

---

Masterarbeit

---

# Wirkungsgradoptimierung einer Hochstromladeschaltung einer Lithium-Ionen-Zelle

---

**Herbert Ziegerhofer**

Datum(02/06/2015)



---

Institut für Elektrotechnik  
Institute of Electrical Engineering  
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18  
Tel.Nr.: +43/(0)3842-402-2401  
Fax: +43/(0)3842-402-2402  
[etechnik@unileoben.ac.at](mailto:etechnik@unileoben.ac.at)

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

---

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

---

## **Affidavit**

---

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Datum

---

Unterschrift

---

## **Danksagung**

---

Bedanken möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Weiß für die Unterstützung bei dieser Diplomarbeit.

---

## Kurzfassung

---

Seit einigen Jahren werden wiederaufladbare Batterien vermehrt in Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb verwendet. Dafür sind Batterien notwendig, die eine hohe Kapazität, ein großes Energie-Gewichts-Verhältnis und ein hohes Sicherheitsniveau aufweisen. Batterien, die mehr als 20 Prozent ihrer ursprünglichen Kapazität verloren haben, oder wo ein Batteriepaket nach längerer Verwendung bereits einige defekte Zellen enthält, müssen durch neue ersetzt werden. Diese Batterien können jedoch dann zum Einsatz kommen, wenn keine hohe Anfangskapazität vorausgesetzt wird, eventuell nach Ersetzen von defekten Zellen innerhalb eines Paketes.

Dafür muss der aktuelle Zustand der Batterien durch Lade- und Entlade-Zyklen überprüft werden, um wiederverwendbare Zellen herauszufinden.

In dieser Masterarbeit wird eine wirkungsgradoptimierte Ladeschaltung beschrieben, die in der Lage ist, eine einzelne Lithium-Ionen-Zelle mit hoher Stromstärke zu laden. Die verwendeten elektronischen und elektrischen Bauteile, wie Operationsverstärker und Schaltnetzteil (SNT), stammen aus dem kommerziellen Bereich.

Wegen der fixen Ausgangsspannung von Schaltnetzteilen, im vorliegenden Fall ein ATX Schaltnetzteil, wie es in Personal Computern verwendet wird, ist eine Regelung der Ausgangsspannung (einstellbarer Maximalwert der Ladeschlussspannung) und des maximalen Ausgangsstroms notwendig. Wichtige Parameter (Ausgangsspannung, Ausgangsstrom und Batterietemperatur) müssen während des Ladevorgangs vor allem im Hinblick auf Sicherheitsaspekte angezeigt (Sollwert und Istwert), überwacht und begrenzt werden. Falls Übertemperaturen auftreten, wird der Ladevorgang durch eine Schutzschaltung mit Speicherung des Ereignisses beendet.

Weitere Anforderungen wie höchstmöglicher Wirkungsgrad, netzfreundliches Verhalten (sinusförmige Stromaufnahme und Blindleistungskompensation durch aktive Leistungsfaktorkorrekturfilter) werden ebenfalls durch das Schaltnetzteil erfüllt.

Nach dem Entwurf wurde das Gerät aufgebaut und in Betrieb genommen. Danach wurden umfangreiche Tests und Messungen durchgeführt, besonders in Bezug auf den Wirkungsgrad.

Stichwörter: Wirkungsgradoptimierung ; hohe Stromstärke ; Ladeschaltung ; Lithium-Ionen-Zelle ; State of Health ; Schaltnetzteil ; Regelung ; Sollwert ; Istwert ; Überwachung ; Sicherheitsaspekt ; Schutzschaltung ; netzfreundliches Verhalten ; Leistungsfaktorkorrekturfilter ; Verlustleistungsregelung

---

## Abstract

---

Nowadays, more and more rechargeable batteries are used in vehicles with electric powertrain. For this reason, batteries with a high capacity, high energy per weight ratio, and high safety level equivalent to a high SOH (State of Health) are necessary. Batteries which have lost more than 20 percent of their original capacity or where the battery pack includes some few deteriorated cells after some longer time of usage must be replaced by new ones. However, these batteries can be reused in applications where high initial capacity is not mandatory, maybe after replacement of deteriorated cells inside the package.

The current state of batteries must be tested by charge and discharge cycles in order to decide which battery-cells can be reused.

The focus of this master thesis is on the charging cycle of one individual battery-cell with high current by usage of commercial electronic and electrical parts such as operational amplifier and switched-mode power supply (SMPS).

Due to the fixed output voltage of the used SMPS which is a low cost ATX power supply unit used in personal computers, a closed-loop control of output-voltage (selectable maximum end of charge voltage) and maximum output current must be implemented. Fundamental parameters (output-voltage, -current and battery-temperature) during charging have to be displayed (set-point-value and actual value), monitored and limited, especially with regard to safety considerations. In case of over-temperature a protective circuit cuts off charging and this event is stored.

Further requirements such as best possible efficiency, power-grid friendly behavior (sinusoidal current consumption and reactive power compensation because of active power factor correction) are also provided by the SMPS.

The device was designed, assembled and commissioned followed by extensive tests and measurements, especially concerning efficiency.

Keywords: efficiency improvement ; high current ; charging device ; lithium-ion-cell ; state of health ; switched-mode power supply ; closed-loop control ; set point value ; actual value ; monitoring ; safety considerations ; protective circuit ; power-grid friendly ; active power factor correction ; linear power dissipation control

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Eidesstattliche Erklärung .....	2
Affidavit .....	2
Danksagung .....	3
Kurzfassung .....	4
Abstract .....	5
Inhaltsverzeichnis .....	6
1 Aufgabenstellung .....	9
2 Batterien .....	10
2.1 Batteriezellenladung .....	10
2.1.1 Grundlagen zu Ladung von Lithium-Ionen-Zellen .....	10
2.1.2 Sicherheitsproblematik bei Lithium-Ionen-Zellen .....	10
2.1.3 Sicherheitsmaßnahmen .....	11
2.2 Batterien auf Lithium-Basis .....	12
2.2.1 Lithium-Ionen Batterie .....	12
2.2.2 Lithium-Eisen-Phosphat Batterie .....	13
2.3 Ladeverfahren .....	13
2.3.1 Konstantstrom-Ladeverfahren .....	13
2.3.2 Pulsladeverfahren .....	14
2.3.3 Konstantspannungs-Ladeverfahren .....	14
2.3.4 IU-Ladeverfahren (CCCV) .....	14
2.4 Batteriemanagement .....	14
2.4.1 Monitoring (inklusive Temperatur) .....	15
2.4.2 Balancer .....	15
2.4.3 Re-Use von Lithium-Ionen Batterien .....	16
3 Beschreibung verwendeter Bauteile .....	16
3.1 Operationsverstärker .....	17
3.1.1 Funktionsbeschreibung .....	17
3.1.2 Grundschaltungen .....	20
3.1.3 Nichtinvertierender Verstärker .....	20
3.1.4 Spannungsfolger .....	21
3.1.5 Differenzverstärker .....	22
3.1.6 Integrierender Verstärker .....	23
4 Schaltungen .....	24

4.1	Regelung von Spannung und Strom .....	24
4.1.1	Längsregelung mit MOSFET .....	25
4.1.2	Schaltregler .....	26
4.1.2.1	Aufwärtswandler (boost converter).....	27
4.1.2.2	Abwärtswandler (buck converter).....	28
4.1.2.3	Sperrwandler mit Transformator.....	28
4.1.2.4	Eintaktflusswandler .....	29
4.1.2.5	Gegentaktflusswandler mit Parallelspeisung.....	30
4.1.3	Potentialtrennung mit 50 Hz-Transformator .....	31
4.1.3.1	Sekundärseitiger Längsregler .....	31
4.1.3.2	Sekundärseitiger Schaltregler .....	32
4.1.4	Schaltnetzteil mit primärseitiger Taktung.....	32
4.1.5	Schaltnetzteil mit PFC (Power Factor Correction) .....	32
5	Aufbau der Hardware .....	33
5.1	Schaltungsfunktionen .....	33
5.2	Blockschaltbild.....	34
5.3	Funktionsweise der Schaltung.....	35
5.4	Schaltplan .....	36
5.5	Detailschaltungen .....	36
5.5.1	Istwerterfassung (inklusive Hochstrommessung) .....	37
5.5.2	Sollwertvorgaben.....	38
5.5.3	Anzeige der Soll- u. Istwerte .....	40
5.5.4	Regelung .....	42
5.5.5	Steuerung des Schaltnetzteils .....	44
5.5.6	Schaltnetzteil .....	45
5.5.7	Batterie .....	45
5.5.8	Gerätebedienung mit Not-Aus-Schalter.....	46
5.5.9	Zustandsanzeige mittels LED .....	47
5.5.10	Stromversorgung .....	48
5.5.10.1	Stromversorgung +12V / -12V .....	48
5.5.10.2	Stromversorgung +8V.....	48
5.5.11	Schutzschaltungen .....	49

5.6	Batteriesimulator .....	50
6	Elektromechanische Realisierung .....	50
6.1	Modifikation des PC-Schaltnetzteils .....	50
6.2	Experimentierplatinen.....	51
6.3	Anschlüsse .....	51
7	Messungen .....	51
7.1	Kontrolle des Übergangs von der Strom- zur Spannungsregelung .....	51
7.2	Messung der aus dem Netz entnommenen Leistung .....	54
7.3	Wirkungsgrad .....	57
8	Schaltungsreview .....	59
9	Zusammenfassung.....	60
10	Verzeichnisse.....	62
10.1	Literaturverzeichnis .....	62
10.2	Abkürzungen .....	65
10.3	Abbildungen .....	66
10.4	Tabellen .....	68
11	Anhang.....	I
11.1	Schaltplan .....	I
11.2	Platinen-Layout .....	VII
11.3	Stücklisten .....	XI
11.4	Aufgebaute Schaltung .....	XIX
11.5	Auswirkungen von Überladeversuchen .....	XX



---

# 1 Aufgabenstellung

---

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Entwicklung einer wirkungsgradoptimierten Ladeschaltung einer einzelnen Lithium-Ionen-Zelle mit folgenden Eckpunkten durchgeführt.

- Entwurf der Schaltung mit
  - vorgegebener Minimalspannung
  - einstellbarer Ladeschlussspannung
  - einstellbarer Ladestrom
  - Schutzschaltungen
  - Zustandsanzeigen mit Leuchtdioden
  - Visualisierung der Soll- und Istwerte mittels LCD-Anzeigen
- Aufbau der Schaltung
- Inbetriebnahme und Test der Schaltung
- Messung der
  - U/I – Kennlinie während des Ladevorgangs
  - aus dem Netz entnommenen Leistung
- Bestimmung des Wirkungsgrades der Ladeschaltung und Vergleich mit dem Wirkungsgrad einer Ladeschaltung mit Verlustleistungsregelung.

Die Aufgabenstellung wurde im Einvernehmen zwischen Betreuung (Institut für Elektrotechnik) und Kandidaten erstellt.

o. Univ.-Prof. Dr. Helmut Weiß

Dipl.-Ing. Herbert Ziegerhofer

---

## 2 Batterien

---

---

### 2.1 Batteriezellenladung

---

---

#### 2.1.1 Grundlagen zu Ladung von Lithium-Ionen-Zellen

---

- Am Beginn des Ladevorgangs wird mit konstantem Strom geladen bis die Ladespannung  $U_{\text{ist}}$  die maximale Ladeschlussspannung erreicht. Die Spannungswerte betragen wie folgt:
  - Lithium-Ionen Batterien
    - Minimale Spannung: 3,0 V
    - Nominalspannung: 3,6 V
    - Maximale Ladespannung: 4,2 V
  - Lithium-Eisen-Phosphat Batterie
    - Minimale Spannung: 2,8 V
    - Nominalspannung: 3,3 V
    - Maximale Ladespannung: 3,6 V
- Danach wird mit konstanter Spannung bei sinkendem Ladestrom weitergeladen, bis der Ladestrom einen Minimalwert unterschreitet.

---

#### 2.1.2 Sicherheitsproblematik bei Lithium-Ionen-Zellen

---

An Ausfall- und Zerstörungseffekten können auftreten:

- Überspannung: Erfahrungswert 5,0 V bis 5,5 V / Zelle, 50 % Überladung (die volle Zelle wird weiter geladen und nimmt ca. 50 % der Nennkapazität zusätzlich auf).

- Externe Übertemperatur (thermal runaway): Tritt bei etwa 150 °C ein. Thermodynamische bzw. chemische Vorgänge in der Batterie bringen diese zum "Durchgehen".
- Kurzschluss (über mehr als einige Sekunden): Ablauf durch innere Aufheizung wie bei thermal runaway.
- Laden mit höherem Ladestrom bei Unterspannung: Es kommt zu chemischen Reaktionen mit Bildung von metallischem Lithium innerhalb der Batterie. Es bilden sich durch Wachstum im elektrischen Feld Spitzen (Dendriten) aus, die den Separator durchdringen können und einen inneren Zellkurzschluss verursachen.
- Innerer Zelldefekt (Versagen des Separators): Es treten innere punktuelle Kurzschlüsse auf.
- Tiefentladung auf weniger als 1 Volt (gegebenenfalls Separatorzerstörung): Ist typisch bei billigen E-Bike-Zellen.
- Umpolung: Es erfolgt ein Zellspannungsaufbau in umgekehrter Polarität.

---

### **2.1.3 Sicherheitsmaßnahmen**

---

Zur Vermeidung von Schäden und von negativen Effekten ist eine Überwachung von

- Übertemperatur
- Überspannung
- Unterspannung
- Überstrom

notwendig und wurde auch in der Ladeschaltung realisiert.

---

## 2.2 Batterien auf Lithium-Basis

---

Die ersten Lithium-Ionen-Batterien wurden ab 1962 in Form von Primärbatterien (nicht mehr aufladbar) entwickelt. Durch Sanyo erfolgte 1972 die Markteinführung.

Die ersten wiederaufladbaren Batterien der Firma Moli Energy (1985) mit einer negativen Lithiumelektrode und einer positiven Molybdänsulfidelektrode hatten Sicherheitsprobleme durch das Lithium. (Vgl. [1] S. 13)

Der Durchbruch gelang durch die Verwendung von Interkalationselektroden, bei denen Lithium-Ionen reversibel in Wirtsgitter ein und ausgelagert werden ([2] S. 509).

---

### 2.2.1 Lithium-Ionen Batterie

---

Lithium-Ionen-Batterien bestehen aus zwei Elektroden zwischen denen sich ein ionenleitfähiger Elektrolyt und eine poröse Membran (Separator) befinden. Durch den Separator werden die beiden Elektroden voneinander isoliert. Beim Laden bzw. Entladen wandern Lithium-Ionen zwischen den Elektroden hin- und her und werden in den Aktivmaterialien eingelagert (Interkalation). (Vgl. [1] S. 14)

Verwendete Materialien [3]:

Positive Elektrode (Kathode beim Entladen, Anode beim Laden):

- Aktivmaterial: Lithium-Metalloxid:  $\text{LiCoO}_2$  ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$
- Ableiter: Aluminium

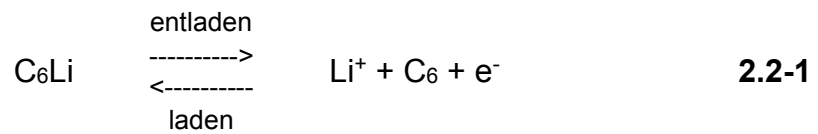
Negative Elektrode (Anode beim Entladen, Kathode beim Laden):

- Aktivmaterial: Graphit
- Ableiter: Kupfer

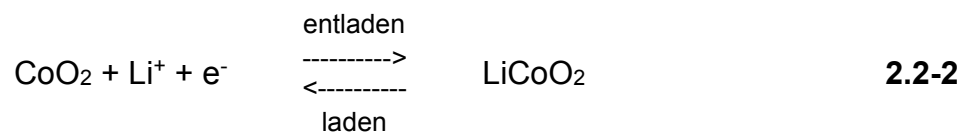
Elektrolyt: z. B. Lithiumhexafluorophosphat ( $\text{LiPF}_6$ )

Elektrochemische Reaktionen:

Negative Elektrode:



Positive Elektrode:



---

## 2.2.2 Lithium-Eisen-Phosphat Batterie

Bei diesem Batterietyp wird in der positiven Elektrode Lithium-Eisenphosphat eingesetzt. Die negative Elektrode besteht aus Graphit mit eingelagertem Lithium-Ionen.

Im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie ist thermisches Durchgehen (thermal runaway) nicht möglich.

---

## 2.3 Ladeverfahren

Vgl. [4]

Je nach Batterietyp sind unterschiedliche Ladeverfahren notwendig. Es werden Ladespannung und –strom so gesteuert, dass die Batterie innerhalb ihrer Betriebsgrenzen vollständig aufgeladen wird.

---

### 2.3.1 Konstantstrom-Ladeverfahren

Die Ladung erfolgt über die gesamte Ladezeit mit konstantem Strom. Damit keine Überladung auftritt, muss das Laden mit Erreichen der Ladeschlussspannung (d. h. vor der Vollladung) beendet werden.

---

### **2.3.2 Pulsladeverfahren**

Beim Pulsladeverfahren handelt es sich um einen Sonderfall der Konstantstromladung. Das Laden erfolgt in Pulsen mit konstantem Strom. In den stromlosen Phasen kann die innere Spannung der unbeeinflussten Zelle gemessen werden.

---

### **2.3.3 Konstantspannungs-Ladeverfahren**

Beim Laden mit konstanter Spannung wird der Ladestrom durch den inneren Widerstand der Batterie begrenzt. Im Verlauf des Ladevorgangs sinkt der Ladestrom von einem hohen Anfangswert bis zu einem kleinen Reststrom, der die Restentladung ausgleicht. Bei der entladenen Batterie würden hierbei sehr große und üblicherweise unzulässig hohe Ströme auftreten.

---

### **2.3.4 IU-Ladeverfahren (CCCV)**

Darunter versteht man eine Kombination aus Konstantstrom- und Konstantspannungs-Ladeverfahren (CCCV: constant current constant voltage). Zu Beginn wird mit konstantem Strom geladen, bis die eingestellte Ladeschlussspannung erreicht ist. Danach wird mit konstanter Spannung weitergeladen, wobei der Ladestrom sinkt. Das Ladeende wird erreicht, wenn der Ladestrom unter einen minimalen Wert fällt.

Dieses Ladeverfahren wird bei der in dieser Masterarbeit beschriebenen Ladeschaltung angewendet.

---

## **2.4 Batteriemangement**

Vgl. [1] S. 177

Einzelne Batteriezellen werden meist zu Batteriepaketen zusammengefasst. Dabei ist sowohl eine Parallel- als auch eine Reihenschaltung der Zellen möglich. Zum Schutz der Zellen ist ein Batteriemangementssystem (BMS) notwendig, wodurch

Zyklenanzahl und Lebensdauer erhöht werden, aber auch die grundsätzliche Sicherheit gewährleistet wird.

Bei Lithium-Ionen-Batterien ist ein BMS besonders wichtig, da die Batterien vor Überladung und Übertemperatur geschützt werden müssen. Sonst können Beschädigungen oder im Extremfall eine Zerstörung dieser Zellen eintreten.

---

#### **2.4.1 Monitoring (inklusive Temperatur)**

---

Vgl. [1] S. 177–178

Zu überwachen sind folgende Parameter:

- Maximale Ladeschlussspannung:
- Minimale Entladespannung
- Maximal erlaubte Temperatur der Zelle
- Maximaler Ladestrom

Ein Überschreiten der maximalen Ladespannung kann eine spontane Selbstzündung auslösen (hohes Sicherheitsrisiko).

Tiefentladung verursacht irreversible Schäden (Kapazitätsverlust, erhöhte Selbstentladung, auch Zerstörung des Separators dabei möglich).

Durch zu hohe Temperaturen und Spannung während des Ladevorgangs kann ein Kapazitätsverlust eintreten.

---

#### **2.4.2 Balancer**

---

Vgl. [1] S. 180–185

Beim Laden von Batteriemodulen mit mehreren Zellen ist darauf zu achten, dass einzelne Zellen nicht überladen werden. Einzelne Zellen können unterschiedliche Restladung oder verringerte Kapazität aufweisen und dadurch die maximale Spannung früher erreichen als andere. Daher kann es zu Überspannung an Zellen oder zu einem frühzeitigen Ende des Ladevorgangs kommen. Durch die nicht vollständige Ladung tritt ein Kapazitätsverlust des Pakets ein.

Bei der Reihenschaltung wird die Länge des Lade- und Entladevorgangs durch die schwächste Zelle bestimmt.

Mit Hilfe von Balancern wird versucht einen Ladungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen durchzuführen. Dabei unterscheidet man folgende Methoden:

- Passiver Ladungsausgleich (resistiv): Überschüssige Energie wird durch Widerstände in Wärme umgewandelt, ein Überladen von Zellen wird dadurch vermieden. Beim Entladen bringt diese Methode keine Verbesserung.
- Aktiver Ladungsausgleich: Ladungen werden zwischen den Zellen mit DC/DC-Wandlern verschoben. Diese Methode ist während des Ladens und des Entladens und auch im Ruhezustand verwendbar. Möglich sind Verfahren mit kapazitiver oder induktiver Energiezwischenspeicherung sowie ein Transformator-isolierter Ladungstransfer.

---

### **2.4.3 Re-Use von Lithium-Ionen Batterien**

Auf dem Gebiet der Wiederverwendung (Re-Use) von Lithium-Ionen Batterien ist noch sehr viel Forschung erforderlich.

Vor allem das Erkennen des aktuellen Zustands ist von großer Bedeutung. Bereits verwendete und nicht mehr den ursprünglichen Spezifikationen entsprechende Zellen weisen andere Parameter als neue auf, z.B.:

- Unbekannten Innenwiderstand
- Selbstentladung
- Ladewirkungsgrad
- vom Neuzustand abweichende Rest- bzw. Nutzkapazität

---

## **3 Beschreibung verwendeter Bauteile**

Die wichtigsten in der Ladeschaltung verwendeten Bauteile werden in diesem Kapitel beschrieben.



---

## 3.1 Operationsverstärker

---

Als Operationsverstärker wird ein mehrstufiger Gleichspannungsverstärker bezeichnet ([5] S. 509). Sie gehören zu den analogen integrierten Schaltkreisen und bestehen im Prinzip aus 3 gleichspannungsgekoppelten Verstärkerstufen ( [6] S. 403): Eingangsseitig ein Differenzverstärker, als 2. Stufe ein Spannungsverstärker und ausgangsseitig ein Stromverstärker ( [6] S. 406).

Als Versorgungsspannung werden meist erdsymmetrische Spannungen bis zu +/- 18 V verwendet ( [7] S. 233), unsymmetrische Spannungen mit z.B. 5 V bezogen auf Masse sind ebenfalls möglich. Die hier beschriebene Ladeschaltung wird mit +/- 12 V betrieben.

---

### 3.1.1 Funktionsbeschreibung

---

Bei der Beschreibung des Verhaltens unterscheidet man zwischen idealen und realen Operationsverstärkern mit folgenden Eigenschaften ( [8]):

**Tabelle 1: Eigenschaften idealer bzw. realer Operationsverstärker**

	V	$U_0$	$V_{CM}$	Eingangsstrom	Ausgangsimpedanz
Ideal	"sehr hoch" ( $\rightarrow \infty$ )	0 $\rightarrow$ keine Offsetspannung	0 $\rightarrow$ keine Gleichtakt- verstärkung	$I_+ = I_- = 0$ ( $R_i \rightarrow \infty$ )	$\rightarrow 0$
Real	für DC z. B. $10^6$	$\neq 0$ , mit Temperatur und Langzeitdrift	$\neq 0$ , Verstärkung auch des Mittel- wertes der Spannungen an den Eingängen	$I_+ \neq 0, I_- \neq 0$	$> 0$

## Idealer Operationsverstärker:

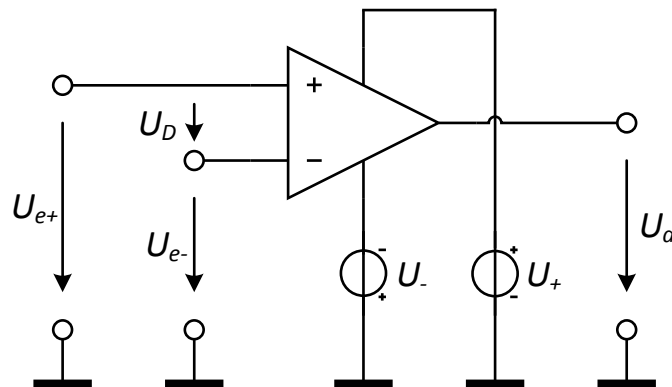


Abbildung 1: Idealer Operationsverstärker

- + nicht invertierender Eingang
- invertierender Eingang
- U<sub>+</sub> positive Versorgungsspannung
- U<sub>-</sub> negative Versorgungsspannung
- U<sub>e+</sub> positive Eingangsspannung
- U<sub>e-</sub> negative Eingangsspannung
- U<sub>a</sub> Ausgangsspannung
- U<sub>D</sub> Differenzeingangsspannung

Differenzeingangsspannung:

$$U_D = U_{e+} - U_{e-} \quad 3.1-1$$

Ausgangsspannung:

$$U_a = V * (U_{e+} - U_{e-}) \quad 3.1-2$$

## Realer Operationsverstärker:

Ausgangsspannung in allgemeiner Form:

$$U_a = V * (U_{e+} - U_{e-} - U_0) + V_{CM} * (U_{e+} + U_{e-}) * \frac{1}{2} \quad 3.1-3$$

V Differenzverstärkung, z. B.  $10^6$

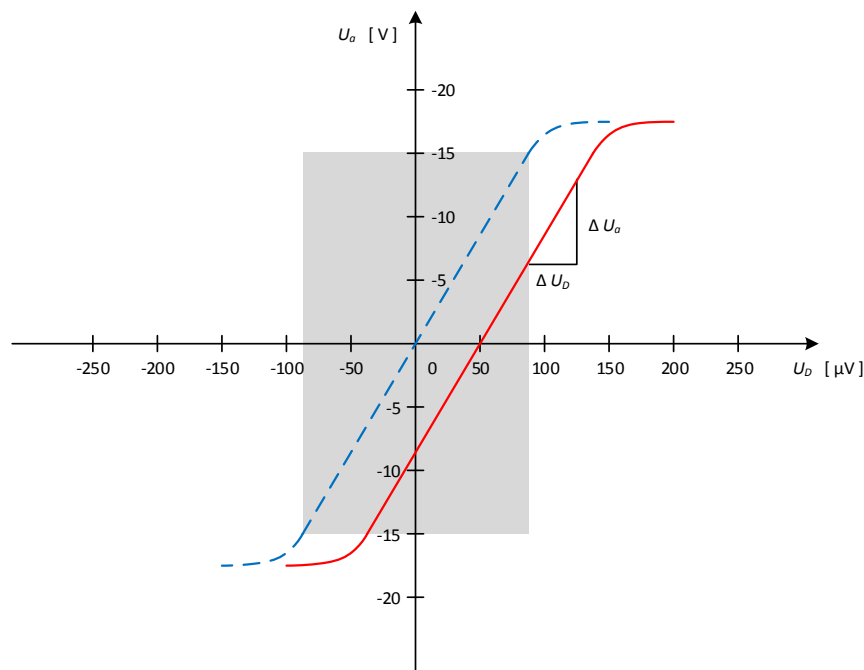
$U_0$  Eingangsoffsetspannung

$V_{CM}$  Gleichtaktverstärkung

CM Common Mode

$(U_{e+} + U_{e-}) * \frac{1}{2}$  Gleichtaktspannung

Im Gegensatz zum idealen Verstärker, bei dem bei gleich großen Eingangsspannungen die Ausgangsspannung Null ist, tritt beim realen Verstärker auch in diesem Fall eine kleine Ausgangsspannung auf. Damit die Ausgangsspannung Null wird, muss man an einen der beiden Eingänge eine kleine Spannung anlegen. Diese Fehlerkorrekturspannung nennt man Eingangsoffsetspannung  $U_0$  des Verstärkers. Wie in Abbildung 2 dargestellt wirkt sich das in einer Verschiebung (rote Linie) der Übertragungskennlinie (vgl. [7] S. 245) aus.



**Abbildung 2: Übertragungskennlinie eines realen Operationsverstärkers**

---

### 3.1.2 Grundschaltungen

---

Wegen der hohen Differenzverstärkung des Operationsverstärkers wird am Ausgang auch bei kleinen Differenzspannungen am Eingang die positive oder negative Maximalspannung erreicht (Aussteuergrenze).

Daher ist eine externe Beschaltung notwendig, um den Verstärker im linearen Bereich betreiben zu können. Meist wird dafür eine Gegenkopplung verwendet, bei der ein Teil der Ausgangsspannung an den invertierenden Eingang zurückgeführt wird [8].

Nachfolgend werden die in der Ladeschaltung verwendeten Beschaltungsarten beschrieben.

---

### 3.1.3 Nichtinvertierender Verstärker

---

Vgl. ([7] S. 248–249)

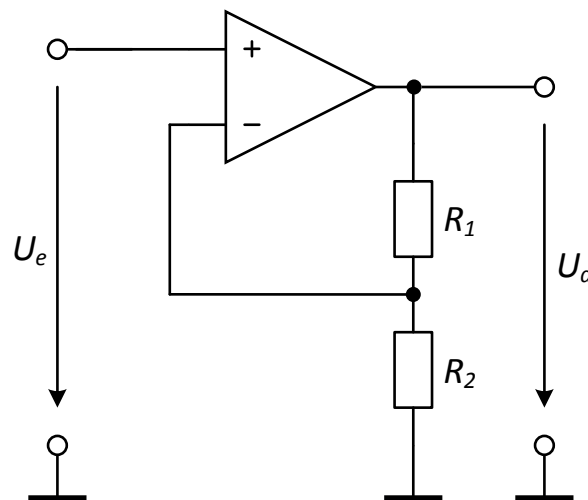


Abbildung 3: Nichtinvertierender Verstärker

Zwischen dem Eingang und dem Ausgang des nicht invertierenden Verstärkers tritt keine Phasendrehung auf (Ein- und Ausgangsspannung weisen dasselbe Vorzeichen auf).

Die Ausgangsspannung wird durch externe Widerstände festgelegt:

$$U_a = U_e * \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad 3.1-4$$

Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die über Widerstände eingestellte Verstärkung wesentlich niedriger ist (um einige Zehnerpotenzen) als die innere Verstärkung des Operationsverstärkers.

---

### 3.1.4 Spannungsfolger

---

Vgl. [7] S. 249 ; [8]

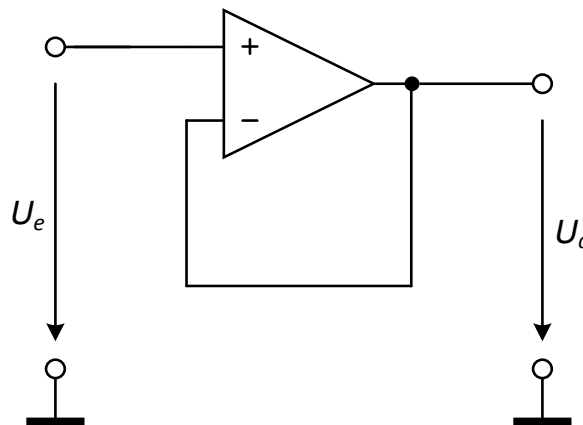


Abbildung 4: Spannungsfolger

Der Spannungsfolger ist ein Sonderfall des nicht invertierenden Verstärkers. Die Ausgangsspannung folgt in Größe und Polarität der Eingangsspannung. Die Schaltung dient der Entkopplung einer Signalquelle von einer nachfolgenden Belastung.

---

### 3.1.5 Differenzverstärker

---

Vgl. [7] S. 254–255)

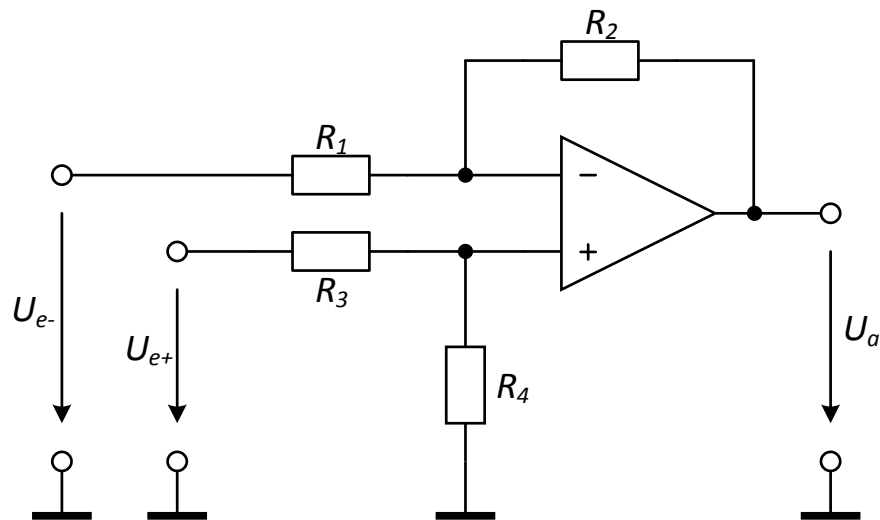


Abbildung 5: Differenzverstärker

Mit einem Differenzverstärker wird die Differenz der beiden Eingangsspannungen verstärkt. Mit der Vereinfachung  $R_1 = R_3$  und  $R_2 = R_4$  ergibt sich die Ausgangsspannung  $U_a$ :

$$U_a = (U_{e+} - U_{e-}) * \frac{R_2}{R_1}$$

3.1-5

---

### 3.1.6 Integrierender Verstärker

---

Vgl. ([7] S. 263–264) , [8]

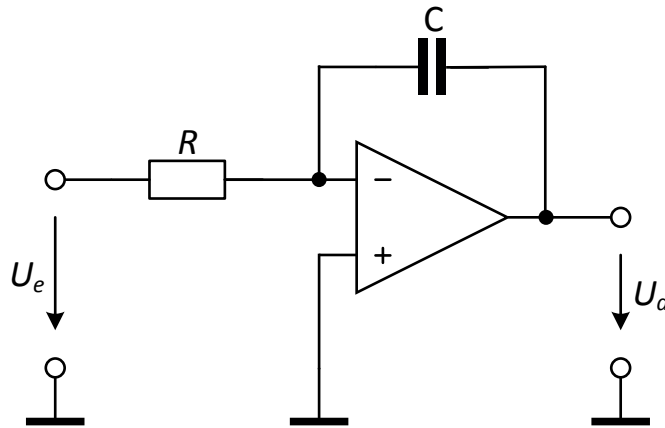


Abbildung 6: Integrierender Verstärker

Die Ausgangsspannung entspricht dem Zeitintegral der Eingangsspannung:

$$U_a(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_e(t) dt + U_a(0) \quad 3.1-6$$

Der Kondensator kann am Anfang des Integrationsvorgangs bereits geladen sein. Das wird durch die Spannung  $U_a(0)$  berücksichtigt. Wenn der Ausgangswert gleich Null sein soll, ist eine Hilfsschaltung notwendig, die den Kondensator vor Beginn des Integrationsvorgangs entlädt.

Bei konstant positiver Eingangsspannung erzeugt der invertierende Integrator eine linear mit der Zeit abfallende Ausgangsspannung.

---

## **4 Schaltungen**

### **4.1 Regelung von Spannung und Strom**

---

Für das Laden von Batterien ist es unbedingt notwendig, dass dafür vorgesehene Stromversorgung eine Gleichspannung liefert, die von Netzspannungsschwankungen und Lastschwankungen unabhängig ist. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten, die nachfolgend kurz beschrieben werden.



### 4.1.1 Längsregelung mit MOSFET

Vgl. [5] S. 898–899; [7] S. 280–282; [6] S. 782–783

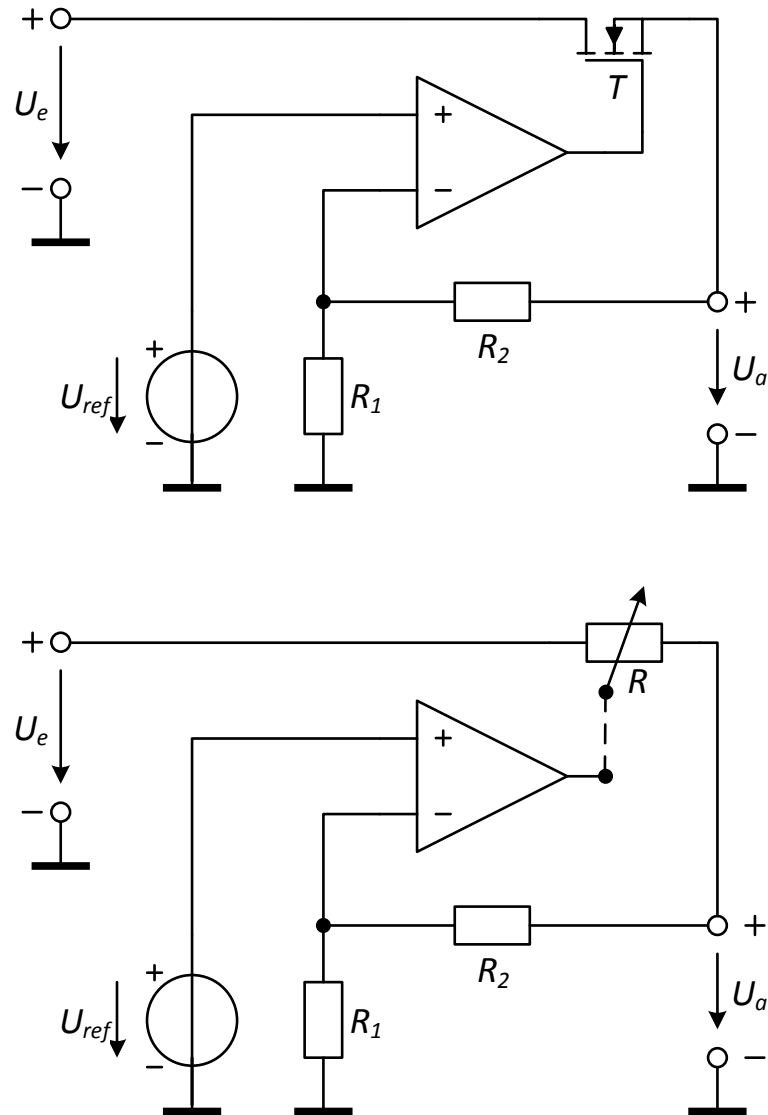


Abbildung 7: Längsregler mit MOSFET

Der Spannungsregler ist mit einem Operationsverstärker als Regelverstärker aufgebaut. Ein Operationsverstärker kann den benötigten Ausgangsstrom nicht liefern und daher ist ein MOSFET notwendig, der den geforderten Ausgangsstrom liefert. Der Operationsverstärker ist als nicht invertierender Verstärker geschaltet. Die Erzeugung der Referenzspannung  $U_{ref}$  kann z. B. durch eine Zenerdiode erfolgen. Der MOSFET  $T$  kann, wie im zweiten Bild von Abbildung 7 dargestellt, als gesteuerter Widerstand betrachtet werden.

Die Verlustleistung  $P_V$  des Reglers, die als Verlustwärme am MOSFET umgesetzt wird, ergibt sich aus der Differenz von Eingangs- und Ausgangsspannung und dem Laststrom  $I_A$  wie folgt:

$$P_V = (U_e - U_a) * I_a \quad 4.1-1$$

---

### 4.1.2 Schaltregler

---

Vgl. ([7] S. 285)

Zur Verminderung der Verluste werden Schaltregler eingesetzt, bei dem die aufgenommene Energie in einer Spule zwischengespeichert und an einen Ladekondensator weitergegeben wird.

Die in den folgenden Abschnitten 4.1.2.1 bis 4.1.2.5 dargestellten Schalter S werden in der Praxis meist durch MOSFET realisiert. Im Abschnitt 4.1.2.1 werden beide Darstellungen vorgestellt.

### 4.1.2.1 Aufwärtswandler (boost converter)

[5] S. 923–924

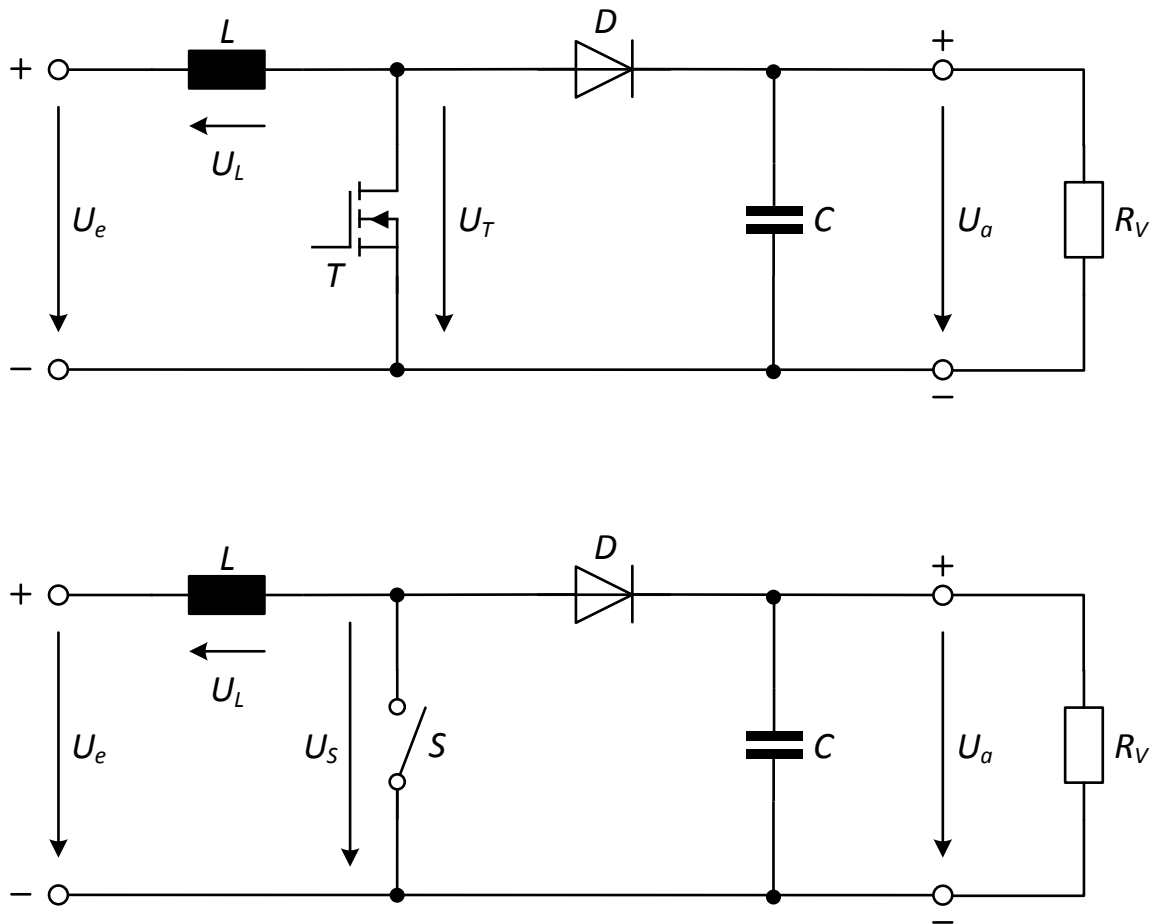


Abbildung 8: Aufwärtswandler (Boost-converter)

Der Aufwärtswandler wird auch als Hochsetzsteller bezeichnet, da die Ausgangsspannung größer als die Eingangsspannung ist.

Schalter geschlossen: Die Induktivität  $L$  wird an die Eingangsspannung  $U_e$  geschaltet, wodurch der Strom  $i_L$  ansteigt und Energie in die Induktivität geladen wird.

Schalter offen: Erst jetzt fließt Strom über die Diode  $D$  auf die Ausgangsseite.

Die Energieübertragung erfolgt in der Sperrphase des Schalters.

---

#### 4.1.2.2 Abwärtswandler (buck converter)

---

Vgl. [5] S. 912–913

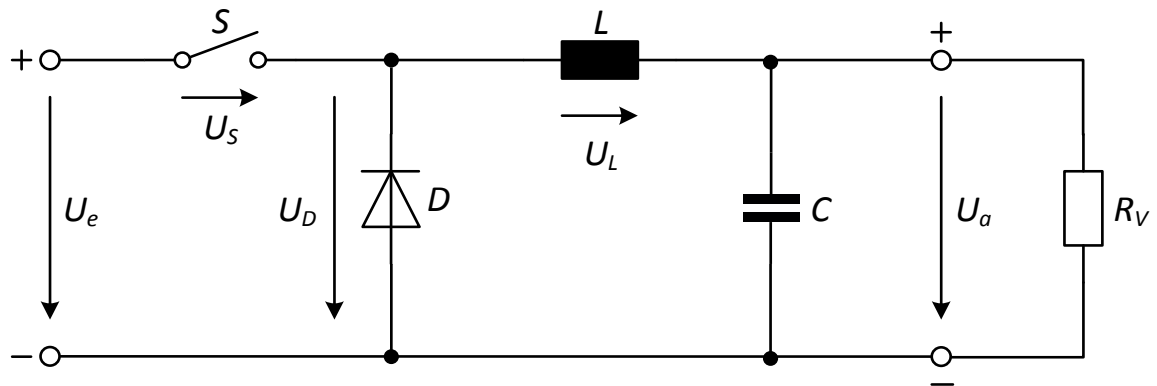


Abbildung 9: Abwärtswandler (Buck-converter)

Der Abwärtswandler wird auch Tiefsetzsteller bezeichnet, da die gelieferte Ausgangsspannung kleiner als die Eingangsspannung ist.

Schalter  $S$  geschlossen: Es fließt ein Laststrom durch die Induktivität  $L$  und den Verbraucher  $R_V$  bei gesperrter Diode  $D$ .

Schalter  $S$  offen: Die in der Induktivität gespeicherte Energie wird abgebaut, wobei der Laststrom durch den Verbraucher weiterfließt, allerdings auch durch die Diode  $D$ . Durch den Glättungskondensator  $C$  wird die Welligkeit des Ausgangsstroms bestimmt.

---

#### 4.1.2.3 Sperrwandler mit Transformator

---

Vgl. [5] S. 932–933

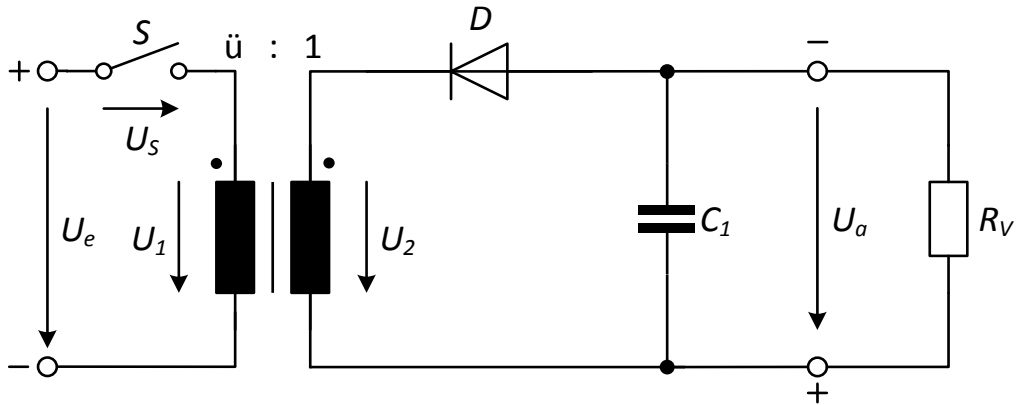


Abbildung 10: Sperrwandler

Die Energieübertragung erfolgt in der Sperrphase des Schalters (Schalter offen): Beim Schließen des Schalters S wird in der Hauptinduktivität des Transformators Energie gespeichert ( $LI^2/2$ ), die Diode D verhindert das Weiterfließen des Stromes in die Last. Mit dem Öffnen des Schalters S kann primärseitig ( $U_1$ ) der Magnetisierungsstrom nicht mehr fließen, jedoch ist nun der Weg über die Diode D offen, wodurch am Ausgang eine negative Spannung entsteht.

#### 4.1.2.4 Eintaktflusswandler

Vgl. [5] S. 934–935

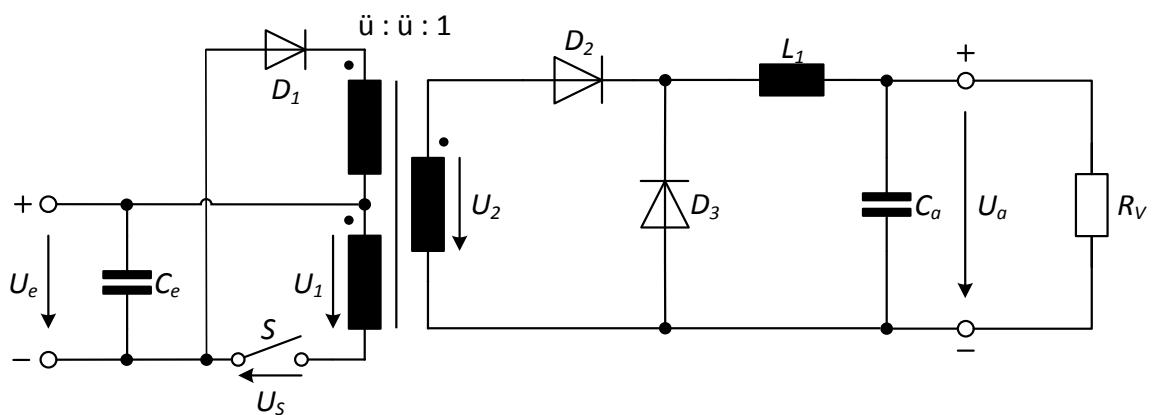


Abbildung 11: Eintaktflusswandler

Die Energieübertragung erfolgt in der Leitphase des Schalters (Schalter geschlossen): Die Energie wird in der Speicherdrossel L gespeichert. Die mit dem

Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  transformierte Eingangsspannung liegt an der Sekundärwicklung an. Wegen der gleichsinnigen Wicklung der ersten Primärwicklung und der Sekundärwicklung ist die Sekundärspannung positiv und die Diode  $D_2$  leitet. Wegen des Magnetfeldaufbaus in der Speicherdrossel  $L$  steigt der Strom linear an und der Kondensator  $C_a$  wird auf die Ausgangsspannung aufgeladen.

Mit dem Öffnen des Schalters  $S$  sperrt auch die Diode  $D_2$ . Damit die im Transformator gespeicherte Energie keinen Spannungsimpuls mit extrem hoher Amplitude erzeugen kann (Zerstörung des Leistungsschalters), erhält der Transformator eine zweite Primärwicklung (Entmagnetisierungswicklung), die dieselbe Wicklungszahl wie die erste aufweist. Die Diode  $D_1$  wird leitend, wenn die Spannung an dieser Wicklung auf  $U_e$  angestiegen ist, wodurch die Spannung am Schalter auf die doppelte Eingangsspannung  $U_e$  begrenzt wird. Somit wird die gespeicherte Magnetisierungsenergie des Transformators an die Eingangsspannungsquelle zurück geliefert.

#### 4.1.2.5 Gegentaktflusswandler mit Parallelspeisung

Vgl. [5] S. 936–937

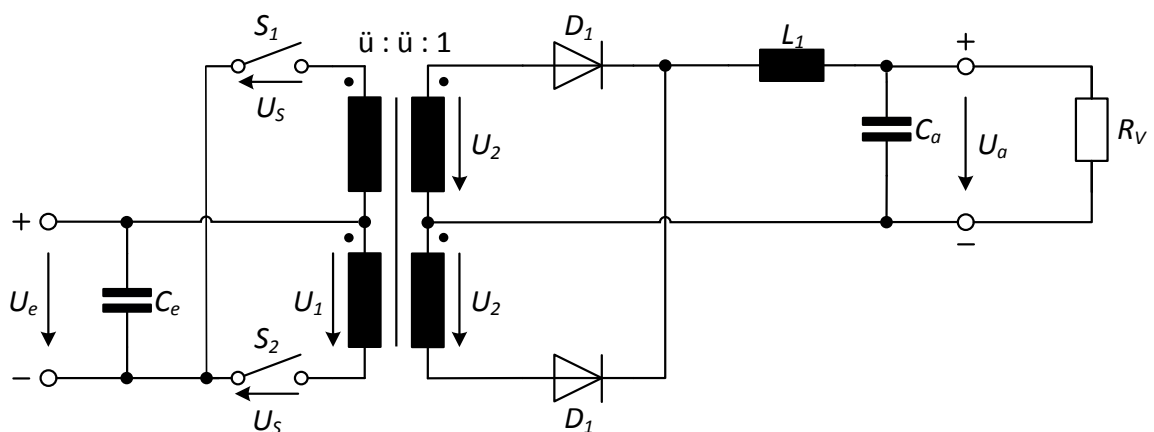


Abbildung 12: Gegentaktflusswandler mit Parallelspeisung

Beim Gegentaktflusswandler werden zwei Leistungsschalter wechselweise eingeschaltet und beide Einschaltphasen zur Energieübertragung genutzt. Im Transformator findet eine immer wechselnde Magnetisierung statt. Er wird in

symmetrisch in beiden Richtungen angesteuert und es entfällt die Entmagnetisierungswicklung.

---

### **4.1.3 Potentialtrennung mit 50 Hz-Transformator**

---

Vgl. [5] S. 889

Mit einem 50 Hz-Transformator wird eine galvanische Trennung vom Versorgungsnetz durchgeführt. Durch den nachgeschalteten Gleichrichter (Einweg- oder Brückengleichrichter) wird ein Sieb-Elko geladen. Meist wird eine geregelte Gleichspannung benötigt, die auf 1% bis 10 % genau einzuhalten ist. Daher ist eine Regelung der Ausgangsspannung notwendig.

---

#### **4.1.3.1 Sekundärseitiger Längsregler**

---

Vgl. [9] S. 4; [5] S. 898-890

Die Regelung der Ausgangsspannung erfolgt im einfachsten Fall durch einem linearen Spannungsregler (z. B. Abbildung 7: Längsregler mit MOSFET).

Der Wirkungsgrad hängt von der abzubauenen Potentialdifferenz ab und beträgt nur zwischen 25 % und 50 %.

---

#### 4.1.3.2 Sekundärseitiger Schaltregler

---

Anstelle des linearen Spannungsreglers wird sekundärseitig ein Schaltregler (z. B. Abbildung 9: Abwärtswandler (Buck-converter) eingesetzt.

Im Vergleich zum sekundärseitigen Längsregler treten wesentlich geringere Verluste auf, sodass der sekundärseitige Schaltregler einen Wirkungsgrad von 80 % bis über 90 % erzielen kann.

---

#### 4.1.4 Schaltnetzteil mit primärseitiger Taktung

---

Der netzseitige Diodengleichrichter lädt einen Kondensator auf, der die 10 ms zwischen den Sinusspannungsspitzen überbrücken muss. Es entsteht ein Eingangsstrom mit hohen Pulshöhen und kurzer Dauer (z. B. 2 ms), der außerdem nicht sinusförmig ist.

---

#### 4.1.5 Schaltnetzteil mit PFC (Power Factor Correction)

---

Vgl. [9] S. 4–8

Schaltnetzteile ohne PFC weisen eine impulsförmige Stromaufnahme auf. Um die Forderungen der Netzbetreiber nach "netzfreundlichem Verhalten" zu erfüllen, müssen elektrische Verbraucher einen genügend hohen Leistungsfaktor (Power Faktor) aufweisen.

Man unterscheidet 2 Arten von PFC-Schaltungen:

**Passive PFC-Schaltung:** (Vgl. [10] S. 183)

Eine PFC-Drossel wird auf der Wechselspannungsseite eingebaut. Dadurch steigt der Ladestrom nur verzögert an.

Es ist ein kostengünstiges Verfahren bei kleinen Leistungen.

**Aktive PFC-Schaltung:** (Vgl. [9] S. 6–9)

Prinzipiell besteht die Schaltung aus einem Gleichrichter, einem Filterkondensator, dem DC/DC-Wandler 1, einen Speicherkondensator und dem DC/DC-Wandler 2.

Durch den ersten DC/DC-Wandler (meist ein Aufwärtswandler) wird die gleichgerichtete, pulsierende Netzspannung  $u_{\text{Netz}}$  auf die Spannung des



Speicherelkos  $U_C$  hochgesetzt. Sie liegt über dem Scheitelwert der Netzspannung auf 350 bis 400 V.

Im zweiten DC/DC-Wandler (z.B. Abwärtswandler, Flusswandler) wird diese Spannung auf die gewünschte Verbraucherspannung abgesenkt.

Als Ergebnis wird der Netzstrom  $i_{\text{Netz}}$  auf Sinusform geregelt. Die Sinusamplitude bestimmt die Eingangsleistung, d.h. die Amplitude des sinusförmigen Eingangssignals wird durch die  $U_C$ -Regelung vorgegeben.

---

## 5 Aufbau der Hardware

---

---

### 5.1 Schaltungsfunktionen

---

Es sind folgende Schaltungsfunktionen definiert:

- Vorgabe der Sollwerte über Potentiometer
- Anzeige dieser Sollwerte in Digital-Displays
- Anzeige der Istwerte in Digital-Displays
- Zustandsanzeige über verschiedenfarbige LED (Konstantstromladung, Konstantspannungsladung, Ladung beendet, Spannung außerhalb des Sollbereichs, Übertemperatur.
- Istwert-Erfassung (Spannung, Strom, Temperatur)
- Ablöseregung: Auf die Stromregelung folgt die Spannungsregelung
- Schutzeinrichtung bezüglich unzulässiger Zellenspannung und –Temperatur

## 5.2 Blockschaltbild

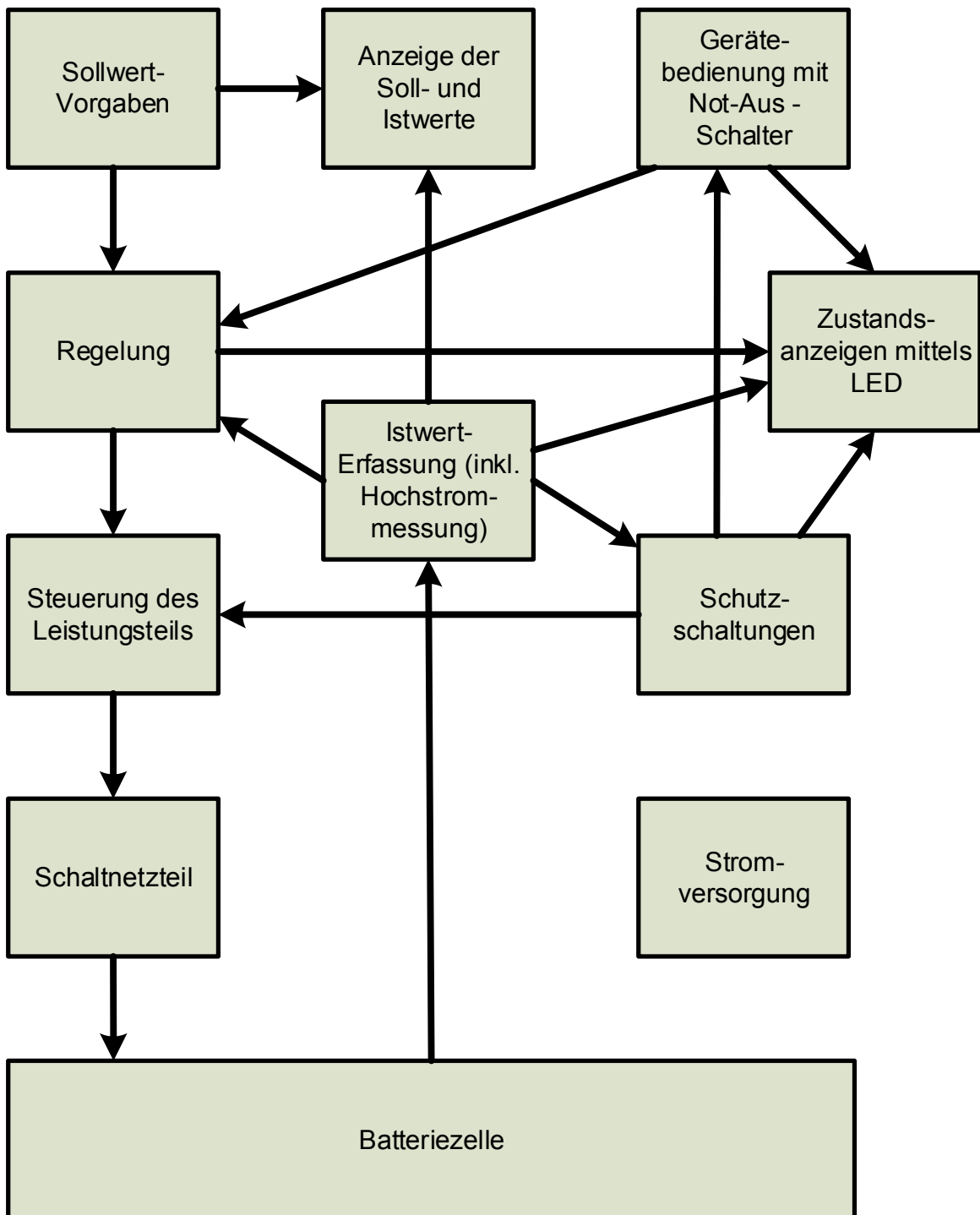


Abbildung 13: Blockschaltbild

Die zentralen Elemente der im Blockschaltbild dargestellten Funktionsblöcke sind die "Istwert-Erfassung" und die "Regelung".

---

## 5.3 Funktionsweise der Schaltung

---

Die Funktionsweise der Schaltung wird anhand des Blockschaltbildes beschrieben.

**"Istwert-Erfassung"**: Dient zur Messung der tatsächlichen Spannung der Batterie, des aktuellen Ladestroms und der Batterietemperatur.

**"Sollwert-Vorgaben"**: Mit 3 Potentiometern werden der Maximalwert der Ladeschlussspannung, der maximale Ausgangsstrom und die maximal erlaubte Batterietemperatur eingestellt. Die dafür notwendige Referenzspannung wird von einem Festspannungsregler zur Verfügung gestellt.

**"Anzeige der Soll- und Istwerte"**: Auf 6 LCD-Anzeigeelementen werden die 3 Sollwerte und die 3 Istwerte angezeigt.

**"Regelung"**: Durch Vergleichen der Soll- und der Istwerte werden Steuersignale für die "Steuerung des Schaltnetzteils" und digitale Signale für die "Zustandsanzeigen mittels LED" erzeugt. Die "Regelung" wird außerdem durch die "Gerätebedienung mit Not-Aus-Schalter" beeinflusst.

**"Steuerung des Schaltnetzteils"**: Die von der "Regelung" gelieferten Signale werden in Steuersignale umgewandelt und über einen Optokoppler an das "Schaltnetzteil" weitergeleitet.

**"Schaltnetzteil"**: Der für das Laden der Batterie notwendige Ladestrom wird durch ein ATX Schaltnetzteil, wie es in Personal Computern verwendet wird, zur Verfügung gestellt. Wegen der fixen Ausgangsspannung eines derartigen Netzteiles ist eine Regelung der Ausgangsspannung (einstellbarer Maximalwert der Ladeschlussspannung) zu implementieren.

**"Batterie"**: Lithium-Ionen-Batterie, die aufgeladen wird.

**"Gerätebedienung mit Not-Aus-Schalter"**: Das Ladegerät wird über einen Schalter ein- und ausgeschaltet. Um es im Notfall sehr schnell ausschalten zu können, wurde ein Not-Aus-Schalter eingebaut.

**"Zustandsanzeigen mittels LED"**: Der Betriebszustand der Ladeschaltung wird mit 5 Leuchtdioden mit den Farben rot, gelb, orange, grün und blau angezeigt.

Bei Übertemperatur der Batterie wird zusätzlich ein akustisches Warnsignal ausgegeben.

**"Schutzschaltungen"**: Durch zusätzliche Schutzeinrichtungen werden die Batteriespannung und der Ladestrom überwacht. Bei Überschreitung der Maximalwerte wird der Ladevorgang abgebrochen, mit je einer roten Leuchtdiode angezeigt, und dieses Ereignis wird zusätzlich noch gespeichert. Nach Beseitigung der Ursache für die Überschreitung der Maximalwerte kann der Ladevorgang nur durch Aus- und neuerliches Einschalten des Ladegerätes wieder gestartet werden.

**"Stromversorgung"**: Die Stromversorgung der Ladeschaltung erfolgt durch 2 Netzteile, die stabilisierte Ausgangsspannungen liefern. Ein Netzteil liefert für die LCD-Anzeigen eine Ausgangsspannung von +8 V, das zweite für den Hauptteil der Ladeschaltung eine positive (+ 12 V) und eine negative (- 12 V) Ausgangsspannung. Die Masseanschlüsse der beiden Netzteile sind nicht miteinander verbunden. Das Schaltnetzteil wird direkt mit der Netzspannung versorgt.

---

## 5.4 Schaltplan

Der vollständige Schaltplan befindet sich im Anhang (Schaltplan).

---

## 5.5 Detailschaltungen

Zur genaueren Beschreibung der Schaltung werden Teilschaltungen, die einem im Blockschaltbild dargestellten Funktionsblock entsprechen, dargestellt.

### 5.5.1 Istwerterfassung (inklusive Hochstrommessung)

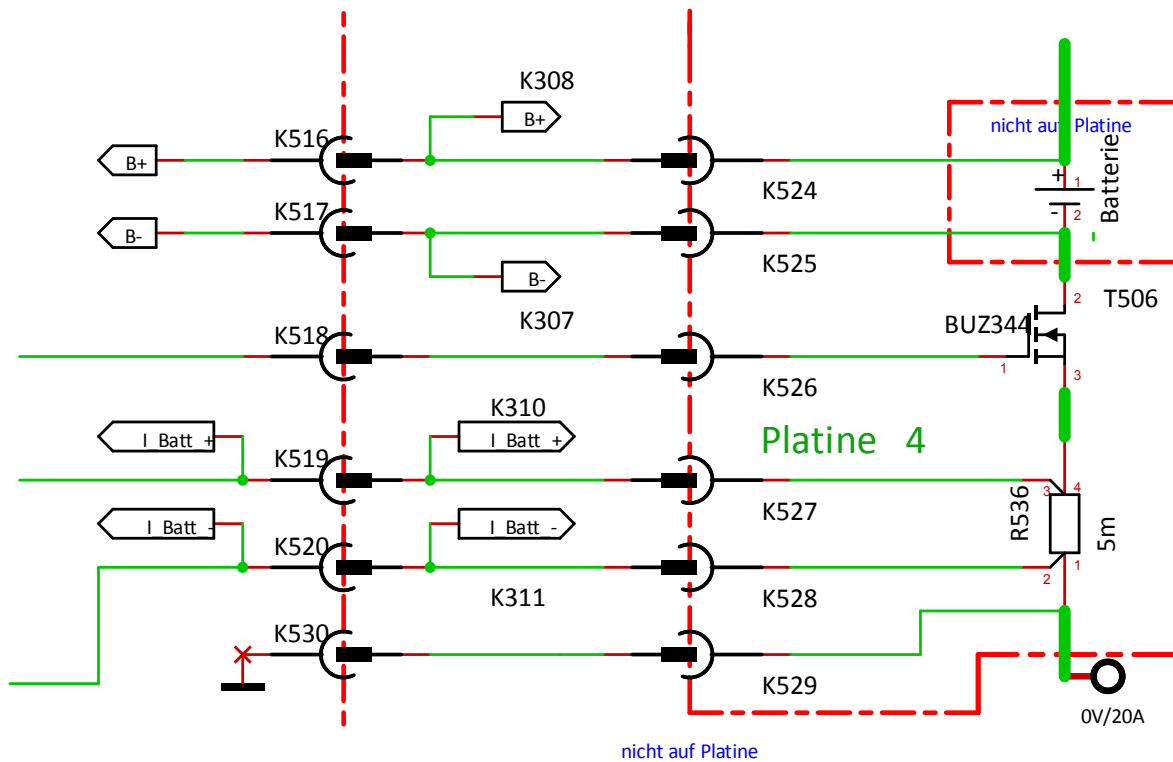


Abbildung 14: Erfassung der Istwerte

Die aktuelle Spannung der Batterie wird direkt an den Batterieklemmen abgenommen. Die Weiterleitung des Messwertes erfolgt über die Klemmen K524 und K525 auf Platine 4 zur Platine 3 (Klemme K516 und K517), wo die Weiterverarbeitung im Funktionsblock "Schutzschaltungen" erfolgt. Über die Klemmen K308 und K307 wird die "Regelung" auf Platine 1 mit den Messsignalen versorgt.

Der Ladestrom verursacht an R536 (5 mΩ) einen Spannungsabfall. Dieser Messwiderstand weist eine Toleranz von 0,5 % und einen Vierleiteranschluss zur Erhöhung der Messgenauigkeit auf. [11]

Der MOSFET-Transistor T506 wird benötigt, um eine Schnellabschaltung des Ladevorgangs auch bei hohem Ladestrom gefahrlos durchführen zu können.

## 5.5.2 Sollwertvorgaben

Damit Sollwerte vorgegeben werden können, muss aus der Versorgungsspannung von +12 V eine Referenzspannung von hoher Genauigkeit und Stabilität abgeleitet werden.

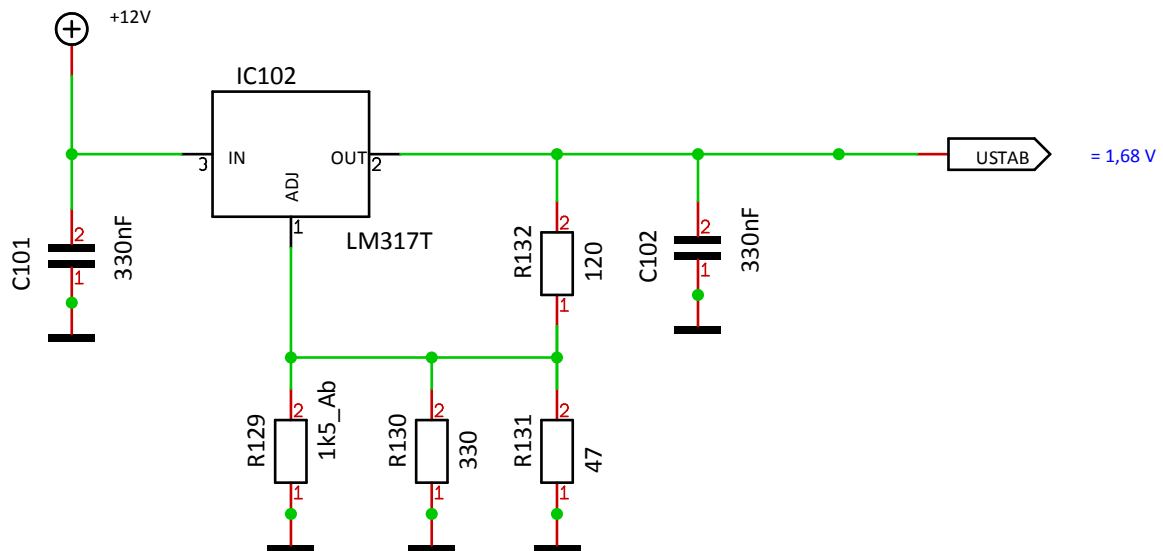


Abbildung 15: Erzeugung der Referenzspannung

Die Referenzspannung  $U_{STAB}$  wird lt. [12] berechnet mit

$$U_{STAB} = U_{Ref} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + (I_{ADJ} * R_2) \quad (5.5-1)$$

$(I_{ADJ} * R_2)$  ist vernachlässigbar, da  $I_{ADJ}$  typischerweise nur 50  $\mu$ A beträgt.

Der typische Wert von  $U_{Ref}$  beträgt 1,25 V .

$R_2$  wird durch die Parallelschaltung der Widerstände  $R_{129}$ ,  $R_{130}$  und  $R_{131}$  repräsentiert,  $R_1$  durch den Widerstand  $R_{132}$ .  $R_{129}$  dient in erster Linie zum Abgleich, um die gewünschte Referenzspannung von 1,68 V zu erzeugen. Rechnerisch ergibt sich mit den oben angegebenen Widerstandswerten eine Referenzspannung von 1,667 V. Da die verwendeten Metallfilmwiderstände eine Toleranz von 1 % aufweisen, konnte bei der realen Schaltung eine Referenzspannung gemessen werden, die zwischen 1,680 V und 1,681 V schwankte.

Die Sollwerte für die maximale Batterietemperatur wird durch das Potentiometer P101 eingestellt, der Maximalwert der Ladeschlussspannung durch P301 und der maximale Ladestrom durch P302.

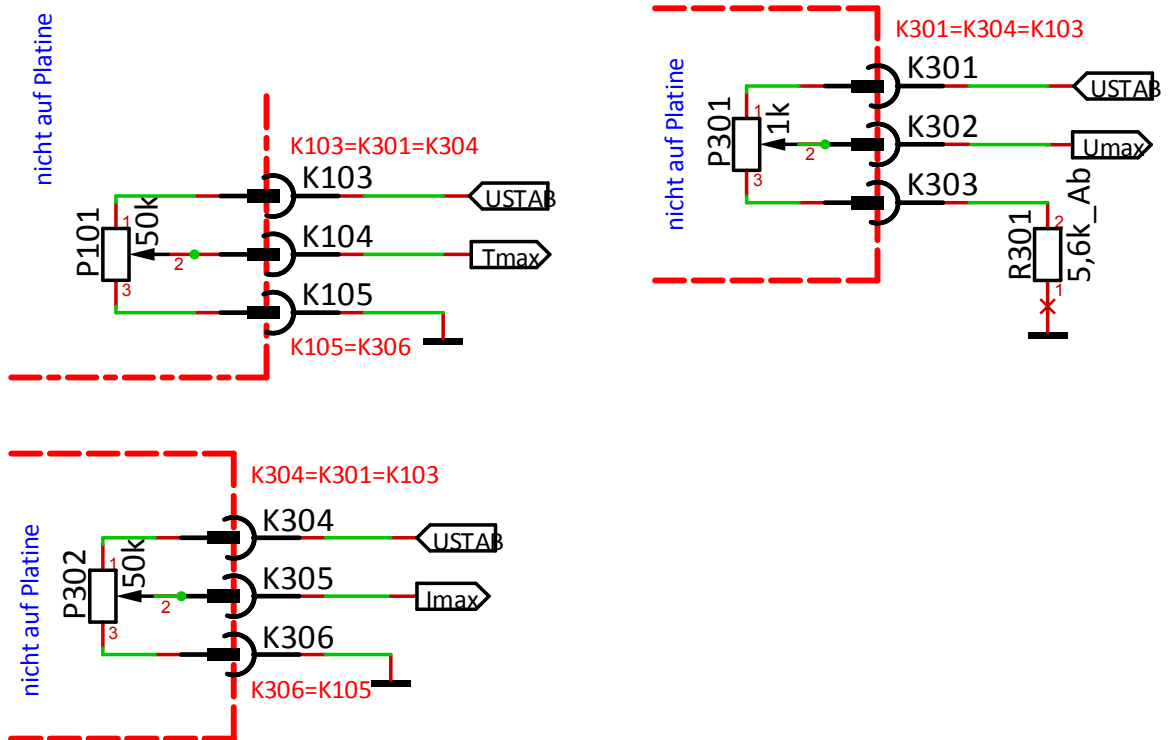


Abbildung 16: Ableitung der Sollwerte aus der Referenzspannung

### 5.5.3 Anzeige der Soll- u. Istwerte

Zur Anzeige wurden kostengünstige Digitalmeter-Module eingesetzt. Da die Versorgung dieser Module gegenüber dem Bezugseingang für die Messung (COM-Eingang) entkoppelt sein muss, ist eine potentialgetrennte Modul-Stromversorgung eingerichtet.

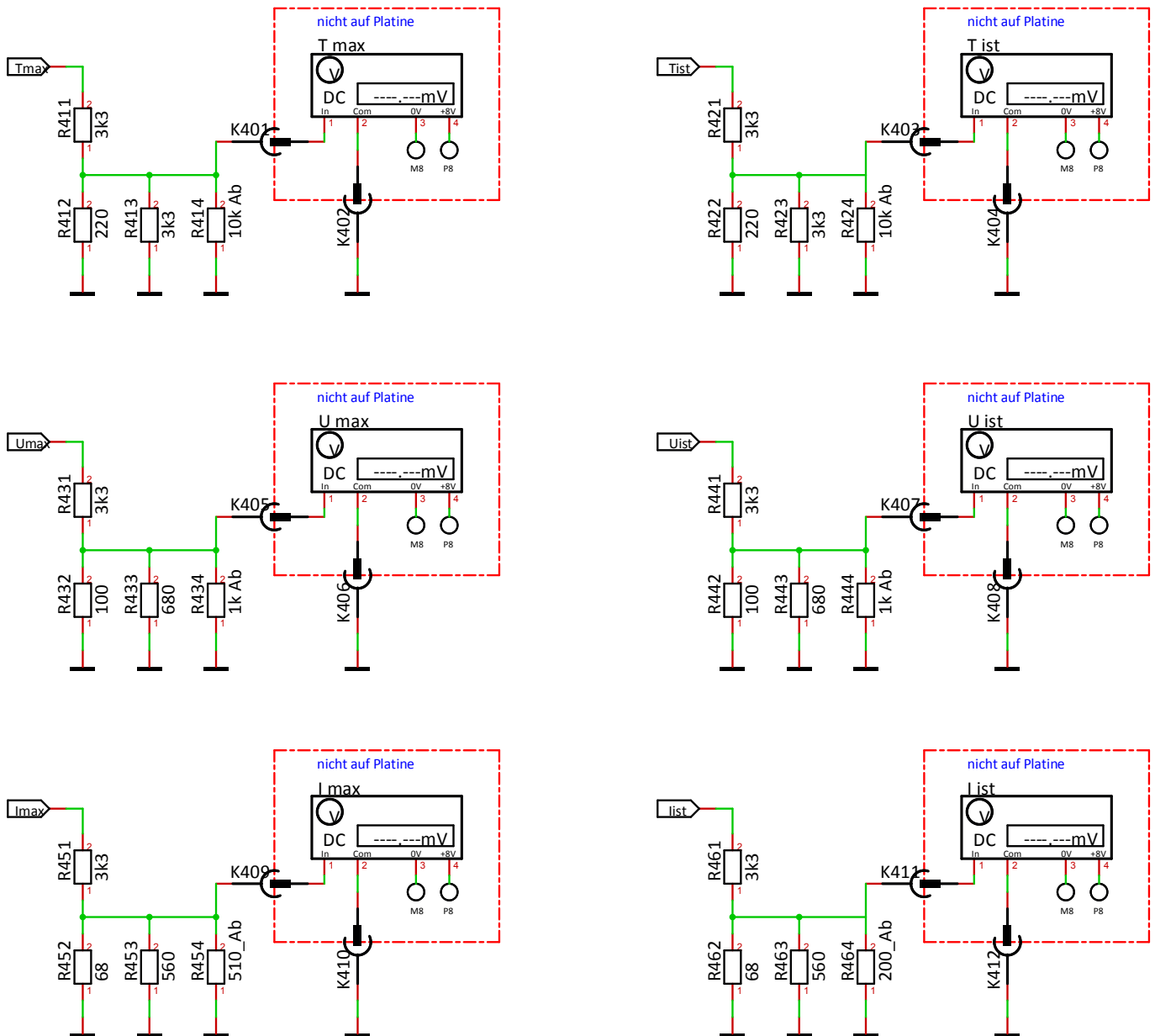


Abbildung 17: Spannungsmessmodule mit LCD – Anzeigen



Die Soll- und Istwerte von Batterietemperatur, Ladespannung und Ladestrom werden mit Spannungsmessmodulen mit LCD-Anzeige angezeigt. Die Spannungsversorgung der Anzeigen erfolgt durch ein Netzteil mit +8 V. Die maximal erlaubte Eingangsspannung der Messmodule beträgt 200 mV.

Da die Sollwerte aus der Referenzspannung  $U_{\text{STAB}}$  abgeleitet werden, kann die höchste zu messende Spannung 1,68 V nicht überschreiten. Die Anpassung dieser Spannung an die zulässige Eingangsspannung und die zu messende Größe wird mit Hilfe von Spannungsteilern durchgeführt.

Die Istwerte werden durch die Regelung bzw. durch die Schutzschaltungen begrenzt, so dass ein Überschreiten der zulässigen Messspannungen nicht möglich ist.

Zwischen gemessener Spannung und zu messender Größe besteht folgender Zusammenhang:

**Tabelle 2: Beziehung zwischen Messgröße und Anzeige**

Maximalen Eingangsspannung von 1,68 V (= 100 %) für	Zu messende Größe	Anzeige
Batterietemperatur	$\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	100 mV
Ladespannung	$U = 4,2 \text{ V}$	42 mV
Ladestrom	$I = 20 \text{ A}$	20 mV

Berechnung der Anzeigespannung für die maximale Ladespannung  $U_{\text{max}}$  (1,68 V).

Die Widerstandswerte beziehen sich auf Abbildung 17.

$$U_{\text{max-Anzeige}} = U_{\text{max}} * \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_{432}} + \frac{1}{R_{433}} + \frac{1}{R_{434}}}}{R_{413} + \frac{1}{\frac{1}{R_{432}} + \frac{1}{R_{433}} + \frac{1}{R_{434}}}} \quad (5.5-2)$$

$$U_{\text{max-Anzeige}} = 1,68 * \frac{\frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{680} + \frac{1}{3000}}}{3300 + \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{680} + \frac{1}{3000}}} = 0,04205 \text{ V} = 42,05 \text{ mV} \quad (5.5-3)$$

---

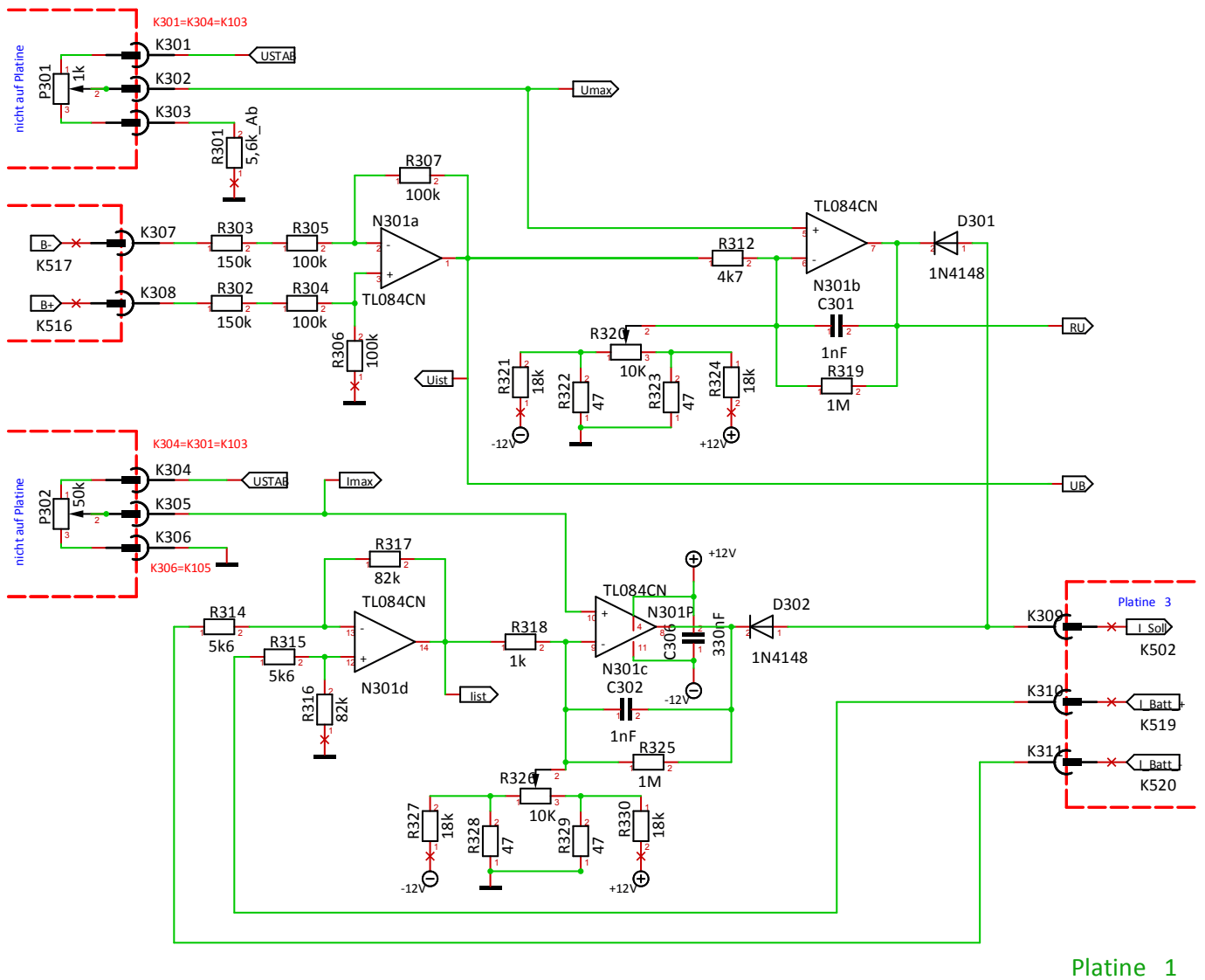
#### **5.5.4 Regelung**

---

Durch die Regelung werden die Istwerte den durch die Potentiometer vorgegebenen Sollwerten und dem Zustand der zu ladenden Batterie angepasst bzw. bei Überschreiten von höchstzulässigen Grenzwerten wird der Ladevorgang abgebrochen.

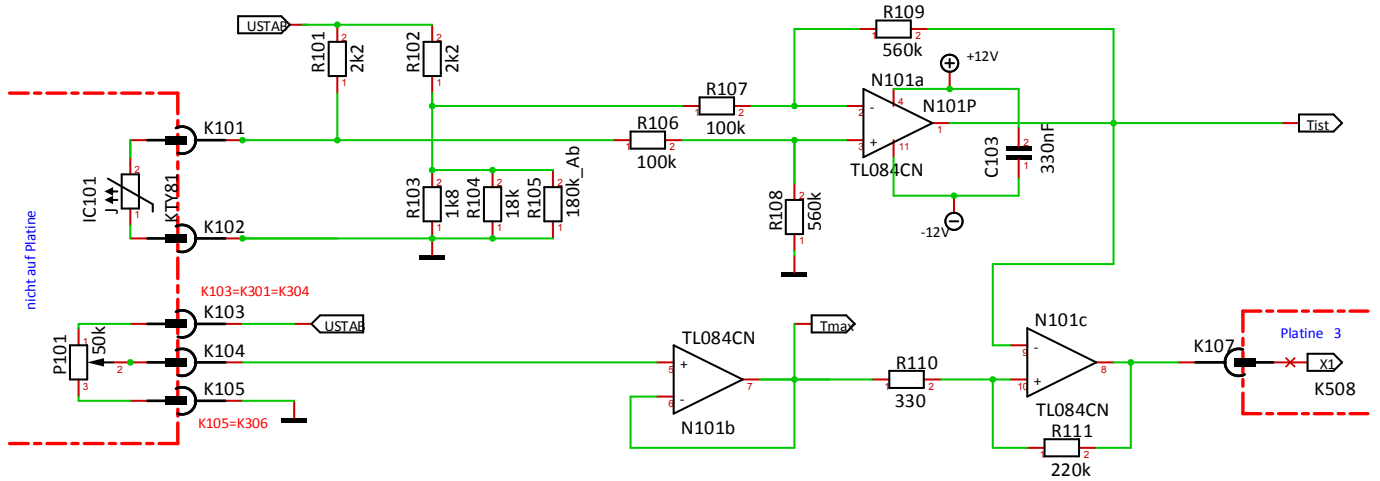
Die geregelten bzw. überwachten Größen sind

- die maximale Ladeschlussspannung,
- der maximale Ausgangsstrom,
- die höchstzulässige Batterietemperatur.



**Abbildung 18: Regelung der vorgegebenen Spannungs- und Stromwerte**

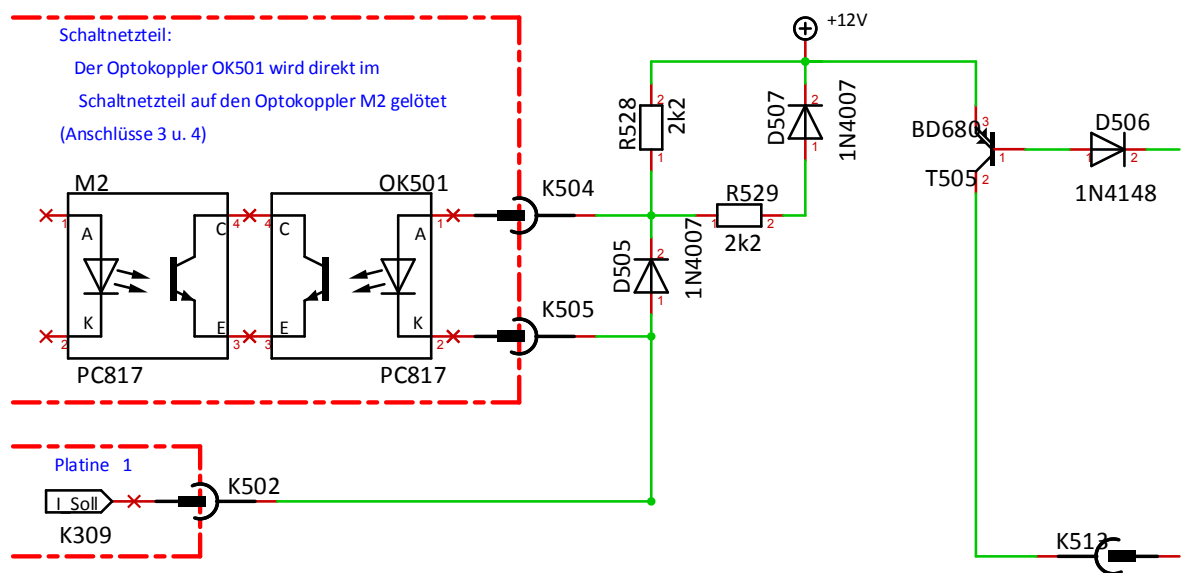
Die Regelung ist als Ablöseregung ausgebildet: Entweder N301b (wenn der Spannungssollwert erreicht ist) oder N301c (wenn der Maximalstrom ansteht) bestimmen – über die Dioden D301 bzw. D302 entkoppelt – die Spannung an K309, welche den Regel-Optokoppler treibt.



**Abbildung 19: Überwachung der maximalen Batterietemperatur**

Der verwendete Temperatursensor KTY81 wird in einer Brückenschaltung ausgewertet. N101c vergleicht als Schmitt-Trigger Maximal- und Istwert der Temperatur. Bei Überschreiten der höchstzulässigen Temperatur kippt das Signal X1 → "0".

### 5.5.5 Steuerung des Schaltnetzteils



**Abbildung 20: Steuerung des Schaltnetzteils mit einem Optokoppler**

Das Schaltnetzteil wird im Originalzustand über den Optokoppler M2 geregelt: Steigt die Ausgangsspannung über den Sollwert, erhöht sich der über die Optokoppler LED fließende Strom, die Kollektor-Emitterspannung (M2, Spannung zwischen den Anschlüssen 4 und 3 des Optokoppler) verringert sich, der Strom durch den Optokoppler-Ausgang erhöht sich, wodurch die Ausgangsspannung auf den Sollwert abgesenkt wird.

---

### **5.5.6 Schaltnetzteil**

Das Schaltnetzteil liefert den für das Laden der Batterie notwendigen Strom.

---

### **5.5.7 Batterie**

Die Batterie wird über einen Hochstrom-Klemmenanschluss mit der Ladeschaltung verbunden.

### 5.5.8 Gerätebedienung mit Not-Aus-Schalter

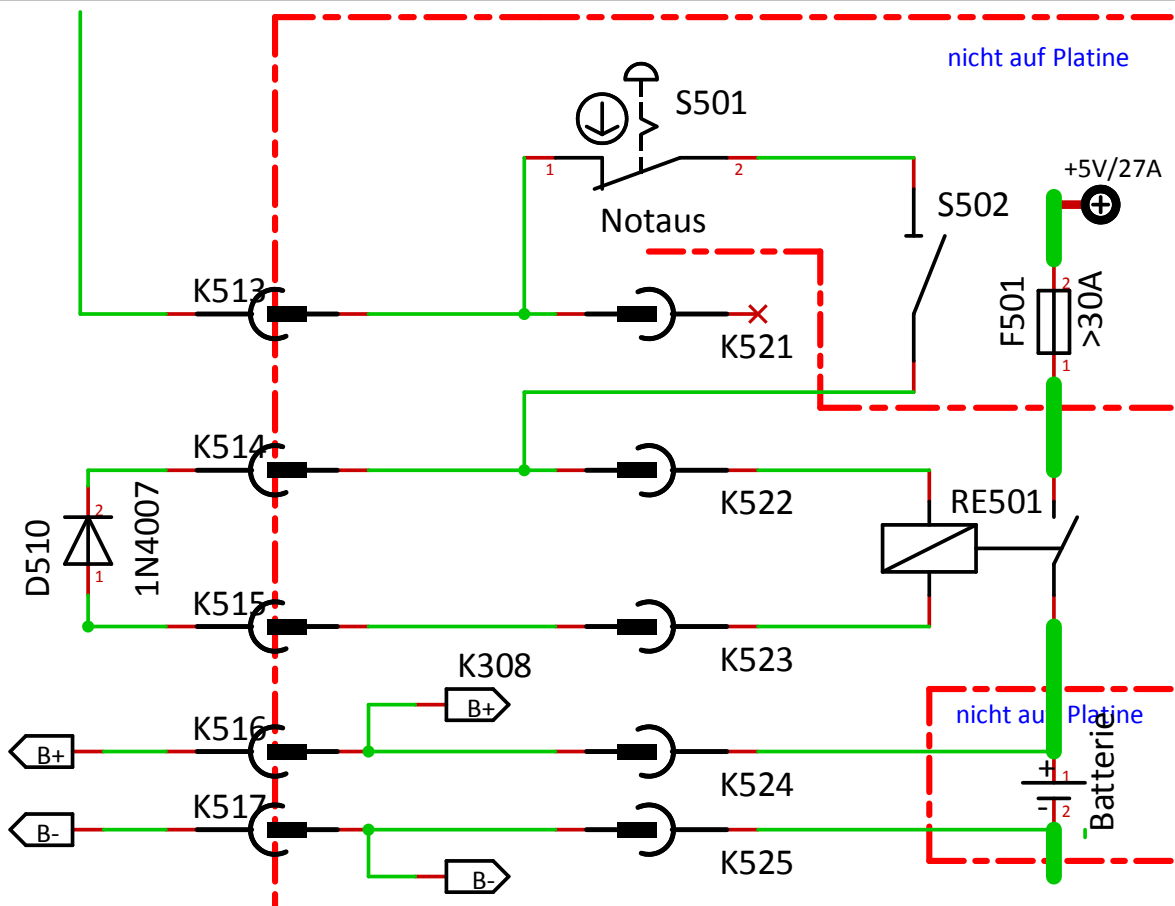


Abbildung 21: Gerätebedienung mit Notaus-Kreis

Der Notaus-Kreis ist eigensicher aufgebaut: Jede Stromunterbrechung über S501 bedingt an RE501 das Öffnen des Kontakts und unterbricht somit die Stromführung zur Batterie.

## 5.5.9 Zustandsanzeige mittels LED

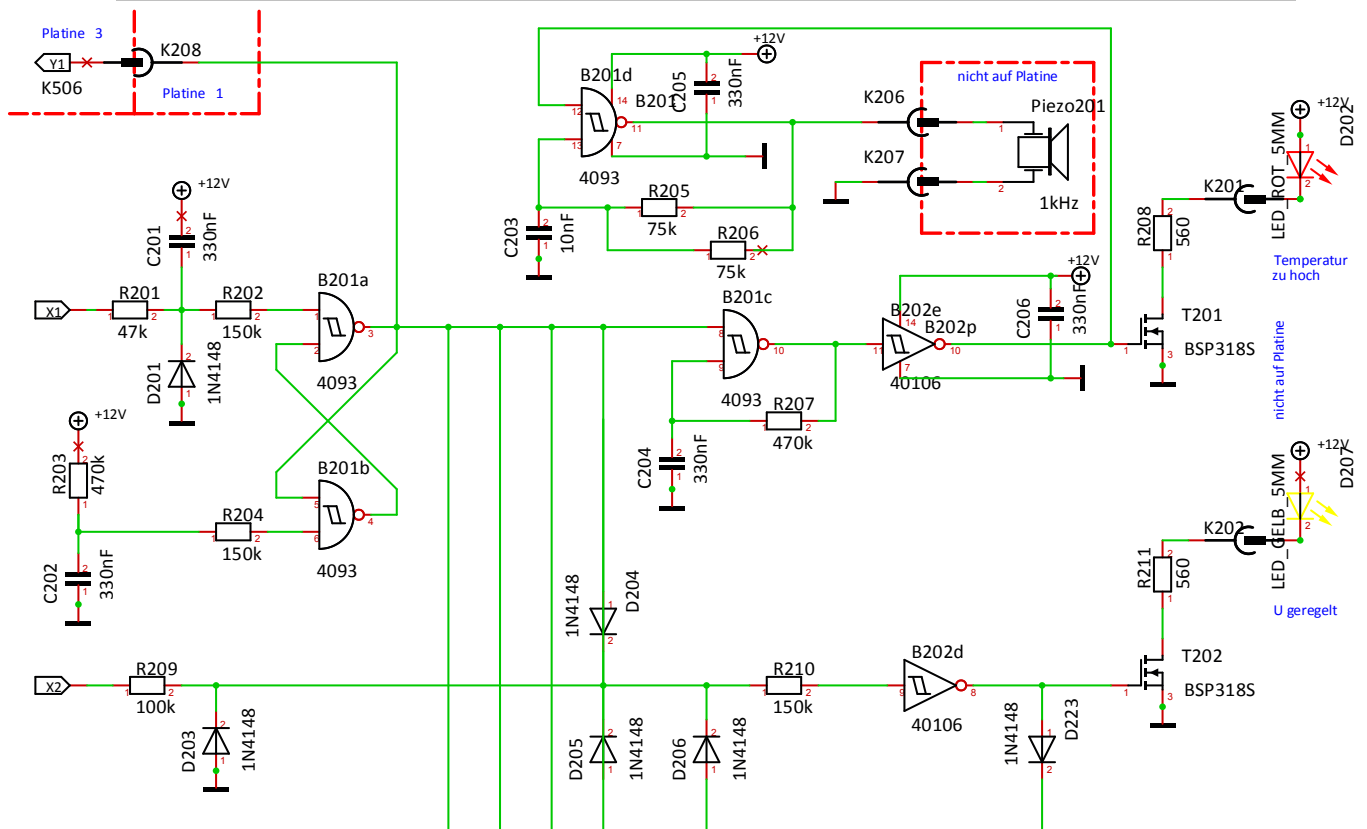


Abbildung 22: Zustandsanzeigen mittels LED

B201a und B201b bilden ein  $\bar{R}/\bar{S}$  Flipflop als Speicherglied, das durch das Signal X1 gesteuert wird. Kippt X1  $\rightarrow$  "0" (bedeutet Übertemperatur), wird der steuerbare Blinkgenerator B201c aktiviert, und die rote LED beginnt zu blinken.

B201 arbeitet als Nf-Tonerzeuger und aktiviert den Piezosummer Piezo201.

Dieser Alarm kann nur durch Abschalten der Ladeschaltung abgestellt werden, und erst nach einer Abkühlphase der Batterie ist das Laden wieder möglich.

Bedeutung der übrigen Leuchtdioden:

- Gelbe LED: Spannungsgeregelte Ladephase; X2  $\rightarrow$  "0".
- Orange LED: Stromgeregelte Ladephase; X3 = "0".
- Grüne LED: Ladeende; X4  $\rightarrow$  "0". Tritt ein, wenn der Ladestrom sehr klein wird.
- Blaue LED: Keine Batterie angeschlossen oder Batterie verpolt.  
Batteriespannung zu klein (< 2,8 V) oder zu groß (> 4,2 V).

## 5.5.10 Stromversorgung

### 5.5.10.1 Stromversorgung +12V / -12V

Stromversorgung +12V / -12V  
Auf einer Lochrasterplatine ohne Kupferauflage

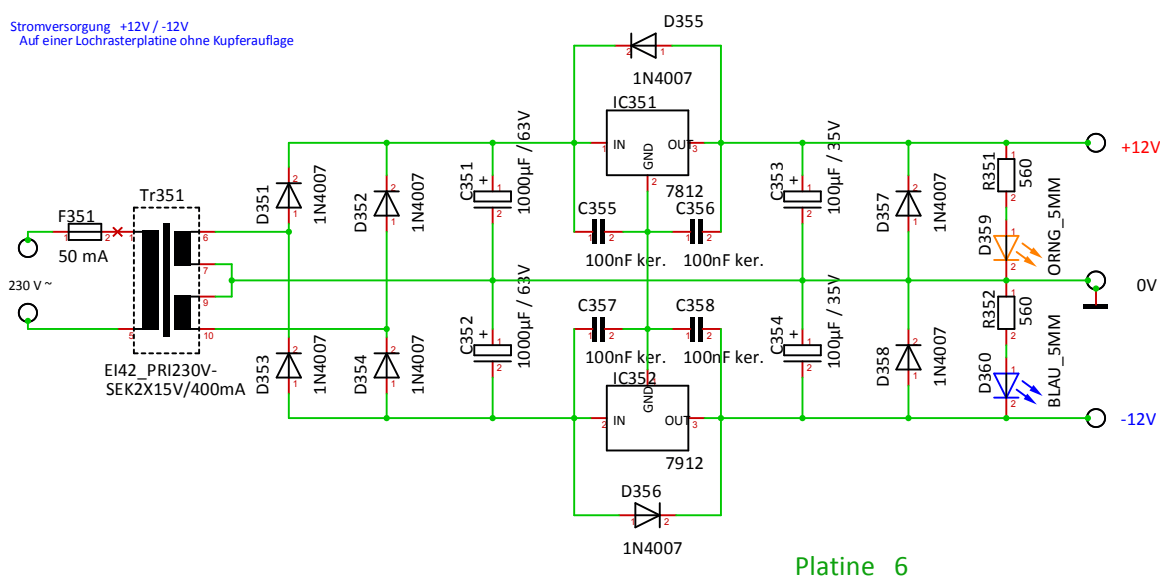


Abbildung 23: Stromversorgung +12V / -12V

### 5.5.10.2 Stromversorgung +8V

Stromversorgung +8V  
Auf einer Lochrasterplatine ohne Kupferauflage

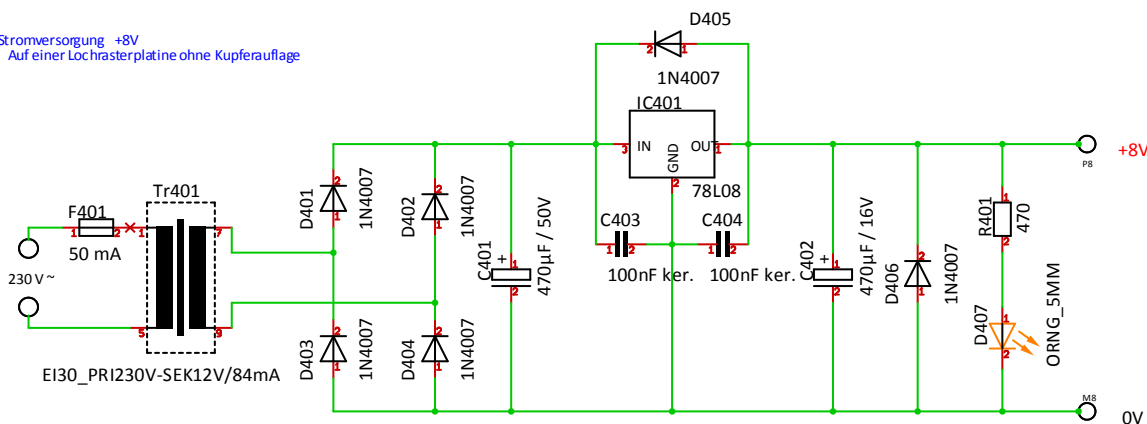


Abbildung 24: Stromversorgung +8V für die LCD-Anzeigen



## 5.5.11 Schutzschaltungen

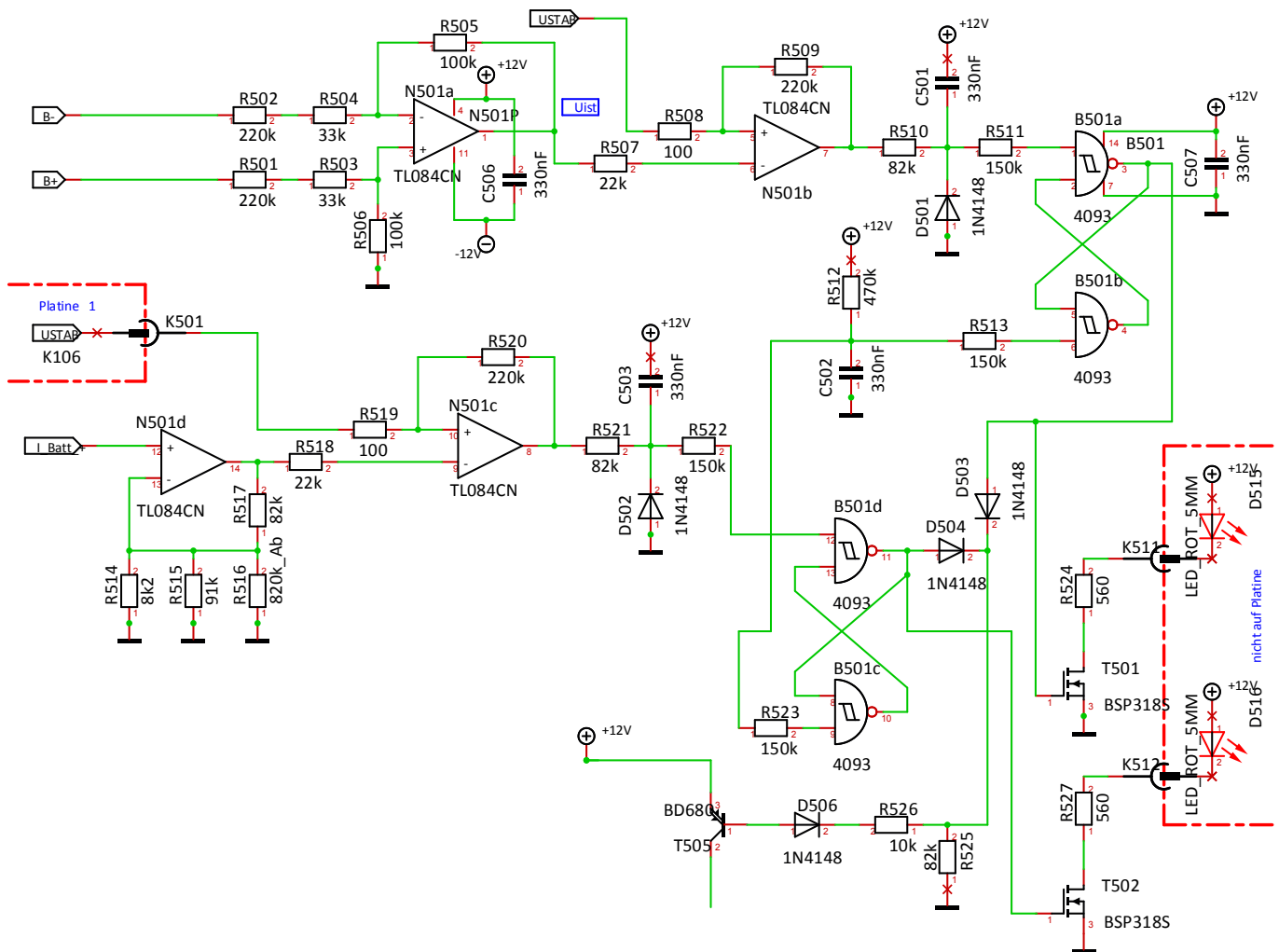


Abbildung 25: Schutzschaltungen

Um bei einem Versagen der primären Regelung die Sicherheit zu gewährleisten, sind Schutzschaltungen vorgesehen, die bei einem Überschreiten der Maximalspannung (4,2 V) oder des Maximalstroms (20 A) den Ladestromkreis unterbrechen.

Die Spannungsüberwachung wird mit den Operationsverstärkern N501a (Signalaufbereitung) und N501b (Signalauswertung) mit Ereignisspeicherung durch ein aus den NAND-Gattern B501a und B501b aufgebautes  $\overline{R}/\overline{S}$  Flipflop durchgeführt. Die Spannungsüberschreitung wird durch die rote Leuchtdiode D115 angezeigt.

Die Stromüberwachung erfolgt analog mit den Operationsverstärkern N501c und N501d, sowie den NAND-Gattern B501c und B501d und der Anzeige durch D116.

Wurde eine dieser Schutzschaltungen aktiviert und daher die Batterieladung abgebrochen, muss nach der Beseitigung des Fehlers die gesamte Ladeschaltung aus- und wieder eingeschaltet werden (dadurch wird das Flipflop zurückgesetzt), um den Ladevorgang neu zu starten.

---

## 5.6 Batteriesimulator

Ein Batteriesimulator wurde als schnell aufgebaute steuerbare Stromsenke (Verlustleistungsregelung) realisiert. Dabei werden durch die Ladeschaltung der Sollspannung  $U_{\text{Soll}}$ , und durch den Batteriesimulator die Istspannung  $U_{\text{Ist}}$  vorgegeben, damit ein eindeutiger Arbeitspunkt eingestellt werden kann.

---

# 6 Elektromechanische Realisierung

Die Schaltung ist unter Nutzung eines Standard-PFC-Schaltnetzteils für Personal Computer (ATX-Type) aufgebaut. Der 5 V-Ausgang des ATX-Netzteils wird zur Hochstrom-Ladung genutzt, da hier die Regelung implementiert ist.

---

## 6.1 Modifikation des PC-Schaltnetzteils

Die ursprüngliche 5 V-Spannungsregelung ist weiter aktiv und wird als Rückfallebene genutzt. Zum Rückkoppel-Optokoppler-Ausgang wird der neue Regeleingriff parallel aktiviert.

---

## 6.2 Experimentierplatinen

---

Zum Aufbau des Prototyps werden Experimentierplatinen eingesetzt. Die Platinen 1 bis 3 sind mit einer Kupferauflage im Lochstreifenrasterformat versehen, die Lochrasterplatinen für die beiden Stromversorgungen sind ohne Kupferbeschichtung. Das Rastermaß für das Einsetzen der Bauteile betragen 2,54 mm.

---

## 6.3 Anschlüsse

---

Alle Anschlüsse sind auf Stecker mit Schraubanschlüssen für die Leitungen herausgeführt.

---

# 7 Messungen

---

---

## 7.1 Kontrolle des Übergangs von der Strom- zur Spannungsregelung

---

Durch die Ablöseregulierung ist sichergestellt, dass bei der Spannungsregelung nicht der zulässige Strom, und bei der Stromregelung auch nicht die zulässige Spannung überschritten werden kann. Die schärfere der beiden Forderungen (Sollwertvorgaben) wird wirksam.

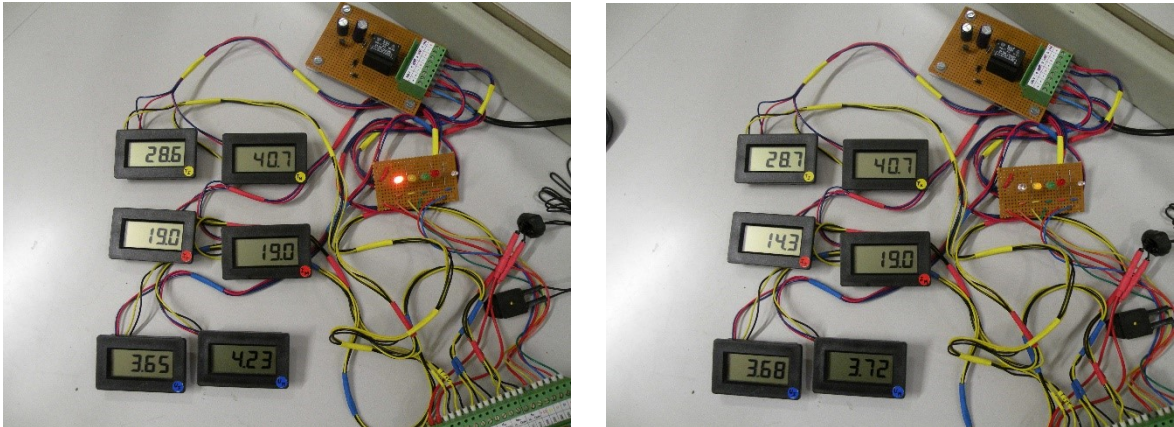
Der Übergang von der Strom- zur Spannungsregelung wurde durch das Kontrollieren der LED-Zustandsanzeigen und die angezeigten Soll- und Istwerte überprüft.

In den folgenden Bildern werden in der linken Reihe der Displays die Istwerte, und in der rechten Reihe die Sollwerte angezeigt.

Farbige Aufkleber auf den Displays kennzeichnen, welche Messgröße angezeigt wird:

Gelb: Temperatur

Rot: Ladestrom  
Blau: Ladespannung

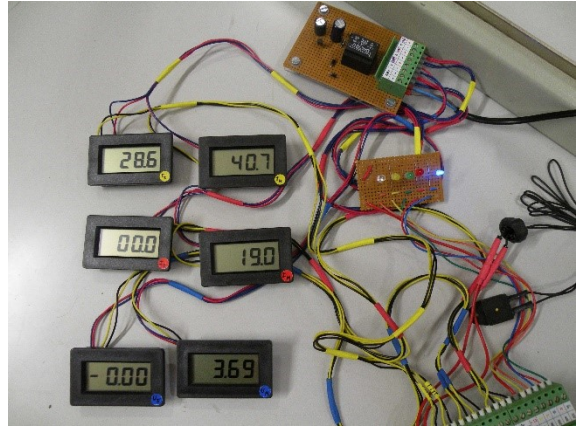
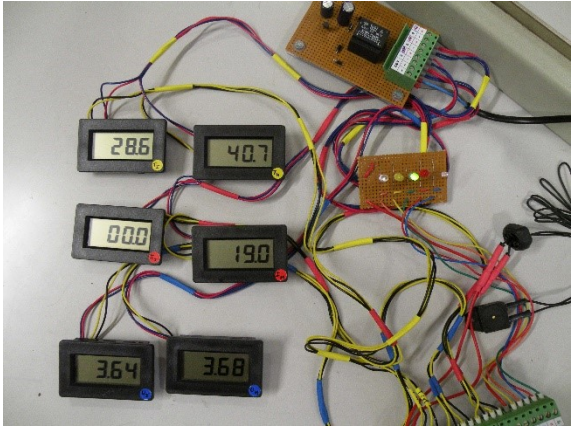


**Abbildung 26: Stromregelung**

**Spannungsregelung**

Linkes Bild: Die orange LED zeigt an, dass die Ladeschaltung im Modus "Stromregelung" betrieben wird. Das erkennt man auch an der Stromanzeige ( $I_{\text{Ist}} = I_{\text{Soll}} = 19,0 \text{ A}$ ) bzw. an der Spannungsanzeige ( $U_{\text{Ist}} = 3,65 \text{ V} < U_{\text{Soll}} = 4,23 \text{ V}$ ). Die Ist-Temperatur liegt mit  $28,6 \text{ }^\circ\text{C}$  unter der vorgegebenen Soll-Temperatur von  $40,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Rechtes Bild: Wenn die Batteriespannung die eingestellte Ladeschlussspannung erreicht, verlöscht die orange LED und die gelbe beginnt zu leuchten. Der Ladestrom  $I_{\text{Ist}}$  liegt mit  $14,3 \text{ A}$  unter  $I_{\text{Soll}}$  ( $19,0 \text{ A}$ ).  $U_{\text{Ist}}$  ( $36,8 \text{ V}$ ) wird nur wegen eines Anzeigefehlers kleiner als  $U_{\text{Soll}}$  angezeigt. Die Ist-Temperatur ist weiterhin kleiner als die Soll-Temperatur.

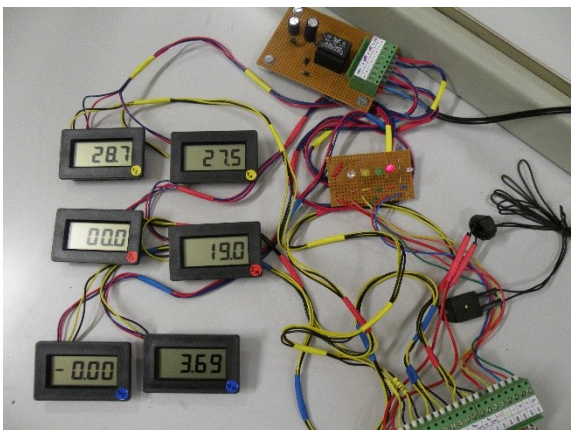


**Abbildung 27: Ladeende**

**Keine Batterie angeschlossen**

Linkes Bild: Durch die grüne LED wird angezeigt, dass trotz eines Stroms  $I_{\text{Soll}}$  von 19,0 A kein Laden mehr stattfindet ( $I_{\text{Ist}} = 0,0$  A). Spannung und Temperatur verhalten sich wie in Abbildung 26 dargestellt.

Rechtes Bild: Durch das Leuchten der blauen LED wird einer der Fehlerfälle "Batterie verpolt", "Batteriespannung kleiner als 2,8 V", "Batteriespannung größer als 4,2 V" oder wie in dargestellten Beispiel "keine Batterie angeschlossen" gemeldet. Sowohl an den Displays des Ladestroms  $I_{\text{Ist}}$  als auch der Ladespannung  $U_{\text{Ist}}$  wird der Wert 0,0 angezeigt, obwohl die Sollwerte 19,0 A bzw. 36,9 V betragen. Die Temperaturanzeigen entsprechen den Anzeigen der Abbildung 26.



**Abbildung 28: Übertemperatur**

Eine Übertemperatur wird durch Verringerung der maximal erlaubten Temperatur  $T_{\text{Soll}}$  (27,5 °C) unter die Ist-Temperatur  $T_{\text{Ist}}$  (28,7 °C) simuliert und durch eine blinkende rote LED und ein zerrhacktes Alarmsignal des Piezosummers gemeldet. Die Batterieladung wurde sofort abgebrochen.

---

## 7.2 Messung der aus dem Netz entnommenen Leistung

---

Die Messung der aus dem Netz entnommenen Leistung wurde mit 2 Geräten durchgeführt:

- Power Analyzer LEM Norma D 4000
- ELV Energy Analyzer EA 8000

Dabei wurden die Wirkleistung (P), die Blindleistung (Q), die Scheinleistung (S) und der Leistungsfaktor (PF: power-factor) gemessen. Die Blindleistung wurde vom Energy Analyzer EA 8000 nur betragsmäßig erfasst, vom Power Analyzer Norma D 4000 wurde zusätzlich noch gemessen, ob die das Netz kapazitiv (negativer Messwert) oder induktiv belastet wurde.

Die Ladespannung und der Ladestrom  $I_{\text{Batt}}$  wurden mit den Vielfachmessgeräten LEM Unigor 355 und 390 gemessen, wobei der Ladestrom aus der Messung des Spannungsabfalls an einem Messwiderstand von 1 m $\Omega$  ermittelt wurde.

Die Ladespannung und der Ladestrom wurden mit dem Batteriesimulator vorgegeben, wobei an der Ladeschaltung der maximale Ladestrom eingestellt wurde.

**Tabelle 3: Aus dem Netz bezogene Leistung - Ladespannung von 3,1 V**

$I_{\text{Batt}}$	P	Q	S	PF	$\eta$	P	Q	S	PF	$\eta$
[A]	[W]	[var]	[VA]			[W]	[var]	[VA]		
2	22,4	-13,4	26,1	0,855	0,277	22,6	12,7	26,0	0,840	0,274
4	32,2	-18,0	36,4	0,862	0,385	33,2	17,6	36,7	0,875	0,373
6	41,5	-20,3	46,4	0,898	0,448	41,6	20,0	46,3	0,899	0,447
8	51,0	-21,7	55,3	0,920	0,486	50,9	21,3	55,2	0,923	0,487
10	60,3	-23,2	64,6	0,934	0,514	60,5	22,8	64,7	0,936	0,512
12	71,4	-24,6	75,5	0,945	0,521	71,6	24,3	75,7	0,947	0,520
14	82,2	-26,5	86,4	0,952	0,528	82,3	26,2	86,5	0,953	0,527
16	95,6	-29,3	99,9	0,956	0,519	95,7	29,1	100,1	0,956	0,518
18	108,0	-30,7	112,3	0,962	0,517	108,2	30,1	112,2	0,963	0,516
20	122,8	-31,5	126,7	0,968	0,505	123,4	31,2	126,9	0,969	0,502
22	138,3	-31,9	142,0	0,974	0,493	138,4	31,7	142,2	0,975	0,493

**Tabelle 4: Aus dem Netz bezogene Leistung - Ladespannung von 3,6 V**

$I_{\text{Batt}}$	P	Q	S	PF	$\eta$	P	Q	S	PF	$\eta$
[A]	[W]	[var]	[VA]			[W]	[var]	[VA]		
2	23,5	-15,8	28,5	0,830	0,306	23,7	15,4	28,4	0,830	0,304
4	34,0	-17,2	38,8	0,875	0,424	34,3	18,7	39,2	0,875	0,420
6	44,4	-21,3	49,3	0,902	0,486	44,7	20,9	49,4	0,904	0,483
8	54,7	-22,2	59,3	0,923	0,527	54,9	22,0	59,3	0,928	0,525
10	65,5	-23,6	69,6	0,941	0,550	65,7	23,2	69,7	0,942	0,548
12	77,4	-25,3	81,5	0,951	0,558	77,5	25,8	81,5	0,951	0,557
14	90,2	-27,8	94,4	0,955	0,559	90,3	27,8	94,6	0,955	0,558
16	102,7	-29,7	-107,2	0,961	0,561	103,1	29,5	107,1	0,961	0,559
18	117,4	-30,7	121,3	0,967	0,552	117,7	30,6	121,4	0,968	0,551
20	133,0	-31,3	136,8	0,973	0,541	133,2	31,1	136,8	0,974	0,541
22	148,3	-32,2	151,7	0,977	0,534	148,2	32,2	151,5	0,978	0,534

**Tabelle 5: Aus dem Netz bezogene Leistung - Ladespannung von 4,1 V**

$I_{\text{Batt}}$	P	Q	S	PF	$\eta$	P	Q	S	PF	$\eta$
[A]	[W]	[var]	[VA]			[W]	[var]	[VA]		
2	26,0	-16,0	29,9	0,839	0,32	25,6	16,1	30,5	0,846	0,32
4	36,2	-18,1	40,6	0,896	0,45	36,5	17,8	40,7	0,899	0,45
6	48,2	-21,1	52,8	0,916	0,51	47,7	20,7	52,7	0,917	0,52
8	59,5	-22,6	63,7	0,934	0,55	59,6	22,3	63,8	0,936	0,55
10	71,5	-24,5	75,4	0,945	0,57	71,6	24,2	75,5	0,949	0,57
12	84,5	-26,4	88,6	0,953	0,58	84,6	26,2	88,6	0,955	0,58
14	97,7	-28,2	101,7	0,961	0,59	97,7	28,0	101,7	0,961	0,59
16	111,7	-28,9	115,7	0,968	0,59	111,8	28,7	115,6	0,969	0,59



### 7.3 Wirkungsgrad

Aus Wirkleistung, Ladespannung und Ladestrom ergibt sich der Wirkungsgrad  $\eta$  :

$$\eta = \frac{U_{Batt} \cdot I_{Batt}}{P} \quad (7.3-1)$$

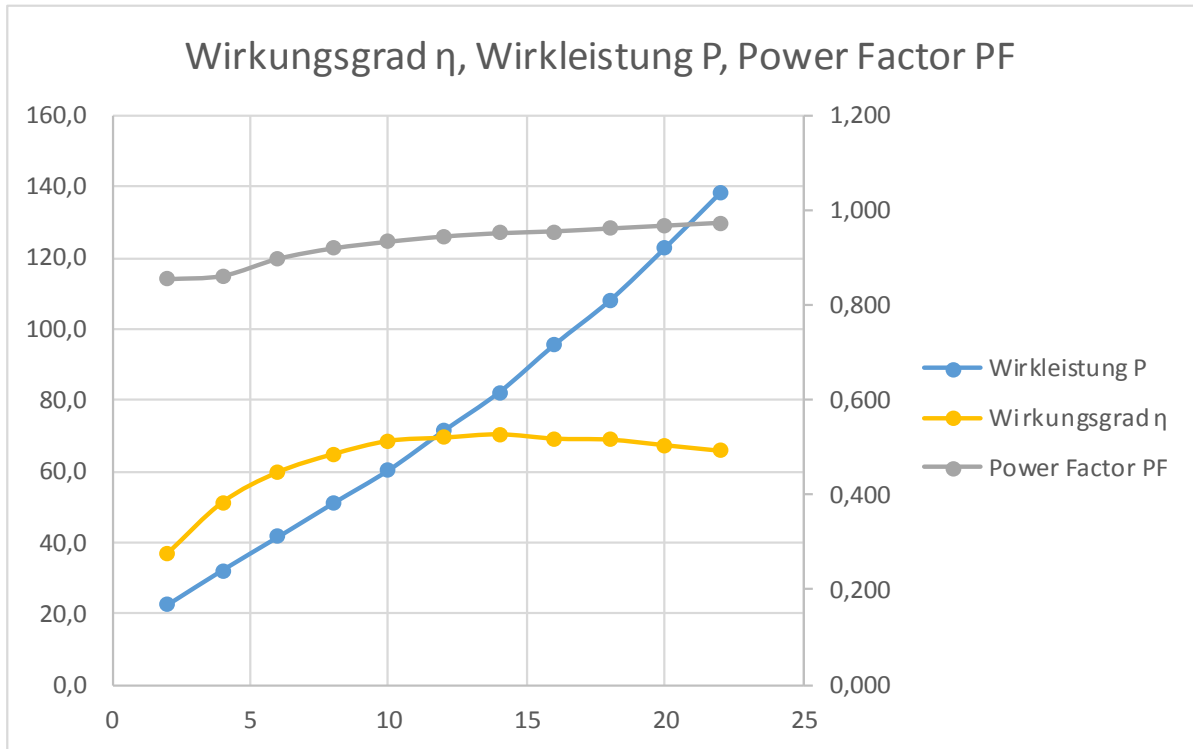


Abbildung 29: Wirkungsgrad  $\eta$  bei einer Ladespannung von 3,1 V

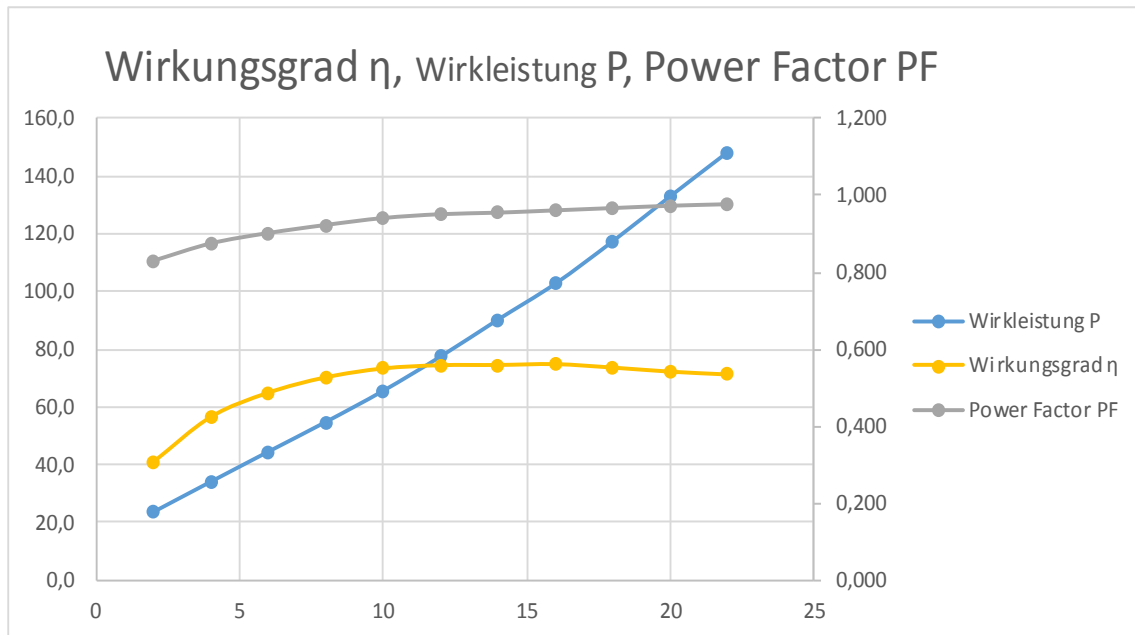


Abbildung 30: Wirkungsgrad  $\eta$  bei einer Ladespannung von 3,6 V

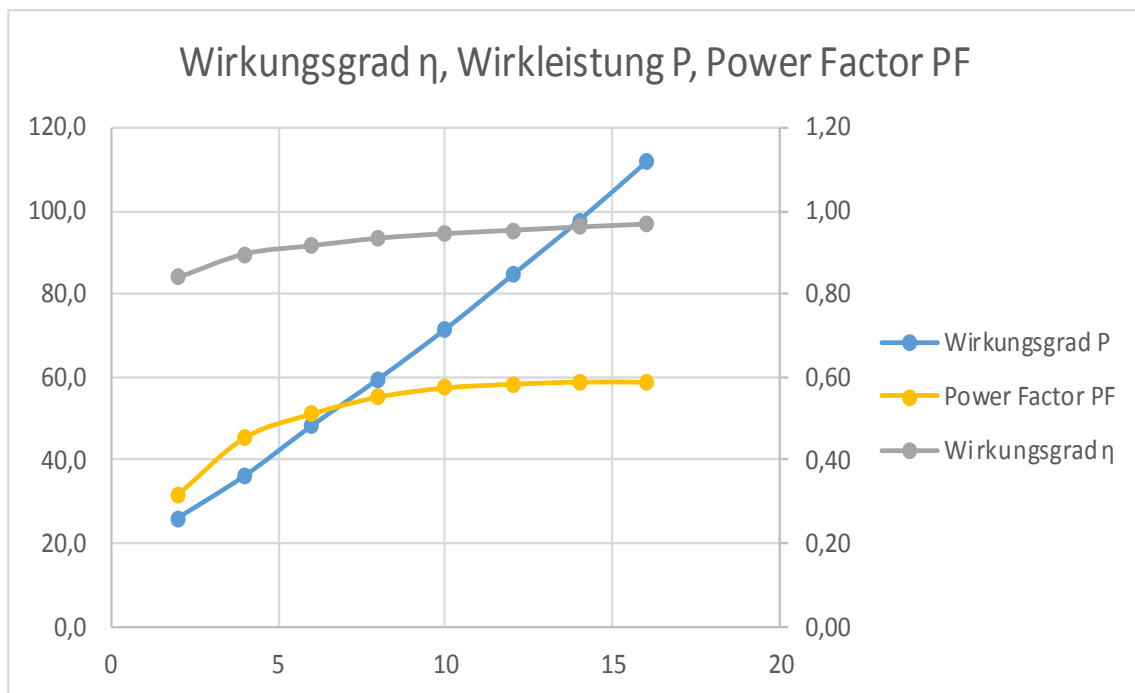


Abbildung 31: Wirkungsgrad  $\eta$  bei einer Ladespannung von 4,1 V

Als Hauptquellen der Verluste wurden das Schaltnetzteil mit dem sekundären Diodengleichrichter (über Schottky-Dioden) und der Sicherheitsabschaltungs-MOSFET T506 identifiziert. Dieser MOSFET vom Typ BUZ344 sollte unmittelbar durch einen Typ mit geringerem Drain-Source on-resistance (minimaler

Durchgangswiderstand)  $R_{DS(on)}$  (z. B 1 m $\Omega$  statt 30 m $\Omega$  bei BUZ344 [16]) ersetzt werden, wodurch über 10 % der Verluste entfallen würden.

PC-Schaltnetzeile sind grundsätzlich auf niedrige Herstellungskosten ausgelegt, für eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades wäre ein energetisch optimiertes neues Konzept erforderlich.

---

## 8 Schaltungsreview

---

Für die energetische Optimierung sind im Detail bessere induktive Komponenten und bessere Halbleiterschalter notwendig.

Eine Erhöhung der Sicherheit würde sich durch zweimalige Messung von jeweils Spannung und Strom samt Quervergleich und durch eine Überwachung der Spannungsversorgung der Schutzschaltung ergeben.

Bei Ausfall der Stromversorgung wird der Ladestromkreis durch das ohne Spannung abfallende Relais RE501 unterbrochen.

Bei Spannungswiederkehr erfolgt aus Sicherheitsgründen keine automatische Wiedereinschaltung.

---

## 9 Zusammenfassung

---

Lithium-Ionen-Zellen hoher Energie, zusammengefasst in Modulen und ganzen Batteriepaketen, stehen für eine Reihe von Anwendungen, insbesondere der Elektromobilität, zur Verfügung. Bei diesen Batteriepaketen können einzelne Zellen ausfallen, auch ist über tausende Zyklen hinweg mit deutlichem Rückgang der Kapazität zu rechnen. Die Batterieeinheiten sind danach dem Recycling-Prozess zuzuführen. Viele Zellen sind immer noch in wiederverwendungsfähigem Zustand, nur muss dieser erfasst werden. Hierzu wird eine Hochstrom-Ladeeinrichtung mit optimiertem Wirkungsgrad für Lithium-Ionen-Zellen zusammengestellt.

Im Ladegerät gelangt ein sehr kostengünstig verfügbares Computer-Schaltnetzteil als Basisgerät zu Einsatz. Dieses ist auf die Bereitstellung von festen Ausgangsspannungen bei Strömen von mehr als 20A ausgelegt. Die Regelung erfolgt als primärseitiger Schaltregler mit Sinusstromsteuerung auf der Netzseite. Ausgangsseitig und von der Netzseite potentialgetrennt finden sich der Schottky-Dioden-Gleichrichter, Elektrolytkondensatoren und induktive Filterkomponenten.

Eine Ladeeinrichtung für Lithium-Ionen-Zellen benötigt eine einstellbare Ladestrombegrenzung, die einstellbare Begrenzung der maximalen Zellenspannung bei Ladung und eine Reihe von Sicherheitsfunktionen. Die entwickelte und realisierte Schaltung überwacht Polarität und Spannungsbereich der Zelle auf Richtigkeit, ebenso fortlaufend die Temperatur, um beginnt mit der Ladung nur, wenn alle Werte korrekt sind. Die weitere Ladung wird sofort abgebrochen, wenn die einstellbare zulässige Temperatur an der Zelle überschritten wird, oder Spannungs- und Stromwerte außerhalb der definierten Grenzen zu liegen kommen. Die Funktion und der Betriebszustand des Geräts werden mit insgesamt 5 farbigen Leuchtdioden visualisiert (Batterie voll geladen, Konstantspannungsladung, Konstantstromladung, Spannung außerhalb Bereich, Übertemperatur). Maximalwerte für Zellenspannung, Ladestrom und Temperatur werden die Maximalwerte und parallel dazu auch die Istwerte auf Displays dem Gerätebediener angezeigt.

Zur Erprobung der fertiggestellten Schaltungsanordnung ist eine zusätzlich realisierte leistungsfähige Stromsenke eingesetzt. Ein Hochleistungs-IGBT bildet das Stellglied mit einstellbarem Strom im Bereich von 0 bis 30 Ampere. Damit werden die Ausgangsgrößen von Spannung und Strom für definierte Betriebspunkte vorgegeben und das Gerät einschließlich Regelung und Anzeigen in Bezug auf Wirkungsgrad und Leistungsfaktor vermessen. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor liegen im erwarteten Bereich. Die Analyse der Verlustquellen ergibt weiteres Verbesserungspotential für den Wirkungsgrad durch Einsatz angepasster Komponenten. Beispielsweise würde ein besonders niederohmiger MOSFET, eingesetzt als Sicherheitsschalter, den gegenwärtigen Wirkungsgrad von 50% bei 3 Volt Zellenspannung auf etwa 65 % erhöhen.

Mit dem realisierten Hochstrom-Ladegerät werden Lithium-Ionen-Zellen mit optimiertem Wirkungsgrad und korrekter Sicherheitsumgebung im Labor auf gezielte Ladeschlusswerte geladen. Das Gerät wird in dieser Form in der Forschung des Instituts eingesetzt.

---

## 10 Verzeichnisse

---

### 10.1 Literaturverzeichnis

---

- [1] KORTHAUER, Reiner: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg : Imprint: Springer Vieweg, 2013 (SpringerLink : Bücher)
- [2] HAMANN, Carl H. ; VIELSTICH, Wolf: *Elektrochemie*. 4., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Weinheim : Wiley-VCH-Verl., 2005
- [3] YAMAKI J: *ION | Overview - Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering/Encyclopedia of Electrochemical Power Sources - SECONDARY BATTERIES – LITHIUM RECHARGEABLE SYSTEMS – LITHIUM*. URL  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455001866> –  
Überprüfungsdatum 2015-05-31
- [4] LEMAIRE-POTTEAU E, PERRIN M, GENIES S: *BATTERIES | Charging Methods - Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering/Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. URL  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455008856> –  
Überprüfungsdatum 2015-06-01
- [5] TIETZE, Ulrich ; SCHENK, Christoph ; GAMM, Eberhard: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 13., neu bearb. Aufl. Heidelberg : Springer, c 2010
- [6] HERING, Ekbert ; BRESSLER, Klaus ; GUTEKUNST, Jürgen: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 6., vollst. aktualisierte und erw. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014 (Springer-Lehrbuch)
- [7] HARTL, Harald ; KRASSER, Edwin ; PRIBYL, Wolfgang ; SÖSER, Peter ; WINKLER, Gunter: *Elektronische Schaltungstechnik : Mit Beispielen in PSpice*. München : Pearson Studium, 2008 (ing - Elektrotechnik)
- [8] WEISS, Helmut: *Elektrotechnik I : Vorlesung zu Elektrotechnik I*. Vorlesungsbegleitende Unterlagen. Leoben. – Vorlesungsbegleitende Unterlagen

- [9] SCHLIENZ, Ulrich: *Schaltnetzteile und ihre Peripherie : Dimensionierung, Einsatz, EMV*. 5., aktualisierte und verb. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012 (Praxis)
- [10] SPECOVIVUS, Joachim: *Grundkurs Leistungselektronik : Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. 5., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011 (Studium)
- [11] HERRMANN, M.: *PBV resistor*. URL  
<http://www.isabellenhuette.de/fileadmin/content/praezisions-leistungswiderstaende/PBV.PDF>
- [12] TEXAS INSTRUMENTS, INCORPORATED [SLVS044,W ]: *LM317 3-Terminal Adjustable Regulator (Rev. W)*
- [13] VEZZINI, Andrea: *Lithiumionen-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge : Teil 1: Technische Möglichkeiten heutiger Batterien – Überprüfungsdatum 2015-05-29*
- [14] KURZWEIL, P. ; BRANDT K: *SECONDARY BATTERIES – LITHIUM RECHARGEABLE SYSTEMS | Overview - Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering/Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. URL  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455001854> –  
Überprüfungsdatum 2015-05-31
- [15] FEDERAU, Joachim: *Operationsverstärker : Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*. 5., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 (Studium)
- [16] *BUZ 344 : SiPMOS Power Transistor – Überprüfungsdatum 2015-05-29*
- [17] WEISS, H. ; SCHOPF, K. ; ZARKAR, M.: *High-performance lawn-mower prototype with re-used Lithium Iron Phosphate battery* : IEEE, 2014
- [18] WEISS, Helmut Jakob ; WEISS, Helmut: *Electric vehicle battery limiter und monitoring system implementation in educational process* : IEEE, 2010

- [19] WEISS, Helmut Jakob ; WEISS, Helmut ; LOPATKIN, Alexandr N. ; LOPATKIN, Nikolay N.: *True zero-emission vehicle energy generation and measurement in students' educational project* : IEEE, 2010
- [20] EBEL, Hans F. ; BLIEFERT, Claus: *Bachelor-, Master- und Doktorarbeit : Anleitungen für den naturwissenschaftlich-technischen Nachwuchs*. 4., aktualisierte Aufl., Nachdr. Weinheim : Wiley-VCH, 2011
- [21] ECO, Umberto ; SCHICK, Walter: *Wie man eine wissenschaftliche Abschlußarbeit schreibt : Doktor-, Diplom- und Magisterarbeit in den Geistes- und Sozialwissenschaften*. 12., unveränd. Aufl. der dt. Ausg. Heidelberg : Müller, 2007 (UTB Interdisziplinär 1512)
- [22] FISCHER, Rolf: *Elektrische Maschinen*. 14., aktualisierte und erw. Aufl. München : Hanser, 2009
- [23] HEESEN, Bernd: *Wissenschaftliches arbeiten : Methodenwissen für das bachelor-, master- und promotionsstudium*. [S.l.] : Springer Gabler, 2013
- [24] HEESEN, Bernd: *Wissenschaftliche Arbeiten schreiben mit Word 2013 : Unkomplizierte Anleitung zur Word-Vorlage Thesis2013D hilft Studierenden schnell eine wissenschaftliche Arbeit mithilfe von Microsoft Word anzufertigen*. Nürnberg : Prescient, 2014 (Erfolgsrezepte für ein erfolgreiches Studium 1)
- [25] HORN, Martin ; DOURDOUMAS, Nicolaos: *Regelungstechnik : Rechnerunterstützter Entwurf zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter Regelkreise*. München : Pearson Studium, c 2004 (et - Elektrotechnik Regelungstechnik)
- [26] *Lithium-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge*. – Aktualisierungsdatum: 2015-01-29 – Überprüfungsdatum 2015-02-09



---

## 10.2 Abkürzungen

---

U	Elektrische Spannung
I	Elektrischer Strom
R	Elektrischer Widerstand
V	Volt : Einheit für elektrische Spannung
A	Ampere : Einheit für elektrischen Strom
$\Omega$	Ohm : Einheit für elektrischen Widerstand
P	Wirkleistung
Q	Blindleistung
S	Scheinleistung
W	Watt : Einheit für Wirkleistung
var	Volt-Ampère-réactif : Einheit für Blindleistung
VA	Volt-Ampère : Einheit für Scheinleistung
PF	Power Factor
$\eta$	Wirkungsgrad

---

## 10.3 Abbildungen

---

Abbildung 1: Idealer Operationsverstärker	18
Abbildung 2: Übertragungskennlinie eines realen Operationsverstärkers	19
Abbildung 3: Nichtinvertierender Verstärker	20
Abbildung 4: Spannungsfolger	21
Abbildung 5: Differenzverstärker	22
Abbildung 6: Integrierender Verstärker	23
Abbildung 7: Längsregler mit MOSFET	25
Abbildung 8: Aufwärtswandler (Boost-converter)	27
Abbildung 9: Abwärtswandler (Buck-converter)	28
Abbildung 10: Sperrwandler	29
Abbildung 11: Eintaktflusswandler	29
Abbildung 12: Gegentaktflusswandler mit Parallelspeisung	30
Abbildung 13: Blockschaltbild	34
Abbildung 14: Erfassung der Istwerte	37
Abbildung 15: Erzeugung der Referenzspannung	38
Abbildung 16: Ableitung der Sollwerte aus der Referenzspannung	39
Abbildung 17: Spannungsmessmodule mit LCD – Anzeigen	40
Abbildung 18: Regelung der vorgegebenen Spannungs- und Stromwerte	43
Abbildung 19: Überwachung der maximalen Batterietemperatur	44
Abbildung 20: Steuerung des Schaltnetzteils mit einem Optokoppler	44
Abbildung 21: Gerätebedienung mit Notaus-Kreis	46
Abbildung 22: Zustandsanzeigen mittels LED	47
Abbildung 23: Stromversorgung +12V / -12V	48
Abbildung 24: Stromversorgung +8V für die LCD-Anzeigen	48
Abbildung 25: Schutzschaltungen	49

Abbildung 26: Stromregelung Spannungregelung	52
Abbildung 27: Ladeende Keine Batterie angeschlossen	53
Abbildung 28: Übertemperatur	53
Abbildung 29: Wirkungsgrad $\eta$ bei einer Ladespannung von 3,1 V	57
Abbildung 30: Wirkungsgrad $\eta$ bei einer Ladespannung von 3,6 V	58
Abbildung 31: Wirkungsgrad $\eta$ bei einer Ladespannung von 4,1 V	58
Abbildung 32: Schaltplan, Blatt 1, Temperatur und Schwellen	II
Abbildung 33: Schaltplan, Blatt 1, LED-Anzeigen	III
Abbildung 34: Schaltplan, Blatt1, Messung/Regelung, Stromversorgung +/- 12 V	IV
Abbildung 35: Schaltplan, Blatt 4, Displays, Stromversorgung + 8 V	V
Abbildung 36: Schaltplan, Blatt 5, Schutzschaltung, Steuerungen	VI
Abbildung 37: Platine 1, Bauteilseite	VIII
Abbildung 38: Platine 2, Bauteilseite	IX
Abbildung 39: Platine 3, Bauteilseite	X
Abbildung 40: Aufgebaute Schaltung, Teil 1	XIX
Abbildung 41: Aufgebaute Schaltung, Teil 2	XX
Abbildung 42: Batteriepaket nach Überladeversuchen	XX

---

## 10.4 Tabellen

Tabelle 1: Eigenschaften idealer bzw. realer Operationsverstärker .....	17
Tabelle 2: Beziehung zwischen Messgröße und Anzeige .....	41
Tabelle 3: Aus dem Netz bezogene Leistung - Ladespannung von 3,1 V .....	55
Tabelle 4: Aus dem Netz bezogene Leistung - Ladespannung von 3,6 V .....	56
Tabelle 5: Aus dem Netz bezogene Leistung - Ladespannung von 4,1 V .....	56
Tabelle 6: Stückliste der Platine 1 .....	XI
Tabelle 7: Stückliste der Platine 2 .....	XIV
Tabelle 8: Stückliste der Platine 3 .....	XVII

---

## 11 Anhang

### 11.1 Schaltplan

---

Die Schaltpläne wurden mit **Target 3001!** (eingetragene Marke), einem Programm zum Entwurf von Schaltplänen und zur Leiterplattenentflechtung der Firma Ing.-Büro Friedrich in der Ausprägung »Kostenlose Version für den PCB-POOL®- und PANEL-POOL®-Service! Kommerzielle Nutzung zulässig« erstellt.

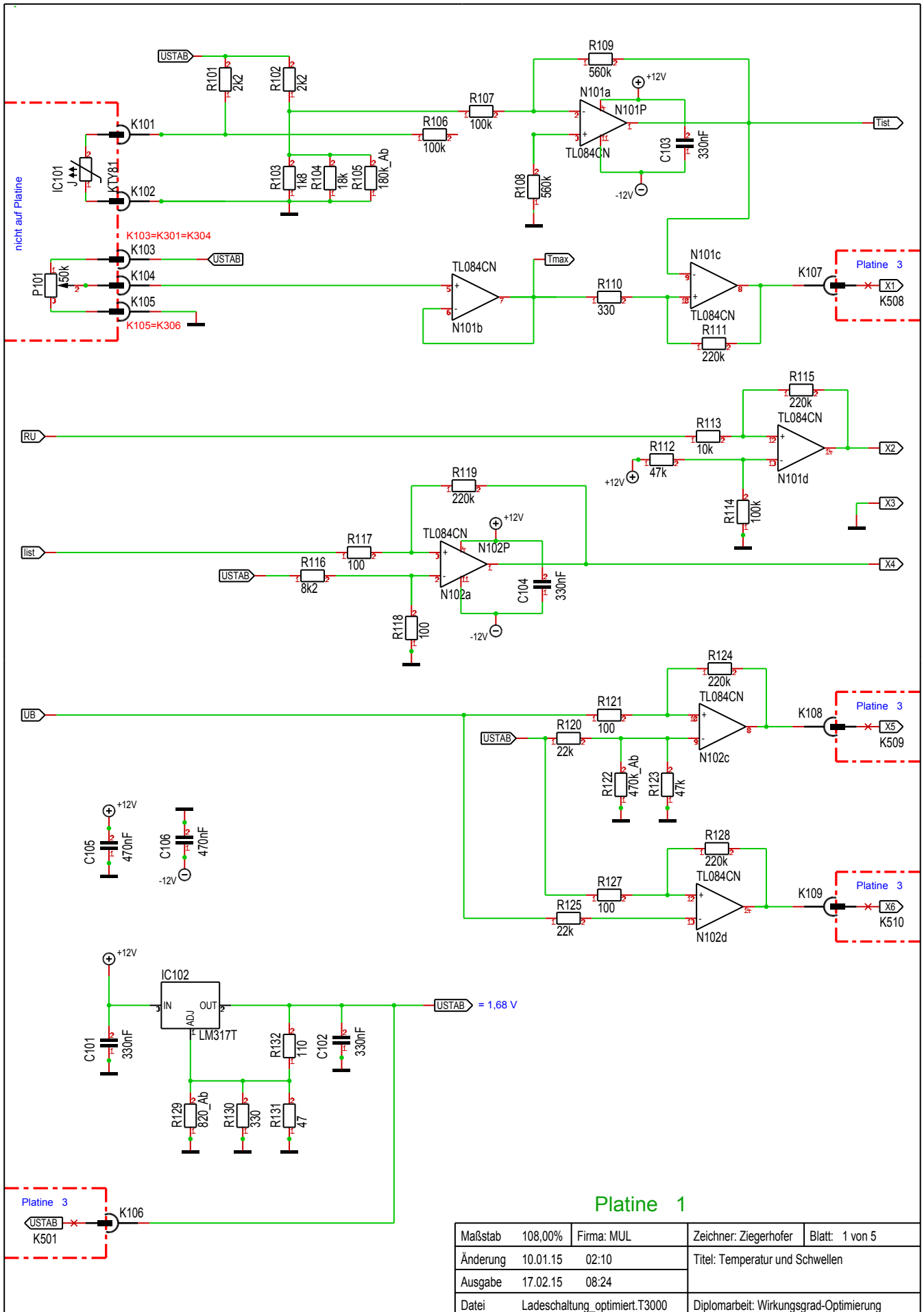
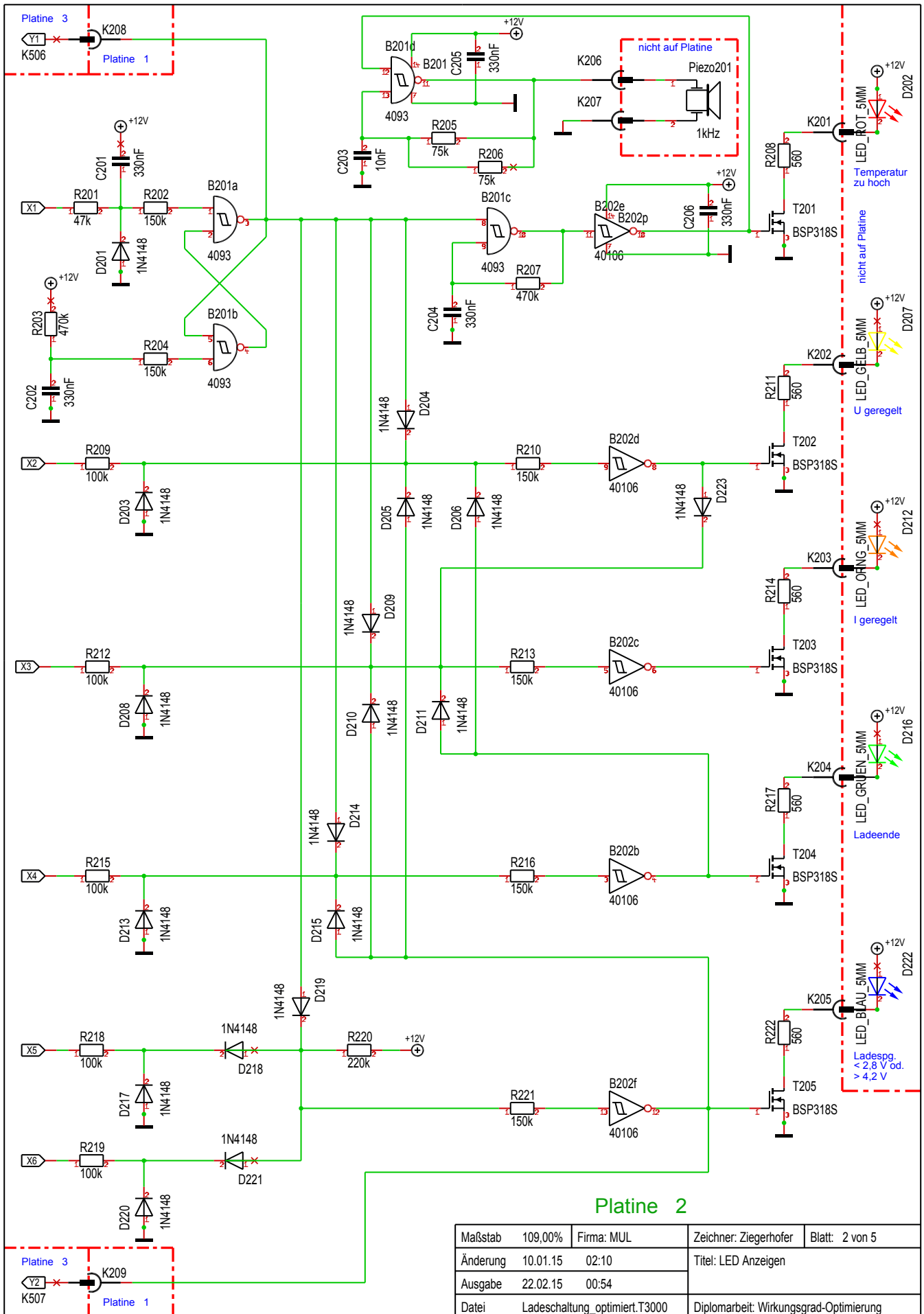
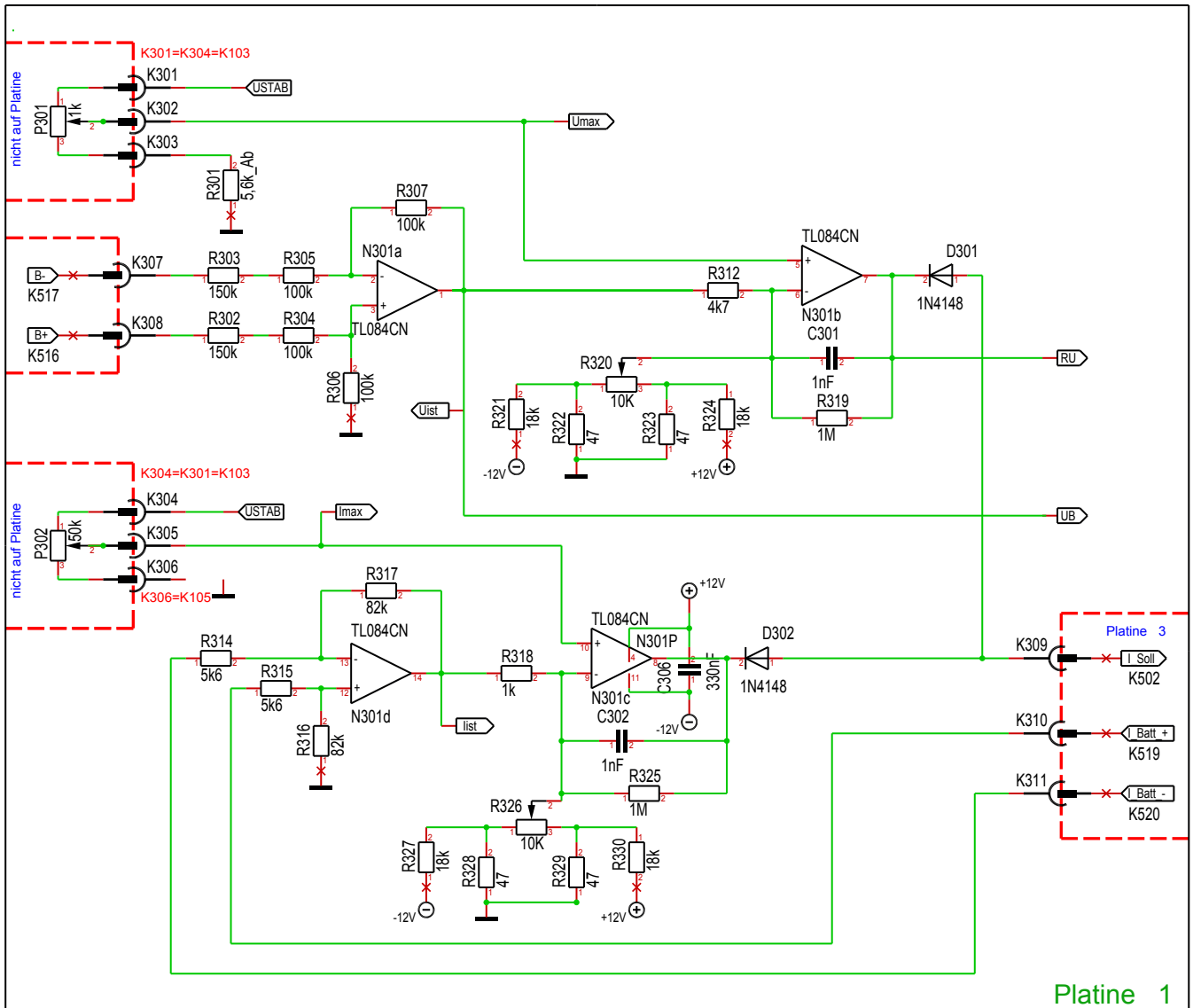


Abbildung 32: Schaltplan, Blatt 1, Temperatur und Schwellen

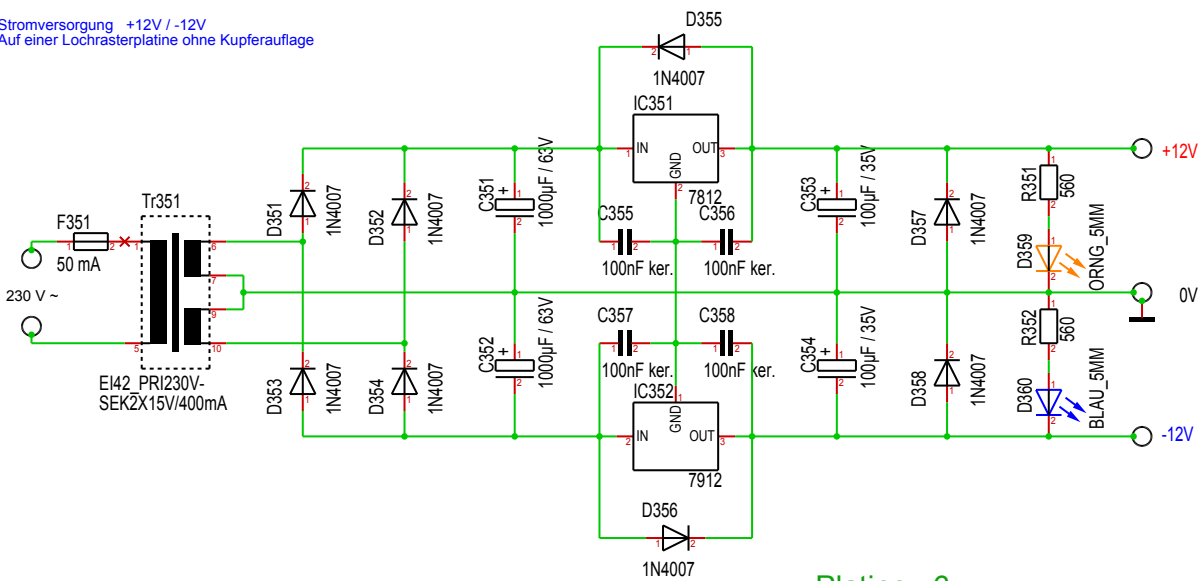


Maßstab	109,00%	Firma: MUL	Zeichner: Ziegerhofer	Blatt: 2 von 5
Änderung	10.01.15 02:10		Titel: LED Anzeigen	
Ausgabe	22.02.15 00:54			
Datei	Ladeschaltung_optimiert.T3000	Diplomarbeit: Wirkungsgrad-Optimierung		

**Abbildung 33: Schaltplan, Blatt 1, LED-Anzeigen**



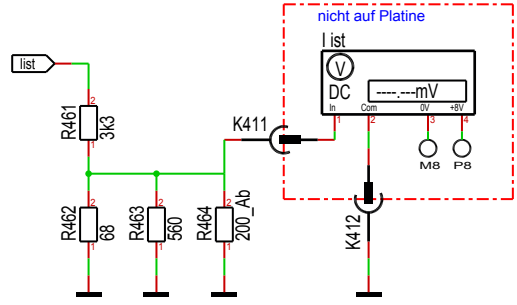
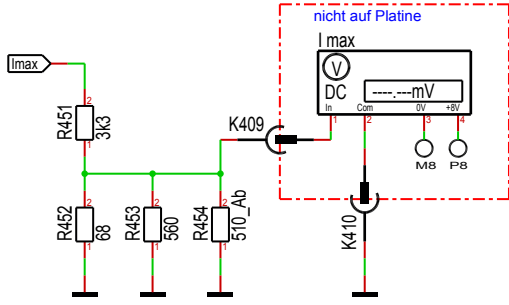
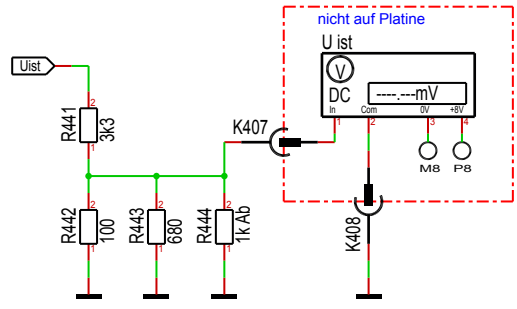
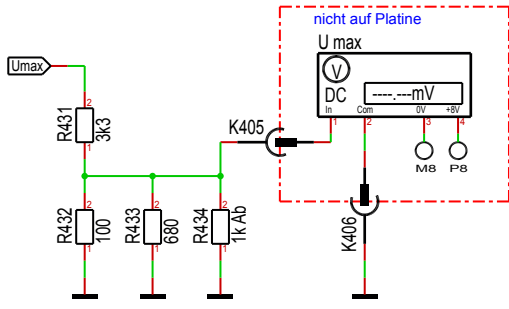
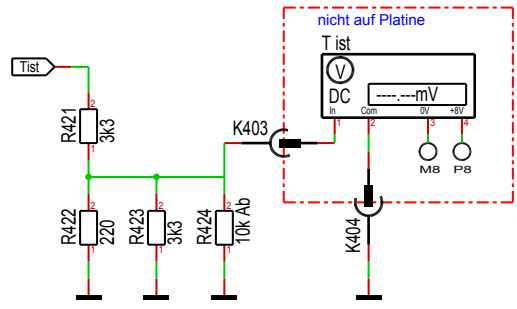
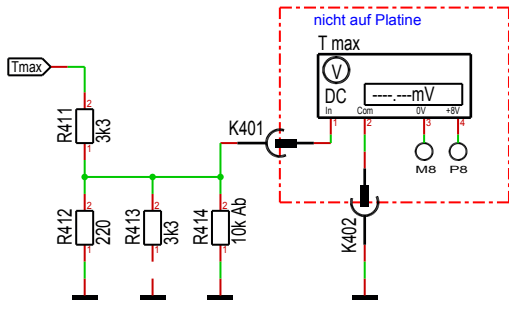
Stromversorgung +12V / -12V  
Auf einer Lochrasterplatte ohne Kupfereulage



Maßstab	60,00%	Firma: MUL	Zeichner: Ziegerhofer	Blatt: 3 von 5
Änderung	15.05.15	20:44	Titel: Messung/Regelung	
Ausgabe	15.05.15	20:45	Stromversorgung ± 12 V	
Datei	Ladeschaltung_optimiert.T3000		Diplomarbeit: Wirkungsgrad-Optimierung	

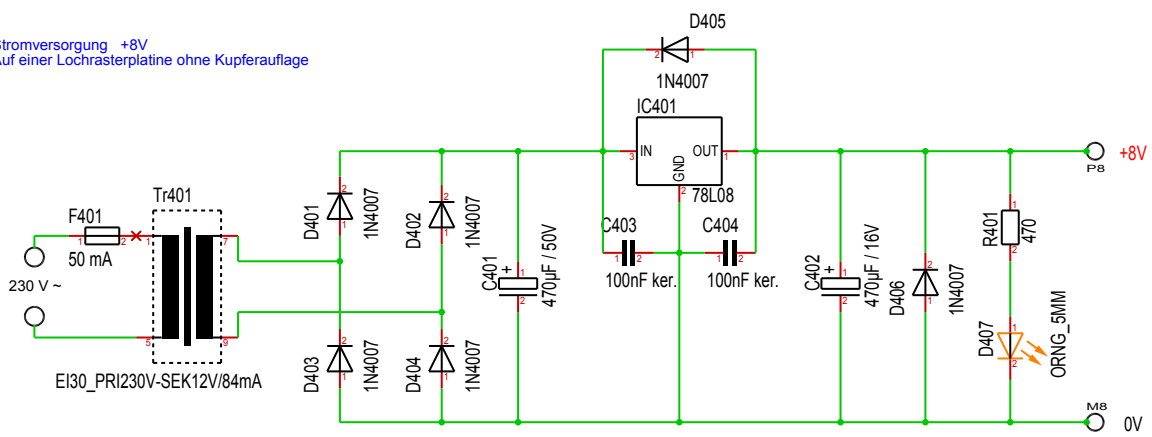
**Abbildung 34: Schaltplan, Blatt1, Messung/Regelung, Stromversorgung +/- 12 V**  
Hochstromladeschaltung - Wirkungsgradoptimierung / Herbert Ziegerhofer - 2015





Platine 2

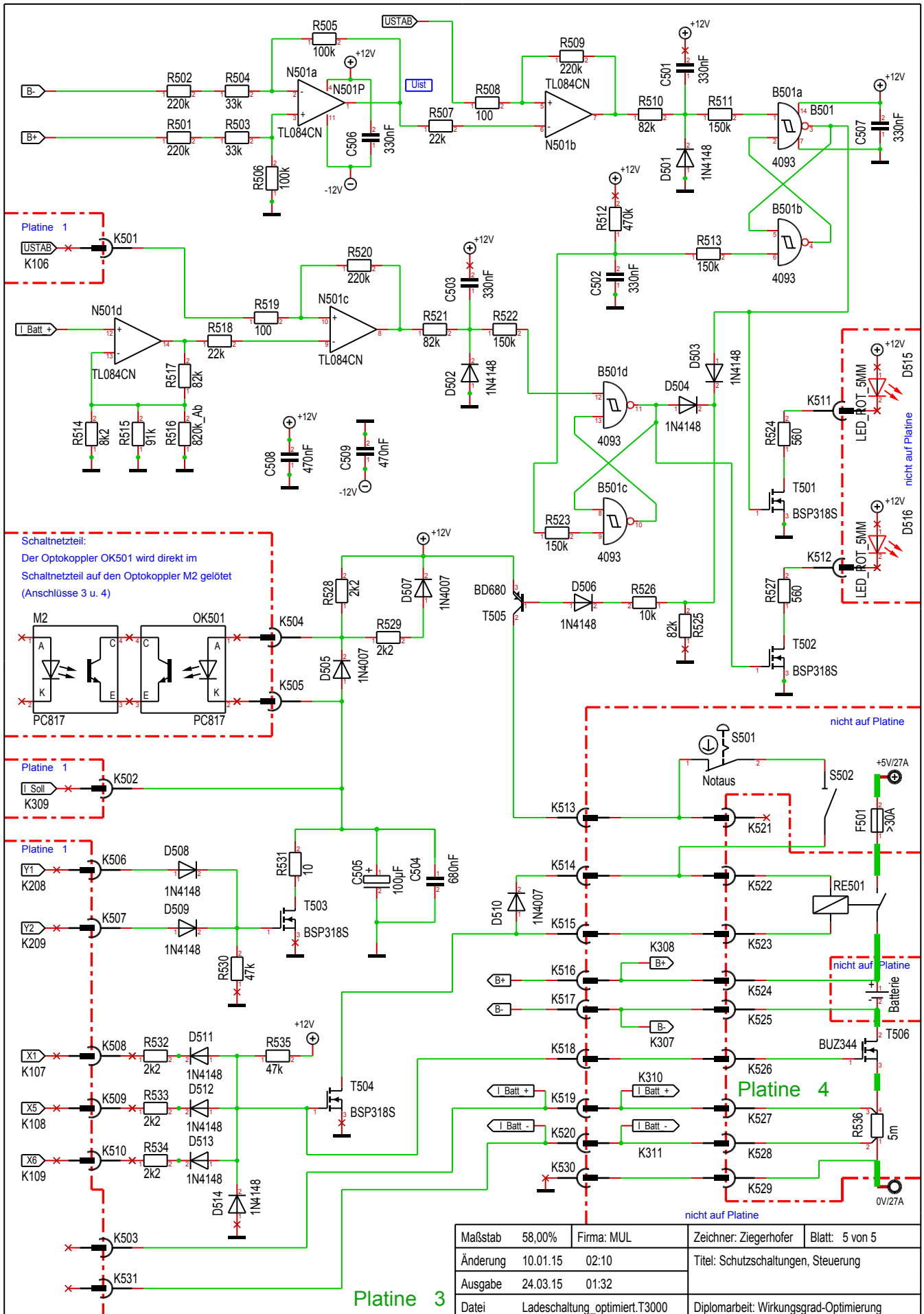
Stromversorgung +8V  
Auf einer Lochrasterplatine ohne Kupferauflage



Platine 5

Maßstab	58,00%	Firma: MUL	Zeichner: Ziegerhofer	Blatt: 4 von 5
Änderung	10.01.15	02:10	Titel: Displays Stromversorgung + 8 V	
Ausgabe	24.03.15	01:28		
Datei	Ladeschaltung_optimiert.T3000		Diplomarbeit: Wirkungsgrad-Optimierung	

Abbildung 35: Schaltplan, Blatt 4, Displays, Stromversorgung + 8 V



**Abbildung 36: Schaltplan, Blatt 5, Schutzschaltung, Steuerungen**

---

## **11.2 Platinen-Layout**

---

Das Platinen-Layout der Lochstreifenrasterplatinen wurde mit dem lizenzierten Programm LochMaster der Firma ABACOM Ingenieurgesellschaft durchgeführt.

Platine 1

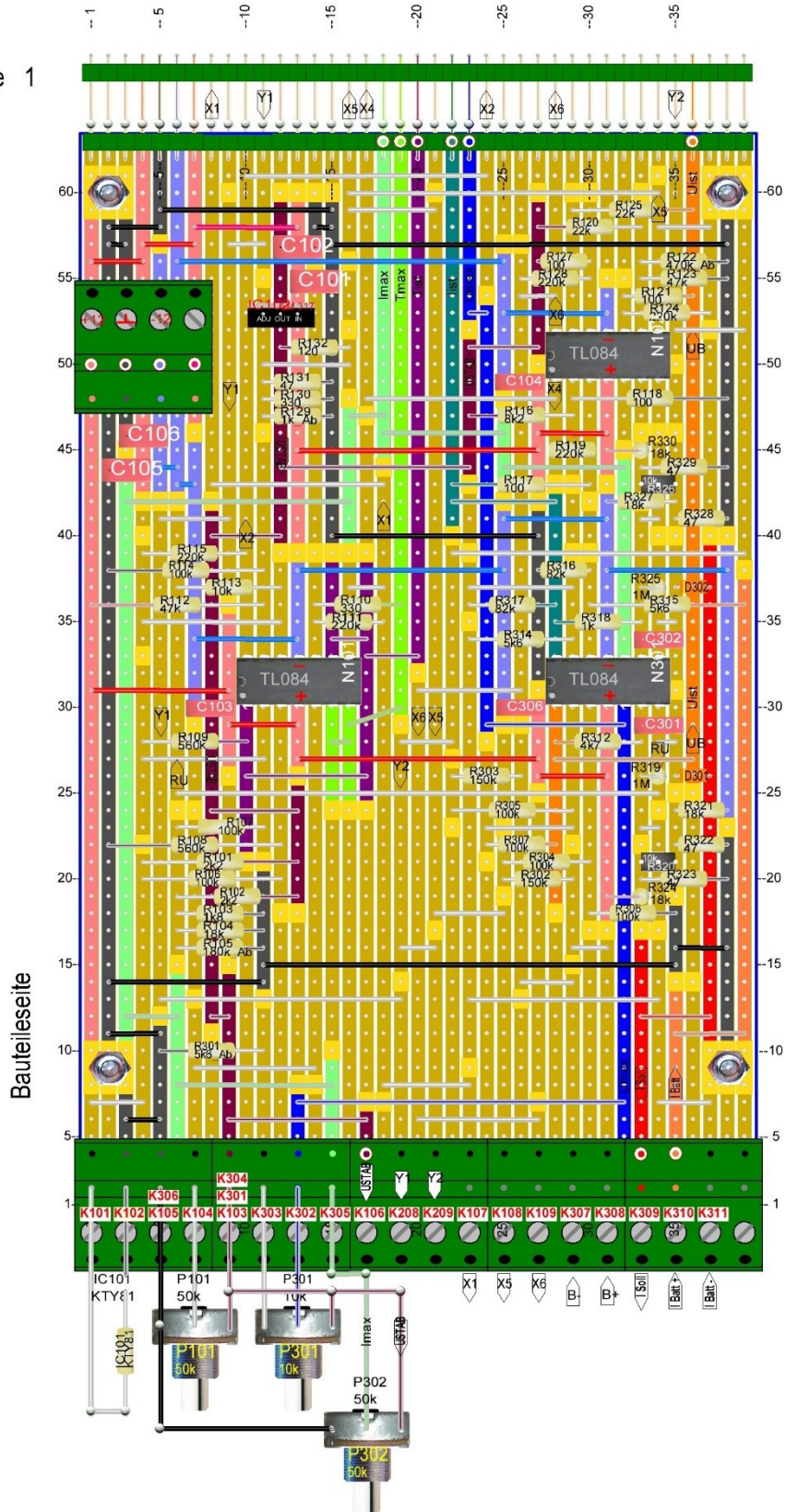


Abbildung 37: Platine 1, Bauteileseite

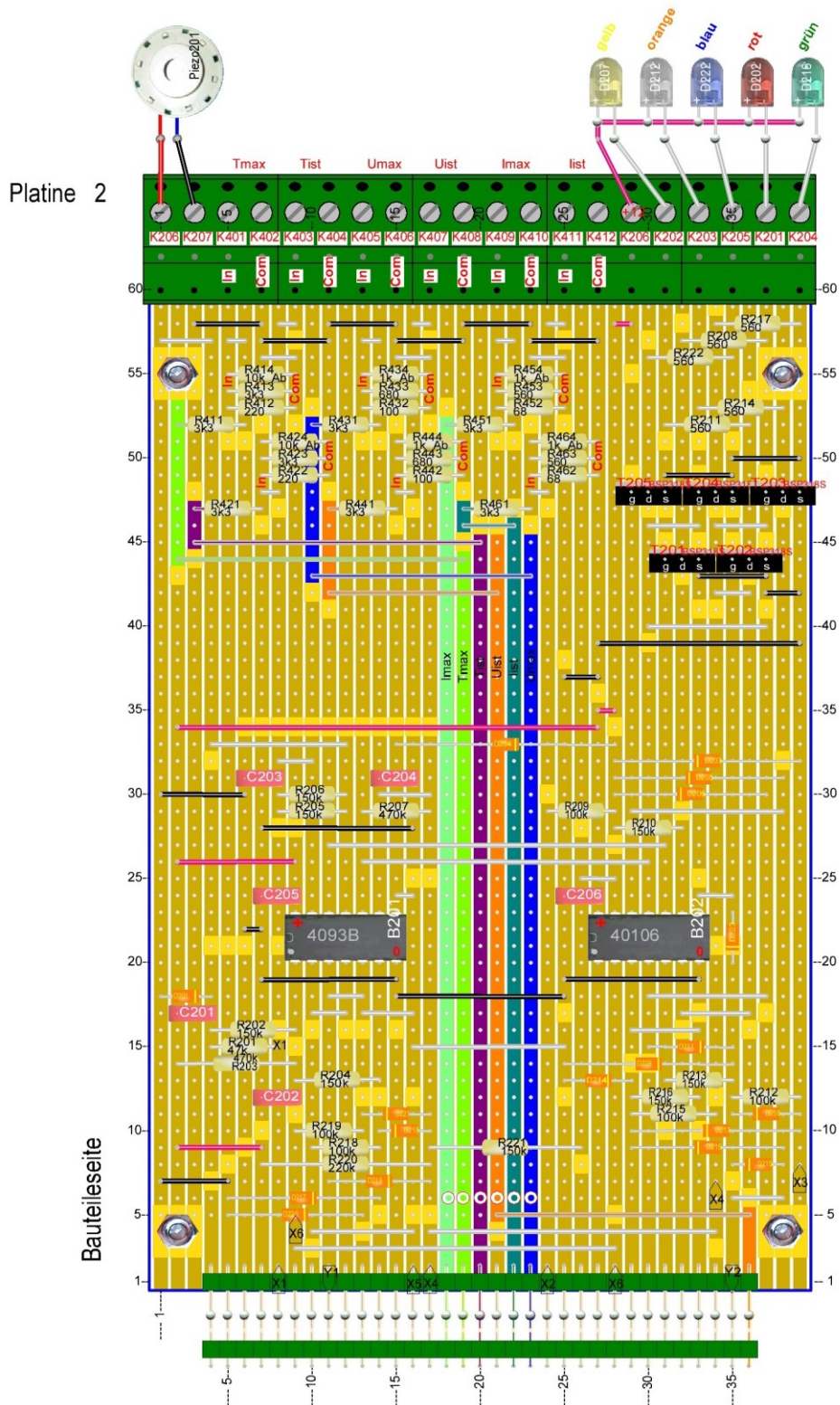


Abbildung 38: Platine 2, Bauteileseite

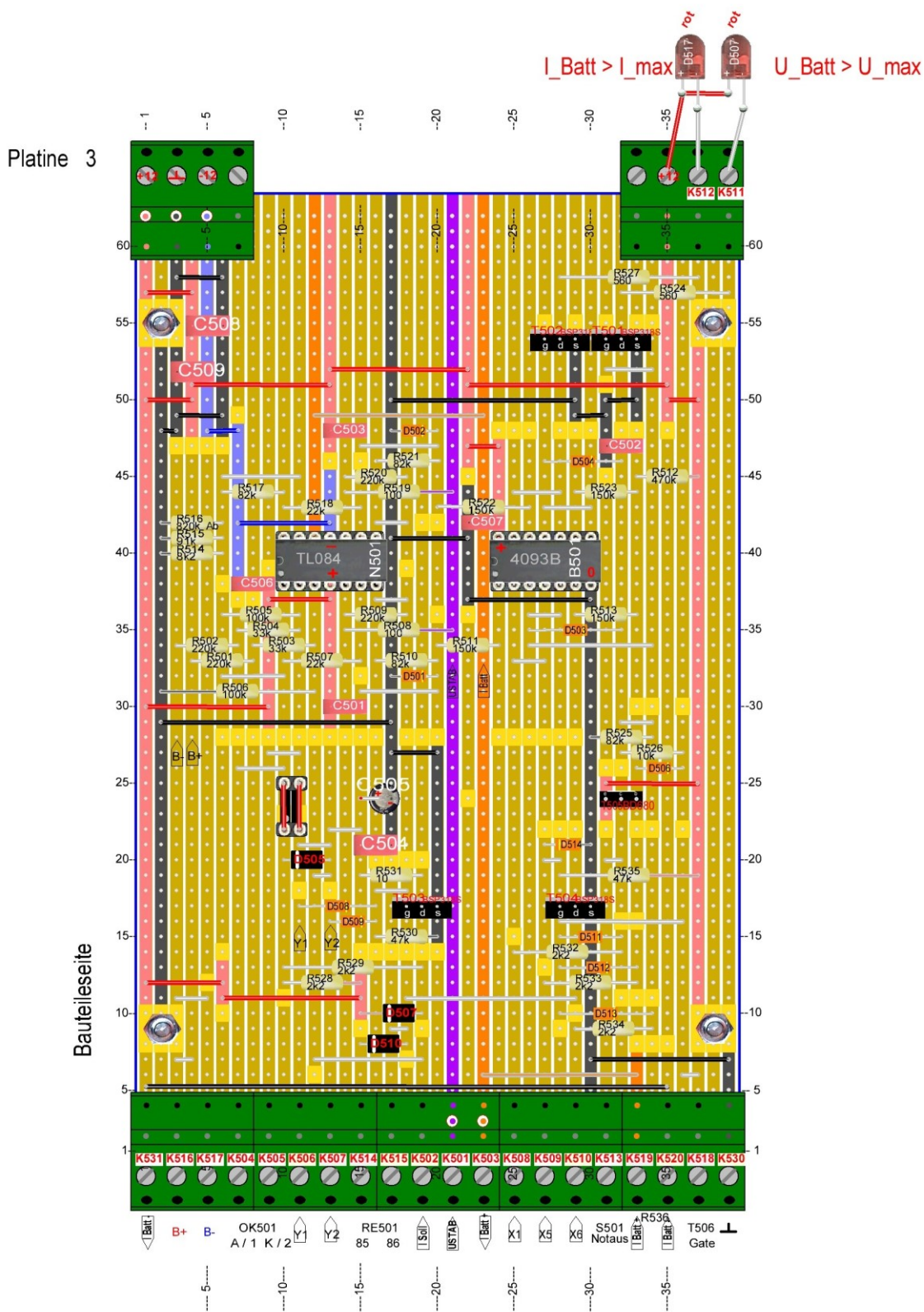


Abbildung 39: Platine 3, Bauteilseite

---

## 11.3 Stücklisten

---

**Tabelle 6: Stückliste der Platine 1**

Kennung	Name	Wert/Typ
PCB	Platine	100,00 x 160,00 mm
	Stiftleiste 90°	1-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
P302	Poti 4mm	50k
P301	Poti 4mm	10k
P101	Poti 4mm	50k
KI1	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI2	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI3	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI4	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI5	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI6	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
R107	Widerstand 0207	100k
R106	Widerstand 0207	100k
R109	Widerstand 0207	560k
R108	Widerstand 0207	560k
R102	Widerstand 0207	2k2
R101	Widerstand 0207	2k2
R103	Widerstand 0207	1k8
R104	Widerstand 0207	18k
R105	Widerstand 0207	180k_Ab
R111	Widerstand 0207	220k
R110	Widerstand 0207	330
R115	Widerstand 0207	220k
R113	Widerstand 0207	10k
R112	Widerstand 0207	47k
R114	Widerstand 0207	100k
C103	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
C104	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R119	Widerstand 0207	220k
R117	Widerstand 0207	100
R116	Widerstand 0207	8k2
R118	Widerstand 0207	100
R121	Widerstand 0207	100
R124	Widerstand 0207	220k
R120	Widerstand 0207	22k
R123	Widerstand 0207	47k

Kennung	Name	Wert/Typ
R122	Widerstand 0207	470k_Ab
R128	Widerstand 0207	220k
R127	Widerstand 0207	100
R125	Widerstand 0207	22k
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
C306	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R307	Widerstand 0207	100k
R305	Widerstand 0207	100k
R303	Widerstand 0207	150k
R306	Widerstand 0207	100k
R304	Widerstand 0207	100k
R302	Widerstand 0207	150k
R312	Widerstand 0207	4k7
C301	MKS 2 / RM5 / B=2,5	1nF
C302	MKS 2 / RM5 / B=2,5	1nF
N102	N102	TL084
N301	N301	TL084
N101	N101	TL084
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
R317	Widerstand 0207	82k
R316	Widerstand 0207	82k
R315	Widerstand 0207	5k6
R314	Widerstand 0207	5k6
IC102	voltage regulator, TO-220	LM 317
C102	MKS 2 / RM5 / B=3,5	330nF
C101	MKS 2 / RM5 / B=3,5	330nF
R132	Widerstand 0207	120



Kennung	Name	Wert/Typ
R131	Widerstand 0207	47
R130	Widerstand 0207	330
R129	Widerstand 0207	1k_Ab
C105	MKS 2 / RM5 /B=3,5	470nF
C106	MKS 2 / RM5 /B=3,5	470nF
R301	R301	5k6_Ab
	Stiftleiste 90°	1-polig
R318	Widerstand 0207	1k
R326	Trimmer Cermet	10k
R328	Widerstand 0207	47
R329	Widerstand 0207	47
R327	Widerstand 0207	18k
R330	Widerstand 0207	18k
	Stiftleiste 90°	3-polig
	Stiftleiste 90°	3-polig
	Stiftleiste 90°	3-polig
	Stiftleiste 90°	3-polig
R320	Trimmer Cermet	10k
R323	Widerstand 0207	47
R322	Widerstand 0207	47
R321	Widerstand 0207	18k
R319	Widerstand 0207	1M
R325	Widerstand 0207	1M
IC101	IC101	KTY81
R324	Widerstand 0207	18k
D301	SI-Universal-Diode	1N4148
D302	SI-Universal-Diode	1N4148

**Tabelle 7: Stückliste der Platine 2**

Kennung	Name	Wert/Typ
PCB	Platine	100,00 x 160,00 mm
KI1	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI2	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI3	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI4	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI5	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
C205	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R201	Widerstand 0207	47k
R202	Widerstand 0207	150k
D201	SI-Universal-Diode	1N4148
C201	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R204	Widerstand 0207	150k
R203	Widerstand 0207	470k
C202	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R207	Widerstand 0207	470k
C204	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
C203	MKS 2 / RM5 / B=2,5	10nF
R205	Widerstand 0207	150k
R206	Widerstand 0207	150k
B201	B201	4093B
B202	B202	40106
T204	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
C206	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R411	Widerstand 0207	3k3
R412	Widerstand 0207	220
R413	Widerstand 0207	3k3
R414	Widerstand 0207	10k_Ab
R431	Widerstand 0207	3k3
R432	Widerstand 0207	100
R433	Widerstand 0207	680
R434	Widerstand 0207	1k_Ab
R421	Widerstand 0207	3k3
R422	Widerstand 0207	220
R423	Widerstand 0207	3k3
R424	Widerstand 0207	10k_Ab
R441	Widerstand 0207	3k3

Kennung	Name	Wert/Typ
R442	Widerstand 0207	100
R443	Widerstand 0207	680
R444	Widerstand 0207	1k_Ab
R451	Widerstand 0207	3k3
R452	Widerstand 0207	68
R453	Widerstand 0207	560
R454	Widerstand 0207	1k_Ab
R461	Widerstand 0207	3k3
R462	Widerstand 0207	68
R463	Widerstand 0207	560
R464	Widerstand 0207	1k_Ab
Piezo201	Piezo	1kHz
J 1	Löt - Nagel	1,3 mm
J 2	Löt - Nagel	1,3 mm
T203	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
T205	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
T202	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
T201	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
R211	Widerstand 0207	560
R214	Widerstand 0207	560
R217	Widerstand 0207	560
R208	Widerstand 0207	560
R222	Widerstand 0207	560
R209	Widerstand 0207	100k
D203	SI-Universal-Diode	1N4148
D204	SI-Universal-Diode	1N4148
D206	SI-Universal-Diode	1N4148
D202	LED 5mm	rot
D212	LED 5mm	orange
D222	LED 5mm	blau
R210	Widerstand 0207	150k
D205	SI-Universal-Diode	1N4148
R213	Widerstand 0207	150k
R212	Widerstand 0207	100k
D208	SI-Universal-Diode	1N4148
D209	SI-Universal-Diode	1N4148
D210	SI-Universal-Diode	1N4148
D211	SI-Universal-Diode	1N4148
R216	Widerstand 0207	150k
R215	Widerstand 0207	100k
D213	SI-Universal-Diode	1N4148
D214	SI-Universal-Diode	1N4148
D215	SI-Universal-Diode	1N4148

Kennung	Name	Wert/Typ
R221	Widerstand 0207	150k
D221	SI-Universal-Diode	1N4148
D218	SI-Universal-Diode	1N4148
D219	SI-Universal-Diode	1N4148
R219	Widerstand 0207	100k
R218	Widerstand 0207	100k
D217	SI-Universal-Diode	1N4148
D220	SI-Universal-Diode	1N4148
R220	Widerstand 0207	220k
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	4-polig
	Stiftleiste 90°	1-polig
	Stiftleiste 90°	1-polig
D223	SI-Universal-Diode	1N4148
D216	LED 5mm	grün
D207	LED 5mm	gelb

**Tabelle 8: Stückliste der Platine 3**

Kennung	Name	Wert/Typ
PCB	Platine	100,00 x 160,00 mm
KI1	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI2	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI3	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI4	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI5	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI6	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
KI7	Schraubklemme, 5,08 Raster	4-polig
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Mutter M3	
	Mutter M3	
C506	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R505	Widerstand 0207	100k
R504	Widerstand 0207	33k
R502	Widerstand 0207	220k
R503	Widerstand 0207	33k
R501	Widerstand 0207	220k
R507	Widerstand 0207	22k
R517	Widerstand 0207	82k
R516	Widerstand 0207	820k_Ab
R515	Widerstand 0207	91k
R514	Widerstand 0207	8k2
C508	MKS 2 / RM5 / B=3,5	470nF
C509	MKS 2 / RM5 / B=3,5	470nF
R518	Widerstand 0207	22k
SC1	Fassung DIL14	
N501	N501	TL084
R508	Widerstand 0207	100
R509	Widerstand 0207	220k
R506	Widerstand 0207	100k
R519	Widerstand 0207	100
R520	Widerstand 0207	220k
R510	Widerstand 0207	82k
C501	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
SC2	Fassung DIL14	
B501	B501	4093B
R511	Widerstand 0207	150k
D501	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
R521	Widerstand 0207	82k
R522	Widerstand 0207	150k
D502	SI-Universal-Diode	1N4148 ?

Kennung	Name	Wert/Typ
C503	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R512	Widerstand 0207	470k
C502	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
R513	Widerstand 0207	150k
R523	Widerstand 0207	150k
C507	MKS 2 / RM5 / B=2,5	330nF
D503	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
D504	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
T502	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
T501	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
R527	Widerstand 0207	560
R524	Widerstand 0207	560
R526	Widerstand 0207	10k
R525	Widerstand 0207	82k
D506	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
T503	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
C504	MKS 2 / RM5 / B=3,5	680nF
R531	Widerstand 0207	10
T504	SIPMOS, n-Channel, TO-220	BSP318S
T505	TO-126 z.B. BD135	BD680
R530	Widerstand 0207	47k
D508	SI-Universal-Diode	1N4148
SC3	Fassung DIL4	
D505		1N4007
R535	Widerstand 0207	47k
D514	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
R532	Widerstand 0207	2k2
R533	Widerstand 0207	2k2
R534	Widerstand 0207	2k2
D511	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
D512	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
D513	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
R528	Widerstand 0207	2k2
R529	Widerstand 0207	2k2
D507		1N4007
D510		1N4007
D509	SI-Universal-Diode	1N4148 ?
C505	Elko	100 µF
D517	LED 5mm	rot
D507	LED 5mm	rot

---

## 11.4 Aufgebaute Schaltung

---

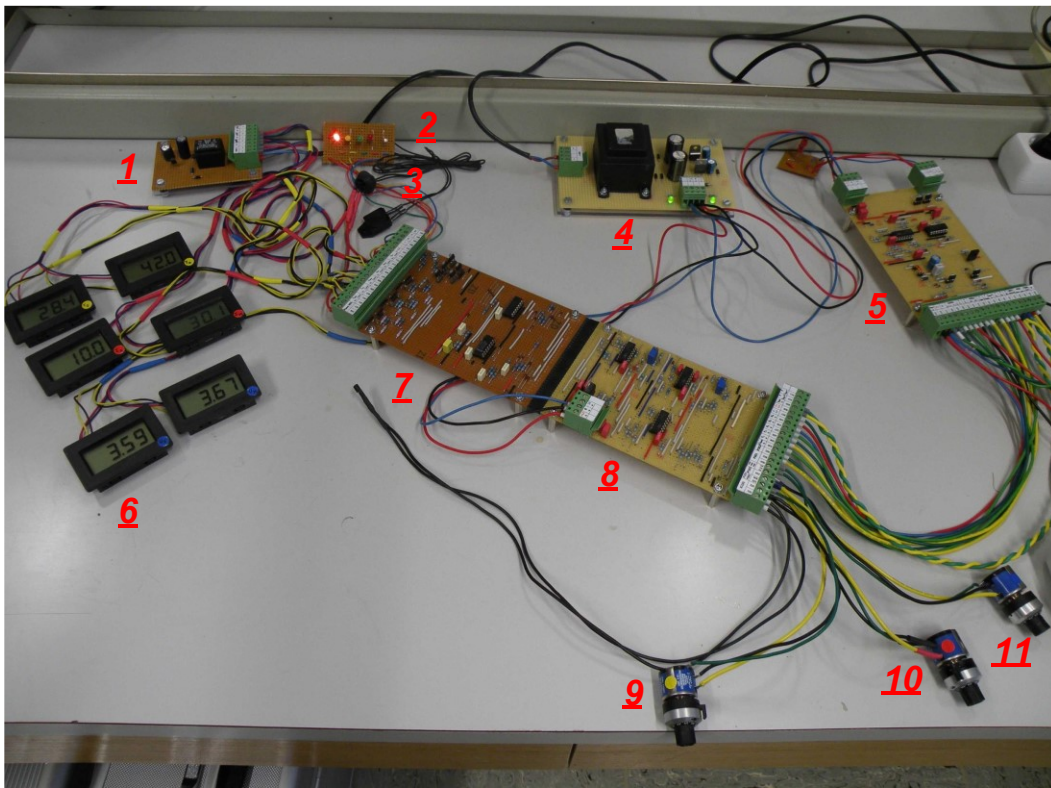


Abbildung 40: Aufgebaute Schaltung, Teil 1

- 1: Stromversorgung +8 V
- 2: LED Anzeigen
- 3: Piezo-Summer für Übertemperaturalarm
- 4: Stromversorgung +/- 12 V
- 5: Platine 3: Schutzschaltungen, Steuerung
- 6: Messmodule mit LCD-Anzeigen. Links: Sollwerte, Rechts: Istwerte
- 7: Platine 2: Steuerung der LED Anzeigen
- 8: Platine 1: Temperatur und Schwellen
- 9, 10, 11:
  - 10-Gang-Potentiometer für die Einstellung der maximalen Sollwerte
  - gelb: Batterietemperatur    rot: Ladestrom    blau: Ladespannung

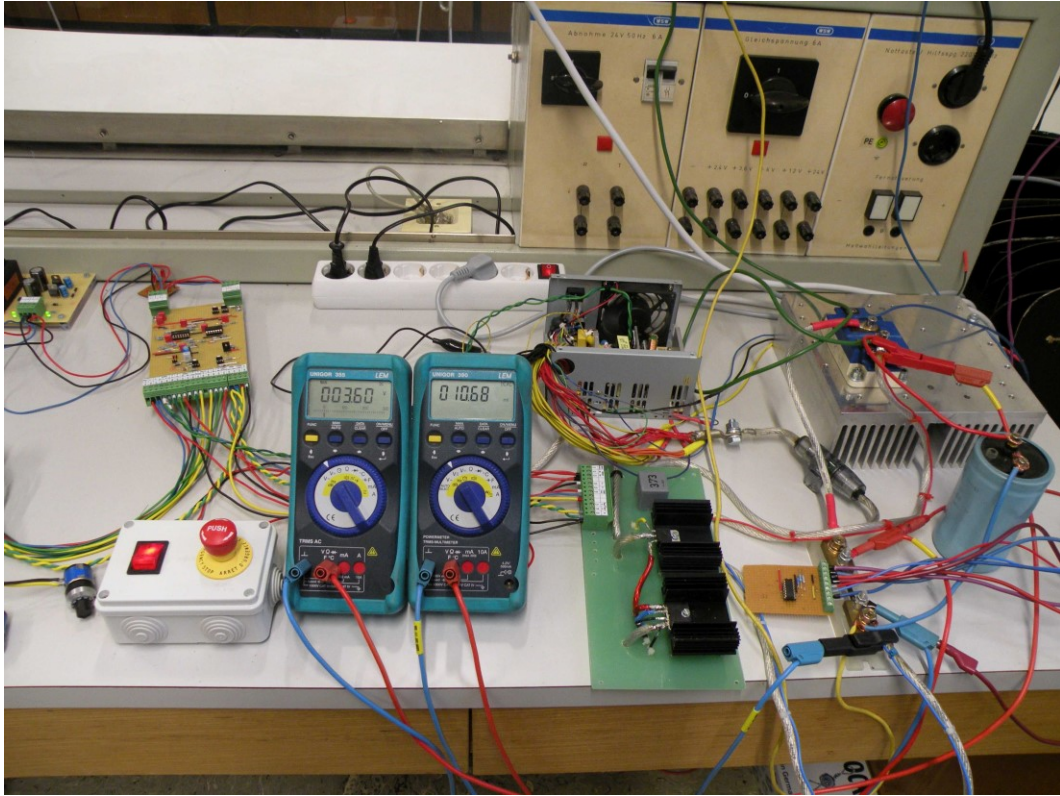


Abbildung 41: Aufgebaute Schaltung, Teil 2

---

## 11.5 Auswirkungen von Überladeversuchen

---

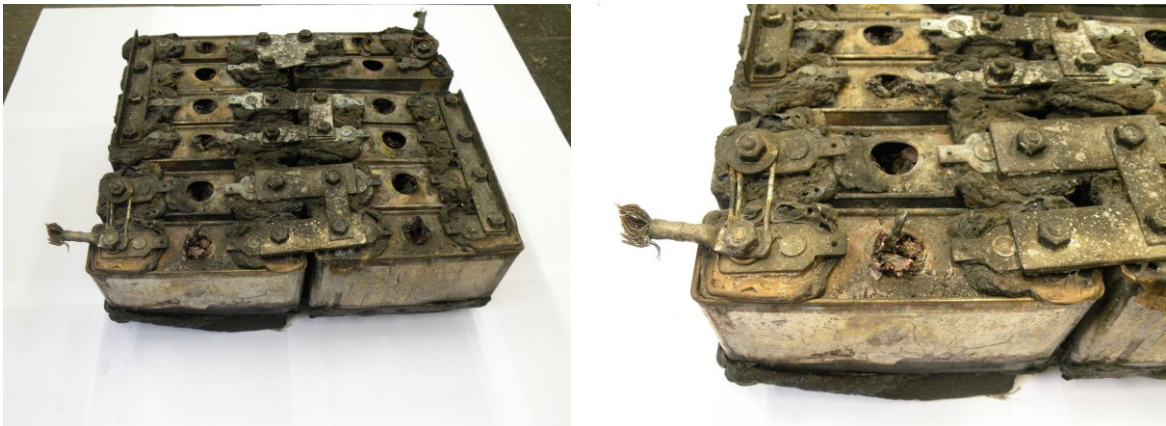


Abbildung 42: Batteriepaket nach Überladeversuchen

Obwohl das Batteriepaket bereits vollständig aufgeladen war, wurde das Laden absichtlich fortgesetzt, um die Zerstörung zu initiieren. Nach einer zusätzlichen Energiezufuhr von ca. 50 % öffneten sich infolge der inneren Erwärmung



(Energiezufuhr bewirkt keine Speicherung in chemischer Form mehr, sondern nur noch Umwandlung in Wärme) die Sollbruchstellen, der hochoverhitzte unter Druck stehende Elektrolyt wurde nach außen gesprüht und entzündete sich augenblicklich in einer Stichflamme, die pro Zelle knapp eine Minute brannte. So wurden die Batterien thermisch zerstört. Die Zellen haben sich dabei bereits trotz eines Edelstahlgehäuses hoher Festigkeit mechanisch verformt.