

Stationäres Teillastverhalten einer geschlossenen Einwellen-Gasturbinenanlage mit Hochtemperaturreaktor bei einer Bypassregelung vom Hochdruckverdichteraustritt zum Kühlereintritt

R. A. Dietrich *

Zusammenfassung

Bei einem Kraftwerk, bestehend aus einer thermischen Energiequelle und einer Gasturbinenanlage, kommt der Beurteilung des stationären Teillastverhaltens sowohl bezüglich der Wirtschaftlichkeit als auch der Sicherheit eine besondere Bedeutung zu. In dem vorliegenden Bericht wird eine 600 MW_{el} Einwellen-Gasturbinenanlage mit Hochtemperaturreaktor als Wärmequelle betrachtet.

Die Nutzleistung, die bei einer Einwellenanlage abgegeben wird, ergibt sich als Differenz aus der Turbinen- und Verdichterleistung. Da die Leistung der Strömungsmaschinen direkt proportional den in ihnen strömenden Mengen des Arbeitsmittels ist, bietet sich unter anderem eine Beaufschlagung der Turbine und der Verdichter mit verschiedenen Mengenströmen des Arbeitsmittels als Regelungsmöglichkeit an.

Zur Beurteilung des Teillastverhaltens wird in diesem Beitrag eine Bypassregelung vom Hochdruckverdichteraustritt zum Kühlereintritt betrachtet. Bei dieser Regelung wird ein Teil der vom Hochdruckverdichter geförderten Menge des Heliums über den Kühler zum Eintritt des Niederdruckverdichters weitergeleitet. Die Temperatur- und Druckverhältnisse am Eintritt des Niederdruckverdichters bleiben dadurch unverändert. Die Verdichter haben jedoch eine größere Menge des Arbeitsmittels zu verarbeiten als die Turbine, wodurch die Nutzleistung geregelt werden kann.

Da die Temperaturen und Drücke für jede Anlagekomponente bei den Teillastzuständen vorliegen, kann jede Komponente nach artspezifischen Kriterien beurteilt werden. Dies gilt für die thermodynamische, die fluid- und strukturelle sowie die konstruktive Beurteilung.

Einleitung

Bei einem Kraftwerk, bestehend aus einer thermischen Energiequelle und einer Gasturbinenanlage, kommt der Beurteilung des stationären Teillastverhaltens sowohl bezüglich der Wirtschaftlichkeit als auch der Sicherheit eine besondere Bedeutung zu.

Die Nutzleistung, die bei einer Einwellenanlage abgegeben wird, ergibt sich als Differenz aus der Turbinen- und Verdichterleistung. Da die Leistung der Strömungsmaschinen direkt proportional den in ihnen strömenden Mengen des Arbeitsmittels ist, bietet sich unter anderem eine Beaufschlagung der Turbine und der Verdichter mit verschiedenen Mengenströmen des Arbeitsmittels als Regelungsmöglichkeit an (s. Bild 1).

In Bild 1 ist der Schaltplan einer 600 MW_{el} Einwellen-Gasturbinenanlage dargestellt, wobei als thermische Energiequelle ein Hochtemperaturreaktor gewählt wurde. Bei der hier gewählten Art der thermischen Wärmequelle wird das Arbeitsmittel Helium vor dem Eintritt in den Niederdruckverdichter im Kühler auf 22 °C heruntergekühlt. Die Verdichtung des Heliums erfolgt in drei Stufen. Zwischen den Stufen wird das Helium wieder weitgehend heruntergekühlt. Nach dem Austritt des Heliums aus dem Hochdruckverdichter durchströmt es den Wärmeübertrager, um einen Teil der Wärme hinter der Turbine zu nutzen. Nach dem Durchströmen des Wärmeübertragers auf der Hochdruckseite wird dem Helium im Reaktor thermische Energie zugeführt. Danach wird das Helium bei einem Druck von 60,61 bar und einer Temperatur von 850 °C der Turbine zugeführt. In der Turbine expandiert das Helium.

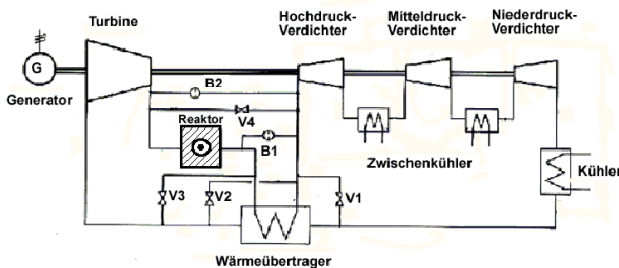


Bild 1: Schaltplan

Anforderungen an die Regelung

Bei einer Gasturbinenanlage mit einem Reaktor ist besonderer Wert auf absolute Zuverlässigkeit und Sicherheit der Regelung zu legen. Bei allen Überlegungen ist die besondere Charakteristik des Reaktors (negativer Temperaturkoeffizient) zu beachten. Die Möglichkeit, den Reaktor mit

*Copyright © 2006 IBSNM - Ingenieur-Büro für Systemanalyse und Numerische Modellierung.

Als Manuskript 06/G/01 erstellt. Für dieses Manuskript behält sich der Verfasser alle Rechte vor.

Anschrift: Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. Rudolf Adolf Dietrich, Neues Land 26, 21522 Hohnstorf/Elbe, Tel.: 04139 - 6 96 91 49,

E-Mail: Rudolf-Adolf.Dietrich@t-online.de

seinen Regelstäben zu regeln, sollte nur für langsame Regelvorgänge und zur Temperaturbegrenzung vorbehalten bleiben.

Andererseits kann die besondere Charakteristik des Reaktors zur Stabilisierung der Temperatur am Reaktorausritt herangezogen werden. Bei einer Kraftwerksanlage ist auch bei Teillast immer ein hoher Wirkungsgrad erwünscht.

An die Regelungsorgane werden folgende Anforderungen gestellt:

- a) Hohe Zuverlässigkeit und hohe Sicherheit,
- b) kleine Baugrößen wegen der Kompaktheit der Anlage und
- c) kleine Umblasmengen bei großer Wirkung auf die Leistungsänderung.

Thermodynamik des Gasturbinenprozesses

Bei einem geschlossenen Gasturbinenprozess (siehe Bild 1) durchläuft das gasförmige Helium eine Reihe von Zustandsänderungen. Das Helium wird bei niedrigem Temperaturniveau verdichtet. Bei mehrfacher Verdichtung wird das Helium zwischen den Verdichtungsstufen heruntergekühlt. Nach der Verdichtung wird das Helium durch den Wärmeübertrager geleitet, so dass ein Teil der hinter der Turbine abzuführenden Wärme zurückgewonnen wird. Dem so vorgewärmten Helium wird danach im Reaktor weitere Wärme zugeführt. Das so auf ein hohes Temperaturniveau erwärmte und unter hohem Druck stehende Helium wird danach in der Turbine entspannt und nach dem Entspannen dem Wärmeübertrager auf der Niederdruckseite zugeleitet. Dort wird, wie bereits erwähnt, ein Teil der noch vorhandenen Wärme auf das Helium bei hohem Druck übertragen. Nach dem Wärmeübertrager wird das Helium bei niedrigem Druck im Kühler auf die Verdichtereintrittstemperatur heruntergekühlt. Die Differenz zwischen der beim Entspannen in der Turbine gewonnenen Leistung und der für die Druckerhöhung im Verdichter benötigten Leistung wird dem Generator zur Erzeugung elektrischer Leistung zugeführt.

Durchführung der Berechnungen

Für die Durchführung der Berechnungen zur Beurteilung des stationären Teillastverhaltens von geschlossenen und offenen Gasturbinenanlagen wurde ein Rechenprogramm in FORTRAN 77 unter LINUX erstellt. Das Rechenprogramm wurde so konzipiert, dass Gasturbinenprozesse mit maximal zwei Wellen mit nahezu beliebiger Struktur des Schaltplanes modelliert werden können. Die Prozessführung ist auf einen Kreisprozess mit einem homogenen Helium begrenzt. Die Größe der berechenbaren Anlage wird durch die im Programm vorgegebene Anzahl von Komponenten und Lei-

tungen vorgegeben.

Für jede Anlagekomponente sind die spezifischen thermohydraulischen Berechnungsverfahren in entsprechenden Unterprogrammen erfasst. Eine detaillierte Beschreibung dieser Berechnungsverfahren würde den Rahmen bei dieser Darstellung weit überschreiten (siehe [1] bis [21]). Im einzelnen wurden folgende Regelungsarten untersucht:

- Bypass vom Hochdruckverdichterausritt zum Kühlereintritt (siehe Bild 1, V1),
- Bypass vom Hochdruckverdichterausritt zum Eintritt der Niederdruckseite des Wärmeübertragers (siehe Bild 1, V2),
- Bypass vom Austritt der Hochdruckseite des Wärmeübertragers zum Eintritt der Niederdruckseite des Wärmeübertragers (siehe Bild 1, V3),
- Bypass vom Hochdruckverdichterausritt zum Turbineneintritt (Temperaturregelung) (siehe Bild 1, V4) und
- Druckpegelregelung (Mengenregelung).

Die Ergebnisse zu diesen verschiedenen Regelungsarten werden in [22] beschrieben. Nachfolgend werden nur einige Ergebnisse zu der Bypassregelung vom Hochdruckverdichterausritt zum Kühlereintritt (siehe Bild 1, V1) beschrieben.

Bypassregelung Hochdruckverdichterausritt zum Kühlereintritt

Bei dieser Regelung wird ein Teil der vom Hochdruckverdichter geförderten Menge des Heliums zum Eintritt des Kühlers und danach zum Eintritt des Niederdruckverdichters zurückgeleitet (siehe Bild 1, V1). Hierdurch bleiben die Temperatur- und Druckverhältnisse am Niederdruckverdichtereintritt unverändert. Die Verdichter haben jedoch eine größere Menge des Heliums zu verarbeiten und die Turbine eine kleinere. Die Differenz der Leistungen wird dadurch kleiner.

Bei dieser Art der Regelung wird das Teillastverhalten unter der Voraussetzung durchgeführt, dass die Temperatur am Eintritt des Niederdruckverdichters nahezu konstant 22°C bleibt. Diese Voraussetzung wird durch die Wassermenge beim Kühler weitgehend erreicht. Ferner wird die Temperatur am Reaktorausritt mit 850°C als konstant festgelegt, um den Reaktor nicht durch Temperaturänderungen zu belasten.

Thermische Leistung und thermischer Wirkungsgrad

In dem Bild 2 ist die relative Änderung des thermischen Wirkungsgrads $\eta_{\text{th}}/\eta_{\text{th0}}$ und der thermischen Leistung Q/Q_0 beim stationären Teillastverhalten in Abhängigkeit vom Quotienten der elektrischen Leistung N/N_0 dargestellt.

Aufgrund des geringeren Mengenstromes im

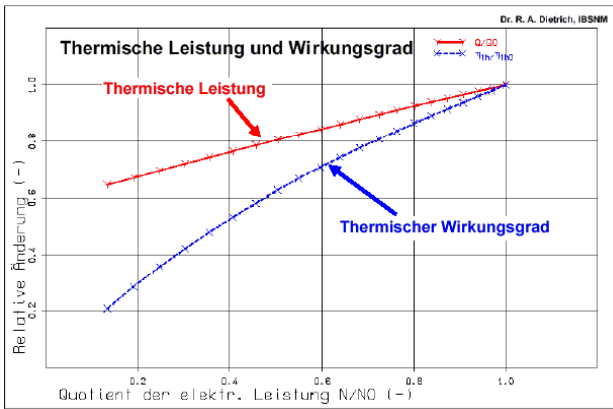


Bild 2: Änderung des thermischen Wirkungsgrades η_{th}/η_{th0} und der thermischen Leistung Q/Q_0 beim stationären Teillastverhalten Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt \rightarrow Kühlereintritt

Reaktor und der ansteigenden Temperatur am Reaktoreintritt (siehe Bild 16) sowie der konstanten Temperatur am Reaktorausritt nimmt die im Reaktor zugeführte thermische Leistung ab. Dadurch bekommt das Verhältnis der thermischen Wirkungsgrade $\eta_{th}/\eta_{th0} = (N/N_0)/(Q/Q_0)$ den überhöhten Verlauf, so dass der thermische Wirkungsgrad nichtlinear mit der elektrischen Leistung abnimmt.

Regelventil

Das stationäre Teillastverhalten des Regelventils (V1 in Bild 1) ist in dem Bild 3 in Abhängigkeit vom Quotienten der elektrischen Leistung N/N_0 dargestellt.

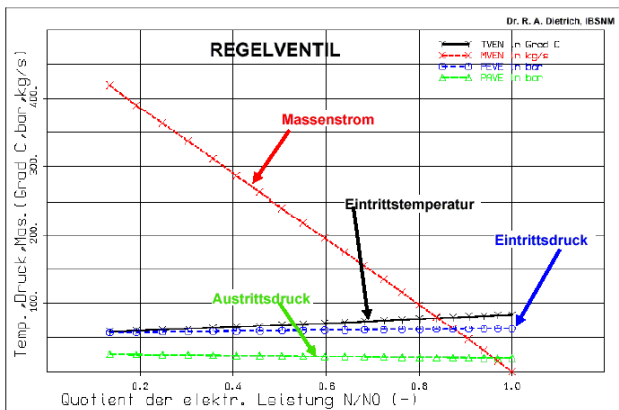


Bild 3: Stationäres Teillastverhalten des Regelventils Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt \rightarrow Kühlereintritt

Der Massenstrom steigt, ausgehend vom Wert Null im Auslegungspunkt der Anlage ($N/N_0 = 1$), linear an, um die Teillastzustände ($N/N_0 < 1$) zu erreichen. Bedingt durch die Änderung der Zustände am Austritt des Hochdruckverdichters (siehe Bild 8), ändern sich ebenfalls die Zustände am Eintritt des Regelventils. Der Austrittsdruck am Regelventil wird durch den Drosselvorgang erreicht. Bei Teillast steigt er jedoch geringfügig an.

Verdichter

Die Zustandsgrößen (Temperatur und Druck) am Ein- und Austritt des Niederdruckverdichters sind

in Bild 4 in Abhängigkeit vom Quotienten der elektrischen Leistung N/N_0 dargestellt.

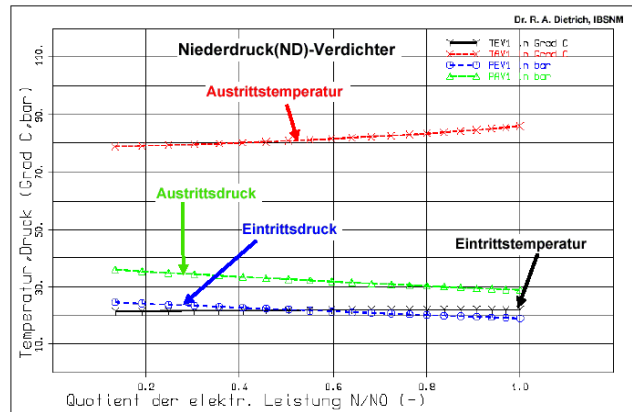


Bild 4: Stationäres Teillastverhalten des Niederdruck(ND)-Verdichters Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt \rightarrow Kühlereintritt

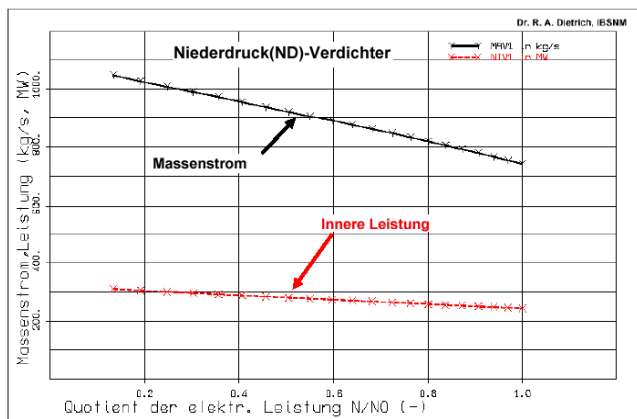


Bild 5: Stationäres Teillastverhalten des Niederdruck(ND)-Verdichters Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt \rightarrow Kühlereintritt

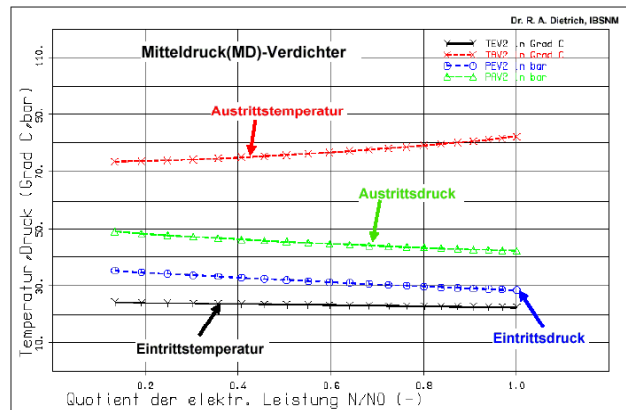


Bild 6: Stationäres Teillastverhalten des Mitteldruck(MD)-Verdichters Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt \rightarrow Kühlereintritt

Die Temperatur am Eintritt des Verdichters bleibt durch den dämpfend wirkenden Kühler nahezu konstant. Der Eintrittsdruck steigt, bedingt durch den Verlauf des Druckes am Turbinenaustritt und somit am Austritt auf der Niederdruckseite des Wärmeübertrages, bei Teillast an. Die Verläufe für die innere Leistung und den Massenstrom sind in dem Bild 5 dargestellt.

Analog hierzu sind in den Bildern 6 bis 9 die Temperaturen und Drücke am Ein- und Austritt sowie die innere Leistung und der Massenstrom

für den Mittel- und Hochdruckverdichter dargestellt.

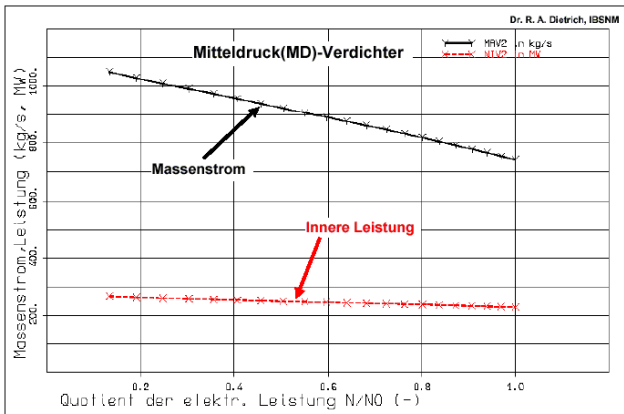


Bild 7: Stationäres Teillastverhalten des Mitteldruck(MD)-Verdichters
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

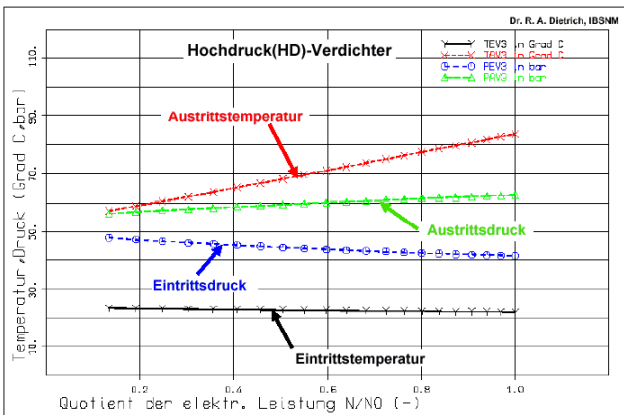


Bild 8: Stationäres Teillastverhalten des Hochdruck(HD)-Verdichters
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

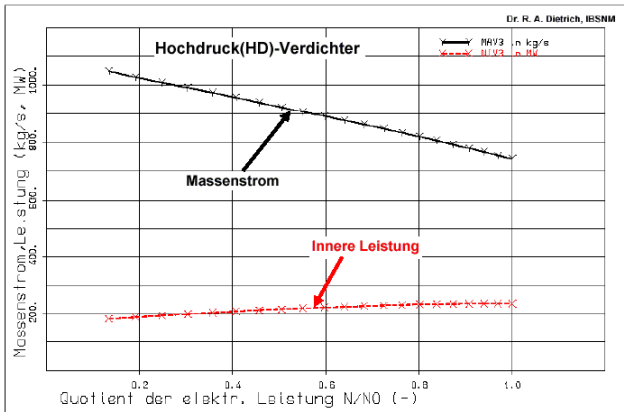


Bild 9: Stationäres Teillastverhalten des Hochdruck(HD)-Verdichters
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

Wärmeübertrager

In dem Bild 10 ist der Übertragungs- oder Wärmerückgewinnungsgrad des Wärmeübertragers in Abhängigkeit vom Quotienten der elektrischen Leistung N/N_0 dargestellt. Für einen Gegenstromwärmeübertrager ist er definiert durch

$$\eta_R = (t_{ND\text{Eintritt}} - t_{ND\text{Austritt}}) / (t_{ND\text{Eintritt}} - t_{HD\text{Eintritt}}).$$

Bedingt durch die Zunahme der Temperaturdifferenz auf der Niederdruckseite (im Zähler) steigt der Wärmerückgewinnungsgrad bei Teillast geringfügig an. Dies ist in erster Linie auf die stär-

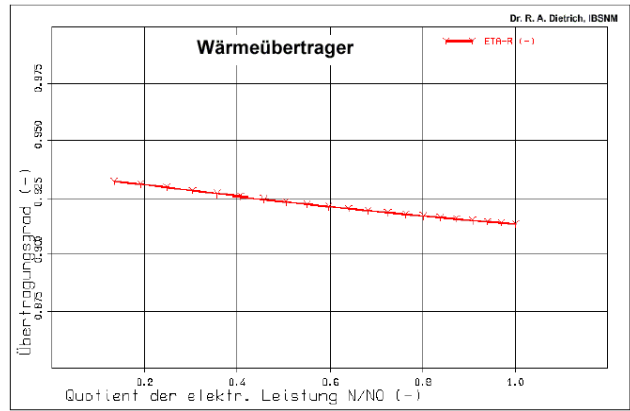


Bild 10: Übertragungsgrad des Wärmeübertragers bei stationärem Teillastverhalten
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

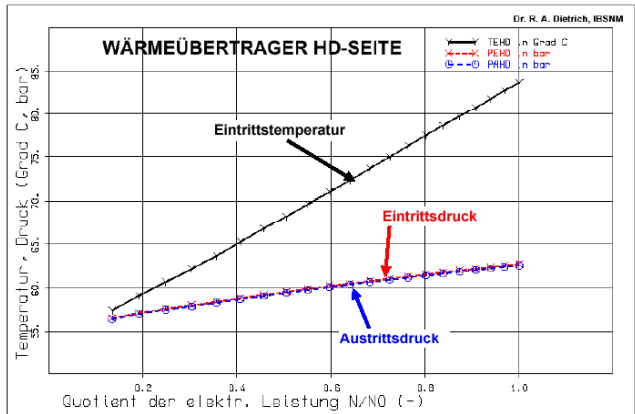


Bild 11: Stationäres Teillastverhalten der HD-Seite des Wärmeübertragers
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

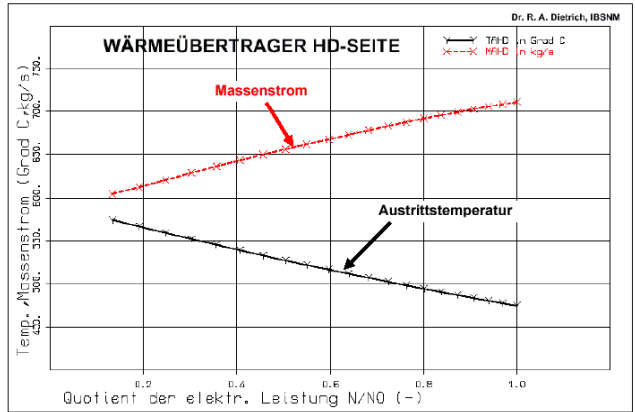


Bild 12: Stationäres Teillastverhalten der HD-Seite des Wärmeübertragers
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

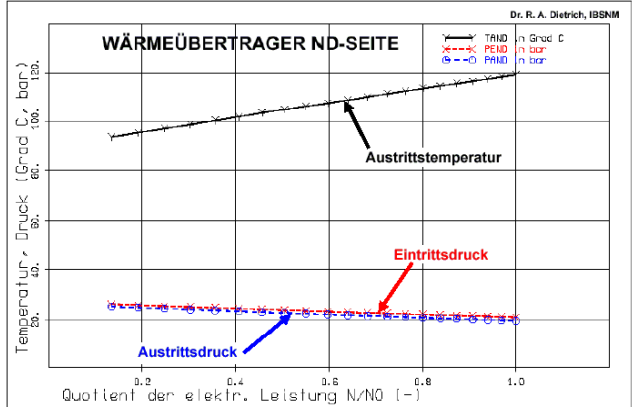


Bild 13: Stationäres Teillastverhalten der ND-Seite des Wärmeübertragers
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

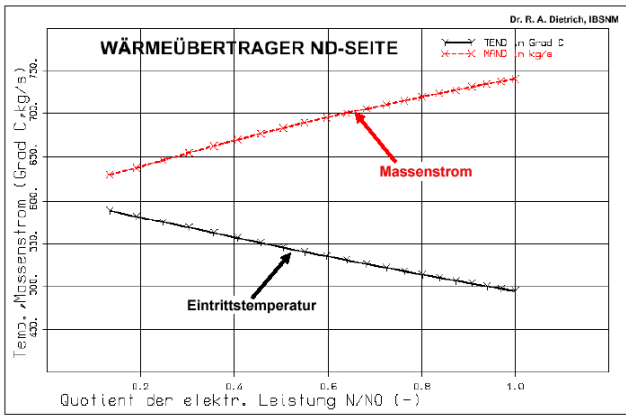


Bild 14: Stationäres Teillastverhalten der ND-Seite des Wärmeübertragers
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

kere Zunahme der Temperatur am Turbinenaustritt (siehe Bild 18) und somit der Temperatur am Eintritt des Wärmeübertragers auf der Niederdruckseite (siehe Bild 13) zurückzuführen. Durch diesen Anstieg wird der Temperaturunterschied zwischen der Niederdruck- und Hochdruckseite größer und auch die mittlere Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung.

Die Verläufe der Temperaturen und Drücke am Ein- und Austritt sowie der Massenstrom auf der Nieder- bzw. Hochdruckseite des Wärmeübertragers sind in den Bildern 11 bis 14 dargestellt.

Reaktor

Für den Reaktor sind der Ein- und Austrittsdruck

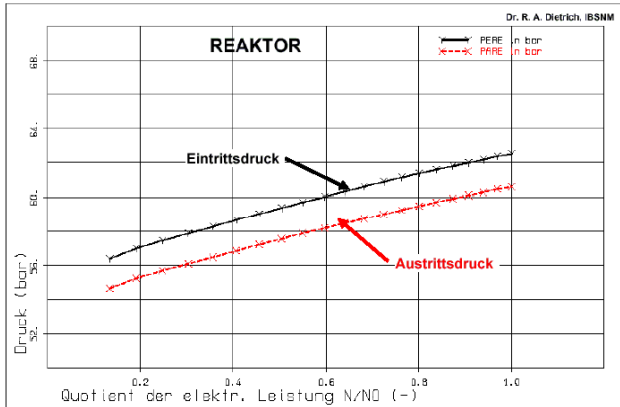


Bild 15: Stationäres Teillastverhalten des Reaktors
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

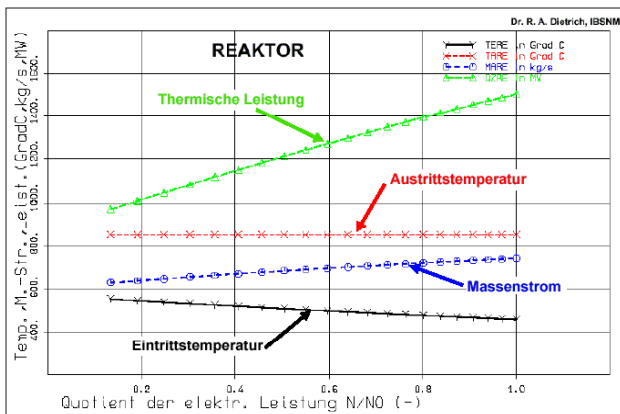


Bild 16: Stationäres Teillastverhalten des Reaktors
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

im Bild 15 und die Temperaturen am Ein- und Austritt sowie der Massenstrom und die thermische Leistung im Bild 16 dargestellt.

Turbine

Die Bildern 17 und 18 zeigen den Ein- und Austrittsdruck, die Ein- und Austrittstemperatur, den

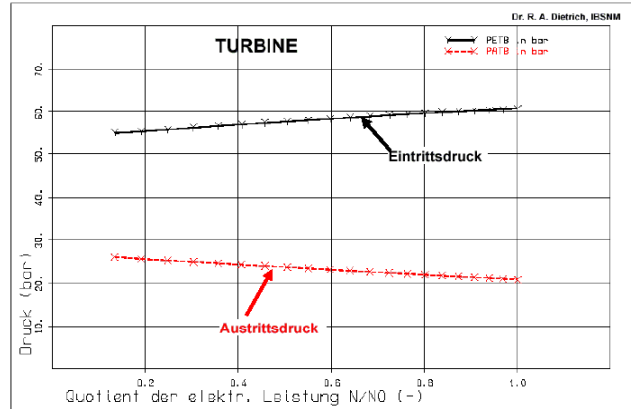


Bild 17: Stationäres Teillastverhalten der Turbine
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

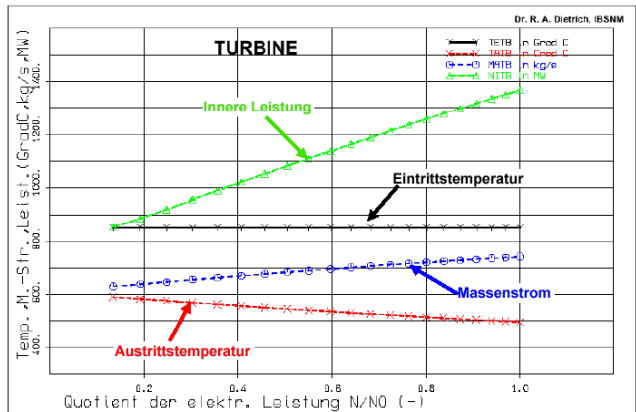


Bild 18: Stationäres Teillastverhalten der Turbine
Bypassregelung: HD-Verdichteraustritt → Kühlereintritt

Massenstrom und die innere Leistung für die Turbine. Mit diesen Daten schließt sich die Betrachtung des geschlossenen Gasturbinenprozesses.

Schlussbemerkungen

Die untersuchte Regelung vermittelt einen guten Einblick in das stationäre Teillastverhalten einer geschlossenen Gasturbinenanlage mit einem Hochtemperaturreaktor als Wärmequelle. In dem Bild 2 ist die Änderung der thermischen Leistung und des thermischen Wirkungsgrades der Anlage dargestellt.

Eine Bewertung der Regelungsart nach dem thermischen Wirkungsgrad zeigt, dass die Regelung durch einen Bypass vom Hochdruckverdichteraustritt zum Kühlereintritt (siehe Bild 1, V1) als günstig anzusehen ist, weil die Umleitung des Mengenstromes bei niedrigem Temperaturniveau erfolgt.

Zur detaillierten Beurteilung des Teillastverhaltens einer geschlossenen Gasturbinenanlage

mit einem Hochtemperaturreaktor wurden in [22] folgende Regelungen untersucht:

- Bypass vom Hochdruckverdichteraustritt zum Kühlereintritt (siehe Bild 1, V1),
- Bypass vom Hochdruckverdichteraustritt zum Eintritt der Niederdruckseite des Wärmeübertragers (siehe Bild 1, V2),
- Bypass vom Austritt der Hochdruckseite des Wärmeübertragers zum Eintritt der Niederdruckseite des Wärmeübertragers (siehe Bild 1, V3),
- Bypass vom Hochdruckverdichteraustritt zum Turbineneintritt (Temperaturregelung) (siehe Bild 1, V4) und
- Druckpegelregelung (Mengenregelung)

Da die Temperaturen und Drücke für jede Anlagekomponente bei den Teillastzuständen vorliegen, kann jede Komponente nach artspezifischen Kriterien beurteilt werden. Dies gilt für die thermodynamische, die fluid- und strukturmehchanische sowie für die konstruktive Beurteilung.

Literatur

- [1] Baehr, H. D.: Thermodynamik, Springer-Verlag
- [2] Eckert/Schnell : Axial- und Radialkompressoren, 2. Auflage, Springer-Verlag, 1961
- [3] Emendörfer, D., und Höcker, K. H.: Theorie der Kernreaktoren, Teil I, BI Hochschultaschenbücher, Band 411/411a
- [4] Emendörfer, D., und Höcker, K. H.: Theorie der Kernreaktoren, Teil II, BI Hochschultaschenbücher, Band 412/412a
- [5] Etherington, H.: Nuclear Engineering Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York
- [6] Glasstone/Edlund: Kernreakthortheorie, Springer-Verlag, 1961
- [7] Gregorig, R.: Wärmeaustauscher, Verlag H.R. Sauerländer & Co Aarau und Frankfurt/Main
- [8] Gröber/Erk/Grigull: Wärmeübertragung, Springer-Verlag
- [9] Hausen, H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom, Springer-Verlag, Berlin, 1950
- [10] Hotes, H.: Digitalrechner in technischen Prozessen, Verlag Walter De Gruyter & Co, 1967
- [11] Leonard, A.: Die selbsttätige Regelung, Springer-Verlag, 1962
- [12] Oppelt, W.: Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr.
- [13] Riezler, W., und Walcher, W.: Kerntechnik, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1958
- [14] Schack, A.: Der Industrielle Wärmeübergang, Verlag Stahleisen m.b.H, Düsseldorf
- [15] Schmidt, K. R.: Nutzenergie aus Atomkernen, Band I, Walter Gruyter & Co, Berlin, 1959
- [16] Schmidt, K. R.: Nutzenergie aus Atomkernen, Band II, Walter Gruyter & Co, Berlin, 1959
- [17] Schöne, A.: Prozessrechensysteme der Verfahrensindustrie, Carl Hanser Verlag München, 1969
- [18] Schulten, R., Güth, W.: Reaktorphysik I, BI Hochschultaschenbücher, Band 6
- [19] Schulten, R., Güth, W.: Reaktorphysik II, BI Hochschultaschenbücher, Band 11
- [20] Traupel, W.: Thermische Turbomaschinen, 1. Bd., Springer-Verlag, 1958
- [21] Traupel, W.: Thermische Turbomaschinen, 2. Bd., Springer-Verlag, 1960
- [22] Dietrich, R. A.: Stationäres Teillastverhalten einer geschlossenen Einwellen-Gasturbinenanlage mit Hochtemperaturreaktor bei Druckpegel- und Bypassregelungen. Ingenieur-Büro für Systemanalyse und Numerische Modellierung (IBSNM) , Neues Land 26, 21522 Hohnstorf/Elbe, Juli 2006