

# Sonnenkompass

Jürgen Womser-Schütz, <https://github.com/JW-Schuetz/Hobby>

## 1 Fragestellung

Wie genau ist die bekannte Methode, die Nord-Richtung per Sonnenstand zu bestimmen?

## 2 Methodenbeschreibung

Die folgenden Aktionen sind zur Durchführung der Methode notwendig

- einen Stab senkrecht in die Erde stecken
- das Ende des Schattens des Stabes mit einem Stein markieren
- einige Zeit abwarten bis der Stabschatten weiter gewandert ist
- das neue Schattenende des Stabes mit einem zweiten Stein markieren.

Man erhält dann die Nordrichtung mittels der folgenden Regeln

- R1: der Schatten des Stab-Endes bewegt sich auf der Verbindungsgeraden der beiden Steine
- R2: die Nordrichtung ist orthogonal zur Verbindungsgeraden
- R3: auf der Nordhalbkugel der Erde zeigt der Schatten Richtung Norden, auf der Südhalbkugel Richtung Süden.

Die Methode wird in der Nähe der Pole scheitern, da das Stabende dort keinen Schatten mehr wirft (und natürlich auch, weil dort keine Erde zum Hineinstecken des Stabes vorhanden ist ☺).

## 3 Vereinbarungen

Im folgenden werden Basiskenntnisse der Geometrie und der linearen Algebra vorausgesetzt.

Vektoren werden durch einen Unterstrich kenntlich gemacht ( $\underline{x}$ ) und ihre Transponierten ( $\underline{x}^T$ ) durch ein hochgestelltes  $T$ . Matrizen werden nicht besonders bezeichnet, sie ergeben sich aus ihrem Kontext.

Weiterhin werden Kugelkoordinaten  $(r, \Theta, \varphi)$  und kartesische Koordinaten  $(x_1, x_2, x_3)$  verwendet, wobei das Koordinatenpaar  $(x_1, x_2)$  die Ekliptikalebene aufspannt, der Ursprung des Koordinatensystems ist der Erdmittelpunkt (siehe dazu die Problemskizze in Abbildung 1).

## 4 Problemformulierung

Es werden die folgenden Annahmen getroffen:

- die Sonne im Punkt  $\underline{S}$  sei durch einen Punktstrahler angenähert
- die Erde bewege sich auf einer idealen Kreisbahn mit Radius  $R_S$  um die Sonne (in der Ekliptikalebene)
- die Erde habe ideale Kugelgestalt mit dem Radius  $R_E$

- die Erd-Rotationsachse habe einen Neigungswinkel  $\psi$  zur  $x_3$ -Achse
- im Punkt  $P$  der Erdoberfläche befinde sich der Fusspunkt des Stabes der Länge  $L$
- die Erdoberfläche um den Fusspunkt des Stabes herum werde durch eine Tangentialebene an die Erdkugel angenähert
- es werden zwei voneinander unabhängige Zeiten betrachtet: die Jahreszeit, gemessen in Tagen  $t = [0, 365)$  und die Tageszeit, gemessen durch den Rotationswinkel  $\alpha = [0, 2\pi)$  der Erde um ihre Rotationsachse.

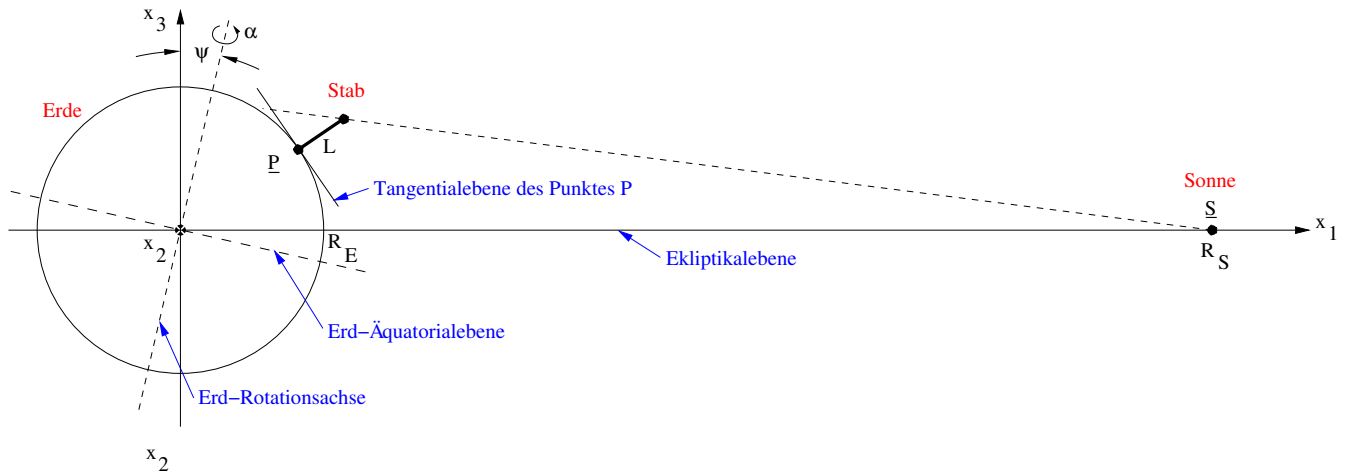


Abbildung 1: Problemskizze (nicht massstäblich, zur Sommersonnenwende)

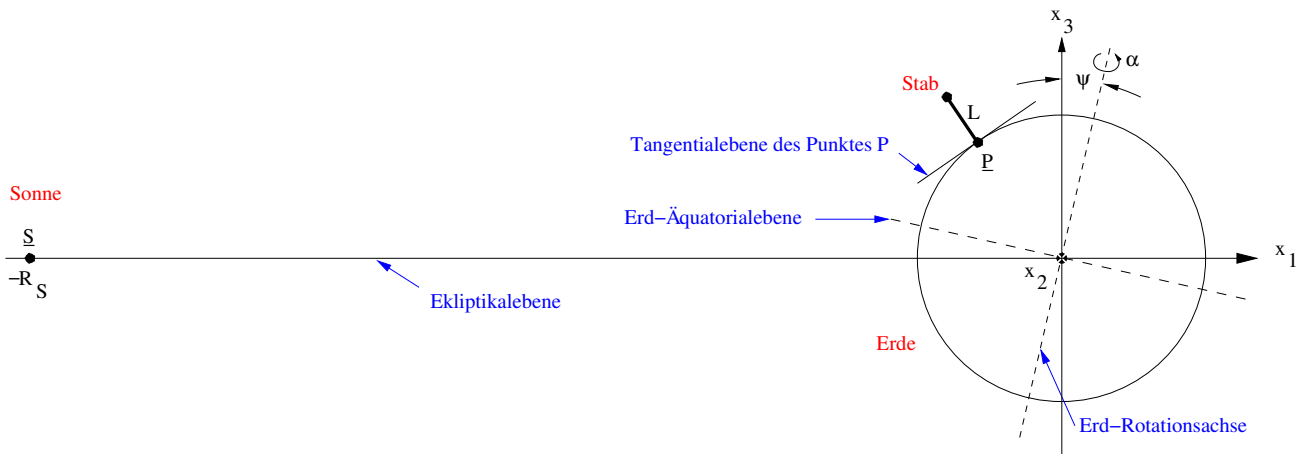


Abbildung 2: Problemskizze (nicht massstäblich, zur Wintersonnenwende)

## 5 Lösung

Zur Unterstützung der Problemlösung wird MatLab und seine „Symbolic Math Toolbox“ verwendet. Die MatLab-Quellen finden sich im GitHub-Unterverzeichnis „Matlab-Sources“.

Gesucht wird die Trajektorie des Schattens des Stabendes auf der Tangentialebene in Abhängigkeit von der Jahreszeit  $t$  und des täglichen Erd-Rotationswinkels  $\alpha$ .

Es sind zwei äquivalente Lösungsansätze denkbar, die Erdrotation zu berücksichtigen

- Die mit der Erde verbundenen Orte um den Winkel  $\alpha$  zu rotieren und die Sonne fixiert lassen.
- Den Ort der Sonne um den Winkel  $-\alpha$  zu rotieren und die mit der Erde verbundenen Orte fixiert lassen.

Der zweite Fall erscheint analytisch etwas einfacher zu sein und wird im folgenden behandelt.

## 6 Tageszeitabhängigkeit

Die tägliche Rotation der Erde um ihre Rotationsachse wird in Abhängigkeit des Rotationswinkels  $\alpha \in [0, 2\pi]$  durch die Drehmatrix

$$D_\alpha = \begin{pmatrix} e_1^2(1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & e_1 e_2(1 - \cos \alpha) - e_3 \sin \alpha & e_1 e_3(1 - \cos \alpha) + e_2 \sin \alpha \\ e_2 e_1(1 - \cos \alpha) + e_3 \sin \alpha & e_2^2(1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & e_2 e_3(1 - \cos \alpha) - e_1 \sin \alpha \\ e_3 e_1(1 - \cos \alpha) - e_2 \sin \alpha & e_3 e_2(1 - \cos \alpha) + e_1 \sin \alpha & e_3^2(1 - \cos \alpha) + \cos \alpha \end{pmatrix}$$

beschrieben, dabei ist

$$\underline{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix}$$

ein Einheitsvektor, der Richtung und Orientierung der Rotationsachse definiert (siehe dazu z.B. [1]).

Es soll zunächst der Zeitpunkt der Sommersonnenwende betrachtet werden, d.h. die Rotationsachse soll, so wie in Abbildung 1 dargestellt, in der  $(x_1, x_3)$ -Ebene liegen. Der Einheitsvektor ist somit durch

$$\begin{aligned} e_1 &= \sin \psi \\ e_2 &= 0 \\ e_3 &= \cos \psi. \end{aligned} \tag{1}$$

gegeben und für die Drehmatrix folgt schliesslich

$$D_\alpha = \begin{pmatrix} \sin^2 \psi (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha & -\cos \psi \sin \alpha & \sin \psi \cos \psi (1 - \cos \alpha) \\ \cos \psi \sin \alpha & \cos \alpha & -\sin \psi \sin \alpha \\ \cos \psi \sin \psi (1 - \cos \alpha) & \sin \psi \sin \alpha & \cos^2 \psi (1 - \cos \alpha) + \cos \alpha \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Der Winkel  $\psi$  hat den numerischen Wert  $\psi = 23.44^\circ$  (siehe dazu z.B. [2]).

## 7 Jahreszeitabhängigkeit

Der jahreszeitliche Einfluss wird durch eine Kreisbewegung der Sonne um die als im Koordinatenursprung fixiert angenommene Erde berücksichtigt.

Sei  $t$  die Jahreszeit, gemessen in Tagen ab dem 1. Januar. Dann gilt für den Ort der Sonne als Funktion des jahreszeitlichen Umlaufwinkels  $\Omega = \omega t$  mit  $\omega = \frac{2\pi}{365}$  die Gleichung

$$\underline{S} = R_S \begin{pmatrix} \cos \Omega \\ \sin \Omega \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Die Sommersonnenwende am 21. Juni wird als Startwinkel  $\Omega = 0$  definiert (siehe dazu auch die Problemskizzen 1,2).

Für jede gewählte Jahreszeit  $t$  und damit für den Winkel  $\Omega = \omega t$  soll für 12 Uhr mittags  $\alpha = 0$  gelten. Dies erfordert eine Drehung der Erde um ihre Rotationsachse um den Winkel  $\alpha = \Omega$ .

## 8 Fusspunkt des Stabes

Der Ort  $\underline{P} = (p_1, p_2, p_3)^T$  des Stabfusspunktes bestimmt sich aus der geographischen Breite  $\Theta$ , der geographischen Länge  $\varphi$ , dem Erdradius  $R_E$  und dem Achsneigungswinkel  $\psi$  zu (siehe dazu z.B. [4])

$$\underline{P} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \tag{4}$$

mit

$$\begin{aligned} p_1 &= R_E \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Theta + \psi\right) \cos \varphi \\ p_2 &= R_E \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Theta + \psi\right) \sin \varphi \\ p_3 &= R_E \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Theta + \psi\right). \end{aligned}$$

Dabei wurde die geographischen Breite durch  $\Theta - \psi \rightarrow \frac{\pi}{2} - \Theta + \psi$  ins Kugelkoordinatensystem umgerechnet (siehe dazu z.B. [4]).

## 9 Endpunkt des Stabes

Für den Punkt  $\underline{Q}$  am Ende des Stabes der Länge  $L$  gilt

$$\underline{Q} = \left(1 + \frac{L}{R_E}\right) \underline{P}. \quad (5)$$

## 10 Tangentialebene

Die Kugel mit Radius  $R_E$  um den Ursprung ist durch die Gleichung  $f(x_1, x_2, x_3) = 0$  gegeben, mit

$$f(x_1, x_2, x_3) = \sum_i x_i^2 - R_E^2, \quad (6)$$

für den Index gilt hier und im folgenden  $i \in [1, 3]$ .

Für die Tangentialebene im Berührungspunkt  $\underline{P} = (p_1, p_2, p_3)^T$  gilt (siehe dazu z.B. [3])

$$\sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_i - p_i) = 0.$$

Die Ableitungen sind im Berührungspunkt  $\underline{P}$  zu bilden.

Für die implizite Gleichung der Tangentialebene im Berührungspunkt  $\underline{P}$  folgt schliesslich für die Kugel nach Gleichung (6) der Ausdruck

$$\sum_i p_i (x_i - p_i) = 0$$

oder in vektorieller Schreibweise

$$\underline{P}^T (\underline{x} - \underline{P}) = 0. \quad (7)$$

## 11 Verbindungsgerade

Die Sonne befindet sich nach Gleichung (3) im Punkt  $\underline{S}$ .

Die Punkte der Verbindungsgerade  $\underline{G}$  der Sonne  $\underline{S}$  mit dem Stabende  $\underline{Q}$  nach Gleichung (5) sind durch

$$\underline{G} = \mu \underline{Q} + (1 - \mu) \underline{S} \quad (8)$$

gegeben, dabei gilt  $\mu \geq 0$ .

Berücksichtigt man die Drehung der Sonne durch die Drehmatrix  $D_{(-\alpha)}$  und fixiert die Erde, dann folgt mit

$$\underline{S}^\alpha = D_{(-\alpha)} \underline{S} \quad (9)$$

aus Gleichung (8)

$$\begin{aligned} \underline{G}_S^\alpha &= \mu \underline{Q} + (1 - \mu) D_{(-\alpha)} \underline{S} \\ &= \mu \underline{Q} + (1 - \mu) \underline{S}^\alpha \end{aligned} \quad (10)$$

Hier wird für  $\mu = 0$  wird der Punkt  $\underline{S}^\alpha$ , für  $\mu = 1$  wird der Punkt  $\underline{Q}$  beschrieben.

## 12 Problemlösung

### 12.1 Lösung durch Fixierung der Erde

Gesucht ist der Schnittpunkt der Geraden  $\underline{G}_S^\alpha$  nach Gleichung (10) mit der Tangentialebene  $T$  oder anders formuliert, gesucht wird der Geradenparameter  $\mu$ , der eine Lösung  $\underline{x}_0$  der Gleichung (7) mit der Bedingung

$$\underline{x}_0 = \mu \underline{Q} + (1 - \mu) \underline{S}^\alpha \quad (11)$$

zulässt.

#### 12.1.1 Lösungspunkt

Einsetzen von Gleichung (11) in Gleichung (7) liefert

$$\underline{P}^T [\mu \underline{Q} + (1 - \mu) \underline{S}^\alpha - \underline{P}] = 0.$$

Wegen  $\underline{P}^T \underline{P} = R_E^2$  folgt nach kurzer Rechnung die zu lösende Gleichung

$$\mu_0(\alpha) = \frac{R^S(\alpha)}{1 + R^S(\alpha)} \quad (12)$$

mit

$$R^S(\alpha) = \frac{1}{L} \left[ R_E - \frac{\underline{P}^T \underline{S}^\alpha}{R_E} \right].$$

Da mit  $\mu = 0$  die Sonne und mit  $\mu = 1$  das Stabende beschrieben wird, muss wegen Gleichung (10) für die Lösung  $\mu_0 > 1$  und damit  $R < 0$  gelten.

Der gesuchte Punkt  $\underline{x}_0$  ergibt sich als Funktion des Drehwinkels  $\alpha$  mit dem nach Gleichung (12) bestimmten  $\mu_0(\alpha)$  durch Einsetzen in Gleichung (11) zu

$$\underline{x}_0^S(\alpha) = \mu_0 \underline{Q} + (1 - \mu_0) \underline{S}^\alpha. \quad (13)$$

#### 12.1.2 Koordinatentransformation

Die gefundenen Trajektorienpunkte  $\underline{x}_0(\alpha)$  sind im Koordinatensystem  $(x_1, x_2, x_3)$  gegeben. Sie sollen aber auf ein zweidimensionales Koordinatensystem der Tangentialebene  $T$  transformiert werden.

Dazu wird der Punkt  $\underline{P}$  um um seinen negativen Längenwinkel  $-\varphi$  um die  $x_3$ -Achse und anschliessend um den Winkel  $\frac{\pi}{2} - (\Theta + \psi)$  um die  $x_2$ -Achse gedreht.

Die Drehung um die  $x_3$ -Achse um den Winkel  $\varphi$  wird durch die Matrix

$$D_{\varphi}^{x_3} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

und die Drehung um die  $x_2$ -Achse um den Winkel  $\Theta$  wird durch die Matrix

$$D_{\Theta}^{x_2} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & 0 & \sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

vermittelt (siehe dazu z.B. [1]).

Der Punkt  $\underline{P}$  liegt dann auf dem Äquator,  $0^\circ$  Breite,  $0^\circ$  Länge, und stimmt mit der  $x_1$ -Achse überein. Die Trajektorienpunkte können mittels der Projektionsabbildung

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

auf die Tangentialebene  $T$  projiziert werden. Der dadurch auftretende Verzerrungsfehler liegt bei Stablängen von einem Meter im Bereich von Mikrometern.

Es ergibt sich also mit den Abbildungen (14, 15 und 16) für die auf die Tangentialebene projizierten Punkte aus  $\mathbb{R}^2$

$$\underline{x}^S(\alpha) = AD_{\left[\frac{\pi}{2} - (\Theta + \psi)\right]}^{x_2} D_{(-\varphi)}^{x_3} \underline{x}_0^S(\alpha). \quad (17)$$

## Literatur

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Drehmatrix>
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdachse>
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Tangentialebene>
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kugelkoordinaten>