

Deckblatt zu einer Klausur am Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik

Modulprüfung																																	
Modulname	Grundgebiete der Elektrotechnik II																																
Datum	25.03.2021																																
Prüfpersonen																																	
1. Prüfperson	Prof. Dr. Martina Gerken																																
ggf. 2. Prüfperson																																	
Kandidat/in																																	
Matrikelnummer																																	
Name, Vorname																																	
Vorleistung vor SoSe 2020 berücksichtigen? → wird beim Abgeben im Exam-OLAT abgefragt <div style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein </div>																																	
Erklärung der/des Kandidatin/Kandidaten vor Beginn der Prüfung																																	
<p>Erklärung zur Prüfungsfähigkeit und Zustimmung zur Klausur mit Videoaufsicht wird digital abgegeben. Ich nehme zur Kenntnis, dass der Termin für die Klausureinsicht vom Prüfungsamt ET&IT bekannt gegeben wird, sobald mein vorläufiges Prüfungsergebnis im QIS-Portal veröffentlicht wurde. Nach dem Einsichtnahmetermin kann ich meine endgültige Note im QIS-Portal abfragen. Bis zum Ende der Widerspruchsfrist des zweiten Prüfungszeitraums der CAU kann ich beim Prüfungsausschuss Widerspruch gegen dieses Prüfungsverfahren einlegen. Danach wird meine Note rechtskräftig.</p> <p style="text-align: right;">_____</p>																																	
Korrektur																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>Aufgabe</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>Σ</td> </tr> <tr> <td>Punkte</td> <td>14</td> <td>18</td> <td>16</td> <td>19</td> <td>18</td> <td>15</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>erreicht</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 33%;">Übungen (Gewicht 25%)</td> <td style="width: 33%;">Klausur (Gewicht 75%)</td> <td style="width: 17%;">Gesamt %</td> <td style="width: 17%;">Modulnote</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		Aufgabe	1	2	3	4	5	6	Σ	Punkte	14	18	16	19	18	15	100	erreicht								Übungen (Gewicht 25%)	Klausur (Gewicht 75%)	Gesamt %	Modulnote				
Aufgabe	1	2	3	4	5	6	Σ																										
Punkte	14	18	16	19	18	15	100																										
erreicht																																	
Übungen (Gewicht 25%)	Klausur (Gewicht 75%)	Gesamt %	Modulnote																														
Einsicht / Rückgabe																																	
<p>Hiermit bestätige ich, dass ich die Korrektur der Klausur eingesehen habe und mit der auf diesem Deckblatt vermerkten Note einverstanden bin. Die Klausurunterlagen verbleiben bei mir. Ein späterer Einspruch gegen die Korrektur und Benotung ist nicht mehr möglich.</p> <p>Kiel, den _____ Unterschrift: _____</p>																																	

Wird nach der Klausur von uns ausgefüllt!

Aufgabe 1: Magnetischer Kreis: Strommesszange (14 Punkte)

Betrachtet werde ein kontaktloses Strommessgerät (Strommesszange), das nach dem folgenden Prinzip funktioniert: Der zu messende Strom I_{mess} erzeugt im hochpermeablen Ringkern ein Magnetfeld \vec{B} , das mit einem Magnetfeldsensor gemessen wird. Da Ringkern und Sensor nicht perfekt linear arbeiten, kann das Sensorsignal nicht direkt zur Strommessung verwendet werden. Stattdessen wird über einen Regler in der blauen Spule ($N = 120$ Windungen) ein Kompensationsstrom I_{komp} eingestellt, der dem Magnetfeld von I_{mess} entgegenwirkt und es genau aufhebt, so dass das Gesamtfeld im Kern immer Null ist. Dadurch spielen die Nichtlinearitäten keine Rolle mehr. Der Kompensationsstrom kann nun zur genauen Berechnung von I_{mess} verwendet werden.

Die Maße der Geometrie seien: mittlerer Kernradius 2 cm, Kernquerschnitt 1 cm^2 , die relative Permeabilität des Kerns sei $\mu_r \approx 10\,000$, der B -Feld-Sensor sei 0,5 mm dick und habe $\mu_r = 1$, wirke also wie ein 0,5-mm-Luftspalt.

Die genaue Funktion des Reglers ist für diese Aufgabe nicht von Bedeutung. Wir nehmen an, dass bei eingeschaltetem Messgerät I_{komp} immer genau so eingestellt wird, dass das Gesamtmagnetfeld im Kern Null ist. Es kann mit den üblichen Näherungen gearbeitet werden.

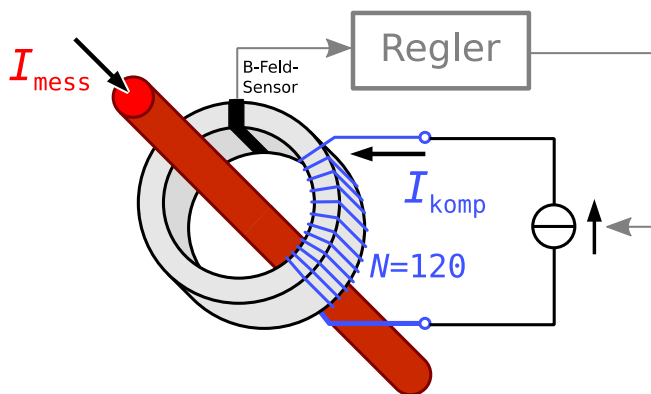


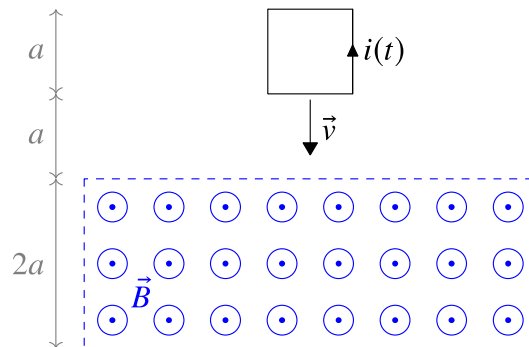
Abbildung basiert auf „Closed loop hall effect current sensor“ von Dracheschreck, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26600273>, CC BY-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>, Abbildung bearbeitet von Hannes Lüder, CC BY-SA 3.0

- Skizzieren Sie ein zweidimensionales Schnittbild des Ringkerns. Es fließe ein Strom $I_{\text{mess}} > 0 \text{ A}$ und das Messgerät sei noch ausgeschaltet, sodass $I_{\text{komp}} = 0 \text{ A}$ ist. Zeichnen Sie Feldlinien des \vec{B} - und \vec{H} -Feldes. Die Feldlinienbilder sollen die unterschiedlichen Dichteverteilungen von \vec{B} und \vec{H} qualitativ darstellen.
- Nun wird das Messgerät eingeschaltet und I_{mess} soll bestimmt werden. Der Kompensationsstrom wird auf $I_{\text{komp}} = -0,6 \text{ A}$ geregelt und der B -Feld-Sensor misst $B = 0 \text{ T}$. Berechnen Sie I_{mess} !
- Für die Strommessung ist es *nicht* wichtig, dass der zu messende Leiter genau im Mittelpunkt des Ringkerns liegt. Begründen Sie dieses!
- Bestimmen Sie die Induktivität, die dieses Strommessgerät im eingeschalteten Zustand für den roten Leiter darstellt!

Aufgabe 2: Induktion (18 Punkte)

Eine quadratische geschlossene Leiterschleife mit Kantenlänge a , vernachlässigbarem Leiterquerschnitt und elektrischem Widerstand R bewege sich wie abgebildet mit konstanter Geschwindigkeit \vec{v} mit Betrag v_0 . Dabei durchquere sie das räumlich begrenzte Magnetfeld \vec{B} eines Dauermagneten. Das Magnetfeld werde näherungsweise als homogen mit Betrag B_0 über die Dicke $2a$ angenommen. Der Bereich des Magnetfelds ist in der Abbildung durch die strichlierte Linie festgelegt. Außerhalb dieses Bereichs sei das Magnetfeld vernachlässigbar. Im betrachteten Gebiet gilt $\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$.

Das Bild zeigt den Zeitpunkt $t = 0$, an dem die Leiterschleife noch eine Distanz a vom Magnetfeld entfernt ist.



Rückwirkungen induzierter Ströme auf das Magnetfeld sowie Rückwirkungen etwaiger Kräfte auf die Geschwindigkeit der Leiterschleife sollen in dieser Aufgabe vernachlässigt werden.

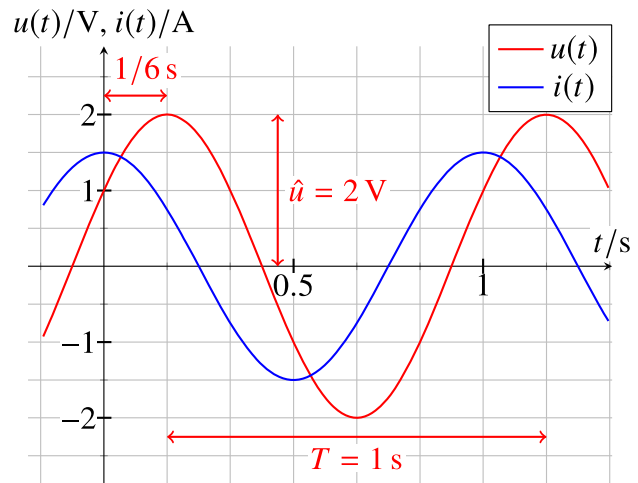
- Geben Sie das Induktionsgesetz in für diese Aufgabe geeigneter Form an!
- Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf $i(t)$ des Stroms in der Leiterschleife für alle Zeiten t !
- Zeichnen Sie in einem Strom-Zeit-Diagramm den Zeitverlauf von $i(t)$! Es muss der gesamte relevante Zeitbereich abgedeckt sein. Bitte denken Sie an die Beschriftung der Achsen!
- Berechnen den zeitlichen Verlauf $\vec{F}(t)$ des Kraftvektors, der auf die Leiterschleife wirkt.
- Erläutern Sie im Zusammenhang mit dieser Aufgabe die Lenz'sche Regel!

Aufgabe 3: Kenngrößen periodischer Schwingungen (16 Punkte)

- (a) An einem elektrischen Zweipol werde der gezeigte Spannungs- und Stromverlauf gemessen. Als Hilfestellung sind einige Parameter bereits eingezeichnet. Alle Parameter können anhand des eingezeichneten Gitternetzes bestimmt werden.

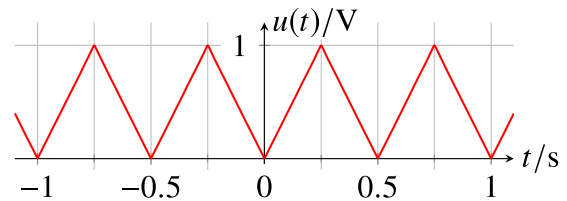
Geben Sie sowohl für $u(t)$ als auch für $i(t)$ die folgenden Größen an:

- Kreisfrequenz
- Zeitfunktion
- vollständiges komplexes Symbol
- komplexer Effektivwertphasor



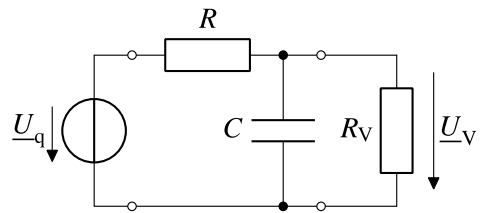
- (b) Berechnen und zeichnen Sie ein Zweipolnetzwerk, an dessen Klemmen ein solcher Spannungs- und Stromverlauf auftreten kann!

- (c) Gegeben sei die gezeigte periodische Dreieckschwingung $u(t)$, die an einem ohmschen Widerstand $R = 100 \Omega$ anliege. Berechnen Sie die in einer Periode umgesetzte Energie!



Aufgabe 4: Dämpfungsfaktor (19 Punkte)

Ein Verbraucher R_V wird über das gezeigte vierpolige Filternetzwerk an eine Wechselspannungsquelle \underline{U}_q angeschlossen.



(a) Berechnen Sie den Dämpfungsfaktor $\underline{D}(j\omega) = \frac{\underline{U}_q}{\underline{U}_V}$ als

eine Funktion von ω , C , R und R_V . Bringen Sie $\underline{D}(j\omega)$ in die Form $\underline{D}(j\omega) = \frac{1+j\frac{\omega}{\omega_g}}{K}$ und bestimmen Sie die Parameter K und ω_g .

(b) Bestimmen Sie lineare Näherungen für das Maß des Betrags von $\underline{D}(j\omega)$ und die Phase von $\underline{D}(j\omega)$ als eine Funktion von $\log(\omega/\omega_g)$ für kleine und große Frequenzen. Wie groß ist die Phase bei ω_g ?

(c) Erstellen Sie ein Bode-Diagramm (ein Diagramm für das Maß des Betrags von $\underline{D}(j\omega)$ und ein Diagramm für die Phase von $\underline{D}(j\omega)$) für die folgenden Bauelementwerte:

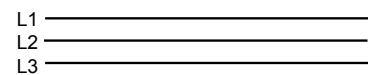
$$R = 100 \, \Omega, \quad C = 10 \, \text{nF}, \quad R_V = 100 \, \Omega .$$

Bitte denken Sie an die Beschriftung der Achsen! Die linearen Näherungskurven reichen aus.

Aufgabe 5: Drehstrom (18 Punkte)

An ein symmetrisches Mittelspannungsdrehstromnetz mit 20 kV Außenleiterspannung und vier Leitern sollen die drei Verbraucher $\underline{Z}_1 = 2 \, \text{k}\Omega$, $\underline{Z}_2 = 1 \, \text{k}\Omega \angle 25^\circ$, $\underline{Z}_3 = 800 \, \Omega - j150 \, \Omega$ in Sternschaltung mit Sternpunktleiter angeschlossen werden.

(a) Zeichnen Sie die Schaltung und bezeichnen Sie Ströme und Spannungen.



(b) Geben Sie die drei Strangspannungen \underline{U}_{1N} , \underline{U}_{2N} und \underline{U}_{3N} an!

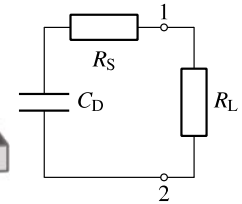
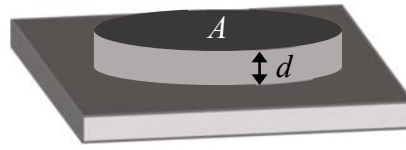
(c) Berechnen Sie die Strangströme und den Sternpunktleiterstrom.



(d) Berechnen Sie die von der Verbrauchergruppe aufgenommene Wirkleistung und Blindleistung. Wie groß ist der Leistungsfaktor der Verbrauchergruppe?

Aufgabe 6: Messtechnik (15 Punkte)

Ein Fotodetektor habe eine Zylinderform mit Fläche A . Das aktive Material mit der Dicke d wird näherungsweise als Isolator mit der relativen Permittivität $\epsilon_r = 3,8$ betrachtet. Es befinde sich zwischen einer flächigen Boden-



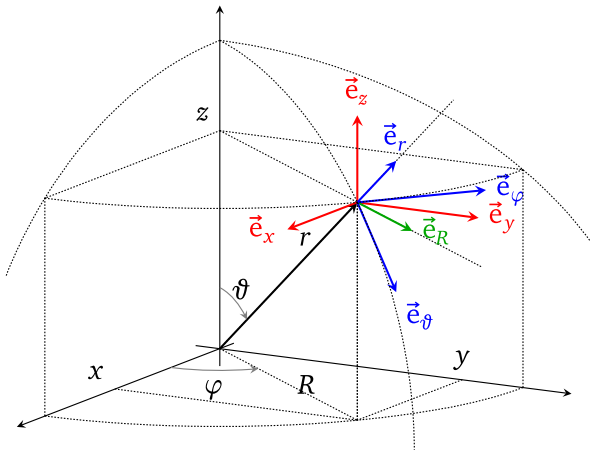
elektrode und der kreisförmigen oberen Elektrode mit der Fläche A . Die Schaltgeschwindigkeit sei durch die RC-Schaltzeit $\tau = RC$ bestimmt. Dabei seien R der Gesamtwiderstand der Anordnung (aus Sicht des Kondensators) und $C = C_D$ die Kapazität. Die Ersatzschaltung mit Detektorkapazität C_D , seriellen Widerstand R_S aufgrund der Elektroden und Lastwiderstand $R_L = 50 \Omega$ (genauer Wert ohne Unsicherheit) des Messgeräts ist ebenfalls gezeigt. Es soll die maximale Schaltfrequenz $f = \frac{1}{2\pi\tau}$ aus den Geometrieparametern bestimmt werden. Mit Hilfe von wiederholten Messungen werden folgende Größen bestimmt. Dabei ist N jeweils die Anzahl der Messungen.

Parameter	N	Schätzwert (Mittelwert der Einzelmesswerte)	Schwankung der Einzelmesswerte
Durchmesser von A	10	1,50 mm	0,2 mm
Dicke d	10	100 nm	30 nm
Serieller Widerstand R_S	10	15,0 Ω	500 m Ω

- (a) Geben Sie für die drei Messungen jeweils das Messergebnis in der Form Schätzwert \pm Vertrauensgrenzen für eine statistische Sicherheit von 95 % an! Beachten Sie dazu die Tabelle unten.
- (b) Stellen Sie die Formeln für die Berechnung des Schätzwertes und der Schwankung der Schaltfrequenz f auf. Berechnen Sie die Zahlenwerte für Schätzwert und Schwankung der Schaltfrequenz.
- (c) In dieser Aufgabe wurde bisher vernachlässigt, dass der Isolator im Kondensator eine kleine Leitfähigkeit hat, die als Widerstand $R_p \approx 5 \text{ M}\Omega$ parallel zu C_S (und damit parallel zu $R_S + R_L$) modelliert werden kann. Zeigen Sie, dass es zulässig ist, diesen Parallelwiderstand zu vernachlässigen, indem Sie den resultierenden systematischen Fehler für die Schaltfrequenz bestimmen!

N	$P = 68.3 \%$	$P = 95 \%$	$P = 99 \%$	$P = 99.73 \%$
	t	t	t	t
2	1.84	12.7	63.7	236
3	1.32	4.30	9.92	19.2
4	1.20	3.18	5.84	9.22
6	1.11	2.57	4.03	5.51
10	1.06	2.26	3.25	4.09
20	1.03	2.09	2.86	3.45
50	1.01	2.01	2.68	3.16
100	1.01	1.98	2.63	3.08
200	1.00	1.97	2.60	3.04
> 200	1.00	1.96	2.58	3.00

Definition der Koordinatensysteme



Umrechnungen

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \Phi_{Zy}(R, \varphi, z) = \begin{pmatrix} R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \\ z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \Phi_{Ku}(r, \vartheta, \varphi) = \begin{pmatrix} r \sin \vartheta \cos \varphi \\ r \sin \vartheta \sin \varphi \\ r \cos \vartheta \end{pmatrix}$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\vartheta = \arccos(z/r)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \varphi = \begin{cases} + \arccos(x/R) & y \geq 0 \\ - \arccos(x/R) & y < 0 \end{cases}$$

Kartesische Koordinaten

Zylinderkoordinaten

Kugelkoordinaten

Einheitsvektoren

$$\vec{e}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/R \\ y/R \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_r = \begin{pmatrix} \sin \vartheta \cos \varphi \\ \sin \vartheta \sin \varphi \\ \cos \vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/r \\ y/r \\ z/r \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_\varphi = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ +\cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y/R \\ +x/R \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_\vartheta = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \varphi \\ \cos \vartheta \sin \varphi \\ -\sin \vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z/r \cdot x/R \\ z/r \cdot y/R \\ -R/r \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{e}_\varphi = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ +\cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y/R \\ +x/R \\ 0 \end{pmatrix}$$

Kurven-, Flächen- und Volumenelemente

$$\begin{aligned} d\vec{s}_x &= \vec{e}_x dx \\ d\vec{s}_y &= \vec{e}_y dy \\ d\vec{s}_z &= \vec{e}_z dz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\vec{s}_R &= \vec{e}_R dR \\ d\vec{s}_\varphi &= \vec{e}_\varphi R d\varphi \\ d\vec{s}_z &= \vec{e}_z dz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\vec{s}_r &= \vec{e}_r dr \\ d\vec{s}_\vartheta &= \vec{e}_\vartheta r d\vartheta \\ d\vec{s}_\varphi &= \vec{e}_\varphi r \sin \vartheta d\varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\vec{A}_x &= \vec{e}_x dy dz \\ d\vec{A}_y &= \vec{e}_y dz dx \\ d\vec{A}_z &= \vec{e}_z dx dy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\vec{A}_R &= \vec{e}_R R d\varphi dz \\ d\vec{A}_\varphi &= \vec{e}_\varphi dz dR \\ d\vec{A}_z &= \vec{e}_z R d\varphi dR \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\vec{A}_r &= \vec{e}_r r^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \\ d\vec{A}_\vartheta &= \vec{e}_\vartheta r \sin \vartheta d\varphi dr \\ d\vec{A}_\varphi &= \vec{e}_\varphi r dr d\vartheta \end{aligned}$$

$$dV = dx dy dz$$

$$dV = R dR d\varphi dz$$

$$dV = r^2 \sin \vartheta dr d\vartheta d\varphi$$

Gradient

$$\text{grad } \phi(x, y, z) = \vec{e}_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\text{grad } \phi(R, \varphi, z) = \vec{e}_R \frac{\partial \phi}{\partial R} + \vec{e}_\varphi \frac{1}{R} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi} + \vec{e}_z \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\text{grad } \phi(r, \vartheta, \varphi) = \vec{e}_r \frac{\partial \phi}{\partial r} + \vec{e}_\vartheta \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta} + \vec{e}_\varphi \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi}$$