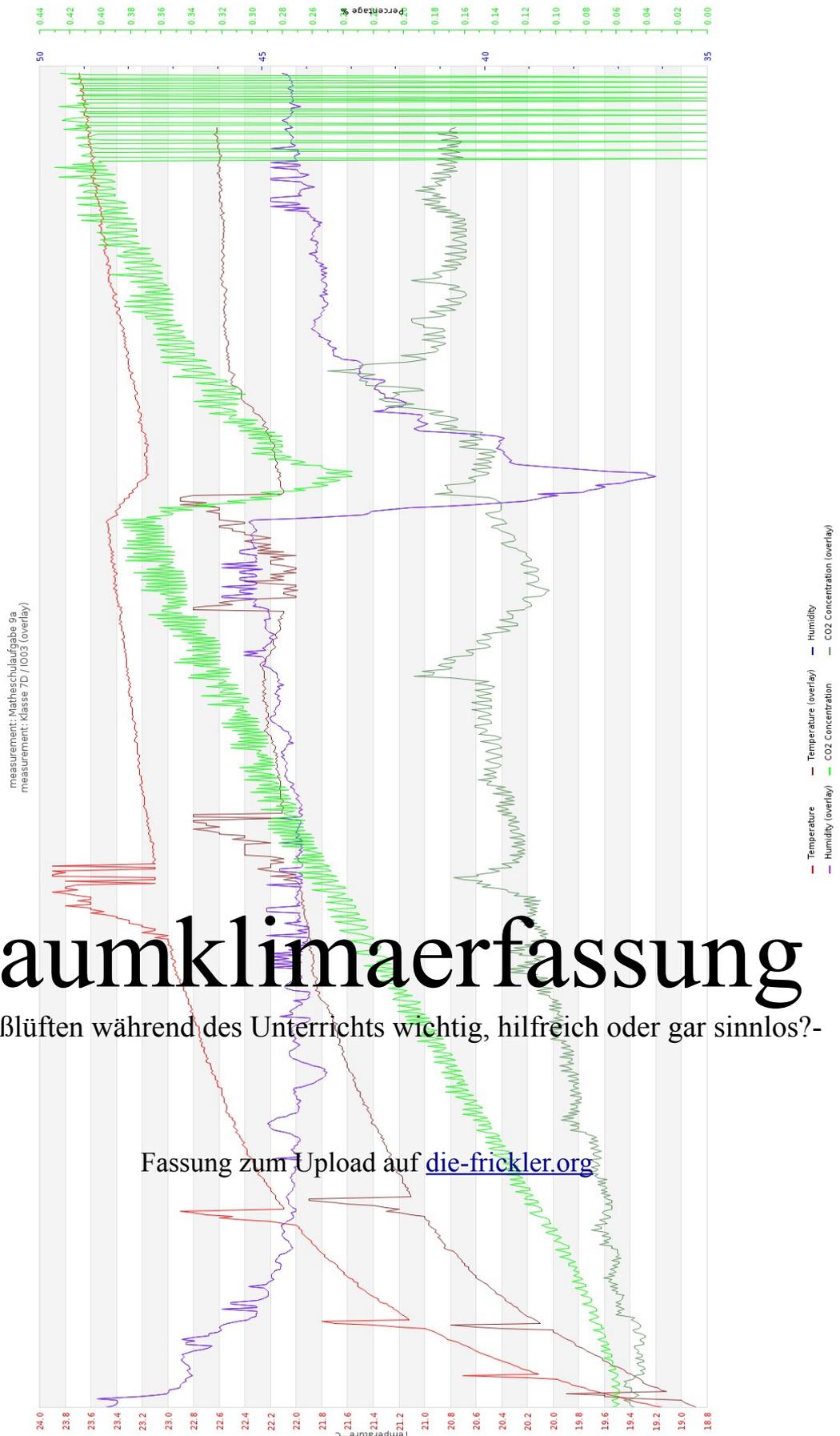


# Raumklimaerfassung

-Ist Stoßlüften während des Unterrichts wichtig, hilfreich oder gar sinnlos?-

Fassung zum Upload auf [die-frickler.org](http://die-frickler.org)



**F a c h a r b e i t**  
aus dem Fach  
**Physik**

**Arbeit für Jugend forscht 2011**

Thema: **Raumklimaerfassung**

-Ist Stoßlüften während des Unterrichts wichtig, hilfreich oder gar sinnlos?-

Verfasser: Alexander Böhm  
Kursleiter: Dr. Hermann Deger  
Abgabetermin: 23. Dezember 2010

Bewertung der Facharbeit: erzielte Punkte: ..... in Worten: .....  
mündliche Prüfung: erzielte Punkte: ..... in Worten: .....

.....  
Unterschrift des Kursleiters

Hinweis zur Form dieser Arbeit

Diese Arbeit wurde, in Rücksprache mit dem Kursleiter, an die Kriterien von Jugend forscht angepasst.

## Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines computergestützten Erfassungssystems für die drei Raumklimafaktoren CO<sub>2</sub>-Konzentration, Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Mit den so erfassten Daten wird die Qualität des Raumklimas während einer Schulstunde gemessen und unter der Fragestellung „Ist Stoßlüften während des Unterrichtes wichtig, hilfreich oder gar sinnlos?“ ausgewertet.

Hierzu wurde ein Messsystem, auf einem ATmega32-Microcontroller basierend, entwickelt. Die Erfassung, sowie Auswertung der Daten erfolgt über ein angeschlossenes PC-System mit einer GUI<sup>1</sup>, die es ermöglicht, Messdiagramme übereinanderzulegen.

Anhand dieser Ergebnisse ist es möglich, die Raumnutzung, bzw. Lüftungshinweise zu optimieren. Das System besteht aus zwei Komponenten – der Messhardware sowie der Erfassungssoftware.

Diese Kombination ermöglicht einen flexiblen und einfachen Einsatz. Es ist somit möglich, das Messmodul dieser Arbeit im Rahmen eines Physikpraktikums nachzubauen und selbst Messungen zu tätigen.

Aus diesem Grund wurden sehr einfach zu beschaffende, beziehungsweise leicht zu verarbeitende Komponenten gewählt. Die Schaltpläne sowie die verwendete Software bestehen hauptsächlich aus Open-Source-Komponenten. Weiterhin wurde die Software sehr genau dokumentiert, um den Aufbau eines Messsystems zu erleichtern.

Ein erster Praxiseinsatz erfolgte am Gymnasium Geretsried: zwei Messungen während einer normalen Unterrichtssituation und eine während einer Klausur.

Die Auswertung der Daten zeigt, dass nicht die Luftfeuchtigkeit der negative Faktor im Raumklima ist, sondern entweder die CO<sub>2</sub>-Konzentration oder eine zu hohe Temperatur.

---

<sup>1</sup> Graphical User Interface – Graphische Benutzeroberfläche

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	6
Theoretische Funktionsbeschreibung.....	7
Grundlegendes Konzept der Messwerterfassung und -übertragung.....	7
Beschreibung der Sensoren.....	8
CO2-Sensor.....	8
Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensor.....	9
Aufgabe des Mikrocontrollers.....	10
Beschreibung der praktischen Umsetzung.....	11
Umsetzung des strukturellen Ablaufs in einen Schaltplan.....	11
Beschreibung der Module, Erläuterung des Schaltplans .....	12
Bestimmung des CO2-Messwertes.....	12
Luftfeuchtigkeits- und Temperaturmessung.....	12
Zentrales Board.....	12
Programmtechnische Umsetzung des Prozessstrukturgramms.....	14
Zentrales Board.....	14
Datenauswertungseinheit, Kommunikationsschnittstelle .....	14
Datenbankbackend.....	14
Webbasiertes Frontend .....	14
Messungen.....	15
Messung #1: Raum IO03 / Klasse 7D.....	15
Beschreibung der Situation.....	15
Durchführung der Messung.....	15
Ergebnis der Messung.....	15
Messung #2: Raum PH1 / Klasse 7D.....	18
Beschreibung der Situation.....	18
Durchführung der Messung.....	18
Ergebnis der Messung .....	18
Messung #3: Raum EE01 / 9A.....	19
Beschreibung der Situation .....	19
Durchführung der Messung .....	19
Ergebnis der Messung.....	19
Diskussion der Ergebnisse.....	20
Danksagung.....	22
Anhang.....	23
Quellenverzeichnis.....	23
Nicht zitierte Werke.....	24
Schaltpläne.....	24
Messreihen.....	26
Bilder aus der Praxis.....	28
Datenstruktur Begleitdatenträger.....	32
Erklärungen.....	35
Eigenständigkeitserklärung.....	35
Datenschutzrechtliche Einwilligung.....	35

## Einleitung

In fast jedem Klassenzimmer hängt ein Zettel mit dem Hinweis, dass nach jeder Unterrichtsstunde stoßgelüftet werden sollte, um die Atmosphäre in diesem Raum zu verbessern. Die feuchte Luft, die Krankheitserreger enthalten könnte, wird gegen trockene, frische und kalte Luft austauscht. Dieser Hinweis wird jedoch von fast allen Schülern und Lehrern ignoriert, da es als lästig empfunden wird, diese Prozedur konsequent alle 45 Minuten durchzuführen.

Deshalb ist in vielen Räumen die Luft „schlecht“, also weder trocken noch sauerstoffreich. Es ist wissenschaftlich erwiesen, dass ein schlechtes Raumklima, insbesondere ein zu hoher CO<sub>2</sub>-Gehalt, die Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen kann.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Erfassung und Auswertung des Raumklimas in Klassenzimmern des Gymnasiums Geretsried. Hierbei sollen Optimierungsmöglichkeiten bzw. einfache Leitsätze gefunden werden, um das Raumklima positiv zu beeinflussen.

Das Raumklima wird allgemein als ein Zusammenspiel der Faktoren Feuchtigkeit, Temperatur und der chemischen Zusammensetzung der Luft definiert.

Es ist es wichtig, neben Temperatur und Feuchtigkeit auch – als chemischen Bestandteil der Luft – die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erfassen. Denn für dieses Gas gilt ein MAK-Wert<sup>2</sup> von 5.000 ppm oder 0,5%.

Daher stellt sich nun folgende Frage: Wie hoch ist die Konzentration des Gases Kohlenstoffdioxids in den Unterrichtsstunden?

Denn schon ab 1.000 ppm lässt sich eine negative Beeinflussung der Leistungsfähigkeit feststellen (nach S. 20, Abs. 3.1 [bwil]).

Für die Erfassung dieser Parameter gibt es unterschiedliche und zum Teil kostspielige kommerzielle Lösungen. Neben der Erläuterung der grundlegenden Konzepte der Erfassung versucht diese Arbeit auch, zum Nachbau einer Lösung anzuregen, die im Rahmen eines Physikpraktikums realisiert werden kann.

---

2 Maximale Konzentration am Arbeitsplatz für einen Acht-Stunden-Arbeitnehmer

## Theoretische Funktionsbeschreibung

Grundlegende Ideen liefert der Artikel „CO<sub>2</sub>-Messer Watchdog für dicke Luft“ [elek] in der Zeitschrift „Elektor“. Aus dieser Idee heraus wurde ein Konzept entwickelt, das neben dem CO<sub>2</sub>-Gehalt auch Temperatur und Feuchtigkeit erfasst und mithilfe eines Computersystems aufzeichnet.

### Grundlegendes Konzept der Messwerterfassung und -übertragung

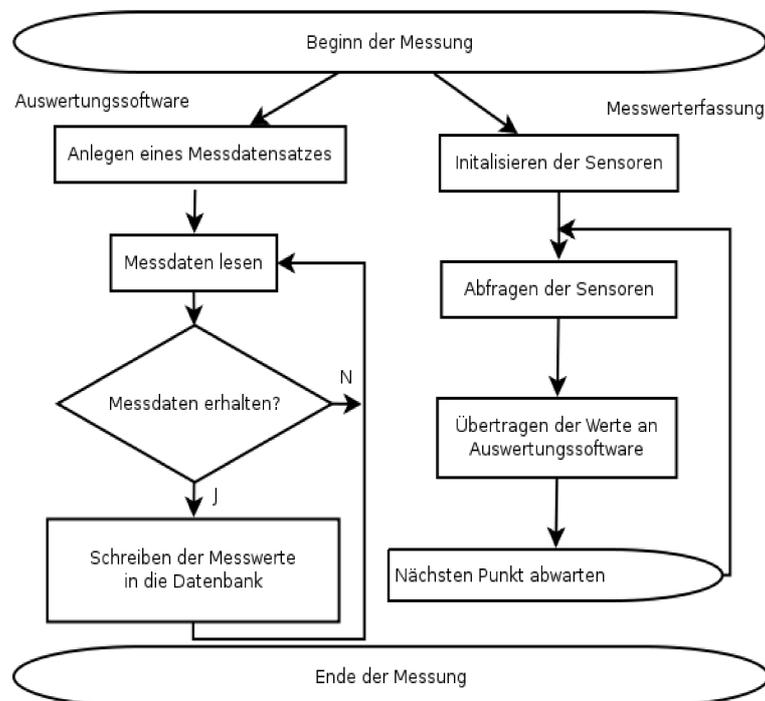


Abbildung 1: Ablauf der Messwerterfassung [ab]

Die Messwerterfassung gliedert sich in zwei Komponenten: zum einen das Computersystem zur Datenerfassung und zum anderen die Erfassungseinheit. Die Datenübertragung erfolgt über EIA-232<sup>3</sup>.

Sobald die Erfassungshardware aktiviert wird, beginnt diese die Sensoren abzufragen und die Ergebnisse an die serielle Schnittstelle zu übertragen. Es erfolgt keine Quittierung des korrekten Empfanges der Messwerte durch die Auswertungssoftware, da fehlende Messdaten aufgrund des langen Messzeitraums interpoliert werden können. Nachdem das

3 Eine standardisierte Schnittstelle (auch als RS-232 bekannt)

Datenpaket abgeschickt wurde, pausiert die Erfassungseinheit für circa drei Sekunden und der Erfassungszyklus beginnt erneut.

Die Auswertungssoftware startet in eine Endlosschleife: Sie wartet nach dem Start auf den Erhalt eines Datenpaketes, welches dann in der Datenbank abgespeichert wird.

## **Beschreibung der Sensoren**

Die in der Facharbeit verwendeten Sensoren sind wie folgt spezifiziert:

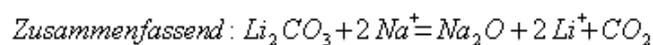
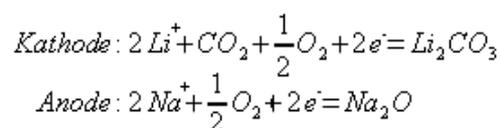
Sensortyp	Typennummer	Hersteller
CO <sub>2</sub> -Messmodul	CDM4161A	Figaro Engineering Inc. (Japan)
Temperatur / Luftfeuchtigkeit	SHT11	Sensiron AG (Schweiz)

## **CO<sub>2</sub>-Sensor**

Der CO<sub>2</sub>-Sensor (TGS416) basiert auf dem Prinzip der ElektroMotorischeKraft (EMK)<sup>4</sup> bei einem Feststoffelektrolyt.

Die Messung des CO<sub>2</sub>-Pegels erfolgt durch eine Redox-Halbzelle<sup>5</sup> aus Lithium und Natrium, die als Feststoff vorliegen.

Hierbei läuft im Zusammenspiel mit einem CO<sub>2</sub>-Molekül folgende Reaktion ab (nach Seite 2, Absatz 1-4 [tfig]):



Die EMK der Redox-Halbzelle wird durch die Nernstsche-Gleichung berechnet.

Um möglichst gleiche Reaktionsbedingungen zu erhalten, wird der Sensor, wie die nachfolgende Abbildung zeigt, auf eine bestimmte Temperatur erhitzt.

---

4 Die EMK ist ein elektrochemisches Prinzip, das die Triebkraft einer Redox-Reaktion bestimmt.

5 Galvanische Zelle - RedOx-Reaktion zwischen zwei Materialien verbunden mit einer Ionenbrücke

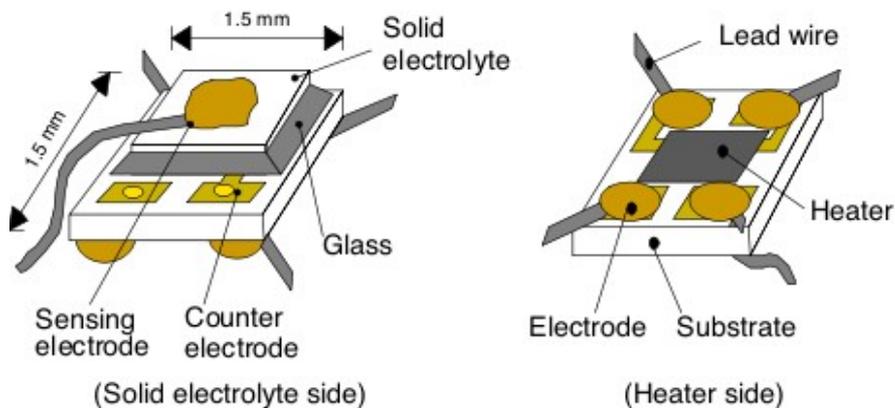


Abbildung 2: Aufbau des Sensormoduls [tfig]

Da die resultierende EMK sehr klein ist, muss der Operationsverstärker, der den entsprechenden Strom verstärkt, eine sehr hohe Eingangsimpedanz<sup>6</sup> besitzen.

Aufgrund dieses Konzeptes ergibt sich somit schon das erste Problem:

Die absolute EMK lässt sich schlecht berechnen, da sie von sehr vielen Faktoren abhängt (vergleiche S. 17 [elek]). Diese Drifteffekte<sup>7</sup> vermindern somit die Genauigkeit der Messung und verhindern eine Erfassung des absoluten Wertes des Kohlenstoffdioxidgehaltes der Luft.

Die Firma Figaro entwickelte aus diesem Grund einen speziellen Mikrocontroller, welcher dieses Signal aufbereitet und den entsprechenden Wert als Analogpegel ausgibt. (vergleiche S. 3, Absatz 1-6 [tfig]).

Dieser Mikrocontroller misst anfangs den Drift, in der Annahme, dass es sich um einen vordefinierten CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft, nämlich den von Frischluft handelt. Ausgehend von dieser Basis ist es nun möglich, die Konzentration des CO<sub>2</sub>-Gehaltes zu bestimmen.

## Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensor

Der Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensor stammt von der Firma Sensiron AG (Schweiz). Im Vergleich zum CO<sub>2</sub>-Sensor ist die Erfassung mit diesem sehr genau.

<sup>6</sup> In diesem Fall ist der Anschlusswiderstand gemeint.

<sup>7</sup> z.B. Drift durch thermische Rauschen (vgl. brownische Molekülbewegung)

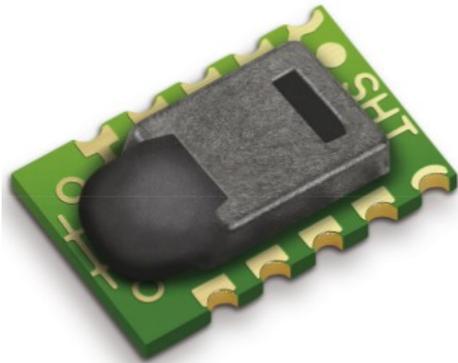


Abbildung 3: Produktfoto SHT1x [shtx]

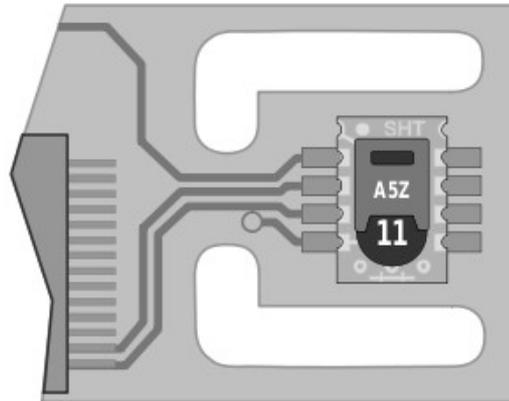


Abbildung 4: Reduzierung der thermischen Störfaktoren [shtx]

Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 3.0\%$  bei der Erfassung der Luftfeuchtigkeit und  $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei der Erfassung der Temperatur (vergleiche Seite 2 [shtx]).

Bei der Verwendung dieses Sensors ist es wichtig, einen gewissen Bereich um den Sensor herum aus der Platine zu fräsen. Hierdurch wird verhindert, dass die Wärme über die Platine, z.B. von angeschlossenen Mikrocontrollern auf den Sensor übertragen wird und dadurch die Messergebnisse verfälscht.

Die Ausgabe der Messergebnisse erfolgt mithilfe eines digitalen Protokolls (vergleiche S. 6, Abs. 3 [shtx]).

## Aufgabe des Mikrocontrollers

Der Mikrocontroller hat die Aufgabe, die Sensoren abzufragen und die erfassten Werte zu verarbeiten, sodass diese durch den Datenlogger<sup>8</sup> empfangen werden können.

Weiterhin stellt der Mikrocontroller die Verbindung zwischen der Erfassungshardware und dem Computersystem dar. Diese Verbindung erfolgt über UART<sup>9</sup> (bzw. EIA-232), einer einfach anzusteuern, seriellen Schnittstelle.



Abbildung 5: Datenflussdiagramm [ab]

<sup>8</sup> Hiermit ist die Aufzeichnungssoftware gemeint.

<sup>9</sup> Kurz für Universal Asynchronous Receiver Transmitter – Baugruppe zur seriellen Übertragung von Daten

Als Mikrocontroller wurde ein ATmega32 von ATMEL gewählt, da dieser leicht zu programmieren ist (C oder Assembler) ist und die benötigten Ein- und Ausgänge durch ihn selbst bereitgestellt werden. Folglich wird weniger zusätzliche Hardware benötigt.

## **Beschreibung der praktischen Umsetzung**

Die praktische Umsetzung stellt den umfangreichsten Teil dieser Arbeit dar. Aus diesem Grund wurde diese in zwei Teile aufgespalten: zum einen die PC-Software und zum anderen die Erfassungshardware.

### ***Umsetzung des strukturellen Ablaufs in einen Schaltplan***

Die Umsetzung der theoretischen Überlegungen lässt sich in verschiedene Schritte gliedern. Zuerst muss das Datenblatt für jedes verwendete Bauteil beschafft werden. Anhand dieser Informationen ist es nun möglich, erste theoretische Überlegungen zur Realisierung anzustellen.

Die gesammelten Rohdaten stellen das Grundgerüst für den Schaltplan dar, der alle Komponenten vernetzt. Die Layouts werden danach aus den vorliegenden Daten unter Beachtung der Design Guides der Hersteller erzeugt.

Der wohl umfangreichste Punkt ist die Umwandlung des theoretischen Konzeptes in einen Schaltplan und die Erstellung der Platinenlayouts. Die Produktion der Platinen wird in dieser Arbeit nicht näher erläutert.

Für die Erstellung der Schaltpläne, sowie der Bordlayouts wird der Layouteditor „Eagle“ der Firma CADSoft<sup>10</sup> verwendet. Sämtliche Dateien lassen sich mit der Freeware-Version dieser Software betrachten und bearbeiten.

Die Software<sup>11</sup> ist aufgrund der Portabilität und Kompatibilität in PHP geschrieben. Sie benötigt einen CGI<sup>12</sup>-fähigen Webserver (z.B. Apache) und ein MySQL<sup>13</sup>-Backend.

---

10 Siehe <http://www.CADsoft.de>

11 Datenlogger und Auswertungssoftware „IEM – Indoor Environment Measurement“

12 Common Gateway Interface → Möglichkeit zur Einbindung einer Scriptsprache

13 Datenbanksoftware

## **Beschreibung der Module, Erläuterung des Schaltplans**

### **Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Messwertes**

Der CO<sub>2</sub>-Messwert wird durch das Modul als Spannungspegel zwischen 0.4V und 4V ausgegeben. Dieser Messwert wird durch den A/D Wandler<sup>14</sup> des ATmega32 erfasst und in einen Digitalwert im Bereich zwischen 0 und 1024 umgewandelt. Der Wert 1024 entspricht der Referenzspannung, während der Wert 0 das Anliegen der Masse an dem Port darstellt.

Um die Kohlenstoffdioxidkonzentration zu erhalten, wird der Spannungswert durch den Faktor 10 geteilt<sup>15</sup>. Daraus resultiert der prozentuale Wert – für die Konzentration in ppm muss der Spannungswert durch 1000 geteilt werden (vergleiche S. 5, Tabelle 5 [difg]).

Für eine genaue Messung des CO<sub>2</sub>-Wertes sowie des Analogwertes ist es wichtig, dass die Versorgungs- und Referenzspannungen möglichst rippelfrei<sup>16</sup> und konstant sind. Die Versorgung des Mikrocontrollers wird im Absatz „Zentrales Board“ erklärt.

### **Luftfeuchtigkeits- und Temperaturmessung**

Die Messung der Luftfeuchtigkeit und Temperatur erfolgt über ein digitales Protokoll und gewährleistet somit eine exakte Übertragung der Messdaten.

An dieser Stelle soll auf die Dokumentation der Firma Sensiron und auf dem Beitrag im [microkontrollet.net](http://microkontrollet.net)-Forum verwiesen werden.

### **Zentrales Board**

Der Mikrocontroller auf diesem Board erfasst sämtliche Daten (CO<sub>2</sub>-Wert über den Analogport, Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit über die Digitalports). Die Kommunikation mit dem Computersystem erfolgt in eine Richtung: Mikrocontroller zu Computer. Die unterschiedlichen Potenziale werden über einen MAX232-Pegelwandler<sup>17</sup> angeglichen. Bei der Beschaltung des Pegelwandlers handelt es sich um eine Standardbeschaltung der entsprechenden Komponente. Aus diesem Grund wird nicht näher auf diese eingegangen,

---

14 Ein A/D-Wandler wandelt einen analogen Spannungspegel in einen Wert (z.B. 1024) um

15 Resultierend aus der Umrechnung von PartsPerMillion zu Prozent

16 Ripplestrom: Störfaktor in der Spannung aufgrund der induktiven Einstreuung eines Wechselstroms (auch als Brummstrom bekannt)

17 Der MAX232 ist ein Schnittstellentreiber. Er setzt das 5V Logiksignal auf den EIA-232 Standard von 15V um.

sondern auf das entsprechende Datenblatt verwiesen.

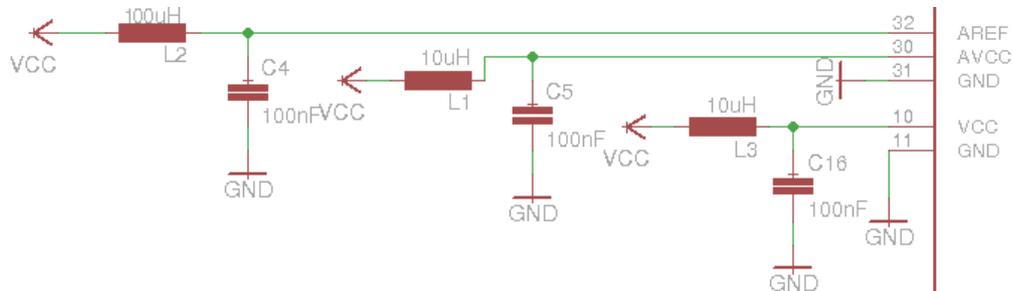


Abbildung 6: Spannungsversorgung des ATmegas [ab]

Um die Versorgung (AREF - Referenzspannung, AVCC und VCC (Versorgungsspannung)) möglichst rippel- und schwankungsfrei zu gestalten, wird ein L-C-Glied verwendet. Die grundlegenden Hinweise zur gefilterten Spannungsversorgung des ATMegas finden sich auf S. 2, Abb. 2-2 in [avrh], sowie S. 210, Abb. 106 [avrd].

Durch diese Entkopplung und Filterung ist der Mikrocontroller in der Lage, den Wert genauer zu erfassen, da eine Messung nicht durch Störfaktoren beeinflusst wird.

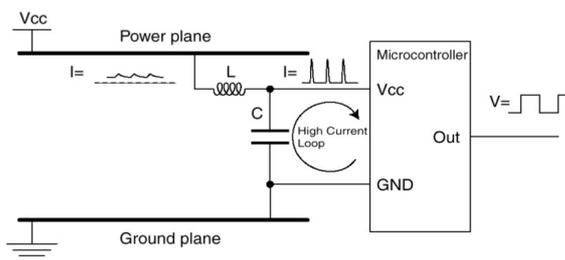


Abbildung 7: Beispiel eines kleinen "high current loops" [avrh]

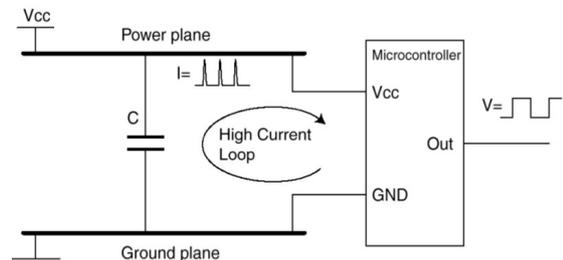


Abbildung 8: Beispiel eines störenden "high current loop" [avrh].

Bei der Versorgung (siehe obige Abbildungen) ist darauf zu achten, dass kein „high current loop“ zwischen Power- und Groundplane entsteht, d.h. der Kondensator darf nicht direkt mit VCC und GND verbunden sein. Zur Definition eines „high current loops“ wird die Variante ohne Induktivität betrachtet.

In diesem Fall kann sich ein Störsignal leichter auf andere Komponenten auswirken (nach Seite 2, Absatz 2.1 [avrh]). Kondensator, Versorgungsspannung und Erdung können wie ein Schwingkreis wirken. Die Erde (Ground Plane) agiert hierbei als Antenne.

Dies ist der Fall, wenn der Mikrocontroller einen der Ausgänge schaltet. Dieser

Schaltvorgang erzeugt eine Stromspitze, die wiederum den Schwingkreis speisen könnte.

## ***Programmtechnische Umsetzung des Prozessstrukturgramms***

### **Zentrales Board**

Der Mikrocontroller wurde in C programmiert, da diese Sprache für den Anfänger leichter zu verstehen ist als Assembler. Sämtliche Quelltexte orientieren sich an Beispielen aus mikrocontroller.net. Die dort genannten Erklärungen können als weitere Dokumentation herangezogen werden. Weiterhin ist jede Datei mit einem standardisierten Kommentar<sup>18</sup> versehen und enthält detaillierte Angaben zur Quelle.

### **Datenauswertungseinheit, Kommunikationsschnittstelle**

Nachdem der Mikrocontroller die Daten verschickt hat, werden diese durch den Datenlogger<sup>19</sup> aufbereitet und aufgezeichnet.

### **Datenbankbackend**

Die vom Logger erfassten Daten werden in einer MySQL Datenbank gespeichert. Hierbei wird jedem Messpunkt ein eindeutiger Messreihenname zugewiesen<sup>20</sup>.

Die Wahl für das eingesetzte Datenbanksystem fiel auf MySQL, da es große Datenmengen leicht verarbeiten kann. Ein weiterer Vorteil ist das Client/Server-Konzept. Dies ermöglicht es, die Datenerfassung und Speicherung zu trennen. Durch die Vielzahl der unterstützten SQL-Statements ist es möglich, die Daten sehr fein zu selektieren.

### **Webbasiertes Frontend**

Der wohl wichtigste Punkt ist die Darstellung der Messdaten: Durch eine Messrate von fünf Punkten pro Minute ergeben sich in einer Unterrichtsstunde ungefähr 220 Messpunkte, die in Relation zueinander und zur Zeit gesetzt werden müssen. Um die Visualisierung möglichst einfach und effizient darzustellen, wurde das Webinterface rein funktional gestaltet.

Es bietet zusätzlich aufgrund des Client/Server-Modells die Möglichkeit einer Fernabfrage

---

<sup>18</sup> JavaDoc, bzw phpDoc ähnlicher Syntax, siehe <http://www.phpdoc.org/>

<sup>19</sup> Der Datenlogger erfasst die Messwerte, die über die EIA-323-Schnittstelle des Computers empfangen werden

<sup>20</sup> Jede Messreihe besitzt einen eindeutigen Identifikationscode

über das Netzwerk. Alle Komponenten (Erfassung, Datenbank, Webinterface) können auf getrennten Systemen laufen und miteinander vernetzt werden. Die eingesetzten Programmiersprachen (PHP als Backend und eine HTML-Ausgabe) bieten eine hohe Portabilität.

Durch die Ausgabe der Inhalte über ein webbasiertes Frontend ist es möglich, eine Vielzahl von Clientsystemen zu unterstützen, da diese Form der Ausgabe sehr geringe Ansprüche an Aufbau und Leistung des Clientsystems stellt. Alle Berechnungen und Erzeugungen von Graphen werden durch die Software JpGraph durchgeführt. Diese Bibliothek<sup>21</sup> ist für Anwendungszwecke im Bildungsbereich kostenlos und wurde unter einer Opensource-Lizenz veröffentlicht.

## **Messungen**

### ***Messung #1: Raum IO03 / Klasse 7D***

Die erste Messung fand im Klassenzimmer der 7D mit der Raumnummer IO03<sup>22</sup> statt.

### **Beschreibung der Situation**

Das Klassenzimmer der 7D ist ein relativ kleines Klassenzimmer. Die Klassenstärke beträgt 25 Schüler. Zum Zeitpunkt der Messung befand sich der Messplatz hinter der letzten Tischreihe. Die Annahme lautete, dass sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft während der Unterrichtsstunde sehr stark erhöhen, vielleicht sogar verdoppeln würde.

### **Durchführung der Messung**

Der CO<sub>2</sub>-Sensor wurde in der Zeit des Stoßlüftens kalibriert. Die Messung erfolgte am 14.12.2010 im zwischen 10:31 Uhr und 11:11 Uhr. In der Messzeit von 41 Minuten wurden 731 Messpunkte aufgezeichnet, dies entspricht etwa 17 Erfassungen pro Minute. Es erfolgte somit im Schnitt alle fünf Sekunden ein Aufzeichnen der Daten. Während der Messung wurde gegen 10:55 Uhr ein Fenster geöffnet.

### **Ergebnis der Messung**

Die unten stehende Abbildung zeigt das Ergebnis der Messung im Klassenzimmer der 7D.

---

<sup>21</sup> Eine Bibliothek ist eine Sammlung von Klassen bzw. Funktionen mit einer gemeinsamen Schnittstelle  
<sup>22</sup> Gang I, Obergeschoss, Raum 03

Im Verlauf der Unterrichtsstunde hat sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration mehr als verdoppelt und bestätigt somit die eingangs getätigte Annahme.

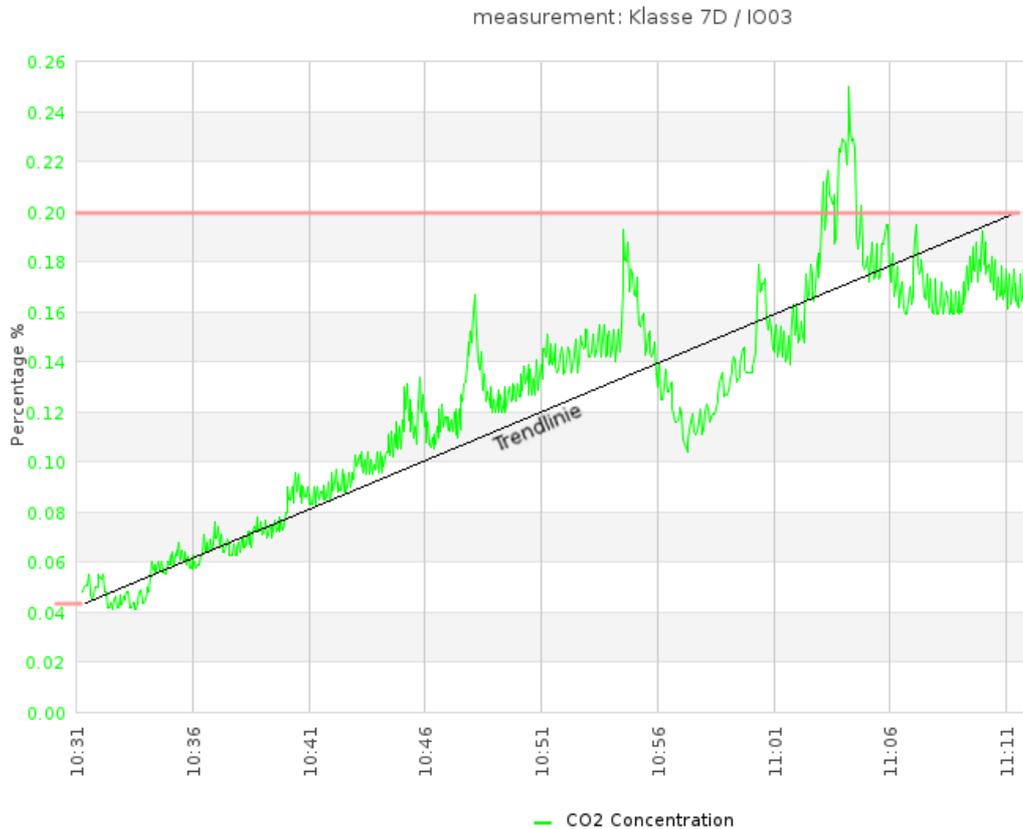


Abbildung 9: CO<sub>2</sub>-Graph mit Trendline [ab]

Die Zeitschrift Elektor verweist auf folgenden Zusammenhang: „Befinden sich zehn Personen in einem 80 m<sup>2</sup> großen Raum (3 m hoch), so verdoppelt sich die anfängliche CO<sub>2</sub>-Konzentration von 500 ppm auf 1000 ppm innerhalb von nur 1,5 Stunden" (S. 21, [elek]).

In einem Klassenzimmer sollte die CO<sub>2</sub>-Konzentration nicht 0,15% oder 1500ppm überschreiten, da sonst die Leistungsfähigkeit absinkt.

Die Temperatur steigt anfangs stark an, pendelt sich aber dann im Bereich von 22°C bis 23°C ein. Nach der Tabelle in Wikipedia zur „gefühlten Temperatur“ [gftm] gehört dieses Ergebnis in den Wertebereich der leicht erhöhten bis behaglichen Temperatur. Für das Lernen optimal wäre ein Temperaturwert von circa 21°C. Dieser Wert wird hier leicht

überschritten. Die Luftfeuchtigkeit sollte, nach der allgemeinen Definition, zwischen 40% und 60% liegen.

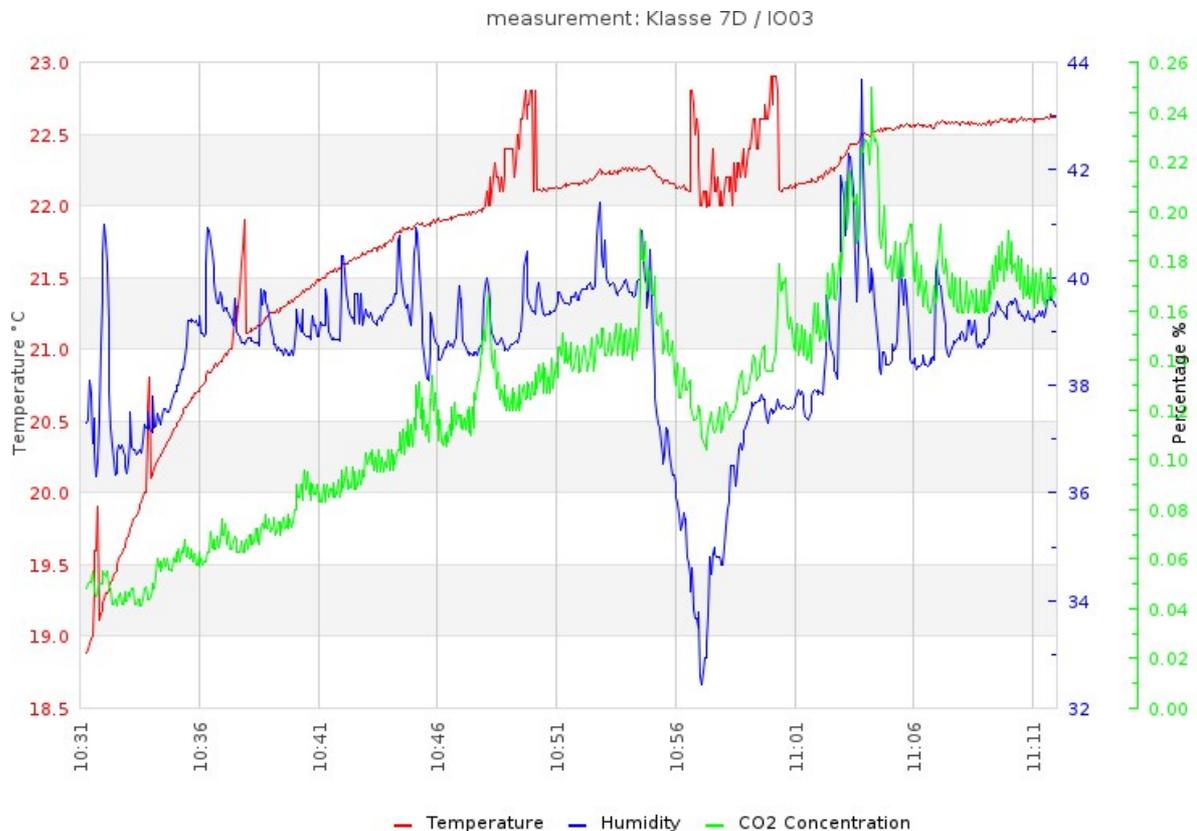


Abbildung 10: Diagramm der Messung im Klassenzimmer der 7D [ab].

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass aufgrund der Luftfeuchtigkeit keine Lüftung erfolgen müsste, da der Wert meistens unter dem Optimum liegt.

Allerdings muss dennoch bei dieser Raumgröße und -belegung öfter stoßgelüftet werden: Die CO<sub>2</sub>-Konzentration liegt weit über der Empfehlung (In Klassenzimmern nicht mehr als 1.000 ppm (nach S. 20, Abs. 3.1 [bwil])) und auch die Temperatur übersteigt den angestrebten Bereich.

Die Notwendigkeit des Lüftens wird besonders am Abfallen der Luftfeuchtigkeit und des CO<sub>2</sub>-Gehalts deutlich. Hierbei zeigt sich, dass ein kurzes Stoßlüften nicht ausreicht, um das Raumklima nachhaltig zu verbessern.

## Messung #2: Raum PH1 / Klasse 7D

Für die zweite Messung wurde die Klasse 7D in den Physiklehrsaal 1 begleitet.

### Beschreibung der Situation

Nach Betreten des Raumes machte sich eine stickige und abgestandene Luft bemerkbar. Der Physiklehrsaal ist im Vergleich zum Klassenzimmer ein sehr großer Raum.

### Durchführung der Messung

Die Messung startete um 11:41 Uhr und endete um 12:19 Uhr. In den 38 Minuten Messzeit wurden 679 Messpunkte erfasst. Aufgrund der gleichen Parameter des Mikrocontrollers wurde auch in diesem Fall circa alle fünf Sekunden eine Messung durchgeführt. Die Messung wurde wieder aus der letzten Reihe des Saals durchgeführt und der Sensor innerhalb der ersten fünf Minuten kalibriert.

### Ergebnis der Messung

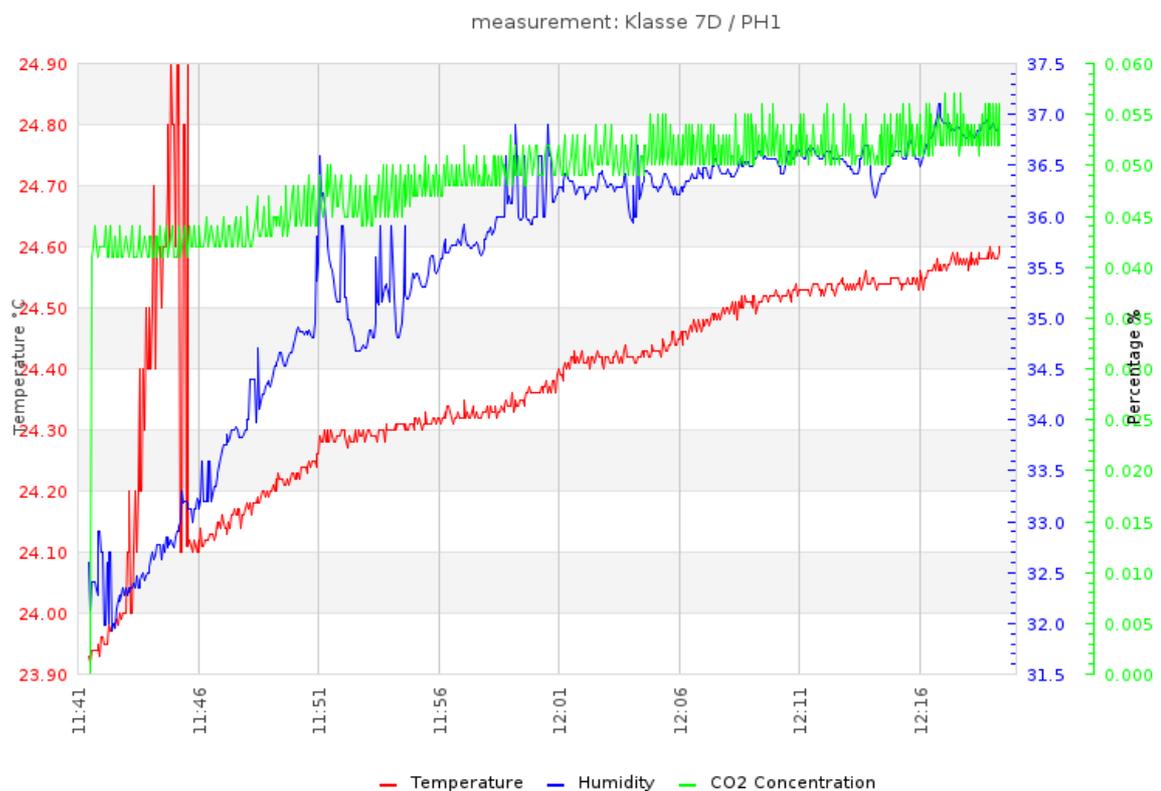


Abbildung 11: Diagramm der Messung im Physiklehrsaal 1 [ab]

Das obenstehende Diagramm zeigt ein eindeutiges Ergebnis:

Die „stickige“ Luft im Physiklehrsaal wird durch die hohe Temperatur (zwischen 24°C und 25°C) verursacht, die eingangs gemessen wurde.

Aus diesem Grund wäre ein Stoßlüften zur Temperaturreduzierung notwendig.

Die Luftfeuchtigkeit liegt knapp unter den Empfehlungen.

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft bleibt aufgrund der Größe des Raumes relativ konstant bei 0,05% oder 500ppm.

### **Messung #3: Raum EE01 / 9A**

Die dritte Messung wurde während einer Schulaufgabe im Fach Mathematik durchgeführt.

### **Beschreibung der Situation**

Die Klasse 9A schrieb im Raum EE01 in der zweiten Unterrichtsstunde eine Schulaufgabe im Fach Mathematik. Der Messplatz befand sich vor der ersten Reihe.

Die Klassenstärke, sowie Raumgröße, entsprechen den selben wie in der ersten Messung

### **Durchführung der Messung**

Diese Messung wurde am 22.12.2010 durchgeführt und begann effektiv um 8:47 Uhr, da vorherige Werte durch eine fehlende Akklimatisierung beeinflusst wurden. Beendet wurde die Messung um 9:27 Uhr. In diesen 42 Minuten wurden 762 Messpunkte erfasst.

Um 9:15 Uhr wurde während dieser Messung für drei Minuten gelüftet.

### **Ergebnis der Messung**

Das Ergebnis der Messung ist beeindruckend, denn der Messbereich<sup>23</sup> des CO<sub>2</sub>-Sensor ist vollständig ausgelastet worden. Dies bedeutet, dass der Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft über 4.000ppm angestiegen ist. Deshalb wurde der Bereich in der Grafik nachträglich grau gefärbt.

---

<sup>23</sup> Der Messbereich des Sensors liegt zwischen 400ppm und 4.000ppm

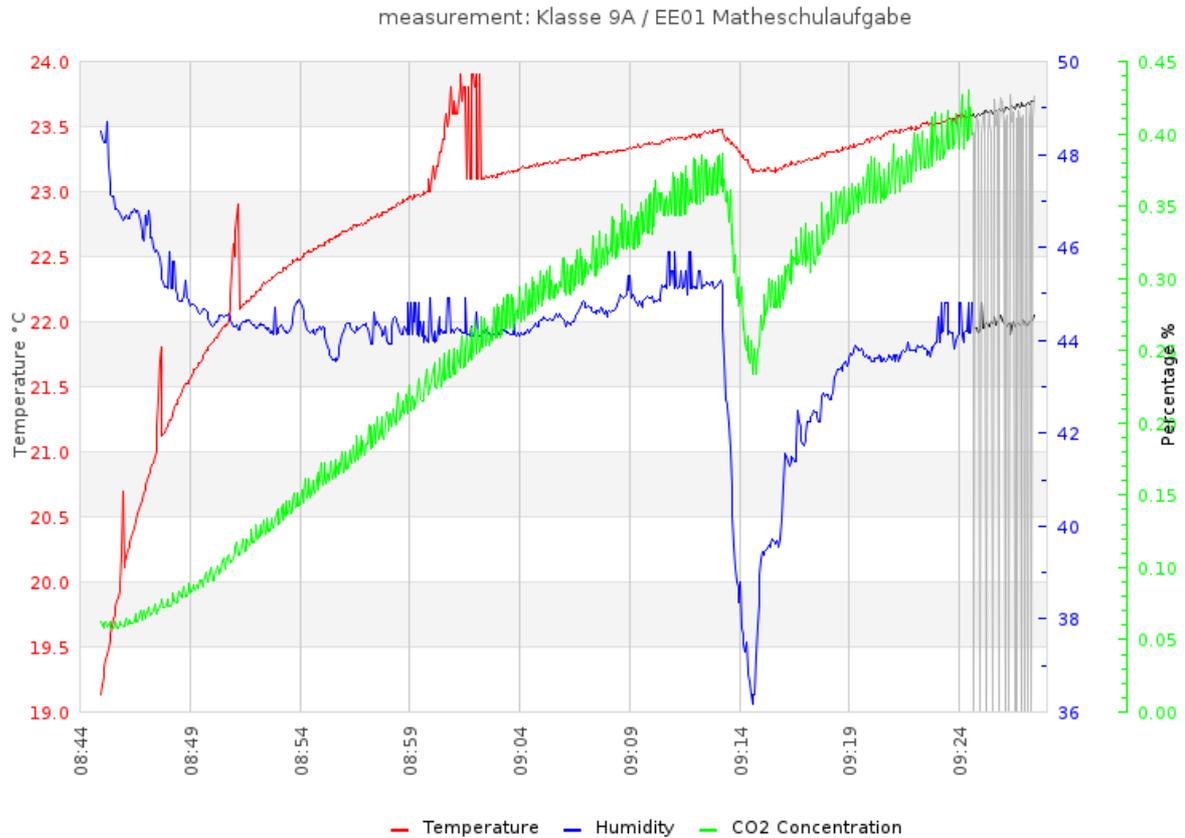


Abbildung 12: Messung in der Klasse 9A [ab]

Dieser Graph zeigt deutlich, dass sich der Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft während der Messung verzehnfacht hat.

In einer Untersuchung fanden Shaughnessy et al. (2005) heraus, dass „höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration[en] [waren] mit signifikant schlechteren Ergebnissen bei Mathematik-Tests“ (S. 22, Abs. 3.2 [bwil]) korrelieren. In Anbetracht dieser Tatsache ist es erschreckend, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt trotz Lüften nicht gesenkt werden konnte.

Auch in diesem Fall ist es im Klassenzimmer etwas zu warm (vgl. Messung im Klassenzimmer der 7D / IO03). Die Feuchtigkeit entspricht weitestgehend der Empfehlung und liegt noch knapp im Optimumsbereich.

## Diskussion der Ergebnisse

Betrachtet man die Ergebnisse unter der Fragestellung „Ist Stoßlüften während des Unterrichts wichtig, hilfreich oder gar sinnlos?“ muss leider festgestellt werden, dass Stoßlüften das Raumklima nicht verbessert.

Mein Ergebnis deckt sich somit mit der Feststellung der Untersuchung „CO<sub>2</sub> als Lüftungsparameter“: „bei durchschnittlich bis dicht belegten Klassenräumen [reicht] einmaliges Lüften in der Pause nicht aus [...] [um] erforderlichen Zuluftmengen sicherzustellen“ (S. 12, [bwil]).

Ein weiteres Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass sich erst durch eine geringe Klassenstärke und ständiges Lüften, d.h. gekippte Fenster, ein Lüftungseffekt bemerkbar macht. Diese Praktik stellt im Winter ein energetisches Problem dar. Weiterhin besteht das Risiko, durch ein starkes Absenken der Raumtemperatur sowie der Zugerscheinungen eine Erkrankung der Schüler zu forcieren.

Bezogen auf die Fragestellung dieser Arbeit stellt sich heraus, dass Stoßlüften durchaus wichtig ist, da eine zu hohe Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Luft die Leistungsfähigkeit negativ beeinträchtigt.

Leider ist die bisherige Praxis des Stoßlüftens nicht hilfreich, da kein ausreichender Luftaustausch gegeben ist. Durch das Lüften wird der Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehaltes der Luft kurzzeitig vermindert, allerdings bleibt der Trend konstant. Die positiven Auswirkungen des Lüftens beschränken sich auf einen kleinen Zeitraum.

In der Praxis bedeutet dies, dass vor allem während Prüfungen öfter gelüftet werden müsste. Weiterhin sollten sich die Lehrkraft sowie die Schüler nicht darauf verlassen, dass ein Lüften zum Unterrichtsbeginn hin ausreicht. Es ist wichtig, dass so oft wie möglich, während des Unterrichts gelüftet wird.

Neben der unzureichenden Möglichkeit, während der Unterrichtsstunde händisch zu lüften, ist die Verwendung einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung zu empfehlen. Allerdings muss diese Lüftungsanlage sowohl Temperatur, Luftfeuchtigkeit als auch die Kohlenstoffdioxidkonzentration der Luft als eigenständige Parameter betrachten, d.h. die Steuerung muss die Lüftung solange aufrecht erhalten, bis alle drei Faktoren wieder im Optimumsbereich liegen.

Leider ist der Erweiterungsbau an unserer Schule, in dem eine solche Lüftungsanlage installiert werden soll, zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht fertiggestellt, sodass keine Vergleichsmessung möglich ist – Eine Anschlussarbeit könnte die Räume überprüfen.

## **Danksagung**

Hiermit bedanke ich mich beim Elternbeitrag und den Freunden des Gymnasiums Geretsried für ihre finanzielle Unterstützung, die es mir ermöglicht hat, den CO<sub>2</sub>-Sensor zu erwerben. Ich möchte mich ebenfalls bei den Lehren und Schülern der Klassen bedanken in denen ich Messungen durchführen durfte. Weiterhin bedanke ich mich bei der Sensirion AG (Schweiz), die mir Samples des SHT11 zur Verfügung gestellt hat. Ich bedanke mich außerdem bei der mikrocontroller.net-Community, die mir in ihren Foren und in dem angeschlossenen Wikisystem viele Beispielcodes zur Verfügung gestellt hat.

## Anhang

### Quellenverzeichnis

- [ab] erstellt vom Autor dieser Arbeit
- [avrd] Atmel Corporation, ATmega32 / ATmega32L Datasheet  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf) (Besucht: 19.12.2010)
- [avrh] Atmel Corporation, AVR Hardware Design Considerations  
[http://atmel.kr/dyn/resources/prod\\_documents/doc2521.pdf](http://atmel.kr/dyn/resources/prod_documents/doc2521.pdf) (Besucht: 19.12.2010)
- [bwil] Boos, Damberger, Hutter, Moshhammer, Tappler, Twrdik, Wallner, BEWERTUNG DER INNENRAUMLUFT [http://www.fh-kufstein.at/klassenzimmerlueftung/CO2\\_in\\_Schulen/resolveUid/57302dde97b578cd885c392d6874da02](http://www.fh-kufstein.at/klassenzimmerlueftung/CO2_in_Schulen/resolveUid/57302dde97b578cd885c392d6874da02) (Besucht: 19.12.2010)
- [dfig] Figaro Engineering Inc., TECHNICAL INFORMATION FOR CDM4161A  
<http://www.figaro-gas-sensor.com/pdf/CDM4161.pdf> (Besucht: 20.12.2010)
- [elek] CO<sub>2</sub>-Messer Watchdog für dicke Luft, elektor, Ausgabe 1/2008
- [gftm] Wikipedia – Gefühlte Temperatur  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Gef%C3%BChlte\\_Temperatur](http://de.wikipedia.org/wiki/Gef%C3%BChlte_Temperatur) (Besucht: 19.12.2010)
- [shtx] SENSIRION AG, Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15)  
[http://www.sensirion.com/en/pdf/product\\_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf](http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf) (Besucht: 19.12.2010)
- [tfig] Figaro Engineering Inc., TECHNICAL INFORMATION FOR TGS4161  
<http://www.figarosensor.com/products/4161Dtl.pdf> (Besucht: 20.12.2010)

### Abbildungsverzeichnis

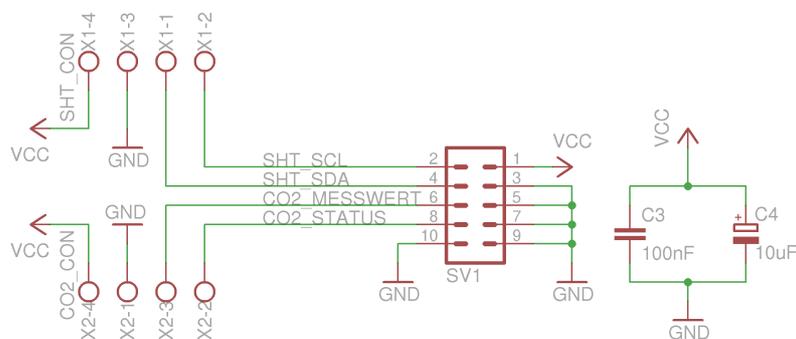
Abbildung 1: Ablauf der Messwerterfassung [ab].....	7
Abbildung 2: Aufbau des Sensormoduls [tfig].....	9
Abbildung 3: Produktfoto SHT1x [shtx].....	10
Abbildung 4: Reduzierung der thermischen Störfaktoren [shtx].....	10
Abbildung 5: Datenflussdiagramm [ab].....	10
Abbildung 6: Spannungsversorgung des ATmegas [ab].....	13
Abbildung 7: Beispiel eines kleinen "high current loops" [avrh].....	13
Abbildung 8: Beispiel eines störenden "high current loop" [avrh].....	13
Abbildung 9: CO <sub>2</sub> -Graph mit Trendline [ab].....	16
Abbildung 10: Diagramm der Messung im Klassenzimmer der 7D [ab].....	17
Abbildung 11: Diagramm der Messung im Physiklehrraum 1 [ab].....	18
Abbildung 12: Messung in der Klasse 9A [ab].....	20

## Nicht zitierte Werke

Diese Werke dienen zum Verständnis des Quelltextes, beziehungsweise der Programmierkonzepte. Sie stellen eine Literaturempfehlung dar

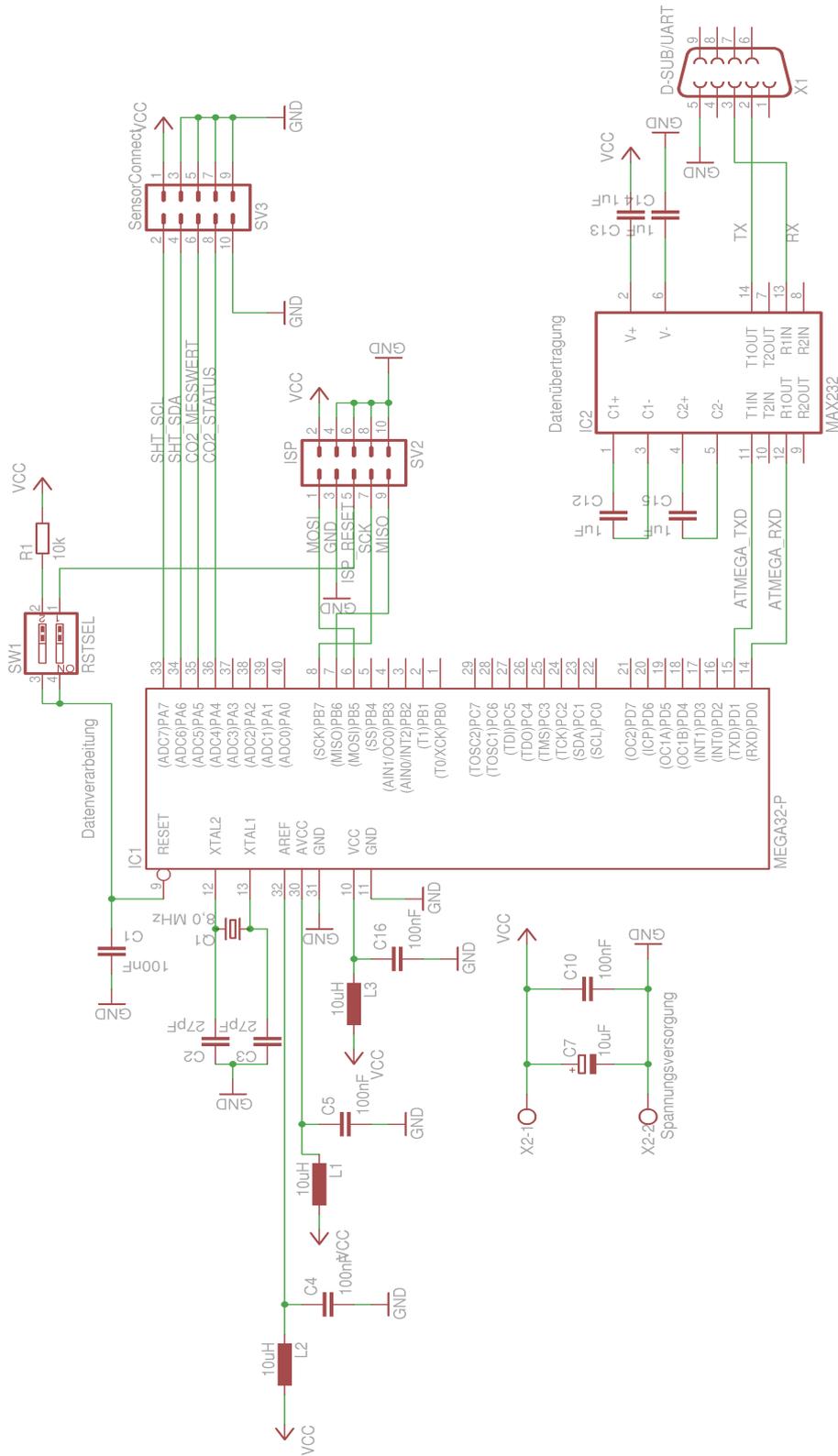
- Dirk Louis, C/C++ Professionell Programmieren mit aktuellen Standards, Markt+Technik Verlag, ISBN: 3-8272-6335-2
- Mark Kronsbein, Thomas Weinert, Sybex-WebBook PHP4, SYBEX-Verlag, ISBN: 3-8155-0502-X (Achtung: Inhalte z.g.T. veraltet, dient nur des Verständnisses)
- Stefan Pribsch, PHP 5.3 Die Neuerungen schnell+kompakt, Software & Supportverlag, ISBN: 978-3-939084-29-7
- Timo Götze, Eigene Webseiten erstellen, tewi Verlag, ISBN: 3-89362-497-X (Achtung: Inhalte z.g.T. veraltet, dient nur des Verständnisses) SELFHTML, Themengebiete: HTML/XHTML, JavaScript/DOM, PHP, <http://de.selfhtml.org>
- PHP Manual, <http://www.php.net/manual/en/>

## Schaltpläne



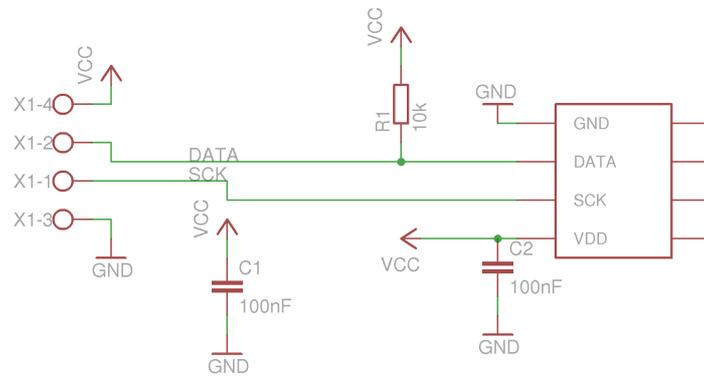
(C) Alexander Böhm, 2010

Anhang 1: Schaltplan der Sensorverbindungen



(C) Alexander Böhm, 2010

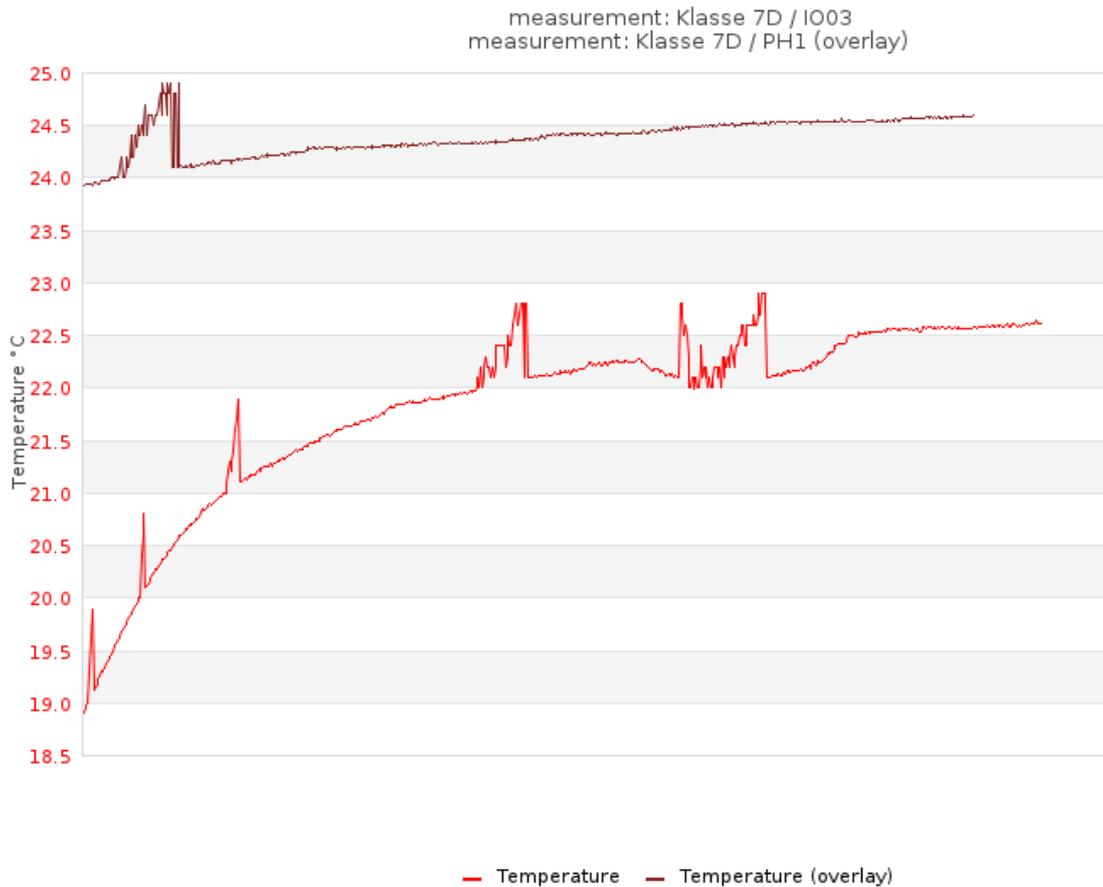
Anhang 2: Schaltplan des zentralen Boards



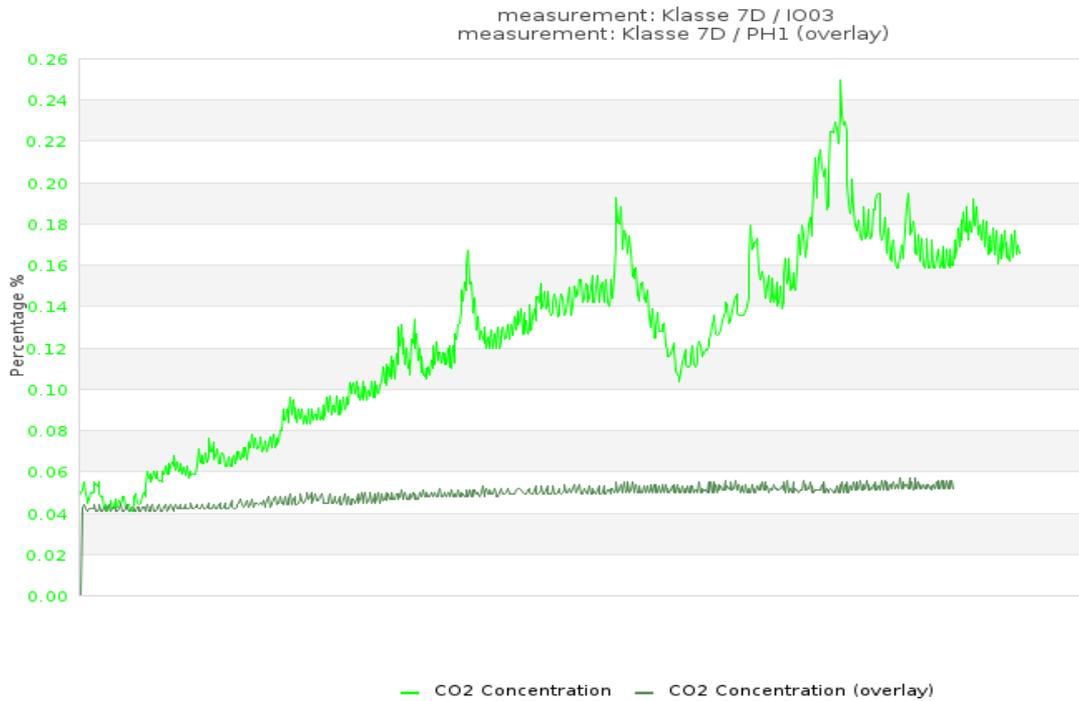
(C) Alexander Böhm, 2010

Anhang 3: Schaltplan des SHT11 Boards

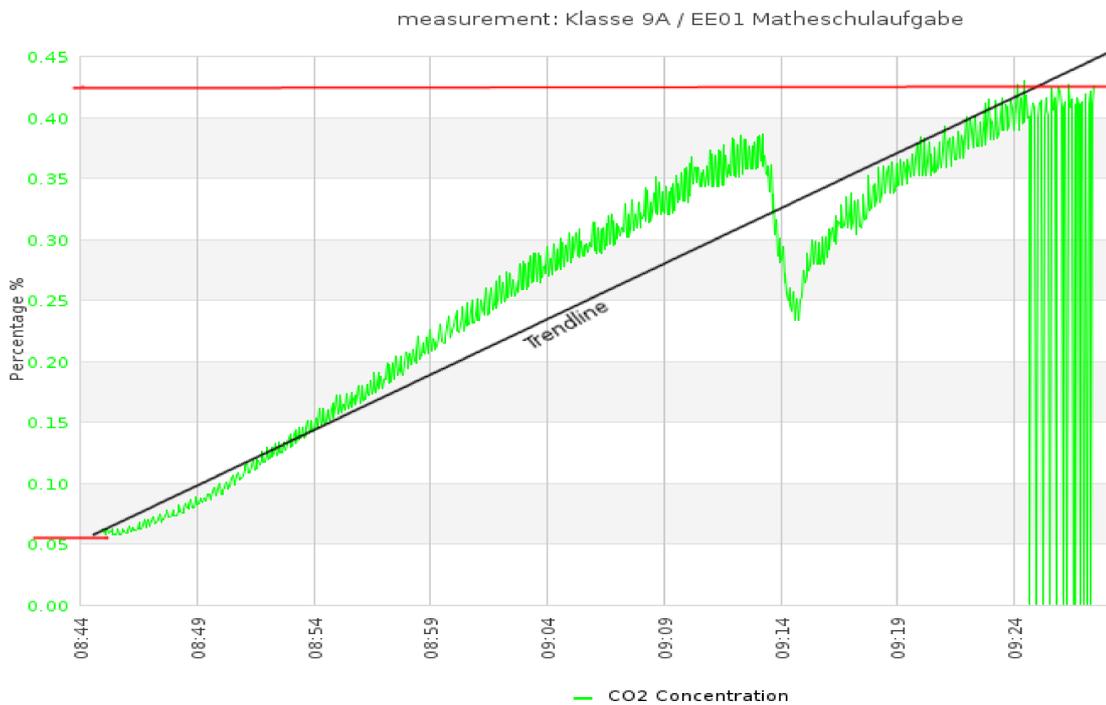
## Messreihen



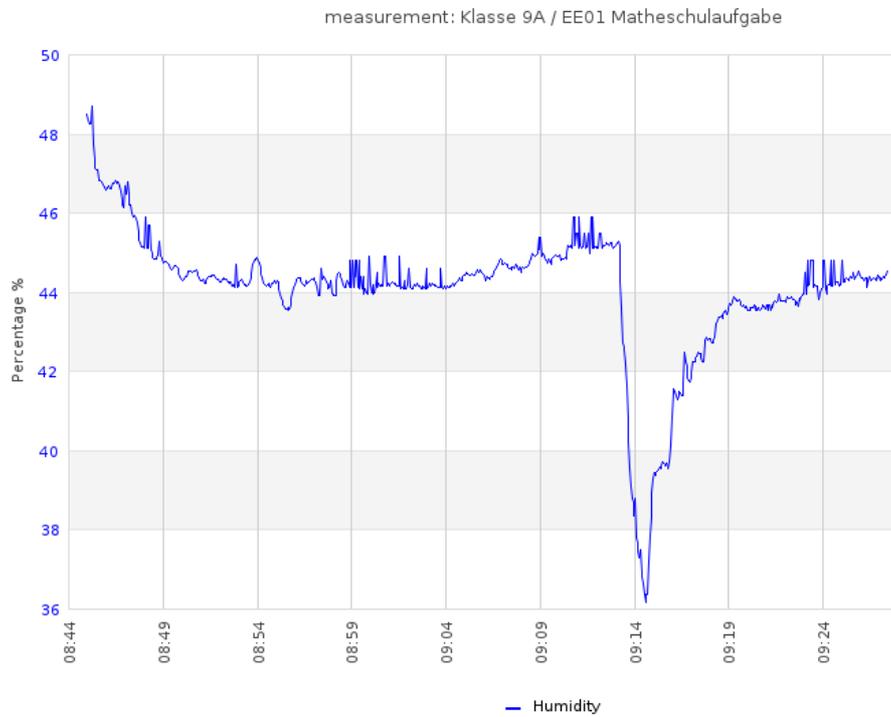
Anhang 4: Vergleich der Temperaturen in IO03 und Phy1



Anhang 5: Vergleich der  $CO_2$ -Konzentration zwischen IO03 und PHY1.

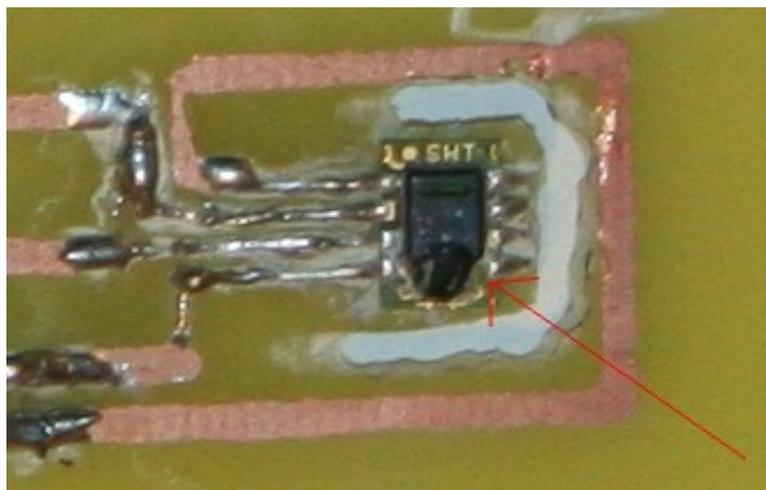


Anhang 6: Graph der  $CO_2$ -Messung in der Klasse 9A (Lüftung zwischen 9:13 - 9:16 Uhr)

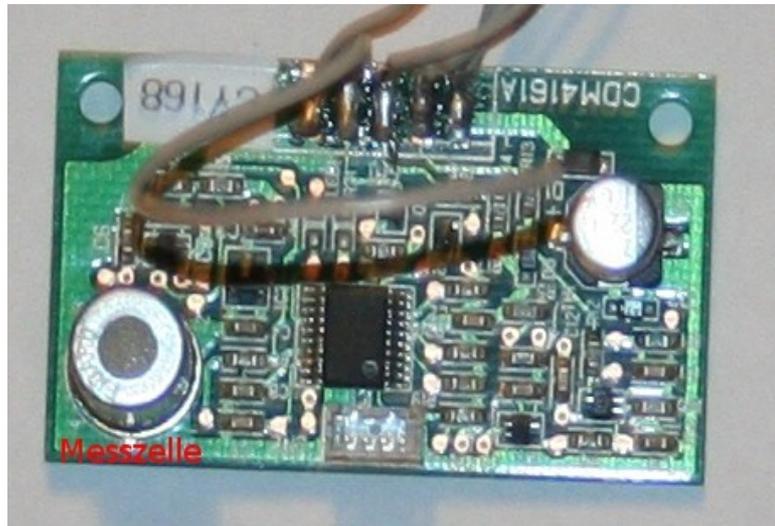


Anhang 7: Feuchtigkeitsverlauf in der Klasse 9A (Lüftung zwischen 9:13 - 9:16 Uhr)

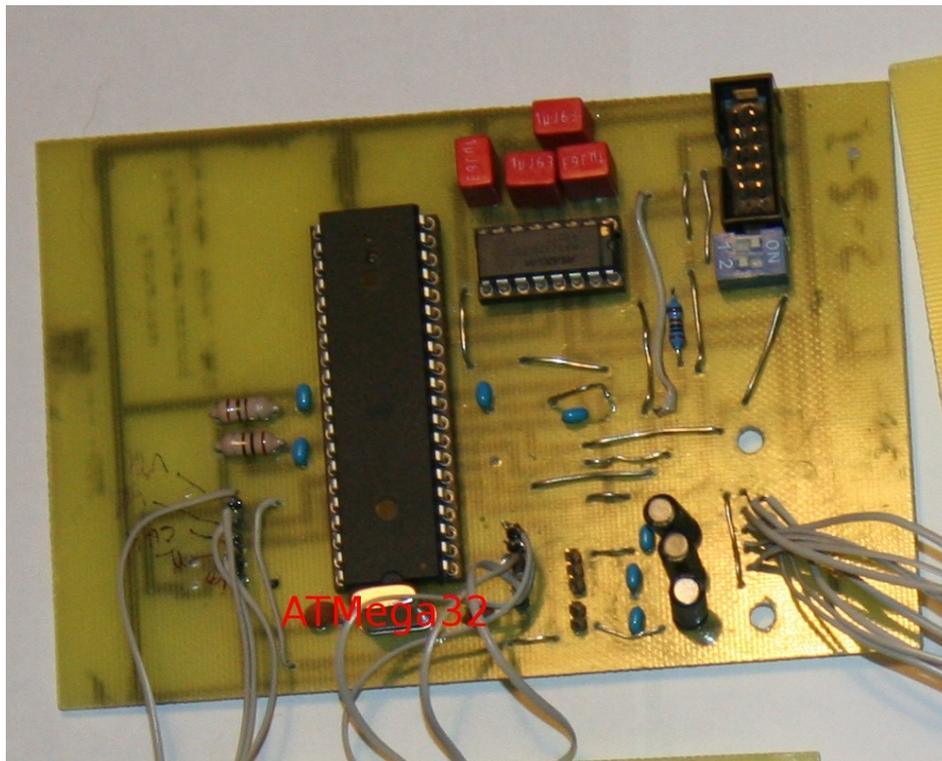
### **Bilder aus der Praxis**



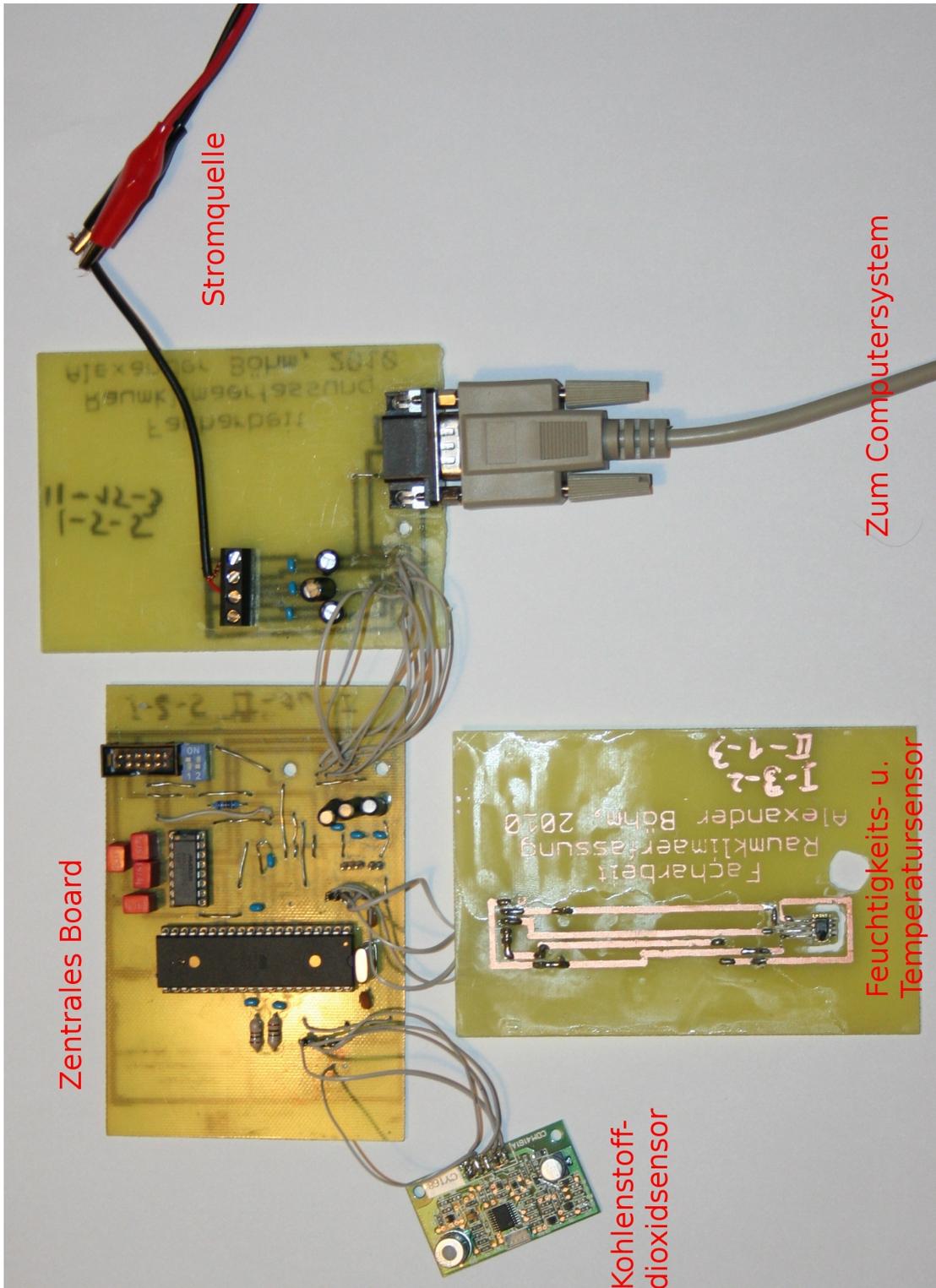
Anhang 8: Temperatur- u. Feuchtigkeitssensor



Anhang 9: Kohlenstoffdioxidensor



Anhang 10: Zentrales Board



Anhang 11: Übersicht über alle Komponenten

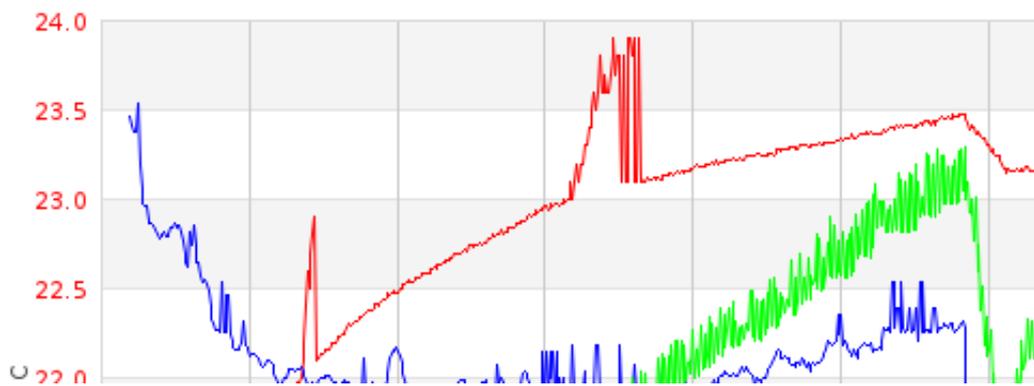
## Technical Information

measurement Start 22.12.2010 - 08:44:57  
measurement End 22.12.2010 - 09:27:25  
Measuring Time 42 mins  
Measuring Points 762

## Graphs

### Combined Graph

measurement: Klasse 9A / EE01 Mathe



Anhang 12: Screenshot der Software

Measuring Time	22.12.2010 - 00:27:25
Temperature [°C]	23.69
Humidity [%]	44.55
CO2 Concentration [%]	0.426
Last Message	

Anhang 13: Screenshot der Liveansicht

## **Abbildungsverzeichnis Anhang**

Anhang 1: Schaltplan der Sensorverbindungen.....	24
Anhang 2: Schaltplan des zentralen Boards.....	25
Anhang 3: Schaltplan des SHT11 Boards.....	26
Anhang 4: Vergleich der Temperaturen in IO03 und Phyl.....	26
Anhang 5: Vergleich der CO <sub>2</sub> -Konzentration zwischen IO03 und PHY1.....	27
Anhang 6: Graph der CO <sub>2</sub> -Messung in der Klasse 9A (Lüftung zwischen 9:13 - 9:16 Uhr) .....	27
Anhang 7: Feuchtigkeitsverlauf in der Klasse 9A (Lüftung zwischen 9:13 - 9:16 Uhr).....	28
Anhang 8: Temperatur- u. Feuchtigkeitsensor.....	28
Anhang 9: Kohlenstoffdioxidensor.....	29
Anhang 10: Zentrales Board.....	29
Anhang 11: Übersicht über alle Komponenten.....	30
Anhang 12: Screenshot der Software.....	31
Anhang 13: Screenshot der Liveansicht.....	31

Sämtliche hier referenzierte Bilder stammen vom Autor dieser Arbeit.

## **Datenstruktur Begleitdatenträger**

- Hauptverzeichnis
  - measurements
    - gymger\_7d\_9a.sql
      - Diese Datei enthält das Datenbankabbild für die Messungen der Klasse 7D in IO03 und in PH1 sowie die Schulaufgabe der Klasse 9A in Mathematik
  - sources
    - elek.pdf
      - Dieses Dokument enthält den Artikel der Elektorzeitschrift „CO<sub>2</sub>-Messer – Watchdog für dicke Luft“ (Quellenreferenz: [elek])
    - datasheets
      - avrd.pdf
        - Datenblatt für den ATmega32(L) (Quellenreferenz: [avrd])
      - avrh.pdf
        - AVR042: AVR Hardware Design Considerations (Quellenreferenz: [avrh])
      - dfig.pdf
        - Technical Information for the CDM4161A CO<sub>2</sub> Module (Quellenreferenz: [dfig])
      - MAX232ECPE.pdf

- Datenblatt für den MAX232-Pegelwandler
- shtx.pdf
  - Datenblatt für SHT1x-Sensor (Quellenreferenz: [shtx])
- tfig.pdf
  - TECHNICAL INFORMATION FOR TGS4161 (Quellenreferenz: [tfig])
- webpages
  - Jeder Quelltext enthält Informationen zum letzten Abruf der entsprechenden Datei
  - AVR-GCC/AVR-GCC-Tutorial.htm
    - Das Microcontroller.net AVR-GCC Tutorial (Informationen zur C-Programmierung)
  - bwil/co2.pdf
    - Artikel „Bewertung der Innenraumlufte“ (Quellenreferenz: [bwil])
  - bwil/CO2\_in\_Schulen.htm
    - Webseite zu [bwil] mit weiteren Informationen zur CO<sub>2</sub>-Problematik in Klassenzimmern
  - co2\_gestis/lpext.dll.htm
    - Informationen zu Kohlenstoffdioxid
  - gtfm/Gefuehlte\_Temperatur.htm
    - Wikipediartikel zur „Gefühlten Temperatur“ (Quellenreferenz: [gtfm])
  - JpGraph/JpGraph - Most powerful PHP-driven charts.htm
    - Lizenzhinweis zu JpGraph
  - SHT11/145736.htm
    - Microcontroller.net Forum zur Ansteuerung des SHT11
  - SHT11/Sample\_Code\_humidity\_sensor\_SHTxx.pdf
    - Beispielcode von Sention zur Ansteuerung des Sensors
  - UART/Der\_UART.htm
    - Microcontroller.net Wikiartikel über „AVR-GCC-Tutorial/Der UART“
- pictures
  - measurements
    - Graphen aus der Auswertungssoftware
  - schematic
    - Bilder der Schaltpläne
  - datasheets
    - Diese Bilder wurden aus den Datenblättern übernommen
  - images

- Erläuternde Bilder zur Facharbeit (z.B Flussdiagramme)
- sourcecode
  - C
    - C-Quelltexte für den Mikrokontroller
  - PHP
    - datenlogger
      - Aufzeichnungssoftware für die Daten (konsolenbasiert)
    - webinterface
      - PHP-Scripte für die Weboberfläche
    - global\_files
      - Konfigurationsdateien (wird von webinterface und datenlogger benötigt)
    - docs/index.html
      - Dokumentation des PHP Quelltextes
- debugging/HTerm.exe
  - Terminalprogramm zum Debuggen der Kommunikation

## Erklärungen

### ***Eigenständigkeitserklärung***

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt habe und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

Ich versichere, dass ich die Teilnahmebedingungen des Wettbewerbs unter [www.jugendforscht.de](http://www.jugendforscht.de) anerkenne und weitere Vorgaben des Veranstalters einhalten werde. Ich habe die Arbeit selbständig angefertigt und alle verwendeten Quellen, alle unterstützenden Unternehmen, Institutionen und Personen sowie die Art der Unterstützung in der Arbeit genannt. Bei Bildern, die in der schriftlichen Fassung und/oder auf Postern veröffentlicht werden, sind die Quelle (Agentur/Institution) und der Name des Fotografen von mir anzugeben. Im Falle von Forschungsarbeiten mit Tieren erhält der zuständige Wettbewerbsleiter im Dezember das vollständig ausgefüllte und unterschriebene Tierschutzformular. Des Weiteren versichere ich, dass ich die Wort-/Bildmarken Jugend forscht (Logo und Schriftzug) ausschliesslich beim Wettbewerb Jugend forscht – Schüler experimentieren und bei weiteren Veranstaltungen der Stiftung Jugend Forscht e.V. zur Gestaltung der schriftlichen Arbeit und des Ausstellungsstandes nutze, nicht aber bei einer Präsentation des Projektes im Internet. Eine Produktwerbung mit den Wort-/Bildmarken Jugend forscht ist grundsätzlich ausgeschlossen. Die Wort-/Bildmarken Jugend forscht dürfen nicht verfremdet werden und müssen immer freigestellt erscheinen.

### ***Datenschutzrechtliche Einwilligung***

Ich bin damit einverstanden, dass die hier gemachten Angaben über meine personenbezogenen Daten ebenso die im Rahmen des Wettbewerbes aufgenommen Fotos und Filmaufnahmen zu Zwecken der Durchführung des Wettbewerbes Jugend forscht und der Presse- um Öffentlichkeitsarbeit von der Stiftung Jugend forscht e.V. und ihren offiziellen Partnern erhoben, verarbeiten und genutzt werden. Zu den offiziellen Partnern, an welche die Stiftung Jugend forscht e.V. erhobenen Daten übermittelt werden, zählen insbesondere Wettbewerbsleiter/innen, Patenunternehmen/-institutionen, Juroren und Preisstifter/innen. Während der Dauer der jeweiligen Wettbewerbsrunde dürfen meine Daten zwecks direkter Kontaktaufnahme an die Medien weitergegeben werden. Darüber hinaus werden meine Daten zum Zweck der Ehemaligen-Arbeit bei der Stiftung Jugend forscht e.V. gespeichert. Mir ist bewusst, dass die Angaben zu Name, Alter, Wohnort, Schule/Ausbildungsbetrieb und Bundesland veröffentlicht werden.

Diese Einwilligung kann ich jederzeit mit Wirkung für die Zukunft widerrufen. Ein Widerruf der sich (auch) auf die Angaben zu Namen, Alter, Schule/Ausbildungsbetrieb oder Bundesland bezieht, kann jedoch zum Ausschluss vom Wettbewerb führen

Geretsried, den 02.03.2011

---

Alexander Böhm / Teilnehmer 1