

Bachelorarbeit

Entwicklung eines Prototyps zur Erfassung des Stromverbrauchs mit Hilfe des Raspberry Pi

Betreuer: Prof. Dr. Gerd Siegmund

Olaf Range
Weidenstr. 6a
85253 Erdweg
Immatrikulationsnummer: 594867
olaf.range@akad.de

13. April 2013



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
------------------------------	------------

Tabellenverzeichnis	IV
----------------------------	-----------

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Motivation	2
1.3 Ziel dieser Arbeit	2
1.4 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Verteilung und Anschluss elektrischer Geräte im Haushalt	4
2.2 Wechselstrom	4
2.2.1 Blindleistung	5
2.2.2 Wirkleistung	6
2.3 Stromwandler	7
2.3.1 Funktionsweise	7
2.3.2 Verbreitung und Einsatzmöglichkeiten	8
2.4 Operationsverstärker	9
2.4.1 Prinzip des Operationsverstärkers	9
2.4.2 Verstärkungs-Kennlinie des Operationsverstärkers	10
2.4.3 Grundsaltungen des Operationsverstärkers	11
2.4.4 Auswahl der Grundsaltung	14
2.5 Analog/Digital-Wandler	14
2.5.1 Quantifizierung analoger Signale	15
2.5.2 Abtaststrategien	15
2.6 SPI-Bus	16
3 Durchführung	18
3.1 Aufbau der Schaltung	18
3.2 Versuchsaufbau der Schaltung	19
3.2.1 Erzeugung des Laststroms	20
3.3 Auswahl des A/D-Wandlers	21
3.4 Auswahl der Stromwandler	21
3.5 Auswahl des Operationsverstärkers	23
3.5.1 Bestimmung des Offsets und der Linearität der Operationsverstärker	25

3.5.2	Ergebnisse des Versuchsaufbaus	25
3.6	Design und Erstellung des Wandler-Board Prototypen	31
3.7	Mechanischer Aufbau	31
3.8	Inbetriebnahme und Test	33
3.9	Programmierung des SPI-Busses	34
3.10	Konfiguration der Datenbank und der Visualisierung	37
4	Ergebnis	38
4.1	Zusammenfassung	38
4.2	Kritische Reflektion	39
4.3	Ausblick	40
4.3.1	Hardwareseitige Verbesserungsmöglichkeiten	40
4.3.2	Softwareseitige Verbesserungsmöglichkeiten	40
	Literaturverzeichnis	42
A	Schaltpläne	46
A.1	Gesamtschaltplan Energiemonitor	46
A.2	Schaltplan Raspberry Pi	46
B	Platinenlayout	52
C	Datenblätter	52

Abbildungsverzeichnis

1	Leistungsaufnahme bei rein ohmschem Verbraucher mit Strom und Spannung in Phase.	5
2	Leistungsaufnahme bei Phasenverschiebung von Spannung und Strom.	6
3	Prinzip des Stromwandlers.	7
4	Kompaktschaltmodul bis 145kV mit integriertem Stromwandler.	9
5	Aufbau des Universal-Operationsverstärkers LM741	10
6	Ersatzschaltbild eines Operationsverstärkers als spannungsgesteuerte Spannungsquelle	11
7	Kennlinie des Operationsverstärkers	11
8	Umkehrverstärker.	12
9	Elektrometerverstärker.	13
10	Invertierender Schmitt-Trigger.	13
11	Nichtinvertierender Schmitt-Trigger.	14

12	Abtastung analoger Signale.	15
13	Prinzipieller Aufbau des A/D-Wandlers mit Kompensationsverfahren .	16
14	SPI-Bus mit einem Slave.	18
15	Blockschaltbild des Energiemonitors.	18
16	Analogteil der Schaltung für einen Kanal.	19
17	Breadboard-Aufbau der Versuchsschaltung.	20
18	Ringkerntrafo mit 12V-Auto-Glühlampen zur Erzeugung der Stromlast.	21
19	Oszilloskop-Bild nach der Vollweggleichrichtung beim CT30-A. . . .	23
20	Oszilloskop-Bild nach der Vollweggleichrichtung beim SCT-0133-000.	23
21	Verstärkte Ausgangsspannungen und numerische A/D-Wandlerwerte an den Operationsverstärkern in Abhängigkeit vom Laststrom (0-14 Ampere).	29
22	Verstärkte Ausgangsspannungen und numerische A/D-Wandlerwerte an den Operationsverstärkern in Abhängigkeit vom Laststrom (0-2 Am- pere).	30
23	Wandlerkarte und Raspberry Pi im DIN-Gehäuse	32
24	Stromwandler vom Typ CT30-A.	32
25	Der Energiemonitor im Verteilerschrank	33
26	Visualisierung der Messwerte mit Hilfe von Cacti.	38
27	Schaltplan des Energiemonitors.	46
28	Platinenlayout des Energiemonitors.	52

Tabellenverzeichnis

1	Vergleich I2C zu SPI-Bus	17
2	Messwerte LM358	26
3	Messwerte TS912	27
4	Messwerte LT1014	28

1 Einleitung

Eines der größten wirtschaftlichen Probleme unserer Zeit ist die Versorgung mit Energie. Ohne eine ausreichende Energieversorgung können grundlegende Bedürfnisse nicht erfüllt werden. Nicht nur der Verkehr, die Industrie und Kommunikationssysteme sind von einer funktionierenden Energie-Infrastruktur abhängig, Energie wird auch im kleinsten Bereich zu jeder Zeit benötigt. Damit die Stromversorgung aufrechterhalten werden kann, investiert der Staat einen Großteil seiner Ausgaben in die nötigen Technologien. Bisher setzte man zu großem Teil auf die Nuklearenergie. Die Atomkatastrophen wie Fukushima und Tschernobyl haben aber zu einem Umdenken geführt. Die Atomkraftwerke in Deutschland sollen bis 2022 abgeschaltet werden

[Deutsche Bundesregierung, 2012]. Bis dahin muss eine alternative Energieversorgung zur Verfügung stehen, wenn nicht die endlichen fossilen Energieträger wie Kohle und Gas über ein vernünftiges Maß hinaus genutzt werden sollen. Diese als „Energiewende“ bezeichnete Neuausrichtung auf dem Energiemarkt ist sehr kostenintensiv und die entstehenden Kosten werden auf den Endpreis des Stroms umgelegt.

Für den Endkunden bedeutet dies, dass die monatliche Stromrechnung höher ausfallen wird als bisher. Der Kunde kann zwar versuchen, einen günstigeren Stromanbieter zu finden, doch auch bei alternativen Anbietern werden die Strompreise steigen, da die Erhöhung hauptsächlich durch Steuern und Abgaben entsteht [Ramge, 2013]. Ihm bleibt letztendlich nur die Möglichkeit seinen Verbrauch zu senken. Hat man zum Beispiel einen alten Kühlschrank als Energieverschwender identifiziert, kann man ausrechnen, ob und ab wann sich die Anschaffung eines energieeffizienten Modells lohnt. Leider sind die Möglichkeiten zur Erfassung des Stromverbrauchs im Haushalt immer noch relativ beschränkt. Am beliebtesten sind Steckermessgeräte, mit denen man den Verbrauch einzelner Geräte messen kann.

1.1 Problemstellung

Der Markt für Strommessgeräte im Haushalt ist groß. Es gibt sie als Zwischenstecker, als Einbaugeräte, für die Einzelmessung, als Funkmodul, mit optischer Abtastung, kontaktfrei und in vielen weiteren Varianten. Bei den Steckermessgeräten gibt es bereits Modelle, die die Messwerte auf Datenspeichern wie SD-Karten oder internem Flash ablegen. Damit kann der Kunde die Energiewerte über einen längeren Zeitraum aufzeichnen. Eine direkte Verbindung mit einer zentralen Einheit zur Messwertaufnahme und zur Speicherung und Präsentation ist mit ihnen aber in der Regel nicht möglich. Daher muss man das Gerät oder die Speicherkarte spätestens dann mit einem PC verbinden, wenn man die Daten auslesen möchte.

Es gibt auf dem Markt sogar nur zwei Steckermessgeräte, die man direkt mit einer USB-Schnittstelle verbinden kann [Ramge, 2013]. Diese sind aber so unverhältnismäßig teuer, dass sie für den Massenmarkt nicht geeignet sind. Deutlich geeigneter ist der Einbau eines Messgerätes in den Verteilerschrank, da alle Verbraucher über die Stromzufuhr angeschlossen sind. Es gibt bereits zwei Messgeräte, die den Verbrauch über Stromwandler erfassen. Eines der Systeme hat den Vorteil, dass eine True-RMS-Messung¹ stattfindet, die aber nur realisiert werden kann, wenn man die stromführenden Leitungen zur Spannungsmessung auftrennt [Megni Energy Monitoring, 2013]. Außerdem ist bei dem Gerät nur die Erfassung von drei Kanälen vorgesehen.

Das andere Gerät ist der OWL-Energiemonitor [2 Save Energy Ltd, 2013]. Das Gerät arbeitet mit Klapp-Stromwandlern, die man um die zu messenden Leitungen klemmt. Dadurch ist es leicht zu installieren. Es handelt sich um ein kommerzielles Produkt, wodurch eine gute Verfügbarkeit gegeben ist. Negativ ist allerdings der relativ hohe Preis und die Tatsache, dass es sich um closed Source handelt. Dadurch sind nur die vom Hersteller vorgesehenen Funktionen möglich. Eine Erweiterung mit eigenen Plugins oder die Möglichkeit, auf die Messwerte zuzugreifen, besteht nicht.

Neben den Systemen für den Endverbraucher gibt es noch diverse Messgeräte, die allerdings eher im industriellen Bereich eingesetzt werden. Sie ermitteln nicht nur den Stromverbrauch, sondern sind auch in der Lage, Aussagen über die Qualität des bezogenen Stromes zu treffen oder eine Leitungsanalyse vorzunehmen [Gossen Metrawatt, 2013]. Diese Geräte müssen von Fachkräften eingebaut werden und die Stromleitungen müssen aufgetrennt werden.

1.2 Motivation

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prototyp soll die Lücke zwischen den professionellen Messgeräten für mehrere hundert Euro, den Einbaugeräten mit den besagten Nachteilen und den einfachen Steckermessgeräten ohne Anschlussmöglichkeit schließen.

1.3 Ziel dieser Arbeit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung eines Prototypen zur Messung des Stromverbrauchs. Dabei soll nicht nur die Machbarkeit der Entwicklung berücksichtigt werden, sondern es soll ein funktionsfähiges Gerät entstehen. Das Gerät soll mindestens acht Kanäle überwachen können und an zentraler Stelle im Verteilerkasten

¹Root Mean Square, Effektivwertmessung in Echtzeit

eingebaut werden. Die Visualisierung der erfassten Messdaten soll über ein webbasiertes Interface stattfinden. Da das Gerät ein möglichst günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen soll, wird zur Vereinfachung des analogen Schaltungsteils lediglich die Scheinleistung erfasst. Das Gerät wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit „Energiamonitor“ genannt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im folgenden werden die Grundlagen vorgestellt (Kapitel 2), die für den Bau und den Betrieb des Energiamonitors relevant sind. Dies sind:

- Der Aufbau des Verteilerkastens in einem Haushalt, in dem der Energiamonitor und die Stromwandler untergebracht werden.
- Die Eigenschaften von Wechselstrom.
- Die Funktion von Stromwandlern und deren elektrische Eigenschaften.
- Die elektronischen Grundlagen von Operationsverstärkern, deren Grundsaltungen, und die Berechnung des Verstärkungsfaktors.
- Die Funktionsweise und verschiedenen Ausführungen von Analog-/Digital-Wandlern.
- Der SPI-Bus als Peripherie-Bussystem.

In der Durchführung (Kapitel 3) werden die Entwicklung, der Bau und die Inbetriebnahme des Energiamonitors beschrieben.

Die einzelnen Phasen sind:

- Der grundlegende Aufbau der Schaltung des Energiamonitors.
- Der Versuchsaufbau für einen einzelnen Kanal zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Schaltung.
- Der Aufbau der Apparatur zur Erzeugung des Laststroms.
- Die Auswahl des A/D-Wandlers.
- Die Auswahl der Stromwandler.
- Die experimentelle Ermittlung des am besten geeigneten Operationsverstärkers.
- Das Design des Wandler-Boards.

- Der mechanische Aufbau und die Inbetriebnahme.
- Die Entwicklung und Installation der grundlegenden Software zur Erfassung und Visualisierung der Messwerte.

Zum Schluss (Kapitel 4) folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse, eine kritische Reflektion und ein Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen und Entwicklungen im Bereich des Energiemonitorings.

2 Grundlagen

2.1 Verteilung und Anschluss elektrischer Geräte im Haushalt

Die zu messenden Verbraucher sind entweder über Steckdosen oder über eine feste Verdrahtung mit der Energieversorgung verbunden. In jedem Fall aber finden sich alle stromführenden Kabel im Elektro-Installationsverteiler² wieder, da alle Verbraucher über Schutzsicherungen abgesichert sein müssen [Schröder, 2000]. In der Regel sind die Verteilungen so strukturiert, dass mehrere Räume zusammengefasst sind und die Steckdosen und die Lampenleitungen je eine Absicherung bekommen. Spezielle Verbraucher, die einen höheren Stromverbrauch haben, werden häufig einzeln abgesichert. Dies ist z.B. ein Wäschetrockner oder die Heizungsanlage. In jedem Fall einzeln abgesichert ist der Elektroherd. In der Regel wird er mit drei Phasen beschaltet, die jeweils eine eigene Sicherung bekommen.

Um die Stromverbräuche im Haushalt messen zu können, bietet es sich an, die Messung innerhalb des Verteilerkastens vorzunehmen. Dort ist in der Regel auch genug Platz vorhanden, die Stromwandler so unterzubringen, dass sie um die Leitungen liegen, die gemessen werden sollen.

Ein weiterer Vorteil der Installation im Verteilerkasten besteht darin, dass sich die Stromversorgung für den Energiemonitor dort leicht entnehmen lässt. Dies kann mit einem zugelassenen externen Netzteil geschehen, so dass das Gerät mit einer Kleinspannung von 5 Volt betrieben wird und keine besonderen Erdungs- oder Schutzvorschriften eingehalten werden müssen [Schröder, 2000].

2.2 Wechselstrom

Die Verbraucher im Privathaushalt werden mit Wechselspannung betrieben. Da das Messprinzip des Energiemonitors mit den Stromwandlern auf dem Transformatorprinzip mit Stromprägung beruht, kann nur Wechselstrom (in Ampere) gemessen werden

²ugs. Sicherungskasten, im Folgenden Verteilerkasten genannt

[Goldstein, 1952]. Die Messung der Wechselspannung (in Volt) wird mit dem Energiemonitor nicht vorgenommen, da sonst ein Eingriff in die Installation in Form einer Unterbrechung der Leitungen notwendig wäre [Schrüfer, 2007].

2.2.1 Blindleistung

Die reine Strom-Messung führt allerdings zu dem Problem, dass eine etwaige Phasenverschiebung nicht berücksichtigt wird.

Ohne Phasenverschiebung findet der Nulldurchgang der Spannungs- und Stromfunktion gleichzeitig statt. Dadurch ist das Produkt aus Spannung und Strom immer positiv (siehe Abbildung 1).

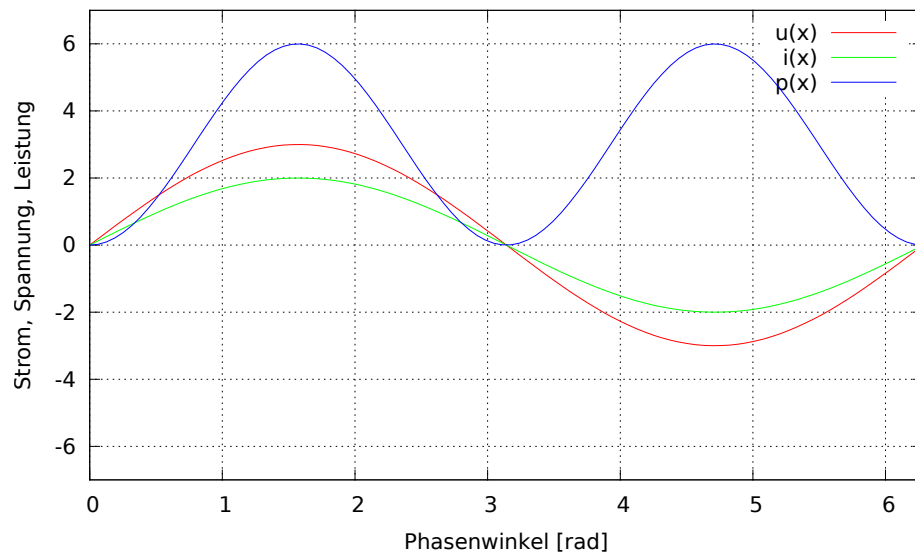


Abbildung 1: Leistungsaufnahme bei rein ohmschem Verbraucher mit Strom und Spannung in Phase.

Anders verhält es sich bei einer Phasenverschiebung. Sie entsteht dadurch, dass der Strom durch kapazitive oder induktive Eigenschaften des Verbrauchers gegenüber der Spannung um den Winkel ϕ verschoben wird. Dies führt dazu, dass die Leistung zu bestimmten Zeiten einen negativen Wert annimmt (siehe Abbildung 2).

Diese negative Leistung wird im Verbraucher nicht in mechanische Energie oder Wärme umgesetzt, belastet aber dennoch das Netz und die energieerzeugenden Generatoren dadurch, dass sie zwischen Erzeuger und Verbraucher hin- und herpendelt. Diese negative Leistung wird als Blindleistung bezeichnet.

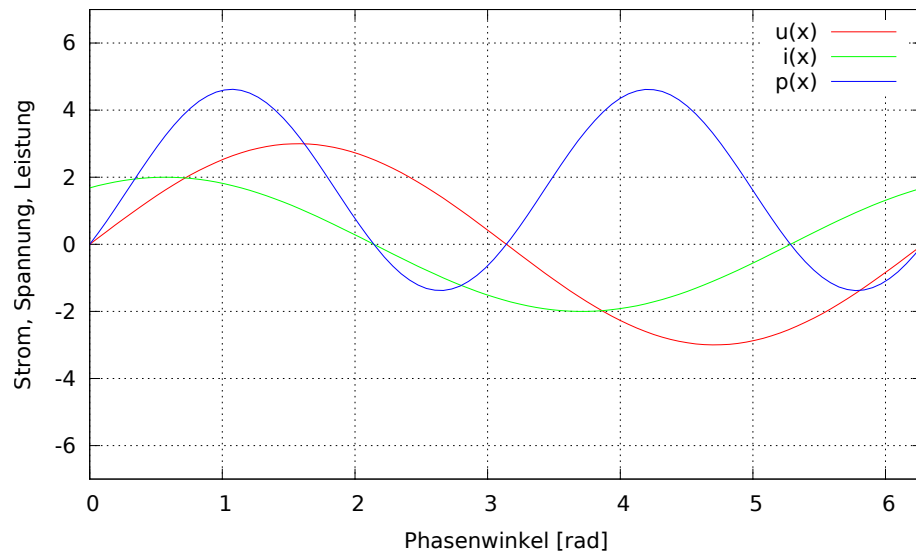


Abbildung 2: Leistungsaufnahme bei Phasenverschiebung von Spannung und Strom.

2.2.2 Wirkleistung

Unter Wirkleistung versteht man den rein ohmschen Verbrauch, der in mechanische Energie oder Wärme umgewandelt wird. Sie wird in der Einheit Watt angegeben, mit dem Stromzähler gezählt und mit dem Energielieferanten abgerechnet.

[Heuck et al., 2010]

Die Vektorsumme aus Blind- und Wirkleistung ist die Scheinleistung. Sie ist größer als die Wirkleistung und hängt von der Phasenverschiebung ab. Sie wird in der Einheit VA angegeben.

Da bei dem Energiemonitor auf eine Spannungsmessung verzichtet wird und nur der Effektivstrom in die Berechnung einfließt, wird eine eventuelle Phasenverschiebung ignoriert.

Dies hat zur Folge, dass es sich bei dem Leistungswert immer um die Scheinleistung handelt und die Blindleistung nicht abgezogen wird. Der gemessene Wert ist also immer um den Faktor $\cos \phi$ zu groß.

Dieser Nachteil wird aber in Kauf genommen, da im Gegensatz zu Industrieanlagen oder Werkstätten der Blindstromanteil im Privathaushalt so niedrig ist, dass er vernachlässigt werden kann. Dies liegt unter anderem daran, dass in der Regel nur wenige Elektromotoren verwendet werden, die eine Phasenverschiebung verursachen.

Die Alternative zu diesem Messverfahren wäre eine True-RMS-Messung gewesen, die die tatsächliche Spannung und den jeweiligen Strom in sehr kurzen Abständen misst und das Produkt als Wirkleistung berechnet und aufsummiert. Diese Art der Messung wird in professionellen Leistungsmessgeräten benutzt [Gossen Metrawatt, 2013].

2.3 Stromwandler

Die Messung des Stroms soll bei dem Energiemonitor über Stromwandler geschehen. Dies hat den Vorteil, dass die stromführenden Leitungen nicht aufgetrennt werden müssen. Der Kern der Stromwandler ist zweigeteilt und kann aufgeklappt werden.

2.3.1 Funktionsweise

Ein Stromwandler dient dazu, Strom zu messen. Dies geschieht berührungslos mit Hilfe eines Ringkerns aus ferromagnetischem Material. Zur Messung des Primärstroms wird die Primärleitung ein- oder mehrmals durch einen Ringkern geführt. Um den Ringkern befindet sich eine Sekundärwicklung mit einer relativ hohen Windungszahl. Der Primärstrom induziert in dem Eisenkern ein Magnetfeld, welches wiederum in der Sekundärwicklung einen Strom erzeugt (siehe Abbildung 3).

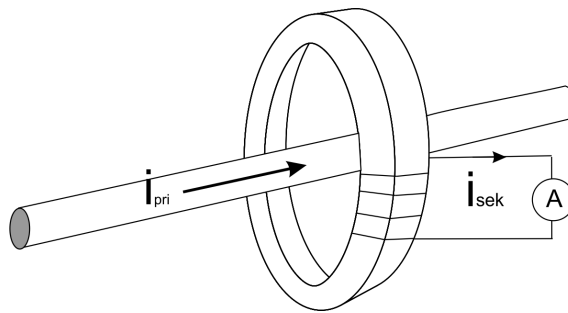


Abbildung 3: Prinzip des Stromwandlers.

Das Prinzip des Stromwandlers entspricht dem eines Einphasentransformators. Es wird allerdings keine Spannung eingepreßt, sondern der transformierte Strom ist umgekehrt proportional zum gemessenen Strom [Heuck et al., 2010].

Um die Einprägung des Stromes zu ermöglichen, muss die Sekundärseite des Stromwandlers fast im Kurzschlussbereich betrieben werden. Dies wird durch eine Bürde³ erreicht, die den Sekundärstromkreis abschließt. Durch den Betrieb in der Nähe des Kurzschlussbereichs wird die Sättigung des Ringkernes vermieden, die dazu führen würde, dass die induzierte Energie nur noch in Wärme und nicht mehr in einen Sekundärstrom umgewandelt wird.

Im ungesättigten Betrieb des Stromwandlers ist das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärstrom umgekehrt proportional zum Verhältnis von Sekundär- zu Primärwicklung:

³Messwiderstand zur Strommessung

$$i_{sek} = i_{pri} \cdot \frac{N_{sek}}{N_{pri}}$$

Ein typischer Stromwandler, wie er für die Messung von Strömen bis 100A verwendet wird, hat in der Regel ein Windungsverhältnis von 1:2000 bis 1:3000. Dadurch wird der Sekundärstrom sehr klein und muss dementsprechend verstärkt werden.

Wird der Primärleiter nur einmal durch einen solchen typischen Ringkern geführt, ergibt sich bei einem maximalen Primärstrom von 16A ein Sekundärstrom von:

$$i_{sek} = \frac{i_{pri}}{N} = \frac{16A}{3000} = 5,33mA$$

Bei einer Bürde in der Größenordnung von 50Ω , ergibt sich eine recht niedrige Spannung von:

$$u_{sek} = i_{sek} \cdot R_{Bürde} = 5,33mA \cdot 50\Omega = 0,266V$$

Dies ist wohlgemerkt die Spannung, die bei dem zu messenden Maximalstrom auftritt. Bei kleinen Lasten, die natürlich auch gemessen werden sollen, ist die Spannung dementsprechend kleiner. Die kleinste zu messende Spannung ist hauptsächlich von dem Offset des verwendeten Operationsverstärkers abhängig und wird noch später im Rahmen dieser Arbeit experimentell ermittelt.

2.3.2 Verbreitung und Einsatzmöglichkeiten

Stromwandler sind seit langem gut erforscht. So gut, dass die Anzahl an Fachliteratur zu dem Thema äußerst gering ist. Bereits 1928 schrieb der Ingenieur Isaak Goldstein in dem Vorwort zu seinem Buch "Messwandler": „Die deutsche Fachliteratur über Messwandler ist sehr dürftig“. Dies war Grund genug für ihn, ein Buch über Messwandler zu schreiben, welches die theoretischen Grundlagen äußerst ausführlich behandelt und erst im Jahre 1952 zum zweitenmal von ihm selbst aufgelegt wurde [Goldstein, 1952].

Messwandler werden in der Energiewirtschaft in Freiluftanlagen genutzt und messen Ströme bis zu 5000 Ampere. Sie dienen dort dazu, die Leistungsaufnahme von Energieversorgungseinrichtungen zu überwachen (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Kompaktschaltmodul bis 145kV mit integriertem Stromwandler (Quelle: Siemens).

2.4 Operationsverstärker

Da die Spannungen, die an der Bürde abfallen, viel zu klein sind, um sie direkt mit einem Analog-Digital-Wandler messen zu können, müssen sie verstärkt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Operationsverstärkers.

Ein Operationsverstärker ist ein integrierter Baustein, der dazu benutzt wird, Spannungen oder Strom zu verstärken [Federau, 2004]. Der Operationsverstärker ist dem Bereich der analogen Schaltungstechnik zuzuordnen. Er ist weit verbreitet und wird für viele Anwendungen genutzt. Operationsverstärker werden in sehr hohen Stückzahlen gefertigt und sind dementsprechend günstig.

Ein einfacher Operationsverstärker wie der LM741 besteht aus etwa zwanzig Transistoren und einigen diskreten Bauelementen wie Widerständen und Kondensatoren (siehe Abbildung 5).

2.4.1 Prinzip des Operationsverstärkers

Ein Operationsverstärker ist im Prinzip eine „spannungsgesteuerte Spannungsquelle“ [Clausert, 1993a]. Der Operationsverstärker besitzt zwei Eingänge (positiv und negativ), deren Spannungsdifferenz U_E multipliziert mit einem Proportionalitätsfaktor v_0

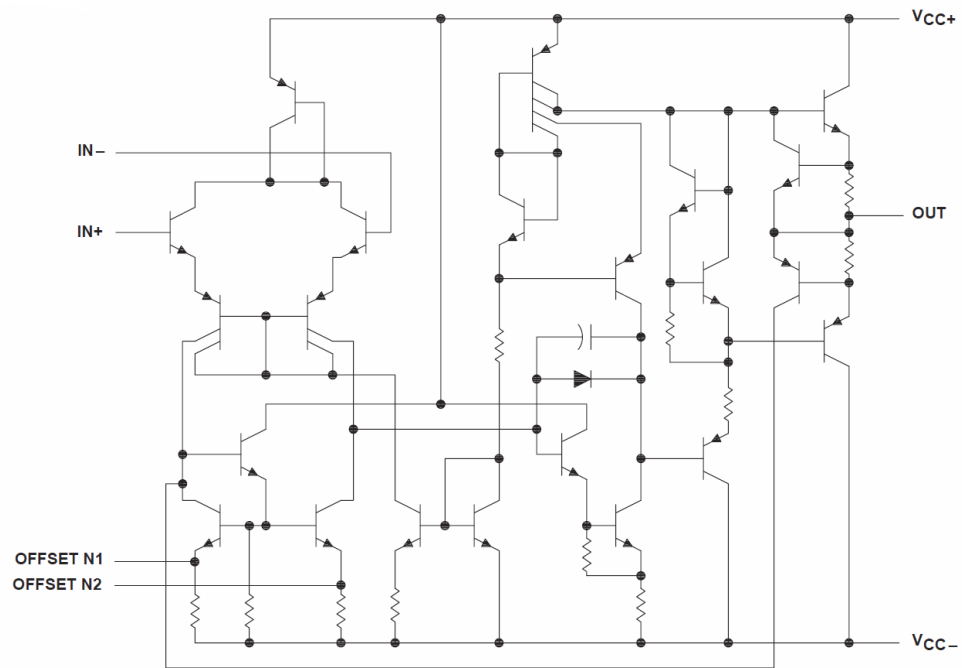


Abbildung 5: Aufbau des Universal-Operationsverstärkers LM741 (Quelle: Texas Instruments).

zu einer Ausgangsspannung U_A führt:

$$U_A = v_0 \cdot U_E$$

Sowohl der Eingang als auch der Ausgang sind mit einem Eingangswiderstand und einem Ausgangswiderstand behaftet, die bei der Beschaltung eines realen Operationsverstärkers beachtet werden müssen.

Das Ersatzschaltbild eines Operationsverstärkers kann wie in Abbildung 6 dargestellt werden.

Die Eingangsspannung U_E liegt zwischen dem positiven und negativen Eingang des Operationsverstärkers an. Der Eingang besitzt den Eingangswiderstand R_E .

Die ideale Spannungsquelle erzeugt die Spannung $v_0 U_E$, die am Ausgang U_A des Operationsverstärkers anliegt. Der Ausgang besitzt einen Ausgangswiderstand der Größe R_A , der ebenfalls bei der realen Schaltung Beachtung findet.

2.4.2 Verstärkungs-Kennlinie des Operationsverstärkers

Das Ergebnis der Verstärkung ist eine Verstärkungs-Kennlinie, die das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsspannung angibt. Liegt der Verstärkungsfaktor zum Beispiel

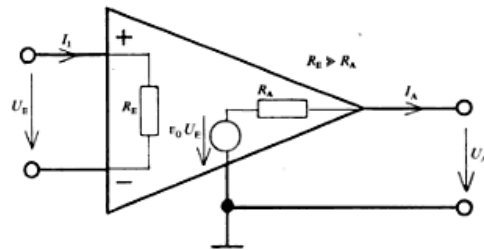


Abbildung 6: Ersatzschaltbild eines Operationsverstärkers als spannungsgesteuerte Spannungsquelle (Quelle: [Clausert, 1993a]).

bei $v_0 = 10$, so würde die Verstärkungs-Kennlinie des Operationsverstärkers folgendermaßen aussehen:

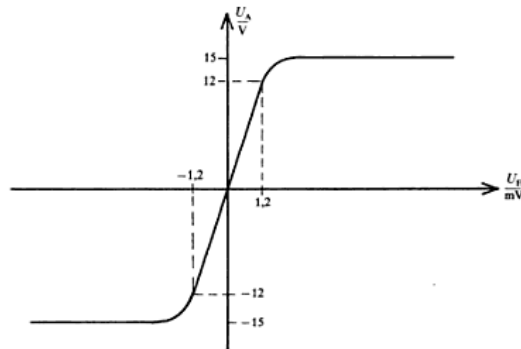


Abbildung 7: Kennlinie eines Operationsverstärkers (Quelle: [Clausert, 1993a]).

Der lineare Bereich des Operationsverstärkers liegt hier zwischen den Grenzen der Versorgungsspannung von -15V bis +15V.

Alle diese Betrachtungen gelten nur für den idealen Operationsverstärker. In der Realität spielen noch viele weitere Faktoren eine Rolle, die das vorgestellte Verhalten des Operationsverstärkers massiv beeinträchtigen. Für den Schaltungsaufbau des Energiemonitors müssen diese Faktoren beachtet werden.

2.4.3 Grundschaltungen des Operationsverstärkers

Da Operationsverstärker zwei Eingänge besitzen und die Differenz der Spannung zwischen den Eingängen ausschlaggebend ist, ergeben sich viele Anwendungsmöglichkeiten. Der verstärkte Ausgang des Operationsverstärkers kann zum Beispiel mit dem negativen Eingang verbunden werden und ergibt damit eine Schaltung, die als Gegenkopplungs-Schaltung bezeichnet wird. Verbindet man den Ausgang mit dem positiven

Eingang des Verstärkers, so erhält man eine Mitkopplungsschaltung. Die Kombination dieser Schaltungsart mit Widerstandsnetzwerken und kapazitiven Elementen führt zu einer großen Menge verschiedener Schaltungsvarianten.

Unter Berücksichtigung der Art, wie das Eingangssignal mit dem Operationsverstärker gekoppelt wird, kann man aber dennoch die Zahl der möglichen Kombinationen auf vier einfache Grundschaltungen reduzieren [Clausert, 1993a]:

- *Gegenkopplung, invertierender Eingang (Umkehrverstärker):*

Beim Umkehrverstärker (siehe Abbildung 8) wird das Ausgangssignal über einen Spannungsteiler an den negativen Eingang des Operationsverstärkers zurückgeführt. Durch das Verhältnis der beiden Widerstände R_1 und R_2 wird der Verstärkungsfaktor festgelegt.

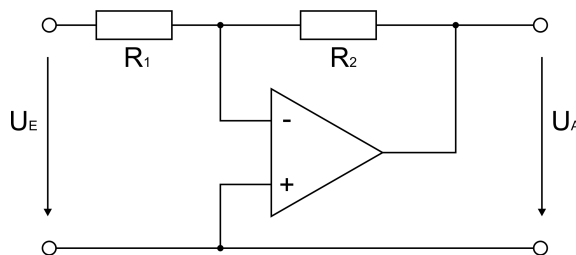


Abbildung 8: Umkehrverstärker.

Da das Eingangssignal an den negativen Eingang des Operationsverstärkers angelegt wird, ist das Ausgangssignal im Bezug auf die Polarität genau umgekehrt zum Eingangssignal.

- *Gegenkopplung, nichtinvertierender Eingang (Elektrometerverstärker):*

Beim Elektrometerverstärker (siehe Abbildung 9) wird das Ausgangssignal ebenfalls über einen Spannungsteiler und den negativen Eingang des Operationsverstärkers zurückgeführt.

Im Gegensatz zur vorherigen Schaltung wird hierbei das Eingangssignal aber an den positiven Eingang gelegt, wodurch das Ausgangssignal in Polarität und Phase mit dem Eingangssignal übereinstimmt.

Die Höhe des Ausgangssignals ist auch bei dieser Schaltung von dem Verhältnis der beiden Widerstände abhängig.

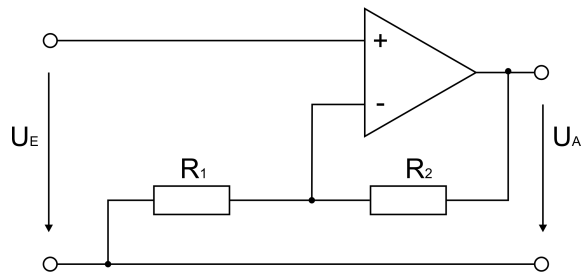


Abbildung 9: Elektrometerverstärker.

Durch einfache Knotenanalyse kann der Verstärkungsfaktor ermittelt werden [Federau, 2004]. Für diesen Verstärkertyp beträgt der Faktor:

$$v_0 = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

Diese Formel ist für die Dimensionierung der Schaltung des Energiemonitors von Bedeutung, um das Ausgangssignal des Verstärkers in einen Bereich zu bringen, der vom A/D-Wandler verarbeitet werden kann.

- *Mitkopplung, invertierender Eingang (inv. Schmitt-Trigger):*

Beim invertierenden Schmitt-Trigger (siehe Abbildung 10) wird der Ausgang mit dem positiven Eingang des Operationsverstärkers verbunden.

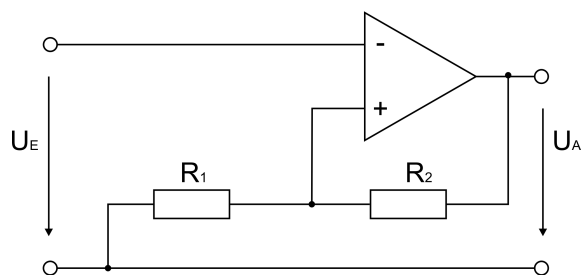


Abbildung 10: Invertierender Schmitt-Trigger.

Dadurch wird die maximale Ausgangsspannung schon bereits bei einer geringen Eingangsspannung erreicht. Diese Art der Schaltung wird genutzt, um ein Hystereseverhalten zu erzeugen.

- *Mitkopplung, nichtinvertierender Eingang (nichtinv. Schmitt-Trigger):*

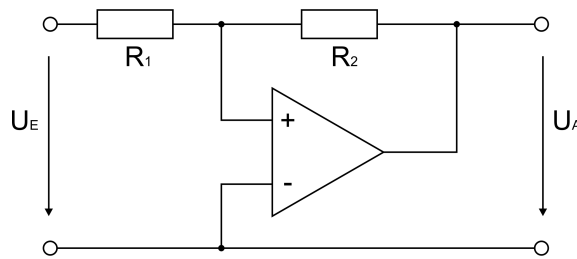


Abbildung 11: Nichtinvertierender Schmitt-Trigger.

Beim nichtinvertierenden Schmitt-Trigger (siehe Abbildung 11) ist das Verhalten ähnlich wie bei der vorherigen Schaltung. Die Flanke ist allerdings genau umgekehrt wie beim invertierenden Schmitt-Trigger.

2.4.4 Auswahl der Grundsaltung

Für das Strommessgerät wird der Strom mit Hilfe des Stromwandlers und eines Widerstandes (Bürde) in eine Spannung umgewandelt, die dann von einem Operationsverstärker verstärkt wird. Die Schaltung muss also nach dem Prinzip der Gegenkopplung mit einem definierten Verstärkungsfaktor realisiert werden. Es stellt sich nur noch die Frage, ob eine invertierende oder eine nichtinvertierende Schaltungsvariante geeigneter ist. Die Antwort auf die Frage ergibt sich aus der Anforderung an den zu wählenden Operationsverstärker. Das fertige Gerät wird mit einer Versorgungsspannung von +5V betrieben werden. Dies ist die Spannung, die der Raspberry Pi zum Betrieb benötigt. Eine negative Spannung ist in der Schaltung nicht vorgesehen. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, einen Operationsverstärker-Typ auszuwählen, der mit einer einzigen positiven Spannung auskommt. Diese sogenannten „Single-Rail-Operationsverstärker“ werden häufig in batteriebetriebenen Geräten eingesetzt, in denen es naturgemäß keine negative Spannung gibt. Der Nachteil dieser Operationsverstärker ist, dass sie die Grenzen der Versorgungsspannung nur schwer erreichen können [Federau, 2004].

Die Frage nach der Auswahl der Grundsaltung ist damit geklärt. Die Elektrometerschaltung ist die geeignete Schaltung.

2.5 Analog/Digital-Wandler

Die Spannungen, die die Operationsverstärker liefern, müssen in digitale Form umgewandelt werden, um von dem Mikrocontroller weiterverarbeitet werden zu können. Zur Umwandlung von analogen in digitale Signale werden Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) benutzt.

2.5.1 Quantifizierung analoger Signale

A/D-Wandler quantifizieren einen bestimmten Spannungsbereich innerhalb eines festgelegten Zeitfensters und liefern einen digitalen Wert, der der gemessenen Spannung entspricht (siehe Abbildung 12).

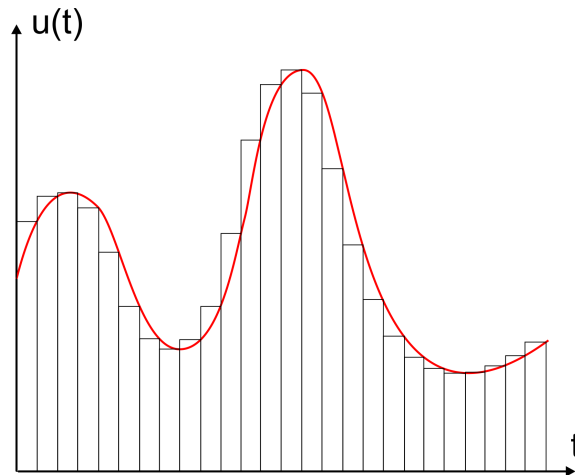


Abbildung 12: Abtastung analoger Signale.

2.5.2 Abtaststrategien

Zum Abtasten der Spannungen werden verschiedene Verfahren verwendet [Plate, 2007]:

- *Parallel-A/D-Wandler:* Dieses Verfahren wird auch als „Flash-A/D-Wandler“ bezeichnet und wird zum Wandeln von Signalen verwendet, die sich sehr schnell ändern. Bei diesem Verfahren wird die zu messende Spannung gleichzeitig an mehrere Komperatoren angelegt. Die Anzahl der Komperatoren wird durch die vorgegebene Auflösung bestimmt. Der Spannungsbereich wird in der Regel durch eine Referenzspannung definiert.
- *Wäge- oder Kompensationsverfahren:* Bei diesem Verfahren wird die Eingangsspannung durch sukzessive Approximation ermittelt. Dazu wird mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers eine Spannung erzeugt und zusammen mit der zu ermittelnden Eingangsspannung an einen Komperator gelegt. Die Logik des A/D-Wandlers verändert die erzeugte Hilfsspannung solange, bis sie mit der Eingangsspannung übereinstimmt und der Komperator den gleichen Wert erkennt. Die Hilfsspannung entspricht dann der Eingangsspannung.

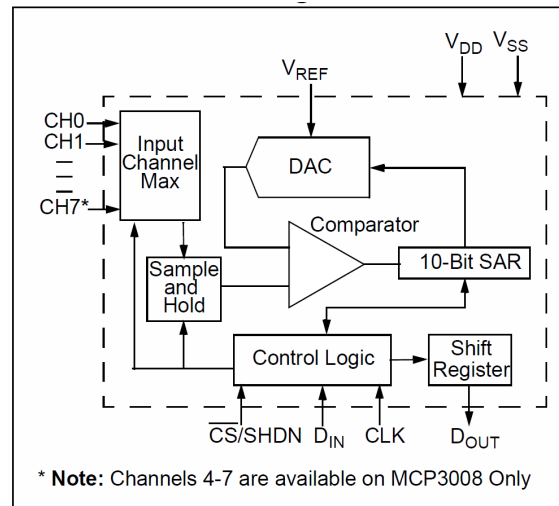


Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau eines A/D-Wandlers mit Kompensationsverfahren (Quelle: Microchip).

Neben der sukzessiven Approximation gibt es noch einfachere Strategien, die Hilfsspannung zu erzeugen. Man kann den Wert der Hilfsspannung einfach erhöhen oder man versucht, den Änderungen der Eingangsspannung zu folgen, weil man davon ausgeht, dass das Eingangssignal nur kleine Sprünge macht.

2.6 SPI-Bus

Das digitale Signal des A/D-Wandlers muss mit dem Mikrocontroller verbunden werden, um die Messwerte zu verarbeiten. Die Verbindung von digitalen Bausteinen, die zusammen in einem Gehäuse platziert sind, geschieht mit Hilfe eines Peripheriebusses.

Im Gegensatz zu Feldbussen wie dem RS-485-Bus, der Teilnehmer über mehrere Kilometer verbinden kann, dienen Peripheriebusse dazu, lokale Teilnehmer zu verbinden.

Zwei gebräuchliche Peripheriebusse sind der I2C und der SPI-Bus. I2C steht für „Inter-Integrated Circuit“ und ist ein serieller Datenbus. SPI steht für „Serial Peripheral Interface“ und arbeitet nach dem Master/Slave-Prinzip.

Beide Bus-Systeme sind für den Energiemonitor geeignet, da der Raspberry Pi beide Systeme sehr gut unterstützt und diverse Implementierungen für den Anschluss von Komponenten über diese Bussysteme vorhanden sind.

Die folgende Tabelle zeigt die Eigenschaften der verschiedenen Bussysteme im Vergleich:

	I2C	SPI
Anzahl Leitungen	2	3
Maximale Geschwindigkeit	3,4 MHz (High speed Mode)	bis zu 10MHz
Adressierung	Über Bus	über eigene Leitung
Betriebsart	Half duplex	Full Duplex
Datenübertragung	synchron	synchron

Tabelle 1: Vergleich I2C zu SPI-Bus

Die Unterschiede zwischen den beiden Bussystemen sind für den Energiemonitor nicht relevant, da nur ein Busteilnehmer adressiert werden soll und die Abfragegeschwindigkeit deutlich geringer ist, als das langsamere Bussystem vorgibt.

Die Entscheidung fiel zugunsten des SPI-Busses, da der gewählte A/D-Wandler, der im Praxisteil ausführlich beschrieben wird, mit dem SPI-Bus arbeitet.

Der SPI-Bus wurde von der Firma Motorola entwickelt [Kainka, 1998]. Der Bus befindet sich in der Regel auf einer Platine oder innerhalb einer Baugruppe, da die Leitungslänge begrenzt ist und die Performance durch zu lange Leitungen eingeschränkt oder sogar die Kommunikation gestört werden kann.

Er arbeitet mit drei Leitungen:

- *SCLK (Signal Clock)*: Die Signal Clock-Leitung synchronisiert den Takt der Bus-Teilnehmer untereinander.
- *MOSI (Master Out, Slave in)*:
Über die MOSI-Leitung werden Daten vom Master und den Slave übertragen.
- *MISO (Master In, Slave Out)*: Da der SPI-Bus im Full-duplex-Modus arbeitet, benötigt er eine Leitung, die gleichzeitig zum Send auch Daten empfangen kann. dies geschieht über die MISO-Leitung.

Eine vierte Leitung, die nicht zum Bus selbst gehört, ist die Clock-Select-Leitung (CS, häufig auch \overline{SS} oder \overline{STE} genannt). Über die CS-Leitung wird der zu adressierende Slave angesprochen, dem die Daten auf der Bus-Leitung gelten. Sind mehrere Slaves mit einem Master verbunden, so benötigt der Slave mehrere CS-Ausgänge, um den jeweiligen Slave anzusprechen. Da im Fall des Energiemonitors aber nur ein Slave vorhanden sein wird, ist nur eine CS-Leitung am Master nötig.

Die Verkabelung eines einzelnen Slaves mit einem SPI-Master sieht folgendermaßen aus:

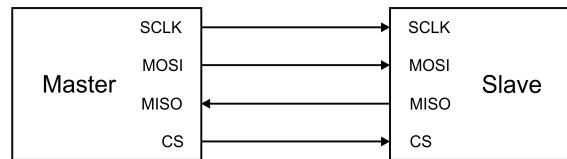


Abbildung 14: SPI-Bus mit einem Slave.

3 Durchführung

3.1 Aufbau der Schaltung

Der Energiemonitor nutzt zur Erfassung der Stromverbräuche acht Stromwandler, die mit Hilfe eines Klapp-Mechanismus ohne Unterbrechung oder Änderung der Installation über die stromführenden Leitungen installiert werden. Die Sekundärströme der Stromwandler werden mit Hilfe von Operationsverstärkern verstärkt und über einen A/D-Wandler einem Mikrocontroller zugeführt (siehe Abbildung 15).

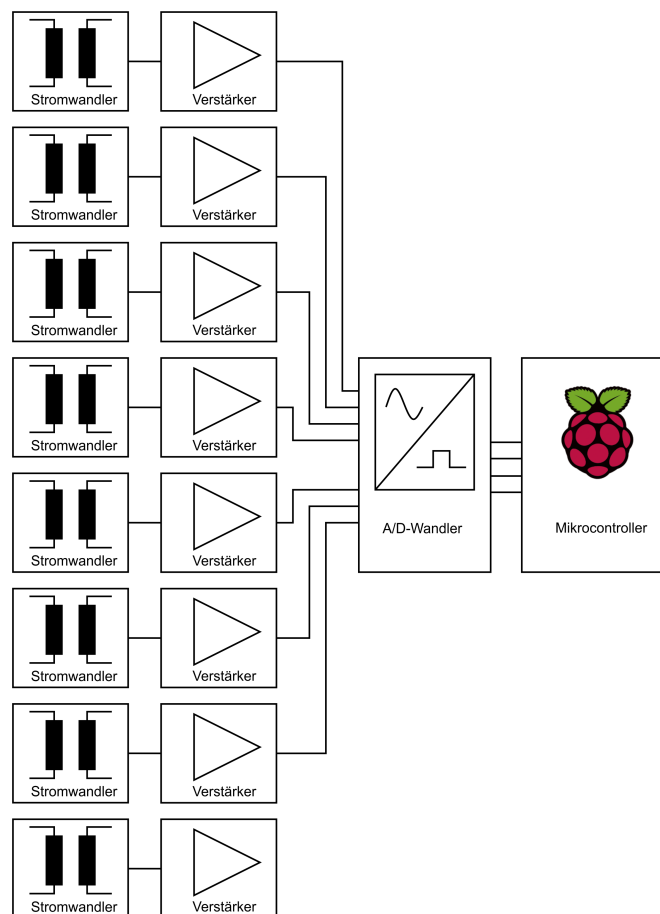


Abbildung 15: Blockschaltbild des Energiemonitors.

Abbildung 16 zeigt den Analog-Teil der Schaltung für einen Kanal. Der Schaltplan ist ein Ausschnitt aus dem Gesamtschaltplan und zeigt Kanal 2. Das Mess-Signal vom Stromwandler wird über eine Graetz-Schaltung mit den vier Schottky-Dioden D5-D8 als Vollweggleichrichter gleichgerichtet. Das gleichgerichtete Signal fällt an dem niederohmigen Widerstand R2 ab. Das Halbwellen-Signal wird über die zwei Tiefpassfilter (C3/R11, C4/R12) in eine Gleichspannung umgewandelt. Danach wird es dem Operationsverstärker IC5B zugeführt, der das Signal entsprechend dem Verhältnis der beiden Widerstände R24 und R26 verstärkt.

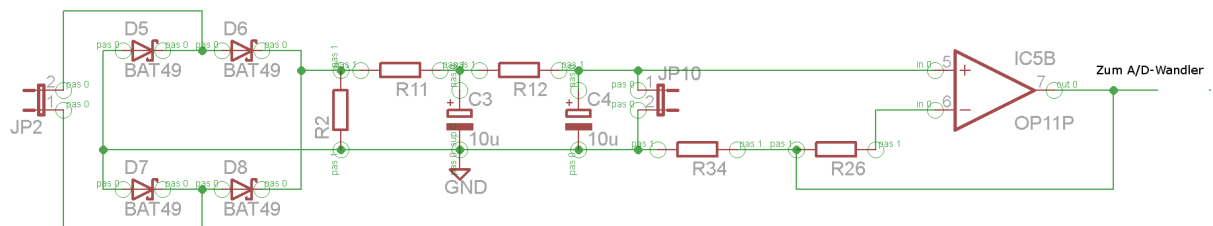


Abbildung 16: Analogteil der Schaltung für einen Kanal.

Die Hersteller von Stromwandlern empfehlen, das Mess-Signal direkt einer Bürde zuzuführen und es mit einem Operationsverstärker gleichzurichten und dann zu verstärken [crmagnetics, 2012]. Auf den gleichrichtenden Operationsverstärker kann man aber verzichten, wenn man das Signal erst mit einer Graetz-Schaltung gleichrichtet und erst dann der Bürde zuführt. Die niedrige Spannung, die vom Stromwandler geliefert wird und deutlich niedriger ist als die Schleusenspannung der Dioden, spielt in diesem Fall keine Rolle, da der Stromwandler den Strom einprägt und nicht die Spannung.

Diese Idee der vereinfachten Gleichrichtung entstammt dem Beitrag eines Elektronik-Forums und wurde für die Schaltung leicht modifiziert [Falk Brunner et al., 2012].

3.2 Versuchsaufbau der Schaltung

Die Schaltung für einen Kanal wurde auf einem Breadboard⁴ aufgebaut (siehe Abbildung 17).

Der Stromwandler wurde über eine 3,5mm-Klinkenbuchse mit der Versuchsschaltung verbunden. Auf der linken Seite befinden sich die vier Schottky-Dioden, die das Signal vom Stromwandler gleichrichten. Danach folgt die zweistufige Glättung mit Hilfe zweier RC-Tiefpassfilter.

⁴Steckplatine zur Erprobung elektronischer Schaltungen

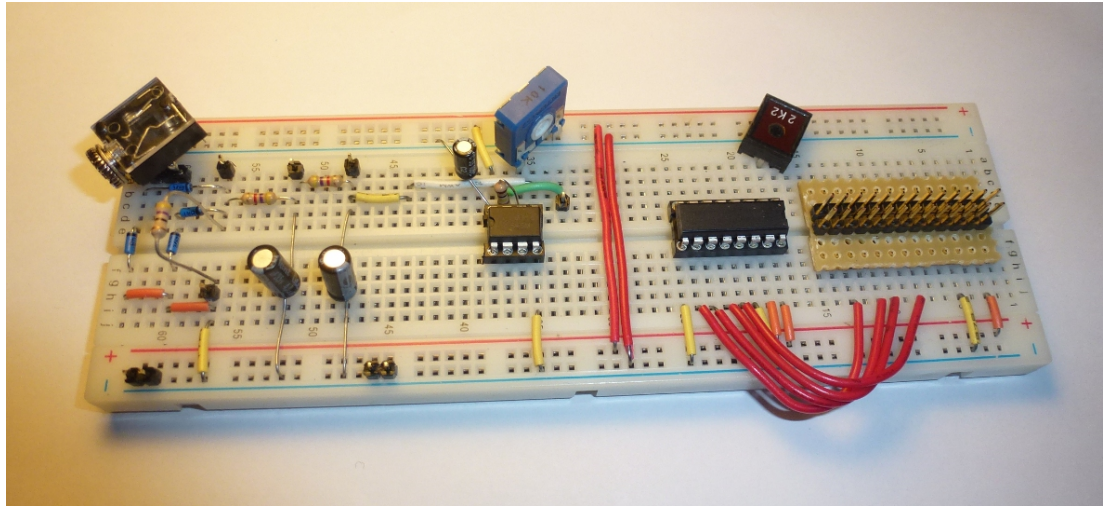


Abbildung 17: Breadboard-Aufbau der Versuchsschaltung.

In der Mitte des Breadboard befindet sich der Operationsverstärker mit einem Stützkondensator und einem variablen Spannungsteiler. Danach folgt rechts der Analog-Digitalwandler und die Pfostenleiste, die die Verbindung zum Raspberry Pi ermöglicht. Die Spannungsversorgung geschieht mit Hilfe eines stabilisierten Netzteils, welches die 5 Volt-Versorgung der Schaltung garantiert.

3.2.1 Erzeugung des Laststroms

Um die Last der Verbraucher zu simulieren, wurde ein Ringkerntransformator benutzt, der eine Spannung von 12V liefert und 300W Leistung besitzt. Der Transformator wurde auf ein Gestell montiert, auf dem sich neun 12V-Auto-Glühlampen befinden. Die Autobirnen haben eine Leistung von jeweils 20W und können mit Hilfe von Krokodilklemmen mit dem Ringkerntrafo verbunden werden. An eine der Zuleitungen des Ringkerntrafos auf der Sekundärseite wurde der Stromwandler geklemmt. Zur Messung des Laststroms wurde die Zuleitung durch ein Digital-Multimeter geführt, welches den Strom misst. Eine zusätzliche 10 Watt-Birne erlaubt eine Abstufung im 10 Watt-Bereich, was ca. 1 Ampere entspricht. Für die Untersuchung des Strombereichs bis 2 Ampere wurden zusätzlich $1,5\Omega$ Keramik-Hochlast-Widerstände benutzt, mit denen sich der Laststrom sehr genau einstellen lässt. Die Alternative zu diesem Versuchsaufbau wäre ein professioneller, einstellbarer Trenntransformator gewesen, der aber Anschaffungskosten von mindestens 500,- Euro verursacht hätte.

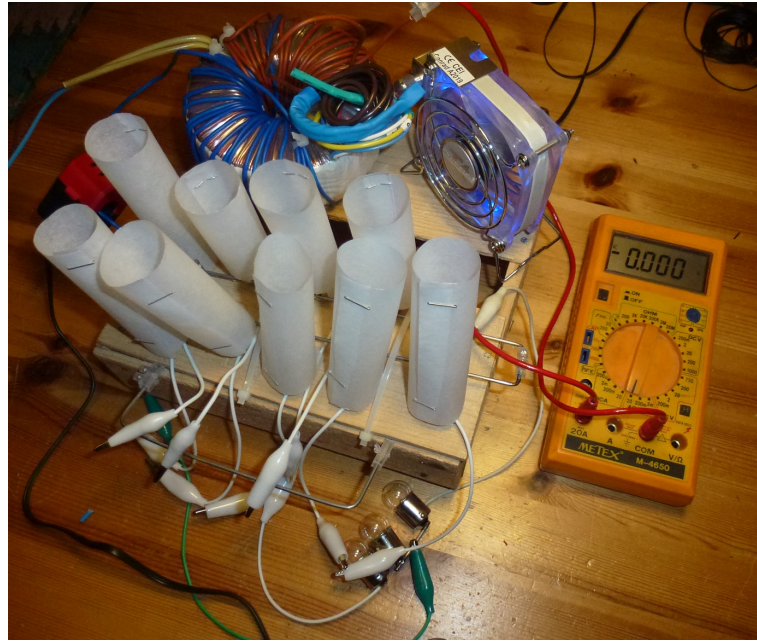


Abbildung 18: Ringkerntrafo mit 12V-Auto-Glühlampen zur Erzeugung der Stromlast.

3.3 Auswahl des A/D-Wandlers

Die Auswahl des A/D-Wandlers wurde dadurch beeinflusst, dass eine gut dokumentierte Implementierung einer Wandler-Schaltung von Erik Bartmann vorliegt [Erik Bartmann, 2012]. Bartmann beschreibt in seinem Artikel die Funktion des A/D-Wandlers MCP3008 im Zusammenhang mit dem Raspberry Pi. Außerdem sind Beispiellbibliotheken in Python verfügbar, die zum Teil übernommen werden konnten. Die Anzahl der Kanäle beträgt acht und ist damit ausreichend für den Energiemonitor. Es handelt sich bei dem MCP3008 um einen A/D-Wandler, der nach dem Wägeverfahren arbeitet und der nicht für sehr hohe Geschwindigkeiten ausgelegt ist. Dies ist jedoch kein Hinderungsgrund, da der Energiemonitor die Werte nur im Sekundenzeitraum abfragt. Der MCP3008 besitzt einen SPI-Bus und kann damit leicht mit dem Raspberry Pi verbunden werden.

3.4 Auswahl der Stromwandler

Die Auswahl des Stromwandlers hängt nicht nur von den elektrischen Eigenschaften ab, da diese bei den verschiedenen Klappwandlern nicht sehr unterschiedlich ist. Auch Eigenschaften wie Größe, Durchmesser, Preis und nicht zuletzt Verfügbarkeit spielen eine Rolle.

Nach einer Vorauswahl anhand von Berichten im Internet kamen für den Energiemonitor zwei Stromwandler in Frage, die um die Messleitung geführt werden können,

relativ günstig sind und für Ströme in der Größenordnung bis 100 Ampere geeignet sind.

- *Klappstromwandler SCT-0133-000*

Der Stromwandler SCT-0133-000 ist für Ströme bis hundert Ampere geeignet und besitzt eine Schutzfunktion in Form zweier Zener-Dioden, die beim Ausstecken des Wandlers die induzierte Spannung kurzschliessen. Er ist mit einem 3,5mm-Klinkenstecker versehen, was den späteren Einbau in das Gerät etwas schwieriger macht als bei dem anderen Wandler. Er ist so klein, dass die notwendige Anzahl problemlos in den Verteilerkasten eingebaut werden kann. Mit 11,- Euro ist er sehr preisgünstig.

- *Klappstromwandler CT30-A*

Der Stromwandler CT30-A ist für Ströme bis 30A ausgelegt und dadurch in dem Bereich gut für die Messungen bis 16A geeignet. Dieser Stromwandler besitzt keine Schutz-Dioden, ist dafür aber mit einem eingebauten 50 Ω -Widerstand als Bürde versehen. Da in dieser Schaltung die Gleichrichtung mit den Schottky-Dioden vor der Terminierung stattfinden soll, musste der Widerstand aus dem Stromwandler entfernt werden. Das Kabel ist bereits mit einem RJ11-Stecker versehen, der kleiner als der Klinkenstecker ist. Mit 4,50 Euro ist er noch einmal nur halb so teuer wie der SCT-0133-000.

Zur Überprüfung der elektrischen Eigenschaften wurden die beiden Stromwandler an den Aufbau zur Lasterzeugung angeschlossen. Die gleichgerichtete Spannung an der Bürde wurde dann mit Hilfe eines Oszilloskopes gemessen (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

Das Ergebnis war für beide Stromwandler gleich gut. Die sinusförmige Kurvenform ist bei beiden Wandlern nahezu gleich, lediglich die Spannung ist bei dem SCT-0133-000 aufgrund der Anzahl der Windungen höher.

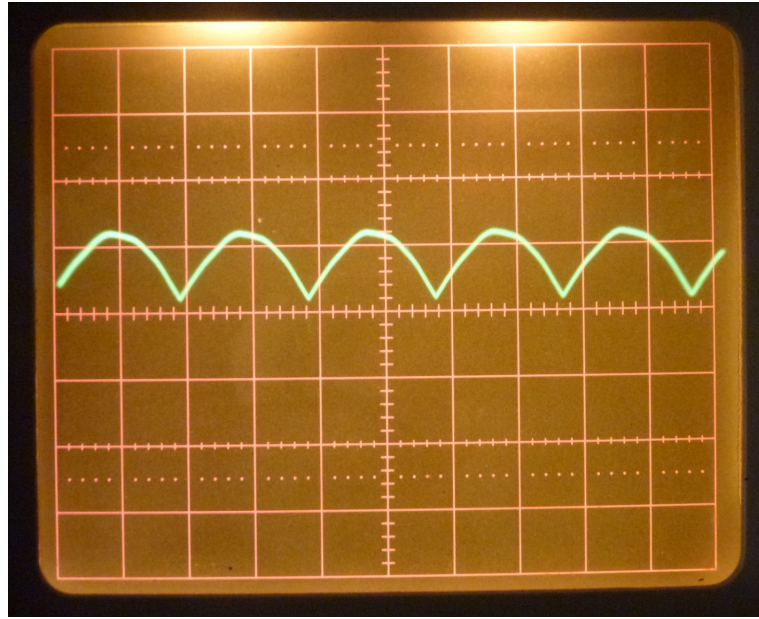


Abbildung 19: Oszilloskop-Bild nach der Vollweggleichrichtung beim CT30-A.

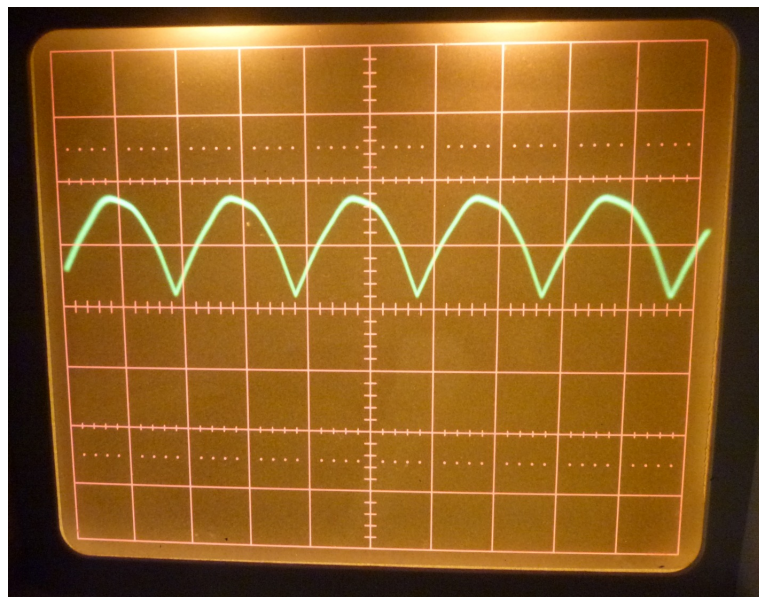


Abbildung 20: Oszilloskop-Bild nach der Vollweggleichrichtung beim SCT-0133-000.

Wegen des geringeren Preises und der besseren Anschlussmöglichkeit mit dem RJ11-Stecker wurde der CT30-A für die weitere Verwendung ausgewählt.

3.5 Auswahl des Operationsverstärkers

Die Auswahl des Operationsverstärkers geschah aufgrund folgender Überlegungen:

- *Offset*: Ein wichtiger Faktor bei der Auswahl des Operationsverstärkers ist der Offset. Dieser Wert bestimmt, ab welcher Spannung der Verstärker linear verstärkt. Bevor dieser Wert erreicht wird, wird die Ausgangsspannung null oder solange auf einem festen Wert über null bleiben, bis die Offset-Spannung erreicht ist. In den letzten Jahren wurden die Operationsverstärker ständig weiterentwickelt, so dass heutzutage Werte von bis zu 5 μ V erreicht werden können (LT104VN).
- *Stromversorgung*: Die ersten Operationsverstärker mussten mit einer positiven und einer negativen Versorgungsspannung betrieben werden. Typisch waren +15V und -15V.

Da die Versorgungsspannung für den Energiemonitor 5V beträgt, steht somit nur ein Rail-to-Rail-Verstärker zur Auswahl [Federau, 2004]. Damit ist die Anzahl der in Frage kommenden Verstärker deutlich eingeschränkt.

- *Bauart*: Die Anzahl der Operationsverstärker pro DIL-Gehäuse⁵ sollte mindestens vier betragen, um nicht mehr als zwei Chips auf dem Wandlerboard unterbringen zu müssen.
- *Preis*: Operationsverstärker wie der LM741 werden zu Tausenden produziert und sind für wenige Cent zu haben. Ein Rail-to-Rail-Verstärker mit niedrigem Offset kann dagegen durchaus mit mehreren Euro zu Buche schlagen. Daher sollte bei der Schaltung auch der Preis beachtet werden.

Zur Auswahl standen drei Operationsverstärker, die aufgrund ihrer Verbreitung in der Literatur, ihren elektrischen Eigenschaften, ihrer Verfügbarkeit, ihrer Bauart und des geringen Preises in Frage kamen. Dies waren der:

- *LM385*

Der LM385 ist ein etwas älterer Operationsverstärker, der allerdings weit verbreitet und universell einsetzbar ist.

- *TS912*

Der TS912 besitzt sehr gute Eigenschaft im Bereich der Linearität, hat jedoch für einen neueren Operationsverstärker eine relativ hohe Offset-Spannung.

- *LT1014CN*

Der modernste Operationsverstärker ist mit einigen Euro zwar der teuerste Verstärker, er besitzt aber eine besonders niedrige Offset-Spannung.

⁵Dual in-line package

3.5.1 Bestimmung des Offsets und der Linearität der Operationsverstärker

Um den optimalen Operationsverstärker zu finden, wurde ein Versuchsaufbau mit den drei zur Auswahl stehenden Operationsverstärkern im Bereich von 0-14 Ampere aufgebaut.

Ströme über 14 Ampere sollen nicht in Betracht gezogen werden, da diese hohen Ströme in der Regel im Haushalt nicht vorkommen. Dies hat finanzielle Gründe. Bei den Sicherungen in einem normalen Haushalt handelt es sich aus Kostengründen meist nicht um hochgenaue Sicherungen, die schon bei 15 oder sogar 14 Ampere abschalten können. Wenn aber eine Leitung im Haushalt bereits mit 14 Ampere belastet ist, liegt wahrscheinlich ein Defekt oder eine Überlast vor.

Der Versuch wurde so vorgenommen, dass der Strom im Bereich von 0-2 Ampere mit einer 20 Watt Auto-Glühbirne und zusätzlichen Hochlast-Widerständen eingestellt wurde. In dem Bereich wurden 12 verschiedenen Stromwerte eingestellt. Ab einem Wert von 2 Ampere wurden 18 Messungen vorgenommen. Es wurde jeweils eine 20 Watt-Birne hinzugefügt und als Zwischenschritt eine 10 Watt-Birne parallel geschaltet. Der Strom wurde mit einem digitalen Messgerät gemessen.

Die Messung der Spannung fand nach der Verstärkung durch den Operationsverstärker statt. Sie wurde mit einem digitalen Multimeter durchgeführt, welches einen ausreichend hohen Innenwiderstand besitzt, um die Messung nicht zu verfälschen.

Der numerische Wert des A/D-Wandlers wurde mit Hilfe eines Python-Skriptes ausgelesen und jeweils dem Laststrom und der verstärkten Spannung zugeordnet.

3.5.2 Ergebnisse des Versuchsaufbaus

Die Messungen für die drei verschiedenen Operationsverstärker ergeben folgende Werte:

Laststrom I_L/A	Verstärkte Spannung LM358 U_V/V	Numerischer Wert A/D-Wandler
0	0	1
0,239	0	1
0,329	0,07	1
0,426	0,07	1
0,595	0,1	6
0,73	0,089	18
0,901	0,103	20
1,01	0,136	27
1,135	0,174	35
1,29	0,222	45

Laststrom I_L/A	Verstärkte Spannung LT1014 U_V/V	Numerischer Wert A/D-Wandler
1,461	0,273	56
1,751	0,388	80
2,324	0,564	116
3,481	0,917	178
4,04	1,08	223
5,125	1,415	291
5,662	1,58	325
6,711	1,898	391
7,25	2,06	424
8,29	2,37	490
8,81	2,53	522
9,846	2,85	586
10,338	3	617
11,308	3,29	678
11,794	3,44	709
12,753	3,67	755
13,232	3,67	757
14,159	3,67	755
14,603	3,67	755

Tabelle 2: Messwerte LM358

Laststrom I_L/A	Verstärkte Spannung TS912 U_V/V	Numerischer Wert A/D-Wandler
0	0,05	11
0,237	0,06	12
0,33	0,08	15
0,428	0,1	20
0,595	0,13	27
0,736	0,204	42
0,9	0,255	52
1	0,289	59
1,129	0,325	66
1,272	0,368	75
1,434	0,419	85
1,785	0,5	101
2,349	0,67	137
3,47	1,01	206
4,019	1,17	239
5,122	1,49	307
5,663	1,67	340
6,714	1,98	408
7,242	2,14	442

Laststrom I_L/A	Verstärkte Spannung TS912 U_V/V	Numerischer Wert A/D-Wandler
8,29	2,47	506
8,806	2,63	540
9,844	2,94	602
10,331	3,09	633
11,292	3,37	693
11,775	3,52	720
12,735	3,81	780
13,203	3,95	811
14,151	4,23	867
14,601	4,38	897

Tabelle 3: Messwerte TS912

Laststrom I_L/A	Verstärkte Spannung LT1014 U_V/V	Numerischer Wert A/D-Wandler
0	0,01	2
0,233	0,03	5
0,327	0,06	12
0,424	0,09	19
0,599	0,15	31
0,732	0,192	40
0,842	0,227	46
0,905	0,246	50
0,969	0,265	54
1,12	0,313	64
1,39	0,396	81
1,767	0,517	106
2,342	0,695	143
3,476	1,042	215
4,038	1,214	251
5,116	1,514	319
5,674	1,713	354
6,73	2,04	421
7,259	2,2	455
8,315	2,52	522
8,848	2,68	555
9,86	2,99	619
10,365	3,15	651
11,33	3,44	713
11,816	3,59	741
12,786	3,88	804
13,25	4,03	834

Laststrom I_L/A	Verstärkte Spannung LT1014 U_V/V	Numerischer Wert A/D-Wandler
14,164	4,24	877
14,625	4,24	877

Tabelle 4: Messwerte LT1014

Die Ergebnisse der Messungen werden in Form der verstärkten Spannungen und der numerischen Werte des A/D-Wandlers in je zwei Diagrammen dargestellt. Eines für den gesamten Strombereich von 0-14 Ampere und ein weiteres für den Bereich von 0-2 Ampere (siehe Abbildung 21).

Den beiden Diagrammen kann man entnehmen, dass alle drei Operationsverstärker über den gesamten Bereich hinweg zu akzeptablen Ergebnissen führen. Es ist lediglich zu erkennen, dass der LM357 früher seine maximale Spannung erreicht als die anderen beiden Typen. Im Bereich von 2-14 Ampere liefern die Verstärker aber alle eine brauchbare Linearität.

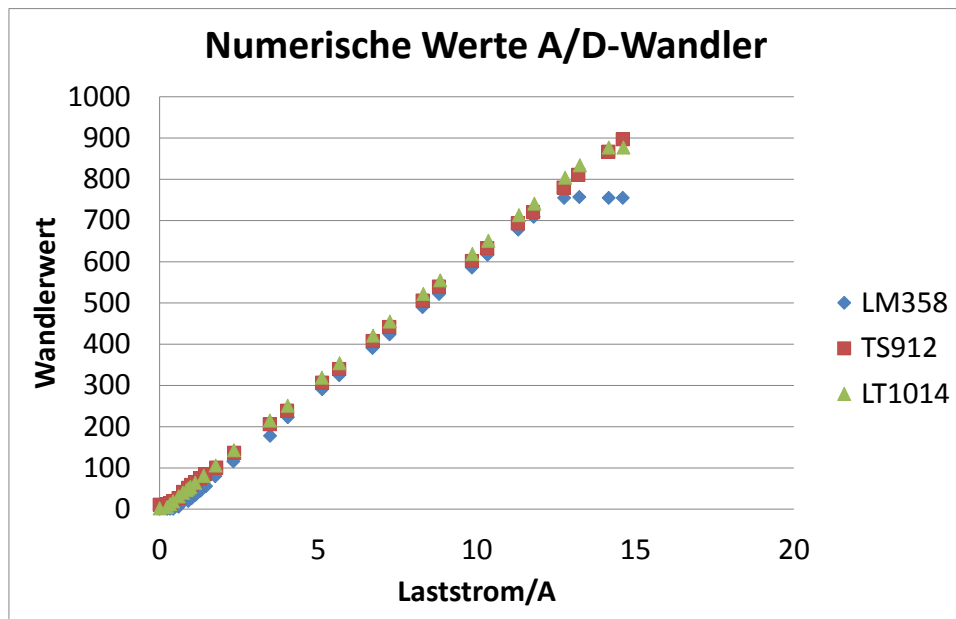
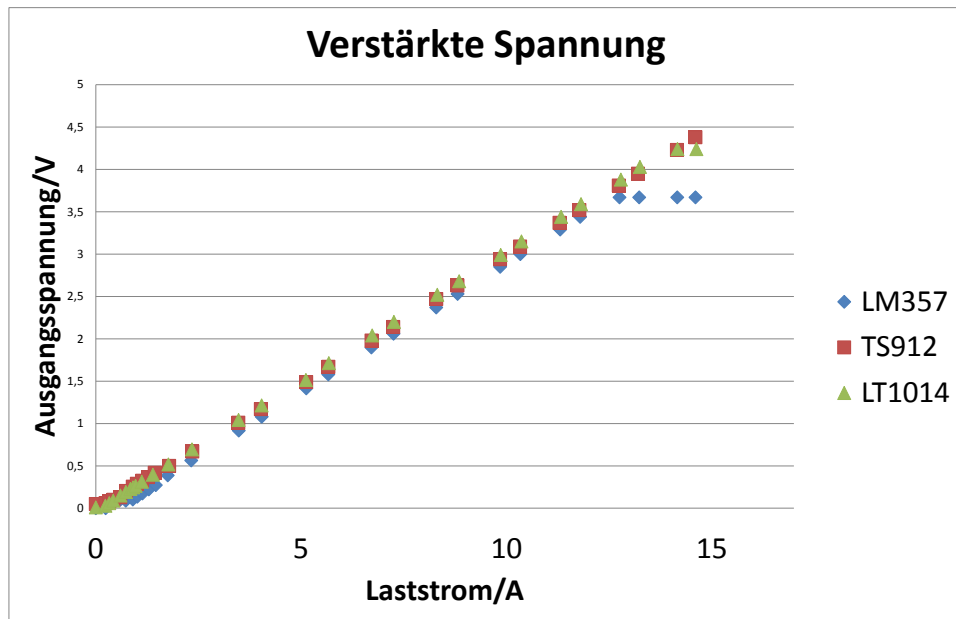


Abbildung 21: Verstärkte Ausgangsspannungen und numerische A/D-Wandlerwerte an den Operationsverstärkern in Abhängigkeit vom Laststrom (0-14 Ampere).

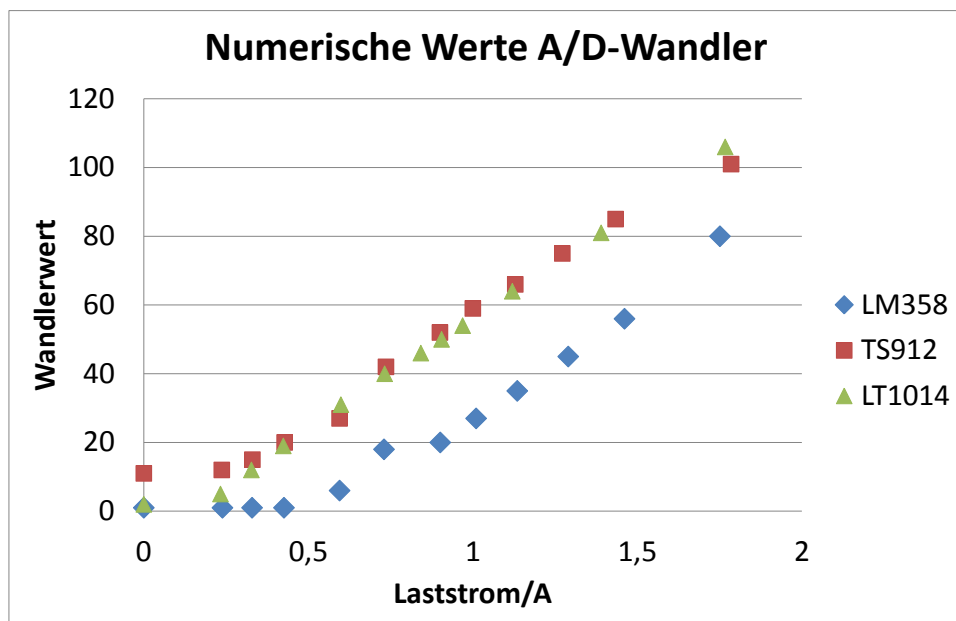
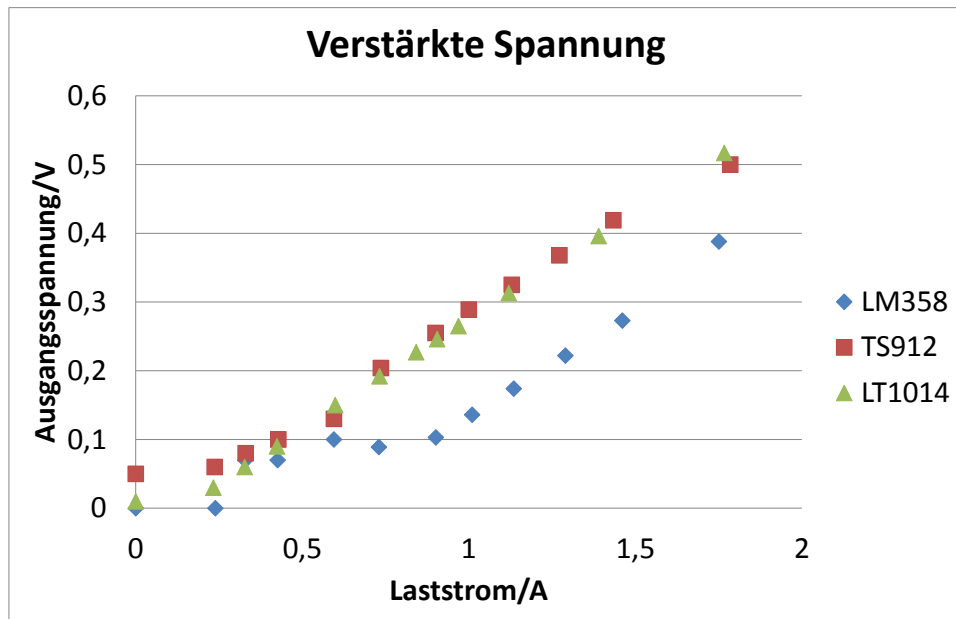


Abbildung 22: Verstärkte Ausgangsspannungen und numerische A/D-Wandlerwerte an den Operationsverstärkern in Abhängigkeit vom Laststrom (0-2 Ampere).

Die grafische Auswertung der Messwerte im Laststrombereich von 0-2 Ampere

zeigt, dass sich die verschiedenen Operationsverstärker unterschiedlich verhalten (siehe Abbildung 22). Dieser Laststrombereich entspricht einem Wirkleistungswert von 0-440 Watt.

Man kann den Diagrammen entnehmen, dass der LM358 erst ab einem Strom von etwa 0,3 Ampere in den linearen Bereich kommt. Dies entspricht einem Wert von 66 Watt.

Der TS912 zeigt zwar noch bei 0,3 Ampere ein lineares Verhalten, liefert aber auch bei 0 Ampere eine Ausgangsspannung von 0,05 V.

Der Operationsverstärker LT1014 zeigt das beste Verhalten im niedrigen Strombereich. Bei 0,3 Ampere ist die Gerade noch im linearen Bereich und bei 0 Ampere Laststrom liefert der Verstärker keine Ausgangsspannung.

Daher liegt es nahe, den LT1014 für den Energiemonitor auszuwählen.

3.6 Design und Erstellung des Wandler-Board Prototypen

Das Zeichnen des Gesamt-Schaltplans wurde mit der PCB-Software „Eagle“ vorgenommen (siehe Abbildung 27). Dazu wurde die Schaltung aus dem Versuchsaufbau achtmal übernommen. Der A/D-Wandler besitzt acht Eingänge und musste nur einmal aufgenommen werden. Die acht Operationsverstärker sind in zwei Bausteinen verbaut. Die integrierten Schaltungen wurden mit Stützkondensatoren (100 nF) versehen, um unerwünschte hochfrequente Störeinflüsse zu vermeiden.

Eagle besitzt ein Schematic-Modul zum Entwurf von elektronischen Schaltungen und ein Modul, um aus der Schaltung eine Platine zu entwerfen, welche an eine Spezialfirma für Leiterplattenentwicklung geliefert werden kann, die eine elektrisch geprüfte Platine erstellt (siehe Abbildung 23). Die Schaltung wurde so aufgebaut, dass Analog- und Digitalteil getrennt sind, um Störeinflüsse zu vermeiden. Um einen Spannungsabfall zu verhindern, wurden die Stromzuführungen auf der Platine mit besonders dicken Leitungen versehen.

Die Stromversorgung des Gerätes erfolgt aus Gründen der Sicherheit extern. Außerdem wird dadurch verhindert, dass sich das Gerät zu stark erwärmt.

3.7 Mechanischer Aufbau

Da das Gerät im Verteilerkasten untergebracht werden soll, bietet sich ein DIN-Gehäuse aus Kunststoff an. Diese Art der Gehäuse lässt sich sehr gut auf der DIN-Schiene befestigen und passt sich damit den Gegebenheiten innerhalb des Schaltschranks an.

Der Raspberry Pi wird auf zwei 5mm-Distanzhülsen montiert, die in das Gehäuse verklebt sind. Die entwickelte Platine wird „huckepack“ mit Hilfe zweier weiterer

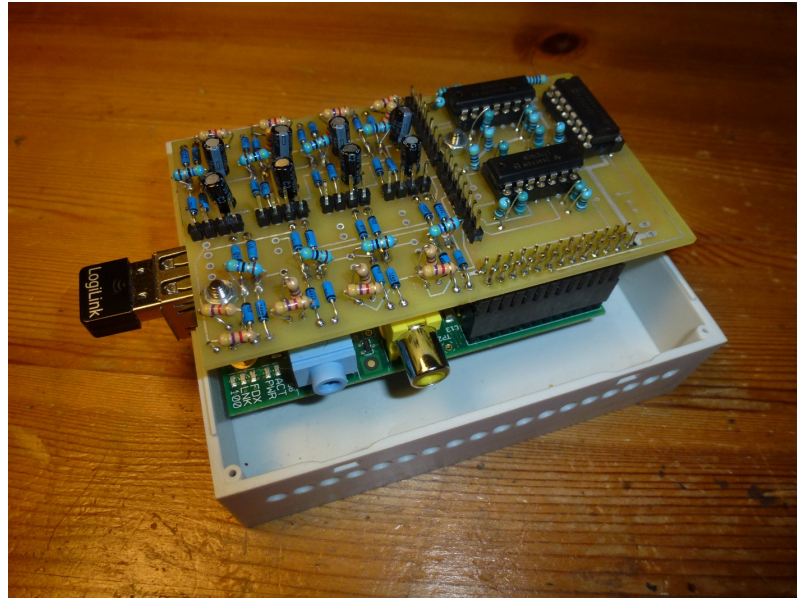


Abbildung 23: Wandlerkarte und Raspberry Pi im DIN-Gehäuse

Schrauben über die Steckerleiste mit dem Raspberry Pi verbunden.

Die Verbindung zwischen den Stromwandlern und der Platine geschieht mit Hilfe von Jumperkabeln und acht RJ11-Buchsen, die in den oberen Bereich des Gehäuses verklebt sind. Das Netzteil wird über ein ausreichend dimensioniertes Kabel mit dem Energiemonitor verbunden.



Abbildung 24: Stromwandler vom Typ CT30-A.

3.8 Inbetriebnahme und Test

Nach dem Zusammenbau wurde das Gerät von einer technisch versierten Fachkraft in den Verteilerschrank eingebaut. Die Stromwandler wurden an den zu untersuchenden Stromkreisen angebracht und fügten sich sehr gut in den Verteilerkasten ein. Die Zuleitungen der Wandler wurden hinter den Hutschienen bis zum Energiemonitor gelegt und über die RJ11-Buchsen verbunden. Das Netzteil wurde über die Sicherung des Klingeltrafos mit dem 220V-Netz verbunden.

Da sich der Router in relativ geringer Nähe zum Verteilerkasten befindet, war es nicht notwendig, den WLAN-Stick mit einer Verlängerung hinauszuführen. Das dünne Blech des Verteilerkastens stellte für die Verbindung kein Problem dar.

Das fertig eingebaute Gerät nimmt auf Grund der kompakten Bauweise sehr wenig Platz in Anspruch (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Der Energiemonitor im Verteilerschrank

3.9 Programmierung des SPI-Busses

Die Werte des A/D-Wandlers werden mit Hilfe eines Python-Scriptes in eine Datenbank und zur Anzeige in RRD-Files geschrieben. Dazu wurde ein von Erik Bartmann programmiertes Script zur Abfrage des MCP3008 so modifiziert, dass es mit dem Betriebssystemstart in einer Endlosschleife läuft und alle 30 Sekunden die acht Messwerte überträgt [Erik Bartmann, 2012].

```
#!/usr/bin/python

#####
# Read numeric data from mcp3008 and write it to MySQL and to
# RRD-files
# Based on Eric Bartmans MCP3008 library for Raspberry Pi
# Part of Powermonitor project
# Olaf Ramge April 2013
#####

import _mysql
import time
import subprocess
import RPi.GPIO as GPIO

GPIO.setmode(GPIO.BCM)

HIGH=True
LOW=False

def readAnalogData(adcChannel, SCLKPin, MOSIPin, MISOPin,
                  CSPin):

    GPIO.output(CSPin,HIGH)
    GPIO.output(CSPin,LOW)
    GPIO.output(SCLKPin,LOW)

    sendcmd=adcChannel
    sendcmd|=0b00011000

    for i in range(5):
```

```
        if (sendcmd & 0x10):
            GPIO.output(MOSIPin,HIGH)
        else:
            GPIO.output(MOSIPin,LOW)

        GPIO.output(SCLKPin,HIGH)
        GPIO.output(SCLKPin,LOW)
        sendcmd <<=1

    adcvalue=0
    for i in range(11):
        GPIO.output(SCLKPin,HIGH)
        GPIO.output(SCLKPin,LOW)
        adcvalue<<=1
        if(GPIO.input(MISOPin)):
            adcvalue|=0x01

#         time.sleep(0.5)
    return adcvalue

con = None

try:

    con = _mysql.connect('localhost', 'root',
        'xxxxxxxx', 'powermonitor')

    con.query("SELECT VERSION()")
    result = con.use_result()

    print "MySQL version: %s" % \
        result.fetch_row()[0]

except _mysql.Error, e:

    print "Error %d: %s" % (e.args[0], e.args[1])
    sys.exit(1)
```

```
finally:
```

```
    SCLK=18  
    MOSI=24  
    MISO=23  
    CS=25
```

```
    GPIO.setup(SCLK,GPIO.OUT)  
    GPIO.setup(MOSI,GPIO.OUT)  
    GPIO.setup(MISO,GPIO.IN)  
    GPIO.setup(CS,GPIO.OUT)
```

```
while True:
```

```
    ch0=readAnalogData(0,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch1=readAnalogData(1,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch2=readAnalogData(2,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch3=readAnalogData(3,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch4=readAnalogData(4,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch5=readAnalogData(5,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch6=readAnalogData(6,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    ch7=readAnalogData(7,SCLK,MOSI,MISO,CS)  
    print "AD Value - Ch0: ",ch0," Ch1: ",ch1,"  
        Ch2: ",ch2," Ch3: ",ch3," Ch4: ",ch4," Ch5:  
        ",ch5," Ch6: ",ch6," Ch7: ",ch7  
    chstr0="N:" + str(ch0*3.6);  
    chstr1="N:" + str(ch1*3.6);  
    chstr2="N:" + str(ch2*3.6);  
    chstr3="N:" + str(ch3*3.6);  
    chstr4="N:" + str(ch4*3.6);  
    chstr5="N:" + str(ch5*3.6);  
    chstr6="N:" + str(ch6*3.6);  
    chstr7="N:" + str(ch7*3.6);  
    print "Power in VA - Ch0: ",chstr0," Ch1: ",  
        chstr1," Ch2: ",chstr2," Ch3: ",chstr3,"  
        Ch4: ",chstr4," Ch5: ",chstr5," Ch6: ",  
        chstr6," Ch7: ",chstr7  
  
    subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/  
        cacti/rra/ch0.rrd",chstr0])  
    subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
```



```
cacti/rra/ch1.rrd",chstr1])
subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
cacti/rra/ch2.rrd",chstr2])
subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
cacti/rra/ch3.rrd",chstr3])
subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
cacti/rra/ch4.rrd",chstr4])
subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
cacti/rra/ch5.rrd",chstr5])
subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
cacti/rra/ch6.rrd",chstr6])
subprocess.call(["rrdtool","update","/var/lib/
cacti/rra/ch7.rrd",chstr7])
time.sleep(30)
con.query("SELECT VERSION() ")
con.execute("INSERT INTO `powermonitor`.`value
` (`when`, `CH0`, `CH1`, `CH2`, `CH3`, `CH4
`, `CH5`, `CH6`, `CH7`) VALUES (now(), '0',
'1', '2', '3', '4', '5', '6', '7')")
result = con.use_result()
```

3.10 Konfiguration der Datenbank und der Visualisierung

Zur Speicherung der Messdaten wird eine MySQL-Datenbank benutzt. Der Raspberry Pi besitzt mit dem SD-Kartenanschluss eine ausreichend große Möglichkeit der Datenspeicherung.

Die Speicherung in der Datenbank hat den Vorteil, dass die Werte in ihrer Rohform länger verfügbar sind als bei RRD-Files. Außerdem lässt sich dadurch von anderen Programmen leichter auf die Daten zugreifen, wenn nötig sogar von außen über das Netzwerk.

Ein weiterer Vorteil der Datenbank-Lösung ist die Möglichkeit, weitere Daten zu speichern. Dies sind zum Beispiel Informationen darüber, welcher Stromkreis sich an welchem Kanal befindet oder Informationen über den aktuellen Strompreis.

Zur Darstellung der Messwerte in graphischer Form wird die Software „Cacti“ verwendet, die eigentlich dazu gedacht ist, Werte von Netzwerk-Komponenten über SNMP abzufragen und in RRD-Files zu speichern. Die Möglichkeiten einer dashboard-artigen Darstellung von RRD-Files ist aber bei Cacti so ausgereift, dass sie sich für die Verwendung im Energiemonitor sehr gut eignet (siehe Abbildung 26). Das Ausliefern

der RRD-Grafiken mit Hilfe von Cacti geschieht über einen Apache Webserver. Über ihn kann auch ein webbasierter Zugriff auf die Datenbank mit Hilfe von PHPMyAdmin stattfinden.

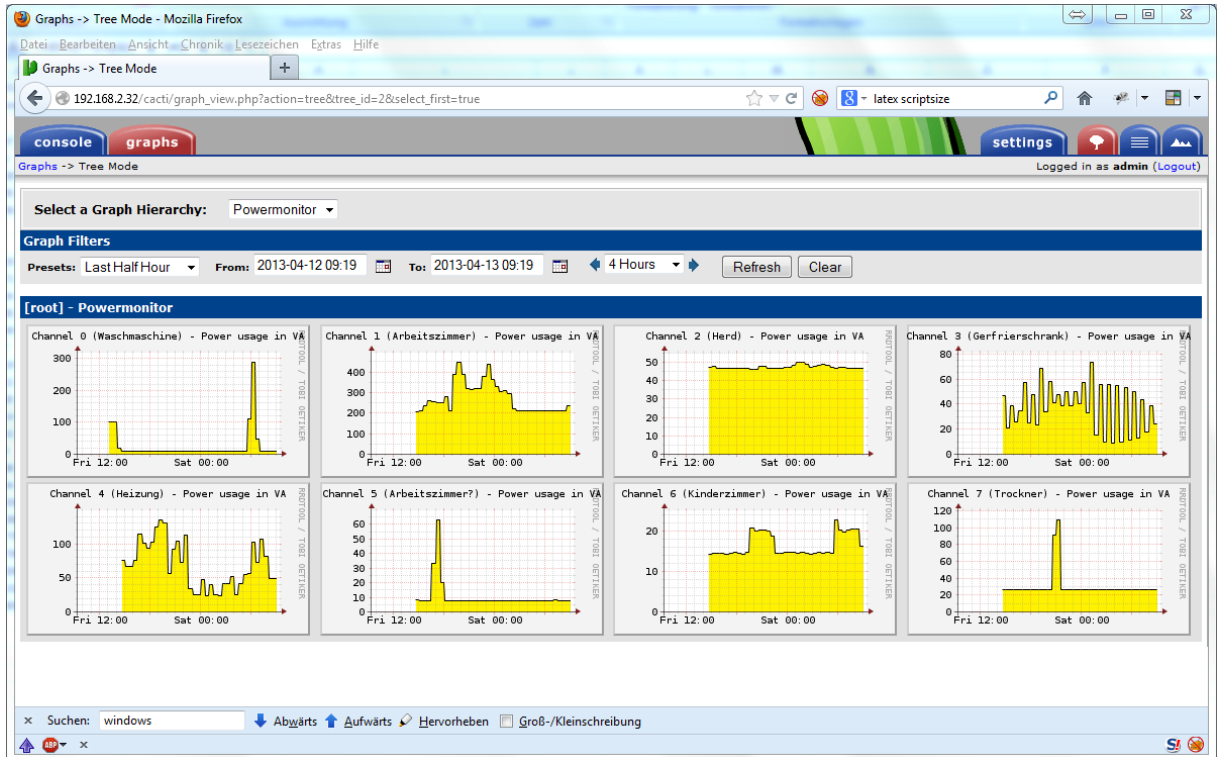


Abbildung 26: Visualisierung der Messwerte mit Hilfe von Cacti.

4 Ergebnis

4.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Prototyps zur Erfassung des Stromverbrauchs mit Hilfe des Raspberry Pi. Dieses Ziel wurde mit dem Bau des Energiemonitors in einem Hutschienengehäuse und der Installation im Verteilerkasten erreicht.

Die Installation des Gerätes an zentraler Stelle im Verteilerkasten ist von großem Vorteil, da die Ströme aller Verbraucher an dieser Stelle zusammentreffen. Mit Klappstromwandlern ist es möglich, das System zu installieren, ohne in die bestehende Installation einzugreifen, da keine Stromkreise geöffnet werden müssen.

Durch die Verwendung des neuen Raspberry Pi konnte der Aufwand für die Entwicklung auf ein Minimum reduziert werden. Der Raspberry Pi verfügt mit seinem leistungsfähigen ARM-Prozessor, seiner großen SD-Karte und nicht zuletzt dem Linux-

Betriebssystem über nahezu die gleichen Möglichkeiten wie eine Unix-Workstation oder ein kleiner Server. Damit konnte auf dem Raspberry Pi eine Datenbank zur Aufnahme der Messwerte und ein Webserver mit Präsentations-Software der RRD-Daten in Form von Cacti implementiert werden.

Auf dem Raspberry Pi hat sich die Programmiersprache Python zur Standardsprache entwickelt. Einer der Gründe dafür ist die leichte Erlernbarkeit dieser Sprache. Aber auch die hohe Verfügbarkeit der Bibliotheken, die alle auf dem Raspberry Pi befindlichen Hardwarekomponenten ansprechen können, hat Python zu seiner Popularität verholfen.

4.2 Kritische Reflektion

Das Gerät besitzt noch einige Schwachstellen, auf die im Folgenden eingegangen werden soll:

- *Fehlende WLAN-Verbindung im Verteilerkasten:*

Eines der ungelösten Probleme ist eine eventuell fehlende Netzwerkverbindung des Energiemonitors mit dem LAN. Der Verteilerkasten befindet sich in Einfamilienhäusern häufig im Keller und besteht nicht selten aus Metallblech, welches die Verbindung des Raspberry Pis mit Hilfe eines WLAN-Dongles erschwert. Der verwendete WLAN-Dongle reichte in der Testinstallation aus, dies lag jedoch daran, dass sich der WLAN-Router nur ca. 10m weit entfernt vom Verteilerkasten befand. Da die Leistung des verwendeten Netzteils mit 2 Ampere ausreichend genug ist, könnte man eventuell auf einen stärkeren WLAN-Dongle ausweichen oder einen WLAN-Expander verwenden. Sollte eine WLAN-Verbindung gar nicht möglich sein, bietet sich der Anschluss über das Stromnetz mit Hilfe von Powernet an.

- *Fehlende Möglichkeit der Wirkleistungsmessung:*

Zu Gunsten der Einfachheit und der automatischen Kalibrierung wird mit dem Energiemonitor keine True-RMS-Messung vorgenommen. Eine solche Messung erfordert eine sehr schnelle Messwerterfassung. Dadurch kann nur die Scheinleistung und nicht die Wirkleistung gemessen werden. Da der Anteil an Blindstrom im normalen Haushalt relativ gering ist, kann man diesen Fehler aber vernachlässigen.

- *Unzureichende Möglichkeit der Messung nicht-sinusförmiger Last:*

Der Energiemonitor misst die Effektivspannung, die durch die Gleichrichtung und Glättung an der Bürde abfällt und berechnet daraus die Effektiv-Leistung bei

sinusförmigem Lastverhalten. Der Strom-Spannungsverlauf ist aber nicht immer sinusförmig. Besonders bei Schaltnetzteilen in Computern und Induktionsherden werden falsche Werte gemessen. Kann man den Fehler bei Computer-Netzteilen noch verkraften, so kann er bei einem Induktionsherd schon von erheblicher Bedeutung sein. Eine Lösung des Problems könnte darin bestehen, den Gesamt-Energieverbrauch mit Hilfe eines optischen Abnehmers mit dem Energiemonitor zu koppeln und andere Lasten vom Gesamtverbrauch zu subtrahieren.

4.3 Ausblick

Der Prototyp des Energiemonitors ist voll einsatzfähig und in Betrieb. Es werden Messwerte aufgenommen und die Verbräuche werden dargestellt. Es könnten aber noch viele weitere Features realisiert werden, die nur wenige Veränderungen auf der Hardware- und Softwareseite benötigen.

4.3.1 Hardwareseitige Verbesserungsmöglichkeiten

- Um das Problem der Blindstromerfassung und der Messung von Geräten zu ermöglichen, die keinen sinusförmigen Stromverbrauch besitzen, wäre es denkbar, den Energiemonitor zusätzlich mit einem Arduino-Chip auszurüsten, der schnell genug ist, eine True-RMS-Messung vorzunehmen. Dies könnte für spezielle Verbraucher wie Computer oder Induktionsherd von Vorteil sein.
- Die Anzahl der Kanäle könnte erhöht werden, um noch mehr Verbraucher zu überwachen. Bei der jetzigen Anzahl von acht Kanälen werden zwar die wichtigsten Verbraucher erfasst, eine komplette Abdeckung hätte aber den Vorteil, dass ein Abgleich mit dem Gesamtverbrauch eventuelle Fehlmessungen sichtbar machen würde.

Da der Platz in dem Gerät bereits nahezu erschöpft ist, wäre es grundsätzlich sinnvoll, auf SMD-Technologie⁶ umzusteigen.

4.3.2 Softwareseitige Verbesserungsmöglichkeiten

Da das System einen kompletten Linux-Server darstellt, sind die Möglichkeiten der softwareseitigen Verbesserungen nahezu unbegrenzt. Denkbar wären folgende Innovationen:

⁶Surface mounted device

- Um den Vergleich mit anderen Haushalten zu ermöglichen, wäre es von Vorteil, eine Art Benchmarking-Dienst einzurichten. Dies hätte zum Beispiel den Vorteil, dass man erkennen kann, ob es nicht bessere Geräte gibt, die den gleichen Zweck erfüllen, aber weniger Energie verbrauchen.
- Bei Erreichen eines Schwellwertes könnten Warnung über SMS oder E-Mail versandt werden. Häufig wird das Abschalten der Verbraucher einfach vergessen (Licht, Fernseher, Herd). Die Software könnte bei Erreichen eines Schwellwertes eine SMS oder eine Email an den Besitzer versenden und ihn so vor zu hohem Verbrauch warnen.
- Das Schalten von Verbrauchern über Funksteckdosen mit Hilfe von Bluetooth oder WLAN wäre relativ leicht zu realisieren. Falls es in Zukunft dazu kommen sollte, dass Nachtstrom wieder populär wird, könnte man mit Hilfe des Energiemonitors Verbraucher zu bestimmten Zeiten einschalten, um in den Genuss eines günstigeren Tarifs zu kommen. Ein Beispiel dafür wäre die Waschmaschine oder der Trockner, der in der Nacht eingeschaltet wird.

aufgrund der außerordentlichen Leistungsfähigkeit des Raspberry Pi ist es durchaus denkbar, den Energiemonitor mit anderen Systemen wie Einbruchssystemen, Kameras oder anderen Bussystemen zu koppeln und ihn dadurch in einen zentralen Server im Bereich der Heimautomation zu machen.

Literaturverzeichnis

- [2 Save Energy Ltd, 2013] 2 Save Energy Ltd (2013). The OWL | Wireless Electricity Monitor Designed To Save You Money and The Environment. <http://www.theowl.com/>.
Abruf am 10. April 2013.
- [Aichele, 2012] Aichele, C. (2012). *Smart Energy: Von der reaktiven Kundenverwaltung zum proaktiven Kundenmanagement*. Vieweg+Teubner Verlag.
- [Aichele et al., 2012] Aichele, C., Doleski, O., Arzberger, M., and Dieper, S. (2012). *Smart Meter Rollout: Praxisleitfaden zur Ausbringung intelligenter Zähler*. Vieweg+Teubner Verlag.
- [Balteri, 2012] Balteri, F. (2012). USB Current Meter.
<http://fabioaltieri.com/2012/08/09/usb-current-meter/>.
Abruf am 7. Oktober 2012.
- [Bartmann, 2012] Bartmann, E. (2012). *Durchstarten mit Raspberry Pi*. O'Reilly Vlg. GmbH & Company.
- [Bergdolt, 2009] Bergdolt, G. und Mattner, D. (2009). *Energiesparen im Haushalt*. Haufe TaschenGuide. Haufe Lexware.
- [Bernstein, 2010] Bernstein, H. (2010). *Werkbuch der Messtechnik*. Franzis PC & Elektronik. Franzis.
- [Brinkschulte, 2002] Brinkschulte, Uwe und Ungerer, T. (2002). *Mikrocontroller und Mikroprozessoren : mit 39 Tabellen*. Springer.
- [Broadcom Corporation, 2012] Broadcom Corporation (2012). High Definition 1080p Embedded Multimedia Applications Processor. <http://www.broadcom.com/products/BCM2835>.
Abruf am 25. Dezember 2012.
- [Catsoulis, 2003] Catsoulis, J. ([2002], c2003). *Designing embedded hardware : "Building your own specialized computer-Cover*. O'Reilly.
- [Clausert, 1993a] Clausert, H. und Wiesemann, G. (1993a). *Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder: mit 5 Tabellen*. Grundgebiete der Elektrotechnik. Oldenbourg R. Verlag GmbH.

- [Clausert, 1993b] Clausert, H. und Wiesemann, G. (1993b). *Grundgebiete der Elektrotechnik 2.: Wechselströme, Drehstrom, Leitungen, Anwendungen der Fourier-, der Laplace- und der Z-Transformation*. Grundgebiete der Elektrotechnik / von Horst Clausert; Gunther Wiesemann. Oldenbourg R. Verlag GmbH.
- [crmagnetics, 2012] crmagnetics (2012). Precision Rectifier Circuit for CT Signal Conditioning.
<http://www.crmagnetics.com/Products/Assets/ProductPDFs/PrecisionRectifierCircuitforCTSignalConditioning.pdf>.
Abruf am 1. November 2012.
- [Deutsche Bundesregierung, 2012] Deutsche Bundesregierung (2012). Ausstieg aus der Kernkraft bis 2022. http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiekonzept/AusstiegKernkraft/kernenergie/_node.html.
Abruf am 8. April 2013.
- [eLinux.org, 2012] eLinux.org (2012). Raspberry Pi Buying Guide.
http://elinux.org/RPi_Buying_Guide.
Abruf am 27. Dezember 2012.
- [EMU Elektronik AG, 2012] EMU Elektronik AG (2012). EMU Check USB. http://www.emuag.ch/d_sites/products_d/steckd_sml6_d.html.
Abruf am 1. Dezember 2012.
- [Erik Bartmann, 2012] Erik Bartmann (2012). Raspberry Pi AddOn, Der A/D-Wandler MCP3008. http://www.erik-bartmann.de/download/PiMeUp_MCP3008.pdf.
Abruf am 20. Dezember 2012.
- [Ewering, 2009] Ewering, S. (2009). *Stromverbrauch senken / Geld sparen*. Books on Demand GmbH.
- [Falk Brunner et al., 2012] Falk Brunner et al. (2012). Vereinfachte Schaltung zur AC-Strommessung. <http://www.mikrocontroller.net/topic/264517#2751149>.
Abruf am 5. Januar 2013.
- [Federau, 2004] Federau, J. (2004). *Operationsverstärker : Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*. Vieweg.

- [Foundation, 2012] Foundation, R. P. (2012). Raspberry Pi R2.0 Schematics. http://www.raspberrypi.org/wp-content/uploads/2012/10/Raspberry-Pi-R2.0-Schematics-Issue2.2_027.pdf.
Abruf am 10. Dezember 2012.
- [Frenz et al., 2011] Frenz, W., Müggenborg, H., and Altenschmidt, S. (2011). *EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz : Kommentar*. Berliner Kommentare. Erich Schmidt.
- [Goldstein, 1952] Goldstein, J. (1952). *Die Meßwandler*. Verlag Birkhäuser Basel.
- [Gossen Metrawatt, 2013] Gossen Metrawatt (2013). Mavalog 10. <http://www.gossenmetrawatt.com/deutsch/produkte/mavolog10.htm>.
Abruf am 10. Januar 2013.
- [Groll, 2011] Groll, M. (2011). *Die 50 Größten Energiespar-Lügen: Die Gängigsten Irrtümer rund um Strom, Sprit und Heizen*. Krenn.
- [Heinemann, 1999] Heinemann, R. (1999). *PSPICE : Elektroniksimulation ; Lehrgang, Handbuch, Kochbuch ; Simulationssoftware mit europäischen Schaltzeichen und Transistoren*. Hanser.
- [Heuck et al., 2010] Heuck, K., Dettmann, K., and Schulz, D. (2010). *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. Vieweg+Teubner Verlag.
- [Kainka, 1998] Kainka, B. (1998). *Erfolgreich Messen, Steuern und Regeln mit Mikrocontrollern : serielle Interface-Schaltungen in der Praxis ; mit 12 Tabellen*. Franzis.
- [Kunde, 1991] Kunde, K. (1991). *Zur Modellierung, Auslegung und Auswahl von Stromwandlern sowie zur rechnergestützten Planung digitaler Distanzschutzeinrichtungen*. Leipzig, Techn. Hochsch., Diss., 1992.
- [Megni Energy Monitoring, 2013] Megni Energy Monitoring (2013). Openenergymonitor. <http://openenergymonitor.org/emon/>.
Abruf am 10. April 2013.
- [Nill-Theobald, 2011] Nill-Theobald, C. u. T. C. (2011). *Energierecht*. dtv, C.H. Beck.
- [Nordwestdeutsche Zählerrevision, 2012] Nordwestdeutsche Zählerrevision (2012). SEM 16+ USB.
<http://www.nzr.de/de/produkte/elektrizitaetszaehler-1,1/standby-energy-monitor,1/standby-energy-monitor->

sem\16-usb.html.

Abruf am 15. Dezember 2012.

- [Plate, 2007] Plate, J. (2007). *Linux Hardware Hackz: Messen, Steuern und Sensorik mit Linux*. Hanser Fachbuchverlag.
- [Ramge, 2013] Ramge, O. (2013). *Design eines Systems zur erfassung des stromverbrauchs in einfamilienhäusern*.
- [Schaloske, 2010] Schaloske, O. (2010). *Effiziente Architekturen und Technologien zur Realisierung von Smart Metering im Bereich der Fernübertragung*. GRIN Verlag GbR.
- [Schmidt, 2007] Schmidt, W. (2007). *Elektronik 8. Sensorschaltungstechnik*. Vogel Business Media.
- [Schröder, 2000] Schröder, B. (2000). *Wo steht was in DIN VDE 0100?* VDE-Schriftenreihe Normen verständlich. VDE-Verlag.
- [Schrüfer, 2007] Schrüfer, E. (2007). *Elektrische Meßtechnik*. Hanser.
- [Sichla, 2010] Sichla, F. (2010). *Schaltungssammlung Mikrocontroller und USB : mehr als 330 erprobte Schaltungen für Labor, Entwicklung und Anwendung ; [Grundschaltungen, Programmiers und Loaders, Schutz- und Überwachungsschaltungen, Interfaces und I/O-Schaltungen, Messtechnikanwendungen, Digital Signal Processing: Signalerzeugung, Digital Signal Processing: Signalverarbeitung, Steuern und Regeln, USB-Anwendungen]*. Franzis.
- [Statistisches Bundesamt, 2012] Statistisches Bundesamt (2012). Verbraucherpreisindex. <https://www.destatis.de/DE/Meta/AbisZ/VPI.html>. Abruf am 2. Dezember 2012.
- [Tietze et al., 2002] Tietze, U., Schenk, C., and Schenk, C. (2002). *Halbleiter-Schaltungstechnik: [neuer Teil: Nachrichtentechnische Schaltungen]*. Springer Verlag.
- [Walter, 2003] Walter, K.-D. (2003). *Messen, Steuern und Regeln per Internet : dezentrales MSR im globalen Internet und lokalem Intranet*. Franzis.

A Schaltpläne

A.1 Gesamtschaltplan Energiemonitor

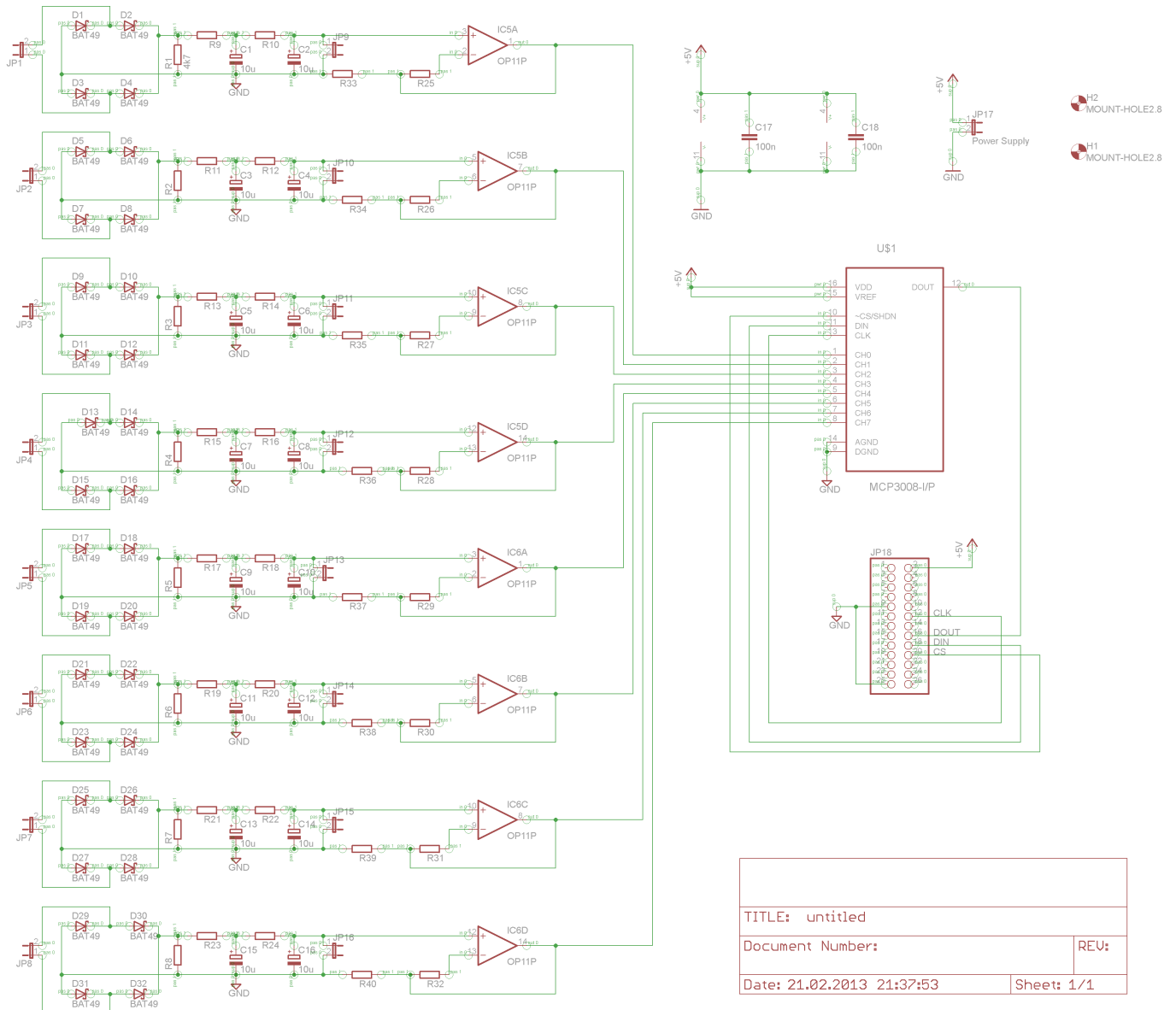
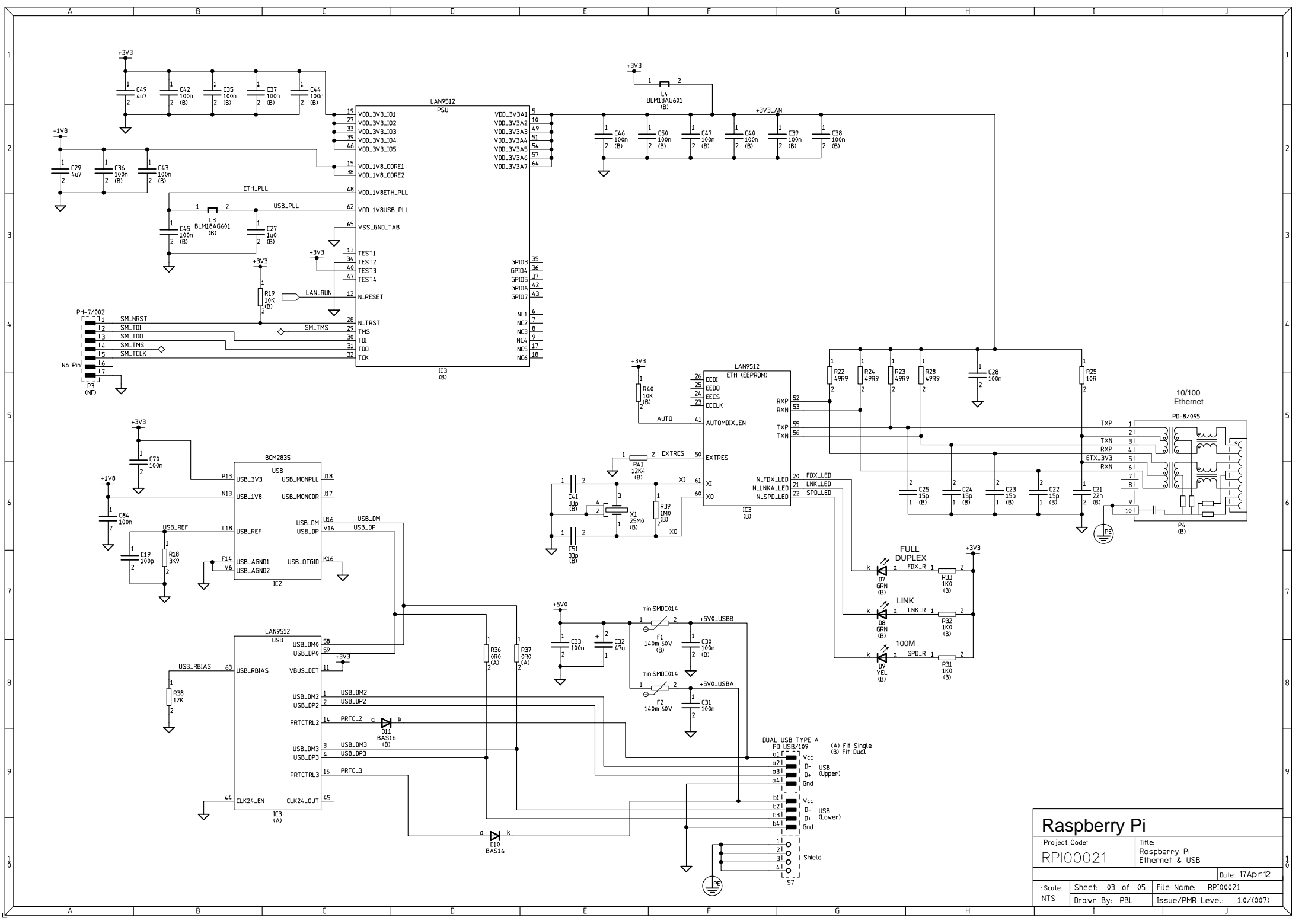


Abbildung 27: Schaltplan des Energiemonitors.

A.2 Schaltplan Raspberry Pi



Raspberry Pi

Project Code:
RPI00021

Title:
Raspberry Pi
Ethernet & USB

Date: 17Apr 12

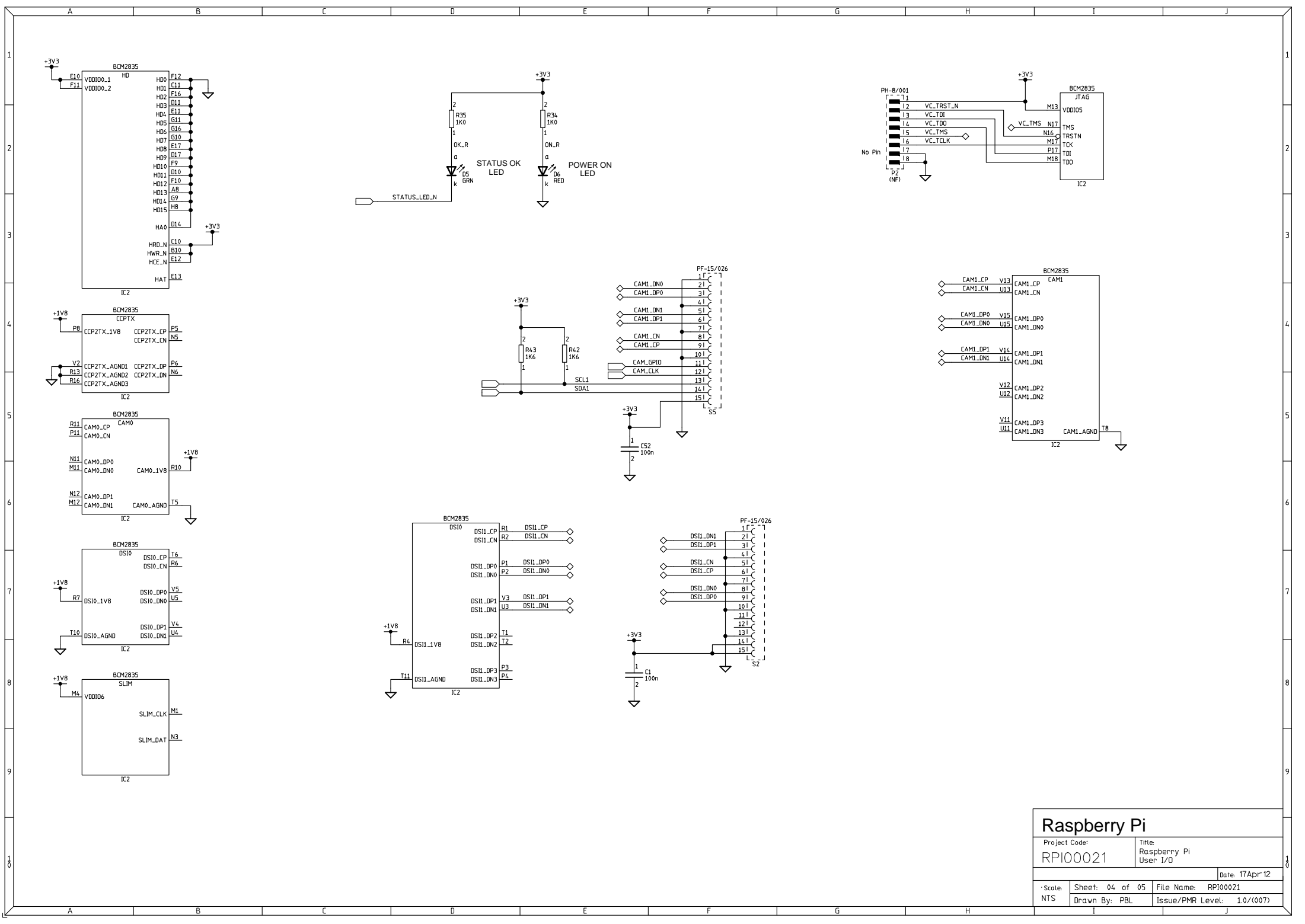
Scale:
NTS

Sheet: 03 of 05

File Name: RPI00021

Drawn By: PBL

Issue/PMR Level: 1.0/(007)



PCB Build Variations	
Each Build variant is assigned a letter A-Z. Components affected by a variant have that letter, in parentheses, associated with it on the schematic pages.	
Build Variant	Build Description
A	Components only fitted to Model A (Basic)
B	Components only fitted to Model B (Full System)
(NF)	Components not fitted to either model.

Notes: A PCB assembly option ('Build Option') is formed by summing the required variants of circuit sections. Eg. A+B+G.

PCB Assembly Options	
List of Assembly options (valid combinations of Build variants, for reference only.	
Build variants	Build Description
A	Components only fitted to Model A (Basic)
B	Components only fitted to Model B (Full System)

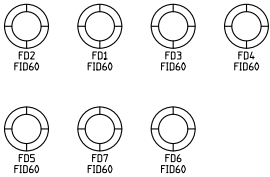
PCB Parts List Entry

- Project Code	- Issue
BD-RPI-00021/001	

PCB Layout Requirements	
Layout notes referring to specific components or groups of components are indicated on the schematics by the note number, enclosed in braces, adjacent to the component. Eg {4}.	
Note No.	Description

Design (c) 2011,2012 Raspberry Pi Foundation
All Rights Reserved

Portions of this work copyright 1979-2012 Norcott Technologies Limited
Provided to the Raspberry Pi Foundation under a perpetual,
royalty free, use and modify licence.



Raspberry Pi

Project Code: RPI00021		Title: Raspberry Pi Build Options/PCB layout instructions.
Client: @Client		Date: 17Apr 12
Scale: NTS	Sheet: 05 of 05 Drawn By: PBL	File Name: RPI00021 Issue/PMR Level: 1.0/(007)

B Platinenlayout

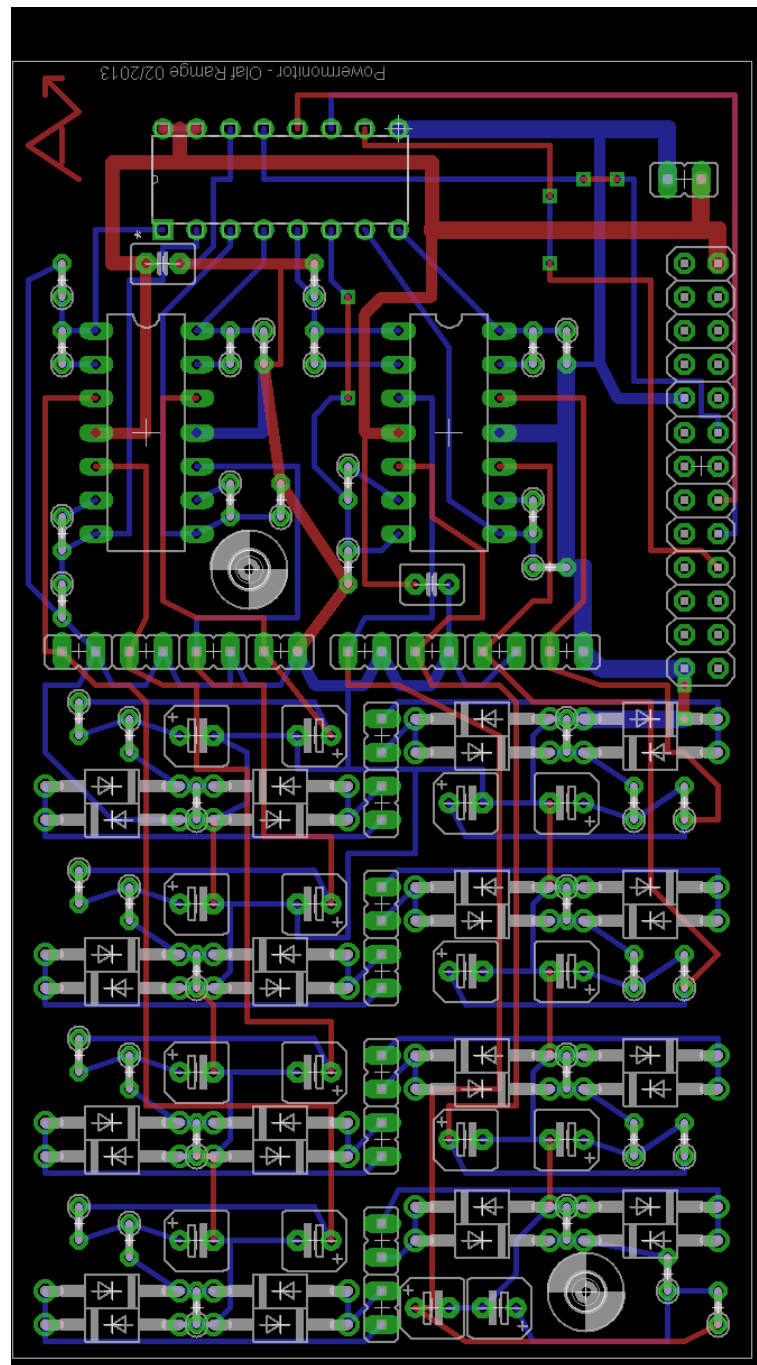


Abbildung 28: Platinenlayout des Energiemonitors.

C Datenblätter

Datenblatt CT30A-13mm/Datasheet CT30A-13mm

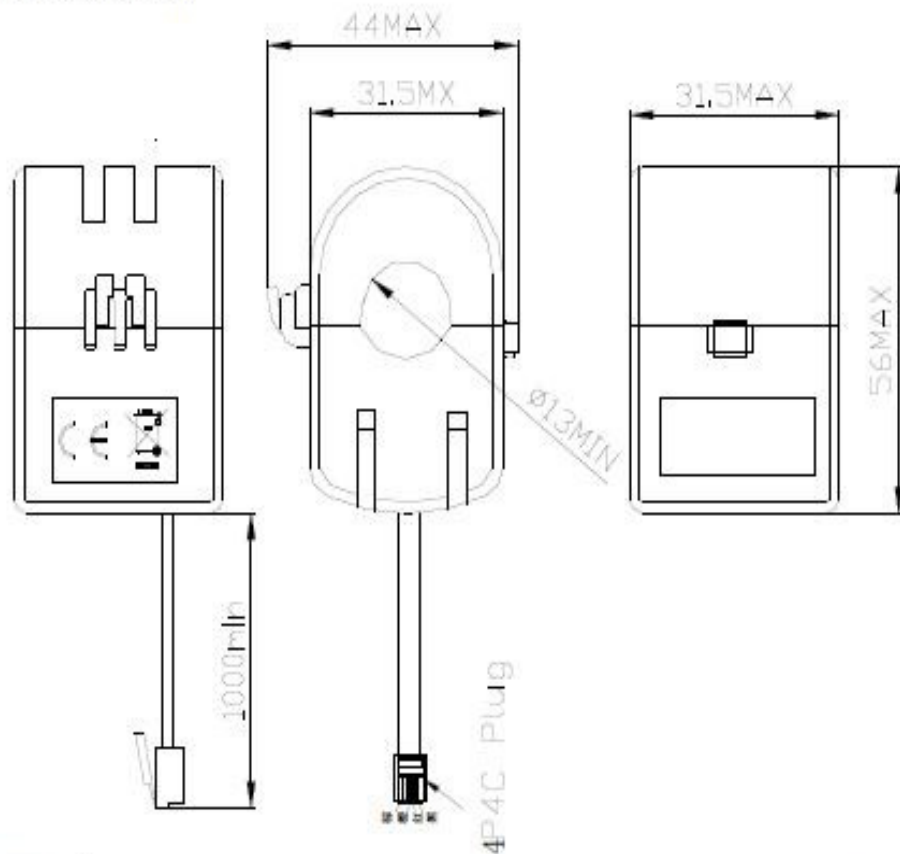
Features:

Small Volume;Low Price; High Linearity; The Split-core current transformer is designed;The installation can be finished at without interrupting the current-carrying wire.

Applications:

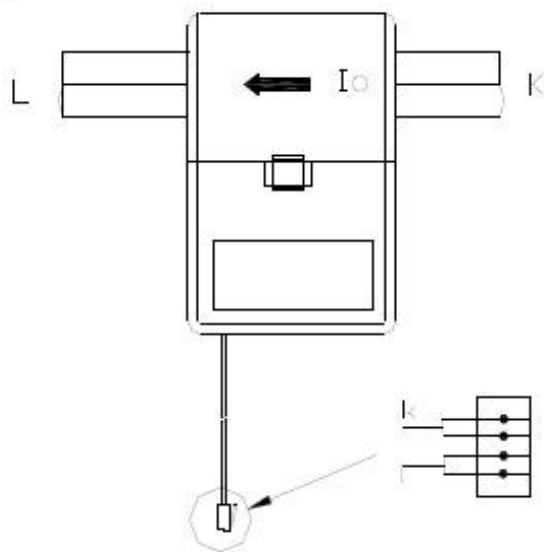
Portable instruments;Electricity Disponser;Power Calibrator;Power Ttansducer;Precision Power Meters;Digital Meters for power System;Serve Motor.

Mechanical Dimensions(unit:mm)



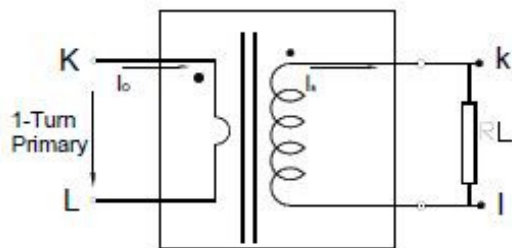
Test circuit:

Bold lines indicate linear region according to formula:



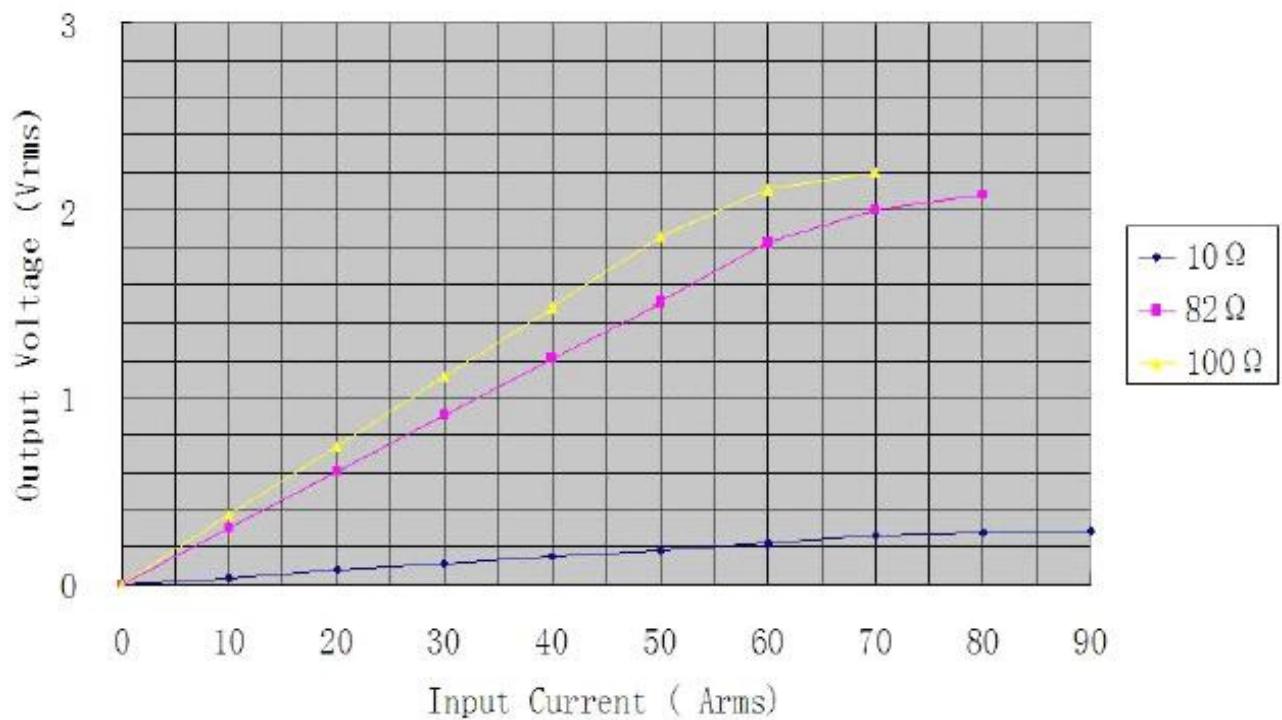
$$V_{out} = \frac{I_o \times R_L}{N}$$

V_{out} : Secondary Output Voltage
 I_o : Primary Current
 R_L : Secondary Load
 N : Secondary Turns



Remark: Unless requested, the 1-turn primary winding and the terminating resistor R_L are not supplied.

Output Volts vs Input Current For various ohmic loads



Electrical Characteristics		
No	Item	Specification
1	Primary Current (Arms 50/60Hz)	30A nom 75A max
2	Secondary Current at primary nominal (rms)	10mA
3	Primary/secondary currents ratio in the nominal range of primary current	3000Ts
4	D.C.Resistance .at25 °C (Ω)	460ΩMAX
5	Maximal burden, resistive load of secondary winding	50Ω
6	Amplitude Error f(%)	±2%
7	Insulation between primary non-insulated wire, touching inside surface of the window, and secondary output must withstand AC rms voltage	1500V/1mA/1min
8	Impulse withstand voltage 1.2/50us	3500V
9	Temperature error of currents ratio	<50ppm/K
10	Ambient operating temperature range	-20°C~60°C
Mechanical Specifications		
No	Item	Describe
1	Housing	ABS
2	Bobbin	PBT
3	core	Ferrite
4	Tap	Polyethylene Terephthalate (PET)
5	Magnet Wire	2UEW
6	Leader wire	4P4C PVC BLACK WIRE
7	Flame retardant	UL94-V0
8	Marking Logo	
9	Approximate Weight	65g
10	Tolerance	
11	All material to the requirement of ROHS	
<div>Drawn by:熊学强</div> <div>Checked by:吴世植</div> <div>Approved by:STEVEN WU</div>		

Quad Precision Op Amp (LT1014) Dual Precision Op Amp (LT1013)

FEATURES

- Single Supply Operation
 - Input Voltage Range Extends to Ground
 - Output Swings to Ground While Sinking Current
- Pin Compatible to 1458 and 324 with Precision Specs
- *Guaranteed* Offset Voltage: 150 μ V Max
- *Guaranteed* Low Drift: 2 μ V/ $^{\circ}$ C Max
- *Guaranteed* Offset Current: 0.8nA Max
- *Guaranteed* High Gain
 - 5mA Load Current: 1.5 Million Min
 - 17mA Load Current: 0.8 Million Min
- *Guaranteed* Low Supply Current: 500 μ A Max
- Low Voltage Noise, 0.1Hz to 10Hz: 0.55 μ V_{P-P}
- Low Current Noise—Better than OP-07, 0.07pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

APPLICATIONS

- Battery-Powered Precision Instrumentation
 - Strain Gauge Signal Conditioners
 - Thermocouple Amplifiers
 - Instrumentation Amplifiers
- 4mA to 20mA Current Loop Transmitters
- Multiple Limit Threshold Detection
- Active Filters
- Multiple Gain Blocks

LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

DESCRIPTION

The LT[®]1014 is the first precision quad operational amplifier which directly upgrades designs in the industry standard 14-pin DIP LM324/LM348/OP-11/4156 pin configuration. It is no longer necessary to compromise specifications, while saving board space and cost, as compared to single operational amplifiers.

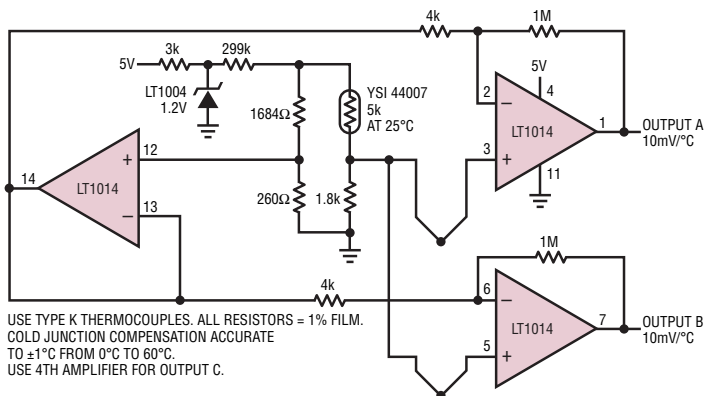
The LT1014's low offset voltage of 50 μ V, drift of 0.3 μ V/ $^{\circ}$ C, offset current of 0.15nA, gain of 8 million, common mode rejection of 117dB and power supply rejection of 120dB qualify it as four truly precision operational amplifiers. Particularly important is the low offset voltage, since no offset null terminals are provided in the quad configuration. Although supply current is only 350 μ A per amplifier, a new output stage design sources and sinks in excess of 20mA of load current, while retaining high voltage gain.

Similarly, the LT1013 is the first precision dual op amp in the 8-pin industry standard configuration, upgrading the performance of such popular devices as the MC1458/MC1558, LM158 and OP-221. The LT1013's specifications are similar to (even somewhat better than) the LT1014's.

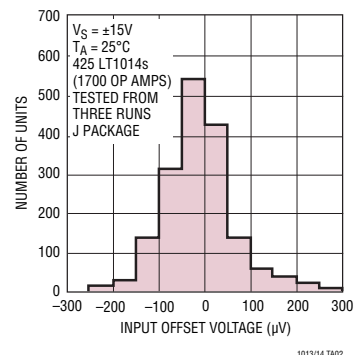
Both the LT1013 and LT1014 can be operated off a single 5V power supply: input common mode range includes ground; the output can also swing to within a few millivolts of ground. Crossover distortion, so apparent on previous single-supply designs, is eliminated. A full set of specifications is provided with ± 15 V and single 5V supplies.

TYPICAL APPLICATION

3-Channel Thermocouple Thermometer



LT1014 Distribution of Offset Voltage



10134fd

LT1013/LT1014

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$. $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_{CM} = 0\text{V}$ unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LT1013AM/AC LT1014AM/AC			LT1013C/D/I/M LT1014C/D/I/M			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{OS}	Input Offset Voltage	LT1013 LT1014 LT1013D/I, LT1014D/I		40 50	150 180		60 60 200	300 300 800	μV μV μV
	Long-Term Input Offset Voltage Stability			0.4			0.5		$\mu\text{V}/\text{Mo.}$
I_{SO}	Input Offset Current			0.15	0.8		0.2	1.5	nA
I_B	Input Bias Current			12	20		15	30	nA
e_n	Input Noise Voltage	0.1Hz to 10Hz		0.55			0.55		μV_{P-P}
e_n	Input Noise Voltage Density	$f_0 = 10\text{Hz}$ $f_0 = 1000\text{Hz}$		24 22			24 22		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
i_n	Input Noise Current Density	$f_0 = 10\text{Hz}$		0.07			0.07		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
	Input Resistance – Differential Common Mode	(Note 2)	100	400 5		70	300 4		$\text{M}\Omega$ $\text{G}\Omega$
A_{VOL}	Large-Signal Voltage Gain	$V_O = \pm 10\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$ $V_O = \pm 10\text{V}$, $R_L = 600\Omega$	1.5 0.8	8.0 2.5		1.2 0.5	7.0 2.0		$\text{V}/\mu\text{V}$ $\text{V}/\mu\text{V}$
	Input Voltage Range		13.5 –15.0	13.8 –15.3		13.5 –15.0	13.8 –15.3		V V
CMRR	Common Mode Rejection Ratio	$V_{CM} = 13.5\text{V}$, -15.0V	100	117		97	114		dB
PSRR	Power Supply Rejection Ratio	$V_S = \pm 2\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$	103	120		100	117		dB
	Channel Separation	$V_O = \pm 10\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$	123	140		120	137		dB
V_{OUT}	Output Voltage Swing	$R_L = 2\text{k}$	± 13	± 14		± 12.5	± 14		V
	Slew Rate		0.2	0.4		0.2	0.4		$\text{V}/\mu\text{s}$
I_S	Supply Current	Per Amplifier		0.35	0.50		0.35	0.55	mA

$T_A = 25^\circ\text{C}$. $V_S^+ = 5\text{V}$, $V_S^- = 0\text{V}$, $V_{OUT} = 1.4\text{V}$, $V_{CM} = 0\text{V}$ unless otherwise noted

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LT1013AM/AC LT1014AM/AC			LT1013C/D/I/M LT1014C/D/I/M			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{OS}	Input Offset Voltage	LT1013 LT1014 LT1013D/I, LT1014D/I		60 70	250 280		90 90 250	450 450 950	μV μV μV
I_{OS}	Input Offset Current			0.2	1.3		0.3	2.0	nA
I_B	Input Bias Current			15	35		18	50	nA
A_{VOL}	Large-Signal Voltage Gain	$V_O = 5\text{mV}$ to 4V , $R_L = 500\Omega$		1.0			1.0		$\text{V}/\mu\text{V}$
	Input Voltage Range		3.5	3.8 –0.3		3.5 0	3.8 –0.3		V V
V_{OUT}	Output Voltage Swing	Output Low, No Load		15	25		15	25	mV
		Output Low, 600Ω to Ground		5	10		5	10	mV
		Output Low, $I_{SINK} = 1\text{mA}$		220	350		220	350	mV
		Output High, No Load	4.0	4.4		4.0	4.4		V
		Output High, 600Ω to Ground	3.4	4.0		3.4	4.0		V
I_S	Supply Current	Per Amplifier		0.31	0.45		0.32	0.50	mA

10134fd

LT1013/LT1014

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the temperature range $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 85^{\circ}\text{C}$ for LT1013I, LT1014I, $0^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 70^{\circ}\text{C}$ for LT1013C, LT1013D, LT1014C, LT1014D. $V_S = \pm 15\text{V}$, $V_{CM} = 0\text{V}$ unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS		LT1013AC			LT1014AC			LT1013C/D/I LT1014C/D/I			UNITS
				MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{OS}	Input Offset Voltage	LT1013D/I, LT1014D/I $V_S = 5\text{V}$, 0V ; $V_O = 1.4\text{V}$ LT1013D/I, LT1014D/I $V_S = 5\text{V}$, 0V ; $V_O = 1.4\text{V}$	●	55	240		65	270		80	400		μV
			●							230	1000		μV
			●	75	350		85	380		110	570		μV
			●							280	1200		μV
	Average Input Offset Voltage Drift	(Note 3) LT1013D/I, LT1014D/I	●	0.3	2.0		0.3	2.0		0.4	2.5		$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
			●							0.7	5.0		$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
I_{OS}	Input Offset Current	$V_S = 5\text{V}$, 0V ; $V_O = 1.4\text{V}$	●	0.2	1.5		0.2	1.7		0.3	2.8		nA
			●	0.4	3.5		0.4	4.0		0.5	6.0		nA
I_B	Input Bias Current	$V_S = 5\text{V}$, 0V ; $V_O = 1.4\text{V}$	●	13	25		13	25		16	38		nA
			●	18	55		20	60		24	90		nA
A_{VOL}	Large-Signal Voltage Gain	$V_O = \pm 10\text{V}$, $R_L = 2\text{k}$	●	1.0	5.0		1.0	5.0		0.7	4.0		V/ μV
CMRR	Common Mode Rejection Ratio	$V_{CM} = 13.0\text{V}$, -15.0V	●	98	116		98	116		94	113		dB
PSRR	Power Supply Rejection Ratio	$V_S = \pm 2\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$	●	101	119		101	119		97	116		dB
V_{OUT}	Output Voltage Swing	$R_L = 2\text{k}$ $V_S = 5\text{V}$, 0V ; $R_L = 600\Omega$ Output Low Output High	●	± 12.5	± 13.9		± 12.5	± 13.9		± 12.0	± 13.9		V
			●		6	13		6	13		6	13	mV
			●	3.3	3.9		3.3	3.9		3.2	3.9		V
			●										
I_S	Supply Current per Amplifier	$V_S = 5\text{V}$, 0V ; $V_O = 1.4\text{V}$	●	0.36	0.55		0.36	0.55		0.37	0.60		mA
			●	0.32	0.50		0.32	0.50		0.34	0.55		mA

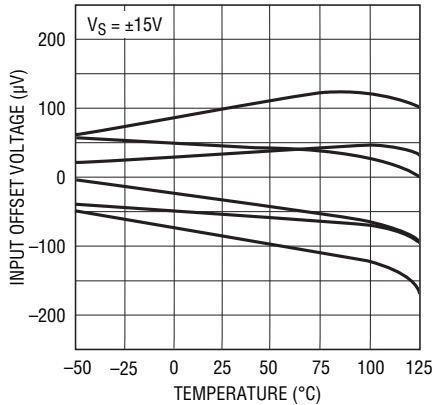
Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

Note 2: This parameter is guaranteed by design and is not tested. Typical parameters are defined as the 60% yield of parameter distributions of individual amplifiers; i.e., out of 100 LT1014s (or 100 LT1013s) typically 240 op amps (or 120) will be better than the indicated specification.

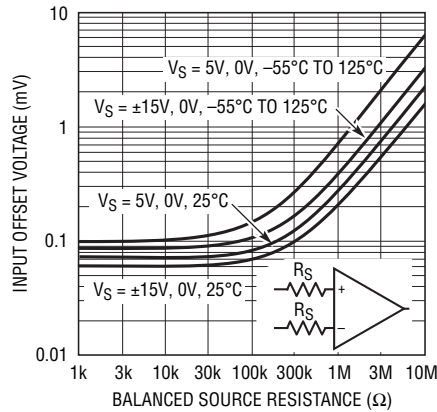
Note 3: This parameter is not 100% tested.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

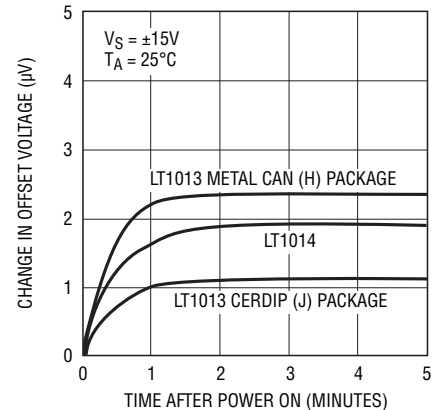
Offset Voltage Drift with Temperature of Representative Units



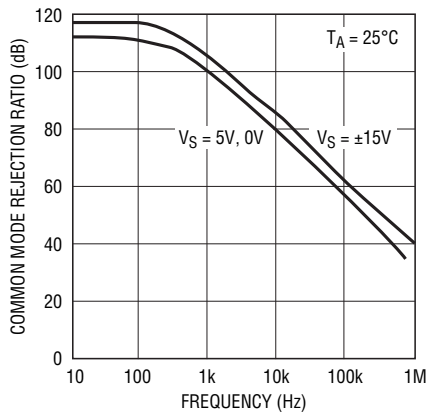
Offset Voltage vs Balanced Source Resistance



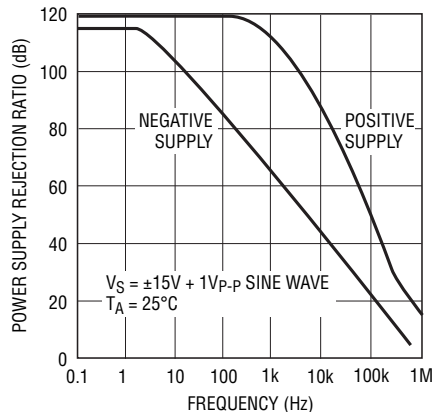
Warm-Up Drift



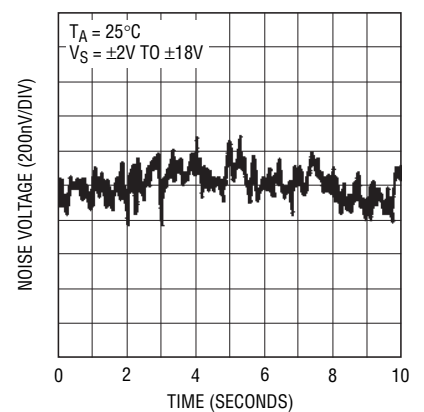
Common Mode Rejection Ratio vs Frequency



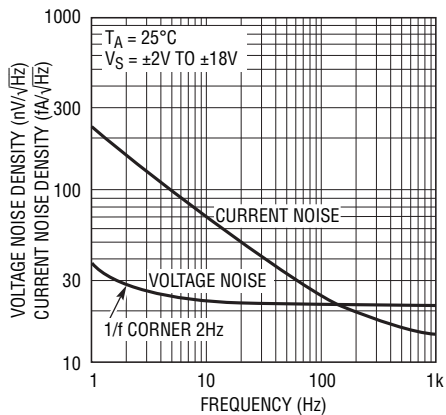
Power Supply Rejection Ratio vs Frequency



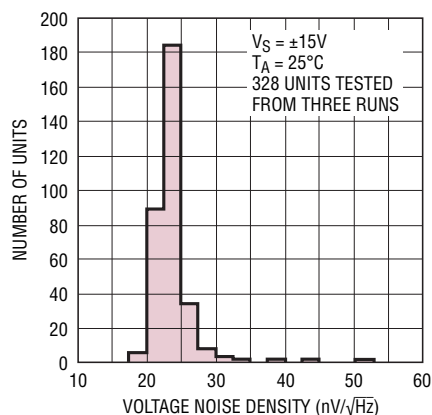
0.1Hz to 10Hz Noise



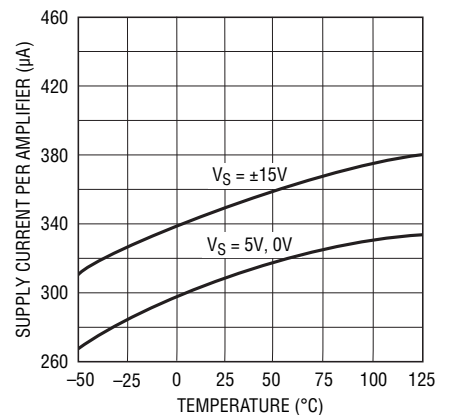
Noise Spectrum



10Hz Voltage Noise Distribution

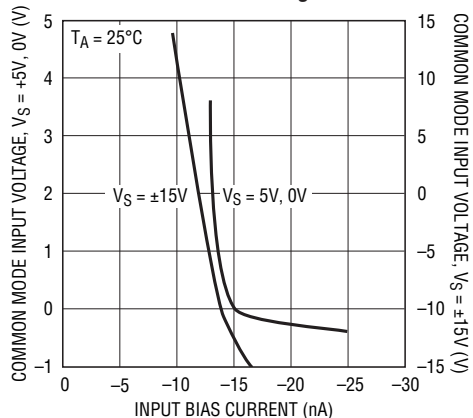


Supply Current vs Temperature



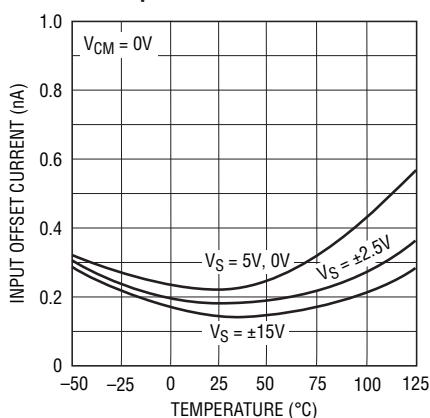
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Input Bias Current vs Common Mode Voltage



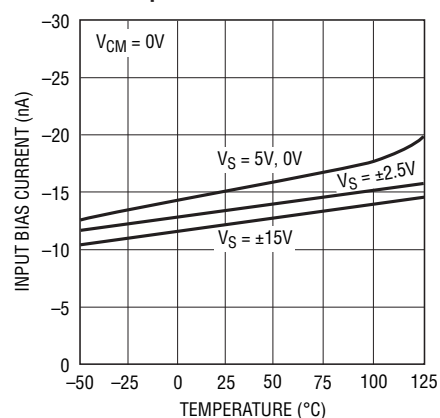
1013/14 TPC10

Input Offset Current vs Temperature



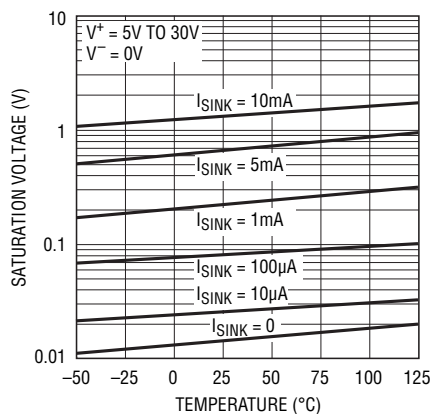
1013/14 TPC11

Input Bias Current vs Temperature



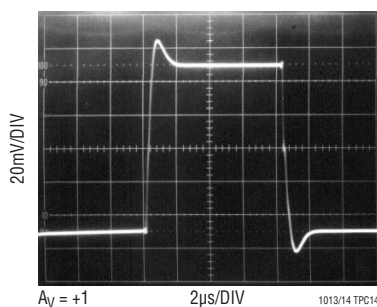
1013/14 TPC12

Output Saturation vs Sink Current vs Temperature



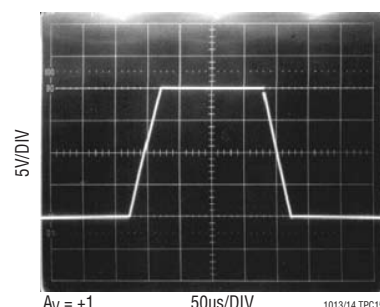
1013/14 TPC13

Small-Signal Transient Response, $V_S = \pm 15\text{V}$



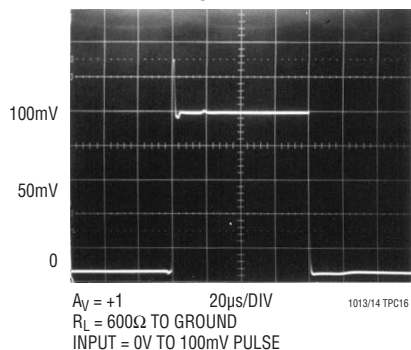
1013/14 TPC14

Large-Signal Transient Response, $V_S = \pm 15\text{V}$



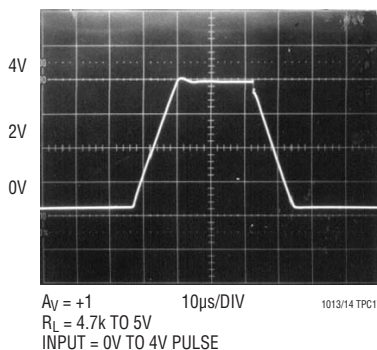
1013/14 TPC15

Small-Signal Transient Response, $V_S = 5\text{V}, 0\text{V}$



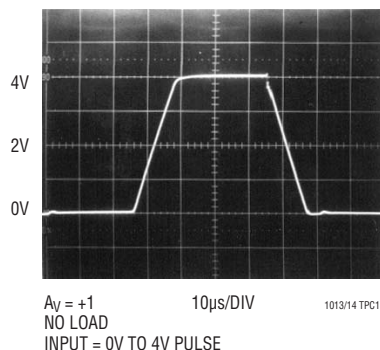
1013/14 TPC16

Large-Signal Transient Response, $V_S = 5\text{V}, 0\text{V}$



1013/14 TPC17

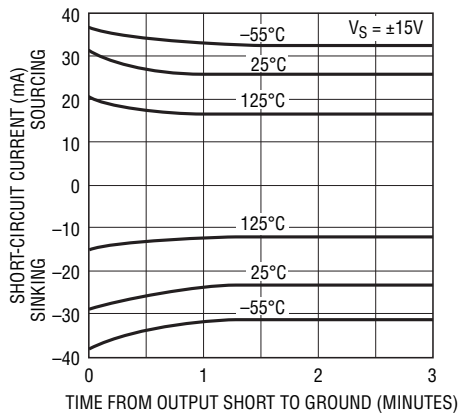
Large-Signal Transient Response, $V_S = 5\text{V}, 0\text{V}$



1013/14 TPC18

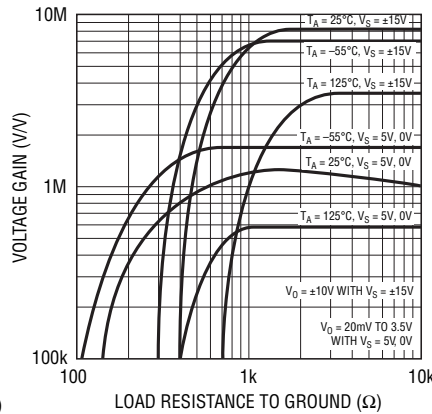
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Output Short-Circuit Current vs Time



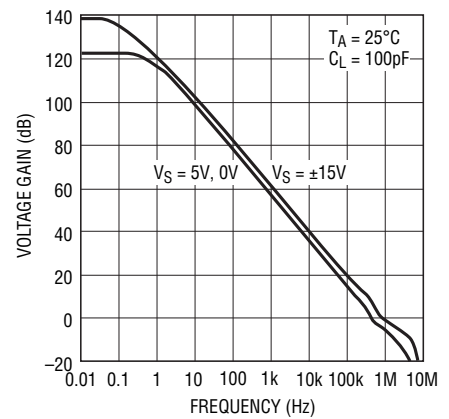
1013/14 TPC19

Voltage Gain vs Load Resistance



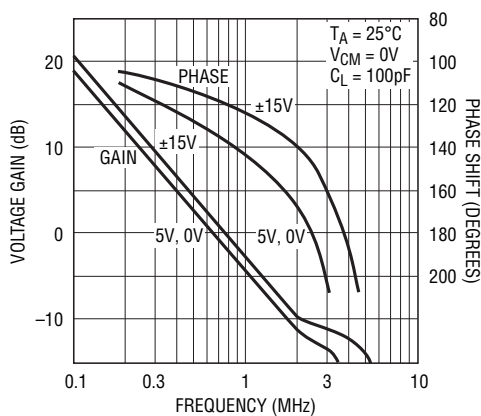
1013/14 TPC20

Voltage Gain vs Frequency



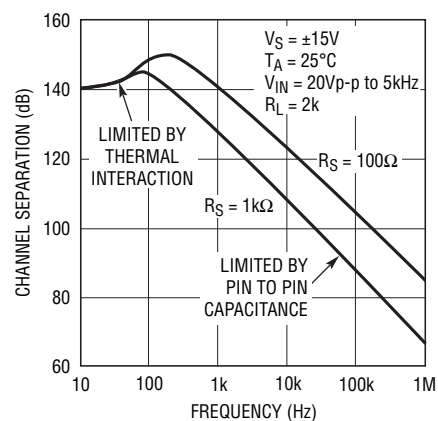
1013/14 TPC21

Gain, Phase vs Frequency



1013/14 TPC22

Channel Separation vs Frequency



1013/14 TPC23

APPLICATIONS INFORMATION

Single Supply Operation

The LT1013/LT1014 are fully specified for single supply operation, i.e., when the negative supply is 0V. Input common mode range includes ground; the output swings within a few millivolts of ground. Single supply operation, however, can create special difficulties, both at the input and at the output. The LT1013/LT1014 have specific circuitry which addresses these problems.

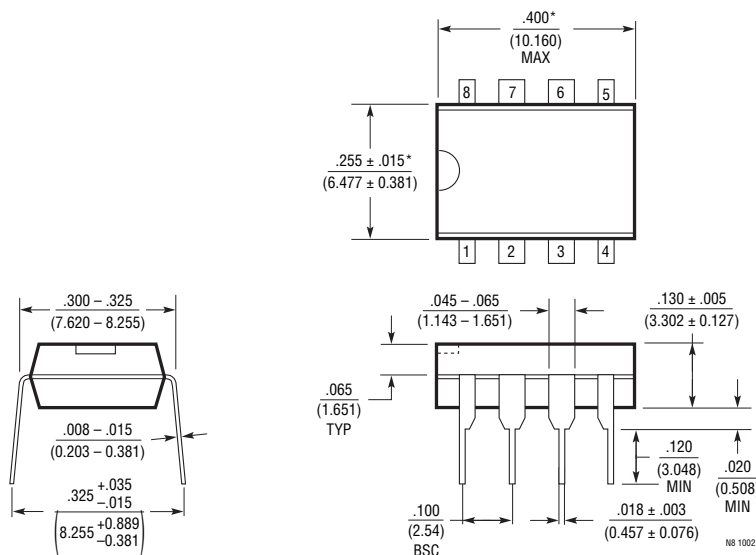
At the input, the driving signal can fall below 0V—inadvertently or on a transient basis. If the input is more than a few hundred millivolts below ground, two distinct

problems can occur on previous single supply designs, such as the LM124, LM158, OP-20, OP-21, OP-220, OP-221, OP-420:

a) When the input is more than a diode drop below ground, unlimited current will flow from the substrate (V^- terminal) to the input. This can destroy the unit. On the LT1013/LT1014, the 400Ω resistors, in series with the input (see Schematic Diagram), protect the devices even when the input is 5V below ground.

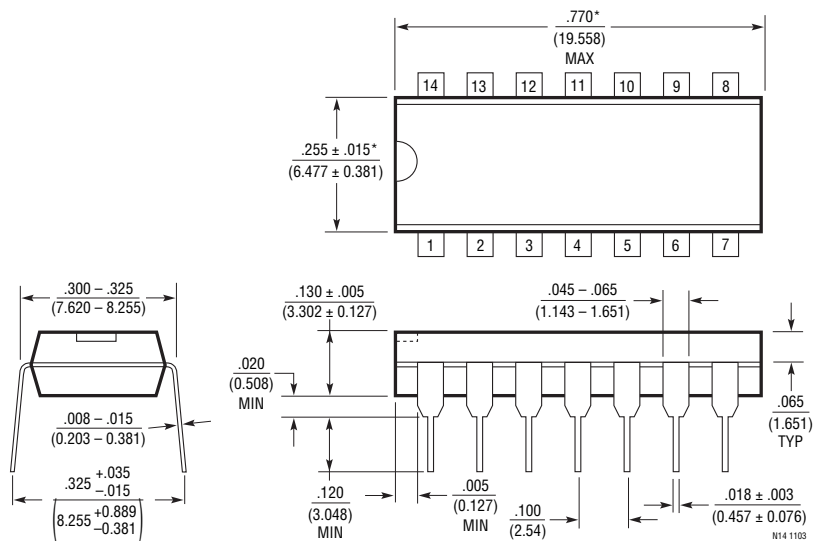
PACKAGE DESCRIPTION

N8 Package 8-Lead PDIP (Narrow .300 Inch) (Reference LTC DWG # 05-08-1510)



NOTE:
1. DIMENSIONS ARE $\frac{\text{INCHES}}{\text{MILLIMETERS}}$
*THESE DIMENSIONS DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS.
MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED .010 INCH (0.254mm)

N Package 14-Lead PDIP (Narrow .300 Inch) (Reference LTC DWG # 05-08-1510)



NOTE:
1. DIMENSIONS ARE $\frac{\text{INCHES}}{\text{MILLIMETERS}}$
*THESE DIMENSIONS DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS.
MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED .010 INCH (0.254mm)



MCP3004/3008

2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface

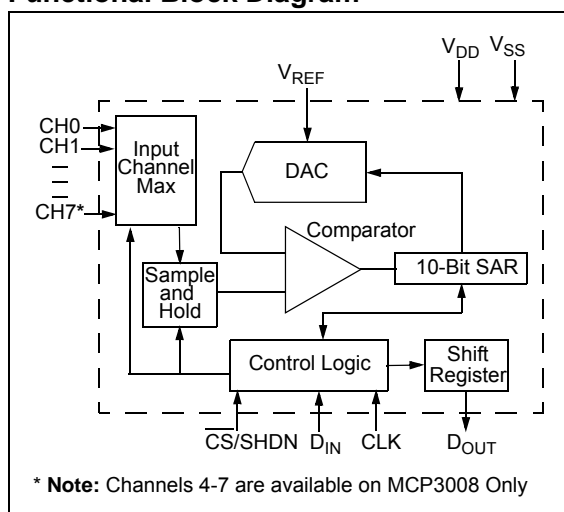
Features

- 10-bit resolution
- ± 1 LSB max DNL
- ± 1 LSB max INL
- 4 (MCP3004) or 8 (MCP3008) input channels
- Analog inputs programmable as single-ended or pseudo-differential pairs
- On-chip sample and hold
- SPI serial interface (modes 0,0 and 1,1)
- Single supply operation: 2.7V - 5.5V
- 200 kbps max. sampling rate at $V_{DD} = 5V$
- 75 kbps max. sampling rate at $V_{DD} = 2.7V$
- Low power CMOS technology
- 5 nA typical standby current, 2 μA max.
- 500 μA max. active current at 5V
- Industrial temp range: $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
- Available in PDIP, SOIC and TSSOP packages

Applications

- Sensor Interface
- Process Control
- Data Acquisition
- Battery Operated Systems

Functional Block Diagram



Description

The Microchip Technology Inc. MCP3004/3008 devices are successive approximation 10-bit Analog-to-Digital (A/D) converters with on-board sample and hold circuitry. The MCP3004 is programmable to provide two pseudo-differential input pairs or four single-ended inputs. The MCP3008 is programmable to provide four pseudo-differential input pairs or eight single-ended inputs. Differential Nonlinearity (DNL) and Integral Nonlinearity (INL) are specified at ± 1 LSB. Communication with the devices is accomplished using a simple serial interface compatible with the SPI protocol. The devices are capable of conversion rates of up to 200 kbps. The MCP3004/3008 devices operate over a broad voltage range (2.7V - 5.5V). Low-current design permits operation with typical standby currents of only 5 nA and typical active currents of 320 μA . The MCP3004 is offered in 14-pin PDIP, 150 mil SOIC and TSSOP packages, while the MCP3008 is offered in 16-pin PDIP and SOIC packages.

Package Types

PDIP, SOIC, TSSOP

CH0	1	14	V_{DD}
CH1	2	13	V_{REF}
CH2	3	12	AGND
CH3	4	11	CLK
NC	5	10	D_{OUT}
NC	6	9	D_{IN}
DGND	7	8	CS/SHDN

PDIP, SOIC

CH0	1	16	V_{DD}
CH1	2	15	V_{REF}
CH2	3	14	AGND
CH3	4	13	CLK
CH4	5	12	D_{OUT}
CH5	6	11	D_{IN}
CH6	7	10	CS/SHDN
CH7	8	9	DGND

1.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Absolute Maximum Ratings †

V_{DD}	7.0V
All Inputs and Outputs w.r.t. V_{SS}	- 0.6V to $V_{DD} + 0.6V$
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Ambient temperature with power applied.....	-65°C to +150°C
Soldering temperature of leads (10 seconds)	+300°C
ESD Protection On All Pins (HBM)	≥ 4 kV

† **Notice:** Stresses above those listed under “Absolute Maximum Ratings” may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operational listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Characteristics: Unless otherwise noted, all parameters apply at $V_{DD} = 5V$, $V_{REF} = 5V$, $T_A = -40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$, $f_{SAMPLE} = 200$ ksp/s and $f_{CLK} = 18 \cdot f_{SAMPLE}$. Unless otherwise noted, typical values apply for $V_{DD} = 5V$, $T_A = +25^{\circ}C$.

Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Conversion Rate						
Conversion Time	t_{CONV}	—	—	10	clock cycles	
Analog Input Sample Time	t_{SAMPLE}	1.5			clock cycles	
Throughput Rate	f_{SAMPLE}	—	—	200 75	ksp/s ksp/s	$V_{DD} = V_{REF} = 5V$ $V_{DD} = V_{REF} = 2.7V$
DC Accuracy						
Resolution		10			bits	
Integral Nonlinearity	INL	—	±0.5	±1	LSB	
Differential Nonlinearity	DNL	—	±0.25	±1	LSB	No missing codes over temperature
Offset Error		—	—	±1.5	LSB	
Gain Error		—	—	±1.0	LSB	
Dynamic Performance						
Total Harmonic Distortion		—	-76		dB	$V_{IN} = 0.1V$ to $4.9V@1$ kHz
Signal-to-Noise and Distortion (SINAD)		—	61		dB	$V_{IN} = 0.1V$ to $4.9V@1$ kHz
Spurious Free Dynamic Range		—	78		dB	$V_{IN} = 0.1V$ to $4.9V@1$ kHz
Reference Input						
Voltage Range		0.25	—	V_{DD}	V	Note 2
Current Drain		—	100 0.001	150 3	μA μA	$\overline{CS} = V_{DD} = 5V$
Analog Inputs						
Input Voltage Range for CH0 or CH1 in Single-Ended Mode		V_{SS}	—	V_{REF}	V	
Input Voltage Range for IN+ in pseudo-differential mode		IN-	—	$V_{REF} + IN-$		
Input Voltage Range for IN- in pseudo-differential mode		$V_{SS} - 100$	—	$V_{SS} + 100$	mV	

Note 1: This parameter is established by characterization and not 100% tested.

2: See graphs that relate linearity performance to V_{REF} levels.

3: Because the sample cap will eventually lose charge, effective clock rates below 10 kHz can affect linearity performance, especially at elevated temperatures. See **Section 6.2 “Maintaining Minimum Clock Speed”**, “Maintaining Minimum Clock Speed”, for more information.

MCP3004/3008

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (CONTINUED)

Electrical Characteristics: Unless otherwise noted, all parameters apply at $V_{DD} = 5V$, $V_{REF} = 5V$, $T_A = -40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$, $f_{SAMPLE} = 200$ ksp/s and $f_{CLK} = 18 \cdot f_{SAMPLE}$. Unless otherwise noted, typical values apply for $V_{DD} = 5V$, $T_A = +25^{\circ}C$.						
Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Leakage Current		—	0.001	± 1	μA	
Switch Resistance		—	1000	—	Ω	See Figure 4-1
Sample Capacitor		—	20	—	pF	See Figure 4-1
Digital Input/Output						
Data Coding Format		Straight Binary				
High Level Input Voltage	V_{IH}	$0.7 V_{DD}$	—	—	V	
Low Level Input Voltage	V_{IL}	—	—	$0.3 V_{DD}$	V	
High Level Output Voltage	V_{OH}	4.1	—	—	V	$I_{OH} = -1$ mA, $V_{DD} = 4.5V$
Low Level Output Voltage	V_{OL}	—	—	0.4	V	$I_{OL} = 1$ mA, $V_{DD} = 4.5V$
Input Leakage Current	I_{LI}	-10	—	10	μA	$V_{IN} = V_{SS}$ or V_{DD}
Output Leakage Current	I_{LO}	-10	—	10	μA	$V_{OUT} = V_{SS}$ or V_{DD}
Pin Capacitance (All Inputs/Outputs)	C_{IN} , C_{OUT}	—	—	10	pF	$V_{DD} = 5.0V$ (Note 1) $T_A = 25^{\circ}C$, $f = 1$ MHz
Timing Parameters						
Clock Frequency	f_{CLK}	—	—	3.6 1.35	MHz MHz	$V_{DD} = 5V$ (Note 3) $V_{DD} = 2.7V$ (Note 3)
Clock High Time	t_{HI}	125	—	—	ns	
Clock Low Time	t_{LO}	125	—	—	ns	
CS Fall To First Rising CLK Edge	t_{SUCS}	100	—	—	ns	
CS Fall To Falling CLK Edge	t_{CSD}	—	—	0	ns	
Data Input Setup Time	t_{SU}	50	—	—	ns	
Data Input Hold Time	t_{HD}	50	—	—	ns	
CLK Fall To Output Data Valid	t_{DO}	—	—	125 200	ns ns	$V_{DD} = 5V$, See Figure 1-2 $V_{DD} = 2.7V$, See Figure 1-2
CLK Fall To Output Enable	t_{EN}	—	—	125 200	ns ns	$V_{DD} = 5V$, See Figure 1-2 $V_{DD} = 2.7V$, See Figure 1-2
CS Rise To Output Disable	t_{DIS}	—	—	100	ns	See Test Circuits, Figure 1-2
CS Disable Time	t_{CSH}	270	—	—	ns	
D_{OUT} Rise Time	t_R	—	—	100	ns	See Test Circuits, Figure 1-2 (Note 1)
D_{OUT} Fall Time	t_F	—	—	100	ns	See Test Circuits, Figure 1-2 (Note 1)

- Note 1:** This parameter is established by characterization and not 100% tested.
Note 2: See graphs that relate linearity performance to V_{REF} levels.
Note 3: Because the sample cap will eventually lose charge, effective clock rates below 10 kHz can affect linearity performance, especially at elevated temperatures. See **Section 6.2 “Maintaining Minimum Clock Speed”**, “Maintaining Minimum Clock Speed”, for more information.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (CONTINUED)

Electrical Characteristics: Unless otherwise noted, all parameters apply at $V_{DD} = 5V$, $V_{REF} = 5V$, $T_A = -40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$, $f_{SAMPLE} = 200$ ksp/s and $f_{CLK} = 18 \cdot f_{SAMPLE}$. Unless otherwise noted, typical values apply for $V_{DD} = 5V$, $T_A = +25^{\circ}C$.

Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Power Requirements						
Operating Voltage	V_{DD}	2.7	—	5.5	V	
Operating Current	I_{DD}	—	425 225	550	μA	$V_{DD} = V_{REF} = 5V$, D_{OUT} unloaded $V_{DD} = V_{REF} = 2.7V$, D_{OUT} unloaded
Standby Current	I_{DDS}	—	0.005	2	μA	$\overline{CS} = V_{DD} = 5.0V$

Note 1: This parameter is established by characterization and not 100% tested.

2: See graphs that relate linearity performance to V_{REF} levels.

3: Because the sample cap will eventually lose charge, effective clock rates below 10 kHz can affect linearity performance, especially at elevated temperatures. See **Section 6.2 “Maintaining Minimum Clock Speed”**, “Maintaining Minimum Clock Speed”, for more information.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Electrical Specifications: Unless otherwise indicated, $V_{DD} = +2.7V$ to $+5.5V$, $V_{SS} = GND$.

Parameters	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Temperature Ranges						
Specified Temperature Range	T_A	-40	—	+85	$^{\circ}C$	
Operating Temperature Range	T_A	-40	—	+85	$^{\circ}C$	
Storage Temperature Range	T_A	-65	—	+150	$^{\circ}C$	
Thermal Package Resistances						
Thermal Resistance, 14L-PDIP	θ_{JA}	—	70	—	$^{\circ}C/W$	
Thermal Resistance, 14L-SOIC	θ_{JA}	—	108	—	$^{\circ}C/W$	
Thermal Resistance, 14L-TSSOP	θ_{JA}	—	100	—	$^{\circ}C/W$	
Thermal Resistance, 16L-PDIP	θ_{JA}	—	70	—	$^{\circ}C/W$	
Thermal Resistance, 16L-SOIC	θ_{JA}	—	90	—	$^{\circ}C/W$	

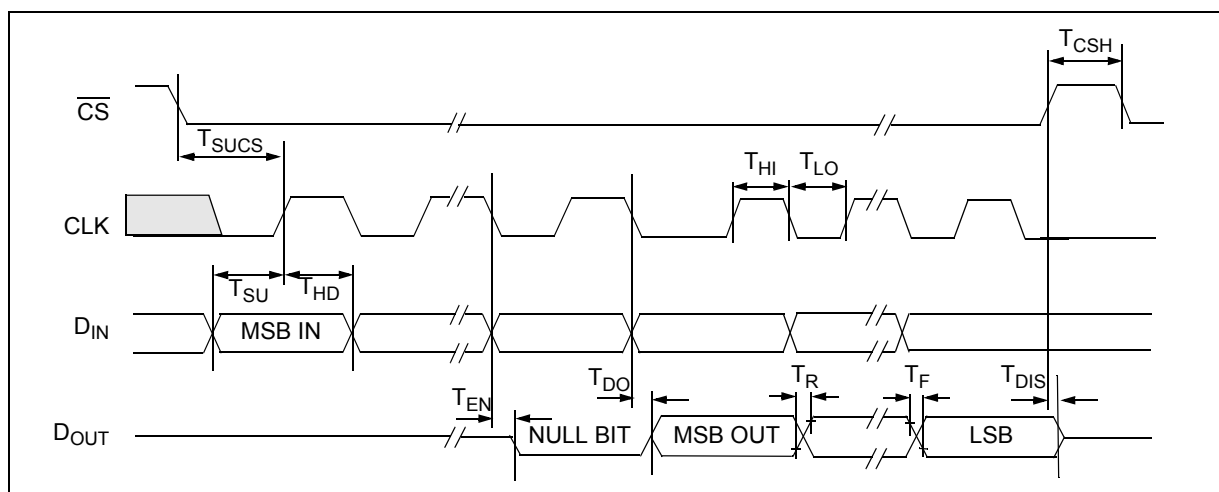


FIGURE 1-1: Serial Interface Timing.

3.0 PIN DESCRIPTIONS

The descriptions of the pins are listed in [Table 3-1](#). Additional descriptions of the device pins follows.

TABLE 3-1: PIN FUNCTION TABLE

MCP3004	MCP3008	Symbol	Description
PDIP, SOIC, TSSOP	PDIP, SOIC		
1	1	CH0	Analog Input
2	2	CH1	Analog Input
3	3	CH2	Analog Input
4	4	CH3	Analog Input
–	5	CH4	Analog Input
–	6	CH5	Analog Input
–	7	CH6	Analog Input
–	8	CH7	Analog Input
7	9	DGND	Digital Ground
8	10	$\overline{\text{CS}}/\text{SHDN}$	Chip Select/Shutdown Input
9	11	D _{IN}	Serial Data In
10	12	D _{OUT}	Serial Data Out
11	13	CLK	Serial Clock
12	14	AGND	Analog Ground
13	15	V _{REF}	Reference Voltage Input
14	16	V _{DD}	+2.7V to 5.5V Power Supply
5,6	–	NC	No Connection

3.1 Digital Ground (DGND)

Digital ground connection to internal digital circuitry.

3.2 Analog Ground (AGND)

Analog ground connection to internal analog circuitry.

3.3 Analog inputs (CH0 - CH7)

Analog inputs for channels 0 - 7, respectively, for the multiplexed inputs. Each pair of channels can be programmed to be used as two independent channels in single-ended mode or as a single pseudo-differential input where one channel is IN+ and one channel is IN-. See **Section 4.1 “Analog Inputs”**, “Analog Inputs”, and **Section 5.0 “Serial Communication”**, “Serial Communication”, for information on programming the channel configuration.

3.4 Serial Clock (CLK)

The SPI clock pin is used to initiate a conversion and clock out each bit of the conversion as it takes place. See **Section 6.2 “Maintaining Minimum Clock Speed”**, “Maintaining Minimum Clock Speed”, for constraints on clock speed.

3.5 Serial Data Input (D_{IN})

The SPI port serial data input pin is used to load channel configuration data into the device.

3.6 Serial Data Output (D_{OUT})

The SPI serial data output pin is used to shift out the results of the A/D conversion. Data will always change on the falling edge of each clock as the conversion takes place.

3.7 Chip Select/Shutdown ($\overline{\text{CS}}/\text{SHDN}$)

The $\overline{\text{CS}}/\text{SHDN}$ pin is used to initiate communication with the device when pulled low. When pulled high, it will end a conversion and put the device in low-power standby. The $\overline{\text{CS}}/\text{SHDN}$ pin must be pulled high between conversions.

4.0 DEVICE OPERATION

The MCP3004/3008 A/D converters employ a conventional SAR architecture. With this architecture, a sample is acquired on an internal sample/hold capacitor for 1.5 clock cycles starting on the first rising edge of the serial clock once \overline{CS} has been pulled low. Following this sample time, the device uses the collected charge on the internal sample and hold capacitor to produce a serial 10-bit digital output code. Conversion rates of 100 ksp/s are possible on the MCP3004/3008. See **Section 6.2 “Maintaining Minimum Clock Speed”**, “Maintaining Minimum Clock Speed”, for information on minimum clock rates. Communication with the device is accomplished using a 4-wire SPI-compatible interface.

4.1 Analog Inputs

The MCP3004/3008 devices offer the choice of using the analog input channels configured as single-ended inputs or pseudo-differential pairs. The MCP3004 can be configured to provide two pseudo-differential input pairs or four single-ended inputs. The MCP3008 can be configured to provide four pseudo-differential input pairs or eight single-ended inputs. Configuration is done as part of the serial command before each conversion begins. When used in the pseudo-differential mode, each channel pair (i.e., CH0 and CH1, CH2 and CH3 etc.) are programmed as the IN+ and IN- inputs as part of the command string transmitted to the device. The IN+ input can range from IN- to ($V_{REF} + IN-$). The IN- input is limited to ± 100 mV from the V_{SS} rail. The IN- input can be used to cancel small signal common-mode noise, which is present on both the IN+ and IN- inputs.

When operating in the pseudo-differential mode, if the voltage level of IN+ is equal to or less than IN-, the resultant code will be 000h. If the voltage at IN+ is equal to or greater than $\{V_{REF} + (IN-) - 1 \text{ LSB}\}$, then the output code will be 3FFh. If the voltage level at IN- is more than 1 LSB below V_{SS} , the voltage level at the IN+ input will have to go below V_{SS} to see the 000h output code. Conversely, if IN- is more than 1 LSB above V_{SS} , the 3FFh code will not be seen unless the IN+ input level goes above V_{REF} level.

For the A/D converter to meet specification, the charge holding capacitor (C_{SAMPLE}) must be given enough time to acquire a 10-bit accurate voltage level during the 1.5 clock cycle sampling period. The analog input model is shown in [Figure 4-1](#).

This diagram illustrates that the source impedance (R_S) adds to the internal sampling switch (R_{SS}) impedance, directly affecting the time that is required to charge the capacitor (C_{SAMPLE}). Consequently, larger source impedances increase the offset, gain and integral linearity errors of the conversion (see [Figure 4-2](#)).

4.2 Reference Input

For each device in the family, the reference input (V_{REF}) determines the analog input voltage range. As the reference input is reduced, the LSB size is reduced accordingly.

EQUATION 4-1: LSB SIZE CALCULATION

$$LSB \text{ Size} = \frac{V_{REF}}{1024}$$

The theoretical digital output code produced by the A/D converter is a function of the analog input signal and the reference input, as shown below.

EQUATION 4-2: DIGITAL OUTPUT CODE CALCULATION

$$Digital \text{ Output Code} = \frac{1024 \times V_{IN}}{V_{REF}}$$

Where:

$$\begin{aligned} V_{IN} &= \text{analog input voltage} \\ V_{REF} &= \text{analog input voltage} \end{aligned}$$

When using an external voltage reference device, the system designer should always refer to the manufacturer's recommendations for circuit layout. Any instability in the operation of the reference device will have a direct effect on the operation of the A/D converter.

5.0 SERIAL COMMUNICATION

Communication with the MCP3004/3008 devices is accomplished using a standard SPI-compatible serial interface. Initiating communication with either device is done by bringing the \overline{CS} line low (see Figure 5-1). If the device was powered up with the \overline{CS} pin low, it must be brought high and back low to initiate communication. The first clock received with \overline{CS} low and D_{IN} high will constitute a start bit. The SGL/DIFF bit follows the start bit and will determine if the conversion will be done using single-ended or differential input mode. The next three bits (D0, D1 and D2) are used to select the input channel configuration. Table 5-1 and Table 5-2 show the configuration bits for the MCP3004 and MCP3008, respectively. The device will begin to sample the analog input on the fourth rising edge of the clock after the start bit has been received. The sample period will end on the falling edge of the fifth clock following the start bit.

Once the D0 bit is input, one more clock is required to complete the sample and hold period (D_{IN} is a "don't care" for this clock). On the falling edge of the next clock, the device will output a low null bit. The next 10 clocks will output the result of the conversion with MSB first, as shown in Figure 5-1. Data is always output from the device on the falling edge of the clock. If all 10 data bits have been transmitted and the device continues to receive clocks while the \overline{CS} is held low, the device will output the conversion result LSB first, as is shown in Figure 5-2. If more clocks are provided to the device while \overline{CS} is still low (after the LSB first data has been transmitted), the device will clock out zeros indefinitely.

If necessary, it is possible to bring \overline{CS} low and clock in leading zeros on the D_{IN} line before the start bit. This is often done when dealing with microcontroller-based SPI ports that must send 8 bits at a time. Refer to Section 6.1 "Using the MCP3004/3008 with Microcontroller (MCU) SPI Ports", "Using the MCP3004/3008 with Microcontroller (MCU) SPI Ports", for more details on using the MCP3004/3008 devices with hardware SPI ports.

TABLE 5-1: CONFIGURE BITS FOR THE MCP3004

Control Bit Selections				Input Configuration	Channel Selection
Single/Diff	D2*	D1	D0		
1	X	0	0	single-ended	CH0
1	X	0	1	single-ended	CH1
1	X	1	0	single-ended	CH2
1	X	1	1	single-ended	CH3
0	X	0	0	differential	CH0 = IN+ CH1 = IN-
0	X	0	1	differential	CH0 = IN- CH1 = IN+
0	X	1	0	differential	CH2 = IN+ CH3 = IN-
0	X	1	1	differential	CH2 = IN- CH3 = IN+

* D2 is "don't care" for MCP3004

TABLE 5-2: CONFIGURE BITS FOR THE MCP3008

Control Bit Selections				Input Configuration	Channel Selection
Single/Diff	D2	D1	D0		
1	0	0	0	single-ended	CH0
1	0	0	1	single-ended	CH1
1	0	1	0	single-ended	CH2
1	0	1	1	single-ended	CH3
1	1	0	0	single-ended	CH4
1	1	0	1	single-ended	CH5
1	1	1	0	single-ended	CH6
1	1	1	1	single-ended	CH7
0	0	0	0	differential	CH0 = IN+ CH1 = IN-
0	0	0	1	differential	CH0 = IN- CH1 = IN+
0	0	1	0	differential	CH2 = IN+ CH3 = IN-
0	0	1	1	differential	CH2 = IN- CH3 = IN+
0	1	0	0	differential	CH4 = IN+ CH5 = IN-
0	1	0	1	differential	CH4 = IN- CH5 = IN+
0	1	1	0	differential	CH6 = IN+ CH7 = IN-
0	1	1	1	differential	CH6 = IN- CH7 = IN+

MCP3004/3008

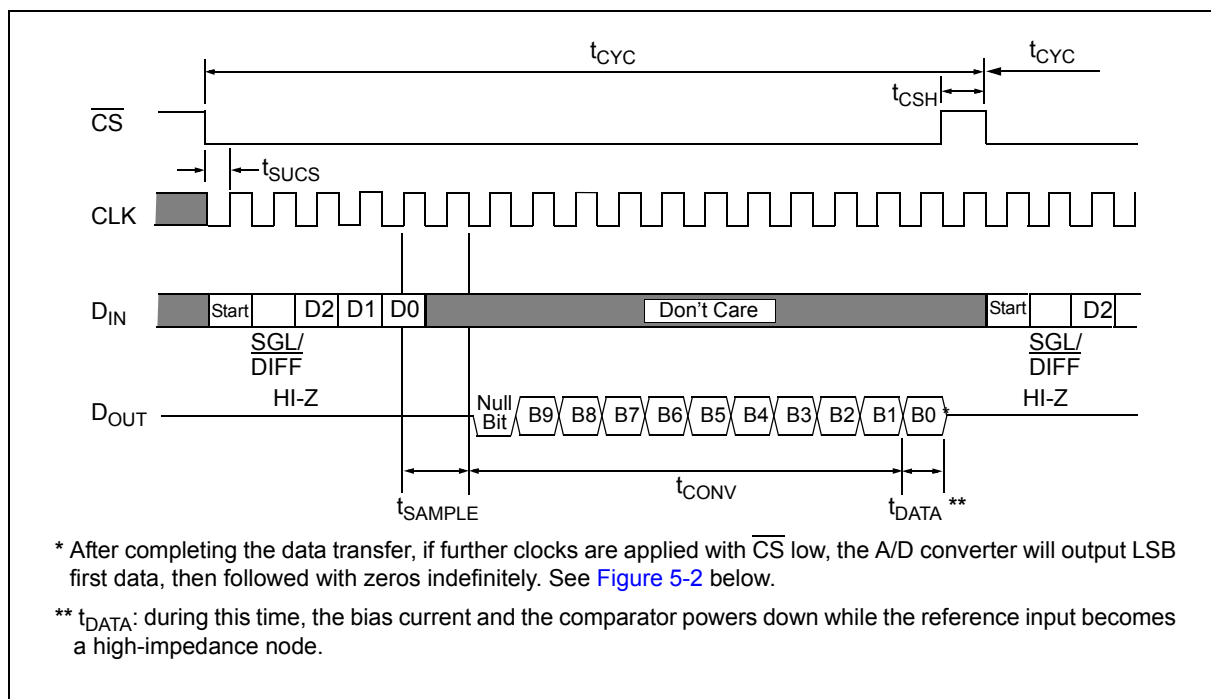


FIGURE 5-1: Communication with the MCP3004 or MCP3008.

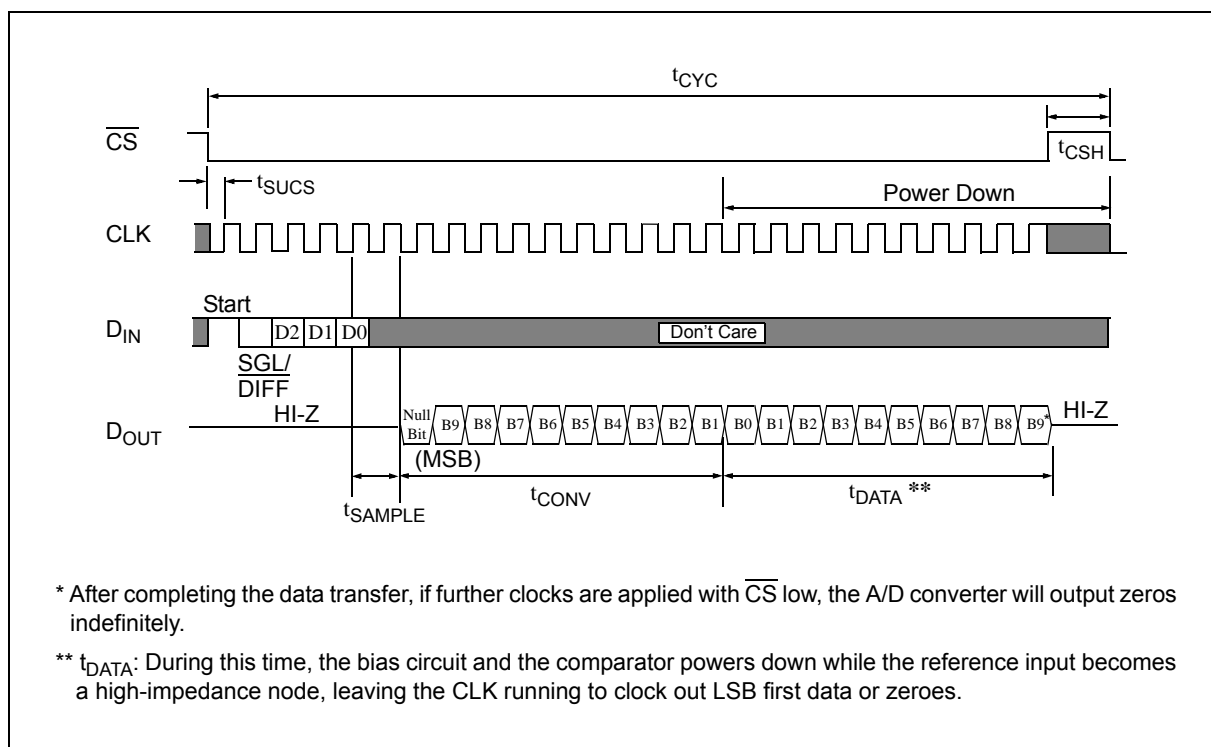


FIGURE 5-2: Communication with MCP3004 or MCP3008 in LSB First Format.

6.0 APPLICATIONS INFORMATION

6.1 Using the MCP3004/3008 with Microcontroller (MCU) SPI Ports

With most microcontroller SPI ports, it is required to send groups of eight bits. It is also required that the microcontroller SPI port be configured to clock out data on the falling edge of clock and latch data in on the rising edge. Because communication with the MCP3004/3008 devices may not need multiples of eight clocks, it will be necessary to provide more clocks than are required. This is usually done by sending 'leading zeros' before the start bit. As an example, [Figure 6-1](#) and [Figure 6-2](#) shows how the MCP3004/3008 can be interfaced to a MCU with a hardware SPI port. [Figure 6-1](#) depicts the operation shown in SPI Mode 0,0, which requires that the SCLK from the MCU idles in the 'low' state, while [Figure 6-2](#) shows the similar case of SPI Mode 1,1, where the clock idles in the 'high' state.

As is shown in [Figure 6-1](#), the first byte transmitted to the A/D converter contains seven leading zeros before the start bit. Arranging the leading zeros this way induces the 10 data bits to fall in positions easily manipulated by the MCU. The MSB is clocked out of the A/D converter on the falling edge of clock number 14. Once the second eight clocks have been sent to the device, the MCU receive buffer will contain five unknown bits (the output is at high-impedance for the first two clocks), the null bit and the highest order 2 bits of the conversion. Once the third byte has been sent to the device, the receive register will contain the lowest order eight bits of the conversion. Employing this method ensures simpler manipulation of the converted data.

[Figure 6-2](#) shows the same thing in SPI Mode 1,1, which requires that the clock idles in the high state. As with mode 0,0, the A/D converter outputs data on the falling edge of the clock and the MCU latches data from the A/D converter in on the rising edge of the clock.

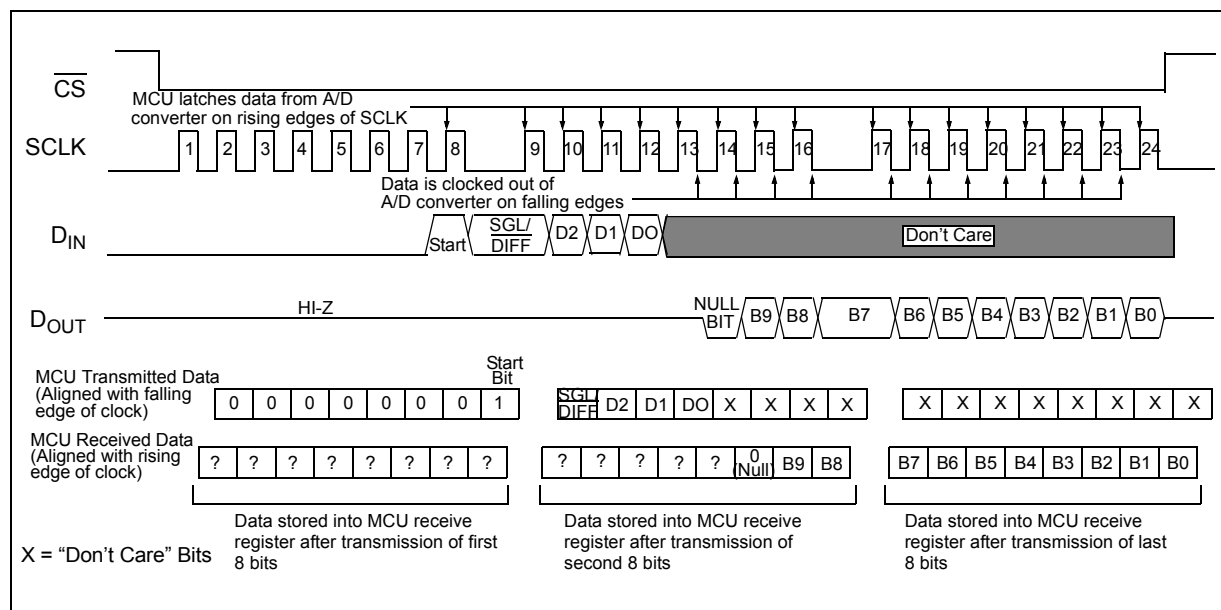


FIGURE 6-1: SPI Communication with the MCP3004/3008 using 8-bit segments (Mode 0,0: SCLK idles low).

MCP3004/3008

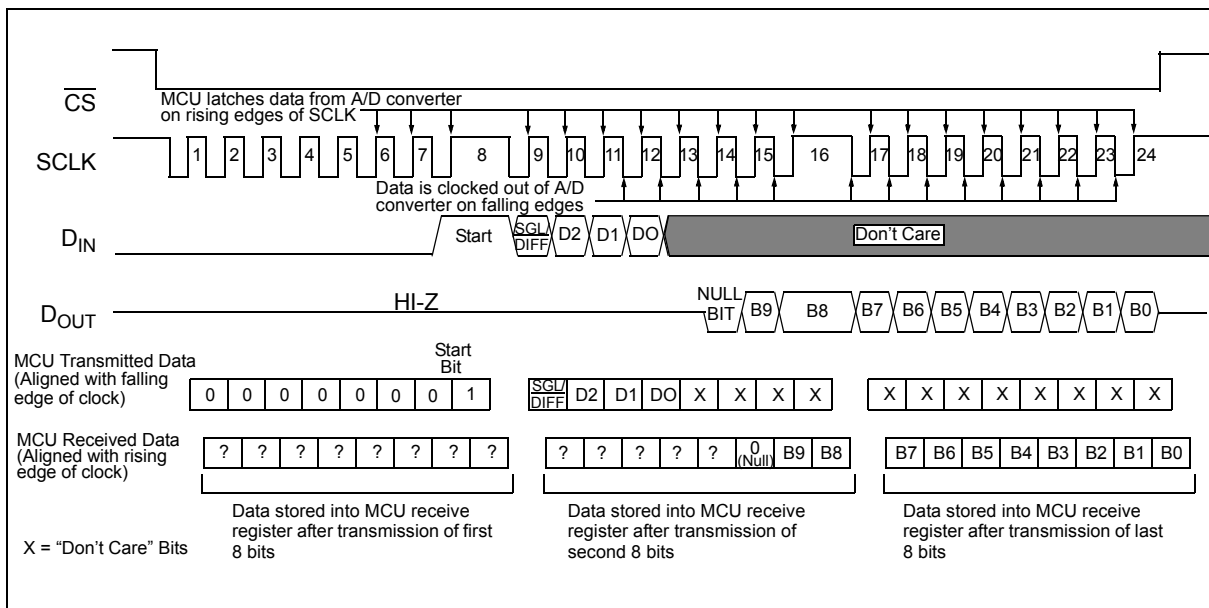


FIGURE 6-2: SPI Communication with the MCP3004/3008 using 8-bit segments (Mode 1, 1: SCLK idles high).

6.2 Maintaining Minimum Clock Speed

When the MCP3004/3008 initiates the sample period, charge is stored on the sample capacitor. When the sample period is complete, the device converts one bit for each clock that is received. It is important for the user to note that a slow clock rate will allow charge to bleed off the sample capacitor while the conversion is taking place. At 85°C (worst case condition), the part will maintain proper charge on the sample capacitor for at least 1.2 ms after the sample period has ended. This means that the time between the end of the sample period and the time that all 10 data bits have been clocked out must not exceed 1.2 ms (effective clock frequency of 10 kHz). Failure to meet this criterion may introduce linearity errors into the conversion outside the rated specifications. It should be noted that during the entire conversion cycle, the A/D converter does not require a constant clock speed or duty cycle, as long as all timing specifications are met.

6.3 Buffering/Filtering the Analog Inputs

If the signal source for the A/D converter is not a low-impedance source, it will have to be buffered or inaccurate conversion results may occur (see Figure 4-2). It is also recommended that a filter be used to eliminate any signals that may be aliased back in to the conversion results, as is illustrated in Figure 6-3, where an op amp is used to drive, filter and gain the analog input of the MCP3004/3008. This amplifier provides a low-impedance source for the converter input, plus a low-pass filter, which eliminates unwanted high-frequency noise.

Low-pass (anti-aliasing) filters can be designed using Microchip's free interactive FilterLab® software. FilterLab will calculate capacitor and resistors values, as well as determine the number of poles that are required for the application. For more information on filtering signals, see AN699, "Anti-Aliasing Analog Filters for Data Acquisition Systems".

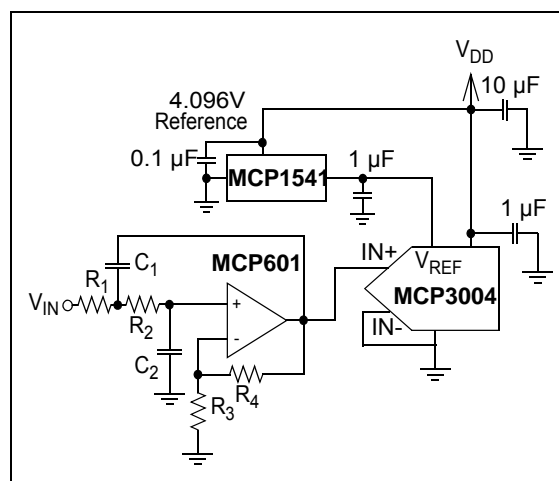


FIGURE 6-3: The MCP601 Operational Amplifier is used to implement a second order anti-aliasing filter for the signal being converted by the MCP3004.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die beiliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

(Datum, Ort)

(Unterschrift)