

Zur Ressourceneffizienz und Ökobilanzierung von Baustahl in geschlossenen industriellen Kreisläufen

B. Hauke

Zusammenfassung Zur Ökobilanzierung von Baustahl im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbewertung werden momentan der Closed-Loop-Ansatz und der Cut-Off-Ansatz diskutiert. Beide Vorgehensweisen werden beispielhaft erläutert. Im Sinne einer holistischen Vorgehensweise ist der Closed-Loop-Ansatz besser geeignet den geschlossenen industriellen Kreislauf von Baustahl zu berücksichtigen. Längere Transportwege von Baustahl fallen in der Ökobilanz durchaus ins Gewicht und müssen berücksichtigt werden. Ressourceneffizienz im Stahlbau muss zukünftig über die Masseneffizienz hinaus auch die Ökobilanz einbeziehen. Dies wird am Beispiel eines Stahlrahmens erläutert. Durch die Verwendung von höherfesten Stahlgüten kann Energiebedarf und CO₂-Emission bei den Baumaterialien eingespart werden. Zukünftig werden spezifische Umweltproduktdeklarationen (EPD) die Datengrundlage der Ökobilanzierung von Baustoffen sein.

Resource efficiency and eco-balance of structural steel in closed industrial cycles

Abstract For the eco-balance of structural steel within the frame of a sustainability assessment the closed-loop concept and cut-off concept are currently discussed. Both concepts are exemplified. In the sense of a holistic approach the closed-loop concept is better suitable for the closed industrial cycle of structural steel. Longer routes of transport must be considered in the eco-balance of structural steel. Resource efficiency of steel structures must beyond the mass efficiency prospectively also involve the eco-balance. This is illustrated with an example steel frame. With the application of higher strength steel grades energy demand and CO₂-emission of the construction materials can be reduced. In the future specific environmental product declarations (EPD) will be the data basis for the eco-balance of construction materials.

1 Nachhaltiges Bauen im Kontext

Die Anfänge des nachhaltigen Bauens reichen mindestens bis in die frühen 90er Jahre des letzten Jahrhunderts zurück. Damals wurde besondere Aufmerksamkeit auf die ökologischen Auswirkungen des Bauens gerichtet. Später kamen andere Teilaspekte, wie z.B. die Lebenszyklusbetrachtung oder auch die verstärkte Berücksichtigung der Energieeffizienz hinzu. Aber erst mit einer angestrebten holistischen Bewertung aller Aktivitäten und aller Aspekte rund um das Planen, Bauen und Betreiben von Bauwerken kann von einer nachhaltigen Bauwirtschaft gesprochen werden. Es ist nicht das Ziel, einzelne Aspekte – z.B. die Energieeffizienz –

zu optimieren, sondern mit allen relevanten ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Ressourcen und Schutzgütern schonend umzugehen. Die dafür unabdingbaren Bewertungswerkzeuge, wie z.B. das deutsche DGNB-Gütesiegel der zweiten Generation, LEED aus den USA oder das britische BREEAM-Gütesiegel sind derzeit in der Entwicklung. Von einem abgeschlossenen Prozess kann nicht die Rede sein.

Nachdem das Bemessungsleitbild des konstruktiven Ingenieurs das gesamte 20. Jahrhundert hindurch von den Fragen der Tragfähigkeit und des Neubaus dominiert war, setzt nun zu Beginn des 21. Jahrhunderts ein allmähliches Umdenken ein. Die früheren „Rohbauingenieure“ entwickeln sich zu „Lebenszyklusingenieuren“ weiter. Diese werden sich zukünftig neben den weiterhin immens wichtigen Fragen der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit eben auch mit den soziokulturellen, ökonomischen und ökologischen Aspekten von Planen, Bauen und Betreiben sowie Umbauen und Rückbauen von Bauwerken beschäftigen. Damit wächst uns eine gesellschaftlich überaus relevante Aufgabe zu.

Im Rahmen der Bewertung der ökologischen, aber auch der ökonomischen Qualität von Bauwerken als Teilaspekt der Nachhaltigkeitszertifizierung spielt der Ressourcen schonende Einsatz der Baumaterialien eine wichtige Rolle. Wie viel Energie muss zur Erzeugung eines Kilogramms Baustoff aufgewendet werden und wie viel CO₂ wird dabei freigesetzt? Um wirklich eine Aussage zur Ressourceneffizienz treffen zu können, muss dann noch die Frage beantwortet werden, wie viel Bauwerk nun mit diesem Kilogramm Baustoff auch hergestellt werden kann. Und was passiert mit diesem Baustoff nach dem Lebensende des Bauwerkes? Gibt es dann ein Kilogramm Bauschutt oder gar Sondermüll? Kann der Baustoff vielleicht mit verminderten Eigenschaften einer neuen Nutzung zugeführt werden? Das nennt man down-cycling. Kann der Baustoff immer wieder für eine vergleichbare Aufgabe und mit gleichbleibenden Materialeigenschaften eingesetzt werden? Das ist dann re-cycling im eigentlichen Sinne und man spricht von einem geschlossenen industriellen Kreislauf.

In diesem Beitrag werden anhand des regenerierbaren Baustoffes Baustahl die verschiedenen Betrachtungsweisen zur Ökobilanzierung erläutert. Der Begriff der Ressourceneffizienz, welcher über die reine Masseneffizienz hinaus geht, wird beispielhaft dargestellt.

2 Grundlagen der Ökobilanzierung

In einer Ökobilanz werden die potenziellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebenswegs eines Bauproduktes (Herstellung, Bau, Nutzung, Instandhaltung, Rückbau/Abriss) untersucht. Meist erfolgt nur die Betrachtung der Materialherstellung (Cradle to Gate), teilweise unter Einbeziehung der Entsorgungswege. Transport, Fertigung, Montage und

Dipl.-Ing. Bernhard Hauke, Ph.D., VDI

Geschäftsführer >>bauforumstahl e.V.

Sohnstraße 65

40237 Düsseldorf

zentrale@bauforumstahl.de

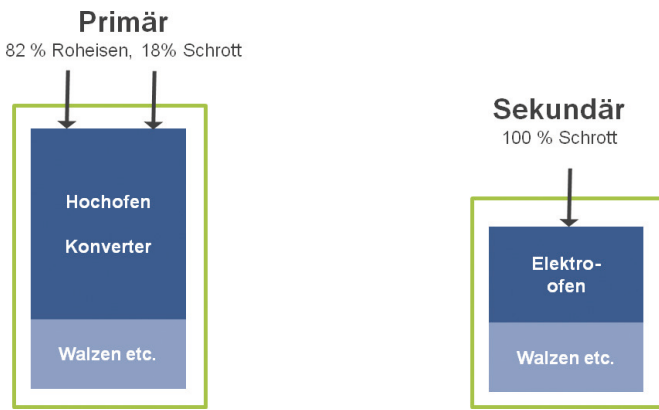


Bild 1. Prinzip des Cut-Off-Ansatz: Hochofen vs. Elektroofen – wird jeweils nur der Prozess betrachtet gibt es deutliche Unterschiede in der Ökobilanz
 Fig. 1. Principle of the cut-off approach: blast furnace vs. electric furnace – if only the manufacturing process is looked at the eco-balance shows clear differences

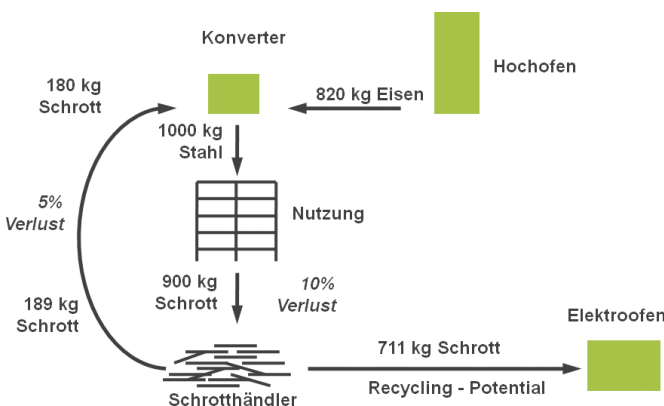


Bild 2. Prinzip des Recycling-Potentials von Hochofenstahl
 Fig. 2. Principle of the recycling-potential for blast furnace steel

Rückbau müssen extra betrachtet werden. Allerdings sind diese Anteile im Vergleich zur Herstellung meist relativ gering. Übliche Wirkkategorien einer Ökobilanz sind das Treibhauspotential, das Ozonschichtzerstörungspotenzial, das Ozonbildungspotenzial, das Versauerungspotenzial, das Überdüngungspotenzial sowie der erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergiebedarf. Vereinfachend und exemplarisch werden hier nachfolgend nur noch die CO₂-Emission (für das Treibhauspotential) sowie der Energiebedarf insgesamt betrachtet.

Bei der Erstellung einer Ökobilanz müssen einige grundlegende Aspekte berücksichtigt werden. Vorausgesetzt wird hier ein Material, das ohne Einbußen bei der Qualität voll recyclebar ist, wie z.B. Stahl oder Aluminium. Den größten Einfluss hat dann die Wahl des Bilanzierungsrahmens. Es gibt zum einen den so genannten Cut-Off-Ansatz, bei dem nur der Herstellungsprozess betrachtet wird. Wichtig für die Bewertung ist hierbei der Anteil des Sekundärmaterials (z.B. Schrott), welches ohne einen „ökologischen Rucksack“ zur Verfügung gestellt wird. Darum spricht man auch vom „Recyclinganteil-Ansatz“. Dem gegenüber betrachtet, der so genannte Closed-Loop-Ansatz den gesamten industriellen Kreislauf eines Materials als Bilanzrahmen. Anhand der aktuellen Recyclingrate wird berücksichtigt, dass durch die Sekundärproduktion die entsprechende Primärproduktion und die zugehörigen Belastungen vermieden werden. Darum spricht man auch vom „Ansatz der verhinderten Belastung“ oder dem „Ansatz des Recyclings am Lebensende“. Im

engeren Sinne von richtig oder falsch kann bei keinem der beiden Ansätze gesprochen werden. Im Sinne einer holistischen und den gesamten Lebenszyklus betrachtenden Vorgehensweise ist der Closed-Loop-Ansatz jedoch besser geeignet.

Neben dem Bilanzierungsrahmen ist der Strommix für die ökologischen Ergebnisse wichtig. Ein hoher Wasserkraftanteil ist günstig, viel Energie aus Kohlekraftwerken mit niedrigem Wirkungsgrad ist ungünstig. Auch die Qualität der Datenbanken ist von Bedeutung und hat unmittelbaren Einfluss auf die Ergebnisse. Je nach Quelle ergeben sich oftmals signifikante Unterschiede. Das liegt daran, dass Bilanzierungsrahmen (siehe oben), Systemgrenzen (bei „Cradle to Gate“ müssen z.B. Transportwege etc. zusätzlich berücksichtigt werden) oder Verteilregeln (Allokationen) oft nicht exakt vergleichbar sind.

3 Ökobilanzierung von Baustahl

Stahlschrott als Sekundärrohstoff kann aus jedem stählerenen Produkt gewonnen werden - von der Rasierklinge über Kühlschränke bis zu Altautos. Das Stahlrecycling schafft so eine nachhaltige Entsorgung. Und schließlich wird dieser Sekundärrohstoff zu Walzträgern verarbeitet. So entsteht ein geschlossener, industrieller Materialkreislauf, weil diese Stahlprofile immer wieder vollständig und mit gleichbleibender Werkstoffqualität wirklich recycelt werden. Mit diesem Potential zum Recycling – die Recyclingrate liegt aufgrund der Werthaltigkeit bei weit über 90% – wird der Einsatz von Primärrohstoffen bei der Baustahlproduktion nachhaltig verringert und die Umwelt deutlich entlastet; die Ökobilanz macht es deutlich.

Für die moderne Herstellung von Baustahl gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Routen: Den Primärprozess bei dem im Hochofen aus Erzen Eisen erschmolzen und dieses dann im Konverter (Oxygenverfahren) unter Einsatz von Kühltischrott zu Stahl veredelt wird sowie den Sekundärprozess bei dem aus 100% Schrott im Elektroofen wieder Stahl hergestellt wird. Die Schritte der Weiterverarbeitung, z.B. das Walzen, sind bei beiden Verfahren vergleichbar. Beim oben beschriebenen Cut-Off-Ansatz (**Bild 1**) wird nur der reine Herstellungsprozess betrachtet. Bei isolierter Betrachtung sind hier beim Primärprozess (Oxygenstahl) z.B. Energiebedarf und damit verbundene CO₂-Emission deutlich höher als beim Sekundärprozess (Elektrostahl), da Eisenoxid zu Eisen reduziert werden muss. Das Recycling-Potential des Oxygenstahls wird hierbei jedoch nicht berücksichtigt. Beide Prozesse sind jedoch für einen funktionierenden industriellen Kreislauf erforderlich.

Der Begriff des Recycling-Potentials von Oxygen- oder Primärstahl wurde bereits mehrfach verwendet. Dieser bedeutet, dass bei einer angenommenen Recyclingrate von z.B. 90% (sie ist tatsächlich noch etwas höher) von 1000 kg verbautem Baustahl 900 kg am Lebensende des Bauwerkes beim Schrotthändler landen (**Bild 2**). Von diesen 900 kg fließen 189 kg wieder zurück in den Primärprozess als technologisch erforderlicher Kühltischrott. Der Rest aber - in unserem Beispiel sind das 711 kg - stellt das echte Recycling-Potential dar (**Bild 2**). Das Recycling-Potential steht dem Elektroofenprozess als Sekundärmaterial zur Verfügung und verhindert die höhere Belastung aus dem reinen Primärprozess.

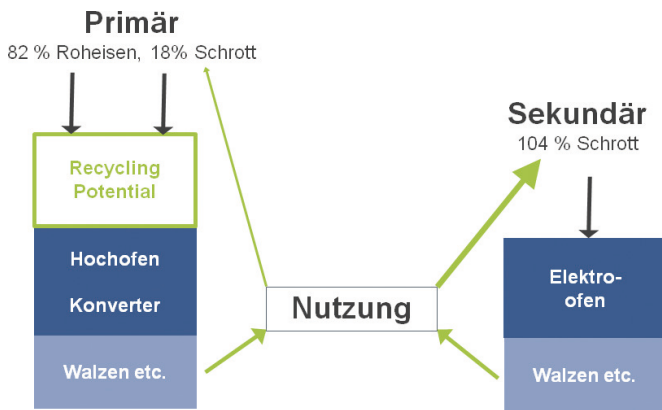


Bild 3. Prinzip des Closed-Loop-Ansatz: Hochofen und Elektroofen ergänzen sich im industriellen Kreislauf

Fig. 3. Principle of the closed-loop approach: blast furnace and electric furnace augment each other in an industrial cycle.

Ein Material ohne echte Recyclingfähigkeit hat demnach auch kein Recycling-Potential. Bei der Herstellung von Elektro- oder Sekundärstahl wird sich bei der Produktion der Schrott im Sinne eines Pfandgutes „ausgeliehen“ und am Lebensende wieder zurückgegeben. Da bei der Elektrostahlproduktion ein Verlust von ca. vier Prozent auftritt, muss jedoch dem Kreislauf in diesem Umfang auch wieder Primärstahl zugeführt werden.

Berücksichtigt man nun in einem geschlossenen industriellen Kreislauf nach dem Closed-Loop-Ansatz das Recycling-Potential der Primärstahlproduktion, so verringert sich der Unterschied in Energiebedarf und CO₂-Emission zwischen den Routen deutlich und den langfristigen industriellen Zusammenhängen wird Rechnung getragen (Bild 3, 4 und 5). Typischerweise ist Baustahl in Deutschland und dem umliegenden Wirtschaftsraum zu rund 75% Elektrostahl und zu rund 25% Oxygenstahl. Die Transportwege vom Werkstor (Gate) bis zur Stahlbauwerkstatt bzw. der Baustelle sind hier selten länger als 500 km. Wenn man dem gegenüber jedoch eine reine Oxygenstahlproduktion z.B. in Ostasien annimmt (der unterschiedliche Energiemix wird vereinfachend vernachlässigt), so müssen noch geschätzte 500 km Transport bis zum Hafen, 10000 km Seefracht und wieder 500 km Transport berücksichtigt werden [5]. Für die Wirkkategorien Energiebedarf und CO₂-Emission ist ein kurzer Transport innerhalb Deutschlands ohne nennenswerte Auswirkung (Bilder 6 und 7). Längere Transporte fallen in der Ökobilanz durchaus deutlich ins Gewicht.

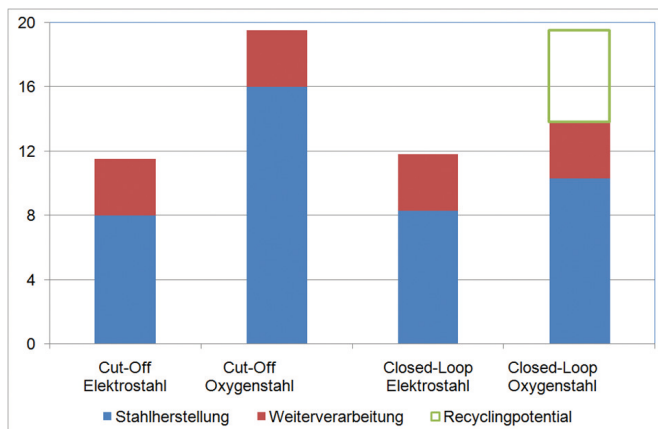


Bild 4. Typischer Energiebedarf bei der Stahlherstellung [MJ/kg Stahl] nach Bilanzrahmen und Route

Fig. 4. Typical energy demand of the steel production [MJ/kg steel] depending on balance scope and route

4 Ressourceneffizienz im Stahlbau

Ressourceneffizienz wird auch bei stählernen Tragkonstruktionen ein wichtiges Thema bleiben. Durch die volle Recyclebarkeit und Kreislauffähigkeit hat Baustahl bei einer ganzheitlichen Betrachtung deutliche Vorteile. Klassischerweise betrachtet der konstruktive Ingenieur nur die verbaute Stahltonnage und vielleicht noch die zugehörigen Material- und Fertigungskosten. Mit der Auswahl eines modernen U-Profils der UPE-Reihe kann z.B. gegenüber der klassischen UPN-Reihe Stahlgewicht eingespart werden (Bild 8). Durch Hochleistungstähle S555, S460 und punktuell auch höher lassen sich im Vergleich zum Standardstahl S235 Bauteilgewicht, Schweißaufwand und in der Summe auch Bauteilkosten sparen, z.B. bei weitgespannten Fachwerkträgern oder Parkhausdeckenträgern. Pilarski [3] hat eine Parameterstudie zur wirtschaftlichen Anwendung von Verbundträgern mit höheren Stahlgüten durchgeführt. Für die meisten Belastungen, Spannweiten etc. ist Stahl S460 die wirtschaftlichste Wahl. Besonders für große Spannweiten und hohe Belastungen sind die ökonomischen Vorteile in der Bauphase substantiell.

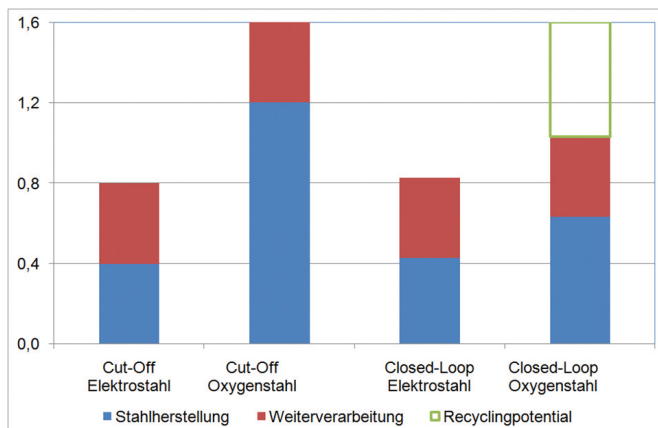


Bild 5. Typische CO₂-Emission bei der Stahlherstellung [kg CO₂/kg Stahl] nach Bilanzrahmen und Route

Fig. 5. Typical CO₂-emission of the steel production [kg CO₂/kg steel] depending on balance scope and route

Wie sieht es aber mit den ökologischen Aspekten aus? Um dies zu untersuchen wurde ein Rahmen als Teil einer typischen Hallenkonstruktion ausgewählt [6]. Hallen haben weniger Anforderungen an die Haustechnik und die Innenraumklimatik als Geschossbauten, so dass hier weniger die Energieeffizienz sondern die holistische Ressourceneffizienz der Baustoffe wichtig ist.

Als Tragsystem wurden eingespannte Stützen mit gelenkig angeschlossenen Binder gewählt. In Bild 9 sind weitere Abmessungen zu sehen. Die gewählte Schneelast beträgt 75 kg/m².

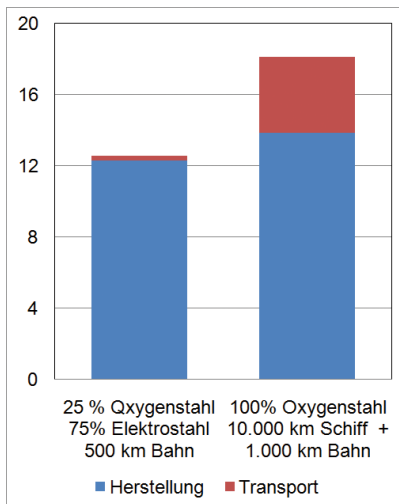


Bild 6. Typischer Energiebedarf für Baustahlherstellung und Transport [MJ/kg Stahl]
Fig. 6. Typical energy demand of structural steel production and transport [MJ/kg steel]

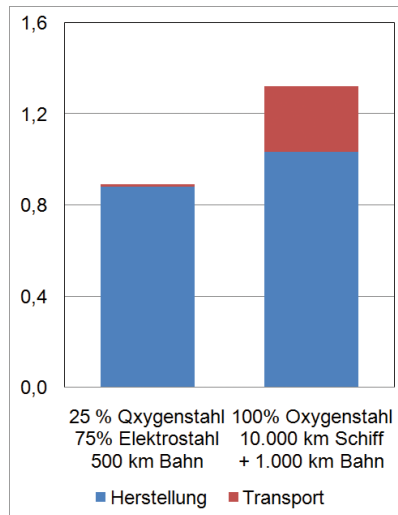


Bild 7. Typische CO₂-Emission für Stahlherstellung und Transport [kg CO₂/kg Stahl]
Fig. 7. Typical CO₂-emission of structural steel production and transport [kg CO₂/kg steel]

In **Tabelle 1** sind die ermittelten Walzprofile in Abhängigkeit von der Stahlgüte angegeben sowie die Gesamtmassen für Baustahl, Beton und Betonstahl – Bodenplatte oder Frostschürze sind nicht berücksichtigt. Bei den Köcherfundamenten lassen sich wegen des geringen Eigengewichtes der Hallenkonstruktion keine Einsparungen durch die höheren Stahlgüten bzw. geringeren Bauteilgewichte erzielen.

Mit den entsprechenden Baustoffdaten aus der Phase der Pilotzertifizierung 2008 des DGNB-Gütesiegels (**Tabelle 2**) lässt sich nun die Umweltbeeinflussung für einen einzelnen Stahlrahmen mit Fundamenten exemplarisch ermitteln. Es wird dabei angenommen, dass die Lebensdauer aller Bauteile mindestens so lange wie die Lebensdauer der Halle ist, so dass kein Austausch von Bauteilen erfolgen muss.

In **Bild 10** ist der Energiebedarf zur Herstellung der Baumaterialien (Baustahl, Beton, Betonstahl) für den Stahlrahmen mit Betonfundamenten dargestellt; in **Bild 11** der entsprechende CO₂-Ausstoß. Es fällt auf, dass der Anteil für die Fundamente relativ hoch ist. Durch die Verwendung von höherfesten Stahlgüten kann in diesem Beispiel 15 bis 23 Prozent an Energiebedarf und CO₂-Emission bei den Baumaterialien eingespart werden. Noch nicht berücksichtigt sind hier weitere positive Effekte wie geringere Transporttonnage oder weniger Fertigungsaufwand.

5 Ausblick

Im Rahmen einer holistischen Betrachtung des industriellen Kreislaufes der Baustahlverwendung von der Primärproduktion aus Erz, über die Nutzung als Ressourcen schonendes Baumaterial bis zum unbegrenzt wiederholbaren Recycling im Sekundärprozess erscheint der Closed-Loop-Ansatz gegenüber der isolierten Betrachtung des Herstellungsprozesses im Cut-Off-Ansatz schlüssiger.

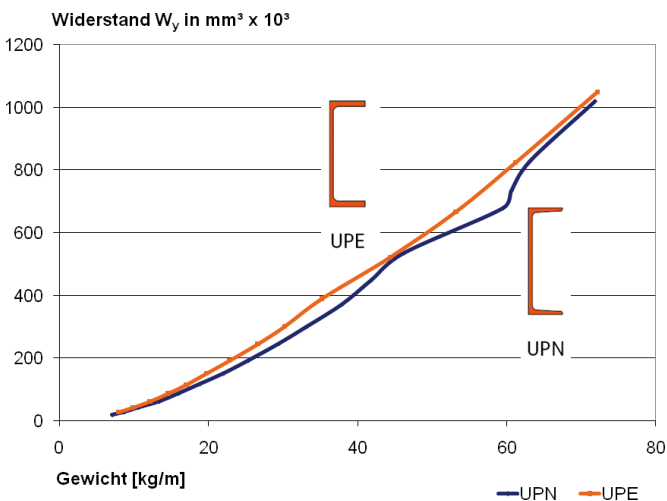


Bild 8. Ressourceneffizienz durch Auswahl geeigneter Walzprofile: UPE vs. UPN
Fig. 8. Resource efficiency through choose of appropriate rolled sections: UPE vs. UPN

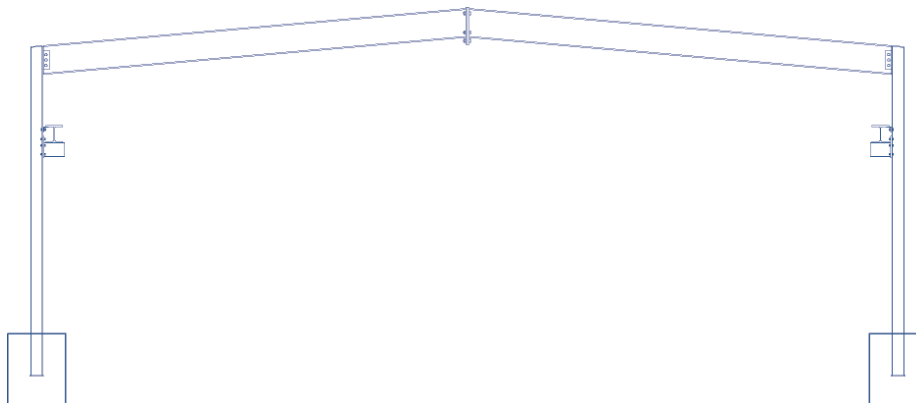


Bild 9. Typische Stahlhallenkonstruktion [6] mit eingespannten Stützen und gelenkig angeschlossenerm Binder: Spannweite 15 m, Traufhöhe 5 m und Dachneigung 5°
Fig. 9. Typical single story steel building [6] with fixed columns and pinned girders: 15 m span, 5 m eaves height and 5° roof pitch

Tabelle 1. Auswahl der Profile für Riegel und Stütze, Baustoffmassen für einen Rahmen
Table 1. Choice of sections for girder and columns, bill of quantities for a building frame

Stahlgüte	S235	S355	S460
Stützprofil	HEA 200	HEA 180	HEA 180
Riegelprofil	IPE 500	IPE 400	IPE 360
Summe Baustahl	1,83 t	1,39 t	1,25
Fundamente Beton C25/35 m ³	4,4 m ³	4,4 m ³	4,4 m ³
Fundamente Betonstahl BSt500	0,22 t	0,22 t	0,22 t

Tabelle 2. Verwendete Umwelt-Baustoffdaten aus der Phase der Pilotzertifizierung 2008 des DGNB-Gütesiegels
Table 2. Employed eco construction material data from the pilot certification 2008 of the DGNB – label

Baustoffdaten	Energiebedarf	CO ₂ -Emission
Baustahl S235, S355, S460	10,3 MJ/kg	0,71 kg/kg
Beton C25/35	1129 MJ/m ³	216,5 kg/m ³
Betonstahl BSt500	12,2 MJ/kg	0,80 kg/kg

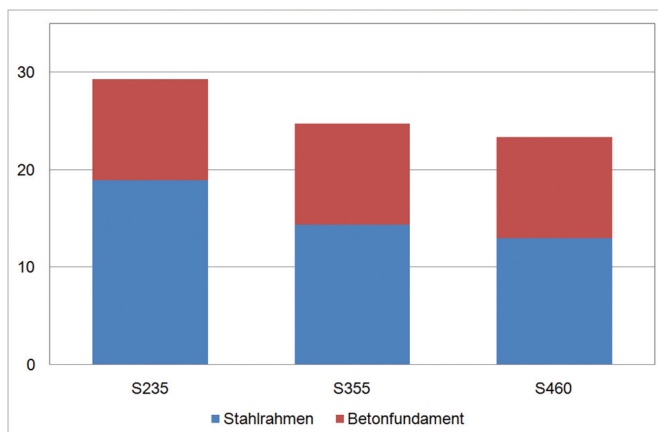


Bild 10. Energiebedarf in [GJ] zur Herstellung der Materialien „Cradle to Gate“ für einen Stahlrahmen mit Betonfundamenten bei Ansatz unterschiedlicher Stahlgüten.

Fig. 10. Energy demand in [GJ] for the construction material production “cradle to gate” for a steel frame with concrete foundations assuming different steel grades

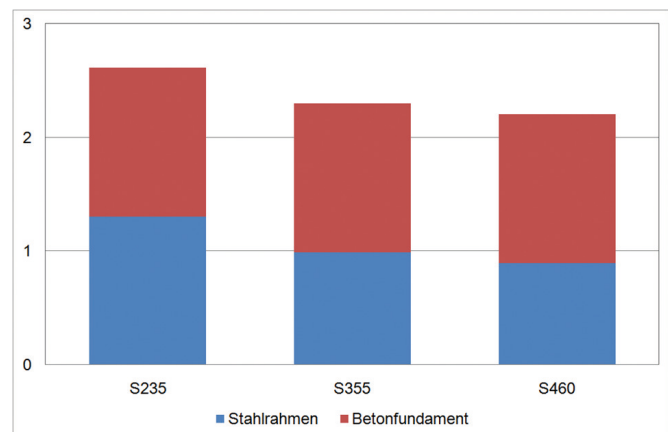


Bild 11. CO₂-Emission in [t] zur Herstellung der Materialien „Cradle to Gate“ für einen Stahlrahmen mit Betonfundamenten bei Ansatz unterschiedlicher Stahlgüten

Fig. 11. CO₂-emission in [t] for the construction material production “cradle to gate” for a steel frame with concrete foundations assuming different steel grades

In der weiteren Entwicklung der Datenermittlung für die Ökobilanzierung werden die bestehenden Datenbanken, welche immer einen eher unpräzisen Marktdurchschnitt abbilden müssen, durch so genannte Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration, EPD) ergänzt und abgelöst werden. Die EPDs werden entweder für die Produkte nur eines Herstellers oder - was sicher interessanter für den momentanen Baumarkt ist - für eine Gruppe von Herstellern mit vergleichbaren Produkten erarbeitet, z.B. Baustahl.

Durch gezielte Nutzung moderner Stahlbauprofile und höherfester Stahlgüten entstehen technisch, wirtschaftlich und ökologisch viel versprechende Möglichkeiten für nachhaltige Baukonstruktionen. Wichtig für eine tatsächliche Nutzung dieses Innovationspotentials ist ein rationales Überdenken von oft seit Jahrzehnten wenig veränderten Konstruktionsprinzipien und der Materialauswahl.

Literatur

- [1] Frischknecht, R.: LCI Modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. Recovery of Materials and Energy for Resource Efficiency '07 World Congress, Davos (2007)
- [2] Hauke, B.: Entwicklung und wirtschaftliche Anwendung von Verbundbauteilen aus Hochleistungsmaterialien. Bautechnik-Tag, Mainz (2007)
- [3] Pilarski, J.: Technisch-wirtschaftlicher Vergleich von Hochleistungs-Verbundträgern mit traditionellen Bauweisen im Hoch- und Industriebau. Diplomarbeit, FH Frankfurt (2006)
- [4] Hauke, B.: Economic application of composite beams with moderate high strength materials. 5th European Conference on Steel and Composite Structures, Graz (2008)
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat, (2008)
- [6] Kocker, R. und Möller, R.: Typenhallen aus Stahl. bauforumstahl e.V., Düsseldorf (2009)
- [7] Hauke, B.: Leitgedanken zum nachhaltigen Bauen. bauforumstahl e.V., Düsseldorf (2009)
- [8] McDonough, W. und Braungart, M.: Cradle to cradle – remaking the way we make things. North Point Press, New York (2002)