

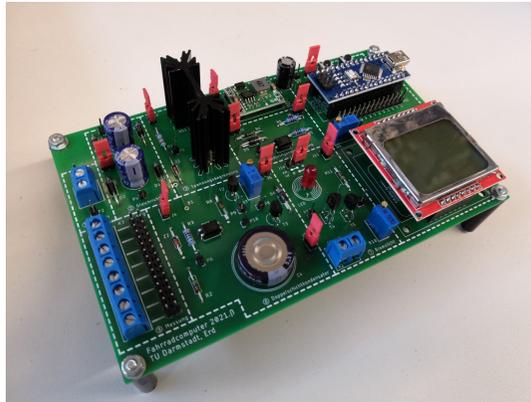
Kooperation von EW, HST und LEA

Energietechnik TU Darmstadt

Betreuende wissenschaftliche
Mitarbeiter:

Nicolas Erd (EW)
Julian Moxter (HST)
Martin Weicker (EW)
Andrea Zingariello (LEA)

A. Binder,
Institut für Elektrische Energiewandlung



Fahrradcomputer. Bestückte Platine

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 1

Gliederung: Kompendium Fahrradcomputer

- Einleitung
- Durchführung elektrischer Messungen
- Fahrraddynamo
- Module des Fahrradcomputers
 - Modul 1: Gleichrichter
 - Modul 2: Spannungsbegrenzung
 - Modul 3: DC/DC-Wandler
 - Modul 4: Nulldurchgangserkennung
 - Modul 5: Mikrocontroller
 - Modul 6: Doppelschichtkondensator
 - Modul 7: Bremslicht

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 3

Ablauf Einführungsveranstaltung

- Begrüßung und Projektvorstellung
- Hygienekonzept
- Technische Sicherheitsbelehrung
- Kompendium Wechselblinker
- Projekt-Kickoff

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 2

EINLEITUNG

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 4

Ziele des Projektwoche Fahrradcomputer



Willkommen zum Einführungsprojekt:
Fahrradcomputer 18-de-1010-pj

Ziele der Projektwoche:

- Erarbeiten eines technischen Lösungskonzepts für eine vorgegebene praxisnahe und komplexe Aufgabenstellung in Kleingruppen
- Schaltungstechnische Lösungen nachvollziehen
- Aufbau der Schaltung (Bestücken, Löten)
- Programmierung des μC am PC
- Überprüfung des Gesamtaufbaus an einem Prüfstand



12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 5

Ablauf des Projektwoche



- Veranstaltungszeitraum vom **8.03. – 12.03.2021**
- Anwesenheitspflicht an allen Terminen
- 2 digitale Zoom-Termine:
 - 1 digitaler Vorbesprechungstermin
 - 1 digitale Abschlussveranstaltung
- **8 Präsenztermine** in Raum **S3|09 15** (Maschinensaal EW)
 - je 4 Vor- und Nachmittagstermine je 4 Stunden
 - Zwei reservierte Zeitslots je Gruppe am Prüfstand
- Pause zwischen Vormittags- und Nachmittagstermin von 60 oder 120 Minuten

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 7

Betreuung: Wissenschaftliche Mitarbeiter



Nicolas Erd (M. Sc.)

Institut für Elektrische Energiewandlung
Tel.: 06151 16-24189
Email: nerd@ew.tu-darmstadt.de



Martin Weicker (M. Sc.)

Institut für Elektrische Energiewandlung
Tel.: 06151 16-24191
Email: mweicker@ew.tu-darmstadt.de



Julian Moxter (M. Sc.)

Fachgebiet Hochspannungstechnik
Tel.: 06151 16-20437
Email: julian.moxter@tu-darmstadt.de



Andrea Zingariello (M. Sc.)

Institut für Stromrichtertechnik und Antriebsregelung
Tel.: 06151 16-20596
Email: andrea.zingariello@lea.tu-darmstadt.de



12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 6

Ablauf des Projektwoche



Zoom-Link für die digitalen Veranstaltungen

<https://tu-darmstadt.zoom.us/j/88255852804?pwd=SmJZK1JkaWh0Ykdub05la0ROQkR1Zz09>

Meeting-ID: 882 5585 2804

Kenncode: 313743

Gruppeneinteilung:

- Einteilung in 4 Gruppen mit je max. 5 Studierenden
- Einteilung findet bei der digitalen Auftaktveranstaltung durch Betreuer statt
- Studierende einer Gruppe bleiben in ihrer Gruppe zusammen → **Kein physischer Kontakt mit anderen Gruppen**

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 8

Zeitplan: Vorschlag

Zeit	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag			
09:00-09:30	Aufaktveranstaltung Zoom	Gruppenarbeit (z.B. Modul 1)	Gruppenarbeit (z.B. Modul 3,4)	Gruppen- arbeit (z.B. Modul 6)	Prüfslot 3	Gruppen- arbeit (z.B. Modul 7)	Prüfslot Reserve	
09:30-10:00								
10:00-10:30								
10:30-11:00								
11:00-11:30								
11:30-12:00	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause		
12:00-12:30								
12:30-13:00								
13:00-13:30								
13:30-14:00								
14:00-14:30	Modulvorbereitung und Polin-Bausatz	Gruppenarbeit (z.B. Modul 2)	Gruppen- arbeit (z.B. Modul 5)	Vorberei- tung Folien	Prüfslot 1	Prüfslot 2	Prüfslot 3	Prüfslot 4
14:30-15:00								
15:00-15:30								
15:30-16:00								
16:00-16:30								
16:30-17:00								
17:00-17:30								
17:30-18:00								
	Endveranstaltung Präsentation Zoom							

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 9

Unterweisungen

- Sicherheitsunterweisung
- Hygienekonzept
- Beide Unterweisungen müssen beim 1. Präsenztermin durch Unterschrift bestätigt werden
- Unterweisungen und schriftliche Bestätigung sind Voraussetzung für Teilnahme
- Verstöße gegen Labor-, Sicherheits- und Hygieneordnung können durch Ausschluss geahndet werden

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 11

Arbeitsplätze

- Jede Gruppe sitzt an ihren zugewiesenen Arbeitsplätzen
Keine Begegnungen auf dem Mittelgang. Warten, Schauen und dann Gehen.
- Wechsel von Arbeitsplätzen nur als geschlossene Gruppe
- Je Arbeitsplatz stehen Lötstation, Multimeter und Werkzeug zur Verfügung
- **Laptop** für die Programmierung des Mikrocontrollers werden durch **Gruppenmitglieder selbst organisiert**

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 10

Anforderungen zum erfolgreichen Modulabschluss (I)

Bewertung gliedert sich in zwei Bereiche:

Individuelle Leistung

- Praktischer Aufbau eines funktionsfähigen Wechselblinkers
- Vorbereitung und Präsentation der zugewiesenen Module

Gemeinschaftliche Leistung

- Praktische Aufbau der Gesamtschaltung des Fahrradcomputers
- Vollständiger Aufbau und erfolgreiche Erprobung von Modul 1 bis 5 (Pflichtteil)
- Dokumentation der Projektwoche

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 12

Anforderung an die Dokumentation:

- Abgabe einer Gesamtdokumentation über den Fahrradcomputers in **Folienform**
- Insgesamt 5 ppt-Folien je Modul
 - Aufgabe und Funktionsweise des Moduls
 - Beschreibung der **eigenen** Simulations- und Messergebnisse
 - Verantwortlich für die Folien ist die jeweilige modulverantwortliche Person
- Dokumentationsvorlage (Titelfolie, Gliederung) in Powerpoint wird gestellt
- Präsentation von 10 min (± 1 min) je Studierendem
- **Prüfung der Dokumentation hinsichtlich Plagiat (Quellenangaben!)**
- **Liegt ein Plagiat vor, führt dies zum Nicht-Bestehen der Projektwoche (Verwenden Sie keine Kopie von Ergebnissen aus dem Kursmaterial)**

PROJEKT: FAHRRADCOMPUTER

Eigenverantwortung und Selbstständigkeit:

- Zeitplanung
- Einarbeitung und technische Recherche (muss über das Kompendium hinausgehen)
- Bearbeitung
- Dokumentation
- Präsentation
- **Betreuer wirkt als Berater**

Ihr seid schneller? Es gibt für Euch mehr kreativen Spielraum, z. B.:

- optionale Module (Supercap, Bremslicht)
- Eigene Ideen mit bestehender Hardware umsetzen (z.B. eigene Software, grafische Oberfläche, ...)
- Schaltungsauslegung und Schaltungssimulation
- weitere eigene Ideen

Projekt: Fahrradcomputer

Problemstellung:

Ein kommerziell verfügbarer Fahrradcomputer benötigt Sensoren, um Informationen über die Geschwindigkeit zu erhalten, sowie eine externe Batterie als Energieversorgung.

Ziel:

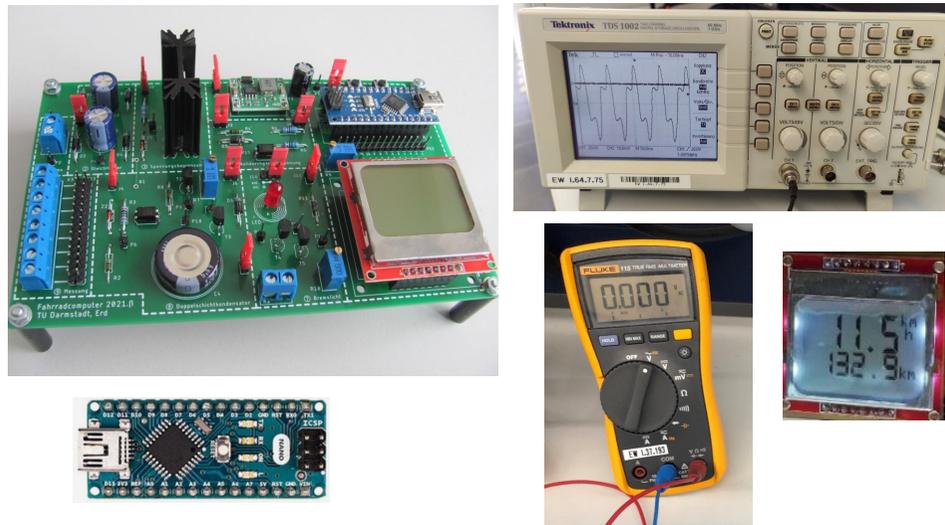
Aufbau eines Fahrradcomputers für Nabendynamos **ohne zusätzlichen Sensor für die Geschwindigkeitsmessung** und **ohne externe Batterie als zusätzliche Energiequelle**

Umsetzung

Hardware: Elektronikaufbau und Arduino-Mikrocontroller

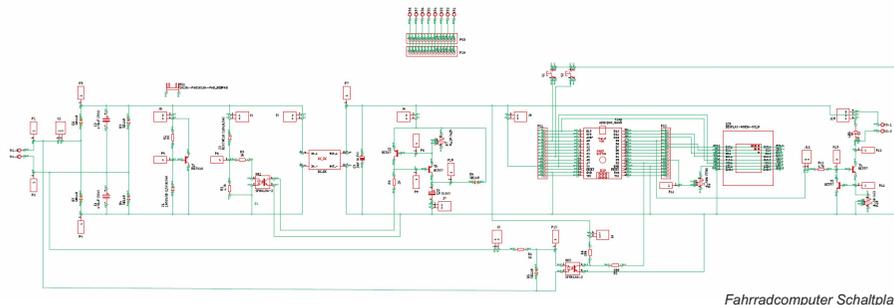
Software: Programmierung des Mikrocontrollers mit der Arduino-Software

In diesem Projekt werden Sie einen solchen Fahrradcomputer aufbauen, untersuchen und anschließend testen !



Vorausplanung der Messung im Schaltplan

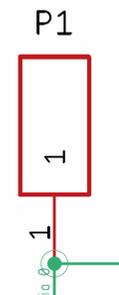
- Überlegen Sie anhand des Schaltplans, welchen Strom oder welche Spannung Sie messen wollen!
- Suchen Sie sich die **passenden Klemmen** für den Anschluss der Messkabel: Voltmeter parallel; Amperemeter in Reihe!



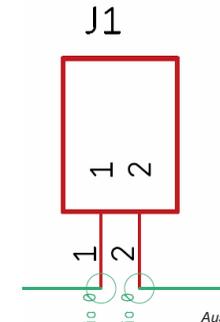
DURCHFÜHRUNG ELEKTRISCHER MESSUNGEN

Schaltplan: Verfügbare Messklemmen

- Einzelmesspunkte für Spannungen sind mit **P** bezeichnet, z. B. P1:
- Auftrennungen für Strommessungen mit zwei Klemmen sind mit **J** bezeichnet, z.B. J1:



Ausschnitt Schaltplan:
Einzelmesspunkt P1



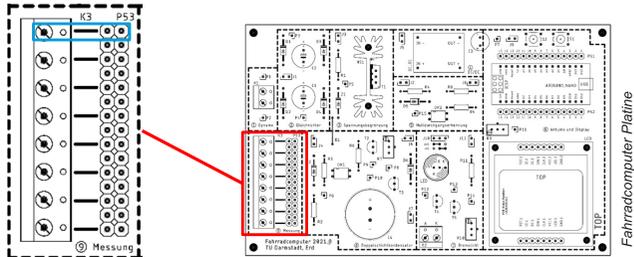
Ausschnitt Schaltplan:
Auftrennung J1

Durchführung der Messung

- Keine Messgeräte direkt in der Schaltung auf der Platine (PCB) anschließen!
- Anschluss von Messgeräten: (PCB: Printed Circuit Board)
 - Verwenden Sie Jumperkabel, um die ausgewählte Messklemme mit den Schraubklemmen zu verbinden!
 - Schließen Sie das benötigte Messgerät an den Schraubklemmen an. Verwenden Sie einen Schraubendreher zum Befestigen.

Die Schraubklemmen für den Anschluss der Messgeräte befinden sich im Platinenbereich mit der Beschriftung „⑨ Messung“

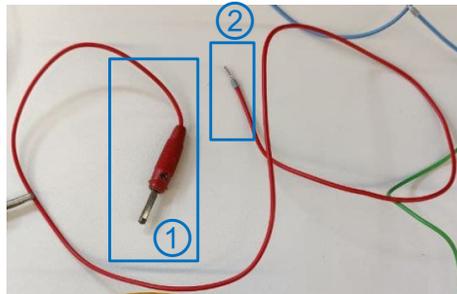
Jeweils eine Schraubklemme ist mit zwei Stiftkontakten elektrisch leitend verbunden (s. blauer Rahmen).



Verbindungsleitungen



weiblich-weiblich Jumperkabel:
Verbindung der Messklemmen mit den Schraubklemmen



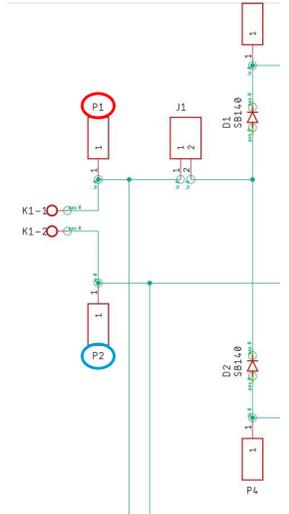
Bananenstecker-Aderendhülse-Kabel:
Anschließen des Multimeters an die Schraubklemmen
①: Bananenstecker für Multimeter
②: Aderendhülse für Schraubklemme im Platinenbereich „⑨ Messung“

Beispiel: Spannungsmessung

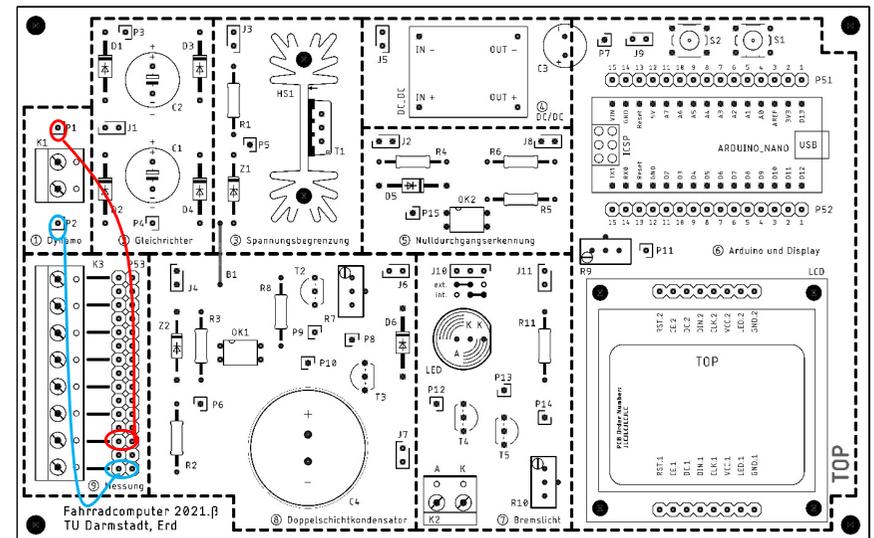
Messung der Dynamospannung:

Der Dynamo wird mit den Klemmen K1-1 und K1-2 verbunden.

- Das Voltmeter muss parallel zum Dynamo geschaltet werden.
- Die Eingangsspannung des Dynamos liegt gemäß dem Schaltplan an den Pins P1 und P2 an.
- Diese Pins müssen nun mit Jumper-Kabeln (weiblich-weiblich) mit freien Pins der Stiftleiste neben dem Klemmenblock im Bereich „⑨ Messung“ verbunden werden.



Verbindung zwischen Stiftkontakt und Schraubklemmen mit Jumperkabel



Verbindung zwischen Schraubklemme und Multimeter

- Das Voltmeter muss nun mit den Schraubklemmen verbunden werden.
- Dafür werden die Bananenstecker-Kabel mit offenem Ende benötigt.
- Das Multimeter muss auf Wechselspannungsmessung „V“ eingestellt werden (siehe linke Abbildung).

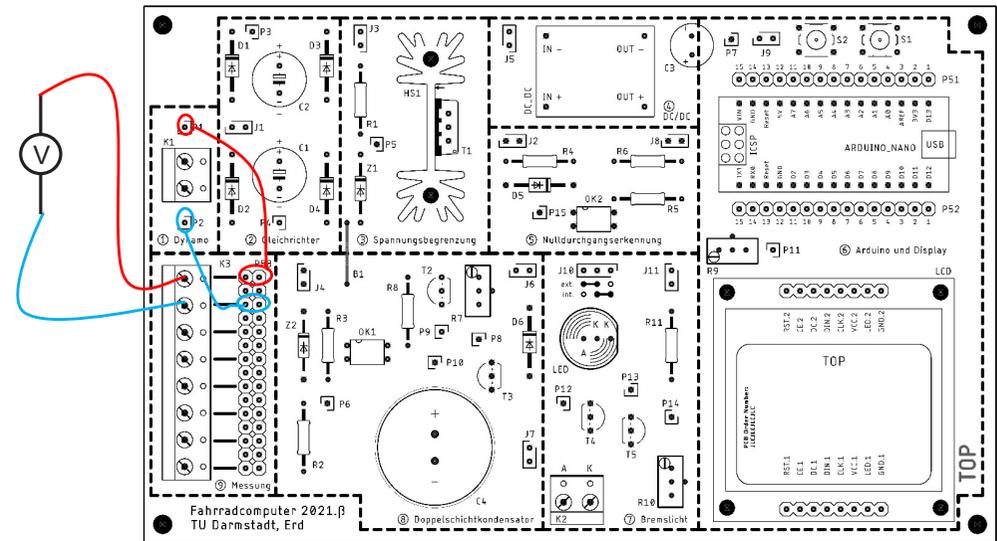


Voltmeter

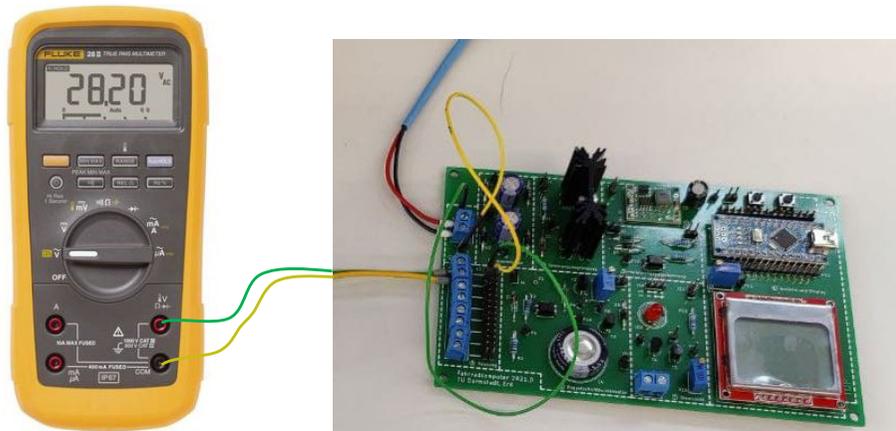


Amperemeter im mA-Messbereich

Verbindung zwischen Schraubklemmen und Voltmeter



Übersicht zur Spannungsmessung

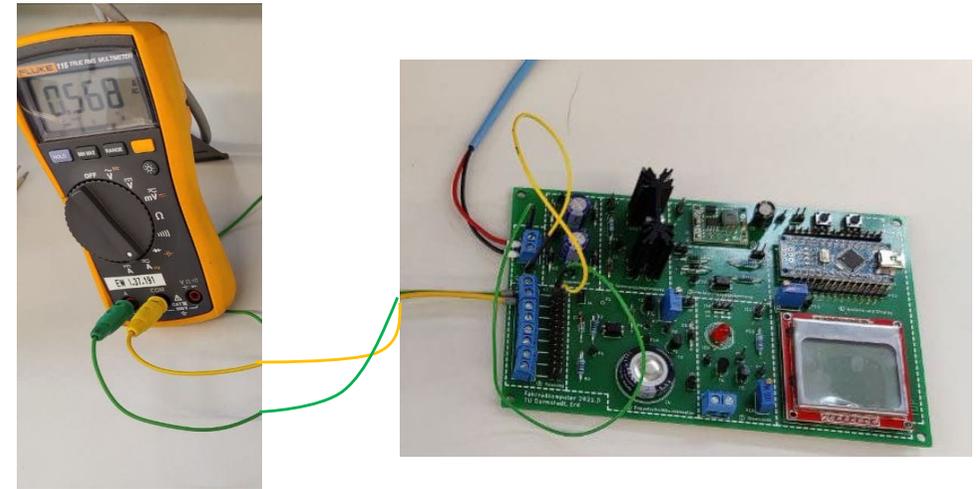
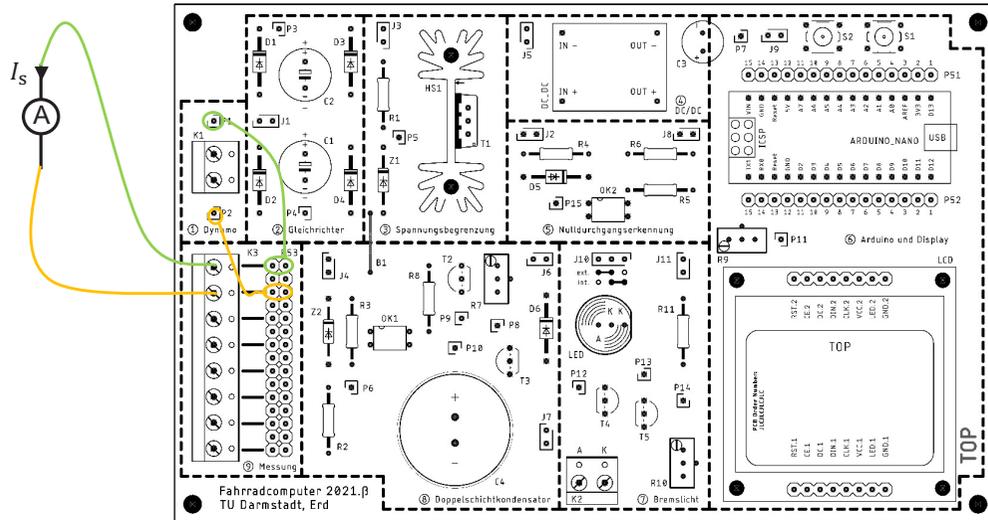


[Bildquelle: FLUKE GmbH]

Beispiel: Strommessung

Messung des Kurzschlussstroms des Dynamos

- Der Dynamo soll durch ein Amperemeter kurzgeschlossen werden.
- Multimeter auf Wechselstrommessung einstellen!
- Schließen Sie den Dynamo an die Schraubklemme K1 an.
- Verbinden Sie die Klemmen P1 und P2 mit Hilfe von zwei Jumperkabeln mit zwei Schraubklemmen im Platinenbereich „9 Messung“.
- Benutzen Sie die Bananenstecker-Leitungen zum Anschluss des Amperemeters an die beiden Schraubklemmen.

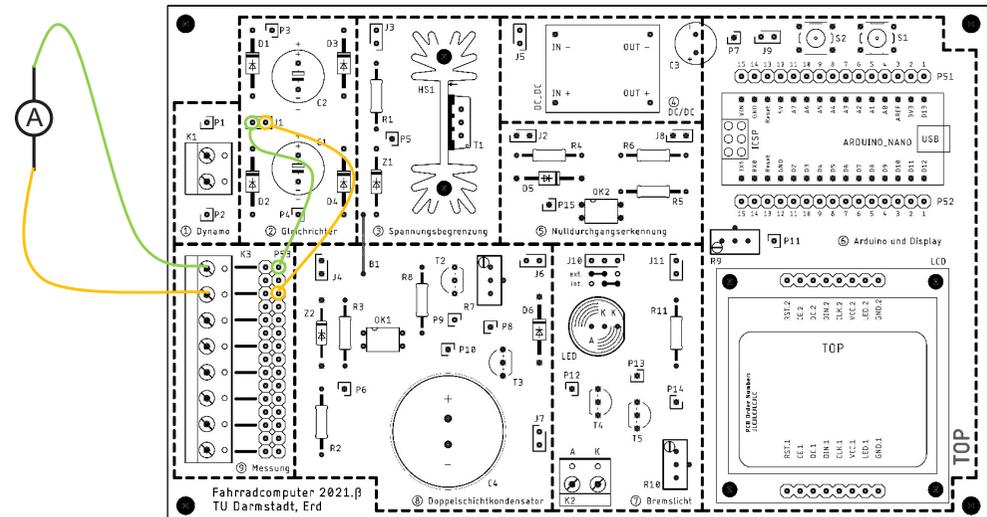


Beispiel: Strommessung bei J1 über Schraubklemmen

Messung des Stroms I_s zwischen J1-1 und J1-2:

- Ein Amperemeter wird zwischen den beiden Klemmen angeschlossen.
- Multimeter auf Wechselstrommessung einstellen!
- Verbinden Sie die Klemmen J1-1 und J1-2 mit Hilfe von zwei Jumperkabeln mit zwei Schraubklemmen im Platinenbereich „⑨ Messung“!
- Benutzen Sie die Bananenstecker-Leitungen zum Anschluss des Amperemeters an die beiden Schraubklemmen.

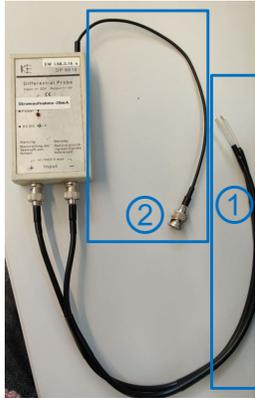
Beispiel: Strommessung bei J1 über Schraubklemmen



Messung mit dem Oszilloskop

Differenzverstärker und Y-BNC-Kabel

- Verwendung des Oszilloskops zur Messung von zeitlichen Spannungsverläufen
- Das Oszilloskop darf nur mit den Differenzverstärker verwendet werden!



Differenzverstärker mit Y-BNC-Kabel

①: BNC-Y-Kabel zu den Schraubklemmen im Platinenbereich mit der Beschriftung „⑤ Messung“

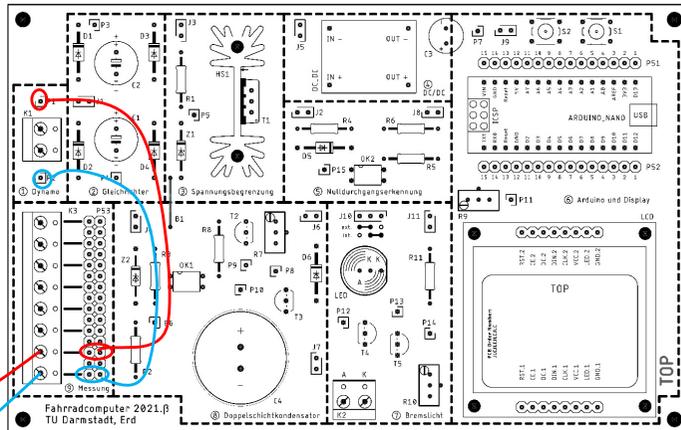
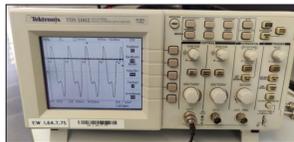
②: Koaxialkabel (BNC-Kabel) Verbindung zum Oszilloskop



BNC-Kabel [1]

Beispiel:

Messung der Dynamospannung mit dem Oszilloskop



Differenzverstärker

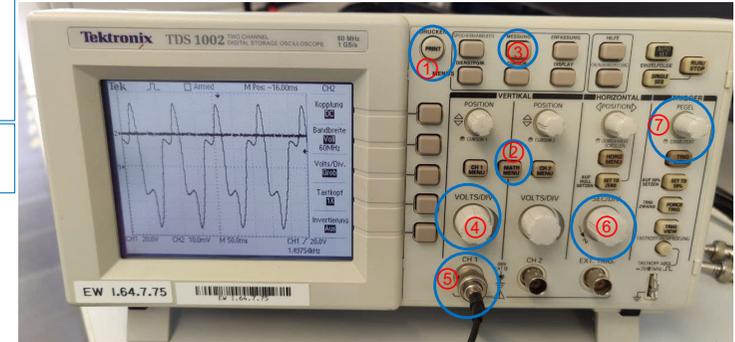
Bedienung des Speicher-Oszilloskops

①: Bildschirmansicht des Oszilloskops ausdrucken

②: Mathematik-Funktionen (FFT)

③: Messung hinzufügen

⑤: Anschluss für die Differenz-Tastköpfe



④: Volts/Div stellt die Auflösung der vertikalen Achse ein

⑥: Sec/Div stellt die Auflösung der horizontalen Achse ein

⑦: Ein Trigger löst einen Messvorgang aus. Der Trigger synchronisiert die Darstellung auf dem Bildschirm!

FAHRRADDYNAMO

Radnabendynamo I

Einphasen-PM-Synchrongenerator



[2]

- Der Fahrraddynamo ist ein einphasiger hochpoliger Synchrongenerator: Abwechselnd als Nord- u. Südpol angeordnete Läufer-Permanentmagnete bewegen sich relativ zu einer ruhenden Ständer-Spule und induzieren dort eine Wechselspannung.
- Der verwendete Fahrraddynamo ist ein Nabendynamo.

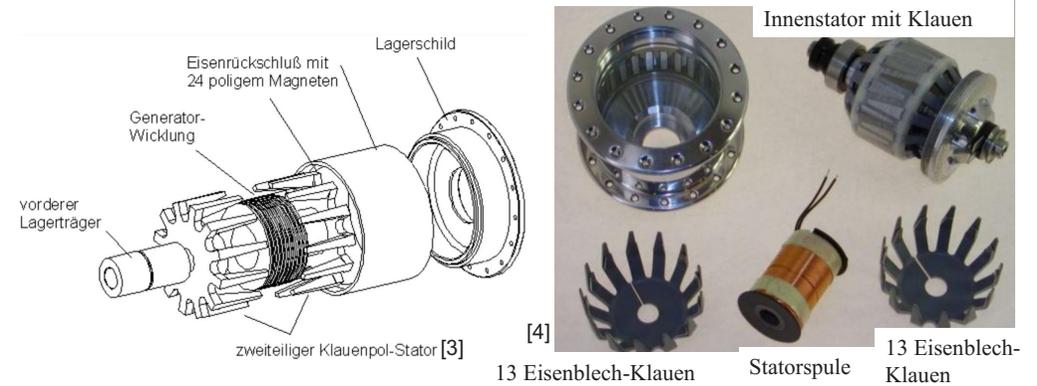
Daten: Fahrraddynamo und Laufrad

Modell	DH-3N31-NT	Bemessungsspannung	6 V
Hersteller	Shimano	Bemessungsleistung in W	3
Masse	705 g	Polpaarzahl p	13

Außenradius des Rades mit Schlauch und Mantel r_{Rad}	0.355 m
--	---------

Radnabendynamo II

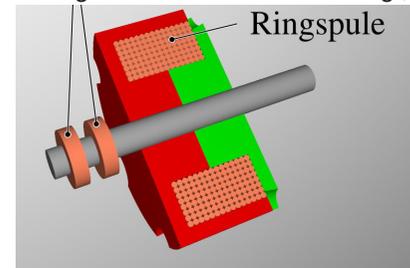
$2p = 26$ Permanentmagnete in Außenläuferglocke



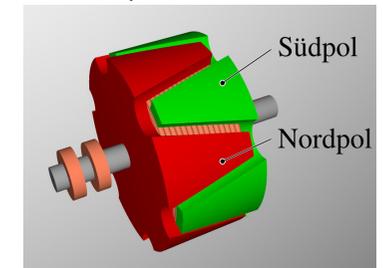
- Im Außenläufer befinden sich $2p = 26$ Permanentmagnete (abwechselnd Nord- und Südpole)
- Im Stator befindet sich eine Spule, die koaxial zur Drehachse liegt und fest steht
- Die Spule ist von jeder Seite von je einem Klauenpolblech umgeben, um aus dem zweiseitigen Spulenfeld ein hochpoliges (26) stehendes pulsierendes $2p$ -poliges Stator-Luftspaltfeld zu erzeugen.

Klauenpolgenerator

Schleifringe werden hier nicht benötigt, da Stator! Bsp.: 2 x 6 Klauen



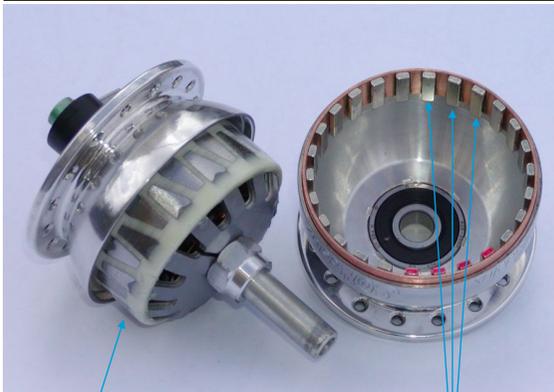
Ohne Klauenpolblechhälften erzeugt eine strom-durchflossene Spule nur einen Nordpol (rot) und einen Südpol (grün) an den beiden Spulenseiten



Die roten und grünen Klauen verteilen diese zwei Pole alternierend am Umfang auf 6 Süd- und 6 Nordpole. Somit wird eine höhere Polzahl (hier: $2p = 12$) erreicht.

[5]

Zusammenhang zwischen Drehzahl und Grundschwungung



Spule mit 2x13 Klauen als 2 Klauenpolblechhälften im Innen-Stator

26 Permanentmagnete im Rotor (Außenläufer) = „Polrad“

[6]

- Mit der Rotation des Rades wird auch der Außen-Rotor mit den 26 Permanentmagneten um die feststehende Spule bewegt. Deren Magnetfeld schließt sich über die 26 Klauen im Klauenblech um die Spule und verketten sich mit dieser magnetisch und induzieren dort die „Polradspannung“ u_p .
- Der Zusammenhang zwischen elektrischer Frequenz f_s der Grundschwungung von u_p und mechanischer Drehzahl n wird durch die Polpaarzahl p bestimmt:

$$f_s = p \cdot n$$

Versuch 1: Leerlaufspannung des Dynamos

Hinweis: Die geschätzte Geschwindigkeit v_{umr} ist auf dem Bildschirm des Umrichters, der über einen E-Motor das Rad antreibt, dargestellt!

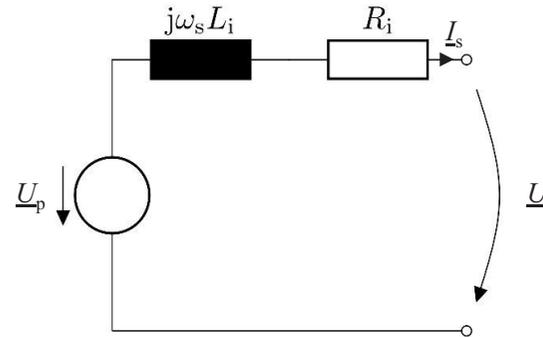
- Stellen Sie $v_{umr} = 5 \text{ km/h}, 10 \text{ km/h}, 15 \text{ km/h}, 20 \text{ km/h}, 25 \text{ km/h}, 30 \text{ km/h}$ auf dem Umrichter ein!
- Messen Sie den Effektivwert der Leerlaufspannung U_p mithilfe des Oszilloskops (Messung \rightarrow Typ \rightarrow Effektivwert)
- Messen Sie den Effektivwert U_p parallel mit einem Multimeter.
- Messen Sie die Frequenz f_s der Leerlaufspannung mithilfe des Oszilloskops (Messung \rightarrow Typ \rightarrow Frequenz)
- Stellen Sie die Diskrete Fourier Transformation des Signales dar (Math Menu \rightarrow Operation \rightarrow FFT)
- Ausdrucken der Zeitverläufe für zwei verschiedene Geschwindigkeiten (z.B. 5 km/h und 25 km/h) bei gleicher Zeitskala
- Vergleichen Sie die Effektivwerte, die mit dem Oszilloskop gemessen wurden, mit den Messwerten des Multimeters

Ersatzschaltbild (ESB) der Spule des Fahrraddynamos

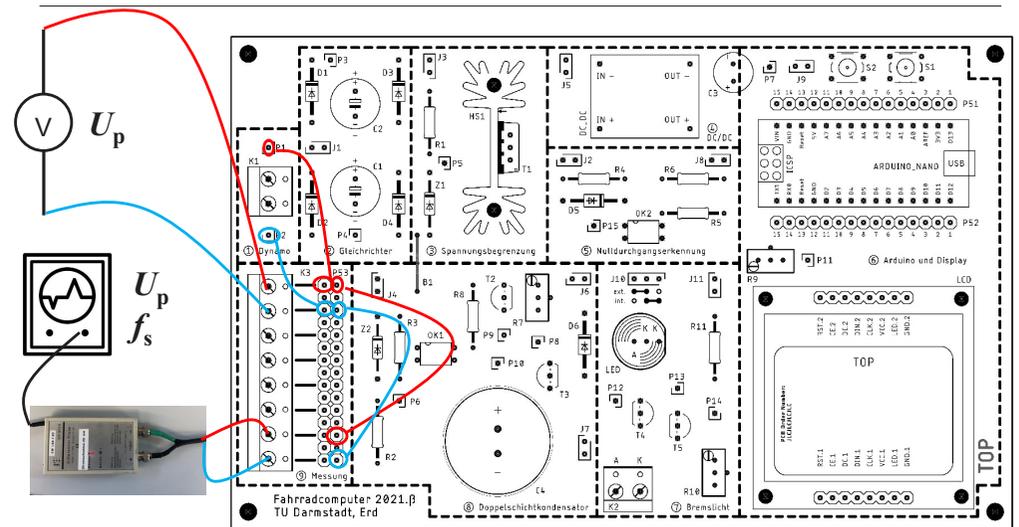
- Vereinfachung: Ersatzschaltbild für die Spannungs-Grundschwungung U_s
- Der Generator erzeugt im Leerlauf (stromlos) als Grundschwungung eine Wechselfspannung \underline{U}_p , deren Frequenz f_s und Amplitude bzw. Effektivwert U_p proportional zur Drehzahl n sind.
- ESB: Ideale Spannungsquelle \underline{U}_p und komplexen Spulenimpedanz $\underline{Z}_i = R_i + j\omega_s L_i$

$$\omega_s = 2\pi \cdot f_s$$

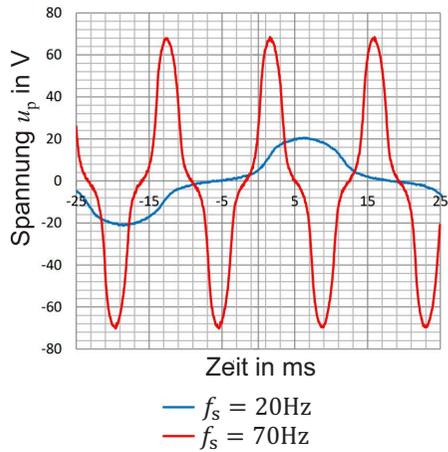
R_i : Spulenwiderstand
 L_i : Spulenselbstinduktivität



Versuch 1: Messung der Leerlaufspannung



Versuch 1: Ergebnisse - Zeitverläufe

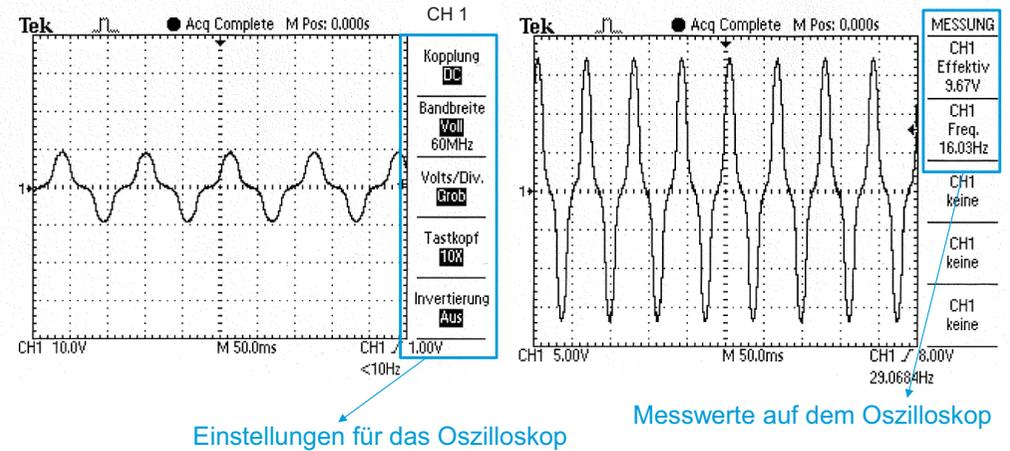


- Die Amplitude der Spannung u_p ist proportional zur Drehzahl n .
- Die Frequenz f_s der Spannung u_p ist proportional zur Drehzahl n .
- Das periodische Spannungssignal u_p lässt sich nach *Fourier* in sinusförmige Schwingungen zerlegen: Man erkennt deutlich, dass es sich nicht um eine reine Grundschwingung mit f_s handelt, sondern noch Oberschwingungen hinzukommen (vor allem eine „Dritte“ mit $3 \cdot f_s$)
- Im Folgenden wird nur die Grundschwingung betrachtet!

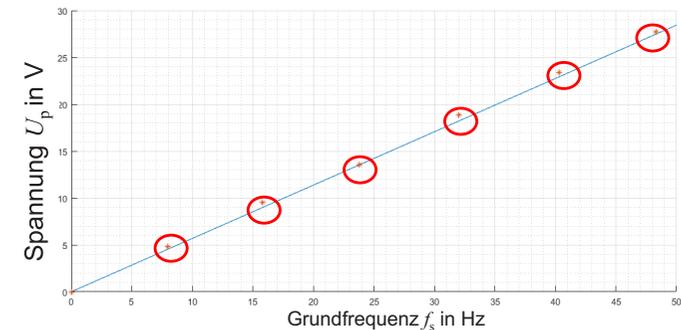
Versuch 1: Ergebnisse

angezeigte Geschwindigkeit v_{umr} in km/h (Schätzwert)	5	10	15	20	25	30
Oszilloskop: Gemessene Grundfrequenz f_s in Hz	8.0	15.8	23.8	32.1	40.3	48.3
Oszilloskop: Gemessener Effektivwert U_p in V	4.8	9.7	13.6	18.8	22.4	27.5
Multimeter: Gemessener Effektivwert U_p in V	4.6	9.1	13.5	18.4	22.2	27.4

Versuch 1: Einstellungen für das Oszilloskop



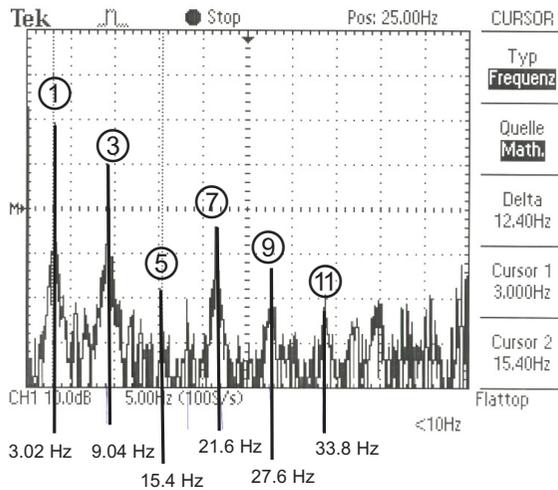
Versuch 1: Effektivwert U_p und Frequenz f_s der Grundschwingung der Leerlaufspannung



- Der Zusammenhang zwischen der Spannung und der Frequenz ist linear: $U_p = \omega_s \psi_{\text{pm}} / \sqrt{2}$
 $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$
- Die magnetische Statorspulen-Flussverkeftung ψ_{pm} des Dynamos mit den PM ist konstant: $\psi_{\text{pm}} = 128 \text{ mVs}$ (Scheitelwert)
- Bei niedrigen Frequenzen kann das Multimeter den Effektivwert und die Frequenz nicht genau messen, da der Speicherplatz nicht ausreicht um eine ganze Periode zu erfassen.

Versuch 1:

Ergebnisse – Diskrete Fourier Transformation (DFT)

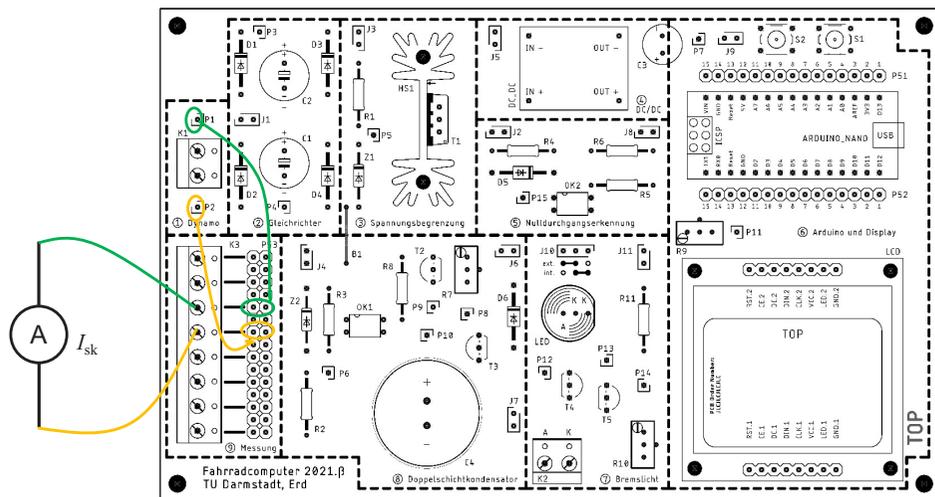


Fourier-Transformation des Spannungssignales

- Das periodische Spannungssignal besteht aus verschiedenen harmonischen Beiträgen
- Besonders die Amplituden der dritten $\textcircled{3}$ (9.04 Hz) und siebten $\textcircled{7}$ (21.6 Hz) Oberschwingungen sind relevant

Versuch 2:

Kurzschlussstrommessung der Spule



Versuch 2:

Kurzschlussstrommessung mit dem Multimeter

Vorbereitung:

- Das Oszilloskop muss entfernt werden! Der Fahrraddynamo wird mit einem Multimeter kurzgeschlossen und der Kurzschlussstrom gemessen.

Messung des Kurzschlussstroms des Dynamos bei verschiedenen Geschwindigkeiten v_{umr} :

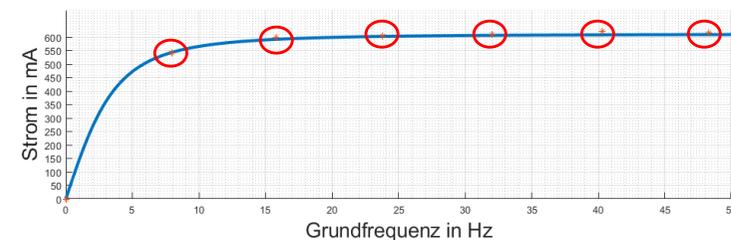
- Messen Sie den Strom bei den gleichen geschätzten Geschwindigkeiten wie beim Versuch 1
- $v_{\text{umr}} = 5 \text{ km/h}, 10 \text{ km/h}, 15 \text{ km/h}, 20 \text{ km/h}, 25 \text{ km/h}, 30 \text{ km/h}$

Berechnung:

- Berechnen Sie die Induktivität L_i durch Strom- und Spannungsmessung bei einer „hohen“ Frequenz. Bsp.: $f_s = 48.31 \text{ Hz}$ ($v_{\text{umr}} = 30 \text{ km/h}$) (Hinweis: $R_i \ll \omega_s L_i$: Vernachlässigen Sie den Widerstand R_i !)
- Berechnen Sie den Widerstand R_i durch Strom- und Spannungsmessung bei einer „kleinen“ Frequenz. Bsp.: $f_s = 7.96 \text{ Hz}$ (5 km/h), verwenden Sie das eben berechnete L_i .

Versuch 2:

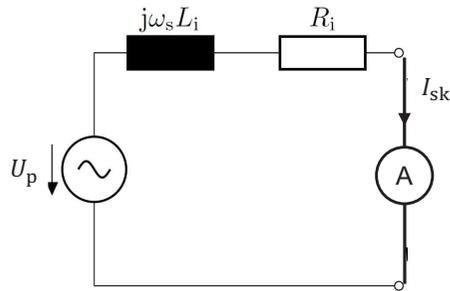
Effektivwert des gemessenen Stromes im Kurzschluss der Spule



- Der Kurzschlussstrom I_{sk} steigt zu Beginn steil an und flacht dann ab ca. $f_s = 10 \text{ Hz}$ ab.
- Er erreicht eine Maximalhöhe von 609 mA.

am Umrichter angezeigte Geschwindigkeit v_{umr} in km/h	5	10	15	20	25	30
Gemessene Grundfrequenz in Hz (aus dem Leerlaufversuch übernommen)	7.96	15.82	23.81	32.05	40.32	48.31
Effektivwert des Stroms I_{sk} in mA	549	598	604	606	608	609

Versuch 2: Ersatzschaltbild der Kurzschlussmessung

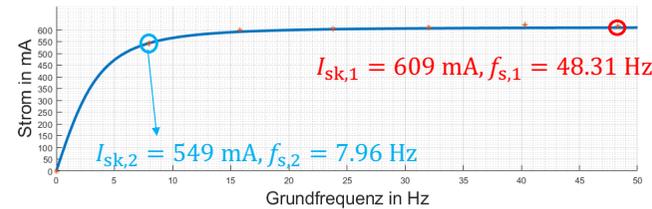


- Für den Kurzschlussstrom gilt:

$$I_{sk} = \frac{U_p}{\sqrt{R_i^2 + (\omega_s L_i)^2}}$$

- U_p ist linear frequenzabhängig
- Bei niedrigen Frequenzen muss wegen $\omega_s L_i \approx R_i$ der Widerstand beachtet werden.
- Bei höheren Frequenzen gilt $\omega_s L_i \gg R_i$.

Versuch 2: Bestimmung der Spulenimpedanz Z_i der Spule als Spannungsquelle



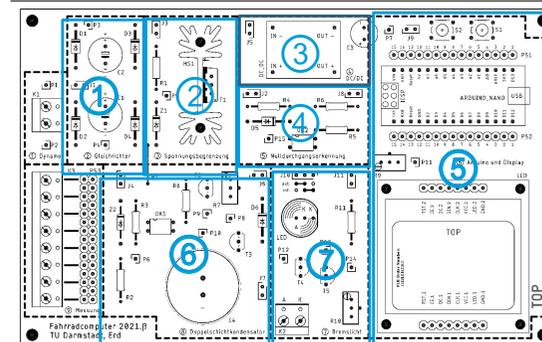
Bei hoher Drehzahl gilt:
 $|I_{sk}| \approx \frac{U_p}{\sqrt{(\omega_s L_i)^2}} \approx \frac{\psi_{pm}}{L_i} = \text{const.}$

Beispiel:
 L_i bei $f_{s,1} = 48.31$ Hz aus dem vorherigen Leerlauf-Versuch ($v_{umr,1} = 30$ km/h):
 $\rightarrow L_i \approx \frac{U_{p,1}}{2\pi \cdot f_{s,1} \cdot I_{sk,1}} = 148.92$ mH

- Bestimmung von R_i aus L_i und Leerlauf- und Kurzschlussmessung bei geringer Frequenz
- Leerlaufversuch ($v_{umr,2} = 5$ km/h): $f_{s,2} = 7.96$ Hz; $U_{p,2} = 4.58$ V
- Kurzschlussversuch: $f_{s,2} = 7.96$ Hz; $I_{sk,2} = 549$ mA

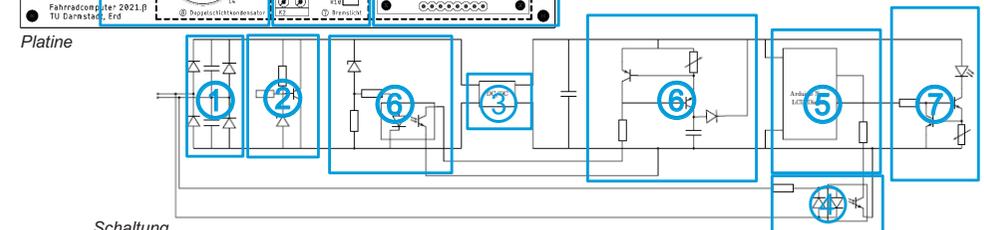
$$R_i = \sqrt{\left(\frac{U_{p,2}}{I_{sk,2}}\right)^2 - (2\pi \cdot f_{s,2} \cdot L_i)^2} \approx 3.76 \Omega$$

Modularer Aufbau des Fahrradcomputers



- Gleichrichter
- Spannungsbegrenzung
- DC/DC-Wandler
- Nulldurchgangserkennung
- Mikrocontroller und Display
- Doppelschichtkondensator
- Bremslicht

Platine



Schaltung

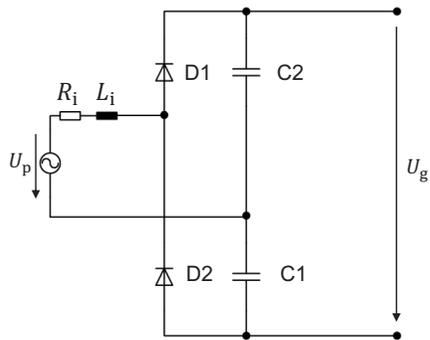
MODULE DES FAHRRADCOMPUTERS

MODUL 1: GLEICHRICHTER

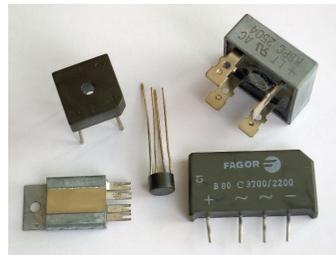
Gleichrichter: Auswahl Gleichrichterschaltung

Anforderungen:

- DC-Versorgung für Elektronik erfordert Gleichrichtung von $u_s \rightarrow$ Gleichrichter
- Ausreichend hohe DC-Versorgung (5 V) bei geringer Drehzahl erforderlich \rightarrow Spannungserhöhung nötig, z. B.: durch die *Delon*-Schaltung

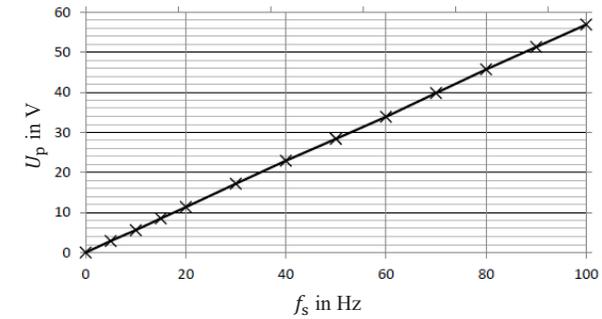


Delon-Gleichrichter



Unterschiedliche Vollbrücken-Gleichrichter-Module [7]

Gleichrichter: Anforderungen



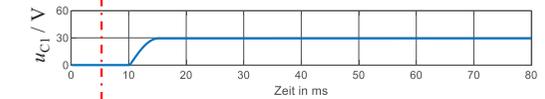
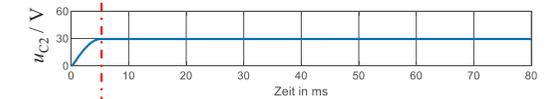
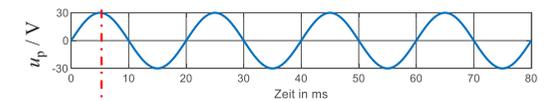
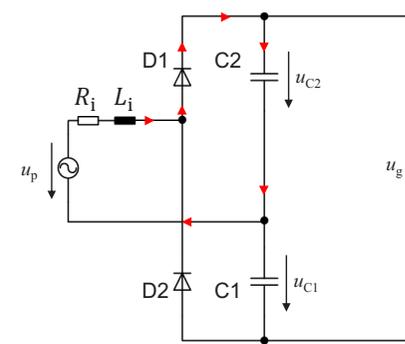
[11]

Leerlaufspannung U_p ist linear abhängig von Frequenz f_s .

Welche Anforderung muss die Spannungsversorgung erfüllen?

Gleichrichter: Funktionsweise der *Delon*-Schaltung (I)

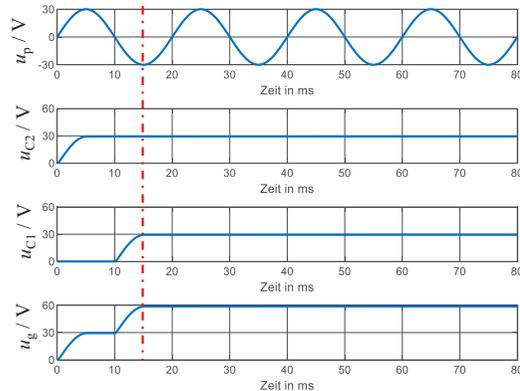
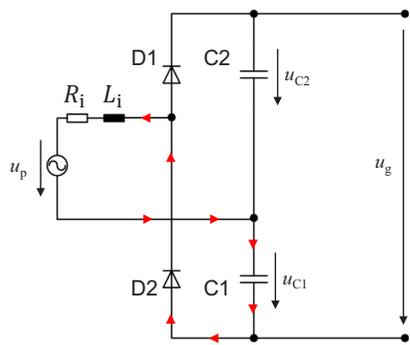
Delon-Schaltung: Verdopplung und Gleichrichtung der Spannung



Gleichrichtung bei positiver Halbschwingung

Gleichrichter: Funktionsweise der *Delon*-Schaltung (I)

Delon-Schaltung: Verdopplung und Gleichrichtung der Spannung

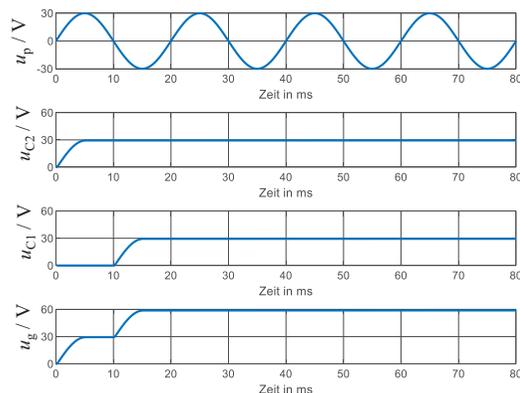
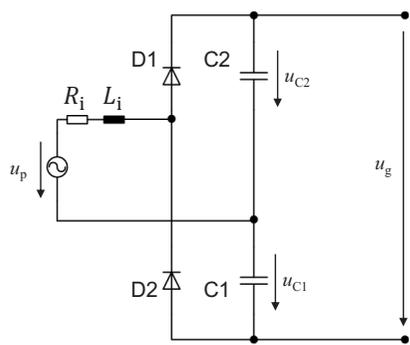


Gleichrichtung bei negativer Halbschwingung

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 61

Simulation 1: *Delon*-Gleichrichter Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die *Delon*-Schaltung die Dynamo-Ausgangsspannung U_s gleichrichtet und verdoppelt!



12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 63

Simulation 1: *Delon*-Gleichrichter Aufgabenstellung

- Untersuchung der Gleichrichtung der *Delon*-Schaltung mit Simulation
- Verwendung des Online-Simulationstools Falstad.com → Datei: „Delon-Schaltung.txt“
- Beobachten Sie die Spannung über beide Kondensatoren C_1 und C_2 sowie die resultierende Gesamtspannung!
- (Hinweis, um ein Oszilloskop in der Simulation hinzuzufügen: Rechts Drücken auf das gewünschte Bauteil → View in New Scope)
- Auf der rechten Fensterseite sind zwei Schieberegler für die Amplitude und Frequenz der Polradspannung des Dynamos untergebracht. Verschieben Sie von Frequenz 0 Hz beginnend die Regler langsam hoch (Beschleunigungsvorgang). Achten Sie darauf, dass beide Schieberegler stets die gleiche horizontale Position haben (frequenzproportionale Polradspannung)!

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 62

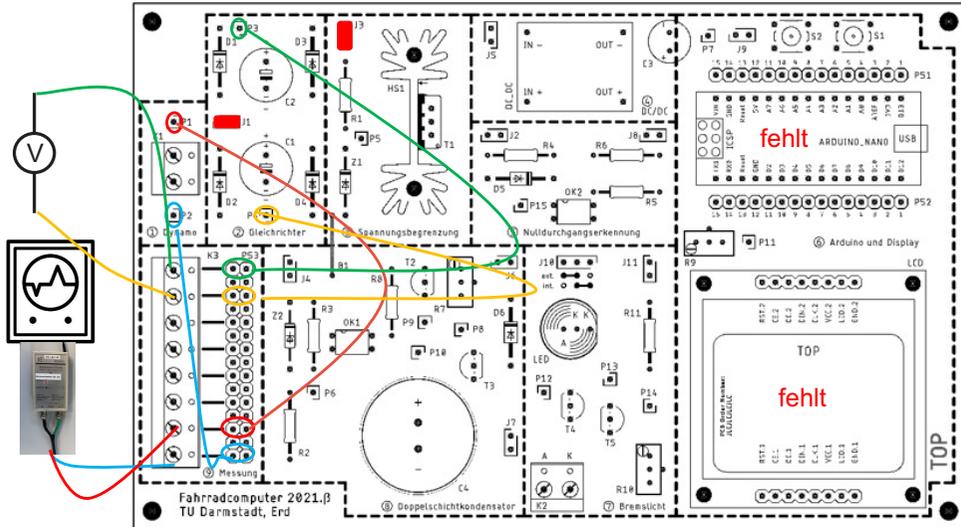
Versuch 1: Gleichrichter *Delon*-Schaltung

- Setzen der Jumper J1 und J3 (Spannungsbegrenzung aus Sicherheitsgründen)
- Verbinden Sie ein Oszilloskop zwischen P1 und P2, um die Dynamospannung U_s (Effektivwert) und $U_{s,pp}$ (Spitze-zu-Spitze-Wert) und deren Frequenz f_s zu erfassen!
- Verbinden Sie ein Multimeter zwischen P3 und P4, um die Ausgangsgleichspannung U_g der *Delon*-Schaltung zu erfassen!
- **Beachten Sie, dass bei dieser Untersuchung die Beleuchtung des Fahrrads ausgeschaltet ist!**
- Erhöhen Sie langsam die Geschwindigkeit des Dynamos und protokollieren Sie die gemessenen Spannungen und die gemessene Frequenz. Was fällt Ihnen auf?
- **Hochfahren des Dynamos maximal auf $v_{umr} = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, sonst Spannungsbegrenzung!**
- **Hochfahren des Ausgangsspannung an P3 und P4 nur auf 15 V, sonst Spannungsbegrenzung!**

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 64

Versuch 1: Gleichrichter

Versuchsaufbau



Versuch 1: Gleichrichter

Messwerte und berechnete Werte

f_s / Hz	0.0	2.1	4.1	6.2	8.1
U_s / V	0.0	1.2	2.4	3.7	4.8
$U_{s,pp} / \text{V}$	0.0	4.5	8.5	12.4	16.8
U_g / V	0.0	3.5	7.8	11.7	14.7
$v / (\text{km/h})$	0.0	1.3	2.5	3.8	5.0
U_p / V	0.0	1.2	2.3	3.5	4.6
$2\sqrt{2} \cdot U_p / \text{V}$	0.0	3.4	6.6	10.0	13.0

Messwerte

berechnete Werte

$$v = 2\pi \cdot r_{\text{rad}} \cdot f_s = 2\pi \cdot 0.355 \cdot \frac{f_s}{\text{Hz}} \cdot 3.6 \text{ km/h}$$

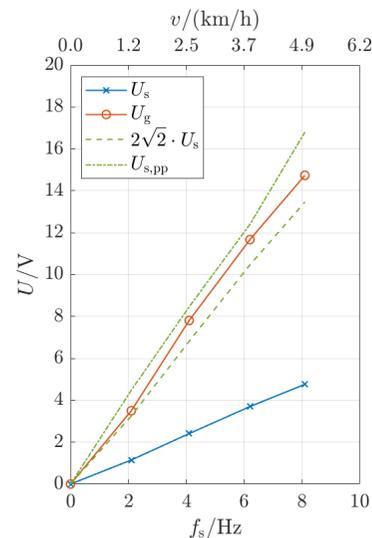
$$U_p = \sqrt{2}\pi \cdot \psi_{\text{pm}} \cdot f_s = \sqrt{2}\pi \cdot 0.128 \text{ V} \cdot \frac{f_s}{\text{Hz}}$$

Berechnung:
s. Abschnitt „Dynamo“

Versuch 1: Gleichrichter

Messergebnisse und Auswertung

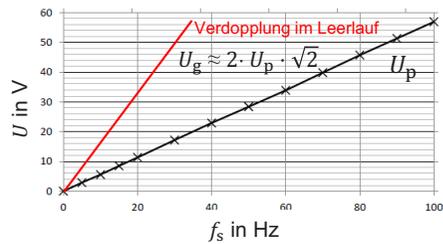
- Die Abb. zeigt die gemessene Dynamospannung als Effektivwert U_s und Spitze-Spitze-Wert $U_{s,pp}$, die Gleichrichter-Ausgangsspannung U_g der Delon-Schaltung und die berechnete Gleichspannung $2\sqrt{2} \cdot U_s$
- Alle betrachteten Spannungen verhalten sich proportional zur Geschwindigkeit, da sie proportional zur Polradspannung sind.
- Die Spannung U_g ist gegenüber U_s durch die Delon-Schaltung gleichgerichtet (Faktor $\sqrt{2}$) und verdoppelt (Faktor 2)
- Daher wird eine Ausgangsspannung i. H. v. $2\sqrt{2}U_s$ erwartet. Aufgrund des nicht nichtsinusförmigen Verlaufs der Dynamospannung liegt die U_g aber höher!
- Die Spannung U_g liegt zwischen $2\sqrt{2}U_s$ und $U_{s,pp}$
- Eine ausreichend hohe Spannung für die Versorgung des μC ist bereits bei geringer Geschwindigkeit erreicht. Allerdings werden bei hohen Geschwindigkeiten Spannungshöhen erreicht, die problematisch für die Elektronik sind.
→ Spannungsbegrenzung ist notwendig.



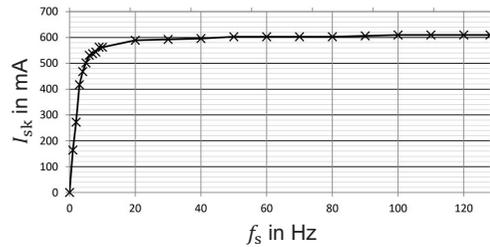
MODUL 2: SPANNUNGSBEGRENZUNG

Spannungsbegrenzung: Betriebsverhalten des Dynamos

Leerlaufspannungs-Kennlinie:



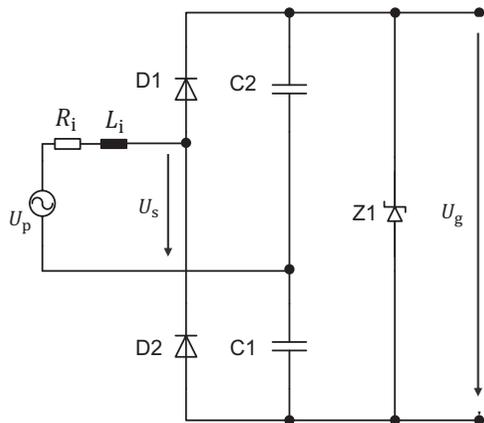
Kurzschlussstrom-Kennlinie:



- Verdopplung der Spannung von Naben-Dynamo durch *Delon*-Schaltung (Starten des Fahrradcomputers schon bei kleinem v)
- **Problem:** Ab ca. 10 km/h wird die maximale Eingangsspannung des DC/DC-Wandlers (28 V) bei Leerlauf überschritten!
- Bei eingeschalteter Beleuchtung („Last“) tritt das Problem nicht auf: Der Laststrom führt zu einem Spannungsfall über die Dynamo-Innenimpedanz
- **Abhilfe bei Leerlauf:** Spannungsbegrenzung durch *Zener*-Diode

Spannungsbegrenzung: Parallele Spannungsbegrenzung

- Parallele Begrenzung der Spannung U_g auf 15 V ... 16 V
- Schutz des nachfolgenden DC/DC-Wandlers vor zu hoher Spannung



Prinzip:

- Bei Erreichen der Durchbruchspannung U_Z der *Zener*-Diode wird diese leitfähig und erhöht den Statorstrom I_s . Dies führt über der Innenimpedanz des Dynamos zu einem zusätzlichen Spannungsfall und begrenzt die Statorspannung U_s .
- Für hohe Geschwindigkeiten:
 - $Z_i = R_i + j\omega_s L_i \approx j\omega_s L_i$;
 - $U_p = \omega_s \psi_{PM} / \sqrt{2}$
- Maximaler Kurzschlussstrom steigt nicht mit Geschwindigkeit an
 - $I_{sk,max} \sim \frac{\psi_{PM}}{L_i} = \text{const.}$

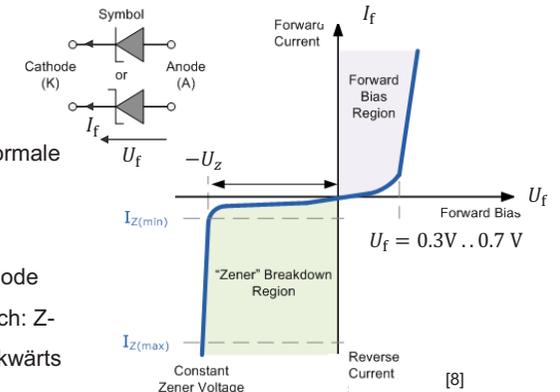
Spannungsbegrenzung durch *Zener*-Diode

Spannungsbegrenzung nötig durch Z-Diode:

- Schutz der nachgeschalteten Bauteile, wie DC/DC-Wandler und Arduino-Controller
- Daher: Begrenzung der Ausgangsspannung des *Delon*-Gleichrichters U_g mit *Zener*-Diode

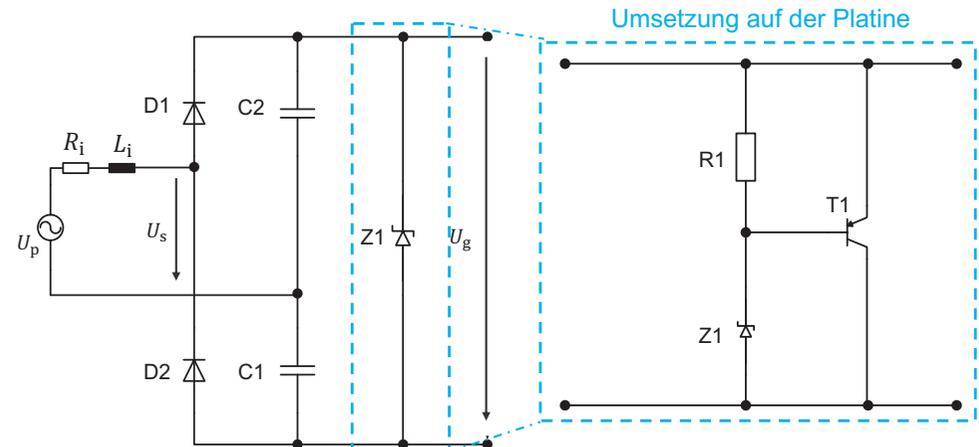
Funktionsweise der Z-Diode

- Verhalten in Durchlassrichtung wie normale Diode
- Unterschied in Sperrrichtung:
 - $|U_f| < |U_Z| \rightarrow$ Sperrt wie normale Diode
 - $|U_f| > |U_Z| \rightarrow$ Reversibler Durchbruch: *Z*-Diode niederohmig, Diode leitet rückwärts



Spannungsbegrenzung: Parallel Spannungsbegrenzung

Aufbau der *Zener*-Diode Z1 mit leistungsschwacher *Zener*-Diode Z1 und Bipolar-Transistor T1 aus Kostengründen

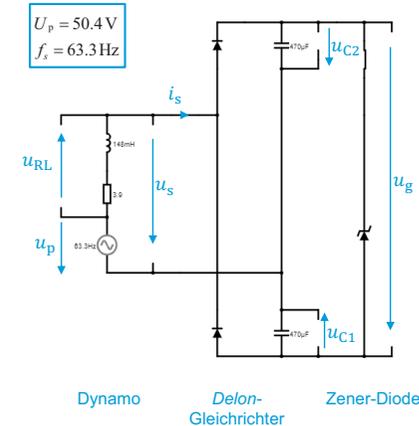


Simulation 1: Untersuchung der Spannungsbegrenzung

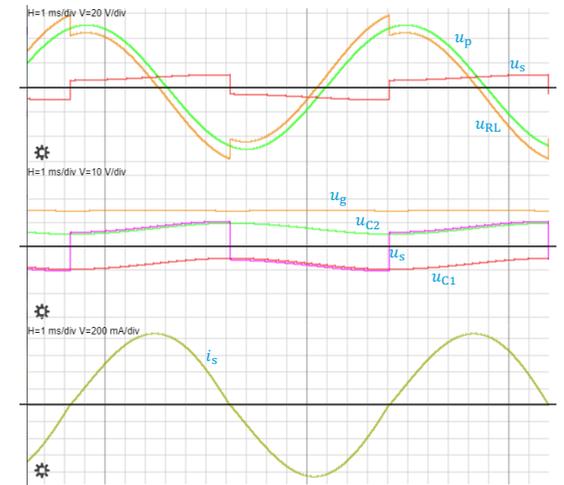
- Verwendung des Online-Simulationstools Falstad.com
→ Datei: „Delon_Schaltung_mit_Zener_3.txt“
- **Simulation für den eingestellten Betriebspunkt** mit: $U_p = 50.4\text{ V}$ und $f_s = 63.3\text{ Hz}$
 - Wie funktioniert die Spannungsbegrenzung?
 - Welche Rolle spielt der Statorstrom und der Spannungsfall über der Innenimpedanz des Dynamos?
 - Auf welche Sperrspannung müssen die Gleichrichterdioden bemessen werden?
- **Simulation für variable Drehzahl:**
 - Auf der rechten Fensterseite sind zwei Schieberegler für die Amplitude und Frequenz der Polradspannung des Dynamos untergebracht. Verschieben Sie von Frequenz 0 Hz beginnend die Regler langsam hoch (Beschleunigungsvorgang). Achten Sie darauf, dass beide Schieberegler stets die gleiche horizontale Position haben (frequenzproportionale Polradspannung)!
 - Ab welcher Frequenz wird die Spannungsbegrenzung aktiv?
 - Welche max. gleichgerichtete Spannung stellt sich ein?

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 73

Simulation 1: Simulationsergebnisse



Simulations-Schaltkreis (Falstad)

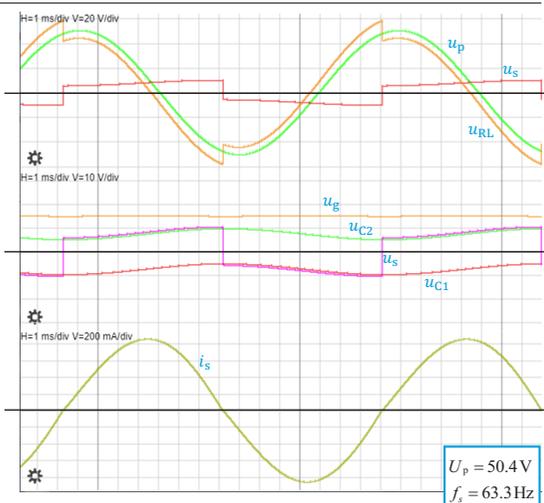


Simulations-Ergebnisse (Falstad)

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 74

Simulation 1: Auswertung der Simulationsergebnisse

- **Delon-Schaltung:** Verdopplung und Gleichrichtung von u_g bezogen auf u_s
- **Zener-Diode:** Begrenzung von u_g auf ca. 15 V (ab ca. $f_s = 10\text{ Hz}$ und $U_p = 5.6\text{ V}$)
- u_s annähernd Rechtecksignal und abschnittsweise gleich der Kondensatorspannungen u_{C1} und u_{C2}
- i_s annähernd sinusförmig und Nulldurchgänge bestimmen die Schaltflanken in u_s
- Spannung u_{RL} an der **Dynamo-Innenimpedanz** bewirkt Spannungsbegrenzung durch Laststrom i_s



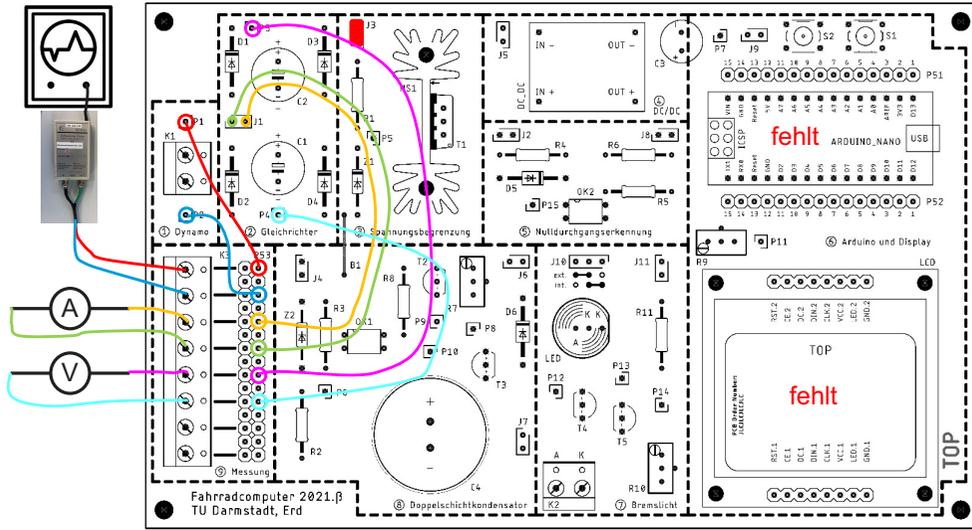
Simulations-Ergebnisse (Falstad)

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 75

Versuch 1: Spannungsbegrenzung Versuchsbeschreibung

- Setzen des Jumpers J3
- Ersetzen des Jumpers J1 durch ein Amperemeter und messen von I_s
- Verbinden Sie das Oszilloskop über einen Differenzverstärker mit P1 und P2, um die Dynamospannung U_s (RMS-Wert) sowie die Statorfrequenz f_s zu messen!
- Messung der Ausgangsspannung U_g zwischen J5 und P4 mit Multimeter.
- Erhöhen Sie langsam die Geschwindigkeit des Dynamo und protokollieren Sie die gemessenen Größen!
- Bei dieser Untersuchung ist die Beleuchtung des Fahrrads ausgeschaltet!
- Überfahren Sie vorsichtig/langsam den Bereich von 15 km/h! Was stellen Sie fest?
- Warnung: Stoppen Sie den Versuch, falls die Spannung U_g 17 V überschreitet.

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 76



f_s / Hz	0.0	2.1	4.1	6.2	8.1	9.8	11.8	15.1	20.2	24.9	30.5	35.1	Messung
U_s / V	0.0	1.2	2.4	3.7	4.8	5.7	6.4	7.3	8.1	8.7	8.9	8.9	
I_s / mA	0	0	0	0	1	19	62	161	440	520	550	560	
U_g / V	0.0	3.5	7.8	11.7	14.7	15.2	15.5	15.7	15.9	15.9	16.0	16.0	
v / (km/h)	0.0	1.3	2.5	3.8	5.0	6.1	7.3	9.3	12.5	15.4	18.8	21.7	Rechnung
U_p / V	0.0	1.2	2.3	3.5	4.6	5.6	6.7	8.6	11.5	14.2	17.3	20.0	
$2\sqrt{2} \cdot U_p$ / V	0.0	3.4	6.6	10.0	13.0	15.8	19.0	24.3	32.5	40.1	49.1	56.5	

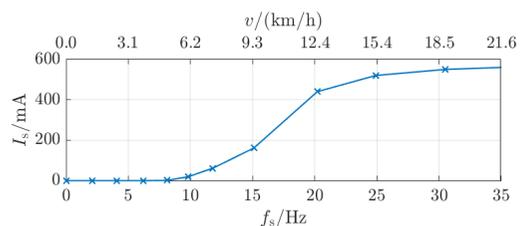
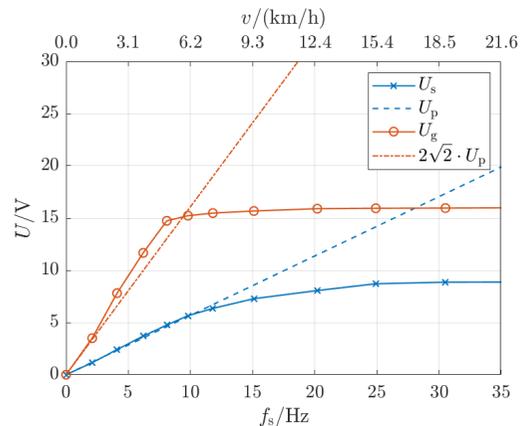
$$v = 2\pi \cdot r_{\text{rad}} \cdot f_s = 2\pi \cdot 0.355 \cdot \frac{f_s}{\text{Hz}} \cdot 3.6 \text{ km/h}$$

$$U_p = \sqrt{2}\pi \cdot \psi_{\text{pm}} \cdot f_s = \sqrt{2}\pi \cdot 0.128 \text{ V} \cdot \frac{f_s}{\text{Hz}}$$

Berechnung:
s. Abschnitt „Dynamo“

Versuch 1: Auswertung

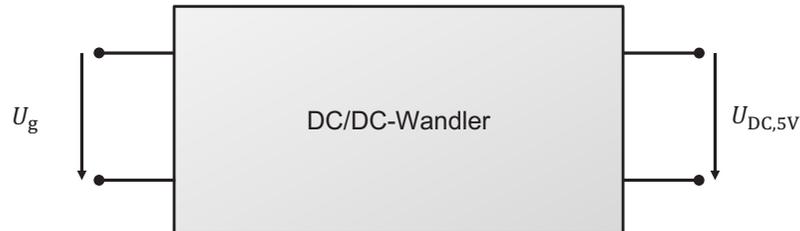
- Ab ca. 8 Hz (5 km/h) setzt die **Spannungsbegrenzung** ein: U_g ist selbst bei steigender Frequenz f_s auf ca. 16 V begrenzt.
- Der Ableitstrom durch die Zenerdiode bedingt einen Statorstrom I_s , der über die **Innenimpedanz** des Dynamos den zur Spannungsbegrenzung notwendigen Spannungsfall erzeugt. Für hohe Frequenzen nähert sich der Statorstrom I_s dem Kurzschlussstrom an.
- Durch die Spannungsbegrenzung werden sowohl die Statorspannung U_s als auch die gleichgerichtete Spannung U_g begrenzt und steigen nicht, wie im Leerlauf streng proportional mit der Frequenz (U_p und $2\sqrt{2} \cdot U_p$), an.



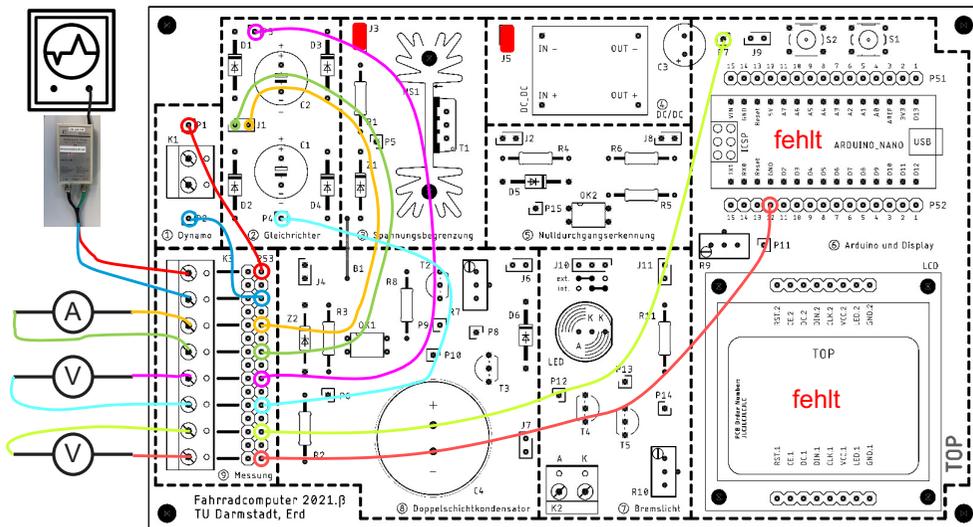
MODUL 3: DC/DC-WANDLER

Aufgabe:

- Erzeugung konstanter Gleichspannung $U_{DC,5V} = 5\text{ V}$ für die Versorgung des Arduino-Controllers und des Displays unabhängig von Geschwindigkeit v .
- Wandlertyp: Geregelter DC-DC-Abwärtswandler (*step-down converter*), um hohes U_g auf niedrigeres $U_{DC,5V}$ zu wandeln!
- Variable Eingangsspannung des DC-DC-Wandlers wegen variablem v : $U_g \approx 6\text{ V} \dots 16\text{ V}$



- Setzen der Jumper J3 und J5
- Verbinden Sie das Oszilloskop über einem Differenzverstärker mit P1 und P2, um die effektive Dynamospannung U_s und Statorfrequenz f_s zu messen!
- Fügen Sie bei J1 ein Multimeter ein, um den Effektivwert des Stromes I_s zu messen.
- Verbinden Sie ein Voltmeter zwischen P2 und P4, um die Eingangsspannung U_g des DC/DC-Wandlers zu messen!
- Verbinden Sie ein Voltmeter zwischen P7 und P4, um die Ausgangsspannung $U_{DC,5V}$ des DC/DC-Wandlers zu erfassen!
- Beachten Sie, dass bei dieser Untersuchung die Beleuchtung ausgeschaltet ist!
- Erhöhen Sie langsam die Geschwindigkeit des Dynamos und erfassen Sie die jeweiligen Spannungen schrittweise!
- Zeichnen Sie U_s , U_g und $U_{DC,5V}$ gemeinsam mit der errechneten Polradspannung U_p über f_s . Zeichnen Sie I_s über f_s .



f_s / Hz	0.0	2.1	4.1	6.2	8.1	9.8	11.8	15.1	20.2	24.9	30.5	35.1	Messung
U_s / V	0.0	1.2	2.4	3.7	4.8	5.7	6.4	7.3	8.1	8.7	8.9	8.9	
I_s / mA	0	0	0	0	1	19	62	161	440	520	550	560	
U_g / V	0.0	3.5	7.8	11.7	14.7	15.2	15.5	15.7	15.9	15.9	16.0	16.0	
$U_{DC,5V} / \text{V}$	0.0	1.8	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	
$v / (\text{km/h})$	0.0	1.3	2.5	3.8	5.0	6.1	7.3	9.3	12.5	15.4	18.8	21.7	Rechnung
U_p / V	0.0	1.2	2.3	3.5	4.6	5.6	6.7	8.6	11.5	14.2	17.3	20.0	
$2\sqrt{2} \cdot U_p / \text{V}$	0.0	3.4	6.6	10.0	13.0	15.8	19.0	24.3	32.5	40.1	49.1	56.5	

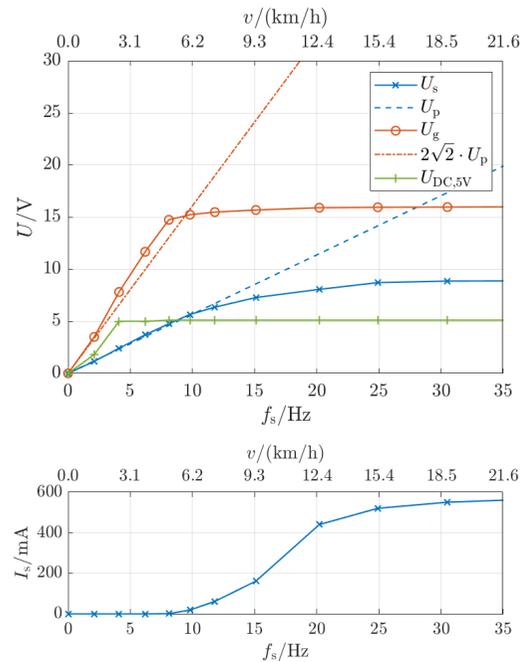
$$v = 2\pi \cdot r_{\text{rad}} \cdot f_s = 2\pi \cdot 0.355 \cdot \frac{f_s}{\text{Hz}} \cdot 3.6 \text{ km/h}$$

$$U_p = \sqrt{2}\pi \cdot \psi_{\text{pm}} \cdot f_s = \sqrt{2}\pi \cdot 0.128 \text{ V} \cdot \frac{f_s}{\text{Hz}}$$

Berechnung:
s. Abschnitt „Dynamo“

Versuch 1: Auswertung

- Die DC-Versorgungsspannung $U_{DC,5V}$ von 5 V für den Mikrocontroller steht ab einer Frequenz von 4 Hz aufgrund der Spannungsverdopplung bereit. Die Geschwindigkeit beträgt dabei $v = 2,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. U_s beträgt an diesem Punkt gerade einmal 2.4 V!
- Durch die Spannungsbegrenzung bleibt die DC-Versorgungsspannung $U_{DC,5V}$ auch bei höheren Geschwindigkeiten konstant (s. Modul „Spannungsbegrenzung“).



12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 85

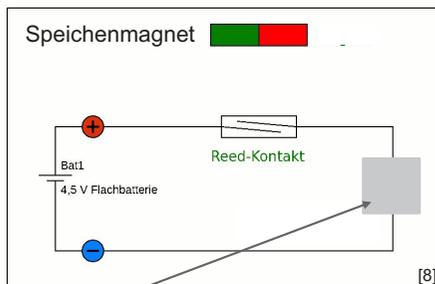
Drehzahl-Messprinzip bei den meisten kommerziellen Fahrradcomputern



- Herkömmliche Fahrradcomputer verwenden zur n -Messung einen Sensor: a) + b):
 - a) Reed-Kontakt (schließt bei Anwesenheit eines Magnetfelds)
 - b) Magnet an Speiche erzeugt dieses Feld
- Sehr kostengünstig
- zusätzliche Sensorik und Verkabelung nötig



Je Radumdrehung wird der Reed-Kontakt beim Vorbeibewegen des Speichenmagnets einmal kurz geschlossen, was als Impuls zum Zählen verwendet wird! [9]



Auswerteelektronik (Fahradcomputer)

n -Messung ohne Sensor möglich?

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 87

MODUL 4: NULLDURCHGANGSERKENNUNG

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 86

Nulldurchgangserkennung Drehzahlmessung ohne weiteren Sensor

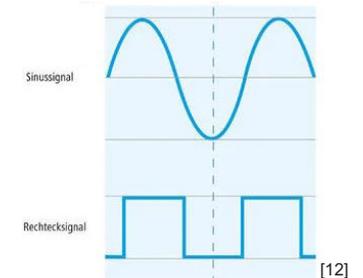


Idee 1: Spannungsmessung

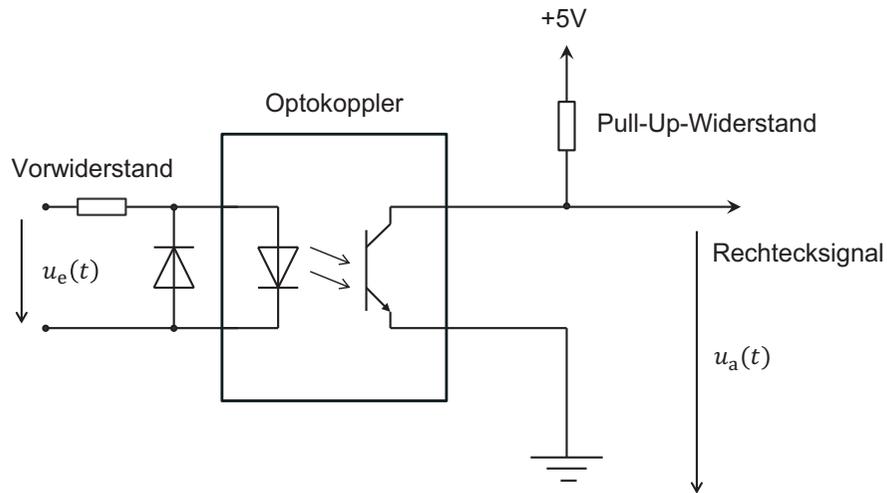
- Leerlaufspannung U_p proportional zur Geschwindigkeit
- ABER: Da Verbraucher/ Spannungsbegrenzung vorhanden $\rightarrow U_s \neq U_p$ wegen Stromfluss: U_s nicht mehr linear mit v
- Spannungsmessung U_s nicht geeignet

Idee 2: Frequenzmessung

- Statorfrequenz f_s ist streng proportional zur Drehzahl n unabhängig vom Stromfluss
- Messung der Statorfrequenz durch Nulldurchgangserkennung der Spannung U_s
- Messung der Zeit T zwischen benachbarten Nulldurchgangsgängen liefert $n \sim 1/T$

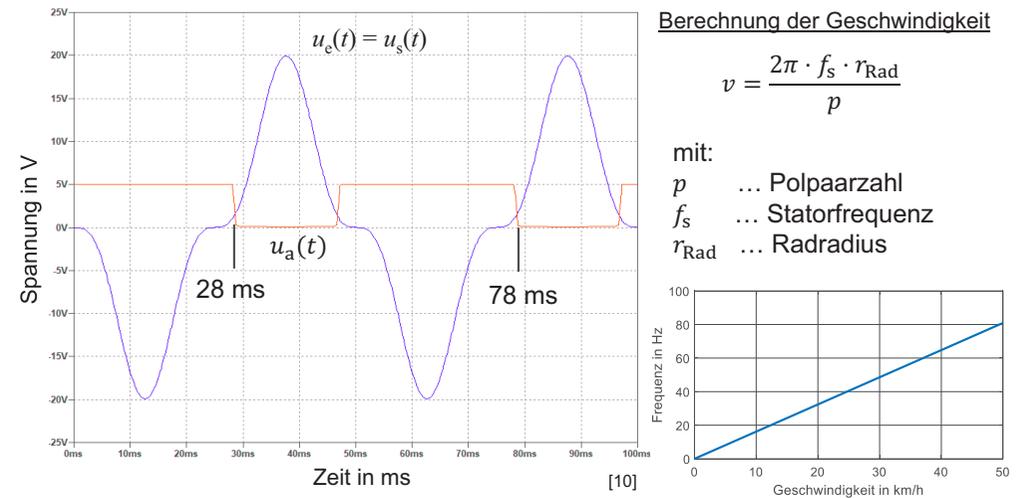


12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 88



$$u_e(t) = u_s(t)$$

[10]

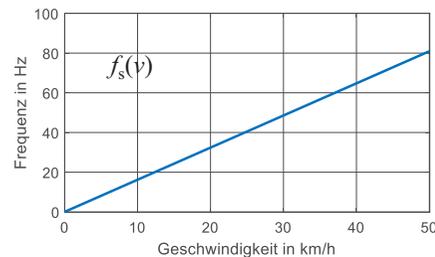


Nulldurchgangserkennung

Berechnung der Geschwindigkeit:

$$v = \frac{2\pi \cdot r_{\text{Rad}} \cdot f_s}{p}$$

mit: $p = 13$ und $r_{\text{Rad}} = 355 \text{ mm}$



Beispiel der Zeitmessung aus vorheriger Abbildung:

$$T_s = 78 \text{ ms} - 28 \text{ ms} = 50 \text{ ms}$$

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{50 \text{ ms}} = 20 \text{ Hz}$$

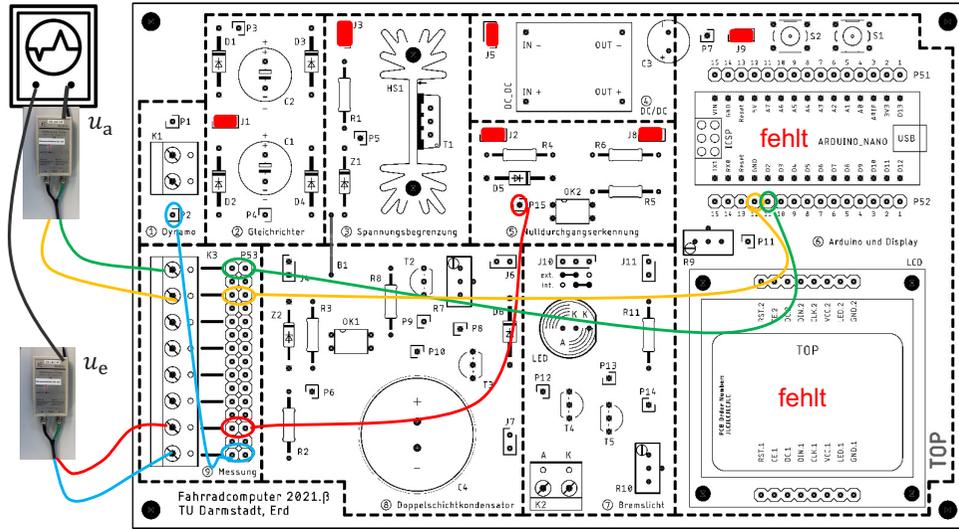
$$v = \frac{2\pi \cdot 355 \text{ mm} \cdot 20 \text{ Hz}}{13} = 3,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 12,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Versuch 1:

Untersuchung der Nulldurchgangserkennung

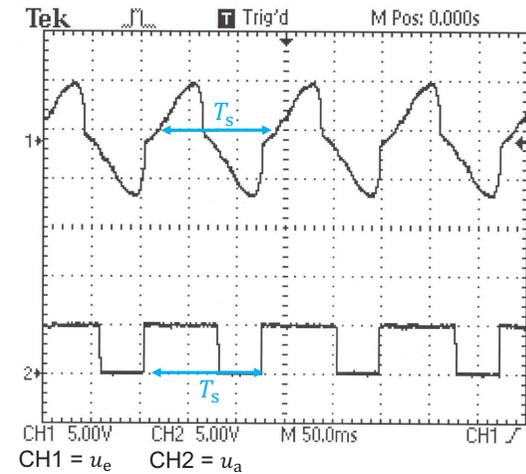
- Setzen der Jumper J1, J2, J3, J5, J8 und J9
- Verbinden Sie das Oszilloskop mit einem Differenzverstärker zwischen P1 und P2, um die Optokoppler-Eingangsspannung $u_e = u_s$ zu erfassen!
- Verbinden Sie das Oszilloskop zwischen P52:11 und P52:12 am Arduino-Controller, um die Optokoppler-Ausgangsspannung u_a zu erfassen!
- Protokollieren Sie die gemessenen Spannungen, während Sie schrittweise die Geschwindigkeit am Umrichter von 0 um 5 km/h auf 30 km/h erhöhen.
- **Beachten Sie, dass bei dieser Untersuchung die Beleuchtung des Fahrrads eingeschaltet ist! (Verlauf der Dynamospannung ist sinusförmiger)**

Versuch 1: Untersuchung der Nulldurchgangserkennung



12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 93

Versuch 1: Ergebnisse der Nulldurchgangserkennung



- Direkte Messung von u_s nicht möglich, denn Potentialtrennung über Optokoppler notwendig
- Messung des Rechtecksignals u_a
- Beide Signale u_a, u_s besitzen die gleichen Periodendauer T_s
- Arduino-Mikrocontroller erkennt Periodendauer durch die Flanken des Rechtecksignals

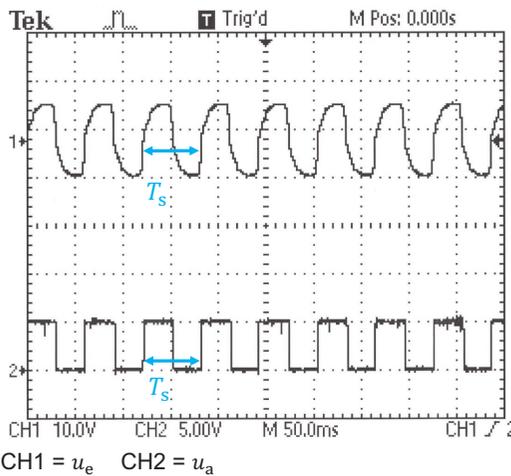
$$v_{umr} = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$f_s = 8 \text{ Hz}$$

$$v = 4.9 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 94

Versuch 1: Ergebnisse der Nulldurchgangserkennung



$$v_{umr} = 10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

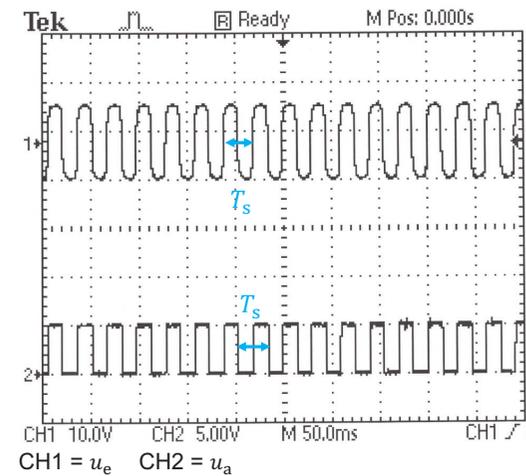
$$f_s = 16 \text{ Hz}$$

$$v = 9.9 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

CH1 = u_e CH2 = u_a

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 95

Versuch 1: Ergebnisse der Nulldurchgangserkennung



$$v_{umr} = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$f_s = 32 \text{ Hz}$$

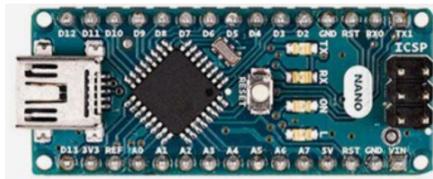
$$v = 19.8 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

CH1 = u_e CH2 = u_a

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 96

Geschwindigkeit v_{umr} in km/h (Schätzwert am Umrichter)	5	10	15	20	25	30
Frequenz f_s in Hz	8	16	24	32	40	48
Geschwindigkeit v in km/h (berechnet aus f_s)	4.9	9.8	14.8	19.7	24.7	29.6

Arduino-Mikrocontroller

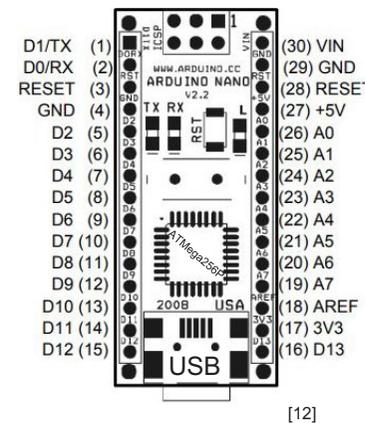


[11]

- Der Arduino Nano ist ein Entwicklungsboard, basierend auf einem Mikrocontroller (ATMega328P) mit USB-Schnittstelle und weiterer Peripherie
- Die Softwareumgebung erlaubt eine einfache und direkte Programmierung des Arduinos mithilfe der Arduino IDE (*integrated development environment* von Arduino) via USB
- Der Controller besteht aus einem Mikroprozessor (CPU), welcher Operationen des Systems steuert
- Analoge und digitale Schnittstellen sind bereits implementiert und können als Ein- und Ausgänge (Input / Output) verwendet werden
- Außerdem sind Speicherplätze vorhanden, auf denen der Code für die Ausführung durch den Prozessor gespeichert wird oder Daten abgelegt werden können

MODUL 5: MIKROCONTROLLER

Arduino Nano Pin Layout



[12]

Pin No.	Name	Art	Beschreibung
1-2;5-16	D0-D13	I/O	Digital Ein-Ausgang
3;28	RESET	Input	
4;29	GND	PWR	Versorgungsmasse
17	3V3	PWR	3.3V Ausgang
18	AREF	Input	ADC Referenz
19-26	A7-A0	Input	Analogausgang Kanal 0 zu 7
27	+5V	Input/Output	+5V Ausgang / +5V Eingang von Speisung
30	VIN	PWR	Versorgungsspannung

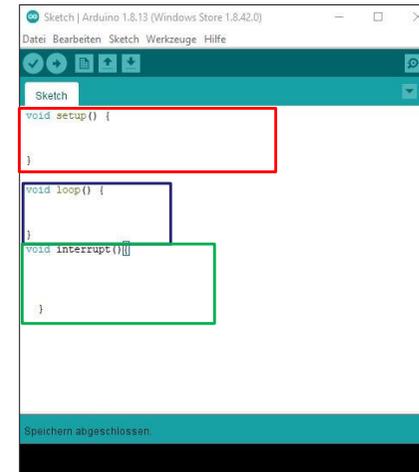
Technische Daten des Arduino Nano

Versorgungsspannung	5 V
Maximaler Gleichstrom pro Pin	40 mA
Durchschnittliche Leistungsaufnahme	95 mW
Flash	32 KiB (davon 2 KiB für Bootloader)
SRAM	2 KiB
EEPROM	1 KiB
Taktfrequenz	16 MHz

- Die Taktfrequenz von 16 MHz bedeutet, dass der Mikrocontroller 16 Millionen Operationen pro Sekunde ausführt.
- Der Flash-Speicher ermöglicht es, Informationen dauerhaft auch ohne anliegender Spannung zu speichern.

Programmierung des Arduinos mit der Arduino-Software

Das Arduino-Programm besteht aus drei Teilen:



```
void setup() {  
}  
  
void loop() {  
}  
  
void interrupt() {  
}
```

- Die rot markierte Sektion `setup` wird nur einmalig beim Starten des Programms ausgeführt. In `setup` werden v.a. die Einstellungen vorgenommen (z.B. Initialisierung der Ein- und Ausgänge)
- Der blau markierte Bereich `loop` wird kontinuierlich im Zyklus der Taktfrequenz ausgeführt, solange der Mikrocontroller mit Spannung versorgt wird.
- Die grün markierte Sektion `interrupt` wird nur dann ausgeführt, wenn eine zuvor definierte Bedingung eintritt. In diesem Fall wird die Ausführung der Schleife `loop` unterbrochen. Die Interrupt-Bedingung wird im `setup`-Code festgelegt.

Erste Schritte Arduino-Board Vorbereitung und Regeln

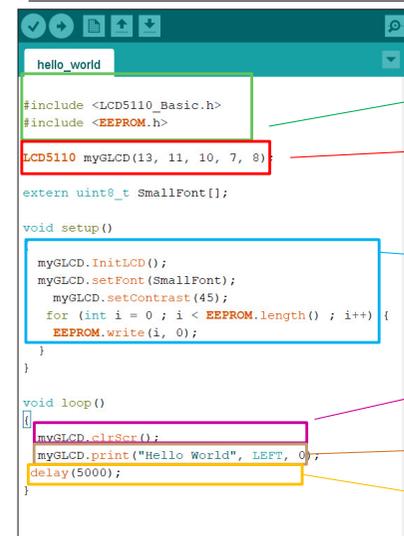
Softwarevoraussetzungen:

- Treiber für CH340 installieren (onboard USB-Schnittstelle des Arduino)
- Die Arduino IDE muss heruntergeladen und installiert werden
- Der library-Ordner „LCD5110_Basic“, welche die Ansteuerung des Display ermöglicht, muss in das Verzeichnis „arduino\libraries“ kopiert werden

Grundregeln:

- Entfernen Sie das Arduino-Board von der Platine (ausstecken!), bevor Sie den Arduino-Controller mit dem Computer (PC) verbinden!
- Andernfalls gefährden Sie Ihren Computer (PC) durch die angeschlossene Schaltung.

Versuch 1: „hello world“- Skript



```
#include <LCD5110_Basic.h>  
#include <EEPROM.h>  
  
LCD5110 myGLCD(13, 11, 10, 7, 8);  
  
extern uint8_t SmallFont[];  
  
void setup()  
{  
  myGLCD.InitLCD();  
  myGLCD.setFont(SmallFont);  
  myGLCD.setContrast(45);  
  for (int i = 0; i < EEPROM.length(); i++) {  
    EEPROM.write(i, 0);  
  }  
}  
  
void loop()  
{  
  myGLCD.clear();  
  myGLCD.print("Hello World", LEFT, 0);  
  delay(5000);  
}
```

Library (Befehlssammlung) für das LCD-Display und EEPROM

Hier werden die für das Display benötigten Anschlusspins eingestellt

→ Das Display wird initialisiert
→ Die Schriftart wird eingestellt
→ Der Kontrast wird eingestellt
→ EEPROM ist initialisiert

Display-Text wird gelöscht

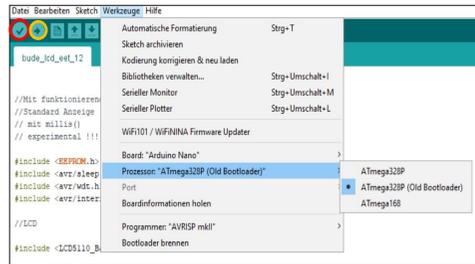
„Hello World“ wird am Display ausgegeben

Delay (Wartezeit)

Versuch 1:

Einstellungen für den Upload des Skripts auf den Arduino

- Drücken Sie „Überprüfen“ (roter Kreis in der nebenstehenden Abbildung)
- Stecken Sie den Arduino vom PCB ab
- Verbinden Sie den Arduino mit dem Laptop (USB-Daten-Kabel)
- Gehen Sie auf „Werkzeuge“ und stellen Sie „Board: Arduino Nano“ ein
- Gehen Sie auf „Werkzeuge“ und stellen Sie „Prozessor: ATmega328P (Old Bootloader)“ ein
- Drücken Sie den Pfeil „Hochladen“ (orangener Kreis in der nebenstehenden Abbildung)

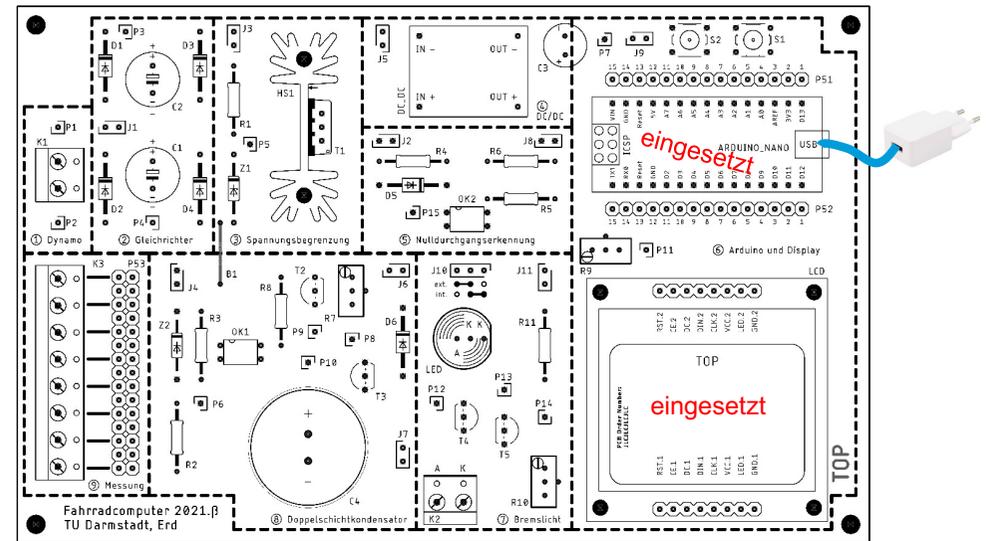


Einstellung für das Hochladen:

Board	Arduino Nano
Prozessor	ATmega328P (Old Bootloader)

Versuch 1:

Verbindungen auf der Platine herstellen



Versuch 1:

Erstes Skript für den Arduino-Controller

- Trennen Sie die USB-Verbindung zwischen Arduino-Controller und Computer (PC)
- Stecken Sie den Arduino-Controller wieder in die Platine
- Versorgen Sie den Arduino über ein USB-Netzteil (siehe Abb.)
- Beobachten Sie die Ausgabe auf dem Arduino-LCD-Display!
(LCD: Liquid Crystal Display)
(Flüssigkristallanzeige)



Versuch 1:

Einstellungen für das Arduino-LCD-Display



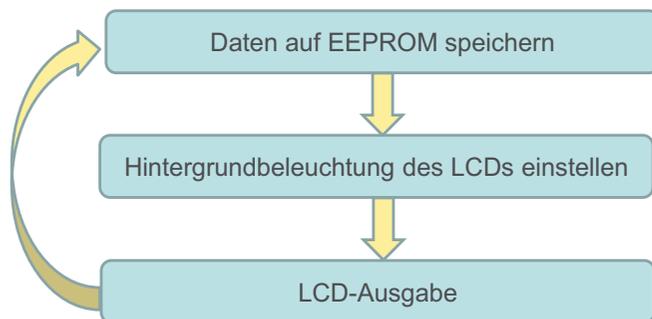
- Es kann vorkommen, dass das Display (vgl. Abbildung links oben) **zu dunkel ist**:
→ Der Wert in der Funktion „setContrast“ muss verringert werden!



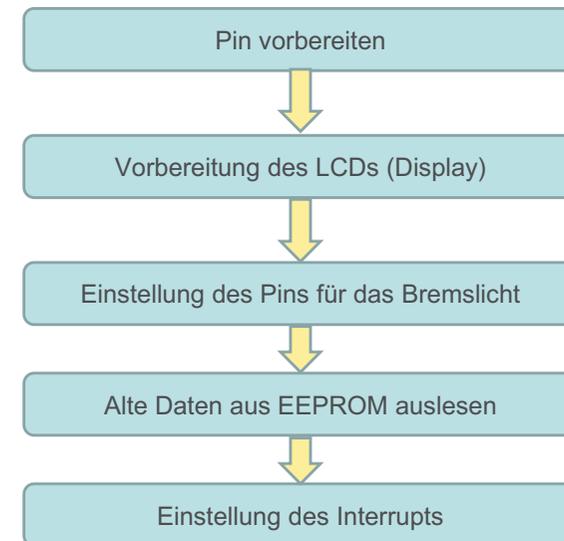
- Falls das Display (vgl. Abbildung links unten) **zu hell ist**:
→ Der Wert in der Funktion „setContrast“ muss erhöht werden!

Laden Sie nun den Code erneut hoch!

- Das Fahrradcomputer-Programm hat als **Hauptziel** die Berechnung der **zurückgelegten Strecke s** und der **Fahrrad-Geschwindigkeit v**
- Das Programm speichert die zurückgelegten Strecke s auf einem **nicht flüchtigen Speicher** (EEPROM). Diese Informationen bleiben auf Dauer erhalten, auch während das Arduino-Board nicht versorgt ist.
- Das Arduino-Programm steuert das Speichern auf dem EEPROM!
- Das Programm stellt die Informationen auf dem LCD-Display dar!
- Eine Histogrammauswertung der zurückgelegten Strecke nach Geschwindigkeitsintervallen erfolgt durch das Programm fortlaufend und kann per USB ausgelesen werden!



(LCD: Liquid Crystal Display)
(Flüssigkristallanzeige)



Der Interrupt wird bei Nulldurchgangserkennung aufgerufen:



Versuch 2: Fahrraddynamo in Betrieb setzen

Überprüfen Sie den Fahrradcomputer bei verschiedenen Drehzahlen n :

- Variieren Sie die Drehzahl n des Fahrraddynamos durch den Antriebs-Umrichter, um die folgenden Geschwindigkeiten v auf dem Display des Arduino-Boards darzustellen: $v_{LCD} = 5 \text{ km/h}, 10 \text{ km/h}, 15 \text{ km/h}, 20 \text{ km/h}, 25 \text{ km/h}, 30 \text{ km/h}$
- Messen Sie die Ausgangsspannung des Dynamos $u_s(t)$ mithilfe des Oszilloskops!
- Messen Sie die Frequenz f_s der Spannung $u_s(t)$ mithilfe des Oszilloskops und berechnen Sie die tatsächliche Geschwindigkeit v in km/h. (S. Abschnitte „Dynamo“ und „Nulldurchgangserkennung“)
- Vergleichen Sie die aus der Frequenz f_s berechnete Geschwindigkeit v mit der vom Fahrradcomputer ermittelten Geschwindigkeit v_{LCD} und der vom Umrichter geschätzten Geschwindigkeit v_{umr} .
- Stellen Sie die Werte in einer Tabelle dar!

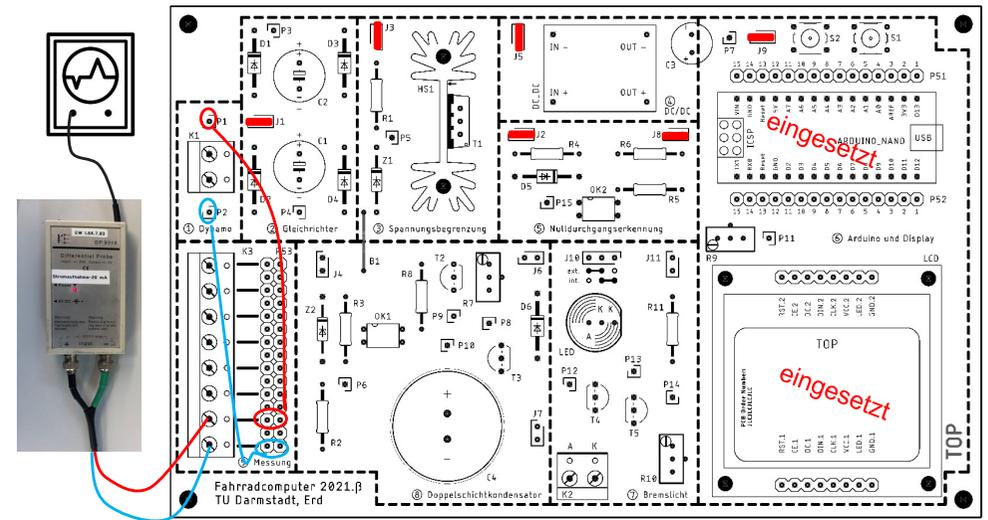
12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 113

Versuch 2: Ergebnisse

Mit dem Oszilloskop gemessene Frequenz f_s in Hz	7.94	16.1	24.4	32.24	40.57	48.59
Berechnete Geschwindigkeit v in km/h aus der gemessenen Frequenz f_s	4.9	9.9	15.1	19.9	25.1	30.0
Geschwindigkeit v_{LCD} in km/h auf dem Fahrradcomputer-LCD	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
Geschwindigkeit v_{umr} in km/h auf dem Umrichter	4.6	9.1	13.5	18.2	22.5	27.4

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 115

Versuch 2: Anschlussplan



12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 114

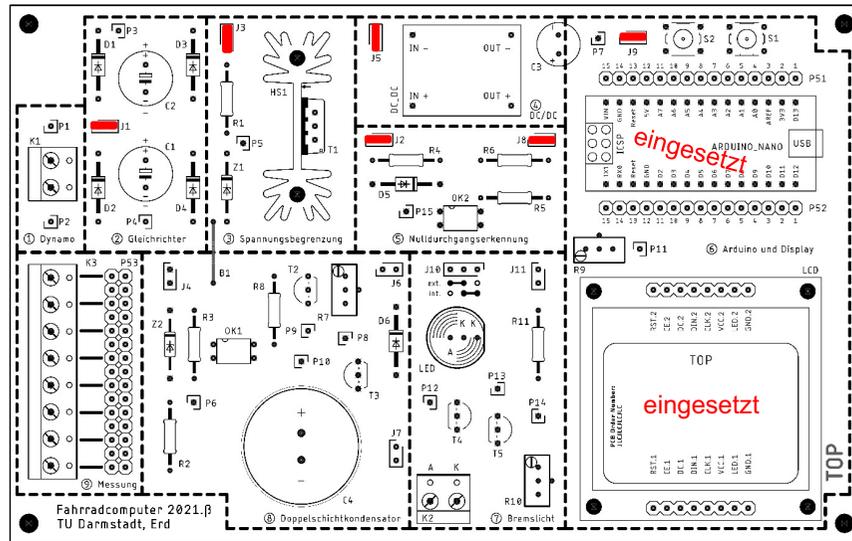
Versuch 3: Überprüfung des EEPROMs

- **Frage: Wird der Kilometerstand richtig gespeichert?**
- Stellen Sie eine gewünschte Geschwindigkeit v_{umr} am Umrichter ein!
- Merken Sie sich den Kilometerstand auf dem Arduino-LCD-Display (z.B. in der Abbildung 132.9 km)
- Jetzt reduzieren Sie die Geschwindigkeit zu $0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, so dass der Arduino Controller wegen fehlender Spannung ausgeschaltet wird!
- Stellen Sie wieder eine gewünschte Geschwindigkeit v_{umr} am Umrichter ein!
- Beobachten Sie den Wert des Kilometerstands nach dem Wiedereinschalten auf dem Display.



LCD-Display des Fahrraddynamos

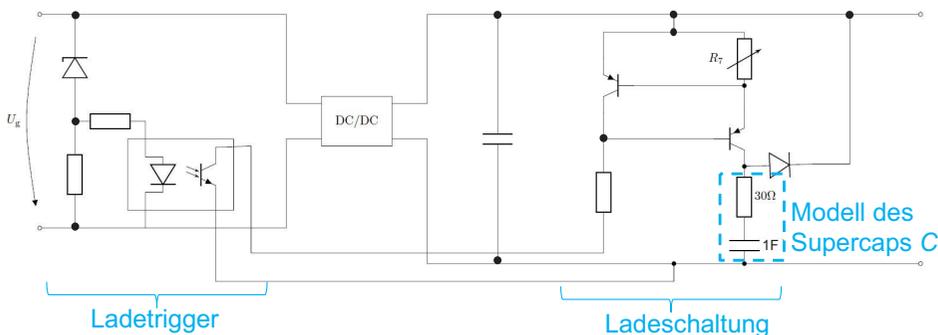
12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 116



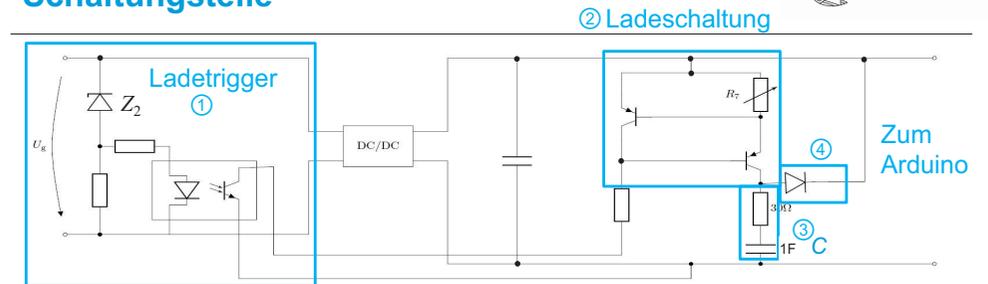
MODUL 6: DOPPELSCHICHTKONDENSATOR

Doppelschichtkondensator C (Supercap): Prinzip

- Wenn die gleichgerichtete Spannung U_g einen Schwellwert überschreitet, wird die Ausgangsspannung des DC/DC-Wandlers zum Laden eines Kondensators verwendet.
- Die in der Kapazität C gespeicherte Energie kann nun zur Aufrechterhaltung des Displays und des Bremslichts bei Stillstand (keine U -Speisung vorhanden) verwendet werden.
- Der Ladevorgang des Kondensators C wird nur bei ausreichend hoher DC-Spannung U_g gestartet, damit der hohe Ladestrom nicht die Versorgung des Arduino gefährdet.

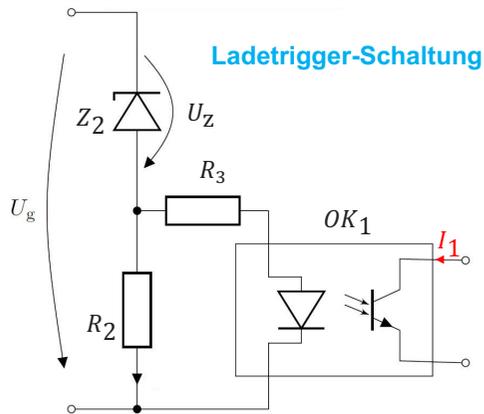


Doppelschichtkondensator C: Schaltungsteile



- ①: Der Ladetrigger steuert den Ladevorgang des Kondensators C . Nur wenn die gleichgerichtete und begrenzten Spannung U_g den Schwellwert der Zener-Diode Z_2 überschreitet, wird geladen.
- ②: Die Ladeschaltung („Stromquelle“) lädt den Kondensator C und begrenzt den Ladestrom, um genügend Restleistung für den sicheren Fahrradcomputerbetrieb (Arduino) zu haben. Der Ladestrom ist proportional zum Potentiometer-Widerstand R_7 .
- ③: Der reale Doppelschichtkondensator C wird für die Simulation als eine ideale Kapazität mit $C = 1\text{ F}$ mit einem großen Innenwiderstand $R = 30\ \Omega$ in Reihe modelliert
- ④: Die Diode verbindet den Kondensator mit dem Arduino. Nur wenn die Speisung durch den Dynamo und DC/DC-Wandler ausgeschaltet ist (z. B. $v = 0$), übernimmt der Kondensator C die Arduino-Versorgung.

Ladetrigger: Schwellspannung U_Z für den C-Ladevorgang

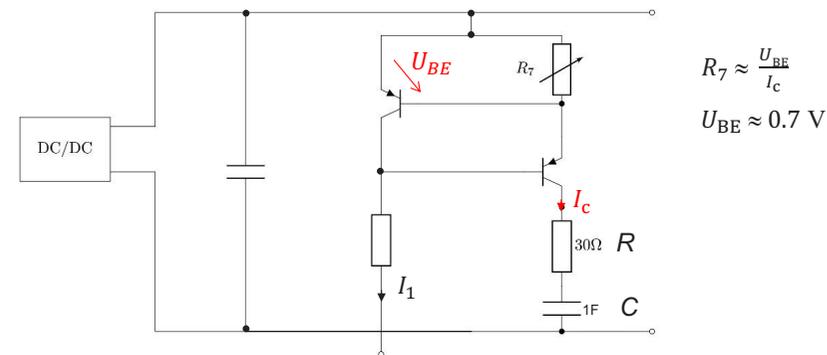


- Wenn $U_g > U_Z$ ist, wird die Z-Diode Z_2 in umgekehrter Richtung leitend: Es fließt ein Strom durch Z_2 .
- Somit fließt auch ein Strom durch Diode des Optokopplers OK_1 , weshalb der Ladestrom I_1 für den Kondensator C freigegeben wird.

Ergebnis:

- Der Kondensator wird nur geladen, wenn $U_g > U_Z = 10V$ ist!
- Für $U_g < U_Z$ ist $I_1 = 0 \rightarrow$ Der Kondensator wird nicht geladen!

Stromquelle I_C als Ladeschaltung

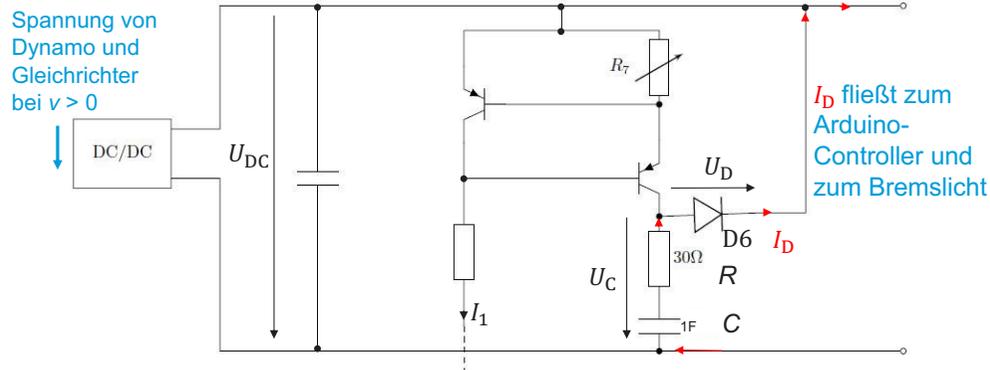


$$R_7 \approx \frac{U_{BE}}{I_C}$$

$$U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$$

- Einstellung des Potentiometers R_7 für einen gewünschten Ladestrom I_C : $R_7 = \frac{0.7 \text{ V}}{I_C}$
- Die Stromquelle begrenzt den maximalen Ladestrom.
- Der Ladetrigger ist notwendig, um zu verhindern, dass der leistungsintensive Aufladevorgang des Supercaps zu einer Unterschreitung der Versorgungsspannung des Arduino führt. So wird sichergestellt, dass das Aufladen nur dann erfolgt, wenn der Arduino sicher versorgt wird.

Bedeutung der Diode D6



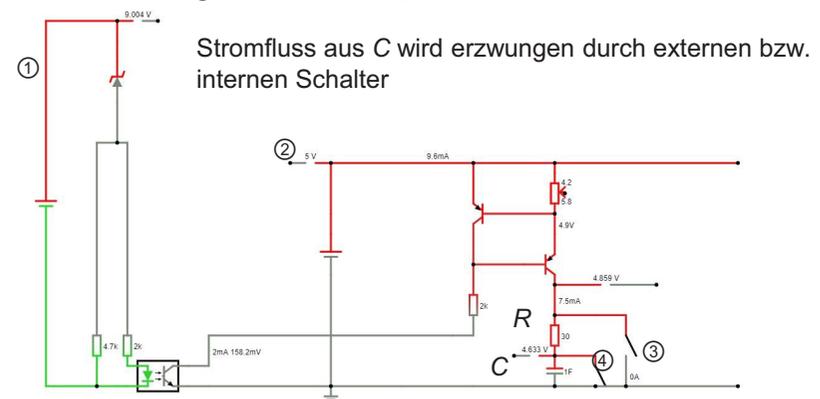
- Es gilt: $U_D = U_C - U_{DC}$
- Für $U_{DC} > U_C$ gilt $U_D < 0 \rightarrow$ die Diode $D6$ ist gesperrt \rightarrow es fließt kein Strom I_D
- Für $U_{DC} < U_C$ gilt $U_D > 0 \rightarrow$ die Diode $D6$ leitet \rightarrow es fließt Strom I_D
- Im $D6$ -Durchlassbereich fließt Strom I_D vom Kondensator C zum Arduino und Bremslicht. Der Kondensator C erhält den Betrieb aufrecht und entlädt sich.

Simulation 1:

Modellierung der Schaltung und des Doppelschichtkondensators C

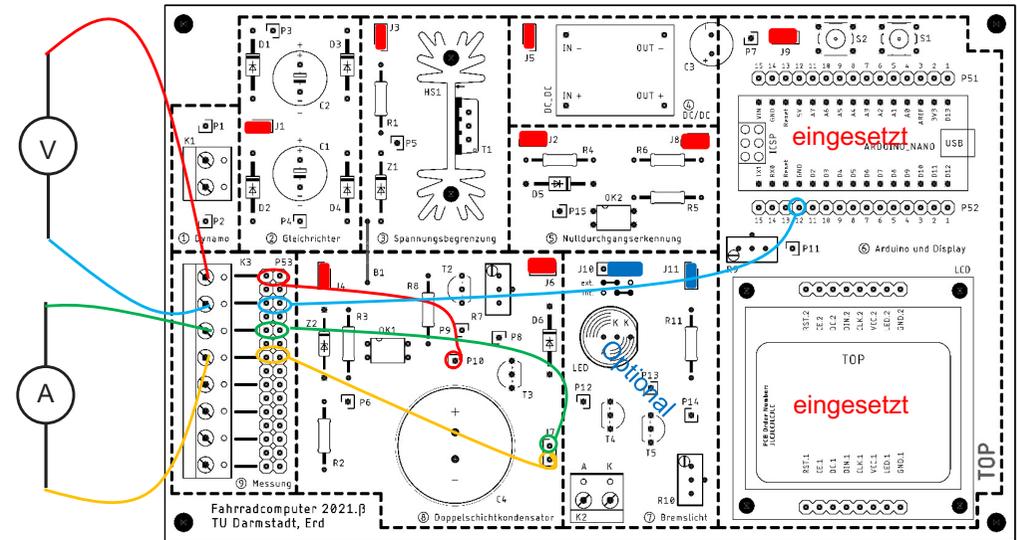
Vereinfachungen:

- ①: Gleichgerichtete Spannung wird ersetzt durch Spannungsquelle am Eingang
- ②: DC/DC-Wandler wird ersetzt durch 5V –Spannungsquelle
- ③: Externer Schalter: Entladen des realen Kondensators C durch Kurzschluss
- ④: Interner Schalter: Entladen des idealen Kondensators C durch Kurzschluss

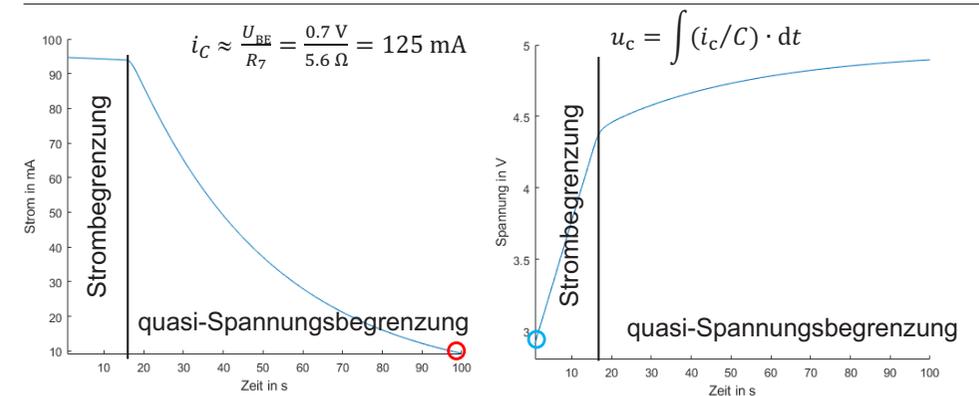


Stromfluss aus C wird erzwungen durch externen bzw. internen Schalter

- Setzen der Jumper J1, J2, J3, J4, J5, J6, J8 und J9
- Schließen Sie mit einem Jumper den Doppelschichtkondensator kurz und warten bis der Kondensator entladen ist. (Mindestens $3\tau = R \cdot C = 90 \text{ s}$)
- Stellen Sie das Potentiometer $R_7 = 5.6 \Omega$ ein.
- Messen Sie mit einem Multimeter zwischen P10 und P52-12 die Kondensatorklemmenspannung u_{RC}
- Messen Sie bei J7 mit einem Multimeter den Kondensatorstrom i_c .
- Stellen Sie eine Start-Geschwindigkeit von $v = 25 \text{ km/h}$ ein, so dass ausreichend Leistung vom Dynamo zur Verfügung gestellt wird.
- Protokollieren Sie Strom i_c und Spannung u_{RC} im Abstand von 10 s.
- Wenn $i_c < 10 \text{ mA}$ ist, ist der Kondensator näherungsweise aufgeladen.
- Reduzieren Sie nun die Geschwindigkeit abrupt auf $v = 0 \text{ km/h}$, so dass vom Dynamo keine Ladespannung mehr erzeugt wird. Nun muss der Kondensator die Spannung bereitstellen.
- Stoppen Sie die Zeit zwischen Anhalten und Erlöschen des LCD.



t / s	u_{RC} / V	i_c / mA
0	2.74	94.5
10	3.78	93.6
20	4.46	84.3
30	4.59	62.4
40	4.63	49.6
50	4.73	37.2
60	4.79	27.9
70	4.82	21.0
80	4.85	15.8
90	4.87	11.9
100	4.89	9.8

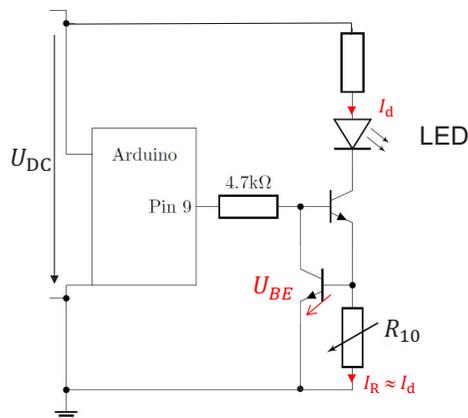


- Statt der vorausgerechneten 125 mA beträgt der Ladestrom nur 93 mA
- Aus dem Anfangswertepaar i_c, u_{RC} lässt sich wegen $u_c \approx 0$ der Innenwiderstand R berechnen: $R = \frac{2.74 \text{ V}}{93 \text{ mA}} = 29 \Omega$
- Strombegrenzung und Spannungsbegrenzung lassen sich klar erkennen

MODUL 7: BREMSLICHT

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 133

Treiberschaltung für das Bremslicht (LED)



- Der Arduino-Controller steuert das Bremslicht (LED) über den digitalen Ausgang des Pin 9.
- Die LED wird mithilfe der gezeigten Treiberschaltung an der DC-Spannung betrieben.
- Der LED-Diodenstrom I_d kann durch das Potentiometer R_{10} eingestellt werden
- Einstellregel: $R_{10} = \frac{U_{BE} = 0.7 \text{ V}}{I_d}$

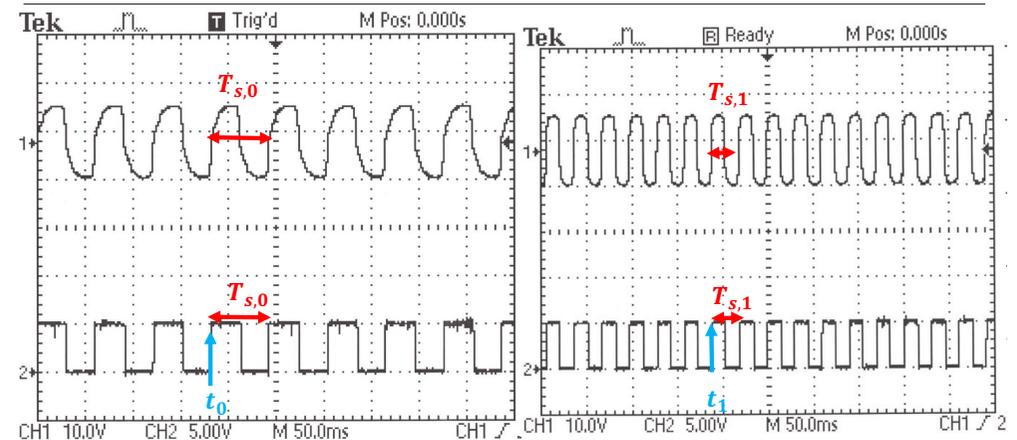
12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 135

Bremslicht (Leuchtdiode LED)

- Die Signale der Nulldurchgangserkennung können nicht nur zur Berechnung der Geschwindigkeit v , sondern auch zur Ermittlung der Beschleunigung $a = dv/dt$ verwendet werden.
- Das Bremslicht wird bei einer Verzögerung ab einem Schwellwert eingeschaltet: $a < -0.4 \text{ m/s}^2 \rightarrow$ Aktivierung Bremslicht
- Für die Ansteuerung des Bremslichts (LED) wird eine eigene Treiberschaltung benötigt, da der Ausgangspin des Arduinos nicht genügend Strom für eine LED bereitstellen kann.
- Durch Setzen des Jumpers J10 kann entweder eine externe oder die interne Leuchtdiode als Bremslicht verwendet werden.
- Für das interne Bremslicht muss den Widerstand R_7 angepasst werden: $R_7 = 35 \Omega$

12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 134

Ermittlung der Beschleunigung a



- Geschwindigkeit v ändert sich: $T_{s,0} < T_{s,1} \rightarrow$ Beschleunigung $a \neq 0!$
- $a = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0}$ Hinweis: Berechnung von v mit Nulldurchgangserkennung aus $T_{s,0}, T_{s,1}$.
- Wenn $a < -0.4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ist, wird das Bremslicht eingeschaltet!

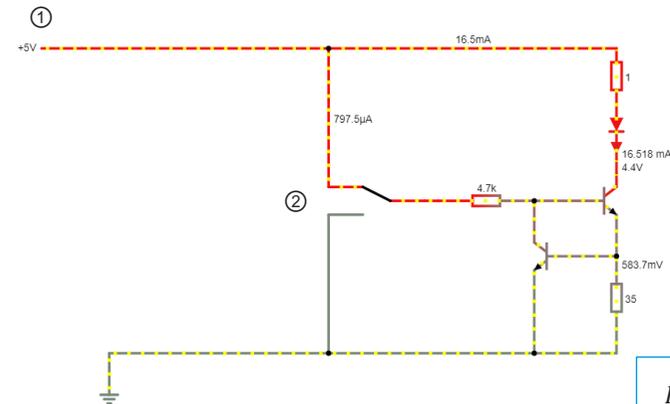
12.04.2021 | Projektwoche 2021 | 136

Simulation 1: Bremslicht

Untersuchung der Bremslicht-Schaltung mit Simulation:

- Verwendung des Online-Simulationstools: Falstad.com → Datei: „LED.txt“
- Der Arduino-Controller wird durch einen Schalter ② zum Ein-/Aus schalten des Bremslichts vereinfachend ersetzt!
- Schalten Sie das Bremslicht durch den Schalter ② ein bzw. aus!
- Beobachten Sie den Strom I_d , der durch die Leuchtdiode (Bremslicht) fließt!

Simulation 1: Simulation für die Bremslicht-Schaltung



Vereinfachungen:
 ①: Der DC/DC-Wandler ist durch die Konstant-DC-Spannung +5V ersetzt!
 ②: Der Arduino-Controller ist durch einen Schalter ersetzt!

$$I_d \approx \frac{U_{BE}}{R_{10}} = \frac{0.7 \text{ V}}{35 \Omega} = 20 \text{ mA}$$

Simulationsergebnis:

Wenn das LED eingeschaltet ist, fließt ein LED-Strom 16.5 mA (statt der abgeschätzten 20 mA).

Versuch 1: Überprüfung des Bremslichts

Test des Bremslichts auf der Platine:

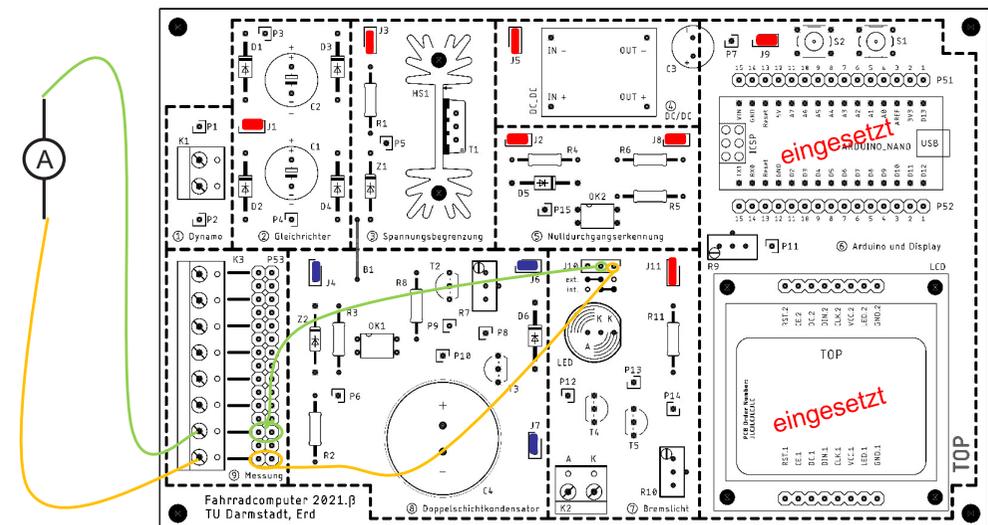
- Setzen der Jumper J1, J2, J3, J5, J8, J9, J10 und J11
- Start-Geschwindigkeit: $v = 25 \text{ km/h}$
- „Bremsvorgang“: Reduzieren Sie nun die Geschwindigkeit abrupt auf 10 km/h!
- Beobachten Sie dabei die LED! Leuchtet sie?

Messung des Stroms durch die Leuchtdiode:

- Messen Sie den Strom mit einem Multimeter durch J10!
- Wiederholen Sie den „Bremsvorgang“!
- Messen Sie den Strom, der durch die Leuchtdiode fließt!
- Variieren Sie den Wert des Potentiometers $R_{10} = [30 \Omega, 40 \Omega, 50 \Omega]$ und messen Sie die Stromvorgabe!
- Berechnen Sie den Wert des Widerstands R_{10} !

$$R_{10} \approx \frac{U_{BE}}{I_d}$$

Versuch 1: Verbindung für das Bremslicht



Versuch 1: Messwerttabelle

Einstellen des LED-Stroms durch das Potentiometer R_{10}



Wert des Potentiometers R_{10} in Ohm	30.4	36.8	49.8
Gemessener LED-Strom I_d in mA	23.2	19.7	13.4

Der LED-Strom wird mit dem Potentiometer R_{10} eingestellt!

Fahrradcomputer – Kompendium: Literatur



Wir wünschen gutes Gelingen!

Fahrradcomputer – Kompendium: Literatur



Literaturangaben:

- [1] <https://www.gjga.de/ratgeber/tipps/bnc-kabel-informationen-zur-steckverbindung-crimpen-und-co/>
- [2] <https://www.kokua-shop.com/Nabendynamo-Vorderrad-24-Biologic-Joule-3>
- [3] <https://fahrradzukunft.de/1/wirkungsweise-fahrradlichtmaschinen/>
- [4] <http://www.grv.de/dynamo.htm>
- [5] https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtmaschine#/media/Datei:Rotor_der_Klauenpolmaschine.png
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichrichter>
- [7] <https://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1166152>
- [8] <https://www.pedelecforum.de/forum/index.php?threads/vdo-mc-2-0-wl-fahrradcomputer-erfahrungsbericht.15861/>
- [9] <https://www.lehrerfreund.de/technik/1s/fahrraddynamo/3326>
- [10] Lukas Kniedel, „Energieautarker und sensorloser Fahrradcomputer“, Bachelor-Arbeit, Institut f. Elektr. Energiewandlung, TU Darmstadt
- [11] <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>
- [12] <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>
- [13] <https://www.elektronik-bu.de/FahrradtachomitArduino.html>