

Unverzichtbar im Sicherheitssystem von Wärmekraftwerken: Die Turbinenumleitstation

Bertram Gögelein, Oliver Kivelitz, Damian Kozub, Martin Piasecki

Anwendungsbereich von Turbinenumleitstationen

In einem Wärmekraftwerk stellt die Turbine das Herzstück im Prozess der Energiegewinnung dar. Die kinetische Energie des anströmenden Mediums (Gas oder Dampf) wird dort zuerst in Rotationsenergie und nachfolgend im Generator in elektrische Leistung umgewandelt. Der wirksame Schutz dieser sehr komplexen Komponenten vor jeglicher mechanischer Beschädigung stellt sowohl aus technischer wie auch wirtschaftlicher Sicht eine der Hauptaufgaben im Kraftwerksbetrieb dar. Aus diesem Grund ist zu jeder Turbinenstufe eine Umleitstation als Umführung vorgesehen (**Bild 1**).

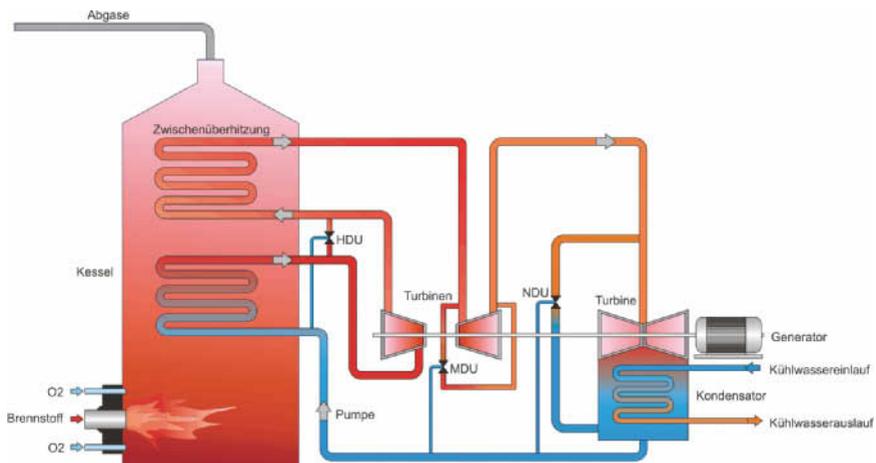


Bild 1: Der Einsatz von Umleitstationen in Wärmekraftwerken

Grundprinzip

Im Falle eines Lastabwurfes der Turbine – bedingt durch Schwankungen in der Stromabnahme oder einem Störfall – übernimmt eine Umleitstation den Dampf, umführt diesen in das nachfolgende System und übt so ihre Schutzfunktion aus. Je nach Turbinenstufe im Hoch-, Mittel- und Niederdruckbereich muss sie, entsprechend der Parameter des nachfolgenden Systems, Druck und Temperatur in vollem Umfang reduzieren. Beim An- und Abfahren werden ebenfalls durch die Umleitstation Unregelmäßigkeiten wie Temperatur- und Druckschwankungen ausgeglichen, was einen weiteren Aspekt zum Schutz der Turbine darstellt. Außerdem

bleibt der Dampfkreislauf dadurch unter vorgegeben Bedingungen ohne Unterbrechung aufrechterhalten und ein energie- und zeitaufwendiges Ab- und Anfahren (Trip) des Kessels kann vermieden werden. Der grundsätzliche Aufbau eines Dampfkreislaufes ist in allen Arten von Wärmekraftwerken – fossil gefeuerte Kraftwerken, Nuklearkraftwerken, Gas- und Dampfkraftwerken, Biomassekraftwerken und sogar Solarkraftwerken – prinzipiell vergleichbar.

Entsprechend der jeweiligen Betriebsparameter und des Rohrleitungssystems ist in der Konstruktion einer Umleitstation jedoch immer eine individuelle Auslegung nach Anlagenspezifikation erforderlich. Dabei resultieren länder- und betreiber-spezifische Sicherheitskonzepte in einer zusätzlichen Vielzahl von Konstruktionsvarianten. Dies schlägt sich beispielsweise in der geforderten Anströmungsrichtung, der Art der Stellantriebe, der Art der Heißdampfkühlung und anderen Merkmalen nieder.

Anforderungen im Kraftwerksbetrieb

Unabhängig von der jeweiligen Spezifikation werden aus Sicht der Praxis folgende grundlegende Anforderungen an Umleitstationen gestellt [1]:

- schnelle Dampfübernahmen (< 1 s)
- sichere und schnelle Heißdampfkühlung
- hohe Regelgenauigkeit
- zuverlässige Funktionalität
- Langlebigkeit
- geringe Schallentwicklung
- wartungseffiziente Konstruktionsweise für kurze Stillstandszeiten

Das folgende Kapitel stellt dar, wie diesen Anforderungen aus technischer Sicht begegnet werden kann und welche besonderen Problemfelder gelöst werden müssen. Schwerpunkte liegen dabei auf den Bereichen Druckreduzierung und Schallkontrolle sowie auf einem Vergleich verschiedener Varianten der Heißdampfkühlung. Der Beitrag schließt im letzten Kapitel mit einem Ausblick auf neuere Entwicklungen bei Turbinenumleitstationen im Einsatzbereich für Temperaturen größer als 620 °C.

Technische Merkmale

Eine Gemeinsamkeit aller Umleitstationen (bzw. Bypassstationen) besteht darin, dass sie eine Trennung zwischen den jeweils angrenzenden Drucksystemen im Kraftwerk darstellen. So ist beispielsweise die Hochdruck-Turbinenumleitstation (HDU) ein Bindeglied zwischen Hochdrucksystem und Mitteldrucksystem und steht damit parallel zur HD Turbinenstufe.

Prinzipiell bedeutet der Übergang zwischen angrenzenden Drucksystemen über eine Umleitstation, dass zwei Systeme mit großen Druck- und Temperaturunter-

schieden verbunden werden. Dies muss kontrolliert stattfinden, da ansonsten hohe Geschwindigkeits- und Geräuschbelastungen auftreten. Außerdem werden über die Verbindung der Systemgrenzen auch Sicherheitskonzepte umgesetzt, die einen Rohrleitungsteil vor einer Drucküberschreitung schützen.

Sicherheitskonzepte

Die Armatur, die als Verbindungsglied zwischen den Systemen steht, sollte bei auftretenden Störungen wie beispielsweise einem Energieausfall immer selbsttätig in eine sichere Stellung fahren, bei der das zu schützende System entlastet oder verblockt wird. Diese sogenannte „Fail-Safe-Position“, also „sichere Position bei Störung“ wird dann rein durch die Kraft des anströmenden Mediums erreicht.

Sicherheitskonzepte sind in verschiedenen Anlagen und in verschiedenen Ländern durchaus unterschiedlich. Die übliche Anströmung einer Dampfumformstation erfolgt seitlich zum Regelkegel und wirkt dadurch in Schließrichtung auf den Kegel. Dieser Effekt kann in einem Sicherheitskonzept beispielsweise zum Schutz vor Drucküberschreitung des nachfolgenden Systems genutzt werden und bedeutet: „Fail-Safe-Position: Zu“. Für eine HDU, die eine besondere Variante einer Dampfumformstation darstellt, verlangen Sicherheitskonzepte häufig, dass die zumeist geforderte „Fail-Safe-Position: Auf“ einerseits durch die Anströmung des Mediums unter den Kegel und andererseits durch eine mechanische Öffnungshilfe mit einer Feder ausgeführt wird. Das bedeutet, dass hier der Dampf unter den Kegel anströmt.

Manche Sicherheitskonzepte verlangen alternativ oder in Ergänzung eine sichere Vorhaltung des Betätigungsmediums (Luft oder Öl) im notwendigen Druckbereich durch entsprechende Bereitstellung in Druckspeichern für die notwendige Hilfsenergie.

Druckreduzierung und Schallkontrolle

In einer Umleitstation wird eine Reduzierung des Druckes und eine Entspannung des Dampfes über Druckstufen erreicht. Da dies direkte Auswirkungen auf die Schallentwicklung hat, müssen diese Themenbereiche zusammenhängend betrachtet werden. Beide Bereiche sind zudem eng mit dem Begriff der Strömungsgeschwindigkeit v verbunden.

Betrachtet man zwei unter Wasserdampf stehende Systeme, in denen die Drücke p_1 und p_2 und die Temperaturen T_1 und T_2 herrschen, wobei $p_1 \gg p_2$ ist, dann wird das Medium durch sein Ausgleichbestreben von der Seite mit dem höheren Druck p_1 zur Seite mit dem niedrigeren Druck p_2 strömen, wenn eine Verbindung zwischen den beiden Systemen besteht.

Der Massenstrom des strömenden Dampfes sowie seine Geschwindigkeit hängen dabei von der Dichte des Medium – als Funktion von Druck und Temperatur – und der in der Verbindung bestehenden freien Fläche A ab. **Bild 2** stellt ein derartiges System dar.

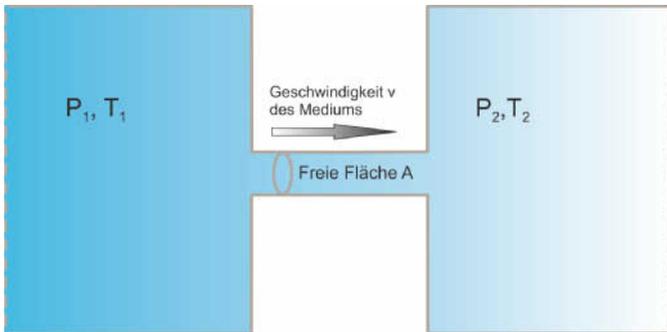


Bild 2: Druckausgleich zwischen zwei verbunden Systemen

Durch die Verbindung fließt das Medium mit der Geschwindigkeit v aus dem System 1 in das System 2 mit den entsprechenden Parametern. Aus dem Massenerhaltungssatz der Physik folgt die Kontinuitätsgleichung mit:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad \text{wobei} \quad \rho_{1/2} = f(p_{1/2}, T_{1/2})$$

In **Bild 3** ist dieser Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Massenstrom für inkompressible Medien schematisch angedeutet. Hier passt sich der konstant bleibende Massenstrom, der von dem großen Querschnitt zu dem kleinen strömt, dem Querschnitt A_2 an, indem seine Geschwindigkeit größer wird.

Das Verhalten von flüssigen und dampf- bzw. gasförmigen Medien ist dabei jedoch unterschiedlich. Die oben gezeigte Kontinuitätsgleichung gilt jedoch für Gase und flüssige Medien gleichermaßen. Im Folgenden soll speziell das Verhalten von Dampf – als Annäherung an ein ideales Gas – betrachtet werden. Entsprechend der Druckdifferenz zwischen zwei Systemen nimmt der Druckabbau ein unterkritisches ($p_2/p_1 > 0,546$), kritisches ($p_2/p_1 = 0,546$), oder überkritisches ($p_2/p_1 < 0,546$) Verhalten an.

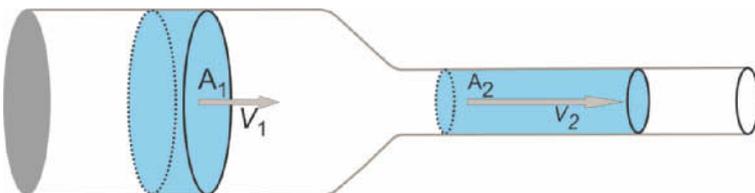


Bild 3: Strömung und Massenstrom

Beispiel: Ein freistehender Behälter, der unter Druck steht (zum Beispiel $p_1 = 10$ bar) hat eine Öffnung mit dem Durchmesser d . Durch diese Öffnung wird das Medium in die Umgebung ($p_2 = 1$ bar) ausströmen, wobei d die Menge des Massenflusses bestimmt. Durch das überkritische Druckgefälle kann der Druckabbau im engsten Querschnitt maximal kritisch stattfinden. Das bedeutet, dass der Druck in einem Schritt höchstens um den Druckreduzierfaktor 0,546 für Wasserdampf verkleinert werden kann.

Da hier jedoch das Medium frei in eine Atmosphäre von nur 1 bar austritt, bildet sich ein sogenannter Freistrah aus. Die Strömungsgeschwindigkeit nähert sich dabei im engsten Querschnitt der Schallgeschwindigkeit. Das Medium kann sich erst dahinter vollständig ausdehnen und es folgt dabei einem Stromlinienverlauf mit wiederkehrenden Verdichtungsstellen, entsprechend **Bild 4**.

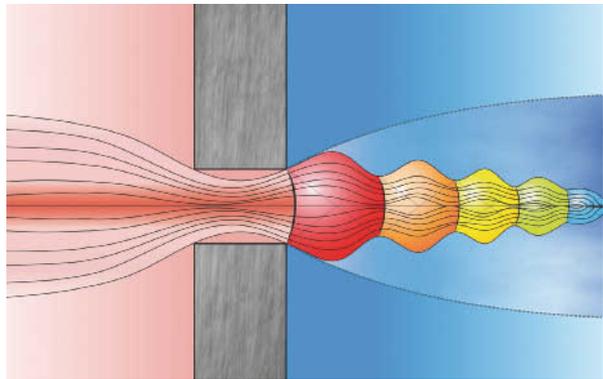


Bild 4:
Schematische Darstellung
eines Freistrahls

Ein solcher überkritischer Druckabbau ist mit hoher Geräusentwicklung, Vibrationen und Verschleiß verbunden. Aus diesem Grund sollte über den Verlauf der Druckreduzierung eine überkritische Entspannung vermieden werden. Durch sogenannte Druckstufen mit einzelnen Entspannungsräumen, in denen ein höherer Zwischendruck vorhanden ist, kann dies erreicht werden. Zusätzlich soll das Medium eine Richtungsänderung erfahren, bei der die kinetische Energie der bewegten Masse umgewandelt und somit die Geschwindigkeit vermindert wird. Bei unterkritischer Entspannung über vier Stufen verläuft der Druckabbau in unserem Beispiel (10 bar auf 1 bar) etwa wie in **Bild 5** dargestellt.

Zur Veranschaulichung soll ein weiteres Beispiel aus der Praxis dienen:

Eine Turbinenumleitstation fungiert als Bindeglied zwischen einem Hochdrucksystem mit den Parametern $p_1 = 125$ bar, $T_1 = 560$ °C und einem Mitteldrucksystem mit $p_2 = 32$ bar und $T_2 = 340$ °C bis 400 °C.

Um eine unterkritische Druckreduzierung erreichen zu können, müssten hier mindestens vier Druckstufen vorgesehen werden. Als technische Umsetzung einer Druckstufe gilt beispielsweise eine gelochte Scheibe oder Büchse, die den Dampf

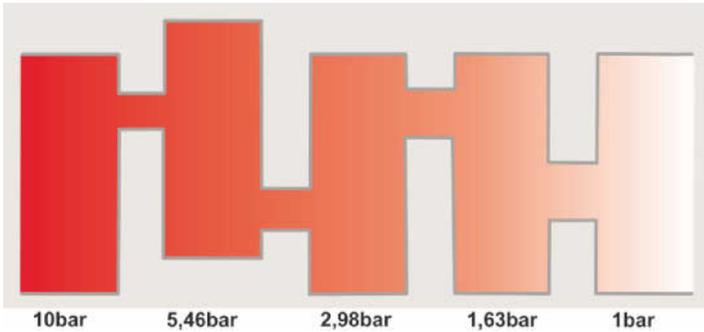


Bild 5: Druckabbau in 4 Stufen

zwingt, eine Bewegungsänderung zu vollziehen. Zwischen den Druckstufen befinden sich Kammern, die zur notwendigen Entspannung des Mediums dienen.

Dabei ist die gute Abstimmung der freien Flächen der einzelnen Druckstufen aufeinander entscheidend für die Druckreduzierung. Das bedeutet, dass gemäß der Volumenerweiterung, die bei einer Entspannung des Mediums eintritt, die exakt richtige Fläche zur Verfügung gestellt werden muss. In diesem Beispiel wurde anstelle von vier Druckreduzierungen bewusst eine Ausführung von sechs Druckstufen gewählt. Dadurch steigt der Druckreduzierfaktor von 0,63 auf 0,79. Dieses hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Schallentwicklung der Armatur, da ein höherer Faktor für eine besonders „leise“ Armatur sorgt. Denn je höher der Quotient des Druckes zwischen zwei Druckstufen P_{n+1} / P_n ist, desto geringer sind die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten von einer Stufe zur nächsten.

In **Tabelle 1** sind die Parameter des beschriebenen Druckabbaus angegeben. Dabei sind für die n-te Stufe jeweils die freie Fläche, die Temperatur, die Enthalpie und der Massenstrom angegeben. Der Massenstrom und die Enthalpie sind dabei Erhaltungsgrößen. Es wird daher auch bei der Drosselung von einem isenthalpen

Tabelle 2: Druckreduzierung über 6 Reduzierstufen

Reduzierstufe n	freie Fläche A [cm ²]	Druckreduzierung p _{Stufe} [bar(a)]	Temperaturstufe T [°C]	Enthalpie HD [kJ/kg]	Massenstrom M _{Punkt} [t/h]
	83	125,0	560,0	3502	280
1	105	125 x 0,79 = 98,8	549,7	3502	280
2	132	98,8 x 0,79 = 78,0	541,2	3502	280
3	167	78,0 x 0,79 = 61,6	534,3	3502	280
4	212	61,6 x 0,79 = 48,7	528,6	3502	280
5	291	48,7 x 0,79 = 38,5	524,1	3502	280
6	273	38,5 x 0,79 = 32,0	521,1	3502	280

Vorgang gesprochen. Den Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik folgend, mindert sich bei Dampf bei fallendem Druck auch die Temperatur, während das spezifische Volumen zunimmt.

Die Druckreduzierung wird technisch häufig mit aufeinander folgenden, gelochten Scheiben oder Zylindern realisiert. Die gelochte Fläche stellt dann den engsten freien Strömungsquerschnitt dar, der bei mehrstufiger Entspannung von Stufe zu Stufe zunimmt. Dabei sind die jeweiligen Flächenerweiterungen genau aufeinander im Hinblick auf die gewünschte Druckreduzierung abgestimmt.

Der Durchfluss oder der Druck kann so durch gezieltes Erweitern oder Vermindern der Flächen, beispielsweise durch eine steigende Spindel (Hub), reguliert werden. Um eine präzise Regelbarkeit zu erzielen, ist die Anordnung der Bohrungen dabei ein wesentliches Kriterium. Die Durchmesser der Bohrungen werden zudem möglichst klein gehalten, um so die Ausbildung von Freistrahlen zu vermeiden.

Grundsätzlich sollten zwei Varianten der Druckreduzierung unterschieden werden:

1. Vollständig mehrstufige Regelbarkeit und Druckreduzierung über alle Hubbereiche
2. Mehrstufige Druckreduzierung mit einstufiger Regelung

Im ersten Fall wird eine Lochkorbkombination aufeinander abgestimmt, bei der proportional zur Öffnung der freien Fläche in der ersten Stufe (abhängig vom eingestellten Hub) alle weiteren Flächen der nachfolgenden Stufen geöffnet werden. Dies ermöglicht einen unterkritischen Druckabbau über den gesamten Lastbereich und über alle Stufen (**Bild 6**).

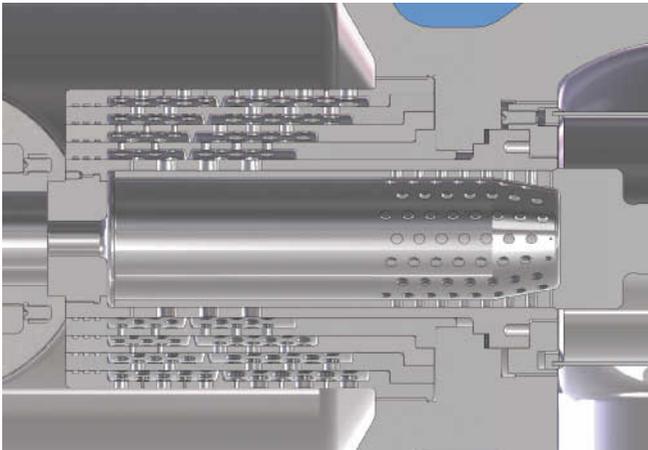


Bild 6: Geregeltes Reduziersystem aus Lochspindel, Sitzbüchse mit Lochkorb und vier weiteren Lochkörben. In den Lochkörben sind die einzelnen Kammern zu erkennen, welche die Entspannung des Mediums auf den entsprechenden Teillastbereich begrenzen (wichtig für Teilhübe)

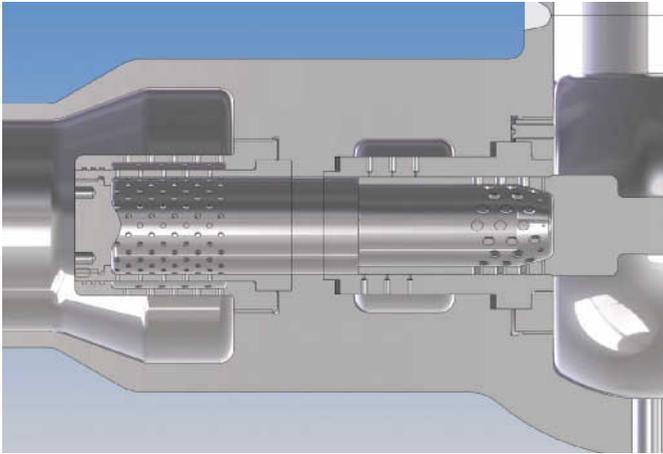


Bild 7: Mehrstufiges Reduziersystem (1-stufig regelbar) bestehend aus Lochspindel, Sitzbüchse und 2 Lochkörben. In den Lochkörben sind keine Kammern für Teillasten erforderlich

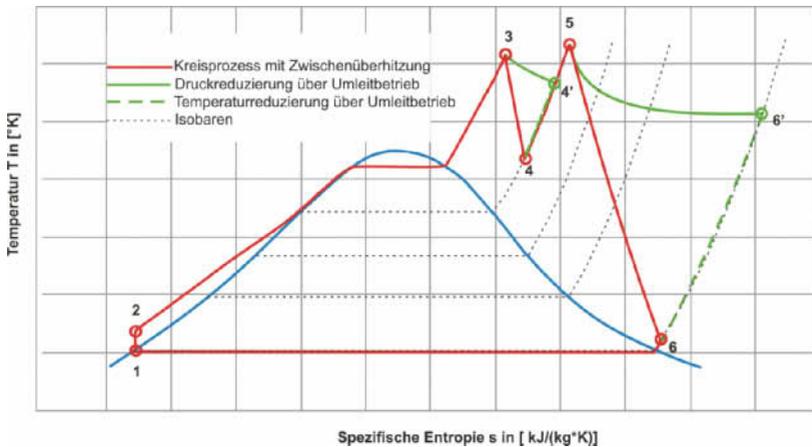
Im zweiten Fall wird mit der Spindel als erster Druckstufe die Menge geregelt. Alle weiteren Druckstufen sind als Lochkörbe oder als Lochscheiben immer vollständig geöffnet und fest angeordnet. Sie sind mit der Öffnung der freien Fläche in der ersten Stufe (dem Hub) nicht weiter variierbar (**Bild 7**).

Das hat zur Folge, dass zwar bei voller Öffnung der Spindel die Flächen optimal aufeinander abgestimmt sind, in Teillastbereichen jedoch die Fläche der ersten Stufe nur verkleinert wird und damit der Hauptdruckabbau an der ersten Stufe erfolgt. Dies kann zu höheren Mediumsgeschwindigkeiten und damit zu größerer Schallentwicklung führen.

Deshalb ist für Anwendungen, die häufiger im Teillastbereich gefahren werden sollen, Variante 1 (vollständige Regelung) vorzuziehen. Variante 2 (1-stufig regelbar) bietet jedoch deutliche Kostenvorteile. Unter Berücksichtigung einer Kosten – Nutzen Analyse ist daher abzuwägen, welche Bauform die Anforderungen der auftretenden Lastbereiche in geeigneter Weise erfüllt.

Heißdampfkühlung

Um den Bedingungen hinter der Turbine gerecht zu werden, bedarf es bei Umführung der Turbine neben der Druckreduzierung auch einer Kühlung des überhitzten Dampfes. Zur Verdeutlichung dieser Vorgänge wird der Kraftwerksprozess in **Bild 8** in einem T-s-Diagramm dargestellt. Durch die mechanische Leistung, die vom Dampf auf die Turbine übertragen wird, sinken gemäß der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten der Druck und die Temperatur. Dies ist im T-s-Diagramm durch die Entspannung in der Turbine mit Verrichtung von Arbeit dargestellt (3->4 und 5->6).



- 1->2 Druckaufbau (Pumpe)
- 2->3 Erhitzung, Verdampfung, Überhitzung
- 3->4 Expansion in der HD Turbine mit Verrichtung von technischer Arbeit
- 3->4' Druckreduzierung bei Umleitbetrieb über die HDU anstatt über die Turbine
- 4'->4 Heißdampfkühlung bei Umleitbetrieb über die HDU
- 4->5 Isobare Zwischenüberhitzung
- 5->6 Expansion in der MD Turbine mit Verrichtung von technischer Arbeit
- 5->6' Druckreduzierung bei Umleitbetrieb über die MDU anstatt über die Turbine
- 6'->6 Heißdampfkühlung bei Umleitbetrieb über die MDU
- 6->1 Kondensation

Bild 8: T-s Diagramm, Typischer Kreisprozess eines Kraftwerkes mit einfacher Zwischenüberhitzung (nach [2], S. 81 ff)

Die Entspannung durch eine Reduzierstation verläuft im T-s-Diagramm adiabat, das bedeutet ohne Wärmeverlust und ohne Verrichtung von technischer Arbeit. Dennoch ergibt sich bei der Druckreduzierung als isenthalper Prozess in einer Armatur auch eine Verringerung der Temperatur des Dampfes – jedoch nicht im gleichen Maße wie durch die Verrichtung von Arbeit an der Turbine. Der Alternativbetrieb über die Umleitstation anstelle der Turbine wird in **Bild 9** durch die grünen Linien angedeutet.

Technisch wird die Kühlung des Dampfes durch Kühlwasser erreicht, das bei der Einspritzung durch verschiedene Verfahren in feinste Tropfen dispergiert wird. Durch die Wärmeübertragung vom Dampf auf die Tropfen werden die Tropfen erhitzt und im Idealfall schnell und vollständig verdampft. Dadurch wird die gewünschte Temperaturreduzierung des Dampfes in Abhängigkeit von der Kühlwassermenge erreicht (Verdampfungsenthalpie). Die Menge des einzuspritzenden Wassers kann mit Hilfe einer Temperaturmessung des Austrittsdampfes geregelt werden. Außerdem werden auch sogenannte Enthalpieregulungen eingesetzt, bei denen durch die gemessenen Parameter am Eintritt (Druck, Temperatur und Mas-

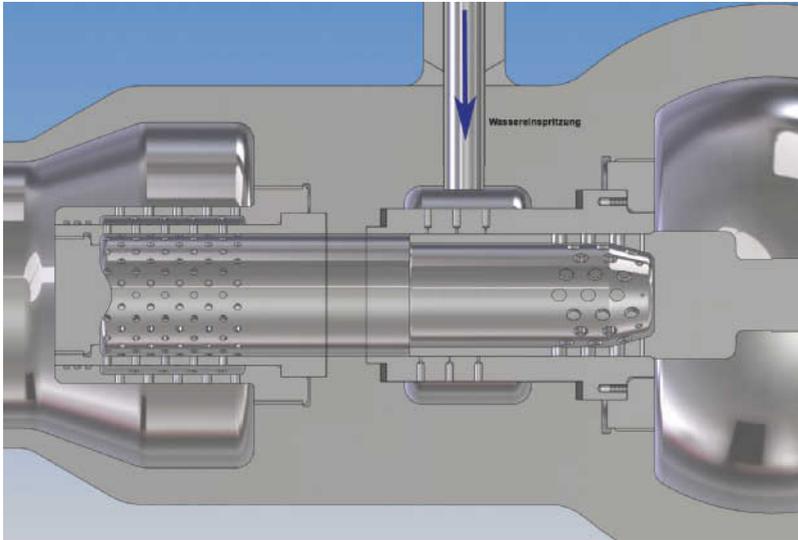


Bild 9: Die integrierte Wassereinspritzung wird durch den blauen Pfeil angedeutet

senstrom), sowie der gewünschten Parameter am Austritt die rechnerisch notwendige Wassermenge über eine Enthalpiebilanz ermittelt wird und das Einspritzregelventil entsprechend der Ventilcharakteristik in die Position für den erforderlichen Wassermengenstrom gebracht wird.

Die Verdampfungszeit der einzelnen Tropfen ist dabei im Wesentlichen von der verfügbaren Oberfläche der Tropfen und dem möglichen Wärmeübergang abhängig.

Der Wärmeübergang kann in allgemeiner Form beschrieben werden:

$$Q = A \cdot \alpha \cdot (T_D - T_W) \cdot \Delta t \quad [\text{J}]$$

Q: Übertragene Wärmemenge [J]

α : Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]

A: Betrachtete Kontaktfläche [m^2]

T_D, T_W : Stofftemperaturen der Medien Dampf und Wasser [K]

Δt : Betrachtetes Zeitintervall [s]

Die Maximierung der Tropfenoberfläche A im Verhältnis zur Masse der Wassertropfen wird durch die Minimierung der Tropfengröße erreicht. Die Maximierung des Wärmeübergangs α wird durch die Maximierung der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Dampf erreicht. Zwar ergibt die Formel dass eine möglichst

kalte Wassertemperatur einen größeren Kühleffekt hat, jedoch wird der hauptsächlichste Anteil der Wärmeaufnahme durch die Verdampfungsenthalpie des Wassers bewirkt. Eine kalte Wassertemperatur hat dabei aufgrund der temperaturabhängigen Auswirkungen auf die Oberflächenspannung einen negativen Einfluss auf die Dispergierung der Tropfen. Außerdem wird die Verweilzeit der Tropfen vor der Verdampfung erhöht, die bei Auftreffen auf der Innenseite der Rohrwand erhöhte Spannungen hervorrufen. Ein weiterer Nachteil sind höhere Spannungen an der Eindüsung, wo Dampf und Wasser unmittelbar zusammentreffen. Zur Vermeidung dieser Effekte sollte daher die Wassertemperatur für die Heißdampfkühlung $T_W > 120 \text{ °C}$ betragen.

Bei Umleitstationen kommen in der Regel drei verschiedene Verfahren zur Einspritzung des Kühlwassers zwecks Heißdampfkühlung zum Einsatz:

1. integrierte Einspritzung
2. nachgeschaltete Druckzerstäubung
3. nachgeschaltete, treibdampfunterstützte Zerstäubung

Integrierte Einspritzung

Bei der integrierten Einspritzung wird in einer mehrstufigen Druckreduzierung das Wasser nach der ersten oder zweiten bzw. spätestens vor der letzten Druckstufe in der Regel unterhalb vom Sitz in die Sitzbüchse eingespritzt (s. Bild 9).

An der Einspritzstelle tritt dabei die höchste Geschwindigkeit im Verlauf der Druckentspannung auf. Nachdem das Wasser und der Dampf sich dort vermischen konnten, folgen weitere Druckstufen. Beim Durchtritt durch die vielen einzelnen Bohrungen der Lochdrosselkörper erhöht sich die Geschwindigkeit erneut, wobei Dampf und Wasser während des Entspannungsprozesses so stark verwirbelt werden, dass beim Austritt in die Rohrleitung bereits ein homogenes Heißdampfgemisch ohne Wassertropfen zur Verfügung steht.

Vorteile der integrierten Einspritzung liegen in der sehr schnellen Verdampfung, die kurze Auslaufstrecken aus der Armatur ermöglicht. Außerdem werden so die Komponenten des nachfolgenden Rohrsystems vor Abrasion durch Wassertropfen oder Schädigung durch unerwünschte Temperaturschocks geschützt. Weiterhin ermöglicht diese Variante eine sehr exakte und schnelle Regelung, insbesondere der Temperatur. Die wirtschaftlichen Vorteile schließlich liefern weitere Argumente für diese Lösung im Vergleich zu anderen Einspritzvarianten.

Nachteile der integrierten Einspritzung ergeben sich aus einer höheren Belastung der Innenteile der Armatur. Auftreffende Wassertropfen bewirken einen höheren Verschleiß und erfordern somit eine höhere Austauschfrequenz der Innenteile. Durch die abrasiven Eigenschaften des Wassers, aber auch durch die thermische Belastung von den kälteren Wassertropfen bei heißer Dampfumgebung, ist daher die integrierte Einspritzung eher für Aufgaben mit zeitlich begrenzten Betriebszeiten sinnvoll. (Anfahren, Abfahren sowie Umleitbetrieb im Trip der Turbine bei Grundlastkraftwerken).

Für Anwendungen mit hohen Dauerbetriebszeiten oder starken Wechsellasten, wie sie beispielsweise in GuD-Kombikraftwerken üblich sind, sind die folgenden Einspritzsysteme besser geeignet.

Nachgeschaltete Druckzerstäubung

Bei der **nachgeschalteten Druckzerstäubung** wird hinter der Druckreduzierung das Wasser mittels einer speziellen Zerstäuberdüse möglichst Zentral in die Rohrleitung bzw. den Dampf eingebracht (**Bild 10**). Dabei kommen beispielsweise Hohlkegeldüsen oder Federspaltdüsen zum Einsatz.

In der **Hohlkegeldüse** wird das Wasser durch die spezielle Geometrie der Düse in einen Drall gebracht, so dass der Wasserstrahl durch die Zentrifugalkraft kreisförmig in feine Tropfen zersprüht wird. Allgemein gilt, dass bei steigender Druckdifferenz zwischen dem eingespritzten Kühlwasser und dem Dampf die einzelnen Tropfendurchmesser kleiner werden (Druckdifferenzen von 3 bis 40 bar zwischen Wasser und Dampf).

Bei der **Federspaltdüse** wird abhängig von Druck und Durchsatz ein Spalt wassergesteuert variabel gehalten. Dazu wird eine Feder verwendet, die eine allzeit optimierte Zerstäuberfläche ermöglicht (Druckdifferenzen von 0,8 bis 35 bar).

Vorteile der Druckzerstäubung bestehen darin, dass innen liegende Einbauten der Armatur nicht in Berührung mit Wassertropfen kommen, was ihre Standzeiten wesentlich erhöht. Darüber hinaus ermöglicht der modulare Austausch der Düsen

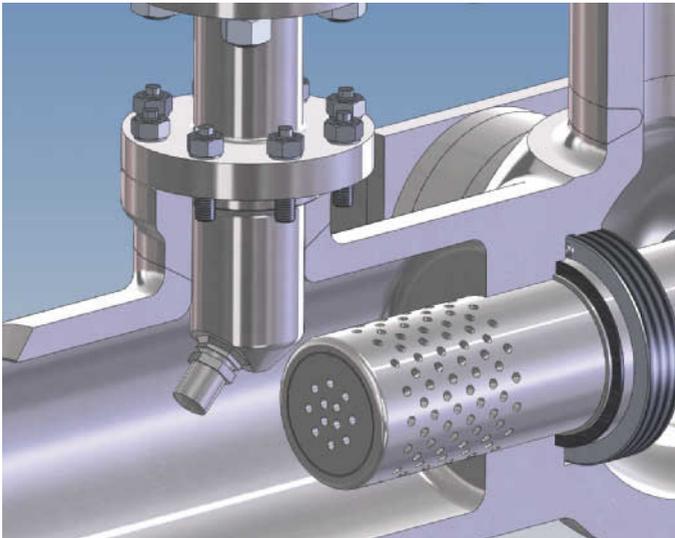


Bild 10: Nachgeschaltete Druckzerstäubung

eine punktuelle Eingrenzung von Verschleißteilen. Insgesamt sind Druckzerstäuberdüsen mit geringeren Herstellungskosten als Treibdampfdüsen verbunden.

Nachteile der Druckzerstäubung resultieren daraus, dass das mögliche Einsatzgebiet für zu kühlende Temperaturen in Bereichen von weniger als 50 °C oberhalb der Sättigungstemperatur als kritisch anzusehen ist. Auch ist ein Lastabfall unter 20 % des Maximaldurchsatzes bei Druckzerstäubungsdüsen nicht zu empfehlen, da in beiden Fällen der Anteil des komplett verdampften Einspritzwassers sinkt. In der Rohrleitung zurückbleibendes Wasser kann Spannungen verursachen oder sogar Wasserschläge auslösen. Außerdem steht das notwendige Wasser für die Kühlung dann nur eingeschränkt zur Verfügung.

Treibdampfkühlung

Bei der Treibdampfdüse wird die Zerstäubung des Wassers durch gesondert zugeführten Zerstäuber Dampf bzw. Treibdampf unter hohem Druck erreicht. Der Treibdampf wird mit sehr hoher Geschwindigkeit in der Düse an der Einspritzstelle vorbeigeführt und zerreißt dabei das eingespritzte Wasser sofort in feinste Tropfen. Die Treibdampfdüse wird häufig direkt hinter einer Druckreduzierung angeordnet (**Bild 11**). Dadurch kann der zugeführte Treibdampf hochdruckseitig entnommen werden und unter optimierten geometrischen Verhältnissen zu sehr hohen Relativgeschwindigkeiten zwischen Wassertropfen und Dampf führen.

Vorteile der Treibdampfkühlung sind eine besonders effiziente Verdampfung des eingespritzten Wassers mit kurzen Verdampfungsstrecken und dadurch bedingt guten Messmöglichkeiten der Temperatur. Innenteile werden von eingespritztem Wasser nicht berührt, da die Treibdampfkühlung hinter der Druckreduzierung an-

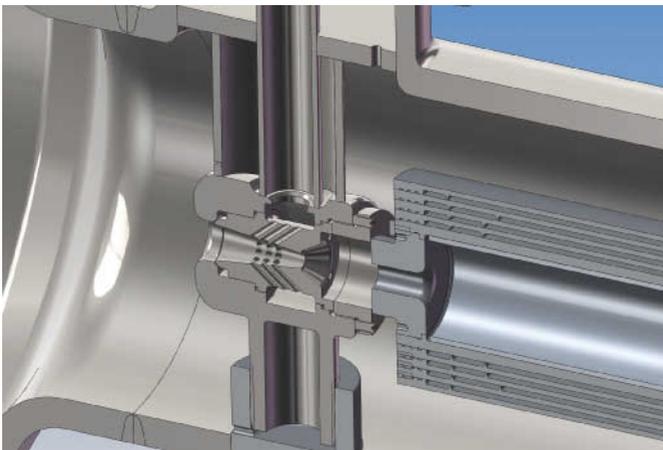


Bild 11: Treibdampfkühlung in einer BOMABA-Umleitstation

geordnet wird. Dadurch ergeben sich geringe Belastungen aller inneren Bauteile und des Rohrleitungssystems. Ein weiterer wichtiger Vorteil sind die möglichen Fahrweisen mit Minimaldurchsätzen von 5 % der maximalen Menge oder sogar weniger, ohne maßgebliche Einschränkung der Verdampfung des Einspritzwassers. Außerdem kann bis in die unmittelbare Satttdampfnahe (ca. 1 bis 5 °C Überhitzung) gekühlt werden.

Nachteile der Treibdampfkühlung liegen darin, dass große Einspritzwassermengen nur mit relativ hohem Aufwand bewältigt werden können. Für alle Varianten ist darüber hinaus die notwendige Länge der ungestörten Verdampfungsstrecke zu beachten, das heißt es sollten sich keine weiteren Einbauten in der Strömung in der unmittelbaren Umgebung hinter der Einspritzung befinden.

Auch wenn die notwendige Länge der Verdampfungsstrecken bei einer Treibdampfkühlung deutlich unterhalb der Verdampfungsstrecken einer reinen Druckzerstäubung liegt, ist sie dennoch länger als bei einer integrierten Einspritzung. Zudem ist eine Treibdampflösung kostenintensiver als andere genannte Varianten.

Weitere technische Aspekte

Neben den Aufgaben der Druckregulierung und Temperatursenkung sollen weitere technische Aspekte der Konstruktion von Umleitstationen umrissen werden. Dazu zählen die Dichtheit des Sitzes, der Einsatz von Packungen im Hochtemperaturbereich sowie die Reaktionszeit der Antriebe.

Sitzdichtheit

Es gibt verschiedene Varianten der Regelung, wobei insbesondere im Hinblick auf die Dichtheit des Sitzes teilweise hohe Anforderungen an die Leckage eingehalten werden müssen.

Der Sitz muss gewährleisten, dass der Bereich hinter einer Armatur frei von Medium gehalten wird. Da im Folgenden nicht auf alle verschiedenen Konzepte zur Sitzdichtheit eingegangen werden kann, wird hier exemplarisch die Grundthematik umrissen.

Die zugleich sicherste Methode zur Gewährleistung der Sitzdichtheit besteht darin, dass ein Absperrventil oder ein Keilplattenschieber vor der Umleitstation in die Rohrleitung eingebaut wird. Aus Kostengründen bietet sich jedoch auch häufig eine Kombination aus Absperr- und Regelventil an. Insgesamt gilt es immer zu beachten, dass eine Regelarmatur auf lange Sicht nur eingeschränkt die Aufgaben eines Absperrventils übernehmen kann. Durch hohe Geschwindigkeiten im Sitzbereich treten dort große Belastungen auf. Berücksichtigt werden muss, dass die tatsächliche Sitzfläche (Abdichtfläche) zum Beispiel bei einem Sitzdurchmesser von 136 mm gerade 6,5 cm² beträgt. Dies entspricht einem Quadrat mit einer Kantenlänge von etwas über 2,5 cm. Bei Druckdifferenzen von etwa 50 bar entspricht dies einer Kraft von 32 kN, bzw. einer Masse von 3,2 t. Zusätzlich ist die Umgebung eines Hochtemperaturbereichs mit Temperaturen von zum Teil über 600 °C zu beachten.

Somit wird deutlich, dass Materialien mit hochfesten Eigenschaften zur Konstruktion des Sitz- und auch Spindelbereichs benötigt werden. Für Temperaturen bis 400 °C eignet sich hier beispielsweise der Werkstoff 1.4057 während für Temperaturen bis 600 °C zum Beispiel der Werkstoff 1.4923 Verwendung findet. In noch höheren Temperaturbereichen kann unter anderem der Werkstoff 1.4910 eingesetzt werden.

Ein weiterer Aspekt bei Armaturen mit großen Dimensionen sind die Kräfte zur Betätigung der Spindel. Insbesondere bei hohen Drücken und großen Sitzdurchmessern können für das Öffnen der Spindel enorme Kräfte notwendig werden. Um diese Öffnungskräfte zu reduzieren eignen sich sogenannte druckentlastete Ausführungen der Spindel. Dabei wird oberhalb der Spindel ein Entlastungsraum geschaffen der mit einer Packung zur Hochdruckseite hin abgedichtet wird. Dadurch bekommen die druckzugewandte und die druckabgewandte Seite der Spindel die gleiche Druckbeaufschlagung und gleichen sich gegenseitig aus. Dies reduziert die notwendigen Antriebskräfte zwar wesentlich, verlangt allerdings anspruchsvollere Abdichtungen (Packungen) am Spindelkopf. Diese Lösung kann jedoch über einen längeren Zeitraum eine steigende Undichtigkeit der Armatur verursachen. Eine Alternative hierzu stellt die Abdichtung mit einem Kolbenring dar, bei der die Entlastungsbohrung durch einen sogenannten Vorhubkegel im geschlossenen Zustand abgedichtet wird (**Bild 12**).

Dabei wird zunächst ein kleiner Sitz im Bereich A geöffnet, so dass der Druckausgleich im Raum C stattfinden kann. Danach kann der große Sitz im Bereich B mit geringeren Antriebskräften geöffnet werden. Hier ist zur Abdichtung des Raumes C nur ein Kolbenring erforderlich. Packungen, die bei kontinuierlichen Ent-

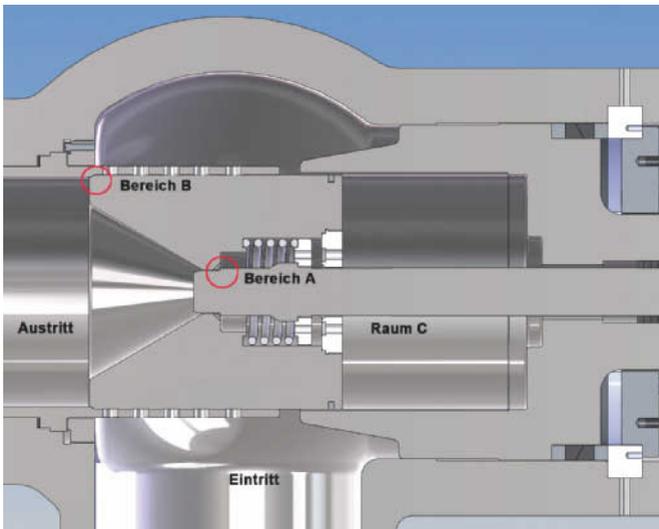


Bild 12: Spindelentlastung mit Vorhubkegel

lastungsbohrungen eingesetzt werden, entfallen dabei ganz. Allerdings vergrößert sich bei dieser Lösung der Hub und die Fertigung des Spindelkopfes gestaltet sich aufwendiger.

Packungen im Hochtemperaturbereich

Ein wichtiges Modul einer Umleitstation ist die Spindelabdichtung. Hier kommen Dichtungen aus Graphit, speziellen Legierungen oder Verbundwerkstoffen zur Verwendung. Standardmäßig können Packungen derzeit bis 500 °C eingesetzt werden. Bei höheren Temperaturen sind folgende Aspekte zu beachten:

Obwohl Graphit eine hohe Beständigkeit auch oberhalb von 700 °C aufweist, wurde jedoch beobachtet, dass es ab Temperaturen von über 500 °C in Verbindung mit Luftsauerstoff in einen gasförmigen Zustand übergeht und seine Dichteigenschaften verliert. Daher sollte bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 500 °C darauf geachtet werden, dass entweder die Oberseite der Packung vor Luftsauerstoff geschützt wird oder der Packungsbereich gesondert auf maximal 500 °C gekühlt wird. In der Praxis wird in der Regel jedoch die lokale Anordnung der Dichtung so gewählt, dass bereits eine deutliche Abkühlung stattgefunden hat, das heißt dass keine kritischen Temperaturen an der Dichtung mehr auftreten.

Auch ist das Abdicht- bzw. Verschleißverhalten der Spindel bei Oberflächenbehandlungen (nitriert, boriert usw.) Gegenstand aktueller Forschungen. Sowohl im konventionellen als auch im Hochtemperaturbereich ergibt sich eine Reihe aktueller Forschungsfragen zum Einsatz von Packungen und Spindelabdichtungen.

Reaktionszeiten (Antriebe)

Die Umleitstation vermag kurzfristig 110 % des im System vorhandenen Dampfes umzuleiten. So kann die Turbine – falls erforderlich – augenblicklich entlastet werden (Turbinentrip) und wie oben beschrieben ohne Dampfverlust gegen Beschädigung geschützt werden. Um diese kurzfristigen Reaktionszeiten der Umleitstation zu ermöglichen, wird ein leistungsfähiger Mechanismus erforderlich, der den Dampfweg zur Turbine verschließt und den Bypass öffnet. Die Umleitstation wird dazu mit pneumatischen oder hydraulischen Antrieben ausgestattet, wobei pneumatische Antriebe Stellzeiten im Sekundenbereich und hydraulische Antriebe im 10-tel Sekundenbereich haben.

Ausblick: Anforderungen an Umleitstationen in modernen Wärmekraftwerken

Wie zuvor erwähnt, ist der Prozess der Kraftwerksentwicklung im Hinblick auf die Zukunftsfähigkeit bestehender Kraftwerkstechnik durch Aspekte der Optimierung des Brennprozesses geprägt. Mit verringertem Brennstoffeinsatz soll dabei eine größere elektrische Energiemenge erzeugt werden. Ebenso steht eine Leistungssteigerung bzw. Wirkungsgraderhöhung einzelner Kraftwerke und die hiermit verbundene Verringerung der CO₂-Emissionen im Fokus aktueller Entwicklungen.

Auch wenn derzeit eine deutliche Zunahme des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung, ausgemacht werden kann, sind die Hauptenergielieferanten immer noch konventionelle Kraftwerke auf Basis von Mineralöl, Erdgas und Steinkohle sowie Kernkraftwerke. Da also auf lange Sicht fossile Brennstoffe weiterhin einen Hauptbeitrag zur Energiegewinnung leisten werden, stellt sich die Aufgabe, die Stromerzeugung aus diesen Brennstoffen langfristig umweltverträglicher und wirtschaftlich attraktiver zu gestalten.

Wichtigste Maßnahme zur Reduzierung der CO₂-Emissionen je Kilowattstunde bei fossil befeuerten Kraftwerken ist die Erhöhung der Wirkungsgrade, was eine der komplexesten Herausforderungen der Kraftwerkstechnik darstellt. Grundsätzlich ist der Wirkungsgrad nach oben durch den theoretischen Wirkungsgrad des Carnotprozesses begrenzt. Praktisch kann dieser Wert allerdings nur angenähert werden, da Wärmeverluste und weitere Verluste durch Reibung und dergleichen nicht vollständig unterdrückt werden können.

In diesem Zusammenhang liegt ein Hauptaugenmerk auf der Entwicklung der Kraftwerkprozesse und der zugehörigen Komponenten. Hier gibt es beispielsweise Ansätze mit einer mehrfachen Zwischenüberhitzung, einer Erhöhung des Turbinenwirkungsgrades, der Verringerung des Kraftwerkseigenbedarfs sowie der Abgaswärmenutzung.

Die effizienteste Verbesserung des Wirkungsgrades in Verbindung mit der Steigerung der Kraftwerksleistung geht jedoch direkt mit höheren Arbeitstemperaturen und Drücken einher, was sich in neuen Anforderungen an Werkstoffe niederschlägt. In **Bild 13** ist der Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad, den Betriebsparametern und den Werkstoffen dargestellt.

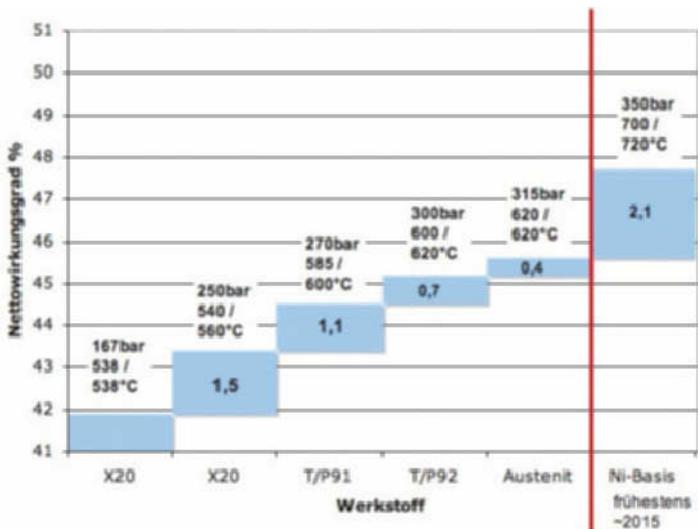


Bild 13: Werkstoffentwicklung in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad [3]

Für Armaturen in 1000-MW-Kraftwerken ist heute der P92-Stahl ein häufig verwendeter Werkstoff, der Dampfzustände bis 620 °C zulässt. Bei noch höheren Temperaturen mit überkritischen Dampfzuständen bei 700 °C und 300 bar werden Legierungen auf Nickelbasis notwendig. Hier besteht wie schon erwähnt Entwicklungsbedarf und entsprechende Entwicklungsprogramme und Forschungseinrichtungen werden von der EU unterstützt. Bis zum Jahr 2020 ist das Ziel gesetzt worden, Wirkungsgrade von bis zu 53 % zu erreichen.

Einen vielversprechenden Ansatz liefern hier erdgasbefeuerte Gas- und Dampfkraftwerke. Die Weiterentwicklung dieser sogenannten GuD-Technologie hat das Ziel eines Wirkungsgrades von 62 %. Hier gilt es, widerstandsfähige Gasturbinenschaukelwerkstoffe mit hohem Nickelanteil und Einkristallstruktur sowie Schutzschichten für die Turbinenschaukeln gegen Korrosion zu entwickeln.

Insgesamt wird also deutlich, dass im Bereich der Kraftwerkstechnik, der Energiegewinnung und in direkter Verbindung auch in der Armaturentwicklung noch viele offene Fragen existieren. Hier sind kreative Ideen in Verbindung mit langjähriger Erfahrung notwendig, damit ein wachsender Energiebedarf auch in Zukunft sichergestellt werden kann.

Literatur

- [1] Logar, Depolt, Gobrecht: Advanced Steam Turbine Bypass Valve Design for Flexible Power Plants. In: ASME Conf. Proc. 2002, S. 43-49.
- [2] Strauß, u.a.: Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen. 6. Auflage, 2009, Heidelberg, Springer Verlag
- [3] Bauer et al. (2008): VGB - Gutachten Kraftwerk Staudinger (KWS 6) - Bewertung der Feuerungsanlage für das Neubauprojekt, Auftrags-Nr. ING 278/08, Essen: VGB Power Tech e.V..