

## Low Cost - High Fun. Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi

Angela Fösel\*

\*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
[angela.foesel@fau.de](mailto:angela.foesel@fau.de)

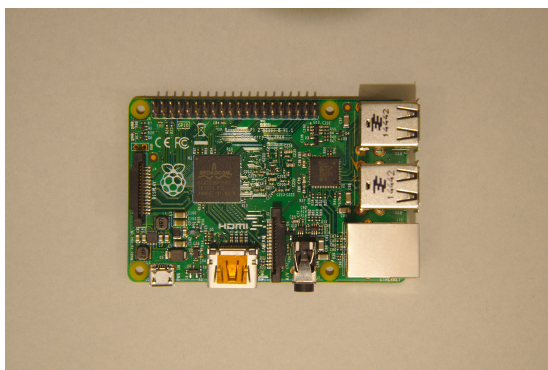
### Kurzfassung

Neben dem Arduino hat kein Mikrorechnersystem in der letzten Zeit mehr Furore gemacht als der Raspberry Pi: Vor etwa 10 Jahren gründete der britische Computerwissenschaftler Eben Upton die Raspberry Pi Foundation mit dem Ziel, die nächste Generation (wieder) für das Programmieren zu begeistern; die Absicht, einen Computer zu entwickeln, hatten Eben Upton und seine Kollegen ursprünglich gar nicht. Dennoch wurden im Jahr 2007 erste Pläne entworfen für einen kostengünstigen Mini-PC, und fünf Jahre später kam das erste Exemplar auf den Markt. Wurde der Raspberry Pi ursprünglich entwickelt, um Schülerinnen und Schülern eine intensive Auseinandersetzung mit der Programmierung attraktiv zu gestalten und hierfür insbesondere auch eine kostengünstige Lösung bzw. Übungsmöglichkeit anzubieten, so stellte sich schnell heraus, dass der kleine Einplatinencomputer nicht nur Programmierern wie auch Tüftlern und Bastlern schier ungeahnte Möglichkeiten bietet: Zusammen mit diversen Hardware-Zusätzen kann er vergleichsweise einfach und vor allem preiswert zur computerge-stützten Messwerterfassung verwendet werden. In dem hier vorliegenden Artikel werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie der Raspberry Pi eingesetzt werden kann für die Messung physikalischer Größen im Rahmen eines spannenden und kreativen Physikunterrichts. Dabei werden grundlegende didaktische Aspekte diskutiert wie das Lernen von, aber auch das Lernen über naturwissenschaftliche Arbeitsweisen; konkrete praktische Umsetzungen einer Messwerterfassung mit dem Einplatinenrechner werden im erläutern.

### 1. Einleitung

Neben dem Arduino hat kein Mikrorechnersystem in der letzten Zeit mehr Furore gemacht als der Raspberry Pi: Vor etwa 10 Jahren gründete der britische Computerwissenschaftler Eben Upton die Raspberry Pi Foundation mit dem Ziel, die nächste Generation (wieder) für das Programmieren zu begeistern; die Absicht, einen Computer zu entwickeln, hatten Eben Upton und seine Kollegen ursprünglich gar nicht. Dennoch wurden im Jahr 2007 erste Pläne entworfen für einen kostengünstigen Mini-PC, und fünf Jahre später kam das erste Exemplar auf den Markt. Beim Raspberry Pi der Version „Modell B“ (Broadcom-Chipset BCM 2835) wurde als CPU ein ARM1176JZF-S 700 MHz Prozessor mit (nur) einem Kern eingesetzt, als Grafikkarte war eine Broadcom Dual Core VideoCore IV GPU mit OpenGL-ES 1.1/2.0 und Full HD 1080p30 Auflösung verbaut. Der Raspberry Pi Modell B hatte einen 512 MB großen Arbeitsspeicher, verfügte über zwei USB 2.0-Anschlüsse und einen 10/100-Mbit-Ethernet-Netzwerkanschluss. Wie ein Mini-PC sah der erste Raspberry Pi nicht aus, und daran hat sich bei diesen Mikrorechnern auch bis heute nichts geändert. Im Wesentlichen handelt es sich beim Raspberry Pi um eine etwa scheckkartengroße Platine ohne Gehäuse und mit vielen

Anschlüssen, jedoch ohne Bildschirm und Tastatur. Im Februar 2015 wurde der Raspberry Pi 2 Modell B vorgestellt. Dieses Modell besitzt einen 1 GB großen Arbeitsspeicher und einen Vierkernprozessor vom Typ Broadcom BCM2836 auf ARM-Cortex-A7-Basis mit einer Taktfrequenz von bis zu 900 MHz. Die zwei USB 2.0-Anschlüsse wurden um zwei weitere ergänzt. Etwa ein Jahr später kam schließlich der Raspberry Pi 3 Modell B auf den Markt. Er erweitert das Vorgängermodell unter anderem um integriertes WLAN und Bluetooth Low Energy und hat eine schnellere CPU mit 64-bit-ARMv8-Architektur. Die Kosten für einen Raspberry Pi belaufen sich - ohne Netzteil und weiteres Zubehör - aktuell auf etwa 40 Euro (Raspberry Pi 2 Modell B) bzw. 50 Euro (Raspberry Pi 3 Modell B); erhältlich sind die Einplatinencomputer beispielsweise in Onlineshops für Technik und Elektronik wie Conrad Electronic (vgl. [1]) oder reichelt elektronik (vgl. [2]). Abb. 1 zeigt einen Raspberry Pi 2 Modell B ohne Netzteil und weiteres Zubehör, Abb. 2 dasselbe Exemplar mit WLAN-Adapter und Netzteil sowie eingesetzt in ein Gehäuse.



**Abb. 1:** Raspberry Pi 2 Modell B ohne Netzteil und weiteres Zubehör.



**Abb. 2:** Raspberry Pi 2 Modell B mit WLAN-Adapter (rechts im Bild) und Netzteil sowie eingesetzt in ein Gehäuse.

Wurde der Raspberry Pi ursprünglich entwickelt, um Schülerinnen und Schülern eine intensive Auseinandersetzung mit der Programmierung attraktiv zu gestalten und hierfür insbesondere auch eine kostengünstige Lösung bzw. Übungsmöglichkeit anzubieten, so stellte sich schnell heraus, dass der kleine Einplatinencomputer nicht nur Programmierern (vgl. hierzu beispielsweise das sechsmal im Jahr erscheinende Magazin „Raspberry Pi Geek“ [3]) wie auch Tüftlern und Bastlern (vgl. dazu vielfältigste Anregungen, wie sie unter anderem in der Zeitschrift „MAKE“ [4] gegeben werden) schier ungeahnte Möglichkeiten bietet: Zusammen mit diversen Hardware-Zusätzen kann er vergleichsweise einfach und vor allem preiswert zur computergestützten Messwerterfassung verwendet werden. Darüber hinaus macht es schlicht Spaß, mit einem Mikrorechner-System zu arbeiten, das den Namen „Raspberry Pi“ (englisch für „Himbeerkuchen“) trägt und mit dem Logo einer stilisierten Himbeere daher kommt.

Wir haben den Raspberry Pi für uns „entdeckt“ als eine extrem kostengünstige und vor allem sehr vielseitige Lösung, um ein „Low Cost - High Fun“-Messwerterfassungssystem zu konfigurieren mit Einsatzmöglichkeiten im Physikunterricht wie auch in

der studentischen Ausbildung an der Universität. Verwendet haben wir bislang ausschließlich den Raspberry Pi 2 Modell B.

Im Artikel werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie der Raspberry Pi eingesetzt werden kann für die Messung verschiedenster physikalischer Größen im Rahmen eines spannenden und kreativen Physikunterrichts. Dabei werden grundlegende didaktische Aspekte diskutiert wie das Lernen von, aber auch das Lernen über naturwissenschaftliche Arbeitsweisen; konkrete praktische Umsetzungen einer Messwerterfassung mit dem Einplatinenrechner werden im Detail erläutert. Auf die Installation und Konfiguration des Raspberry Pi wird - im nachfolgenden Kapitel - nur insofern eingegangen, als es für eine Vorbereitung des Einplatinencomputers zur Messwerterfassung nötig ist. Details zu Hard- und Software wurden bewusst ausgespart und können in der gut sortierten Fachliteratur (vgl. beispielsweise [5], [6] oder [7]) nachgelesen werden.

## 2. Installation und Konfiguration des Raspberry Pi

Für das in diesem Artikel vorgestellte Low-Cost-Messwerterfassungssystem wird der Raspberry Pi in ein bestehendes Netzwerk per LAN-Verbindung eingebunden, und der Benutzer loggt sich per Fernzugriff vom PC aus auf dem Einplatinencomputer ein. Auf diese Option zielt auch nachfolgende Kurzbeschreibung einer Installation und Konfiguration des Raspberry Pi ab. Viele andere Möglichkeiten sind denkbar und sinnvoll; so mag es durchaus Vorteile haben, den Raspberry Pi unabhängig von externen Netzwerken als Access-Point aufzusetzen. Im Rahmen eines physikdidaktischen Artikels wird jedoch einer einfachen Lösung der Vorzug gegeben, um den Fokus auf die eigentliche Messwerterfassung legen zu können.

Das Betriebssystem für den Raspberry Pi wird von einer SD-Speicherkarte (micro-SD-Karte für den Raspberry Pi 2 B und Raspberry Pi 3 B) gestartet und muss dazu erst auf die Speicherkarte geschrieben werden. Die kleine Speicherkarte dient auch als (Daten - )Speicher für Programme und Daten anstelle einer Festplatte. Normalerweise ist sie nicht im Lieferumfang des Einplatinencomputers enthalten; bewährt haben sich Karten mit einer Speichergroße von 8 GB oder 16 GB und einem Datendurchsatz von 20 MB/s, wie ihn beispielsweise SD-Karten vom Typ „Class 10“ leisten können. Mittlerweise gibt es über 20 Betriebssysteme für den Raspberry Pi, mit Abstand am weitesten verbreitet jedoch ist das Debian-basierte Raspbian: Zum einen handelt es sich um das Betriebssystem, das offiziell von der Raspberry Pi Foundation unterstützt wird, was es effektiv zur Standarddistribution macht. Zum anderen wurde es von Beginn an auf das direkte Zusammenspiel mit der Raspber-

ry Pi Hardware hin optimiert. Zudem ist Debian eine sehr einsteigerfreundliche Linux-Distribution mit einer fensterbasierten grafischen Benutzeroberfläche, die es selbst Einsteigern leicht macht, sich an den Umgang mit der kleinen Platine schnell zu gewöhnen. Für die in diesem Artikel diskutierten Beispiele wurde der Raspberry Pi mit Raspbian „Jessi“ (Kernel-Version 4.1) ausgestattet; mittlerweile (Stand: Mai 2017) sind „Raspbian Jessie with Pixel“ und „Raspbian Jessie Lite“ (beide Kernel-Version 4.4) auf dem Markt. Die Betriebssysteme können von der offiziellen Webseite der Raspberry Pi Foundation [8] als beispielsweise .zip-Datei heruntergeladen und anschließend entpackt werden. Das Image wird dann vom PC aus auf die SD-Karte geschrieben. Unter Windows ist das z. B. mithilfe der freien Software „Win 32 Disk Imager“ [9] einfachst möglich.

Anschließend wird die SD-Karte in den Raspberry Pi eingeschoben, und der Einplatinencomputer wird per LAN-Kabel in das bereits bestehende Netzwerk integriert. Die Energieversorgung des Raspberry Pi geschieht über den Micro-USB-Eingang. Ein Netzteil ist normalerweise nicht im Lieferumfang enthalten. Es empfiehlt sich, ein „speziell für den Raspberry Pi geeignetes“ zu kaufen, denn erst die Berücksichtigung der speziellen Spezifikationen (stabilisierte Gleichspannung von 5 V bei 1,8 A bis 2,0 A maximaler Stromstärke) garantiert einen stabilen Betrieb des Einplatinencomputers. Einen Ein-/Ausschalter hat der Mini-PC übrigens nicht: Wird er über das Netzteil mit Energie versorgt, so fährt er hoch. Ausschalten sollte man ihn allerdings, indem man mit dem Befehl `sudo shutdown -h 0` das Betriebssystem herunterfährt, und erst dann, wenn die OK-LED am Raspberry Pi blinkt, sollte der Einplatinencomputer von der Energieversorgung getrennt werden. Nach dem Hochfahren des Raspberry Pi besitzt dieser eine IP-Adresse, die er z. B. von einem Router des Netzwerks erhalten hat, der per DHCP die IP-Adressen in diesem Netzwerk verteilt. Diese IP-Adresse des Einplatinencomputers wird benötigt, um vom PC aus eine Remote-Verbindung zum Raspberry Pi herstellen zu können. Am einfachsten lässt sich die Adresse herausfinden, indem man sich mit Adminrechten beim Router nach der IP-Adresse „erkundigt“. - Häufig ist der Router eine Fritzbox, die durch folgende Eingabe in der Adressleiste des Browsers erreichen werden kann: `http://fritz.box`. Alle im Netzwerk erkannten Geräte werden mit IP-Adresse gelistet, so auch der Raspberry Pi. Mit der freien Software „PuTTY“ (Download über [10]) und unter Angabe der IP-Adresse des Raspberry Pi gelingt per Secure Shell ein Fernzugriff auf den Mini-PC. Der Benutzername für den Einplatinencomputer lautet standardmäßig „pi“, das Passwort ist auf „raspberrypi“ gesetzt.

Nach der Eingabe der Zugangsdaten sollte der

Raspberry-Pi konfiguriert werden; der Befehl `sudo raspi-config` führt direkt zum *Raspberry Pi Configuration Tool*. Das Debian-Image ist für SD-Karten mit einer Größe von 2 GB ausgelegt. Daher wird bei einer größeren SD-Karte der Speicherplatz nicht voll ausgenutzt. Mit *Expand Filesystem* wird die Systempartition an die tatsächliche Größe der SD-Karte angepasst. Unter *Advanced Options* über die Option *Hostname* bekommt der Raspberry Pi eine eindeutige Bezeichnung, unter der er im Netzwerk erscheint. Standardmäßig heißt der Raspberry Pi „raspberrypi“; über diesen Namen kann der Mini-PC auch im lokalen Netzwerk angesprochen werden. Zur Vermeidung von Namenskonflikten sollten unterschiedliche Einplatinencomputer allerdings auch voneinander unterscheidbare Bezeichnungen bekommen; im Klassenverband bieten sich beispielsweise an „raspiarbeitsplatz1“, „raspiarbeitsplatz2“, ...

Für eine Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi muss es möglich sein, weitere Hardware, z. B. Sensoren, an den Einplatinencomputer anschließen zu können; eine ordnungsgemäße „Kommunikation“ setzt die Aktivierung entsprechender Schnittstellen voraus. Viele Sensoren und andere Geräte arbeiten beispielsweise über die so genannte I2C-Schnittstelle, um Daten auszutauschen. Am Raspberry Pi befinden sich zwei I2C-Schnittstellen bzw. zwei I2C-Kanäle. Sofern entsprechende Sensoren eingesetzt werden sollen, kann eine Aktivierung von I2C einfach über die Option *I2C* unter *Advanced Options* erledigt werden. Analoges gilt für die SPI-Schnittstelle. Wirksam werden alle im Konfigurationstool vorgenommenen Änderungen übrigens erst nach einem Neustart des Raspberry Pi. Die Installation und Konfiguration des Raspberry Pi sollte mit einer Systemaktualisierung über die Kommandos `sudo apt-get update` und `sudo apt-get upgrade` abgeschlossen werden. Mit dem zweiten der beiden Befehle werden neue Pakete (Programme, Bibliotheken und Treiber) aus dem Internet geladen; der Raspberry Pi muss hierzu daher eine Verbindung ins Internet haben.

Sehr gute und vor allem ständig aktuelle Tipps zu Soft- und Hardware sowie zu Installation und Konfiguration des Raspberry Pi finden sich auch auf der offiziellen Webseite der Raspberry Pi Foundation [8].

### 3. Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi

#### 3.1. Temperaturmessung

Anhand der physikalischen Größe Temperatur werden wir in diesem Kapitel ausführlich erläutern, wie eine Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi erfolgen kann. Das vorgestellte System stellt damit eine Alternative zu einem kommerziellen Messwerterfassungssystem, beispielsweise dem CASSY-System der Firma Leybold, in Kombination mit einem entsprechenden Temperatursensor dar. Typische Anwendungen im Physikunterricht mögen die Erarbeitung des so genannten „Erwärmungssatzes“ sein oder auch die Untersuchung des Energieaustausches zwischen zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Temperatur. Bei der Konzeption und Inbetriebnahme eines solchen „Low Cost“-Messwerterfassungssystems eventuell auftretende Herausforderungen sehen wir dabei durchwegs nicht als Lernhemmnisse; vielmehr fördern sie in besonderer Weise den Umgang mit naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen: So wird nicht nur die Methode „Messen“ gefördert, sondern es wird auch viel über die naturwissenschaftliche Arbeitsweise „Messen“ gelernt.

Darüber hinaus kann bei dem von uns gewählten experimentellen Setup eine (von mehreren) Möglichkeiten einer Messbereichserweiterung thematisiert werden. Generell wird im Rahmen einer jeden computergestützten Messwerterfassung zur Registrierung einer physikalischen Größe ein geeigneter Sensor benötigt. Viele dieser Sensoren liefern ein (analoges) Spannungssignal, das zur Messgröße in definierter Abhängigkeit steht und das später im Computer in die Messgröße umgerechnet wird. Konkret zur Registrierung der Temperatur im Rahmen einer Messwerterfassung mit dem Raspberry Pi haben wir uns für den bereits kalibrierten (analogen) Temperatursensor LM35 (LM35CZ) entschieden: Der Zusammenhang zwischen dem registrierten Spannungssignal und der Messgröße ist linear und wird vom Hersteller *Texas Instruments* mit  $+10\text{ mV}/^\circ\text{C}$  angegeben (Datenblatt zum Temperatursensor LM35 siehe [11]). Der Temperatursensor LM35CZ kann beispielsweise bei Reichelt Elektronik [2] zu einem Preis von etwa 3 Euro erworben werden; der Zusatz „CZ“ in der Bezeichnung des Sensors kennzeichnet den Gehäusotyp. Eingangsseitig kann der Temperatursensor LM35 mit einer Spannung von 4 V bis 30 V versorgt werden; verwendet wurde die seitens des Raspberry Pi zur Verfügung gestellte Referenzspannung von 5 V.

Die Genauigkeit des Sensors wird mit  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  bei einer Referenztemperatur von  $25^\circ\text{C}$  angegeben; die Selbsterwärmung des Sensors ( $0,08^\circ\text{C}$ ) ist vernachlässigbar. Der Messbereich des Temperatursensors LM35 liegt zwischen  $-55^\circ\text{C}$  und  $+150^\circ\text{C}$ , jedoch ist eine messtechnische Erfassung negativer Temperaturen nur mit einer Erweiterung des Messaufbaus ( $\rightarrow$  „Messbereichserweiterung“, vgl.

Kapitel 3.3) realisierbar.

Da der Raspberry Pi nur digitale Signale verarbeiten kann, müssen die (analogen) Spannungssignale in digitale Signale umgewandelt werden. Diese Aufgabe übernimmt typischerweise ein so genannter Analog-Digital-Wandler. Wir verwenden für unser Messwerterfassungssystem den *A(nalog)/D(igital)-Wandler MCP3208* des amerikanischen Halbleiterherstellers *Microchip* (Datenblatt zum AD-Wandler MCP3208 siehe [12]). Dieser IC verfügt über eine 12-Bit-Auflösung, d.h. bei Division der seitens des Raspberry Pi zur Verfügung gestellten Referenzspannung von 3,3 V durch die Anzahl der Bitkombinationen erhält man einen *Spannungswert pro Bit-Sprung* von  $U = U_{REF}/4096 = 3,3\text{ V}/4096 \approx 810\ \mu\text{V}$ . Wie bereits der Temperatursensor, so kann auch der A/D-Wandler z. B. über Reichelt Elektronik [2] kostengünstig bezogen werden. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen den experimentellen Aufbau des „Low Cost - High Fun“-Messwerterfassungssystems, bestehend aus Temperatursensor LM35, A/D-Wandler MCP3208 und Raspberry Pi 2 Modell B. Temperaturen von  $+2^\circ\text{C}$  bis  $150^\circ\text{C}$  können so messtechnisch erfasst werden.

Der Baustein ist in der Lage, acht Analogkanäle gleichzeitig zu verarbeiten; für die Registrierung positiver Temperaturen in Kombination mit dem Sensor LM35 wurde jedoch nur ein Kanal (CH0, vgl. Abb. 3) verwendet, und auch bei einer Erweiterung des Messbereichs auf negative Temperaturen wurden nur zwei der acht Kanäle genutzt. Um Störeinflüsse zu vermeiden, wurden nicht verwendete Eingänge auf die gemeinsame Gerätemasse (*Ground GND*) gesetzt (vgl. Abb. 3).

Für die Kommunikation des A/D-Wandlers mit dem Raspberry Pi bietet sich das Serial-Parallel-Interface (SPI) an. Die konkrete Realisierung erfolgt softwareseitig; bei der Wahl der Programmiersprache haben wir uns für „Python“ entschieden, der nativen Programmiersprache des Raspberry Pi. Der Code unseres Programms „temperaturmessung\_1\_kanal.py“ lehnt sich sehr stark an dem von Erik Bartmann in seinen Skripten „PiMeUp. Raspberry Pi - AddOn. Der A/D-Wandler MCP3008“ (siehe [13]) und „PiMeUp. Raspberry Pi - AddOn. Der A/D-Wandler MCP3208“ (siehe ebenfalls [13]) ausführlich diskutierten Programm zur Kommunikation des A/D-Wandlers mit dem Mini-PC an. Unter [16] findet sich eine konkrete Realisierung dieses Programms. Gestartet von der Konsole des Raspberry Pi aus mit dem Befehl `sudo temperaturmessung_1_kanal.py` und gestoppt über die Tastenkombination Strg-C werden die Messwerte für die Temperatur, die der Sensor LM35 registriert, zusammen mit der seit Beginn der Messung laufenden Zeit auf die Konsole geschrieben und auch in eine mit einem Zeitstempel versehene Textdatei.



### 3.2. Messung von Schall(wechsel)druck und Kraft

Die in Kapitel 3.1 vorgestellte Konzeption eines Messwerterfassungssystems auf Basis eines Raspberry Pi (2 Modell B) ermöglicht die Registrierung einer Vielzahl an physikalischen Größen: So kann der Temperatursensor LM35 durch nahezu jeden beliebigen anderen Sensor ausgetauscht werden, der ebenfalls ein (analoges) Spannungssignal liefert. Sinnvollerweise sollte ein solcher Sensor auch über die Referenzspannung des Raspberry Pi ( $U_{REF} = 3,3\text{ V}$  oder  $U_{REF} = 5\text{ V}$ ) gespeist werden können und eine maximale Spannung von  $U_{OUT} = 3,3\text{ V}$  zurückgeben. Die Digitalisierung der Spannungssignale erfolgt dann wiederum mit dem MCP3208, und das bereits vorgestellte Programm übernimmt nach kleineren Änderungen im Code (z. B. Anpassung der `initFile`- und der `writeln`-Methode) weiterhin die Kommunikation des Mini-PC mit dem A/D-Wandler.

Eine ausführliche Diskussion konkreter Beispiele (Schall(wechsel)druck und Kraft) mit Einbettung in den Physikunterricht ist unter [16] zu finden.

### 3.3. Messbereichserweiterung und Erfassung negativer Temperaturen

In Kapitel 3.1 wurde intensiv das „Low Cost - High Fun“-Messwerterfassungssystem im Hinblick auf speziell eine Temperaturmessung vorgestellt. Anschließend wurde auf Literatur zu weiteren Beispielen verwiesen, wie das bestehende System verwendet werden kann, um weitere physikalische Größen zu erfassen und Messwerte zu speichern sowie sie zu analysieren. Zu einem Lernen über die naturwissenschaftliche Arbeitsweise „Messen“ gehört darüber hinaus auch die Kenntnis von Möglichkeiten einer Erweiterung des Messbereichs eines Messgerätes. In diesem Kapitel soll exemplarisch die Erweiterung des Messbereichs des Temperatursensors LM35 diskutiert werden. Damit eignet sich „Low-Cost - High Fun“-System beispielsweise auch zur Untersuchung des Temperaturverlaufs beim Schmelzen von Eis bzw. allgemein bei Aggregatzustandsänderungen.

Da der Temperatursensor LM35 die Temperatur linear in eine Ausgangsspannung umwandelt, ergibt sich für negative Temperaturen auch eine negative Ausgangsspannung. Das negative Temperaturlimit des Sensors liegt bei  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , was einer Ausgangsspannung von  $-550\text{ mV}$  entspricht. Da der A/D-Wandler jedoch nur positive Eingangsspannungen erlaubt, muss der Messaufbau dahingehend verändert werden, dass eine ausreichend hohe und vor allem positive Potentialdifferenz erreicht wird: Zwischen Temperatursensor und Gerätemasse werden daher zwei Dioden vom Typ (beispielsweise) 1N914 eingebaut. Die maximale Stromstärke des LM35 ist auf  $I_{max} = 60\text{ }\mu\text{A}$  begrenzt, so dass diese Dioden unterhalb ihres Arbeitspunktes betrieben werden und die Durchlassspannung einer einzigen Diode nur  $0,48\text{ V}$  beträgt. Mit einer

Diode wäre somit die Messung negativer Temperaturen auf  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  limitiert, mit zwei Dioden lässt sich der komplette Temperaturbereich des Sensors nutzen. Abb. 5 zeigt den experimentellen Setup für die Messung negativer Temperaturen mit dem Sensor LM35 und lässt auch erkennen, dass nun zwei Messpunkte auf je einen Kanal des A/D-Wandlers (CH0 und CH1) geführt werden; die Temperaturmessung mit dieser veränderten Schaltung erfolgt dann mithilfe einer Differenzbildung der beiden Kanäle. Der Programmcode aus Kapitel 3.1 muss an den veränderten experimentellen Aufbau angepasst werden: Die Bit-Zahlen der Kanäle des MCP3208 werden nacheinander ausgelesen und in eine Temperatur umgerechnet, dann wird eine Differenz der beiden Temperaturen ermittelt. Die beiden Spannungswerte der Messpunkte sowie die Differenzspannung werden abschließend in eine Datei geschrieben und gespeichert. Somit ist es gut möglich, die Teilspannungen mithilfe eines Spannungsmessgerätes zu überprüfen, da sich die Temperaturen in einen Spannungswert umrechnen lassen. In [16] wird der entsprechende Code gelistet.

Um die Funktion des angepassten Messaufbaus zu überprüfen, wurde der Sensor mithilfe von Peltier-Elementen im negativen Temperaturbereich bis  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  getestet.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben gezeigt, dass der Raspberry Pi zusammen mit diversen Hardware-Zusätzen vergleichsweise einfach und vor allem kostengünstig zur computergestützten Messwerterfassung verwendet werden kann, und somit unser Messwerterfassungssystem zu Recht den Titel „Low Cost - High Fun“ trägt. Im Artikel wurde der experimentelle Grundaufbau für die Verwendung von Sensoren vorgestellt, die analoge Spannungssignale liefern; der Analog-Digital-Wandler übernimmt dann die Aufgabe der Digitalisierung für den Mini-PC. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl an Sensoren, die „direkt“ digitale Signale liefern; Setup und Programmierung sind nun noch einfacher. Exemplarisch seien hier genannt der Ultraschallsensor HC-SR04 von Cytron Technologies für Abstandsmessungen oder der digitale Sensor DHT22 zur Messung von Temperatur und Feuchtigkeit von Adafruit.

