Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 43 (1951)
Heft: 1

Artikel: Die wichtigsten Roheisenerzeugungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Gaswirtschaft
Autor: Hellbrügge, Heinrich
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921665

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die wichtigsten Roheisenerzeugungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Gaswirtschaft

Von Dr. ing. *Heinrich Hellbrügge,* zurzeit Sao Paulo (Bras.)

Das Eisen nimmt unter den Metallen eine besondere Stellung ein, sowohl der erzeugten Menge als auch teilweise der Herstellungsverfahren wegen. Aus diesem Grunde hat sich die Metallurgie des Eisens neben der der übrigen Metalle selbständig entwickelt. Der Eisenverbrauch je Kopf der Bevölkerung ist ein Gradmesser für den Lebensstandard. Eisenindustrie muß vor vielen anderen Industrien vorhanden sein, wenn ein Land sich technisch entwickeln will. Der Energieverbrauch je t Stahl ist sehr groß und beträgt im Durchschnitt etwa 8 Mill. Kcal, wenn man vom Erz bis zum mittleren Walzprodukt geht. Deshalb konnte die Eisenerzeugung in den Ländern, die neben guten Erzen auch gute Kohle haben, sich stark entwickeln, während sie in Ländern, die zwar über hinreichende und gute Mengen an Erzen verfügen, aber nur schlechte oder gar keine Kohle besitzen, zurückgeblieben ist. In jüngerer Zeit sind allerdings Verfahren zur Betriebsreife entwickelt worden, die es ermöglichen, auch aus Erzen mit schlechten Brennstoffen Roheisen wirtschaftlich zu erzeugen. Im folgenden soll auf verschiedene Roheisenverfahren eingegangen werden. Vorweg soll noch betont werden, daß nur stark die Hälfte des in der Welt erzeugten Rohstahls aus Roheisen gewonnen wird. Der verbleibende Teil des Rohstahls wird direkt aus Stahlschrott vorwiegend in Siemens-Martin-Öfen erzeugt. Die Erzeugung von Rohstahl aus Schrott ist aber nur in solchen Ländern möglich, deren Eisenverbrauch und damit auch deren Schrottanfall je Kopf der Bevölkerung entsprechend groß ist. Länder mit geringem Eisenverbrauch müssen in verstärktem Maße den Weg zum Stahl über Roheisen gehen, wenn sie nicht Schrott importieren wollen.

Roheisenerzeugung im Hochofen

Für die Roheisenerzeugung hat weitaus die größte Bedeutung der Hochofen. Das außerhalb des Hochofens erzeugte Roheisen ist mengenmäßig sehr gering im Vergleich zum Hochofenroheisen. Der Hochofen ist, wie der Name sagt, ein hohes (bis zu 30 m), rundes Gefäß, in das oben, auf der Gicht, abwechselnd Erz und Koks gegeben wird. In seinem unteren Teil, dem Gestell, wird erwärmte Luft, der sog. Wind, durch wassergekühlte Blasformen eingeblasen. Zur Erhöhung der Haltbarkeit der Auskleidung des Ofens ist er sehr intensiv mit Wasser gekühlt. Die Auskleidung des Ofens kann ganz aus Schamottesteinen oder auch nur im oberen Teil aus Schamottesteinen und im Gestell aus Kohlenstoffsteinen oder Kohlenstoffstampfmasse bestehen. In einer Ofenreise, das ist die Zeit, bis zu der die Auskleidung z. B. des Schachtes erneuert werden muß, kann ein Ofen etwa 2 Mill. t Eisen erzeugen. Die Auskleidung des Gestells hält sogar bis zu 4 Mill. t Roheisen aus, ehe sie erneuert werden muß. Ein Hochofen erzeugt heute bis zu 1000 t und mehr in einem Tag. Die wichtigsten chemischen Vorgänge, die im Hochofen vor sich gehen, sind verhältnismäßig einfach. Sie bestehen in der Hauptsache aus der Verbrennung des Luftsauerstoffs mit Kokskohlenstoff nach der Gleichung $2\,C + O_2 = 2\,CO$. Diese Verbrennung findet im Gestell vor den Blasformen statt. Sie verläuft sehr schnell; denn in dem Gestell des Ofens herrscht eine Temperatur von über 1400° C. Außerdem wird ein Teil des Kohlenstoffs durch den Erzsauerstoff des noch unreduziert in das Gestell gelangenden Erzes verbrannt (Direkte Reduktion: $C + FeO = Fe + CO$). Die bei der Verbrennung sich bildenden heißen Abgase, bestehend aus Kohlenoxyd und Stickstoff, steigen nach oben, zur Gicht des Ofens, und geben ihre fühlbare Wärme größtenteils an die dem Gasstrom entgegenrutschende Beschickung ab. Auf diesem Wege findet die zweite wichtige chemische Reaktion, die im Hochofen vor sich geht, statt, nämlich die Oxydation eines Teiles des Kohlenoxydes durch den Erzsauerstoff nach der Gleichung $Fe_2O_3 + CO = 2\,FeO + CO_2$ oder $FeO + CO = Fe + CO_2$. Diese Reaktionen werden die «indirekte Reduktion» genannt, indirekt deshalb, weil die Reduktion nicht unmittelbar durch Kohlenstoff, sondern nur

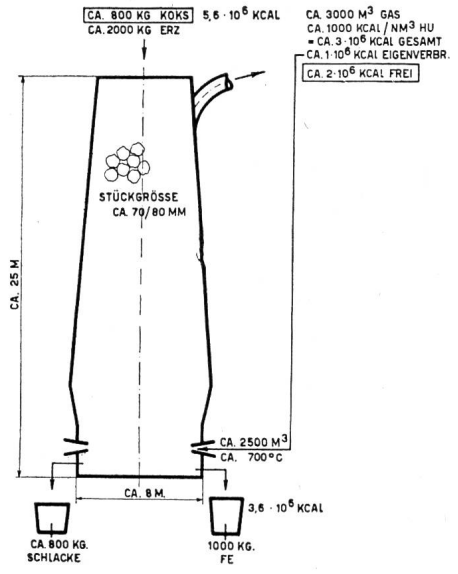

Abb. 1 Hochofen, schematische Darstellung mit Anhaltszahlen

mittelbar über den im CO-Gas enthaltenen Kohlenstoff verläuft. Die Abgase, die sog. Gichtgase, verlassen den Ofen mit einer je nach Ofen und Arbeitsweise verschiedenen Temperatur, die im allgemeinen bei 200 bis 300° C liegt. Wesentlich für den Hochofen ist, daß der Kokskohlenstoff in ihm vor den Blasformen nur bis zu CO und nicht zu CO_2 verbrannt werden kann, denn im Gestell des Ofens muß ein Koksüberschuß vorhanden sein, um das Eisen aufkohlen und das in den inzwischen flüssig gewordenen Erzen noch enthaltene Eisenoxyd gänzlich zu Fe reduzieren zu können. Außerdem muß eine Kokssäule vorhanden sein, die die hohe Beschickungssäule trägt und dabei noch soviel Raum zwischen den einzelnen Stücken läßt, daß die Abgase dadurch nach oben entweichen können. In Gegenwart von Kohlenstoff ist aber bei der im Gestell herrschenden Temperatur von über 1400° C nur CO und nicht CO_2 beständig. So wird der Hochofen also auch zum Gaserzeuger. Auf dem Wege der Gase vom Gestell zur Gicht des Ofens wird zwar wie gesagt ein Teil des CO-Gases zu CO_2 oxydiert. Jedoch ist diese Oxydation nur bis zu einem bestimmten Verhältnis von CO zu CO_2, das von der jeweiligen Temperatur abhängig und in dem bekannten Boudouard Gleichgewicht festgelegt ist, möglich. Doch das theoretisch mögliche Verhältnis von CO zu CO_2 ist im Hochofen nicht zu erreichen. Wie weit man sich dem theoretisch möglichen Verhältnis nähern kann, hängt von verschiedenen Bedingungen z. B. der Erzbeschaffenheit, der Gasgeschwindigkeit und anderem ab. Der Hochofen muß also bis zu einem gewissen Grade ein Gaserzeuger bleiben. Der Wärmeinhalt des Hochofengichtgases ist etwa 1000 Kcal/Nm^3 Gichtgas. Das heißt, der Hochofen erzeugt ein verhältnismäßig schlechtes Gas aus gutem, druckfestem Koks. Im Mittel fallen etwa 3 Mill. Kcal je t Roheisen im Gichtgas an. Rund die Hälfte der je t Roheisen aufgewendeten, im Koks enthaltenen Wärmemenge geht ins Gichtgas. Hiervon werden zwar etwa ein Drittel für den Ofen selbst, für die Vorwärmung des Windes und dessen Kompression auf etwa 1 atü, benötigt, so daß noch je t Roheisen etwa 2 Mill. Kcal im Gas für andere Zwecke zur Verfügung stehen. Rechnet man mit einem Koksverbrauch von z. B. 800 kg/t Roheisen, so beträgt die im Gichtgas für fremde Betriebe zur Verfügung stehende Wärme von etwa 2 Mill. Kcal gut ein Drittel der insgesamt je t Roheisen aufgewendeten Wärme. Man hat versucht eine weitergehende Verbrennung zu CO_2 im Hochofen zu erreichen, wohl hauptsächlich dadurch, daß man versuchte Erz und Koks räumlich im Ofen zu trennen um so eine bessere Oxydation des aufsteigenden CO zu CO_2 zu erreichen. Doch alle diese Versuche dürften wegen ofentechnischer und teilweise auch wegen metallurgischer Schwierigkeiten zum Scheitern verurteilt sein. Inwieweit die Tatsache, daß der Hochofen bis zu einem gewissen Grade Gaserzeuger ist, als Nachteil des Hochofens zu betrachten ist, hängt stark von den örtlichen Verhältnissen ab. Arbeitet der Hochofen innerhalb eines gemischten Hüttenwerkes, dessen Fertigung z. B. bis zu mittleren Walzprodukten geht, so ist innerhalb des Hüttenwerkes der Energieverbrauch so groß, daß ohne Schwierigkeiten das Gichtgas untergebracht werden kann. Je t Walzprodukt werden ja, wie gesagt, etwa 8 Mill. Kcal benötigt. Würde das Gichtgas nicht vorhanden sein, so müßte in den meisten Fällen ohnehin Gas in Generatoren erzeugt werden, deren Wirkungsgrad nicht besser ist als der des Hochofens. In diesem Falle kann also die Tatsache, daß der Hochofen überhaupt Gas erzeugt, nicht als Nachteil verbucht werden. Es bliebe noch der Einwand, daß er nur ein minderwertiges Gas aus hochwertigem Brennstoff erzeugt. Doch solange ohnehin hauptsächlich hochwertiger Brennstoff zur Verfügung steht, wie z. B. an der Ruhr, spielt dieser Umstand weniger eine Rolle. In einigen Fällen braucht ein Hüttenwerk sogar ein minderwertiges Gas, nämlich dann, wenn es nicht erwünscht ist, hohe Verbrennungstemperaturen zu bekommen, z. B. für Glühöfen. In anderen Fällen ist es wieder ein Nachteil, z. B. für den Siemens-Martin-Ofen. Doch hier hat man sich geholfen, indem man minderwertiges Gichtgas abgibt z. B. für die Beheizung von Koksöfen und dafür äquivalente Mengen Wärme in Form von hochwertigem Kokereigas bezieht. Durch Einordnung des Hochofens in den Rahmen einer vernünftigen Energiewirtschaft läßt sich also sein Nachteil, aus hochwertigem Brennstoff minderwertiges Gas zu erzeugen, weitgehend beseitigen. Man besitzt dann im Hochofen einen Apparat, der große Mengen Eisen in einer Einheit mit einem thermischen Wirkungsgrad erzeugt, wie er in fast keinen anderen eisenerzeugenden Öfen außer dem Elektroroheisenofen erreicht wird. Die Anforderungen an die physikalische Beschaffenheit der Rohstoffe für den Hochofen sind dafür sehr groß. Der Koks muß druckfest sein und eine möglichst gleichmäßige Stückgröße haben, das Erz muß stückig und auch möglichst gleichmäßig sowohl in der Stückgröße als auch der chemischen Zusammensetzung sein. In vielen Fällen sind diese Anforderungen ohne Weiteres erfüllt, weil die Rohstoffe von Natur aus so beschaffen sind. In vielen Fällen muß auch erst die physikalische Beschaffenheit der Rohstoffe durch besondere Vorbereitungsverfahren für die Ansprüche des Hochofens geschaffen werden. Dabei ist die Vorbereitung der Erze für den Hochofen wirtschaftlich verhältnismäßig eher tragbar. Dagegen ist die Aufbereitung der Brennstoffe schwieriger und oft technisch gar nicht möglich. Für die Eisenerzeugung in größerem Umfange ist die Brennstoffrage entscheidender als die Erzfrage. So ist es auch zu erklären, daß in Ländern, die zwar eine gute Erzbasis haben, aber nur ungeeigneten, schlechten Brenn-

stoff, die Eisenerzeugung zurückgeblieben ist. Dagegen hat sich auf einer guten Brennstoffbasis vielfach eine starke Eisenerzeugung entwickeln können, obwohl Erze größtenteils nicht vorhanden waren, sondern importiert werden mußten, wie z. B. an der Ruhr. Feste, verallgemeinerte Maßstäbe lassen sich hierfür nicht angeben; denn es gibt auch Beispiele, bei denen sich auf der Erzbasis eine Eisenindustrie entwickelt hat, z. B. in Lothringen und Luxemburg, die größtenteils ihren Koks von der Ruhr im Austausch gegen Erz beziehen.

Roheisenerzeugung im Sauerstoffniederschachtofen

Geht man von der Tatsache aus, daß die Brennstofffrage für die Eisenerzeugung eine entscheidendere Rolle spielt als die Erzfrage, so wächst damit um so mehr die Bedeutung aller Verfahren, die die Verwendbarkeit schlechteren Brennstoffes für die Eisenerzeugung ermöglichen. Viele Länder besitzen zwar Kohle in genügender Menge, jedoch eine solche, die manchmal gar nicht verkokbar ist oder nur schlechten, für den Hochofen unbrauchbaren Koks liefert, z. B. Griechenland, Jugoslawien, Brasilien und andere. Für solche Fälle ist der Sauerstoffniederschachtofen von einer Bedeutung, die heute erst allmählich erkannt und eingesehen wird. Der Sauerstoffniederschachtofen arbeitet im Prinzip wie der Hochofen. Seine Konstruktion ist ähnlich wie die des Hochofens, er ist nur niedrig gebaut wie sein Name sagt. Es spielen sich in ihm die gleichen chemischen Reaktionen ab. Während beim Hochofen der Sauerstoff der Luft, der mit Stickstoff verdünnt ist, mit dem Kohlenstoff des Brennstoffs zu CO verbrennt, wobei die Abgase aus einem Gemisch von CO und N_2 bestehen, verbrennt beim Sauerstoffniederschachtofen vor den Blasformen der Sauerstoff der Sauerstoffanlage mit Kohlenstoff zu CO, wobei die Abgasmenge geringer ist als beim Hochofen mit Luftbetrieb, eben weil der Stickstoff mehr oder weniger je nach Sauerstoffanreicherung fehlt. Der Hochofen wurde so hoch gebaut, um die fühlbare Wärme der großen Abgasmenge auszunutzen, indem die Abgase im Gegenstrom zur Beschickung ihre fühlbare Wärme an diese abgeben. Beim Sauerstoffniederschachtofen ist die Abgasmenge je kg verbrannten Kohlenstoffs geringer, infolgedessen braucht der Ofen auch nur eine geringere Höhe, um im Gegenstrom zur Beschickung die fühlbare Wärme der Abgase ausnutzen zu können. Die notwendige Höhe des Ofens hängt von der Abgasmenge je kg verbrannten Kohlenstoffs und die Abgasmenge wiederum von der Sauerstoffanreicherung im Wind ab. Bestimmt wird zweckmäßigerweise der Grad der Sauerstoffanreicherung im Wind des Sauerstoffniederschachtofens durch die Tragfähigkeit des zu verwendenden Brennstoffs. Je besser diese ist, um so höher wird man ihn bauen, um so weniger braucht man den Wind an Sauerstoff anzureichern; denn je höher der Ofen ist, um so besser vorbereitet kommt der Möller in die Schmelzzone, um so schneller können hier die Reaktionen verlaufen, um so größer ist die Erzeugung je m^2 Herdfläche, um so besser ist damit der thermische Wirkungsgrad. Das Extrem in dieser Richtung ist also der Hochofen, der ohne Sauerstoffanreicherung arbeitet. Das Extrem in der anderen Richtung ist der Sauerstoffniederschachtofen, der mit 100 %igem Sauerstoff arbeitet. Dieser braucht nur eine Höhe von etwa 1 m oberhalb der Blasformen, damit die Abgase ihre fühlbare Wärme abgeben können. Der Brennstoff kann eine ganz geringe Druckfestigkeit haben, er muß nur stückig sein, um ein Entweichen der an sich geringeren Abgasmenge zu ermöglichen. Wegen der geringen Höhe des Ofens ist die Durchsatzzeit des Möllers nur kurz. Da sie aber nicht beliebig verkürzt werden kann, läßt sich je m^2 Herdfläche nicht die gleiche Eisenmenge wie beim Hochofen erzeugen, infolgedessen steigen die Wärmeverluste je t erzeugten Eisens durch Leitung und Kühlung des Ofengefässes, da diese im großen gesehen je m^2 Gestellofenoberfläche bei gegebenen Verhältnissen konstant sind, und damit wird der thermische Wirkungsgrad des Sauerstoffniederschachtofens schlechter als der des Hochofens. Die notwendige Kohlenstoffmenge je t erzeugten Roheisens wird infolgedessen größer. Dennoch kann aber der Sauerstoffniederschachtofen wirtschaftlich sein, da im allgemeinen die schlechteren Brennstoffe billiger sind. Außerdem tritt diese Frage vielfach in den Hintergrund, wenn es sich darum handelt, ob man überhaupt Roheisen erzeugen kann oder nicht. Technisch bietet der Sauerstoffniederschachtofen jedenfalls eine Möglichkeit, nicht nur nicht mit schlechtem Koks, sondern auch mit Braunkohle und Kohle Roheisen erzeugen zu können. Der Sauerstoffniederschachtofen ist aber in noch stärkerem Maße ein Generator als der Hochofen, und zwar wegen seines höheren Kohlenstoffverbrauchs je t Roheisen, bedingt durch den schlechteren Wirkungsgrad des Ofengefässes und dem daraus folgenden höheren Gichtgasanfall. Außerdem wird beim Hochofen ein Teil der für die Eisenerzeugung notwendigen Wärme durch die fühlbare Wärme des Windes geliefert. Beim Sauerstoffofen fällt aus technischen Gründen diese Vorwärmung weg. Die dadurch im Vergleich zum Heiß-

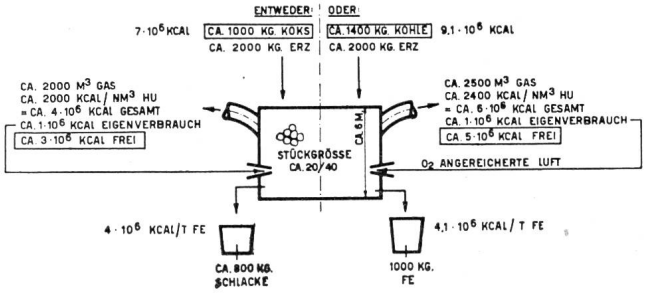

Abb. 2
Sauerstoff-Niederschachtofen, schematische Darstellung mit Anhaltszahlen

windbetrieb des Hochofens ausfallende Wärme muß durch zusätzliche Kohlenstoffverbrennung ersetzt werden. Da diese aber nur zu geringem Teil zu CO_2 verläuft, steigt damit die im Gichtgas anfallende Wärme um so mehr. Der dritte Faktor, der einen größeren Wärmeanfall im Gichtgas im Vergleich zum Hochofen bedingt, ist die schlechtere indirekte Reduktion des Sauerstoffofens. Weil die Durchsatzzeit in ihm kürzer ist, ist den CO-Abgasen weniger Gelegenheit gegeben FeO zu reduzieren, wobei das CO selbst zu CO_2 oxydiert wird. Die indirekte Reduktion des Sauerstoffofens, der z. B. mit 75 % Sauerstoff im Wind arbeitet, liegt etwa 20 % niedriger als beim Hochofen, wenn dieser mit denselben Erzen arbeiten würde. Die Wertigkeit des Gichtgases des Sauerstoffofens ist aber höher. Der Heizwert liegt je nach Sauerstoffanreicherung zwischen etwa 1500 und 2500 Kcal/Nm³. Fallen beim Hochofen etwa 3 Mio Kcal je t Roheisen im Gichtgas an, so kann man beim Sauerstoffofen als Anhaltszahl mit etwa 4 Mio Kcal rechnen. Beim Hochofen standen für andere Betriebe nach Abzug des Eigenverbrauches etwa 2 Mio Kcal zur Verfügung, beim Sauerstoffofen stehen nach Abzug des Eigenverbrauches inklusive Sauerstofferzeugung etwa 3 Mio Kcal je t Roheisen für andere Betriebe zur Verfügung. Arbeitet man im Sauerstoffofen mit Kohle, so kommt zu dieser Wärme noch die des sonst anfallenden Kokereigases hinzu; denn das Verkoken ist ja in den Sauerstoffofen verlegt und nur zum geringen Teil wird das Koksgas im Sauerstoffofen für Reduktionszwecke verbraucht. Je nach Kohle kommen dann noch etwa 2 Mio Kcal je t Roheisen, um eine Anhaltszahl zu nennen, hinzu. Damit würden beim Arbeiten mit Kohle beim Sauerstoffofen etwa 5 Mio je t Roheisen für fremde Betriebe zur Verfügung stehen in Form eines Gases, mit etwa 2000 Kcal je Nm³ und einem CO-Gehalt von etwa 50 %. Auch letztere Zahlen können nur ein Anhalt sein; denn sie ändern sich mit Sauerstoffanreicherung und Kohlenart. Wenn im Sauerstoffofen technisch die Möglichkeit gegeben ist, mit Kohle Roheisen erzeugen zu können, so wird die Ausnutzung dieser Möglichkeit in starkem Maße davon abhängen, ob eine Verwendung des Gichtgases gegeben ist. Ist dieses nicht der Fall, so wird es richtiger sein, die Kohle vorher zu verkoken oder zu schwelen, wobei meistenteils noch wertvolle Nebenprodukte gewonnen werden, die beim Verhütten mit Kohle nicht nutzbar gemacht werden.

Ein anderer Vorteil, den der Sauerstoffofen noch bietet, ist der Umstand, eine höhere Verbrennungstemperatur im Ofen erreichen zu können als es beim Hochofen beim Arbeiten mit Heißwind möglich ist. Da aber die im Hochofen mit Heißwind erzielbaren Temperaturen für die Roheisenerzeugung vollauf genügen, ist dieser Umstand für die Roheisenerzeugung nicht als Vorteil anzuführen. Dagegen ist dieser von Bedeutung, wenn man im Sauerstoffofen solche Stoffe erzeugen will, die eine höhere Arbeitstemperatur verlangen, die mit Heißwind nicht zu erreichen ist. Dieses ist bei der Erzeugung vieler Ferrolegierungen der Fall, z. B. Ferrochrom, deren Erzeugung bisher dem Elektroofen vorbehalten war.

Die Roheisenerzeugung im Elektroniederschachtofen

Beim Elektroniederschachtofen wird ein Teil der für die Roheisenerzeugung notwendigen Energie durch Strom geliefert. Reduktionskohlenstoff und Aufkohlungskohlenstoff sind auch für ihn erforderlich, dagegen wird der Heizkohlenstoff durch Strom ersetzt. Der Gichtgasanfall je t Roheisen ist niedriger als beim Hochofen und Sauerstoffniederschachtofen, da die aus der Verbrennung des Heizkohlenstoffs stammenden CO-Gase wegfallen. Je t Roheisen entstehen aus der Verbrennung des Reduktionskohlenstoffs mit Erzsauerstoff etwa 700 Nm³ Gichtgas mit einem Heizwert von etwa 2500 Kcal/Nm³, insgesamt also etwa 1,7 Mio Kcal je t Roheisen. Der Elektroniederschachtofen erzeugt also bedeutend weniger Wärme je t Eisen im Gichtgas als Hochofen und Sauerstoffofen, vergleicht man jedoch die für fremde Betriebe je t Eisen freibleibende Wärme im Gichtgas, so steht der Elektroniederschachtofen mit seinen 1,7 Mio Kcal nicht viel besser da als der Hochofen mit seinen 2 Mio Kcal. Der Heizwert des Gases ist allerdings mit 2500 Kcal/Nm³ bedeutend besser als der des Hochofengases mit nur 1000 Kcal/Nm³.

Der Elektroniederschachtofen ist nur niedrig gebaut, da die Elektroden zu lang würden, wollte man ihn höher bauen. Eine größere Höhe ist auch gar nicht zweckmäßig, denn die geringe Abgasmenge kann ihre fühlbare Wärme auf verhältnismäßig kurzem Wege an den Möller abgeben. An die physikalische Beschaffenheit der Einsatzstoffe werden geringere Anforderungen gestellt als beim Hochofen. Die Druckfestigkeit kann gering sein, das Material muß aber auch stückig sein. Ideal wäre eine möglichst gleichmäßige kleinere Korngröße von etwa 10 bis 30 mm. Feines, pulverförmiges Material verarbeitet auch der Elektroofen nicht. Wird

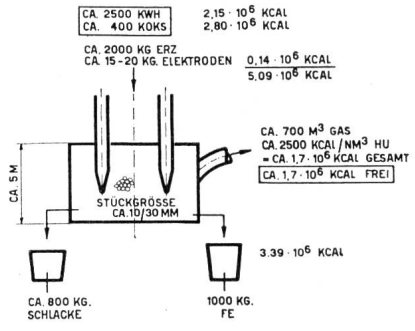

Abb. 3
Elektro-Niederschachtofen, schematische Darstellung mit Anhaltszahlen

der Anteil des Möllers an feinem Material zu groß, so wird der Ofengang unregelmäßig, da die Reduktionsgase nicht gleichmäßig entweichen können. Es kommt dann zu Gasüberdrücken, der Stromverbrauch je t Eisen wird dadurch erhöht. Bei allen Reaktionsvorgängen, bei denen ein gasförmiges Produkt entsteht, wie bei der Reduktion mit Kohlenstoff das CO, müssen die Abgase entweichen können. Je größer die Menge dieser Abgase ist, um so größer muß die Stückgröße der Einsatzstoffe sein, damit die Gase genügend Raum haben, um entweichen zu können. Deshalb verlangt der Hochofen, bei dem zu den Reduktionsgasen noch die Abgase aus der Verbrennung des Heizkohlenstoffs hinzukommen, eine Stückgröße von etwa 70 bis 80 mm. Für den Sauerstoffniederschachtofen genügt eine solche von etwa 20 bis 40 mm, weil bei ihm die Abgasmenge aus der Verbrennung des Heizkohlenstoffs infolge Sauerstoffanreicherung geringer ist. Beim Elektroofen kann die Stückgröße noch kleiner (etwa 10 bis 30 mm) sein, da nur das Reduktionsgas entweichen muß. In der Wahl des Reduktionskohlenstoffs ist man beim Elektroofen ziemlich frei. Es können Koks, Kohle und zum Teil auch Koksgrieß verwendet werden. Die Ansprüche, die an den Kohlenstoff gestellt werden, sind noch geringer als für den Sauerstoffniederschachtofen. Die indirekte Reduktion ist beim Elektroofen schwächer als beim Hochofen oder Sauerstoffniederschachtofen, wegen der an sich geringeren Gasmenge und der kurzen Durchsatzzeit.

Am gebräuchlichsten für die elektrische Roheisenerzeugung ist heute der Tysland-Hole-Ofen, der aus einem zylindrischen Gefäß besteht, in das von oben drei im Dreieck angeordnete Elektroden und auch der Möller (Erz und Koks oder Kohle) eingeführt werden. Die größten zurzeit im Bau befindlichen Elektroroheisenöfen haben eine Leistung von etwa 20 000 kW. Bei guten Erzen werden je t Roheisen etwa 2500 kWh gebraucht, d. h. ein 20 000-kW-Ofen kann etwa 190 t Roheisen im Tag erzeugen. Im Vergleich zu einem Hochofen mit einer Tagesleistung von etwa 1000 t ist das wenig. Auch in absehbarer Zukunft wird mengenmäßig die Elektroroheisenerzeugung im Vergleich zur Erzeugung im Hochofen eine geringe Rolle spielen. Trotzdem gewinnt aber für Länder mit billigem Hydrostrom die Elektroroheisenerzeugung an Bedeutung. Eine wichtige Frage für die elektrische Roheisenerzeugung ist, ob man die Leistung einer Einheit noch vergrößern kann. Rein technisch sollte dieses möglich sein, da man ja Kalziumkarbidöfen bis zu einer Leistung von 30 000 kW baut. Doch ist es nicht ausgeschlossen, daß bei Leistungssteigerung beim Eisen Schwierigkeiten metallurgischer Art auftreten. Beim Elektroofen findet in verhältnismäßig engem Schlauch um jede Elektrode ein großer Energieumsatz höchstwertiger, elektrischer Energie statt. Wenn dieser Energieumsatz in der Raumeinheit zu groß wird, kann die Durchsatzzeit so groß werden, daß nicht genügend Zeit für die Vorbereitung des Möllers und die Reduktion des Erzes vorhanden ist. Die Qualität des Eisens kann darunter leiden. Durch Erhöhung der Elektrodenzahl von 3 Elektroden auf z. B. 6 Elektroden liesse sich die Leistung einer Einheit verdoppeln, ohne den Energieumsatz um eine Elektrode herum steigern zu müssen.

Die Frage, wann elektrische Verhüttung oder wann andere Verfahren für die Eisenerzeugung zu wählen sind, läßt sich dahingehend beantworten, daß die elektrische Verhüttung wohl nur mit Hydrostrom in Frage kommt. Es würde in jedem Falle unrichtig sein, aus Kohle Strom zu erzeugen, um mit diesem Verhütten zu wollen; denn für solche Fälle gibt es wirtschaftlichere Verfahren, mit denen direkt mit Kohle Eisen erzeugt werden kann. Dieses ist vorauszusetzen, wenn man die in der Literatur vielfach aufgestellte Beziehung zwischen kWh-, Koks- oder Kohle-Preis, wonach bei einem Verhältnis von 1 kg Koks gleich etwa 6 kWh die elektrische Verhüttung und Verhüttung mit Koks gleichzusetzen sind, zur Beurteilung dieser Frage beiziehen will. Nach dem Verhältnis von 1 kg Koks = 6 kWh dürfte z. B. in der Schweiz eine kWh nur etwa 0,8 Rp. kosten, wenn man gleiche Gestehungskosten des Elektroroheisens wie z. B. an der Ruhr im Hochofen erzielen wollte, wobei der Reduktionskohlenstoff nicht teurer sein darf als an der Ruhr, wo eine t Hochofenkoks etwa 48 sFr. kostet. Stünde dagegen die Frage zur Diskussion, wie teuer in der Schweiz der Strom sein darf, damit die Gestehungskosten des Elektroroheisens nicht über den Importpreisen liegen oder über den Gestehungskosten für Hochofeneisen, das hier mit importiertem Koks herzustellen wäre, so würde das Ergebnis wieder ein anderes sein. Es läßt sich eben keine allgemein gültige Vergleichszahl angeben, sondern es müssen von Fall zu Fall verschiedene Momente für diese Betrachtung in Rechnung gestellt werden.

Roheisenerzeugung im Basset-Ofen

Auf ein weiteres Verfahren, das zwar noch wenig praktische Bedeutung besitzt, aber hinsichtlich der Art der verwendbaren Rohstoffe interessant ist, soll noch kurz eingegangen werden. Es ist das sog. Bassetverfahren, das im Drehofen zu gleicher Zeit Zementklinker und Roheisen erzeugt. War bei den drei im vorhergehenden angeführten Verfahren eine gewisse Stückigkeit des Materials erforderlich, so ist das beim Bassetverfahren nicht der Fall, im Gegenteil, hier müssen die Einsatzstoffe sehr fein sein. Feingemahlenes Erz oder auch Pyritasche werden mit dem notwendigen feingemahlenen Reduktionskohlenstoff und dem Rohmehl in den Ofen gegeben. Auf dem Wege durch den langen

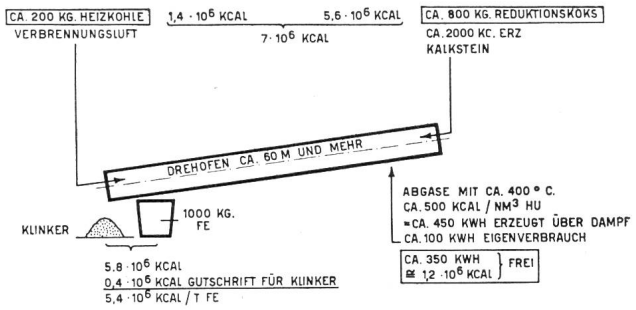

Abb. 4 Basset-Ofen, schematische Darstellung mit Anhaltszahlen

Drehofen wird das Eisenoxyd reduziert und zu Roheisen aufgekohlt. Es sammelt sich in flüssiger Form am Austragende des Drehofens, wo es von Zeit zu Zeit abgestochen wird. Das Rohmehl bildet mit den Schlackenkomponenten des Erzes und der Kohle oder des Kokses den Klinker, der das Eisen abdeckt. Man kann im Drehofen zwei verschiedene Zonen haben, nämlich eine Reduktionszone unterhalb der Klinkerschicht und eine Oxydationszone oberhalb der Klinkerschicht. Infolgedessen gelingt es, die Reduktionsgase in stärkerem Maße zu CO_2 zu verbrennen als es in den erwähnten Schachtöfen der Fall ist. Die je t Eisen erzeugte Klinkermenge und damit der Brennstoffverbrauch hängen von der chemischen Zusammensetzung der Einsatzstoffe ab. Es muß so gearbeitet werden, daß ein bestimmtes Verhältnis von CaO zu SiO_2 im Klinker nicht unterschritten wird. Bei diesem Verfahren erübrigen sich vielfach die Aufbereitungskosten der Einsatzstoffe. Hervorzuheben ist noch, daß der Schwefel in den Einsatzstoffen zu keinerlei Schwierigkeiten führt, da er durch den kalkigen Klinker ohne weiteres entfernt wird. Der Gesamtwärmeverbrauch je t Eisen unter Berücksichtigung des Klinkers liegt höher als bei den vorerwähnten Verfahren, was auf den bedeutend schlechteren thermischen Wirkungsgrad eines Drehofens im Vergleich zu Schachtöfen zurückzuführen ist. Dem ist wiederum entgegenzuhalten, daß an Aufbereitungskosten der Einsatzstoffe in Pulverform gespart werden kann. Auch hier läßt sich nichts Allgemeines über die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sagen, ohne die vielen dabei in Rechnung zu stellenden Faktoren geprüft zu haben.

Die Abbildungen 1 bis 4 geben ein schematisches Bild der vier besprochenen Verfahren, wobei die wichtigsten Anhaltszahlen angegeben sind. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß bei allen diesen Verfahren je t Roheisen mehr oder weniger Wärme in Form eines mehr oder weniger guten Gases anfällt. Diese Wärmemenge im Gas ist nach Abzug des jeweiligen Eigenverbrauchs mit etwa 5 Mio am größten beim Sauerstoffniederschachtofen, der mit Kohle arbeitet. Beim mit Koks arbeitenden Sauerstoffofen beträgt sie etwa 3 Mio und ist damit etwa 1 Mio größer als beim Hochofen, bei dem etwa 2 Mio für fremde Betriebe anfallen. Der Elektroniederschachtofen steht mit seinen 1,7 Mio Kcal dem Hochofen nicht sehr viel nach, was im allgemeinen nicht genügend beachtet wird. Der Basset-Ofen erzeugt etwa 1,2 Mio je t Eisen, wobei noch zu bemerken ist, daß das Gas des Basset-Ofens eigentlich nicht mit den anderen Gasen ohne weiteres verglichen werden darf; denn sein Heizwert ist so gering, daß es nur direkt am Ofen unter Ausnutzung seiner hohen fühlbaren Wärme verfeuert werden kann.

Der wirkliche Wärmeverbrauch je t Eisen, d. h. die je t Eisen insgesamt eingesetzte Wärme abzüglich der für fremde Betriebe im Gas freiwerdenden Wärme, ist ebenfalls eingetragen. Den niedrigsten Wärmerverbrauch hat der Elektroniederschachtofen mit 3,39 Mio je t Fe, dann folgt der Hochofen mit 3,6 Mio Kcal. Der Sauerstoffofen benötigt etwas mehr, nämlich etwa 4 Mio Kcal. Am höchsten ist der Verbrauch beim Basset-Ofen mit etwa 5,4 Mio Kcal, wobei eine Wärmegutschrift für den Klinker abgesetzt ist. Diese Wärmeverbrauchszahlen sind aber allein kein Maß für die Wirtschaftlichkeit. Für wirtschaftliche Betrachtungen muß auch die Wärmewertigkeit berücksichtigt werden. Diese kann geringer werden in der Richtung vom Hochofen zum Sauerstoffniederschachtofen, zum Elektroniederschachtofen, zum Basset-Ofen, der als Drehofen in der Lage ist, mit minderwertigstem Brennstoff zu arbeiten.

Les travaux hydrauliques de la Plaine de Sibérie et la liaison avec la mer Caspienne à travers le Kazakstan, l'Uzbégie et la Turkménie

Dans un pays aussi immense que l'Union des Républiques Soviétiques Socialistes, certains travaux atteignent une ampleur gigantesque, dont nous ne pouvons, en Suisse, nous faire que difficilement une idée. La Plaine de Sibérie offre des contrastes très accentués. Elle est entourée à l'ouest par les Monts Oural et, à l'est, par les collines et plateaux du district de Krasnojarsk (Monts Sayan). Au sud, le steppe des Kirghiz (Kazakstan) est barré par les contreforts des Monts Oural et du Pamir. La mer Caspienne, d'une étendue de 439 000 km² et d'une profondeur maximum de 1000 m, ferme à l'ouest cette vaste contrée, au centre de laquelle se trouve la petite mer d'Aral d'une étendue de 64 500 km² et d'une profondeur de 30 m seulement.

La Plaine de Sibérie et le steppe des Kirghiz sont reliés par un seuil peu élevé, appelé la porte de Tourgai,