



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial

Ergebnisse des ‚Zukunftsdialogs
Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung‘



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Wuppertal, Juni 2008

Redaktion:

Thomas Lemken
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19
Postfach 10 04 80
42004 Wuppertal

Tel.: +49 (0)2 02 / 24 92 - 179
Fax: +49 (0)2 02 / 24 92 - 138
thomas.lemken@wupperinst.org

Autorinnen und Autoren:

Thomas Lemken
Christa Liedtke
Katrín Bienge
Corinna Salzer
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH



Diese Broschüre ist im Rahmen des F+E Vorhabens „Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung, Teilvorhaben 1: Potenzialermittlung, Maßnahmenvorschläge und Dialog zur Ressourcenschonung“ entstanden. Dieses Forschungsprojekt wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt (Förderkennzeichen 206 93 100/01, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit).

Die in der Broschüre geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Auftraggebers übereinstimmen.

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern durchgeführt:



UNEP/WUPPERTAL INSTITUTE COLLABORATING
CENTRE ON SUSTAINABLE
CONSUMPTION AND PRODUCTION



Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Institute for Futures Studies and Technology Assessment

Gestaltung: Stephan Preuß Grafik + Design, Wuppertal; Stephan Preuß, Marion Hintz, Michael Conen

Einleitung	4
1 Stahl – ein globales Werkstoffsystem	5
2 Leitmärkte zur Verbreitung ressourcenschonender Technologien	9
3 Maßnahmen für den ressourceneffizienten Stahleinsatz	9
3.1 Optimierung bestehender Anwendungsfelder	14
3.2 Erschließung weiterer Ressourceneffizienzpotenziale	14
3.3 Ansätze zur Verbesserung der Rahmenbedingungen	20
4 Ausblick	24
Literatur	25

Diese Broschüre ist im Rahmen des vom Umweltbundesamtes geförderten Forschungsprojektes „Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“ entstanden. Das Projekt wurde federführend vom Wuppertal Institut gemeinsam mit dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung in Berlin (IZT) und dem UNEP/Wuppertal Institute Collaborating Centre on Sustainable Consumption and Production (CSCP) durchgeführt.

Sie spiegelt die Ergebnisse des Zukunftsdialogs von 2007 bis 2008 wider und gibt einen Einblick über aktuelle Potenziale, Chancen und Hemmnisse zur Verbesserung der Rohstoff- und Ressourcenproduktivität im Fokusbereich „Werkstoffsystem Stahl“. Hintergrundrecherchen, Experteninterviews und Workshops waren Teil des offenen Dialogprozesses mit Akteuren aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft. Darüber hinaus werden ausgewählte Maßnahmenoptionen mit Beispielen für effiziente Handlungsansätze vorgestellt.

Ziel des Zukunftsdialogs war die Bündelung konkreter und praxisrelevanter Beiträge zur Verbesserung der Rohstoffproduktivität und der Ressourcenschonung und die Erarbeitung von Maßnahmenoptionen zur Steigerung der Ressourcenproduktivität. Diese gilt es nun an vorhandene politische Initiativen wie die Europäische Ressourcenstrategie und die ‚Ökologische Industriepolitik‘ des Bundesumweltministeriums (BMU) anzuknüpfen.

Wir möchten an dieser Stelle allen Personen, die sich in den Dialogprozess eingebracht haben und/oder für ein Interview zur Verfügung standen, unseren herzlichen Dank aussprechen. Viele der Anregungen und Vorschläge sind in den nachfolgenden Text eingegangen.

*Weiterführende Informationen und diese Publikation als Download finden Sie unter:
<http://www.ressourcenproduktivitaet.de>*

Ressourcenpolitik ist ein neues Politikfeld, welches sich den Chancen und Risiken stellt, die mit dem Rohstoff- und Energieverbrauch unserer Wirtschaftsweise einhergehen. Aus umweltpolitischer Sicht geht es in der Ressourcenpolitik vor allem um eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der damit verbundenen Umweltbelastung entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Deutschland ist im Bereich der Rohstoffwirtschaft in hohem Maße abhängig von der Versorgung aus anderen Volkswirtschaften. Preissteigerungen für Rohstoffe und Rohstoffkonflikte bei erhöhter weltweiter Nachfrage verschärfen diese Situation.

Jede Ressourcennutzung ist lebenszyklusweit mit Energieeinsatz und Umweltbelastungen verbunden. Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, Produktnutzung, Recycling sowie Entsorgung finden in einer globalisierten Wirtschaft auf unterschiedlichem umwelt- und arbeitsschutztechnischem sowie sozioökonomischem Niveau statt. Für die Verbesserung der Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung gilt es daher integrative Ansätze für diese ressortübergreifenden Herausforderungen an Politik und Wirtschaft zu finden und Handlungsfelder für mehr Ressourceneffizienz in Deutschland (Begriffe siehe Kasten) – auch mit Bezug zu den europäischen Aktionsplänen wie z.B. der Initiative „European Technology Steel Platform“ (vgl. ESTEP 2005) – zu identifizieren.

Das Werkstoffsystem Stahl ist ein solches Handlungsfeld mit hohen Potenzialen zur Ressourceneffizienzsteigerung. Maßnahmen für einen ressourceneffizienteren Umgang mit Stahl sollen weniger Ressourcenverbrauch mit höherer Nutzenstiftung verbinden (Rohstoffproduktivität) und die Ressourcenintensität über den Lebenszyklus auf ein umweltverträgliches Niveau verringern (Ressourcenschonung). Das Schlagwort „Ressourceneffizienz“ führt diese beiden Ziele zusammen. Die entwickelten Maßnahmenoptionen greifen sowohl industrie- als auch umweltpolitische Aspekte auf.

Ressourcennutzung: „Bezeichnet hier jeglichen Zugriff des Menschen auf natürliche Ressourcen, sowohl direkt (z.B. durch die Entnahme von Rohstoffen) als auch indirekt (z.B. durch die Abgabe von Emissionen). Rohstoffe sind stoffliche Ressourcen im Naturzustand, die entnommen werden, um in der Ökonomie genutzt zu werden. Zu ihnen gehören Erze (für Metalle), Mineralien (z.B. Kalk, Kies, Sand, div. Steine), fossile Energieträger (v.a. Erdöl, Erdgas, Kohle), Biomasse, Boden oder Erde sowie Luft und Wasser.“

Ressourcenproduktivität: „Die erzielte Wertschöpfung pro Einheit dafür erforderlicher Ressource, z.B. BIP geteilt durch den gesamten Energieverbrauch, Einheit: Euro pro Joule. Ressourcenproduktivität zeigt die Effizienz der ökonomischen Nutzung von Ressourcen an.“ „Ressourceneffizienz bezieht sich allgemein auf das Verhältnis eines erwünschten Outputs eines Prozesses zu dem damit verbundenen Ressourcenaufwand oder -input. Ist der Output eine ökonomische Größe, z.B. Wertschöpfung oder BIP, so spricht man im gesamtwirtschaftlichen Kontext von „Ressourcenproduktivität“. Die Ressourceneffizienz von Prozessen kann sich jedoch auch auf das Verhältnis von physischen Relationen beziehen, z.B. das Verhältnis von verwerteter Rohstoffentnahme zur Gesamtextraktion von Primärmaterial.“

Ressourcenschonung: „Die natürlichen Ressourcen wie Rohstoffe, Flächen, Artenvielfalt und Umweltmedien, werden durch Produktion und Konsum in Anspruch genommen. Die heutigen Produktions- und Konsummuster und die damit verbundene Ressourceninanspruchnahme sind weltweit und auf Dauer jedoch nicht tragbar. Eine moderne Umweltpolitik hat daher die Aufgabe, die natürlichen Ressourcen zu schonen und damit unsere Lebensgrundlagen zu erhalten.“

Quelle: Schütz/Bringezu 2008

„Wir wissen, ein effektiver Ressourceneinsatz kann immense Kosten einsparen. Wir wollen den Blick darauf lenken. Permanent auf die Lohnkosten zu zeigen, ist wahrlich wenig phantasievoll und aus unserer Sicht nachweislich der falsche Weg. Konstruktiv und vorausschauend ist es hingegen, die enormen Einsparpotenziale bei den Ressourcen durch viele kreative Maßnahmen tatsächlich zu realisieren und in Kosteneinsparungen zu verwandeln.“

Jürgen Peters, ehemaliger Vorsitzender IG Metall, Ressourceneffizienz – Innovation für Umwelt und Arbeit 2007

1 Stahl - ein globales Werkstoffsystem

Produktion, Anwendung und das Recycling von Stahl geschehen in einem globalen Wertschöpfungskontext. Durch den Nachfrageboom in allen Anwendungsfeldern wie auch den neuen umwelttechnologischen Anforderungen entstehen neue Herausforderungen im globalen Werkstoffsystem.

Boomender Werkstoff in der weltwirtschaftlichen Entwicklung

Stahl und Eisen sind die dominierenden metallischen Werkstoffe. Die Stahl erzeugende und die Stahl verarbeitenden Industrien sind Schlüsselindustrien der deutschen, europäischen und weltweiten Wirtschaft. Ihre Produkte sind allgegenwärtig. Zu den wichtigsten verarbeitenden Branchen zählen die Automobilindustrie aber auch der Maschinen- und Anlagenbau oder das Bauwesen.

Nach einer Zeit der Stagnation befindet sich die Stahlindustrie derzeit weltweit in einem ausgeprägten Boom. Während in den Jahren 1974-2000 die Rohstahlerzeugung weltweit durchschnittlich 0,7 % im Jahr wuchs, betrug die jährliche Wachstumsrate in den Jahren 2000-2005 durchschnittlich 6,1 % und 2005-06 sogar 9,0 % (IISI 2007). Das Wachstum wird sich allerdings in den nächsten Jahren bei weiter steigenden Produktionsmengen verringern. Für die Jahre 2005-2010 sind es geschätzte 6,3 % (Ameling 2008). So stieg die Weltrohstahlerzeugung seit 1980 von 717 Mio. t auf aktuell insgesamt 1,34 Mrd. t (IISI 2007).

Dieser Boom wird durch das dynamische Wirtschaftswachstum der Schwellenländer mit den entsprechenden Produktionsmengen angetrieben. Neben Japan, USA, Russland und Indien zählt dazu China, der weltweit größte Produzent von Rohstahl mit 489 Mio. t im Jahr 2007. Die EU 27 lag mit 210 Mio. t an zweiter Stelle der Weltrohstahlerzeuger (IISI 2008). Eine Wertabschätzung des International Iron and Steel Institute wies für die Welterzeugung von Stahl für 2006 von 1,24 Mrd. t einen Wert von 670 Mrd. € aus (vgl. IISI nach Ameling 2008).

Neben dem Eisenerz werden auch Halbzeuge und Fertigprodukte weltweit gehandelt. 2007 waren China (54 Mio. t), die GUS Staaten (50 Mio. t) und Japan (31 Mio. t) die größten Nettoexporteure. In den vergangenen Jahren ist es ihnen gelungen, ihre Marktposition deutlich auszubauen. Die EU 27, Mitglieder des North American Free Trade Agreement (NAFTA) und der Nahe und Mittlere Osten hingegen zählen zu den Nettoimporteuren mit durchschnittlich je 20-30 Mio. t importiertem Halbzeug und Fertigprodukten. Auffällig dabei ist, dass es den NAFTA Staaten gelungen ist, ihre Importabhängigkeit deutlich zu reduzieren, wogegen ein enormer Anstieg der Abhängigkeit bei den EU 27 von 6,6 auf 20,5 Mio. t zu verzeichnen ist (Ameling 2008).

Wertschöpfungskette Stahl

Die Stahlerzeugung wird grundsätzlich von zwei Verfahrensrouten dominiert. In der Hochofenroute wird zunächst aus Eisenerz unter Zugabe von Reduktionsmitteln Roheisen hergestellt. Die dabei anfallende Schlacke kann z.B. für die Zementherstellung weiterverwendet werden. Aus dem flüssigen Roheisen wird in einem weiteren Schritt Rohstahl erzeugt (Primärerzeugung), in dem unerwünschte Begleitelemente (Kohlenstoff, Silizium, Schwefel, Phosphor) durch Aufblasen von Sauerstoff entfernt werden (Oxygenstahl). Zur Kühlung wird hierbei Schrott in eher geringen Mengen zugeführt. Ein weiteres Verfahren ist die Elektrolichtbogenroute, bei der kein Roheisen, sondern ausschließlich Schrotte zur Rohstahlerzeugung eingesetzt werden (Sekundärerzeugung). Für die Stahlherstellung sind je nach Herstellungsverfahren und Anwendungsbereich neben Energie also Eisenerz, Reduktionsmittel (Koks, Kohle, Öl oder Gas) und Zuschläge sowie Legierungselemente notwendig (vgl. BDS 2008). Die Elemente der Wertschöpfungskette Stahl (Rohstoffproduktion, Erzeugung und Weiterverarbeitung, Stahlverwendung) sind über den Handel miteinander verbunden. In Deutschland wurden im Jahr 2005 von 35 Mio. t Stahl der Bauindustrie, 24 % im Maschinenbau und 14 % in

der Autoindustrie eingesetzt. Zu den sonstigen Abnehmerbranchen (28 %) gehören u.a. das Transportwesen, die Verpackungsindustrie, Elektroindustrie und Gebrauchsgüter (Ellermann 2007).

Preisentwicklung und Rohstoffproduktivität

Der Stahlboom führte Anfang des neuen Jahrtausends zu einer „kleinen Stahlkrise“ aufgrund steigender Preise, leer gekaufter Märkte und Überhitzung der Kurse. Hier wurde auch deutlich, dass trotz steigender Nachfrage und steigender Preise die Substitutionspotenziale für Stahl in seinen Anwendungen begrenzt sind. Die Knappheiten bei der Stahlerzeugung sind allerdings eher durch die vorhandenen Produktionskapazitäten als durch die vorhandenen und erschlossenen Erzlagerstätten bedingt. Ähnlich ist die Situation bei Koks kohlen und Koks. Die teilweise enormen Preissteigerungen und -schwankungen der letzten Jahre sind vor allem auf begrenzte Kokereikapazitäten zurückzuführen. Zugleich hat die starke Nachfrage nach Rohstoffen in einigen Bereichen, etwa für Legierungselemente, die Versorgungssicherheit mindestens vorübergehend eingeschränkt, z.B. bei einigen wichtigen Legierungselementen, insbesondere beim Nickel, welcher für hochlegierte Stähle eines der wichtigsten Legierungselemente darstellt (U.S. Geological Survey 2008). Das führt bei produzierenden Unternehmen zu Unsicherheiten der Planung. Eine Verringerung der Rohstoffabhängigkeit durch eine verbesserte Ressourcenproduktivität kann daher eine erhöhte Planungssicherheit für Unternehmen bedeuten. Die Stahlproduktion und -verarbeitung in Deutschland finden auf hohem technischem Niveau statt. Hier wurde bereits in der Vergangenheit die Energie- und Materialeffizienz stetig verbessert und die Umweltbelastung verringert.

Effizienzfortschritte in der primären und sekundären Stahlerzeugung

Vergleicht man die in den einzelnen Ländern oder Weltregionen eingesetzten Verfahren der Primärerzeugung, so kann man am Indikator Reduktionsmittelverbrauch feststellen, dass Deutschland mit 486 kg Reduktionsmitteln pro Tonne Roheisen derzeit den niedrigsten Wert hat und China mit 555 kg/t hier noch Potenziale besitzt (Durchschnittswert weltweit liegt bei 543 kg/t) (Stahl-Zentrum 2007). Die Gründe hierfür sind vielfältig: geringerer marktwirtschaftlicher und gesellschaftlicher Druck zur Effizienz, Übernahme ausrangierter Technologien und verschiedene Mischungsverhältnisse der Reduktionsmittel.

Die Ressourceneffizienz der primären Stahlerzeugung wurde in Deutschland durch viele Optimierungsschritte bereits deutlich erhöht. Die Gesamtausbringung der eingesetzten Eisenressourcen wurde von ca. 65% im Jahr 1960 auf fast 90% in 2005 verbessert (Ameling 2008). Ebenso konnten zahlreiche verfahrenstechnische Optimierungen umgesetzt werden. Der spezifische Einsatz von Rohstoffen wurde so zwischen 1960 und 2003 pro Tonne Rohstahl um insgesamt 44% reduziert (Buttermann/Hillebrand 2005).

CO₂-ärmeres Verfahren der primären Stahlerzeugung: Direktreduktion

Ein alternatives Verfahren der primären Stahlerzeugung ist die Direktreduktion (DRI) von Eisenerz zu Eisenschwamm. Vorteile der Direktreduktion sind, dass durch den Einsatz von Erdgas als relativ CO₂-armes Reduktionsmittel auf die Verkokung von Koks kohle zu Koks verzichtet werden kann, so dass dadurch CO₂-Emissionen reduziert werden können. Heute verursachen insbesondere ältere Kokereien aufgrund von Undichtigkeiten häufig erhebliche Emissionen, insbesondere auch aromatischer Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzol). Bisher wird in Deutschland nur von Arcelor Mittal eine Direktreduktion betrieben. Die Produktionsmenge von ca. 0,5 Mio. t direkt reduziertem Eisen (DRI) (Mittal 2007) entspricht etwa 1 % der gesamten deutschen Rohstahlproduktion. Die weltweite Produktion von DRI steigt derzeit an. Die meisten DRI-Anlagen werden dabei in erdgasreichen und schrottarmen Regionen, insbesondere im Nahen Osten und Südamerika, errichtet. Auch hier kann weltweit ein ressourceneffizienterer Verfahrensmix durchaus zur Ressourcenschonung beitragen.

Bezogen auf die Sekundärerzeugung gab es im historischen Verlauf von 1965 bis 2000 deutliche Effizienzsteigerungen in der Erzeugung von Elektro Stahl. So gelang es, den Verbrauch von elektrischer Energie, die für die Herstellung notwendig ist, von 630 kWh/t auf 345 kWh/t und damit um 45 % zu reduzieren (Ameling 2008).

Bedeutung des Recyclings

Stahl ist grundsätzlich zu 100 Prozent recycelbar. Ausgenommen sind hier dissipative Verluste in die Öko- und Technosphäre, die nicht zurück gewonnen werden können z.B. durch Emissionen, Korrosion (vgl. Brahmer-Lohss et al. 2002). Deswegen wird bei Stahl auch nicht von einem Verbrauch, wie z.B. bei fossilen Energierohstoffen, sondern von Gebrauch gesprochen. Auch wenn generell keine geologische Knappheit an Eisenerzen besteht, so wird Recycling schon seit Beginn der Stahlnutzung aus ökonomischen Gründen betrieben. Der Recyclinganteil (Anteil Schrott an der Rohstahlherstellung) beträgt in der EU etwa 56 Prozent und weltweit etwa 40 Prozent (Ameling/Endemann 2007). In Deutschland existieren Recyclingraten für Rohstahl von ca. 45 % (Bezugsjahr 2006, bezogen auf die Produktion) und im Bereich von Weißblech von etwa 90 % (Bezugsjahr 2006, bezogen auf verfügbare Gesamtmenge) (GVM 2007, Destatis 2008).

Für importabhängige Verbrauchsländer wie Deutschland ist ein hoher Recyclinganteil unter den Aspekten der Kostenersparnis und Versorgungssicherheit von Bedeutung. Die Verarbeitung von Sekundärrohstoffen – vor allem aus dem inländischen Aufkommen – verringert die benötigten Importe. Auch die Bundesregierung misst der Steigerung des Recyclings von Metallen angesichts der Preisentwicklung auf den Welt-Rohstoffmärkten eine große Bedeutung zu (Deutsche Bundesregierung 2007).

Aus umweltpolitischer Sicht bietet das Stahlrecycling erhebliche Potenziale, da u.a. Belastungen durch Bergbau und Transport entfallen. Auch benötigt die Verarbeitung von Sekundärressourcen wesentlich weniger Energie und Ressourcen als die Produktion von Stahl aus Erz und ist mit geringeren Umweltbelastungen verbunden. So betragen die CO₂-Emissionen in der Elektrolichtbogenroute mit durchschnittlich ca. 0,5 kg CO₂/kg Stahl nur ein knappes Viertel der spezifischen CO₂-Emissionen der Hochofenroute mit durchschnittlich 2,2 kg CO₂/kg Stahl (IISI 1998). Eine kontinuierliche Verringerung der spezifischen CO₂-Emissionen in der Stahlherstellung konnte einerseits durch die kontinuierliche Erhöhung des Anteils von Stahl aus der Elektrolichtbogenroute, andererseits durch die generelle Prozessoptimierung erreicht werden (Still et al. 2005).

Das Thema Stahlrecycling kann aber nicht losgelöst von der Technologie der Stahlerzeugung diskutiert werden. Die Hochofenroute kann nur einen definierten Maximalanteil von Schrottzugaben im Konverter verarbeiten, die Elektroofenroute braucht dagegen fast ausschließlich Schrotte (ggf. auch Eisenschwamm). Auch der steigende Bedarf an höherwertigen Stählen ist zu beachten, da sich die Elektrolichtbogenroute für diese Herstellung bislang nicht eignet (Verunreinigungen im Schrott) (siehe Verhältnis Primär- zur Sekundärerzeugung). Recyclingraten sind daher eng an die Produktionsmethoden gekoppelt und müssen langfristig thematisiert werden. In der aktuellen Situation („explodierende“ Stahlnachfrage auf dem Weltmarkt) kommt es weltweit eher zu einer Verknappung der Ressource Schrott, was sich deutlich an der Preisentwicklung der letzten Jahre ablesen lässt. Nach Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl hat sich der Schrottpreis von 2002 (durchschnittlich 110 €/t) auf 2007 mehr als verdoppelt und erreichte so ein Allzeithoch von 241 €/t (bezogen auf den Jahresdurchschnitt Sorte 2) (vgl. BVSE 2008). Diese Situation wird sich erst über die nächsten Jahrzehnte (abhängig von der Lebensdauer der Produkte, in denen aktuell der Stahl verbaut wird) verändern. Eine Weiterentwicklung der Technologien kann zudem auch einen höheren Prozentsatz von Schrotten in der Hochofenroute ermöglichen.

Vom Recycling zum Urban Mining

Recyclingstrategien sind eng mit umweltpolitischen Anliegen verknüpft und zielen auf die perspektivische Veränderung von einer Durchflusswirtschaft auf eine Maß- und Recyclingwirtschaft. So führen die

linearen, industriell erzeugten Stoffströme einer Durchflusswirtschaft dazu, dass gerade einmal 20 % der Rohmaterialien mehr als ein Jahr verbleiben, da sie nach dem Einweg- und Wegwerfprinzip organisiert ist und Sekundärrohstoffe nicht zurück geführt werden. In einer Kreislaufwirtschaft sind die Stoffströme hingegen auf eine konsequente Kreislaufführung und einen abnehmenden industriellen Metabolismus ausgerichtet (Vermeiden, Verwerten, Lebenszyklusperspektive) (vgl. Schmidt-Bleek 2007). Japan mit seinem R3-Konzept (Reduction, Reuse, Recycling), China mit seinem Konzept der „Circular Economy“ und die EU mit ihrer Ressourcenstrategie forcieren eine solche Entwicklung, um neben Ressourceneffizienz und Klimaschutz, Engpässen in der Rohstoffversorgung entgegen zu wirken (vgl. Pintér 2006, Ministry of Environment Japan 2005, Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2005). Diese „Lagerstätten“ bilden bestehende Infrastruktur, Bauwerke und Konsumgüter. Bei ihrer Erschließung spricht man in Analogie zur Primärgewinnung in den Bergwerken vom „Urban Mining“. In Japan sind bereits Abschätzungen erarbeitet worden, um Umfang und Verbleib des anthropogenen Stahllagers zu bestimmen. Informationen zu den einzelnen Herstellungsverfahren, Quantitäten von Import und Export wie auch die Flüsse in die Abnehmerbranchen bilden die Datengrundlage, auf welcher mit Lebenszeitprognosen das Schrottaufkommen kalkuliert wurde. Dabei wurde für den Zeitraum von 2005 bis 2030 ein ansteigender Schrottanfall von 22 Mio. t/Jahr auf 33 Mio. t/Jahr berechnet (vgl. Matsuno/Daigo/Adachi 2007). Grund hierfür ist, dass alte, stahlbeinhaltende Güter zunehmend das Ende Ihrer Lebenszeit erreichen und so in das Schrottaufkommen mit eingerechnet werden können.

Verhältnis Primär- zur Sekundärerzeugung

Langfristig ist in mehreren Jahrzehnten von einer weiteren Zunahme des Anteils des Elektrostahl-Verfahrens auszugehen, auch wenn der Nachfrageboom und die Langlebigkeit der erzeugten Produkte eine Zunahme der Elektrostahlerzeugung zur Zeit unmöglich machen. Der Schrottanfall wird dann kontinuierlich zunehmen und sich in der Menge der Stahlproduktion allmählich annähern (Gyllenraum/Ekerot 2007). Zunehmend fallen dann auch Schrotte aus langlebigen Infrastrukturen an und vergrößern so den Schrottanfall. Diese Entwicklung sollte dazu führen, dass zukünftig ein höherer Anteil der Stahlproduktion aus Elektrostahlwerken gedeckt werden wird. Es ist aber dabei auch von großer Bedeutung, Produktionskapazitäten, Werkstoffentwicklung und Verwendung schon heute systematisch auf diese Situation vorzubereiten. Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft und mit Blick auf Ressourcenschonung ist dies ein wichtiger Schritt. Da heute viele der hergestellten hochwertigen Stahlsorten nur in der relativ verunreinigungsfreien Hochofenroute produziert werden können, würde durch ein solches Vorgehen schon jetzt Sortenreinheit für verschiedene Anwendungen hergestellt sowie neue Legierungen und Verfahren entwickelt, um auch mit der Elektrostahlroute vergleichbare Werkstoffe zu erzeugen (Moll/Acosta/Schütz 2005).

Ressourcenverbräuche im Vergleich - Werkstoffe und ihre Verwendung

Die dominierende Rolle, die Eisen und Stahl unter den metallischen Werkstoffen spielen, gilt auch für die mit der Gesamtproduktion verbundenen Umweltbeeinträchtigungen (van der Voet/van Oers/Nikolic 2003) und den Ressourcenverbrauch. Keine andere Metall erzeugende Industrie hat absolut gesehen eine vergleichbar hohe Produktionsmenge und damit einen vergleichbaren Ressourcenverbrauch. Die absoluten Produktionsmengen sind jedoch eine unmittelbare Folge der intensiven Stahlnachfrage. Diese steht im Zusammenhang mit der guten Verfügbarkeit der Rohstoffe und der vielseitigen Anwendbarkeit des Werkstoffes sowie seinen werkstofftechnischen, vielfach seinen ökonomischen aber auch ökologischen Vorteilen gegenüber anderen Werkstoffen.

Will man Stahl mit anderen Werk- und Baustoffen vergleichen, so muss dies neben der Bezugsgröße Gewicht auch im konkreten Einsatzfall (also auf der Ebene der Dienstleistungserbringung) erfolgen. Hierzu gibt der Indikator Total Material Requirement (TMR) Aufschluss. Der TMR umfasst die oftmals als „ökologische Rucksäcke“ bezeichneten Materialaufwendungen. Diese bestehen einerseits aus der nicht verwerteten Entnahme im Inland, z.B. Abraum bei der Gewinnung von Kohle,



Erdaushub bei Bautätigkeiten oder Bodenerosion infolge landwirtschaftlicher Bewirtschaftung. Zum anderen umfasst der TMR alle im Ausland lebenszyklusweit aufgewendeten Materialien, genutzt und ungenutzt, die zur Bereitstellung eines importierten Gutes erforderlich waren. Diese werden allgemein als indirekte Materialflüsse bezeichnet.“ (Schütz/Bringezu 2008: 84) Die TMR einzelner Grund-, Werk- und Baustoffe sind bezogen auf eine Gewichtseinheit bereits sehr unterschiedlich, so z.B. etwa für Holz 4,7 kg/kg (inkl. Energieaufwendung für Herstellung, Trocknung, Material für Sägen), für Stahlträger aus der Elektroofenroute etwa 8 kg/kg, für ein verzinktes Stahlblech etwa 9 kg/kg und für Stahlträger aus der Elektroofenroute (Stahlrecycling) etwa 1,8 kg/kg (inkl. Rohmaterialien für Energie). In der Hochofenroute spielen der Eisenerzabbau, Reduktionsmittel, die Beschaffenheit des Stahlwerks und verwendete Legierungen eine Rolle. Beim Stahlrecycling hingegen ist der Stromverbrauch maßgebend. Für die Primärproduktion von Aluminium sind im Vergleich mit Stahl höhere Materialinputs notwendig, da der Herstellungsprozess energieintensiver ist (u.a. Bauxitabbau, Anodenproduktion, Elektrolyse). Ein Aluminiumblech aus der Primärerzeugung hat einen TMR von etwa 38 kg/kg, aus dem Recyclingverfahren nurmehr 0,85 kg/kg (vgl. Herzog et al. 2003, Wuppertal Institut 2008, www.mips-online.info).

Doch bei der konkreten Verwendung verändern sich diese Verhältnisse: bei Tragrahmen im Bau aus Stahl, Holz oder Stahlbeton z.B hängt das Ergebnis sehr vom spezifischen Einsatzgebiet ab und muss jeweils berechnet werden oder bei der Automobilkarosserie wirkt das eingesparte Gewicht über Kraftstoffeinsparungen in der Nutzungsphase zusätzlich auf die Ressourcenproduktivität. Es hat sich hier gezeigt, dass Stahlkarosserien mit 'Tailored Blanks (maßgeschneiderte zusammengesetzte Blechplatinen aus unterschiedlichen Blechdicken und Werkstoffen) und sonstige Gewichtseinsparungen die Gewichtsvorteile des Aluminiums bisher lebenszyklusweit kompensieren kann (Langkamp 1995).

Große Verbesserungen bezüglich der Ressourcenproduktivität und damit auch der anderen ökologischen Faktoren würden sich hier etwa durch einen gezielteren und damit verringerten Einsatz von Zink (und anderen Legierungselementen) ergeben, da zu ihrer Herstellung ein hoher Materialinput (inkl. Rohmaterialien für Energie) notwendig ist. Doch lässt sich dies nicht einfach umsetzen, da diese Metalle spezifische Funktionen in Verbindung mit Stahl erfüllen. Zink trägt z.B. in einem erheblichen Maße zur Lebensdauererlängerung von Stahlprodukten bei.

2 Leitmärkte zur Verbreitung ressourcenschonender Technologien

Derzeit beträgt das Weltwirtschaftswachstum 4-5 % pro Jahr und wird weiter steigen um prognostizierte 3,4 % jährlich bis zum Jahr 2030. Dabei entwickeln sich Schwellenländer wie China und Indien mit einem Wirtschaftswachstum von ca. 7 % (Meyer 2007). Der gegenwärtige Industrialisierungsprozess, vor allem in den Schwellenländern, steigert die Nachfrage nach knappen Ressourcen drastisch. Aktuell ist der Anstieg des Wirtschaftswachstums mit etwa äquivalent ansteigenden Ressourcenverbräuchen gekoppelt. Diese Kopplung von Wohlstand/Wachstum und Ressourcenverbrauch ist die Ursache auch für den Klimawandel mit all seinen prognostizierten Wirkungen und Effekten sowie weiteren Schädigungen der Ökosysteme (IPCC 2007, Schmidt-Bleek 2007, Jäger 2007, Mauser 2007, Latif 2007). Das Bevölkerungswachstum bis 2050 sowie weiter steigende Urbanisierungsprozesse beschleunigen diese Entwicklung. Der Druck ist bereits messbar: der ökologische Fußabdruck der Menschheit übersteigt bereits 30% der natürlichen Regenerierbarkeit (Global Footprint Network 2007).

Das Wirtschaftswachstum wirft daher die Frage nach den Grenzen auf. Bis zu welchem Punkt und auf welche Art ist Wachstum möglich, ohne die Ressourcen zu erschöpfen und ohne die Biosphäre zu zerstören? Eine dynamische Strategie des Umbaus unserer Wirtschaften und Gesellschaften ist von größter Bedeutung. Ein Aspekt für den Umbau ist z.B. die Entwicklung und Anwendung von Leitmarktstrategien. Deutschland kann hier eine Pionierrolle übernehmen (BMU/Roland Berger Strategy Consultants 2007). „ (...) ein solcher Weg ist auch wirtschaftlich vorteilhaft, denn unser Land ist der führende Hersteller von Investitionsgütern in der Welt und hat mit seinen Produkten in dem Segment der ressourcenschonenden Technologien eine sehr gute Marktposition“ (Meyer 2007: 26).

Leitmarktstrategien

Entsprechende Strategien (Aho et al. 2006) können dazu beitragen, dass Leitmärkte für ressourcenschonende Technologien und Produkte entstehen, in denen (deutsche) Unternehmen eine Führungsposition auf den Weltmärkten übernehmen könnten. „Die Fähigkeit auf diesen Leitmärkten mit innovativer Technologie präsent zu sein, entscheidet maßgeblich über die internationale Wettbewerbsfähigkeit eines Landes. Leitmärkte sind Zukunftsmärkte, die nicht ausschließlich ökonomisch bestimmt werden, sondern auch gesellschaftspolitische Leitvorstellungen berücksichtigen“ (BMU/Roland Berger Strategy Consultants 2007: 8).



Innovationsförderung und Leitmarktinitiative auf europäischer Ebene

Die Strategie der Leitmärkte hat für die EU-Industrie eine wichtige Bedeutung, da diese einen globalen Wettbewerbsvorteil entwickeln kann, vorausgesetzt, sie wird vom öffentlichen Sektor als Regulierer, Abnehmer und Vermittler unterstützt (vgl. Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2006a). Auf europäischer Ebene wird das zum einen durch Initiativen umgesetzt, die sich auf Bereiche konzentrieren, in denen öffentliche Behörden die Innovationstätigkeiten der Wirtschaft erleichtern können. Dies geschieht durch die Schaffung günstiger Rechts- und Regulierungsrahmen, durch die Festlegung von Standards, durch eine Verbesserung des Zugangs zu Risikokapital, durch die Unterstützung der Forschung und durch das Handeln als Erstkunde.

Zum anderen fördert die EU Innovationen im Rahmen einer Leitmarktinitiative für Europa, die zu Beginn des Jahres 2008 von der Kommission verkündet wurde (vgl. Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2007). In den sechs identifizierten Leitmärkten – elektronische Gesundheitsdienste („eHealth“), Schutztextilien, nachhaltiges Bauen, Recycling, biobasierte Produkte und erneuerbare Energie – sollen Innovationslösungen unterstützt werden. Diese sind auch für die Stahlindustrie von höchster Relevanz, da der Werkstoff in allen Leitmärkten Verwendung findet – mal sehr spezifisch mit geringen Margen, mal als Massen- oder High-Tech-Werkstoff.

Integration der Lebenszyklusperspektive

Problematisch an der EU-Strategie scheint, dass das grundlegende Ziel der Ressourcen- und Energieeffizienz zwar benannt wird, aber keine Lebenszyklussicht für die zu entwickelnden Produkte und Dienstleistungen vermittelt wird, besonders nicht im Bereich der Forschung und Entwicklung. In der Integration der Lebenszyklusperspektive aber liegen die Potenziale für die notwendigen Ressourceneinsparungen (vgl. Schmidt-Bleek 2007, Kristof et al. 2007, Meyer 2007, Liedtke/Welfens 2008).

Die europäische Stahlindustrie konzentriert sich mit ihrer Technologieplattform ESTEP (European Steel Technology Platform) bereits auf ihre bedeutendsten Anwendungsbereiche: Bauwesen, Automobilindustrie, Maschinenbau und Metallwaren (siehe Kapitel 3.3). ESTEP richtet ihre Forschung und Entwicklung auf eine entsprechend ganzheitliche Produktentwicklung aus, die systemweit die Ressourcen- und Energieeffizienz im Blick hat und Impulse für Energie- und Materialeinsparungen in der Stahlindustrie gibt (ESTEP 2005). Dies ist auch Rahmen des deutschen Dialogs zu nutzen.

Leitmärkte in Deutschland

Eine wesentliche Bedeutung für eine zukunftsfähige Entwicklung in Deutschland kommt den Leitmärkten für Umwelttechnologien in Deutschland zu (BMU/Roland Berger Strategy Consultants 2007): Dazu zählen umweltfreundliche Energieerzeugung und -speicherung, Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltige Mobilität, Nachhaltige Wasserwirtschaft sowie Rohstoff- und Materialeffizienz. Insbesondere für den Leitmarkt Rohstoff- und Materialeffizienz (ADL/WI/ISI 2005, Kristof et al. 2007) werden hervorragende Wachstumschancen prognostiziert. Die sechs Leitmärkte hatten 2005 ein Weltmarktvolumen von etwa 1.000 Mrd. €. Bis 2020 wird sich der Umsatz der Umweltindustrien auf 2.200 Mrd. € mehr als verdoppeln (BMU/Roland Berger Strategy Consultants 2007).

Zurzeit hält Deutschland, je nach Marktsegment, zwischen 5% und 30% Anteile an den weltweiten Märkten (BMU/Roland Berger Strategy Consultants 2007). Hier lassen sich durch Material- und Prozessinnovationen, eine effizienzorientierte Produktplanung von der Design-Phase (Abfallvermeidung, Recyclingfähigkeit, Entsorgungsanforderungen und Logistik, Benutzung nachhaltiger erzeugter Rohstoffe) bis hin zur Entsorgung des Produktes, die Mehrheit aller produktbezogenen Umweltbelastungen beeinflussen. Das schließt auch ökointelligente Konzepte für die Nutzungsphase

mit ein, mit dem Ziel, eine möglichst umfassende Dematerialisierung – d.h. eine drastische Reduktion der durch menschliches Handeln verursachten Stoffströme (Schmidt-Bleek 2007) – unseres Wirtschaftens bei möglichst hoher Dienstleistungsdichte zu erreichen.

Bedeutung der deutschen Stahlindustrie

Fertigprodukte der Stahlindustrie aus Deutschland in den Anwendungsfeldern Bauwesen, Automobilindustrie und Maschinenbau haben eine weltweit hohe Bedeutung, denn jedes „fünfte Fahrzeug und jede sechste Maschine, die irgendwo auf der Welt importiert wurden, stammen aus Deutschland“ (Meyer 2007: 40). Es sind aber nur wenige Wirtschaftszweige wie Maschinenbau, Fahrzeugbau, Elektrotechnik, Regulierungstechnik oder Chemie, die diesen Export in Deutschland erwirtschaften (Meyer 2007). Stahl ist für alle diese Bereiche notwendig. Diese Konzentration auf wenige Wirtschaftszweige birgt zum einen Risiken, zum anderen aber auch Potenziale, da in diesen Produkten und Systemen eine hohe Wissensdichte steckt, die so schnell nicht transferiert oder kopiert werden kann und auf entsprechenden Entwicklungsstrukturen (institutionell, organisatorischen) basiert.

Im Dialogprozess wurde deshalb auch die Anwendung hochfester Stähle für den Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus diskutiert, da hochfeste Stähle zum einen wissensintensiv sind, d.h. in diesen Produkten und Verfahren steckt eine hohe Wissensdichte, die nicht so schnell transferiert oder kopiert werden kann. Zum anderen sind sie auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig. Eine Potenzialabschätzung für eine Verwendung wurde als notwendig erachtet, da hierfür keine öffentlich zugänglichen Daten vorliegen. Die Aufteilung der gesamten Stahlproduktion Deutschlands auf die stahlverwendenden Branchen enthält wichtige Informationen, um Aktionsfelder mit möglicherweise hohem Potential an Ressourceneffizienz und -schonung zu identifizieren.

Wachstumsfelder für Stahl

Eine vor Jahren als alte und krisenanfällig abgestempelte Industrie zeigt, insbesondere auch in Deutschland, eine außerordentliche Dynamik und Innovationskraft. Mit unzähligen neuen Stahlsorten, ganz neuen Gruppen von Stählen und innovativen Verarbeitungsverfahren eröffnen sich verbesserte Einsatzmöglichkeiten und neue Anwendungsfelder für Stahl. Neue Impulse für den Stahleinsatz gehen auch von der Dezentralisierung der Energie- und Wasserwirtschaft und den schnellen Innovationszyklen bei Fahrzeugen und anderen Konsumgütern aus. Hier kann die Verbesserung der Rohstoffproduktivität über die Gestaltung ressourceneffizienter Produkt-Dienstleistungssysteme dazu beitragen, die Ressourcenschonung zu forcieren, wenn hinsichtlich der Ressourcenschonung neben der reinen Technikentwicklung in Richtung Ressourceneffizienz auch Strategien des Vermeidens, Verlagerens und der maßgefertigten Dienstleistungssysteme integriert werden (Stahel 2006).

Ressourceneffizienzstrategien haben zum Ziel, den werkstoff- und systemübergreifend ressourceneffizientesten Ansatz zur Bedürfnisbefriedigung zu finden, im Markt zu positionieren und auf der Nachfrageseite Vermeidungsstrategien (= maßvollen und ressourcenschonenden Konsum) zu entwickeln. Wie sich die ESTEP mit ihrer Arbeit auf die Stärken der europäischen Stahlindustrie in den Leitmärkten konzentriert, so kann sich Deutschland in Verbindung mit dieser Plattform im Bereich der ressourceneffizientesten Energietechnikanwendungen (z.B. Kraftwerke, Öl- und Gasförderung, Erneuerbare Energien, Stromverteilung) oder auch Leichtbau (Automobile, Maschinen und Anlagen, Infrastruktur, Bauen und Wohnen) positionieren.

3 Maßnahmen für den ressourceneffizienten Stahleinsatz

Im Dialogprozess wie auch bei der Entwicklung der Maßnahmen war Grundlage der Überlegungen, dass produzierende Unternehmen im globalen Handels- und Wirtschaftssystem mit einer steigenden Komplexität und einer wachsenden Anzahl an Produkten und Varianten konfrontiert werden. Um sich im globalen Wettbewerb erfolgreich zu behaupten, konzentrieren sich Unternehmen zunehmend auf ihre Kernkompetenzen, verteilen die Wertschöpfung auf eine Vielzahl unterschiedlicher Unternehmen und organisieren sich in Wertschöpfungsnetzen. So ergeben sich neben der Verbesserung von unternehmensinternen Prozessen die größten Potenziale für Nachhaltigkeit in der Planung, Steuerung und Verbesserung der gesamten Prozesskette innerhalb des Wertschöpfungsnetzes (Seliger o.J.).

Betrachtet man die verschiedenen Prozesse, die in der Regel zur Befriedigung von Kunden- und/oder gesellschaftlichen Bedürfnissen notwendig sind, so kann mit Blick auf die Ressourceneffizienz des Stahleinsatzes konstatiert werden, dass grundsätzlich in allen Prozessstufen Effizienzpotenziale vorliegen (vgl. Abbildung 1).

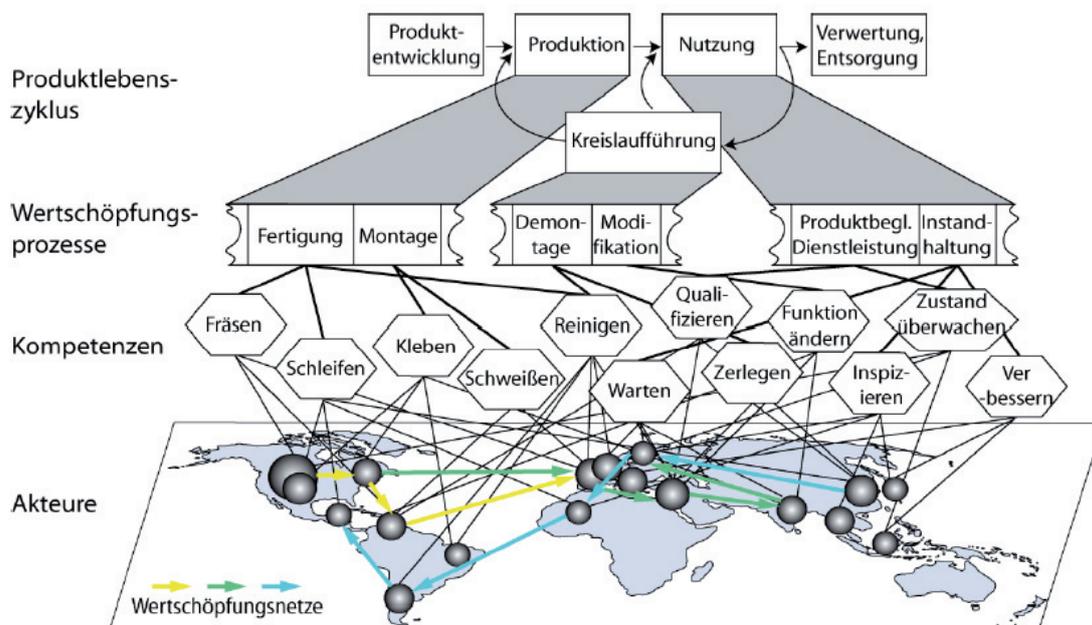


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Wertschöpfungsnetzen Quelle: Seliger (o.J.)

In der Regel sind die verschiedenen Stufen eng miteinander verflochten: so werden weite Bereiche des Ressourcen- und Energieverbrauchs bereits in der Konstruktion festgelegt (Beispiel: Hausbau) oder sind abhängig von der Nutzungsintensität (Beispiel: Autokarosserie). Die Handlungssituation für die Industrie, lässt sich dabei als verwobenes teilweise konfligierendes Zielsystem beschreiben, das durch Komplexität, Dynamik, Intransparenz und Vernetzung gekennzeichnet ist.

Der Fokus der Ressourceneffizienz-Betrachtungen für Europa/Deutschland lag daher im Dialog um die Maßnahmenentwicklung auf den Kompetenzen, die in der Stahlindustrie vorhanden sind: hochwertige Stahlsorten und effiziente Herstellungsverfahren, die diese mit ihren spezifischen Eigenschaften zur Entfaltung kommen lassen. Das zugehörige Wertschöpfungsnetz soll laut EU Technologieplattform ESTEP auf Nachhaltige Entwicklung in den einzelnen Anwendungsfeldern ausgerichtet sein oder werden.

Nachfolgend wird jedes Aktionsfeld mit seinen Potenzialabschätzungen zum Stahlgebrauch und den damit verbundenen Problemen und Hemmnissen zur Verbesserung der Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung kurz beschrieben. Danach werden mögliche Maßnahmen vorgeschlagen, die sowohl industriepolitische, als auch umweltpolitische und regulatorische Lösungsansätze beinhalten.

3.1 Optimierung bestehender Anwendungsfelder

Ein großes Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz des Werkstoffes Stahl liegt in der Optimierung seiner Nutzung. Wichtige Aspekte sind hier Gewichtsminimierung sowie Reparatur- und Recyclingfähigkeit. Diese Verbesserungspotenziale in Produkten bei ihrer Nutzung und beim Recycling sind gegenüber den Potenzialen bei der Herstellung der Werkstoffe weitgehend unbestimmt (Still et al. 2005). Im Bereich der Produktnutzung liegt das vor allen Dingen daran, dass es sich hierbei relativ häufig um nicht exakt bestimmbare verfahrenstechnische Potenziale handelt. Dennoch kann natürlich z.B. ein reparaturfreundlicher oder modularer Aufbau von Produkten (z.B. beim Auto: Stoßstangen aus Stahl, die sich „rückformen“ lassen, einfach auszutauschen und zu recyceln sind oder mit Kratzern weiter genutzt werden – anstelle von lackierten Kunststoffblenden) hier zu einer mindestens abschätzbaren Verbesserung der Ressourceneffizienz beitragen. Aber wie man an diesem Beispiel – und hiervon gibt es viele – gut beobachten kann, spielen hier so viele verschiedene Faktoren eine Rolle (z.B. das Design oder die Kundenwünsche), dass Hochrechnungen mehr als schwierig sind. Anders verhält sich die Sachlage, wenn man die Innovationen oder Veränderungen in den „unsichtbaren“ Bereich verlegt: wenn die Werkstoff- oder Produktveränderungen für den Designer oder Kunden nicht sichtbar oder erfahrbar sind, dann lassen sich Optimierungen einfacher umsetzen: z.B. Tailored Blanks im Innenbereich der PKW-Tür. Beim Recycling kann man die potenzielle Recyclingfähigkeit erhöhen – z.B. durch lösbare Werkstoffverbünde oder Sortenreinheit – einen Einfluss auf die tatsächlichen Recyclingströme zu nehmen ist ungleich schwieriger.

Die verstärkte Suche nach systemischen Lösungen und lebenszyklusweiter Optimierung sollte daher zunehmend ins Blickfeld des Interesses gerückt werden. Der Einfluss der Produktgestaltung (basierend auf der zu erbringenden Dienstleistung z.B. saubere Wäsche oder Transport von A nach B), einschließlich der Lebensdauer und Recyclingfähigkeit sowie der Nutzung von Produkten, bietet häufig weit größere Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs als eine schon weitgehend optimierte Werkstoffherzeugung, wie das Beispiel des PKW unmittelbar deutlich macht.

Automobilkarosserie

Eine wichtige Strategie zur Verringerung der eingesetzten Materialmengen und zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs ist der Leichtbau – also die Verringerung des Gewichts des PKW – in der Regel bei gleichzeitiger Verbesserung der Eigenschaften bzw. des Leistungsspektrums. Möglich wird er durch geschickte Konstruktion (z.B. verschiedene Blechstärken innerhalb eines Bauteiles, so dass dort Material eingespart wird, wo keine oder geringe Kräfte fließen), aber auch durch Nutzung höherwertiger Stahlsorten (höhere Festigkeiten, die wiederum geringere Bauteil-Wandstärken ermöglichen) und optimierter Verarbeitungsverfahren (z.B. Laserschweißen, flexibles Walzen).

Die klassische Stahlkarosserie ist hier in den letzten Jahrzehnten in einen starken Wettbewerb mit dem Werkstoff Aluminium eingetreten. Das spezifisch leichtere Aluminium wurde erstmals von AUDI für die Herstellung ganzer Karosserien genutzt und hat damit den etablierten Werkstoff Stahl unter Druck gesetzt. Die Entwicklung höherwertiger Stahlsorten und die Anwendung neuer Verarbeitungsverfahren führte zu einer Steigerung der Ressourcenaufwendungen pro kg Stahl, die aber wiederum über die Gewichtseinsparung überkompensiert wurden, so dass die eigene Einsatzmenge kontinuierlich reduziert werden konnte (Herzog et al. 2003). Stahl blieb dadurch wettbewerbsfähig. Auch verschiedene Vergleiche der Ressourceneffizienz von Autokarosserien aus

unterschiedlichen Werkstoffen ergaben, dass bei der Ressourceneffizienzbetrachtung die Produktion und die Nutzungsphase gesamt betrachtet werden müssen, um eine Aussage zu dem ressourceneffizienteren Werkstoff machen zu können. Dies ist abhängig von den Herstellungsbedingungen (Rohstoff-/Werkstoffwahl, Energiemix, Innovationssprünge in den Herstellungsprozessen) und der erreichten Gewichtseinsparung, die sich dann in der Nutzenphase niederschlägt. Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen auch, dass die PKW-Karosserie immer mehr zu einem Konglomerat von verschiedenen Werkstoffen wird. Stahl muss sich hier auch der Konkurrenz aus den Bereichen Kunststoffe und z.B. Magnesium stellen. Dies wiederum wird die Entsorgung und das Recycling von PKWs vor neue Herausforderungen stellen.

Der Leichtbau ist bereits seit langem Forschungsgebiet der stahlintensiven Automobilindustrie, dennoch sind die Entwicklungen in diesem Bereich stetig und haben ihr Optimum noch nicht erreicht. Hoch- und höchstfeste Stahlsorten können bei einzelnen Bauteilen im Automobilbau eine Gewichtsreduktion von bis zu 40% ermöglichen (Velikonja 2004). Beim Vergleich einer traditionellen Stahlkarosserie mit einer Leichtgewichts-Stahlkarosserie konnte gezeigt werden, dass die Herstellung der Leichtgewichtskarosserie mit einem rund 15%igen verringerten Ressourceneinsatz verbunden war – bei gleichzeitig verbesserten Eigenschaften (Herzog et al. 2003). So werden bei einer Reduktion von 100 kg Gewicht in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp circa 0,3 bis 0,5 Liter Sprit auf 100 km eingespart. Dies kann mit 7,5 g/km bis 12,5 g/km weniger CO₂ gleichgesetzt werden (www.automobil-industrie.vogel.de). Der Leichtbau unterstützt mit der Ressourcenschonung auch die CO₂-Minderung. Für die Erreichung der CO₂-Ziele muss in Anlehnung an das Projektergebnis Ressourceneffizienz im Automobilssektor eine durchschnittliche Reduktion des Fahrzeuggewichts von 46 % für Benziner und 37 % für Diesel realisiert werden.

Ein prominentes Beispiel für den Einsatz von höherwertigen Stahlsorten, wie für systemisches Denken, ist das Konzept der ultraleichten Stahlkarosserie (ULSAB), das auch mögliche Potenziale in der Großserienproduktion der Automobilindustrie aufzeigt (ULSAB-AVC Konsortium 2001). Es entstand der „New steel body“, welcher in seiner Konstruktionsart bekannte Elemente der Schalenbauweise, mit neuartiger Profilbauweise sowie dem Einsatz von innovativen Mehrphasenstählen vereint. Beim Referenzobjekt Opel „Zafira“ konnte eine 24%ige Gewichtseinsparung des gesamten Fahrzeuges erreicht werden (VDI Technologiezentrum GmbH 2006). Durch den Einsatz hochfester Stähle wurde damit exemplarisch belegt, dass verbesserte Eigenschaften bei nahezu gleichem Ressourcenverbrauch während der Herstellung der hochfesten Stähle erzielt werden können. Hochfeste Stähle zeichnen sich durch eine Gefügeverbesserung des Materials aus und werden mittels der vorhandenen Hochöfen und in demselben thermischen Walzverfahren wie zur herkömmlichen Stahlherstellung produziert (Jochem et al. 2004).

Eine wichtige Rolle bei Leichtbau-Konzepten spielen neben hochfesten Stählen auch Fügeverfahren (etwa Laserschweißen) und neue Formgebungsverfahren (etwa das Innenhochdruckformen). Hierbei treten jedoch auch gegenläufige Effekte auf. Ein erhöhter Aufwand in der Herstellung der höherwertigen Stahlsorten und bei der Produktion oder in der Verbindung der Bauteile muss in Vergleich zu den potenziellen und tatsächlichen Einsparungen gesetzt werden. Im Rahmen des Studie zu den PKW-Karosserien konnte gezeigt werden, dass diese Mehraufwände durch die erzielten lebenszyklusweiten Einsparungen kompensiert und übertroffen wurden – dies ist aber natürlich signifikant von der Höhe der erzielbaren Einsparungen abhängig. Eine Pauschalisierung lässt sich nicht treffen, wohl aber eine produktbezogene Größenordnung für das einzusparende Minimum: beim nutzungsphasenintensiven PKW ist die Amortisation schon bei ca. 10 % erreicht – beim Fahrrad würde sie dagegen nie erreicht werden, da hier keine externe Energiequelle außer der menschlichen Muskelkraft für den Betrieb eingesetzt wird.

Man kann aufgrund der Entwicklungen der letzten Jahre davon ausgehen, dass sich diese Gewichtsreduzierungen durch Leichtbauverfahren sukzessive in allen PKW-Segmenten fortsetzen werden – u.a. auch aufgrund der auf der anderen Seite immer noch steigenden Gewichte durch neue Sicherheits- und Komfortleistungen. Eingesetzt wird der Stahl in der Autoherstellung dabei ganz allgemein in den Bereichen Karosserie und Türen, Fahrwerk und Felgen sowie Motor und Getriebe – diese machen bereits einen Großteil des Endgewichts aus. Die Fülle der unterschiedlichen hochfesten Stahlsorten finden je nach Belastungsart und Anforderung im Auto Verwendung. Durch einen spezifischen Einsatz gelingt eine optimierte und effizientere Materialausnutzung.

Im Rahmen des Experten-Interviews war aber die entscheidende Frage für die Zukunft, ob es gelingt, eine ähnliche Entwicklung wie im Automobilbereich auch in anderen Branchen voran zu treiben: die Entwicklung von verbesserten Stahlsorten für die spezifischen Einsatzgebiete und/oder die Übertragung der bereits entwickelten Stahlsorten auf andere Produktbereiche und Anwendungen.

Ressourcenschonung im Rahmen globaler Mobilitätswachse

Auch wenn die Schwellenländer im Vergleich zu den Industrieländern ein hohes Wachstum der Personenverkehre verzeichnen, so wächst der Personenverkehr auch in Deutschland, in Westeuropa und den USA weiter an. Das bedeutet neben steigenden Ressourcenverbräuchen auch signifikante Emissionen aller Art (u.a. CO₂-Emissionen, Luftschadstoffe, Lärm, Einschränkungen bei der Sicherheit und Stadtqualität). Sollen die Klimaschutzziele und Ziele der Ressourcenschonung erreicht werden, benötigt man ein integriertes Konzept über alle Transportmittel hinweg der erhöhten Systemeffizienz: ressourceneffiziente Technologien in Produktion und Konsum, Verkehrsvermeidung (Verkürzung der Distanzen und Verkürzung der Wegezähl), Verlagerung auf umwelteffizientere Verkehrsträger und Verbesserung der Verkehrsabläufe.

Bei wachsenden Zahlen der zurückgelegten Personenkilometer in Westeuropa – Westeuropa liegt hier gleich auf mit den USA – (vgl. Rommerskirchen/Greinus 2008) bedeutet dies erhebliche Veränderungen, an denen Politik, Produzenten und Konsumenten gemeinsam arbeiten müssen. Leichtbau ist eine bedeutende Strategie für Ressourceneinsparungen im Bereich der Mobilität – selbst wenn der Gewichtsreduktion auf der einen Seite Gewichtszuwächse für Sicherheit und Entertainment auf der anderen Seite entgegenstehen. Doch so innovativ und hilfreich sie auch sind, sie reichen hierfür nicht aus. Eine Studie des Wuppertal Instituts (Schallaböck et al. 2006) gehen von einem Minderungspotenzial (Emissionen) von 50% aus, bei Ausschöpfung des technisch Machbaren am PKW. Eine Studie des Umweltbundesamtes gibt ein Minderungspotenzial von 50% über Technik im Verkehr und über strukturelle Veränderungen der Verkehrszusammensetzung und der Leistung (also km) an (UBA 2005). Neben einer Veränderung des Transportmittelmixes pro Personenkilometer ist auch eine Reduktion der pro Kopf gefahrenen Personenkilometer als Lösungsstrategie in eine Ressourcenstrategie miteinzubeziehen (Grundlage: integrierte Siedlungs- und Verkehrsentwicklung, Aufwertung von Nähe, Nahmobilität). Eine solche Entwicklung wird bereits zwischen den Akteuren im von den Vereinten Nationen gestarteten Marrakesh Prozess zu Sustainable Consumption and Production im Bedarfsfeld Mobilität diskutiert (vgl. EEA 2008).

Stahlbau

Mit dem Einsatz hoch- und höchstfester Stahlsorten kann nicht nur die benötigte Stahlmenge reduziert werden. Häufig kann auch die Leistungsfähigkeit von Bauten und Anlagen gesteigert (z.B. Tragfähigkeit von Brücken und Auslegern, Beschleunigung von Geräten z.B. Roboterarme) oder aufgrund des verringerten Gewichts der Energieverbrauch beweglicher Stahlerzeugnisse reduziert werden (Fahrzeuge, bewegliche Anlagenteile). Hierfür gibt es eine Reihe von Beispielen: Im Stahlbau, etwa bei Brücken, konnte durch den Einsatz höherfester, mikrolegierter Stahlsorten mit erhöhter Bruch- und Zugfestigkeiten die Stahleinsatzmenge deutlich reduziert werden. Bei der Öresundbrücke konnte so durch den Einsatz von 82.000 t mikrolegierter Stähle die benötigte Stahlmenge um 15.000 t reduziert werden (Bleck 2007). Das entspricht bezogen auf die ursprünglich benötigte Stahlmenge einer Einsparung um etwa 15%, was in etwa auch den eingesparten Ressourcen entsprechen dürfte,

3 Maßnahmen für den ressourceneffizienten Stahleinsatz

da der Energieaufwand für die Herstellung dieser Stahlsorten kaum erhöht ist. Da es sich um mikrolegierte Stähle handelt, werden nur sehr geringe Mengen an Legierungselementen dem Stahl zugesetzt – auch hier findet kein signifikant erhöhter Ressourceneinsatz statt.

An dieser Stelle muss differenziert werden zwischen den beschriebenen technologisch aufgewerteten Stählen sowie den aufgewerteten Stählen durch Versetzung mit Legierungsanteilen. Diese sind gekennzeichnet durch einen 20-25 % höheren Preis und einem signifikant gesteigerten Legierungsanteil durch Elemente wie Mangan, Chrom oder Nickel – diese Stähle sind hier nicht gemeint. Im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch sind sie wesentlich intensiver und daher nicht für eine großflächige Anwendung zu empfehlen: Typischer Edelstahl ist ca. 2 bis 3 mal so ressourcenintensiv wie unlegierter Stahl aus der Hochofenroute und ca. 5 bis 10 mal ressourcenintensiver gegenüber einem solchen Stahl aus der Elektroofenroute. Die Spannweite ist abhängig von den gewählten Indikatoren: Gesamtmaterialeinsatz (TMR), Wasser, kumulierter Energieverbrauch (KEA) und Treibhauspotenzial (Global Warming Potential).

Durch den ökonomischen Faktor (Legierungselemente sind relativ teuer – hier zeigt sich zumindest ansatzweise eine Relation zwischen dem Ressourcenverbrauch und den Marktpreisen) reguliert sich die Anwendung jedoch von selbst auf ein geringes Maß (z.B. die klassischen Edelstähle im Einsatzbereich der Lebensmittelindustrie oder der Verfahrenstechnik). Gefügeverbesserte (hochfeste) Feinkornstähle können ebenso wie normalfeste Stähle, als niedrig legierte Stähle ausgebildet werden – dies ist der Fall ab einem Legierungsanteil von unter 5 %. In der Regel kann von demselben Legierungsanteil wie bei normalen Stählen ausgegangen werden, eher ist der Legierungsanteil geringer, weil diese spezifischer in der Mikrostruktur eingelagert werden. Es ist also davon auszugehen, dass die Mikrolegierung der Stähle eher zu einer Verringerung des Legierungselementeinsatzes führt und damit unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz vorteilhaft ist. Da durchschnittliche Legierungselemente den ca. 4 bis 20 fachen Ressourcenaufwand gegenüber Rohstahl benötigen, ist eine Reduktion dieser Elemente im Stahl in den meisten Fällen sinnvoll. Darüber hinaus haben die eingesetzten thermomechanisch gewalzten Stähle den Vorteil einer guten Schweißbarkeit, was in dem geringeren Kohlenstoffanteil begründet liegt. In vielen Fällen kann so auf eine Vorwärmung der Schweißstelle verzichtet werden (Hubo/Schröter 2001, Hanus 2000). Ergänzend kommt hinzu, dass durch den Einsatz höherfester Stähle auch der Schweißnahtquerschnitt reduziert und damit die Kosten sowie der Energieverbrauch reduziert werden können (Schröter/Martin 2007).



Abbildung 2: Öresundbrücke
Quelle: www.pixelio.de, C. Nöhren

Die Anzahl großer Brückenbauwerke ist jedoch insgesamt sehr gering. Im Jahr 2005 wurden in Deutschland bei in Stahlbau gebauten Verkehrsbrücken lediglich 48.563 t Stahl bei einer gesamtdeutschen Stahlbauproduktion von 1.486.461 t eingesetzt (DSTV 2006). Im Vergleich zum Vorjahr sind die Werte nahezu konstant mit Verwendungen von 53.190 t Stahl – es ist daher von einem stetigen 3,5% Anteil an der Gesamtbauproduktion auszugehen. Aus Sicht der Ressourcenschonung lohnend ist daher sehr viel stärker eine Übertragung der beim Bau großer Brücken gemachten Erfahrungen hinsichtlich der Einsparung von Material und Ressourcen auf die anderen Stahlbaubereiche. Dies muss im Hinblick auf die spezifischen statischen und dynamischen Belastungen geschehen, welche je nach Anwendungsbereich sehr variieren können. Bei extremen Umwelteinflüssen, wie hier bei großen Brückenbauwerken, sind die Konstruktionen Biegezug- und Torsionsbeanspruchungen ausgesetzt. Diese besonders stark belasteten Ingenieurbauwerke benötigen daher zwingend große Steifigkeiten, um die Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten. Durch die Effizienzsteigerung selbst bei diesen stark beanspruchten Konstruktionen wird deutlich, dass eine Übertragung auf andere Bereiche gut möglich ist.

In einer Reihe von Fällen können mit der Substitution anderer Baumaterialien durch Stahl relevante Ressourcenersparnisse erzielt werden. Für Freileitungsmasten konnte beispielsweise gezeigt werden, dass hier Stahl im Vergleich zu Stahlbeton deutlich weniger Ressourcen benötigt. Bei der Untersuchung von Masten für 110 kV Leitungen wies der Stahlgittermast einen um rund 60% geringeren Verbrauch abiotischer Ressourcen auf (Merten/Liedtke/Schmidt-Bleek 1995). Durch den Einsatz hochfester Stahlsorten dürfte dieser Unterschied noch deutlich größer sein. Auch besteht bisher die Mehrzahl der Strommasten aus Stahl in der Gitterbauweise, aber ähnlich wie in anderen Ländern ist auch hier eine Tendenz zu den schlankeren Stahl- oder Stahlbetonmasten zu erkennen. Diese Masten haben eine geringere Auftrittfläche und beanspruchen daher weniger Bodenfläche: z.B. in Österreich sind diese Mastenkonstruktionen daher weiter verbreitet als in Deutschland.

Ganzheitliche Optimierung

Es zeigt sich, dass es nicht alleine ausreichend ist, hochfeste Stähle einzusetzen. Vielmehr müssen unterschiedliche Aspekte wie Zugfestigkeit, Dauerschwingfestigkeit und Verarbeitbarkeit zusammen optimiert werden. Denn die Dauerfestigkeit von Stahl steigt zwar mit der Zugfestigkeit an, nicht jedoch die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen. Die Ursache ist eine Schweißnahtübergangskerbe, die sich bei ohnehin kerbempfindlicherem höherfestem Stahl stärker auswirkt als bei einem niedrigfesten Stahl. Soll die Dauerfestigkeit eines Bauteils erhöht werden, muss daher der Optimierung der Fügeverbindungen – etwa durch Nachbearbeitung – eine hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden (Nitschke-Pagel 2007). Bisher ist die oft mangelnde Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen ein Hauptgrund für den verzögerten Einsatz von höherfestem Stahl in ermüdungsbeanspruchten Anwendungen. Problematisch ist insbesondere, dass der Einsatz von Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung im Baubereich noch unüblich ist, da die bestehenden Normen es bisher nicht gestatten, die resultierenden Vorteile bei der Tragwerksbemessung zu berücksichtigen (Kuhlmann et al. 2007). Es ist daher notwendig zusammen mit neuen Werkstoffen und Verarbeitungsverfahren auch ihre praktische Anwendung zu untersuchen und Anwendungshinweise zu entwickeln, um so eine spätere Normierung vorzubereiten.

Legierungen

Da eine Reihe von wichtigen Legierungselementen für hochwertige Stahlsorten, insbesondere Nickel, weit begrenzter verfügbar sind als Eisenrohstoffe, zugleich aber auch mit einem besonders hohen Ressourcenaufwand gewonnen werden, ist die Entwicklung von neuen Legierungen, die ohne oder mit möglichst geringen Mengen solcher potenziell ressourcenintensiveren Legierungselemente auskommen, eine wichtige Maßnahme, um einen dauerhaft ressourceneffizienten Stahleinsatz zu erleichtern. Die Entwicklungen, die Legierungselemente auf der Mikrostrukturebene in das Stahl-

gefüge einsetzen, gehen in diese Richtung. Man versucht durch Modifikationen im Stahlgefüge Eigenschaften zu verändern, die man bisher nur durch die Vermengung verschiedener Metalle (Eisen und Legierungselemente) erreichen konnte. Da bei der Gewinnung ausnahmslos alle Legierungselemente einen höheren Ressourcenverbrauch haben als Eisen, ist eine Reduktion hier in der Regel ein Beitrag zur Ressourcenschonung. Bei der lebenszyklusweiten Analyse müssen dann aber auch die Nutzungs- und die Recyclingphase berücksichtigt werden: so ist der klassische Edelstahl zwar ressourcenintensiv, aber er verhindert das Rosten und ist hervorragend geeignet zum Recycling. Ein Vergleich zwischen verzinktem Stahl und Edelstahl würde bei verschiedenen Produkten zu verschiedenen Favoriten führen: dies ist in der Regel marktwirtschaftlich auch über die Preisregelung bereits zu beobachten. Besonders wichtig wird die Entwicklung neuer Stahlsorten auch sein, wenn der Anteil der Elektrolichtbogenroute an der Gesamtproduktion deutlich steigt und möglicherweise auch aus dieser Verfahrensrouten Flacherzeugnisse erzeugt werden müssen, die bisher nur mit der Hochofenroute erzeugt werden konnten.

Formgebungs- und Fügeverfahren

Neue und weiterentwickelte Formgebungs- und Fügeverfahren sind eine Voraussetzung, um kraftflussgerechte Konstruktionen zu ermöglichen und sind somit eine wesentliche Rahmenbedingung für den optimierten Einsatz von Stahl. Optimierte Formgebungs- und Fügeverfahren erlauben es einerseits, das Gewicht von Konstruktionen deutlich zu reduzieren, etwa dadurch, dass kostengünstiger und kraftflussgerecht konstruiert werden kann und dadurch die Festigkeit des Werkstoffs optimal genutzt wird. Andererseits kann der Aufwand zur Herstellung von Bauteilen deutlich reduziert werden - etwa wenn eine sehr energieaufwendige und Werkstoff verbrauchende, spanende Bearbeitung minimiert oder vollkommen ersetzt werden kann. Ein Beispiel, in dem durch geeignete Formgebungsverfahren sowohl eine Gewichtsoptimierung erreicht wurde, als auch durch ein Umformungsverfahren der Fertigungsaufwand minimiert werden konnte zeigt Abbildung 3.

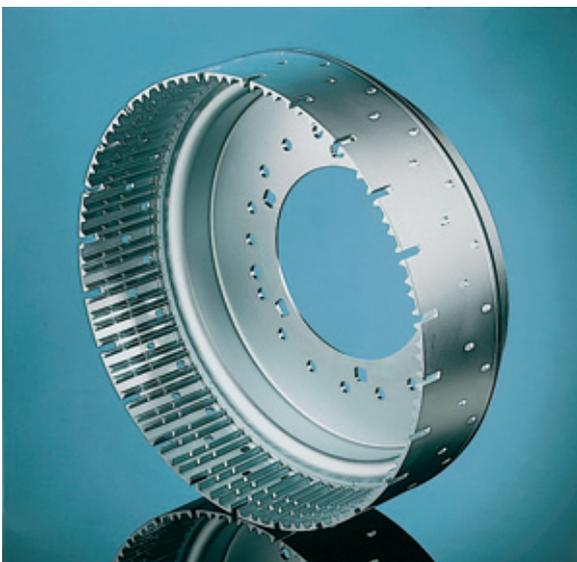


Abbildung 3: Bauraum- und gewichtsoptimierte Getriebeteile aus Stahl lassen sich mit dem Drückwalzen kostengünstig herstellen.

Quelle: <http://www.stahl-online.de>

Ganz ähnlich kann es sich mit Fügeverfahren verhalten, die vielfach in Konkurrenz zu Trennverfahren stehen. Durch das Fügen von mehreren Einzelteilen kann u.U. der Energie- und Ressourcenaufwand gegenüber einer Fertigung aus einem größeren Vorprodukt deutlich verringert werden. Zugleich gibt es bei Fügeverfahren selber erhebliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Energie- und Ressourceneffizienz, so bei den jeweiligen Schweißverfahren, aber auch innerhalb einer Gruppe von Schweißverfahren. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Schweißtechniken sind bisher aus gängigen Regelwerken des Stahlbaus für deren Anwender zu ersehen. Dennoch liegt der

Fokus bei der dortigen Darstellungsweise nicht auf Ressourcenschonung, durchaus aber auf Energieeinsparung und insbesondere auf Zeitextensivität. Auf Grund der wirtschaftlichen Konkurrenzsituation entsteht Wettbewerbsfähigkeit zumeist über eine Minimierung der Arbeitsstunden, welche durch bestimmte Schweißverfahren unterstützt wird. An einer Darstellung im Hinblick auf Ressourceneffizienz besteht also Bedarf. ThyssenKrupp beispielsweise entwickelte eine flanschlose Füge-technologie, welche bedeutend weniger Material verbraucht. Bei der Auswahl von Fügeverfahren sollte daher grundsätzlich auch der mit ihnen verbundene Energie- und Ressourcenaufwand berücksichtigt werden. Dazu ist es notwendig, dass die entsprechenden Daten für die Konstrukteure zugänglich gemacht werden und anhand von beispielhaften Ressourceneffizienzprofilen veranschaulicht werden.

3.2 Erschließung weiterer Ressourceneffizienzpotenziale

Ein Ergebnis der im Projekt durchgeführten Interviews war, dass die Befragten erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale insbesondere in Anwendungsfeldern vermuten, in denen bisher noch vielfach einfache Stahlqualitäten eingesetzt werden, also etwa dem Hoch- und Tiefbaubereich, dem Schiffbau und in Teilen des Maschinen- und Anlagenbaus, jedoch auch dort, wo eine besonders große Nähe der bereits entwickelten Verfahren zu neuen Anwendungen zu erkennen ist, wie etwa in der Automobilindustrie.

Die Bereiche Maschinenbau und Bauwesen sind mit zusammen etwa 58 % an der inländischen Stahlverwendung beteiligt (Ellermann 2007). Das mögliche Einsparpotenzial ist daher auch in absoluten Mengen beträchtlich. Wie das Beispiel der Masten aus dem Baubereich zeigt, kann die Substitution von Baumaterialien mit Stahl weitere Ressourcenersparnisse mit sich bringen.

„Man muss fairerweise sagen, dass die Explosion hinsichtlich neuester Stahl-Qualitäten nach 1990 eingesetzt und sich in den letzten 10 Jahren explosionsartig ausgedehnt hat. Somit ist es klar und selbstverständlich, dass das noch nicht in allen Anwendungsbereichen angekommen ist.“

Dr. Gunnar Still; Direktor Direktionsbereich Umweltschutz, ThyssenKrupp Steel AG

Anwendung neuer Verfahren und Werkstoffe

Bisher treten erhebliche Schwierigkeiten bei der Übertragung neuer Verfahren und Werkstoffe in die breite Anwendung insbesondere bei KMU auf. Ursachen werden in den z.T. relativ unkontrollierten Fertigungsbedingungen, etwa auf Baustellen, gesehen. Hier wird eine Ausnutzung der möglichen Festigkeit dadurch verhindert, dass Verarbeitungsfehler nicht ausgeschlossen werden können und daher höhere Sicherheiten eingeplant werden müssen, jedoch ebenso durch teilweise eingeschränkte Kenntnisse von Werkstoffen und Verarbeitungsverfahren. Die Baupraxis beispielsweise zeigt, dass in der Regel „auf der sicheren Seite“ und somit ein erhöhter Materialbedarf berechnet wird. Dies findet einfache Begründung in den bereits zuvor genannten hohen Kosten für Arbeitsstunden, welche durch genauere Verfahren erforderlich sind. Die möglichen Effizienzpotenziale durch den Einsatz hochfester Stahlsorten können daher u.U. nur unvollständig erschlossen werden. Dies unterstreicht nochmals die Notwendigkeit, Anwendungsrichtlinien, wie etwa die Richtlinien des DASt (Deutscher Ausschuss für Stahlbau) zu entwickeln, die es ermöglichen diese Effizienzpotenziale etwa durch eine beanspruchungsgerechte Bauteildimensionierung und die Vermeidung von Schwachstellen auszunutzen.

Eine Vorreiterrolle hinsichtlich der Anwendung neuer Verarbeitungsverfahren – nicht bei der Entwicklung besonders umwelt- und ressourcenschonender Produkte – spielt häufig die Automobilindustrie. Die technischen Anforderungen unterscheiden sich in anderen Anwendungen jedoch z.T. deutlich vom Automobil, so dass nicht jede werkstoffliche oder fügetechnische Neuerung einfach übertragen werden kann. Im Maschinenbau z.B. ist häufig – aber nicht immer – die Steifigkeit eines Bauteils entscheidend und nicht die Festigkeit. In solchen Fällen ist der Einsatz von hochfesten

Stählen u.U. nicht lohnend, da das Elastizitäts-Modul von hochfesten Stählen nicht höher ist als von Normalstählen. Insofern hängen die Potenziale, insbesondere im Werkzeugmaschinenbau, in hohem Maße von der jeweiligen Anwendung ab. Der Einsatz hochfester Stahlsorten kann besonders dort lohnend sein, wo große Kräfte übertragen werden müssen. Das gilt z.B. für die Karosserie eines Autos, bei welcher es so zu verbessertem Unfallschutz führen kann oder für Brücken und den schweren Industrie- oder Kraftwerksbau. Hier können gerade auch öffentliche Auftraggeber die Entwicklung beschleunigen, indem sie etwa Kriterien wie Dauerhaftigkeit, Lebenszeitkosten, Minimierung der Unterhaltungskosten oder Ressourceneinsparung bei der Vergabe von Aufträgen berücksichtigen. Möglichkeiten zu solchen ganzheitlichen Betrachtungen sind auch nach heutigen Richtlinien möglich (Kuhlmann et al. 2007). Zudem müssen Branchen unabhängig vom Zugpferd Automobilbranche nach neuen Werkstoffen und Füge-technologien forschen. Hier kann u.U. die Branche der Erneuerbaren Energien eine Vorreiterrolle übernehmen, wenn es darum geht, neue Potenziale im Bereich Offshore oder bei den Windkraftanlagen allgemein zu generieren.

Stahl in der Verbindung mit anderen Werkstoffen

Stahl ist der dominierende metallische Werkstoff. Trotz seiner Vielfältigkeit gibt es viele Anwendungsfälle, bei denen eine Kombination von Werkstoffen unter optimaler Ausnutzung ihrer jeweiligen Eigenschaften (u.a. Zugfestigkeit, E-Modul, Gewicht, Betriebsfestigkeit, Wärmedehnung, Temperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit) eine weitergehende Optimierung ermöglicht. Eine solche Kombination von Werkstoffen erfordert jedoch ein sehr hohes Maß an werkstoffkundlichem Know-how. Berücksichtigt man, dass eine sachgerechte Werkstoffauswahl – einschließlich der damit verbundenen Verarbeitungs- und Gestaltungsmöglichkeiten – ein wesentlicher Aspekt einer umweltgerechten Produktgestaltung ist, wird dieser Tatsache in Ausbildung und Qualifizierung bisher zu wenig Bedeutung geschenkt. Insbesondere auch in Hinblick auf vorgelagerte Prozessschritte wie die Werkstoffherzeugung und die damit verbundenen Aspekte des Umwelt- und Ressourcenschutzes.

Werkstoffkombinationen gehen in der Regel einher mit Verbindungstechniken: z.B. Stahl-Beton, Verzinkung oder Sandwich-Bauteile. Dadurch wird u.a. das Recycling dieser einzelnen Werkstoffe erschwert, was wiederum einen negativen Einfluss auf die Ressourcenproduktivität hat. Auf der anderen Seite verlängert eine Verbindung von zwei oder mehreren Werkstoffen die Einsatzfähigkeit eines Produktes (z.B. verzinktes Stahlblech) bzw. macht diese überhaupt erst möglich (z.B. isolierte Kabel). Die Anwendungsfälle sind sehr verschieden, so dass pauschale Potenzialabschätzungen nicht oder nur sehr schwer möglich sind. Generell ist hier aber weitergehender Forschungsbedarf zu konstatieren, der auch unter dem Aspekt der Ressourcenproduktivität geführt werden muss: Ressourcenaufwendungen in Herstellung und Recycling versus Einsparungen in der Nutzungsphase – oder umgekehrt.

„Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anwendung von Prinzipien des Leichtbaus in den letzten zwei Jahrzehnten zu einer erfolgreichen Weiterentwicklung von Produktionsverfahren mit dem Ziel der signifikanten Einsparung von Ressourcen geführt hat, aber dass ein Ende der Entwicklung vor allem in Bereichen hybrider Fertigungsverfahren, hybrider Werkstoffsysteme und innovativer Füge-technik noch nicht abzusehen ist.“

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kleiner, Symposium intelligenter Leichtbau, EMO 2007

Bekanntere Beispiele von Werkstoffkombinationen sind etwa Verbundwerkstoffe (z.B. Stahlbeton), die unterschiedliche Eigenschaften kombinieren und so gegenüber den Ausgangswerkstoffen neue verbesserte Eigenschaftsprofile ermöglichen: Stahlbeton ist dann effizienter, wenn Druck- und Zugbelastung vorhanden sind. Druck kann auch von höherwertigen Stählen nicht besser aufgenommen werden, da sich der Werkstoff Stahl ohnehin durch hervorragende Zug- nicht jedoch Druckfestigkeit auszeichnet. In diesem Fall können Stahlbetonbauwerke effizienter sein, in denen der Stahl den Zug und Beton den Druck aufnimmt. Auch für Stahlwerkstoffe gilt, dass erst so manche Anwendungsbereiche erschlossen werden können.

3 Maßnahmen für den ressourceneffizienten Stahleinsatz

Neben den Verbundwerkstoffen können auch andere Verbindungen von Werkstoffen Ressourcensparpotenziale erschließen. Hierbei kommen ganz unterschiedliche Werkstoffkombinationen in Frage: zum einen Verbindungen unterschiedlicher Stahlwerkstoffe oder metallischer Werkstoffe, etwa unterschiedliche Stahlsorten für Automobilbleche, hochtemperaturfeste Stähle und Nickelbasislegierungen für den Kraftwerksbau oder Stahl und Kunststoff für leichte Stahlprofile wie z.B. I-Träger.

Erfolg versprechend ist auch der Stahleinsatz in Kombination mit anderen Werkstoffen als Verbundquerschnitte und -system im Baubereich. Hier verspricht bereits der Einsatz normalfester Stähle Potenziale für den ressourcenschonenden Stahleinsatz. Aufgrund der eher begrenzten Kräfte ist der Einsatz hochfester Stähle in aller Regel nicht notwendig und nicht konkurrenzfähig. Bereits ein verstärkter Einsatz herkömmlicher Stahlsorten könnte durch geschickte Kombination unterschiedlicher Werkstoffe (und Werkstoffeigenschaften) z.B. mit Aluminium, Metallschäumen oder Carbonfasern erhebliche Potenziale erschließen. Eine Modellierung des Tragwerks beispielsweise mittels der Finite Elemente Methode (Verfahren zur Berechnung komplexer Strukturen) hilft bei einer Formoptimierung, in welcher die Werkstoff-Potenziale genau ermittelt und eingespart werden können.

In allen Fällen geht es stets darum, die günstigsten Werkstoffkombinationen – hinsichtlich Ressourcenschonung, Recyclingfähigkeit, Kosten, Funktionalität usw. auszuwählen, die zu den günstigsten Produkteigenschaften beim geringsten lebenszyklusweiten Ressourcenverbrauch führen.

„Für mich sind Verbundsysteme aus Stahl und Beton aber auch aus Holzstahl und Beton interessant, weil sie konkurrenzfähig sind und die Qualitäten der verschiedenen Baustoffe zu verbinden suchen. Erst über solche Hybridbauweisen gelangt m. E. Stahl in neue Anwendungsbereiche.“

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart



Abbildung 4: Eisenbahnbrücken aus Stahl-Verbundfertigteilen: Lech-Brücke in Schongau.

Quelle: Stahl-Zentrum <http://www.stahl-online.de>

3.3 Ansätze zur Verbesserung der Rahmenbedingungen

Forschung und Qualifizierung

Forschung und Entwicklung (F+E) in der Werkstoff- und Anwendungstechnologie sind zentrale Grundlagen für eine im Sinne der Ressourceneffizienz optimierte Anwendung von Werkstoffen. Um diese Grundlage weiter zu sichern sollten insbesondere die Lissabonziele umgesetzt werden, d.h. eine Erhöhung der Ausgaben für F+E von gegenwärtig ca. 2,5 % auf 3 % des BIP (BMBF 2007). Auf europäischer Ebene sind die folgenden Forschungsfelder bedeutend, um die Stahlindustrie zu einer führenden Branche im Sinne von Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit zu machen (siehe Abbildung 5):

ESTEP-Forschungsfelder			
<p>Sichere, saubere, kosteneffiziente und kapitalextensive Technologien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energieeffizienz • Flexible und multifunktionale Prozesskette • Intelligentes Produzieren 	<p>Stahl-Anwendungen für Endverbraucher</p> <ul style="list-style-type: none"> • Automobil • Baugewerbe und Infrastruktur • Energiesektor 	<p>Attraktivität der Branche für qualifiziertes Personal</p> <p>Sicherung des Nachwuchses und der Qualifikationen</p>	<p>Rationeller Energie- und Ressourceneinsatz; Management der Beiprodukte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verringerung des Ausstoßes der Klimagase • Energieeffizienz und Ressourcenschonung • Definition und Analyse der gesellschaftlichen Vorteile von Stahlanwendungen

Tabelle 1: Forschungsfelder für eine nachhaltige Stahlindustrie (Quelle: ESTEP 2005)

Bisher werden die Umweltforschung und die Technologieentwicklung vielfach noch getrennt betrieben bzw. die Verknüpfung bleibt meist recht vage, auch wenn häufig eine obligatorische Berücksichtigung von Umwelt- oder Nachhaltigkeitsaspekten in Technologieprojekten erfolgt. Es scheint daher notwendig, stärker interdisziplinäres Forschen zur Verknüpfung Werktechnologien und Nachhaltigkeitsaspekten zu fördern. Ansätze wie die oben genannte Plattform bilden hier wichtige Akzente zur integrativen Betrachtung von Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit, die forciert und ausgebaut werden müssen.

Die Stahl- und Stahlanwendungsforschung in Deutschland stützt sich auf ein dichtes Netz von Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Diese Forschung wird ganz überwiegend – zu rund 90 % – aus Mitteln der Stahlunternehmen finanziert (Wuppermann 2007). Damit ist der Anteil der Forschungsfinanzierung durch Unternehmen überproportional groß und gemessen an der Marktbedeutung von Stahl ist die öffentliche Forschungsförderung gering. Dies hat u.a. zur Folge, dass KMU zu wenig mit ihren Potenzialen in die Forschung integriert sind, denn diese Unternehmen können sich selten mit einer eigenen Finanzierung an Forschungsvorhaben beteiligen. Perspektivisch sollten jedoch auch kleine und mittlere Unternehmen und branchenbezogene Dienstleister aus der Eisen und Stahlbranche, oder allgemeiner aus den Branchen der metallischen Strukturwerkstoffe, verstärkt durch die öffentliche Forschungsförderung adressiert werden (Bleck 2005). Dabei sollte insbesondere auch die anwendungsorientierte Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung berücksichtigt werden, damit die Zielperspektive der Ressourcenproduktivität integraler Bestandteil der Untersuchungen wird. Forschung und Entwicklung müssen jedoch ergänzt werden um eine zielgerichtete universitäre und außeruniversitäre Ausbildung in diesen Bereichen. Nur so lässt sich die Anwendung von Forschungsergebnissen sicher stellen. Zudem wird so eine Diffusion dieser Ergebnisse in KMU erleichtert. Wie auch in den Expertenworkshops diskutiert, ist die Durchführung von Forschungsprojekten insbesondere für KMU noch zu häufig mit erheblichen organisatorischen und administrativen Problemen verbunden, die zusammen mit der alleinigen Anteilsfinanzierung eine erhebliche Hürde für die Projektdurchführung darstellen.

Industrielle Fertigungsstrukturen und Infrastrukturen

Die größten Potenziale zur Ressourcenschonung lassen sich dort erschließen, wo die wirtschaftliche Entwicklung dynamisch verläuft und große Mengen Stahl langfristig im Güterbestand gebunden werden. Im Bereich der Infrastruktur spielt der Werkstoff Stahl traditionell eine wichtige Rolle. Dabei gehen Aufbau und Erneuerung industrieller Fertigungsstrukturen und öffentlicher Infrastrukturen einher mit langfristigen technologischen Festlegungen, prägen also den Ressourcenverbrauch über längere Zeiträume. Bei anstehenden Erneuerungen und dem Aufbau neuer Strukturen muss diese Festlegung vorausschauend berücksichtigt werden. Sowohl beim Umbau und der Instandhaltung bestehender Systeme in Industrieländern, als auch bei der Entwicklung ressourceneffizienter Systemlösungen für Schwellen- und Entwicklungsländer ergeben sich daher große Potenziale für den Werkstoff Stahl. Wichtig ist hierbei, dass nicht wie bisher vor allem möglichst günstige Erstellungskosten im Mittelpunkt von Investitionsentscheidungen, etwa im Bereich der Verkehrsinfrastruktur oder der Energieerzeugung stehen, sondern dass lebenszyklusweit gedacht wird und auch die Nutzung und die Lebensdauer ökonomisch und mit Blick auf den Ressourcenverbrauch mit berücksichtigt werden. Dazu ist eine Veränderung der Förderungen in den Bereichen Forschung, Exportunterstützung und Ausschreibungen notwendig, damit die Ziele auf Nachhaltigkeit hin orientiert werden.

Normung und Standardisierung

Standardisierungen, Normen und technische Regeln sind weitere Aspekte, die berücksichtigt werden müssen, wenn moderne Verfahren und Werkstoffe eingesetzt werden sollen. So wird der Einsatz hochfester Stähle – und damit ihr Potenzial zur Ressourcenschonung – aufgrund unflexibler Vorschriften eingeschränkt (siehe Kasten). Innovationen können nur dann zum Tragen kommen, wenn sie auch Eingang in die Standardisierungen und Normen gefunden haben. Dass dies zeitversetzt stattfindet und dass die Veränderung von Normen nicht leichtfertig erfolgen darf, ist selbstverständlich. Gegebenfalls sollte hier aber eine engere Zusammenarbeit aller Beteiligten stattfinden – auch um schneller reagieren zu können und eine weitere Verbreitung der innovativen Erkenntnisse sicher zu stellen.

Stabilitäts- und Ermüdungsverhalten von Stählen

So werden z.B. in Eurocode 3 (DIN EN 1993-1-1; DIN EN 1993-1-2) derzeit nur Stähle mit einer Streckgrenze bis 700 N/mm² berücksichtigt, (bis zur Annahme der neuen Norm im Juli 2006 waren sogar nur Stähle bis zu einer Streckgrenze bis 460 N/mm² berücksichtigt) obwohl auch Stähle mit 1100 N/mm² verfügbar sind und neuere Forschungsergebnisse darauf hinweisen, dass die Bemessungsregeln nach Eurocode 3 auch auf Festigkeiten höher als 700 N/mm² anwendbar sind (Völling et al. 2006). Die Regeln gehen aber dennoch davon aus, dass das Ermüdungsverhalten normaler- wie auch höherfester Stähle gleichzusetzen ist, da es zu Stabilitäts- und Ermüdungsverhalten von Stählen zwischen 700 N/mm² bis 1100 N/mm² keine normativen Regelungen gibt. Bisher werden sie unter dem Begriff der Anerkannten Regeln der Technik in der Praxis angenommen.

Eine Anpassung von Normen und technischen Regeln wird jedoch nur dann erfolgreich umzusetzen sein, wenn die Anwender entsprechend qualifiziert werden. Dies kann sowohl die akademische Ausbildung als auch die Weiterbildung betreffen und auch die Exportmärkte einschließen. Neben der universitären ist hier insbesondere die duale Ausbildung angesprochen.

Im Bereich der Normung / Standardisierung wird es daher in einigen Fällen notwendig sein, Regeln für die Verarbeitung gerade für hochfeste Stähle anzupassen. Dabei muss es nicht grundsätzlich so sein, dass bei der Verwendung hochfester Stahlsorten überdimensioniert wird, u.U. wird nach derzeitigen Regeln auch unterdimensioniert. Hier muss weiter geforscht werden, um die Nachweis-konzepte stärker zu differenzieren, wie es etwa im FOSTA-Vorhaben P 652 „Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle“ durchgeführt wird.

3 Maßnahmen für den ressourceneffizienten Stahleinsatz

Berücksichtigt werden muss aber auch, dass Leichtkonstruktionen aufgrund geringer Materialdicke anfälliger für Korrosionsschäden sind. Außerdem sind Reparaturen an Leichtkonstruktionen deutlich schwieriger durchzuführen, da einerseits der Kraftfluss nicht beeinträchtigt werden darf, andererseits aber auch die eingesetzten Stahlsorten etwa nach thermischen Einwirkungen deutliche Festigkeitsverluste erleiden können. Beides kann zu Schäden an Bauteilen führen. Leichtbau macht es daher notwendig, auch neue Strategien für die Nutzung und Reparatur von Gütern zu entwickeln. Ebenso bestehen in seltenen Fällen Probleme mit der Unfallrettung aus hochfesten Karosserien.

Die folgende Tabelle 1 fasst die zentralen Ressourceneffizienzpotenziale sowie entgegenstehende Hemmnisse zusammen und stellt die Handlungsansätze dar.

Effizienzpotenziale	Hemmnisse	Handlungsansätze
Stahlerzeugung · Ressourceneinsparung durch effizientere Verfahren (Energie, Rohstoffe) · Entwicklung neuer Verfahren (technologische Aufwertung, Legierungen, kraftflussgerecht)	· Reparatur- und Recyclingfähigkeit · mangelnder Einfluss auf Recyclingströme · Design- und Kundenwünsche · Werkstoff- und Verfahrenkenntnisse · veraltete Anwendungsrichtlinien und Standards	· Förderung inter- und transdisziplinärer Forschung und Entwicklung (Werkstoffe, Verfahren, Potenziale) mit lebenszyklusweiter Perspektive · Qualifizierung für werkstoff- und verfahrenkundliches Know-how (Ausbildung und Beruf)
Stahlverwendung · Werkstoffgestaltung: neue Werkstoffe, Werkstoffkombinationen · Produkt- und Anlagengestaltung: Leichtbau, hochfeste Stähle · modulare Systeme · ganzheitliche Optimierung	· unbestimmte Potenziale · Übertragbarkeit neuer Werkstoffe und Verfahren in KMU · neue Werkstoffe und Produkte vs. Recyclingfähigkeit · Ressourcenintensität vs. Ressourceneinsparungen von Legierungen · Mengeneffekte (Einsparungen durch z.B. effizientere Technologien werden durch vermehrte Nutzung und Konsum überkompensiert)	· Anpassung von Normierungen und Anwendungsrichtlinien · Ausrichtung von Infrastrukturen und industrieller Fertigstrukturen an Effizienzzielen und Lebenszyklusperspektive · Sicherung des dauerhaften Zugangs zu natürlichen Ressourcen für hochwertige Werkstoffe und Produkte
Systemische Lösungen und lebenszyklusweite Perspektive		

Tabelle 2: Zusammenfassende Tabelle zu den Potenzialen, Hemmnissen und Handlungsvorschlägen

Quelle: Wuppertal Institut

4 Ausblick

Die Stahlbranche bietet erhebliche Ressourcenschonungspotenziale und wird so zu einem bedeutenden Aktionsfeld für strategische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Diese werden jedoch nur dann realisiert, wenn die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen einen effizienten Umgang mit den natürlichen Ressourcen auch wirklich zulassen und befördern. Die Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung in der Stahlbranche ist von vielen Akteuren abhängig und setzt vielfältige Veränderungsprozesse voraus.

Die lebenszyklusweite Ressourceneffizienz ist bei der Gestaltung von Produkten bisher nur selten ein Thema. Sie wird auf politischer Ebene zunehmend als eine Schlüsselgröße für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen (Stahl-)Wirtschaft wahrgenommen. Auch wenn ein Werkstoff sich für viele Anwendungen gut eignen mag, wird dies nicht für alle anderen Anwendungen gleichermaßen zutreffen. Daher lassen sich im Einzelfall gewonnene Potenziale nicht 1:1 für Produktgruppen oder -segmente hochrechnen. Es lässt sich aber über entsprechend orientierte Innovationsforen, bei denen Wissenschaft mit Herstellern und Verarbeitern und anderen Stakeholdern zusammenarbeiten, klären, wie hoch diese das Verbreitungs- und Ressourceneffizienzpotenzial von technologischen oder produktspezifischen Lösungsansätzen bewerten.

Ein großes Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz des Werkstoffes Stahl birgt die Optimierung seiner Nutzung. Wichtige Aspekte sind hier Gewichtsminimierung und Reparatur- und Recyclingfähigkeit. Diese Verbesserungspotenziale sind gegenüber den Potenzialen bei der Herstellung weit weniger genau bestimmt. Die verstärkte Suche nach systemischen und Werkstoff übergreifenden Lösungen sollte daher verstärkt in den Mittelpunkt des Interesses gerückt werden. Will man die Ressourcenproduktivität deutlicher als bisher steigern, muss man daher über rein betriebliche und sektorale Ansätze hinausgehen und Systemlösungen entwickeln. Systemlösungen versprechen technologische und organisatorisch-institutionelle Entwicklungssprünge. Damit sind nicht nur graduelle Verbesserungen in Technologie, Produktionsprozess oder Produkt möglich, sondern substantielle Steigerungen der Ressourcenproduktivität – meist verbunden mit lukrativen wirtschaftlichen Potenzialen.

Der gewählte Dialogansatz hat sich im Fokusbereich Stahl bewährt. Es ist eine Integration unterschiedlicher Wissensgebiete gelungen. Gleichzeitig konnte durch die strikte Maßnahmenorientierung und die Fokussierung auf einzelne Maßnahmenbereiche die Komplexität der Zielsetzung „Ressourcenproduktivität und Ressourcenschonung“ reduziert werden. Abstrakte politische Vorgaben wurden fachlich kontextualisiert und konkretisiert.

Die Expertinnen und Experten im Rahmen des Dialogprozesses waren sich darin einig, dass der begonnene Zukunftsdialog in erweiterter Form fortgesetzt werden sollte. Für die einzelnen im Rahmen der Broschüre behandelten Themenfelder sollte der Teilnehmerkreis erweitert und gezielt weitere Expertinnen und Experten einbezogen werden.

- ADL - Arthur D. Little GmbH; Wuppertal Institut; ISI - Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (2005):** Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in Mittelständischen Unternehmen, Abschlussbericht. Download unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/endbericht-wirksamkeit-des-programms-zur-verbesserung-der-materialeffizienz.property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Aho, E.; Cornu, J.; Georghiou L.; Subirá A. (2006):** Creating an Innovative Europe. Report of the Independent Expert Group on R&D and Innovation appointed following the Hampton Court Summit and chaired by Mr. Esko Aho. Luxembourg. Download unter: http://ec.europa.eu/invest-in-research/pdf/download_en/aho_report.pdf
- Ameling, D. (2008):** Stahl – Innovationsmotor zur Ressourcenschonung; Vortrag im Rahmen des „Zukunftsdialog Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“ im Bundespresseamt am 24.01.2008 in Berlin; Download unter: http://www.stahl-online.de/medien_lounge/Vortraege/240108RohstoffproduktivitaetundRessourcenschonungWuppertalInstitutBerlin.pdf
- Ameling, D.; Endemann, G. (2007):** Ressourceneffizienz – Gute Argumente für Stahl; Stahlinstitut VDEh, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Düsseldorf; Download unter: http://www.stahl-online.de/wirtschaft_und_politik/Umwelt_und_Energiepolitik/IISI_Ressourceneffizienz_deutsch_Internet.pdf
- BDS - Bundesverband Deutscher Stahlhandel (Hg.) (2008):** Wege zum Stahl, Düsseldorf; Download unter: http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/D519_Schaubild_Wege_zum_Stahl.pdf
- Bleck, W. (2005):** Universitäre Forschung am Scheideweg; in: Stahl und Eisen 125 (2005), Nr. 6, Düsseldorf, S. 36-38
- Bleck, W. (2007):** Ressourcenschonung mit neuen Stählen / Technologien / Methoden; Vortrag im Rahmen des 1. Expertenworkshops im Projekt „Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“ am 18.04.2007 in Düsseldorf.
- BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2007):** Pakt für Forschung und Innovation; Berlin; URL: <http://www.bmbf.de/de/3215.php> (Stand: 05.05.2008).
- BMU - Bundesministerium für Umwelt (Hg.) / Roland Berger Strategy Consultants (2007):** GreenTech made in Germany. Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, München.
- BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.) (2004):** Verkehr in Zahlen 2004/2005; Hamburg.
- Brahmer-Lohse, M.; Dräger, H.-J.; von Gleich, A.; Gößling-Reisemann, S.; Gottschick, M.; Grossmann, D.; Horn, H.; Jepsen, D.; Kracht, S.; Lohse, J.; Lorenzen, S.; Sander, K. (2002):** Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg. Erkenntnisse – Erfahrungen – praktische Erfolge, Hamburg.
- Buttermann, H. G.; Hillebrand, B. (2005):** Die Bedeutung von Stahl-Werkstoffen als „Rohstoff“ für die Wirtschaftsstruktur in Deutschland; EEFA Analysen; Münster, Berlin.
- BVSE - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (Hg.) (2008):** Sekundärrohstoff Marktbericht, Bonn; Download unter: <http://www.bvse.de/images/picturepool/1/1502.pdf>
- DESTATIS (Hg.) (2008):** Eisen und Stahl; Fachserie 4 Reihe 8.1; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Deutsche Bundesregierung (Hg.) (2007):** Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung; in: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/elementerohstoffstrategie.property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>
- DIN EN 1993-1-1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1:** Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005.
- DIN EN 1993-1-12 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-12:** Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlsorten bis S700; Deutsche Fassung EN 1993-1-12:2007.
- DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen 2006.**
- DSTV - Deutscher Stahlbau-Verband (Hg.) (2006):** Stahlbauproduktion; Quartalsübersicht 2005, Düsseldorf.
- EEA - Environmental Energy Agency (Hg.) (2008):** Time for action — towards sustainable consumption and production in Europe; Summary report of the conference held on 27–29 September 2007, Ljubljana, Slovenia; EEA Technical report No 1/2008, Copenhagen; Download unter: http://www.scp-centre.org/fileadmin/cscp/Project_Files/Slovenia_Conference/Time_for_action-towards_sustainable_consumption_and_production_in_Europe.pdf
- Ellermann, O. (2007):** Handel im Wandel; Vortrag in Martinsberg am 23.11.07, Download unter: http://www.lb-log.ch/pdf/ELLERMANN_Handel_im_Wandel_231107.pdf
- ESTEP - European Steel Technology Platform (2005):** Strategic Research Agenda: A vision for the future of the steel sector, Belgien; Download unter: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/estep/docs/sra_en.pdf
- Global Footprint Network (Hg.) (2007):** Global footprint network 2007; Annual report, Oakland.
- GVM - Gesellschaft für Verpackungsforschung (Hg.) (2007):** Recycling-Bilanz für Verpackungen 1991 - 2006, Wiesbaden; Download unter: http://www.gvm-wiesbaden.de/pdf/infocus/2007-11rb14_de.pdf

- Gyllenraum, R.; Ekerot, S. (2007):** Lubricating the recycling machine; 1st International Seminar on Society & Materials, SAM 1 am 06-07.03.2007 in Seville.
- Hanus, F. (2000):** Thermomechanisch gewalzte Stähle für den Stahl- und Behälterbau; Vortrag zum Seminar „Schweißen der thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustähle“ der SLV-Duisburg, Oktober 2000.
- Herzog, K., Liedtke, C., Ritthoff, M., Wallbaum, H., Merten, T. (2003):** Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzwerkstoffen – Verfahren, Ressourceneffizienz, Recycling, Umwelt; Forschungsbericht P 559; Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf.
- Hubo, R.; Schröter, F. (2001):** Thermomechanisch gewalzte Stähle – Hochleistungsprodukte für einen effizienten Stahlbau; Dillingen/Saar.
- IISI - International Iron and Steel Institute (Hg.) (1998):** Worldwide LCI Database for Steel Industry Products; Technical Report No. 1, Brüssel.
- IISI - International Iron and Steel Institute (Hg.) (2007):** World Steel in Figures 2007; Web/pdf version; 4 September 2007, Brüssel; Download unter: <http://www.worldsteel.org/pictures/newsfiles/2007%20Summary.pdf>
- IISI - International Iron and Steel Institute (Hrsg.) (2008):** World crude steel output increases by 7.5% in 2007; Media Release vom 23.01.2008; URL: <http://www.worldsteel.org/pictures/newsfiles/2007%20Summary.pdf> (Stand: 05.05.2008).
- IPCC (2007):** Climate Change 2007. URL: <http://www.ipcc.ch/>; 06/2007.
- Jäger, J. (2007):** Was Verträgt Unsere Erde Noch? Wege in die Nachhaltigkeit, Frankfurt am Main.
- Jochem, E.; Schön, M.; Angerer, G.; Ball, M. (2004):** Werkstoffeffizienz: Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe; ISI - Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Hg.), Karlsruhe.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2005):** Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen; KOM (2005) 670 endg., Brüssel; Download unter: http://europa.eu.int/comm/environment/natres/pdf/com_natres_de.pdf.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2006a):** Kenntnisse in die Praxis umsetzen: Eine breit angelegte Innovationsstrategie für die EU; KOM (2006) 502 endg., Brüssel.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2006b):** Kommission sucht Anregungen für ihre künftige Politik zur Stärkung der EU-Metallindustrie. Rapid Press Release vom 18.09.2006; IP/06/1205, Brüssel; URL: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/06/1205&format=HTML&aged=0&language=DE&guiLanguage=en> (Stand: 05.05.2008).
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2007):** Eine Leitmarktinitiative für Europa; KOM (2007) 860 endg., Brüssel.
- Kormann, A. (2002):** Aus der Arbeit der Wirtschaftsvereinigung Stahl und der wirtschaftlichen Fachverbände; in: Stahl und Eisen 122 (2002), Düsseldorf, S. 57-69.
- Kristof, K. / Liedtke, C. / Baedeker, C. / Lemken, T. (2007):** Erfolgsfaktoren für eine erfolgreiche Ressourcenpolitik: Kostensenkung, Rohstoffsicherheit, Arbeitsplätze und Umweltschutz. Hintergrundpapier für die Innovationskonferenz II „Ressourceneffizienz“. Wuppertal.
- Kuhlmann, U.; Pelke, E.; Hauf, G.; Herrmann, T.; Steiner, J.; Aul, M. (2007):** Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Verbundbrücken unter Berücksichtigung des Bauverfahrens und der Nutzungsdauer; in: Stahlbau 76 (2007), Nr. 2, Berlin, S. 105-116.
- Langkamp, A. (1995):** Vergleichende Materialintensitätsanalyse von BMW Hinterachsvarianten; Dresden.
- Latif, M. (2007):** Bringen wir das Klima aus dem Takt? Hintergründe und Prognosen, Frankfurt am Main.
- Liedtke, C. / Welfens, M. J. (Hg.) (2008):** Mut zur Nachhaltigkeit – didaktische Module: Konsum, Nachhaltige Entwicklung, Klima Ozeane, Ressourcen Energie, Wasser, Ernährung Bevölkerung, Wirtschaft Neue Weltordnung für die Erwachsenenbildung zum Projekt „Mut zur Nachhaltigkeit“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Stiftung Forum für Verantwortung, ASKO EUROPA-STIFTUNG, europäische Akademie Otzenhausen gGmbH. Informationen unter: www.asko-europa-stiftung.de.
- Matsuno, Y.; Daigo, I.; Adachi, Y. (2007):** Dynamic material flow analysis of steel, aluminum and copper scraps in Japan; 1st International Seminar on Society & Materials, SAM 1, Seville, 6-7 March 2007.#
- Mauser, W. (2007):** Wie lange reicht die Ressource Wasser? Vom Umgang mit dem blauen Gold, Frankfurt am Main.
- Merten, T.; Liedtke, C.; Schmidt-Bleek, F. (1995):** Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (1) - Die Werkstoffe Beton und Stahl- Materialintensitäten von Freileitungsmasten; Wuppertal Paper Nr. 27, Wuppertal.
- Meyer, B. (2007):** Wie muss die Wirtschaft umgebaut werden? Perspektiven einer nachhaltigen Entwicklung, Frankfurt am Main.
- Ministry of Environment Japan (Hrsg.) (2005):** Japan's Experience in Promotion of the 3Rs. For the Establishment of a Sound Material-Cycle Society, Tokyo.
- Mittal (Hg.) (2007):** Mittal Steel Hamburg; URL: www.mittalsteel.com/Facilities/Europe/Mittal+Steel+Hamburg (Stand: 05.05.2008).
- Moll, S.; Acosta, J.; Schütz, H. (2005):** Iron and Steel – a Materials System Analysis Pilot study examining the material flows from the resource input to product and waste for the production and consumption of steel in the European Union; European Topic Centre on Waste and Material Flows, Copenhagen.

- Münz R. / Reiterer A.F. (2007):** Wie schnell wächst die Zahl der Menschen? – Weltbevölkerung und weltweite Migration, Frankfurt am Main.
- Nitschke-Pagel, T. (2007):** Schweißnachbehandlung bei hochfesten Stählen. Konferenz Tagungsband: Hochfester Stahl- im Stahl- und Maschinenbau – Neues aus Forschung und Anwendung am 13.12.2006 in Wallerfangen; Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf.
- Pintér, L. (2006):** International Experience in Establishing Indicators for the Circular Economy and Considerations for China; Report for the Environment and Social Development Sector Unit, East Asia and Pacific Region, The World Bank; Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Rommerskirchen, S.; Greinus, A. (2008):** Personenverkehr in Europa und Übersee; in: Internationales Verkehrswesen (60), S. 10-14.
- Schallaböck, K. O.; Fishedick, M.; Brouns, B.; Luhmann, H.J.; Merten, F.; Ott, H. E.; Pastowski, A.; Venjakob, J. (2006):** Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien; Wuppertal Spezial 34, Wuppertal.
- Schmidt-Bleek, F. (2007):** Nutzen wir die Erde richtig? Die Leistungen der Natur und die Arbeit des Menschen, Frankfurt am Main.
- Schröter, F.; Martin, F. (2007):** Neuste Entwicklungen von thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustählen – Erfahrungen aus Offshore-Industrie und Stahlwasserbau. Konferenz Tagungsband: Hochfester Stahl- im Stahl- und Maschinenbau – Neues aus Forschung und Anwendung am 13.12.2006 in Wallerfangen; Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf.
- Seliger, G. (o.J.):** Nachhaltige industrielle Wertschöpfungsnetze; TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Berlin; Download unter: http://www.natwiss.de/inc/Seliger_Wertschoepfungsnetze.pdf
- Stahel, W. R. (2006):** The Performance Economy; London.
- Stahl-Zentrum (Hg.) (2007):** The Steel Industry in Germany, Düsseldorf; Download unter: http://www.stahl-online.de/medien_lounge/Hintergrundmaterial/ansichtSteelindustrytitelBrz.pdf
- Still, G.; Adam, H.; Alsleben, D.; Volkhausen, W. (2005):** Produktintegrierter Umweltschutz – Chance oder Gefahr?; in: Stahl und Eisen 125 (2005), Nr. 4, Düsseldorf, S. 57-64.
- ThyssenKrupp Steel (Hg.) (2007):** Produktinformation höherfeste IF-Stähle HX; Für hohe Streck- und Tiefziehbeanspruchung; Duisburg; Download unter: <http://www.thyssenkrupp-steel.com/auto>
- U.S. Geological Survey (2008):** Mineral commodity summaries 2008, Washington.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2005):** Die Zukunft in unseren Händen; 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen; Dessau; Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/>
- ULSAB-AVC-Konsortium (Hrsg.) (2001):** Automotive (R)Evolution in Steel, Düsseldorf.
- van der Voet, E.; van Oers, L.; Nikolic, I. (2003):** Dematerialisation: not just a matter of weight. CML Report 160. Centre of Environmental Science (CML) Leiden University, Leiden, Niederlande.
- VDI Technologiezentrum GmbH (Hg.) (2006):** Mit Sicherheit leicht: New Steel Body, News vom 10.09.2006, Düsseldorf; URL: [http://www.kompetenzcluster.org/index.php?id=1032&bl=DE&kb=fahrzeug&map=DEF&tx_ttnews\[backPid\]=1143&tx_ttnews\[pointer\]=6&tx_ttnews\[tt_news\]=25&cHash=2a7b5baa84](http://www.kompetenzcluster.org/index.php?id=1032&bl=DE&kb=fahrzeug&map=DEF&tx_ttnews[backPid]=1143&tx_ttnews[pointer]=6&tx_ttnews[tt_news]=25&cHash=2a7b5baa84) (Stand: 05.05.2008).
- Velikonja, D. (2004):** Visionen und innovative Lösungen in der Umformtechnik; in: Stahl und Eisen 124 (2004), Nr. 8, Düsseldorf, S. 36-38.
- Völling, B.; Sedlacek, G.; Pak, D.; Clarin, M. (2006):** Zum Beulverhalten kaltgeformter und geschweißter Rechteckhohlprofile aus hochfestem Stahl; in: Stahlbau, Ausgabe 11, Berlin, S. 889-896.
- von Wartenberg, L. (2005):** Rohstoffversorgung und Rohstoffsicherung: Herausforderungen für die Industrie; Vortrag auf der STAHL 2005 am 10.11.2005 in Düsseldorf.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.) (2003):** Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2003-2004 (CD-ROM); Wirtschaftsvereinigung Stahl, Düsseldorf.
- Wuppermann, C.-D. (2007):** Netzwerk Stahltechnologie als Chance der Zukunft; in: Stahl und Eisen 127 (2007), Nr. 8, Düsseldorf, S. 108-116.
- Wuppertal Institut (Hg.) (2008):** MIPS Online, Wuppertal; URL: www.mips-online.info (Stand: 05.05.2008).
- Schütz, H.; Bringezu, S. (2008):** Ressourcenverbrauch von Deutschland - aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen. Erstellung eines Glossars zum „Ressourcenbegriff“ und Berechnung von fehlenden Kennzahlen des Ressourcenverbrauchs für die weitere politische Analyse. Texte 02/08, herausgegeben vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau ; Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de> Wuppertal, Juni 2008

**Wuppertal Institut für
Klima, Umwelt, Energie GmbH**
Postfach 10 04 80
42004 Wuppertal
www.wupperinst.org