

# Kosten von H<sub>2</sub> und die Reduktion mit Wasserstoff bei der Stahlherstellung

geschrieben von Admin | 27. Februar 2024

**Nun soll auch die Herstellung von „grünem“ Stahl durch Umstellung auf das Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff zur Klimaretterung beitragen – doch schon die dafür erforderlichen Energiekosten verschlingen gemessen an der Hochofen-Route Milliarden Euro**

**Dr.-Ing. Erhard Beppler**

## Fazit

Die Energiepreise laufen davon, dennoch soll in allen Sektoren im Sinne der Dekarbonisierung auf Wasserstoff umgestellt werden, ohne sich jedoch der Mühe zu unterziehen, die Kosten für die Umstellung auf Wasserstoff auch nur annähernd zu sichten.

Eine Schlüsselrolle bei der Umstellung auf Wasserstoff soll nun die Stahlindustrie durch Austausch des Hochofenverfahrens gegen das Direktreduktionsverfahren mit dem ausschließlichen Einsatz von Wasserstoff als Reduktionmittel übernehmen. Die Investitionen für diese Umstellung sind weitgehend ausgehandelt.

Die Kosten für die Herstellung bis zur Verarbeitung des Wasserstoffes bei der Umstellung der Stahlerzeugung auf Wasserstoff teilen sich im Wesentlichen auf nach 1. der ausschließlichen Stromerzeugung über Wind und Sonne, 2. der Herstellung von sauberem Wasser, 3. den Herstellkosten in H<sub>2</sub>-Elektrolyseuren, 4. den Energiekosten, 5. den Speicherkosten, 6. den Transportkosten.

Im Folgenden sollen in einem ersten Schritt ausschließlich die Energiekosten bei der Umstellung der Stahlherstellung behandelt werden. Basierend auf thermodynamischen Daten sind zunächst für die Reduktion von 1 kg H<sub>2</sub> 33 kWh erforderlich. Bei einem angesetzten Wirkungsgrad bei der Herstellung des Wasserstoffes in Elektrolysatoren von 70% sind dann für 1 kg H<sub>2</sub> 47 kWh aufzuwenden.

Auf der Basis der Industriestrompreise in 2023 von 0,265 Euro/kWh ergeben sich dann Energiekosten von 12,5 Euro/kg H<sub>2</sub> ( 2022 bei 0,432 Euro/kWh von 20,3 Euro/kg H<sub>2</sub>).

Wird von einer mittleren jährlichen Stahlerzeugung von 42,4 Mio. t Stahl ausgegangen, davon 23,3 Mio. t über die Hochofen-Route, so errechnet sich unter angesetzten Gleichgewichtsverhältnissen (Versuche in Schachtöfen bei ausschließlichem Einsatz von Wasserstoff sind nicht bekannt) für die Umstellung der Hochofenroute auf die Direktreduktion ausschließlich über Wasserstoff ein H<sub>2</sub>-Verbrauch von 3425 t H<sub>2</sub>/Tag (30 800 t H<sub>2</sub>O/Tag) und ein H<sub>2</sub>-Verbrauch von 54 kg/t Stahl (da hier von Gleichgewichtsverhältnissen ausgegangen werden muss, liegen diese Werte unter Betriebsbedingungen natürlich wesentlich höher).

Damit liegen die Energiekosten auf der Basis der Stromkosten in 2023 von 12,5 Euro/kg H<sub>2</sub> bei  $54 \times 12,5 = 675$  Euro/t Stahl (2022 bei Energiekosten von 20,3 Euro/kg H<sub>2</sub> bei 1096 Euro/t Stahl).

Diesen Energiekosten stehen Hochofen-seitig bei einem Koksverbrauch von 450 kg/t Roheisen und angesetzten Kokskosten von 450 Euro/t und bezogen auf eine Tonne Stahl 237 Euro/t Stahl gegenüber (die Zahlen für den Hochofenbetrieb basieren auf Jahrzehnte-langen Erfahrungen).

Daraus errechnen sich dann jährliche Ausgaben alleine für die Energiekosten

– Hochofenbetrieb  $23,3 \text{ Mio.t Stahl/a} \times 237 \text{ Euro/t Stahl} = 5\,500 \text{ Mio. Euro/a}$

– Direktreduktion Basis 2023:  $23,3 \text{ Mio.t Stahl/a} \times 675 \text{ Euro/t Stahl} = 15\,700$  Millionen Euro/a, d.h. etwa 10 Milliarden Euro/a höher gemessen am Hochofenbetrieb (2022: Mehrkosten etwa 20 Milliarden gemessen am Hochofenbetrieb)

Diese Mehrkosten verstehen sich ohne die Kosten für die Erzeugung von grünem Strom über Wind und Sonne, die Wasseraufbereitung, die H<sub>2</sub>-Darstellung in H<sub>2</sub>-Elektrolyseuren, die H<sub>2</sub>-Speicherung sowie den H<sub>2</sub>-Transport innerhalb Deutschlands sowie Seetransporte (zahlreiche Projekte zur Herstellung von Wasserstoff in Lateinamerika, im arabischen Raum und in Afrika laufen auf Hochtouren).

## 1. Einleitung

Die Transformation der Stahlindustrie lässt sich der Staat viele Milliarden Euro kosten: Salzgitter, Thyssenkrupp und auch die Saarstahlholding haben ihre Förderbescheide, jetzt darf auch Arcelor Mittal damit rechnen.

Die Stahlindustrie in Deutschland verursacht knapp 30% der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie und leidet unter den hohen Energiepreisen in Deutschland.

Auch die „Kraftwerksstrategie“ (ein weiterer Sektor) sollte – als Voraussetzung für den Ausstieg aus der Kohle wie der Atomenergie – bisher schon in 2030 umgesetzt sein, nun soll die Stromerzeugung nach einer neuen Zielmarke in 2035 klimaneutral sein. Ursprünglich waren zur Abdeckung der Stromleistung in Wind- und Sonnen- armen Zeiten 50 neue Gaskraftwerke vorgesehen (25 GW), nun sollen in einem ersten Schritt kurzfristig 10 GW ausgeschrieben werden, die nach 2035 vollständig auf Wasserstoff umgestellt werden sollen – erschreckend wenig für die bis dahin geforderten Stromverbräuche. (1)

Dabei fehlt es nicht an Plänen, ohne jedoch in Betracht zu ziehen, mit welchen Kosten diese Umstellungen auf Wasserstoff verknüpft ist.

Im Folgenden wird dieser Frage nur für die aufzubringende Energie für die Umstellung der Stahlindustrie auf die Wasserstofftechnologie nachgegangen. Dabei soll die Hochofen- Route ersetzt werden durch das Direktreduktionsverfahren unter ausschließlicher Nutzung von Wasserstoff.

Bezüglich der Kosten für die Herstellung von Wasserstoff gibt es im Schrifttum eine Reihe von Angaben, die in weiten Grenzen schwanken:

4-8 Euro/kg H<sub>2</sub> (2), 1,23 Euro/kg H<sub>2</sub> für die Herstellung + 5 Euro/kg H<sub>2</sub> für den Transport (3), 6 Dollar/kg H<sub>2</sub> (4), 5,99 Euro/kg H<sub>2</sub> für die Herstellung + 2 Euro/kg H<sub>2</sub> für den Transport (5), +10 Dollar/kg H<sub>2</sub>. (6)

Die Kosten für die Herstellung von Wasserstoff teilen sich im Wesentlichen wie folgt auf:

1. Kosten für die Erzeugung von grünem Strom über Wind und Sonne
2. Kosten für die Beschaffung von sauberem Wasser
3. Herstellkosten in Wasserstoff-Elektrolyseuren
4. Energiekosten
5. Speicherkosten
6. Transportkosten (u.a. Umstellung der Erdgasnetze auf Wasserstofffähigkeit; Wasserstoff-Transport mit Schiffen)

Im Folgenden soll für den Standort Deutschland zunächst versucht werden, ausschließlich die Energiekosten für die Herstellung von Wasserstoff für den Einsatz im Direktreduktionsverfahren genauer zu ermitteln.

## 2. Energiekosten

### 2.1 Energiekosten basieren zunächst auf thermodynamischen Daten

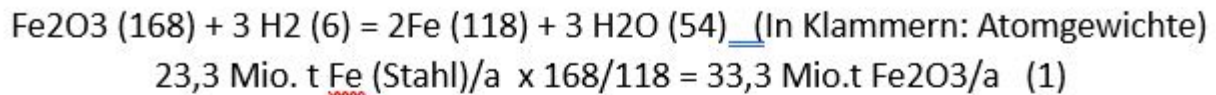
Die unabänderliche Basis für die Abschätzung der Kosten für die Herstellung von Wasserstoff sind zunächst thermodynamische Daten:

-  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$      $-57\,810 \text{ kcal/kmol}$ , aus denen sich ein Stromverbrauch von 33 kWh/kg H<sub>2</sub> errechnet. Unter Berücksichtigung eines bei der Herstellung von Wasserstoff in Wasserstoff-Elektrolyseuren angesetzten Wirkungsgrades von 70% summiert sich dann der Betrag auf  $33/0,7 = 47 \text{ kWh/kg H}_2$ .

Der Industriestrompreis in Deutschland lag 2023 bei 0,265 Euro/kWh (2022 bei 0,432 Euro/kWh (statista)). Daraus errechnen sich alleine über den Strompreis für 47 kWh/kg H<sub>2</sub> auf der Basis der Energiekosten von 2023:  $47 \times 0,265 = 12,5 \text{ Euro/kg H}_2$  (2022:  $47 \times 0,432 = 20,3 \text{ Euro/kg H}_2$ )

2.2. Kostenvergleich Hochofen-Route mit dem Direktreduktionsverfahren mit ausschließlichem Wasserstoffeinsatz – wo müsste der Preis für Wasserstoff nur auf Basis der Energiekosten liegen, um Kostenparität mit dem Hochofen zu erzielen

Wird von 12,5 Euro/kg H<sub>2</sub> in 2023 ausgegangen, kann bei einer jährlichen Produktion an Stahl in Deutschland über die Hochofen-Route von etwa 23,3 Mio. t unter angesetzten Gleichgewichtsverhältnissen wie folgt gerechnet werden (1):



Für das Direktreduktionsverfahren muss dann die folgende H<sub>2</sub>-Menge bereitgestellt werden:

$$33,3 \text{ Mio. t Fe}_2\text{O}_3/\text{a} \times 6/168 = 1,25 \text{ Mio.t H}_2/\text{a} \text{ oder } 3 \text{ 425 t H}_2/\text{Tag} \quad (2)$$

Bei dieser Betrachtung der Wasserstoffverbräuche darf nicht unerwähnt bleiben, dass mangels Betriebsergebnissen in Schachtofen nur mit H<sub>2</sub>-Einsatz von Gleichgewichtsverhältnissen im Schachtofen ausgegangen werden muss, die in einem durchströmten Schachtofen jedoch nicht erreicht werden können, d.h. die Wasserstoffverbräuche werden im Betrieb zwangsläufig höher liegen. (die Wasserstoffmenge für das Einschmelzen des Eisenschwammes wie des Schrottes sind in den Betrachtungen nicht eingeschlossen -vgl. (1)).

Die genannten H<sub>2</sub>-Mengen entsprechen einer Menge an sauberem Wasser von 30 800 t H<sub>2</sub>O/Tag.

Schließlich errechnet sich ein H<sub>2</sub>-Verbrauch von

$$1,25/23,3 = 0,054 \text{ t H}_2/\text{t Fe (Stahl)}.$$

Wird der genannte Strompreis von 2023 angesetzt, so liegen die Energiekosten in 2023 bei:

$$54 \text{ kg H}_2/\text{t Fe} \times 12,5 \text{ Euro/kg H}_2 = 675 \text{ Euro/t Fe (Stahl)} \quad (3)$$
$$(2022: 1096 \text{ Euro/t Fe (Stahl)})$$

(Begleitelemente vernachlässigt).

Roheisen enthält etwa 95% Fe, Koks etwa 90% Kohlenstoff.

Wird von Kokskosten von etwa 450 Euro/t ausgegangen und einem Koksverbrauch von 450 kg/t Roheisen, so gilt für die Kosten für die Reduktion der Eisenoxide im Hochofen:

$$450 \text{ Euro/t Koks} \times 0,450 \text{ t Koks/t RE} \times 100/90 \times 1 \text{ t RE} \times 100/95 = 237 \text{ Euro/t Fe} \quad (4)$$

(4) (die Hochofenkennzahlen basieren auf jahrelangen Betriebserfahrungen)





Um Kostengleichheit für die Roheisenerzeugung im Hochofen und der Stahlherstellung nach dem Direktreduktionsverfahren nur mit Wasserstoff und nur auf der Basis der Energiekosten zu erlangen, müsste der Preis für die Tonne Wasserstoff ohne Berücksichtigung der Gasgutschrift am Hochofen und ohne eine etwaige Gasgutschrift beim Direktreduktionsverfahren (Versuche mit nur Wasserstoff sind nicht bekannt) nur auf Basis der Energiekosten wie folgt liegen: 2023:

$$675 \text{ Euro/t Fe (Stahl)} \text{ über H}_2 \times X = 237 \text{ Euro/t Fe (Stahl) Hochofenroute}$$

$$X = 237/675 = 0,351$$

d.h. um Kostenparität zwischen dem Betrieb im Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff und dem Hochofenbetrieb mit dem Einsatz von Koks zu erreichen, dürfte der Preis für Wasserstoff nur auf der Basis der Energiekosten

$$0,351 \times 12,5 = 4,38 \text{ Euro/ kg H}_2 \quad \underline{(5)} \quad \text{aufweisen oder}$$

$$54 \text{ kg H}_2/\text{t Fe} \times 4,38 \text{ Euro/ kg H}_2 = 236 \text{ Euro/t Fe (Stahl)} \quad (6)$$

#### Entstehende Mehrkosten durch die Umstellung auf Wasserstoff

Werden die Industriestrompreise der Jahre 2023 (2022) angesetzt, ergeben sich folgende Mehrkosten bei der Anwendung des Direktreduktionsverfahrens mit Wasserstoff gemessen am Betrieb nach der Hochofen-Route:

-2023 Betrieb Direktreduktion mit Strompreis 0,265 Euro/KWh:

$$23,3 \text{ Mio. t Fe (Stahl)/a} \times 675 \text{ Euro/t Fe (Stahl)} = 15\,730 \text{ Mio. Euro/a} \quad (3)$$

(2022: 25 540 Euro/a)

- Betrieb nach der Hochofen-Route:

$$23,3 \text{ Mio. t Fe (Stahl)/a} \times 236 \text{ Euro/t Fe (Stahl)} = 5\,500 \text{ Mio. Euro/a}$$

Das entspricht:

- Mehrausgaben Basis 2023: 15 730- 5 500 etwa 10 Milliarden/a

(2022: 25 540 – 5 500 etwa 20 Milliarden Euro/a)

- Kostengleichheit liegt bei 4,38 Euro/kg H<sub>2</sub> – vgl. Gleichung (5) – bzw. 236 Euro/t Fe (Stahl) – vgl. Gleichung (6).

### 3. Schlussbetrachtung

Bei dieser Betrachtungsweise fehlen die erheblichen Kosten für die Herstellung von grünem Strom (vgl. später), die Kosten für die Beschaffung von sauberem Wasser, die Wasserstoffherstellung über H<sub>2</sub>-Elektrolyseure, die H<sub>2</sub>-Speicherung sowie die Transportkosten innerhalb Deutschlands sowie Seetransporte (zahlreiche Milliarden-Projekte in Lateinamerika, im arabischem Raum sowie in Afrika laufen auf Hochtouren).

Die hier durchgeführten Berechnungen zeigen erneut den hoffnungslosen und planlosen Umgang dieser Regierung in Energiefragen. Da ist es nicht

verwunderlich, dass die Energie-intensiven Industrien ins Ausland abwandern, die Direktinvestitionen aus Deutschland ins Ausland bei der gegebenen Unsicherheit massiv zunehmen und die Direktinvestitionen aus dem Ausland nach Deutschland gegen null gehen. Über die Marginalität des anthropogenen CO<sub>2</sub>-Anteiles am CO<sub>2</sub>-Anstieg der Atmosphäre ist in früheren Arbeiten berichtet worden, insbesondere der Deutschlands (Bild 1). (7)

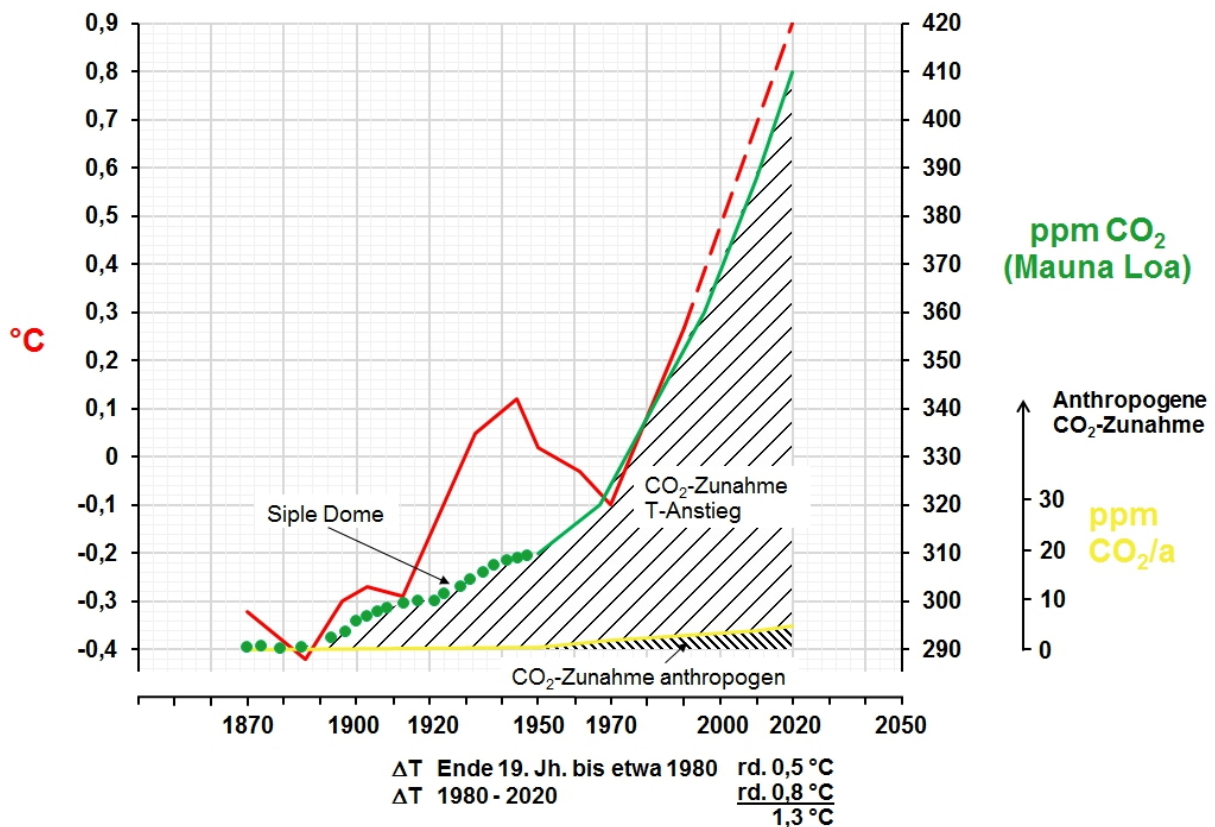


Bild 1: Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Anstieges der Atmosphäre sowie der Beitrag der weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Zunahme zu diesem Anstieg

Die hier diskutierten Maßnahmen zur Umstellung der Stahlerzeugung auf die Wasserstofftechnologie ebenso wie die Umstellung aller übrigen Sektoren auf Wasserstoff sind bezogen auf den CO<sub>2</sub>-Anstieg der Atmosphäre vernachlässigbar, zumal der Anteil Deutschlands an den in Bild 1 dargestellten weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen nur bei 2% liegt. Damit ist auch die Aussage des IPCC zur Wirkung des anthropogenen CO<sub>2</sub>-Eintrages auf das Klima widerlegt.

Der einzige Weg zur Absenkung der Energiekosten wie der Stabilisierung der Stromnetze ist die Stromerzeugung mit fossilen Energierohstoffen sowie die Stromerzeugung über Kernenergie, d. h. die sinnlose ideologische Verteuerung des Stromes über CO<sub>2</sub>-Zertifikate muss zwingend ein Ende haben, bevor Deutschland gänzlich verarmt.

Schließlich kostet die Stromerzeugung aus heimischer Braunkohle 3 ct/KWh und wird durch die CO<sub>2</sub>-Abgaben z.Z. bereits um 6 ct/KWh verteuert. Für die Verteuerung des Strompreises über Strom aus Wind und Sonne gilt u.a.: die Windanlagenbetreiber erhalten eine garantierte

Einspeisevergütung von 7,35 ct/KWh, die Solaranlagenbetreiber von 11-13 ct/KWh – weit entfernt von den 3 ct/KWh bei der Stromerzeugung aus Braunkohle.

Aussagen, dass der Zubau von erneuerbaren Energien über Wind und Sonne zu einer Verbilligung der Stromerzeugung führen, gehören in den Bereich einer geradezu Märchen-haften Ideologie.

## 4. Quellen

1. Beppler, E.: "In Dubai priorisierte der Kanzler die Umstellung der Stahlerzeugung auf die H<sub>2</sub>-Technologie – aber wo sollen die geforderten 6 000 t H<sub>2</sub>/Tag dargestellt werden." EIKE, 12.01.2024
2. FAZ, 05.12.2023
3. Waniczek, H.: „Wasserstoff, der Retter der Energiewende“, EIKE, 17.12.2022
4. Goreham, St.: „Grüner Wasserstoff benötigt gewaltige Subventionen“, EIKE, 25.10.2023
5. Meyer-Gosh, S.A.: Stahl und Eisen, Dezember, 2023
6. Menton, F.: „Wenn man die Zahlen betrachtet, ist grüner Wasserstoff ein Fehlschlag.“ EIKE, 19.02.2024
7. Beppler, E.: „Zur (absurden) Meinung des IPCC, der CO<sub>2</sub>-Anstieg sei ausschließlich menschengemacht“; EIKE, 11.04.2022