

Zink – Einsatzgebiete und Anwendungen

Dr.-Ing. F. Prenger, Grillo-Werke AG, Duisburg
 S. Grund, Initiative Zink in der WVM, Düsseldorf

1 Einleitung

Zink ist ein Werkstoff mit zahlreichen Einsatzbereichen. Es zählt außerdem zu den für Mensch, Tier und Pflanze lebenswichtigen Spurenelementen. Hintergrundinformationen über Zink und seine Anwendungen, über das Recycling von Zink und über innovative, neue Anwendungen sowie über die Bedeutung des Zinks für die menschliche Gesundheit sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

2 Zink in Zahlen

Zink findet als Konstruktionswerkstoff breite Anwendung unter anderem im Bauwesen und im Automobilbau. Ein Auto enthält durchschnittlich 10,2 kg Zink, davon u.a. 4,9 kg Zinkdruckguss, 3,2 kg als Verzinkung zum Korrosionsschutz, 0,5 kg Zink in Gummi (als Vulkanisator) /1/. Weltweit werden jährlich über 9 Mio. t Zink gewonnen. Als Zinkblech - so genanntes Bauzink - findet Zink Einsatz als Bedachungsmaterial, bei der Dachentwässerung und als Fassadenelement. Zinkdruckgussteile finden sich in allen Lebensbereichen wieder. Meist sind diese nicht als solche zu erkennen. Sie sind entweder in funktionellen Komponenten mit anderen Werkstoffen verbaut oder aber pulverbeschichtet bzw. durch Verchromen veredelt.

In **Bild 1** sind die Verwendungsbereiche von Zink dargestellt und die Branchen, in denen Zink zu finden ist. 16 % der weltweiten Zinkerzeugung werden zu Zinkdruckgusslegierungen verarbeitet während 7 % als so genanntes Titan- oder Bauzink in die Halbzeugindustrie gehen. 19 % werden als Legierungsbestandteil in der Messingproduktion verarbeitet. Der Hauptteil des weltweit erzeugten Zinks (47 %) dient dem Korrosionsschutz von Stahl. Insgesamt 70 % des Zinks aus all seinen Verwendungen findet im Endprodukt Einsatz im Bausektor (45 %) bzw. im Bereich Verkehr (25 %).

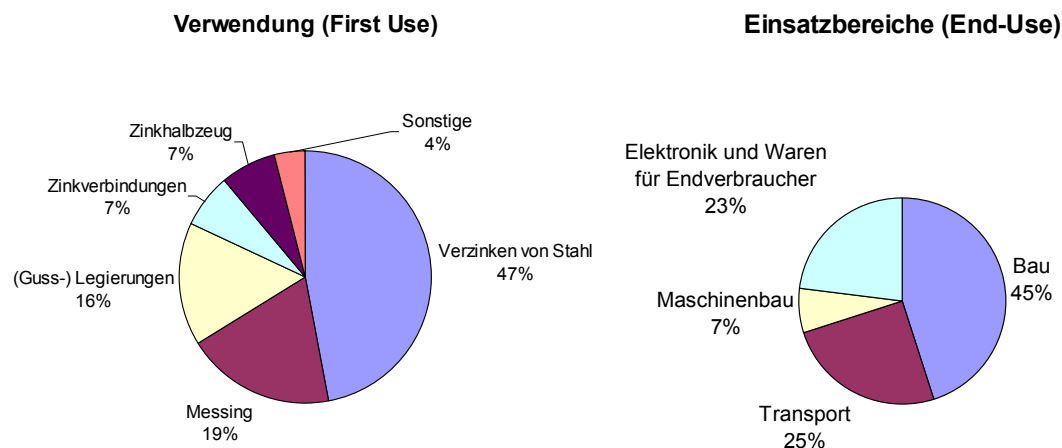


Bild 1: Verwendung und Einsatzbereiche von Zink /1/

Im Jahre 2005 wurden in Deutschland 623 000 t Zink verarbeitet, 339 000 t hiervon wurden direkt in Deutschland erzeugt /5/. In der deutschen zinkerzeugenden und -verarbeitenden Industrie und in ihrem direkten und indirekten Umfeld sind heute ca. 30 000 Mitarbeiter in 320 Unternehmen beschäftigt. Der mit 1,5 Mrd. EUR Jahresumsatz (2005) bedeutende Wirtschaftszweig gliedert sich in Metallherzeugung, Verzinkereien, Halbzeugherstellung und Gießereien. Dort werden Mitarbeiter in vielfältigen Berufsfeldern aus- und fortgebildet: Chemiefacharbeiter, Dachdecker, Energieelektroniker, Galvaniseure, Gießereimechaniker, Hüttentechniker, Industriemechaniker, Kaufleute, Klempner, Laboranten und Verfahrensmechaniker /2/.

3 Der Werkstoff Zink

Zink ist so alt wie die Erdkruste und wird bereits seit dem Altertum als Bestandteil von Messing genutzt. Wahrscheinlich waren die Römer unter Kaiser Augustus (20 v. Chr. bis 14 n. Chr.) die ersten, die aus einer Kupfer- und Zinkermischung den Rohstoff für Messingmünzen erschmolzen, ohne sich dessen bewusst zu sein. Erst im Jahre 1374 erkannten die Inder Zink als „neues“, unlegiertes Metall. Erst 1805 wurde in Belgien das erste Zinkwalzwerk gegründet /2/. Zink ist als eigenständiger Werkstoff also ein „junges“ Metall.

Die Eigenschaften von Zink sind vielfältig – ebenso, wie es heute seine Anwendungen sind. **Tabelle 1** zeigt charakteristische Eigenschaften von Zink und die sich daraus ergebende Verwendung im Überblick.

Tabelle 1: Eigenschaften, Verwendung und Einsatzbereiche von Zink /1/

Eigenschaften	Verwendung	Einsatz
<ul style="list-style-type: none"> Niedriger Schmelzpunkt enge Toleranzen des Rohgusses lange Standzeiten der Formen Gute Voraussetzungen für Oberflächenbehandlungen Mechanische Festigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Zinkdruckguss 	<ul style="list-style-type: none"> Automobilbau Baubeschläge, Fittings, Möbel/Haushalt, Maschinenbau Sanitär Spielzeug
<ul style="list-style-type: none"> Formbarkeit Witterungsbeständigkeit Wartungsfreiheit 	<ul style="list-style-type: none"> Bauzink (Bedachungen, Fassaden und Dachentwässerungssysteme) 	<ul style="list-style-type: none"> Bau und Konstruktion
<ul style="list-style-type: none"> Korrosionsbeständigkeit Reaktivität mit Eisen Elektrochemische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> Korrosionsschutz für Stahl (Stückverzinken, Bandverzinken, Spritzverzinken, zinkreiche Farben) 	<ul style="list-style-type: none"> Auto und Transport, Bau und Konstruktion, Straßenmöblierung (Leitplanke, Schilder und Laternenmasten) Energie, Landwirtschaft, Haushaltsgeräte
<ul style="list-style-type: none"> Legierungseigenschaften und Legierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Messing (Cu-Zn), Aluminium- und Magnesiumlegierungen 	<ul style="list-style-type: none"> Bau und Konstruktion, Fittings, Komponenten in der Elektronik und im Automobilbau
<ul style="list-style-type: none"> Elektrochemische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> Batterien 	<ul style="list-style-type: none"> Automobil und Transport, Computer, medizinische Ausrüstung, Endverbraucher
<ul style="list-style-type: none"> Chemische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> Zinkoxid, Zinksulfat, Zinkstearat 	<ul style="list-style-type: none"> Reifen, Gummi, Pigmente für Farben, Keramik
<ul style="list-style-type: none"> Lebensnotwendiges, d.h. essentielles Spurenelement 	<ul style="list-style-type: none"> Zinkverbindungen 	<ul style="list-style-type: none"> Nahrungsergänzungsmittel für den Menschen, Tierfutterzusätze, Dünger
<ul style="list-style-type: none"> Heilende Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> Zinkverbindungen 	<ul style="list-style-type: none"> Pharmazeutische Industrie, Kosmetika

3.1 Korrosionsschutz durch Zink

In vielen Anwendungen ist verzinkter Stahl heute nicht mehr wegzudenken. Als Werkstoff für Autokarosserien, Brücken oder Gebäudearchitektur hat er eine lange Tradition und ist in Bezug auf seine Wirtschaftlichkeit und seine mechanischen und physikalischen Eigenschaften häufig unschlagbar. Die Lebensdauer von Stahlkonstruktionen hängt entscheidend vom Korrosionsschutz ab. Die Feuerverzinkung ist ein hochwertiges, langlebiges und damit wirtschaftliches Schutzsystem. Durch thermisches Spritzverzinken lassen sich komplexe, auch dünnwandige Bauteile ohne thermische Belastungen verzugfrei vor Korrosion schützen. Der Erhalt eines optimalen Korrosionsschutzes kann durch Flamm- oder Lichtbogenspritzen mit Zink und Zinklegierungen auch an großen, bereits montierten Stahlkonstruktionen, dauerhaft gewährleistet werden. Seine schützende Wirkung entfaltet Zink sowohl aktiv als auch passiv: Neben der physikalischen Trennschicht, die Zink zwischen Stahl und der korrosiven Umgebung bildet, sind es die elektrochemischen Eigenschaften des Zinks, die bewirken, dass auch bei einer mechanischen Verletzung der Schutzschicht der Stahl nicht rostet. Das Ergebnis: Es kommt zum so genannten „Selbsteilungseffekt“ der Schutzschicht.

Ob spritz- oder feuerverzinkte Stahlkonstruktion in Architektur und Brückenbau, Zinkdach oder -fassade, ob Signal und Sicherheitsanlage im Verkehrswesen oder die bandverzinkte Karosserie eines hochwertigen Automobils: Immer dann, wenn wertvolle „Anlagen“ vor Korrosion zu schützen sind, ist der Einsatz von Zink unumgänglich. Seine lebensverlängernden Eigenschaften bewahren uns vor wirtschaftlichem Schaden. Fast die Hälfte der jährlich gewonnenen über 7 Mio. t Zink wird als Korrosionsschutz für Stahl verwendet. Nach aktuellen schwedischen Schätzungen führt der Einsatz von verzinktem Stahl in Schweden zu jährlichen Energieeinsparungen, die der Jahreskapazität eines Atomkraftwerkes entsprechen. Diese Einsparungen werden möglich, weil verzinkter Stahl nicht rostet und daher weniger Stahlkonstruktionen frühzeitig ersetzt werden müssen. Im Jahr 2001 wurden in Deutschland rund 1,6 Mio. t Stahl verzinkt /2/.

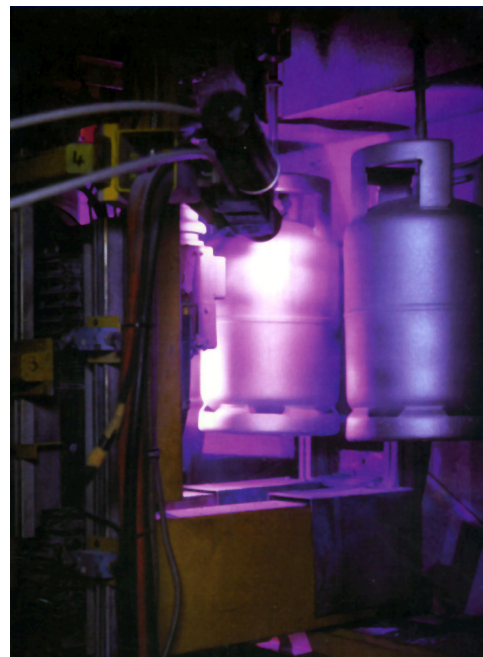


Bild 2: Verzinken von Stahlrohren [Institut Feuerverzinken], thermisches Spritzverzinken von Gasflaschen

3.2 Zink in der Architektur

Seit mehr als 200 Jahren wird Zink traditionell in den Bereichen Dachdeckung, Fassade und Dachentwässerung eingesetzt. Bei den Architekten unserer Zeit erfreut sich der Einsatz von Zinkblech, so genanntem Titan- oder Bauzink zunehmender Beliebtheit. Die Verwendung von Zink ist heute ein bezeichnender Bestandteil moderner Architektur. Mit Zink werden Meilensteine des modernen Bauens gesetzt. Ob das Vitra-Stuhlmuseum von Frank O. Gehry, das Bonnefantenmuseum von Aldo Rossi oder das jüdische Museum von Daniel Libeskind: Zink ist prägender und langlebiger Bestandteil dieser großartigen Architektur. Wichtige Argumente für den Einsatz von Zink in der modernen Architektur

sind eine lange Lebensdauer, Wartungsfreiheit und ästhetische Aspekte: Zink setzt Akzente, z.B. in der Dachdeckung, der Fassadenverkleidung oder der Dachentwässerung, aber auch als Gaube, Erker oder Kaminverkleidung. Doch nicht nur spektakuläre Neubauten profitieren von den Materialeigenschaften des Werkstoffs. Auch bei der Renovierung klassischer Gebäude des 18. und 19. Jahrhunderts ist Zink der Werkstoff erster Wahl.



Bild 3: Jüdisches Museum in Berlin, ausgezeichnet mit dem Deutschen Architekturpreis 1999
[Fa. Rheinzink GMBH Co KG]



Bild 4: Highway Telekommunikationszentrum, Korea, Baujahr 2001;
[Fa. Rheinzink GMBH Co KG]

3.3 Zinkdruckguss

Im Druckgussverfahren erzeugte Bauteile aus Zink werden in vielen Bereichen eingesetzt. Es gibt kaum einen Bereich des täglichen Lebens, in dem man nicht auf Bauteile aus Zinkdruckguss stößt. Meist sind diese unscheinbar und auf den ersten Blick nicht als solche erkennbar. Zinkdruckguss kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn hohe Festigkeit, Maßhaltigkeit und Korrosionsbeständigkeit gefragt sind.

Wegen der hohen Standzeiten der Druckgussformen (500 000 bis 2 000 000 Einpressvorgänge sind beim Zinkdruckguss durchaus üblich), der kurzen Zykluszeiten, die eine hohe Produktivität gewährleisten, und der geringen Nachbearbeitung, ist Zinkdruckguss vor allem für Großserien wirtschaftlich interessant. Der Selbstkostenpreis eines Druckgussteils wirkt sich deshalb beim Werkstoff Zink insbesondere bei Großserien ab 50 000 Abgüssen positiv d.h. Kosten reduzierend aus – auch im Vergleich mit anderen Produktionsverfahren wie Stanzen, Umformen oder Schmieden.

Bauteile aus Zinkdruckguss finden unter anderem Einsatz im Automobilbau, im Maschinen- und Apparatebau, in der Elektrotechnik und Elektronik sowie im Bauwesen.

4 Recycling von Zink

Die Weiterentwicklung von Werkstoffen und Werkstoffanwendungen, wie z.B. eines neuen Fahrzeugtyps im Automobilbau ist heute nicht mehr denkbar ohne gleichzeitig sicherzustellen, dass auch diese Neuerung recyclingfähig ist. Dabei sind technische und wirtschaftliche Aspekte ebenso relevant wie die Einhaltung des komplexen Regelwerks, das der Gesetzgeber vorgibt. Laut europäischer Richtlinie für Altfahrzeuge müssen alle nach Januar 2005 auf den Markt gebrachten Kraftfahrzeuge zu 85 Prozent wieder verwertbar sein. Ab 2015 soll diese Quote auf 95 Prozent erhöht werden. Kaum verwunderlich also, dass Kraftfahrzeughersteller für den Bau der Karosserie auf verzinkten Stahl zurückgreifen /8/ Die EU-Altautorichtlinie 2000/53/EG /4/ und die RoHS 2002/95/EG sowie im deutschen das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) /3/ sind Beispiele dafür, dass das Recycling längst nicht mehr nur für die Zinkhütten von Bedeutung ist. Die Zink abnehmende Industrie, die mit Ihren Produkten dicht am Endkunden angesiedelt ist, muss sich diesem Thema heute ebenfalls stellen. Die Unternehmen AUDI, BMW, DaimlerChrysler, FORD, Opel, Porsche, Volvo und VW haben vor dem Hintergrund des Recyclings von Altfahrzeugen gemeinsam eine zentrale Datenbank für ein internationales Materialdatensystem (IMDS) entwickelt. Über Internetzugänge finden die Zusammensetzungen der für den Automobilbau verwendeten Werkstoffe Eingang in die Datenbank /7/. Zinkdruckgussbauteile sind konform mit den in Altautorichtlinie, RoHS und IMDS enthaltenen Anforderungen.

Die Unternehmen der Zinkindustrie recyceln bereits heute große Mengen aus den unterschiedlichen Anwendungen. Druckgusschrotte machen etwa 16 % des aus Recyclingmaterialien gewonnenen Zinks aus (**Bild 5**).

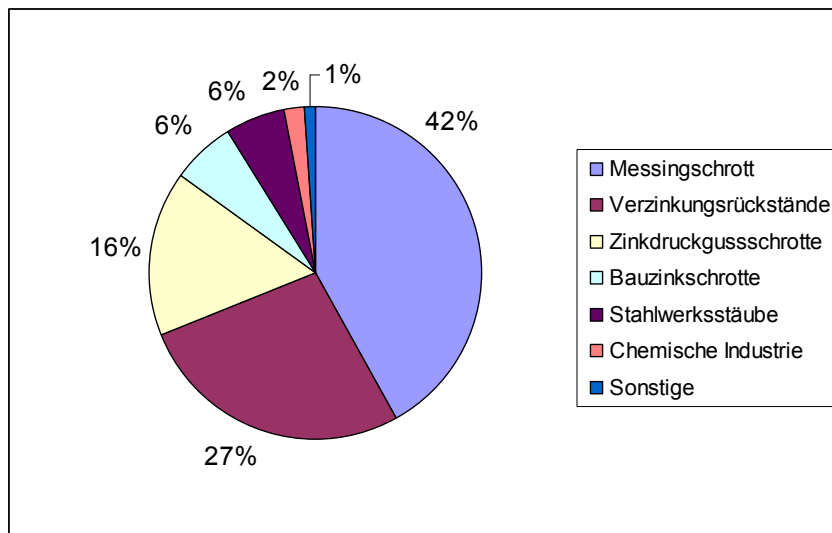


Bild 5: Hauptquellen für Zink aus Recyclingmaterialien /1/

Hohe, anwendungsspezifische Recyclingraten von über z.B. 95 % bei Bauzink zeichnen den Werkstoff Zink aus. Für die Gewinnung von Zink aus Zinkblechen nach der Nutzungsphase muss nur ein Bruchteil der Energie aufgewendet werden, die für die Gewinnung von Zink aus Erzen erforderlich ist /6/. Die Recyclingraten sind produktspezifisch unterschiedlich. In der Anwendung als Bedachungsmaterial hat Zink eine Lebensdauer von teilweise über 100 Jahren. Die Lebensdauer von Zinkdruckguss im Fahrzeugbau richtet sich nach der durchschnittlichen Haltbarkeit des gesamten Fahrzeugs und liegt damit heute bei etwa 10-15 Jahren. War es früher vor allem das „Durchrosten“ der Karosserie, die die Lebensdauer eines Autos begrenzte, so ist dies heute durch den weit verbreiteten Einsatz verzinkter Karosserien kein Thema mehr („Zink statt Rost“).

Die für das Recycling von Zink verwendete Technologie richtet sich vor allem nach dem Zinkgehalt dieser so genannten Sekundärrohstoffe. Hochzinkhaltige Schrotte wie Bauteile aus Zinkdruckguss werden eingeschmolzen und gereinigt, d.h. raffiniert. Entsprechend der genormten Legierungszusammensetzungen werden wieder Legierungen z.B. für den Zinkdruckguss daraus erzeugt. Verarbeitungsschrotte, die z.B. aus dem Entgraten der frisch gegossenen Bauteile stammen werden vielfach vor Ort wieder eingeschmolzen.

Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung bietet Zink nicht nur einen modernen Werkstoff mit innovativen Anwendungen, sondern auch einen geschlossenen Kreislauf von der Werkstoffherzeugung über die Anwendung bis hin zum Recycling ohne Qualitätsverlust.

5 Zink ist Innovativ

Zink ist als Metall noch vergleichsweise jung. Neben den typischen Einsatzgebieten Korrosionsschutz, Bauzink und Zinkdruckguss gibt es eine große Bandbreite moderner und innovativer Entwicklungen.

Ganz im Trend des Leichtbaus liegen z.B. die neuen Lotwerkstoffe auf der Basis von Zink und Aluminium, die für das Fügen von verzinkten Stählen mit geringer Wandstärke untereinander oder mit Aluminiumwerkstoffen entwickelt wurden. Die Vorteile liegen dabei klar auf der Hand. Aufgrund der niedrigen Schmelztemperaturen, die in Abhängigkeit von der Legierung bei Temperaturen $< 400\text{ °C}$ liegen, lassen sich dünne Materialien mit geringer Energie nahezu verzugsfrei verbinden. Die Verzinkung und damit der Korrosionsschutz des Stahlbleches im Bereich der Schweiß-/Lotnaht wird dabei nicht beschädigt und muss nicht nachgearbeitet werden.

Ein weiterer Fokus liegt bei der Entwicklung von Metallschaum aus Zink- oder Zinklegierungen. Ausgehend von einer Dichte die mit Stahl vergleichbar ist können Zinkschäume Dichten bis zu $0,6\text{ kg/cm}^3$ erreichen. Zinkschaum eignet sich dadurch hervorragend für jede Art von Leichtbaukonstruktion. Aufgrund der niedrigeren Schäumtemperaturen des Zinks lassen sich aus Zinkschaum Sandwichbauteile mit Aluminiumdeckblechen leicht herstellen. Anwendungen sind im Bereich des Chassis zu finden. Aufgrund der guten Verformungseigenschaften des Zinkschaums werden die Einsatzmöglichkeiten als Crashabsorber für den passiven Aufprallschutz im Karosseriebau untersucht. Auch für bewegte Teile im Werkzeugmaschinenbau lassen sich Zinkschäume zur Verringerung der Kräfte beim Beschleunigen und Bremsen optimal einsetzen. Laufende Untersuchungen beschäftigen sich mit den geeigneten Werkstoffkompositionen zur Zinkschaumherstellung und der Entwicklung der geeigneten Verfahrens- und Prozesstechnik zur Produktion des Halbzeuges.

6 Zink ist pures Leben

Das mit einem durchschnittlichen Gehalt von 70 mg/kg Zink in der Erdkruste enthaltene Zink zählt zu den 10 häufigsten in der Erdkruste vorkommenden, natürlichen Elementen. Alles Leben auf unserer Erde hat sich in Gegenwart dieses natürlich vorkommenden Zinks entwickelt. Durch den Einfluss von Wind und Wetter werden immer wieder kleine Zinkmengen aus Gesteinen, Böden und Sedimenten freigesetzt. In Oberflächenwasser, Luft und Boden stellt sich daher eine natürliche so genannte Hintergrundkonzentration von Zink ein. Es entsteht ein natürlicher Zinkkreislauf mit regional unterschiedlicher Konzentration, die von einer Vielzahl von Umgebungsfaktoren (Bodentyp, Wasserhärte, etc.) abhängig ist.

Im Laufe der Evolution haben sich alle Organismen optimal auf die in ihrem jeweiligen Lebensraum vorkommenden Zink-Konzentrationen eingestellt. Zink wird ständig von allen Lebewesen und Pflanzen aufgenommen und gemäß seiner Bioverfügbarkeit verwertet; eine Kenngröße, die die für Organismen tatsächlich verwertbare Zinkmenge beschreibt. Zink ist für Menschen, Tiere und Pflanzen ein essentielles Spurenelement, ohne das ein Leben nicht möglich wäre. Die Fähigkeit aller Lebensformen, die Aufnahme von Zink auf ein gesundes Maß zu begrenzen (Homöostase), bietet einen natürlichen Schutz. Überschüssiges Zink wird einfach ausgeschieden.

Da unser Körper nicht in der Lage ist, so genannte Mikronährstoffe (Vitamine, Mineralstoffe und Spurenelemente) zu produzieren, müssen wir diese mit der täglichen Nahrung aufnehmen. Die Wissenslücke: Zink ist nach Eisen das zweitwichtigste Spurenelement. Unser Organismus enthält ca. $2 - 3\text{ g}$ Zink. Obschon das nicht besonders spektakulär klingt, ist diese verschwindend geringe Menge für uns lebenswichtig. Denn Zink ist an fast allen wichtigen Stoffwechselvorgängen beteiligt. Kaum ein ande-

rer Mikronährstoff hat für unsere Gesundheit eine größere Bedeutung. Alle Organe, Blutzellen und über 200 Enzyme sind abhängig von Zink. Enzyme, die bei praktisch sämtlichen Reaktionen in den Zellen unseres Körpers die entscheidende Rolle spielen und für einen ordnungsgemäßen Ablauf des Stoffwechsels sorgen. Auch an anderen wichtigen Prozessen wie Wundheilung oder Wachstum ist Zink maßgeblich beteiligt.

Auf Grund veränderter Ernährungsgewohnheiten und der Zinkarmut der meisten Lebensmittel hat der „Zinkkonsum“ in Europa von 1988 bis 1995 um 17 - 19 % abgenommen. So lag die Zinkaufnahme bei Frauen bei nur 9,7 mg und bei Männern bei 12,1 mg. Die Folge: Zinkmangel. Ein Mangel, auf den unser Organismus mit Fehlregulationen und Krankheiten reagiert. Mit Müdigkeit, Abgeschlagenheit und Anfälligkeit für Erkältungen. Haut und Haare sehen fahl und kraftlos aus und die Wundheilung verzögert sich. Auch wenn die Höhe unseres täglichen Zinkbedarfs von unseren individuellen Lebensumständen abhängt, sollten Erwachsene täglich mindestens 12 - 15 mg zu sich nehmen. In besonderen Situationen - etwa in der Schwangerschaft, nach schweren Krankheiten oder bei Sporttreibenden - kann eine höhere Dosis notwendig werden. Beim Stillen kann der Tagesbedarf bis auf 22 mg steigen.

Der Zinkgehalt in unseren Nahrungsmitteln ist sehr unterschiedlich. Besonders zinkreich sind Fleisch, Innereien und Meeresfrüchte. Dabei ist zu bedenken, dass das in den Nahrungsmitteln enthaltene Zink nicht vollständig vom Organismus aufgenommen wird. Je nach Nahrungskonstellation werden nur 10 - 40 % ins Blut überführt. Häufig wird daher die zusätzliche Einnahme von Zinkpräparaten empfohlen, die Zinkverbindungen enthalten, die gut bioverfügbar sind. Eine vernünftige und ausgewogene Ernährung kann Zinkmangel verhindern.

7 Zusammenfassung

Ob als „treibende Kraft“ in der alkalischen Batterie, zum Korrosionsschutz von Stahl oder als Zinktablette zur Nahrungsergänzung, Zink ist im täglichen Leben immer präsent. Aufgrund der bestehenden, breiten Anwendungspalette und der Vielseitigkeit des Werkstoffes Zink ergeben sich nahezu täglich neue Aufgabenstellungen, die mit Hilfe von Zink und Zinklegierungen abgedeckt werden können. Intensive Forschung und Entwicklung stellen dazu optimierte Werkstoffe und Verfahren zur Verfügung. Ein firmenübergreifender Dialog zu Fragen zum Thema Zink ist über die Initiative Zink möglich.

8 Literatur

- /1/ „Zinc Guide 2004“, International zinc association, www.zincworld.org
- /2/ „Die Bedeutung von Zink“, Broschüre herausgegeben von der Initiative Zink in der Wirtschaftsvereinigung Metalle, Düsseldorf, www.initiative-zink.de
- /3/ „RoHS-konform? Handlungshilfe zu Kommunikation entlang der Lieferkette über die Einhaltung stoffbezogener Anforderungen aus der Richtlinie 2002/95/EG (RoHS)“, herausgegeben vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e.V., Frankfurt am Main, September 2005
- /4/ Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge, Anhang II
- /5/ „WVM Metallstatistik 2003“, herausgegeben von der Wirtschaftsvereinigung Metalle, Berlin, www.wvmetalle.de
- /6/ „Sachbilanz der Zinkerzeugung“, J. Krüger, et al., Herausgegeben von der Initiative Zink, Düsseldorf, 2002
- /7/ www.mdsystem.com
- /8/ „Zink hält mobil“, Initiative Zink, Düsseldorf, www.zink.de

