Das Quecksilberpendel wurde zuerst von Graham (1675 — 1751) ausgeführt. An einer Eisenstange von der Länge $l_1$ wird durch die Pendelmutter eine Brücke getragen, auf der sich ein, zwei oder vier Quecksilbergefäße befinden. Wird die Höhe des Quecksilbers h genannt, so möge sich der Schwerpunkt des Pendels (Abb. 81) bei $l = l_1 - \frac{h}{2}$ befinden. Dieser Schwerpunkt soll bei Erwärmung nicht verschoben werden. Das Volumen des Quecksilbers wird größer. Wenn die Formel für die Verlängerung eines Stabes $l_1 = l_0 (1 + \alpha t)$ ist, so ist die für die Vergrößerung eines Volumens $v_1 = v_0 (1 + \alpha t)^3$, da ein Körper drei Dimensionen hat. Rechnen wir das Binom aus, so ist $v_1 = v_0 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3)$. Das dritte und vierte Glied sind klein gegen das zweite; wir vernachlässigen sie

$$v_1 = v_0 (1 + 3\alpha t).$$

Das Quecksilber befindet sich in einem Gefäß aus Gußeisen, Stahl, Glas od. dgl., das sich bei Erwärmung ebenfalls ausdehnt. Der Querschnitt der Quecksilbersäule, d. h. der innere Querschnitt des Gefäßes sei q, der Ausdehnungskoeffizient des Gefäßes $\beta$, dann ergibt sich durch dieselbe Entwicklung wie oben

$$q_1 = q_0 (1 + 2\beta t).$$

Vor der Erwärmung war $v_0 = q_0 \cdot h$ oder

$$h = \frac{v_0}{q_0}.$$

Nach der Erwärmung ist $v_1 = q_1 \cdot h_1$ oder

$$h_1 = \frac{v_1}{q_1} = \frac{v_0 (1 + 3\alpha t)}{q_0 (1 + 2\beta t)}$$

$$h_1 = h \frac{1 + 3\alpha t}{1 + 2\beta t}$$

oder mit genügender Annäherung

$$h_1 = h (1 + 3\alpha t - 2\beta t)$$

oder der Abstand des Schwerpunktes von der Grundfläche

$$\frac{h_1}{2} = \frac{h}{2} (1 + 3\alpha t - 2\beta t).$$

Die Erhebung des Schwerpunktes über seine frühere Lage ist $\Delta h = \frac{h_1}{2} - \frac{h}{2}$

$$\Delta h = \frac{h}{2} \cdot (3\alpha t - 2\beta t).$$

Dieser Erhebung steht eine Senkung durch die Verlängerung der Pendelstange entgegen. War die Länge der Pendelstange bis zur Grundfläche $l + \frac{h}{2}$, und ist der Ausdehnungskoeffizient $\gamma$, so ist die Länge nach der Erwärmung $\left(l + \frac{h}{2}\right)(1 + \gamma t)$ und die Verlängerung, d. h. die Senkung des Schwerpunktes

$$\Delta l = \left(l + \frac{h}{2}\right) \cdot \gamma \cdot t.$$

Die Senkung soll gleich der Hebung sein:

$$\left(l + \frac{h}{2}\right) \cdot \gamma \cdot t = \frac{h}{2} (3\alpha t - 2\beta t) \text{ oder}$$

$$l \cdot \gamma \cdot t = \frac{h}{2} (3\alpha t - 2\beta t - \gamma t).$$

Wir kürzen durch t und erhalten für die notwendige Höhe der Quecksilbersäule

$$h = \frac{2 l \gamma}{3\alpha - 2\beta - \gamma} \quad \ldots \ldots \quad (60)$$

Um hierfür ein Zahlenbeispiel zu rechnen, nehmen wir an, der Schwerpunktsabstand l sei 98 cm, die Stange bestehe aus Stahl mit dem Ausdehnungskoeffizienten $\gamma = 0{,}000012$, daß Gefäß bestehe aus Glas mit dem Ausdehnungskoeffizienten $\beta = 0{,}000008$ und der Ausdehnungskoeffizient des Quecksilbers sei $\alpha = 0{,}000060$, dann muß das Quecksilber die Höhe haben:

$$h = \frac{2 \cdot 98 \cdot 0{,}000012}{3 \cdot 0{,}000060 - 2 \cdot 0{,}000008 - 0{,}000012}$$

$$h = 98 \cdot \frac{0{,}000024}{0{,}000152}$$

$$\mathbf{h = 15{,}5\ cm.}$$

Das Quecksilberpendel hat vor dem Rostpendel den Vorzug der Einfachheit. Dieses hat in statischer Beziehung einen sehr ungünstigen Bau, auch können leicht Klemmungen auftreten, die das freie Arbeiten der Ausdehnungskräfte beeinträchtigen. Das Quecksilber hingegen kann sich ungestört ausdehnen. Allerdings dauert es längere Zeit, bis das Quecksilber die Temperatur der Umgebung angenommen hat; deshalb die Unterteilung in zwei oder gar vier Gefäße. Auf einen anderen Nachteil des Quecksilbers, die Unempfindlichkeit gegen Temperaturschichtung, kommen wir in Abschnitt 18d zurück.

Rostpendel und Quecksilberpendel haben heute fast nur noch geschichtlichen Wert, nachdem man bessere Mittel für den Temperaturausgleich bei Präzisionsuhren gefunden hat.

### c) Nickelstahlpendel und Quarzpendel

Unser Nickelstahl ist ein Ergebnis der wissenschaftlichen Metallforschung, die vor 30 — 40 Jahren einsetzte, und die unsere ganze Auffassung von den Metallen sowie die technische Verwendung der Werkstoffe von Grund auf gewandelt hat. Wir stehen noch mitten in dieser Bewegung; werden wir doch täglich überrascht durch neue Legierungen und Verbindungen mit besonderen Eigenschaften. Einer der Bahnbrecher auf diesem Gebiete war Ch.-Ed. Guillaume, Sohn eines Uhrenfabrikanten aus der Westschweiz. Er hatte es sich bei seinen Arbeiten im Internationalen Bureau für Maße und Gewichte in Sèvres, dessen Leiter er jetzt ist, zur Aufgabe gesetzt, einen geeigneten Stoff für Drähte zu suchen, die sich für Basismessungen eignen. Solche Messungen, die bei Landesvermessung gebraucht werden, müssen sehr genau sein und sind so mühsam und zeitraubend, daß sie in unwirtlichen Gegenden überhaupt nicht durchführbar sind. Hat man aber Drähte von sehr geringem Ausdehnungskoeffizienten, so läßt sich bei genügender Vorsicht in sehr kurzer Zeit eine Längenmessung von ausreichender Genauigkeit erzielen. Nun erforschte Guillaume mit ungewöhnlicher Zähigkeit und großem Geschick ganz systematisch die Nickelstahllegierungen mit verschiedenem Nickelgehalt auf ihre verschiedenen physikalischen Eigenschaften hin. Neben seinen hervorragenden persönlichen Fähigkeiten hatte er noch das Glück, daß ihm durch die Hilfsbereitschaft des Stahlwerkes in Imphy das schwierig zu beschaffende, kostbare Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt wurde. Die Ergebnisse der Forschung waren für die Metallurgie von größter Bedeutung. Wir greifen nur das eine heraus: Er fand eine Legierung mit ungefähr 36 % Nickel, die einen sehr geringen Ausdehnungskoeffizienten (kleiner als 0,000001, also nur 10 — 5 % von dem des Eisens) hat. Es ist einleuchtend, daß Guillaume nach seiner Herkunft auf den Gedanken kam, diese Nickelstahllegierung, die Invar (von invariable = unveränderlich) genannt wurde, auch in der Uhrmacherei zu verwerten. So entstand 1897 das Invarpendel, gewissermaßen als ein Nebenprodukt der Guillaumeschen Arbeiten. Freilich waren