



## Flexibilisierung des Betriebs kombinierter Gas- und Dampf- kraftwerke durch eine moderne, modellbasierte Steuerung

—

## Voraussetzung für Klimaschutz und erneuerbare Energien

Dipl.-Ing. Lutz Hanel

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik (SuA)

E-Mail: [lutz.hanel@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:lutz.hanel@ifk.uni-stuttgart.de)

Tel.: 0711 685 66208

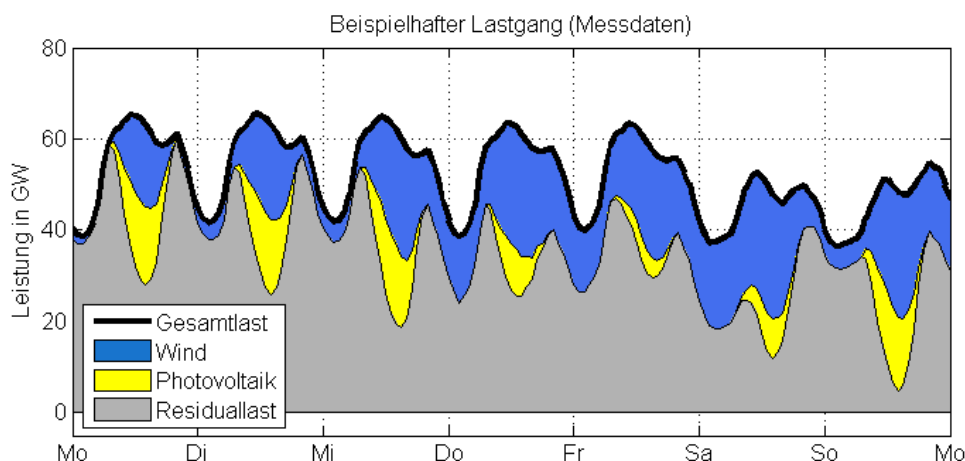
# Flexibilisierung des Betriebs kombinierter Gas- und Dampfkraftwerke durch eine moderne, modellbasierte Steuerung

## Voraussetzung für Klimaschutz und erneuerbare Energien

### 1 Flexible Kraftwerke für die Energiewende

Dank umfangreicher Maßnahmen, sowohl auf politischer als auch auf technischer Ebene, hat die Energiewende Fahrt aufgenommen. Der Klimaschutz wird vorangetrieben und profitiert von der deutlichen Zunahme der installierten Leistung erneuerbarer Energien. Insbesondere die Erzeugungskapazität aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Allen relevanten Studien zufolge ist mit weiterem Zubau zu rechnen, was vor dem Hintergrund der ambitionierten Ziele bezüglich der Reduzierung von Treibhausgasen notwendig sein wird.

Der Erfolg eines ambitionierten Vorhabens wie der Energiewende erfordert neben der detaillierten Untersuchung einzelner Komponenten auch die Betrachtung des „Gesamtsystems Energieversorgung“. Hierbei ist die Versorgungssicherheit von zentraler Bedeutung, die eng mit einem stabilen, zuverlässigen Betrieb der Stromnetze verknüpft ist. Da Strom derzeit nur in geringem Umfang speicherbar ist, muss die Erzeugung jederzeit an den aktuellen Verbrauch angepasst werden. Aufgrund der bevorzugten Einspeisung des Stroms aus erneuerbaren Energien und deren volatilen Charakters entstehen daraus steigende Anforderungen an den Betrieb konventioneller Kraftwerke. Dies wird beispielhaft durch Abbildung 1 verdeutlicht. Konventionelle Kraftwerke haben die Aufgabe, die sogenannte Residuallast, d.h. die Differenz zwischen Gesamtlast und Einspeisung aus erneuerbaren Energien, zu decken. Aufgrund der zunehmenden installierten Leistung nehmen die Schwankungen bereits heute deutlich zu, gleichzeitig werden die Gradienten größer.



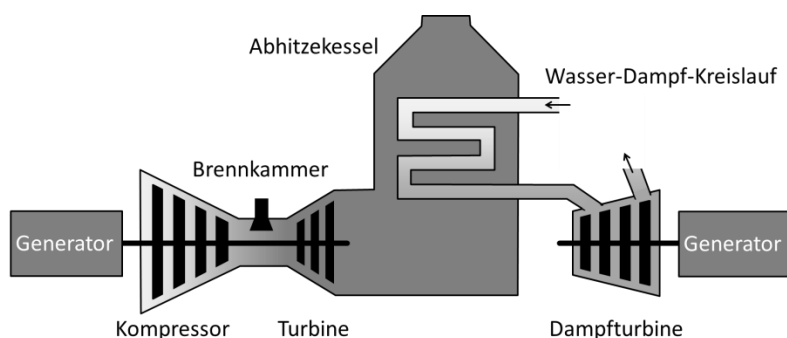
**Abbildung 1:**  
Einspeisung  
aus  
erneuerbaren  
Energien und  
Residuallast  
einer beispielhaften Woche  
aus 2014

Die zunehmenden Anforderungen an konventionelle Kraftwerke werden unter dem Begriff „Flexibilität“ zusammengefasst. Darunter fallen diverse Aspekte, insbesondere aber schnelle Leistungsänderungen in einem großen Leistungsband. Darüber hinaus sind konventionelle Kraftwerke unabdingbar als zuverlässiger Partner der erneuerbaren Energien durch die Bereitstellung von sogenannten „Systemdienstleistungen“ wie beispielsweise Regelleistung.

Um den reibungslosen Fortschritt der Energiewende zu gewährleisten, ist daher die Flexibilisierung konventioneller Kraftwerke zwingend notwendig, heute wie in absehbarer Zukunft. Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke, insbesondere auch Bestandsanlagen, sind dabei besonders geeignet, eine herausragende Rolle zu spielen und zum Klimaschutz beizutragen.

## 2 Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke

Gas- und Dampfprozess können vielfältig kombiniert werden. Die gängigste und im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Variante besteht in der Nutzung der Abhitze einer Gasturbine in einem nachgeschalteten Abhitzekegel, siehe Abbildung 2. Die Kombination ermöglicht um bis zu 15 Prozentpunkte höhere Wirkungsgrade als beispielsweise bei einem konventionellen Kohlekraftwerk. Mit den höheren Wirkungsgraden gehen auch deutlich geringere spezifische Emissionen einher, was vor dem Hintergrund von Klimaschutz und anvisierten Emissionszielen von Bedeutung ist. Zur Attraktivität kombinierter Gas- und Dampfkraftwerke trägt außerdem bei, dass diese vielfach zur Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden, was eine Brennstoffausnutzung von bis zu 90 % ermöglicht. Darüber hinaus weisen kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke technologiebedingt bessere Flexibilitätseigenschaften auf als andere Kraftwerke, sodass sie die ideale Ergänzung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien darstellen. Hieraus ergibt sich der Fokus auf diesen Kraftwerkstyp.



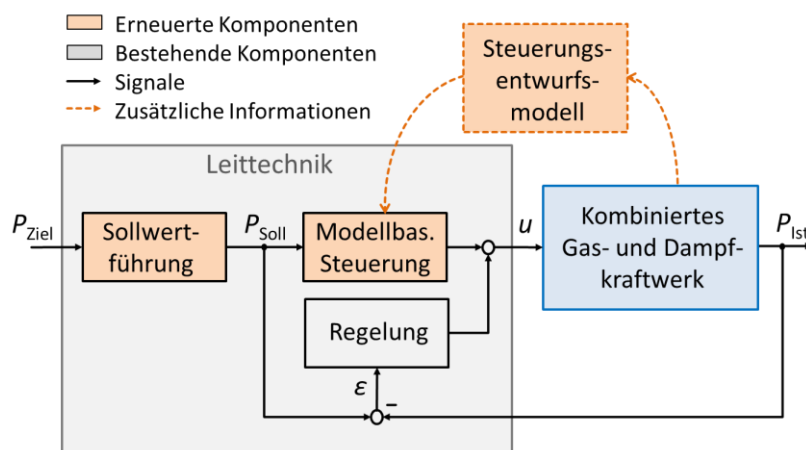
**Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines kombinierten Gas- und Dampfkraftwerks**

## 3 Neuartige modellbasierte Steuerung

Um Bestandskraftwerke und Neubauanlagen flexibler betreiben zu können, kommen eine Reihe von Maßnahmen in Frage. Viele davon beinhalten umfangreiche bauliche Maßnahmen, beispielsweise auf Feuerungsebene. Derartige Maßnahmen sind teuer und erfordern lange Stillstandszeiten, auch die Inbetriebnahme kann sich schwierig gestalten. Demgegenüber stehen Verbesserungen auf leittechnischer Ebene, wie die in dieser Arbeit

vorgestellte modellbasierte Steuerung. Die Vorteile liegen in den geringeren Kosten, kürzeren Stillstandszeiten bei der Umsetzung und der Möglichkeit, bei der Inbetriebnahme im Zweifelsfall auf die alten Regelstrukturen zurückgreifen zu können. Darüber hinaus bietet sich in diesem Bereich erhebliches Optimierungspotential, da die angewendeten regelungstechnischen Konzepte in ihrer Entwicklung nicht mit der Weiterentwicklung der Hardware Schritt gehalten haben.

Ein Gesamtregelkonzept besteht aus zwei wesentlichen Komponenten, einer Steuerung sowie einer Regelung. Mit der Kombination dieser beiden Komponenten ist es möglich, die beiden Anforderungen, die klassischerweise an Regelsysteme gestellt werden, zu bedienen: Zum einen sollen Störungen, die von außen auf den Prozess einwirken, unterdrückt werden. Regelungen sind aufgrund des Soll-Istwert-Vergleichs hierfür bestens geeignet. Zum anderen sollen Arbeitspunktänderungen möglich sein. Im Falle des Kraftwerks bedeutet dies, dass die Leistung möglichst schnell und präzise, aber auch effizient erhöht oder abgesenkt wird. Zwar ist dies durch eine Regelung möglich, bei hohen Anforderungen an die Lastwechseldynamik ist jedoch eine Steuerung zu bevorzugen, da eine Steuerung auf direktem Weg auf den Prozess einwirkt und ohne die Bildung eines Regelfehlers auskommt. Gerade im Bereich der Steuerung bestehen, insbesondere bei kombinierten Gas- und Dampfkraftwerken, Defizite, da durch die bisherigen Rahmenbedingungen nicht die Notwendigkeit hierfür gegeben war. Abbildung 3 zeigt für das kombinierte Gas- und Dampfkraftwerk, wie sich aus der Kombination von Steuerung und Regelung das Gesamtregelkonzept ergibt.



**Abbildung 3: Aufbau des regelungstechnischen Gesamtkonzeptes mit der modellbasierten Steuerung**

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine modellbasierte Steuerung entwickelt. Über das zu Grunde liegende Modell wird Wissen über das dynamische Verhalten des Prozesses in die Steuerung eingebracht, wodurch geeignete Stellgrößenverläufe berechnet werden können. Als Entwurfsmethodik kommt die sogenannte „flachheitsbasierte Entwurfsmethodik“ zum Einsatz. Dieses Konzept wurde Mitte der 90er Jahre erstmalig beschrieben und hat seit der Jahrtausendwende Anwendung in der Industrie gefunden. Im Kraftwerksbereich kommt die Methode dennoch bislang nicht zum Einsatz. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass das Konzept für kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke anwendbar ist und damit einen wertvollen Beitrag zur Energiewende leisten kann. Darüber hinaus wird in der Arbeit auch gezeigt, dass

die Methodik aufgrund der Ähnlichkeit der Prozesse auch für andere thermische Kraftwerke geeignet ist.

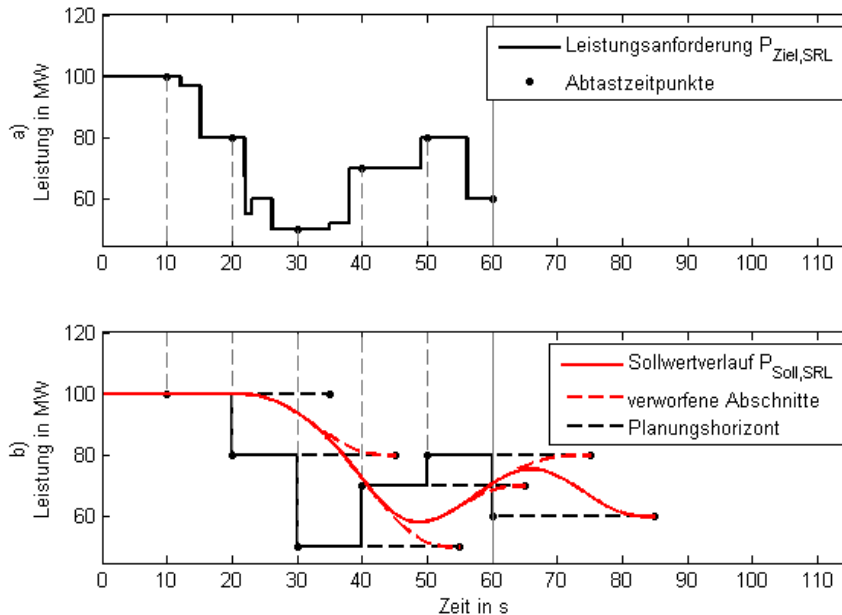
#### 4 Neuartige Sollwertführung

Ein weiterer Aspekt, der eng mit der Steuerung verknüpft ist, ist die Sollwertführung. Die Sollwertführung hat die Aufgabe, aus Zielwertvorgaben für die Leistung geeignete Sollwertverläufe für die Regelung und als Eingang der Steuerung zu bestimmen (siehe Abbildung 3). Nach dem Stand der Technik werden die Sollwerte auf einen maximalen Gradienten begrenzt. Bei schnellen Lastwechseln bedeutet dies, dass die Anlage einem rampenförmigen Sollwertverlauf folgen soll. Unabhängig vom verwendeten Steuer- und Regelungskonzept ist dies jedoch aufgrund der Trägheit des Prozesses nicht möglich, sodass es zwangsläufig zu Verzögerungen und schlechtem Regelverhalten kommt. Die zweite wesentliche Neuerung dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer neuen Art der Sollwertführung. Diese neue Sollwertführung ermöglicht die Berechnung geeigneter Sollwertverläufe, die an die Prozessdynamik angepasst sind. Hierbei kommen sogenannte Bézierkurven zum Einsatz.

Bézierkurven haben ihren Ursprung im Designbereich der Automobilbranche und wurden im Zusammenhang der Sollwertführung in dieser Form noch nicht eingesetzt. Mit dieser Methodik können weitgehend beliebig geartete Sollwertverläufe erzeugt werden, bestehende Freiheitsgrade können für Optimierungsaufgaben genutzt werden. So ist es möglich, die Sollwertverläufe an die Prozessdynamik anzupassen und auf diese Art zu besserem Lastwechselverhalten beizutragen. Darüber hinaus sind Bézierkurven gegenüber anderen Ansätzen numerisch vorteilhaft.

Zielwertvorgaben entstehen zum einen durch Fahrplanvorgaben. Wird zum Stundenwechsel beispielsweise mehr Leistung verkauft, wird der Sollwert entsprechend angehoben und das Kraftwerk erhöht seine Leistung. Zum anderen stellen Kraftwerke verschiedene Systemdienstleistungen bereit, unter anderem Sekundärregelleistung. Im Gegensatz zu fahrplanbedingten Leistungsänderungen wird Sekundärregelleistung (SRL) über ein kontinuierliches Signal vom Übertragungsnetzbetreiber zur Verfügung gestellt, siehe Abbildung 4 a). Daraus ergeben sich neue Anforderungen an die Sollwertführung, weil der Verlauf nicht mehr im Voraus geplant werden kann. Stattdessen muss, aufgrund des kontinuierlichen Charakters, in kurzen Abständen von einem bestehenden Verlauf aus neu geplant werden. Um diese Problematik zu lösen, wird ein Algorithmus zur prädiktiven Sollwertführung entwickelt. Die Funktionsweise ist beispielhaft in Abbildung 4 b) illustriert. Dabei sind zwei Parameter charakteristisch: Die zehntausendstel Abtastung ( $T_A = 10\text{s}$ ) des SRL-Signals wird um einen Planungshorizont ( $T_H = 25\text{s}$ ) verschoben und als Ziel eines neuen Abschnitts des Sollwertverlaufs verwendet. Bei jeder neuen Abtastung wird die Planung erneuert, wodurch die rot gestrichelt dargestellten, nicht weiter verfolgten Abschnitte entstehen sowie der insgesamt resultierende Verlauf (rot). Dadurch können nicht nur im

Voraus bekannte fahrplanbedingte Leistungsänderungen gehandhabt werden, sondern auch die kontinuierliche Anforderung von Sekundärregelleistung. Die Wahl der Parameter  $T_A$  und  $T_H$  ist für die Umsetzung geeignet anzupassen, die Beispielwerte dienen der besseren Anschaulichkeit.



**Abbildung 4:**  
**Beispielhafte**  
**Darstellung der**  
**prädiktiven**  
**Sollwertführung zur**  
**Bereitstellung von**  
**Sekundär-**  
**regelleistung**

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Um die Energiewende erfolgreich zu gestalten, ist ein umfassender Ansatz notwendig. Der reibungslose Ausbau der erneuerbaren Energien und insbesondere deren Integration in die Stromnetze kann nur gewährleistet werden, wenn effiziente, flexible Kraftwerke verfügbar sind. Neben der Deckung der Residuallast ist hier auch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen besonders relevant.

Emissionsarme kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke mit hohen Wirkungsgraden sind die ideale, notwendige Ergänzung der erneuerbaren Energien. Unter den diversen Maßnahmen zur Flexibilisierung des Betriebs überzeugen leittechnische Maßnahmen durch geringe Kosten sowie eine schnelle Umsetzung und sichere Inbetriebnahme.

Dieser Aspekt wird in der Arbeit mit der Entwicklung zweier Komponenten aufgegriffen, die jeweils über den Stand der Technik hinausgehen. Zum einen wird eine neuartige modellbasierte Steuerung entwickelt. Das noch junge Konzept der „flachheitsbasierten Steuerung“ wird dabei erstmalig für thermische Kraftwerke untersucht. Zum anderen wird neben der eigentlichen Steuerung auch eine verbesserte Sollwertführung vorgeschlagen, die auf dem neuen Ansatz der Bézierkurven basiert. Durch den prädiktiven Charakter ist es möglich, nicht nur fahrplanbedingte Leistungsänderungen zur Deckung der Residuallast zu fahren, sondern auch die zur Stabilisierung des Übertragungsnetzes notwendige Sekundärregelleistung bereitzustellen.