

REDUNDANTE STEUERUNG EINES 2 MW-SCHWUNGMASSENSPEICHERS

I. Koch, F. Hinrichsen

1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Projektes Dynastore wurde ein rotierender Schwungmassenspeicher für eine unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage (USV-Anlage) entwickelt. Ein im Vakuum mit 10.000 1/min rotierender Kohlefaserschwungring wird mit einer Kombination aus Hochtemperatur-Supraleitern und Dauermagneten berührungslos gelagert. Aufgrund des hohen Energieinhaltes und der hohen Drehzahl darf es auf keinen Fall zu unkontrollierbaren Betriebs- oder Fehlerzuständen kommen. Daher muss die Steuerung ausfallsicher arbeiten und im Fehlerfall eine geordnete Stillsetzung der Anlage einleiten.

Der Schwungring wird von zwei Teilmaschinen mit eigenen Wechselrichtern angetrieben und gebremst. Eine mechanische Notbremse ist nicht vorhanden. Es bietet sich an, die Steuerung ebenfalls in zwei Einheiten aufzuteilen, die je einer Teilmaschine zugeordnet werden. Dies ermöglicht zwei identische, voneinander unabhängige Antriebssysteme, die im Fehlerfall bis hin zum Totalausfall eines Teilsystems den Schwungring sicher herunterfahren können.

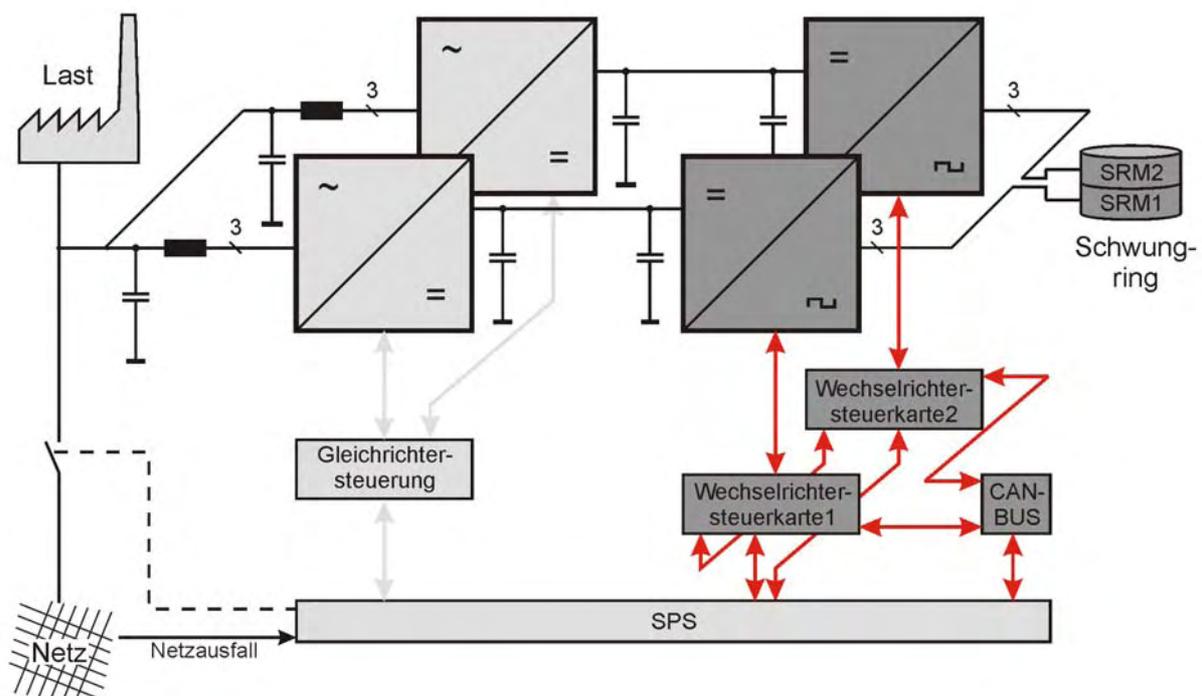


Bild 1: Komponenten der USV-Anlage mit Schwungmassen-Speicher

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der gesamten USV-Anlage. Die dunkelgrau hinterlegten Einheiten gehören zum Testaufbau am IMAB, der in **Bild 2** etwas detaillierter dargestellt ist. Die Steuersignale von der SPS an die Steuerkarten werden vorerst manuell vorgegeben. Zur Vereinfachung wird die Netzanbindung mit zwei ungesteuerten Gleichrichtern realisiert. Jeder Wechselrichter verfügt aus Sicherheitsgründen über einen eigenen Bremssteller und Bremswiderstand. Im Testbetrieb dienen diese auch als Last. Es wird keine Leistung ins Netz zurückgespeist.

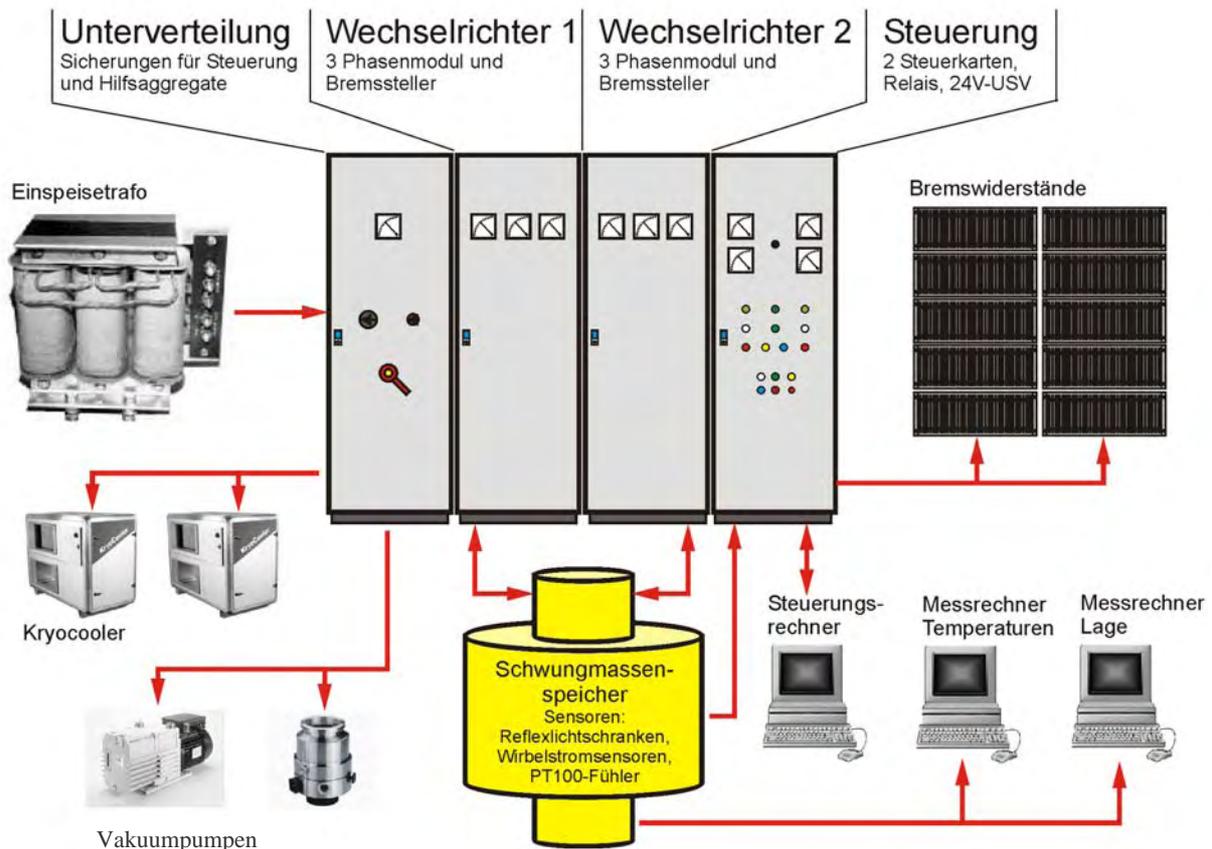


Bild 2: Übersicht Prüfstand am Institut

2 STEUERKARTE

Bild 3 zeigt das Foto einer Steuerkarte mit angedeuteten Funktionsblöcken. Die Ein- und Ausgangssignale werden galvanisch getrennt übermittelt, so dass auch im Falle einer unzulässig hohen Spannung im Leistungsteil oder eines Überschlags auf die andere Steuerkarte die Funktion der nicht betroffenen Einheit gewährleistet bleibt. Die Kommunikation zwischen den beiden Steuerkarten beschränkt sich auf ein Fehler-Bit und einen CAN-Bus zur Übertragung von Sollwerten. Auch diese Signale werden über Optokoppler getrennt.

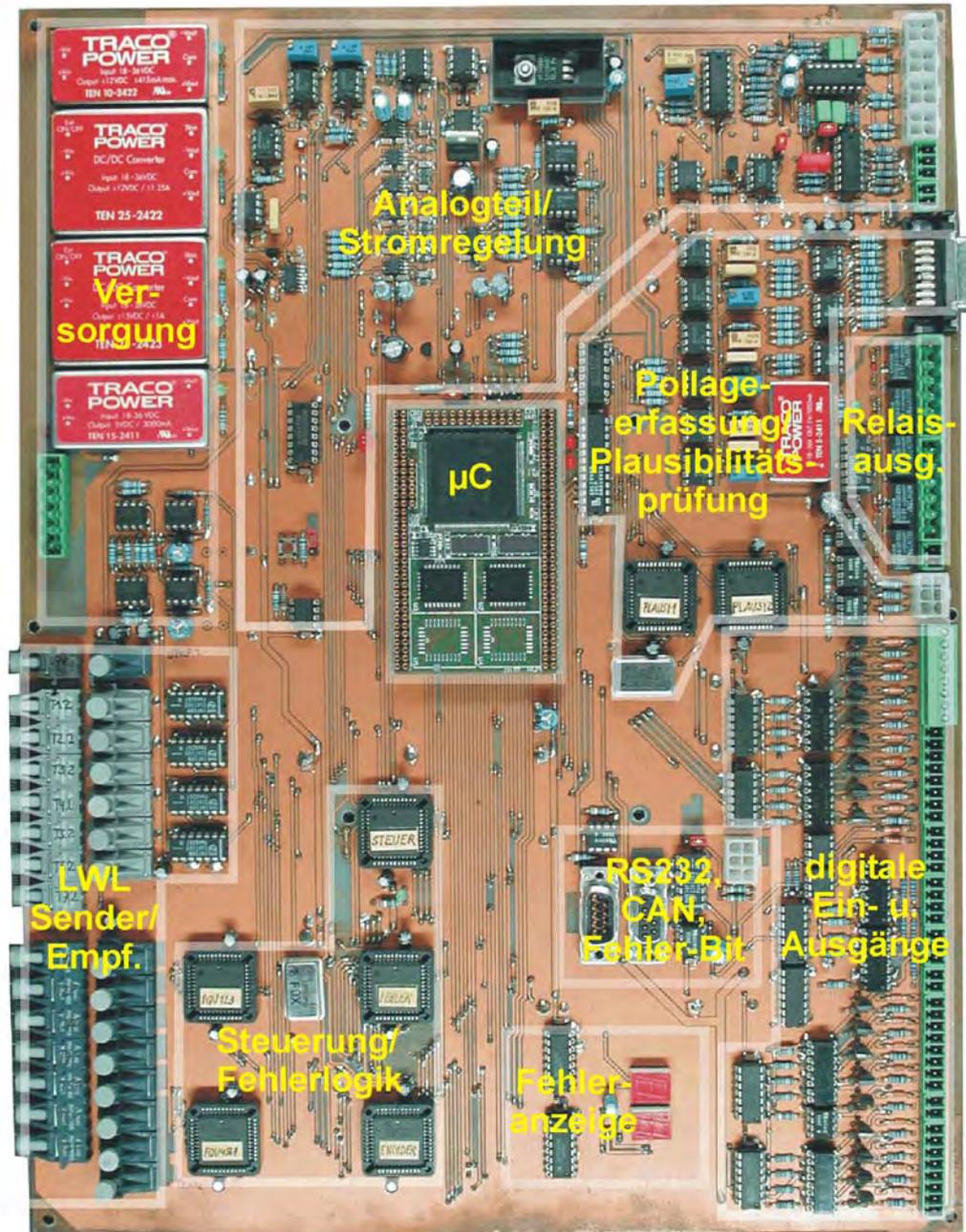


Bild 3: Steuerkarte mit Funktionsblöcken

Alle Signalverbindungen wurden so realisiert, dass bei fehlerhafter Übertragungsstrecke, z. B. durch Kabelbruch, ein sicherer Zustand bzw. ein Fehler erkannt wird. Daher werden einige Signale in negativer Logik übermittelt.

3 EIN- UND AUSGANGSSIGNALE

Über die Taster am Steuerungsschrank erhalten beide Steuerkarten die gleiche Signaleingabe zum Betrieb der Anlage. Hier kann die Freigabe des Reglers zum Hochfahren der Anlage erteilt werden. Nach Erreichen der Mindestdrehzahl des Schwungrings kann über den

entsprechenden Taster vom motorischen auf generatorischen Betrieb umgeschaltet werden, wobei die generatorisch zu erzeugende Leistung über einen Analog-Sollwert vorgegeben wird. Bei Erreichen der unteren Drehzahlgrenze schaltet die Steuerung automatisch wieder auf den motorischen Betrieb um, so dass der Schwungring wieder auf Nenndrehzahl gebracht wird und für den nächsten generatorischen Betrieb bereit steht. Die sofortige Stilllegung der Anlage kann jederzeit durch einen roten Pilztaster eingeleitet werden. Nachdem der Gleichrichter vom Netz getrennt wurde, kann der Zwischenkreis mit dem Entlade-Taster über den Bremssteller entladen werden.

Sollte während des Betriebes ein Fehler eingetreten sein, kann nach dessen Beseitigung die Fehlerlogik mit einem Reset-Taster zurückgesetzt werden. Als Informationen für den Benutzer werden die Ist-Drehzahl, eine optische und akustische Fehlermeldung und ein Fehler-Code über eine Sieben-Segment-Anzeige ausgegeben. Es werden Fehlermeldungen verschiedener Betriebsmittel wie der Kältemaschine, der Vakuum- und Turbomolekularpumpen, der Lageerfassung des Schwungringes sowie der Temperaturerfassung für die Wechselrichter, die Maschinen und die Lager eingelesen. Sollte ein Fehler von einer Steuerkarte erkannt werden, wird über das Fehler-Bit die andere Steuerkarte informiert, so dass diese Steuereinheit die Stillsetzung des Schwungringes gegebenenfalls auch alleine vornehmen kann.

Alle übrigen Eingänge der Steuerung erfassen elektrische Größen des Leistungsteils. Ein auf der Steuerkarte integrierter Mikrocontroller verarbeitet die Eingaben des Bedieners, die Pollagesignale sowie Fehler und liefert Ansteuersignale für die Wechselrichterventile. Bei Bedarf kann das Mikrocontrollerprogramm erweitert werden, so dass weitere von der Karte erfasste Signale und Daten über das bestehende CAN-Interface ausgegeben werden können. Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgt über eine RS232-Schnittstelle.

4 POLLAGEERFASSUNG

Bei den elektrischen Maschinen des Schwungmassenspeichers handelt es sich um geschaltete Reluktanzmaschinen. Jede dreisträngige Teilmaschine wird aus drei Zwei-Quadranten-Stellern gespeist. Sie bestehen jeweils aus zwei IGBTs und zwei Dioden, die in den Diagonalen einer H-Brücke verschaltet sind. Da es sich beim Antrieb im Prinzip um Synchronmaschinen ohne Erregung handelt, ist eine Pollageerfassung auch für den Bremsbetrieb zwingend notwendig. Normalerweise wird die Pollage durch Reflexlichtschranken mit einer hohen Genauigkeit ermittelt. Der Geber hat eine Teilung von eins zu zwei, die das Verhältnis Zahn zu Zahnücke auf dem Rotor widerspiegelt. Für einen Teilmotor sind drei Geber notwendig. Die Gebersignale werden von der Maschinenregelung im Mikrocontroller ausgewertet.

Der Schwungring ist so konstruiert, dass sich der Kohlefaserwickel selbst zerspante, wenn der Schwungring seinen erlaubten Aufenthaltsbereich verließ. Herumfliegende Kohlefasern würden dann die optische Pollageerfassung stören. Deshalb ist zusätzlich zu den Reflex-

lichtschranken ein Notsystem aus drei induktiven Näherungssensoren je Teilmaschine vorgesehen, das zwar nicht so präzise ist wie das Hauptsystem, aber für das Funktionieren der elektrischen (Not-)Bremse ausreicht. Beide Systeme werden permanent mittels Plausibilitätsprüfung überwacht. Diese übernimmt jeweils ein Zustandsautomat in einem CPLD. Ein Prinzipschaltbild der Anordnung zeigt **Bild 4**, die Wirkungsweise der Überwachung erläutert **Bild 5**.

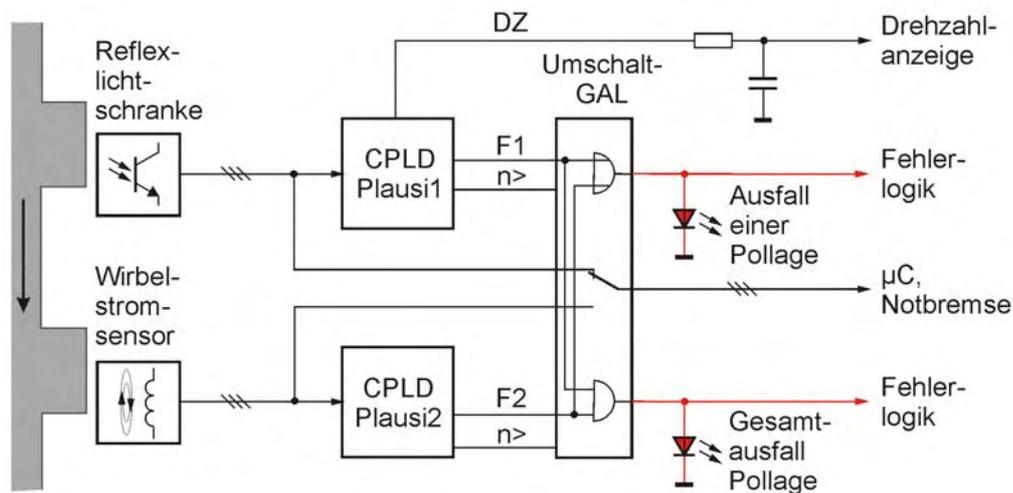


Bild 4: Prinzipschaltbild Plausibilitätsprüfung/Pollage-Logik

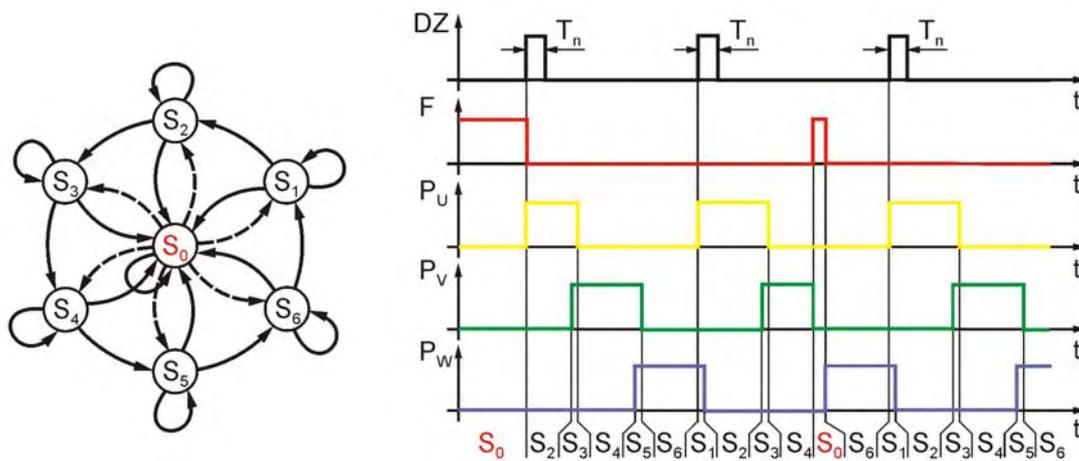


Bild 5: Flussdiagramm Zustandsautomat zur Plausibilitätsprüfung, Signale über der Zeit

Zur Plausibilitätsprüfung werden die Signale aller drei Geber herangezogen. Durch eine gewollte Überlappung der drei Signale im ungestörten Betrieb und die Festlegung auf nur eine Drehrichtung entsteht eine sich stets wiederholende Abfolge von erlaubten digitalen Zuständen $S_{1..6}$ der Gebersignale $P_{U..W}$, z. B. S_2 : $P_U = H$, $P_V = L$, $P_W = L$ oder S_3 : $P_U = H$, $P_V = H$, $P_W = L$ usw. Solange diese Reihenfolge nicht verletzt wird, springt der Zustandsautomat synchron mit dem Rotor von einem Zustand zum nächsten. Tritt eine verbotene oder an dieser Stelle unerwartete Bit-Kombination auf, springt er in den Initialisierungszustand S_0 zurück. Gleichzeitig wird das Fehlerbit F High. Dadurch wird in einem zentralen GAL-

Baustein auf den anderen Pollagegeber umgeschaltet und der Fehlerlogik der Steuerkarte der Ausfall eines Pollagegebers mitgeteilt. Bei Ausfall beider Pollagegeber wird ein schwerer Fehler gemeldet. Zusätzlich erzeugt das erste CPLD mit jeder steigenden Flanke von P_U einen Puls konstanter Dauer auf dem Ausgang DZ. Ein Tiefpassfilter macht aus diesem pulsfolgemodulierten Signal eine analoge Drehzahlinformation. Intern wird DZ mit der Periodendauer von P_U verglichen, um bei Überdrehzahl den Ausgang ">n" zu setzen, was ebenfalls eine Fehlermeldung bewirkt.

5 FEHLERLOGIK

Am Beispiel der Pollageerfassung ist bereits ersichtlich, dass es sehr viele verschiedene Fehlerzustände des Systems geben kann, auf die angemessen zu reagieren die Aufgabe der Fehlerlogik ist. Sie ist komplett in programmierbarer Logik in mehreren CPLD-Bausteinen untergebracht, denen je ein bestimmtes Aufgabengebiet zugeordnet ist. Grundsätzlich wird zwischen leichten und schweren Fehlern unterschieden. Beide führen zur Stillsetzung des Speichers, tritt ein schwerer Fehler auf einer der Steuerkarten auf, obliegt diese Aufgabe allein der anderen Karte.

Anhand eines Worst-Case-Szenarios für Steuerkarte 1 soll die Funktion der in **Bild 6** dargestellten Fehlerlogik veranschaulicht werden: Der Schwungrad dreht sich mit Nenndrehzahl im Leerlauf. Plötzlich liefert eine Reflexlichtschranke des optischen Pollagegebers von Teilmaschine 1 ein gestörtes Signal, z. B. weil jemand ein Kabel abgerissen hat. Die Plausibilitätsprüfung erkennt dies, schaltet unvermittelt auf den induktiven Geber um und meldet einen leichten Fehler an das CPLD "Fehlerbehandlung". Der zum Fehler gehörende 6-Bit-Code wird an die Sieben-Segment-Anzeige und den Mikrocontroller übermittelt, der daraufhin den Speicher herunterzufahren versucht, zudem wird der Steuerkarte 2 mitgeteilt, dass der Speicher heruntergefahren werden soll. Durch einen Softwarefehler bleibt das Mikrocontroller-Programm aber in einer Endlosschleife hängen. Das wiederum bemerkt der Watchdog-Timer und teilt es der Fehlerbehandlung mit. Die veranlasst eine Notbremsung ohne Unterstützung des Controllers durch das CPLD "Steuerung/Notbremse", das ab jetzt die Steuerbefehle des Controllers ignoriert und die IGBTs nach einer einfachen, fest abgelegten Strategie synchron zur noch vorhandenen Pollageerfassung ansteuert. Ungünstigerweise hatte sich zuvor ein Lichtwellenleiter (LWL) zur Ansteuerung eines der IGBTs gelöst. Da aber die Quittungskontrolle jeden Steuerbefehl mit hört, bemerkt sie die fehlende Rückmeldung, die in Form eines Pulses definierter Länge auf dem Fehlermelde-LWL der betroffenen IGBT-Treiberstufe kurz darauf eintreffen müsste. Die Quittungskontrolle meldet einen Kommunikationsfehler an den Encoder für schwere Fehler, der einen 6-Bit-Fehlercode generiert und an die Fehlerbehandlung sendet. Der schwere Fehler überschreibt den leichten auf dem Bus zur Anzeige und zum Controller. Sicherheitshalber wird auch das CPLD "Steuerung" informiert, das sofort alle IGBTs sperrt, damit der defekte Wechselrichter nicht den Stillsetzungsprozess durch den anderen Wechselrichter behindert. Nach erfolgreicher Stillsetzung beginnt die Fehlersuche. Dabei hilft die Anzeige, die nach jedem Reset die Nummer eines der noch anstehenden Fehler zeigt. Nach Behebung aller

