



networking



advanced materials

Versuch: Formgedächtniseffekt

- Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe -

Prof. Dr. -Ing. Frank Mücklich

Kann ein Werkstoff ein „Gedächtnis“ besitzen oder alles nur fauler Zauber?

Erklärung des Formgedächtniseffektes am Beispiel der thermischen Formgedächtnislegierung NiTi (Nickel-Titan)

Versuchsbeschreibung:

In diesem Versuch wird mit Hilfe von elektrischem Strom, heißem Wasser und heißer Luft der Formgedächtniseffekt einer NiTi-Legierung verdeutlicht.

Ausstattung:

- Gestell zur Halterung des NiTi-Drahtes
- Netzteil
- Eventuell Wasserkocher
- Eventuell Fön

Versuchsanordnung (Vorderansicht):

Bild Versuchsaufbau

Der NiTi-Draht soll wie auf obiger Abbildung eingespannt und mit dem Gewicht verbunden werden. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass sich die Relaischaltung am NiTi-Draht befindet, so dass die Stromquelle nach einer gewissen Zeit automatisch wieder abgeschaltet wird. Ist dies alles korrekt miteinander verbunden, kann das Netzteil angeschlossen und der Versuch gestartet werden.

Bevor Sie den Versuch starten, machen Sie sich bitte zuerst um folgende Fragestellung Gedanken oder diskutieren Sie in der Klasse, was Sie bei dem Versuch erwarten.

1. Was passiert, wenn man einen elektrischen Strom durch das Material fließen lässt? Erwärmt es sich?
2. Was passiert, wenn sich ein Material erwärmt? Zieht es sich zusammen oder dehnt es sich aus?
3. Auf welchen Grundlagen könnten diese Effekte beruhen?

Nachdem Sie die Fragestellungen beantwortet haben, starten Sie bitte den Versuch und beurteilen, ob die Beobachtungen bei der Durchführung des Versuches wirklich den Erwartungen entsprechen.

Verblüfft Sie das Experiment?

-Formgedächtniseffekt-

Schildern Sie bitte die gemachten Beobachtungen, notieren Sie sich diese bitte und stellen Sie erste Vermutungen an, warum sich das Material so verhält!

Damit Sie uns glauben, dass dieser Effekt nicht durch einen faulen Zauber geschieht, führen Sie bitte einen ähnlichen Versuch mit heißem Wasser bzw. einem Föhn durch. Hierzu verbiegen sie einen NiTi-Draht und erwärmen ihn anschließend mit dem Föhn.

Frage: Was beobachten Sie? Hätten Sie das erwartet? Schreiben Sie sich bitte ihre Beobachtungen auf!

Ein weiterer kleiner Versuch schließt sich nun im Folgenden an: Hierzu benötigen Sie eine Schale mit heißem Wasser (Vorsicht: Verbrennungsgefahr). Bitte verbiegen Sie den NiTi-Draht und tauchen ihn dann in das heiße Wasser. Anschließend nehmen Sie den Draht aus dem Wasser und lassen ihn an der Luft abkühlen.

Frage: Was beobachten sie hier? Haben Sie vielleicht eine Vermutung mit welcher physikalischen Größe diese Effekt zu tun hat? Diskutieren Sie in der Klasse darüber!

Erklärung:

Sie haben jetzt 3 Versuche gesehen oder selbständig durchgeführt, welche alle, mehr oder weniger direkt, etwas mit dem Temperatur zu tun hatten. Im Folgenden werden wir nun versuchen den verblüffenden und interessanten Formgedächtniseffekt etwas zu erklären.

Wie Sie alle aus dem Chemieunterricht wissen, besteht ein Element aus einer unterschiedlichen Anzahl von Elektronen und Protonen. Vereinfacht bildlich dargestellt findet man die Situation so vor, dass die Elektronen um den Atomkern kreisen und sich auf Bahnen bewegen bzw. in Schalen aufhalten.

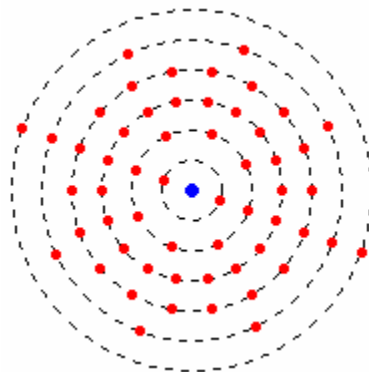


Bild 1

In Bild 1 stellen die roten Kugeln die Elektronen dar, die sich auf Bahnen um den Atomkern (hier blau) befinden.

Die einzelnen Elemente können sich untereinander verbinden. Die verschiedenen Bindungsmöglichkeiten hängen speziell von den Bindungseigenschaften der Elemente ab. Man unterscheidet zwischen Atombindung, Ionenbindung, metallischer Bindung und Van-der-Waals Bindung, um nur einige zu nennen. Auf die einzelnen Bindungsmechanismen soll hier nicht im Detail eingegangen werden, aber auf die Frage, was passiert, wenn sich in einem Material die Temperatur erhöht.

Bei einer Veränderung der Umgebungsparameter, zum Beispiel Druck oder Temperatur, kann es beim Über- oder Unterschreiten eines kritischen Wertes zu einer Phasenumwandlung kommen. Jeder kennt diesen Begriff unter Schmelzen, Verdampfen oder Kondensieren. Alle diese Vorgänge kann man als Phasenumwandlung bezeichnen.

Wenn man einem Material sehr viel Energie zu führt (zum Beispiel: bei starker Erwärmung) befindet es sich meist, wenn man den Schmelzpunkt erreicht hat, im flüssigen Bereich. Bei einer weiteren Temperaturerhöhung kommt es zu einer weiteren Phasenumwandlung, nämlich dem Übergang von flüssig nach gasförmig. In einem Gas, zum Beispiel der Luft, sind alle Bestandteile vollkommen ungeordnet.

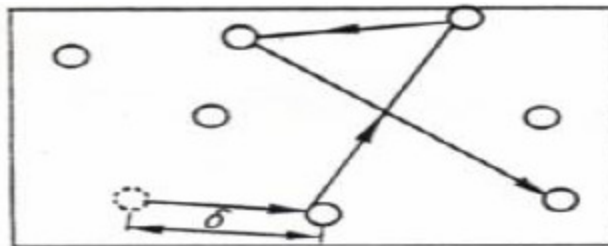


Bild 2

Dies soll Bild 2 verdeutlichen. Man benötigt immer einen anderen Weg von einem Atom zum Nächsten. Es existiert also keine Ordnung.

Im festen Zustand gestaltet sich die Sache etwas anders:

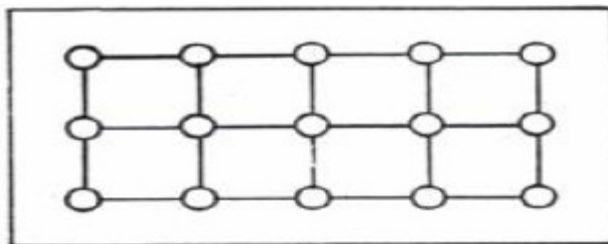


Bild 3

Die Atome im festen Zustand sind, wie schon erwähnt, nicht regellos angeordnet, sondern besitzen eine gewisse Ordnung. Man spricht von **Fernordnung**, da auch über weite Gebiete hinweg noch eine Periodizität besteht. Die Atome bilden ein **Gitter**, in dem die Atome feste Positionen einnehmen. Im Gegensatz dazu besitzen Flüssigkeiten nur eine **Nahordnung**, d.h. nur in einer kleinen Umgebung um ein Atom herum stellt sich für kurze Zeit ein Ordnungszustand ein.

Je nach Anordnung der Atome im festen Zustand unterscheidet man verschiedene Gittertypen. Man kann einen Gittertyp anhand einer Zelle, die sich im Kristall periodisch wiederholt, vollständig beschreiben. Eine solche Zelle nennt man **Elementarzelle (EZ)**. In der folgenden Abbildung (Bild4) ist die Elementarzelle des kubisch primitiven Gitters dargestellt. Das Grundgerüst ist ein Würfel, der auf den Würfecken jeweils mit einem Atom besetzt ist.

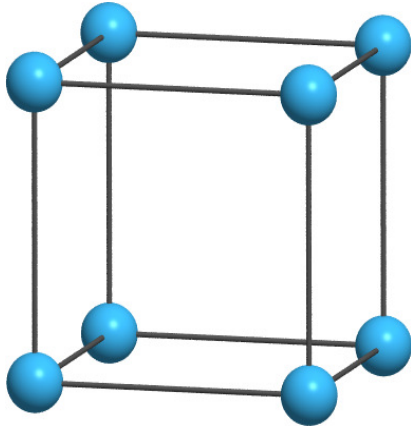


Bild 4

Wenn man jetzt die Elementarzellen Stück für Stück wie Legobausteine zusammenbaut, entsteht das Gitter des kompletten Kristalls. Anschaulich lässt sich der Effekt sehr gut bei Kochsalz (NaCl) zeigen. Hier erkennt man wie sich aus dem einfachen Würfel bestehend aus Na (grau) und Cl (grün) ein periodisches Gitter ausbildet.

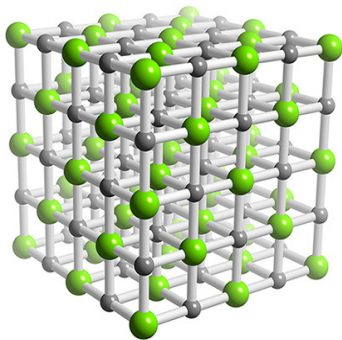


Bild 5

Mit der Elementarzelle hat man also eine Möglichkeit gefunden die Struktur eines Kristalls anhand einer Zelle komplett zu beschreiben. Bild 6 zeigt neben dem bereits erwähnten kubisch primitiven Gitter noch 3 weitere bedeutsame Gitterstrukturen, die wir hier erwähnen möchten.

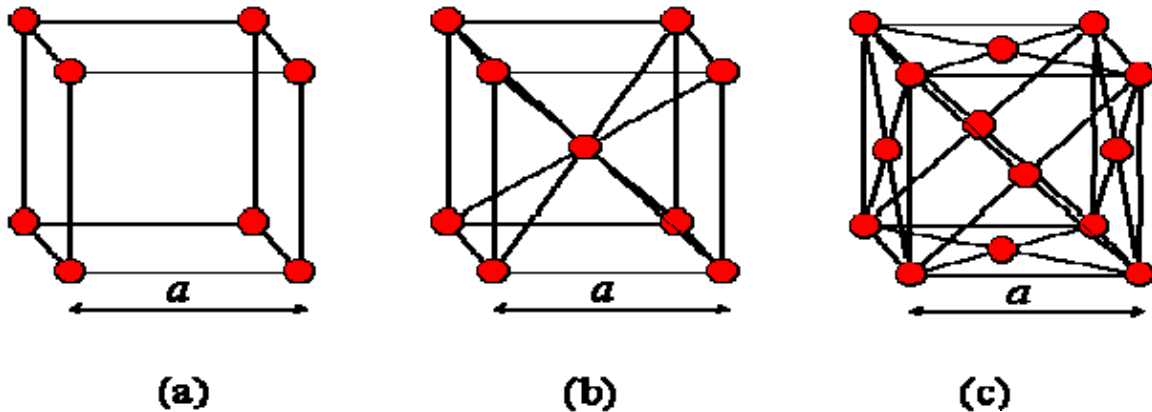
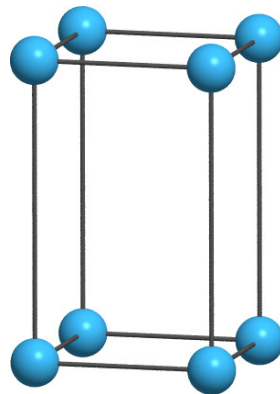


Bild 6

Kubisch primitiv

Kubisch raumzentriert (krz)

Kubisch flächenzentriert (kfz)



Tetragonal

Die kubisch raumzentrierte Struktur (krz) bei der neben den Eckatomen noch ein Atom in der Mitte sitzt, die kubisch flächenzentrierte Struktur, bei der auf jeder der sechs Flächenmitten des Würfels noch ein Atom sitzt und die tetragonale Gitterstruktur, bei der man nun keinen Würfel mehr als Grundstruktur hat, sondern einen Quader, mit einem Quadrat als Grundfläche.

Es ist, wie Sie alle durch die eben angesprochenen Bindungsarten wissen, auch möglich, verschiedene Elemente miteinander zu verbinden. Eine Verbindung von verschiedenen Elementen (hier meist metallischer Natur) heißt Legierung. Am Beispiel einer Legierung möchten wir nun auf den Begriff einer Phase eingehen. Dazu stellen Sie sich bitte vor, dass Sie Reinstoffe (zum Beispiel reines Nickel und reines Titan) miteinander mischen. Dies kann darüber erfolgen, dass man die beiden Elemente aufschmilzt und sie im schmelzförmigen Zustand miteinander vermischt („Rühren“). Lässt man das System abkühlen so entstehen Legierungen. Setzt die Legierung sich aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammen, so nennt man diese Bestandteile Phasen. Die Phasen sind sehr stark von der Konzentration, der Temperatur und dem Druck abhängig. Je nachdem welche Konzentration vorliegt und wie sich die äußeren Bedingungen verhalten, bilden sich verschiedene Phasen.

Am Beispiel des Wassers soll dies nun verdeutlicht werden. Da wir in diesem System nur Wasser haben, hängt das Ganze nicht mehr von der Konzentration ab, sondern nur noch vom Druck p und der Temperatur T , welche auch auf der x und y Achse aufgetragen sind.

-Formgedächtniseffekt-

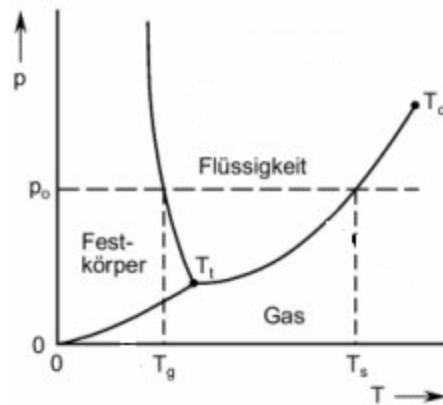


Bild 7

Dieses Diagramm in dem der Druck über die Temperatur aufgetragen ist, bezeichnet man als Phasendiagramm des Wassers. Man sieht, dass bei tiefen Temperaturen und hohem Druck, die feste Phase (Eis) existiert. Bei einer Temperaturerhöhung gelangt man in den flüssigen und schließlich auch in den gasförmigen Bereich. Die drei Phasen, die hier existieren, sind also Wasser, Eis und Wasserdampf.

Ähnliche Diagramme erhält man, wenn man zwei Elemente miteinander verbindet. Diese Phasendiagramme sehen dann etwas komplizierter aus und enthalten mehr Phasen, aber darauf kann an dieser Stelle nicht genauer eingegangen werden.

Nachdem wir nun die Grundlagen gelegt haben, können wir jetzt speziell auf Nickel-Titan eingehen. Wie eben schon erwähnt, hängt die Phasenbildung sehr stark von der Zusammensetzung, der Konzentration ab. Bei dem System Nickel-Titan gibt es nur bestimmte Konzentrationsbereiche, die interessant sind. Bei einer Nickelkonzentration von circa 50% tritt der hier beobachtete Effekt auf. Der verwendete NiTi-Draht hat also circa eine Zusammensetzung von 50% Nickel und 50% Titan. Der verblüffende Effekt beruht darauf, dass bei diesem Versuch nicht das passiert, was man erwartet. Normalerweise dehnt sich ein Material bei Erwärmung aus und zieht sich bei Abkühlung zusammen. Der verwendete NiTi-Draht zieht sich aber bei Erwärmung zusammen. Grund hierfür ist eine Phasenumwandlung. Bei dieser Phasenumwandlung wandeln sich nicht zwei Aggregatzustände ineinander um, sondern zwei verschiedene Gitterstrukturen. Genauer genommen haben wir die Transformation (Umwandlung) eines kubisch flächenzentrierten Gitters in ein tetragonales Gitter. Die Phase, die die kubisch flächenzentrierte Struktur besitzt, heißt **Austenit** und ist bei höheren Temperaturen stabil (Hochtemperaturphase). Die Phase mit der tetragonalen Struktur heißt **Martensit** und ist bei niedrigeren Temperaturen stabil (Niedrigtemperaturphase). Der genaue Mechanismus über den diese Phasentransformation abläuft, ist im Rahmen dieses Schulversuches zu komplex zu erklären. Einen Aspekt dieses Mechanismus möchten wir allerdings hier noch etwas genauer erläutern, nämlich die **Zwillingsbildung** und **Zwillingsbewegung**. Unter einem Zwilling kann man sich eine besondere Anordnung von Atomen vorstellen. Diese Anordnung hat eine Symmetrieachse und eine spiegelbildliche Anordnung/Verkipfung auf beiden Seiten.

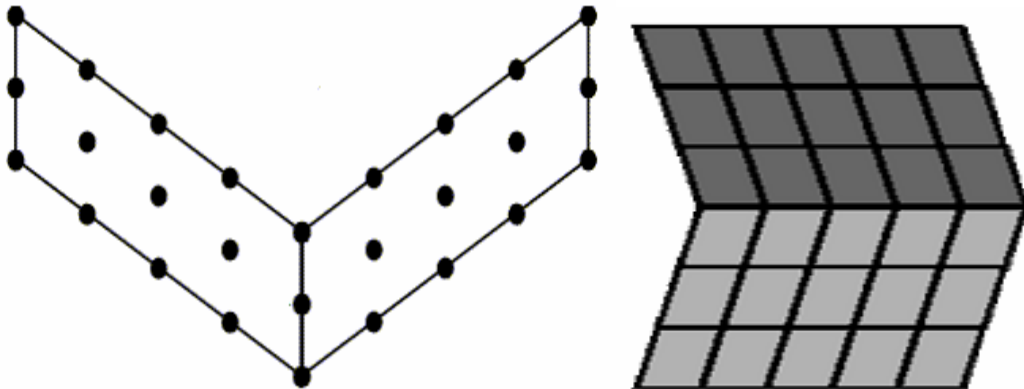


Bild 8 Zwillingsgrenze

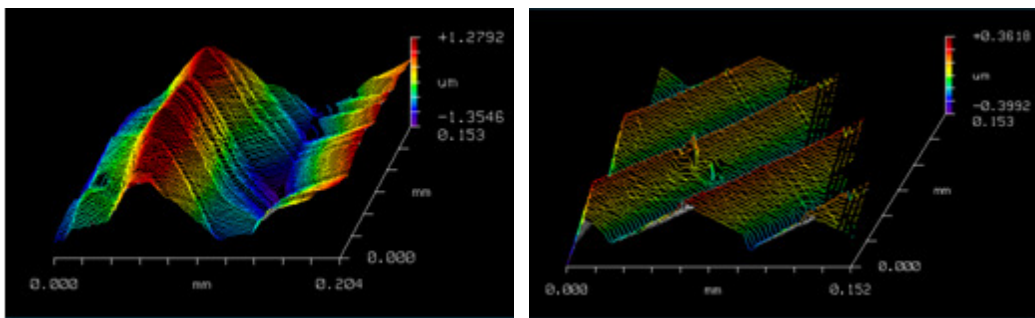


Bild 9 Zwillingsaufnahme unter einem Weißlichtmikroskop

Da man sich kaum vorstellen kann, dass schematische Darstellungen wie in Bild 8 in Wirklichkeit existiert, haben wir Ihnen hier zwei Aufnahmen eines Weißlichtmikroskopes beigefügt. Auf die Abbildungstechnik soll hier nicht im Einzelnen eingegangen werden, aber man kann sehr schön die Struktur der Zwillinge mit Zwillingsgrenze und spiegelbildlicher Anordnung erkennen.

Diese Phasenumwandlung kann man sich wie eine Zwillingsbewegung vorstellen. Was man darunter verstehen kann, soll das kommende Bild verdeutlichen.

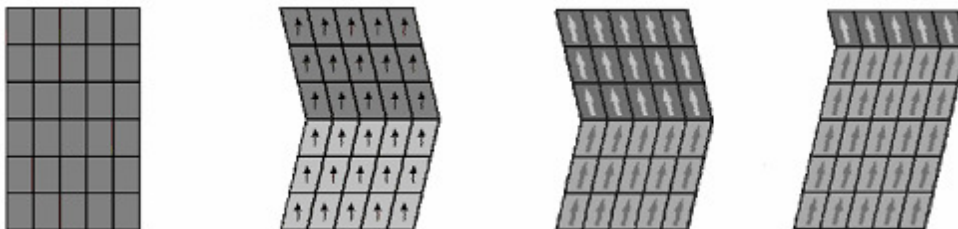


Bild 10 Zwillingsbewegung

Auf diesem Bild ist die Zwillingsbewegung dargestellt. Anfänglich befinden wir uns im austenitischen Zustand bevor wir dann, nach der Phasenumwandlung, im Martensit „landen“. Auf den nächsten beiden Bildern sieht man dann die Zwillingsbewegung. Man kann hier sehr gut erkennen, wie sich die Zwillingsgrenze nach oben verschiebt.

Sie stellen sich nun sicher die Frage, wie es zu einer Verkürzung des Drahtes kommen kann.

-Formgedächtniseffekt-

Wie Sie jetzt wissen, beschreibt die Phasentransformation den Übergang des kubisch flächenzentrierten Gitters (kfz-Gitter) in ein tetragonales Gitter (trz-Gitter). Ein kfz-Gitter können sie sich wie einen Würfel vorstellen. Ein Würfel zeichnet sich damit aus, dass alle Seitenkanten gleich lang sind. Diese Seitenkante hat in der Werkstoffwissenschaft einen besonderen Namen, sie heißt **Gitterkonstante**. Bei einem tetragonalen Gitter sind nicht alle Seiten gleich lang und ein solches Gitter besitzt auch eine andere Gitterkonstante. Wie Sie sehen, beschreibt die Phasentransformation auch einen Übergang in den Gitterkonstanten. Mit diesem Wissen ist auch der Effekt der Verkürzung zu erklären. Ändert sich über einen großen Gitterbereich die Gitterkonstante durch einen Übergang von Austenit (kfz-Gitter) in den Martensit (trz-Gitter), so kommt es zu einer Verkürzung der gesamten Probe.

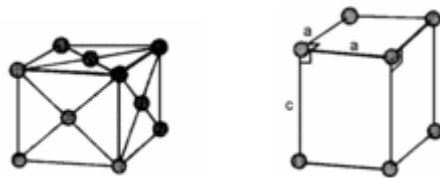


Bild 11 Aus einem kfz-Gitter wird ein tetragonales Gitter

Zum besseren Verständnis stelle man sich bitte eine lange Kette von Würfeln vor. Alle Würfel sehen gleich aus und haben die gleichen Seitenlängen. In diese Kette werden jetzt über einen großen Bereich, zum Beispiel die Hälfte der Kette, die ursprünglichen Würfel durch neue Würfel ersetzt. Der neue Würfel hat eine kleinere Kantenlänge und somit wird unsere ganze Kette kürzer. Falls Sie sich dies nicht vorstellen können, nehmen sie bitte ein Blatt Papier und zeichnen sich diesen Sachverhalt kurz auf. Danach sollte es Ihnen klarer werden. Somit verstehen Sie einen Teil des Formgedächtniseffektes und können sich die auftretende Verkürzung der Probe erklären.

Dieser Effekt ist reversibel, ansonsten könnte sich der Draht nicht wieder verlängern, nachdem Sie die Spannungsquelle ausgeschaltet haben. Wäre dieser Effekt nicht reversibel, so könnten Sie den Draht nicht verbiegen, ihn in heißes Wasser halten und anschließend wieder die ursprüngliche Form erhalten (ähnliches gilt für den Versuch mit dem Fön). In diesem Fall haben wir die umgekehrte Transformation, also den Übergang des Martensits in den Austenit.

Da wir nicht wissen, für wie viele Stunden dieser Versuch ausgelegt ist, bieten wir Ihnen folgende Aufgaben optional an, da es sein könnte, dass die vielen Grundlagen, die für diesen Versuch benötigt werden, so viel Zeit in Anspruch nehmen, dass für die folgenden Rechnungen keine Zeit mehr bleibt.

Aufgabe 1.

Rechnen Sie die Hubarbeit aus, die von der Feder verrichtet wird. Dazu ist eine Messung notwendig, die den angehobenen Weg des Gewichtes ermittelt.

Ansatz: $E = m \cdot g \cdot h$ (Hubarbeit)

Aufgabe 2.

Rechnen sie die in der Feder gespeicherte Energie aus.

Ansatz: Federenergie $E = \frac{1}{2} \cdot k \cdot s^2$ und Energieerhaltung

Aufgabe 3.

Variieren Sie das Gewicht am Versuchsaufbau und rechnen Sie Aufgabe 1 und 2 erneut.