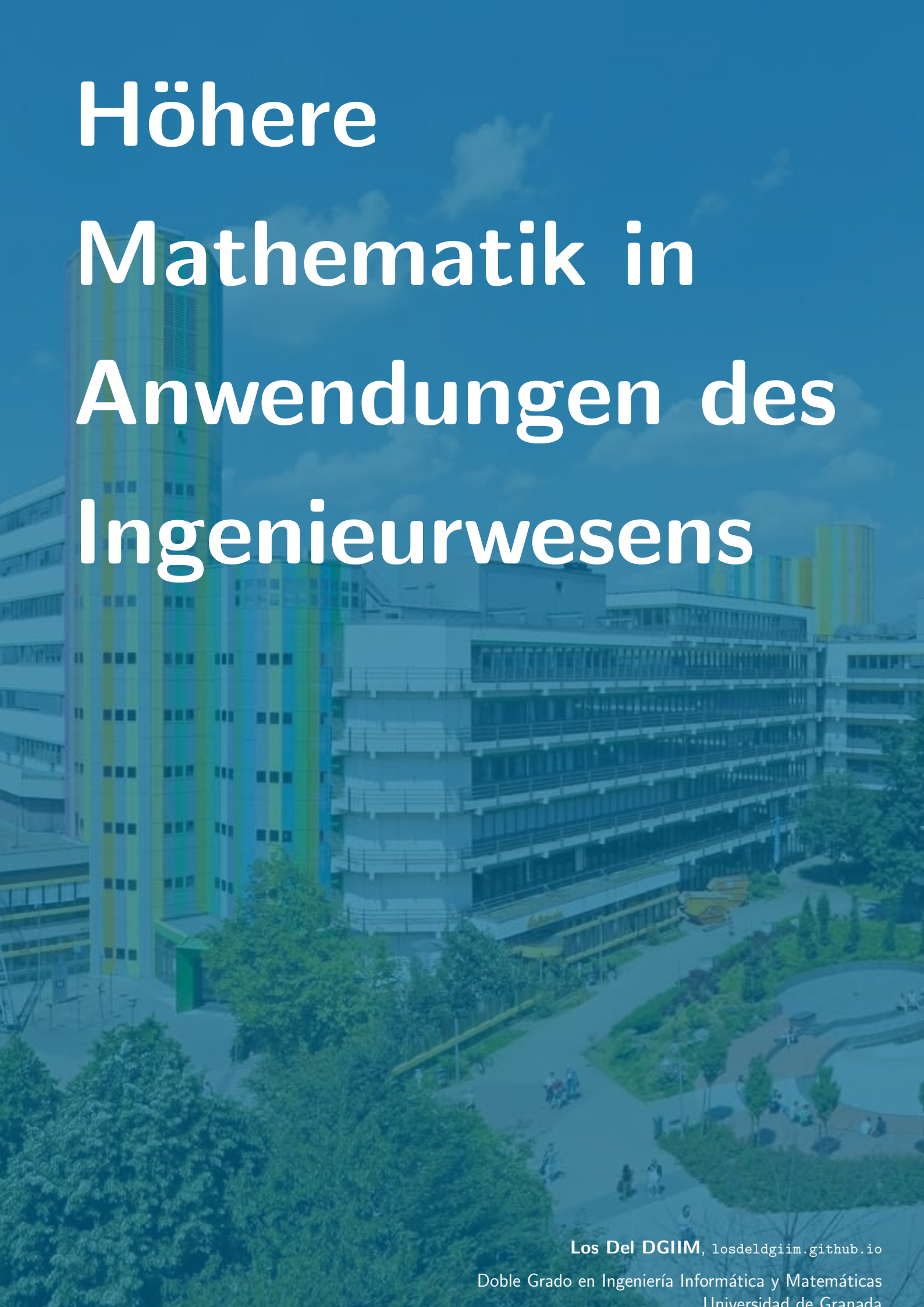


Höhere Mathematik in Anwendungen des Ingenieurwesens



Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada

Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

Höhere Mathematik in Anwendungen des Ingenieurwesens

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Arturo Olivares Martos

Granada, 2025

Índice general

1. Übungs Blätter	5
1.3. Rechnen mit physikalischen Größen	5
1.5. Komplexe Rechnung in physikalisch-technischen Zusammenhängen . .	9
1.8. Ableitungen von Funktionen mehrerer Veränderlicher	15
1.9. Kurvenintegrale	17
1.10. Potenzialfelder und Mehrfachintegrale	21
1.11. Datenanalyse und Fehlerrechnung	26

1. Übungs Blätter

1.3. Rechnen mit physikalischen Größen

Ejercicio 1.3.1 (Fährverbindung). Eine Fähre bewegt sich mit der Eigengeschwindigkeit $v_0 = 4 \text{ m/s}$ (relativ zum Fluss) vom Uferpunkt A aus auf kürzestem Weg zum gegenüberliegenden Flussufer (Punkt B ; Abb. 1.1).

1. Unter welchem Winkel α muss die Fähre gegen die Strömung gesteuert werden, wenn die Geschwindigkeit der Strömung den Betrag $v_s = 1,5 \text{ m/s}$ hat?

The Ferry wants to get to B in an straight line. Therefore, it must compensate the flow velocity by steering at an angle α against the flow. It is then needed that:

$$v_s = v_0 \sin(\alpha) \implies \alpha = \arcsin\left(\frac{v_s}{v_0}\right) = \arcsin\left(\frac{1,5}{4}\right) \approx 0,3844 \text{ rad} \approx 22,024^\circ$$

2. Wie groß ist dann die resultierende Geschwindigkeit v_r der Fähre?

The resulting velocity v_r of the ferry is given by:

$$v_r = v_0 \cos(\alpha) = 4 \cos(0,3844) \approx 3,7081 \text{ m/s}$$

Ejercicio 1.3.2 (Elektrische Punktladungen im Koordinatensystem). Eine Punktladung $q_1 = 6,0 \mu\text{C}$ befindet sich in einem kartesischen Koordinatensystem bei $x_1 = 1,0 \text{ m}$, $y_1 = 0,5 \text{ m}$. Eine zweite Ladung $q_2 = -2,5 \mu\text{C}$ befindet sich in dessen Ursprung. Ein Elektron, d.h. eine dritte Punktladung, ist in einem Punkt mit den Koordinaten (x_e, y_e) . Berechnen Sie die Werte für x_e und y_e , bei denen sich das

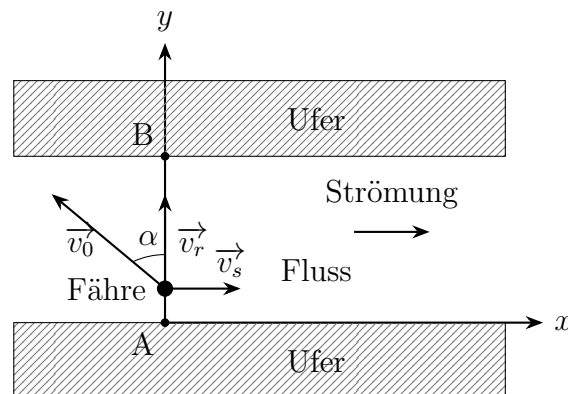


Figura 1.1: Fährverbindung über einen Fluss mit Strömung.

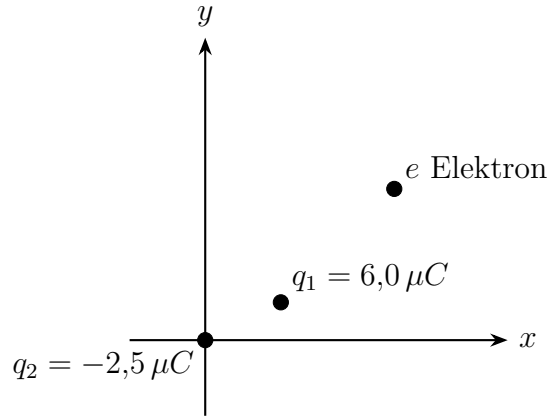


Figura 1.2: Punktladungen im Koordinatensystem.

Elektron im Gleichgewicht befindet, d.h. bei dem die Gesamtkraft auf das Elektron verschwindet.

Option 1 :

The forces acting on the electron due to the other two charges must cancel each other out for equilibrium. Let F_{ei} be the force on the electron due to charge q_i . The forces can be expressed as:

$$\vec{F}_{e1} + \vec{F}_{e2} = 0$$

where, using that $q_e = -e < 0$ (the charge of the electron):

$$\vec{F}_{e1} = -k_e \frac{|q_1 e|}{r_{e1}^2} \hat{r}_{e1}, \quad \vec{F}_{e2} = k_e \frac{|q_2 e|}{r_{e2}^2} \hat{r}_{e2}$$

Here, k_e is Coulomb's constant, e is the elementary charge, r_{ei} is the distance between the electron and charge q_i , and \hat{r}_{ei} is the unit vector pointing from charge q_i to the electron. Using the values of r_{e1} and r_{e2} based on the coordinates of the charges and the electron, we have:

$$\vec{r}_{e1} = (x_e - 1, y_e - 0,5), \quad \vec{r}_{e2} = (x_e, y_e)$$

Therefore, the equilibrium condition becomes:

$$-k_e \frac{|q_1 e|}{((x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2)} \cdot \frac{(x_e - 1, y_e - 0,5)}{\sqrt{(x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2}} + k_e \frac{|q_2 e|}{(x_e^2 + y_e^2)} \cdot \frac{(x_e, y_e)}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} = 0$$

This vector equation can be separated into its x and y components, leading to a system of two equations with two unknowns (x_e and y_e). Solving this system will yield the coordinates of the electron in equilibrium.

$$\begin{aligned} -k_e \frac{|q_1 e|(x_e - 1)}{((x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2)^{3/2}} + k_e \frac{|q_2 e|x_e}{(x_e^2 + y_e^2)^{3/2}} &= 0 \\ -k_e \frac{|q_1 e|(y_e - 0,5)}{((x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2)^{3/2}} + k_e \frac{|q_2 e|y_e}{(x_e^2 + y_e^2)^{3/2}} &= 0 \end{aligned}$$

In an easier way:

$$\frac{|q_1|(x_e - 1)}{((x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2)^{3/2}} = \frac{|q_2|x_e}{(x_e^2 + y_e^2)^{3/2}}$$

$$\frac{|q_1|(y_e - 0,5)}{((x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2)^{3/2}} = \frac{|q_2|y_e}{(x_e^2 + y_e^2)^{3/2}}$$

As we can see, this system of equations is nonlinear and may require numerical methods or iterative approaches to solve for x_e and y_e . We should then approach the problem using another method.

Option 2 :

Given that $\vec{F}_{e1} = -\vec{F}_{e2}$, the forces must have the same magnitude but opposite directions. This implies that the electron must lie along the line connecting the two charges, with $x_e, y_e < 0$. Therefore:

$$y_e = \frac{y_1}{x_1}x_e = \frac{1}{2}x_e$$

On the other hand, equating the magnitudes of the forces:

$$|\vec{F}_{e1}| = |\vec{F}_{e2}| \implies k_e \frac{|q_1 e|}{r_{e1}^2} = k_e \frac{|q_2 e|}{r_{e2}^2} \implies \frac{|q_1|}{r_{e1}^2} = \frac{|q_2|}{r_{e2}^2} \implies \frac{|q_1|}{(x_e - 1)^2 + (y_e - 0,5)^2} = \frac{|q_2|}{x_e^2 + y_e^2}$$

Therefore, using the relation for y_e in terms of x_e , we have the following equation to solve for x_e :

$$\frac{|q_1|}{(x_e - 1)^2 + \left(\frac{1}{2}x_e - 0,5\right)^2} = \frac{|q_2|}{x_e^2 + \left(\frac{1}{2}x_e\right)^2}$$

$$6 \cdot \left(\frac{5}{4}x_e^2\right) = 2,5 \cdot \left(\frac{5}{4}x_e^2 - 2,5x_e + 1,25\right)$$

$$4,375x_e^2 + 6,25x_e - 3,125 = 0$$

$$x_e = \frac{-6,25 \pm \sqrt{(-6,25)^2 - 4 \cdot 4,375 \cdot (-3,125)}}{2 \cdot 4,375} = \frac{-5 \pm 2\sqrt{15}}{7}$$

Given that $x_e < 0$, we take:

$$x_e = -\frac{5 + 2\sqrt{15}}{7} \approx -1,8208 \text{ m}$$

$$y_e = \frac{1}{2}x_e = -\frac{5 + 2\sqrt{15}}{14} \approx -0,9104 \text{ m}$$

Ejercicio 1.3.3 (Die magnetische Kraft). Ein punktförmiges Teilchen mit einer Ladung $q = -3,64 \text{ nC}$ bewegt sich mit einer Geschwindigkeit $\vec{v} = 2,75 \cdot 10^6 \text{ m/s } \vec{e}_x$, d.h. entlang der x-Achse. Berechnen Sie die Kraft, die folgende Felder auf das Teilchen ausüben:

1. $\vec{B} = 0,38 \text{ T } \vec{e}_y$

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ v_x & 0 & 0 \\ 0 & B_y & 0 \end{vmatrix} = q \cdot v_x \cdot B_y \cdot \vec{e}_z = \\ &= -3,64 \cdot 10^{-9} \cdot 2,75 \cdot 10^6 \cdot 0,38 \vec{e}_z = -3,8038 \cdot 10^{-3} \text{ N } \vec{e}_z\end{aligned}$$

2. $\vec{B} = T 0,75 \vec{e}_x + T 0,75 \vec{e}_y$

$$\begin{aligned}\vec{F} &= q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ v_x & 0 & 0 \\ B_x & B_y & 0 \end{vmatrix} = q \cdot v_x \cdot B_y \cdot \vec{e}_z = \\ &= -3,64 \cdot 10^{-9} \cdot 2,75 \cdot 10^6 \cdot 0,75 \vec{e}_z = -7,5075 \cdot 10^{-3} \text{ N } \vec{e}_z\end{aligned}$$

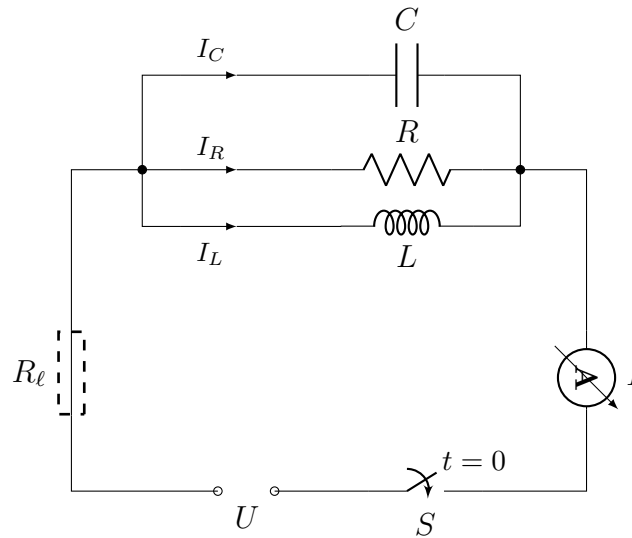


Figura 1.3: Skizze zur Aufgabe 1.5.2

1.5. Komplexe Rechnung in physikalisch-technischen Zusammenhängen

Ejercicio 1.5.1. Zeigen Sie durch Rechnung in komplexer Form: Drei gleichfrequente, sinusförmige Wechselströme i_1 , i_2 und i_3 mit den Amplituden i_0 , der Kreisfrequenz $\omega > 0$ und den Nullphasenwinkeln $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 2/3\pi$ und $\varphi_3 = 4/3\pi$ löschen sich bei ungestörter Überlagerung gegenseitig aus, d.h. $i_1 + i_2 + i_3 = 0$.

Let $\underline{i}_1(t)$, $\underline{i}_2(t)$ und $\underline{i}_3(t)$ be:

$$\begin{aligned}\underline{i}_1(t) &= i_0 \cdot e^{j(\omega t + 0)} = i_0 \cdot e^{j\omega t} \\ \underline{i}_2(t) &= i_0 \cdot e^{j(\omega t + 2/3\pi)} = i_0 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j2/3\pi} \\ \underline{i}_3(t) &= i_0 \cdot e^{j(\omega t + 4/3\pi)} = i_0 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j4/3\pi}\end{aligned}$$

Therefore:

$$\begin{aligned}\underline{i}_1(t) + \underline{i}_2(t) + \underline{i}_3(t) &= i_0 \cdot e^{j\omega t} (e^{j0} + e^{j2/3\pi} + e^{j4/3\pi}) = \\ &= i_0 \cdot e^{j\omega t} \left(1 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = \\ &= i_0 \cdot e^{j\omega t} \cdot 0 = 0\end{aligned}$$

Therefore, we have shown that:

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = \Im(\underline{i}_1(t) + \underline{i}_2(t) + \underline{i}_3(t)) = \Im(0) = 0$$

Ejercicio 1.5.2 (Resonanz im Parallelschwingkreis). Der in Abbildung 1.3 skizzierte Parallelschwingkreis mit dem ohmschen Widerstand $R = 10 \Omega$, der Induktivität $L = 0,2 \text{ H}$ und der Kapazität $C = 10 \text{ mF}$ wird durch eine Wechselstromquelle mit dem Effektivwert $I = 10 \text{ A}$ und der variablen Kreisfrequenz ω zu elektromagnetischen Schwingungen angeregt.

1. Im Resonanzfall sind der Gesamtstrom I und die angelegte Spannung U in Phase, d.h. $\varphi_I - \varphi_U = 0$. Bei welcher Kreisfrequenz ω_0 tritt dieser Fall ein? Wie groß ist dann der komplexe Gesamtwiderstand Z ?

The complex resistance is:

$$\underline{Z} = \frac{u(t)}{\underline{i}(t)} = \frac{\sqrt{2}U e^{j(\omega t + \varphi_U)}}{\sqrt{2}I e^{j(\omega t + \varphi_I)}} = \frac{U}{I} e^{j(\varphi_U - \varphi_I)} \stackrel{(*)}{=} \frac{U}{I} e^{j0} = \frac{U}{I} \in \mathbb{R}$$

where in $(*)$ we used the fact that in resonance $\varphi_U = \varphi_I$.

We can calculate the complex resistance as:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\underline{Z}} &= \frac{1}{\underline{Z}_R} + \frac{1}{\underline{Z}_L} + \frac{1}{\underline{Z}_C} \\ &= \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \\ \Rightarrow \underline{Z} &= \frac{1}{\frac{1}{R} - j\frac{1}{\omega L} + j\omega C} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(-\frac{1}{\omega L} + \omega C\right)} \end{aligned}$$

Given that $\underline{Z} \in \mathbb{R}$, we have that the imaginary part must be zero:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\omega_0 L} + \omega_0 C &= 0 \Rightarrow \omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L} \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \\ \Rightarrow \omega_0 &= \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{0,2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{500} \approx 22,36 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Therefore, we have that:

$$\underline{Z} = Z = R = 10 \Omega$$

2. Wie ändert sich die Situation, wenn die Zuleitungen nicht mehr als ideal angenommen werden und einen ohmschen Widerstand R_ℓ beitragen? Welche Werte haben ω_0 und Z dann?

In this case, we have:

$$\underline{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(-\frac{1}{\omega L} + \omega C\right)} + R_\ell$$

Therefore, ω_0 does not change, but:

$$\underline{Z} = Z = R + R_\ell = 10 + R_\ell$$

Ejercicio 1.5.3 (Wechselstrommessbrücke). Mit der in Abbildung 1.4 dargestellten Brückenschaltung lässt sich ein unbekannter komplexer Widerstand $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_X$ wie folgt bestimmen: Bei vorgegebenen (komplexen) Widerständen \underline{Z}_2 und \underline{Z}_3 wird der stetig veränderbare komplexe Widerstand \underline{Z}_4 so eingestellt, dass der Brückenweig A–B stromlos wird. Das in die Brücke geschaltete Wechselstromamperemeter mit dem (bekannten) Innenwiderstand \underline{Z}_5 dient dabei lediglich als Nullindikator.

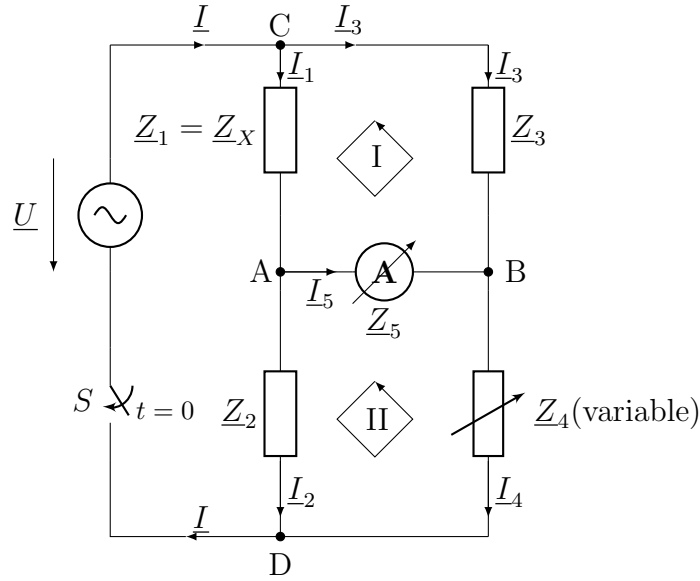


Figura 1.4: Skizze zur Aufgabe 1.5.3.

1. Wie lautet die sogenannte Abgleichbedingung, d.h. die Bedingung für die Stromlosigkeit des Brückenweiges A-B?

Let's denote $U_{ij} := \underline{U}_i - \underline{U}_j$ the voltage between nodes i and j . According to Kirchhoff's laws, we have that:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{CA} + \underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CB} &= 0 \\ \underline{U}_{AD} - \underline{U}_{BD} - \underline{U}_{AB} &= 0\end{aligned}$$

In order that the branch A-B is currentless, we need:

$$0 = \underline{I}_5 = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_5} \iff \underline{U}_{AB} = 0$$

Therefore, we have:

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{CB} \quad \underline{U}_{AD} = \underline{U}_{BD} \quad (1.1)$$

Using now Kirchhoff's Intensity Law on nodes A and B , taking into account that $\underline{I}_5 = 0$, we have:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_4\end{aligned}$$

Using Ohm's Law, we have:

$$\frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_1} = \frac{\underline{U}_{AD}}{\underline{Z}_2} \quad \frac{\underline{U}_{CB}}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{U}_{BD}}{\underline{Z}_4} \quad (1.2)$$

Unifying Equations (1.1) and (1.2), we obtain:

$$\begin{aligned}\frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_1} = \frac{\underline{U}_{AD}}{\underline{Z}_2} &\implies \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{U}_{AD}} = \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \\ \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{U}_{AD}}{\underline{Z}_4} &\implies \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{U}_{AD}} = \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_4}\end{aligned}$$

We should denote that we can divide by \underline{U}_{AD} because if $\underline{U}_{AD} = 0$, then $\underline{U}_{BD} = \underline{U}_{AD} = 0$ and therefore $\underline{I}_2 = \underline{I}_4 = 0$, which according to the Kirchhoff's Intensity Law implies that $\underline{I} = 0$, which would mean that $\underline{U} = 0$, which is not the case.

Therefore, we have the balance condition:

$$\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_4} \implies \underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$$

2. In einem konkreten Fall haben die festen Widerstände \underline{Z}_2 und \underline{Z}_3 folgende Werte:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_2 &= 10\Omega - j \cdot 2\Omega, \\ \underline{Z}_3 &= 8\Omega - j \cdot 6\Omega.\end{aligned}$$

Die Brücke A–B wird dabei genau dann stromlos, wenn der variable Widerstand \underline{Z}_4 auf den Wert

$$\underline{Z}_4 = 5\Omega - j \cdot 2\Omega$$

eingestellt wird. Welchen Wert besitzt dann der (zunächst noch unbekannte) Widerstand \underline{Z}_X ?

Using the balance condition obtained in the previous part, we obtain:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_X &= \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_4} \\ &= \frac{(10 - 2j)(8 - 6j)}{5 - 2j} = \\ &= \frac{492}{29}\Omega - j \cdot \frac{244}{29}\Omega \approx 16,97\Omega - j \cdot 8,41\Omega\end{aligned}$$

Ejercicio 1.5.4 (Wechselstromparadoxon). Der in Bild 1.5 dargestellte Wechselstromkreis enthält die ohmschen Widerstände R und R_x und einen zu R_x parallel geschalteten Kondensator mit der Kapazität C . Beim Anlegen einer Wechselspannung \underline{U} mit der Kreisfrequenz ω fließt der Gesamtstrom \underline{I} , dessen Effektivwert I durch das zugeschaltete Wechselstrommessgerät A gemessen wird. Der Innenwiderstand R_i des Geräts sei im Widerstand R bereits enthalten. Zeigen Sie: Der ohmsche Widerstand R_x lässt sich so wählen, dass die Stromanzeige unabhängig ist von der Stellung des Schalters S (geschlossen oder offen; sog Wechselstromparadoxon).

We have two options:

- Switch open: In this case, everything is connected in serial and $\underline{I}_1 = 0$. Therefore:

$$\underline{Z}_{\text{open}} = R + \frac{1}{j\omega C} = R - \frac{1}{\omega C} \cdot j$$

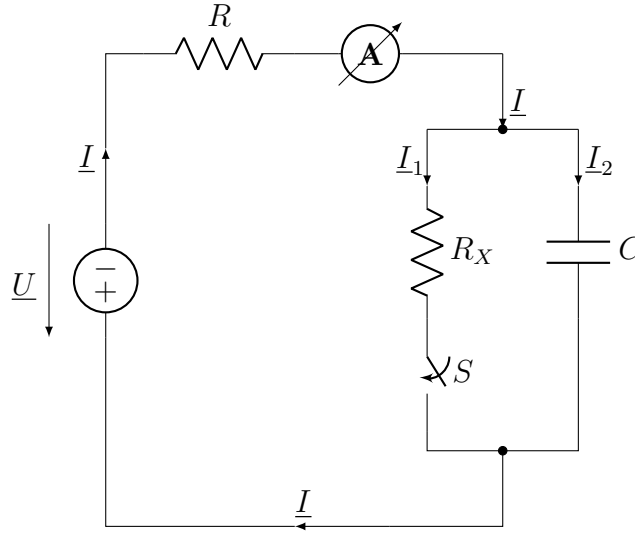


Figura 1.5: Skizze zur Aufgabe 1.5.4.

- Switch closed:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{\text{closed}} &= R + \frac{1}{\frac{1}{R_X} + j\omega C} = \left(R + \frac{\frac{1}{R_X}}{\frac{1}{R_X^2} + \omega^2 C^2} \right) - \frac{\omega C}{\frac{1}{R_X^2} + \omega^2 C^2} \cdot j = \\
 &= \left(R + \frac{R_X}{1 + (R_X \omega C)^2} \right) - \frac{R_X^2 \omega C}{1 + (R_X \omega C)^2} \cdot j = \\
 &= \frac{R(1 + (R_X \omega C)^2) + R_X}{1 + (R_X \omega C)^2} - \frac{R_X^2 \omega C}{1 + (R_X \omega C)^2} \cdot j
 \end{aligned}$$

In order that the current does not depend on the position of the switch, it is needed:

$$\hat{I}_{\text{closed}} = \hat{I}_{\text{open}} \implies |I_{\text{closed}}| = |I_{\text{open}}| \implies \left| \frac{U_{\text{closed}}}{Z_{\text{closed}}} \right| = \left| \frac{U_{\text{open}}}{Z_{\text{open}}} \right|$$

Given that $U_{\text{open}} = U_{\text{closed}}$, we only need that:

$$\begin{aligned}
 |\underline{Z}_{\text{closed}}| &= |\underline{Z}_{\text{open}}| \implies |\underline{Z}_{\text{closed}}|^2 = |\underline{Z}_{\text{open}}|^2 \implies \\
 \implies R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2} &= \frac{(R(1 + (R_X \omega C)^2) + R_X)^2 + (R_X^2 \omega C)^2}{(1 + (R_X \omega C)^2)^2} \implies \\
 \implies (R(1 + (R_X \omega C)^2))^2 + \frac{(1 + (R_X \omega C)^2)^2}{\omega^2 C^2} &= (R(1 + (R_X \omega C)^2))^2 + R_X^2 + 2R_X R(1 + (R_X \omega C)^2) + \\
 \implies \frac{(1 + (R_X \omega C)^2)^2}{\omega^2 C^2} &= R_X^2 + 2R_X R(1 + (R_X \omega C)^2) + (R_X^2 \omega C)^2 \implies \\
 \implies 1 + 2(R_X \omega C)^2 &= (R_X \omega C)^2 + 2\omega^2 C^2 R_X R(1 + (R_X \omega C)^2) \implies \\
 \implies 1 + (R_X \omega C)^2 &= 2\omega^2 C^2 R_X R(1 + (R_X \omega C)^2) \implies \\
 \implies (2\omega^2 C^2 R_X R - 1)(1 + (R_X \omega C)^2) &= 0
 \end{aligned}$$

Therefore, the only possible solution is:

$$R_X = \frac{1}{2R(\omega C)^2}$$

Using that value of R_X , we will measure the same current value with the switch opened and closed.

1.8. Ableitungen von Funktionen mehrerer Veränderlicher

Ejercicio 1.8.1 (Partielle Ableitungen 1. und 2. Ordnung). Bilden Sie alle partiellen Ableitungen erster und zweiter Ordnung der Funktion:

$$\begin{aligned} f : \quad \mathbb{R}^2 &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) &\longmapsto x^2 \cdot e^{-xy} \end{aligned}$$

The partial derivatives of first order are:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) &= 2xe^{-xy} - x^2ye^{-xy} = e^{-xy}(2x - x^2y) \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) &= -x^3e^{-xy} \end{aligned}$$

The partial derivatives of second order are:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} (e^{-xy}(2x - x^2y)) = -ye^{-xy}(2x - x^2y) + e^{-xy}(2 - 2xy) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} (-x^3e^{-xy}) = x^4e^{-xy} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} (-x^3e^{-xy}) = -3x^2e^{-xy} + x^3ye^{-xy} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.8.2 (Eine Differenzialgleichung). Zeigen Sie, dass die Funktion

$$\begin{aligned} f : \quad \mathbb{R}^2 &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (x, t) &\longmapsto e^{-\pi^2 a^2 t} \cdot \sin(\pi x) \end{aligned}$$

eine Lösung der folgenden Gleichung ist:

$$a^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial f}{\partial t} \quad (a \in \mathbb{R} \text{ const.})$$

Let's compute the partial derivatives:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) &= -\pi^2 a^2 e^{-\pi^2 a^2 t} \sin(\pi x) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, t) &= -\pi^2 e^{-\pi^2 a^2 t} \sin(\pi x) \end{aligned}$$

Therefore, it is clear that it is a solution of the given equation.

Ejercicio 1.8.3 (Totales Differenzial einer gebrochen rationalen Funktion). Bestimmen Sie das totale Differenzial der Funktion

$$\begin{aligned} f : \quad \mathbb{R}^2 &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) &\longmapsto \frac{x^2 + y^2}{y - x} \end{aligned}$$

To find the total differential of the function, we first compute the partial derivatives:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) &= \frac{2x(y-x) + (x^2 + y^2)}{(y-x)^2} = \frac{-x^2 + 2xy + y^2}{(y-x)^2} \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) &= \frac{2y(y-x) - (x^2 + y^2)}{(y-x)^2} = \frac{y^2 - 2xy - x^2}{(y-x)^2}\end{aligned}$$

Therefore the total differential is:

$$\begin{aligned}df(x, y) &= \frac{-x^2 + 2xy + y^2}{(y-x)^2} dx + \frac{y^2 - 2xy - x^2}{(y-x)^2} dy = \\ &= \frac{(-x^2 + 2xy + y^2) dx + (y^2 - 2xy - x^2) dy}{(y-x)^2}\end{aligned}$$

1.9. Kurvenintegrale

Ejercicio 1.9.1 (Kurvenintegral erster Art). Berechnen Sie das Kurvenintegral erster Art $\int_{\varphi_1} f dt$ für die skalarwertige Funktion

$$\begin{aligned} f : \quad \mathbb{R}^3 &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (x, y, z) &\longmapsto \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{aligned}$$

über die parametrisierte Kurve

$$\begin{aligned} \varphi_1 : [0, 2\pi] &\longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ t &\longmapsto (t \cos(t), t \sin(t), t) \end{aligned}$$

First of all, we compute the derivative of the parameterization:

$$\varphi_1'(t) = \begin{pmatrix} \cos(t) - t \sin(t) \\ \sin(t) + t \cos(t) \\ 1 \end{pmatrix}$$

We then realize that ϕ is differentiable, and given that the third component is constant and non-zero, we can conclude that the parameterization is regular. Therefore, in order to compute the norm of the derivative, we have:

$$\begin{aligned} \|\varphi_1'(t)\| &= \sqrt{(\cos(t) - t \sin(t))^2 + (\sin(t) + t \cos(t))^2 + 1^2} \\ &= \sqrt{\cos^2(t) - 2t \sin(t) \cos(t) + t^2 \sin^2(t) + \sin^2(t) + 2t \sin(t) \cos(t) + t^2 \cos^2(t) + 1} \\ &= \sqrt{1 + t^2 + 1} = \sqrt{t^2 + 2} \end{aligned}$$

Therefore, we can now compute the curve integral:

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_1} f dt &= \int_0^{2\pi} f(\varphi_1(t)) \|\varphi_1'(t)\| dt \\ &= \int_0^{2\pi} \sqrt{t^2 + t^2} \cdot \sqrt{t^2 + 2} dt \\ &= \sqrt{2} \int_0^{2\pi} t \sqrt{t^2 + 2} dt \end{aligned}$$

We use the substitution given by:

$$\begin{aligned} \Phi : [2, 4\pi^2 + 2] &\longrightarrow [0, 2\pi] \\ u &\longmapsto \sqrt{u - 2} \end{aligned}$$

Thus, using $t = \Phi(u)$, we have:

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_1} f dt &= \sqrt{2} \int_{\Phi^{-1}(0)}^{\Phi^{-1}(2\pi)} \Phi(u) \sqrt{\Phi(u)^2 + 2} \cdot \Phi'(u) du \\ &= \sqrt{2} \int_2^{4\pi^2+2} \sqrt{u-2} \sqrt{u} \cdot \frac{1}{2\sqrt{u-2}} du = \frac{\sqrt{2}}{2} \int_2^{4\pi^2+2} \sqrt{u} du = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[\frac{2}{3} u^{3/2} \right]_2^{4\pi^2+2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} [u^{3/2}]_2^{4\pi^2+2} = \frac{\sqrt{2}}{3} ((4\pi^2 + 2)^{3/2} - 2^{3/2}) \end{aligned}$$

Ejercicio 1.9.2 (Kurvenintegral zweiter Art). Berechnen Sie das Kurvenintegral zweiter Art $\int_{\varphi_2} \vec{f} d\vec{s}$ für das Vektorfeld

$$\begin{aligned} \vec{f} : \quad \mathbb{R}^3 &\longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ (x, y, z) &\longmapsto (x - z, y^2, 1) \end{aligned}$$

über die parametrisierte Kurve

$$\begin{aligned} \varphi_2 : [0, 1] &\longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ t &\longmapsto (t^2, t, e^t) \end{aligned}$$

We first compute the derivative of the parameterization:

$$\varphi_2'(t) = (2t, 1, e^t)$$

We then realize that ϕ is differentiable, and given that the third component is non-zero, we can conclude that the parameterization is regular. Then, the dot product $\vec{f}(\varphi_2(t)) \cdot \varphi_2'(t)$ is given by:

$$\begin{aligned} \vec{f}(\varphi_2(t)) \cdot \varphi_2'(t) &= (t^2 - e^t, t^2, 1) \cdot (2t, 1, e^t) \\ &= 2t^3 - 2te^t + t^2 + e^t \end{aligned}$$

Therefore, we can now compute the curve integral:

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_2} \vec{f} d\vec{s} &= \int_0^1 \vec{f}(\varphi_2(t)) \cdot \varphi_2'(t) dt \\ &= \int_0^1 (2t^3 - 2te^t + t^2 + e^t) dt \end{aligned}$$

Let's firstly compute the integral of te^t using integration by parts:

$$\begin{bmatrix} u(t) = t & u'(t) = 1 \\ v(t) = e^t & v'(t) = e^t \end{bmatrix}$$

$$\int_0^1 te^t dt = [te^t]_0^1 - \int_0^1 e^t dt$$

Now, we can compute the entire integral:

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_2} \vec{f} d\vec{s} &= \left[2 \cdot \frac{t^4}{4} - 2(te^t - e^t) + \frac{t^3}{3} + e^t \right]_0^1 = \left[\frac{t^4}{2} - 2te^t + 3e^t + \frac{t^3}{3} \right]_0^1 = \\ &= \frac{1}{2} - 2e + 3e + \frac{1}{3} - 3 = -\frac{2}{3} + e \end{aligned}$$

Ejercicio 1.9.3 (Länge einer Kurve). Berechnen Sie die Länge der Kurve C mit der Parameterdarstellung

$$\begin{aligned} \varphi : [-1, 1] &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ t &\longmapsto (x(t), y(t)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x : [-1, 1] &\longrightarrow \mathbb{R} \\ t &\longmapsto t^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y : [-1, 1] &\longrightarrow \mathbb{R} \\ t &\longmapsto 1 - t^2 \end{aligned}$$

Observación. Man denke an die Voraussetzung zur Längenberechnung mittels Kurvenintegralen, dass die Parameterdarstellung regulär sein muss, d.h. $\varphi'(t) \neq \vec{0}$. Ist dies nicht für alle Punkte der Kurve der Fall, berechnet man die Länge abschnittsweise.

Given that $x(t)$ is injective, we realize that φ is also injective. Let's compute the derivative of the parameterization:

$$\varphi'(t) = (3t^2, -2t)$$

We realize that φ is differentiable, and that $\varphi'(t) = \vec{0}$ only at $t = 0$. Therefore, we will compute the length of the curve in two parts: in $[-1, 0]$ and in $[0, 1]$. Thus, we compute the norm of the derivative:

$$\|\varphi'(t)\| = \sqrt{(3t^2)^2 + (-2t)^2} = \sqrt{9t^4 + 4t^2} = \sqrt{t^2(9t^2 + 4)} = |t|\sqrt{9t^2 + 4}$$

Therefore, we can now compute the length of the curve:

$$\begin{aligned} L &= \int_{-1}^0 \|\varphi'(t)\| dt + \int_0^1 \|\varphi'(t)\| dt \\ &= \int_{-1}^0 -t\sqrt{9t^2 + 4} dt + \int_0^1 t\sqrt{9t^2 + 4} dt \end{aligned}$$

We use the substitution given by:

$$\begin{aligned} \Phi : \mathbb{R} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ t &\longmapsto u = 9t^2 + 4 \end{aligned}$$

In both intervals, Φ is bijective. Thus, using $t = \Phi^{-1}(u)$, we have:

$$\begin{aligned} L &= \int_{\Phi(-1)}^{\Phi(0)} -\Phi^{-1}(u)\sqrt{u} \cdot (\Phi^{-1})'(u) du + \int_{\Phi(0)}^{\Phi(1)} \Phi^{-1}(u)\sqrt{u} \cdot (\Phi^{-1})'(u) du \\ &= \int_{13}^4 -\Phi^{-1}(u)\sqrt{u} \cdot \frac{1}{2\Phi^{-1}(u)} \cdot \frac{1}{9} du + \int_4^{13} \Phi^{-1}(u)\sqrt{u} \cdot \frac{1}{2\Phi^{-1}(u)} \cdot \frac{1}{9} du = \\ &= 2 \cdot \frac{1}{18} \int_4^{13} \sqrt{u} du = \frac{1}{9} \left[\frac{2}{3} u^{3/2} \right]_4^{13} = \frac{2}{27} (13^{3/2} - 4^{3/2}) = \frac{26\sqrt{13} - 16}{27} \end{aligned}$$

Ejercicio 1.9.4 (Flächeninhalt einer Ellipse). Zeigen Sie, dass der Flächeninhalt F einer Ellipse E , die durch die Gleichung

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

beschrieben wird, $F = \pi ab$ ist.

Observación. Verwenden Sie die Parameterdarstellung

$$\begin{aligned} \varphi : [0, 2\pi] &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ t &\longmapsto (a \cos t, b \sin t) \end{aligned}$$

We first compute the derivative of the parameterization:

$$\varphi'(t) = (-a \sin t, b \cos t)$$

We then realize that ϕ is differentiable, and given that $a, b > 0$ and that both $\sin t$ and $\cos t$ cannot be zero at the same time, we can conclude that the parameterization is regular. Given that the curve goes around the ellipse counter-clockwise, we can use the following formula to compute the area:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \int_{\varphi} (-y, x) \cdot d\vec{x} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (-b \sin t, a \cos t) \cdot (-a \sin t, b \cos t) dt \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} ab \sin^2 t + ab \cos^2 t dt = \frac{ab}{2} \int_0^{2\pi} 1 dt = \frac{ab}{2} \cdot 2\pi = \pi ab \end{aligned}$$

1.10. Potenzialfelder und Mehrfachintegrale

Ejercicio 1.10.1 (Kurvenintegral einer Funktion mit Potenzial). Im \mathbb{R}^2 ist eine Kurve gegeben durch die Parameterdarstellung

$$\begin{aligned}\varphi : [0, \pi/2] &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ t &\longmapsto (\sin t, t)\end{aligned}$$

Berechnen Sie das Kurvenintegral $\int_{\varphi} \vec{f} \cdot d\vec{s}$ für:

$$\begin{aligned}\vec{f} : \mathbb{R}^2 &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ (x, y) &\longmapsto \begin{pmatrix} 2xy + 2\cos(y) \\ x^2 - 2x\sin(y) + 1 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Observación. Prüfen Sie, ob \vec{f} ein Potenzial hat und nutzen Sie es ggf. aus.

Let's first check that φ is a regular parametrization:

$$\varphi'(t) = (\cos t, 1)$$

Given that $1 \neq 0$ for all $t \in [0, \pi/2]$, we conclude that φ is regular. Let's now try to calculate the integral directly. In order to do so, we need to compute $\vec{f}(\varphi(t)) \cdot \varphi'(t)$:

$$\begin{aligned}\vec{f}(\varphi(t)) &= \vec{f}(\sin t, t) = \begin{pmatrix} 2\sin t \cdot t + 2\cos t \\ \sin^2 t - 2\sin^2 t + 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2t\sin t + 2\cos t \\ 1 - \sin^2 t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2t\sin t + 2\cos t \\ \cos^2 t \end{pmatrix} \\ \varphi'(t) &= (\cos t, 1)\end{aligned}$$

$$\vec{f}(\varphi(t)) \cdot \varphi'(t) = 2t\sin t \cos t + 2\cos^2 t + \cos^2 t = 2t\sin t \cos t + 3\cos^2 t$$

Therefore, the integral is:

$$\int_{\varphi} \vec{f} \cdot d\vec{s} = \int_0^{\pi/2} (2t\sin t \cos t + 3\cos^2 t) dt$$

Given that integrating this expression is quite cumbersome, let's check if \vec{f} has a potential function. Given that \mathbb{R}^2 is star-shaped, we check:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_1}{\partial y} &= 2x - 2\sin(y) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} &= 2x - 2\sin(y)\end{aligned}$$

Since the mixed partial derivatives are equal, \vec{f} has a potential function. Let's find it:

Option 1 Having fixed $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, let's consider the following path from $(0, 0)$ to (x, y) :

$$\begin{aligned}\Phi : [0, 1] &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ t &\longmapsto (tx, ty)\end{aligned}$$

Let's also write the potential function as $u : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Then:

$$\int_{\Phi} \vec{f} \cdot d\vec{s} = u(\Phi(1)) - u(\Phi(0)) = u(x, y) \implies u(x, y) = \int_0^1 \vec{f}(\Phi(t)) \cdot \Phi'(t) dt + u(0, 0)$$

Given that the potential is defined up to a constant, we can set $u(0, 0) = 0$.

Now, let's compute $\vec{f}(\Phi(t)) \cdot \Phi'(t)$:

$$\vec{f}(\Phi(t)) = \vec{f}(tx, ty) = \begin{pmatrix} 2(tx)(ty) + 2 \cos(ty) \\ (tx)^2 - 2(tx) \sin(ty) + 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2t^2xy + 2 \cos(ty) \\ t^2x^2 - 2tx \sin(ty) + 1 \end{pmatrix}$$

$$\Phi'(t) = (x, y)$$

$$\begin{aligned} \vec{f}(\Phi(t)) \cdot \Phi'(t) &= 2t^2x^2y + 2x \cos(ty) + t^2x^2y - 2txy \sin(ty) + y \\ &= 3t^2x^2y + 2x \cos(ty) - 2txy \sin(ty) + y \end{aligned}$$

Therefore, the potential function is:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \int_0^1 (3t^2x^2y + 2x \cos(ty) - 2txy \sin(ty) + y) dt = \\ &= \left[x^2yt^3 + \frac{2x}{y} \sin(ty) + yt \right]_0^1 - 2xy \int_0^1 t \sin(ty) dt = \\ &= x^2y + \frac{2x}{y} \sin(y) + y - 2xy \int_0^1 t \sin(ty) dt \end{aligned}$$

To compute the remaining integral, we use integration by parts:

$$\left[\begin{array}{ll} u(t) = t & u'(t) = 1 \\ v(t) = -\frac{1}{y} \cos(ty) & v'(t) = \sin(ty) \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 t \sin(ty) dt &= \left[-\frac{t}{y} \cos(ty) \right]_0^1 + \frac{1}{y} \int_0^1 \cos(ty) dt = \\ &= \left[-\frac{t}{y} \cos(ty) + \frac{1}{y^2} \sin(ty) \right]_0^1 = -\frac{1}{y} \cos(y) + \frac{1}{y^2} \sin(y) \end{aligned}$$

Therefore, the potential function is:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= x^2y + \frac{2x}{y} \sin(y) + y - 2xy \left(-\frac{1}{y} \cos(y) + \frac{1}{y^2} \sin(y) \right) = \\ &= x^2y + \cancel{\frac{2x}{y} \sin(y)} + y + 2x \cos(y) - \cancel{\frac{2x}{y} \sin(y)} = \\ &= x^2y + y + 2x \cos(y) \end{aligned}$$

Option 2 We look for a function $u(x, y)$ such that:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= 2xy + 2 \cos(y) \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= x^2 - 2x \sin(y) + 1 \end{aligned}$$

Integrating the first equation with respect to x :

$$u(x, y) = \int 2xy + 2 \cos(y) dx = x^2 y + 2x \cos(y) + h(y)$$

where $h(y)$ is an arbitrary function of y . Now, we differentiate $u(x, y)$ with respect to y and equate it to the second equation:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = x^2 - 2x \sin(y) + h'(y) = x^2 - 2x \sin(y) + 1 \implies h'(y) = 1 \implies h(y) = y + C$$

Given that the potential is defined up to a constant, we can set $C = 0$. Therefore, the potential function is:

$$u(x, y) = x^2 y + 2x \cos(y) + y$$

Finally, we can compute the integral using the potential function:

$$\int_{\varphi} \vec{f} \cdot d\vec{s} = u(\varphi(\pi/2)) - u(\varphi(0)) = u(1, \pi/2) - u(0, 0) = \frac{\pi}{2} + 2 \cos(\pi/2) + \frac{\pi}{2} - 0 = \pi$$

Ejercicio 1.10.2 (Doppelintegral mit e-Funktion). Berechnen Sie

$$I = \int_0^1 \int_0^{y^2} e^{x/y} dx dy$$

$$\int_0^1 \int_0^{y^2} e^{x/y} dx dy = \int_0^1 [ye^{x/y}]_0^{y^2} dy = \int_0^1 y(e^y - 1) dy = \int_0^1 ye^y dy - \int_0^1 y dy$$

To compute the remaining integral, we use integration by parts:

$$\begin{bmatrix} u(y) = y & u'(y) = 1 \\ v(y) = e^y & v'(y) = e^y \end{bmatrix}$$

$$\int_0^1 ye^y dy = [ye^y]_0^1 - \int_0^1 e^y dy = [ye^y - e^y]_0^1 = (e - e) - (0 - 1) = 1$$

Therefore, the value of the integral is:

$$I = 1 - \left[\frac{y^2}{2} \right]_0^1 = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

Ejercicio 1.10.3 (Flächenberechnung mit Doppelintegral). Ein Flächenstück wird durch die Kurven $x = 0$, $y = 2x$ $y = 1/ax^2 + a$, $a > 0$ berandet. Berechnen Sie den Flächeninhalt A mit Hilfe eines Doppelintegrals.

In Figure 1.6, we can see the area to be calculated. Let's first find the points of intersection between the curves $y = 2x$ and $y = 1/ax^2 + a$:

$$2x = \frac{1}{a}x^2 + a \implies x^2 - 2ax + a^2 = 0 \implies (x - a)^2 = 0 \implies x = a$$

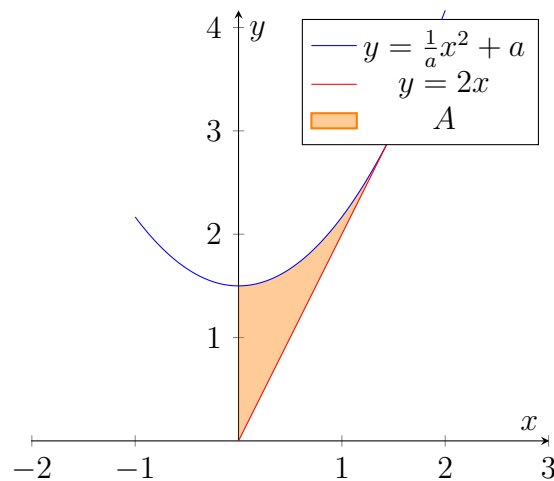


Figura 1.6: Area to be calculated in Exercise 1.10.3.

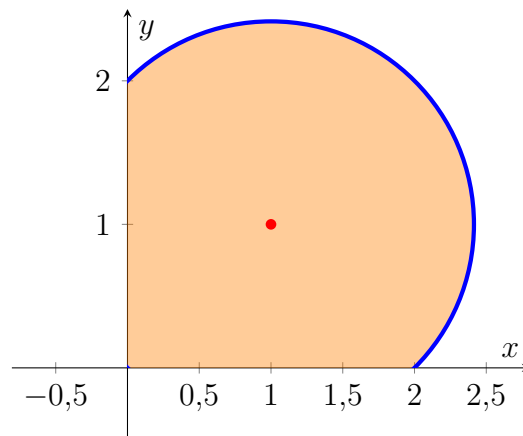


Figura 1.7: Area to be calculated in Exercise 1.10.4.

Therefore, the curves intersect at the point $(a, 2a)$. Given that the area is bounded by $x = 0$ and $x = a$, we can set up the double integral to calculate the area:

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^a \int_{2x}^{1/a x^2 + a} dy \, dx = \int_0^a \left(\frac{1}{a} x^2 + a - 2x \right) dx = \left[\frac{1}{3a} x^3 + ax - x^2 \right]_0^a = \\
 &= \frac{1}{3a} a^3 + a^2 - a^2 - 0 = \frac{a^2}{3}
 \end{aligned}$$

Ejercicio 1.10.4 (Flächeninhalt mit Polarkoordinaten). Die Randkurve eines Gebiets in der Ebene wird durch die Gleichung

$$r = 2(\cos(\varphi) + \sin(\varphi))$$

in Polarkoordinaten beschrieben. Berechnen Sie den Flächeninhalt A dieses Gebiets.

In Figure 1.7, we can see the area to be calculated. Using polar coordinates, the

area can be calculated as:

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^{\pi/2} \int_0^{2(\cos(\varphi)+\sin(\varphi))} r \, dr \, d\varphi = \int_0^{\pi/2} \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^{2(\cos(\varphi)+\sin(\varphi))} d\varphi = \int_0^{\pi/2} 2(\cos(\varphi) + \sin(\varphi))^2 d\varphi = \\
 &= 2 \int_0^{\pi/2} (\cos^2(\varphi) + 2\sin(\varphi)\cos(\varphi) + \sin^2(\varphi)) d\varphi = 2 \int_0^{\pi/2} (1 + \sin(2\varphi)) d\varphi = \\
 &= 2 \left[\varphi - \frac{1}{2} \cos(2\varphi) \right]_0^{\pi/2} = 2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \cos(\pi) - \left(0 - \frac{1}{2} \cos(0) \right) \right) = 2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = \pi + 2
 \end{aligned}$$

Ejercicio 1.10.5 (Dreifachintegral in Zylinderkoordinaten). Berechnen Sie das folgende in Zylinderkoordinaten gegebene Integral:

$$I = \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^1 \int_r^{r^2} rz \cdot \sin(\varphi) \, dz \, dr \, d\varphi.$$

$$\begin{aligned}
 I &= \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^1 \int_r^{r^2} rz \sin(\varphi) \, dz \, dr \, d\varphi = \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^1 \left[\frac{rz^2}{2} \sin(\varphi) \right]_{z=r}^{z=r^2} dr \, d\varphi = \\
 &= \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\varphi) \int_0^1 r \cdot \left[\frac{z^2}{2} \right]_r^{r^2} dr \, d\varphi = \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\varphi) \int_0^1 r \cdot \left(\frac{r^4}{2} - \frac{r^2}{2} \right) dr \, d\varphi = \\
 &= \frac{1}{2} \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\varphi) \int_0^1 (r^5 - r^3) dr \, d\varphi = \frac{1}{2} \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\varphi) \left[\frac{r^6}{6} - \frac{r^4}{4} \right]_0^1 d\varphi = \\
 &= \frac{1}{2} \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\varphi) \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{4} \right) d\varphi = -\frac{1}{24} \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\varphi) d\varphi = \frac{1}{24} [\cos(\varphi)]_{\pi}^{2\pi} = \frac{1}{24} (1 - (-1)) = \frac{1}{12}
 \end{aligned}$$

1.11. Datenanalyse und Fehlerrechnung

Ejercicio 1.11.1 (Ein neues Schwimmbecken). Bei einem Schwimmbadbauer wird ein quaderförmiges Becken mit einer Länge $l = 50$ m, einer Breite $b = 15$ m und einer Tiefe $h = 2$ m in Auftrag gegeben. Erfahrungsgemäß baut die Firma ziemlich ungenau mit statistisch verteilten Fehlern von $\sigma_l = 0,4$ m, $\sigma_b = 0,2$ m sowie $\sigma_h = 0,1$ m für Länge, Breite bzw. Tiefe. Berechnen Sie die das Volumen des Schwimmbeckens und den zu erwartenden relativen Fehler nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Wieviel Wasser (in m^3) sollte bereitstehen, damit das Becken auf jeden Fall bis zum Rand gefüllt werden kann?

The volume V of the swimming pool is given by the formula:

$$V = l \cdot b \cdot h = 50 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} = 1500 \text{ m}^3$$

To calculate the relative error in the volume using Gaussian error propagation, we use the formula:

$$\begin{aligned} \sigma_V &= \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial l} \sigma_l\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial b} \sigma_b\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h} \sigma_h\right)^2} = \\ &= \sqrt{(b \cdot h \cdot \sigma_l)^2 + (l \cdot h \cdot \sigma_b)^2 + (l \cdot b \cdot \sigma_h)^2} = \\ &= \sqrt{(15 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m})^2 + (50 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m})^2 + (50 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m})^2} = \\ &= \sqrt{(12 \text{ m}^3)^2 + (20 \text{ m}^3)^2 + (75 \text{ m}^3)^2} = \\ &= \sqrt{144 \text{ m}^6 + 400 \text{ m}^6 + 5625 \text{ m}^6} = \\ &= \sqrt{6169 \text{ m}^6} \approx 78,55 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

The relative error in the volume is then given by:

$$\frac{\sigma_V}{V} = \frac{78,55 \text{ m}^3}{1500 \text{ m}^3} \approx 0,0524 \approx 5,24 \%$$

Therefore, the volume of the swimming pool is 1500 m^3 with an expected relative error of approximately $5,24 \%$. To ensure that the pool can be filled to the brim with a level of confidence of around $99,7 \%$ (which corresponds to 3σ), we should prepare the following amount of water:

$$V + 3\sigma_V = 1500 \text{ m}^3 + 3 \cdot 78,55 \text{ m}^3 \approx 1735,65 \text{ m}^3$$

Ejercicio 1.11.2 (Selbstinduktion einer Doppelleitung). Eine elektrische Doppelleitung besteht aus zwei parallelen, elektrisch leitenden Drähten mit der Länge l und dem Radius r . Der Abstand ihrer Mittelpunkte beträgt a . Die Selbstinduktivität L dieser Doppelleitung in Luft wird dabei nach der Formel

$$L(l, r, a) = \frac{\mu_0}{\pi} l \cdot \ln \left(\frac{a - r}{r} + \frac{1}{4} \right)$$

berechnet, mit der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$.

1. Welche Selbstinduktivität L besitzt eine Doppelleitung, deren Dimensionen wie folgt gemessen wurden?

$$l = (2000 \pm 10 \text{ m}); \quad r = (2 \pm 0,05 \text{ mm}); \quad a = (30 \pm 0,3 \text{ cm})$$

The self-inductance L of the twin-lead can be calculated using the given formula:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0}{\pi} l \cdot \ln \left(\frac{a-r}{r} + \frac{1}{4} \right) = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}}{\pi} \cdot 2000 \text{ m} \cdot \ln \left(\frac{0,30 \text{ m} - 0,002 \text{ m}}{0,002 \text{ m}} + \frac{1}{4} \right) = \\ &= 8 \cdot 10^{-4} \text{ Vs/A} \ln(149 + 0,25) \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ Vs/A} \cdot 5,005622 = \\ &= 4,004498 \text{ mH} \end{aligned}$$

2. Wie groß ist die absolute bzw. prozentuale Messunsicherheit des Mittelwertes von L (d. h. der absolute bzw. prozentuale mittlere Fehler des Mittelwertes von L)?

The absolute uncertainty in L can be calculated using Gaussian error propagation:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial l} \Delta l \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial r} \Delta r \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial a} \Delta a \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{a-r}{r} + \frac{1}{4} \right) \Delta l \right)^2 + \left(\frac{\mu_0}{\pi} l \cdot \frac{1}{\frac{a}{r} - \frac{3}{4}} \cdot \frac{a}{r^2} \Delta r \right)^2 + \left(\frac{\mu_0}{\pi} l \cdot \frac{1}{\frac{a}{r} - \frac{3}{4}} \cdot \frac{1}{r} \Delta a \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{a}{r} - \frac{3}{4} \right) \Delta l \right)^2 + \left(\frac{\mu_0}{\pi} l \cdot \frac{a}{ar - \frac{3r^2}{4}} \Delta r \right)^2 + \left(\frac{\mu_0}{\pi} l \cdot \frac{1}{a - \frac{3r}{4}} \Delta a \right)^2} \approx \\ &\approx 2,95 \cdot 10^{-5} \text{ H} = \\ &= 0,0295 \text{ mH} \end{aligned}$$

The percentage uncertainty in L is then given by:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{0,0295 \text{ mH}}{4,004498 \text{ mH}} \approx 0,00737 \approx 0,737 \%$$

Ejercicio 1.11.3 (Regressionsanalyse). Gegeben die folgende Wertetabelle:

t	-2	-1	0	1	2
y	$13,1$	-2	$-2,2$	-4	$-15,9$

Finden Sie x_1 und x_2 für die beste Kurve der Form $y = f(t) = x_1 + x_2 t^3$ zur Anpassung der Messdaten. Welchen Wert hat das zugehörige Bestimmtheitsmaß R^2 ?