

E12 INDUKTIONSPENDEL

28. Oktober 2010

Marcel Lauhoff - Informatik BA - Matrnr: xxxxxxxx

xxx@xxxx.xx

Simon Linke - Physik BA - Matrnr: xxxxxxxx

xxx@xxxx.xx

1	Einleitung	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Die Maxwellgleichungen	3
2.2	Magnetische Felder	4
2.3	Induktion, Wirbelströme	5
2.4	Schwingungen eines Fadenpendels	5
2.4.1	Ungedämpfte Schwingung	6
2.4.2	Gedämpfte Schwingungen	7
3	Aufbau und Durchführung	8
3.1	Aufbau	8
3.2	Durchführung	10
4	Ergebnisse	11
4.1	Auswertung der Messdaten	11
4.2	Fehlerbetrachtung	16
5	Literatur	17
A	Plots	18

1 Einleitung

Im folgenden Versuch, wird man ein Pendel mit einer Spule durch ein zeitlich konstantes magnetisches Feld schwingen. Dabei messen wir die Winkelgeschwindigkeit des Pendels, sowie die in der Spule induzierte Spannung.

Des Weiteren verbindet man die Spule mit unterschiedlichen Widerständen und misst so die durch Energieverlust verursachte Dämpfung.

Anschließend werden die erhaltenen Werte mit den Ergebnissen aus der mathematischen Betrachtung der verwendeten Bauteile verglichen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Die Maxwellgleichungen

Die Maxwellgleichungen wurden in den Jahren 1861-1864 von Clerk Maxwell erarbeitet. Es handelt sich bei ihnen um 4 Differentialgleichungen, mit denen sich alle elektrischen und magnetischen Phänomene beschreiben lassen.

1. Maxwellsche Gleichung

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

Die Gleichung drückt aus, dass jedes Elektrische Feld (elektrische Flussdichte D) eine Ladung (Ladungsdichte ρ) als Quelle hat. Man bezeichnet sie auch als den Gaußschen Satz im Dielektrikum.

2. Maxwellsche Gleichung

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

Diese Gleichung bildet die Analogie zur 1. Maxwellschen Gleichung für Magnetfelder B . Sie besagt, dass es keine magnetischen Monopole gibt, ein Magnetfeld B also immer quellfrei ist.

3. Maxwellsche Gleichung

$$\nabla \times E = -\frac{d}{dt}B \quad (3)$$

Die dritte Maxwellsche Gleichung bezeichnet man auch als Induktionsgesetz. Es besagt, dass jede zeitliche Änderung eines magnetischen Feldes B immer ein ihm entgegen gerichtetes elektrisches Wirbelfeld E erzeugt.

4. Maxwellsche Gleichung

$$\nabla \times H = j + \frac{d}{dt}D \quad (4)$$

Diese Gesetz ist der Umkehrschluss des Induktionsgesetzes. Es besagt, dass ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld D ein magnetisches Rotationsfeld H erzeugt. Des weiteren enthält es auch einen Term der besagt, dass konstante elektrische Ströme (Stromdichten j) immer ein magnetisches Wirbelfeld um sich herum erzeugen (Ampèresches Durchflutungsgesetz)

Alle Maxwellgleichungen lassen sich zusätzlich zu ihrer differentiellen Form, auch in integraler Form schreiben. Dann lauten sie [TG98]:

$$\text{I } \oint D \cdot dA = Q$$

$$\text{II } \oint B \cdot dA = 0$$

$$\text{III } \oint E \cdot ds = -\frac{d}{dt} \int B \cdot dA$$

$$\text{IV } \oint H \cdot ds = \int j \cdot dA + \int D \cdot dA$$

Wobei Q die Ladung und A die Oberfläche in konstantem Abstand r ist.

2.2 Magnetische Felder

Magnetische Felder können zwei Ursachen haben, entweder entstehen sie durch ausgerichtete Spins in Festkörpern (z.B.: Dauermagnete) oder wie in diesem Versuch durch elektrische Ströme. Sie lassen sich durch die magnetische Feldstärke H , sowie die magnetische Induktion (magnetische Flussdichte) B beschreiben. Es gilt die Beziehung:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (5)$$

Für stromdurchflossenen Leiter mit einfacher bekannter Geometrie lässt sich die magnetische Feldstärke mittels des Ampèreschen Gesetzes (Durchflutungsgesetz) berechnen:

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = I \quad (6)$$

Somit kann das Magnetfeld H berechnet werden, welches einen Strom I hervorruft. Hierbei ist s die Strecke, die von I bei konstantem Abstand umflossen wird.

In allgemeineren, komplizierteren Fällen muss das Gesetz von Biot und Savart, welches sich aus den Maxwellgleichungen herleiten lässt, verwendet werden:

$$dB(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} I dl \times \frac{r - r'}{|r - r'|^3} \quad (7)$$

Man kann hiermit die magnetische Flussdichte bestimmen, die ein infinitesimales Leiterstück in einem Abstand von r hervorruft. Um die gesamte Induktion am Ort r' zu kennen muss also über den gesamten Leiter integrieren.

Für eine lange, dünne Spule, ergibt sich in ihrem inneren das homogene H-Feld:

$$H = \frac{NI}{\sqrt{l^2 + D^2}} \quad (8)$$

2.3 Induktion, Wirbelströme

Der englische Experimentalphysiker Michael Faraday hat im 19. Jhd. erste Forschungen zur Induktion betrieben er wollte herausfinden in wie fern sich das Ampèresches Durchflutungsgesetz (2.2) umkehren lässt. Ob es also möglich sei, durch Magnetfelder einen Strom hervorzurufen.

Aus seinen Experimenten schloss er auf das allgemein gültige Induktionsgesetz:

„In einem Leiter wird eine Spannung erzeugt, wenn das ihn umgebene Magnetfeld \mathbf{B} sich zeitlich verändert.“ [TG98]

Es muss sich also die Anzahl an Feldlinien (magnetischer Fluss Φ_{mag}), die durch eine vom Leiter umschlossene Fläche fließt, ändern.

Der magnetische Fluss ist definiert als.

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Das Induktionsgesetz lautet also:

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Das Minuszeichen erklärt sich hierbei durch die Lenzsche Regel:

„Das Vorzeichen einer induzierten Spannung ist immer so gerichtet, daß der durch sie verursachte Strom mit seinem Magnetfeld dem verursachenden Magnetfeld entgegenwirkt.“ [TG98]

Würde das Minuszeichen fehlen, so würde der Induktionsstrom ein eigenes Magnetfeld aufbauen, welches das ursprüngliche verstärken würde. Somit würde man nach mehrfacher gegenseitiger Beeinflussung ein unendlich großes Magnetfeld vorfinden. Der Energieerhaltungssatz wäre somit verletzt.

Werden großflächig, massive Metallkörper einem sich zeitlich ändernden magnetischen Fluss (orthogonal zur Ausdehnung der Metallplatte) ausgesetzt, treten hohe (Wirbel-förmige) Kurzschlussströme auf, die in einer Ebene mit der Metallplatte verlaufen. Diese erzeugen Wärme und starke Magnetfelder (die nach Lenz der Änderung de Flusses entgegen gerichtet sind) [Rai06].

2.4 Schwingungen eines Fadenpendels

Bei der mathematischen Beschreibung der Schwingung eines Pendels unterscheidet man zwischen zwei Ansätzen: dem mathematischen und dem physikalischen Pendel. Während

das physikalische Pendel versucht ein reales Pendel möglichst exakt darzustellen (die tatsächliche Massenverteilung von Seil und schwingender Masse wird in die Rechnung einbezogen), geht das mathematische Pendel von zum Teil starken Vereinfachungen aus: Das Pendel wird als eine punktförmige Masse behandelt, die an einem masselosen Seil schwingt. Somit wird die Rechnung wesentlich einfacher, es führt aber auch zu ungenaueren Ergebnissen. Im Folgenden wollen wir die Schwingung eines mathematischen Pendels unter Einfluss des Gravitationsfeldes der Erde betrachten.

2.4.1 Ungedämpfte Schwingung

Verwenden wir Polarkoordinaten ergibt sich die Kraft als Summe der Kräfte in Richtung der Achsen:

$$F = F_r e_r + F_\phi e_\phi \quad (9)$$

Hierbei ist F_r die Komponente der Kraft, die in Richtung des Radius zeigt (mit Einheitsvektor e_r) und F_ϕ die Komponente der Kraft, die in Richtung des Winkels ϕ zeigt (mit Einheitsvektor e_ϕ).

Da die Masse an einem Faden mit konstanter Länge hängt, hebt dieser die angreifende Kraft F_r auf und die Masse bewegt sich auf einer Bahn mit konstantem Abstand l zum Ursprung (hier ist der Faden befestigt). Somit ist nur $F_\phi (= -mg \sin \phi)$ für die Schwingung (in Richtung e_ϕ) ausschlaggebend. Es ergibt sich folgende Bewegungsgleichung:

$$ml\ddot{\phi} = -mg \sin \phi \Rightarrow \ddot{\phi} + \frac{g}{l} \sin \phi = 0$$

Für kleine Winkel gilt:

$$\sin \phi \approx \phi$$

Somit erhält man folgende Schwingungsgleichung:

$$\ddot{\phi} + \frac{g}{l} \phi = 0$$

Für diese Differentialgleichung erhält man die allgemeine Lösung:

$$\phi(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

Dabei sind A und B Konstanten, die von den Anfangsbedingungen abhängen und ω ist die Winkelgeschwindigkeit (erste Ableitung von ϕ nach der Zeit) es gilt [No102]:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

2.4.2 Gedämpfte Schwingungen

In der Realität kommt es immer zu Energieverlust durch Reibung oder in unserem Fall zusätzlichem Energieverlust durch Anschließen eines Widerstandes an die Induktionsspannung (siehe Einleitung). Somit schwingt das Pendel nicht mit konstanter Auslenkung. Die Maximalauslenkung nähert sich immer Null.

Wählt man für die Schwingung den Ansatz:

$$x(t) = e^{\lambda t}$$

Wobei $x(t)$ die Auslenkung zur Zeit t als Exponentialfunktion mit der Abklingkonstante λ und der Zeit t ist.

So lautet die Bewegungsgleichung:

$$\lambda^2 + 2\beta\lambda + \omega^2 = 0$$

Hierbei ist β die geschwindigkeitsproportionale Dämpfung des Pendels.

λ erfüllt die Gleichung für:

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \quad (10)$$

Je nach Größe der Dämpfung β und Anfangsamplitude ω_0 , kann unter der Wurzel eine negative Zahl stehen. Die Gleichung muss in diesem Fall komplex gelöst werden. [No102]

3 Aufbau und Durchführung

3.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau, wie in Abbildung 1 dargestellt, besteht aus einem Induktionspendel der Länge $l = 0,6$ m. Am oberen Ende ist das Pendel aufgehängt und mit einem Tachogenerator verbunden. Dieser liefert eine zur Winkelgeschwindigkeit proportionale Spannung. Am unteren Ende ist eine quadratische Spule mit $n = 100$ Windungen befestigt, welche mit einem Spannungsmessgerät verbunden ist. Die Spule schwingt durch ein von einem Spulenpaar erzeugten Magnetfeld.

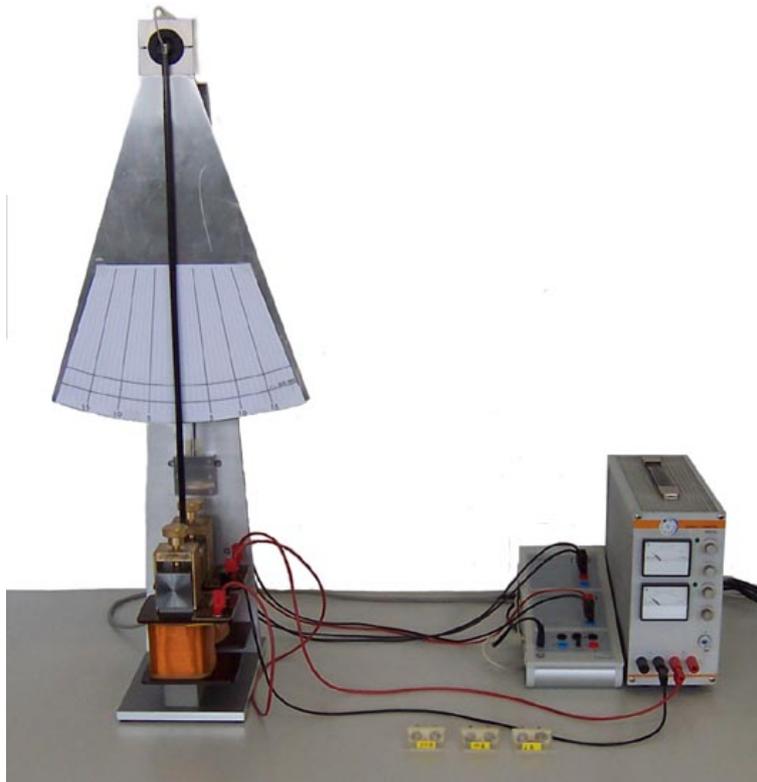


Abbildung 1: Fotografische Abbildung des Versuchsaufbaus E12 [Uni10].

Das Pendel und das statische Spulenpaar ist in Abbildung 2 in der Ruhelage skizziert. Wird das Pendel in Bewegung gesetzt passiert die Spule am Pendelstab das statische Magnetfeld der beiden unteren Spulen.

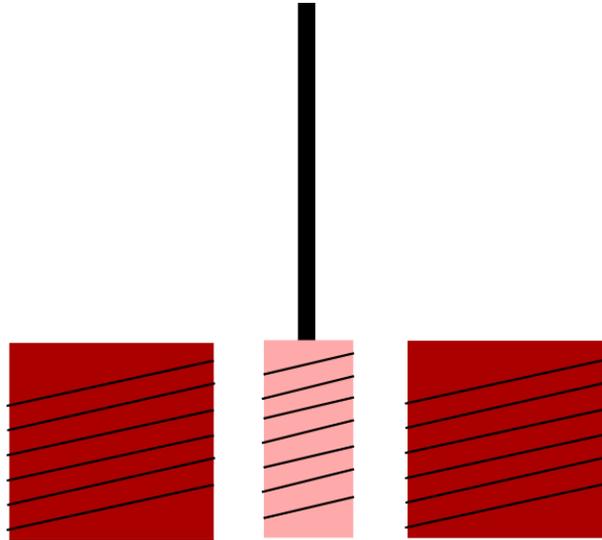


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Pendels und der Spulen.

Der Pendelstab hat eine Masse von $0,15 \text{ kg}$ und die Spule von $0,4 \text{ kg}$. Der Luftspalt zwischen den beiden Spulen an der unteren Seite hat eine Größe von $0,04 \times 0,04 \text{ m}$. Zur Messung der Spannungen der Spule am Pendel und der des Tachogenerators wird das Datenerfassungssystem *CASSY* verwendet. Das Datenerfassungssystem *CASSY* besteht aus einer PC-Software und einer Interfacebox mit anschlüssen für die einzelnen Messungen. Die gemessenen Spannungen haben eine Auflösung von fünf Nachkommastellen. Zur Spannungsversorgung der Spulen für das statische Magnetfeld wird ein Netzteil mit Strombegrenzung verwendet. Dieses wird auf den Maximalstrom von 1 A eingestellt.

3.2 Durchführung

Zu Beginn wird der Versuchsaufbau verkabelt und der Computer und die Messsoftware *CASSY-LAB* gestartet. Die Verkabelung des Datenerfassungsboards mit dem Induktionsspendel ist im Versuchsaufbau bereits vorgenommen und muss nicht weiter verändert werden. Die Spulen für das statische Magnetfeld werden mit Stromdurchflußrichtungen verkabelt, die die Magnetfelder beider Spulen nicht aufheben, sondern verstärken. Das Netzteil wird auf eine Strombegrenzung von 1 A eingestellt um die Spulen nicht zu beschädigen. Alle weiteren Messungen werden durch *CASSY* erledigt, welches jeweils die Spulenspannung U_{ind} und eine zur Winkelgeschwindigkeit proportionale Spannung U_ω als Funktion zur Zeit aufzeichnet.

Kalibrieren des Winkelgeschwindigkeitssensors

Zur Kalibrierung des Winkelgeschwindigkeitssensors werden für die Auslenkungen $\phi = \{10, 15, 20\}^\circ$ die Spannungen U_ω gemessen.

Messungen der Winkelgeschwindigkeit und Induktionsspannung bei verschiedenen Widerständen

Nacheinander werden gleichzeitig die Winkelgeschwindigkeit U_ω und die Induktionsspannung U_{ind} mit den Widerständen $R = \{0, 2, 10, 50\} \Omega$ gemessen. Die Widerstände werden in die oberen Öffnungen der Bananenstecker der zur Pendelspule gehörenden Leitungen auf dem *CASSY*-Interface gesteckt. Dadurch wird der Widerstand parallel zur Induktionsspule geschaltet.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung ist unterteilt in verschiedene Abschnitte. Zunächst wird der Verlauf der Induktionsspannung theoretisch abgeschätzt und die Kalibrierung des Winkelgeschwindigkeitssensors berechnet. Darauf wird die Induktionsspannung, die Abklingkonstanten und die Dämpfung aus den erhobenen Messdaten ausgewertet. Plots der Messdaten sind jeweils im Anhang zu finden.

Theoretische Abschätzung

Zunächst wird der Verlauf der induzierten Spannung $U_{ind}(t)$ theoretisch abgeschätzt. Dafür wird die Geschwindigkeit v des Pendels beim Durchgang durch das magnetische Feld bestimmt. Das Pendel wird vorerst näherungsweise als mathematisches Pendel betrachtet, wodurch gilt:

$$m g h = \frac{1}{2} m v^2 \quad (11)$$

Für die Geschwindigkeit v am Nulldurchgang folgt:

$$v = \sqrt{2 g h} \quad (12)$$

Da g bekannt ist, muss die Höhe h bestimmt werden um v bestimmen zu können. Für h gilt:

$$h = l - l \cos(20^\circ) \quad (13)$$

Die Länge l ist dabei die Länge des Stabs des Induktionsspendes ausgehend von der Drehachse und die Länge der Induktionsspule.

Die Induktionsspannung U_{ind} wird berechnet durch:

$$U_{ind} = - n B l_s v \sin(\phi) \quad (14)$$

$$= - n B l_s \sqrt{2 g (l - l \cos(20^\circ))} \sin(\phi) \quad (15)$$

Durch Einsetzen der bekannten Werte für die Spule ($n = 100$, $l_s = 0,04$ m) [Uni10] und

$B = 0,5 \text{ T}$ gilt:

$$U_{ind} \approx 1,74 \text{ V} \quad (16)$$

Kalibrieren des Winkelgeschwindigkeitssensors

Am Winkelgeschwindigkeitssensor liegt eine zur Winkelgeschwindigkeit ω proportionale Spannung U_ω an. Es gilt:

$$\omega \sim U_\omega \quad (17)$$

$$\omega = b U_\omega \quad (18)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist definiert durch:

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} \quad (19)$$

Um den Faktor b zu ermitteln wurde für die Winkel $\phi = (10, 15, 20)^\circ$ jeweils die Zeit bis zum Nulldurchgang des Pendels gemessen. Die Zeiten werden aus den durch *CASSY* erhobenen Messwerten ermittelt. Aus dieser Zeit und dem Startwinkel ϕ kann dadurch die Winkelgeschwindigkeit ω berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Tabelle 1 aufgeführt.

$\phi/^\circ$	ϕ/rad	t/s	$U_\omega(t)/\text{V}$	$b/(\text{rad/Vs})$
20	0,349	0,315	0,0390	28,41
15	0,262	0,380	0,0303	22,74
10	0,175	0,280	0,0199	31,41

Tabelle 1: Spannungen U_ω am Nulldurchgang bei verschiedenen Auslenkungen

Aus den Messwerten ergibt sich durch Bilden des Mittelwerts und der Standardabweichung folgender Wert:

$$b = (27 \pm 4) \text{ rad/Vs} \quad (20)$$

Verlauf von U_{ind}

Der Verlauf der induzierten Spannung ist in Abbildung 3 dargestellt. Wenn die Induktionsspule das statische Magnetfeld passiert, wird eine Spannung induziert. Erst ist diese negativ, weil das Pendel das statische Magnetfeld von der linken Seite passiert. Danach wird die Spannung null, da das Pendel das Magnetfeld verlässt und an der anderen Seite an seinem Wendepunkt ankommt. Danach wird die Spannung positiv, da das Pendel dieses mal von der rechten Seite das Magnetfeld passiert.

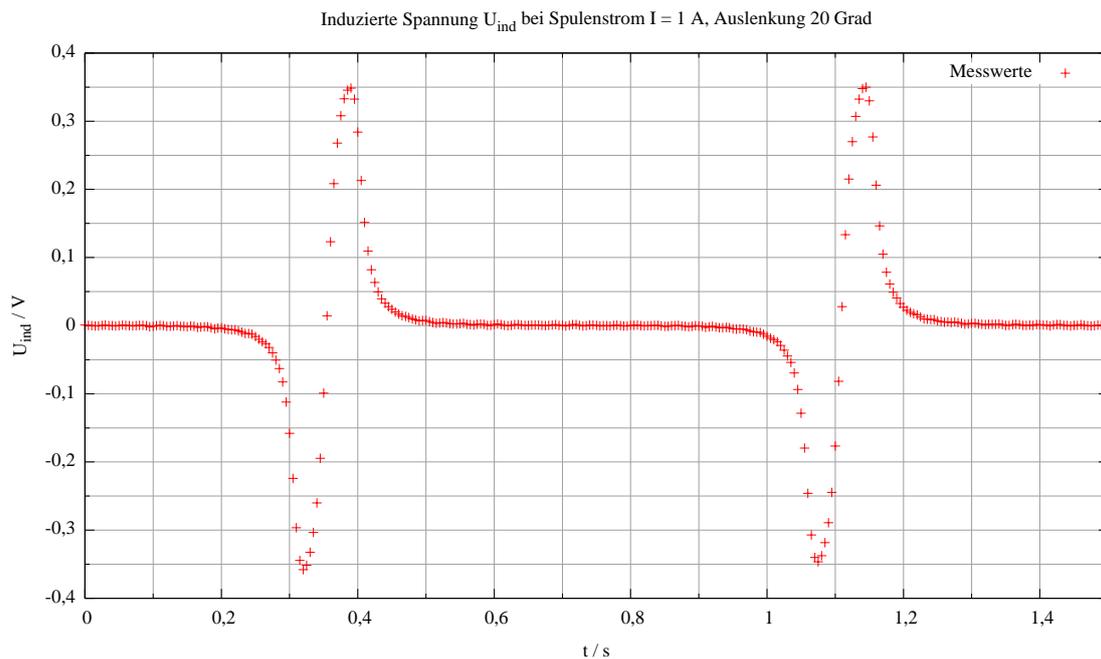


Abbildung 3: Verlauf der induzierten Spannung U_{ind} über die Zeit

Die magnetische Flussdichte B im Spalt lässt sich durch Umstellen von Formel (14) berechnen:

$$B = -\frac{U_{ind}}{n l v} \quad (21)$$

Die Geschwindigkeit v ist dabei die Bahngeschwindigkeit des Pendels berechnet aus U_{ind} und b . Die Induktionsspannung beträgt $U_{ind} = 0,35$ V.

Durch Einsetzen erhält man für B :

$$B = -0,128 \text{ T} \quad (22)$$

Abklingkonstanten der Pendelbewegung bei verschiedenen Dämpfungen

Die Abklingkonstanten werden berechnet aus jeweils zwei aufeinanderfolgenden Maximalauslenkungen. Die Maximalauslenkungen sind in den Geschwindigkeits- / Zeit-Diagrammen als Hochpunkte zu erkennen. Die Diagramme für die Dämpfungen von $\{0, 2, 10, 50\} \Omega$ sind in den Diagrammen 5, 6, 7 und 8 im Anhang zu finden. Die ermittelten Maximalauslenkungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

U_ω / V			
0Ω	2Ω	10Ω	50Ω
0,039	0,040	0,038	0,035
0,038	0,039	0,035	0,030
0,037	0,037	0,032	0,027
0,036	0,035	0,030	0,023
0,035	0,034	0,028	0,019
0,034	0,033	0,026	0,014
0,033	0,031	0,024	0,011
0,031	0,030	0,021	0,007
0,030	0,028	0,019	0,005
0,029	0,026	0,014	0,004

Tabelle 2: Geschwindigkeitmaxima bei verschiedenen Dämpfungswiderständen. Ermittelt aus den Abbildungen: 5, 6, 7 und 8.

Aus den Geschwindigkeitsamplituden werden durch Bilden der Verhältnisse zweier aufeinander folgender Maxima die Abklingkonstanten berechnet. Die berechneten Werte sind in Tabelle 3 zu finden.

	0Ω	2Ω	10Ω	50Ω
<i>Abklingkonstanten</i>	1,026	1,026	1,086	1,167
	1,027	1,054	1,094	1,111
	1,028	1,057	1,067	1,174
	1,029	1,029	1,071	1,211
	1,029	1,030	1,077	1,357
	1,030	1,065	1,083	1,273
	1,065	1,033	1,143	1,571
	1,033	1,071	1,105	1,400
	1,034	1,077	1,357	1,250
	<i>Mittelwert</i>	1,034	1,049	1,120
<i>Standardabweichung</i>	0,012	0,020	0,092	0,143

Tabelle 3: Abklingkonstanten bei verschiedenen Dämpfungswiderständen. Ermittelt aus den Geschwindigkeitsmaxima in Tabelle 2.

Die Abklingkonstanten sind relativ konstant und weisen eine geringe Standardabweichung auf (Tabelle 3). Die Dämpfung ist daher abhängig von der jeweiligen Geschwindigkeit des Pendels. Die Hauptursache der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung ist dabei die Reibung an der Drehachse.

Dämpfung

Die Dämpfungen für die Widerstände $R = 10 \Omega$ und $R = 2 \Omega$ sind auszuwerten. Zunächst, indem die Geschwindigkeiten zweier Maxima im $\omega(t)$ Diagramm verglichen werden.

Aus Tabelle 2 werden für $R = (10, 2) \Omega$ die ersten beiden Maxima die Geschwindigkeiten ermittelt:

$$v_{(2 \Omega, 1)} = 0,704 \text{ m/s}$$

$$v_{(2 \Omega, 2)} = 0,687 \text{ m/s}$$

$$v_{(10 \Omega, 1)} = 0,669 \text{ m/s}$$

$$v_{(10 \Omega, 2)} = 0,614 \text{ m/s}$$

Der Energieverlust lässt sich bestimmen durch:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m (v_2 - v_1)^2 \quad (23)$$

Durch Einsetzen ergeben sich folgende Werte:

$$\Delta E_{2 \Omega} = 0,079 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

$$\Delta E_{10 \Omega} = 0,083 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

Die geleistete elektrische Arbeit kann durch das folgende Arbeitsintegral berechnet werden:

$$W = \frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} U^2(t) dt \quad (24)$$

Das in Formel (24) enthaltene Integral wurde durch die Integralmessungsfunktion der Software *CASSY-Lab* bestimmt. Für die elektrische Arbeit gilt also:

$$W_{2\Omega} = \frac{1}{2\Omega} 0,0065 \text{ V}^2\text{s} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{Ws}$$
$$W_{10\Omega} = \frac{1}{10\Omega} 0,0125 \text{ V}^2\text{s} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{Ws}$$

4.2 Fehlerbetrachtung

Fehler traten unter anderem bei der Messung der Spannung U_{ind} und U_ω auf. Das Datenerfassungssystem *CASSY* liefert jeweils Spannungen mit bis zu 5 Nachkommastellen. Der *Ablesefehler* würde sehr klein ausfallen und wird deswegen nicht angegeben.

Für die Messungen der Proportionalitätskonstante b und der Abklingkonstanten wurden jeweils mehrere Messpunkte ausgewertet über die ein Mittelwert mit Standardabweichung gebildet wird. Auch Fehlerbehaftet ist das bestimmen der Maxima aus den rohen Messdaten durch ablesen.

Zur Kalibrierung des Winkelgeschwindigkeitssensors wurden verschiedene Anfangsauslenkungen verwendet. Diese sind besonders Fehlerträchtig, da sie per Hand ausgelenkt wurden. Es wurden für drei verschiedene Auslenkungen messungen durchgeführt und der Mittelwert mit Standardabweichung als Ergebnis verwendet. Der einzelne Fehler wurde deshalb nicht mit eingerechnet.

5 Literatur

- [Nol02] W. Nolting, *Klassische Mechanik*, Grundkurs: Theoretische Physik, Springer, Berlin (2002)
- [Rai06] W. Raith, *Elektromagnetismus*, de Gruyter, Berlin (2006)
- [TG98] C. Thomsen, H.-E. Gumlich, *Ein Jahr für die Physik: Newton, Feynman und andere*, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin (1998)
- [Uni10] Universität Paderborn – Fakultät für Naturwissenschaften - Physikalisches Grundpraktikum, E12: Induktionspendel (Juli 2010)
<http://groups.uni-paderborn.de/physik/studieninfos/praktika/versuch.php?versuch=e12>

A Plots

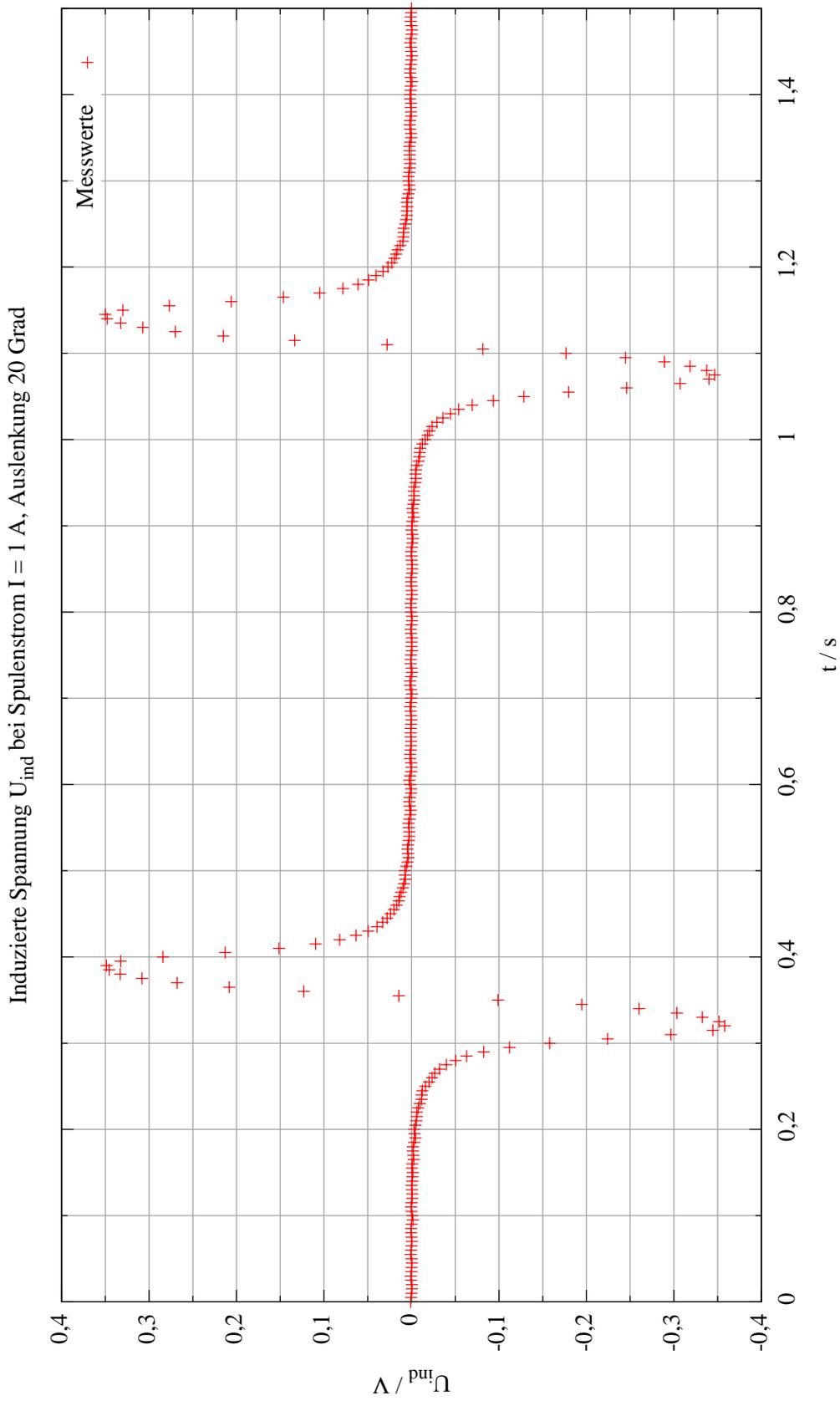


Abbildung 4

Geschwindigkeit des Induktionsspendels bei $R = 0 \text{ Ohm}$, Auslenkung 20 Grad

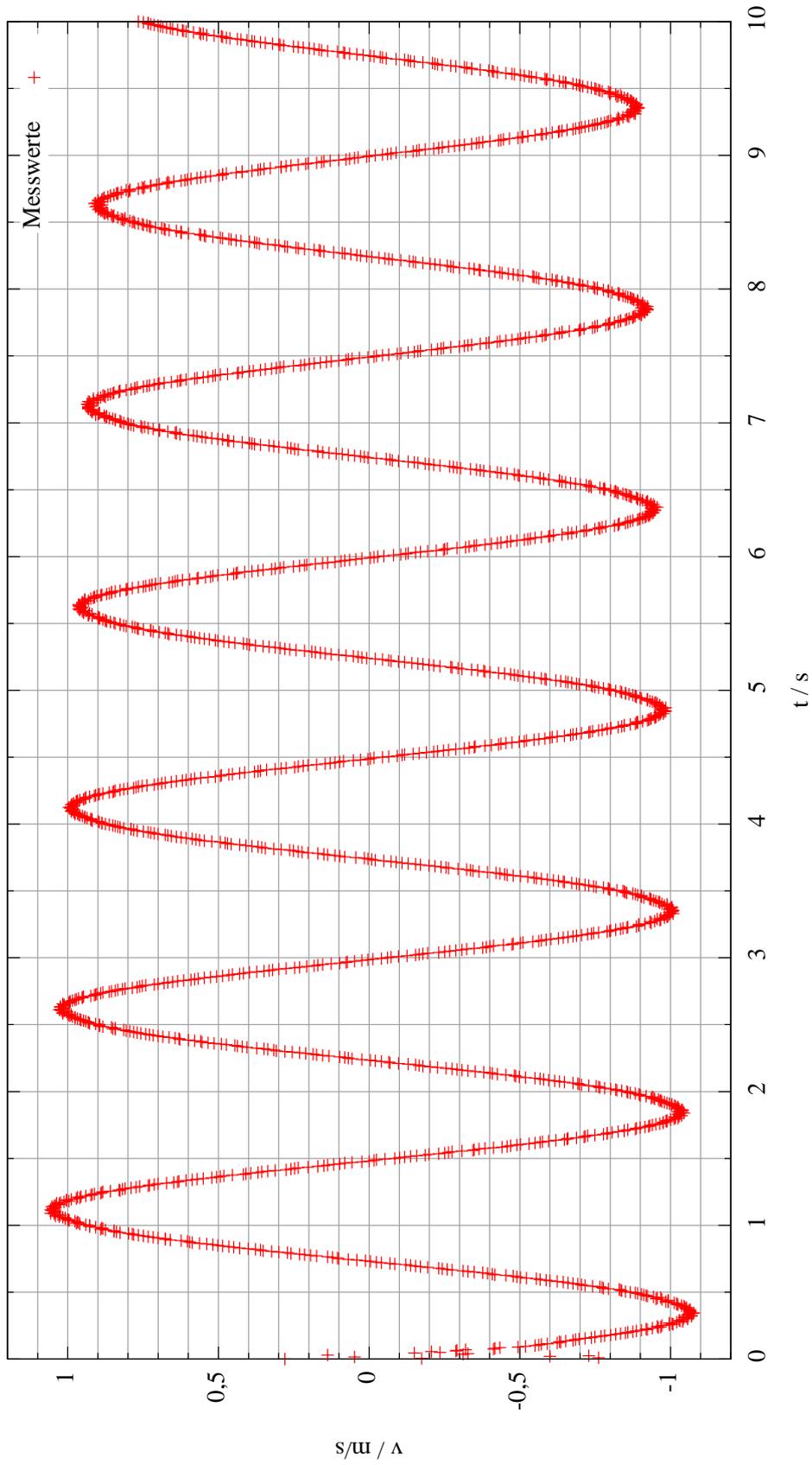


Abbildung 5

Geschwindigkeit des Induktionsspendels bei $R = 2 \text{ Ohm}$, Auslenkung 20 Grad

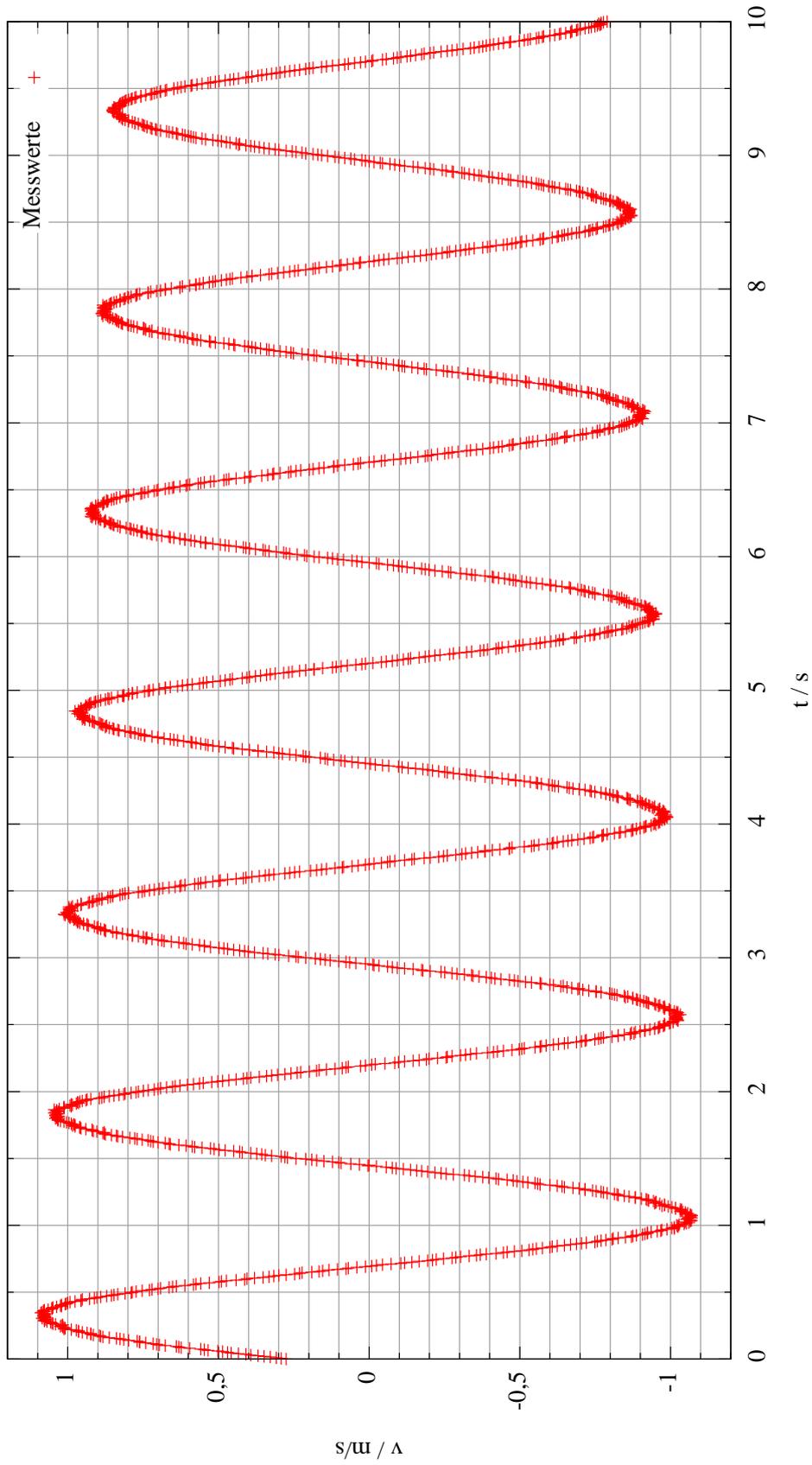


Abbildung 6

Geschwindigkeit des Induktionspendels bei $R = 10 \text{ Ohm}$, Auslenkung 20 Grad

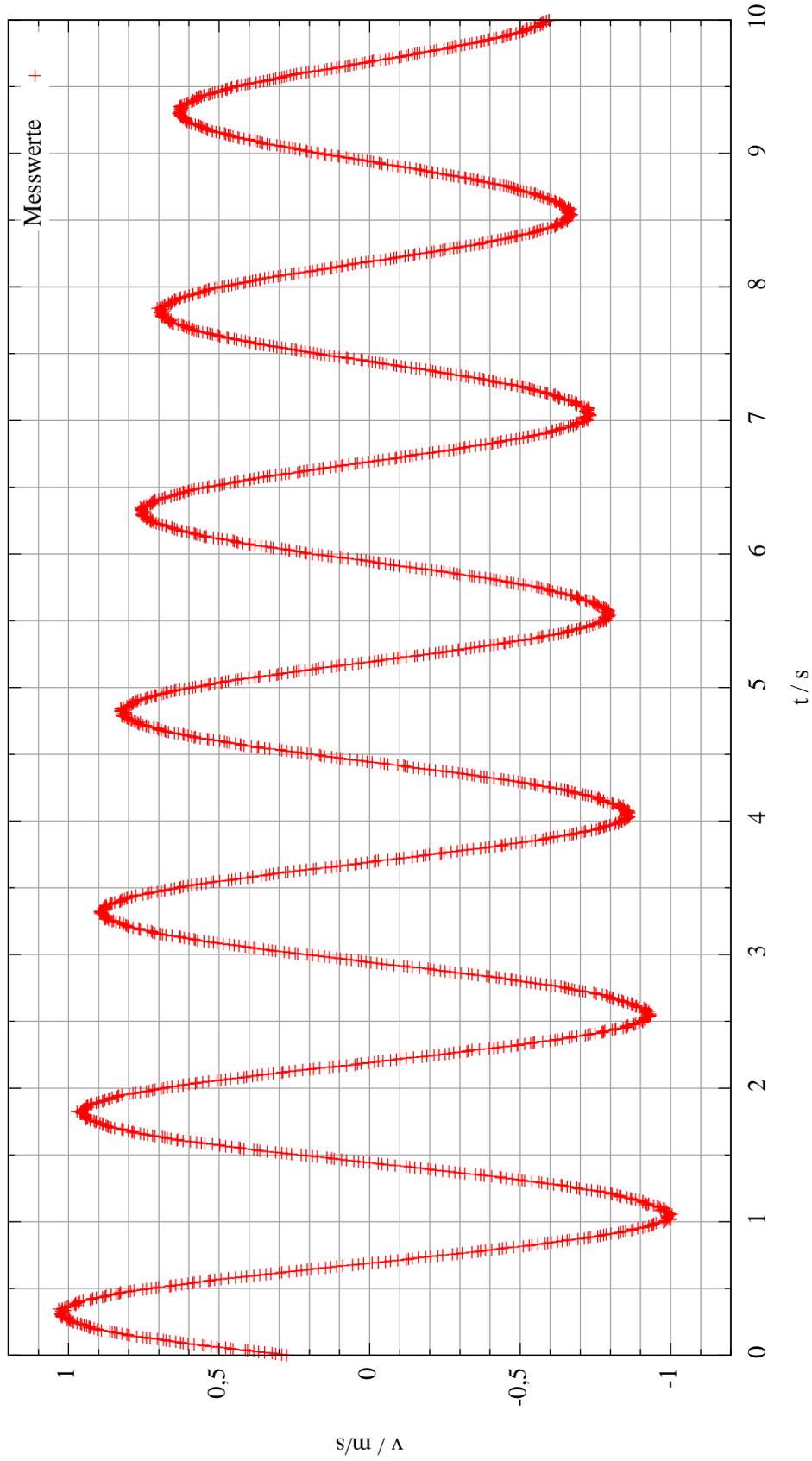


Abbildung 7

Geschwindigkeit des Induktionspendels bei $R = 50 \text{ Ohm}$, Auslenkung 20 Grad

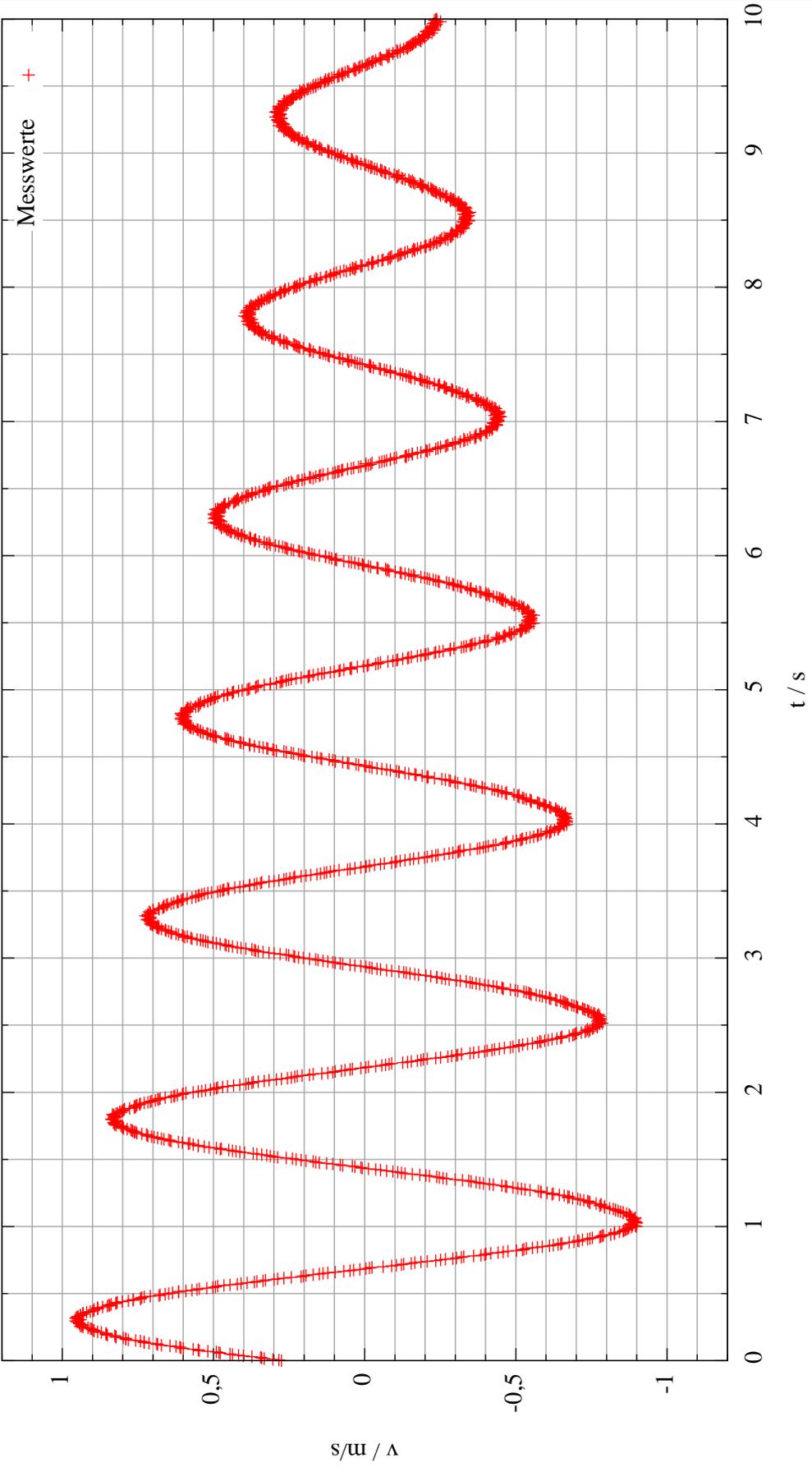


Abbildung 8

Geschwindigkeit und Induktionsspannung bei $R = 2 \text{ Ohm}$ und $I = 1 \text{ A}$, Auslenkung 20 Grad

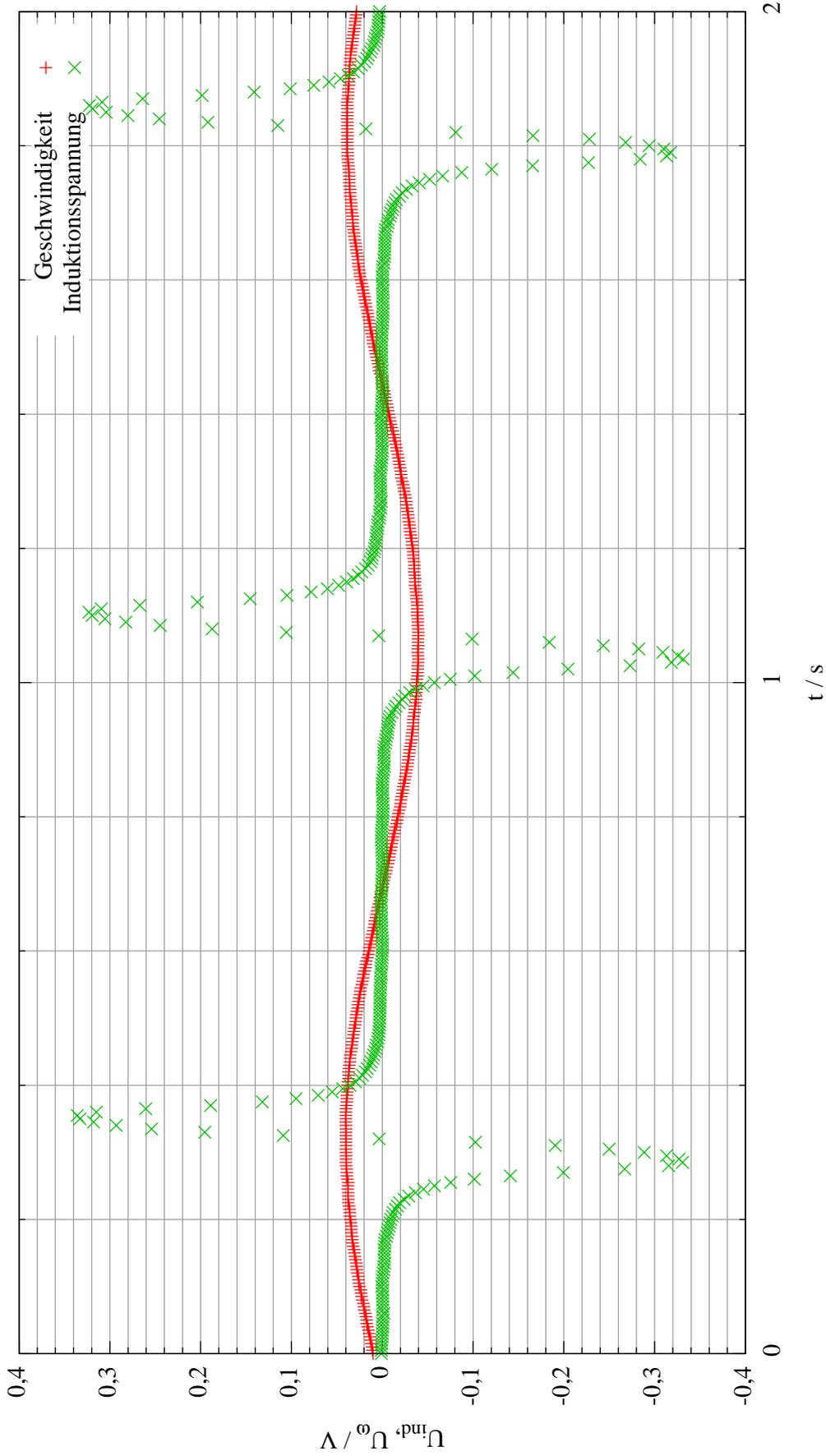


Abbildung 9

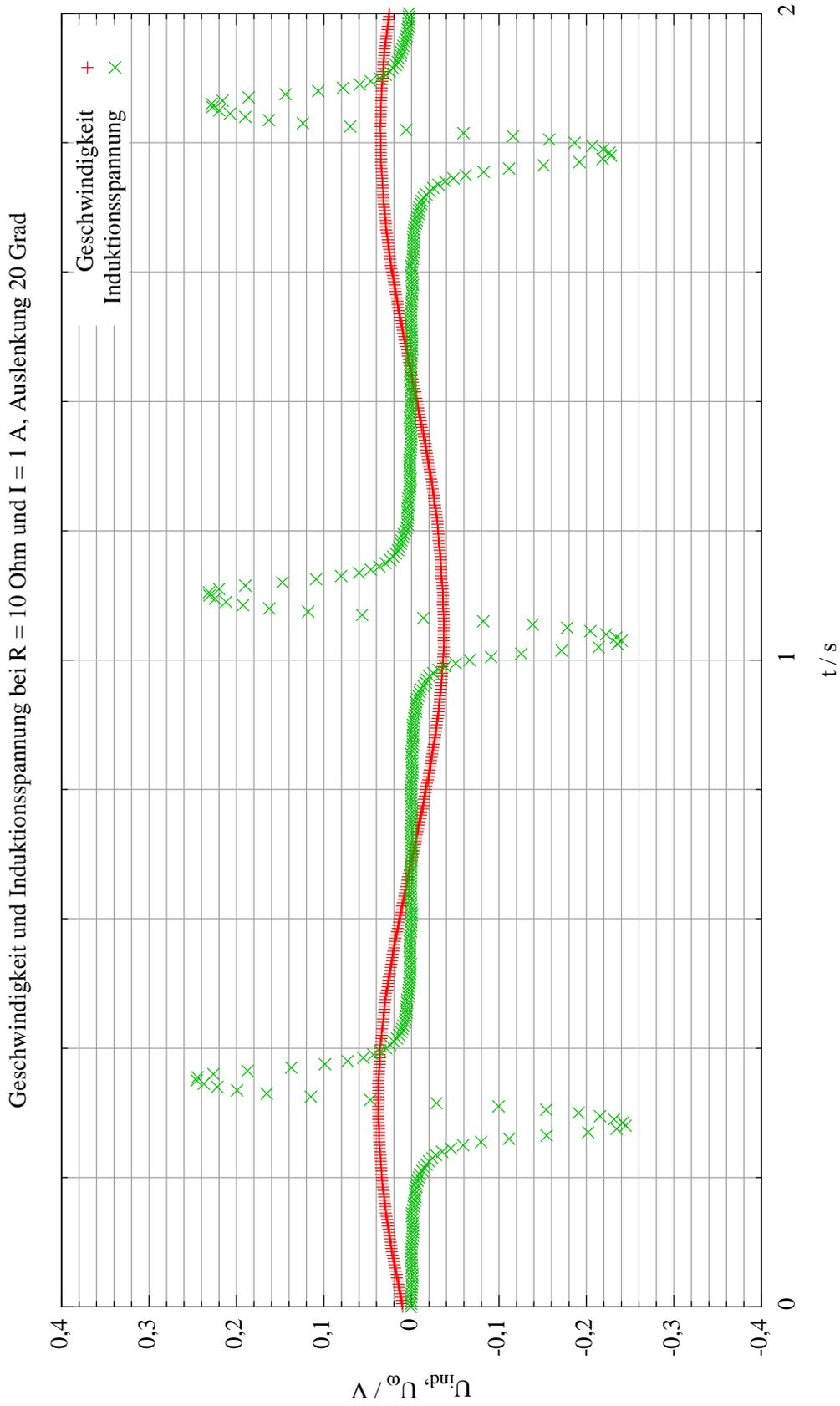


Abbildung 10