

# Keine Erfindung ohne geeigneten Werkstoff

Dr. Brigitte Mayer und Dr. Michael Marz

4. Oktober 2017

## 1 Werkstoffkunde - so ungeliebt wie wichtig?

Werkstoffkunde ist in jedem ingenieurwissenschaftlichen Studiengang ein zentrales Fachgebiet. Von Studierenden jedoch wird es oftmals weniger geliebt mit der Begründung „zu viel Chemie“, „zu viel Physik“ und zudem sei vieles doch nur „Auswendiglernerei“.

Ohne naturwissenschaftliche Grundlagenkenntnisse lassen sich Werkstoffeigenschaften aber kaum verstehen. Wer einen Werkstoff verstanden hat, muss weniger auswendig lernen.

Wie wichtig ein geeigneter Werkstoff wiederum für die Verwirklichung einer Erfindung ist, zeigt sich eindrucksvoll am nachfolgenden Beispiel.

## 2 Da Vincis Luftschraube - die Ur-Idee bleibt unverwirklicht

Leonardo da Vincis Luftschraube<sup>1</sup>, die er Helix Pteron nannte, war zugleich Inspiration wie Ansporn für eine technische Neuentwicklung, die den Menschheitstraum der Luftfahrt revolutionieren sollte, **den Hubschrauber**. Diese Erfindung war deshalb revolutionär, weil in der Natur keine Vorbilder dafür existieren. Natürlich vorkommende Drehflügler, beispielsweise Ahornsamen, sind antriebslose Flugsysteme, die zwar schweben, obwohl sie schwerer als Luft sind, nicht aber eigenständig vom Boden abheben können. Vielleicht hatte das Universalgenie die schon lange bekannte archimedische Wasserschraube im genialen Hinterkopf, als er seine berühmte Zeichnung anfertigte.

Jedenfalls hatte da Vinci **grundlegende Erkenntnisse über den Auftrieb** entdeckt, und dennoch stieg seine „geflügelte Wendel“ niemals in die Lüfte. Als er Ende des 15. Jahrhunderts seine Idee zu Papier brachte, gab es nämlich *weder geeignete Werkstoffe*, aus denen seine Luftschraube gefertigt werden, *noch einen ausreichend starken Motor*, der sie antreiben hätte können.

Erst vier Jahrhunderte später erfand der Ingenieur **Nikolaus August Otto**<sup>2</sup> mit dem **Verbrennungsmotor** einen ausreichend starken Antrieb, um größere Gewichte in die Luft zu erheben, und nochmals rund vier Jahrzehnte vergingen, bevor der erste senkrecht startende Hubschrauber tatsächlich

<sup>1</sup>Quelle online: [de.wikipedia.org/wiki/Luftschraube\\_\(Leonardo\\_da\\_Vinci\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Luftschraube_(Leonardo_da_Vinci)), abgerufen am: 21.09.2017

<sup>2</sup>Quelle online: [de.wikipedia.org/wiki/Ottomotor](http://de.wikipedia.org/wiki/Ottomotor), abgerufen am: 21.09.2017

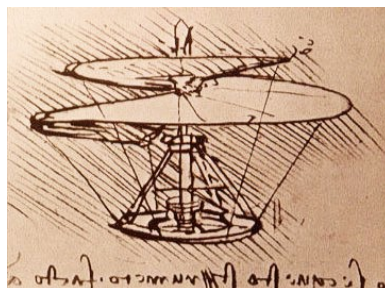


Abbildung 1: Die Luftschraube Leonardo da Vincis; Bildquelle online: [commons.wikimedia.org/wiki/Image:Leonardo\\_da\\_Vinci\\_helicopter\\_and\\_lifting-wing.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Leonardo_da_Vinci_helicopter_and_lifting-wing.jpg) abgerufen am: 21.09.2017

vom Erdboden abhob. Zahlreiche technische Probleme, vor allem der Flugsteuerung und des Drehmoment-Ausgleichs mussten gelöst werden, zu denen Leonardo gar nicht erst vorgestoßen war. Und nicht zuletzt machte erst die Entwicklung **leichter, und zugleich stabiler Struktur- und Funktionswerkstoffe** den späteren Siegeszug des *Helikopters* möglich, der damit noch heute jenen Namen trägt, den ihm einst sein Zeichner gegeben hatte.

### 3 Ein Werkstoff, der leicht und zugleich stabil genug ist um zu „beflügeln“: Aluminium

Aluminium ist ein silbrig-glänzendes **Leichtmetall**. Verglichen mit Stahl bringt es bei gleicher Festigkeit nur etwa die Hälfte an Gewicht auf die Waage<sup>3</sup>. In all jenen technischen Bereichen, in denen Gewichtsersparnisse weitaus wichtiger als Materialkosten sind, sind Aluminium und seine Legierungen Werkstoffe der Wahl. In der Schmelze lässt sich Aluminium mit einer Vielzahl von Elementen vermengen, die wiederum die Eigenschaften des Werkstoffs, beispielsweise seine vielfältigen **Be- und Verarbeitungsmöglichkeiten**, seine **Korrosionsbeständigkeit** oder seine **Festigkeit** beeinflussen. Auch wenn reines Aluminium herzustellen teuer ist, weil es nur mit hohem Energieaufwand aus dem Mineral Bauxit<sup>4</sup> herausgelöst werden kann, hat es von Anfang an die Luft- und Raumfahrt im wahrsten Sinne des Wortes „beflügelt“.

### 4 Einen Werkstoff „verstehen“

Aluminium kristallisiert wie viele technisch wichtigen Metalle in einem kubisch-flächen-zentrierten Gitter (kfz-Gitter), d.h. in der kubisch-dichtesten Atompackung mit einer Packungsdichte von 74 %. Bereits daraus ergeben sich viele seiner mechanischen Eigenschaften. So ist reines Aluminium ein *zähes*, also gut verformbares, aber auch *weiches* Metall. Der deutsche Chemiker Alfred Wilm entdeckte Anfang des 20. Jahrhunderts, dass sich die geringe Härte reinen Aluminiums durch den Zusatz weiterer Elemente wie Kupfer und Magnesium deutlich steigern lässt. Seine patentierte Erfindung **Dural**<sup>5</sup>, übersetzt das „harte Aluminium“, erhält seine Festigkeit durch fein verteilte Ausscheidungen, die Verformungsmechanismen blockieren und damit den Werkstoff verfestigen.

In vielerlei Hinsicht spielen **Radienverhältnisse** dabei eine entscheidende Rolle. Sie bestimmen beispielsweise, ob sich einwandernde Teilchen auf Gitterplätze schieben und dabei andere substituieren, sich auf **Zwischengitterplätzen** einlagern, oder sich intermetallische Phasen mit kompliziert gebauten Gitterstrukturen ausbilden können. Jeder dieser Prozesse für sich bzw. aufsummiert kann zu einer mehr oder minder großen Festigkeitszunahme gegenüber dem Ausgangsmaterial führen.

Zum besseren Verständnis der Bandbreite, mit der sich das Fach Werkstoffkunde beschäftigt, bietet sich beispielsweise die Berechnung einer atomaren Abmessung aus einer makroskopischen Messgröße als Einstieg an. (Ähnliche und weiterführende Aufgaben in Standardwerken der Werkstoffkunde.)

### 5 Abschätzung der Atomgröße aus gegebener Dichte und Gittertypus

Sind Dichte und Gittertyp eines kristallinen Reinstoffes (Vollmaterial) bekannt, lässt sich beispielsweise die Atomgröße des Gitterbildners wie folgt abschätzen:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Die Masse des Reinstoffes berechnet sich aus dem Produkt von Stoffmenge und molarer Masse:

$$m = n \text{ [mol]} \cdot M_m \left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \quad (2)$$

<sup>3</sup>Quelle online: de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung\_Chemie/\_Dichte\_fester\_Stoffe, abgerufen am: 21.09.2017

<sup>4</sup>Holleman-Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Auflage, de-Gruyter, 2007, Kap.2 Das Aluminium

<sup>5</sup>Quelle online: de.wikipedia.org/wiki/Duraluminium, abgerufen am: 21.09.2017

Die Stoffmenge in einer Elementarzelle des Gitters ergibt sich wiederum aus dem Verhältnis von Teilchenanzahl zur Avogadro-Konstanten:

$$n = \frac{N}{N_A} \left[ \frac{\text{Teilchen}}{\text{mol}} \right] \quad (3)$$

Einsetzen der Gleichungen (2) und (3) in (1) liefert dann:

$$\rho = \frac{N \cdot M_m}{N_A \cdot V} \quad (4)$$

Um die Atomgröße abzuschätzen, wird die Gleichung (4a) nach dem Volumen aufgelöst:

$$V = \frac{N \cdot M_m}{N_A \cdot \rho} \quad (5)$$

Wobei das Volumen  $V$  dem Volumen der Elementarzelle (EZ) entspricht, so dass gilt:

$$V = V_{EZ} \quad (6)$$

Die Anzahl der Teilchen in einer Elementarzelle (siehe Abbildung 2) ergibt sich aus dem Gittertyp. So sind in einer **kfz-Gitterzelle**

$$8 \cdot \frac{1}{8} \text{ Eckatome} + 6 \cdot \frac{1}{2} \text{ Flächenatome} = 4 \text{ Atome pro Zelle} \quad (7)$$

enthalten.

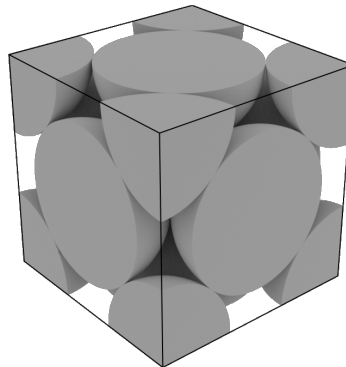


Abbildung 2: Elementarzelle im kfz-Gitter (Raumerfüllung)<sup>6</sup>

Im kfz-Gitter beträgt die Raumnutzung durch dichteste Kugelpackung 74 %, oder anders ausgedrückt:

$$\text{Packungsdichte} = \frac{4 \cdot V_K}{V_{EZ}} = 0,74 \quad (8)$$

Einsetzen von Gleichung (8) in (5) liefert:

$$V_K = \left( \frac{0,74}{4} \right) \cdot V_{EZ} = 0,74 \cdot \frac{M_m}{N_A \cdot \rho} \quad (9)$$

Mit dem Kugelvolumen  $V_K = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3$  errechnet sich der Atomradius  $R$  schlussendlich zu:

$$R_K = \sqrt[3]{\frac{(3 \cdot V_K)}{(4 \cdot \pi)}} = \sqrt[3]{\frac{(3 \cdot 0,74 \cdot M_m)}{4 \cdot \pi \cdot N_A \cdot \rho}} \quad (10)$$

<sup>6</sup>Bildquelle online: [commons.wikimedia.org/wiki/File:Elementarzelle\\_einer\\_Kubisch\\_primitiven\\_Elementarzelle.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elementarzelle_einer_Kubisch_primitiven_Elementarzelle.png)  
abgerufen am: 21.09.2017

Nach Einsetzen der Zahlenwerte für Aluminium:  $M_{mol} = 26,98 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$  und  $\rho_{Al} = 2,71 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ergibt sich näherungsweise für den Atomradius  $R_{Al}$ :

$$R_{Al} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,74 \cdot 26,98 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{4 \cdot \pi \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \cdot 2,71 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}} = 1,43 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad (11)$$

Mit der Umrechnung von  $1 \text{ pm} = 10^{-10} \text{ cm}$  ergibt sich für Aluminium ein Atomradius von etwa **143 pm**.

Als Entscheidungskriterium für die Einlagerung von Teilchen versus der Substitution von Gitteratomen betrachtet man die Größenverhältnisse der Zwischengitterplätze.

## 6 Radienverhältnis in einer Oktaederlücke des kfz-Gitters

Im kfz-Gitter berühren sich die dichtest gepackten Kugeln entlang der Flächendiagonalen  $d_F$ , so dass sich die Kantenlänge der Einheitszelle (= Gitterparameter  $a$ ) und der Atomradius  $R$  in Beziehung setzen lassen:

$$d_F = \sqrt{2} \cdot a = 4 \cdot R \quad (12)$$

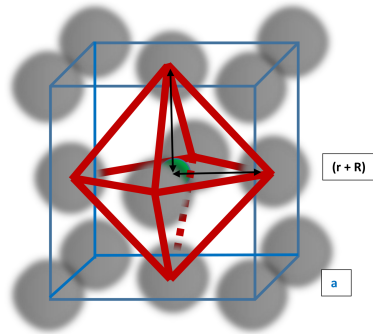


Abbildung 3: (zentrale) Oktaederplätze im kfz-Gitter.

In der Elementarzelle des kfz-Gitters ergeben sich dementsprechend **4** oktaedrisch koordinierte Zwischengitterplätze (Oktaederlücke/n, OL):

$$1 \cdot 1 \text{ Zentrale OL} + 12 \cdot \frac{1}{4} \text{ Kanten-OL} = 4 \text{ OL} \quad (13)$$

Die „Größe“ dieser Oktaederlücke (siehe Abbildung 3 Zentrale Oktaederlücke) lässt sich als Radienverhältnis von eingelagertem Atom mit Radius  $r$  zu gitterbildendem Atom  $R$  abschätzen:

$$a = 2 \cdot (r + R) \quad (14)$$

Einsetzen von Gleichung (12) in Gleichung (14) liefert dann:

$$2 \cdot (r + R) = \frac{4 \cdot R}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Auflösen nach dem Radienverhältnis:

$$\frac{r}{R} = \sqrt{2} - 1 \simeq 0,414 \quad (16)$$

Die Oktaederlückengröße ist somit unabhängig von den Radien selbst, nur ihr Verhältnis zueinander entscheidet, ob und in welchem Ausmaß sich Teilchen in ein Gitter einlagern können.

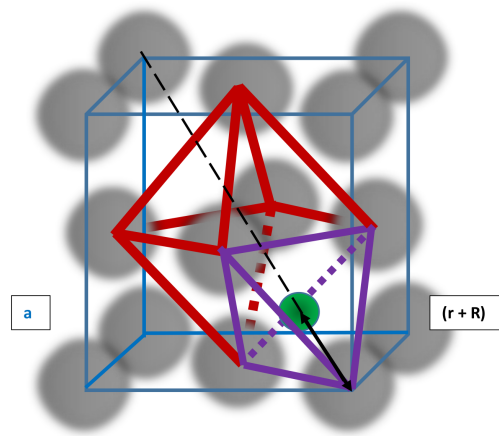


Abbildung 4: Tetraederplätze im kfz-Gitter.

Neben den Oktaederlücken gibt es auch **8** tetraedisch koordinierte Zwischengitterplätze (siehe Abbildung 4 Tetraeder mit Oktaederfläche als Basis).

Dabei liegen je 2 Tetraederzentren auf einer Raumdiagonalen:

$$d_R = 4 \cdot (r + R) = \sqrt{3} \cdot a \quad (17)$$

Damit ergibt sich mit Gleichung (7):

$$4 \cdot (r + R) = \sqrt{3} \cdot \frac{4 \cdot R}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

Auflösen nach dem Radienverhältnis liefert schließlich:

$$\frac{r}{R} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} - 1 \simeq 0,225 \quad (19)$$

Bis zu einem gewissen Anteil lassen sich also kleine Nicht-Metall-Atome auf Zwischengitterplätzen in einem Werkstoff einlagern, ohne dass sich sein Volumen deutlich ändert.

Das bekannteste Beispiel eines eingelagerten Nicht-Metall-Atoms in ein Wirtsgitter ist in Eisen gelöster Kohlenstoff. Die Fe-C-Legierung (bis zu einem C-Gehalt von maximal 2,06 Ma%) heißt Stahl<sup>7,8</sup>.

Ein **thermo-chemisches Verfahren** um Randschichten eines unlegierten Eisenwerkstoffes zu härten, ist das „Aufkohlen“<sup>(8)</sup>. In das kfz-Gitter der  $\gamma$ -Modifikation von Eisen können abhängig von der Temperatur C-Atome statistisch verteilt auf Oktaederlücken eingelagert werden. Allerdings ist bei einem Radienverhältnis<sup>9</sup> von  $r_C$  zu  $R_{Fe}$  von 0,5 die Oktaederlücke etwas zu klein, so dass es zu Gitterverzerrungen kommt. Was wiederum erklärt, dass nur ein relativ geringer Anteil an Kohlenstoff (temperaturabhängig) im Gitter gelöst werden kann. Dennoch reicht dieser Anteil aus, um die Eigenschaften der Werkstoffrandschicht entscheidend zu verändern.

**Fazit:** Je besser ein Werkstoff mechanistisch verstanden ist, umso besser lassen sich seine Eigenschaften im Anschluss „maßschneidern“.

<sup>7</sup>Taschenbuch der Werkstoffe, 7. Auflage, Hanser, 2008, Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe

<sup>8</sup>Taschenbuch der Werkstoffe, 7. Auflage, Hanser, 2008, Eisen-Legierungen

<sup>9</sup>Quelle online: de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoff und de.wikipedia.org/wiki/Eisen, abgerufen am: 21.09.2017