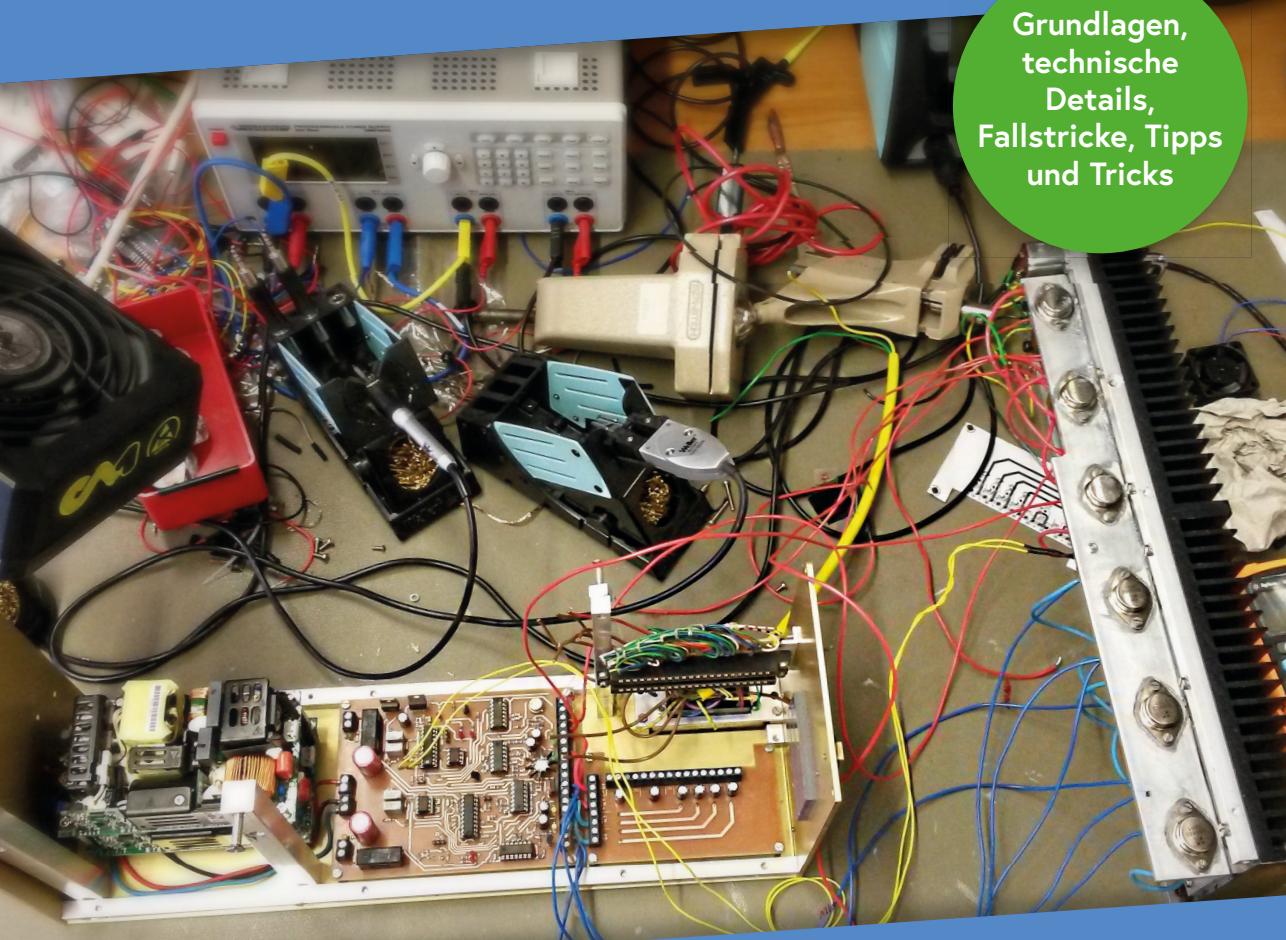


Stromversorgung ohne Stress – Band 4

Entwurf und Bau von linearen Stromversorgungssystemen

für kleine und große Leistungen



Grundlagen,
technische
Details,
Fallstricke, Tipps
und Tricks

Franz Peter Zantis

Stromversorgung ohne Stress

Band 4

Entwurf und Bau von linearen Stromversorgungssystemen

für kleine und große Leistungen

Grundlagen, technische Details, Fallstricke, Tipps und Tricks



Franz Peter Zantis

● © 2024: Elektor Verlag GmbH, Aachen.

1. Auflage 2024

● Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

● **Erklärung**

Autor, Übersetzer und Verlag haben sich nach besten Kräften bemüht, die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Informationen zu gewährleisten. Sie übernehmen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die durch Fehler oder Auslassungen in diesem Buch verursacht werden, unabhängig davon, ob diese Fehler oder Auslassungen auf Fahrlässigkeit, Versehen oder eine andere Ursache zurückzuführen sind, und lehnen jegliche Haftung hiermit ab.

● **ISBN 978-3-89576-616-9** Print

ISBN 978-3-89576-617-6 eBook

● Satz und Aufmachung: D-Vision, Julian van den Berg | Oss (NL)

Druck: Ipkamp Printing, Enschede (NL)

Elektor Verlag GmbH, Aachen

www.elektor.de

Elektor ist die weltweit wichtigste Quelle für technische Informationen und Elektronik-Produkte für Maker, Ingenieure und Elektronik-Entwickler und für Firmen, die diese Fachleute beschäftigen. Das internationale Team von Elektor entwickelt Tag für Tag hochwertige Inhalte für Entwickler und DIY-Elektroniker, die über verschiedene Medien (Magazine, Videos, digitale Medien sowie Social Media) in zahlreichen Sprachen verbreitet werden. www.elektor.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	10
1 • Ungeregelte lineare Stromversorgungen	12
1.1 Intermezzo: Absolute Spannung und Spannungsqualität	13
1.2 Siebglieder	14
1.2.1 Siebung mit LC-Glied.	15
1.2.2 Siebung mit RC-Glied	18
1.3 Netzteil für die Not-Nachladung eines Solarakkumulators	18
1.3.1 Steuerung	22
2 • Lineare Spannungsstabilisierung	32
2.1 Serielle Spannungsstabilisierung	36
2.1.1 13,8 V	38
2.1.1.1 Versorgung aus 24-V-Akkumulator.	41
2.1.1.2 Versorgung aus dem 230-V-Netz	46
2.1.2 Fazit zur seriellen Stabilisierung	47
2.2 Parallele Spannungsstabilisierung	47
2.2.1 Parallelstabilisierung für kleine Leistungen	49
2.2.2 Parallelstabilisierung für größere Leistungen	51
2.2.3 Fazit zur Parallelstabilisierung	55
2.3 Kombinierte Serien-Parallel-Stabilisierung	55
2.4 Hinweise zum Aufbau	56
3 • Referenzspannung	58
3.1 Z-Diode zur Referenzspannungserzeugung	58
3.1.1 Temperaturkompensation durch Reihenschaltung	62
3.1.2 Temperaturkompensation durch Transistor.	63
3.1.3 Temperaturkompensation durch hohe Arbeitstemperatur.	64
3.2 Referenzspannungserzeugung mit Transistor-Array	66
3.3 Referenzspannung durch Konstantstrom.	67
3.4 Referenzspannungserzeugung mit Standard-ICs	68
3.4.1 Referenzspannung mit Operationsverstärker	68
3.4.2 Referenzspannungserzeugung mit 78xx-Reglern	70

3.4.3 Referenzspannungs-Bereitstellung mit Mikrocontroller	70
3.4.3.1 1,2V mit MSP430F2013	70
3.4.3.2 1,5V oder 2,5V mit MSP430G2553	71
3.5 Band-Gap-Referenzelemente	73
4 • Wärme	75
4.1 Erlaubte Arbeitsbereiche von Leistungstransistoren	75
4.2 Ein bisschen Thermodynamik	77
4.2.1 Wärmeleitung	77
4.2.2 Konvektion	79
4.2.3 Wärmestrahlung	81
4.2.4 Die Temperatur im Gehäuseinnern	82
4.2.5. Nutzung der Wärmekapazität	86
4.3 Kühlkörper	87
4.3.1 Rückrechnung	90
4.3.1.1 Die Wirkung eines Kühlbleches	91
4.3.1.2 Die Zeit bis zur Überlastung	92
4.3.2 Kühlkörper von der Stange	94
4.4 Der Einsatz von Lüftern	95
4.4.1 Druck- oder saugseitige Anbringung	101
4.4.2 Zwei Lüfter	101
4.4.3 Geräuschpegel	101
4.4.4 Zusammenfassung	105
4.5 Wärmeleistung reduzieren	105
4.5.1 Umschaltung der Gleichrichterschaltung	106
4.5.2 Spannungsbegrenzung durch elektronischen Schalter	106
4.5.3 Umschaltung mit Thyristoren	107
4.5.4 Schaltbare Transformatorschaltung	109
4.6 Die Kernaussage	112
5 • Leistungstransistoren-Kram	113
5.1 Parallelschaltung von Leistungstransistoren	113
5.1.1 Parallelschaltung von Bipolartransistoren (BJTs)	114

5.1.2 Parallelschaltung von Leistungs-MOSFETs	120
5.2 Darlingtonsschaltungen	121
5.2.1 Darlingtonsschaltungen mit gleicher Dotierungsfolge	121
5.2.2 Komplementär-Darlingtonsschaltung	124
6 • Lineare Regelung	125
6.1 Serielle Spannungsregelung	125
6.1.1 Spannungseinstellung über die Rückkopplung	127
6.1.2 Spannungseinstellung durch Variation der Referenzspannung.	129
6.1.3 Anmerkungen zur Regelung	129
6.1.4 Spannungsversorgung mit Operationsverstärker als Regler	131
6.1.4.1 Festspannungsnetzteil	136
6.1.4.2 Netzteil für 24 V Ausgangsspannung	136
6.1.4.3 Netzteil für 13,8 V Ausgangsspannung	137
6.1.4.4 Kurzschlussfestigkeit	138
6.1.4.5 Hybrides Netzteil	138
6.1.5 Festspannungsnetzteil mit Mikrocontroller als Regler.	139
6.2 Kurzschlusschutz und Strombegrenzung	147
6.3 Isolated Source	150
6.4 G02-Labornetzteil	156
6.4.1 Spannungsregelung	159
6.4.2 Stromregelung	161
6.4.3 Wärmeleistung, Ausgangsspannung und Temperatur.	162
6.4.4 Energie und Fertig	164
6.4.5 Programm des Mikrocontrollers	166
6.4.6 Messungen.	172
6.5 Festspannungsnetzteil mit Standard-IC	173
6.6 Labornetzteil mit Darlington-Stellglied	177
6.6.1 Spannungsregelung	177
6.6.2 Stromregelung	178
6.7 Lineares Netzteil ohne Spannungsanzeige	180
6.7.1 Reglerplatine	181

6.7.1.1 Spannungsregelung	181
6.7.1.2 Stromregelung.	188
6.7.1.3 Freischaltung.	190
6.7.2 Steuerplatine	191
6.7.2.1 Stromerfassung, Stromanzeige	195
6.7.2.2 Anzeige des Betriebszustands	196
6.7.2.3 Programm des Mikrocontrollers	197
6.8 Hochvolt-Regler.	201
6.8.1 Hochvolt-Regler für stationäre Anwendung	201
6.8.2 Hochvolt-Labornetzteil.	204
6.9 Lineare Parallelregelung	208
6.9.1 Parallelregler mit symmetrischer Ausgangsspannung	212
6.11 Lineare Stromregelung.	214
6.11.1 Stromregler für LED	215
6.11.2 Spannungsgesteuerte Stromquelle mit Akkubetrieb	218
6.11.2.1 Programm des Mikrocontrollers	222
6.11.2.2 Variante für größere Ströme	225
7 • Silent Power	226
7.1 Reiner Akkubetrieb (Intervallbetrieb)	226
7.1.1 Sicherheit	228
7.2 Gepufferter Betrieb	229
7.2.1 Akkumulator mit Ladegerät	230
7.2.2 Akkumulator mit Netzgerät	230
7.2.3 Laden der Li-Ion-Akkus	230
7.2.4 Laden der Bleiakkus	237
7.3 Silent Power Supply	238
7.4 Absolut konstante Spannung.	243
7.4.1 Vierleitertechnik	244
7.4.2 Kompensation bei konstanter Last	246
8 • Messtechnik und Hilfsmittel	250
8.1 Reinheit der Gleichspannung.	250
8.2 Statischer und dynamischer innerer Widerstand	251

8.3 Lastpotentiometer	252
8.4 Elektronische Last	254
8.5 Kleine Transformatoren-Hilfe.	265
8.6 Schutzschaltungen.	270
Bibliographie	274
Formelzeichen	276
Stichwortverzeichnis	277

Vorwort

Mittlerweile gibt es fast nur noch Schaltnetzteile. Diese sind leicht und billig herzustellen und sie verursachen vergleichsweise wenig Wärme. Aber nicht für alle Einsatzzwecke sind Schaltnetzteile die beste Wahl, denn sie rauschen und stören. Das gilt primär für die vom Netzteil gelieferte Versorgungsspannung selbst. Aber es gilt auch für die Umgebung. Ursache sind durch den Schaltbetrieb quasi als Nebenprodukt erzeugte Hochfrequenzschwingungen, die über parasitäre (oder vorgesehene) Kapazitäten das Schaltnetzteil verlassen und in die Netzeleitung und die Umgebung strahlen.

Hier im Physikalischen Institut III der RWTH geht es um die Erfassung sehr schwacher Signale von atomaren Teilchen. Jedes auch noch so geringe Rauschen stört - deshalb müssen wir hier lineare Netzteile einsetzen. Diese liefern Gleichspannungen von höchster Qualität. Nur die aus Batterien oder Akkumulatoren kommende Spannung ist noch sauberer bzw. rauschärmer.

Auch die Funkamateure sind über Schaltnetzteile nicht begeistert. Häufig stören diese den Funkbetrieb. Funker lieben saubere Gleichspannungen ohne Brumm und Störung.

Aber auch jenseits der superempfindlichen Anwendungen sind lineare Netzteile nicht nachteilig. Verwendet man lineare Netzteile muss man sich grundsätzlich über Brumm und Rauschen wenig Sorgen machen. Auch der Aufbau ist im Vergleich zu Schaltnetzteile unkritisch. Wenn man überhaupt von Nachteilen bei linearen Netzteilen sprechen kann wäre nur das höhere Gewicht zu nennen. Die erhöhte Abwärme ist bei genauer Betrachtung, zumindest in Gebieten mit fast ganzjährigem Heizbedarf, kein Nachteil. Die Heizungen haben alle Thermostate und was das lineare Netzteil an Wärme abgibt spart die Heizung ganz automatisch an z.B. Gas. Betrachtet man nun noch, dass elektrische Energie zu einem großen Teil aus Sonne und Wind entsteht, stellt die Abwärme der linearen Netzteile in Innenräumen ein umweltbewusster und klimafreundlicher Nebeneffekt dar. Es wird also höchste Zeit für die Renaissance der linearen Stromversorgungen.

Neben diesen grundsätzlichen Vorteilen sind lineare Stromversorgungen auch einfach zu verstehen, können aus Standard-Bauteilen aufgebaut werden, sind leicht zu modifizieren und reparaturfähig und damit nachhaltig.

In diesem Buch geht es um den Entwurf und den Bau von linearen Stromversorgungssystemen für kleine und große Leistungen. Aber auch Randthemen wie die lineare Steuerung von Verbrauchern und Kompromissen aus Kombinationen von Schaltnetzteil und linearem Netzteil oder Hilfsschaltungen wie lineare Lasten sind Bestandteil des Buches. ... Und bei dieser Gelegenheit gibt es ausreichend Raum für die Besprechung der Grundlagen, der technischen Details, der Fallstricke und der Tricks und Tipps.

Um Fragen vorzugreifen: Die Schaltungen und Layouts sowie die Frontplatten habe ich mit dem Programm „Target“ der Firma IBF aus Eichenzell erstellt. Die Mikrocontroller habe ich mit Hilfe der Freeware „CodeComposer“ von Texas Instruments programmiert. Für die Texterstellung und Kalkulationen verwendete ich „Libre Office“. Für praktische Aufbauten/

Arbeiten nutze ich eine Lötzstation von „StarTec“ aus Bremen.

Alsdorf, im November 2023

Franz Peter Zantis

1 • Ungeregelte lineare Stromversorgungen

Bei linearen Stromversorgungen gibt es im Leistungskreis – also zwischen Energiequelle und Verbraucher – keine Schaltvorgänge. Eingang und Ausgang sind über Widerstände miteinander verbunden. Diese können variabel sein, um eine einstellbare Ausgangsspannung zu erhalten, sie können auch unsichtbar sein, weil sie nur parasitär sind.

Lineare Stromversorgungen haben generelle Vorteile: Die Ausgangsspannung ist vergleichsweise rauscharm, ihre Restwelligkeit ist leicht beherrschbar und kann sehr klein sein. Bei konsequenter Umsetzung mit einem Transformator als Spannungsumsetzer am Eingang wird im Netz keine Blindleistung erzeugt. Wegen der einfachen Bauweise ist die Ausfallwahrscheinlichkeit, verglichen mit schaltenden Stromversorgungen, deutlich geringer.

Im einfachsten Fall besteht ein lineares Stromversorgungsgerät aus einem Netztransformator, einem Gleichrichter und einer Siebung bestehend aus einem RC- oder LC-Glied (Bild 1.1). Der Netztransformator bildet eine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite. An der Primärseite liegt die Wechselspannung des Versorgungsnetzes an (in Europa $230\text{ V}\sim / 50\text{ Hz}$). Die Spannung auf der Sekundärseite ist zur Versorgung von Transistorschaltungen meistens eine Kleinspannung in der Größe zwischen 3 V und 24 V . Zur Versorgung von Röhrenschaltungen liegt die Ausgangsspannung typischerweise im Bereich 200 V bis 500 V .

Die absolute Ausgangsspannung $U_A = U_{C1}$ in der Schaltung nach Bild 1.1 ist nicht stabil, denn sie ist ungeregelt. Wie stark sie in Abhängigkeit von der Belastung schwankt, hängt von der Dimensionierung der Bauteile ab und natürlich von der Belastung. Ungeachtet dessen kann die Qualität der erzeugten Gleichspannung sehr gut sein. Details dazu im „Intermezzo“-Abschnitt 1.1.

Die höchste Ausgangsspannung ergibt sich, wenn die Quelle nicht belastet wird. Sie ist dann für die Einwegschaltung (Bild 1.1 oben)

$$\hat{U}_A = \hat{U}_{C1} = U_N \cdot F \cdot \sqrt{2} - U_F \quad \{1.1\}$$

U_N = sekundäre Nennspannung des Transformators

F = Verhältnis U_{leer}/U_{last} ; abhängig vom Transformatortyp; siehe [1]

U_F = Schleusenspannung (Forward Voltage) der Gleichrichterdiode

und für die Zweiwegschaltung (Bild 1.1 unten)

$$\hat{U}_A = \hat{U}_{C1} = U_N \cdot F \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_F \quad \{1.2\}$$

Fließt der Nennstrom des Transformators, sinkt die Ausgangsspannung auf den Nennwert, abzüglich der Schleusenspannung der Dioden.

Es gibt genügend Anwendungen, bei denen diese Spannungsschwankung keine Rolle spielt. Zum Beispiel, wenn ein Verbraucher versorgt wird, der die auftretenden Spannungsschwankungen toleriert oder der immer den gleichen Strom aufnimmt. Häufig wird die Spule bzw. der Widerstand, der anstelle der Spule benutzt wird, einfach weggelassen. Die Restwelligkeit der Ausgangsspannung ist dann größer. Auch die Ströme, die während der Leitphase der Diode fließen erreichen dann größere Scheitelwerte. Sie sind dann nur noch vom Innenwiderstand des Transformators und der Gleichrichterdiode begrenzt.

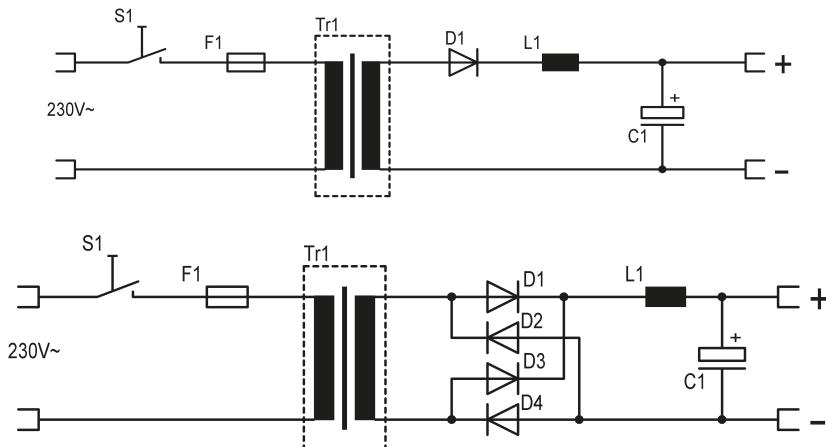


Bild 1.1: Einfachste Variante einer linearen Stromversorgung mit Einweggleichrichtung (oben) und Zweiweggleichrichter (unten).

1.1 Intermezzo: Absolute Spannung und Spannungsqualität

Eingangs habe ich von absoluter Spannung und der Qualität der Gleichspannung geschrieben. Mit absoluter Spannung meine ich den Wert der tatsächlichen Gleichspannung, d.h. den Wert, den man mit einem Gleichspannungsmessgerät (z.B. mit einem analogen Drehspulinstrument oder einem digitalen RMS-Messgerät; RMS: Root Mean Square) messen würde. Kleine überlagerte Wechselanteile werden dabei „weggemittelt“. Man nennt diesen Teil auch DC-Wert oder Gleichspannungswert (DC: Direct Current).

Mit der Qualität einer Gleichspannung meine ich allerdings deren Reinheit. Eine „reine“ Gleichspannung hat keinen Wechselanteil. Nur Batterien und Akkumulatoren können diese liefern. Wird die Gleichspannung aus dem 50 Hz-Versorgungsnetz gewonnen sind mindestens 50 Hz- und/oder 100 Hz-Wechselanteile der Gleichspannung überlagert. Es bedarf viel Aufwand hinsichtlich der Bauteile und des Designs, damit diese Wechselanteile vernachlässigbar klein sind. Den Wechselanteil einer Gleichspannung kann man im einfachsten Fall messen, indem man sein Multimeter auf „AC“ schaltet (AC: Alternating Current). Dann wird nur der Wechselanteil angezeigt. Zu beachten ist dabei, dass die meisten verbreiteten digitalen Multimeter im Wechselspannungsbereich nur bis zu einer Frequenz von vielleicht 400 800 Hz messen können. Am besten misst man den Wechselspannungsanteil deshalb mit einem Oszilloskop.

Bei ungeregelten Stromversorgungen können die Wechselanteile mit relativ wenig Aufwand klein gehalten werden. Der absolute Spannungswert ist dabei nicht stabil, sondern er verändert sich mit der Belastung oder auch mit Schwankungen der Netzwechselspannung. Diese Schwankungen sind typischerweise langsam und nicht periodisch.

Bei Stromversorgungen, die eine Regelschaltung enthalten, wird die Ausgangsspannung absolut konstant gehalten. Dazu sind ständig Ausgleichsvorgänge durch die Regelschaltung erforderlich. Dies verursacht zusätzliche Wechselanteile auf der Gleichspannung. Um diese vernachlässigbar klein zu halten muss viel Aufwand getrieben werden.

Besonders viele Wechselanteile findet man in der Ausgangsspannung von Schaltnetzteilen. Die internen, hohen Schaltströme verursachen viele und besonders hochfrequente Wechselanteile, die der Gleichspannung am Ausgang überlagert sind und nur schwer, wenn überhaupt, wieder herauszufiltern sind. Diese hochfrequenten Wechselanteile gelangen nicht nur durch die Schaltung zum Ausgang, sondern werden auch abgestrahlt oder gelangen über parasitäre Kapazitäten in das Versorgungsnetz.

1.2 Siebglieder

In [1] bin ich auf die Einweg- und Zweiweggleichrichtung eingegangen. Auf die Möglichkeit von LC- oder RC-Kombinationen zur Filterung habe ich lediglich hingewiesen. Ich möchte hier die Details nachholen.

Wie erwähnt ist die Netzfrequenz f in Europa 50 Hz. Nach dem Gleichrichter erhält man ohne Siebglied Sinushalbschwingungen. Beim Einweggleichrichter mit einer Periodizität von 20 ms; entsprechend 50 Hz. Beim Zweiweggleichrichter mit einer Periodizität von 10 ms; entsprechend 100 Hz. Die von einer Gleichrichterschaltung erzeugte Gleichspannung beinhaltet also einen Wechselanteil. Im vorliegenden Fall ist es die Grundschwingung und geradzahlige Oberwellen (entnommen aus [5]). Bei der Einweggleichrichtung sind also Frequenzanteile von 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, etc. enthalten.

Bei Zweiweggleichrichtung entstehen hingegen die Frequenzen 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 600 Hz, etc.

Diese Frequenzen werden auch Brummfrequenzen genannt, da sie sich bei der Anwendung in Audioschaltungen wie Rundfunkgeräte oder Musikverstärker als Brummen bemerkbar machen.

Die Amplituden der Wechselspannungsanteile sinken mit der Frequenz.

Zur Unterdrückung dieser Wechselanteile kann man Filter zum Glätten, bestehend aus einer Spule und einem Kondensator verwenden. Diese Kombination ist zur Versorgung von Röhrenschaltungen üblich. Bei Geräten der Halbleitertechnik wird die Spule fast immer weggelassen. Bei kleinen Leistungen wird hinter dem Ladekondensator ein Linearregler eingesetzt. In diesem Kapitel geht es jedoch um Spannungsversorgungen ohne Linearregler.

Gedanklich kann man die Glättungskombination (das Siebglied) bestehend aus L1 und C1 im Bild 1.1 vereinfachen. Dies geschieht wie im Bild 1.2 gezeigt, durch zwei Widerstände, die als Spannungsteiler verschaltet sind. Die Widerstände müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

R1 muss für die Wechselspannung der auftretenden Brummfrequenzen einen möglichst hohen Widerstand und für die Gleichspannung einen möglichst geringen Widerstand haben. R2 muss umgekehrt für Gleichspannung einen sehr hohen und für die Wechselspannung der Brummfrequenz einen möglichst geringen Widerstand aufweisen.

Die Bedingung für R1 wird durch eine Induktivität, die Bedingung für R2 durch eine Kapazität am besten erfüllt. Für die Induktivität wurden früher Eisendrosseln verwendet, die mit einem Luftspalt versehen sind, damit der Induktivitätswert bei einer Änderung des hindurchfließenden Gleichstroms nicht zu stark variiert. Der ohmsche Widerstand dieser Drossel soll klein sein, denn er erhöht den Innenwiderstand der entstehenden Spannungsquelle und es entsteht in ihm Wärme.

Trotzdem kann es in manchen Fällen sogar sinnvoll sein, die Spule ganz durch einen ohmschen Widerstand zu ersetzen.

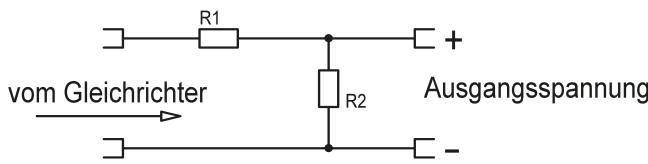


Bild 1.2: Ersatzschaltung zum Bild 1.1.

Das Verhältnis der Spannung vor dem Filter zu der Brummspannung hinter dem Filter ist der Siebfaktor S . Die Anordnung stellt einen Spannungsteiler dar, der aus den Blindwiderständen des Kondensators und der Spule gebildet wird.

1.2.1 Siebung mit LC-Glied

Hier wird der Widerstand R1 aus Bild 1.2 durch eine Spule ersetzt und der Widerstand R2 durch einen Kondensator. Damit wird R1 durch X_L und R2 durch X_C ersetzt. Vereinfacht kann man schreiben:

$$X_L = \omega \cdot L \quad \{1.3\}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \{1.4\}$$

mit

C = Kapazität des Kondensators in Farad

L = Induktivität der Drossel in Henry

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

f = Brummfrequenz in Hz

Wird die Eingangsspannung u_1 genannt und die Ausgangsspannung u_2 , kann folgender Ansatz gemacht werden:

$$S = \frac{u_1}{u_2} = \frac{X_L + X_C}{X_C} = \frac{\omega \cdot L + \frac{1}{\omega \cdot C}}{\frac{1}{\omega \cdot C}} \quad \{1.5\}$$

Dabei muss die Kombination aus Spule und Kondensator als Tiefpassfilter wirken (siehe [6]). Die sich aus der Zusammenschaltung von Spule und Kondensator ergebende Resonanzfrequenz muss also weit unterhalb der tiefsten auszusiebenden Frequenz liegen. Andernfalls ergibt sich eine Spannungsüberhöhung an C . Anstelle der Brummunterdrückung wäre dann eine Brummerhöhung festzustellen. Bei $f_0 \ll f$ ist $X_L \gg X_C$ und man kann X_C im Zähler der Gleichung {1.5} vernachlässigen. Damit ergibt sich:

$$S \approx \frac{\omega \cdot L}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \omega^2 \cdot L \cdot C \quad \{1.6\}$$

Bei dieser Rechnung sind sowohl die Verluste (der ohmsche Widerstandsanteil der Spule) als auch die Dämpfung durch den angeschlossenen Verbraucher nicht berücksichtigt. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die angegebenen Brummfrequenzen Siebfaktoren wie in der Tabelle 1.1 aufgeführt.

f	50 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	500 Hz
$S \approx$	$0,1 \cdot LC$	$0,4 \cdot LC$	$1,6 \cdot LC$	$3,6 \cdot LC$	$10 \cdot LC$

Tabelle 1.1: Siebfaktoren für L in H und C in μF .

Die Siebglieder lassen sich hintereinander schalten. Der resultierende Siebfaktor ist dann gleich dem Produkt der Siebfaktoren der Einzelglieder.

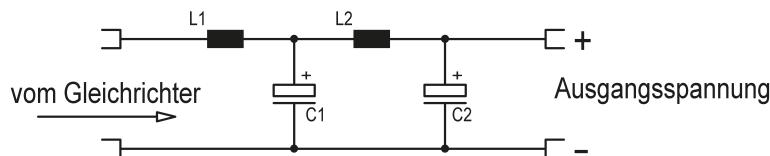


Bild 1.3: Reihenschaltung von LC-Filtern.

Bei einem vorgegebenen Betrag von L und C ist die wirkungsvollste Art der Aufteilung diejenige, bei der L und C in den Filterabschnitten gleich groß gemacht werden. Im Bild 1.4 ist dazu ein Beispiel gerechnet. Vorgegeben ist eine Induktivität von $20 H$ und eine Kapazität von $32 \mu F$. Bei der Aufteilung 1. erhält man einen Siebfaktor von $K = 144$ bei $50 Hz$. Bei der Aufteilung 2. ist der Siebfaktor maximal weil L und C in den beiden Filtern die gleiche Größe haben.

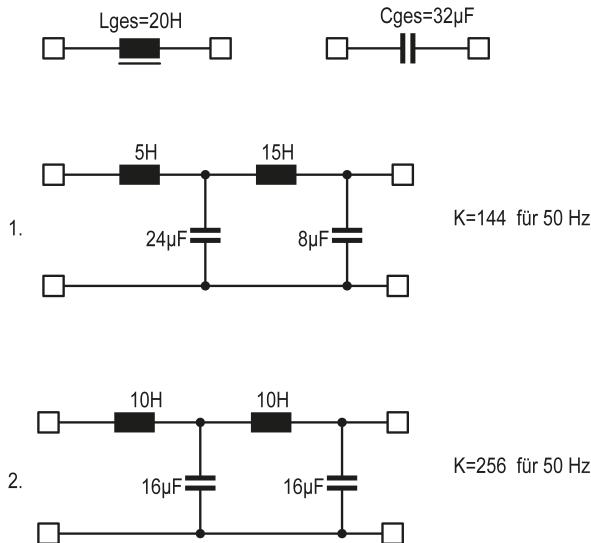


Bild 1.4: Auswirkung der Dimensionierung bei der Reihenschaltung von LC-Filtern.

Grundsätzlich ist es gleichgültig, ob die Siebdrossel im positiven oder im negativen Zweig liegt. Es ist jedoch davon abzuraten, sie in diejenige Leitung zu legen, die geerdet wird bzw. den Bezug (GND, Ground) darstellt. Das ist meistens (aber nicht immer) der negative Zweig.

Zur Dimensionierung der Drosselpule geht man davon aus, dass der von der Brummspannung erzeugte Brummstrom durch die Reihenschaltung von $\omega' L$ (Scheinwiderstand der Drossel) und R (Verbraucherwiderstand) gegenüber dem von der Gleichspannung erzeugte Gleichstrom U_{gl} durch R klein bleiben muss.

$$\frac{\omega \cdot L}{R} \geq \frac{U_{Br}}{U_{gl}} \quad \{1.7\}$$

Das ergibt einen Mindestwert für die Pufferinduktivität von

$$L \geq \frac{u_{Br} \cdot R}{2 \cdot \pi \cdot f_{Br} \cdot U_{gl}} \quad \{1.8\}$$

Es genügt, wenn man nur die Grundschwingung der Brummspannung berücksichtigt, deren Spitzenwert das 0,667fache der Gleichspannung beträgt. Die Frequenz der Grundschwingung ist bei Zweiweggleichrichtung das doppelte der Netzfrequenz – also 100 Hz. Damit ergibt sich

$$L[H] \geq 1,06 \cdot \frac{R}{[k\Omega]}$$

Dabei ist R der Gesamtwiderstand, also der Verbraucherwiderstand und der Innenwiderstand der Gleichrichter, des Transformators und der Siebkette. Man gibt R in $k\Omega$ an. Alleine daran erkennt man schon, dass der Einsatz von Drosselpulen nur bei kleinen Strömen wirklich sinnvoll ist – wie sie z.B. bei Röhrenschaltungen vorkommen.

1.2.2 Siebung mit RC-Glied

Wenn der entstehende Spannungsabfall nicht stört, kann die Spule durch einen ohmschen Widerstand ersetzt werden. Das ist bei kleinen Verbraucherströmen der Fall. Auch hier liegt eine Spannungsteilerschaltung vor. Für den Siebfaktor gilt dann:

$$S = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\frac{R + \frac{1}{\omega \cdot C}}{1}}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{R}{\frac{1}{\omega \cdot C}} + 1 = \omega \cdot C \cdot R + 1$$

Der Siebfaktor steigt mit der Frequenz nicht mehr quadratisch, sondern linear. Die Oberschwingungen werden also weniger unterdrückt wie beim LC-Filter. Die Wirkung der RC-Filtrierung ist in der Tabelle 1.2 dokumentiert. Man beachte, dass dort der Widerstand in $k\Omega$ berücksichtigt ist. Diese Art der Filterung ist nur für kleine Ströme sinnvoll. Weiterhin ist zu beachten, dass der eingesetzte Widerstand die entstehende Verlustleistung verkraften muss. Für die Auswahl des Widerstandes geht man am besten aus von der bekannten Formel (*zum Beispiel aus [4]*):

$$P = I^2 \cdot R$$

mit I in Ampere und R in Ω

f	50 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	500 Hz
$S \approx$	$0,3 \cdot RC$	$0,6 \cdot RC$	$1,3 \cdot RC$	$1,9 \cdot LC$	$10 \cdot LC$

Tabelle 1.2: Siebfaktoren für R in $k\Omega$ und C in μF .

1.3 Netzteil für die Not-Nachladung eines Solarakkumulators

Im Folgenden beschreibe ich ein Beispiel für den Einsatz eines ungeregelten Netzteils.

LiFePO₄-Akkuatoren werden häufig als Speicher für Solarenergie im Inselbetrieb eingesetzt. Diese Art Akkumulator haben immer ein BMS (Batterie Management System) integriert. Es soll dafür sorgen, dass die einzelnen Zellen, die im Akkumulator sind, gleichmäßig aufgeladen werden. Weiterhin schaltet das BMS den Akkumulator hochohmig, wenn es der Ansicht ist, dass er vollständig geladen oder vollständig entladen ist. Genau hier liegen große Probleme. Sobald das BMS entscheidet, der Akkumulator ist leer, wird er vom Laderegler nicht mehr erkannt. Damit ist der Laderegler außer Betrieb gesetzt. Um die Anlage wieder in Gang zu setzen, muss der Laderegler vom Akkumulator getrennt werden. Auch die Solarzellen sind vom Laderegler zu trennen. Dann muss der Akkumulator mit einem externen, netzbetriebenen Ladegerät etwas aufgeladen werden. Erst wenn die Spannung am Akkumulator wieder stabil ansteht, darf er wieder an den Laderegler angeschlossen

werden. Im letzten Schritt werden die Solarzellen wieder mit dem Laderegler verbunden.

Vor allem in den Wintermonaten November und Dezember wird von der Sonne vergleichsweise sehr wenig Energie geliefert [7]. Im konkreten Fall reichte die erfasste Sonnenenergie in diesen Monaten oftmals für den Betrieb nicht aus. Der oben beschriebene Vorgang ist deshalb öfter aufgetreten.

Damit das nicht mehr passiert habe ich eine Not-Nachladung eingerichtet . Diese wird zugeschaltet, wenn der Akkumulator fast leer ist. Sie liefert dem Laderegler ersatzweise Energie aus einer anderen Energiequelle und verhindert so das Abschalten des Akkumulators durch das BMS.

Im vorliegenden Fall wurde das Versorgungsnetz als Notspeisung gewählt. Dazu war ein Netzteil notwendig. Das Netzteil ist auf der Eingangsseite mit dem 230V-Versorgungsnetz verbunden und liefert auf der Ausgangsseite eine ähnlich hohe Gleichspannung, wie sie auch typischerweise von den Solarpaneelen geliefert wird. Sofern die Solarpaneelle bereits Dioden eingebaut haben, kann man den Ausgang des Netzteils direkt parallel anklammern. Ansonsten muss in die Leitung der Solarpaneelle eine (Schottky-) Diode eingefügt werden. Damit wird verhindert, dass Strom aus dem Netzteil in die Solarpaneelle hineinfließt.

Für den Laderegler macht es keinen Unterschied, ob die Energie von den Solarpaneelen kommt oder vom zusätzlich angeschlossenen Netzteil. Das Netzteil muss deshalb auch keine konstante Spannung liefern. Es reicht ein einfaches, ungeregeltes Netzteil bestehend aus Transformator, Gleichrichter und Glättungskondensator. Im Bild 1.5 ist die Anordnung des Netzteils innerhalb der Solaranlage ersichtlich.

Die Spannungsfestigkeit der Schottky-Diode ist zu beachten. Sie muss die maximal vorkommende Spannung, die vom Netzteil kommt, sperren und den Kurzschlussstrom der Solarpaneelle tragen.

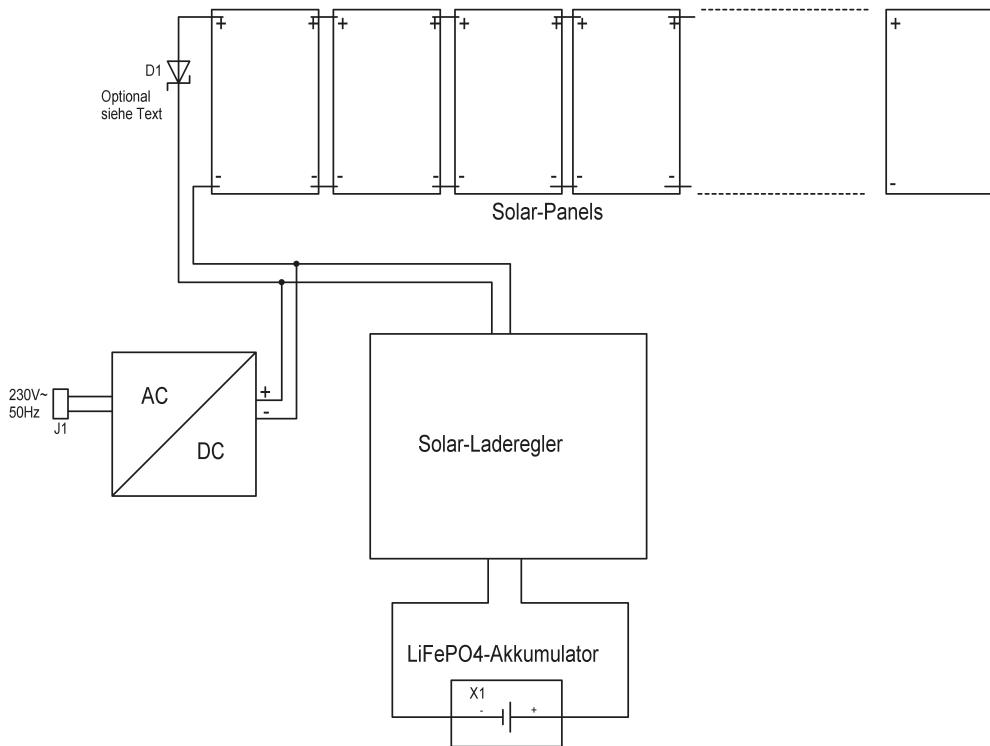


Bild 1.5: Anordnung eines einfachen Netzteils (AC/DC) für die Notladung innerhalb einer Solaranlage.

Im Bild 1.6 ist das Schaltbild des Netzteils zu sehen. Es entspricht der Schaltung aus Bild 1.1 unten, wobei auf die Spule L1 verzichtet wurde. Die Dimensionierung ist nicht schwierig, da die Solarregler dafür ausgelegt sind einen großen Eingangsspannungsbereich zu akzeptieren und in nutzbare Energie zum Laden der Solarbatterie zu wandeln. Die vom Netzteil ausgegebene Spannung muss lediglich im Bereich der Spannung liegen, die von den Solarpaneelen typischerweise geliefert wird. Bei trübem Wetter wird die Spannung klein sein und bei orthogonaler Sonneneinstrahlung wird sie ihr Maximum erreichen. Die vom Notlade-Netzteil gelieferte Spannung sollte unbedingt frei von Wechselanteilen sein. Die Solarpaneelle liefern eine saubere Gleichspannung, wofür der Laderegler ausgelegt ist. Was passiert, wenn man eine Gleichspannung mit großem Wechselanteil an den Laderegler anschließt, ist unbekannt (in der Regel auch bei den Herstellern selbst).

In meinem Fall habe ich zum Bau des Netzteiles auf in meiner Werkstatt herumliegende Bauteile zurückgegriffen. Ein Ringkerntransformator mit einer sekundären Nennausgangsspannung von 24 V bei einer Leistung von 100 VA, ein Gleichrichter der Deutschen Firma Herrmann Typ KS20-B30/25 sowie ein Elektrolytkondensator mit 35000 μF /40 V. Der Gleichrichter ist für eine Sperrspannung von 100 V und einem Dauerstrom von 11 A ausgelegt und damit für die vorgestellte Anwendung sehr gut geeignet.

Aus [1, Seite 99] kann man ersehen, dass die Leerlaufspannung von Ringkerentransformatoren mit einer Nennleistung von 100 VA im Schnitt um den Faktor 1,1 höher liegt als die Nennspannung U_N . Die maximale, am Elektrolytkondensator im Leerlauf messbare Spannung ist dann gemäß {1.2}:

$$\hat{U} = 24 \text{ V} \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot 0,7 \text{ V} \approx 35,94 \text{ V}$$

U_F ist dabei die Durchlassspannung der Gleichrichterdioden, die man mit 0,7 V pro Diode ansetzen kann.

Wichtig ist, dass Gleichrichter und Kondensator für die maximale Spannung ausgelegt sind, welche die Solarpaneele bei direkter Sonnenbestrahlung liefern. Bei meinem in [7] beschrieben Solarsystem habe ich am Eingang des Solarreglers noch nie höhere Spannungen als 38 V gemessen. Somit ist die Bedingung erfüllt.

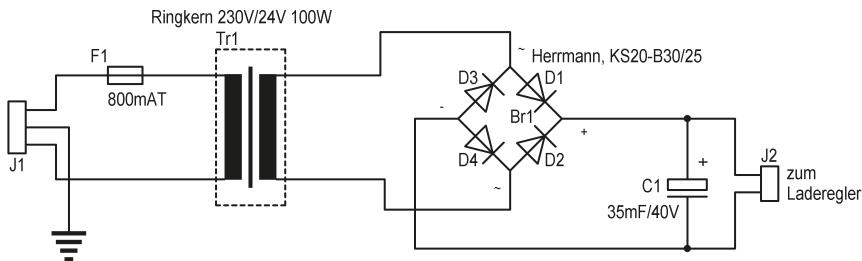


Bild 1.6: Schaltung des ungeregelten Netzteils für die besprochene Not-Nachladung.



Bild 1.7: Das ungeregelte Netzteil nach Bild 1.6 auf einer Metallplatte aufgebaut.

Der Gleichrichter ist hinten rechts angeordnet. In der Primärleitung des Transfomators ist die Feinsicherung eingefügt.

1.3.1 Steuerung

Der Vollständigkeit halber stelle ich hier noch die Ansteuerung vor, mit der die vorgestellte Not-Nachladung ein- bzw. ausgeschaltet wird. In meinem Shack (Shack = Funkbude) wird die Systemspannung permanent gemessen. Unterschreitet diese einen vorgegebenen unteren Schwellwert, wird über ein Funksignal eine handelsübliche Funksteckdose eingeschaltet und damit die Not-Nachladung gestartet. Wird ein vorgegebener oberer Schwellwert überschritten, wird ebenfalls durch ein Funksignal die Steckdose wieder ausgeschaltet. Die Hysterese beträgt 1,1 V.

Bild 1.8 zeigt die im Shack unter einem Regalbrett angebrachte Steuereinheit. Oben rechts ist die "Spannungsüberwachungs-Platine". Diese hatte ich in einer Vorgängerversion bereits in [2] beschrieben. Bild 1.9 zeigt das Schaltbild. Die Akkumulatorspannung wird über den Widerstand R1 an U1 geführt. Die gemessene Spannung ist demnach die Versorgungsspannung. Zwei Linearregler versorgen die "Spannungsüberwachungs-Platine" und ein kleines 433 MHz Funkmodul. Über den Portausgang P1.2 kann der auf der Platine befindliche Mikrocontroller MSP430F2013 das Funkmodul ansteuern.

Die benutzte Funksteckdose entstammt einem Set von Pollin. Sie ist baugleich mit dem Funksteckdosen-Set "RCS 1000 N" der Firma "brennenstuhl". Der Handsender sendet ein Amplitudenmoduliertes Signal. Genauer ist es eine Amplitudenumtastung (ASK - Amplitude Shift Keying). Ich habe dieses Signal aufgezeichnet und den Code entschlüsselt und in der Software des Mikrocontrollers nachgebildet. Die Funksteckdosen sind im Übrigen in [10] beschrieben.

Der zuletzt ausgelöste Funkimpuls (ein oder aus) wird alle ca. 44 Minuten wiederholt. Das dient der Sicherheit, denn es könnte doch sein, dass z.B. der Ausschaltpuls durch eine zufällige Funkstörung überdeckt wurde und deswegen die Nachladung nicht abgeschaltet ist. Auch könnte es sein, dass ein baugleiches Funksteckdosen-Set in der Nachbarschaft genutzt wird und dieses meine Ansteuerung unbemerkt umkehrt.

Das genutzte Programm ist am Ende dieses Kapitels abgedruckt.

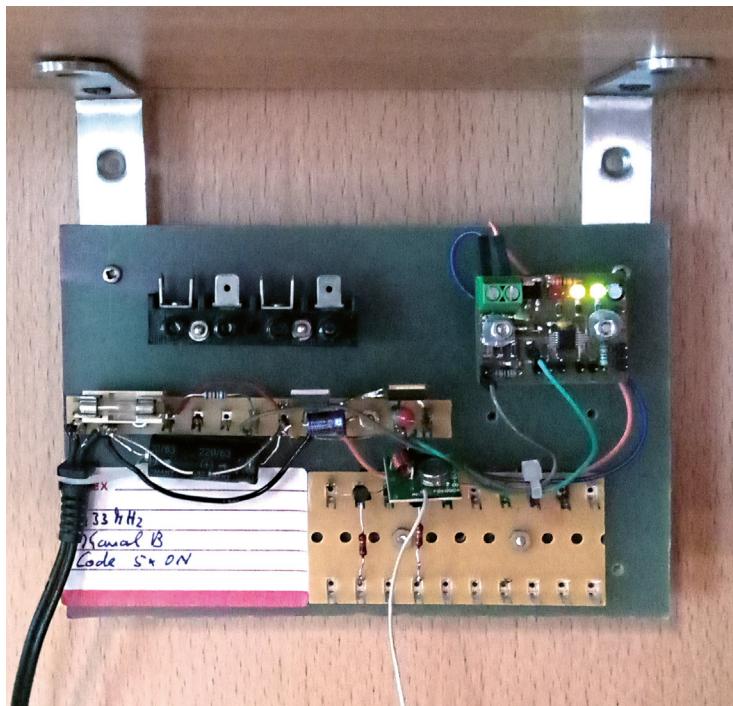


Bild 1.8: Steuerung der Not-Nachladung.

Links die Zuleitung. Mittig das ISM-Funkmodul mit herabhängendem Antennendraht.

Situation anhand der LEDs: Nachladung ist ausgeschaltet. Die aktuelle Akkumulatorspannung liegt aktuell zwischen der Einschalt- und Ausschaltschwelle. Der Mikrocontroller ist so programmiert, dass Kanal B mit dem Code 5x ON verwendet wird. Die Funksteckdose muss entsprechend eingestellt sein.

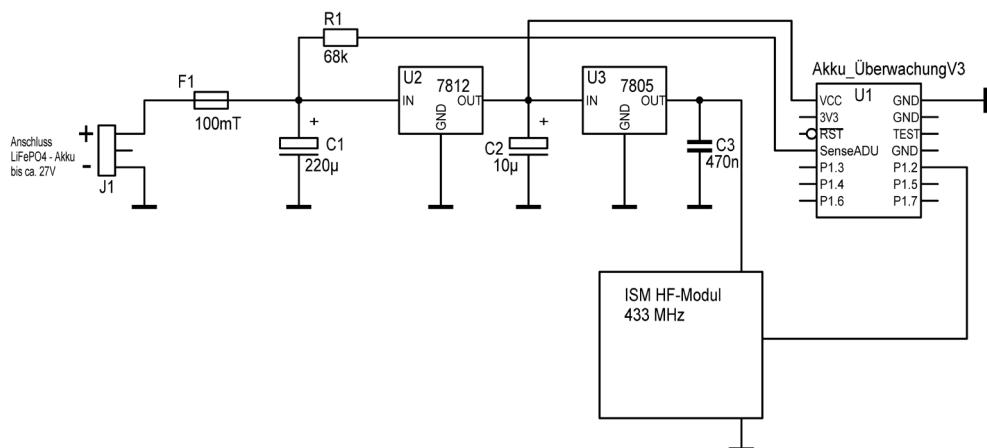


Bild 1.9: Steuerung der Not-Nachladung.

```

/* Die Spannung an des Solarakkus wird überwacht.
 * Sinkt die Spannung unter 24,7V wird die Nachladung über das Stromnetz aktiviert.
 * Ziel ist die Vermeidung einer Abschaltung durch das BMS.
 * Steigt die Spannung über 25,8V wird die Nachladung wieder abgeschaltet.
 * Der Abgriff der Akkusspannung erfolgt über einen 68 kOhm-Widerstand auf den
Messeingang.
 * Der Schaltvorgang wird zyklisch in größeren Abständen wiederholt.
 * Mikrocontroller: MSP430F2013
 * Benutzte Parameter der Funksteckdose: Kanal B, Code 5x ON
 * Stand: 6. Januar 2023 / F.P. Zantis
*/
#include <msp430f2013.h>
volatile unsigned int counter; //counter for the ADU-values
volatile unsigned int voltage = 0x00;
const unsigned int v247 = 34160; //24,7V beruht auf Messung,
gemessen: ADUwert = 1383*U
const unsigned int v258 = 35681; //25,8V beruht auf Messung,
gemessen: ADUwert = 1383*U
unsigned int flagnachladung;
unsigned int werteP11[11]; //Spannung am Akkumulator
const unsigned int numofvalues = 11; //Anzahl der ADU Daten für die Medianbildung
unsigned int i;
unsigned int timercount = 10000; //damit bei der Aktivierung gleich
ein Schaltvorgang ausgeführt wird
void send(unsigned int);
unsigned int findmedian(unsigned int[], unsigned int); //zur Verbesserung des ADU-
Ergebnisses: Medianbildung

void ausschalten(void);
void einschalten(void);

int main(void)
{
    WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD; //Stop watchdog timer
    BCSCTL1 = CALBC1_1MHZ; //SMCLK ist 1 MHz
    DCOCTL = CALDCO_1MHZ; //use internal DCO
    BCSCTL2 &= ~SELS; //SMCLK ist gleich DC0clock

    P1SEL = 0x00;
    P1DIR = 0x00;

    //LEDs
    P1DIR |= BIT0; //P1.0 output
    P1OUT &= ~BIT0; //P1.0 High; LED red on
    P2SEL = 0x00; //P2 als GPIO verwenden
    P2DIR |= BIT6; //P2.6 output
}

```

```

P2DIR |= BIT7;           //P2.7 output
P2OUT &= ~BIT6;          //P2.6 High; LED yellow on
P2OUT &= ~BIT7;          //P2.7 High; LED green on

P1DIR |= BIT2;           //P1.2 output, zur Steuerung des Senders
P1OUT &= ~BIT2;          //P1.2 low

P1DIR |= BIT5;           //P1.5 für Timer output (über Interrupt); Prüfen der
Timer-Zeit von 0,52428s
P1OUT &= ~BIT5;          //P1.5 low

//Initialisierung AD-Wandler
SD16CTL |= SD16SSEL_1;    //Clock für den ADC ist SMCLK
SD16CTL |= SD16XDIV_3;    //Dividiert durch 48
SD16CTL |= SD16DIV_3;     //Dividiert durch 8 --> 2604 Hz
SD16CTL |= SD16REFON;     //Interne Referenzspannung von 1,2V (600mV) wird
benutzt
SD16INCTL0 = SD16INCH_4;  //ADC A4 an P1.1; flagchannel = 11 ist schon
initialisiert!
SD16AE = SD16AE1;         //P1.1 A+, A- = GND
SD16CCTL0 |= SD16IE;       //Interrupt des ADC aktivieren
SD16CCTL0 |= SD16UNI;      //Zahlenbereich von 0 bis FFFF
SD16CCTL0 &= ~SD16XOSR;    //Oversampling
SD16CCTL0 |= SD16OSR_256;  //Abtastrate = 1MHz/(48*8*256)=10,2Hz
SD16CCTL0 &= ~SD16SNGL;    //continous conversion
SD16CCTL0 |= SD16SC;       //start conversion

P1DIR |= BIT4;             //SMCLK-Takt an P1.4 ausgeben
P1SEL |= BIT4;              //SMCLK-Takt an P1.4 ausgeben

//Timer zur Wiederholung der EIn-Ausschalt-Funktion
TACTL = TASSEL_2;          //Takt ist SMCLK
TACTL |= ID_3;              //Takt wird durch 8 geteilt
TACTL |= MC_2;              //zählt bis 65535; 1/(1MHz/8) * 65535 = 0,52428s
TACTL |= TAIE;              //interrupt enabled

_BIS_SR(GIE);              //alle Interrupts freigegeben

__delay_cycles(1000000);    //als warten bis das Medianarray gefüllt ist; prüfen
der drei LEDs

while (1)
{
    voltage = findmedian(werteP11, numofvalues);
    __no_operation();
}

```

```

if (voltage < v247)
{
    if(flagnachladung == 0)
    {
        SD16CCTL0 &= ~SD16IE; //Interrupt des ADC deaktivieren
        einschalten(); //Nachladung einschalten
        einschalten(); //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        einschalten(); //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        SD16CCTL0 |= SD16IE; //Interrupt des ADC aktivieren
        flagnachladung = 1;
        P1OUT &= ~BIT0; //LED red on
        P2OUT |= BIT6; //LED yellow off
        P2OUT |= BIT7; //LED green off
        __delay_cycles(10000000); //wait 10s
    }
}

if ((voltage > v247) && (voltage < v258))
{
    P2OUT &= ~BIT6; //LED yellow on; kein Schaltvorgang
erforderlich
}
else
{
    P2OUT |= BIT6; //LED yellow off
}

if(voltage > v258)
{
    if(flagnachladung > 0)
    {
        SD16CCTL0 &= ~SD16IE; //Interrupt des ADC deaktivieren
        ausschalten(); //Nachladung ausschalten
        ausschalten(); //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        ausschalten(); //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        SD16CCTL0 |= SD16IE; //Interrupt des ADC aktivieren
        flagnachladung = 0;
        P1OUT |= BIT0; //LED red off
        P2OUT |= BIT6; //LED yellow off
        P2OUT &= ~BIT7; //LED green on
    }
}

//der zuletzt ausgeführten Schaltvorgang wird wiederholt
//if (timercount > 9999) //5242,8s = 87,38 min.; zur zyklischen

```

```

Wiederholung des Schaltvorgangs
if (timercount > 4999) //2621,4s = 43,69 min.; zur zyklischen Wiederholung
des Schaltvorgangs
{
    timercount = 0;           //wird im Timer-Interrupt inkrementiert
    if (flagnachladung == 0)
    {
        //Ausschalten wiederholen
        SD16CCTL0 &= ~SD16IE; //Interrupt des ADC deaktivieren
        ausschalten();         //Nachladung ausschalten
        ausschalten();         //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        ausschalten();         //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        SD16CCTL0 |= SD16IE;  //Interrupt des ADC aktivieren
        P1OUT |= BIT0;          //LED red off
        P2OUT |= BIT6;          //LED yellow off
        P2OUT &= ~BIT7;         //LED green on
    }
    else
    {
        //Einschalten wiederholen
        SD16CCTL0 &= ~SD16IE; //Interrupt des ADC deaktivieren
        einschalten();         //Nachladung einschalten
        einschalten();         //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        einschalten();         //muss mindestens 2x ausgeführt werden
        SD16CCTL0 |= SD16IE;  //Interrupt des ADC aktivieren
        P1OUT &= ~BIT0;          //LED red on
        P2OUT |= BIT6;          //LED yellow off
        P2OUT |= BIT7;          //LED green off
    }
}

}//end while
}//end main

void einschalten()
{
    //Adresscode alle auf ON = 0 muss gesendet werden; 00000
    send(0);
    send(0);
    send(0);
    send(0);
    send(0);

    //Kanal B
    send(2);
    send(0);
}

```

```
send(2);
send(2);
send(2);

//send ein
send(0);
send(2);

//send sync
send(3);
}

void ausschalten()
{
    //Adresscode alle auf ON = 0 muss gesendet werden; 00000
    send(0);
    send(0);
    send(0);
    send(0);
    send(0);
    send(0);

    //Kanal B
    send(2);
    send(0);
    send(2);
    send(2);
    send(2);
    send(2);

    //send aus
    send(2);
    send(0);

    //send sync
    send(3);
}

void send(unsigned int ltype)
{
    //0, 1, 2, 3 für 0, 1, f, sync;
    if(ltype == 0)        //send 0, 4a 12a 4a 12a;    a = 81.25µs
    {
        P1OUT |= BIT2;
        _delay_cycles(325);
```