

Simulation von Dampfturbinen
in der Energieversorgung

1000 MW im Prüflabor

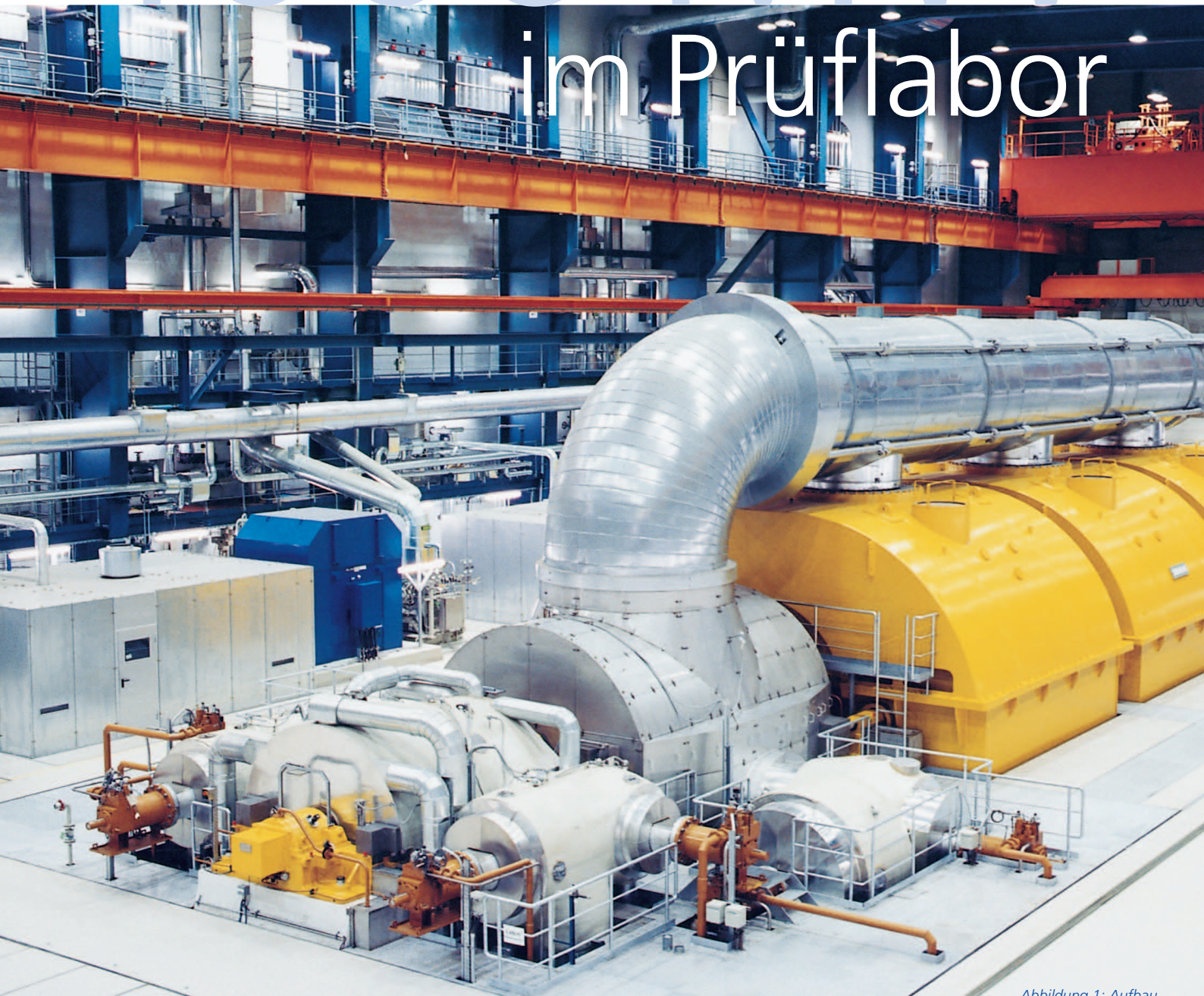


Abbildung 1: Aufbau
eines Dampfturbosatzes.



Abbildung 2: Rotor einer Dampfturbine.

Moderne digitale Leittechniksysteme für Dampfturbinen zur Energieerzeugung verfügen über sehr komplexe Regelfunktionen. Eine Prüfung der Funktionalität der Turbinenregelung während der Inbetriebnahme ist zeit- und kostenintensiv, so dass sich der frühe Einsatz eines Simulators im Prüffeld anbietet. Der Simulator weist außerdem den Vorteil auf, ohne Risiko für die Anlage kritische Zustände zu prüfen und über standardisierte Tests nicht auszuschließende Fehler frühzeitig erkennen und beheben zu können; ein wichtiger Aspekt bei der Sicherung hoher Qualitätsstandards.

Moderne Dampfturbinen für höchste Wirkungsgrade

Über zwei Drittel der elektrischen Energie werden in Deutschland durch Dampfturbinen, die einen Generator antreiben, bereitgestellt. Weltweit sieht die Situation ähnlich aus, und laut Prognosen werden Dampfturbinen auch in Zukunft maßgeblich an der Stromerzeugung beteiligt sein. Dabei kommt der Effizienz neben der Zuverlässigkeit für maximale Wirtschaftlichkeit und größtmögliche Klimaverträglichkeit besondere Bedeutung zu. Mit über 100 Jahren Erfahrung fertigt Siemens Dampfturbinen von 45 kW bis hin zu 1.900 MW elektrischer Leistung. Mit Dampftem-

peraturen von bis zu 600 °C bei einem Druck von ca. 275 bar können heute Wirkungsgrade von über 48 % in der Stromerzeugung erreicht werden. Über eine Wärmeauskopplung lässt sich der Brennstoff noch effizienter ausnutzen. In Kombination mit einer Gasturbine können sogar Wirkungsgrade von über 60 % in der Stromerzeugung erzielt werden – ein Wert, der noch vor wenigen Jahren als unerreichbar galt.

Leittechnik für steigende Anforderungen

Für einen zuverlässigen Betrieb ist ein modernes Leittechniksystem erforderlich, das auf die jeweilige Anlage

angepasst wird. Die Komplexität der Funktionen hat dabei ständig zugenommen: Mehr als 500 Seiten Software-Funktionspläne sind nicht außergewöhnlich. Auch die ehrgeizigen Ziele insbesondere in Deutschland – Stichwort Energiewende – stellen hohe Anforderungen an den Betrieb im elektrischen Verbundnetz. Die steigende, schwankende Einspeisung aus regenerativen Quellen passt nur selten zum Bedarf der Verbraucher. Da es an geeigneten Speichern für elektrischen Strom unverändert mangelt, müssen Kraftwerke ihre Leistung der Nachfrage schnell anpassen können. Dazu bedarf es einer Leittechnik, die diese Anforderungen mit den verfahren-



Abbildung 3: Mit dem Leittechniksystem T3000® der Siemens AG werden große Dampfturbinenkraftwerke automatisiert.

renstechnischen Randbedingungen der Dampfturbine in Einklang bringt. Die Komplexität und die hohen Qualitätsanforderungen lassen sich nur mit geeigneten Simulatoren während der Entwicklung und anlagenspezifischen Projektierung der Leittechnik beherrschen. Eine im Prüffeld bereits optimierte Leittechnik ermöglicht eine verkürzte Inbetriebnahme, verringert Kosten und vermeidet lebensdauerverbrauchende Versuche an der Turbine. Kein Kraftwerksbetreiber würde zudem das Risiko eingehen, ungeprüfte Leittechnikfunktionen an seiner Turbine zu testen.

Simulation eines Dampfturbosatzes

Der Funktionstest der Leittechnik setzt ein geeignetes Modell nicht nur der Dampfturbine, sondern auch

des Generators und des Netzes voraus, um sämtliche Funktionen realitätsnah prüfen zu können. Eine typische Dampfturbine besteht aus einem Hochdruckteil (HD), einem Mitteldruckteil (MD) und einem Niederdruckteil (ND), die eine gemeinsame Welle antreiben. Der im Kessel (Dampferzeuger) erzeugte Dampf strömt über die sogenannten Frischdampf-Ventile (FV) zunächst in den HD-Teil. Anschließend wird er noch einmal überhitzt, bevor er über die Abfangventile (AV) dem MD- und ND-Teil zugeführt wird. Im Kondensator schlägt sich der Dampf nieder und wird als Wasser über die Speisewasserpumpe wieder dem Dampferzeuger zugeführt. Die mechanische Energie der Welle wird vom Generator in elektrische Energie umgesetzt und über einen Transformator in das

Netz gespeist. Das Simulationsmodell muss daher alle Komponenten einschließlich einer vereinfachten Netznachbildung umfassen. Nur so kann der normale Betrieb vom Anfahren der Turbine auf Nenndrehzahl über Synchronisation des Generators mit dem Netz bis hin zur Steigerung der Kraftwerksleistung auf Vollast simuliert werden. Bei Ausfall anderer Kraftwerke ist automatisch das Netz durch eine schnelle Leistungserhöhung der Dampfturbine zu stützen. Bei einer unerwarteten Störung mit Trennung des Kraftwerks vom Netz kommt es zum sogenannten Lastabwurf, der ebenfalls sicher zu beherrschen ist.

Anforderungen an den Echtzeitsimulator

Die Siemens-Ingenieure erstellen für die Simulation der Dampfturbine

„Der dSPACE Simulator zusammen mit den MATLAB/Simulink-Modellen erfüllt alle Anforderungen. Wir können zwischen den verschiedenen Turbinenkonfigurationen einfach wechseln und eine anlagenspezifische Parametrierung laden. Probleme, die sonst erst während der Inbetriebsetzung aufgefallen wären, können wir nun bereits im Prüffeld erkennen und beheben.“

Michael Schütz, Siemens AG

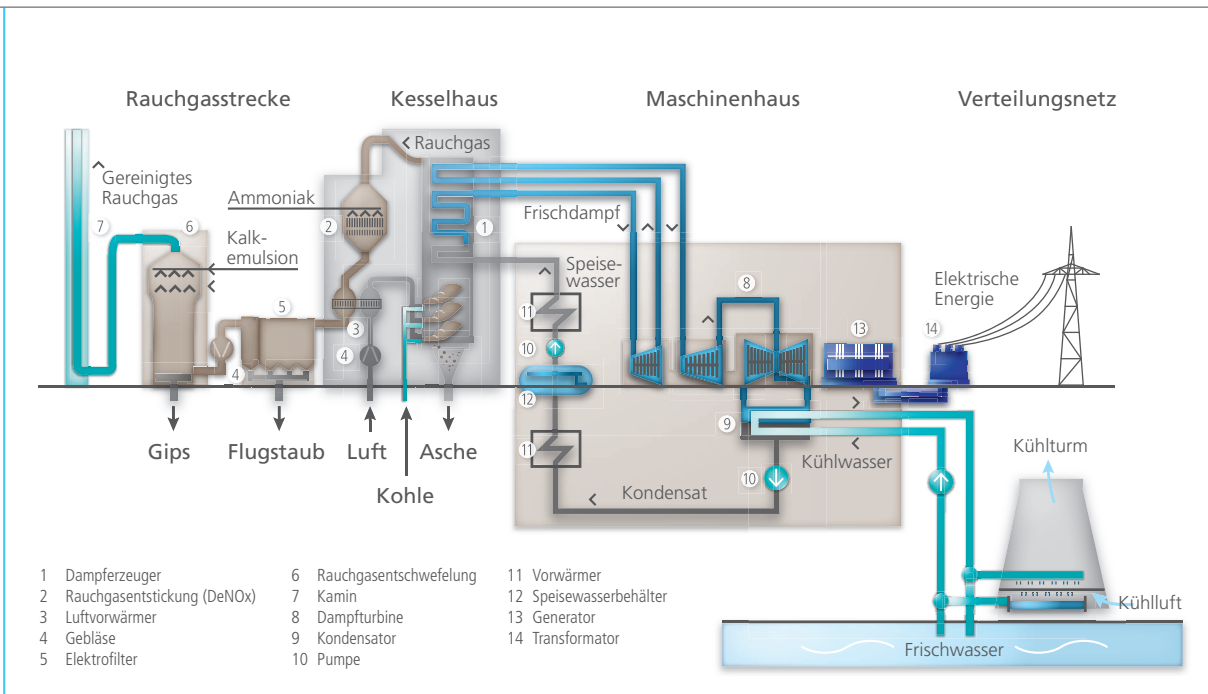


Abbildung 4: Übersicht eines modernen Dampfkraftwerkes.

eine Spezifikation für den Echtzeit-simulator:

- Validierte, modularisierte Modelle aller Siemens-Dampfturbinenkonfigurationen
- Einfache, anlagenspezifische Parametrierung
- Echtzeitfähigkeit bei einer Schrittweite von 1 ms für schnelle Transienten
- Signalkonditionierung zum direkten Anschluss ohne Anpassung an die Leittechnik

- Flexible Änderungsmöglichkeiten
- Komfortable Bedienung und Beobachtung zur Ablaufsteuerung und Dokumentation
- Schnittstelle zu MATLAB®/Simulink®, um Modelle und Simulations- oder Messergebnisse austauschen zu können

Der dSPACE Simulator

Siemens entschied sich für ein flexibles dSPACE System. Mit dem DS1005 PPC Board kann das Modell des Dampf-

turbosatzes mit über 50 Zustandsgrößen bei der geforderten Schrittweite von 1 ms problemlos berechnet werden. Je zwei I/O-Karten mit je 32 analogen Kanälen stellen die zahlreichen analogen Ein- und Ausgangssignale bereit, die zum Anschluss an die Leittechnik benötigt werden. Drei I/O-Karten mit digitalen Kanälen versorgen die binären Signale und Drehzahlimpulse der Turbine. Sämtliche Karten finden in einer dSPACE Expansion Box Platz. Trenn-

Abbildung 5: Für die Prüfung der digitalen Leittechnik werden Signale, wie Drehzahl, Leistung, Frischdampfdruck, Ansteuerungen und Stellungsrückmeldungen der einzelnen Ventile, zwischen Simulator und Leittechnik ausgetauscht.

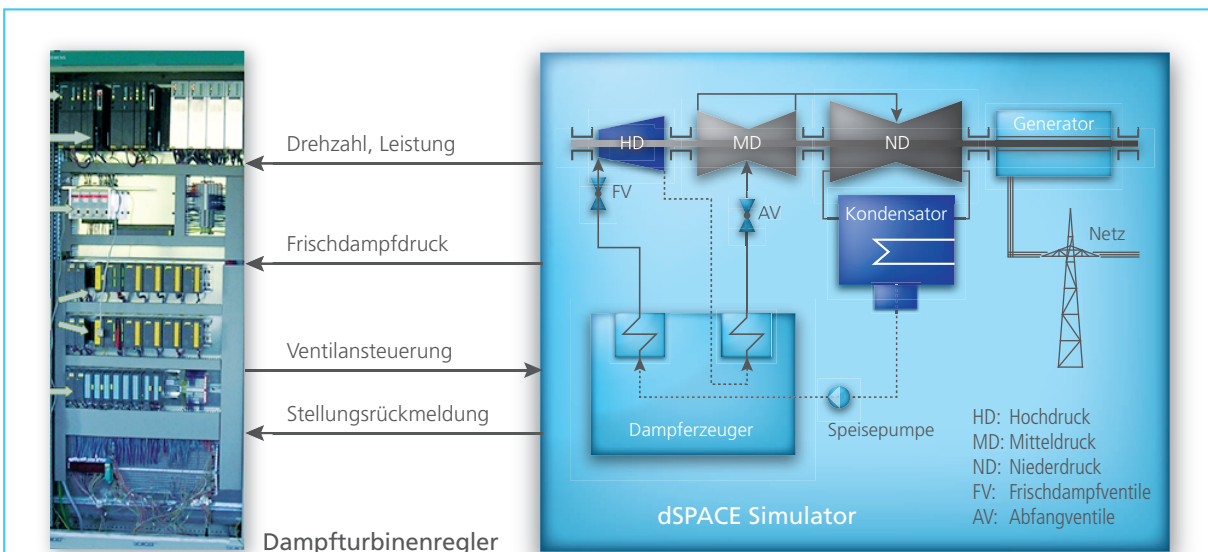




Abbildung 6: Aufbau des Prüffelds samt Simulator im Labor.

verstärker sorgen für eine Potentialtrennung und Anpassung der analogen Signale. Auch die digitalen Signale unterliegen einer Potentialtrennung und Absicherung. Die Verwendung der weit verbreiteten Software MATLAB/Simulink vereinfacht die Zusammenarbeit mit anderen Abteilungen innerhalb der Siemens AG, die sich mit der komplexen Thematik der Dampfturbinenregelung beschäftigen. Auch die Validierung der verwendeten Modelle und Parameter anhand von Messungen an Anlagen gestaltet sich so einfach.

Bedienen und Beobachten

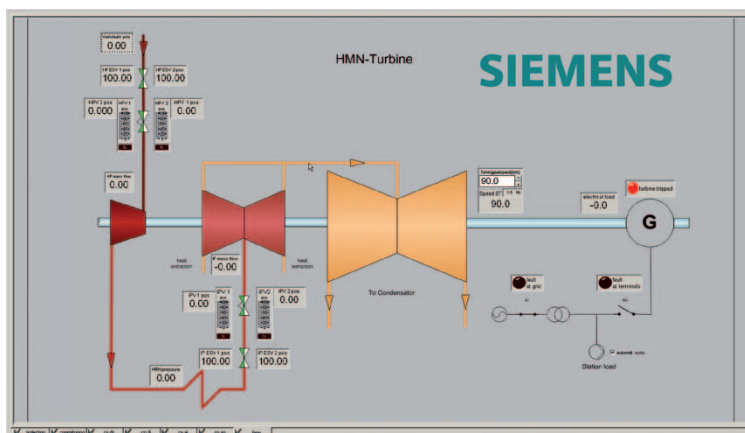
Für jede Anlagenkonfiguration wurde für den Simulator ein eigenes zweisprachiges Bedienbild erstellt, um dem internationalen Kraftwerksgeschäft gerecht zu werden. Mit entsprechenden Schaltern und Vorgaben über die angeschlossene Leittechnik können das Anfahren der Turbine auf Nenndrehzahl, das Synchronisieren des Generators mit dem Netz und der Leistungsbetrieb des Kraftwerks simuliert werden. Zahlreiche weitere Optionen erlauben umfangreiche Prüfmöglichkeiten

sowohl im Normalbetrieb als auch bei Störungen. Sämtliche Signale lassen sich aufzeichnen und analysieren.

Prüfung bestanden

Eine typische Prüfung beginnt zunächst mit dem Hochfahren der Dampfturbine auf Nenndrehzahl von zumeist 3.000 U/min, entsprechend 50 Hz elektrisch. Stimmen Spannung, Drehzahl und Phasenlage, so kann der Generator mit dem Netz verbunden und die Leistung der Turbine bis auf Volllast gesteigert werden.

Abbildung 7: Über das Bedien- und Beobachtbild des Simulators einer Turbine mit HD-, MD- und ND-Teil sowie Ventilen können alle relevanten Größen betrachtet werden.



Martin Bennauer
Martin Bennauer koordinierte die Entwicklung des Simulators und ist verantwortlich für den Dampfturbinenregler bei der Siemens AG in Mülheim an der Ruhr.

Achim Degenhardt
Achim Degenhardt koordinierte die Entwicklung des Simulators bei der Siemens AG in Erlangen.



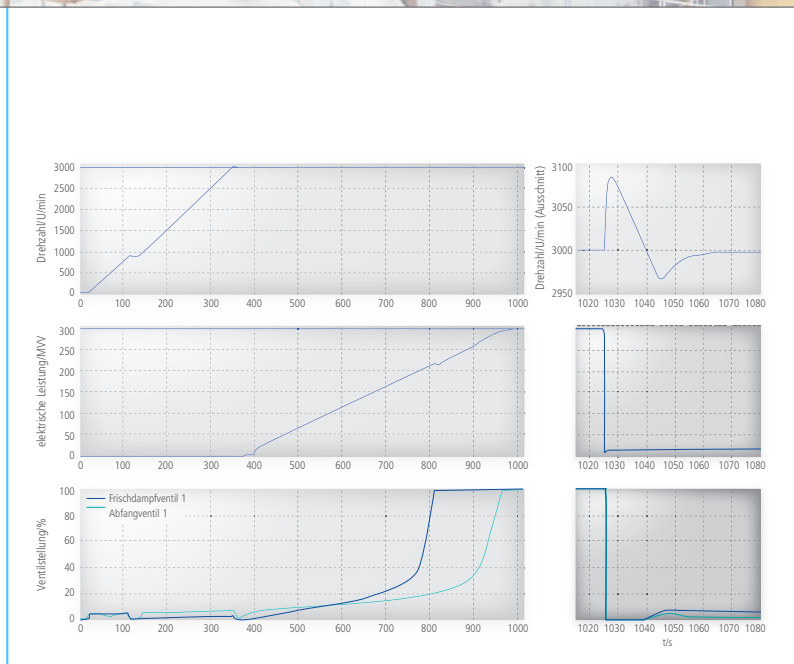


Abbildung 8: Für das Hochfahren der Turbine auf Nenn Drehzahl sind nur geringe Ventilöffnungen erforderlich. Die zunächst geschlossenen Abfangventile öffnen nach den Frischdampfventilen. Nach dem Synchronisieren mit dem Netz wird die Leistung auf Vollast gesteigert (links). Beim Trennen des Kraftwerks vom Netz verringert sich die elektrische Last schlagartig auf den geringen Eigenbedarfswert (rechts). Durch das schnelle Schließen der Ventile steigt die Drehzahl auf den unkritischen Wert von ca. 103 %, bevor sie gut gedämpft einschwingt.

Eine wesentliche Forderung ist das Abfangen des Dampfturbosatzes bei Vollast durch das Trennen vom Netz aufgrund eines Netzfehlers auf den Eigenbedarf des Kraftwerks. Hierbei müssen die Frischdampf- und Abfangventile schnell geschlossen werden, um unzulässige Drehzahlüberhöhungen zu vermeiden. Die in den Turbinen enthaltene Dampfmenge lässt die Drehzahl

zunächst ansteigen. Gleichzeitig soll der elektrische Eigenbedarf des Kraftwerks weiterhin versorgt werden. Dies setzt ein sicheres Einhalten des zulässigen Drehzahlbereiches voraus. Stiege die Drehzahl durch ein zu spätes Ventilschließen unzulässig an, würden Schutzsysteme eingreifen, um eine Gefährdung des Turbosatzes auszuschließen. Dann würde jedoch die Anlage abfahren

und könnte ihren Eigenbedarf nicht mehr selbst versorgen. ■

Martin Bennauer
Achim Degenhardt
Dr. Rüdiger Kutzner
Patrick Müller
Christoph Schindler
Michael Schütz
Dr. Andree Wenzel

Dr. Rüdiger Kutzner
Dr. Rüdiger Kutzner ist Professor für Regelungstechnik an der Fakultät I – Elektro- und Informationstechnik der Hochschule Hannover.

Patrick Müller
Patrick Müller ist verantwortlich für die Durchführung der Reglerfunktionstests bei der Siemens AG in Erlangen.

Christoph Schindler
Christoph Schindler ist verantwortlich für die Modellierung der Dampfturbine bei der Siemens AG in Mülheim an der Ruhr.

Michael Schütz
Michael Schütz ist verantwortlich für die Automatisierung der Dampfturbinen-Reglerleittechnik bei der Siemens AG in Erlangen.

Dr. Andree Wenzel
Dr. Andree Wenzel war Teamleiter für Echtzeitsimulation von Dampfturbinen und Generatoren bei der Siemens AG in Erlangen. Seit dem 1. Februar ist er Professor für Elektrische Energieanlagen an der Hochschule Hannover.

