

Ausgewählte Ergebnisse von Messungen des Allianz Zentrum für Technik (AZT) an Anlagen mit unterschiedlichen Rotorlagerungskonzepten. Auszug aus dem bei der VDI-Tagung „Schwingungen von Windenergieanlagen 2011“ in Bremen präsentierten Beitrag.

Dipl. Ing. Th. Gellermann, Allianz Zentrum für Technik, Allianz Risk Consulting GmbH, München
Dr. Ing. F. Wikidal, GearConsult, München

1. Einleitung

Schäden aus dem Bereich der Windenergie werden seit über 15 Jahren intensiv im Allianz Zentrum für Technik (Allianz Risk Consulting GmbH) untersucht. Ein Schwerpunkt der Schadenuntersuchung betrifft den mechanischen Triebstrang mit Getriebe und Generator [1, 2]. Um weiterführende Erkenntnisse zu den Schadenmechanismen zu gewinnen, wurde vor etwa 10 Jahren mit Messungen des Betriebsverhaltens und der Triebstrangbelastungen begonnen [3]. Seitdem wurden umfangreiche Messreihen an verschiedenen Anlagen zwischen 600 kW und 5 MW durchgeführt. Die daraus erhaltenen Einblicke trugen wesentlich zum Verständnis von Schadenmechanismen bei. Bei den Prototypvermessungen, die vom Allianz Zentrum für Technik für Hersteller durchgeführt werden, stehen die Analyse und Bewertung der Bauteilbelastungen und des dynamischen Betriebsverhaltens im Fokus.

2. Unterschiedliche Rotorlagerungs- und Triebstrangkonzeppte

In den letzten Jahren wurden mit dem starken Leistungswachstum der Anlagen verschiedene neue Triebstrangkonzeppte entwickelt, die auf eine Gewichts- oder Belastungsreduzierung abzielen. Teilweise wurde gleichzeitig eine Verringerung der Komponentenzahl angestrebt. Dies gilt auch für die vermehrt auf den Markt kommenden direktantriebenen Anlagentypen (getriebe-los).

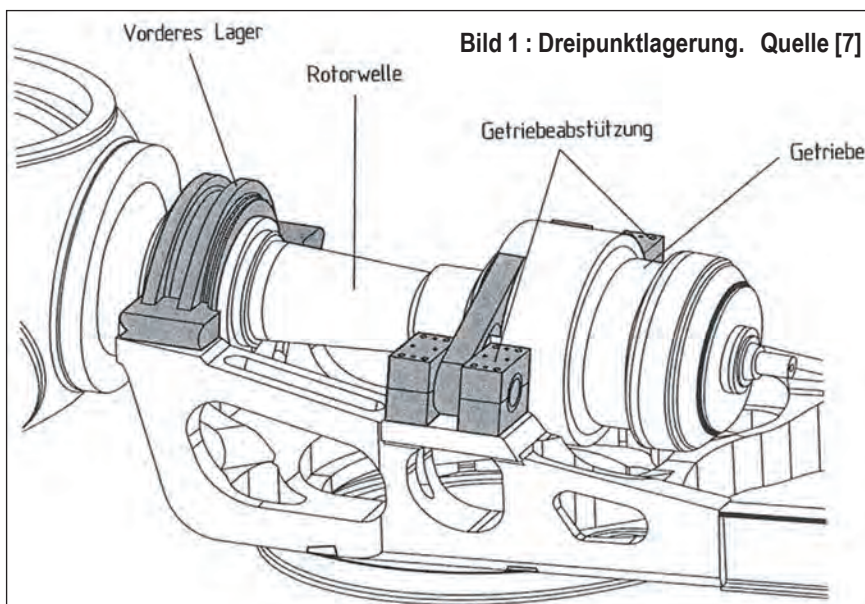
Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen konzentrieren sich auf Getriebeanlagen. Auch bei diesen wird versucht, die Komponentenzahl durch Übergang von modularen zu kompakten Antriebssträngen zu verringern. Als parallele Entwicklung kommen unterschiedliche Arten der Rotorlagerung zum Einsatz (vgl. [4]). Sie lassen sich im Wesentlichen einteilen, nach einer separaten Rotorlagerung mit einem oder zwei Hauptlagern (Bild 3), einer Dreipunkt-lagerung des Rotors (Bild 1) und einer vollständig ins Getriebe integrierte Rotor-lagerung. Die Art der Rotorlagerung bee-

Abstract :

Investigation into the dynamic behaviour of drive trains in wind energy converters

Since air flow over the rotor blades is irregular due to gusts, turbulence and inclined flow, wind energy converters are subject to highly dynamic loads. The design of the drive train significantly influences how loads affect individual components. Wind energy converter control and regulation also has an impact on strain. A targeted, comprehensive investigation of the operational behaviour and loads on drive train components is thus highly significant for prototype validation.

This paper focuses on loads affecting the gear box. Exemplary, results of measurements at drive trains with 3-point rotor suspension are presented. The results of the investigation into the 5 MW wind energy converter BARD 5.0 serve as another example. Here we were able to demonstrate that the specific drive train design resulted in a low bending moment dynamic at the transmission input shaft.



influsst neben dem Gesamtgewicht der Anlage (z.B. durch Einsparung der Rotorwelle) auch die Getriebebelastungen, insbesondere bezüglich der Einleitung von Querkräften.

3. Dynamische Anregung durch den Rotor

Bei Windenergieanlagen resultieren große Querkräfte aus den in der Rotorfläche lokal unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten infolge von Böen, Turbulenz und Windscherung. Die Wirkung einer ungleichmäßigen Anströmung wird durch die Größe der überstrichenen Rotorfläche anschaulich, die z.B. bei einer 3 MW-Anlage mit 90 m Rortordurchmesser etwa der Fläche eines Fußballfeldes entspricht. Zudem treten

gemäß den Untersuchungen des Forschungszentrums ForWind [5, 6] kurzzeitige, starke Windgeschwindigkeit-sänderungen deutlich häufiger auf als durch bislang gebräuchliche Standard Windfeldmodelle vorgegeben. In den nachfolgenden Abschnitten wird die Querkrafteinwirkung vom Rotor auf das Getriebe exemplarisch bei zwei verschiedenen Rotorlagerungskonzepten betrachtet.

4. Dreipunkt-lagerung

Bei Windenergieanlagen mit Getriebe bis etwa 2,5 MW stellt die Dreipunkt-lagerung des Rotors ein weit verbreitetes Triebstrangkonzeppte dar. Die drei Auflagerpunkte (Bild 1) bilden das Hauptlager und die beiden seitlich am Getriebe angeord-

neten Drehmomentstützen. Bei diesem Lagerungskonzept stützen sich die Biegemomente über den Planetenträger auf dem Getriebe ab. Dabei werden Querkräfte in die erste Planetenstufe des Getriebes eingeleitet, was sowohl die Breitenlastverteilung in den Zahneingriffen, als auch die Lastaufteilung auf die einzelnen Planeten und deren Lagerung beeinflusst.

Die an entsprechenden Anlagen durchgeführten Messungen der axialen und radialen Relativbewegungen zwischen Rotorwelle und Getriebegehäuse zeigen hochdynamische Auslenkungen der Rotorwelle, die über weite Teile des Messzeitraums vorhanden sind. In Bild 2 ist ein Beispiel der gemessenen Bewegungsbahnen der Rotorwelle relativ zum Getriebegehäuse stark vergrößert dargestellt.

Ihren Ursprung hat die Dynamik in der ungleichmäßigen Anströmung des Rotors. Diese führt an der Rotorwelle zu Biegemomenten, die ein Mehrfaches des Biegemoments aus dem Rotorgewicht erreichen (Beispiel eines Biegemomentverlaufs enthält der Gesamtbeitrag). Insgesamt ist festzustellen, dass die in die erste Planetenstufe eingeleiteten großen Auslenkungen hohe lokale Beanspruchungen bewirken und ein vorzeitiges Versagen von Verzahnungen und Lager erklären können. Die ebenfalls vorgefundene ausgeprägte axiale Dynamik der Rotorwelle ist durch das relativ große Axialspiel des als Pendelrollenlager ausgeführten Hauptlagers zu erklären. Bauart bedingt liegt das Verhältnis zwischen axialer zu radialer Betriebslast bei diesen Lagern meist im Bereich 5 bis 8 (vgl. [8, 9]). Die auftretenden, dynamischen Verschiebungen stellen daher auch für das Hauptlager hohe Zusatzlasten dar.

5. Triebstrang mit separatem Rotorlager

Bei Multi-Megawatt Anlagen mit separat gelagertem Rotor kommen heute sowohl Konzepte mit zwei Hauptlagern, z.B. Repower 5M, als auch mit einem Hauptlager zum Einsatz. Letzteres wird auch als Momentenlager bezeichnet. Es handelt sich in der Regel um ein großes doppelreihiges Kegelrollenlager mit Durchmessern von teilweise größer 3 m, das die Radial- und Axiallasten und die Kippmomente aus dem Rotor aufnimmt. Ein Beispiel für die Anwendung eines solchen Momentenlagers stellt die 5 MW-Anlage BARD 5.0 dar (Bild 3).

An dem ersten Prototyp dieser Anlage führte das AZT im Auftrag von BARD

Emden Energy GmbH & Co. KG eine umfangreiche Betriebsmessung zur Untersuchung der Getriebebelastungen durch. Insgesamt wurden etwa 90 Messsignale über einen Zeitraum von über einem Jahr erfasst und aufgezeichnet. Die Anlage besitzt einen modularen Triebstrang mit 3-stufigem Getriebe (2

Planeten- und eine Stirnradstufe, $i = 96,965$) und doppeltgespeistem Asynchronogenerator (nnenn = 1.212 U/min). Als Getriebeaufleger werden von der ESM Schwingungstechnik Mitsch GmbH konzipierte Elastomerhydraulische Drehmomentstützen verwendet, bei denen die Elastomerelemente mit Flüss-

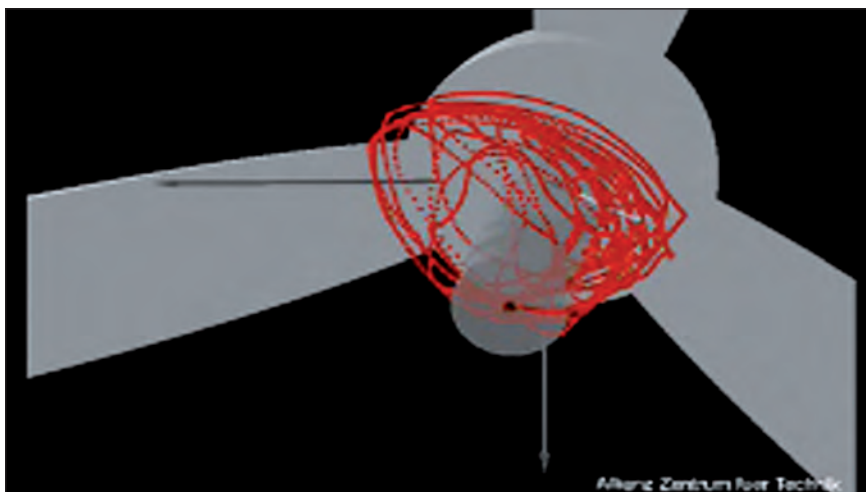
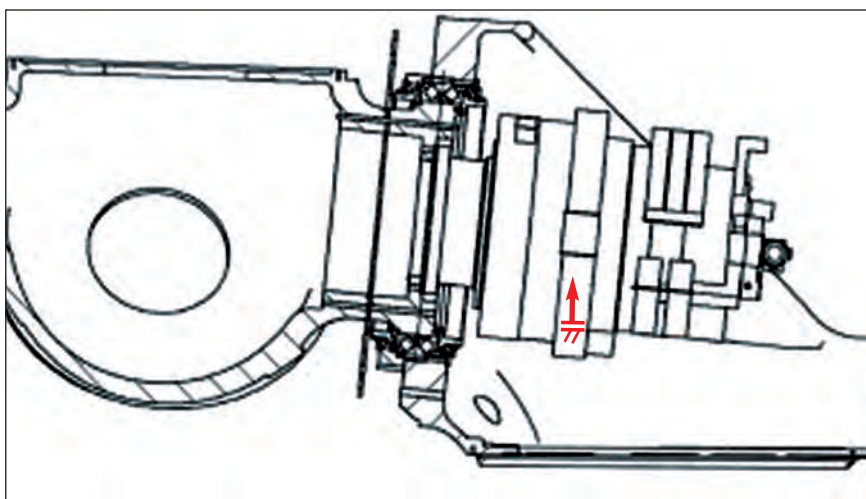


Bild 2 a + b : Gemessene Bewegungsbahn der Rotorwelle relativ zum Getriebegehäuse bei einer Anlage mit Dreipunktlagerung



Bild 3 : Triebstrang der 5 MW-Anlage BARD 5.0 mit einem Hauptlager (Generator nicht dargestellt), Pfeil kennzeichnet Abstützung durch Elastomerhydraulisches Getriebeauflager. Quelle Bard Emden Energy.



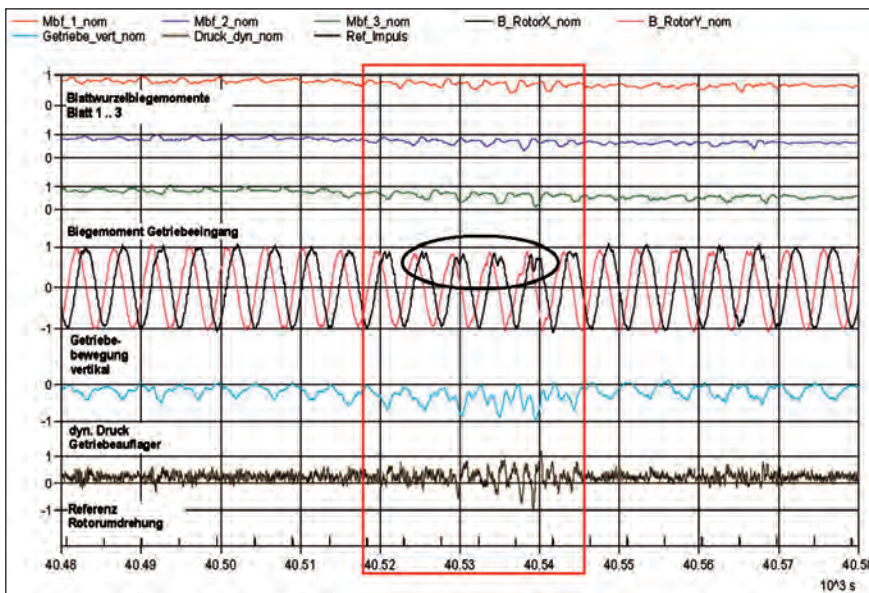


Bild 4: Umlaufbiegung an der Getriebeeingangswelle während erhöhter Querkrafteinleitung vom Rotor [normierte Messgrößen von oben: Blattwurzelbiegemomente in Schlagrichtung, Biegemomente Getriebeeingang, vertikale Getriebebewegung, dyn. Druck Getriebeauflager]

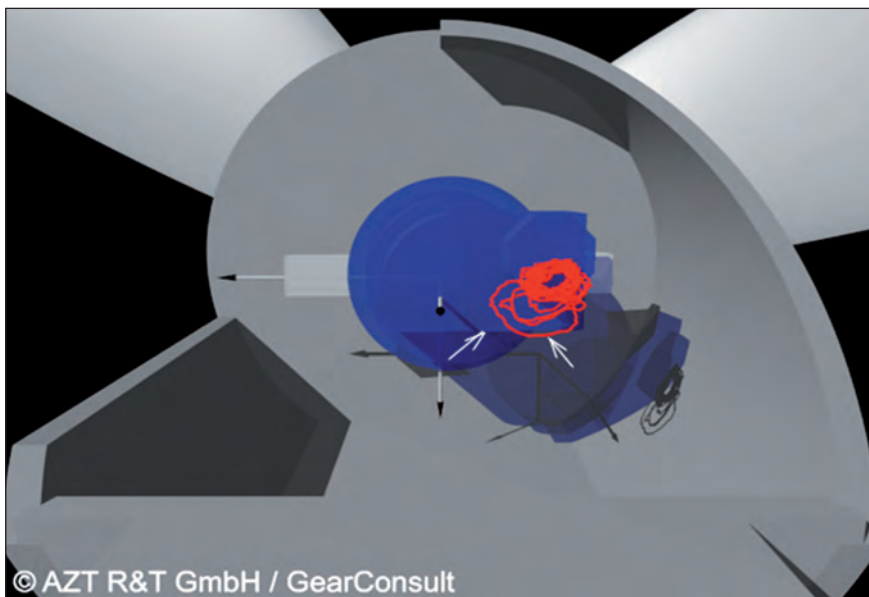


Bild 5: Gemessene Ausweichbewegungen des Getriebes in der Elastomerhydraulischen Drehmomentstütze (markiert durch Pfeile) während des in Bild 4 dargestellten erhöhten Querkrafteintrags vom Rotor

sigkeit gefüllt und mittels Ausgleichsleitungen über Kreuz verbunden sind (vgl. [10]).

Die Drehmomentsstützen besitzen durch den möglichen Flüssigkeitsaustausch zwischen Ober- und Unterseite eine niedrige translatorische Steifigkeit bei gleichzeitig hoher Torsionssteifigkeit zur Abstützung des Drehmoments. Die niedrige translatorische Steifigkeit soll vertikale Getriebeverschiebungen ermöglichen, um Zwangskräfte aus Bauteilverformungen, die trotz der hohen Steifigkeiten des Maschinenträgers und Rotorlagers noch auftreten können, zu

minimieren.

Die durchgeführte messtechnische Untersuchung bestätigte die geringe Einwirkung von äußeren Kippmomenten auf die Getriebeeingangswelle. Der sinusförmige Amplitudenverlauf der zwei auf der Welle um 90° versetzt angeordneten Biegemomentmessstellen repräsentiert die Umlaufbiegebelastung durch den vom Hauptlager übernommenen Traganteil des Getriebegewichts. Eine für den Messzeitraum von über einem Jahr markante Abweichung im sinusförmigen Biegemomentverlauf äußert sich in den in Bild 4 dargestellten 21 Rotorumdrehungen. Im mittleren Diagrammteil ist

die Beeinflussung des durch die Umlaufbiegung geprägten, sinusförmigen Biegemomentenverlaufs erkennbar.

In diesem Zeitraum nehmen auch die Getriebebewegungen in den Drehmomentstützen zu. In den vertikalen Getriebebewegungen bildet sich ein deutlich erkennbarer 3X-Anteil (dreimal pro Rotorumdrehung) aus. Dies weist auf die Einleitung von größeren Biegemomenten vom Rotor hin. Der Verlauf der Blattwurzelbiegemomente (obere Kurvengruppe in Bild 4) bestätigt die Anregung aus dem Rotor. Die Biegemomente in Schlagrichtung zeigen bei den 3 Rotorblättern phasenversetzt auftretende Amplitudenschwankungen, die auf lokal stark unterschiedliche Windgeschwindigkeiten hindeuten. Die bei dieser Anlage hinter dem Momentenlager erfasste Einwirkung auf die Biegemomente ist im Vergleich zu den bei dreipunktgelagerten Rotoren gemessenen starken Biegemomentüberhöhungen allerdings als gering zu beurteilen.

Der dynamische Druckverlauf und der Verlauf der vertikalen Getriebebewegungen zeigen die Reaktionen der elastomerhydraulischen Getriebe Lagerung auf die vom Rotor eingeleiteten Querkräfte. Dabei verringern die Ausweichbewegungen des Getriebes die Zwangskräfte auf die Antriebsstufe. Neben den vertikalen treten auch horizontale Getriebebewegungen auf. In Bild 5 sind die radialen Getriebebewegungen in starker Vergrößerung als kinetische Bahn der Abtriebswelle dargestellt.

Von den Amplituden der Getriebebewegungen lassen sich die (verbleibenden) auf das Getriebe übertragenen Querkräfte ermitteln. Die rechnerische Abschätzung ergibt, dass diese gegenüber den bei Nennmoment in der Planetenstufe wirksamen Verzahnungs- und Lagerkräfte vernachlässigbar klein sind. Dies bestätigen auch die im Getriebegehäuse gemessenen radialen und axialen Relativbewegungen des Planetenträgers, die während des dargestellten erhöhten Biegemomenteneintrags des Rotors keine Änderungen zeigen.

Zusätzlich zu den Relativbewegungen der Verzahnungen wurden auch die Zahnfußdehnungen der Hohlräder beider Planetenstufen gemessen. Die daraus ermittelte Verteilung der Zahnfußspannung zeigte für beide Stufen unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen des Programms RIKOR der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.. Damit

liefern derartige Messungen am Prüfstand und insbesondere während der Betriebsphase des Prototyps eine Grundlage, auf der die Flankenkorrekturen der Verzahnungen beurteilt und weiter optimiert werden können.

6. Schlussfolgerungen

Aus der ungleichmäßigen Anströmung des Rotors infolge Böen, Turbulenz und Windscherung resultieren hohe dynamische Lasten und Querkräfte auf den Triebstrang. Die Übertragung der äußeren Querkräfte auf das Getriebe kann durch die Art der Rotorlagerung beeinflusst werden. Bei der Dreipunktlagerung des Rotors werden die Biegemomente der Rotorwelle auf das Planetenträgerlager der ersten Getriebestufe übertragen. Vom Rotor eingeleitete Biegemomente können sich daher negativ auf die Lastverteilung in der Planetenstufe auswirken.

Eine separate Rotorlagerung, bei der die vom Rotor eingeleiteten Biegemomente über zwei oder ein Hauptlager auf einen möglichst steifen Maschinenträger übertragen werden, bietet Abhilfe, um die äußeren Zwangskräfte auf die Getriebeverzahnung zu verringern. Die Untersuchung der 5 MW-Anlage BARD 5.0 hat gezeigt, dass durch die Kombination der separaten Rotorlagerung mit dem elastomerhydraulischen Getriebeauflager

äußere Zwangskräfte auf die Getriebeeingangsstufe wirkungsvoll vermindert werden.

7. Literatur

- [1] E. Bauer: Windenergieanlagen – Schadenbetrachtungen, Allianz Report Heft 2/ 2001.
- [2] E. Bauer, F. Wikidal, T. Gellermann: Überblick über Schäden am mechanischen Strang von Windenergieanlagen, Tagungsband ATK 2005.
- [3] T. Gellermann: Messtechnische Erfassung von Belastungen des mechanischen Strangs von Windenergieanlagen, Allianz Report Heft 1/ 2002.
- [4] A. Weidmann, M. Rettinger: Multi MW wind turbines – Main Rotor Bearing designs and field experience, Tagungsband ATK 2005.
- [5] J. Peinke et al.: Turbulence a Challenging Issue for the Wind Energy Conversion, EWEC 2008.
- [6] T. Mücke, D. Kleinhans, J. Peinke: Atmospheric turbulence and its influence on the alternating loads on wind turbines, Wind Energy, n/a. doi: 10.1002/we.422.
- [7] E. Hau: Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. Springer Verlag, 3. Auflage 2003.
- [8] R. Wagner: Kleine Ursache mit großer Wirkung – Rotorlagerung einer Windturbine mit Dreipunktlagerung, Antriebstechnik Heft 9/ 2006.

[9] D. Neumann: Neue Lagerkonfiguration für Windturbinen-Rotorwellen, Wind-Kraft Journal Heft 1/ 2010.

[10] F. Mitsch: Elastomerhydraulik: Reduzierung der durch Nick- und Gierschwingungen des Rotors erzeugten Zwangskräfte im Triebstrang von Windenergieanlagen, Wind-Kraft Journal Heft 3/ 2010.

Kontakt und vollständiger Beitrag (Deutsch/ Englisch) zur VDI-Tagung „Schwingungen von Windenergieanlagen 2011“ über:

Thomas Gellermann
thomas.gellermann@allianz.com

Allianz Risk Consulting GmbH
– Allianz Zentrum für Technik –
Fritz-Schäffer-Str. 9
81737 München
<http://www.allianz-azt.de/de>

Die nächste VDI-Tagung
"Schwingungen von
Windenergieanlagen 2012"
findet am 07. und 08.02.2012
in Bremen statt.
Informationen zur Veranstaltung und
zur möglichen Beitragseinreichung
finden Sie unter
www.windenergie-tagung.de.

Neues Onlineportal
für Gebrauchtanlagen
von der Deutschen Windtechnik



www.zopf-service.de

ZOPF Energieanlagen GmbH, Liviastraße 4, 04105 Leipzig
Tel. 0341 98073-63 Fax 98073-53, E-Mail: leipzig@zopf-service.de

ZOPF
GmbH
ENERGIEANLAGEN



Instandsetzung von
Elektro- und Elektronikkomponenten

SEG / Alstom / u.a. - IGBT, SkiiP Packs, V-RCC, CT's und viele andere Steuerungsplatinen

