

**Prof. Dr.-Ing. R.-G. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. B. Lammen
cand.-ing. T. Hoffmann, Dipl.-Ing. C. Wächter**

Echtzeitsimulation einer Kleingasturbine

(2001-2003)

Kooperationspartner: **Diehl Avionik Systeme GmbH, Überlingen
Labor für Regelungstechnik (Prof. Lammen)**

Finanzierung: **AGIP**

Die Verstromung von Abfallgasen (Deponiegas, Grubengas, Klärgas, Prozessgase, ...) und Rückstandsölen, die naturgemäß nur in kleineren Mengen anfallen, erfordert eine verbrauchernahe, dezentrale Aufstellung kleiner Stromerzeugungsanlagen. Das *Erneuerbare-Energien-Gesetz* (EEG) lässt hier eine deutliche Marktbelebung erwarten. Kleingasturbinen sind aufgrund ihrer hohen Brennstoffflexibilität und schadstoffarmen Verbrennung dafür besonders geeignet. Außerdem begünstigt eine dezentrale verbrauchernahe Aufstellung die Kraft-Wärme-Kopplung.

Eine Notstromversorgung bzw. ein Pumpenantrieb auf der Basis von Kleingasturbinen ist bei kleinen Abmessungen und geringem Gewicht und ohne besondere Ansprüche an die Infrastruktur sehr flexibel einsetzbar.

Kleingasturbinen übernehmen die Energieversorgung in Verkehrsflugzeugen bei abgeschalteten Haupttriebwerken.

Kleingasturbinen eignen sich aufgrund ihrer hohen Prozesstemperaturen für die Abwärmenutzung bei Hochtemperaturbrennstoffzellen in mobilen und stationären Anlagen.

Besonders der Einsatz in der Stromerzeugung stellt hohe Anforderungen an die Frequenzstabilität. Die bisher eingesetzten hydromechanischen Regler bei Kleingasturbinen sind langsam, mit geringer Genauigkeit behaftet, unflexibel und erlauben nur primitive Regelgesetze. Auch analoge Regler weisen eine geringe Flexibilität und begrenzte Komplexität der Regelgesetze auf.

Die digitale Regelung vermeidet diese Nachteile. Die hohe Flexibilität bei der Programmierung der Regelgesetze ermöglicht eine schnelle und perfekte Anpassung an die Umgebungsluftbedingungen, die Last und die Brennstoffart. Damit ist jederzeit ein effizienter und umweltfreundlicher Betrieb bei hoher Lebensdauer gewährleistet. Mit optimierten Regelgesetzen wird ein zuverlässiger und auch bei variabler Last drehzahlgenauer Betrieb realisiert. Das ist wichtig für einen Inselbetrieb von Stromerzeugungsanlagen. Die Integration der Steuerungsalgorithmen für das Anfahren und Abfahren sowie der Funktionen der Sicherheitsüberwachung in den Regler lässt einen vollautomatischen Betrieb der Anlage zu.

Die Auslegung und Optimierung der digitalen Regelung konnte wegen der enormen Betriebskosten (Brennstoff, Verschleiß) und aus Sicherheitsgründen (Überdrehzahl, Übertemperaturen) nicht am Prüfstand erfolgen. Aus Messdaten und physikalischen Überlegungen wurde ein Modell der laboreigenen Kleingasturbine entwickelt und in einer Offline-Simulation mit Matlab/Simulink überprüft. Dieses Modell wurde anschließend in einen digitalen Echtzeitsimulator (Digitaler Signal Prozessor DSP implementiert, der zusammen mit dem Steuergerät (Versatile Electronic Control Box VECB), den entsprechenden Schnittstellen (A/D-Wandler, D/A-Wandler, u. a.) und einer Signalanpassung den Hardware-in-the-Loop Prüfstand bildet. Damit wurden die Regelalgorithmen dieser Kleingasturbine optimiert und im Steuergerät programmiert. Die Verifikation der Echtzeitsimulation erfolgte mit Messdaten von Prüfstandsversuchen, wobei der VECB die volle Regelautorität über die Gasturbine erteilt wurde.

Die Echtzeitsimulation wurde anschließend genutzt, um das dynamische Verhalten der Gasturbine bei geänderten Umgebungsbedingungen und Lastarten vorherzusagen und

einen etwaigen Bedarf für eine Adaption der Regelalgorithmen zu erkennen und auszutesten.

Bei dem entwickelten Simulationsmodell handelt es sich um eine iterative Leistungssyntheserechnung. Andere ebenfalls betrachtete Simulationsverfahren erwiesen sich als rechenzeitintensiver ohne eine signifikante Verbesserung der Modellgüte. Für die getrennt berechneten Gasturbinenkomponenten (Ansaugsystem, Verdichter, Brennkammer, Turbine und Düse bzw. Diffusor) berechnet der Algorithmus iterativ die Betriebspunkte unter Berücksichtigung folgender Bedingungen:

- die Drehzahlen des Verdichters und der Turbine sind gleich
- die Massenströme aller Komponenten sind identisch (unter Berücksichtigung des Brennstoffmassenstromes)
- der statische Druck am Austritt der Düse bzw. des Diffusors entspricht dem Umgebungsdruck
- die Summe aller an der Gasturbinenwelle angreifenden Momente (einschließlich des Beschleunigungsmomentes) ist null.

Die tatsächlichen Eingangsgrößen für das Modell sind daher nur der Umgebungszustand (Druck, Dichte und Luftfeuchtigkeit) und der Brennstoffmassenstrom.

Das Komponentenverhalten ist bestimmt von Querschnittsänderungen, die Zustandsänderungen hervorrufen (also von der Gasturbinengeometrie), von diversen Verlustkorrelationen für die Strömungsverluste und von Wärmeaustauschvorgängen mit den Bauteilen. Dabei gilt immer das Prinzip der Massen- und Energieerhaltung. Die Temperaturerhöhung in der Brennkammer wird ausschließlich aus dem Gleichgewicht von zugeführter (Brennstoffenergie, Gasenthalpie, Wärmeenergie aus den Bauteilen) und abfließender Energie (Gasenthalpie, Wärmeverlust an die Bauteile) ermittelt.

Das so aufgebaute Modell bietet eine zufriedenstellende Genauigkeit und ist echtzeitfähig.

Das Echtzeitsimulationsmodell dient dem Projektpartner - einem Hersteller von Triebwerkssteuergeräten - zur Optimierung seiner Reglerentwürfe für Hilfstriebwerke (Auxiliary Power Units) in Flugzeugen und eventuell zur Erschließung neuer Anwendungsfelder für seine Regler bei stationären Kleingasturbinen.

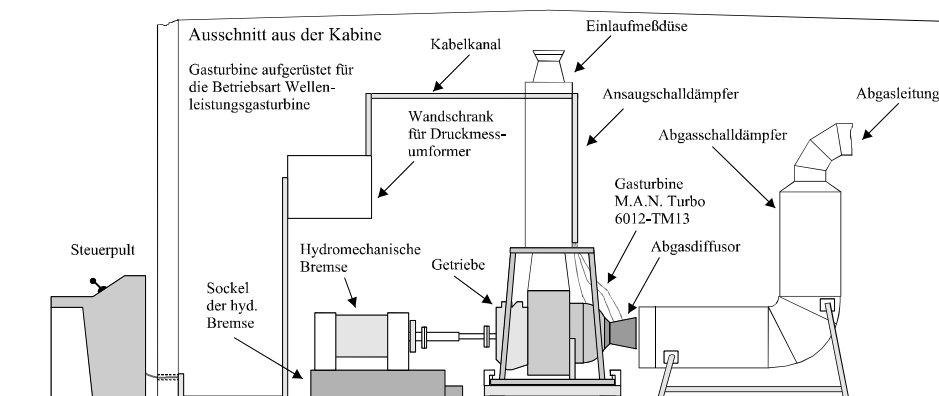


Bild 1: Gasturbinenprüfstand des Labors für Strömungslehre und Strömungsmaschinen

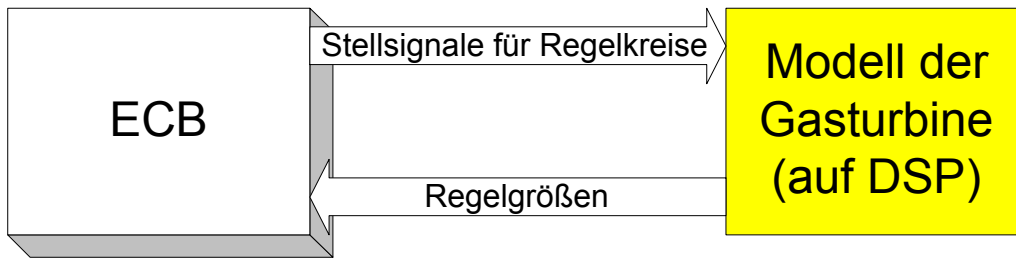


Bild 2: Hardware in the Loop Simulation

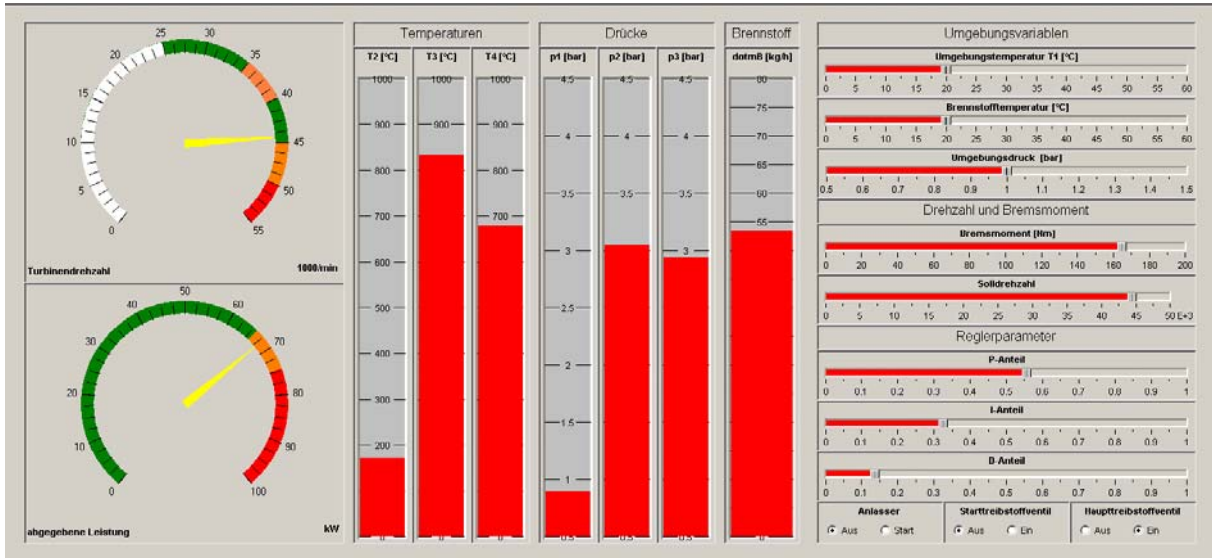


Bild 3: Oberfläche des Control Desk des Echtzeitsimulators

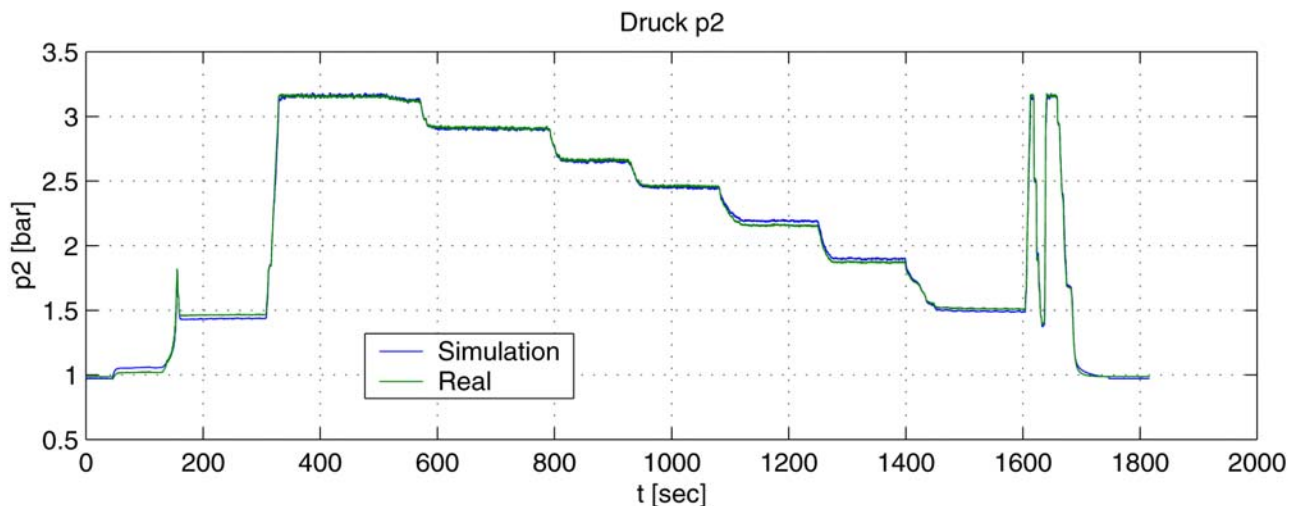


Bild 4: Simulierter und gemessener Verdichteraustrittsdruck