters darstellt, zu Rate gezogen. Bei den Kurven mit den Startfrequenzen 12Hz, 14Hz und 16Hz ist ein deutlicher Leistungsabfall nach einem Leistungsanstieg zu erkennen. Dieser Abfall resultiert aus einem Anlaufen des Motors. Beim Start fließt im Motor der 4 bis 8-fache Kurzschlußstrom, der im Bereich des Kippschlupfs deutlich abfällt. Der Widerstand  $R_2/s$  nimmt mit abnehmendem Schlupf zu und verkleinert die Leistungsaufnahme. Bei der Kurve mit der Startfrequenz von 10Hz erfolgt ein Anlauf nicht, da keine Leistungsabnahme stattfindet: die Asynchronmaschine verhält sich wie ein Trafo im Kurzschluß, da die mechanische Drehbewegung fehlt.

Der Leistungsabfall nach einem erfolgreichen Anlauf ist signifikant und wird daher als Kriterium für einen erfolgreichen Anlauf verwendet. Ein 30% Abfall wurde als sichere Schwelle festgelegt.

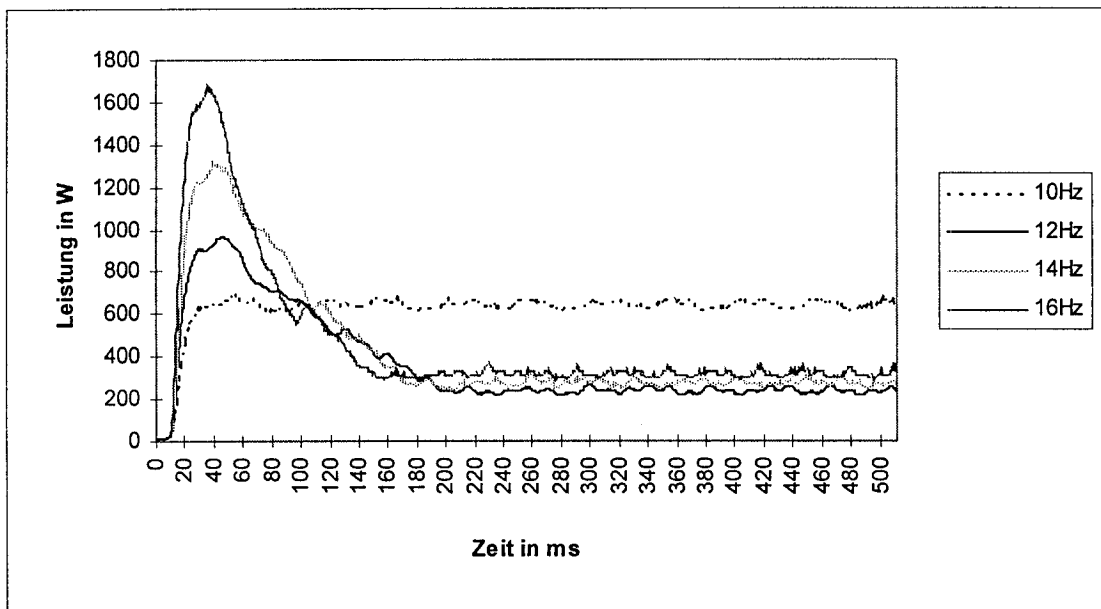


Abb. 4.2: Eingangsleistung des Wechselrichters beim Anlauf der Exzentrerschneckenpumpe 2NQ14 für verschiedene Startfrequenzen bei einem Gegendruck von 4bar

### Signalflußplan für die Anlaufstrategie:

Abb. 4.3 zeigt den Signalflußplan des Unterprogramms für den Anlaufvorgang. Das Unterprogramm wird so lange aufgerufen, bis das am Ende gesetzte AnlaufBit=1 dem übergeordneten Hauptprogramm einen erfolgreicher Anlauf signalisiert. Daraufhin ruft das Hauptprogramm das Unterprogramm MPP-Regelung auf.

Folgende Fälle können beim Durchlaufen der Anlaufroutine auftreten:

- 1) Ein erfolgreicher Anlauf findet bei der eingestellten Startfrequenz  $f_{\text{Start}}$  statt.
  - die Leuchtdiode LED0 wird eingeschaltet.
  - der Motor wird mit der Frequenz  $f_{\text{Start}}$  und 30% Überspannung gestartet.
  - die Leistung wird kontinuierlich gemessen und das Maximum aller gemessen Werte als  $P_{\text{max}}$  abgespeichert



- bei einem ersten Abfall der Eingangsleistung unter 70% des abgespeicherten Leistungsmaximums  $P_{\max}$  wird der Timerstand des CompareTimers in der Variablen T\_Pabf abgespeichert und das PabfBit=1 gesetzt.
- Überspannung wird nach 200ms zurückgenommen.
- Läuft der Antrieb weitere 30s stabil, dann gilt der Anlauf als erfolgreich.
- Die Motorfrequenz wird abgespeichert und das AnlaufBit=1 gesetzt.

2) Ein erfolgreicher Anlauf findet nicht statt. Dies kann folgende Gründe haben:

- Durch einen Zusammenbruch der Solargeneratorspannung fällt die Spannung unter die minimale Betriebsspannung von 150V.
- Ein Unterschreiten der 70% Schwelle des Leistungsmaximums  $P_{\max}$  findet nicht statt. Daraus resultiert eine Zeitüberschreitung, die den Anlaufversuch ebenfalls abbricht.

In beiden Fällen findet nach einer Zeit von 10 Sekunden ein erneuter Anlauf mit einer neuen Startfrequenz, die um 1Hz erhöht ist, statt. Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis entweder ein erfolgreicher Anlauf stattgefunden hat oder eine maximale Startfrequenz von 14Hz erreicht ist.

Wenn der Antrieb bis zur maximalen Startfrequenz nicht erfolgreich angelaufen ist, kann das folgende Gründe haben:

- 1) Die Kapazität des Anlaufkondensators ist zu klein bemessen  
⇒ ein weiterer Kondensator muß nachgerüstet werden
- 2) Ein Defekt im Antrieb liegt vor (defekte Pumpe oder Motor)
- 3) Die Energie des Solargenerators reicht für einen stationären Betrieb nicht aus.  
⇒ nach 3 Minuten wird ein neuer Anlaufversuch unternommen

Aus dem Signalflußplan für die Anlaufsteuerung wurde ein Modul für die Wechselrichtersteuerung in der Programmiersprache C erstellt. Dieses Modul wurde an den Exzentrerschneckenpumpenantrieben mit den Pumpen 2NQ14 und 2NQ18 erfolgreich getestet.

**Durch das Modul Anlaufsteuerung ergibt sich ein optimaler Anlauf:**

- Der Anlauf erfolgt zuverlässig und mit minimaler Energie.
- Auch bei einer festsitzenden Pumpe oder Motor gelingt eventuell ein Anlauf, da das maximal mögliche Anlaufmoment durch das kontinuierliche Erhöhen der Startfrequenz erzeugt wird.

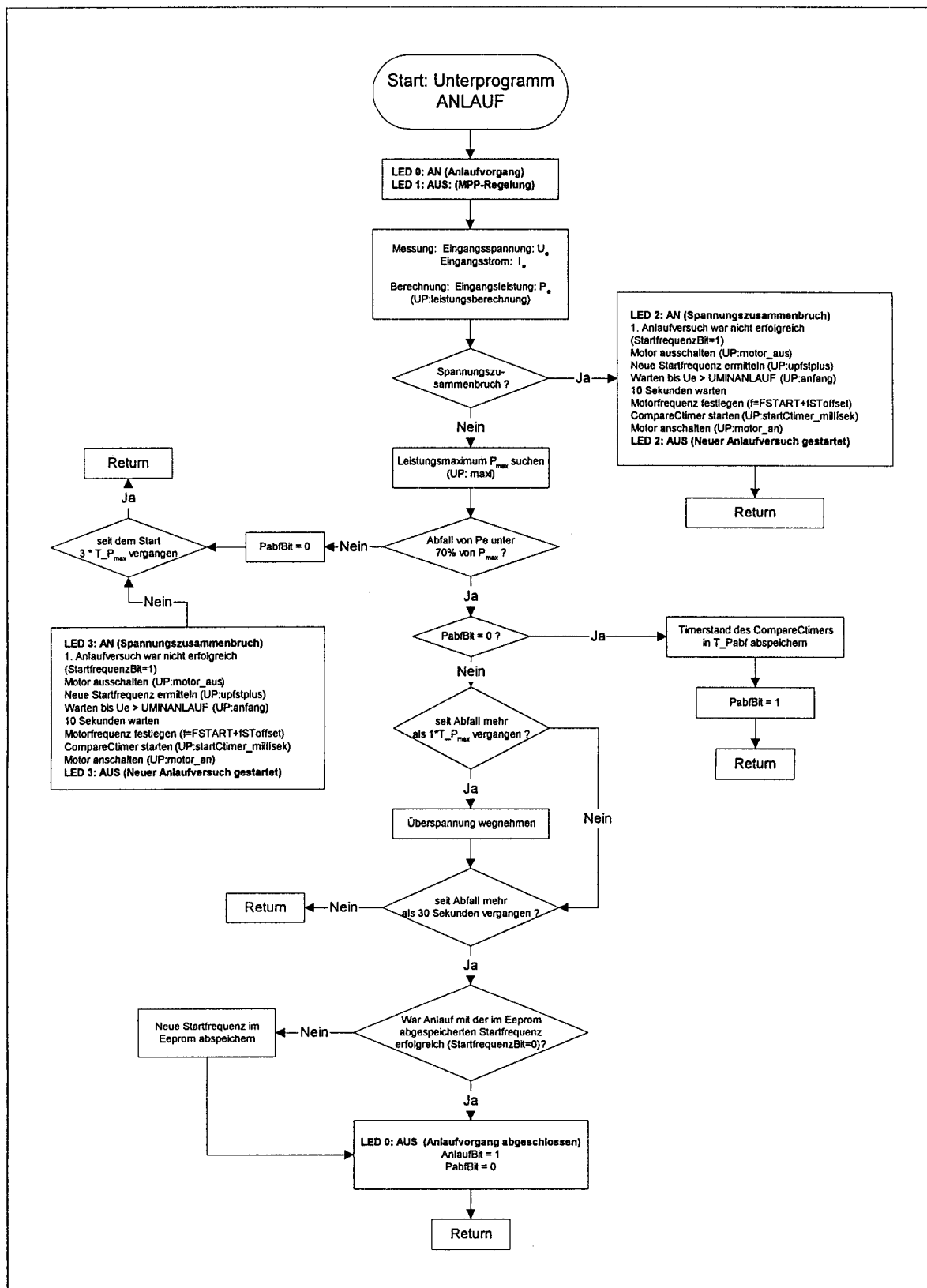


Abb. 4.3: Signalflußplan für die Anlaufstrategie

## **5. MPP-Regelung**

In Photovoltaischen Pumpensystemen (PVPS) liefert der Solargenerator die notwendige Energie für den Pumpenantrieb. Das Energieangebot des Solargenerators ist abhängig von der Einstrahlungsleistung und somit jahreszeitlichen und tageszeitlichen Schwankungen unterworfen und verringert sich geringfügig mit steigender Temperatur der Solarzelle. In Abhängigkeit von diesen Parametern erhält man die Betriebskennlinie des Solargenerators, die im Diagramm als Eckpunkte den Kurzschlußstrom  $I_k$  und die Leerlaufspannung  $U_L$  hat (Abb. 2.2.). Mit steigender Einstrahlungsleistung vergrößert sich der Kurzschlußstrom, wogegen sich die Leerlaufspannung nur geringfügig verändert. Auf der Betriebskennlinie befindet sich genau ein Punkt, der sogenannte Maximum Power Point (MPP), bei dem die Leistungsabgabe des Solargenerators maximal ist. Aufgabe der MPP-Regelung ist es, im Pumpenbetrieb einen Zustand einzustellen, bei dem die maximale Förderleistung erzielt wird. Wenn der Solargenerator sich im MPP befindet, tritt dieser Zustand ein.

Die Förderleistung der Pumpe erhöht sich sowohl bei der Kreiselpumpe als auch bei der Exzentrerschneckenpumpe mit steigender Drehzahl des Antriebs. Wenn sich der Solargenerator im MPP befindet, ist die maximal mögliche Drehzahl am Motor eingestellt.

Eine optimale Regelung weist folgende Eigenschaft auf: bei einer Veränderung der Leistung im MPP (Änderung der Einstrahlungsleistung) wird die Motordrehzahl so geregelt, daß auf der Betriebskennlinie des Solargenerators immer der MPP eingestellt bleibt. Diese Eigenschaft kann aufgrund der Trägheit des Systems real nicht erfüllt werden. Deshalb wird die Forderung an einen Regelalgorithmus gestellt, einen Punkt auf der Betriebskennlinie des Solargenerators einzustellen, der sich möglichst nahe, rechts vom MPP befindet. Auf der Betriebskennlinie rechts vom MPP befindet sich das System in einem stabilen, links in einem instabilen Zustand. Dies hat folgenden Grund: rechts vom MPP vergrößert sich die Solargeneratorleistung bei erhöhter Leistungsaufnahme des Motors und verringert sich bei geringerer Leistungsaufnahme. Die Leistungsaufnahme des Wechselrichters unterliegt auch bei konstanter Motorfrequenz kleinen zeitlichen Schwankungen. Befindet sich der aktuelle Betriebspunkt rechts vom MPP, liefert der Solargenerator diese unterschiedliche Energiemenge. Bei einem Betriebspunkt links vom MPP würde bei steigender Eingangsleistung des Wechselrichters die Leistung des Solargenerators abnehmen, was zur Folge hat, daß die Spannung des Solargenerators zusammenbricht. Es fließt dann der Kurzschlußstrom.

Um ein stabiles System zu erhalten werden folgende Forderungen aufgestellt:

- 1) Die Motordrehzahl wird so eingestellt, daß sich ein Betriebspunkt auf der Kennlinie des Solargenerators einstellt, der sich möglichst nahe, rechts vom MPP befindet.
- 2) Wandert der Betriebspunkt über den MPP nach links, so muß die Motordrehzahl verringert werden (Leistungsaufnahme des Wechselrichters sinkt), um wieder einen Betriebszustand rechts vom MPP zu erhalten.

Die Wanderung auf der Betriebskennlinie über den MPP nach links kann verschiedene Ursachen haben:

- Die Wechselrichtereingangsleistung wird durch eine Erhöhung der Motordrehzahl größer als die Leistung im MPP. Die entstehende Energiedifferenz zwischen der Leistungsaufnahme des Wechselrichters und der Leistungsabgabe des Solargenerators vergrößert sich zeitlich langsam (einige 100ms), da der Pufferkondensator von  $3300\mu\text{F}$  die Zeitkonstante verlängert. Der Regelalgorithmus hat mehrere 100ms Zeit, um die Motordrehzahl so weit zu verkleinern, daß keine Energiedifferenz mehr vorhanden ist.
- Eine Verschattung des Solargenerators durch Wolken kann die Leistung im MPP innerhalb von 100ms um mehrere 100Watt verkleinern. Um die Energiedifferenz möglichst klein zu halten, wird eine schnelle Reaktion (Absenkung der Drehzahl des Motors) vom Regelalgorithmus verlangt. Diese Reaktion muß wesentlich schneller als die oben genannte sein.

Aus den oben genannten Forderungen und den Zeitkonstanten im System wurde der Regelalgorithmus für die MPP-Regelung entwickelt. Dieser Algorithmus wird an dem Signalflußplan (Abb. 5.1) erläutert. Dabei werden alle möglichen dynamischen Veränderungen auf der Betriebskennlinie des Solargenerators, die durch eine Veränderung der Einstrahlungsleistung oder durch die Änderung der Motorfrequenz entstehen, beachtet.

#### **Signalflußplan für den Regelalgorithmus der MPP-Regelung:**

Zuerst werden die verwendeten Variablen erläutert:

- Ps: momentane Solargeneratorleistung
- Ps\_5smittel: 5 Sekunden Mittelwert der Solargeneratorleistung über die Regelzeit
- t\_mpp: Regelzeit; während dieses Zeitraums findet keine Erhöhung der Motorfrequenz statt;
- t\_start: Zeitintervall zwischen einem Zusammenbruch des Solargenerators oder Unterschreiten der Mindestfrequenz des Motors bis zu einem Neustart
- f: aktuelle Motorfrequenz

$P_f[x]$ : 5 Sekunden Mittelwert des Solargenerators bei der Motorfrequenz  $x$ ;  $30\text{Hz} < x < 60\text{Hz}$  bei der Kreiselpumpe;

Der Regelalgorithmus nutzt die Tatsache, daß bei steigender Motorfrequenz die Förderleistung und somit die Motorleistung zunimmt. Die Motorfrequenz wird nur in 1Hz Schritten verändert.

Folgende Reaktionen des Algorithmus auf Veränderungen der Drehzahl des Motors oder Änderungen der Einstrahlungsleistung ergeben sich:

### 1) Hochlaufvorgang

Die Mindestfrequenz von 30Hz bei der Kreiselpumpe wird vor einem Eintreten in das Unterprogramm MPP-Regelung eingestellt.

1. Schritt: Erhöhung der Frequenz um 1Hz auf 31Hz
2. Schritt: Start des Timer 1
3. Schritt: Annahme: Der aktuelle Betriebspunkt befindet sich rechts vom MPP. Es stellt sich ein stabiler Zustand ein. Die Abbruchbedingung ( $P_s < P[f-1]-40\text{Watt}$ ) ist nicht erfüllt, da der Solargenerator die benötigte Leistung für einen Betrieb bei 31Hz liefert und, wie oben erwähnt, die aufgenommene Motorleistung bei 31Hz auf jeden Fall größer ist wie bei 30Hz. Die zusätzliche Schwelle von 40Watt wird benötigt, um eine eindeutige Hysterese zu erhalten, da durch Meßungenauigkeiten möglicherweise Überlappungen in der Leistung zwischen 2 Leistungsmeßwerten bei benachbarten Motorfrequenzen auftreten könnten. Diese Überlappungen würden dann ein Hochlaufen des Motors verhindern.
4. Schritt: Nach Ablauf der MPP-Regelzeit wird die Zählvariable  $Z$  erhöht und eine weitere Bedingung abgefragt. Ist die Bedingung ( $P_{s\_5\text{mittel}} > P[f-1]$  oder  $Z = 3$ ) erfüllt, wird die Frequenz um 1Hz erhöht,  $Z = 0$  gesetzt und mit dem Rücksprung erneut der Timer 1 gestartet. Die Zählvariable  $Z$  erfüllt eine ähnliche Aufgabe wie die Schwelle von vorhin. Bei niedrigen Drehzahlen kann es vorkommen, daß sich die Leistungsaufnahme zweier benachbarter Frequenzen nur gering voneinander unterscheiden. Durch die Meßungenauigkeit wird dann möglicherweise eine kleinere Leistungsaufnahme des Motors bei Frequenzerhöhung gemessen. Das System würde ohne die zusätzliche Bedingung ( $Z=3$ ?) nicht hochlaufen, da die Bedingung ( $P_{s\_5\text{mittel}} > P[f-1]$ ) nicht erfüllt ist und der Motor bei der eingestellten Frequenz sozusagen „hängenbleibt“. Durch die zusätzliche Bedingung ( $Z=3$ ?) wird in jedem Fall nach dreimaligem Durchlaufen der MPP-Regelzeit eine Frequenzerhöhung stattfinden. Ein zweiter Vorteil ergibt sich durch die Abfrage: befindet sich der Betriebspunkt auf der Kennlinie des Solargenerators nahe am MPP, jedoch auf der linken Seite, dann ist die Bedingung ( $P_{s\_5\text{mittel}} > P[f-1]$ ) unter Umständen nicht erfüllt. In diesem Fall wird die

Regelzeit durch die Zählvariable  $Z$  verlängert, bis entweder die Abbruchbedingung ( $P_s < P[f-1] - 40\text{Watt}$ ) erfüllt oder dreimal die MPP-Regelzeit vergangen ist.

5. Schritt: Eine Frequenzerhöhung findet solange statt, bis die maximal mögliche Motorfrequenz  $f_{\max, \text{MPP}}$ , bei welcher der Solargenerator die nötige Energie liefern kann, eingestellt ist. Die maximale Motorfrequenz  $f_{\max, \text{Motor}}$  kann größer sein, nur ist der Solargenerator nicht in der Lage diese Energie zu liefern.

6. Schritt: Wird die Motorfrequenz über die maximale Frequenz  $f_{\max, \text{MPP}}$  erhöht, wandert der Betriebspunkt auf der Solargeneratorkennlinie über den MPP nach links. Es stellt sich ein instabiler Zustand ein. Das bedeutet, daß der Solargenerator weniger Leistung liefert als die Eingangsleistung des Wechselrichters beträgt. Die Differenz wird von dem Speicherkondensator bezogen. Sobald die Solargeneratorleistung  $P_s$  kleiner wird als die Summe aus der abgespeicherte Leistung bei der um 1Hz niedrigeren Motorfrequenz und 40 Watt ( $P_s < P[f-1] - 40\text{Watt}$ ), ist die Abbruchbedingung erfüllt. Die Motorfrequenz wird daraufhin verkleinert, die Leistungsaufnahme verringert sich und der Betriebspunkt auf der Kennlinie wandert wieder über den MPP nach rechts, so daß sich ein stabiler Zustand einstellt.

7. Schritt: Bei Erreichen der maximal möglichen Frequenz  $f_{\max, \text{MPP}}$  entsteht ein Zustand, bei dem die Motorfrequenz um diese Frequenz pendelt. Die Schwankung in der Frequenz beträgt zwei bis maximal drei Hertz.

Die erste Forderung nach einer hohen Regelgenauigkeit ist gegeben. Die Motordrehzahl befindet sich nach dem Hochlaufvorgang sehr nahe an der maximal möglichen Frequenz  $f_{\max, \text{MPP}}$ , was gleichbedeutend ist mit maximaler Förderleistung.

Nun wird das Verhalten des Systems, welches sich bei der Frequenz  $f_{\max, \text{MPP}}$  befindet, bei Auftreten einer Störung untersucht. Die Störung besteht in einem schnellen Abfall der Leistung im MPP, wie dies bei einem Wolkendurchzug passiert.

## **2) Schneller Abfall der Leistung im MPP durch Wolkendurchzug:**

Die Leistung im MPP fällt innerhalb von wenigen 100ms um einige hundert Watt. Eine schnelle Verringerung der Motorfrequenz ist nötig, damit die Spannung des Solargenerators nicht zusammenbricht. Die Abbruchbedingung ( $P_s < P[f-1] - 40\text{Watt}$ ) ist solange erfüllt, bis die Solargeneratorleistung und die Motorleistung wieder ähnliche Werte annehmen. Solange die Abbruchbedingung erfüllt ist, wird die Motorfrequenz verringert. Diese Verringerung geht sehr schnell, da die Zeitkonstante nicht die MPP-Regelzeit, sondern lediglich die Rechenzeit

des Mikrocontrollers ist. Um eine definierte Zeitkonstante zu erhalten und Schwingungen zu vermeiden wird in die Regelschleife eine Warteschleife eingefügt, die einige ms beträgt.

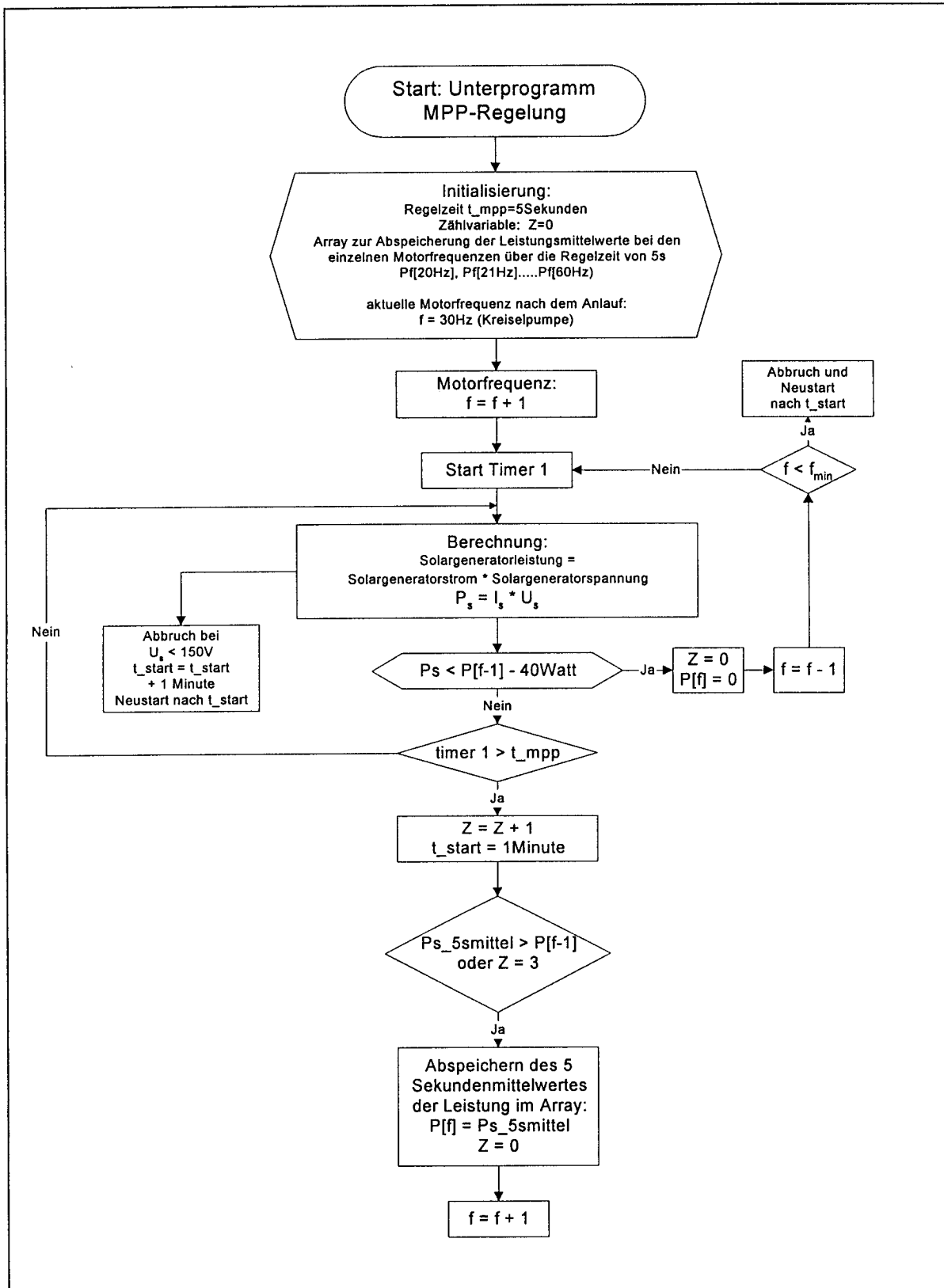


Abb. 5.1: Signalflußplan des Regelalgorithmus für die MPP-Regelung

Somit ist die zweite Forderung nach einer schnellen Reaktion des Systems bei einem Abfall der Einstrahlungsleistung und dem damit verbundenen Abfall der Leistung im MPP erfüllt.

Die MPP-Regelung wurde am Pumpenprüfstand der UniBw (Abb. 3.2) mit den zur Verfügung stehenden Pumpenantrieben und dem Solargenerator von 1,8kW getestet. Die Eingangsleistung des Wechselrichters wird über einen Meßumformer den Meßbereichen der Datenerfassungskarte im PC angepaßt. Abb. 5.2 zeigt die Leistungsaufnahme des Wechselrichters über einen Zeitraum von 45 Minuten. Dieser Zeitabschnitt wurde aus dem gesamten Tagesverlauf ausgewählt, da in diesem Zeitabschnitt alle vorher im Signalflußplan auftretenden Veränderungen im System (Hochlaufvorgang, Änderung der Einstrahlungsleistung) und die Reaktion des Regelalgorithmus zu erkennen sind. Es ergeben sich folgende verschiedene Betriebszustände:

- [1]: Anlaufversuch: Die Leistung des Solargenerators ist für einen Pumpenbetrieb mit der Mindestdrehzahl von 30Hz zu gering. Nach 5 Minuten wird ein neuer Anlaufversuch unternommen.
- [2] bis [3]: Hochlaufvorgang bis 830 Watt
- [3] bis [4]: Drehzahl der Pumpe wird aufgrund schwankender Einstrahlungsleistung geregelt. Ursache für die Änderung der Einstrahlungsleistung ist die unterschiedliche Bewölkungsdichte.
- [4] bis [5]: Die Motordrehzahl wird aufgrund langsam zunehmender Bewölkungsdichte verringert.
- [6] bis [7]: aufgrund starker Zunahme der Einstrahlungsleistung: Hochlaufvorgang von 400 auf 1000 Watt
- [7] bis [8]: maximale Förderleistung der Pumpe bei maximaler Drehzahl von 60 Hz
- [8] bis [9]: aufgrund starker Bewölkung: schnelle Drehzahlreduzierung durch großen Leistungsabfall des Solargenerators
- [9] bis [10]: langsame Zunahme der Bewölkungsdichte: Drehzahl wird bis zur Mindestfrequenz von 30 Hz reduziert
- [10]: Die Leistung des Solargenerators ist für einen Pumpenbetrieb mit der Mindestdrehzahl von 30 Hz zu gering. ⇒ Abbruch des Pumpenbetriebes, neuer Versuch nach 3 Minuten



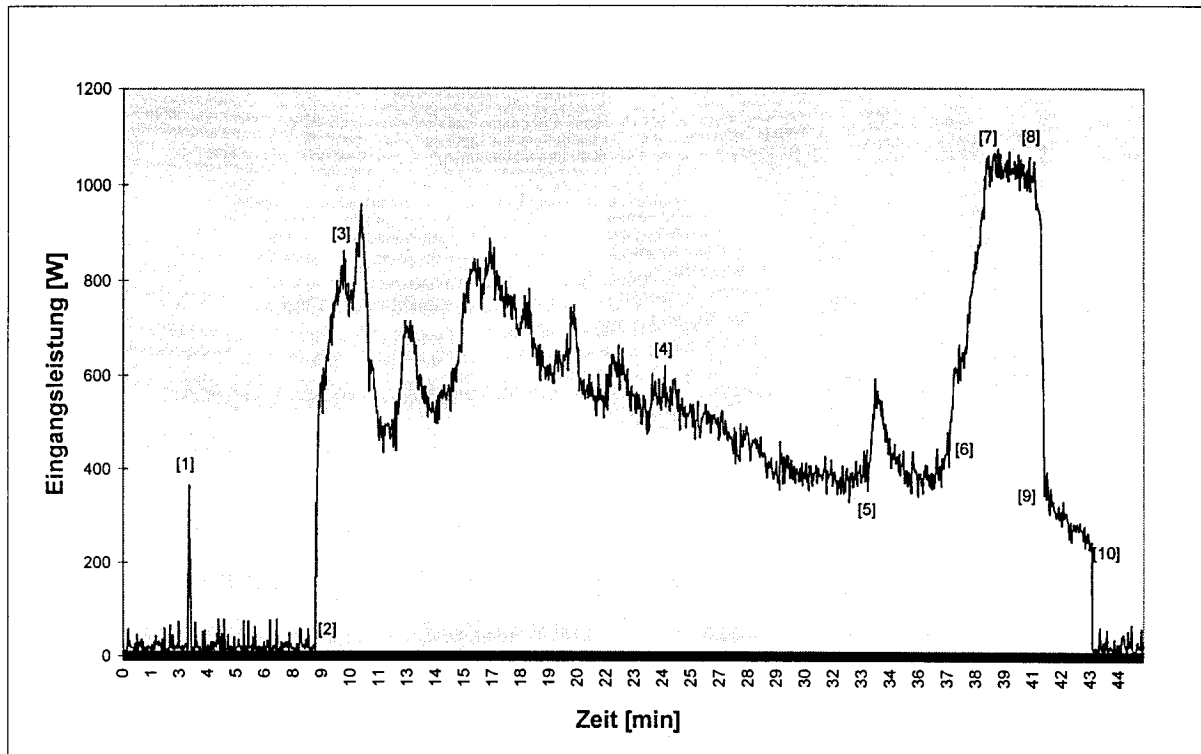


Abb. 5.2: Leistungsaufnahme des Wechselrichters „BEPING“; die Antriebseinheit besteht aus einer Grundfoss 3A8 Kreiselpumpe in Kombination mit einem Franklin Motor 1,1kW

---

## **6. Wechselrichter „BEPING“**

### **6.1. Kurzbeschreibung der Funktion**

Für den Einsatz in Photovoltaischen Pumpensystemen (PVPS) wurde ein spezieller Wechselrichter entwickelt, mit dem sowohl Kreiselpumpen als auch Exzentrerschneckenpumpen ohne Batteriepufferung zuverlässig betrieben werden können. Die Wechselrichtersteuerung enthält eine spezielle Anlaufsteuerung, die den Schweranlauf von Exzentrerschneckenpumpen sicher und mit minimaler Energie durchführt. Somit wird kein Servicepersonal benötigt, welches die spezifischen Startparameter in Abhängigkeit von dem angeschlossenen Antrieb und der Förderhöhe einstellen muß.

Durch die Auswahlmöglichkeit des Pumpentyps kann der optimale Antriebsstrang, bestehend aus einem Drehstrommotor in Kombination mit einer Kreiselpumpe oder Exzentrerschneckenpumpe, entsprechend dem Einsatzort ausgewählt werden. Insbesondere bei tiefen Brunnen (ab ca. 50 Meter) und dem bei Photovoltaikanlagen häufig vorkommenden Teillastbetrieb kann die Tagesfördermenge durch den Einsatz von Exzentrerschneckenpumpen erhöht werden.

Die nach der Anlaufsteuerung gestartete MPP-Regelung der Microcontrollersteuerung des Wechselrichters sorgt für eine optimale Ausnutzung des Leistungsangebotes des Solargenerators, indem automatisch die maximal mögliche Motorfrequenz und somit maximale Förderleistung eingestellt wird. Aufgrund der Erfassung der aktuellen Strom- und Spannungswerte des Solargenerators und des Regelalgorithmus funktioniert die Regelung temperaturunabhängig.

Ein großer Vorteil des entwickelten Regelalgorithmus besteht darin, daß am selben Solargenerator während des Pumpenbetriebes andere Verbraucher angeschlossen werden können. Dies ermöglicht eine optimale Ausnutzung des Solargenerators. Ist beispielsweise der Vorratsbehälter schon ausreichend mit Wasser gefüllt, können Batterien geladen oder andere Verbraucher betrieben werden. Das MPP-Tracking regelt die Motordrehzahl so, daß die verbleibende Energiemenge zur Wasserförderung verwendet wird. Die Exzentrerschneckenpumpe fördert bei einer verringerten Leistungsaufnahme nahezu proportional zur Drehzahlverringerung weniger und ist daher für den gleichzeitigen Betrieb mit anderen Verbrauchern geeignet. Bei der Kreiselpumpe ist der Förderdruck in einem weiten Bereich quadratisch von der Drehzahl abhängig, so daß bei einem verringerten Leistungsangebots die Fördermenge sehr schnell abnimmt.

## **6.2. Einsatz des Wechselrichters in PVPS**

Der Wechselrichter ist für den Einsatz in Photovoltaischen Pumpensystemen (PVPS) ohne Batteriepufferung konzipiert. Bei diesen Pumpenanlagen handelt es sich um Tauchpumpenanlagen, die Wasser aus einem Brunnen in einen Vorratsbehälter pumpen. Diese Anlagen werden im Inselbetrieb eingesetzt und bestehen aus den Komponenten Solargenerator, Wechselrichter, Motor, Pumpe und dem hydraulischen System (Abb. 2.1). Als Antriebsstrang muß ein Drehstrommotor mit einer Exzentrerschnecken- oder Kreiselpumpe angeschlossen werden.

Die Inbetriebnahme des Wechselrichters gestaltet sich sehr einfach. Nach Anklemmen der Gleichspannung des Solargenerators und der Motorkabel ist das System einsatzbereit. Das Einschalten des Hauptschalters des Wechselrichters startet automatisch einen Anlauf der angeschlossenen Pumpe. Die Sanftanlaufsteuerung gewährleistet ein zuverlässiges Hochlaufen des Motors mit minimaler Energie. Dadurch ist auch der Schweranlauf von Exzentrerschneckenpumpen möglich.

Das nach der Anlaufphase gestartete MPP-Tracking sorgt für eine optimale Ausnutzung des Leistungsangebotes des Solargenerators. Die maximal mögliche Drehzahl des Motors und somit die maximale Förderleistung wird eingestellt.

### **Systemkonfiguration des Photovoltaischen Pumpensystems mit unserem Wechselrichter:**

**1) Standardkonfiguration des Wechselrichters ermöglicht den Anschluß eines Kreiselpumpen- oder Exzentrerschneckenpumpenantriebs.**

#### **Einsatz eines Kreiselpumpenantriebs:**

In PVPS werden bisher im Leistungsbereich über 500 Watt fast ausschließlich Kreiselpumpen eingesetzt. Durch die einfache, modulare Bauweise sind sie kostengünstig in verschiedenen Leistungsklassen erhältlich. Beim Betrieb zeichnen sie sich durch einen leichten Anlauf aus, was keine besondere Anlaufstrategie beim Wechselrichter verlangt. Diese Pumpen funktionieren nach dem Strömungsprinzip. Da der Druckaufbau über die Fliehkraft erfolgt, ist der Förderdruck in einem weiten Bereich quadratisch von der Drehzahl abhängig. Insbesondere bei tiefen Brunnen wirkt sich diese Eigenschaft der Kreiselpumpe ungünstig aus. Je größer die Brunnentiefe, umso höher liegt die Drehzahl, ab der überhaupt Wasser gefördert werden kann. Im häufig vorkommenden Teillastbetrieb bei geringer Einstrahlungsenergie erreicht die Pumpe nur eine geringe Drehzahl, was zur Folge hat, daß bei tiefen Brunnen der zur Überwindung der Förderhöhe erforderliche Druck nicht erreicht wird, d.h. die zur Verfügung stehende Generatorleistung nicht in Förderleistung umgesetzt werden kann.

---

In Gegenden mit einer hohen Sonnenscheindauer und Brunnen mit einer Tiefe bis ca. 50 Meter ist die Kreiselpumpe meist der geeignete Pumpentyp.

### **Einsatz eines Exzentrerschneckenpumpenantriebs:**

Exzentrerschneckenpumpen gehören zu den Verdrängerpumpen und funktionieren nach dem volumetrischen Verdrängerprinzip. Bei ihnen rotiert ein Rotor aus Metall in einem aus Elastomerkunststoff ausgekleidetem Statorgehäuse. Aufgrund ihrer Konstruktion besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Drehzahl und Förderstrom, der nahezu unabhängig von der Förderhöhe ist und nur durch einen Leckstrom und ein leichtes Abknicken der Kurve bei hohen Gegendrücken gestört wird. Deshalb steigt der Wirkungsgrad der Pumpe mit steigender Förderhöhe und ermöglicht einen sinnvollen Einsatz dieses Pumpentyps bei tiefen Brunnen (ab ca. 50 Meter). Ein großer Vorteil dieses Pumpentyps besteht in der steilen Pumpenkennlinie, die dafür sorgt, daß der Förderdruck schon im niedrigen Drehzahlbereich stark ansteigt und eine Wasserförderung im Teillastbereich bei niedriger Einstrahlung ermöglicht.

In PVPS ergeben sich durch den Einsatz der Exzentrerschneckenpumpe weitere Vorteile:

- Exzentrerschneckenpumpen besitzen eine höhere Beständigkeit gegenüber abrasiven Medien. Mit steigender Verunreinigung durch Sand oder andere Stoffe erhält man eine immer größere Lebensdauer der Pumpe im Verhältnis zur Kreiselpumpe.
- Ein weiterer Vorteil ist die Eigenschaft der Exzentrerschneckenpumpe im Teillastbereich Wasser zu fördern. Um eine Verunreinigung mit Bakterien zu verhindern, sollte Trinkwasser möglichst schnell verbraucht werden. Beim Einsatz der Exzentrerschneckenpumpe entstehen auch bei Schlechtwetterperioden durch die Fähigkeit im Teillastbetrieb Wasser zu fördern meist nur geringe Ausfallzeiten. Demzufolge ist ein kleinerer Wassertank nötig als bei der Kreiselpumpe und es ergeben sich kürzere Lagerzeiten für das Trinkwasser.
- Werden am selben Solargenerator andere Verbraucher gemeinsam mit der Wasserpumpe betrieben fördert das System mit der Exzentrerschneckenpumpe bei steigendem Verbrauch anderer Verbraucher proportional zur Drehzahl der Pumpe weniger Wasser. Beim Kreiselpumpensystem nimmt bei sinkendem Leistungsangebot des Solargenerators die Wasserförderung aufgrund der Pumpenkennlinie wesentlich stärker ab.

**2) Der Wechselrichter kann auf Wunsch mit zwei Ausgangsrelais geliefert werden. Diese Konfiguration ermöglicht einen Anschluß zweier Pumpen, einer Kreiselpumpe und einer Exzentrerschneckenpumpe.**

Die benötigte Software für die Motorsteuerung ist noch nicht verfügbar.

Diese Konfiguration gestattet es die Vorteile beider Pumpentypen auszunützen. Die Microcontrollersteuerung ermittelt automatisch die günstigste Antriebskombination. Im Teillastbetrieb (am Morgen, bei bewölktem Himmel und am Abend) wird die Exzentrerschneckenpumpe zugeschalten, bei hoher Solargeneratorleistung die Kreiselpumpe. Bei Verwendung zweier Vorratsbehälter zur Wasserspeicherung wird für jede Pumpe ein eigener Speicher verwendet. Der Wasserspeicher für die Kreiselpumpe kann zur Bewässerung, der Speicher für die Exzentrerschneckenpumpe als Trinkwasserreservoir verwendet werden.

Mit einem Schalter am Wechselrichter kann bei einem Defekt in einem Pumpenkreislauf oder bei zu geringer Neubildung des Grundwassers nur eine von beiden Pumpen eingeschalten werden.

Falls die Vorratsbehälter gut gefüllt sind oder andere Verbraucher am selben Solargenerator angeschlossen sind, kann der Wechselrichter auch nur mit der Exzentrerschneckenpumpe betrieben werden.

### **6.3. Allgemeine Daten**

**Funktion:** Betrieb von Exzentrerschnecken- und Kreiselpumpen in Photovoltaischen Pumpensystemen ohne Batteriepufferung. Bei diesen Pumpenanlagen handelt es sich um Tauchpumpenanlagen, die Wasser aus einem Tiefbrunnen in einen Vorratsbehälter pumpen. Diese Anlagen werden im Inselbetrieb eingesetzt und bestehen aus den Komponenten Solargenerator, Wechselrichter, Motor, Pumpe und dem hydraulischen System. Am selben Solargenerator können andere Verbraucher angeschlossen werden. Die MPP-Regelung der Steuerelektronik regelt in diesem Fall die Motordrehzahl, so daß die verbleibende Solargeneratorleistung für die Wasserförderung verwendet wird.

**Benutzerfreundliche Bedienung:** Nach Anschluß des Solargenerators und des Motors wird ein Betrieb des Pumpensystems durch Einschalten des Hauptschalters automatisch gestartet. Die Sanftanlaufsteuerung gewährleistet ein zuverlässiges Hochlaufen des Motors mit minimaler Energie. Dadurch ist auch der Einsatz von Exzentrerschneckenpumpen möglich.

**MPP-Tracking (MPPT):** Die MPP-Regelung (Maximum-Power-Point - Regelung) ermöglicht einen direkten Betrieb des Pumpenantriebs ohne Batteriepufferung. Dabei stellt die Regelung die momentan maximal mögliche Drehzahl am Antrieb und somit maximale Förderleistung ein. Die Mindestspannung für den Betrieb des Wechselrichters beträgt 130V. Damit ist ein MPPT im Teillastbereich bei sinkender Leerlaufspannung gewährleistet. Die Regelung funktioniert temperaturunabhängig unter Verwendung der aktuellen Meßdaten Solargeneratorspannung und -strom. Dies garantiert eine hohe Regelgenauigkeit.

### **6.4. Technische Daten**

**Leistungsaufnahme:** maximal 2,2kW

Bis zu dieser Leistungsaufnahme kann der Wechselrichter bei einer Umgebungstemperatur von 50°C betrieben werden, ohne daß die Temperaturabschaltung anspricht. Der Einsatz des Wechselrichters ist in einem Bereich von 400W bis 2,2kW aufgrund des hohen Wirkungsgrades im Teillastbetrieb sinnvoll.

**Ausgangsspannung:**

- 3-phasig 220V (in der jetzigen Version)
- niedrigere Ausgangsspannungen sind möglich

**Ausgangsfrequenz:** 5 bis 70Hz; Einstellung durch die MPPT

**Schutzklasse:** IP65

**maximale Solargeneratorspannung:** 410V DC

---

**maximale Umgebungstemperatur im Betrieb:** -40 °C bis +70°C

**Anzeigeelemente:** 3 LEDs; Betrieb, Übertemperatur, Fehler

**Maße:** 395mm - 265mm - 210mm

**Schutzmaßnahmen:**

- Temperaturüberwachung der Kühlleiste für die Leistungstransistoren und des Gehäuseinneren
- Automatisches Ausschalten bei Überschreiten der maximalen Temperaturen
- Nach Unterschreiten der eingestellten Schwelle wird der Antrieb wieder eingeschaltet.
- Blitzschutz durch Varistoren. Kurzschlußsicher am Ausgang;

**Interface:**

- serielle Schnittstelle RS232 zur Betriebsdatenerfassung
- Konfiguration des Wechselrichters (Programmierung des internen Eeproms) und externe Steuerung.

**Technische Besonderheiten:**

- vollständig galvanisch isolierte Leistungsstufe am Ausgang (Meßdatentrennung durch Optokoppler
- Ansteuerung der Leistungstransistoren durch Trafos
- galvanisch isoliertes Netzteil
- nahezu keine Geräusentwicklung durch ein Schalten der Leistungshalbleiter mit einer Taktfrequenz von 33kHz (Pulsweitenmodulation), die über der Hörschwelle liegt
- Leistungsfiler am Ausgang verbessert das System:
  - keine Überspannungen und Spannungsspitzen am Motor
  - Verhinderung von Beschädigungen der Motorwicklung
  - Erhöhung der Lebensdauer
  - Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit

**Hohe Verfügbarkeit und Lebensdauer durch speziellen Aufbau des Gerätes:**

das Material des Gehäuses besteht aus 2,03mm starkem Stahlblech, die Oberfläche ist Zinkspritzlackiert. Die Komponenten EMV-Filter, Leistungstransistoren, Ansteuerung der Leistungstransistoren, Netzteil, Meßdatenerfassung und Mikrocontrollersteuerung mit Pheripherie befinden sich auf einer Leistungsplatine und müssen deshalb nicht miteinander verkabelt werden. Die Steuerplatine mit dem Mikrocontroller und der Abschaltautomatik befinden sich auf einer separaten Platine, die mit einem eingelötetem Stecker in die Buchse auf der Leistungsplatine gesteckt wird. Beide Platinen können auf Wunsch komplett mit Schutzlack versiegelt werden. Dieser Aufbau, der auf der Niederspannungsseite nahezu ohne Verkabelung auskommt, gewährleistet eine hohe Sicherheit.

## **7. Zusammenfassung**

Mit dem Projekt „BEPING“ wurde die Entwicklung eines neuartigen Wechselrichters für photovoltaische Pumpensysteme (PVPS), mit dem sowohl Kreisel- als auch Exzentrerschneckenpumpen ohne Batteriepufferung zuverlässig betrieben werden können, gefördert. Insbesondere der Schweranlauf von Exzentrerschneckenpumpen war bisher problematisch. Ein Anlauf gelang bei einigen Geräten teilweise nur, wenn der Wechselrichter und der Motor überdimensioniert und die passenden Parameter von Hand am Gerät eingestellt wurden. Auch Versuche diesen Pumpentyp mit speziellen Gleichstrommotoren zu betreiben sind bisher an den sehr hohen Kosten dieser speziell angefertigten Motoren gescheitert.

Die wesentlichste technische Neuerung am entwickelten Gerät stellt die Anlaufsteuerung von Exzentrerschneckenpumpen dar. Die eben erwähnten Probleme wurden dadurch beseitigt. Die Mikrocontroller-Steuerung stellt automatisch die optimalen Parameter für einen zuverlässigen Anlauf mit minimaler Energie ein.

Mit der Förderung des Projekts wurde damit die noch offene Lücke in der fehlenden Wechselrichtertechnologie geschlossen. Als Antriebsmotor wird der Asynchronmotor mit Kurzschlußläufer eingesetzt. Dieser Motor ist derzeit der kostengünstigste, am einfachsten gebaute und betriebssicherste Motor.

Der Wechselrichter wurde komplett neu entwickelt. Aufgrund dieser Tatsache war es möglich, ein Gerät zu entwickeln, welches speziell auf die Anforderungen eines photovoltaischen Pumpensystems abgestimmt ist. Die wichtigsten sind:

- 1) Der Anlauf und Betrieb des Gerätes erfolgt automatisch, so daß keine Parameter von Hand eingestellt werden müssen. Somit wird während des Betriebs kein Personal benötigt, wodurch das System wartungsfrei ist.
- 2) Die spezielle Anlaufsteuerung für Exzentrerschneckenpumpen ermöglicht den Schweranlauf von Exzentrerschneckenpumpen.
- 3) Die MPP-Regelung funktioniert in einem weiten Leistungsbereich (0,3 bis 2,5kW) unabhängig vom Pumpentyp und der Temperatur des Solargenerators.
- 4) Höchste Zuverlässigkeit auch unter extremen Umgebungsbedingungen. Die komplette Steuerelektronik befindet sich auf zwei Platinen, die nach dem Bestücken lackiert und mit



einem wasserdichten Stecker ineinandergesteckt werden. Dieser Aufbau schützt die Elektronikkomponenten gegen Feuchte.

- 5) Die Konstruktion des Gerätes ermöglicht auch eine Fertigung kleiner und mittlerer Stückzahlen. Dadurch wird die Markteinführung erleichtert.

Technisch ist es gelungen eine neue Generation von Wechselrichtern zu entwickeln die „hybrid“ arbeiten, d.h. für mehrere Pumpentypen geeignet sind und sich auch in andere Konzepte (Mehrfachnutzung des Solargenerators) integrieren lassen. Besonderen Wert bei der Entwicklung wurde auch auf einen modularen Aufbau gelegt, um den Einsatz des Gerätes auf andere Bereiche erweitern zu können. Eine weitere sinnvolle Anwendung wären Pumpenantriebe, die mit Windenergie betrieben werden.

Durch die Entwicklung des Wechselrichters soll der Einsatzbereich von PVPS erweitert und die Zuverlässigkeit der Systeme erhöht werden. Dadurch verbessern sich die Marktchancen von PVPS gegenüber Dieselaggregaten im mittleren Leistungsbereich von 1 bis 2kW weiter. Bei einer Kostenreduzierung der Solarmodule, die den größten Kostenfaktor darstellen, würde sich diese Entwicklung weiter beschleunigen.

**A1. Literaturverzeichnis**

Fischer R., Elektrische Maschinen, 8. Aufl., Hanser Vlg., Wien, 1992

Vetter, G. (Hrsg.): Pumpen, 2. Aufl., Vulkan-Vlg., Essen, 1990

Mayer O., Zängerl.H.P., Abschlußbericht des Projekts: Wechsellansteuerung zur Beherrschung des Schweranlaufs von Motoren in photovoltaischen Pumpensystemen, ISET, Kassel, 1994

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title  BEPING: Bau Eines Pumpen Inverters der Neuesten Generation	
3b. Title of Publication  BEPING: Bau Eines Pumpen Inverters der Neuesten Generation	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Mayer Oliver, Zängerl Hans-Peter Klemt Michael, Dauer Oliver	5. End of Project 31.10.98
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Mayer Oliver, Zängerl Hans-Peter Klemt Michael, Dauer Oliver	6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Universität der Bundeswehr München Abtlg. Regenerative Energien, BauV 6.1 Werner-Heisenberg-Weg 39 85577 Neubiberg  ATPE GmbH Am Anger 9 84174 Eching	7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)  53170 Bonn	9. Originator's Report No.
	10. Reference No BMBF 0329737
	11a. No. of Pages Report 60
	11b. No. of Pages Publication 48
	12. No. of References 3
	14. No. of Tables -
	15. No. of Figures 24
16. Supplementary Notes <del>The project has been a university / industrial co-operation</del>	
17. Presented at (Title, Place, Date) 12. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 1997. / 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion	
18. Abstract Within the project BEPING a new type of pump inverter has been developed, being capable to run as well a centrifugal pump as a screw pump. The special task was to ensure the secure start up of the connected pump. The inverter has the following characteristics: - Start and running of BEPING are performed automatically, no parameter setting is needed. - A special start up regulation allows start up of high load pump such as screw pumps. - The MPP regulation is working in a wide range undependant of the pump type used. - High reliability even under extrem environmental conditions - The design of BEPING allows a economic production even for small numbers. This will ease introduction into market.	
19. Keywords Photovoltaic Pumping Systems, Inverter, Solar Pumping	
20. Publisher	21. Price