

Astronomische Klimafaktoren

Teaser

Der menschliche Einfluss auf das Erdklima wird in den nächsten Jahrzehnten/Jahrhunderten mit großer Wahrscheinlichkeit eine Erhöhung der mittleren Atmosphärentemperatur im Bereich einiger Grad Celsius bewirken. Um die Größenordnung dieser Temperaturänderung für das Erdklima einzuschätzen, kann man auf relativ einfache astronomisch-atmosphärische Modellbetrachtungen zurückgreifen.

Die durch menschliche Einflüsse verursachte Temperaturerhöhung der unteren Atmosphäreschichten beträgt im letzten Jahrhundert etwa 1K, wie Modellrechnungen zeigen, könnte sich die mittlere Atmosphärentemperatur in den nächsten hundert Jahren sogar um bis zu 4K vergrößern... Diese oder ähnliche Aussagen werden fast täglich in Nachrichten oder Zeitungen kommuniziert, lösen aber kaum den irgendwie erwarteten Aufschrei in der Bevölkerung aus; sicher auch deshalb, weil die naheliegende Frage, ob die vorhergesagte Temperaturveränderung nun als „viel“ oder „wenig“ oder „katastrophal“ anzusehen sei, oft unbeantwortet bleibt. Wir haben keine Sinneswahrnehmung für die Änderung langzeitlicher Mittelwerte und reagieren deshalb als Menschen entsprechend träge. Außerdem folgen die prognostizierten Klimaänderungen nur aus extrem komplexen Modellrechnungen und sind in ihren Auswirkungen vom geografischem Standort auf der Erde abhängig.

Diese objektiven Tatsachen sind natürlich einer Umweltbildung, die auf von Schülern nachvollziehbaren Erkenntnisse und Einsichten beruhen soll, nicht gerade förderlich. Wenn wir den Blick von den Details der klimatologischen Wechselwirkungen auf der Erde weg- und auf die astronomischen Rahmenbedingungen hinwenden, erschließen sich überschaubare und zumindest in der Sekundarstufe II transportierbare Modelle, mit deren Hilfe man – im Sinne von Abschätzungen – zumindest ein annäherndes „Gefühl“ für die Veränderung und Stabilität des Erdklimas gewinnen kann.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Quantenphysik Optik Thermodynamik	Stefan-Boltzmann-Gesetz, Experimente mit dem Strahlungs-Würfel Transmission und Absorption Albedo, Reflexion Temperaturbegriff
Astronomie	Sterne Planeten	Sonnenleuchtkraft, Bahnbewegung der Erde, Präzession
Verknüpfungen	Mathematik Geografie	Potenzgesetze Jahreszeiten

Methodisches Vorgehen

Die Betrachtungsweise, die nachfolgend vorgeschlagen wird, sieht von Details der irdischen Wechselwirkungen ab. Auf ein einfaches Atmosphärenmodell wird man trotzdem nicht in jedem Fall verzichten können.

Das Ziel der nachfolgenden Überlegungen besteht darin, anhand der astronomischen Rahmenbedingungen (hauptsächlich) für den globalen Energieeintrag einige einfache Abschätzungen zu atmosphärische Temperaturänderungen zu gewinnen.

Neben der Strahlungsgeometrie und den Absorptionseigenschaften der Atmosphäre spielt für diese Abschätzungen die Bewegungsgeometrie der Erde eine zentrale Rolle. Ein Demonstrationsversuch auf dem Anforderungsniveau der Sekundarstufe I ergänzt die theoretischen Überlegungen.

Erst seit relativ kurzer Zeit ist die Forschung davon überzeugt, dass die von dem jugoslawischen Wissenschaftler Milankovitch in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts vorhergesagte Klimabeeinflussung durch langzeitliche Veränderung von Erdbewegungsparametern in Zusammenhang mit Kalt- und Warmzeiten der Erdgeschichte gebracht werden kann. Zu diesen Parametern gehören die Präzession der Erdachse, die Neigung der Erdachse und die Exzentrizität der Erdbahn. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese Größen und ihre quasi-periodischen Variationen. Durch Überlagerung einzelner Effekte ist es z.B. möglich, dass die Südhalbkugel der Erde gerade dann über einige Jahrtausende besonders weit von der Sonne entfernt ist, wenn auf ihr das Winterhalbjahr herrscht. Da sich auf der südlichen Erdhemisphäre aber eine relativ große Wasserfläche befindet, sich Wasser nicht so schnell wie die Landmassen erwärmen und außerdem eine große Strahlungsmenge reflektieren kann, könnte hierdurch eine Temperaturveränderung in den unteren Atmosphärenschichten ausgelöst werden. Es könnte! – denn ob dies tatsächlich erfolgt, hängt natürlich mit den auf der Erde ablaufenden positiven und negativen Rückkopplungen, beispielsweise zwischen den Luft- und Wassermassen, zusammen. So hat man einige der einzelnen Milankovitch-Veränderungen aus der Tabelle 1 mit Kalt- und Warmzeiten in Verbindung bringen können, keineswegs ist es aber so, dass im Rhythmus der Milankovitch-Zeiten zwangsläufig immer Warm- und Kaltzeiten aufeinander folgen! Offenbar kann sich das atmosphärische System der Erde unter günstigen Umständen hinreichend effektiv nachregulieren und eine Temperaturänderung so vermeiden. Aus der Tatsache, dass ein solches Nachregulieren jedoch nicht immer gelingt, kann man zumindest entnehmen, dass das Erreichen von Extrema der Erdbewegung für die Klimastabilität eine erhebliche Belastung bedeutet.

Für eine Abschätzung ist hierbei die Veränderung der Bahnexzentrizität von besonderer Bedeutung, da sie sowohl die globale Sonneneinstrahlung ändert als auch die Ausprägung der Jahreszeiten beeinflusst, während die Erdachsenneigung und die Präzession nur die Ausprägung der Jahreszeiten, nicht aber die globale Sonneneinstrahlung ändern.

Erdbahnform	Schiefe der Ekliptik	Präzession
Exzentrizität schwankt zwischen $e=0,01$ und $0,05$	Neigung der Erdachse variiert zwischen $22,1$ und $24,5^\circ$	Kreiselbewegung der Erdachse
Zeitraum ca. $100000a$	Zeitraum ca. $40000a$	Zeitraum $26000a$

Tabelle 1: Quasi-Perioden der Änderung von Parametern der Erdbewegung

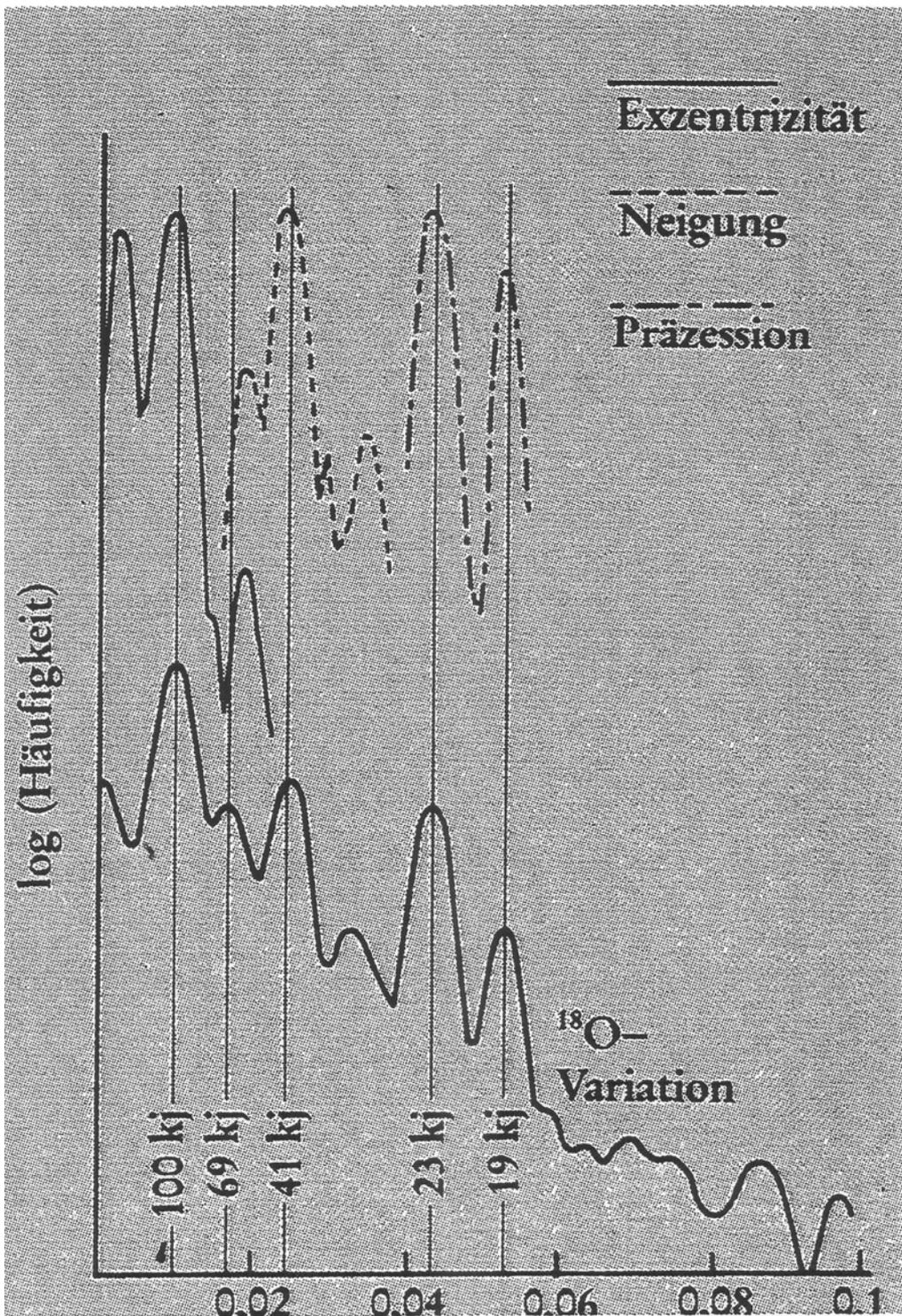


Abbildung 1: Isotopenanalysen in Sedimenten und Eisproben belegen die Schwankung des Erdklimas mit den quasi-periodischen Änderungen der Erdbewegung, über der Abszisse des Diagramms ist die Zeit in kj (1000 Jahresschritten) abzulesen (Titel: Temperaturgang der Erdatmosphäre).

Modell 1: Abschätzung einer Schwankungsbreite für die Erdtemperatur anhand der mittleren Abstandsänderung Erde-Sonne

Für alle nachfolgenden Überlegungen gelten die Festlegungen:

A : mittleres Rückstrahlungsvermögen (Albedo), L : Leuchtkraft der Sonne (Strahlungsleistung), R : Planetenradius, r Abstand Sonne-Planet, τ : Transmissionsvermögen für kurzwellige Strahlung, τ^* : Transmissionsvermögen für langwellige Strahlung, σ : Stefan-Boltzmann-Konstante, Q : Strahlungswärme, T : Temperatur, T_B : Temperatur am Boden des Planeten, S : Solarkonstante (die außerhalb der Erde je Sekunde senkrecht pro Quadratmeter ankommende Strahlungsenergie).

Im einfachsten Temperaturmodell betrachtet man die Erde als Kugel im Strahlungsgleichgewicht zwischen der von der Sonne empfangenen und der von der Kugeloberfläche der Erde abgestrahlten elektromagnetischen Strahlung. In diesem Modell spielt die Atmosphäre keine Rolle, mithin reagiert die mittlere Temperatur am Erdboden völlig passiv und ziemlich schnell auf Veränderungen der Solarkonstante.

Die Erde empfängt mit ihrer Querschnittsfläche je Sekunde die Strahlungswärme

$$Q_0 = \pi R^2 S \quad (1)$$

und emittiert im Strahlungsgleichgewicht diese Strahlungswärme je Sekunde auch wieder:

$$Q_0 = 4\pi R^2 \sigma T_B^4 \quad (2)$$

Setzt man die Formeln (1) und (2) gleich, so ergibt sich

$$T_B = \left(\frac{S}{4\sigma}\right)^{1/4} \quad (3)$$

Die Solarkonstante lässt sich aus der Leuchtkraft der Sonne und dem Abstand Sonne-Erde berechnen, es gilt

$$S = \frac{L}{4\pi r^2}, \quad (4)$$

so dass sich für T_B insgesamt ergibt

$$T_B = \left(\frac{L}{16\pi\sigma r^2}\right)^{1/4} \approx 278K \quad (5)$$

Diese Temperatur ist, verglichen mit der realen mittleren Bodentemperatur der Erde, um etwa 10K zu gering. Die langzeitliche Variationsbreite für die Exzentrizität der Erdbahn beträgt 0,01-0,05. Daraus entnimmt man (großzügig geschätzt), dass im Extremfall die Differenz zwischen dem minimalen und dem maximalen Abstand Erde-Sonne etwa 10% betragen könnte. Die Bodentemperatur in unserem einfachen, sofort auf diese Abstandsänderung reagierenden Modell (5) würde zwischen 286K und 272K schwanken und damit (bei einem Bahnlauf der Erde) lediglich einige Kelvin ober- bzw. unterhalb der mittleren Erdtemperatur liegen. Da in der Vergangenheit durch solche Veränderungen offenbar Eiszeiten und Warmzeiten ausgelöst wurden, entnehmen wir unserem einfachen Modell, dass selbst Änderungen um wenige Kelvin dramatische Auswirkungen auf das Erdgeschehen haben können. Um auf die eingangs gestellt Frage zurückzukommen: Einige Kelvin Temperaturänderung sind also ziemlich „viel“.

Modell 2: Abschätzung der globalen Temperatur und eines möglichen globalen Temperaturmaximums

Natürlich können Abschätzungen zum Klima nur dann einigermaßen realistisch sein, wenn die Existenz der Atmosphäre in Betracht gezogen wird. Dadurch wird die Betrachtung etwas komplex, so dass sie sich nur noch für den Unterricht in der Sekundarstufe II eignet.

Ausgangspunkt für alle Atmosphärenmodelle ist der von der Sonne herrührende Energieeintrag. Dieser wird für die Erde durch die Solarkonstante, also die pro Quadratmeter außerhalb der Atmosphäre senkrecht einfallende Strahlungsleistung von $S=1360\text{W/m}^2$ und die Strahlungsempfangsfläche der Erde, nämlich πR^2 (R: Erdradius) bestimmt. Für ein globales Modell müssen wir wieder die je Sekunde an der Oberseite der Atmosphäre ankommende Energie gleichmäßig auf die gesamte Erde verteilen, mithin auf die Fläche $4\pi R^2$. Beachtet man außerdem, dass aufgrund der Albedo der Erde rund 29% der Sonnenstrahlung wieder ins Weltall reflektiert werden, so erhält man für die im Mittel an der Oberseite der Atmosphäre je Quadratmeter und Sekunde auftreffende Energie Q_0 den Zusammenhang:

$$Q_0 = \frac{1}{4}(1-A)S \quad (6)$$

Weitere relevante Energieströme entnimmt man der Abbildung 2. Von Q_0 kommt an der Erdoberfläche bei einem mittleren atmosphärischen Transmissionskoeffizienten für kurzwellige Strahlung τ lediglich der Bruchteil

$$Q_{Bo} = \tau Q_0 = \frac{1}{4}\tau(1-A)S \quad (7)$$

an. Der Boden seinerseits strahlt als näherungsweise schwarzer Körper mit

$$Q_B = \sigma T_B^4, \quad (8)$$

wobei lediglich der Bruchteil τ^*Q_B die Oberseite der Atmosphäre erreicht (τ^* ist in diesem Fall der Transmissionskoeffizient für langwellige Strahlung). Schließlich wird die Atmosphäre durch die in ihr absorbierte Strahlung ebenfalls aufgeheizt, weshalb sie in beiden Richtungen pro Zeit- und Flächeneinheit die Energie

$$Q_A = (1-\tau^*)\sigma T_A^4 \quad (9)$$

emittiert. Im stationären Zustand müssen die ober- und unterhalb der Atmosphäre auftretenden Energiebilanzen ausgeglichen sein, was auf die beiden Zusammenhänge

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q_A + \tau^* Q_B \\ Q_B &= Q_A + \tau Q_0 \end{aligned} \quad (10a,b)$$

führt. Stellt man die Gleichungen 10a und 10b nach Q_A um, setzt sie dann gleich und formt anschließend nach Q_B um, so erhält man

$$Q_B = \sigma T_B^4 = Q_0 \left(\frac{1+\tau}{1+\tau^*} \right) = \frac{1}{4}(1-A)(1+\tau) \left(\frac{1}{1+\tau^*} \right) S \quad (11)$$

bzw. für T_B

$$T_B = \left(\frac{1}{4\sigma} (1-A)(1+\tau) \left(\frac{1}{1+\tau^*} \right) S \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

Mit den realistisch gemittelten Werten $\tau=0,9$ und $\tau^*=0,2$ erhält man für T_B einen Zahlenwert von 286,5K, welcher der mittleren Erdtemperatur von 288K schon sehr nahe kommt. Weitere Verbesserungen an dem hier diskutierten Modell wären leicht möglich, etwa indem man in Gleichung (8) durch einen Zahlenfaktor $\cong 0,95$ berücksichtigt, dass das mittlere Emissionsvermögen der Erdoberfläche nicht exakt den Zahlenwert 1 eines schwarzen Strahlers aufweist. Nachfolgend verzichten wir zugunsten prinzipieller Überlegungen auf solche verfeinernden Korrekturen.

Interessanter ist hier die Untersuchung der Frage, bis auf welche Temperatur sich die untere Erdatmosphäre maximal aufheizen könnte. Für eine Extremal Betrachtung setzen wir $A=0$ (alle ankommende Strahlung gelangt in die Erdatmosphäre), $\tau=1$ (alle Strahlung wird durch die Erdatmosphäre durchgelassen) und $\tau^*=0$ (die Bodenstrahlung bleibt in der Atmosphäre gefangen, maximaler Treibhauseffekt). Wie man leicht nachrechnen kann, ergibt sich in diesem Fall eine maximal mögliche Erdtemperatur von 336K=57°C. Ausgehend von der heutigen Temperatur der Erde erreichen wir schon nach vierzig Kelvin Temperaturzunahme den größtmöglichen Wert, der natürlich für das menschliche Leben einer absoluten Katastrophe entsprechen würde! Offenbar ergibt sich auch aus diesen Überlegungen: wenige Kelvin Temperaturzunahme in der Erdatmosphäre bedeuten für das Erdklima sehr viel!

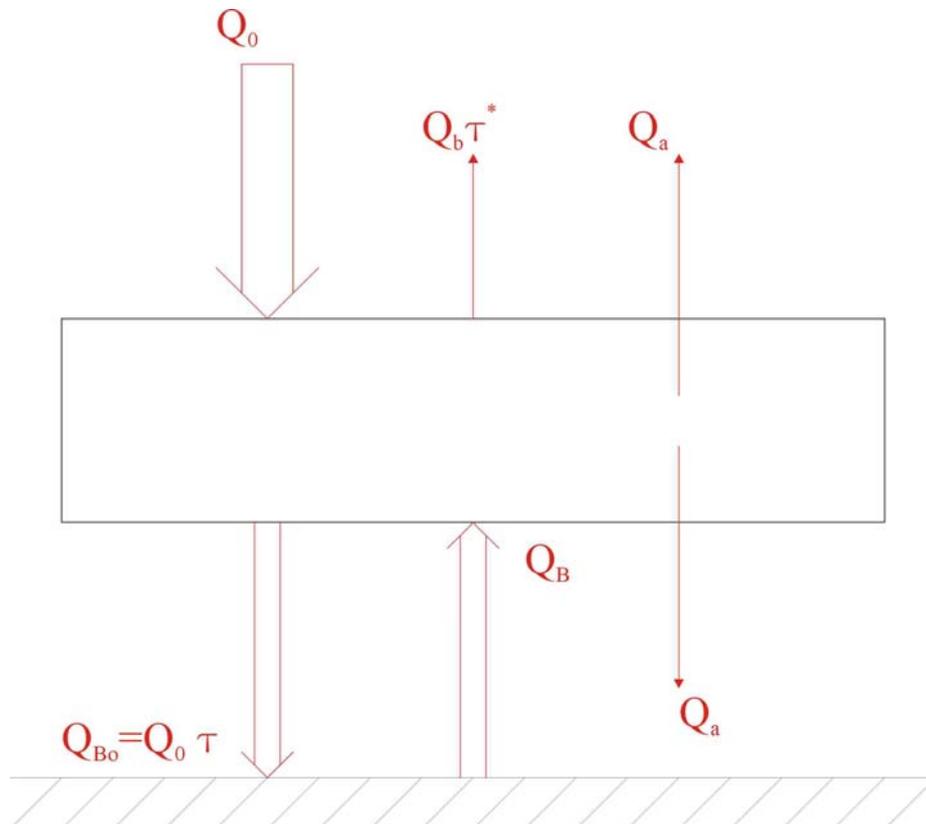


Abbildung 2: Modell zur Analyse der atmosphärischen Energieflüsse (Titel: Atmosphärenmodell). Dieses Bild eignet sich auch als Folie!

Modellexperiment: Demonstrationsversuch zu den Auswirkungen unterschiedlicher Erdachsenstellung relativ zur Erdbahnebene (Sek. I)

Unser Experiment nutzt den Leslie-Würfel (Abb. 3 links) als geometrisch-physikalisches Modell der Erde. Es soll demonstriert werden, dass die Erde im Mittel trotz gleichmäßiger globaler Einstrahlung während der Jahreszeiten unterschiedlich erwärmt werden kann. Einen Leslie-Würfel, der eigentlich zur Überprüfung der Strahlungsgesetze dient, kann man bei verschiedenen Lehrmittelherstellern leicht beziehen. Der Leslie-Würfel besteht aus verschiedenen Oberflächenmaterialien (matt, metallisch glänzend, schwarz), die im nachfolgenden Versuch die unterschiedliche Albedo der Nord- und Südhalbkugel der Erde darstellen sollen. Der mit Wasser gefüllte Würfel besitzt eine Rührvorrichtung, außerdem eine Öffnung für ein Thermometer. Mit Hilfe von Stativmaterial kippt man den Würfel, so dass je zwei Flächen von einer Wärmestrahlungsquelle beleuchtet werden können (Abb. 3 rechts). Im Versuchsbeispiel wurde der Würfel einmal um 10° und einmal um 45° gekippt. Die Strahlung einer 250W-Heizlampe traf dann die schwarze Oberfläche unter einem Einfallswinkel von 10° bzw. 45° , die metallische Oberfläche unter einem Winkel von 80° bzw. 45° . Die nachfolgende Tabelle 2 gibt die gemessene Temperaturänderung des Würfels in der Zeit an.

Kippwinkel	Temperatur im Würfel in $^\circ\text{C}$	Bestrahlungszeit in min
45°	19	0
45°	20	2
45°	21	6
45°	22	9
45°	23	12
10°	24	14
10°	25	16
10°	26	17

Tabelle 2: Temperaturgang im Leslie-Würfel

Aus der Tabelle entnimmt man, dass die durchschnittliche Änderung der Temperatur zunächst $0,3\text{K}$ pro Minute, in zweiten Versuchsteil aber $0,6\text{K}$ pro Minute betrug. Trotz unveränderter Globalstrahlung kann die Versuchsgeometrie in Verbindung mit unterschiedlichen Albedowerten für andere Erwärmungsraten sorgen.

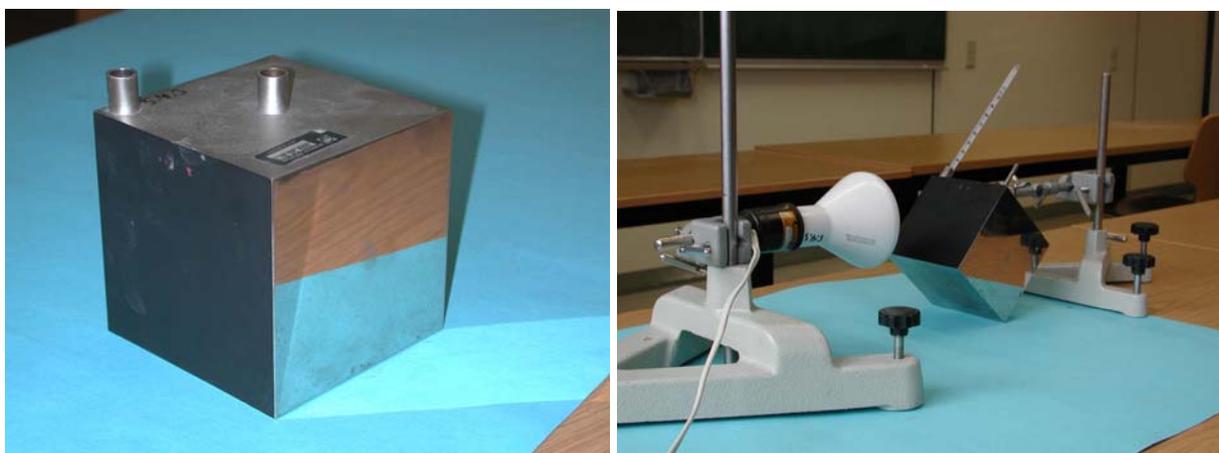


Abbildung 3: Links: Leslie-Würfel, rechts: Versuchsaufbau.