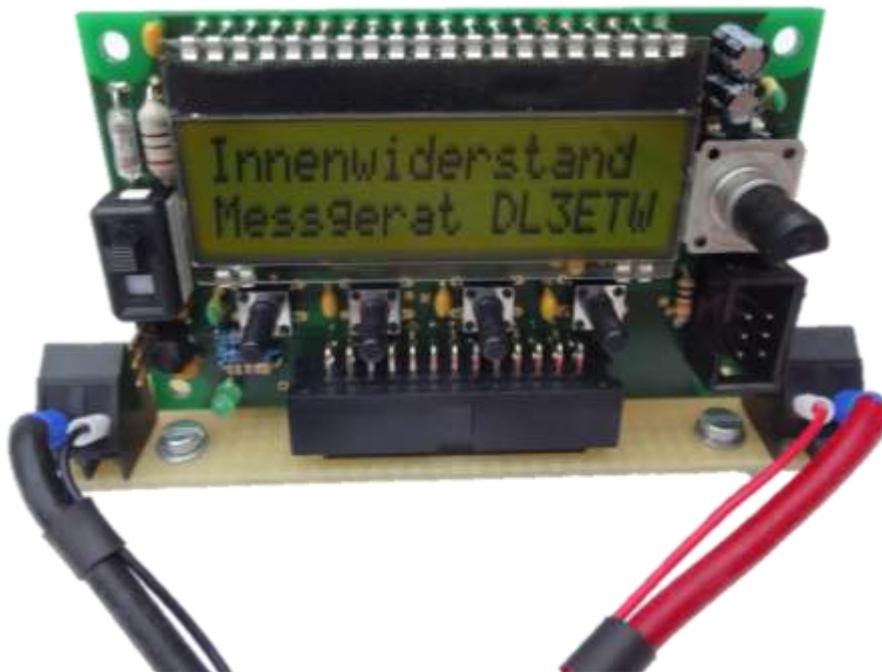


# Bestimmung des Innenwiderstandes von Akkus und Batterien

Ein Bericht von der Idee bis zur vollständigen Schaltung



Eine wichtige Kenngröße von Akkus ist neben der Spannung und Kapazität der Innenwiderstand. Auch wenn das Ladegerät den Akku fehlerfrei geladen anzeigt, bedeutet dies nicht, dass er im Bedarfsfall auch den erwarteten Strom liefern kann. So mag der Akku einen Transceiver im Empfangsbetrieb noch ausreichend mit Strom versorgen zu können, drückt man jedoch die Sendetaste, schaltet das Gerät ab. Dieses Verhalten dürfte nicht nur den OMs mit Erfahrung im Portabelbetrieb bekannt vorkommen. Ähnlich verhält sich ein DECT Telefon, das mit defekten oder verbrauchten Akkus betrieben wird. In dem Moment, wenn das Mobilteil die Basisstation mit erhöhter Sendeleistung sucht, schaltet es ab, weil die Akkuspannung zusammenbricht infolge eines zu hohen Innenwiderstandes. Dieser Beitrag beschreibt die Messtechnik und ein von mir entwickeltes Messgerät zur Bestimmung des Innenwiderstandes von Akkus und Batterien.

## Inhalt

Inhalt.....	2
1 Anforderung an das Gerät.....	3
2 Messtechnik.....	3
2.1 Bedeutung des Innenwiderstandes .....	3
2.2 Die unterschiedlichen Methoden zur Messung .....	4
3 Die ersten Versuche.....	6
4 Der Testaufbau .....	8
4.1 Testaufbau mit einem Mikrocontroller als Piggyback.....	8
4.2 Vierletermessung.....	10
4.3 Differenzverstärker für Spannung und Strom .....	11
4.4 Die Pulserzeugung .....	12
4.5 Pulsdauer und Einschwingen .....	14
4.6 Software Hauptroutine.....	15
4.7 Die Korrekturfaktoren .....	16
5 Der dritte Aufbau.....	18
5.1 Anforderungen an das Gesamtgerät .....	18
5.2 Der Controller ATmega328.....	18
5.3 Funktionen des Controller328_Mini .....	20
5.4 Stromversorgung.....	21
5.5 LCD .....	21
5.6 Drehencoder.....	21
5.7 DA-Wandler MCP4726 .....	21
5.8 Schaltplan des Controller328_Mini .....	22
5.9 Der analoge Teil .....	23
5.10 Schaltplan .....	24
5.11 Herstellung der Vierleiter-Prüfspitzen.....	25
6 Das Gesamtgerät.....	26
6.1 Genauigkeitsbetrachtung.....	26
6.2 Vergleichsmessungen .....	27
6.3 Hinweise zur Bedienung.....	29
6.4 Empfehlungen für die Wahl des Laststromes .....	30
6.5 Verbesserungen, Erfahrungen und Ausblick .....	31
7 Literaturhinweise.....	31

## 1 Anforderung an das Gerät

Am Ende dieses Projektes stellte ich mir ein kleines Eigenbaugerät vor, mit dem ich kurzerhand den Innenwiderstand eines Akkus aus einen DECT-Telefon, oder einer Li-Ion Zelle aus einem Handy überprüfen kann. Für mich ist nur von Bedeutung, dass der Messwert eine Aussage liefert, wie weit die Akkuspannung bei einer Gleichstrombelastung absinkt. Eine Zusammenstellung von gleichwertigen Akkus für ein 12V-Pack sollte damit möglich sein.

Mit einigen Messdaten von Akkus und Batterien im weiteren Teil ist es möglich über die Qualität des Prüflings zu entscheiden.

## 2 Messtechnik

### 2.1 Bedeutung des Innenwiderstandes

Im einfachsten Fall kann man sich alle Verluste konzentriert in einem einzigen Widerstand vorstellen. Bild 1 zeigt die ideale Spannungsquelle, den Innenwiderstand und eine externe Last. Bei näherer Betrachtung ist der Innenwiderstand nicht nur für das Zusammenbrechen der Akkuspannung verantwortlich, sondern auch für die Erwärmung beim Laden und Entladen und bestimmt somit auch den Wirkungsgrad hierbei. Sind große Ströme im Spiel, hat dies u.U. zur Folge, dass die Temperatur des Akkus überwacht werden muss. Der Innenwiderstand bestimmt weiterhin welche maximale Leistung dem Akku zu entnehmen ist. Will man mehrere Akkus in Serie verschalten, tut man gut daran, Akkus mit gleichem Innenwiderstand auszuwählen.

Vom Innenwiderstand auf den Ladezustand zu schließen, ist ein Thema für sich, in jedem Fall erhöht sich der Innenwiderstand mit dem Alter bei Li-Ion-Zellen. Dies ist unabhängig von den Ladezyklen und beginnt ab Fertigungsdatum. Während des Entladezyklus bleibt der Innenwiderstand vergleichsweise konstant, zum Entladeschluss steigt er stark an. Unter [1] wird dies in weiteren Details beschrieben.

In der Praxis setzt sich dieser gedachte Ersatzwiderstand aus einer Vielzahl von Wirkwiderständen, kapazitiven und induktiven Komponenten zusammen, die ihre Ursache in der chemischen Zusammensetzung bis hin zur Zuleitungsinduktivität haben. Dies sollte ich im weiteren Verlauf der Entwicklung noch kennenlernen.

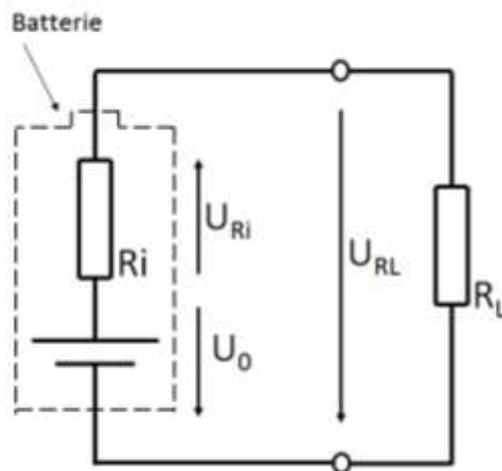


Bild 1: Ersatzschaltbild Batterie mit Last

## 2.2 Die unterschiedlichen Methoden zur Messung

Um es vorweg zu nehmen, **die** richtige Methode mit **dem** richtigen Ergebnis gibt es nicht. Dies hängt von vielen Faktoren ab wie:

- Messmethode, siehe Liste nachstehend
- Typ des Akkus, NiMH, NiCd, Li-Ion etc.
- Typ der Batterie Zink-Kohl, Alkali Mangan
- Prüfstromstärke und Dauer
- Temperatur, Ladezustand, Alter der Zelle

Auch der Vergleich des eigenen Messergebnisses mit den Spezifikationen des Herstellers ist schwierig. Der Hersteller misst nach einer Vielzahl von DIN Normen oder gibt seine eigene Methode vor. In [3] beschreibt Energizer in einem Technical Bulletin die „Dual pulse method“ (5mA/505mA) für Batterien. So hat eine frische Alkaline Zylinder Batterie 150 bis 300 m $\Omega$ , abhängig von der Größe der Zelle.

Insbesondere bei Li-Ion-Zellen misst der Hersteller fast ausschließlich nach der AC-Methode bei 1 kHz. Diese Messwerte sind deutlich niedriger und kaum mit der durch die  $\Delta U / \Delta I$  – Methode bestimmten vergleichbar.

Drei Methoden möchte ich hier kurz erwähnen siehe auch [3]:

1.  $\Delta U / \Delta I$  – Methode
2. Laden mit einem sinusförmigen 1 kHz Strom
3. Über die Erwärmung beim Laden/Entladen

Bei 1. wird zuerst die Leerlaufspannung, bzw. Grundlast gemessen und anschließend mit einem definierten Strom. Mit den zwei zugehörigen Spannungswerten und ist  $R_i$  bestimmbar.

$$R_i = (U_0 - U_1) / (I_1 - I_0) \quad \text{GI (1)}$$

Bei 2) wird das Verhältnis nach Betrag und Phase der sinusförmigen Ladespannung zum Strom gebildet. Dieses Ergebnis ist unterschiedlich von 1. und hat sich zum einem Standard entwickelt. Man findet diesen Wert fast ausschließlich in den Datenblättern von Li-Ion-Zellen.

$$Z_i = U(t) / I(t) \quad \text{bei 1 kHz} \quad \text{GI (2)}$$

3) ist von untergeordneter Bedeutung. Die beim Laden oder Entladen abgegebene Wärme führt zu einer Temperaturerhöhung in einer Flüssigkeit. Durch eine Vergleichsmessung mit einer anderen bekannten Wärmequelle lässt sich der Innenwiderstand bestimmen.

$$Q = I R_i t \quad \text{GI (3)}$$

### 3 Die ersten Versuche

Erste Versuche habe ich nach  $\Delta U / \Delta I$  – Methode gemacht. Hierzu habe ich verschiedene Hochlastwiderständen verwendet und mit einem digitalen Multimeter gemessen. Auf einer Lochrasterkarte habe ich verschiedene Steckverbinder und einen Taster verlötet. Mit dem Multimeter habe ich direkt an den Polen des Akkus gemessen und im zweiten Messschritt mit dem Taster die Last eingeschaltet. Den tatsächlichen Strom habe ich über einen  $0,1 \Omega$  5 Watt Drahtwiderstand im Metallgehäuse (Toleranz 1%) gemessen. Bild 2 zeigt die Platine mit einer Auswahl an Lastwiderständen. Die Messwerte habe ich in ein Excel-Sheet eingetragen und den Innenwiderstand berechnet.

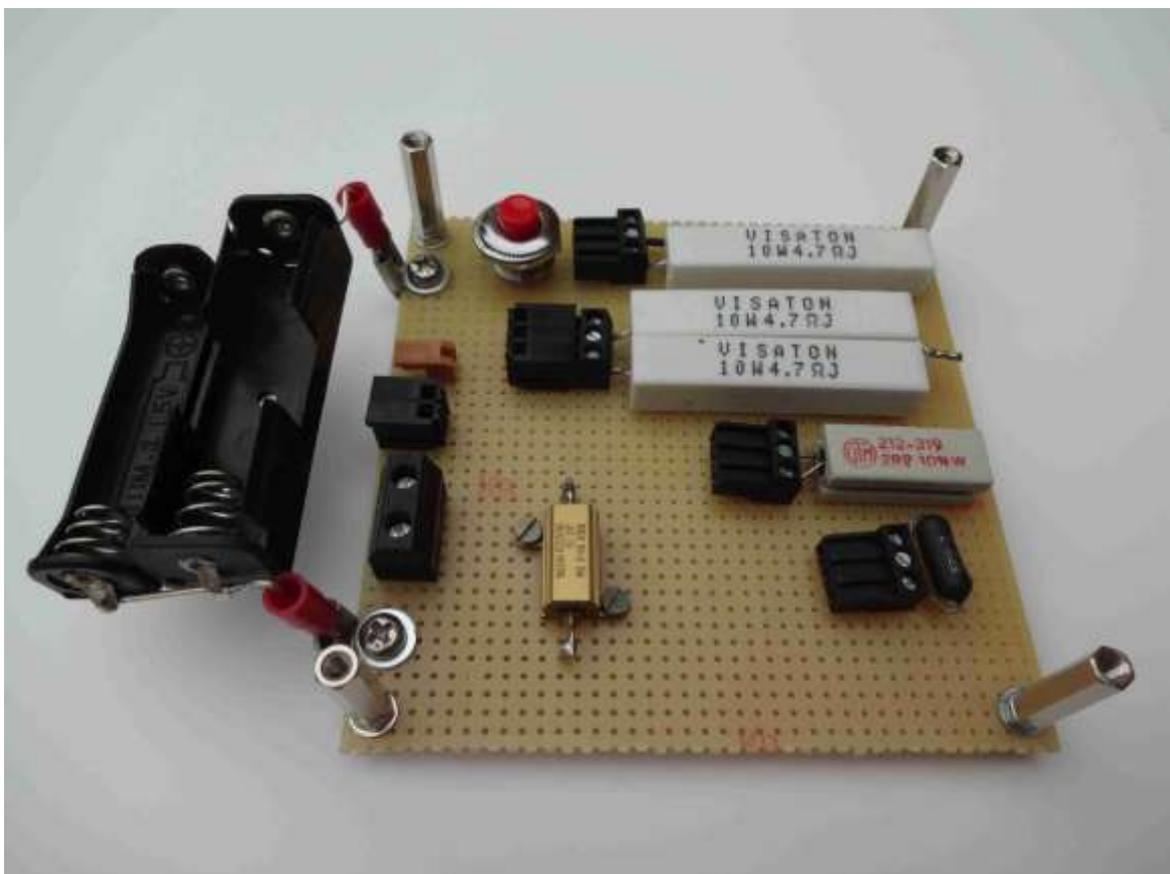


Bild 2. Lochrasterkarte mit Hochlastwiderständen

Von besonderem Interesse für war für mich die Ermittlung des Innenwiderstandes einer Autobatterie. Für die Messung war ein Lastwiderstand erforderlich, der eine deutlich messbare Spannungsänderung an den Polen der Batterie erzeugt. Ich entschied mich für einen Laststrom von 50 A. Der erforderliche Widerstand von  $0,25 \Omega$  war schnell aus 23 Meter  $1,5 \text{ mm}^2$  Kupferdraht auf ein Holzbrett gewickelt. Die entstehende Verlustleistung von 600 Watt sollte er mühelos stand halten. Siehe Bild 3.

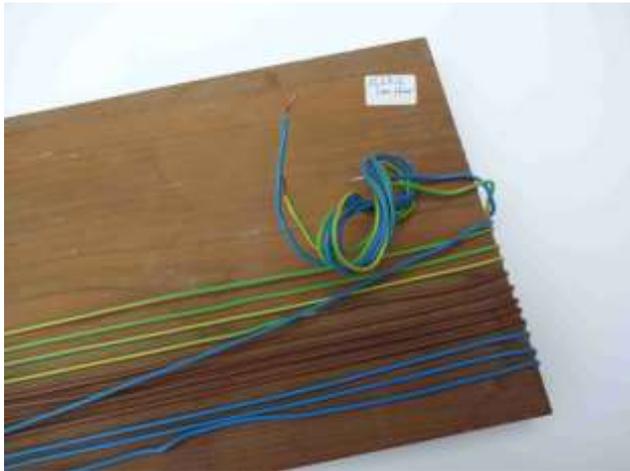


Bild 3. Lastwiderstand  $0,25 \Omega$  für 50 A

Für die Messung an einer Autobatterie musste ich den tatsächlich fließenden Strom mit einer Stromzange gemessen. An einer Autobatterie und einer Motorradbatterie ermittelte ich folgenden Innenwiderstände:

36 Ah Autobatterie	$0,020 \Omega$
19 Ah Motorradbatterie	$0,025 \Omega$

Diese Methode stellte sich auf Dauer als recht mühselig heraus, das Interesse jedoch an der Messtechnik im Milliohmbereich blieb. Es entstand die Idee die Messwertaufnahme zu automatisieren und die Berechnung einem Mikrocontroller zu überlassen. Auch die Verwendung von Hochlastwiderständen und die damit entstehende Verlustleistung sind unhandlich. Eine Internetrecherche ergab, dass es handelsübliche Geräte, nicht nur für den Modelbaubereich gibt, die die Messung mit einer pulsformigen Belastung durchführen. Hierdurch wird die entstehende Verlustleistung deutlich reduziert. Auch dieses Signal ließe sich einfach mit einem Controller erzeugen.

## 4 Der Testaufbau

### 4.1 Testaufbau mit einem Mikrocontroller als Piggyback

Für den Testaufbau konzentrierte ich mich jedoch erst einmal auf die Vermessung von einzeln Akkus und Batterien und beschränkte mich auf Lastströme bis ca. 5 A.

Für den Controller plante ich eine häufig von mir verwendete Schaltung mit einem ATmega328, einem LC-Display, vier Tastern, einem Drehencoder und einer Stromversorgung bestehend aus einer Li-Ion Zelle ein. Diese Schaltung baute ich auf einer separaten Lochrasterplatine auf. Der zu entwickelnde analoge Teil sollte später, separat auf einer Lochrasterkarte im Eurokartenformat folgen. Bild 4 und 5 zeigen die gesamte Schaltung. Der Controller befindet sich über der eigentlichen Platine als Piggyback. Die rote Li-Ion Zelle ist der Prüfling.

Der zu entwickelnde analoge Schaltungsteil bestand aus drei Teilen:

- Stromsenke mit einem FET, der den Akku mit einem definierten Strom entlädt
- Messverstärker, der den tatsächlichen Stromfluss misst.
- Messverstärker, der die Spannung an den Akkupolen misst.

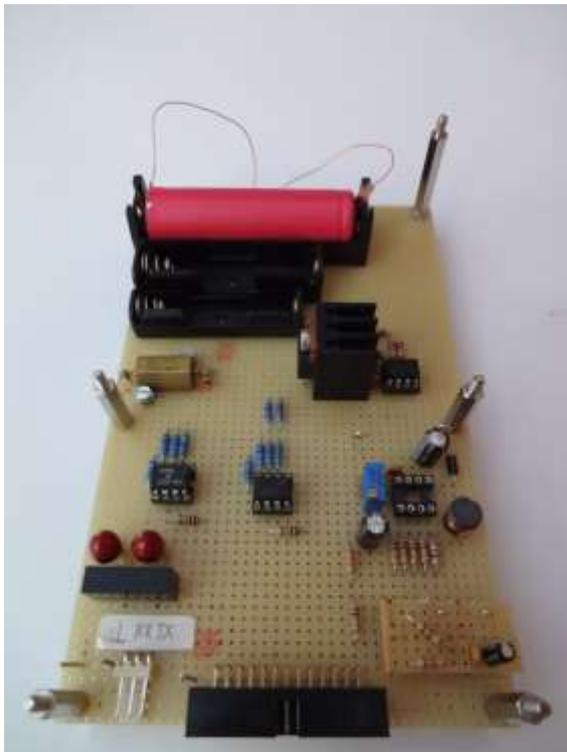


Bild 4: Foto des Testaufbaus

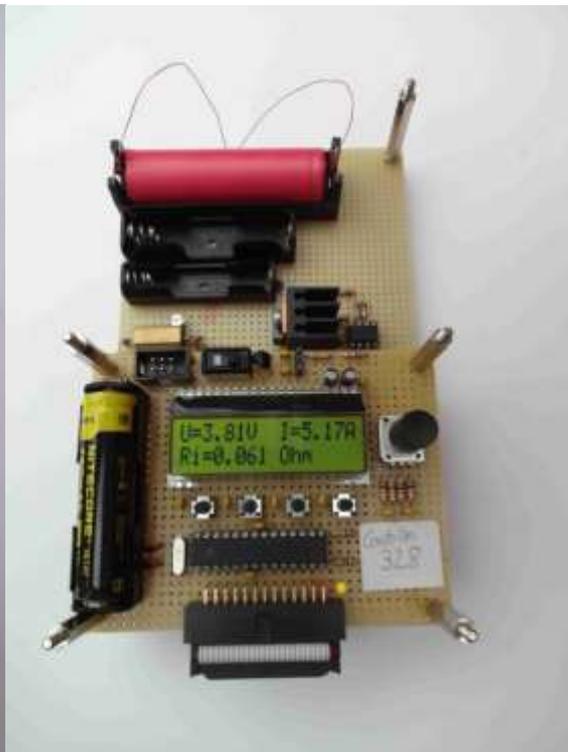


Bild 5: Foto Testaufbau mit Piggyback

Um den Bauteileaufwand so gering wie möglich zu halten, versuchte ich auf die negative Versorgungsspannung für den Operationsverstärker zu verzichten und mit der Versorgungsspannung aus der Li-Ion Zelle von 3,5 V bis 4,2 V des Controllerboards alleine auszukommen. Dies musste ich jedoch schnell verwerfen,

da die benötigte Gate-Spannung des Leistungs-FETs deutlich höher sein würde. Dies ergab ein Blick ins Datenblatt. Vorerst erzeugte ich eine zusätzliche 12V Versorgungsspannung mit einem DC/DC Wandler IC MC34061.

### Stromsenke

Der naheliegende Ansatz mit dem Controller ein PWM zu erzeugen, die über einen Tiefpass eine proportionale Spannung für die Stromsenke liefert, zog ich nicht näher in Erwägung. Ich fand einen 12 Bit DA-Wandler MCP4726, der sich über die I2C-Schnittstelle ansteuern ließ bei [2]. Im ersten Schritt wollte ich nur einen definierten Strom mit dem Controller erzeugen, ohne zu diesem Zeitpunkt bereits Gedanken an das spätere Tasten des PWM Signals zu verschwenden.

Den DA-Wandler im SOT-23-6 Gehäuse baute ich auf einer separaten kleinen Lochrasterplatine auf. Die Versorgungsspannung von 3,3 V der Controllerplatine diente als Versorgungsspannung und Referenzspannung des DA-Wandlers.

### Software

Entwicklungsbegleitend habe ich die Software in AVR-GCC mit Atmel Studio 4 geschrieben. Die Grundfunktionen für das LCD, den Drehencoder und die Taster existierten bereits, so dass ich für die ersten Schritte nur einige Zeilen in der Hauptschleife des Programm einfügen brauchte. Für die I2C-Einbindung habe ich auf die Routinen von Peter Fleury zurückgegriffen. Nach einem kurzen Studium des Datenblattes des DA-Wandlers reduzierte sich die Softwareanbindung lediglich auf zwei Befehle.

### Strom- und Spannungsmessung

Hierfür plante ich den 10Bit AD-Wandler des ATMEga ein. Ich entschied mich für die integrierte Referenzspannung von 1,1 V. Für die Strommessung über ein Shunt verwendete ich den bereits oben erwähnten 0,1  $\Omega$ , 5 Watt Widerstand.

Für die allerersten Gehversuche mit der Software verband ich den ADC1 mit dem Shunt und den ADC2 über einen Spannungsteiler mit dem zu vermessenden Akku. Die damit verbundenen Messfehler nahm ich vorerst in Kauf.

Mit dem recht genauen Digital-Analog-Wandler und einer Stromsenkenschaltung aus einem OP, einem Shunt und einem FET, besteht die Möglichkeit über die Stellspannung am Ausgang des DA-Wandlers schon den Laststrom recht genau einzustellen, ohne ihn noch separat mit dem Controller messen zu müssen. Siehe Bild 6. Nach einer Vielzahl von Testschaltungen und Softwarekonfigurationen inklusive einer digitalen Regelung gab ich diesen Ansatz auf, so dass ich den Laststrom über die Stromsenke grob vorgebe, den tatsächlichen Strom jedoch mit dem AD-Wandler des Controllers am Shunt messe und für die Berechnung verwende. Mit ein Grund war, dass bei größeren Strömen nicht gewährleistet ist, dass der vorgegebene Strom sich auch einstellt. Der Schaltungsaufbau und der Innenwiderstand des Akkus könnten diesen begrenzen.

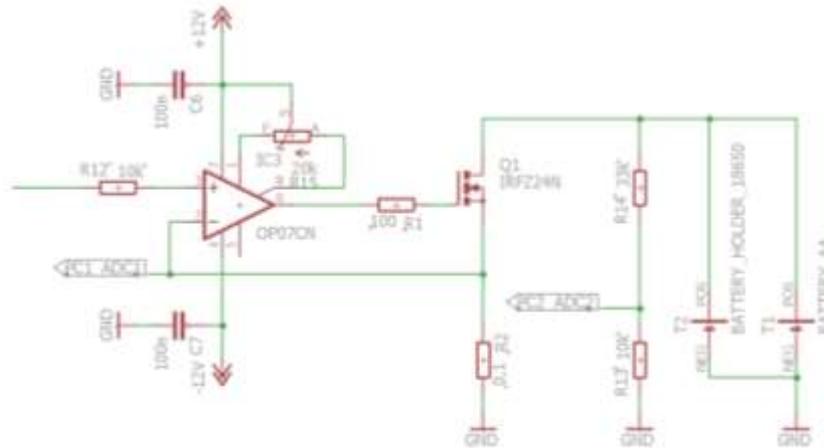


Bild 6. Prinzipschaltung einer Stromsenke mit OP und FET

Für die nun folgende Entwicklung der Software implementierte ich die Vorgabe des Laststromes bis 10 A in die Software. Durch einen Tastendruck konnte ich den definierten Laststrom ein und ausschalten. Als Ersatz und zur Sicherheit verwendete ich anstatt eines Akkus ein Labornetzteil als Prüfling. Ich konnte stets den tatsächlichen fließenden Strom überwachen. Da ich den Pulsbetrieb noch nicht implementiert hatte, konnte ich nur mit geringen Strömen prüfen, denn die gesamte Energie wurde am FET in Wärme umgesetzt.

#### Die ersten Messungen

Nachdem ich soweit Vertrauen in die Hardware und Software hatte, implementiert ich eine Routine, die zyklisch zwei mal pro Sekunde zwischen Leerlauf und Lastbetrieb umschaltete und gleichzeitig die Spannungen aufnahm. Nachdem nun der Controller soweit seine Messungen und Berechnungen durchführte, konnte ich mich um die genaue Messung der Spannung und des Stromes kümmern.

## 4.2 Vierleitermessung

Diese Methode wird verwendet, um Widerstände im Milliohmbereich zu messen. Hierbei schickt man einen bekannten definierten Strom durch den zu bestimmenden Widerstand und misst die abfallende Spannung direkt am Widerstand. Der Quotient aus der gemessenen Spannung und dem Laststrom ergibt den Widerstand des Prüflings.

Für meine Anwendung messe ich den Laststrom über einen den Shunt, die Spannung muss ich dann direkt an den Polen des Akkus messen, einmal ohne Last und einmal mit dem Laststrom.

#### Das Masseproblem

Bei einem Laststrom vom 5A ist der Minus-Pol des Akkus und die „kalte Seite“ des Shunts sind nicht mehr gleichzeitig die Masse des Controllers und somit des AD-Wandlers. Der Schaltungstechnische Aufwand diesen Messfehler zu beseitigen ist erheblich. Es sind je ein Differenzverstärker bestehend aus einem Operationsverstärker für die Spannungen über dem Shunt und für die Spannung

direkt an den Polen des Akkus erforderlich. Ich nahm dies auch gleich zum Anlass die zusätzliche negative Versorgungsspannung für die OPs bereit zu stellen. Ich entschied mich für einen 1W DC/DC Wandler, der mir aus den 3,5 bis 4,2 Volt der Li-Ion Zelle vom Controller die notwendige +/- 12V für die nun drei Operationsverstärker erzeugt.

Meine Bedenken, dass der DC/DC Wandler bei Unterspannung abschaltet, bestätigt sich nicht. Die Eingangsspannung ist mit 5,0 V +/- 10 % spezifiziert. Auch wenn die Akkuspannung auf 3,5 absinkt, schaltet der Wandler nicht ab, sondern reduziert die Ausgangsspannung. In einem Testaufbau mit der Nennlast habe ich dies untersucht. Die tatsächliche Versorgungsspannung der nun drei OPs ist nicht weiter von Bedeutung und mein Versorgungsspannungsproblem gelöst. Über die Restwelligkeit von 75 mV<sub>ss</sub> von > 50 kHz auf der Versorgungsspannung machte ich mir keine Sorgen.

### 4.3 Differenzverstärker für Spannung und Strom

In Bild 5 des zweiten Testaufbaus ist die separate Spannungsmessung direkt an den Polen des Akkus zu sehen. Es führen von hier zwei dünne Kupferlackdrähte zu dem Operationsverstärker auf der Lochrasterplatine. Ich habe an den Kupferlackdrähten kleine Kupferplättchen angelötet und diese zwischen der Batteriehalterung und dem Anschlusspol des Akkus geschoben. Dies hat keinen Einfluss auf den Strom durch den Akku, da er geregelt wird. Der tatsächliche Wert wird ohnehin gemessen. Der Differenzverstärker erhält an den Eingängen diese zwei Spannungen direkt von den Polen des Akkus. Die Ausgangsspannung entspricht der Differenz mit einer definierten Verstärkung in Bezug auf Masse. Auf gleiche Art verfähre ich mit der Spannungsmessung am Shunt. Auch hier habe ich direkt zwei Drähte von den Anschlüssen zum Differenzverstärker geführt.

Für beide Spannungen verwende ich die gleiche Schaltung. Die Spannung wird mit 0,25 und der Strom mit 1.0 verstärkt bzw. reduziert. Um von der Genauigkeit nicht viel einzubüßen, verwende ich hier Metallwiderstände mit 1% Toleranz.

Als Operationsverstärker wählte ich den Klassiker OP07, siehe Bild 7 mit dem Schaltplan. Die Widerstände am Ausgang der OPs dienen zur Strombegrenzung, sie schützen die Eingänge des AD-Wandlers im ATmega328. Ich habe den Testaufbau um die zwei OPs und dem DC/DC Wandler erweitert.

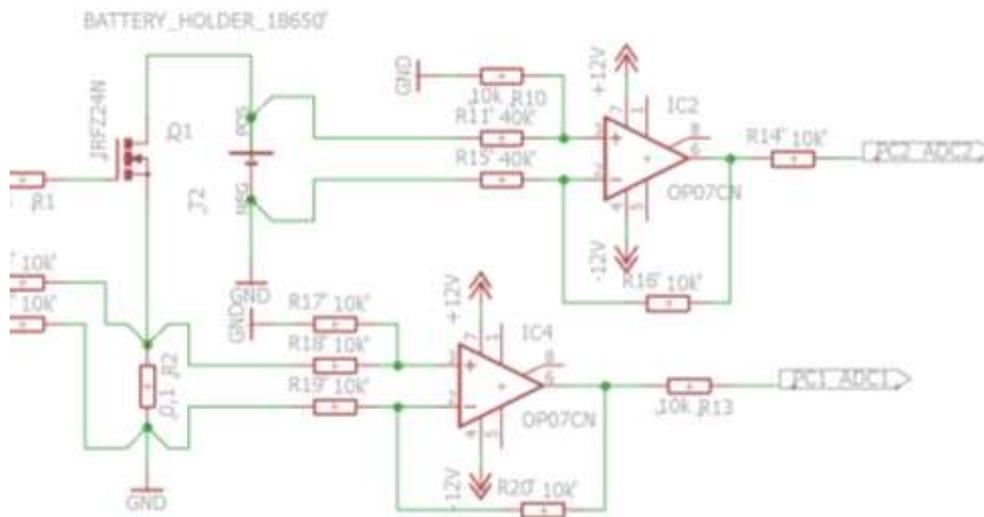


Bild 7: Auszug Schaltplan Differenzverstärker für Spannung und Strom

#### 4.4 Die Pulserzeugung

Der Pulsbetrieb hat den Zweck die Verlustleistung zu verringern, alternativ kann der Pulsstrom erhöht werden, um eine höhere Spannungsdifferenz zwischen Leerlauf und Lastbetrieb zu erzeugen. Bei näherer Betrachtung der ansteigende Flanke des Strompulses erwies sich die Prinzipschaltung der Stromsenke nach Bild 6. als ungeeignet. Es war stets ein Schwingen im Einschaltmoment des FETs zu beobachten. Die Anstiegszeit liegt bei ca. 300  $\mu$ s. Siehe Bild 8 und 9, Schaltplan Stromsenke und Oszillogramm

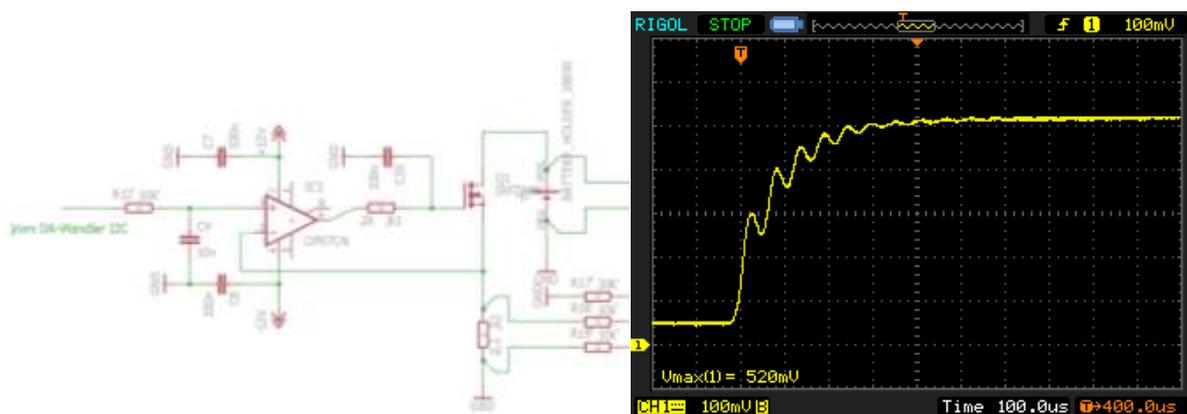


Bild 8 und 9: Schaltung Stromsenke und Oszillogramm

Nach einer Modifikation gemäß Bild 10, konnte ich das Einschwingen beseitigen und die Anstiegszeit auf 64  $\mu\text{s}$  verringern. Die Schaltung konnte ich aus einer ähnlichen Applikation übernehmen. Diese Spannungen ist am Shunt von 0,1 Ohm gemessen, so dass die 500 mV einem Strom von 5 A entsprechen. Siehe Bild 10 mit dem neuen Schaltplan und Bild 11 mit dem zugehörigen Oszillogramm.

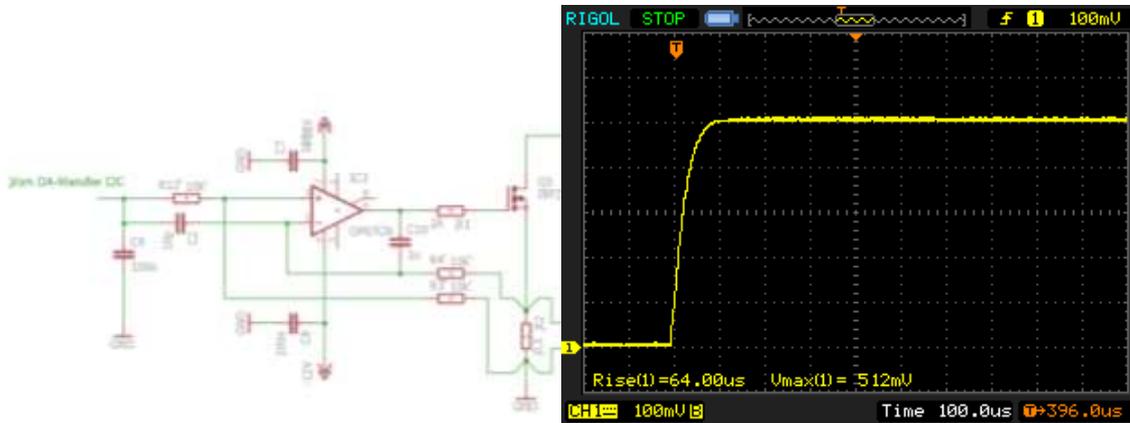


Bild 10 und 11: Geänderte Schaltung und Oszillogramm

## 4.5 Pulsdauer und Einschwingen

Hiermit gab ich mich zufrieden und konnte mich nun auf das Timing der Pulserzeugung und der AD-Wandlung in der Software beschäftigen. Ich legte die Anzahl der Messungen auf eine pro Sekunde fest. Anfängliche Versuche die Pulslänge auf 1 ms zu reduzieren scheiterten daran, dass der Akku, in diesem Fall eine Li-Ion-Zelle 18650, noch Zeit benötigt um einzuschwingen. Siehe Bild 12.

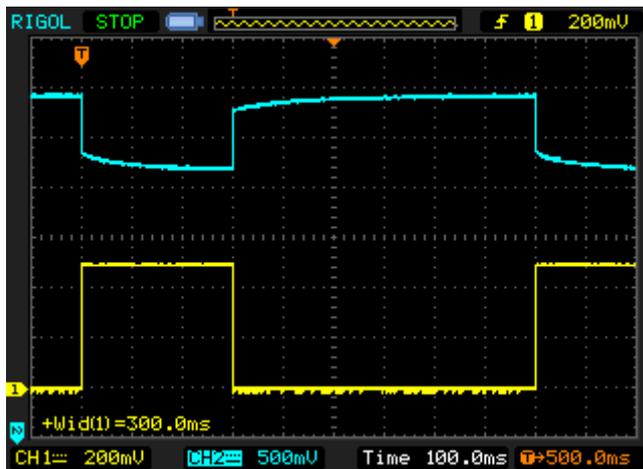


Bild 12 Single-shot Oszillogramm

CH#1, gelb, Spannung über dem Shunt mit 2 A / cm

CH#2, blau, Spannung direkt an den Polen der Li-Ion Zelle Akkus 500 mV / cm

Mit dem Einschalten des Stroms sinkt die Spannung am Akkus unmittelbar um 700 mV, benötigt jedoch noch weitere 200 ms, um auf den endgültigen Wert abzusinken. Diese Erkenntnis ließ mich erneut im Internet recherchieren, den offensichtlich schien der Innenwiderstand im Akku noch eine zeitliche Abhängigkeit zu haben, die ich in diesem Zusammenhang nicht vernachlässigen konnte. Eine Spannungsmessung direkt nach dem Einschalten der Last würde zu einem geringeren Innenwiderstandsmesswert führen, als ich für meine Anwendung erwarte.

Unter [4] lernte ich, dass das von mir unter Bild 1 angenommene Ersatzschaltbild in meinem Fall nicht mehr ausreicht. Ich fand ein erweitertes Ersatzschaltbild, das meine Messungen erklärte. Siehe Bild 13: Randles Model. Der zusätzliche Kondensator „C“ sorgt für das weitere Abfallen der Spannung während der Belastung. Erst wenn C vollständig geladen ist, ergibt sich der Innenwiderstand aus  $R1$  plus  $R2$ .

Wenn es keine weiteren Batterien oder Akkus in meinem Anwendungsfall gibt, die eine längere Einschwingzeit benötigen, könnte ich dieses Puls/Pausenverhältnis beibehalten. Separate Messungen an Batterien und Akkus, alt oder neu, leer oder voll sollten folgen.

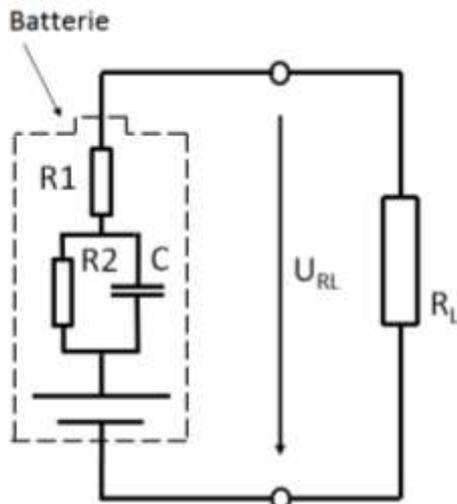


Bild 13: Randles Model

#### 4.6 Software Hauptroutine

Nachfolgend ein Auszug aus der Hauptschleife des Programms. Ich rufe hier nacheinander einige Unterprogramme auf. Die Variable "Load\_counter" wird periodisch alle 100ms aufgerufen. In den jeweiligen If-Abfragen kann ich den Beginn auf ein 100 ms Zeitintervall festlegen. Im ersten Teil wird die U\_0 gemessen und der Laststrom eingeschaltet. Im zweiten wird kurz vor dem Abschalten die Spannung U\_1 gemessen und der zugehörige Strom I\_1.

```

if (load_counter == 1)                // starte
{
    set_load_current(0);                // kein Laststrom
    read_ad_channel();                  // lese Werte für Leerlaufspannung U_0
    ad_spannung_strom[1] = adc[2];      // 1: U_0, 2: I_0, Leerlaufwerte für später merken
    ad_spannung_strom[2] = adc[1];
    dac_value = calc_dac_value(last_strom); // rechne Entladestrom aus
    set_load_current(dac_value);        // schalte nun Entladestrom ein
}
if (load_counter == 4)                // starte
{
    read_ad_channel();                  // lese erneut alle Werte nun unter Last
    set_load_current(0);                // schalte Strompuls wieder aus
    ad_spannung_strom[3] = adc[2];      // U_1, 4: I_1
    ad_spannung_strom[4] = adc[1];      // sichere Werte für später
}
if (load_counter == 9)                // nun ist eine Sekunde um
                                        // ein wenig rechnen und Ergebnisse anzeigen
{
    display_voltage_current(2,1);
    U_0 = ad_spannung_strom[1] * 4.35 / 1024; // Rechnung dauert sehr lange typ. 1ms
    I_0 = ad_spannung_strom[2] * 11.0 / 1024;
    U_1 = ad_spannung_strom[3] * 4.35 / 1024;
    I_1 = ad_spannung_strom[4] * 11.0 / 1024;

    I_0 = 0;                            // wird nicht verwendet
    R_i = ((U_0 - U_1) / (I_1 - I_0));
}

```

```
    dtostrf ((R_i), 1,3,(char*) ascii[3]);    // one digits left of decimal, three right
    lcd_pos( 1,0);
    lcd_text("Ri=      ");    // zeige Innenwiderstand an
    lcd_pos( 1,3);
    lcd_text((char*) ascii[3]);
    lcd_pos( 1,9);
    lcd_text("Ohm  ");

    load_counter = 0;    // nun wieder von vorne eine Sekunde ist um
}
```

Im dritten Teil der Hauptschleife wird der Innenwiderstand aus den zuvor gemessenen Spannungen und Strömen berechnet. Die Messwerte aus dem Wandler habe ich mit einem Korrekturwert versehen und in eine Gleitkommazahl gewandelt.

$$R_i = ((U_0 - U_1) / (I_1 - I_0));$$

Das Ergebnis wird auf dem Display angezeigt und ein neuer Messzyklus von einer Sekunde beginnt.

Es war sehr hilfreich, die Rohdaten aus dem Wandler in Echtzeit über die serielle Schnittstelle mit einem Terminal Programm verfolgen zu können. Die Messwert streuten um mehrere Digits. Durch die Erhöhung der Mittelwertbildung in der Analog-Digital-Wandler Routine, konnte ich dies deutlich verringern. Ich habe die Mittelung auf 50 heraufgesetzt. Dies führte zu einer stabileren Anzeige.

#### 4.7 Die Korrekturfaktoren

Spannung:

Mit dem Wert " 4.35 / 1024" korrigiere ich den 10 Bit-Wert des Wandlers auf die Float Variable für die Spannung des Prüflings.

Am Eingang des Controllers ergibt sich der Wert zu:

$$ADC = (V_{in} / V_{ref}) * 1024 \quad \text{vgl. Datasheet ATmega238}$$

Als  $U_{ref}$  wurde die interne Referenz von 1.1 Volt gewählt.

Die  $V_{in}$  wird durch den Differenzverstärker mit den Widerständen von 10 k $\Omega$  auf eine Verstärkung von (10k / 40k) = 0,25 reduziert:

$$ADC = (V_{in} * 0.25 / 1.1) * 1024 \quad // \text{umgestellt nach } V_{in}$$

$$V_{in} = ADC * (1.1 / 0,25) / 1024$$

$$\underline{V_{in} = ADC * 4.4 / 1024}$$

Strom:

$$\text{ADC} = (V_{\text{in}} / V_{\text{ref}}) * 1024$$

Die  $V_{\text{in}}$  ergibt sich zu am Differenzverstärker mit den Widerständen von 10 k $\Omega$  und 10k zu 1,0

$$\text{ADC} = (V_{\text{in}} / 1.1) * 1024$$

$$V_{\text{in}} \text{ am Eingang OP: } V_{\text{in}} = (\text{ADC} / 1,0) * 1.1 / 1024$$

$$\text{Am Shunt: } V_{\text{in}} = (\text{ADC} / 1.0) * 1.1 * 10 / 1014 \quad // \text{ umgestellt nach } V_{\text{in}}$$

$$V_{\text{in}} = \text{ADC} * 11.0 / 1024$$

$V_{\text{in}}$  = Spannung am Shunt

Verstärkung OP = 1.0

Referenzspannung 1.1 V

Shunt = 10 V/A

Ein Abgleich oder Kalibration des Gerätes ist nicht erforderlich.

## 5 Der dritte Aufbau

### 5.1 Anforderungen an das Gesamtgerät

Der Testaufbau verwendet Batteriehalter für die Typen AAA, AA und 18650. Für die Vierleitertechnik sind jedes mal die Kontakte für die Spannungsmessung zu wechseln. Das endgültige Gerät sollte mit Eigenbau-Tastspitzen in der Vierleitertechnik ausgestattet werden.

Hier die Eckdaten des Gesamtgerätes:

Eingangsspannung:	4,4 V max.
Laststrom:	0,1 bis 10 A max.
R <sub>i</sub> Anzeigebereich	0 bis 10 Ω
Messzyklus	1 s, periodisch, 30% Dutycycle

### 5.2 Der Controller ATmega328

Der ATmega328 hat sich als ein sehr universeller Mikrocontroller erwiesen. Durch seinen recht großen Flashspeicher und der Vielzahl der Funktionen hat er sich zu einem Standard etabliert. Dies zeigt sich auch dadurch, dass er in einer Vielzahl von Projekten rund um den Arduino verwendet wird.

Dieses Projekt nahm ich zum Anlass einen autarken Controller auf einer separaten Leiterkarte mit den Abmaßen eine viertel Europakarte zu entwickeln. Die Hardware umfasst den Controller, LCD, 4 Taster einen Drehencoder und ein Stromversorgung in Form einer kleinen Li-Ion Zelle. Die meisten Portpins des Controllers sind mit einem 26-poligen Wannensteckverbinder am Rand der Platine verbunden.

Die Controllerplatine kann somit an der Frontplatte eines Gerätes befestigt werden und über ein Flachbandkabel wird die Verbindung zur Hauptplatine hergestellt. Da die Leiterkarte zweilagig ist, können Änderungen an der Leiterbahnführung nachträglich durchgeführt werden. Während der Entwicklung von kleinen Projekten hat sich dieses Board als recht hilfreich erwiesen. Frontansicht der fertig bestückten Platine siehe Bild 14.

Der Nachbau des Controllers kann auch auf einer Lochrasterplatine erfolgen. Natürlich ist dann für das DIL-Gehäuse für den Controller vorzuziehen. Der Schaltplan ist im EAGLE-Format im Downloadbereich bei FUNKAMATEUR zu finden. Das Layout stelle ich gerne zur Verfügung.



Bild 14: Controller328\_Mini

### 5.3 Funktionen des Controller328\_Mini

Auf einer Fläche einer viertel Europakarte (80 mm x 50 mm) ist folgende Hardware integriert:

- ATMega328
- LCD 2 x 16 Zeichen
- Drehencoder mit Taster
- 4 Taster
- 12 Bit Digital-Analog-Wandler
- 3,7 V Li-Ion Zelle 750 mAh
- 26 poliger Wannensteckverbinder mit Verbindung zum Controller
- 6 poliger ISP Steckverbinder

Mit einer eigenen Spannungsquelle an Board ist der Controller direkt betriebsbereit. Weitere externe Spannungen sind nicht erforderlich. Der ATMega328 wird wie das LC-Display mit 3,3 Volt betrieben. Über den 6-poligen ISP Wannensteckverbinder ist ohne weitere Hardware eine Programmierung möglich.

Bild 15 zeigt die Rückseite mit dem Batteriehalter und dem Li-Ion Akku. Der Controller und der 12 Bit DAC sind als SMD Bauteil zu erkennen.



Bild 15: Rückseite mit ATMega328 und DAC

## 5.4 Stromversorgung

Auf der Rückseite befindet sich eine Batteriehalterung für eine Mignonzelle, Typ AA. Es gibt eine Li-Ion Zelle mit den Abmaßen 14 mm x 50 mm, der genau in diese Halterung passt. Dieser Akku versorgt die Schaltung mit einer Spannung von 3,5 bis 4,2 V. Der Akku muss extern geladen werden.

Beim Einlegen des Akkus ist unbedingt auf richtige Polung zu achten. Ein Betrieb mit 1,5 V Mignon ist nicht möglich.

Der LP2950 3,3 V Spannungsregler ist ein „low dropout voltage, and low quiescent current.“ Der Stromverbrauch des Controller und des LCDs ist geringer als 5 mA, auch ohne den Controller in einen Sleep-Modus zu versetzen, oder den DAC / LED abzuschalten. Mit dem Akku ist somit mühelos eine Betriebsdauer von weit über 100 Stunden möglich. Eine externe Versorgung von bis zu 30 V ist alternativ über den 26-poligen Wannensteckverbinder möglich. Hier ist dann die Verlustleistung des LP2950 zu beachten und die Li-Ion Zelle natürlich zu entnehmen.

Die Akku-Spannung und die geregelten 3,3 V aus dem Spannungsregler sind ebenfalls auf den 26-poligen Wannensteckverbinder geführt. Somit lässt sich eine externe Baugruppen auch hieraus versorgen.

## 5.5 LCD

Das zweizeilige LC-Display EA DOGM162L-A macht diesen Aufbau mit dem geringen Bauteileaufwand erst möglich. Durch die geringe Stromaufnahme von typisch 250  $\mu$ A und einer Versorgungsspannung von nur 3,3 Volt ist ein Betrieb an einem Li-Ion Akku sinnvoll. Weiterer Bonus ist, die Steuerung über nur 4 Leitungen des Controllers. Die Software erzeugt eine SPI Protokoll.

## 5.6 Drehencoder

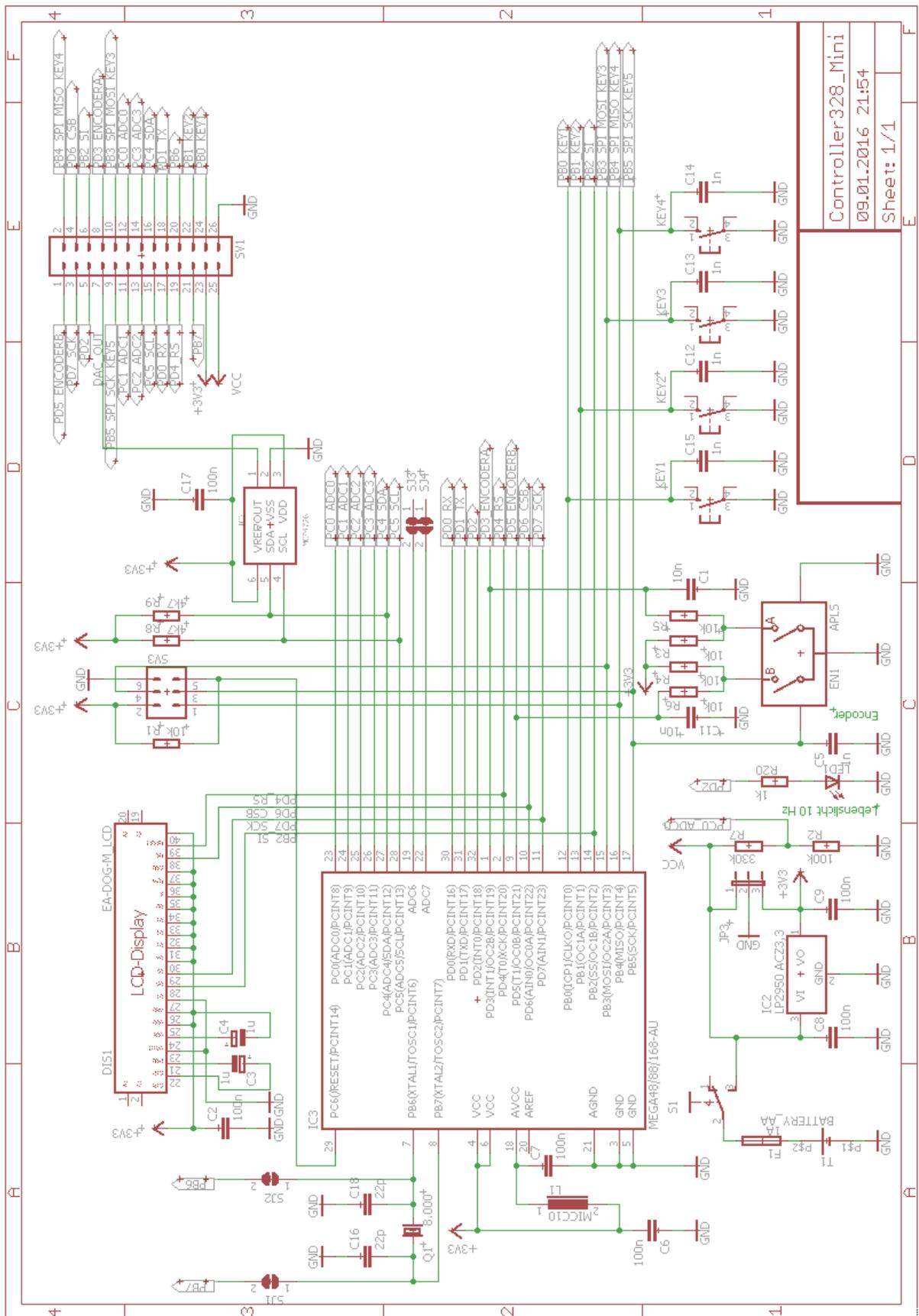
Dieser ist sehr hilfreich bei der Einstellung von Parametern. Der Drucktaster ist ebenfalls implementiert. Bei Rotation wird auf einer Leitung ein Interrupt ausgelöst, in der Interruptroutine wird dann der Pegel der zweiten Leitung überprüft, um die Drehrichtung zu ermitteln.

## 5.7 DA-Wandler MCP4726

Der MCP4726 ist ein 12 Bit DA-Wandler von Microchip Technology Inc. Er wird seriell über ein I2C-Bus mit Daten versorgt. Im SOT-23 Gehäuse hat er nur 6 Anschlusspins. Als Referenzspannung verwende ich die stabilisierten 3,3 Volt des Controllers, die ich noch einmal mit 100nF und 10  $\mu$ F abblocke.

Achtung: Die Software stürzt ab, wenn die beiden pull-up Widerstände abgetrennt werden. Sie sollten somit nicht über einen Steckkontakt gehen und für geringe Geschwindigkeiten wie hier mit 100 kHz direkt am Controller platziert werden.

### 5.8 Schaltplan des Controller328\_Mini



Controller328\_Mini  
09.01.2016 21:54  
Sheet: 1/1

## 5.9 Der analoge Teil

Auf einer zweiten Platine ist der analoge Schaltungsteil aufgebaut. Siehe Bild 16. Der Controller328\_Mini wird über den 26poligen Steckverbinder, unten im Bild, mit dem Analogteil verbunden. Links und rechts sind die beiden zweipoligen Kontaktklemmen für die Prüfspitzen.

Oben links der 0,1  $\Omega$  Shunt mit den separaten Abgriffen für die Stromregelung und die Strommessung. Links der Operationsverstärker für die Laststromreglung, in der Mitte für die Strommessung und rechts für die Spannungsmessung.

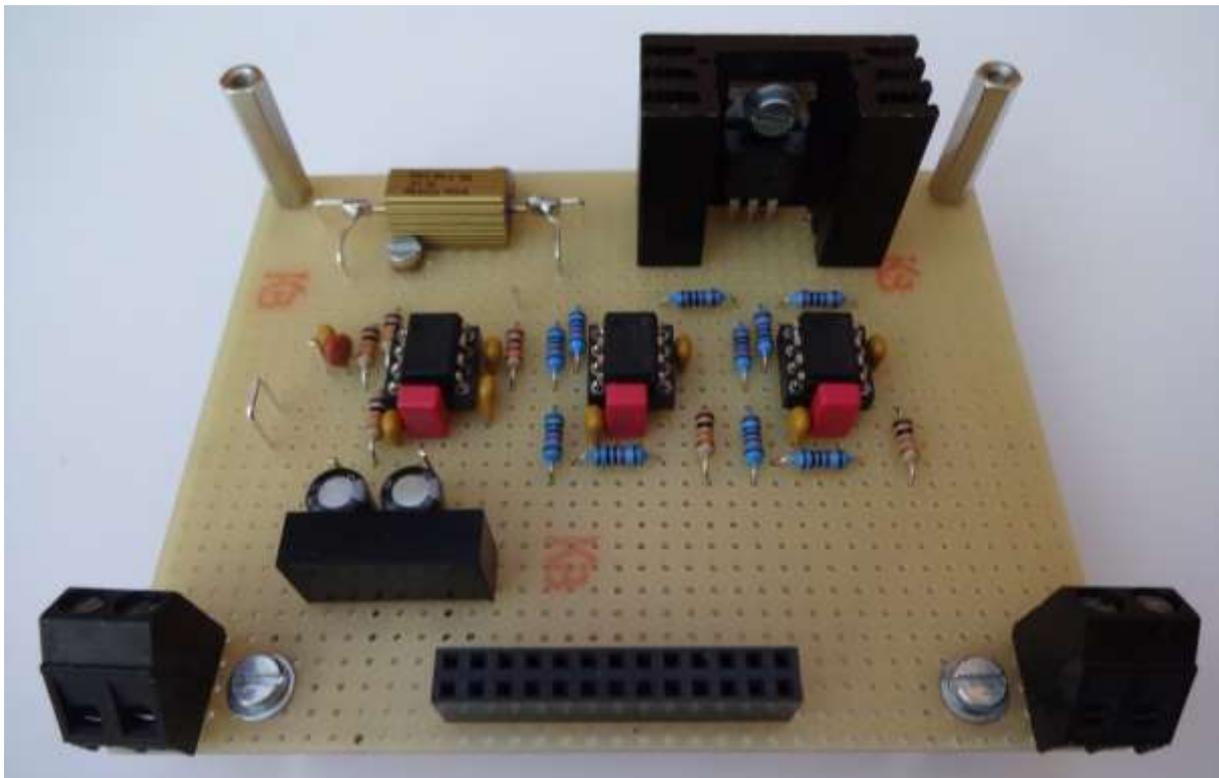
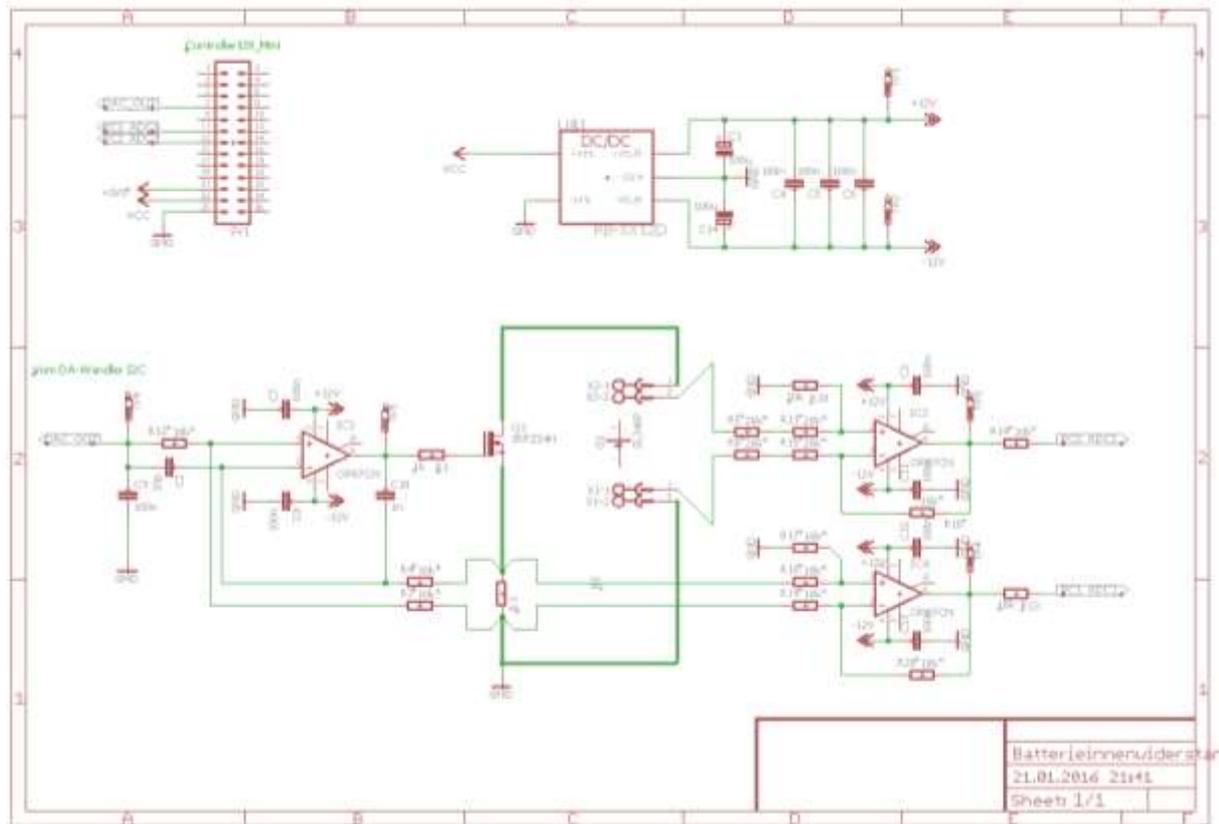


Bild 16: Analoger Teil

## 5.10 Schaltplan



Mit den dicken Linien habe ich den Lastkreis des Akkus angedeutet. X1 und X2 sind die Steckverbinder zu den Vierleiter-Prüfspitzen. G1 ist der Prüfling. SV1 ist der 26-polige Wannensteckverbinder zum Controller mit der Stromversorgung und dem Steuersignal für den Puls und die beiden Analogsignale für den AD-Wandler. Alle Widerstände um IC3 und IC4 sind mit einer Toleranz von 1%.

## 5.11 Herstellung der Vierleiter-Prüfspitzen

Aus einem Streifen Lochrasterplattenmaterial aus FR4 lassen sich die beiden Prüfspitzen herstellen. An der Spitze wird ein ca. 2 cm langes Stück Platinmaterial mit einem Streifen Lochrastermaterial verbunden. Die Ecke wird etwas abgefeilt, hier entsteht die Fläche, die auf den Batteriepol gedrückt wird. Die beiden 0,8 mm starken, versilberten Kupferdrähte werden wie in Bild 17 gebogen und durch die Löcher gezogen. Bild 18 zeigt die Auflagefläche mit den beiden Kontakten. Auf der Rückseite werden die Kupferdrähte auf die Platine zusammen gelötet.

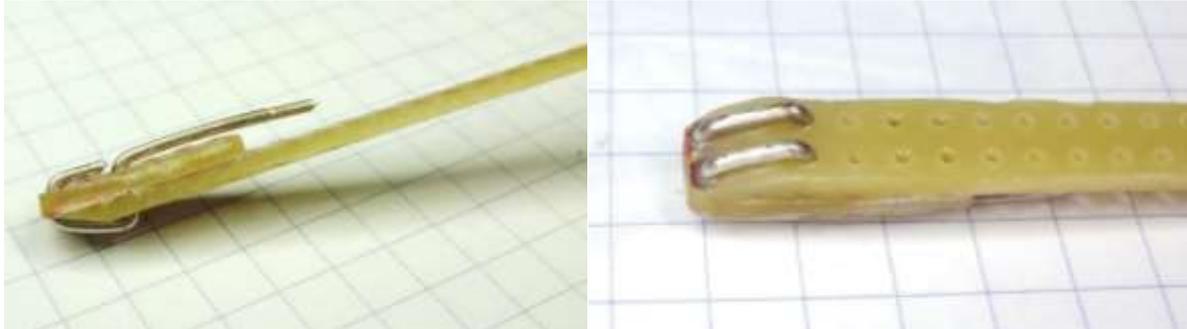


Bild 17: Prüfspitze aus Lochraster FR4    Bild18: Zwillingskontakt

Für den Laststromführenden Kontakt empfiehlt sich eine dicke hochflexible Litze. Diese Leitung bestimmt maßgeblich den maximal fließenden Laststrom. Zum Schluss habe ich die Prüfspitzen noch mit einem Schrumpfschlauch überzogen. Bild 19 zeigt das fertig montierte Paar.



Bild 19: Das fertige Prüfspitzenpaar

## 6 Das Gesamtgerät

Ich habe mich dazu entschlossen das Controllerboard senkrecht auf die analogen Platine zu befestigen. Auf diese Weise wäre eine einfache Montage in ein Gehäuse möglich. Auch ein abgesetzter Betrieb über ein 26 poliges Flachbandkabel ist ohne Aufwand denkbar. Die Bilder 20 und 21 zeigen Front- und Rückansicht.

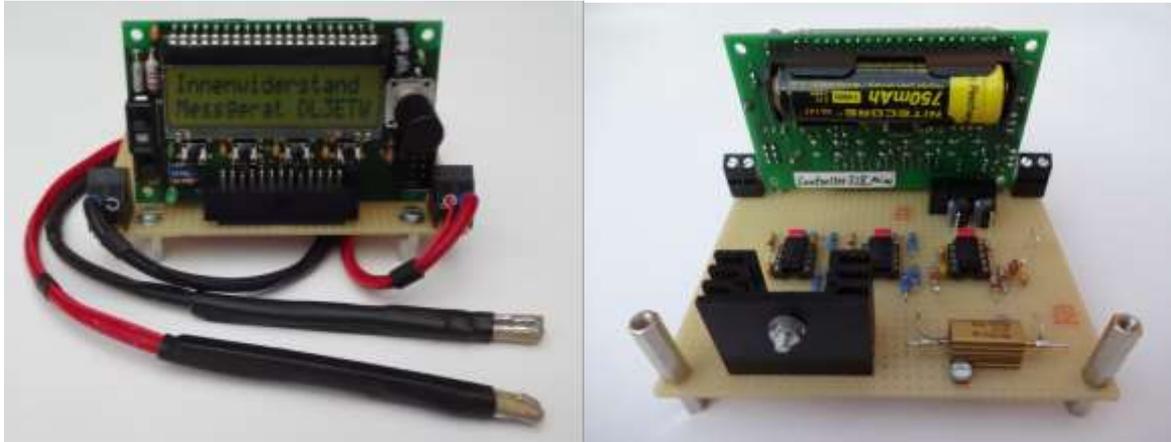


Bild 20: Frontansicht

Bild 21: Rückwärtige Ansicht

### 6.1 Genauigkeitsbetrachtung

#### Strommessung

Der Strom wird über einen 1%-igen Widerstand gemessen. Gefolgt von einer differentiellen Operationsverstärkerschaltung mit 1%-igen Metallwiderständen. Der 10Bit AD-Wandler im Controller ist mit  $\pm 2$  LSBs absoluter Genauigkeit und einem halben Bit an Unlinearität spezifiziert.

#### Spannungsmessung

Mit einer genauen, stabilen Referenzspannung von 2,500 V als Eingangsspannung wurde ein Messwert von 2,47 V im Display des Messgerätes angezeigt. Der Messfehler ist  $< 1,3\%$ .

Bedingt durch die Differenzbildung bei der Berechnung des Innenwiderstandes, ist der absolute Wert hierfür von untergeordneter Bedeutung. Für die Anzeige der Leerlaufspannung jedoch schon.

Im unteren Milliohmbereich ist die Differenz zwischen den beiden Spannung am Prüfling fast gleich. Sie bewegt sich dann nur bei wenigen Digits. (LSB = 4,4 mV) Bei einem geringen Laststrom lässt dies eine Messwertanzeige in nur noch groben Abstufungen zu. Hierunter leidet entsprechend die Genauigkeit. Um dem entgegenzuwirken ist nach Möglichkeit ein große Strom zu wählen.

## 6.2 Vergleichsmessungen

Nachfolgend einige Vergleichsmessungen zwischen der automatischen und der manuelle Methode. So wie sie zu ermitteln waren, habe ich noch die Daten des Herstellers mit angeführt. Bild 22, Foto der Batterien und Akkus.



Bild 22, Foto der Batterien und Akkus

**Duracell PLUS POWER, Alkaline AA, originalverpackt, ca 2 Jahre alt**

Bei 600 mA Last

Zelle	Ri / $\Omega$ AUTOMATISCH	Ri / $\Omega$ MANUELL
#1	0,225	0,187
#2	0,232	0,180
#3	0,225	0,180
#4	0,225	0,212

Der Hersteller gibt in seinem Datenblatt [5] den DC Resistancs an. Er liegt bei einer frischen Zelle etwas **unter 0,2  $\Omega$** . Vergleiche Bild 23.

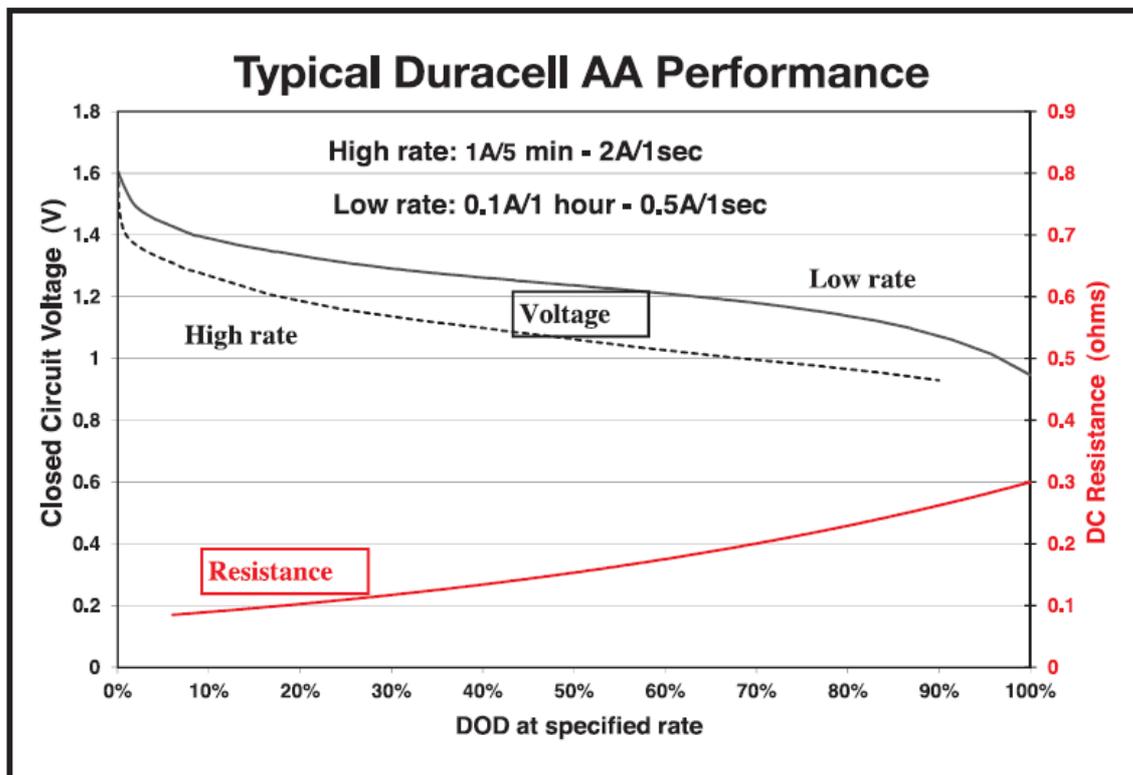


Bild 23, Innenwiderstand und Entladekurve Duracell Plus Power AA

**Energizer Extreme AA 2300 mAh NiMH, neu originalverpackt**

Bei 600 mA Last, nach dem ersten Laden, nach 30 Min

Zelle	Ri / $\Omega$ AUTOMATISCH	Ri / $\Omega$ MANUELL
#1	0,035	0,038
#2	0,035	0,039
#3	0,028	0,036
#4	0,035	0,039

Anmerkung: Der Hersteller gibt in seinem Product Datasheet (Quelle Reichelt) den **DC Innenwiderstand mit 30 mΩ** bei voller Zelle an und 40 mΩ bei halb voller Zelle. Zusätzlich gibt er die AC Impedanz bei 1 kHz mit 12 mΩ an. Alle Werte mit +/- 20 % Toleranz.

### Ansmann, Phone Akku, 550 mAh NiMH, neu originalverpackt

Bei 500 mA Last, voll geladen

Zelle	Ri / Ω AUTOMATISCH	Ri / Ω MANUELL
#1	0,090	0,130
#2	0,075	0,110

Anmerkung: Der Hersteller gibt in seinem Datenblatt (Quelle Reichelt) leider nur die AC Impedanz von < 50 mΩ an bei voll geladener Zelle.

### No Name, Li-Ion Zelle 18650 gebraucht

Bei 5 A Last, voll geladen

Zelle	Kapazität C	Ri / Ω AUTOMATISCH	Ri / Ω MANUELL
#1	1800 mAh	0,116	0,131
#2	2 * 2900 mAh	0,043	0,045

Resumé:

Erstaunlich ist, dass die Ergebnisse innerhalb eines Vierpacks so dicht beieinander liegen. Dies gilt für die Alkaline Batterien, als auch für die vier NiMH Akkus. Dass ich mit beiden Methoden doch so dicht an die vom Hersteller angegebenen Daten komme, habe ich nicht erwartet. Die automatische Messung deckt sich ausreichend für meine Anwendung mit der manuellen Methode.

## 6.3 Hinweise zur Bedienung

Nach dem Einschalten wird der Ladezustand des Controller-Akkus angezeigt. Bei einer Spannung kleiner 3,5 V sollte der Akku getauscht oder geladen werden. Die gesamt Stromaufnahme ist ca. 70 mA.

Anschließend erscheint das Menu mit der Funktion der vier Taster. Zu diesem Zeitpunkt wird bereits in der oberen Zeile kontinuierlich die Leerlaufspannung des Prüflings angezeigt. Die Stromanzeige sollte Null sein.

Mit dem Taster 1 wird der Laststrom eingeschaltet und die Messung gestartet. Der ermittelte Innenwiderstand  $R_i$  wird in der zweiten Zeile laufend angezeigt. Der Taster 2 schaltet den Strom wieder aus und die Messung hält an. Das Menu wird wieder angezeigt.

Nachdem Taster 3 betätigt wird, lässt sich über den Drehencoder der Laststrom zwischen 100 mA und 10 A ändern. Anschließen ist mit dem Taster des Encoders die Änderung abzuspeichern. Der Laststrom ist mit 2000 mA voreingestellt.

Bei großen Strömen ist auf die Temperatur des Kühlkörpers zu achten. Bei Verpolung des Akkus besteht Gefahr, dass die Body-Diode des FET zerstört wird. Achtung bei Zellen mit elektronischer Kurzschluss- und Tiefentladungsschutz.

#### **6.4 Empfehlungen für die Wahl des Laststromes**

Für die Beurteilung einer unbekanntes Zelle sind folgende Richtwerte zu empfehlen:  
Zink-Kohle oder Alkali Mangan Batterien: 500 mA, NiMH Akkus: 1 A. Li-Ion Zellen mit Kapazitäten um die 2000 mAh: 5 A.

Überprüft man Akkus für eine bestimmte Anwendung, ist der maximale Laststrom sicherlich bekannt. Dann kann bei diesem Strom auch geprüft werden.

## 6.5 Verbesserungen, Erfahrungen und Ausblick

Messwerte in der Praxis spielen sich hier zwischen 50 mΩ und 500 mΩ ab. Oberhalb kann man die Zellen als defekt ansehen. Defekte Zellen zeigen noch Werte bis 10 Ω an. Von der Verwendung von Batteriehaltern kann ich nur abraten, um Umständen sind die Prüfspitzen zu verbessern oder gegen handelsüblich zu ersetzen.

Die bestehende Hardware kann auch dazu genutzt werden, um die Kapazität des Akkus recht genau zu messen. Allein die Software ist dafür zu entwickelt. Es lassen sich so die vom Hersteller im Datenblatt angegebenen Werte überprüfen.

Alle Bauteile sind ausnahmslos über [2] erhältlich.

## 7 Literaturhinweise

- [1] Wolfgang Gellerich, DJ3TZ, Innenwiderstand von Batterien und Akkus, CQDL 12-2014
- [2] Reichelt Elektronik GmbH & Co. KG, Sande, Elektronikring 1, 26452 Sande, Tel (04422) 955-111; [www.reichelt.de](http://www.reichelt.de)
- [3] Energizer Holdings, In.  
<http://data.energizer.com/PDFs/BatteryIR.pdf>
- [4] [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_internal\\_resistance](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_internal_resistance)
- [5] datasheet Duracell Plus Power AA  
<http://celltech.dk/pdffiles/017924.pdf>