

Wirtschaftlichkeit und Betriebserfahrungen leistungssteigernder Maßnahmen bei Kombi-Kraftwerken

Prof. Dr. C. Kail ¹⁾, Dr. B. Rukes ²⁾, W. Märker ²⁾, F. Strobelt ²⁾, I. Weber ²⁾, Dr. K. Werner ²⁾

¹⁾ FH Südwestfalen

²⁾ Siemens AG, Energy Sector

Kurzfassung

Die wirtschaftlichste Art der Leistungserhöhung bei GUD-Kraftwerken ist die nasse Verdichtung. An zweiter Stelle folgt die Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger. Die Verdunstungskühlung ist die Methode mit den geringsten Zusatzinvestitionen. Sie ist jedoch nur wirtschaftlich bei hohen Umgebungstemperaturen. Die Wirtschaftlichkeit der Kompressionskältemaschine hängt stark von den jeweiligen Bedingungen ab (Umgebungsbedingungen, Kühlsystem, Betriebszeit mit Leistungssteigerung, Gaspreis, Strompreis, etc.). Eine generelle Aussage kann daher nicht gemacht werden. Die beschriebenen Maßnahmen können nicht nur zur Leistungssteigerung, sondern auch zur Stützung der Netzfrequenz eingesetzt werden.

1. Einleitung

Mit leistungssteigernden Maßnahmen kann bei Gasturbinen- und GUD-Kraftwerken vor allem bei hohen Umgebungstemperaturen kostengünstig zusätzlicher Strom erzeugt werden, der dann in vielen Fällen zu Spitzenlasttarifen verkauft werden kann. Dies ist besonders in liberalisierten Märkten attraktiv, da Spitzenlaststrom dort oftmals um ein Vielfaches teurer ist als Grundlaststrom. Leistungssteigernde Maßnahmen können auf diese Weise zu einer Erhöhung des Gewinns des Kraftwerksbetreibers führen.

Im Folgenden werden die erfolgversprechendsten Maßnahmen zur temporären Erhöhung der Leistung von GUD-Kraftwerken vorgestellt und sowohl unter technischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Im Einzelnen sind dies folgende Maßnahmen:

- Kühlung der Ansaugluft der Gasturbine durch Verdunstung von Wasser
- Kühlung der Ansaugluft der Gasturbine durch Einsatz einer Kompressionskältemaschine
- Kühlung der Luft vor und während der Verdichtung durch Verdunstung von Wasser
- Zusatzfeuerung am Eintritt des Abhitzedampferzeugers

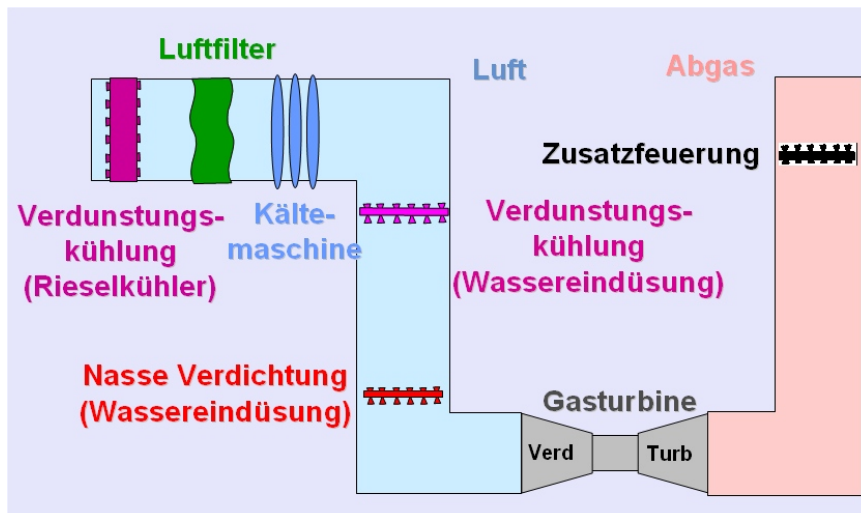


Bild 1: Maßnahmen zur Erhöhung der Leistung von GUD-Kraftwerken

2. Thermodynamische Bewertung leistungssteigernder Maßnahmen

2.1 Verdunstungskühlung (Evaporative Cooling, Fogging)

Die Kühlung der Ansaugluft durch Verdunstung von Wasser kann zum einen durch einen Rieselkühler erfolgen, der vor dem Luftfilter sitzt (Evaporative Cooling), und zum anderen über die Eindüsung von Wasser in fein zerstäubter Form (Fogging) nach dem Luftfilter (siehe Bild 1). In beiden Fällen wird der Luft bis zum Erreichen der Sättigungsgrenze, also bis zu einer relativen Feuchte von 100 %, Wasser zugeführt. Üblicherweise wird ein gewisser Sicherheitsabstand zur Sättigungslinie eingehalten, um ein Überschreiten dieser Linie zu vermeiden. Die Anforderungen an die Qualität des Wassers sind beim Rieselkühler geringer als bei einer Eindüsung, die voll entsalztes Wasser (Deionat) erfordert. Dies wirkt sich auf die Wasserkosten aus.

Bei hohen Umgebungstemperaturen und niedrigen relativen Feuchten der Umgebungsluft ist die Verdunstungskühlung besonders effektiv. Bei diesen Bedingungen sinkt die Temperatur der Verdichtereintrittsluft durch Verdunstungskühlung um rund 10 K. Die Absenkung der Temperatur führt zum einen durch eine Zunahme der Dichte der Luft zu einem Anstieg des Luftmassenstroms, der durch die Gasturbine geht. Zum anderen sinkt die spezifische Verdichtearbeit mit abnehmender Verdichtereintrittstemperatur, da die Isobaren im T,s-Diagramm mit abnehmender Temperatur konvergent verlaufen. Durch beide Effekte steigt die Nutzleistung der Gasturbine und damit auch die des GUD-Prozesses. In günstigen Fällen beträgt der Leistungsanstieg bis zu 6 % (siehe Bild 2). Der Wirkungsgrad des GUD-Prozesses sinkt leicht bei Anwendung der Verdunstungskühlung, da der Wasseranteil im Abgas zunimmt und damit auch die Abgasverluste. Dies hängt mit der Verdampfungswärme des Wassers zusammen, die mit dem Abgas verloren geht. Der Wirkungsgradverlust ist jedoch relativ gering und beträgt im ungünstigsten Fall rund

0,15 %-Punkte. Für die im Diagramm dargestellten Ergebnisse wird angenommen, dass die tatsächliche Aufsättigung 90 % der theoretisch maximal möglichen beträgt.

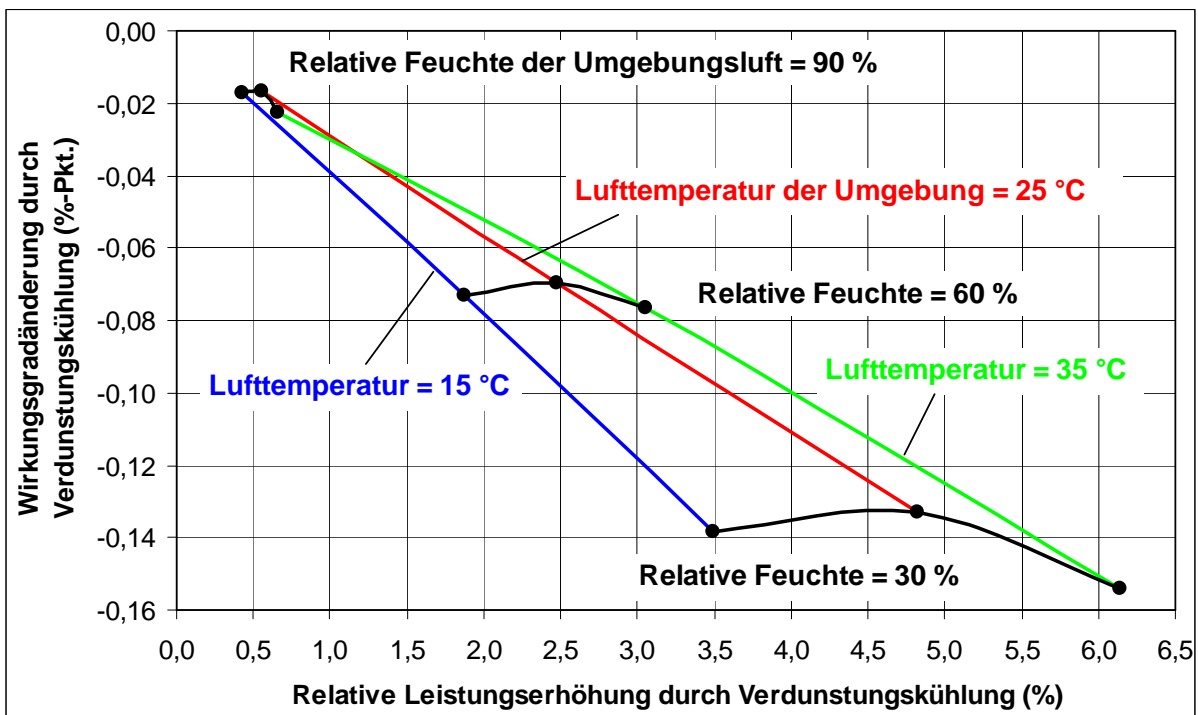


Bild 2: Änderung von GUD-Leistung und -Wirkungsgrad durch Verdunstungskühlung

2.2 Kompressionskältemaschine (Chilling)

Eine weitere Möglichkeit, die Temperatur der Verdichteransaugluft zu senken und dadurch die Leistung zu erhöhen, ist der Einsatz einer Kompressionskältemaschine. Die für die Kompressionskältemaschine erforderliche elektrische Antriebsenergie hängt von den jeweiligen Gegebenheiten ab. Eine niedrige Kühlwassertemperatur, wie sie z. B. bei einer Frischwasserkühlung vorliegt, und eine geringe Feuchte der zu kühlenden Luft führen zu einem günstigen Stromverbrauch der Kältemaschine. Bei einer Abkühlung der Luft um 15 K und einer Frischwasserkühlung liegt der Stromverbrauch der Kältemaschine z. B. bei 15 % bis 20 % der Kälteleistung. Diese Bedingungen sind Grundlage der Kalkulationen, deren Ergebnisse in Bild 3 dargestellt sind. Die Leistung steigt demnach bis zu 6,4 %. Die Antriebsenergie der Kompressionskältemaschine führt zu entsprechenden Wirkungsgradverlusten, die zwischen 0,5 %-Punkten und 1,1 %-Punkten liegen und damit deutlich größer sind als bei der oben beschriebenen Verdunstungskühlung. Die möglichen Leistungssteigerungen durch den Einsatz einer Kältemaschine sind im Mittel jedoch höher als bei der Verdunstungskühlung.

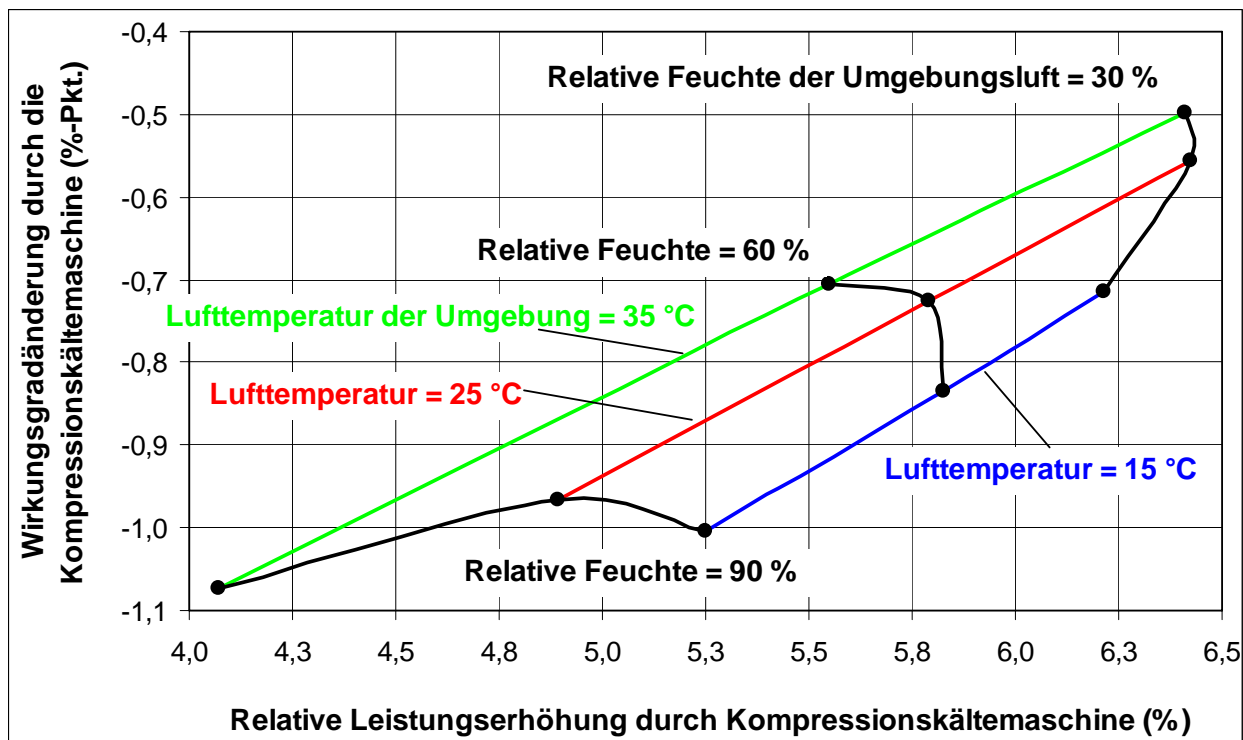


Bild 3: Änderung von GUD-Leistung und -Wirkungsgrad durch Einsatz einer Kompressionskältemaschine

2.3 Nasse Verdichtung (Wet Compression)

Bei der nassen Verdichtung wird vor der Verdichterbeschaufelung Wasser in fein zerstäubter Form in den Luftstrom eingedüst (Bild 1). Die Wassermenge variiert in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen zwischen 1,6 % und 2,2 % der Luftmenge. Der überwiegende Anteil des Wassers verdampft relativ schnell in den ersten Stufen des Verdichters. Die Nutzleistung der Gasturbine steigt zum einen durch die Erhöhung des Massenstroms und zum anderen durch die Verminderung der Lufttemperatur während der Verdichtung. Dies sind die gleichen Effekte, die schon im Zusammenhang mit der Verdunstungskühlung im Kapitel 2.1 erläutert wurden. Im Fall der nassen Verdichtung finden die Kühleffekte jedoch auch im Verdichter und nicht nur davor statt. Die im Bild 4 dargestellten Zahlen sind Ergebnisse von Kalkulationen. Der Leistungsgewinn durch die nasse Verdichtung liegt demnach zwischen 10 % und 18 %, der Wirkungsgradverlust zwischen 0,6 %-Punkten und 0,8 %-Punkten. Hohe Temperaturen und niedrige Feuchten der Umgebungsluft ermöglichen die höchsten Leistungssteigerungen. Aktuelle Messungen haben jedoch gezeigt, dass die erreichbaren Leistungssteigerungen kleiner ausfallen können als die hier dargestellten berechneten Werte. In Kapitel 4 werden Messdaten von Gasturbinenkraftwerken vorgestellt.

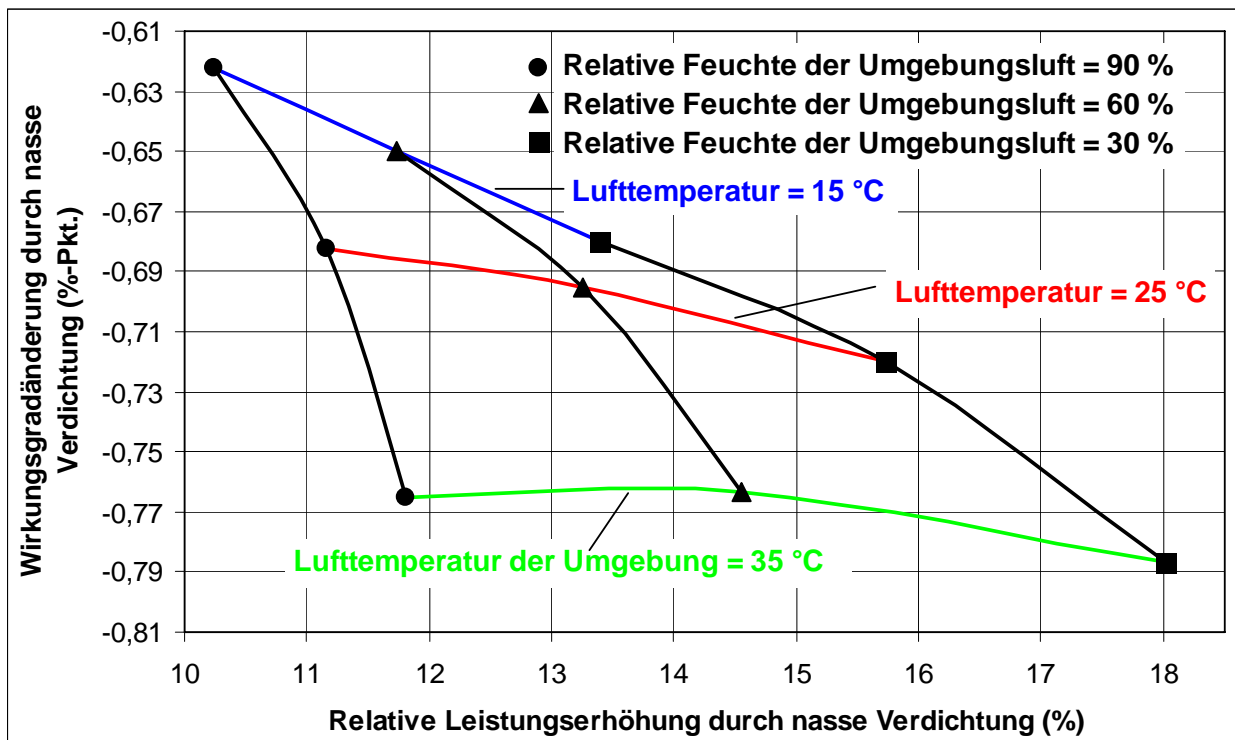


Bild 4: Änderung von GUD-Leistung und -Wirkungsgrad durch nasse Verdichtung

2.4 Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger (Duct Firing)

Die vierte Möglichkeit zur Erhöhung der Leistung von GUD-Kraftwerken ist die Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger. Die dadurch steigende Abgastemperatur führt zu einer höheren Dampfproduktion. Dies erhöht die Leistung der Dampfturbine. Die Gasturbine ist von dieser Maßnahme nicht betroffen.

In Bild 5 sind die Leistungs- und Wirkungsgradänderungen der Zusatzfeuerung dargestellt. Es wird angenommen, dass 10 % der Brennstoffleistung, die der Gasturbine zugeführt wird, in der Zusatzfeuerung verbrannt wird. Die Abgastemperaturen nach der Zusatzfeuerung liegen damit zwischen 650 °C und 700 °C. Bis zu Werten von 750 °C bis 800 °C könnte die Zusatzfeuerung noch gesteigert werden, ohne dass größere Zusatzinvestitionen im Abhitzedampferzeuger notwendig sind. Die Erhöhung der GUD-Leistung durch die Zusatzfeuerung beträgt in den hier betrachteten Fällen rund 8 %. Der Wirkungsgrad fällt um rund 1,0 %-Punkte. Diese Werte sind in erster Näherung unabhängig von den Umgebungsbedingungen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den bisher beschriebenen Maßnahmen, bei denen die Leistungserhöhungen stärker von den Umgebungsbedingungen abhängen.

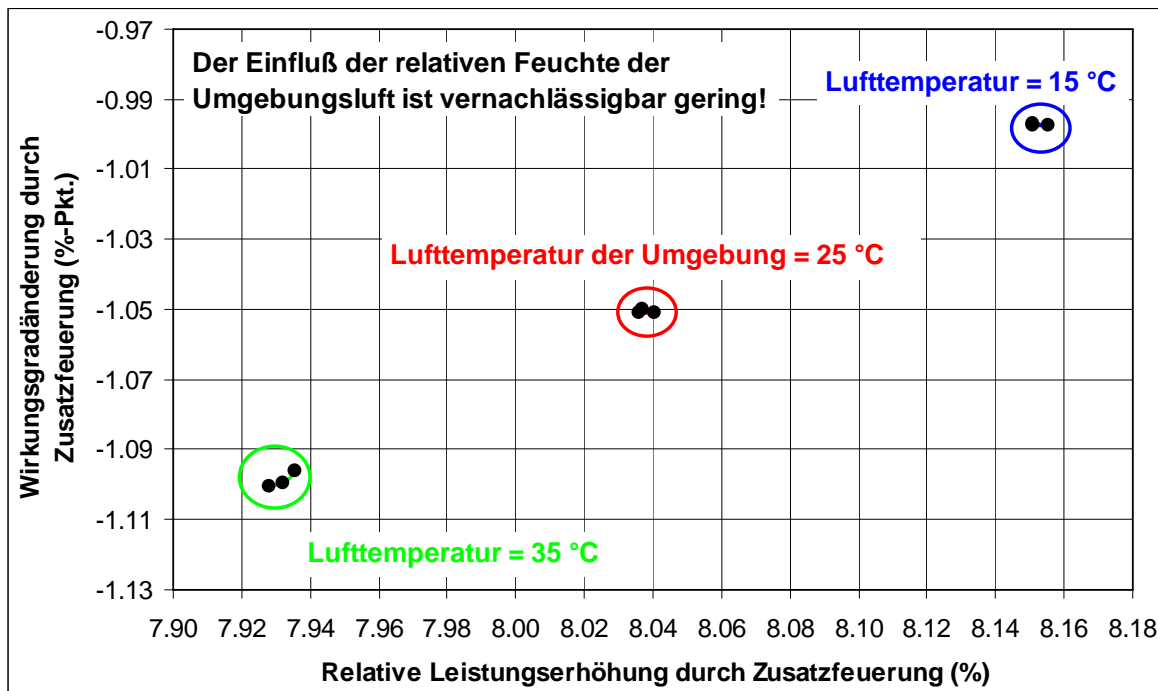


Bild 5: Änderung von GUD-Leistung und Wirkungsgrad durch Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger

3. Beschränkung der Gasturbinenleistung bei niedrigen Verdichtereintrittstemperaturen

Üblicherweise werden bei modernen Gasturbinen bei niedrigen Verdichtereintrittstemperaturen Maßnahmen zu Leistungsbegrenzung getroffen, da ansonsten aufgrund des mit sinkender Temperatur zunehmenden Luftmassenstroms zum einen Komponenten der Gasturbine überlastet und zum anderen das Verbrennungsverhalten und die Emissionen ungünstig beeinflusst werden könnten.

Die Grenztemperaturen, ab deren Unterschreitung leistungsmindernde Maßnahmen getroffen werden sollten, liegen zurzeit üblicherweise zwischen 10 °C und 15 °C. Für die oben dargestellten Methoden zur Leistungssteigerung, bei denen die Temperatur der Verdichtereintrittsluft gesenkt wird, folgt daraus, dass bei Einsatz dieser Methoden bei einer Umgebungstemperatur von 15 °C in den meisten Fällen zusätzlich leistungsbegrenzende Maßnahmen bei der Gasturbine ergriffen werden müssen. Dies vermindert nicht nur die erreichbaren Leistungserhöhungen, sondern erhöht darüber hinaus die Wirkungsgradverluste in nicht unerheblichem Maße. In Bild 6 ist der Einfluss der Leistungsbeschränkung bei niedrigen Verdichtereintrittstemperaturen beispielhaft für den Einsatz einer Kompressionskältemaschine dargestellt und in Bild 7 für die Verdunstungskühlung. Wie zu erkennen ist, geht bei Einsatz einer Kompressionskältemaschine ein Großteil der Leistungserhöhung wieder verloren, so dass der Einsatz der Kältemaschine bei Lufttemperaturen

von 15 °C keinen Sinn macht. Erst ab rund 25 °C Umgebungstemperatur ist der Einsatz einer Kältemaschine zur Leistungssteigerung sinnvoll.

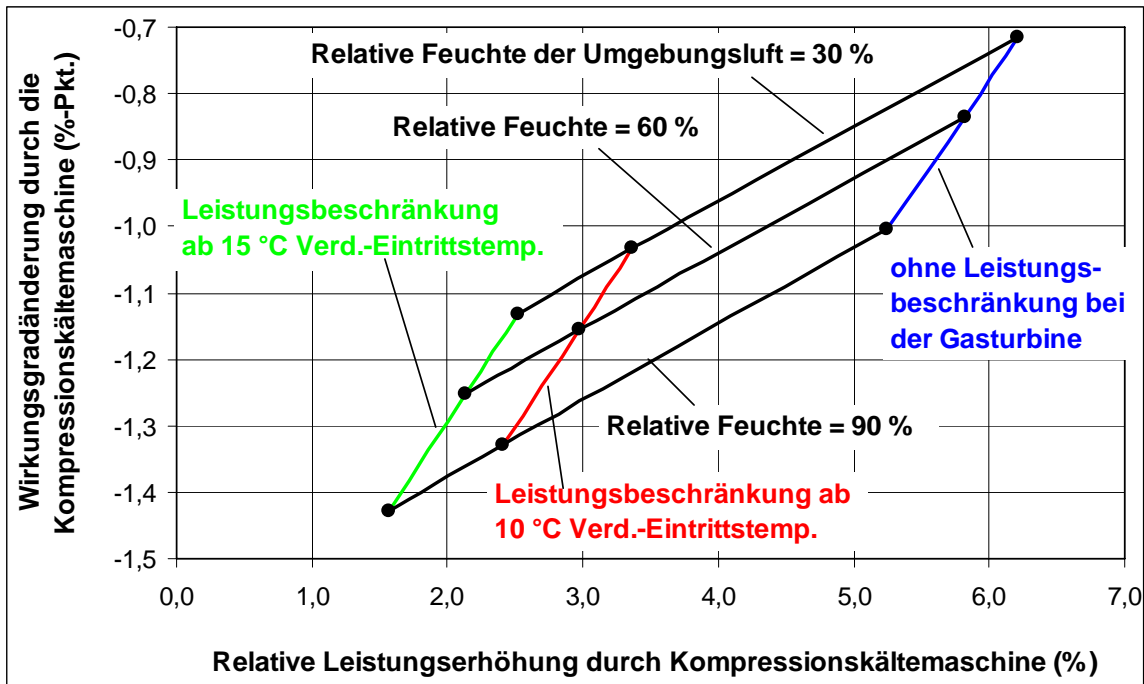


Bild 6: Beschränkung der Leistungssteigerung durch Kompressionskältemaschinen bei 15 °C Umgebungstemperatur

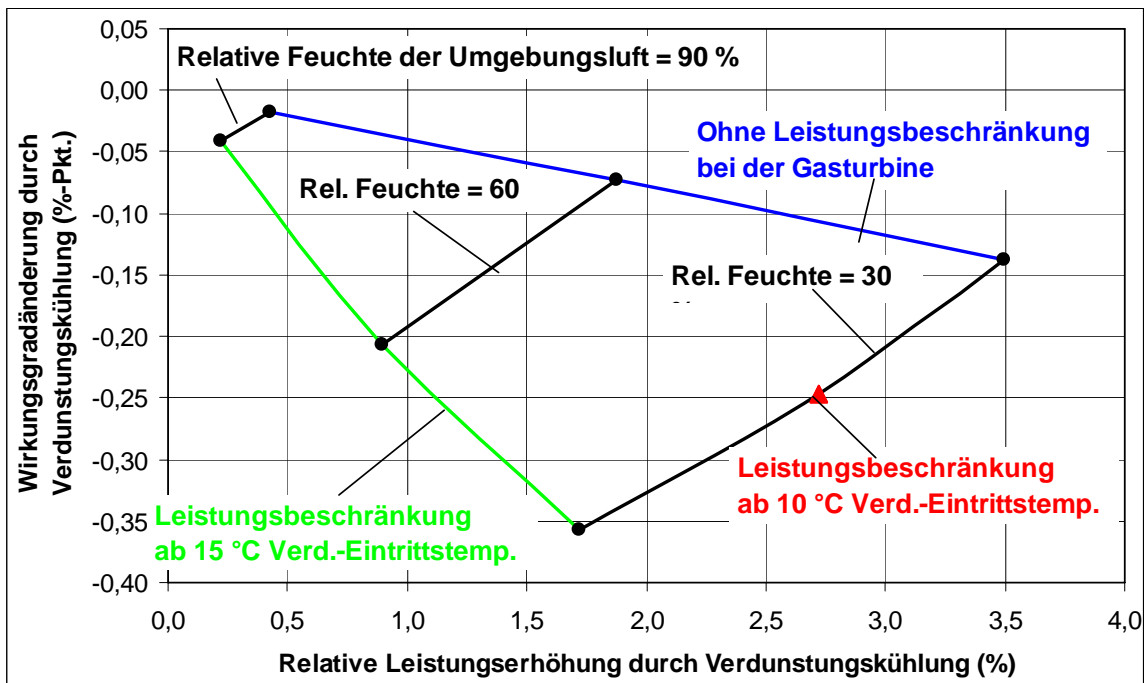


Bild 7: Beschränkung der Leistungssteigerung durch Verdunstungskühlung bei 15 °C Umgebungstemperatur

4. Betriebserfahrungen mit nasser Verdichtung (Wet Compression)

Seit 1995 wird die Technologie der nassen Verdichtung in großen, Strom erzeugenden, Gasturbinen eingesetzt. Mehr als 40 Gasturbinen nutzen mittlerweile diese leistungssteigernde Maßnahme im Betrieb. Darunter sind Maschinen, die bereits mehr als 25 000 äquivalente Betriebsstunden mit nasser Verdichtung gesammelt haben. Flottengesamtwerte in der Größenordnung von 100 000 äquivalenten Betriebsstunden mit nasser Verdichtung liegen vor.

Neben Prüffeldversuchen wurden auch schon zahlreiche Garantieabnahmetests mit hochgenauem Testinstrumentarium durchgeführt. Dabei wurden die Erwartungswerte jeweils bestätigt oder übertroffen. Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten Messergebnisse einiger ausgewählter Maschinen als Beispiele. Die Daten sind auf die Gasturbine allein bezogen.

Anlagenstandort / Region	Eingespritzte Wassermenge bezogen auf Luftansaugmassenstrom	Relative Leistungsänderung Gasturbine	Relative Wirkungsgradänderung Gasturbine	Abnahme NOx-Emissionen
	%	%	%	%
Prüffeld Deutschland	1.5	+ 15.7	+4.1	-30
Naher Osten	2.0	+16.0	+1.8	-15 bis -20
Australien	2.0	+17.2	+1.5	n. a.

Alle Werte gelten nach Umrechnung auf Referenzbedingungen. Der Verdunstungseffekt vor Verdichtereintritt ist jeweils noch nicht heraus gerechnet worden. Das heißt, dass der Effekt der nassen Verdichtung kleiner wird als in der Tabelle angegeben, wenn man von gesättigter Luft am Verdichtereintritt ausgeht.

Bild 8 zeigt die Abhängigkeit der durch nasse Verdichtung erzielten Leistungssteigerung in Abhängigkeit der relativen Umgebungsluftfeuchte. Zum Vergleich ist auch die Kurve für die Leistungsdifferenz eingetragen, die durch einen Verdunstungskühler mit 85% Wirkungsgrad erreicht wird. Die dargestellten Flächen weisen aus, dass das Leistungspotential der nassen Verdichtung deutlich weniger von Umgebungsrandbedingungen abhängt.

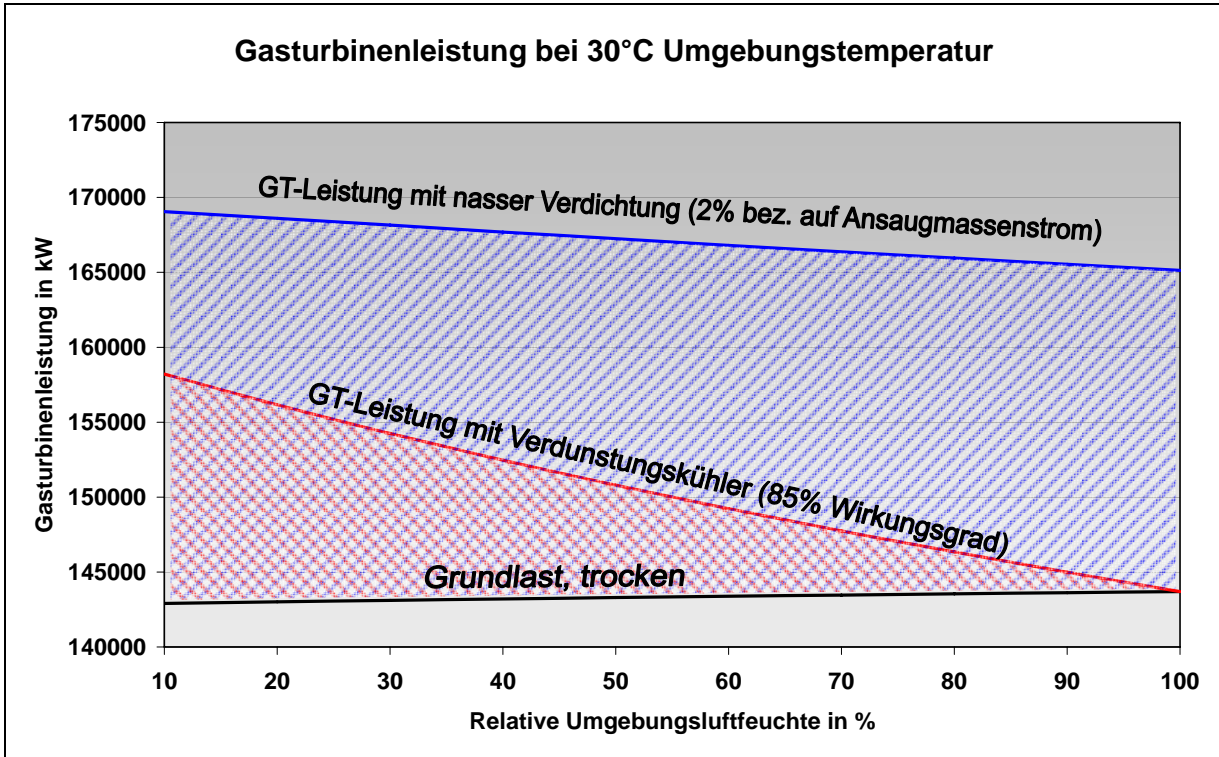


Bild 8: Leistungsänderung der Gasturbine über relativer Umgebungsluftfeuchte

Die Berücksichtigung dieser Effekte wird auch durch die jeweils zwei unterschiedlichen Verläufe der Gasturbinenleistung und des Gasturbinenwirkungsgrades in den Bildern 9 und 10 verdeutlicht.

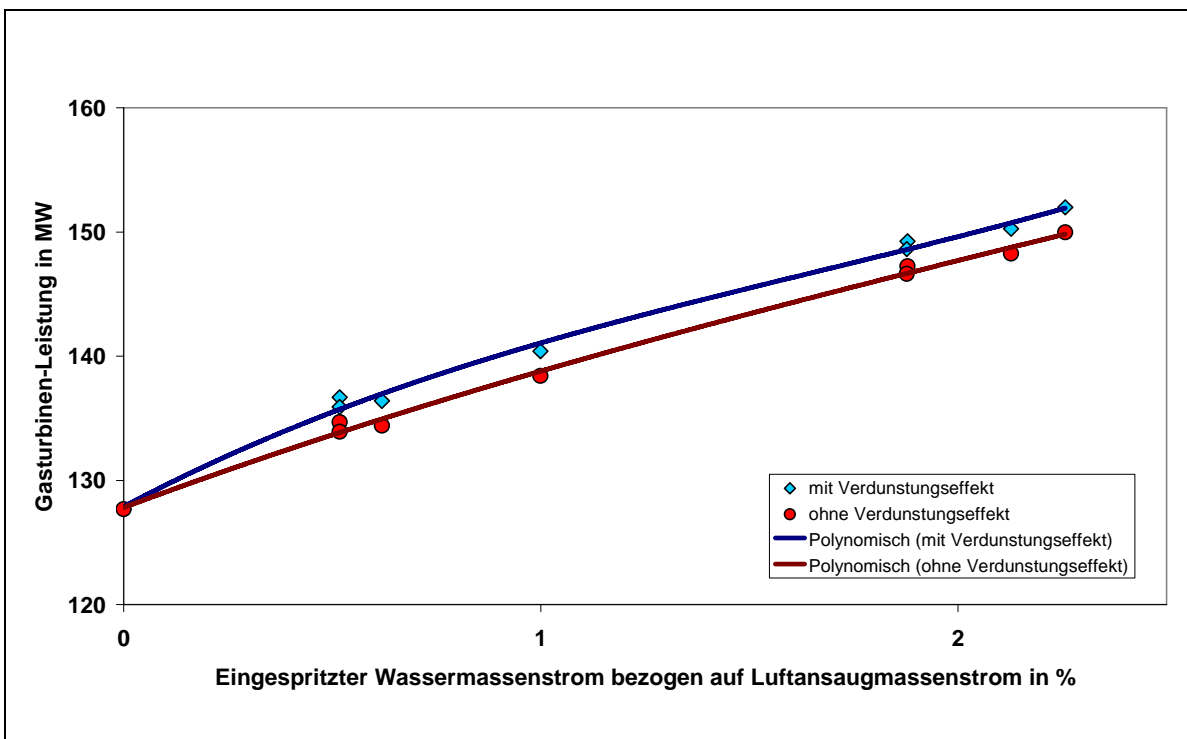


Bild 9: Gasturbinenleistung als Funktion des eingespritzten Wassermassenstromes mit und ohne Berücksichtigung des Verdunstungseffektes vor Verdichter

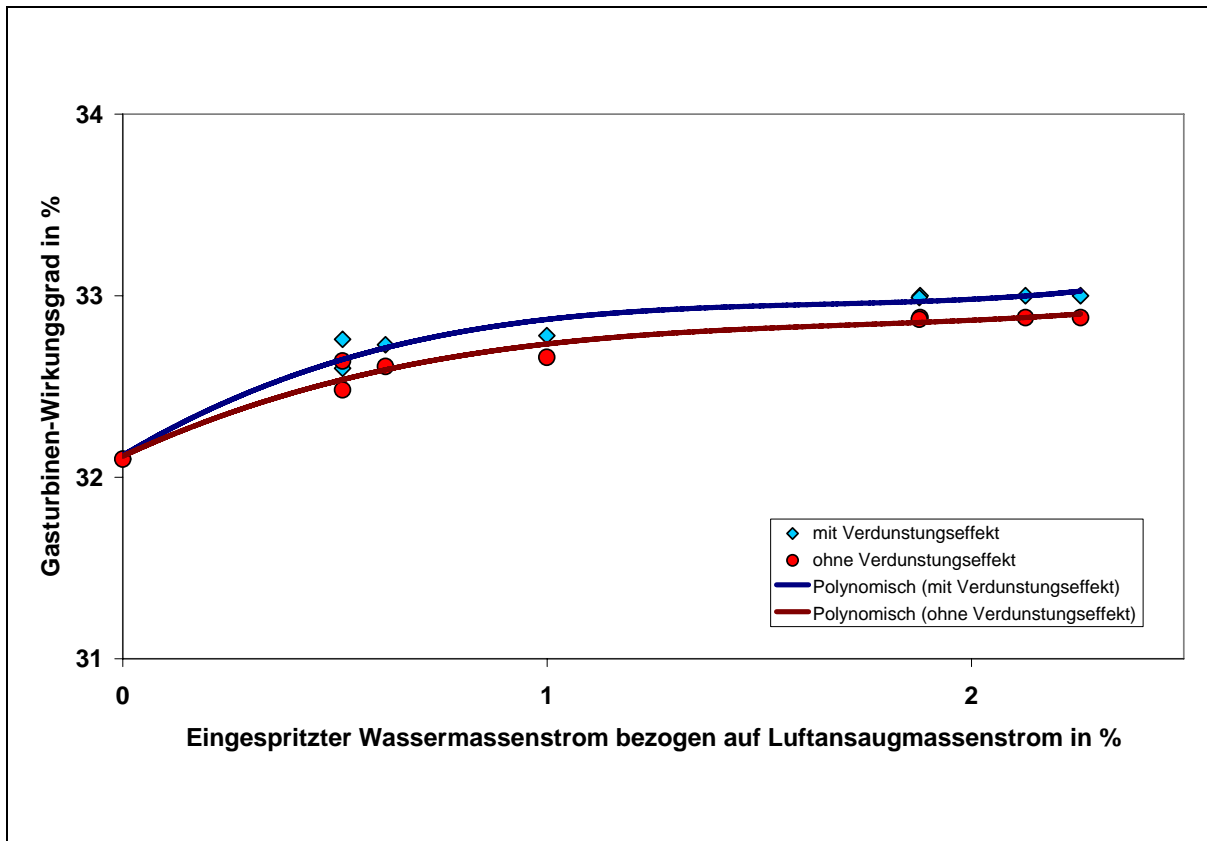


Bild 10: Gasturbinenwirkungsgrad als Funktion des eingespritzten Wassermassenstromes mit und ohne Berücksichtigung des Verdunstungseffektes vor Verdichter

Um den Einfluss der nassen Verdichtung auf den GUD-Prozess beurteilen zu können, müssen auch die Abgasdaten der Gasturbine berücksichtigt werden. Die folgenden Diagramme zeigen exemplarische Verläufe der beiden Abgasparameter Temperatur und Massenstrom einer E-Klasse Gasturbine der Siemens AG.

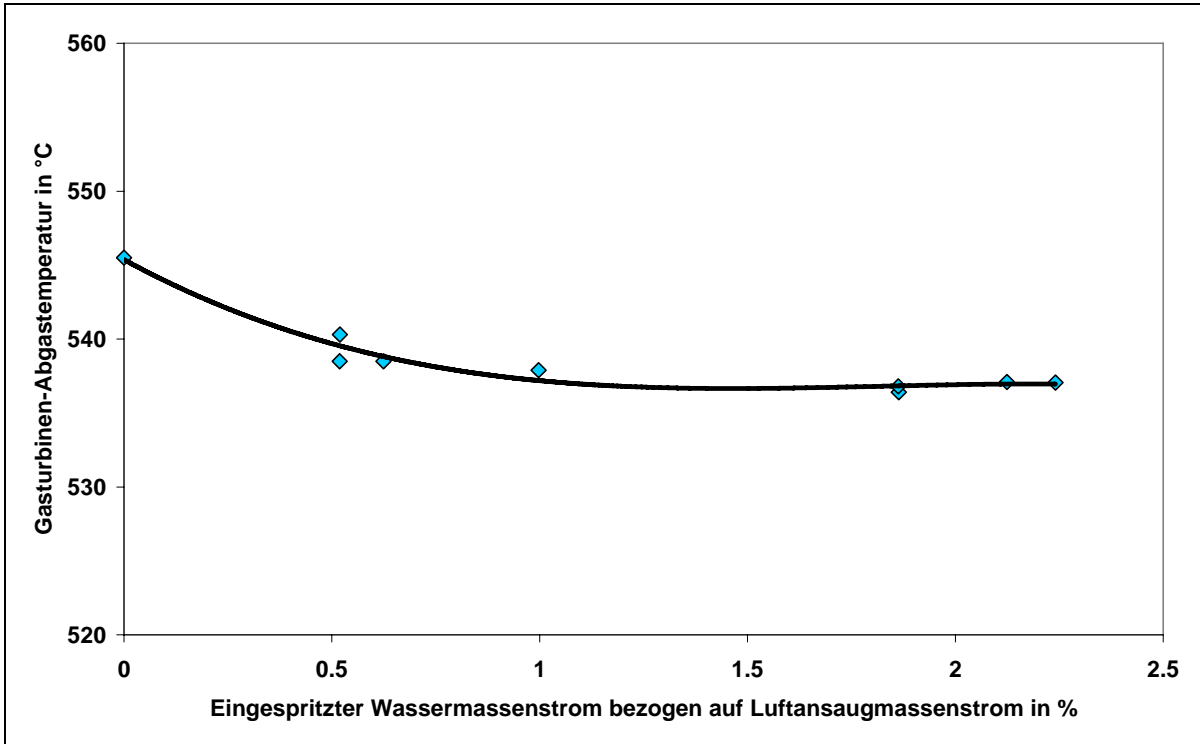


Bild 11: Gasturbinen-Abgastemperaturverlauf als Funktion der eingespritzten Wassermenge (nach Umrechnung auf Referenzbedingungen)

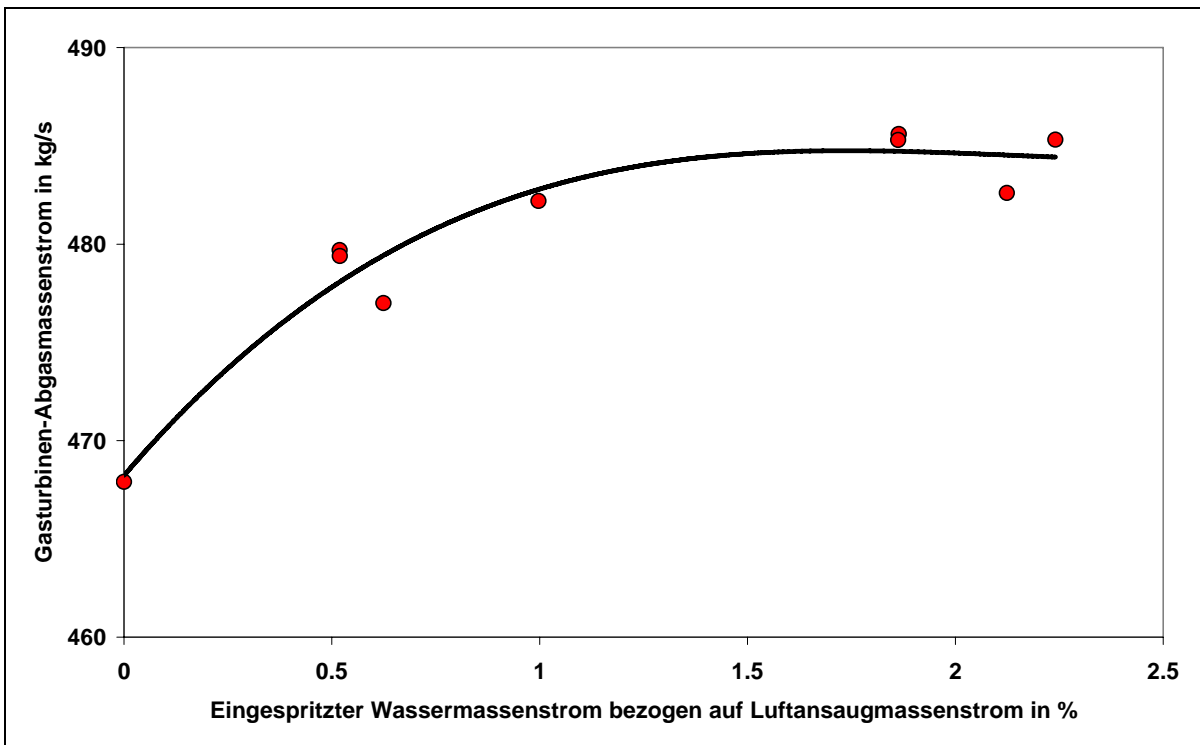


Bild 12: Gasturbinen-Abgasmassenstromverlauf als Funktion der eingespritzten Wassermenge (nach Umrechnung auf Referenzbedingungen)

Die Verläufe in Bild 13 deuten an, welche Leistungssteigerungen mit nasser Verdichtung über einen großen Bereich der Umgebungsrandbedingungen möglich sind. Die Daten basieren auf einer Messung bei ca. 30°C und 73% relativer Luftfeuchte, mit der ein Leistungsgewinn von 21 MW bei einer E-Klasse Gasturbine der Siemens AG erreicht werden konnte.

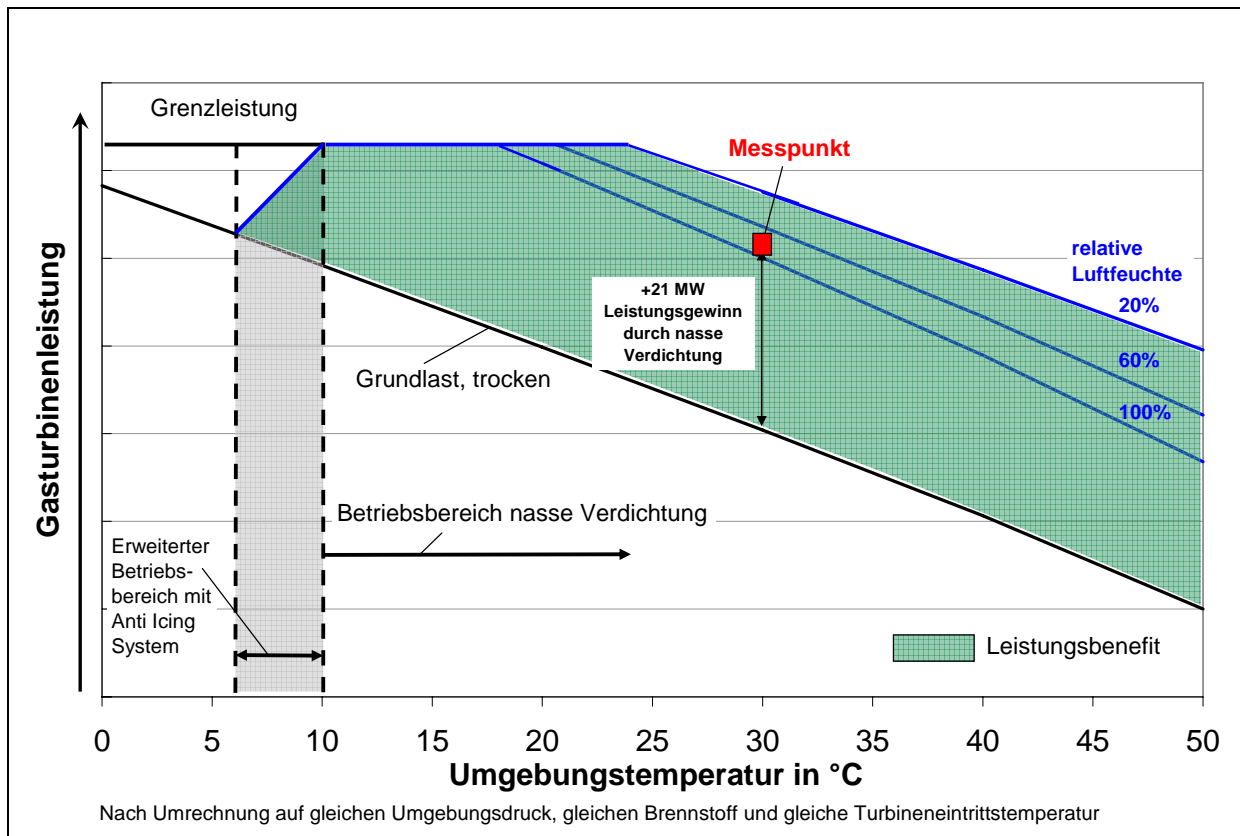


Bild 13: Validierte Gasturbinen-Leistungssteigerungen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen

5. Wirtschaftliche Bewertung der leistungssteigernden Maßnahmen am Beispiel des GUDs „SCC5-4000F 1S“

Die wirtschaftliche Bewertung der leistungssteigernden Maßnahmen geschieht anhand eines konkreten GUD-Kraftwerks. Dieses Kraftwerk mit der Bezeichnung „SCC5-4000F 1S“ besteht aus einer Gasturbine und einer Dampfturbine, die gemeinsam auf einer Welle sitzen und einen Generator antreiben. Der GUD-Prozess erreicht eine elektrische Leistung von rund 417 MW. Der Wirkungsgrad liegt bei gut 58 %.

Für dieses GUD-Kraftwerk wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 beschriebenen Leistungsbeschränkungen der jeweilige Gewinn des Kraftwerksbetreibers (Kundennutzen) ermittelt, der sich durch Einsatz der leistungssteigernden Maßnahmen im Abschreibungszeitraum ergibt. Es wird dabei von 1500 jährlichen Betriebsstunden mit Leistungssteigerung ausgegangen.

Der Gaspreis liegt bei 4,9 €/GJ, die Internal Rate of Return (IRR) bei 12 % und der Strompreis bei 5,6 ct/kWh bzw. 4,3 ct/kWh.

5.1 Verdunstungskühlung

Die Zusatzinvestitionen der Verdunstungskühlung betragen rund 0,5 Mio. Euro (siehe Bild 14). Dazu kommen noch Kostennachteile der Verdunstungskühlung für den Betrieb ohne Leistungssteigerung durch erhöhte Druckverluste im Ansaugbereich der Gasturbine, die durch Leistungs- und Wirkungsgradverluste über den Abschreibungszeitraum gesehen eine ähnliche Größenordnung erreichen wie die Anlagenkosten der Zusatzfeuerung. Die Kosten der Verdunstungskühlung liegen damit insgesamt bei knapp 1 Mio. Euro.

Bei niedrigen Umgebungstemperaturen, hier 15 °C, liegt der über den Abschreibungszeitraum aufsummierte Gewinn durch den Betrieb mit Verdunstungskühlung bestenfalls in einer ähnlichen Größenordnung wie die Kosten der Verdunstungskühlung. In den meisten Fällen werden bei derartig niedrigen Umgebungstemperaturen jedoch eher Verluste anfallen. Bei niedrigen Umgebungstemperaturen wird es daher im Allgemeinen keinen Sinn machen, eine Verdunstungskühlung zu betreiben. Erst ab Temperaturen von rund 25 °C und moderaten Luftfeuchten bis rund 60 % führt der Betrieb mit Verdunstungskühlung zu Gewinnen. Im günstigsten Fall, bei 35 °C und 30 % rel. Feuchte, kann der Gewinn bis zu rund 5 Mio. Euro betragen.

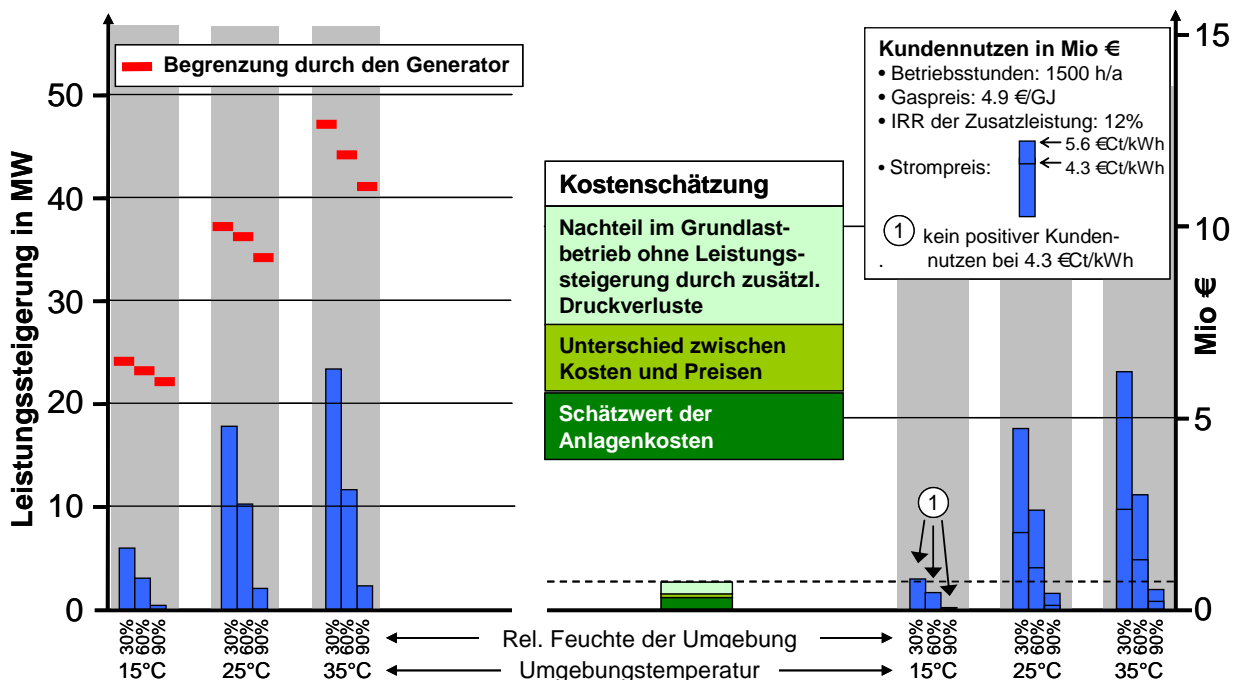


Bild 14: Gewinn/Kundennutzen der Verdunstungskühlung

5.2 Kompressionskältemaschine

Der Einsatz einer Kompressionskältemaschine zur Leistungssteigerung ermöglicht, wie die Verdunstungskühlung, erst ab Umgebungstemperaturen von rund 25 °C einen gewinnbringenden Betrieb, wenn gleichzeitig die rel. Feuchte der Umgebungsluft niedrig ist. Dies zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitskalkulation (Bild 15). Da die Anlagenkosten in Abhängigkeit von den jeweiligen Bedingungen (Kühlsystem, relative Feuchte, etc.) stark streuen, ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der Kompressionskältemaschine zu treffen. Es ist jeweils im Einzelfall zu prüfen, ob der Einsatz einer Kältemaschine wirtschaftlich Sinn macht oder nicht. Folgende Tendenz gilt jedoch: Je höher die Umgebungstemperatur und je niedriger die relative Feuchte, desto eher ist die Kältemaschine wirtschaftlich zu betreiben.

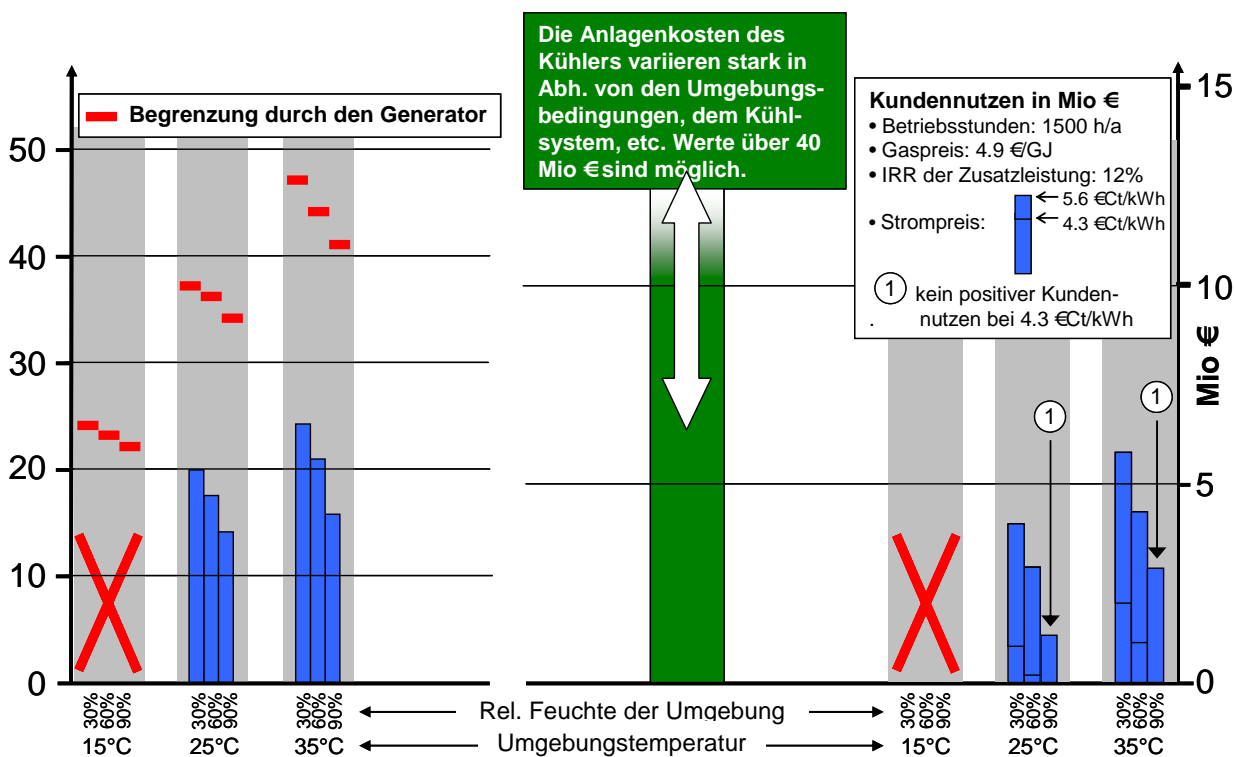


Bild 15: Gewinn/Kundennutzen der Kompressionskältemaschine

5.3 Nasse Verdichtung

Die nasse Verdichtung schneidet unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten deutlich besser ab als die Verdunstungskühlung und die Kältemaschine. Dies kann Bild 16 entnommen werden. Der Gewinn ist demnach nur schwach von den Umgebungsbedingungen abhängig und liegt bei den hier getroffenen Annahmen immer im positiven Bereich. Bei ausreichend hohen Spitzenlaststrompreisen (5 bis 6 ct/kWh) kann über die Abschreibungsdauer ein zusätzlicher Gewinn zwischen 5 und 10 Mio. Euro erzielt werden. Die Anlagenkosten der nassen Verdichtung liegen bei rund 1 Mio. Euro, wenn kein größerer Generator eingesetzt wird. Die Kostennachteile durch

Verschlechterung des Grundlastbetriebes ohne Leistungssteigerung bewegen sich in ähnlicher Höhe und sind auf zusätzliche Druckverluste und eine geringere Verfügbarkeit zurückzuführen.

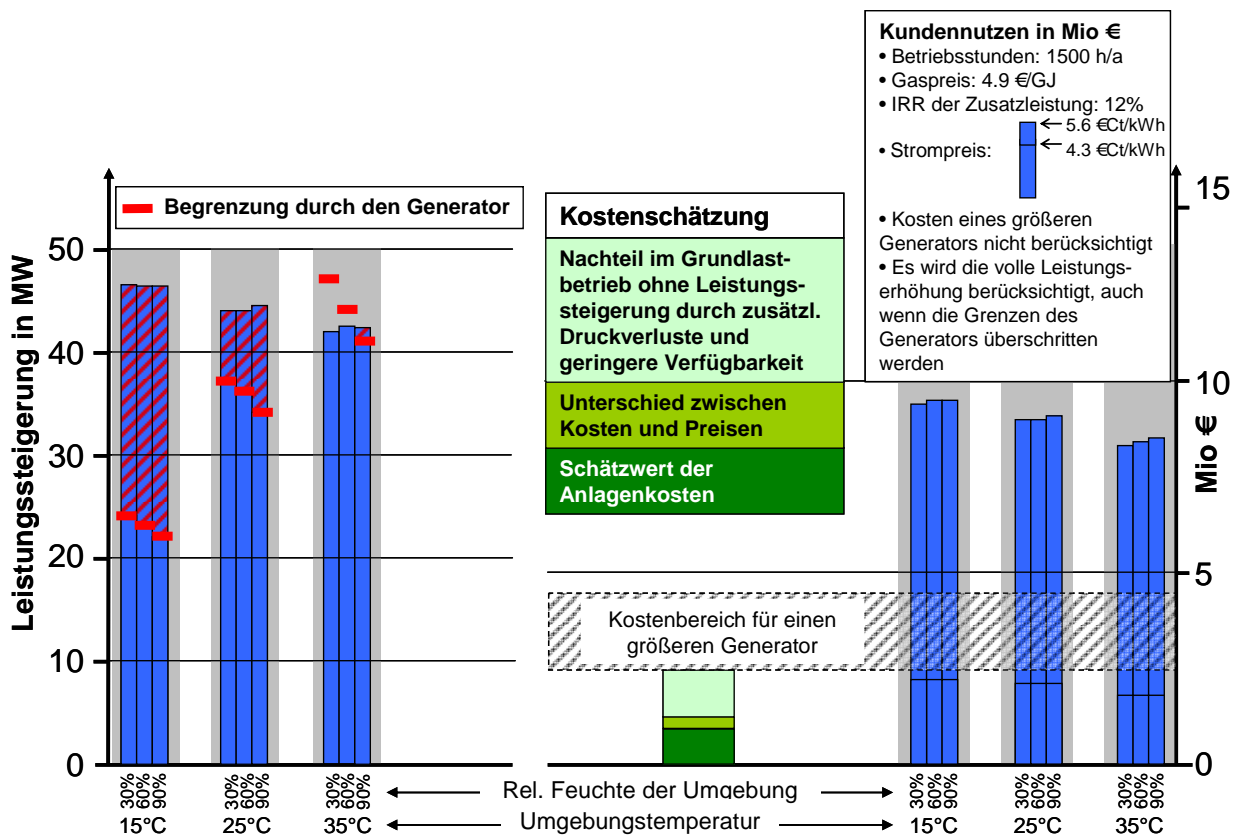


Bild 16: Gewinn/Kundennutzen der nassen Verdichtung

5.4 Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger

Auch die Zusatzfeuerung ermöglicht, wie die nasse Verdichtung, über das gesamte Spektrum der hier betrachteten Umgebungsbedingungen einen gewinnbringenden Betrieb. Der Gewinn ist mit 6 bis 7 Mio. Euro etwas niedriger als bei der nassen Verdichtung, jedoch sehr viel höher als bei der Verdunstungskühlung. Die Kosten der Zusatzfeuerung ohne Einsatz eines größeren Generators betragen 3 bis 4 Mio. Euro. Dazu kommen noch rund 0,5 Mio. Euro, die sich über die Abschreibungsdauer aus Verschlechterungen des Grundlastbetriebes ohne Leistungssteigerung durch zusätzliche Druckverluste im Abhitzedampferzeuger ergeben.

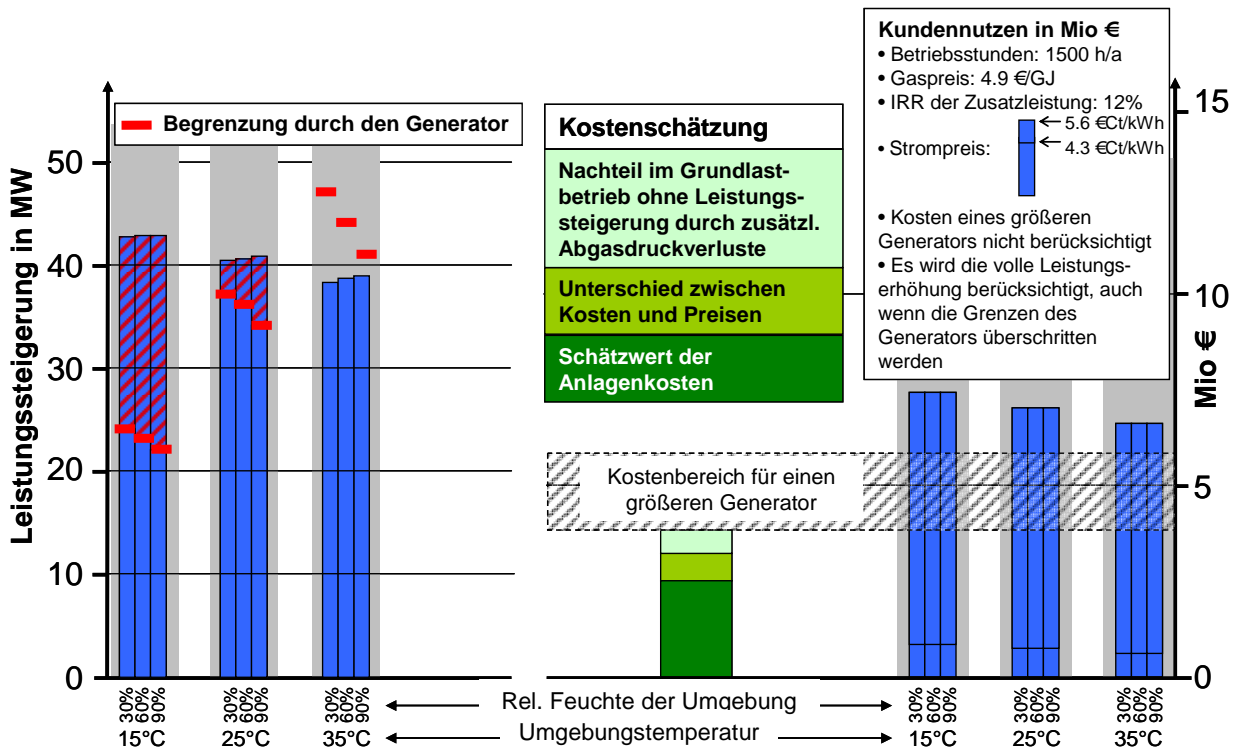


Bild 17: Gewinn/Kundennutzen der Zusatzfeuerung im Abhitzedampferzeuger

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail, FH Südwestfalen, Lindenstr. 53, 59872 Meschede, E-Mail kail@fh-swf.de

Dr.-Ing. Bert Rukes, Siemens AG, Energy Sector, Freyeslebenstr. 1, 91058 Erlangen, E-Mail bert.rukes@siemens.com

Dipl.-Ing. Wolfgang Märker, Siemens AG, Energy Sector, Freyeslebenstr. 1, 91058 Erlangen, E-Mail wolfgang.maerker@siemens.com

Dipl.-Ing. Frank Strobelt, Siemens AG, Energy Sector, Freyeslebenstr. 1, 91058 Erlangen, E-Mail frank.strobelt@siemens.com

Dipl.-Phys. Ingo Weber, Siemens AG, Energy Sector, Freyeslebenstr. 1, 91058 Erlangen, E-Mail ingo.iw.weber@siemens.com

Dr.-Ing. Klaus Werner, Siemens AG, Energy Sector, Mellinghofer Str. 55, 45473 Mülheim an der Ruhr, E-Mail kw.werner@siemens.com