

Strom aus der Gasleitung – Entspannungsanlagen

Andrea Möller, Christof Niehörster und Falk Otto

Rohrnetz, Klimaveränderung, Ressourcenschonung, rationelle Energienutzung, Reduzierung von CO₂-Emissionen, Druckdifferenz bzw. Druckgefälle, Drosselung, Entspannungsanlagen, Stromerzeugung, Joule-Thomson-Effekt

Der Betrieb von Entspannungsanlagen ist im Ferngas- und Regionalgassystem häufig wirtschaftlich und kann somit einen wichtigen Beitrag zur ökologischen Stromerzeugung leisten. In Deutschland wird die Möglichkeit, mittels Entspannungsanlagen Strom zu erzeugen, nur zu etwa 15 % genutzt. Die Chance einer höheren Effizienz bei der Stromerzeugung sollte aber möglichst weitgehend genutzt werden. Dazu bieten Hersteller von Entspannungsmaschinen in allen relevanten Leistungsklassen Anlagen für diese Art der Energierückgewinnung mit hohen Wirkungsgraden und der Möglichkeit eines wirtschaftlichen Betriebs an. Jede Art dieser Anlagen trägt zur Minderung der CO₂-Emissionen bei.

In the grid gas and regional gas system, the operation of expansion facilities is often profitable and can thus be an important contribution to ecological electricity generation. In Germany, only 15 % of the potential of generating electricity by means of expansion facilities is used. However, the chance to achieve a higher efficiency in electricity generation should be used as much as possible. Manufacturers of expansion engines offer plants with high degrees of efficiency and the possibility of a profitable operation for this way of energy recovery in all relevant power classes. Every type of these plants contributes to the reduction of CO₂-emissions.

1. Chancen für die Umwelt

Der zunehmende Treibhauseffekt mit der Folge von Klimaveränderungen und die daraus resultierenden Gefahren für unsere Umwelt zeigen sehr deutlich die Notwendigkeit der Ressourcenschonung. Ein verantwortungsbewusster Umgang mit den verfügbaren Ressourcen führt direkt zur rationellen Energienutzung und zu Energieeinsparmaßnahmen. Hierbei heißt das Ziel, mit wenig Primärenergie viel Nutzenergie zu erzeugen bzw. die Reduzierung von CO₂-Emissionen. Vordringlich sind die Industrienationen aufgefordert, höhere, aber auch kostengünstige Reduzierungen der CO₂-Emissionen zu erreichen. Die heutige Technik ist so weit fortgeschritten, dass dieses Ziel in Reichweite gerückt ist. Dazu können die vorhandenen Potenziale genutzt werden. Die Erdgasentspannung ist eine Möglichkeit, die nachstehend als Chance für die Umwelt näher beleuchtet und beschrieben wird.

Dipl.-Geol. Andrea Möller und Dr.-Ing. Christof Niehörster, BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Theaterstraße 58–60, D-52062 Aachen, und Dipl.-Ing. Falk Otto, BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Büro Leipzig, Karl-Liebknecht-Straße 64, D-04275 Leipzig.

2. Hintergrund

In Deutschland werden die großen Leitungsnetze der Ferngasgesellschaften mit einem Überdruck von bis zu 84 bar betrieben. Dieser Druck wird mittels Transportverdichtern (auch Streckenverdichter genannt) bedarfsgerecht aufrechterhalten und gesteuert. In den Verteilnetzen¹ wird jedoch ein deutlich geringerer Betriebsdruck benötigt. Die Druckreduzierung innerhalb des Erdgasversorgungssystems geschieht heute bis auf wenige Ausnahmen durch Entspannung über Drossleinrichtungen (Druckreduzieranlagen), wobei die durch das Druckgefälle verfügbare potenzielle Energie nicht genutzt wird.

Werden Gas-Expansionsanlagen mit nachgeschaltetem Stromgenerator eingesetzt, lässt sich diese Druckdifferenz in mechanische bzw. elektrische Energie umwandeln und somit das Energiepotenzial optimal nutzen. Das in den Versorgungssystemen in Deutschland verfügbare Druckenergiepotenzial, das durch Entspannungsanlagen genutzt werden kann, wird mit Stand 1994 auf ca. 700 MW geschätzt [1].

Der Einsatz von Expansionsanlagen in der Gasversorgung erfolgt an der Schnittstelle zwischen den Fernleitungs- und Verteilnetzen – dort kann die anstehende Druckdifferenz

¹ Hierunter sind sowohl die regionalen als auch die kommunalen Netze zu verstehen.

Tabelle 1. Beispiele für realisierte Entspannungsanlagen in Deutschland.

Betreiber	Bauart	Gasdurchsatz z [m ³ /h]	Gasdrücke [bar]	Gas- temperatur [°C]	Vorwärme- leistung [kW]	Elektrische Leistung [kW]	Jahr der Inbetrieb- nahme
SW Lemgo	2-Zylinder- Kolbenmotor	7.000	25/5/0,080	90/10	370	336	1990
SW Heilbronn	3-Zylinder- Kolbenmotor	25.000	46/9	95/10	710	650	1990
SW Lübeck	6-Zylinder- Kolbenmotor	45.000	41/9	95/10	1.600	1.450	1988
Dortmunder SW	Axialturbine	63.000	49/12/4	75/12	3.590	3.260	1989
GV Gesellschaft Filstal	Radialturbine	16.000	30/3	90/10	780	700	1990
Edelstahlwerke Buderus AG Wetzlar	Axialturbine	9.000	45/0,5	90/5	440	400	1989
Hamburger Gaswerke			40/14,5			75	1999

wirtschaftlich genutzt und ein Beitrag zur Energieeffizienz und damit zum Umweltschutz geleistet werden.

In Deutschland wurden bereits Anlagen in unterschiedlichen Leistungsklassen realisiert (siehe *Tabelle 1*). Es werden sowohl Kolbenmotoren als auch Radial- und Axialturbinen erfolgreich für eine höhere Energieeffizienz eingesetzt.

3. Technische Umsetzung – Druckgefälle ein wertvolles „Abfallprodukt“

Die Druckreduzierung zwischen Ferntransportnetzen und Verteilnetzen wird in der Regel mittels Drosselung mit einfachen Drosselventilen geregelt. Bei der Drosselung realer Gase tritt eine Temperaturänderung als Folge des *Joule-Thomson-Effekts* auf. Bei Erdgas entsteht, unter für Erdgas-transport- und Verteilsysteme typischen Betriebsbedingungen², eine Temperaturabsenkung bei der Druckreduzierung (Realgaseffekt, der von der Zusammensetzung des Gases abhängt). Diese Abkühlung muss durch Vorwärmung des Erdgasstromes vor der Drosselung kompensiert werden, um einer Vereisung der Anlagen entgegenzuwirken³.

Für den Drosselvorgang muss also Energie zugeführt werden, die durch die Druckdifferenz vorhandene nutzbare potenzielle Energie geht jedoch durch Reibungsverluste verloren (*Bild 1*).

Als Alternative zur Druckreduzierung mittels Drosselventilen bietet sich die energetische Nutzung des Druckgefälles durch Entspannungsanlagen⁴ an. Hierbei wird die potenzielle Energie (Druckgefälle) in kinetische Energie (z. B. Rotation eines Turbinenläufers bzw. einer Kurbelwelle) umgewandelt und schließlich in einem nachgeschalteten Generator Strom aus der Entspannungsarbeit erzeugt. Expansionsmaschinen können im Auslegungspunkt isentrope Wir-

² Überdruck von bis zu 84 bar, Temperaturen von ca. 5 bis zu 20 °C.

³ Es besteht die Gefahr der Methanhydratbildung, da im Erdgas in der Regel Restfeuchte vorhanden ist.

⁴ Für die Entspannung von Erdgas kommen Axial- und Radialturbinen bzw. Kolbenmaschinen zum Einsatz.

kungsgrade von bis zu 90% erreichen. Sofern in der Nähe des Anlagenstandorts Kältebedarf (z. B. für Klimatisierung) besteht, kann zusätzlich durch einen Wärmetauscher nach der Entspannungsanlage noch Nutzkälte ausgekoppelt werden oder alternativ einem Kältemittel Wärme entzogen werden (*Bild 2*).

Um den Nutzungsgrad der Stromerzeugung in der Erdgas-Expansionsanlage zu ermitteln, ist es systematisch richtig, eine Differenzbetrachtung zwischen dem vorherigen Zustand (Drosselung, siehe Beispiel in *Bild 3*) und der realisierten Expansionsanlage (siehe Beispiel in *Bild 2*) zu führen. Zur Berechnung werden somit die erzeugte Strommenge und die benötigte Mehrmenge an Brennstoff eingesetzt. Im dargestellten Beispiel ergibt sich ein Nutzungsgrad der Stromerzeugung von 87% – ein Wert, der selbst in den modernsten Kraftwerken der Stromwirtschaft bei weitem nicht erreicht wird.

Der bei jeder Entspannung eines realen Gases auftretende *Joule-Thomson-Effekt* (Temperaturabsenkung infolge Druckreduzierung) wird dadurch kompensiert, dass der Erdgasstrom vorgewärmt wird. In einem Expansionsprozess muss wesentlich stärker vorgewärmt werden als bei einer isenthalpen Drosselung, da ein höherer Anteil technischer Arbeit entzogen wird und somit ein höheres Potenzial an

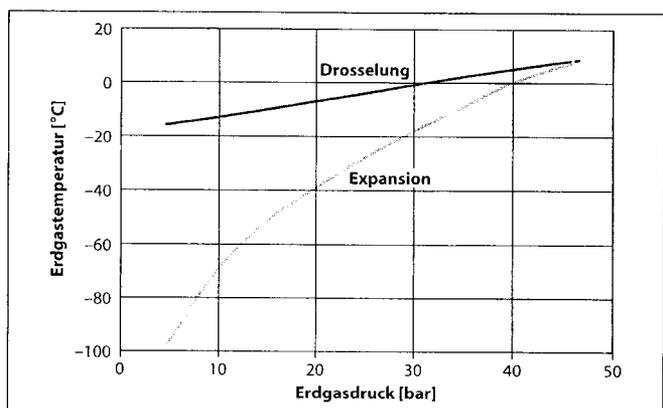


Bild 1. Abkühlungseffekt bei Drosselung bzw. Expansion – ausgehend von $p = 48$ bar und $t = 10$ °C.

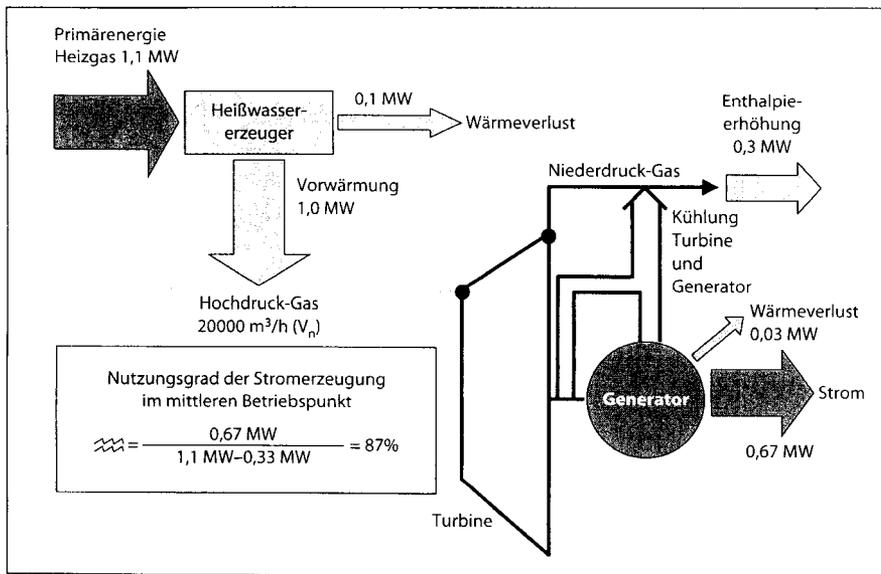


Bild 2. Leistungsbilanz bei Druckreduzierung mittels Entspannungsanlage.

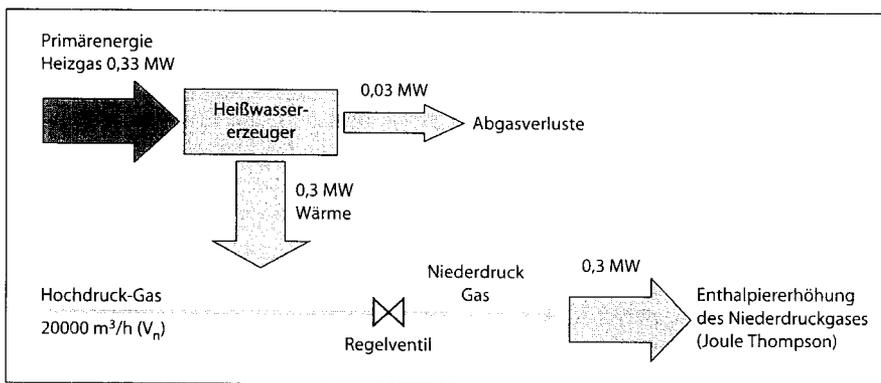


Bild 3. Leistungsbilanz bei Druckreduzierung mittels Drosselung.

Energie genutzt werden kann. Die Abkühlungseffekte bei Expansion sind in Bild 1 dargestellt.

4. Faktoren für einen wirtschaftlichen Betrieb

Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs einer Entspannungsanlage wird durch zwei wesentliche Parameter bestimmt - den Vordruck/Druckdifferenz und die Erdgasmenge.

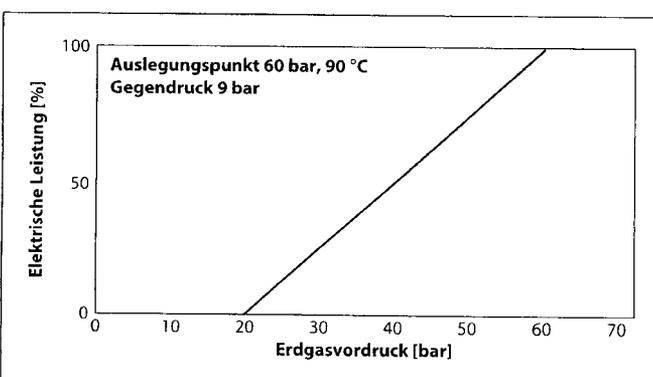


Bild 4. Elektrische Leistung versus Vordruck.

4.1 Vordruck

Die Unternehmen der Ferngas- und Regionalversorgung garantieren in der Regel Gasleitungsdrücke von 20 bis 30 bar. Der Versorgungsdruck liegt jedoch meist höher – bei etwa 40 bis 50 bar. Bei Auslegung einer Entspannungsanlage ist zu beachten, dass eine spätere Änderung des verfügbaren Vordrucks zu einer Fehlauslegung führen kann. Durch das Absinken des verfügbaren Druckgefälles wird die mögliche Stromerzeugung überproportional reduziert. Darüber hinaus wird bei reduziertem Eingangsdruk der maximal durch die Entspannungsanlage strömende Volumenstrom verringert, da der maximale Strömungsquerschnitt der Maschine gegeben ist und nicht vergrößert werden kann. Dies ist eine wesentliche Randbedingung für die langfristige Wirtschaftlichkeit der Anlage (Bild 4).

4.2 Erdgasmenge

Da Erdgas zu einem großen Teil zu Heizzwecken eingesetzt wird, ist der Durchsatz an Übernahmestationen (als typische Standorte von Entspannungsanlagen) in der Regel stark von der Außentemperatur abhängig. Die Gasmenge schwankt typischerweise zwischen den Jahreszeiten (Sommer/Winter) im Verhältnis von ca. 1:5.

Begründet durch dieses Mengenverhältnis werden die Entspannungsturbinen nur in wenigen Ausnahmefällen im Vollastbetrieb betrieben, sofern eine Auslegung auf die maximalen Volumenströme hin stattfindet. Daher ist dem Teillastwirkungsgrad⁵ eine hohe Bedeutung beizumessen, oder es findet eine Auslegung für einen Teillastzustand statt.

5. Umweltentlastung und Wirtschaftlichkeit

Das existierende Potenzial für die Gas-Expansionsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland liegt in einer Größenordnung von ca. 700 MW, wovon derzeit nur ca. 15% genutzt werden [1] (siehe auch Tabelle 1). Die mögliche Reduktion der CO₂-Emissionen durch Einsatz von Entspannungsmaschinen ergibt sich aufgrund der Minderung des notwendigen Primärenergieeinsatzes bei der Stromerzeugung.

Eine erhebliche Minderung der CO₂-Emissionen ergibt sich insbesondere dann, wenn für die Vorwärmung des

⁵ Einstufige Erdgasentspannungsturbinen erreichen annähernd lineare Leistungskennlinien im Bereich zwischen 25 und 100% des Auslegungsmassestromes.

Tabelle 2. Gegenüberstellung Kombinationsanlage und „konventionelle“ Entspannungsstation mit Drosselung.

BHKW + Expansionsturbine		
Gasverbrauch BHKW	kWh _(Hu) /a	5.848.000
Stromerzeugung BHKW (netto)	kWh/a	2.047.000
Stromerzeugung Expansionsturbine (netto)	kWh/a	1.895.000
Stromerzeugung Gesamt (netto)	kWh/a	3.942.000
CO ₂ -Emission Gasverbrauch ¹⁾	t/a	1.180
CO ₂ -Gutschrift f. erzeugten Strom ²⁾	t/a	-2.360
CO₂-Bilanz	t/a	-1.180
Konventionelle Gasentspannung		
Gaseinsatz für Vorwärmung	kWh _(Hu) /a	395.000
Strombedarf	kWh/a	15.000
CO ₂ -Emission Gasverbrauch ¹⁾	t/a	80
CO ₂ -Emission Strombedarf ²⁾	t/a	10
CO₂-Bilanz	t/a	90
¹⁾ Emissionsfaktor Erdgas H	t/MWh _(Hu)	0,202
²⁾ Emissionsfaktor Strom BRD	t/MWh _{el}	0,600

Gases vor der Entspannungsmaschine Wärme aus einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage oder aus regenerativen Energieträgern verwendet wird. Nach neuesten Informationen werden Kombinationen aus KWK-Anlagen und Gasentspannungsmaschinen nach dem KWKModG (Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung vom 19.03.2002) in ihrer Gesamtheit als KWK-Anlage anerkannt und erhalten somit einen monetären Zuschlag sowohl auf den Strom aus der KWK-Anlage (welche die Wärme für die Vorwärmung liefert) als auch auf den Strom aus der Entspannungsmaschine. Aus der Tatsache, dass eine derartige Anlage als KWK-Anlage im Sinne des KWKModG gilt, ergibt sich weiterhin für den örtlichen Stromnetzbetreiber die Anschlusspflicht an das Stromnetz sowie die Abnahmepflicht für den in der Anlage erzeugten Strom. Nach dem 1. April 2002 bis einschließlich 31. Dezember 2005 in Betrieb genommene Anlagen bis 2 MW installierter elektrischer Gesamtleistung erhalten voraussichtlich noch bis Ende 2010 KWK-Zuschläge vom Stromnetzbetreiber. Durch erzielbare KWK-Zuschläge lässt sich die Erlösseite von Kombinationsanlagen erheblich verbessern, so dass diese Projekte in vielen Fällen wirtschaftlich realisiert werden können. Das KWKModG sieht für neu errichtete Kleinst-Anlagen bis 50 kW installierter elektrischer Leistung einen Zuschlag von 5,11 Ct/kWh über einen Zeitraum von 10 Jahren vor. Durch die vergleichsweise hohe Förderung besteht auch für diese Anlagengröße Aussicht auf eine wirtschaftliche Umsetzung wobei sich durch die kleinere erforderliche Durchsatzmenge ein wesentlich breiterer Einsatzbereich ergibt z. B bei Großkunden oder Teilnetzen.

Die Größenordnung der realisierbaren CO₂-Minderung verdeutlicht *Tabelle 2*, die eine Kombinationsanlage aus motorischem Blockheizkraftwerk und Expansionsturbine (Gesamtleistung 500 kW_{el}) einer konventionellen Entspannungsstation gegenübergestellt. Der erzeugte bzw. verbrauchte Strom wird dabei mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 0,6 t CO₂ je MWh_{el} für den „Strom-Mix“ in Deutschland bewertet. Nach der Modellrechnung wird durch die Anlage in Summe eine CO₂-Emission vermieden, die der tatsächlichen CO₂-Emission der Anlage entspricht. Durch den Betrieb der Kombinationsanlage wird also bei der Stromerzeugung im deutschen „Kraftwerkspark“ rund die doppelte Menge an CO₂-Emissionen vermieden.

6. Zusammenfassung

Ein rationeller Umgang mit Energieressourcen bedeutet häufig schon das Ausnutzen des vorhandenen Energiepotenzials. Beispielsweise kann der in Gasleitungen vorhandene unterschiedliche Gasdruck mittels Entspannungsanlagen zur Stromerzeugung genutzt werden. Dadurch wird die durch den Drosselvorgang erzeugte Energie, die sonst als Reibungsverlust verpufft, in kinetische Energie umgewandelt. Die Folge ist ein effizientes Ausnutzen des Energiepotenzials mit einem Nutzungsgrad von bis zu 86%. Dass Entspannungsanlagen wirtschaftlich betrieben werden können, zeigen bereits realisierte Anlagen in allen Leistungsklassen. Faktoren für einen wirtschaftlichen Betrieb sind vor allem der Vordruck bzw. die Druckdifferenz und die Erdgasmenge, die durch die Rohrleitung fließt.

Typische Standorte für Entspannungsanlagen sind Übernahmestationen, die zwischen Ferngasversorgung und Verteilung liegen. Das nutzbare Druckgefälle in einem Standardbetriebszustand sollte möglichst groß sein. Je größer das Druckgefälle ist, um so besser sind die Aussichten für einen wirtschaftlichen Betrieb. Mehrschienige Anlagen bieten sich besonders für eine Nachrüstung an. Kombinationen mit Blockheizkraftwerken sowie eine zusätzliche Kälteauskoppelung – welche eine weitere, erhebliche Minderung der CO₂-Emissionen bewirkt – sind besonders reizvoll. Im Vergleich einer Kombinationsanlage mit einer konventionellen Station wird durch die Entspannungsanlage rund die doppelte Menge an CO₂-Emissionen vermieden.

Literatur

- [1] Fasold, H.-G. und Wahle, H.-N.: Gasentspannung in Expansionsmaschinen unter Berücksichtigung des Realgasverhaltens. GWF-Gas/Erdgas 136 (1994) Nr. 6, S. 261–269.

(Manuskripteingang: 13. April 2004)