

## **Metall in der Architektur**

Nachhaltige Zukunft von Metall

## **Metal in architecture**

Sustainable future of metal

# **Bachelorarbeit**

Zur Erlangung des akademischen Grades

## **Bachelor of Science in Engineering (BSc)**

der Fachhochschule FH Campus Wien

Bachelorstudiengang: Architektur - Green Building

### **Vorgelegt von:**

Nicole Kainrath

### **Personenkennzeichen**

2110733028

### **Erstbegutachter:**

Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias Steiner

Eingereicht am:

06. 07. 2023



Eigenständigkeitserklärung:

Ich erkläre, dass die vorliegende Abschlussarbeit von mir selbst verfasst wurde und ich keine anderen als die angeführten Behelfe verwendet bzw. mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe (wie z.B. ChatGPT oder ähnlichen auf künstlicher Intelligenz basierenden Programmen) bedient habe. Ich versichere, dass diese Arbeit keine personenbezogenen Daten enthält und dass ich sämtliche urheber-, lizenz- sowie bildrechtliche Fragen im Zusammenhang mit der elektronischen Veröffentlichung dieser Arbeit geklärt habe, widrigenfalls werde ich die FH Campus Wien von Ersatzansprüchen Dritter schad- und klaglos halten. Ich versichere, dass ich diese Abschlussarbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass die von mir eingereichten Exemplare (ausgedruckt und elektronisch) identisch sind.

Datum: .....26.06.2023..... Unterschrift:.....

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters, positioned above the signature line.



## **Danksagung**

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Menschen bedanken, die mich im Verlauf der Bachelorarbeit unterstützt haben.

Zunächst möchte ich meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias Steiner danken, dessen Fachkenntnisse und Input für dieses Projekt von unschätzbarem Wert waren.

Ich möchte meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich unterstützt und immer wieder mit der richtigen Hilfestellung auf den richtigen Weg führten.

Besonderer Dank kommt meiner Mutter Anna Kainrath zu, die mir immer wieder Zuversicht gegeben hat, auch in schwierigen Phasen nicht aufzugeben und mein Ziel konsequent weiterzuverfolgen.

Darüber hinaus möchte ich meinem Partner Matthew Holmes für all seine Liebe und Unterstützung danken, der mir immer wieder die unerlässlichen kleinen Dinge des Alltags abgenommen hat, damit ich mich voll und ganz auf die Bachelorarbeit konzentrieren kann.

## Kurzfassung

Die Bachelorarbeit "Metall in der Architektur – Nachhaltige Zukunft von Metall" befasst sich mit den verschiedensten Metallen, welche im Bauwesen zu finden sind, nach ihrer Einteilung, ihren Eigenschaften und ihren genauen Einsatzgebieten. Die Metalle Stahl, Aluminium und Kupfer werden besonders im Hinblick auf den Herstellungsprozess, den Recyclingprozess und ihrer Nachhaltigkeit betrachtet, einschließlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Energieaufwands.

Metall in der Architektur bietet eine Vielzahl von Vorteilen, aber wie nachhaltig ist es wirklich? Es ist ein langlebiges Material, das recycelt werden kann und somit den Ressourcenverbrauch verringert. Es ist auch widerstandsfähig gegen Witterungseinflüsse und erfordert wenig Wartung, was zu geringeren Betriebskosten führt. Auf der anderen Seite ist die Primärherstellung von Metall mit extremen Umweltbelastungen verbunden. Regenwälder werden abgeholzt, Ressourcen werden verbraucht und Abfallprodukte verschmutzen und vergiften die Umgebung rund um die Metallraffinerien.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Nachhaltigkeit von Metall in der Architektur von verschiedenen Faktoren abhängt, einschließlich des Herstellungsprozesses, der Materialwahl und des Lebenszyklus der Struktur. Durch die Berücksichtigung von Umweltaspekten und die Anwendung nachhaltiger Praktiken kann Metall in der Architektur eine umweltfreundliche Option sein.

## **Abstract**

The bachelor's thesis "Metal in architecture – Sustainable future of metal" deals with various metals found in the construction industry, their classification, properties, and specific areas of application. The metals steel, aluminium, and copper are particularly examined in terms of their manufacturing process, recycling process and sustainability, including CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption.

Metal in architecture offers a variety of advantages, but how sustainable is it really? It is a durable material that can be recycled, thus reducing resource consumption. It is also resistant to weathering and requires little maintenance, leading to lower operating costs. On the other hand, the primary production of metal is associated with significant environmental impacts. Rainforests are deforested, resources are depleted, and waste products pollute and poison the surroundings of metal refineries.

It is important to note, that the sustainability of metal in architecture depends on various factors, including the manufacturing process, material selection, and the life cycle of the structure. By considering environmental aspects and implementing sustainable practices, metal in architecture can be an environmentally friendly option.

## Abkürzungsverzeichnis

CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
GJ	Gigajoule
GJL	G = Gusswerkstoff, J = Eisen (Iron) und L = lamellar Graphit
GJMW	G = Gusswerkstoff, J = Eisen (Iron), M = Temperguss (malleable cast iron) und W = Weiß (White)
GJMB	G = Gusswerkstoff, J = Eisen (Iron), M = Temperguss (malleable cast iron) und W = Schwarz (Black)
GJS	G = Gusswerkstoff, J = Eisen (Iron) und S = Kugelgraphit (speroidal graphite)
GJV	G = Gusswerkstoff, J = Eisen (Iron) und V = vermicularer Graphit
MJ	Megajoule

## Schlüsselbegriffe

Abstichgewicht	Tapping weight
Duktil	Ductile
Güteklasse	Quality grade
Koks	Coke
Korrosion	Corrosion
Legierung	Alloy
Patina	Patina
Schlacke	Cinder
Vorbewittern	Preweather

# Inhaltsverzeichnis

<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IV</b>
<b>SCHLÜSSELBEGRIFFE</b> .....	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. EINTEILUNG VON METALLEN</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1. Eisenwerkstoffe</b> .....	<b>9</b>
1.1.1. Einteilung nach Kohlenstoffgehalt .....	9
1.1.2. Einteilung von Stahl nach chemischer Zusammensetzung .....	9
1.1.3. Einteilung von Stahl nach Güteklassen .....	10
1.1.4. Gusseisen .....	10
1.1.5. Grauguss (GJL) .....	10
1.1.6. Sphäroguss (GJS) .....	11
1.1.7. Vermiculargraphit (GJV) .....	12
1.1.8. Temperguss (GJMW/GJMB) .....	12
<b>1.2. Nichteisenmetalle</b> .....	<b>12</b>
1.2.1. Schwermetalle .....	13
1.2.2. Leichtmetalle .....	13
<b>2. METALLE UND DEREN EINSATZGEBIETE IM BAU</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1. Stahl</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2. Aluminium</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3. Chrom</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4. Kupfer</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5. Titan</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6. Zink</b> .....	<b>20</b>
<b>2.7. Titanzink</b> .....	<b>20</b>
<b>2.8. Zinn</b> .....	<b>21</b>
<b>3. HERSTELLUNG VON METALLEN + ENERGIEAUFWAND</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1. Stahl</b> .....	<b>22</b>
3.1.1. Hochofen .....	23
3.1.2. Elektrolichtbogenofen .....	24
3.1.3. Energieaufwand und CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	25

<b>3.2. Aluminium</b> .....	<b>27</b>
3.2.1. Energieaufwand und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	30
<b>3.3. Kupfer</b> .....	<b>31</b>
3.3.1. Energieaufwand und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	32
<b>4. RECYCLE &amp; WIEDERVERWENDUNG + ENERGIEAUFWAND</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1. Stahl</b> .....	<b>33</b>
4.1.1. Energieaufwand und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	35
<b>4.2. Aluminium</b> .....	<b>35</b>
4.2.1. Energieaufwand und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	36
<b>4.3. Kupfer</b> .....	<b>37</b>
4.3.1. Energieaufwand und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	39
<b>5. NACHHALTIGKEITSASPEKTE</b> .....	<b>39</b>
5.1.1. Kreislaufwirtschaft.....	39
5.1.2. Taxonomie .....	40
<b>6. RESÜMEE</b> .....	<b>41</b>
<b>QUELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>42</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>50</b>
<b>ANHANG</b> .....	<b>51</b>

# 1. Einteilung von Metallen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie man Metalle kategorisieren kann. Durch diese Einteilungen bekommt man eine klare Vorstellung von den jeweiligen Eigenschaften und Verwendungsbereichen, in denen Metalle vorkommen können.

Ein Aspekt ist das Gewicht der Metalle, das auf ihrer Dichte basiert. Hier gibt es Leichtmetalle wie Aluminium und Magnesium, die trotz ihrer Stärke eine geringere Dichte aufweisen. Im Gegensatz dazu stehen Schwermetalle wie Blei und Gold, die durch eine höhere Dichte charakterisiert sind.

Eine weitere Unterscheidung basiert auf der Reaktivität und chemischen Natur. Hier unterscheidet man zwischen edlen und unedlen Metallen. Edelmetalle, zu denen beispielsweise Edelstahl und Neusilber gehören, sind chemisch weniger reaktiv, wodurch sie Korrosion besser widerstehen als unedle Metalle. Diese korrosionsbeständige Eigenschaft macht sie besonders wertvoll für viele Anwendungen, insbesondere in Bereichen, in denen Korrosion ein Problem darstellen könnte.

Eine andere Art, wie man Metalle einteilen kann, ist durch die Anordnung ihrer Atome, auch bekannt als Kristallstruktur. Die Atome in einem Metall können sich auf verschiedene Arten anordnen, was dann ihre Form bestimmt. Einige Atome sind wie Würfel angeordnet, manche sind enger beieinander und andere formen eine sechseckige Struktur. Wie die Atome angeordnet sind, kann die Eigenschaften des Metalls verändern und bestimmt, wie man sie verwenden kann.

Ein weiterer Aspekt ist die Anwendung der Metalle. Kupfer und Aluminium finden aufgrund ihrer guten Leitfähigkeit Anwendung in der Elektronik, aber auch in der Dachdeckung in Form von Blechen. Eisen und Stahl hingegen sind aufgrund ihrer Stärke und Haltbarkeit häufig in der Bauindustrie und im Maschinenbau zu finden.

Metalle können auch nach ihrer Herkunft eingeteilt werden. Einige Metalle wie Gold, Silber und Kupfer treten natürlich in der Umwelt auf. Andere, wie Aluminium und Stahl, werden künstlich aus mineralischen Erzen gewonnen. Unabhängig von ihrer Herkunft müssen die meisten Metalle aufbereitet werden, damit sie auch einwandfrei in der Bauindustrie verwendet werden können.

Metalle werden aufgrund all dieser Kategorisierungen in zwei Hauptgruppen unterteilt. Diese heißen Eisenwerkstoffe zu denen Stähle und Gusseisen gehören, und Nichteisenmetalle, welche den Schwer- und Leichtmetallen zugeordnet sind.

## **1.1. Eisenwerkstoffe**

Eisenwerkstoffe sind Werkstoffe, wo das Basiselement Eisen ist, oder bei einer Metalllegierung der Prozentanteil von Eisen höher ist als jedes andere Element. Sie bestehen aus Stählen und Gusseisen, und werden aus den verschiedensten Gründen in Kategorien eingeteilt. Einige dieser Gründe sind der Kohlenstoffgehalt, die chemische Zusammensetzung und die Güteklasse. Diese Klassifizierungsmethoden werden hauptsächlich bei Stahl angewendet. Gusseisen wird von der Form seines Kohlenstoffes unterschieden.<sup>1</sup>

### **1.1.1. Einteilung nach Kohlenstoffgehalt**

Die Einteilung nach dem Kohlenstoffgehalt ist die wichtigste Methode, wie man Eisenwerkstoffe beziehungsweise Gusseisen und Stahl voneinander unterscheidet. Hat eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung einen Kohlenstoffgehalt zwischen 0,002 % und 2,06 %, dann wird diese als Stahl bezeichnet.

Ist der Kohlenstoffgehalt höher als 2,06 %, spricht man von Gusseisen. Stähle werden so aufgrund ihres Kohlenstoffgehalts in Baustähle (0,1 - 0,5 %), Vergütungsstähle (0,25 - 0,8 %) und Werkzeugstähle (0,5 - 2,06 %) weiter eingeteilt.<sup>2</sup>

### **1.1.2. Einteilung von Stahl nach chemischer Zusammensetzung**

Bei der chemischen Zusammensetzung wird in unlegierte und legierte Stähle unterschieden. Ein Stahl gilt dann als legiert, wenn der Masseanteil des Legierungselements hoch genug ist und einen bestimmten Grenzgehalt überschreitet. Legierte Stähle werden zusätzlich auch noch in niedrig- und hochlegierte Stähle unterteilt.

---

<sup>1</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/56-arten-der-eisenwerkstoffe> [letzter Zugriff: 24.04.2023]

<sup>2</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/56-arten-der-eisenwerkstoffe> [letzter Zugriff: 24.04.2023]

Dabei liegen niedriglegierte Stähle bei einem Prozentanteil von unter 5 % und hochlegierte Stähle über 5 %.<sup>3</sup>

### **1.1.3. Einteilung von Stahl nach Güteklassen**

Stahl wird in drei Hauptgüteklassen eingeteilt: Grundstähle, Qualitätsstähle und Edelstähle. Grundstähle sind normale unlegierte Stähle ohne zusätzliche Anforderungen und Gebrauchseigenschaften. An Qualitätsstähle werden höhere Ansprüche als bei Grundstählen gestellt. Sie können legiert, aber auch unlegiert sein. Einige der Anforderungen können Verformbarkeit, Schweißbarkeit oder auch Spröbruchempfindlichkeit sein. Diese Anforderungen werden meist mit Legierungen bezweckt. Edelstähle sind legierte, aber auch unlegierte Stähle, die einen hohen Reinheitsgrad besitzen und deren chemische Zusammensetzung besonders eng toleriert ist. Auch Edelstähle können rosten.<sup>4</sup>

### **1.1.4. Gusseisen**

Gusseisen ist eine Legierung aus Eisen mit einem hohen Kohlenstoffanteil von mindestens 2 %. Zusätzlich enthält es auch weitere Legierungen, insbesondere Silizium.<sup>5</sup> Da Gusseisen im Vergleich zu Stahl hart und spröde ist, was an dem hohen Kohlenstoffgehalt liegt, kann es daher nicht geschmiedet werden, sondern nur in Form gegossen.<sup>6</sup> Gusseisen wird in Lamellengraphit (Grauguss), Kugelgraphit (Sphäroguss), Vermiculargraphit und Temperguss eingeteilt. Diese Unterteilung entsteht durch die Form der Lamellen.<sup>7</sup>

### **1.1.5. Grauguss (GJL)**

Grauguss hat einen Graphitanteil von 2,6 - 3,6 %. Er hat einen streifenförmigen Graphit, wovon auch der Name Lamellengraphit kommt. Grauguss ist der am häufigsten Verwendete der drei Gussarten. Mit ihm lassen sich auch kompliziertere

---

<sup>3</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/56-arten-der-eisenwerkstoffe> [letzter Zugriff: 24.04.2023]

<sup>4</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/56-arten-der-eisenwerkstoffe> [letzter Zugriff: 24.04.2023]

<sup>5</sup> <https://www.chemie.de/lexikon/Gusseisen.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

<sup>6</sup> <https://www.ofen.de/wissenscenter/infothek/kamin-wissen/gusseisen-welche-eigenschaften-hat-dieses-material> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

<sup>7</sup> <https://www.silbitz-group.com/de/gusseisen.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

Formen herstellen.<sup>8</sup> Für seine Herstellung wird Einsatzmaterial aus der Kreislaufwirtschaft verwendet, das aus Schrott, unlegiertem Stahlschrott oder paketierte Spänen besteht.<sup>9</sup>

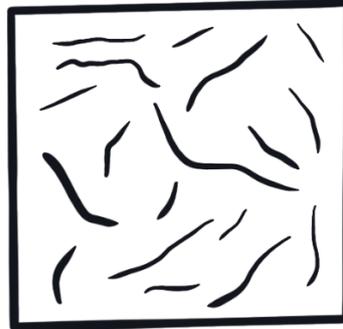


Abbildung 1: groblamellar GJL

#### 1.1.6. Sphäroguss (GJS)

Sphäroguss hat einen Graphitanteil von 3,2 - 4 %. Er wird aufgrund seines kugelförmigen Graphits auch Kugelgraphit genannt. Er hat Eigenschaften, die dem Stahl ähneln.<sup>10</sup> Für die Herstellung wird Sonderroheisen und sortierter Stahlschrott ohne Legierungselemente und frei von Öl sowie Rost verwendet.<sup>11</sup>

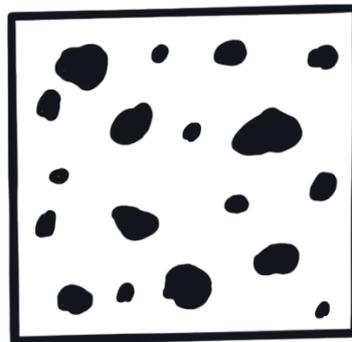


Abbildung 2: kugelförmig GJS

---

<sup>8</sup> Hartl, Roland: Eisen-Gusswerkstoffe. Wien: Mollardgasse Berufsschule für Metalltechnik, Glasbautechnik und Technische Zeichner. Skriptum. SS 2018/19. S. 2.

<sup>9</sup> Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. S. 180.

<sup>10</sup> Hartl, Roland: Eisen-Gusswerkstoffe. Wien: Mollardgasse Berufsschule für Metalltechnik, Glasbautechnik und Technische Zeichner. Skriptum. SS 2018/19. S. 2.

<sup>11</sup> Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. S. 182.

### 1.1.7. Vermiculargraphit (GJV)

Diese Art von Gusseisen hat einen Graphitgehalt von 3 - 5 %. Vermiculargraphit hat einen wurmförmigen Graphit, wird für wärmebeanspruchte Teile verwendet<sup>12</sup> und ist eine Zwischenform von Lamelle zur Kugel. Die Herstellung erfolgt ähnlich wie die von Sphäroguss.<sup>13</sup>

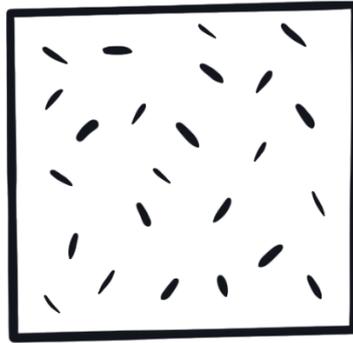


Abbildung 3: wurmförmig GJV

### 1.1.8. Temperguss (GJMW/GJMB)

Temperguss wird in zwei Arten unterteilt, weißer (GJMW) und schwarzer Temperguss (GJMB). Weißer Temperguss hat einen Graphitgehalt von 0,5 - 1,7 %, wobei schwarzer Temperguss einen Anteil von 2,0 - 2,9 % hat.<sup>14</sup> Die zwei Arten unterscheiden sich in der Analyse, Wärmebehandlung und dem entstehenden Gefüge.<sup>15</sup>

## 1.2. Nichteisenmetalle

Sogenannte NE-Metalle sind Metalle, die kein Eisen sind oder Metalllegierungen, bei denen Eisen das Hauptelement ist. Dabei darf der Reineisenanteil nicht über 50 % liegen. Nichteisenmetalle werden auch als Buntmetall bezeichnet, da die häufigsten Metalle in dieser Kategorie farbig sind wie zum Beispiel Kupfer, Messing,

---

<sup>12</sup> Hartl, Roland: Eisen-Gusswerkstoffe. Wien: Mollardgasse Berufsschule für Metalltechnik, Glasbautechnik und Technische Zeichner. Skriptum. SS 2018/19. S. 2.

<sup>13</sup> Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. S.187.

<sup>14</sup> Hartl, Roland: Eisen-Gusswerkstoffe. Wien: Mollardgasse Berufsschule für Metalltechnik, Glasbautechnik und Technische Zeichner. Skriptum. SS 2018/19. S. 2.

<sup>15</sup> Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. S. 184.

Zink und Bronze. Nichteisenmetalle werden in zwei weitere Kategorien unterteilt: Schwermetalle und Leichtmetalle.<sup>16</sup>

### **1.2.1. Schwermetalle**

Zu den Schwermetallen gehören alle Metalle, deren Dichte größer als 5 kg/dm<sup>3</sup> ist. Schwermetalle sind chemische Elemente und natürliche Bestandteile in der Erdkruste, die aufgrund ihrer hohen Dichte und Toxizität als schädlich für die Umwelt und die Gesundheit von Menschen und Tieren angesehen werden.<sup>17</sup> Schwermetalle sind aber auch Bestandteile unserer Nahrung, wie zum Beispiel Zink, Eisen, Mangan und Kupfer. Obwohl Kupfer, Zink, Nickel, Silber und Gold technisch gesehen auch Schwermetalle sind, werden sie oft als „nicht-toxische Schwermetalle“ bezeichnet, da sie im Allgemeinen weniger toxisch sind als andere Schwermetalle wie Quecksilber, Blei, Cadmium und Arsen.<sup>18</sup>

### **1.2.2. Leichtmetalle**

Leichtmetalle sind allgemein alle Metalle und Legierungen deren Dichte niedriger als 5 kg/dm<sup>3</sup> ist. Sie sind meist sehr reaktiv, sodass sie nicht in Kontakt mit Luft und Wasser gebracht werden dürfen.<sup>19</sup> Im Falle eines Brandes von Leichtmetallen darf man kein Wasser für die Löschversuche verwenden, da sie mit dem im Wassermolekül enthaltenen Sauerstoff unter Bildung einer Lauge und Wasserstoff sehr stark reagieren können. Durch den Löschversuch mit Wasser kann es passieren, dass der dadurch freiwerdende Wasserstoff sich entzünden kann und es zu einer Explosion kommt. Magnesium kann auch ohne Sauerstoff weiter brennen.<sup>20</sup>

---

<sup>16</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/nichteisenmetalle> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

<sup>17</sup> <https://www.chemie.de/lexikon/Schwermetalle.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

<sup>18</sup>

[https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/01\\_Lebensmittel/02\\_UnerwunschteStoffeOrganismen/07\\_Schwermetalle/Im\\_schwermetalle\\_node.html](https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/01_Lebensmittel/02_UnerwunschteStoffeOrganismen/07_Schwermetalle/Im_schwermetalle_node.html) [letzter Zugriff: 20.05.2023]

<sup>19</sup> <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Leichtmetalle> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

<sup>20</sup> <https://www.chemie.de/lexikon/Leichtmetalle.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

## 2. Metalle und deren Einsatzgebiete im Bau

Metalle spielen im Bauwesen eine wichtige Rolle und werden in vielfältigen Anwendungen eingesetzt. Ihre Eigenschaften machen sie zu einem unverzichtbaren Baustoff, der sowohl Stabilität als auch ästhetisches Design gewährleistet. In diesem Kapitel gehen wir auf die verschiedenen Metalle ein, die im Bauwesen verwendet werden. Von traditionellen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium bis hin zu innovativen Verbundmaterialien. Metall liefert eine Vielzahl von Lösungen für die Herausforderungen der Baubranche.

### 2.1. Stahl

Dies ist das am häufigsten verwendete Metall im Bauwesen. Die Dichte von Stahl beziehungsweise Eisen beträgt um die  $7.850 \text{ kg/m}^3$  und hat einen Schmelzpunkt von  $1530 \text{ °C}$ , was je nach Legierungsanteilen variieren kann.

Stahl kann durch Anpassung von Legierungen für die unterschiedlichsten Zwecke angewendet werden. Das kann man mit Legierungen bezwecken, womit man dem Stahl zum Beispiel duktile, harte oder spröde Eigenschaften verleiht. Ebenso ein Vorteil ist das wiederholte Recyceln.<sup>21</sup> Er ist zu 100 % recycelbar, wobei bei der nachhaltigeren Herstellung mit dem Elektrolichtofen dennoch Rohmaterial dazugegeben werden muss, um die richtige Stahlgüte zu erreichen.<sup>22</sup> Zu den Nachteilen gehört, dass Stahl in der Herstellung sehr energieintensiv und teurer ist als einige andere Metalle, dies wirkt sich auch auf die Kosten vom Bau von Stahlkonstruktionen aus. Brandschutz ist ein weiterer Nachteil von Stahl, da er Wärme von einem brennenden Teil des Gebäudes schnell überträgt. Aus diesem Grund müssen Stahlrahmen feuerfest sein. Die Instandhaltung von Stahl ist auch eine kostenintensive Maßnahme. In einigen Bereichen des Bauwesens ist Stahl der Umwelt komplett ausgesetzt, wie zum Beispiel im Brückenbau oder bei Türmen. Dort kommt es zu Korrosionen, da sie ständig dem Wasser oder der Luft ausgesetzt sind. Aus diesem Grund werden sie regelmäßig mit einem Korrosionsschutz

---

<sup>21</sup> [https://www.chemie.de/lexikon/Stahl.html#Einteilung\\_nach\\_Anwendungsgebieten](https://www.chemie.de/lexikon/Stahl.html#Einteilung_nach_Anwendungsgebieten) [letzter Zugriff: 09.06.2023]

<sup>22</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 16.

angestrichen.<sup>23</sup> Die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen von der Stahlindustrie sind 24 %, wodurch die Aufgabe die Emissionen in diesem Sektor zu senken sehr wichtig ist.<sup>24</sup>

Die vielseitigen Eigenschaften von Stahl ermöglichen eine ebenso vielseitige Verwendung im Bauwesen. Im Bauwesen findet er Anwendung im Brückenbau, Hochbau, Stahlbetonbau, Dachdeckungen, für Stahlseile, Fassadenverkleidung und vieles mehr.<sup>25</sup>

## 2.2. Aluminium

Aluminium ist mit einer Dichte von 2.710 kg/m<sup>3</sup> ein Leichtmetall und das dritthäufigste auf der Erde vorkommende Element in der Erdkruste.<sup>26</sup> Aluminium wurde erstmals 1821 in der Ortschaft Les Baux in Frankreich abgebaut. Davon kommt auch der Name für das Aluminiumerz, Bauxit.<sup>27</sup> Aluminium tritt aber auch in Form von Aluminiumsilikat auf, das Bestandteil von Ton, Gneis und Granit ist.<sup>28</sup> Aluminium macht 6 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus.<sup>29</sup>

Die guten Eigenschaften des Werkstoffs Aluminium liegen darin, dass es sich um ein leichtes Metall handelt, das aber trotzdem über eine hohe Festigkeit verfügt. Ebenso ist er beständig gegen UV-Strahlung und Korrosion, hat eine gute Wärmeleitfähigkeit, ist dampfdicht und ist recycelbar, was ihn in dieser Ansicht zu einem nachhaltigen Metall macht. Jedoch gibt es auch schlechte Materialeigenschaften. Zum Beispiel hat er eine hohe Wärmeausdehnung, ist schlecht löt- und

---

<sup>23</sup> <https://skyciv.com/de/technical/steel-vs-timber-vs-concrete/> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

<sup>24</sup> <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/klimaneutrale-industrie-zement-stahl-chemie> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

<sup>25</sup> <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/marktfuehrer-metall-eisen-stahl/> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

<sup>26</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 108.

<sup>27</sup> Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. S. 194.

<sup>28</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 108.

<sup>29</sup> <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/klimaneutrale-industrie-zement-stahl-chemie> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

schweißbar, verformt bei übermäßiger mechanischer Beanspruchung und hat eine sehr energieaufwendige Herstellung.

Im Bauwesen ist Aluminium das am häufigsten verwendete Leichtmetall. Die größte Verwendung findet Aluminium bei Spenglerarbeiten für Profile, Bleche, Dach-eindeckung, Dachrinnen, Schneefanggitter und noch viel mehr.<sup>30</sup> Auf dem Dach montiert, bildet das Material an der Luft eine natürliche Patina, also eine korrosionsbeständige Schicht, die es schützt. Aluminium ist deshalb so beliebt, weil es ein leichtes Metall ist und die Dachhaut dadurch ein geringes Gewicht hat.<sup>31</sup> Weitere Einsatzgebiete im Bauwesen sind Fenster- und Türprofile (gedämmt oder ungedämmt, auch in Kombination mit Holz), Technischer Ausbau (Lüftungsrohre, Gasrohre), Aluminiumfolie (als diffusionsdichte Schicht bei Innendämmungen oder Dächern), Elektrotechnik (aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit in nahezu allen Bereichen), Fassaden (Profile und Verkleidung) und Innenausbau (Profile für Gipskartonständerwände, Möbel).<sup>32</sup>

### **2.3. Chrom**

Chrom ist aufgrund seiner hohen Dichte von  $7.140 \text{ kg/m}^3$  ein Schwermetall und hat einen sehr hohen Schmelzpunkt von  $1.907 \text{ °C}$ . Mit den verschiedensten Verbindungen kann Chrom mit unterschiedlichen Farben auftreten.

In der Natur kommt Chrom in gediegener Form - sehr rein, nicht mit anderen Elementen vermischt - und nur sehr selten vor. Das Metall kommt am häufigsten in Form von Chromit oder Chromeisenstein vor, der zu 50 % aus Chrom besteht. Nach dem Abbau wird das Chromit von taubem Gestein befreit. Zum Schluss entsteht nach mehreren chemischen Reaktionen Chrom. Chrom kann nicht wie Stahl und Blei durch Reduktion gewonnen werden.

---

<sup>30</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 108.

<sup>31</sup> <https://www.wohnet.at/bauen/rohbau/spenglermaterial-23789> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

<sup>32</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 108.

Gute Materialeigenschaften sind die Beständigkeit gegen Korrosion und chemische Einflüsse und es ist das härteste Metall aller Elemente.<sup>33</sup> Die Härte kann bei geringen Verunreinigungen mit Wasserstoff oder Sauerstoff noch ansteigen, wodurch es aber sehr spröde wird, was einer der Nachteile ist.<sup>34</sup> Zu den weiteren Nachteilen gehört, dass Chrom sehr selten und schlecht schweißbar ist.

Durch seine Beständigkeit wird Chrom in der Bautechnik größtenteils als Legierung für Metallteile verwendet. Zu diesen Metallteilen gehören Schrauben, Sanitärgegenstände (Rohre, Geruchsverschluss, Armaturen), Türbänder oder Stahlträger. Das Auftragen der Legierung geschieht durch Galvanisierung. Eine Chromlegierung hilft bei der Korrosionsbeständigkeit, Hitzebeständigkeit und das zu legierende Metall härter.<sup>35</sup> Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Mauerwerkstroekenlegung. Beim Blecheinschlagverfahren werden Chrombleche als Sperrschicht verwendet.<sup>36</sup>

## 2.4. Kupfer

Kupfer ist aufgrund seiner Dichte von  $8.920 \text{ kg/m}^3$  ein Schwermetall, aber dennoch ein relativ weiches, gut formbares und zähes Halbedelmetall. Es ist außerdem ein sehr guter Wärme- und Stromleiter.

Kupfer wurde 9000 v. Chr. von der Menschheit entdeckt. Weil es mit einfachen Werkzeugen bearbeitbar ist, war es in den ältesten bekannten Kulturen weit verbreitet. Das Metall kommt in der Natur nur selten in gediegener Form vor, eher aber in Kupfererzen. Das Kupfer wird durch den Abbau von Kupferstein gewonnen, der zunächst extrahiert wird. Der extrahierte Kupferstein wird geröstet und durch Zugabe von Zuschlagstoffen werden die Eisenoxide entfernt. Die entstandene

---

<sup>33</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 109.

<sup>34</sup> <https://www.seilnacht.com/Lexikon/24Chrom.htm> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

<sup>35</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/38-einfluss-legierungselemente-stahl> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

<sup>36</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 109.

Schlacke wird abgegossen, wodurch Rohkupfer entsteht, das für die weitere Verarbeitung bereit ist.<sup>37</sup>

Die Oberfläche von Kupfer korrodiert, wodurch sich eine grüne Patina bildet. Dadurch ist die darunterliegende Schicht geschützt. Weitere gute Materialeigenschaften sind zum Beispiel gute Wärmeleitfähigkeit, gut löt- und recycelbar. Zu den Nachteilen gehört, dass Kupfer ein natürliches Vorkommen ist, das durch den Abbau erschöpft wird, und dass es für viele Mikroorganismen bereits in geringen Mengen giftig ist.

Kupfer ist ein sehr haltbares Metall, da die Oxidation, die sich auf der Oberfläche bildet (Patina), eine witterungsbeständige, fest haftende Schutzschicht ist. Das Schwermetall kann man gut bearbeiten, ist jedoch im Vergleich zu den anderen Metallen sehr teuer. Das Kupfer kann man durch Walzen, Gießen, Ziehen, Prägen, Stauchen, Pressen, Drücken, Nieten, Falzen oder Kleben bearbeiten. Das Schwermetall kann man entweder mit Zinn weich löten oder mit Kupferphosphatlegierungen hartlöten. Die Oberfläche kann mit verschiedensten Anwendungen verändert werden, zum Beispiel gebeizt (mit verdünnter Schwefelsäure), gebrannt (mit Ammoniumsulfat), verzinkt, poliert, farblos lackiert, satiniert, patiniert, brüniert, oder wärmebehandelt. Alle diese Prozesse verändern die Oberfläche von Kupfer farblich, wodurch es auch für Fassaden- oder Innenraumgestaltung verwendet wird. Die meiste Verwendung von Kupfer findet sich bei Spenglerarbeiten (Profile, Bleche, Dacheindeckung, Dachrinnen, Schneefanggitter), Elektrotechnik (aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit in nahezu allen Bereichen) und Technischer Ausbau (Trinkwasserversorgung, Gasversorgung, Heizungstechnik).<sup>38</sup> Das Kupfer in Verbindung mit Wasser bildet stark giftige Kupfersalze, die verhindern, dass Moos auf der Dachdeckung oder in den Redenrinnen wächst. Das kann aber auch problematisch werden, wenn die giftigen Kupfersalze ins Abwasser gelangen.<sup>39</sup> Da kein Moos auf Kupfer wächst, entstehen keine Wartungskosten für das Entfernen solcher

---

<sup>37</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 109.

<sup>38</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 110.

<sup>39</sup> <https://www.steinrein.com/at/moos-auf-dem-dach/> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

Ablagerungen. Die Nutzdauer eines Kupferdachs liegt bei über 200 Jahren dank der Patina. Das ist mit Abstand die längste Nutzdauer jeglicher Dachdeckungen.<sup>40</sup>

## 2.5. Titan

Titan ist ein Übergangsmetall das leicht, dehnbar, korrosions- und temperaturbeständig ist. Im Vergleich zu seinem Gewicht hat Titan eine sehr hohe Festigkeit. Das Metall ist das härteste, technisch nutzbare Leichtmetall mit einer Dichte von 4.500 kg/m<sup>3</sup>.

Titan ist kein seltenes Metall, kommt in der Natur aber in der Erdkruste nur in Verbindung mit Sauerstoff vor. Entdeckt wurde es Ende des 18. Jahrhunderts. Erst 1831 gelang es der Menschheit aus dem Titaneisen das metallische Titan zu gewinnen. Durch Reduktion eines Titanchlorids durch Magnesium wird Titan erzeugt. Da dieser Vorgang sehr kompliziert ist, ist reines Titan 35-mal teurer als verbreitete Stahllegierungen und rund 200 - mal teurer als Rohstahl.

Vorteile von dem Leichtmetall ist sein geringes Gewicht, Korrosionsbeständigkeit und eine hohe Festigkeit. Zu den nicht so guten Eigenschaften zählen schlecht Wärmeleitfähigkeit, sehr komplizierter und kostspieliger Herstellungsprozess, verliert bei hohen Temperaturen an Elastizität und Schweißen ist nur mit Schutzgas möglich.<sup>41</sup>

Aufgrund der hohen Festigkeit bei der geringen Dichte von Titan, kommt er in Bereichen zum Einsatz, wo hohe Belastungen wirken, wo jedoch aber ein geringes Gewicht von der Konstruktion gefordert ist, wie zum Beispiel im Automobil- und Flugzeugbau. Im Bauwesen wird Titan in der Elektrotechnik für Kabellegierungen, im Tiefbau für Pfähle und Verankerungen, für Konstruktionselemente von Brücken und anderen Bauwerken, aber auch als Werkzeugwerkstoff verwendet.<sup>42</sup>

---

<sup>40</sup> <https://www.eccuro.com/artikel/720-kupferdach-eigenschaften-vorteile-und-kosten> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

<sup>41</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 110.

<sup>42</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 111.

## 2.6. Zink

Zink zählt aufgrund seiner Dichte von  $7140 \text{ kg/m}^3$  zu den Schwermetallen. Das Metall hat eine bläuliche bis weiße Farbe und ist ein sprödes Metall mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit. Zink wird am meisten für den Zinküberzug von Eisen- oder Stahlteilen sowie für Legierungen mit anderen Metallen verwendet.

Zink ist in der Erdkruste ein häufiges Metall, sogar häufiger als Kupfer oder Blei. Das Schwermetall kommt selten gediegen vor, eher in Erzen gebunden. Aus Zinksulfid wird durch Reduktion reines Zink hergestellt. Durch die Einwirkung von Luft und Wasser bildet sich auf der Oberfläche eine Schutzschicht (Patina), die die Oberfläche verfärbt und die Korrosionsbeständigkeit erhöht. Die Schutzschicht bildet sich über mehrere Monate oder Jahre und je nach Witterung läuft sie anders ab. Da dieser Prozess so lange dauert, wird Zink vorbewittert, sprich bereits fertig patiniert angeboten.

Vorteile von Zink sind Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Witterungsbeständigkeit, besonders langlebig, gut löt- und schweißbar. Zink ist aber auch sehr spröde, was ein Nachteil ist.<sup>43</sup>

Zink wird im Bauwesen bei Spenglerarbeiten in Form von Profilen, Blechen, Dachrinnen, Dacheindeckung und Schneefanggitter verwendet, aber auch als Korrosionsschutz und Oberflächenbehandlung von Stahlteilen und in der Elektrotechnik als Anode in galvanischen Zellen (Batterien).<sup>44</sup>

## 2.7. Titanzink

Titanzink ist wie der Name schon verrät eine Legierung aus Zink, einem geringen Anteil von 0,1 - 0,2 % an Titan und einem höheren Anteil an Kupfer. Es wird im geschmolzenen Zustand in Bleche zu unterschiedlichen Stärken gewalzt. Titanzink

---

<sup>43</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 111.

<sup>44</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 112.

ist komplett recycelbar<sup>45</sup>, wobei Dachrinnen aus Titanzink eine Recycling-Rate von 95 % haben.<sup>46</sup>

Gute Materialeigenschaften von Titanzink sind die weiche Oberfläche, die Biege- und Bearbeitbarkeit quer und parallel zur Walzrichtung, die hohe Festigkeit, die Korrosions- und Witterungsbeständigkeit sowie die Recyclingfähigkeit.<sup>47</sup>

Verwendet wird Titanzink für Dachdeckungen, Fassaden und für die Entwässerung. Titanzink wird in der Spenglerei dort eingesetzt, wo Zink beim Biegen um kleinste Radien brechen würde. Regenrinnen aus Titanzink haben eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten und sind relativ günstig, was es zu einem beliebten Material für Spenglerarbeiten macht. Nach einigen Monaten der Bewitterung kann man Zink-Dachrinnen in einer beliebigen Farbe streichen.<sup>48</sup>

## 2.8. Zinn

Zinn ist aufgrund seiner Dichte von 5.780 kg/m<sup>3</sup> bis 7.260 kg/m<sup>3</sup> ein Schwermetall. Die Farbe von Zinn ist silberweiß glänzend, und obwohl es eine sehr hohe Dichte hat, ist es ein weiches Schwermetall. Es hat einen sehr niedrigen Schmelzpunkt von 231,9 °C. Kälte hält das Metall nicht gut stand und ist nur gegen schwache Säuren beständig.

Zinn ist in der Erdkruste auffindbar. Das sogenannte Zinnerz wird durch verschiedene Verfahren angereichert, bis es dann reduziert wird, wodurch reines Zinn entsteht.

Vorteile sind, dass es sehr weich und eine geringe Wärmeausdehnung hat. Ein Nachteil von Zinn ist, dass es eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit hat.

Der wichtigste und größte Anwendungsbereich von dem Metall ist das Löten. Weichlot oder Lötzinn besteht aus Zinn und Blei, und wird fürs Löten von verzinkten

---

<sup>45</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 112.

<sup>46</sup> <https://www.hausbaumagazin.at/dachrinnen-vor-und-nachteile-der-verschiedenen-materialien/>  
[letzter Zugriff: 04.06.2023]

<sup>47</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 112.

<sup>48</sup> <https://www.hausbaumagazin.at/dachrinnen-vor-und-nachteile-der-verschiedenen-materialien/>  
[letzter Zugriff: 04.06.2023]

Eisenblechen, Zink- und Bleiblech verwendet. Hartlot besteht aus Kupferlegierungen.<sup>49</sup> Ebenso findet es Anwendung bei der Floatglas-Herstellung, wobei das geschmolzene Glas auf ein Bad aus flüssigem Zinn aufgebracht wird, wodurch das Glasstück gerade wird und langsam abkühlt. Da Zinn eine höhere Dichte hat als Glas, schwimmt das Glas ohne Problem auf dem geschmolzenen Metall wie auf einem Laufband.

### **3. Herstellung von Metallen + Energieaufwand**

Die Herstellung von Metallen spielt eine entscheidende Rolle für die Industrie aber auch für die Umwelt. Metalle sind in einer Vielzahl von Anwendungen unverzichtbar, sei es in der Automobilindustrie, im Bauwesen oder in der Elektronik. Die Gewinnung und Verarbeitung von diesem Werkstoff ist jedoch mit einem hohen Energieaufwand verbunden, der nicht nur finanzielle Kosten verursacht, sondern auch die Umwelt belastet. Insbesondere der CO<sub>2</sub>-Ausstoß während des Produktionsprozesses trägt zur globalen Erwärmung bei und stellt somit eine Herausforderung für die Nachhaltigkeit der Metallindustrie dar. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Energieaufwand und den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Metallen. Themen sind zum Beispiel die verschiedenen Verfahren zur Metallgewinnung für die jeweiligen Metalle, ihren spezifischen Energieanforderungen und den potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt.

#### **3.1. Stahl**

Stahl kann man auf zwei verschiedene Arten herstellen: mittels eines Hochofens mit Eisenerz und Koks oder mit einem Elektrolichtbogenofen, wo recycelter Stahl (Schrott) mit Zugabe von Roheisen für die Herstellung verwendet wird.<sup>50</sup> Der Prozess Stahl herzustellen, begann schon um 4000 v. Chr. in Ägypten, wo Eisen aus Meteoriten zu Schmuck verarbeitet wurde. Im Jahr 1400 v. Chr. haben es die Hethiter aus Kleinasien erstmals geschafft mithilfe von ihrer entwickelten Eisenverhüttung Eisen aus Eisenerzen zu gewinnen. Diese Erkenntnisse breiteten sich schnell aus, bis sie 800 v. Chr. in Europa landeten und so die Eisenzeit begann.

---

<sup>49</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 112.

<sup>50</sup> <https://www.futura-sciences.com/de/die-herstellung-von-stahl-1776/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Einer der wichtigsten Prozesse ist das Reduzieren vom Eisenoxid, um so das Eisen zu gewinnen. Dieser Prozess findet bei beiden Herstellungsarten statt, wobei man beim Elektrolichtbogenofen auf nachhaltigere Möglichkeiten zurückgreift.<sup>51</sup>

### 3.1.1. Hochofen

Der erste Hochofen in Europa, bei dem man erstmals flüssiges Eisen anstatt von Eisenschwamm gewann, wurde Mitte des 14. Jahrhunderts entwickelt.<sup>52</sup> Ein Hochofen kann eine Höhe von bis zu 100 Metern und einen Durchmesser von bis zu 14 Metern erreichen, wie zum Beispiel der größere von drei Hochöfen bei der Voestalpine in Linz, weshalb er auch „Schwarzer Riese“ genannt wird.

Der Prozess ist in Zonen unterteilt, die direkt im Hochofen geschehen. Jede Zone hat eine eigene Temperatur, die von oben nach unten ansteigt. Koks, das man aus Kohle hergestellt, wird als Reduktionsmittel für das Eisenerz verwendet.<sup>53</sup> Das Eisenerz und der Koks werden nacheinander schichtweise aufgetragen (Koks, Eisenerz, Koks, Eisenerz und so weiter), damit der Hochofen mit abwechselnden Schichten gefüllt wird. Die erste Zone mit circa 200 °C ist die Trocken- und Vorwärmzone. Dort werden Eisenerz, Koks und Zuschlag vom durchströmenden Gichtgas getrocknet und vorgewärmt. Danach beginnt die Reduktionszone, die eine Temperatur von circa 400 °C bis 900 °C erreicht. Dort wird dem Eisenoxid mithilfe von Koks, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoff der Sauerstoff entzogen, wobei reines Eisen entsteht. Das dabei entstehende Eisen ist in der Zone noch fest. Die nächste Zone, in der Temperaturen von ca. 1200 °C herrschen, wird als Karbonisationszone bezeichnet. In dieser Zone reagiert der Koks mit dem eingeblasenen Sauerstoff zu einem Eisen-Kohlenstoff-Gemisch. Die letzte Zone ist die so genannte Schmelzzone, in der Temperaturen von 1800 °C bis 2000 °C herrschen. Der Koks verbrennt an der eingeblasenen Luft und schmilzt das Eisen-Kohlenstoff-Gemisch. Die verbleibenden Eisenverbindungen werden durch Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoff zu Eisen reduziert. Durch die dazugegebenen

---

<sup>51</sup> <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/der-hochofenprozess-herstellung-von-eisen-und-stahl> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>52</sup> <https://www.interstahl.com/wiki/geschichte/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>53</sup> Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. S. 88.

Zuschlagstoffe entsteht eine Schlacke, die aufgrund ihrer Dichte auf dem flüssigen Roheisen schwimmt. Das gewonnene Roheisen wird durch ein Loch extrudiert, wodurch es von der Schlacke getrennt wird.

Der Kohlenstoffanteil von Roheisen liegt bei 4 %, was zu hoch ist. Dieser hohe Anteil macht ihn sehr spröde, was die Ver- und Bearbeitung sehr schwierig macht. Um den Kohlenstoffanteil auf 2 % zu reduzieren, gibt es zwei Verfahren, die angewendet werden können. Im so genannten Sauerstoff-Blasverfahren wird Sauerstoff auf das Roheisen geblasen, wodurch der Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid wird.<sup>54</sup> Im zweiten Verfahren, das so genannte Herdfrischverfahren, wird nochmal Schrott oder Erz dazugegeben. Der Sauerstoff, der in der Verbindung ist, oxidiert zu Kohlenstoffdioxid.<sup>55</sup>

### **3.1.2. Elektrolichtbogenofen**

Der Elektrolichtbogenofen ist die nachhaltigere Variante, um Stahl herzustellen. Ein großer Aspekt der Stahlherstellung mittels Elektrolichtbogenofen ist die Verwendung von Recycelmaterial, was nichts anders ist als Schrottmaterial, der auch beim Hochofenprozess verwendet wird. Um die gewünschte Stahlgüte wie bei der Herstellung mittels Hochofens zu erzielen, muss beim Elektrolichtbogenofen zusätzlich zum Schrott, auch Roheisen hinzugefügt werden.<sup>56</sup> Damit man das Roheisen für den Elektrolichtbogenofen nicht im Hochofen herstellen muss, gibt es einen Prozess vor dem Elektrolichtbogenofen, wo das Eisenerz mittels Erdgases oder in Zukunft mit Wasserstoff reduziert und zu Roheisen hergestellt wird. Dadurch hat die Stahlherstellung mittels Elektrolichtbogenofen zwei Prozesse. Zum einen die Roheisenherstellung mittels nachhaltigeren Reduktionsmittels, wie zum Beispiel Erdgas und Wasserstoff, und dann die eigentliche Stahlherstellung mittels Elektrolichtbogenofen mit Schrott und zusätzlichem Roheisen. Das im Vergleich zur Stahlherstellung mittels Hochofens, wo alles in einem Prozess verpackt ist.<sup>57</sup> Nachdem man den Schrott richtig sortiert und gereinigt hat, ist er bereit im

---

<sup>54</sup> <https://www.lernort-mint.de/der-hochofenprozess/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>55</sup> <https://www.chemie.de/lexikon/Stahlerzeugung.html> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>56</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 16.

<sup>57</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 3.

Elektrolichtbogenofen geschmolzen zu werden.<sup>58</sup> Die Graphitelektroden werden von oben bis knapp über den Stahlschrott in den Elektrolichtbogenofen eingeführt. Mit Hilfe von elektrischem Strom wird an den Elektroden ein Lichtbogen erzeugt. Dieser kann eine Temperatur von bis zu 3.500 °C erreichen. Durch Zugabe von Sauerstoff wird der Schrott 25 bis 40 Minuten lang eingeschmolzen. Der flüssige Stahl erreicht Temperaturen bis zu 1800 °C. Abstichgewichte von einem Elektrolichtbogen variieren je nach Größe zwischen 80 und 250 Tonnen Stahl. Ein typischer Elektrolichtbogenofen verbraucht pro Tonne Stahl zwischen 350 bis 400 kWh Strom. Aufgrund dieser hohen Mengen an Strom die ein Elektrolichtbogenofen verbraucht, benötigt er eigene Anschlussleitungen, die im Bereich von etwa 120 MW liegen.<sup>59</sup> Um diesen Prozess noch nachhaltiger zu gestalten, müsste man diese Mengen an Strom aus erneuerbaren Energien gewinnen. Das ist im Moment sehr schwierig, da man zum Beispiel in Österreich nicht die Kapazität hat so viel erneuerbare Energie bereitzustellen, um die zukünftigen Elektrolichtbogenöfen bei der Voestalpine in Linz und Donawitz mit Strom zu beliefern. Auch die Bereitstellung von ausreichenden Mengen an Wasserstoff für die Reduzierung von Eisenerz ist eine große Herausforderung. Bis der Einsatz von Wasserstoff möglich ist, ist Erdgas als Ersatz für Wasserstoff im Einsatz.<sup>60</sup> Für die Produktion von Wasserstoff werden ebenfalls große Mengen an Strom gebraucht. Die CO<sub>2</sub>-freie Herstellung von Wasserstoff geschieht mittels Elektrolyseverfahren, wo Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von Strom aufgespaltet wird. Die nicht umweltfreundliche und mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbundene Methode zur Herstellung von Wasserstoff ist die Dampfreformierung von Erdgas.<sup>61</sup>

### **3.1.3. Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Ein großer Nachteil der Stahlherstellung mittels Hochofens sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die dabei entstehen. Die Stahlindustrie gehört zu den

---

<sup>58</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 18.

<sup>59</sup> [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/\\*/\\*Elektrolichtbogenofen.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/*/*Elektrolichtbogenofen.html?op=Wiki.getwiki) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>60</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 6.

<sup>61</sup> <https://www.tuev-nord.de/explore/de/entdeckt/was-ist-wasserstoff-einfach-erklart/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

klimaschädlichsten Branchen und ist für rund sieben Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich.<sup>62</sup> In Österreich betragen die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stahlindustrie 15,3 %.<sup>63</sup> Wenn man bedenkt, dass 95% des produzierten Roheisens im Hochofenprozess hergestellt wird, so entstehen bei diesem Prozess enorme Mengen an CO<sub>2</sub> -Emissionen. Grund dafür sind Reduktionsmittel wie Schweröl, Kohle, Erdgas und nicht umweltfreundlich hergestellter Wasserstoff. Der Hochofenprozess wird aus diesem Grund am laufenden optimiert. Die moderneren optimierten Hochöfen benötigen viel weniger Reduktionsmittel als die veralteten Hochöfen. Für einen moderneren Hochofen werden pro Tonne Roheisen nur mehr circa 450 Kilogramm Reduktionsmittel verwendet. Mit diesem Bedarf an Reduktionsmittel entstehen pro Tonne Roheisen rund 1.450 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dies ist die Grenze für die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Prozess verursacht werden. Weitere Senkungen können nur noch mit dem Einsatz neuer Technologien verbessert werden. Im Hochofenprozess kommt es heutzutage öfter vor, dass vorreduziertes Material für die Herstellung verwendet wird, damit die Reduktion selbst nicht im Hochofen stattfindet. Das Material wird, wie beim Elektrolichtbogenofen durch einen Prozess, der davor geschieht, hergestellt. Das vorreduzierte Material wird statt wie beim Hochofen mit Koks, mit umweltfreundlicherem Erdgas hergestellt. Durch den Einsatz von 200 Kilogramm vorreduziertem Eisenschwamm für eine Tonne Roheisen, können 180 Kilogramm CO<sub>2</sub> eingespart werden. Eine solche Direktreduktionsanlage der Voestalpine AG steht seit 2016 am Standort Corpus Christi, in Texas (USA). Dieses Werk stellt pro Jahr zwei Millionen Tonnen Eisenschwamm her, wobei die Hälfte an die Voestalpine in Linz und Donawitz geliefert wird.<sup>64</sup> Ein Hochofen und Stahlwerk haben zusammen einen Verbrauch

---

<sup>62</sup> <https://www.sueddeutsche.de/wissen/stahl-wasserstoff-klimawandel-1.5065080> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>63</sup> <https://www.ee-news.ch/de/article/49938/energiefakten-austria-gruner-stahl-von-lichtbogenofen-und-ccs-technologien> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>64</sup> <https://www.energy-innovation-austria.at/article/CO2-minimierte-roheisenproduktion/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

von circa 12 GJ pro Tonne Rohstahl.<sup>65</sup> Der Elektrolichtbogenofen verbraucht zwischen 350 und 400 kWh Strom pro Tonne Stahl.<sup>66</sup>

### 3.2. Aluminium

Aluminium ist das dritthäufigste auf der Erde vorkommende Element in der Erdkruste, und kommt in Form vom Aluminiumerz Bauxit vor.<sup>67</sup> Um die 90 % des weltweiten Vorkommens von Bauxit befinden sich im Tropengürtel der Erde. Regenwälder werden für das Errichten von Bauxitminen gefällt. Dort liegt das Aluminiumerz im Vergleich zu Europa nur wenige Meter unter der Oberfläche. Umgerechnet 18 Millionen Tonnen Bauxit können jährlich in so einer Mine abgebaut werden. Im Regenwald abgebautes Bauxit hat einen Aluminiumoxidanteil von mehr als 50 %, was der Grundstoff für jedes Aluminium ist. Ebenso hat er einen geringen Anteil von unter 5 % Silikaten. Aus diesen Gründen ist das hochwertige Aluminiumerz aus dem Regenwald so wertvoll. Der Wasserbedarf einer Bauxitmine ist gigantisch. Wasser wird in riesigen „Waschmaschinen“ geleitet, wo Lehm und andere Anteile des Bauxits die weniger Aluminium enthalten, ausgeschwemmt werden. Dieser Schlamm wird zurück in ein Becken gepumpt, bis es stillgelegt wird und austrocknet. Das feingemahlene Bauxiterz wird mit Frachtern in Aluminiumwerke weitergeleitet. In der Aluminiumfabrik wird das Bauxit nochmal feingemahlen. Um das Aluminium von Eisen und anderen Stoffen zu trennen, braucht es große Mengen an Natronlauge. Sie ist notwendig um aus dem Bauxiterz, das Aluminiumoxid zu gewinnen. Bauxit geht mit Natronlauge in eine Lösung in einen Druckkessel, der mit 7 bar unter Druck steht, und Temperaturen bis zu 180 °C erreicht. Aluminiumoxid wird als Natriumaluminate aufgeschlossen. Diese Flüssigkeit wird in Silos gepumpt, wo sich langsam das Aluminiumoxid am Boden absetzt. Die Natronlauge wird abgeschöpft und für denselben Prozess wiederverwendet. Mehr als die Hälfte des Bauxits ist unbrauchbar und wird als giftiger Rotschlamm

---

<sup>65</sup> Fleiter, Tobias / Schломann, Barbara / Eichhammer, Wolfgang: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013. S. 8.

<sup>66</sup> [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/\\*/\\*/Elektrolichtbogenofen.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/*/*/Elektrolichtbogenofen.html?op=Wiki.getwiki)  
[letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>67</sup> Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016. S. 108.

ausgeschieden. Der Rotschlamm wird verladen und auf Rotschlammdeponien gebracht. Am Ende hat man dann ein weißes Pulver, das Aluminiumoxid. Dieses Pulver ist das Ausgangsmaterial für unzählige Anwendungen, wie zum Beispiel Zement, Aluminiumkeramik oder metallisches Aluminium.

Für die Herstellung vom metallischen Aluminium werden Unmengen an elektrischer Energie benötigt, um das Metall aus seiner Verbindung mit Sauerstoff zu lösen. Im Kessel wird durch Zugabe von viel Strom, das Aluminiumoxid oder auch Tonerde genannt, in flüssiges Aluminium umgewandelt. Die Herstellung von Aluminium ist 10-mal so energieaufwendig wie die Erzeugung von Stahl. Flüssiges Aluminium ist sehr reaktionsfreudig, besonders, wenn es in Kontakt mit Wasser kommt. Dieser Kontakt erzeugt eine so große Energie, die so ähnlich wie die Explosion von Dynamit ist. Aus diesem Grund muss es in einer Aluminiumschmelze komplett trocken sein.<sup>68</sup>

Bei der Herstellung von Aluminiumoxid, zum Beispiel in Brasilien, entsteht ein Aluminiumstaub, der sich auf einige Kilometer um die Aluminiumraffinerie ausbreitet und Wasser, Bäume, Esse, Organismen, ganze Ortschaften und Dörfer vergiftet. Ein weiteres Problem ist die Rotschlammdeponie, die, wenn es trocken ist, staubt. Wenn tropische Regenfälle niedergehen, besteht die Gefahr, dass der mit ätzender Natronlauge getränkter Schlamm überläuft. Um das einigermaßen zu verhindern, wird in der weltgrößten Aluminium-Raffinerie in Barcarena, im Nordosten Brasiliens, die Deponie schräg angelegt, damit durch den Druck des immer aufgeschütteten Rotschlammes die Flüssigkeit nach unten weggedrückt und gesammelt wird. Diese Flüssigkeit wird größtenteils dem kompletten Natronlaugeprozess wieder zugeführt und nur ein geringer Teil bleibt übrig der als neutralisiertes Wasser wieder dem ökologischen Kreislauf zurückgegeben wird. Menschen, die in den Dörfern rund um die Raffinerie leben, trinken das durch Aluminiumstaub und Natronlauge vergiftete Wasser, baden darin und kochen damit. Beschwerden reichen von aufgeplatzter Haut, Juckreiz, ätzende und brennende Haut.<sup>69</sup>

---

<sup>68</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=q9zjKBg2ws&ab\\_channel=Langbein%26Partner](https://www.youtube.com/watch?v=q9zjKBg2ws&ab_channel=Langbein%26Partner) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>69</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=Dze0wfpYjf0&ab\\_channel=Langbein%26Partner](https://www.youtube.com/watch?v=Dze0wfpYjf0&ab_channel=Langbein%26Partner) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

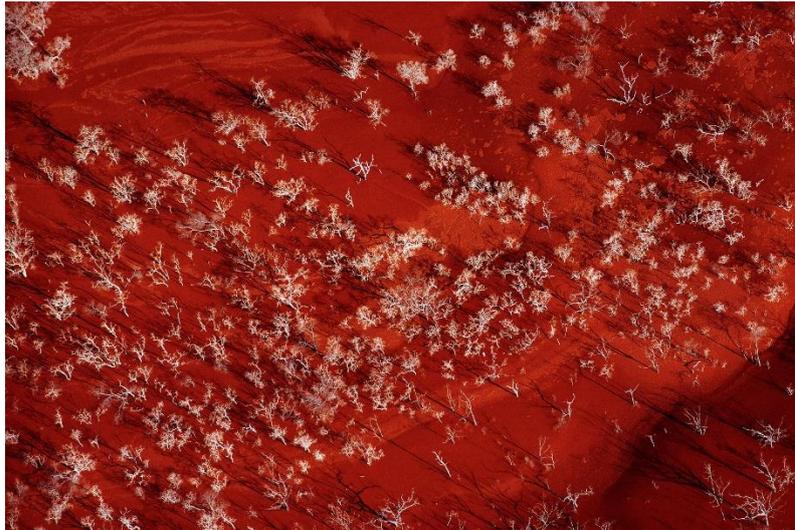


Abbildung 4: Baum Skelette im Rotschlamm, Grove, Northern Territory, Australien 1974

Am 04.10.2010 kam es In der Aluminiumfabrik Ajka, in der Ukraine, zum Einsturz eines Rotschlammbeckens. In Folge traten mehr als 600.000 bis 1,1 Millionen Kubikmeter des ätzenden und schwermetallhaltigen Schlammes aus. Die Meterhohe Flut ergoss sich auf die benachbarten Ortschaften, bei dem 120 Menschen verletzt wurden und 10 starben. Das österreichische Umweltbundesamt hat einen Element-Screen durchgeführt, der ergab, dass im Rotschlamm insgesamt 38 chemische Elemente enthalten sind. Das österreichische Umweltministerium gab bekannt, dass der Rotschlammbecken nur für 300.000 Kubikmeter Schlamm ausgelegt war, was viel weniger ist, als tatsächlich ausgetreten ist. Die Aufräumarbeiten dauerten länger als ein Jahr und es mussten ganze Stadtviertel abgerissen werden. Der Rotschlamm vergiftete auch ganze Gewässer, sodass nicht nur das Trinkwasser ungenießbar wurde, sondern auch ein Fischsterben zu verzeichnen war.<sup>70</sup>

In Brasilien wird die Rotschlammproblematik professioneller handgehabt, denn dort bleibt weniger Natronlauge auf den Deponien zurück. Grund dafür ist, dass sie die Rotschlammbecken austrocknen lassen, damit der schlamm hart wird und nicht auslaufen kann. Dennoch wächst der Rotschlammberg Tag für Tag. Für jede Tonne Aluminiumoxid die produziert werden, wächst der Berg um mindestens dieselbe

---

<sup>70</sup> <https://www.stava1985.it/der-einsturz-der-deponie-von-ajka-2010/?lang=de> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Menge. Es gibt Pläne aus dem Rotschlamm Straßenbelag oder Ziegel herzustellen.<sup>71</sup>

### 3.2.1. Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der Energieaufwand der Aluminiumherstellung ist sehr hoch, was sich auch im Preis widerspiegelt. Die Herstellung von Aluminium ist 10-mal so energieaufwendig wie die Erzeugung von Stahl. Das größte Aluminiumwerk in Deutschland, Alunorf in Neuss, benötigt bei der Herstellung von Aluminium so viel Strom, dass damit die Stadt Düsseldorf für ein Jahr auskommen könnte.<sup>72</sup> Die Wiederverwendung von Aluminium spielt eine große Rolle, da beim Recycling im Vergleich zu Primäraluminium nur 5 % Energiekosten entstehen. Bei der Herstellung einer Tonne Primäraluminium, werden im Durchschnitt 15.700 kWh elektrische Energie benötigt. Das entspricht etwa dem jährlichen Strombedarf von drei bis vier Vier-Personenhaushalten. Um eine Tonne Tonerde, beziehungsweise Aluminiumoxid herzustellen, wird rund 250 bis 420 kWh benötigt. Zusätzlich werden für den Prozess 2,4 Tonnen Bauxit, 85 bis 100 Kilogramm Ätznatron, 50 Kilogramm gebrannter Kalk und 330 Kilogramm Brennstoffe verwendet. Der durchschnittliche Gesamtenergieverbrauch im Bayer-Prozess liegt bei etwa 12 GJ pro Tonne Tonerde. Etwa 90 % dieses Energiebedarfs werden durch Brennstoffe wie hauptsächlich Kohle und Erdgas abgedeckt, während die restlichen 10 % durch Strom bereitgestellt werden. Durch den derzeit weltweit verwendeten Energiemix, ergeben sich durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 570 Kilogramm CO<sub>2</sub> pro Tonne Tonerde.<sup>73</sup> Für die eigentliche Herstellung für eine Tonne Aluminium, entstehen im Durchschnitt circa 16.000 Kilogramm CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>74</sup> Der Bedarf an elektrischer Energie für die weltweite Aluminiumproduktion macht circa 37,5 %

---

<sup>71</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=Dze0wfpYjf0&ab\\_channel=Langbein%26Partner](https://www.youtube.com/watch?v=Dze0wfpYjf0&ab_channel=Langbein%26Partner) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>72</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=q9zjKBg2ws&ab\\_channel=Langbein%26Partner](https://www.youtube.com/watch?v=q9zjKBg2ws&ab_channel=Langbein%26Partner) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>73</sup> Vasters, Jürgen / Franken, Gudrun: Aluminium - Informationen zur Nachhaltigkeit. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit 2020. S. 11.

<sup>74</sup> <https://www.voestalpine.com/blog/de/verantwortung/umwelt/argumente-fuer-recycling-weltmeister-stahl/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs, der 2018 bei 2.500 TWh lag, aus.<sup>75</sup>

### **3.3. Kupfer**

Das Land, wo weltweit das meiste Kupfer gefördert wird, ist Chile in Südamerika. Dort entstehen in den Wüsten terrassenförmige Tagebaue. Es sind die größten Erzgruben auf der Welt. Die größte Kupfermine der Welt ist die Chuquicamata-Mine und liegt im Norden Chiles. Dort wurde seit Beginn der Mine, also vor rund 100 Jahren, mehr als 18 Millionen Tonnen Kupfer produziert. Weitere 90 Millionen Tonnen soll die Erde in den nächsten 100 Jahren hergeben.<sup>76</sup> Die Extraktion von Kupfer aus einer Kupferlagerstätte, ist erst dann sinnvoll, wenn über 2 Kilogramm Kupfer in 1.000 Kilogramm Erz enthalten ist, was 0,2 % ausmacht. Kupfererze kommen oxidisch und sulfidisch vor, wobei das sulfidische Erz am meisten verwendet wird. Das abgebaute Erz wird zunächst mit sogenannten Erzbrechern oder Crushern zerkleinert und in Mühlen zu Pulver gemahlen, bis es eine kleinere Korngröße als Sandkörner hat. Um aus dem gemahlene sulfidischen Kupfererz das Kupferkonzentrat zu gewinnen, wird ein Verfahren angewendet, das sich Schwimmaufbereitung oder auch Flotation nennt. Das feingemahlene Roherz wird mit Wasser und diversen chemischen Substanzen vermischt. Danach wird von unten am Boden Luft eingeblasen, wobei Luftblasen entstehen, die sich an der Oberfläche häufen. Da die sulfidischen Kupfermineralteilchen hydrophob sind, halten sie sich an den Luftbläschen fest und werden an die Oberfläche gehoben, wo sie dann abgeschöpft werden. Durch dieses Verfahren erhält man Erzkonzentrate mit einem Kupfergehalt von 20 bis 30 % oder sehr kupferreiche Konzentrate mit einem Kupfergehalt von 50 %. Bei der Flotation entsteht viel nicht verwendbares Material, weshalb die Fabriken zur Aufbereitung des Kupfererzes aus wirtschaftlichen Gründen nahe an den Erzgruben liegen. Das Kupferkonzentrat wird anschließend bei hohen Temperaturen von 1.300 °C geschmolzen und in Form-

---

<sup>75</sup> Vasters, Jürgen / Franken, Gudrun: Aluminium - Informationen zur Nachhaltigkeit. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit 2020. S. 13.

<sup>76</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=-o88lZw38ZM&ab\\_channel=wocomODOCS](https://www.youtube.com/watch?v=-o88lZw38ZM&ab_channel=wocomODOCS) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

scheiben gegossen, wodurch Kupferanoden gewonnen werden.<sup>77</sup> Die Kupferanoden haben einen Reinheitsgrad von 99,5 %. Um den Reinheitsgrad zu erhöhen, werden die Anoden in einen Tank mit einer Schwefelsäurelösung gehängt und an einem Stromkreis angeschlossen. Durch die elektrische Energie löst sich das Kupfer von der Anode und wandert zur Kathode. In diesem zwölftägigen Prozess entstehen die Kupferkathoden mit einem Reinheitsgrad von 99,99 %. Das ist das reinste Kupfer, das wir Menschen in der Lage sind, herzustellen.<sup>78</sup>

### 3.3.1. Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Für die Herstellung von Primärkupfer beläuft sich der Energieaufwand auf circa 113 MJ/kg, der sich aufteilt in 72 MJ für den Erzabbau und Aufbereitung und zusätzliche 15 MJ für das Umformen zu Blechen, Profilen, Rohren und Draht.<sup>79</sup> Seit 1990 konnte der Energieverbrauch für die Produktion von Kupfer durch innovative Technologien um 60 % reduziert werden.<sup>80</sup> Die Kupferindustrie ist für 0,15 % der gesamten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Welt verantwortlich, was sich auf circa 35 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> beläuft. Beim jährlichen Endenergieverbrauch der Welt verbraucht die Kupferindustrie nur etwa 0,1 %, was umgerechnet circa 375 Milliarden GJ sind.<sup>81</sup>

## 4. Recycle & Wiederverwendung + Energieaufwand

Die Notwendigkeit einer nachhaltigen Ressourcennutzung und eines effizienten Abfallmanagements hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Insbesondere das Recycling von Metallen bietet Möglichkeiten, die Umweltauswirkungen der traditionellen Metallgewinnung zu reduzieren und gleichzeitig wertvolle Ressourcen zu schonen. Dieses Kapitel widmet sich dem Thema Metallrecycling unter besonderer Berücksichtigung des Energieaufwandes, der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Bedeutung der Kreislaufwirtschaft.

---

<sup>77</sup> <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/kupfer/produktionsprozesse/gewinnung> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>78</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=-o88lZw38ZM&ab\\_channel=wocomoDOCS](https://www.youtube.com/watch?v=-o88lZw38ZM&ab_channel=wocomoDOCS) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>79</sup> <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/kupfer> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>80</sup> <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>81</sup> <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

## 4.1. Stahl

Stahl ist ein Werkstoff, der aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken ist. Aufgrund der geringen Herstellungskosten, Stärke und Dauerhaftigkeit, ist er mit Abstand das beliebteste Metall unserer Zeit. Dadurch entsteht aber ein Problem: Treibhausgasemissionen. Die Stahlindustrie macht 24 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Auf Rang zwei der Metalle ist Aluminium mit 6 %.<sup>82</sup> Die Wiederverwendung von Stahl reduziert nicht nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern schont auch wertvolle Ressourcen, die man sonst abgebaut hätte, um neuen Stahl herzustellen. Kein anderes Metall wird so oft recycelt wie Stahl. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung einer Tonne Stahl ist durch Multi-Recycling über mehrere Lebenszyklen um circa 50 % geringer als bei der reinen Primärerzeugung von Stahl. Nicht nur das Metall selbst wird wiederverwendet, aber auch die Nebenprodukte, die bei der Stahlherstellung entstehen werden weiterverwendet, statt sie zu entsorgen. Zum einen die Schlacke, die sich bei der Herstellung auf dem Roheisen bildet, wird weiter in der Zementindustrie und im Straßenbau eingesetzt. Eisenoxide finden in der Lackindustrie als magnetisierbares Material für Festplatten Verwendung. Auch Düngemittel für die Landwirtschaft ist ein wichtiges Nebenprodukt. Aus der Koksherstellung entsteht das Nebenprodukt Teer, dass für den Straßenbau verwendet wird.<sup>83</sup>

Stahlschrott gibt es in verschiedenen Ausführungen, von Schrott das alle Arten von Material enthält, bis hin zu höherwertigen, sortierten Klassen, die als sauber gelten. Wenn man normalen Stahl herstellen möchte, der keine besonderen Eigenschaften haben soll, kann man 100 % unsortierten Schrott nehmen. Das ändert sich, wenn man Stahl mit einer bestimmten Güteklasse benötigt. Man kann dazu 100 % Schrott, vorausgesetzt er ist homogen und von hoher Qualität, verwenden. Das ist jedoch nicht immer möglich. Deswegen wird oft Roheisen mit einer bestimmten Güteklasse zum geschmolzenen Schrott dazugegeben, um die gewünschte Qualität zu erzielen. Diese Anpassung ermöglicht es auch, minderwertigen Schrott für

---

<sup>82</sup> <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/klimaneutrale-industrie-zement-stahl-chemie> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>83</sup> [https://www.rivastahl.com/de/corporate\\_responsibility/recyclingweltmeister\\_stahl](https://www.rivastahl.com/de/corporate_responsibility/recyclingweltmeister_stahl) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

hochqualitativen Stahl zu verwenden.<sup>84</sup> Aus all diesen Gründen ist es wichtig, den Stahl vor der weiteren Verarbeitung richtig zu sortieren und zu reinigen. Beim Sortieren wird zuerst zwischen metallisch und nichtmetallisch unterschieden. Bei hoch- und niedriglegierten Stählen kann das Sortieren schwieriger sein, da zum Beispiel beide, Kupfer und Eisen metallisch sind.<sup>85</sup> Legierungselemente, die im Stahl gebunden sind, wie zum Beispiel Chrom, ist eine Trennung nur im flüssigen Zustand des Stahls möglich. Wenn der Stahl flüssig ist, reagiert das Chrom mit der Schlacke, die Chromatome aufnimmt. Beim Abkühlen schwimmt die Schlacke an der Oberfläche des flüssigen Materials. Während der gereinigte Stahl durch eine Öffnung am Boden des Behälters abgelassen wird, bleibt die Schlacke oben und kann so getrennt werden. Diese Methode funktioniert leider nicht mit allen Legierungselementen. Zum Beispiel bleibt Kupfer, das nicht sauerstoffaffin ist, im Stahl enthalten und kann auf diese Weise nicht entfernt werden. Das Kupfer, das nicht entfernt werden kann, beeinflusst die Eigenschaften und dazu führen, dass der Stahl zu weich ist. Dagegen können leicht oxidierende Elemente wie Mangan, Eisen, Silizium und Aluminium in die Schlacke übergehen und sind leichter abtrennbar.<sup>86</sup> Nichtmetallische Materialien wie Staub, Schmutz oder Kunststoffabfälle, werden mit Luftströmen entfernt, da sie leichter sind als der Schrott. Andere Verschmutzungen werden durch mechanische, physikalische oder chemische Methoden entfernt. Alle diese Schritte können die Kosten von Schrott stark beeinflussen. Je teurer oder hochwertiger der Schrott ist, desto höher ist der Aufwand für die Sortiertechnik und damit die Kosten. Trotz all dem Aufwand der Sortiertechnik ist es fast unmöglich, alle Verunreinigungen zu entfernen. Es bleibt immer ein gewisses Maß an Verschmutzungen übrig. Das ist ein Thema in der Schrottindustrie, das zurzeit sehr intensiv erforscht wird.<sup>87</sup>

Schrott wird immer beliebter in der Metallindustrie, da die Wiederverwendung von Metall mehr Bedeutung annimmt. Es gibt aber nur eine bestimmte Menge an verfügbaren Schrott, der in der Welt zirkuliert. Es ist zu erwarten, dass aufgrund der

---

<sup>84</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 13.

<sup>85</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 15.

<sup>86</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 18.

<sup>87</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 15.

steigenden Recyclingrate, es zu einer Knappheit kommen wird. In so einer Situation wird Europa Schrott aus anderen Ländern importieren, was aber wiederum die Kosten weiter erhöht und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Transports vergrößert. Durch diese preiserhöhenden Faktoren wird sich der Schrottpreis ebenso erhöhen, wodurch die Kosten für Stahl steigen. Ebenfalls können Hersteller gezwungen sein, mehr Stahl neu zu produzieren, wenn es zu einer Schrottknappheit kommt. Um dies auszugleichen, könnte in Zukunft in Elektroöfen vermehrt mit Wasserstoff reduziertes Roheisen dem Schrott beigemischt werden. Diese Mischung könnte ein Beitrag zum Ausgleich des Defizits sein, wenn nur eine begrenzte Menge an Schrott zur Verfügung steht. Das kann zu einem Gleichgewicht zwischen Recycling und Neuproduktion führen.<sup>88</sup>

#### **4.1.1. Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Der Energieaufwand für das Recycling von Stahl hängt stark davon ab, was für eine Qualität der Schrott hat und wie aufwendig die Sortierung ist. Der wichtigste Aspekt des Recycelns von Stahl sind die Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Einfluss auf den Klimawandel. Laut Wissenschaftlern und Studien, spart die Stahlindustrie beim Einsatz von einer Tonne recyceltem Schrott aus rostfreiem Edelstahl in der Edelstahlproduktion 4,3 Tonnen CO<sub>2</sub>. Bei normalem Stahl liegen die Einsparungen bei durchschnittlich 1,67 Tonnen CO<sub>2</sub>. Die Herstellung von recyceltem Stahl ist nicht nur hervorragend bei der Minimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, aber auch bei der Verhinderung von anderen Umweltschäden, die bei der herkömmlichen Stahlproduktion entstehen, zum Beispiel die Versauerung von Gewässern, Sommersmog oder Eutrophierung. Ebenso senkt die Herstellung von nachhaltigem Stahl, in Europa die Kosten des Klimawandels um bis zu 20 Milliarden Euro pro Jahr.<sup>89</sup>

## **4.2. Aluminium**

Aluminium hat wie sonst kein anderes Metall die meisten Verwendungszwecke. Die Produkte aus Aluminium, die beim Recyceln die größte Rolle spielen sind unter

---

<sup>88</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 12.

<sup>89</sup> <https://www.recyclingmagazin.de/2019/11/14/studie-stahlschrott-mindert-CO2-ausstoss-erheblich> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

anderem Aluminium Dosen, Autoteile, Fenster und Türen, Lebensmittelbehälter, Alufolie und Aluschalen. Das recycelte Aluminium nennt man auch Sekundäraluminium, da es nicht wie das Primäraluminium direkt aus Bauxit gewonnen wird. Der Recycle Prozess von Aluminium ist sehr komplex, da das Metall meist in Form von Metallgemischen, also Legierungen, vorkommt. Aluminium ist ein unedles und nicht magnetisches Metall, was das Trennen von den edlen Legierungen schwer macht. Es gibt heute spezielle Sortiermaschinen, die mithilfe von Röntgenstrahlen unterschiedliche Legierungen erkennen, um sie dann voneinander zu trennen.<sup>90</sup> Es ist ein sehr aufwendiger Prozess, das Aluminium sortenrein zu trennen. Dadurch entsteht auch kein Verlust der Qualität des Metalls. Die zweite Möglichkeit ist das Recycling der verschiedenen Materialien zusammen, das so genannte Downcycling. Dabei werden die unterschiedlichsten Materialien, sprich Aluminium mit verschiedenen Legierungen, zusammen eingeschmolzen, wodurch sich die Qualität des Materials verschlechtert.<sup>91</sup>

Nachdem der Aluminium-Schrott richtig sortiert wurde, wird er eingeschmolzen. Das passiert unter ständiger Bewegung in großen Öfen bei 650 bis 700 °C. Beim Schmelzvorgang entsteht auf der Oberfläche eine Schlacke, die aus unterschiedlichen Oxiden besteht. Diese Schlacke wird abgetragen, da die Oxide sonst das Aluminium verunreinigen. Das flüssige Sekundäraluminium wird dann in Formstücke für die Weiterverarbeitung gegossen.<sup>92</sup>

#### **4.2.1. Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Der Bedarf von Aluminium steigt immer weiter an. Da die Produktion von Primäraluminium sehr viel Energie verbraucht und CO<sub>2</sub>-Emissionen ausstößt, wird vermehrt Sekundäraluminium hergestellt. Die Herstellung von Sekundäraluminium macht nur 5 % vom Energieaufwand von Primäraluminium aus. Mit der Energie, die zur Herstellung einer Getränkedose aus Primäraluminium benötigt wird, können mit der gleichen Energie 20 Getränkedosen aus Sekundäraluminium hergestellt

---

<sup>90</sup> <https://utopia.de/ratgeber/aluminiumrecycling-so-funktioniert-es/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>91</sup> <https://de.materials4me.com/wissen-ideen/werkstoff-aluminium/recycling-von-aluminium/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>92</sup> <https://www.leifichemie.de/anorganische-chemie/metalle-und-erze/grundwissen/recyclingprozess-von-aluminium> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

werden. Eine Verringerung des Energieverbrauchs hat eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge.<sup>93</sup> Wenn mehr Sekundäraluminium produziert wird, besteht vielleicht die Hoffnung, dass weniger Regenwald abgeholzt wird, um mehr Primäraluminium zu produzieren, weil sich die Nachfrage ändert. Dadurch würde sich die Natur erholen aber auch die Menschen, die unter den Aluminium-Raffinerien leiden.

### 4.3. Kupfer

Im nachhaltigen Bauen ist Kupfer sein sehr wichtiges Material für den es 128 Einsatzmöglichkeiten gibt, einschließlich Sanitär, Beleuchtung, Verkabelung und Bedachung. Kupfer stellt die intelligente Infrastruktur zur Verfügung, die die EU benötigt, um sich eine saubere und grünere Zukunft zu sichern.<sup>94</sup> Kupfer ist zu nahezu zu 100 % ohne jeglicher Qualitätsverluste recycelbar. Ein sogenanntes Downcycling, wie es bei anderen Werkstoffen der Fall ist, gibt es bei Kupfer nicht.<sup>95</sup> In Europa sind über 80 % des verbauten Kupfers in kupferhaltigen Bauprodukten aus recyceltem Kupfer.<sup>96</sup> Das Gleichgewicht der Kupferindustrie in Europa ist so fortgeschritten, dass jeweils genau 50 % Primär- und Sekundärkupfer produziert wird.<sup>97</sup> Der Anteil von recyceltem Kupfer, beträgt etwa ein Drittel der gesamten Weltproduktion. Kupfer ist ein sehr langlebiger Werkstoff, was sehr gut ist, aber dazu führt, dass kupferhaltige Produkte erst nach einer langen Nutzungsdauer wieder in den Kupferkreislauf zurückgeführt werden. Zum Beispiel kann das Kupfer von einem Kupferdach, dass eine Langlebigkeit von 60 bis 80 Jahren hat, erst nach diesem Zeitraum erneuert werden. Vor 10 Jahren hat man für die Herstellung neuer Produkte weitaus weniger Kupfer benötigt als heute, wenn man etwas aus Kupfer herstellt. Aufgrund dessen wird für die heute benötigte Menge an Kupfer weiterhin ein Teil des Kupfers neu aus Erzen gewonnen. Geht man von einer durchschnittlichen Lebensdauer aller Kupferprodukte von circa 33 Jahren aus, und setzt

---

<sup>93</sup> <https://de.materials4me.com/wissen-ideen/werkstoff-aluminium/recycling-von-aluminium/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>94</sup> <https://kupfer.de/anwendungen/bauwesen/green-building/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>95</sup> <https://kupfer.de/anwendungen/bauwesen/architektur/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>96</sup> <https://kupfer.de/anwendungen/bauwesen/green-building/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>97</sup> <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/recycling/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

die Menge an Altkupfer ins Verhältnis zur Kupferproduktion im gleichen Zeitraum, so erhöht sich der Anteil des aus Schrotten gewonnenen Kupfers auf circa 80 %.<sup>98</sup>

Die Rohstoffe für die Kupfergewinnung aus Recyclingmaterialien, also die Sekundärrohstoffe, lassen sich in vier Gruppen unterteilen. Zum einen gibt es den Neuschrott, der als Produktionsabfall aus der Metallerzeugung ohne Verunreinigungen anfällt, zum Beispiel beim Stanzen von Blechen. Unter Altkupfer versteht man hochkupferhaltige Schrotte wie Regenrinnen, Dachabdeckungen oder alte Rohre. Legierungsschrotte bestehen aus Kupferlegierungen wie zum Beispiel Bronze, Messing und Rotguss. Eine weitere Gruppe sind kupferhaltige Produktionsrückstände und Shreddermaterial. Dies ist eine Art von Kupferschrott, der einen geringeren Anteil an Kupfer enthält und bei dem auf den ersten Blick nicht zu erkennen ist, dass er Kupfer enthält. Dazu gehören zum Beispiel in Gießereien kupferhaltige Altsande, verkupferte Schichten oder kupferhaltige Schlämme.<sup>99</sup> Zu guter Letzt gibt es noch den Elektroschrott, der besondere Anforderungen an das Recyclingverfahren hat. Aus einer Tonne Platinschrott bekommt man beispielsweise etwa 1 Kilogramm Gold, 6 Kilogramm Silber, 12 Kilogramm Aluminium, 20 Kilogramm Zinn und 200 Kilogramm Kupfer. Ein großer Teil des Elektroschrotts besteht aus Kunststoffen, die bei der thermischen Verwertung berücksichtigt werden müssen, da sie bei unsachgemäßem Recycling umweltschädliche Stoffe freisetzen können.<sup>100</sup>

Der erste Schritt für das Recyclingverfahren ist die Schrottaufbereitung bei der der Schrott gesammelt, gereinigt und getrennt wird. Der aufwändige Prozess der Schrottaufbereitung hängt von der Reinheit des Kupfers ab. Sortenreine Kupfer- und Legierungsschrotte können direkt in die Prozesse zur Herstellung von Kupferwerkstoffen eingebracht werden. Das ist der effizienteste Weg des Kupferrecyclings, da sie nicht wie die anderen kupferhaltigen Sekundärrohstoffe, für weitere Recyclingprozesse vorbereitet werden müssen. Zu diesen weiteren

---

<sup>98</sup> <https://q9j8s3a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>99</sup> <https://q9j8s3a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>100</sup> <https://q9j8s3a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Recyclingprozessen zählen unter anderem das Zerkleinern von größeren Stücken, weiteres trennen und reinigen. Am Ende erhält man ein Kupfergranulat mit einer Reinheit von 99,95 % Kupfer.<sup>101</sup> Das Kupfergranulat wird anschließend in einem Induktionsofen geschmolzen und kann wieder zu Produkten verarbeitet werden.

#### **4.3.1. Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Beim Recyceln von Kupfer wird 80 bis 90 % weniger Energie verbraucht als bei der Primärproduktion durch Erze. Im Durchschnitt wird jedes Jahr weltweit 90 Millionen Tonnen Kupfer recycelt. Das sind jährliche Einsparungen von 40 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen, was äquivalent zu 16 Millionen Autos weniger auf der Straße ist.<sup>102</sup>

## **5. Nachhaltigkeitsaspekte**

Metalle werden von vielen aufgrund ihres Herstellungsprozesses als nicht sehr nachhaltig bezeichnet. Es gibt jedoch einige Aspekte, die für die Nachhaltigkeit von Metall sprechen. Metall hat eine sehr hohe Langlebigkeit, ist beständig gegenüber Witterungseinflüssen und reduziert dadurch den Bedarf an Reparaturen, Austausch und Neubeschaffung. Weiters ist Metall zum größten Teil recycelbar. Es kann geschmolzen und wiederverwendet werden, ohne seine Eigenschaften zu verlieren. Durch das Recyceln von Metallen werden Ressourcen gespart und der Bedarf an Primärrohstoffen verringert. Der Energieaufwand für die Herstellung von recyceltem Metall ist viel geringer als für die Herstellung von Metall mittels Primärrohstoffen. Es wird nicht nur an Energie gespart, sondern auch die Treibhausgase werden reduziert. Kupfer ist ein wichtiger Bestandteil vieler nachhaltiger Produkte im Bereich Green Building. Dazu gehören erneuerbare Energiesysteme, intelligente Netztechnologien und kältemittelbasierte Kühlsysteme.

#### **5.1.1. Kreislaufwirtschaft**

Die Kreislaufwirtschaft spielt in der Metallindustrie eine zentrale Rolle. Im Prinzip ist die Vorgehensweise der Kreislaufwirtschaft bei allen Metallen gleich. Das Metall wird zuerst aus dem Erz gewonnen, dann werden die End-of-Life-Produkte bis zum

---

<sup>101</sup> <https://q9j8s3a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

<sup>102</sup> <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Ende verbraucht, bevor sie recycelt und im sekundären Produktionsprozess wiederverwendet werden. Das daraus gewonnene Sekundärmaterial durchläuft dann denselben Prozess und wird immer wieder neu recycelt und wiederverwendet. Es wird angestrebt, kein Metall mehr aus Erzen herzustellen und stattdessen auf Sekundärmaterial in der Kreislaufwirtschaft angewiesen zu sein.

### **5.1.2. Taxonomie**

Im Juni 2020 wurde im EU-Parlament die Taxonomie-Verordnung beschlossen. Diese Richtlinie besagt, dass nur Wirtschaftstätigkeiten als umweltfreundlich gelten, wenn sie einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung von Umweltzielen leisten. Es ist jedoch wichtig, dass sie keine erheblichen Auswirkungen auf andere Umweltziele haben. Die Verordnung enthält sechs Umweltziele: Klimaschutz, Anpassung an den Klimawandel, nachhaltige Nutzung und Schutz der Wasser- und Meeresressourcen, Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung sowie Schutz und Wiederherstellung der biologischen Vielfalt und der Ökosysteme. Sie ist damit ein wichtiger Schritt zur Erreichung des Ziels einer klimaneutralen EU bis 2050.<sup>103</sup>

Als Anreiz für die vielen Veränderungen, die Firmen vornehmen müssen, um als nachhaltig zu gelten, erhalten sie Kapital für den ökologischen Umbau der Energieproduktion und der Wirtschaft.<sup>104</sup> Genau so geht es der Voestalpine und anderen Konzernen. Als Reaktion auf die Gesetze und zunehmender Kundennachfrage, hat die Voestalpine vor etwa fünf Jahren begonnen, seine Produktion in Richtung CO<sub>2</sub>-reduzierten Stahl umzustellen. Kunden, vor allem in der Automobilindustrie, haben erkannt, dass die Verwendung von Stahl mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoß eine Möglichkeit zur Reduzierung ihres eigenen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ist. Durch den Druck des Marktes hat sich das Tempo der Veränderungen beschleunigt, und viele Unternehmen setzen ihre Pläne bereits vor Ablauf der offiziellen Fristen um. Dies gilt nicht nur für die Automobilindustrie, sondern auch für den Stahlbau im Allgemeinen.<sup>105</sup> Durch die Umstellung der Voestalpine von Hochofen zu

---

<sup>103</sup> <https://www.bmk.gv.at/green-finance/finanzen/eu-strategie/eu-taxonomie-vo.html> [letzter Zugriff: 20.06.2023]

<sup>104</sup> <https://www.bmuv.de/faq/was-ist-die-taxonomie> [letzter Zugriff: 20.06.2023]

<sup>105</sup> Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023 (siehe Anhang S.51). Frage 4

Elektrolichtbogenofen, wird ab 2027 der jährliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Österreich um 5 % verringert. Bis alle Hochöfen der Voestalpine ersetzt sind, wird sich dieser Anteil erhöhen.<sup>106</sup>

## 6. Resümee

Es stellt sich die Frage, wie weit der Fortschritt der Nachhaltigkeit in der Metallindustrie ist. Um diese Frage zu beantworten, sollte man, die bisherigen Entwicklungen näher betrachten. Wie bereits erwähnt, repräsentiert die Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen einen bedeutenden Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Produktion. Dennoch ist es wichtig, die Gesamteffektivität und den Umfang solcher Methoden zu bewerten. Welche Prozentsätze der globalen Produktion nutzen bereits diese umweltfreundlicheren Techniken, und wie haben sich diese Zahlen im Laufe der Zeit verändert? Welche anderen innovativen Ansätze werden erforscht und welche Fortschritte wurden hier erzielt?

Auch der Aspekt der Kreislaufwirtschaft ist entscheidend für die Beurteilung des Fortschritts. Wie effizient sind aktuelle Recyclingmethoden im Vergleich zu traditionellen Herstellungsverfahren? Welchen Anteil des Gesamtbedarfs an Metallen kann bereits durch Recycling gedeckt werden, und wie entwickelt sich dieser Anteil?

Die Antworten auf diese Fragen geben Aufschluss darüber, wie weit der Fortschritt der Nachhaltigkeit in der Metallindustrie tatsächlich ist und welche Herausforderungen noch zu bewältigen sind, um die Vision einer vollständig nachhaltigen Metallindustrie zu verwirklichen. Es ist zu hoffen, dass eines Tages alle weltweit im Umlauf befindlichen Metalle in einer Kreislaufwirtschaft geführt werden und keine Primärmetalle mehr produziert werden. Bis es so weit ist, müssen leider weiterhin Erze abgebaut und zu Rohmetall verarbeitet werden, um den Bedarf der Welt zu decken.

---

<sup>106</sup> <https://www.voestalpine.com/blog/de/verantwortung/greentec-steel/unsere-weg-in-eine-gruene-zukunft/> [letzter Zugriff: 20.06.2023]

## Quellenverzeichnis

### Literaturquellen

Fleiter, Tobias / Schlomann, Barbara / Eichhammer, Wolfgang: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013.

Hartl, Roland: Eisen-Gusswerkstoffe. Wien: Mollardgasse Berufsschule für Metalltechnik, Glasbautechnik und Technische Zeichner. Skriptum. SS 2018/19.

Mezera, Karl / Riccabona, Christof: Baukonstruktion 2. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH 2016.

Vasters, Jürgen / Franken, Gudrun: Aluminium - Informationen zur Nachhaltigkeit. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit 2020.

Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012.

## Internet

Agerer, Markus: Eisenwerkstoffe. In: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/56-arten-der-eisenwerkstoffe>  
[letzter Zugriff: 24.04.2023]

Agerer, Markus: Nichteisenmetalle. In:  
<https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/nichteisenmetalle>  
[letzter Zugriff: 20.05.2023]

Agerer, Markus: Stahl – Einfluss der Legierungselemente. In:  
<https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/38-einfluss-legierungselemente-stahl> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

Architektur: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In:  
<https://kupfer.de/anwendungen/bauwesen/architektur/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Chuquicamata: Die größte Kupfermine der Welt. In:  
[https://www.youtube.com/watch?v=-o88IZw38ZM&ab\\_channel=wocomoDOCS](https://www.youtube.com/watch?v=-o88IZw38ZM&ab_channel=wocomoDOCS)  
[letzter Zugriff: 11.06.2023]

Co<sub>2</sub>-minimierte Roheisenproduktion mit vorreduzierten Eisenträgern:  
Herausgegeben von Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). In: [https://www.energy-innovation-austria.at/article/CO<sub>2</sub>-minimierte-roheisenproduktion/](https://www.energy-innovation-austria.at/article/CO2-minimierte-roheisenproduktion/) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Dachrinnen – Vor- und Nachteile der verschiedenen Materialien: Herausgegeben  
von Hausbaumagazin. In: <https://www.hausbaumagazin.at/dachrinnen-vor-und-nachteile-der-verschiedenen-materialien/> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

Das Klimaproblem von Stahl und Zement: Herausgegeben von Orsted Germany GmbH. In: <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/klimaneutrale-industrie-zement-stahl-chemie> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

Der Einsturz der Deponie von Ajka – 2010: Herausgegeben von Fondazione Stava 1985 Onlus. In: <https://www.stava1985.it/der-einsturz-der-deponie-von-ajka-2010/?lang=de> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Der Hochofenprozess – Herstellung von Eisen und Stahl: Herausgegeben von Duden Learnattack GmbH: In: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/der-hochofenprozess-herstellung-von-eisen-und-stahl> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Die Herstellung von Stahl: Herausgegeben von SARL Futura-Sciences. In: [https://www.futura-sciences.com/de/die-herstellung-von-stahl\\_1776/](https://www.futura-sciences.com/de/die-herstellung-von-stahl_1776/) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Diermann, Ralph: Der Öko-Hochofen. In: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/stahl-wasserstoff-klimawandel-1.5065080> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Elektrolichtbogenofen: Herausgegeben von Forschungszentrum Jülich GmbH. In: [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/\\*/\\*/Elektrolichtbogenofen.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2939-2/*/*/Elektrolichtbogenofen.html?op=Wiki.getwiki) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Energiefakten Austria: Grüner Stahl – von Lichtbogenöfen und Ccs-Technologien: Herausgegeben von eecomm GmbH. In: <https://www.ee-news.ch/de/article/49938/energiefakten-austria-gruner-stahl-von-lichtbogenofen-und-ccs-technologien> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Entdeckung von Eisen als Werkstoff: Herausgegeben von INTERSTAHL Service GmbH & Co.KG. In: <https://www.interstahl.com/wiki/geschichte/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

EU-Taxonomie-Verordnung. Herausgegeben von Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). In: <https://www.bmk.gv.at/green-finance/finanzen/eu-strategie/eu-taxonomie-vo.html> [letzter Zugriff: 20.06.2023]

Gewinnung: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In: <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/kupfer/produktionsprozesse/gewinnung> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Green Building: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In: <https://kupfer.de/anwendungen/bauwesen/green-building/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Grimm, Roland: Eisen und Stahl im Bauwesen. In: <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/marktfuehrer-metall-eisen-stahl/> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

Gusseisen: Herausgegeben von Lunitos AG. In: <https://www.chemie.de/lexikon/Gusseisen.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

Gusseisen: Herausgegeben von Silbitz Group GmbH. In: <https://www.silbitz-group.com/de/gusseisen.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

Gusseisen - Welche Eigenschaften hat dieses Material?: Herausgegeben von AA-Kaminwelt. In: <https://www.ofen.de/wissenscenter/infothek/kamin-wissen/gusseisen-welche-eigenschaften-hat-dieses-material> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

Häufig verwendete Materialien im Bauingenieurwesen: Herausgegeben von SkyCiv Engineering. In: <https://skyciv.com/de/technical/steel-vs-timber-vs-concrete/> [letzter Zugriff: 09.06.2023]

Nachhaltigkeit: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In: <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Held, Volkmar: Argumente für Recycling-Weltmeister Stahl. In: <https://www.voestalpine.com/blog/de/verantwortung/umwelt/argumente-fuer-recycling-weltmeister-stahl/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Held, Volkmar: Unser Weg in eine grüne Zukunft. In: <https://www.voestalpine.com/blog/de/verantwortung/greentec-steel/unser-weg-in-eine-gruene-zukunft/> [letzter Zugriff: 20.06.2023]

Kolb, Bernhard: Kupfer – Ökobilanz. In: <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/kupfer> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Kreislaufwirtschaft: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In: <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Kupferdach: Eigenschaften, Vorteile und Kosten: Herausgegeben von eccuro GmbH. In: <https://www.eccuro.com/artikel/720-kupferdach-eigenschaften-vorteile-und-kosten> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

Leichtmetalle: Herausgegeben von Geolitho Stiftung gemeinnützige GmbH. In: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Leichtmetalle> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

Leichtmetalle: Herausgegeben von Lumitos AG. In: <https://www.chemie.de/lexikon/Leichtmetalle.html> [letzter Zugriff: 20.5.2023]

Moos auf dem Dach: Herausgegeben von SteinRein – Ihr Reinigungssteinmetz. In: <https://www.steinrein.com/at/moos-auf-dem-dach/> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

Rau, Luise: Aluminiumrecycling: So funktioniert es. In: <https://utopia.de/ratgeber/aluminiumrecycling-so-funktioniert-es/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Recycling von Aluminium und anderen Metallen: Herausgegeben von thyssenkrupp Schulte GmbH. In: <https://de.materials4me.com/wissen-ideen/werkstoff-aluminium/recycling-von-aluminium/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Recycling: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In: <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/recycling/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Recycling von Kupferwerkstoffen: Herausgegeben von Kupferverband e.V.. In: <https://q9j8s3a5.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Recyclingprozess von Aluminium: Herausgegeben von Joachim Herz Stiftung. In: <https://www.leifichemie.de/anorganische-chemie/metalle-und-erze/grundwissen/recyclingprozess-von-aluminium> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

RECYCLINGWELTMEISTER STAHL: Herausgegeben von RIVA Stahl GmbH. In: [https://www.rivastahl.com/de/corporate\\_responsibility/recyclingweltmeister\\_stahl](https://www.rivastahl.com/de/corporate_responsibility/recyclingweltmeister_stahl)  
[letzter Zugriff: 11.06.2023]

Seilnacht, Thomas: Chrom. In: <https://www.seilnacht.com/Lexikon/24Chrom.htm>  
[letzter Zugriff: 04.06.2023]

Schwermetalle: Herausgegeben von Bundesamt für Verbraucherschutz und  
Lebensmittelsicherheit (BVL). In: [https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/01\\_Lebensmittel/02\\_Unerwuenschte  
StoffeOrganismen/07\\_Schwermetalle/Im\\_schwermetalle\\_node.html](https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/01_Lebensmittel/02_UnerwuenschteStoffeOrganismen/07_Schwermetalle/Im_schwermetalle_node.html) [letzter Zugriff:  
20.05.2023]

Schwermetalle: Herausgegeben von Lumitos AG. In: <https://www.chemie.de/lexikon/Schwermetalle.html> [letzter Zugriff: 20.05.2023]

Stahl: Herausgegeben von Lumitos AG. In: [https://www.chemie.de/lexikon/Stahl.html#Einteilung\\_nach\\_Anwendungsgebieten](https://www.chemie.de/lexikon/Stahl.html#Einteilung_nach_Anwendungsgebieten)  
[letzter Zugriff: 09.06.2023]

Stahlerzeugung: Herausgegeben von Lumitos AG. In: <https://www.chemie.de/lexikon/Stahlerzeugung.html> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Studie: Stahlschrott mindert CO<sub>2</sub>-Ausstoß erheblich: Herausgegeben von  
Recycling Magazin – Trends, Analysen, Meinungen und Fakten zur  
Kreislaufwirtschaft. In: [https://www.recyclingmagazin.de/2019/11/14/studie-  
stahlschrott-mindert-CO<sub>2</sub>-ausstoss-erheblich](https://www.recyclingmagazin.de/2019/11/14/studie-stahlschrott-mindert-CO2-ausstoss-erheblich) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Teil 2: Wie Aluminium erzeugt wird.

[https://www.youtube.com/watch?v=q9zjKBq2ws&ab\\_channel=Langbein%26Partner](https://www.youtube.com/watch?v=q9zjKBq2ws&ab_channel=Langbein%26Partner) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Teil 3: Gefahren für Mensch und Umwelt.

[https://www.youtube.com/watch?v=Dze0wfpYjf0&ab\\_channel=Langbein%26Partner](https://www.youtube.com/watch?v=Dze0wfpYjf0&ab_channel=Langbein%26Partner) [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Was ist die EU-Taxonomie?: Herausgegeben von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). In: <https://www.bmu.de/faq/was-ist-die-taxonomie> [letzter Zugriff: 20.06.2023]

Wasserstoff. Schlüsselement der Energiewende?: Herausgegeben von TÜV NORD AG. In: <https://www.tuev-nord.de/explore/de/entdeckt/was-ist-wasserstoff-einfach-erklart/> [letzter Zugriff: 11.06.2023]

Welche Materialien verarbeitet ein Spengler?: Herausgegeben von Wohnnet. In: <https://www.wohnnet.at/bauen/rohbau/spenglermaterial-23789> [letzter Zugriff: 04.06.2023]

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: groblamellar GJL.....	11
Abb. 2: kugelförmig GJS.....	11
Abb. 3: wurmförmig GJV .....	12
Abb. 4: Baum Skelette im Rotschlamm, Grove, Northern Territory, Australien 1974 .....	29

<https://www.georggerster.com/en/baum-skelette-im-rotschlamm-gove-northern-territory>

## Anhang

Interview mit Hrn. Angeli vom 30.05.2023

1. Welche Art von nachhaltigen Technologien und Innovationen hat Voestalpine implementiert, um die Umweltauswirkungen seiner Produkte und Prozesse zu minimieren?

Sie sind Vorreiter in der Reduktion der Umweltauswirkungen in der Stahlindustrie, einschließlich der Emissionen von Staub und CO<sub>2</sub> und dem Versuch, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

Die Firma hat insbesondere Maßnahmen getroffen, um die Umweltauswirkungen in der Stadt Linz, in der sie ansässig ist, zu reduzieren. Zukünftig plant Voestalpine, eine neue Marke namens "Greentec Steel" einzuführen. Dieser Stahl wird in einem Prozess hergestellt, der darauf abzielt, die Stahlproduktion in Linz kurz- und mittelfristig CO<sub>2</sub>-neutral zu gestalten. Hierzu wird ein Elektrostahlwerk anstelle eines Hochofens in Betrieb genommen, um pro Tonne Stahl mehr CO<sub>2</sub> einzusparen. Diese Veränderung ist ein weiterer Schritt, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stahlproduktion zu reduzieren und damit grüneren Stahl zu produzieren.

2. Wie kann der Stahlbau dazu beitragen, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Gebäuden und Infrastrukturen zu reduzieren, und welche Rolle spielt Voestalpine in dieser Hinsicht?

Voestalpine trägt als Zulieferer von Stahl zum nachhaltigen Bauen bei, da es in der Stahlproduktion Maßnahmen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen umgesetzt hat. Dies kommt nicht nur dem Stahlbau zugute, sondern auch anderen Branchen wie der Automobilindustrie.

Die Firma produziert unter anderem große, flache Stahlplatten sowie dünnes Blech, das auf Coils aufgewickelt wird. Diese Produkte können vielfältig eingesetzt werden. Im Stahlbau können die dicken Platten beispielsweise zugeschnitten und zu Stahlkonstruktionen verschweißt werden. Das dünne Blech kann zu Streifen verarbeitet und in Profile geformt werden, die dann zu Stäben werden. Diese Stäbe können wiederum zu einer Grundkonstruktion für den Stahlbau zusammengeschweißt werden.

In der Automobilindustrie wird besonders dünnes Blech verwendet, das auf eine spezifische Größe zugeschnitten wird. Diese Platten werden dann mit einem Stanzwerkzeug zu Autoteilen wie Türen, Motorhauben oder Kotflügeln verformt. Diese Formgebung ermöglicht es, Bauteile mit den erforderlichen Formen herzustellen.

Durch die Implementierung von CO<sub>2</sub>-reduzierenden Maßnahmen in seiner Stahlproduktion trägt Voestalpine dazu bei, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Gebäuden, Infrastrukturen und Fahrzeugen zu reduzieren.

**3. Wie wird Voestalpine in Zukunft den Einsatz von erneuerbaren Energien in der Stahlproduktion erhöhen und welche Technologien werden dabei eingesetzt?**

Voestalpine plant in der Zukunft, den Einsatz von erneuerbaren Energien in der Stahlproduktion zu erhöhen, indem es auf Wasserstofftechnologie setzt. Derzeit wird in der Stahlproduktion Kohlenstoff verwendet, um Sauerstoff aus Eisenerz zu entfernen und Roheisen zu produzieren, was CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Die Zukunft der Stahlindustrie wird darin bestehen, Kohlenstoff durch Wasserstoff zu ersetzen, was den Sauerstoff bindet und Wasser bildet, anstatt CO<sub>2</sub> zu emittieren.

Wasserstoff wird durch Elektrolyse erzeugt, einem Verfahren, das Strom benötigt, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Um diesen Prozess nachhaltig zu gestalten, muss der dafür benötigte Strom aus erneuerbaren Quellen wie Photovoltaik, Wasserkraft oder Windkraft stammen.

Die Implementierung der Wasserstofftechnologie erfordert zwei neue Produktionsstufen in der Stahlherstellung. Derzeit nutzt ein Hochofen Kohlenstoff, um Sauerstoff zu entfernen und das Eisenerz zu schmelzen, wobei das neue Verfahren diese Funktionen auf zwei Aggregate aufteilen würde: eines zur Reduzierung des Sauerstoffs durch Wasserstoff und eines zum Schmelzen des Eisens mit einem Elektroofen.

Voestalpine hat sich entschlossen, bis 2027 den ersten Elektroofen in Betrieb zu nehmen. In der Zwischenzeit plant das Unternehmen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Erdgas, das Wasserstoff enthält, zu reduzieren, obwohl dieser Prozess immer noch CO<sub>2</sub> freisetzt. Sobald genügend grüne Energie verfügbar ist,

um ausreichend Wasserstoff herzustellen, wird Voestalpine in der Lage sein, fast CO<sub>2</sub>-freien Stahl zu produzieren.

4. Wie arbeitet Voestalpine mit anderen Unternehmen und Organisationen zusammen, um nachhaltige Lösungen für die Stahlproduktion und den Stahlbau zu fördern?

Diese beinhalten das Stahlbau-Segment, die Automobilindustrie und die Elektroindustrie. Sie arbeiten daran, grünen Stahl zu produzieren, der in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden kann, je nach Marktnachfrage.

Vor etwa fünf Jahren hat das Unternehmen begonnen, seine Produktion in Richtung CO<sub>2</sub>-reduzierten Stahl umzustellen, in Reaktion auf Gesetze und zunehmende Kundennachfrage. Kunden, insbesondere in der Automobilindustrie, haben erkannt, dass sie durch die Verwendung von CO<sub>2</sub>-armem Stahl ihren eigenen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck reduzieren können. Dieser Marktdruck hat das Tempo der Änderungen beschleunigt, wobei viele Unternehmen bereits vor den offiziellen Fristen ihre Pläne umsetzen. Das passiert nicht nur in der Automobilindustrie, sondern auch im generellen Stahlbau.

Voestalpine ist dabei, seine Stahlproduktion mit Elektroöfen umzustellen, was zu einer erheblichen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen wird. Dies ist besonders wichtig, da die Stahlindustrie in Österreich, angeführt von der Voestalpine-Gruppe, für den Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Landes verantwortlich ist. Durch diese Änderungen wird eine deutliche Reduzierung der Emissionen erwartet.

5. Wie sieht Voestalpine seine Rolle bei der Förderung von Nachhaltigkeit in der Stahlproduktion und im Stahlbau?

Voestalpine sieht sich als Technologieführer in der globalen Stahlindustrie und strebt an, auch im Bereich Nachhaltigkeit eine Vorreiterrolle einzunehmen. Das Unternehmen hat sich die Förderung von nachhaltiger Stahlproduktion und Stahlbau als strategisches Ziel gesetzt und beabsichtigt, nicht nur den Entwicklungen in diesem Bereich zu folgen, sondern sie aktiv mitzugestalten und anzuführen.

6. Was sind einige der größten Herausforderungen bei der Umsetzung von nachhaltigen Lösungen in der Stahlproduktion und im Stahlbau, und wie geht Voestalpine mit diesen Herausforderungen um?

Die größten Herausforderungen bei der Umsetzung von nachhaltigen Lösungen in der Stahlproduktion und im Stahlbau bestehen für Voestalpine in der Verfügbarkeit von grüner Energie und Wasserstoff. Diese Elemente sind notwendig, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß signifikant zu reduzieren. Insbesondere die Bereitstellung ausreichender Mengen an Wasserstoff ist eine Herausforderung, da das Unternehmen darauf angewiesen ist, dass Dritte die Produktion und Infrastruktur bereitstellen. Bis diese zur Verfügung stehen, plant Voestalpine, in neuen Anlagen zunächst mit Erdgas zu arbeiten und dann später auf Wasserstoff umzustellen. Die Schaffung einer solchen grünen Energie-Infrastruktur in Europa und insbesondere in Österreich ist eine der Hauptaufgaben, vor denen das Unternehmen steht. Sie möchten diese Herausforderung gerne annehmen, sind aber darauf angewiesen, dass die notwendigen Ressourcen zur Verfügung gestellt werden.

7. Welche Vorteile bietet der Einsatz von nachhaltig produziertem Stahl im Vergleich zu herkömmlich produziertem Stahl, und wie unterscheidet sich die Qualität der Produkte?

Voestalpine, als Technologieführer, produziert hochwertigen Stahl, den sie teuer auf dem Markt verkaufen können. Dies ist notwendig, da die Standortkosten (Energiekosten, Personalkosten usw.) in Linz hoch sind. Bei der Umstellung auf einen nachhaltigen Elektro-Lichtbogenofen ist es nicht möglich, nur Schrott zu verwenden, da dies die Stahlqualität drastisch reduzieren würde. Um weiterhin hochwertigen Stahl zu produzieren, sind besondere technologische Anstrengungen erforderlich, um die Qualität des in den Elektro-Lichtbogenofen eingespeisten Schrotts und des reduzierten Eisens zu bestimmen.

Das Aufschmelzen von Schrott ist komplex, da er auch unerwünschte Elemente wie Silizium, Aluminium, Kupfer und Nickel enthält, die durch den Aufschmelzprozess nicht entfernt werden können. Dies begrenzt die Art von Stahl, die produziert werden kann, da bestimmte Eigenschaften (z.B. extra weicher Karosseriestahl) nicht erreicht werden können, wenn diese Elemente im Stahl bleiben.

Eine mögliche Lösung, die Voestalpine in Betracht zieht, ist die Rückführung von qualitativ hochwertigem Schrott, wie z.B. die Abfälle von BMW und Audi, die aus Voestalpines eigenem Blech entstehen. Dies würde einen "premium" Schrott liefern, der in der Produktion verwendet werden könnte. Es wird jedoch betont, dass das Aufbereiten und Sortieren von Schrott eine zusätzliche Herausforderung ist.

**8. Welche Rolle spielt die Kreislaufwirtschaft bei der Stahlproduktion und wie wird sie von Voestalpine umgesetzt?**

Das Unternehmen strebt an, so viel Schrottmaterial wie möglich mit hoher Qualität zurückzugewinnen, um es in seinem Produktionsprozess wiederverwenden zu können. Je höher die Qualität des Schrotts, desto mehr kann Voestalpine diesen in einem Kreislauf wiederverwenden. Theoretisch könnten sie sogar ohne neue Rohstoffe auskommen, obwohl dies in der Praxis nicht der Fall ist.

Die Fähigkeit, Materialien zu recyceln und wiederverwenden, bekommt eine immer höhere Bedeutung in der Stahlindustrie. Daher legt Voestalpine einen starken Fokus auf das Aufbereiten von Schrott und bemüht sich, qualitativ hochwertigen Schrott von ihren Kunden zurückzubekommen. In diesem Sinne ist die Kreislaufwirtschaft ein integraler Bestandteil ihrer Produktionsstrategie.

**9. Wie sieht die Zukunft der nachhaltigen Stahlproduktion und des Stahlbaus aus, und welche Rolle spielt Voestalpine bei der Gestaltung dieser Zukunft?**

Das Unternehmen steht im Einklang mit den Trends der europäischen Stahlindustrie, die sowohl durch die Gesetzgebung als auch durch den Druck ihrer Kunden geformt werden. Diese Kunden kommen aus verschiedenen Branchen, einschließlich des Stahlbaus, der Automobilindustrie und der Elektroindustrie. Sie alle beeinflussen die Entwicklung und Nachfrage nach nachhaltigem Stahl.

**10. Wie plant Voestalpine, die Energieeffizienz in der Stahlproduktion zu erhöhen und welche Maßnahmen wurden bisher ergriffen?**

Voestalpine ist bestrebt, die Energieeffizienz in der Stahlproduktion kontinuierlich zu steigern, wie auch in ihrem Nachhaltigkeitsbericht festgehalten wird. Energie stellt Kosten dar, die das Unternehmen natürlich optimieren möchte. Zusätzlich ist die Reduzierung von Emissionen ein zentraler Punkt in ihrer Strategie. Sie streben

danach, alle Abfallstoffe und wiederverwertbaren Stoffe in ihrer Produktion zu recyceln und in den Prozess zurückzuführen. Beispiele dafür sind die Reinigung und Wiederverwendung von Abwasser durch Grauwassertechnologie und die sofortige Rückführung von Schrottresten in die Produktion. Dies trägt dazu bei, den Energieverbrauch zu senken, da nicht ständig neue Ressourcen mit hoher Energie aufgewendet werden müssen. Allerdings wird die Verbesserung der Energieeffizienz mit der Zeit schwieriger und erfordert immer größere Anstrengungen.

#### **11. Für welche Bereiche im Bauwesen wird Stahl am meisten hergestellt?**

Im Bauwesen wird Stahl hauptsächlich für Profile wie Stützen und Drahtgerüste hergestellt, die in Betonstrukturen verwendet werden, um deren Stabilität zu erhöhen. Stahlprodukte wie A-Profile werden beispielsweise in Krems hergestellt, indem sie umgeformt und zusammengeschweißt werden. Andere Produkte wie L- oder T-Profile werden direkt in einem festen Zustand gegossen und gewalzt. Diese werden hauptsächlich im konstruktiven Grundgerüstbau verwendet, der das Skelett von Infrastrukturen wie Hochhäusern bildet.

Darüber hinaus gibt es dünnere Stahlbleche, die lackiert und als Fassadenelemente verwendet werden. Ein Beispiel dafür sind Gebäudehüllen, die aus zwei Stahlblechen bestehen, die einen PU-Schaum einschließen, um Fertigteillemente zu schaffen. Diese können dann leicht installiert werden, um eine Halle oder ein ähnliches Gebäude zu bilden. Je dicker das Blech ist, desto wahrscheinlicher wird es im Skelettbau verwendet.

#### **12. Wieviel Stahl wird recycelt im Vergleich zu neu produziert?**

Mit dem Einsatz von Elektrohochöfen wird mehr Stahl recycelt als neu produziert, da mehr Schrott verwendet werden kann. Es wird erwartet, dass die Recyclingrate steigt, aber der Schrottmarkt in Europa ist nicht unendlich, und es könnte eine Knappheit eintreten. In solchen Fällen könnte Europa Schrott aus anderen Ländern importieren, aber das könnte die Kosten erhöhen und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Transports vergrößern.

Die Kosten für Schrott sind ein wichtiger Faktor in der Stahlproduktion, und höhere Schrottpreise könnten die Kosten für Stahl erhöhen. In der Zukunft könnte es eine neue Dynamik geben, in der der Preis für Eisenerz und Erdgas sowie der Schrottpreis die Kosten für Stahlprodukte bestimmen.

Wenn es zu einer Knappheit kommt und nicht genug Schrott für die Stahlproduktion verfügbar ist, könnten Hersteller gezwungen sein, mehr Stahl neu zu produzieren. Dies würde allerdings vom Bedarf der Kunden abhängen. Darüber hinaus kann die Verfügbarkeit von Schrott eine natürliche Grenze für die Menge an Stahl setzen, die durch Recycling produziert werden kann. Dies könnte bedeuten, dass nicht alle Elektroöfen zu 90% mit Schrott versorgt werden könnten.

Um die Balance zu halten, könnte eisenhaltiges Material, das mit Erdgas oder Wasserstoff reduziert wurde, als Ersatz für Schrott in Elektroöfen verwendet werden. Dieser Mix würde dazu beitragen, das Defizit auszugleichen, wenn die verfügbare Menge an Schrott begrenzt ist. Der Überschuss würde dann mit eisenhaltigen Substanzen aufgefüllt, die aus Eisenerz gewonnen wurden. Auf diese Weise wird sich das Verhältnis zwischen Recycling und neuer Produktion einpendeln.

**13. Geht beim Recycelprozess von Stahl was verloren, oder ist er zu 100% recycelbar?**

Im Prinzip ist Stahl zu 100% recycelbar. Die Verwendung des Schrotts hängt jedoch von der gewünschten Stahlqualität ab. Wenn hochwertiger Stahl benötigt wird, kann theoretisch 100% des Schrotts verwendet werden, vorausgesetzt, er ist homogen und von hoher Qualität.

Bei minderwertigem Schrott muss mehr erzbasiertes Eisen verwendet werden, was den Prozess komplexer macht. Man kann sich das vorstellen wie bei einem Rezept in der Küche: Schrott und erzbasiertes Eisen sind wie zwei Zutaten, die in der richtigen Kombination das gewünschte Ergebnis ergeben. Je nach Qualität des Schrotts kann das Verhältnis der beiden Zutaten variiert werden.

Diese Anpassungen ermöglichen es auch, minderwertigeren Schrott zu verwenden. Diese Art von Anpassung und Optimierung ist ein neues und spannendes Feld in

der Wissenschaft, dass weitere Forschung erfordert, um das optimale Verhältnis für die Stahlproduktion zu bestimmen.

#### **14. Wie hoch ist der Verschmutzungsgrad von Recycelmaterial?**

In der Schrottindustrie existieren verschiedene Schrottklassen, die den Verschmutzungsgrad des Materials widerspiegeln. Es gibt eine Ve.V.hI von Klassen, von "0815", das alle Arten von Material enthält, bis hin zu höherwertigen, sortierten Klassen, die als sauber gelten.

Die Qualität des Schrotts hängt von der Sammlung und Sortierung ab. Einige Sammler komprimieren den gesammelten Schrott einfach in Paketen und verkaufen ihn als "0815".

Andere Sammler sortieren das Material vor dem Verkauf aus, was zu einer höheren Qualität des Schrotts führt. Der Grad der Aussortierung beeinflusst die Qualität des Schrotts stark. Wenn Schrott gekauft wird, wird nicht einfach "Schrott" gekauft, sondern eine spezifische Schrottklasse mit einer bestimmten Kennzeichnung. Diese Kennzeichnung informiert über die Reinheit und die Größe der Teile und bietet eine klare Definition von dem, was gekauft wird. Es könnte auch eine Norm dafür geben, die weitere Klarheit bietet.

#### **15. Gibt es Putzmittel, um den Verschmutzungsgrad zu minimieren und vor dem Recyceln das Material „aufzubereiten“?**

Es gibt verschiedene Methoden, um Verschmutzungen auf Schrott vor dem Recycling zu minimieren. Diese Methoden hängen von der Art der Verschmutzung ab und ob das Material metallisch oder nichtmetallisch ist.

Für nichtmetallische Materialien wie Staub, Schmutz oder Kunststoffabfälle können Luftströme verwendet werden, um diese leichten Materialien zu entfernen, da der Schrott schwerer ist und auf dem Gitter liegen bleibt.

Für metallische Materialien können magnetische und nichtmagnetische Materialien unterschieden werden. Bei bestimmten Metallen, wie hoch- und niedriglegierten Stählen, kann dies jedoch schwieriger sein. Zum Beispiel kann die Unterscheidung zwischen Kupfer und Eisen problematisch sein, da beide metallisch sind.

Die Entfernung von Verschmutzungen kann durch mechanische, physikalische und "chemische" Methoden erreicht werden. Je teurer oder hochwertiger der Schrott ist, desto mehr Aufwand wird in die Aussortiertechnik investiert, was die Kosten erhöht. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass es fast unmöglich ist, alle Verunreinigungen zu entfernen, es bleibt immer ein gewisses Maß an Verschmutzung übrig. Dieses Problem der Materialreinigung und -trennung ist ein eigenes Forschungsfeld und sehr komplex.

**16.** Kann man bei 100% recycelten Stahl dieselbe Stahlgüte erzielen, wie bei neu produziertem Stahl?

Die Möglichkeit, bei 100% recyceltem Stahl dieselbe Qualität wie bei neu produziertem Stahl zu erreichen, hängt von der gewünschten Stahlgüte ab. Bei weniger anspruchsvollen Stahlgüten ist es durchaus möglich, diese nur aus recyceltem Material zu produzieren. Bei sehr hochwertigen Stahlgüten hingegen ist dies nicht möglich. Für diese Güten muss zusätzlich frisches, erzbasiertes Material hinzugefügt werden, um die benötigte Qualität zu erzielen.

**17.** Gibt es einen Unterschied beim Energieaufwand und den Kosten von Recycelten und frischem Material bei derselben Stahlqualität?

Die Energie und Kosten für das Recycling von Stahl im Vergleich zur Produktion von frischem Material hängen stark von der Qualität des recycelten Materials und den spezifischen Anforderungen an den Stahl ab. Schrott, der eingeschmolzen werden muss, erfordert einen erheblichen Energieaufwand, was auch zu höheren Kosten führen kann. Aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach Schrott könnte dieser auch teurer werden, da er zu einer Mangelware wird.

Die Logik legt nahe, dass die Herstellung von recyceltem Stahl nicht billiger wird, insbesondere wenn man bedenkt, dass mehr Energie und Ressourcen investiert werden müssen. Das kann letztlich dazu führen, dass Kunden mehr für CO<sub>2</sub>-armen Stahl zahlen müssen. Allerdings kann man das nicht genau quantifizieren und es bleibt eine Frage des Marktes. Die meisten Stahlhersteller sind jedoch der Meinung, dass die Kosten für die Stahlproduktion im Allgemeinen wahrscheinlich steigen

werden, wenn man sich auf umweltfreundlichere Praktiken zubewegt. Es ist jedoch unklar, wie hoch diese Kostensteigerung pro Tonne Stahl sein wird.

**18.** Beim Recyceln von Legierungsstählen, wie schaut der Prozess aus, bei dem die Legierungen entnommen werden? Wie werden legierte Stähle zerteilt? Wie schafft man es so viele verschiedene Legierungen zu trennen?

Bei der Wiederverwertung von legierten Stählen ist die Trennung der Legierungen ein komplexer Prozess. Zunächst werden andere Materialien wie Glas, Mineralien und Kunststoff aus dem Schrott entfernt, so dass nur noch Stahl übrig bleibt. Dieser Stahl kann in legierte und unlegierte Stähle unterteilt werden. Legierte Stähle enthalten zusätzliche Elemente wie Chrom, Nickel oder Vanadium.

Ein erster Trennschritt ist die Unterscheidung zwischen magnetischen und nichtmagnetischen Stählen. Hochlegierte Stähle, die nicht magnetisch sind, können so von niedriglegierten, magnetischen Stählen getrennt werden.

Für Legierungselemente, die im Stahl gebunden sind, wie beispielsweise Chrom, ist eine Trennung erst im flüssigen Zustand des Stahls möglich. Wenn der Stahl flüssig ist, reagiert das Chrom mit einer Schlacke. Diese Schlacke, eine Art Kalk, nimmt dann die Chromatome auf. Bei der Abkühlung schwimmt die Schlacke an der Oberfläche und wird entfernt, während der gereinigte Stahl durch ein Loch am Boden des Behälters abgelassen wird. Auf diese Weise werden die Begleitelemente, die sich in der Schlacke befinden, getrennt.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Methode nicht für alle Legierungselemente funktioniert. Beispielsweise bleibt Kupfer, das nicht sauerstoffaffin ist, im Stahl enthalten und kann nicht auf diese Weise entfernt werden. Einige Elemente, wie Mangan, Eisen, Silizium und Aluminium, die leicht oxidieren, können dagegen in die Schlacke übergehen und sind daher einfacher zu trennen. Kupfer und ähnliche Elemente bleiben jedoch im Stahl und können seine Eigenschaften beeinflussen, beispielsweise dazu führen, dass der Stahl zu weich wird.

**19.** Was ist die Hybrid-Elektrostahlroute?

Die Hybrid-Elektrostahlroute bezeichnet eine Mischung aus der konventionellen Hochofenroute und der Elektroofenroute zur Stahlerzeugung. In diesem speziellen Fall ersetzt voestalpine einen ihrer kleineren Hochöfen durch einen Elektroofen, was ihnen erlaubt, sowohl traditionell erzeugten Stahl als auch "grünere" Stahl zu produzieren, der durch das Einschmelzen von Schrott entsteht.

Diese Mischung aus den beiden Routen wird als "Hybrid" bezeichnet. Etwa ein Viertel (1,5 Millionen Tonnen) der jährlichen Stahlproduktion von voestalpine (6 Millionen Tonnen) wird dabei durch den Elektroofen erzeugt. Das Unternehmen plant, weitere Elektroöfen hinzuzufügen und so den Anteil des grünen Stahls zu erhöhen. Bis alle Hochöfen ersetzt sind und voestalpine komplett auf Elektrostahl umgestellt hat, wird von einer Hybrid-Variante gesprochen.

## Einverständniserklärung zur Verwendung eines Interviews in der Bachelorarbeit

Ich, Dr. Angeli Johann, stimme hiermit der Verwendung des Interviews, das am 30.05.2023 geführt wurde, in der Bachelorarbeit von Nicole Kainrath, mit dem Titel „Metall in der Architektur“, zu.

Die Daten werden im Rahmen eines mündlichen Gesprächs erhoben, das mit einem Aufnahmegerät aufgezeichnet wurde. Zum Zwecke der Datenanalyse werden die mündlich erhobenen Daten verschriftlicht.

Ich verstehe, dass meine Aussagen in der Arbeit zitiert und diskutiert werden können.

Ich bestätige hiermit, dass ich über meine Rechte und Zwecke der Verwendung des Interviews informiert wurde und dass ich freiwillig zustimme, mein Interview in der Bachelorarbeit zur Verwendung freizugeben.

Das Einverständnis zur Aufzeichnung und Weiterverwendung der Daten kann jederzeit widerrufen werden.



Unterschrift Interviewpartner:



Datum:

Unterschrift Interviewender:

