

# Workshop DIY Messtechnik für Höhlen- Möglichkeiten und Grenzen



Martin Rüsseler (KGM)

Christian Strobl (KGM)

Robert Queitsch (KGM)

Martin Queitsch (KGM)

# Vorwort

Im Rahmen der langjährigen Forschungsarbeiten in Mühlbach sind zahlreiche Messgeräte entwickelt worden, zumeist aus Gründen der Verfügbarkeit geeigneter Technik und des entsprechenden finanziellen Einsatzes. Einige davon wollen wir im Workshop vorstellen, und vor allem auch die Möglichkeiten aufzeigen, wie man mit relativ einfachen Mitteln brauchbare Ergebnisse erzielen kann. Selbstverständlich haben solche Projekte auch ihre Grenzen- auch darauf wollen wir eingehen - was kann man erwarten. Häufig interessiert in erster Linie ein qualitativer Verlauf einer Größe und nicht unbedingt die absolute Genauigkeit. Möglichkeiten für die Kalibrierung werden aufgezeigt.

Folgende Systeme werden bzw. wurden diskutiert:

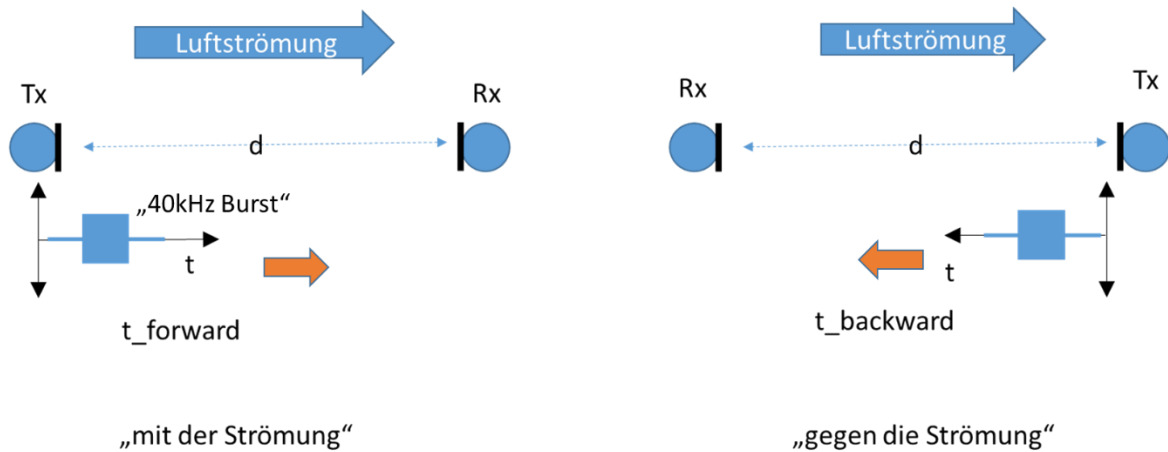
- Anemometer
- Datenlogger (Leitfähigkeit, Pegel, Temperatur Trübung)
- Fluorimeter
- Peilungssysteme
- CO<sub>2</sub>
- Lidar
- Radonmessung
- Radon-Folgeproduktmessung

## Anemometer

Mit Anemometern lassen sich Luftströmungen erfassen. Diese können sowohl durch Temperaturdifferenzen zwischen der Außenluft und der Höhlentemperatur entstehen, als auch durch Änderung des Außenluftdrucks, wenn dieser auf ein geschlossenes Höhlenvolumen arbeitet. Mit entsprechenden Methoden der Signalverarbeitung lassen sich Rückschlüsse auf ein zu erwartendes Volumen ziehen.



Klassische Flügelradanemometer sind für die geringen Luftbewegungen in den meisten Höhlen nicht sinnvoll einsetzbar. Ultraschallsysteme lassen sich als DIY Projekt gut realisieren. Hierbei wird in einer definierten Messstrecke in einem Rohr in beide Richtungen, also mit und gegen die Richtung, eine Ultraschallwelle (ca. 40KHz) erzeugt und am jeweiligen Ende empfangen. Ist keine Strömung vorhanden, braucht diese Welle in jede Richtung gleich lang. Liegt eine Strömung vor, so wird die Welle mit der Strömung schneller und die Welle gegen die Richtung langsamer. Es lässt sich damit eine Differenz ermitteln, die ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit ist. Die wechselseitige Messung ist notwendig, damit die massiven Abhängigkeiten der Ausbreitung von der Schallgeschwindigkeit ausgeschlossen werden können.



$$v = \frac{d}{2} * \left( \frac{1}{t_{forward}} - \frac{1}{t_{backward}} \right)$$

Mit integrierten Drucksensoren (z.B. BMP 280) oder den Nachfolgeprodukten kann der Luftdruck aufgezeichnet werden und mit Temperatursensoren entsprechen z.B. die Außenlufttemperatur. Die Strömung kann mit etwa 2cm/s aufgelöst werden.

#### Realisierung:

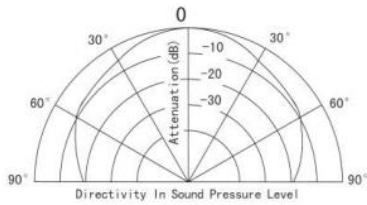
Für alle Systeme, die als Logger länger in Höhlen verbleiben sollen, muss man unbedingt Ultraschallsensoren verwenden, wie sie für z.B. Einparkassistenten in Fahrzeugen Verwendung finden (z.B.: A-18P20). Diese sind in Aluminium gekapselt und damit wasserdicht, dafür allerdings unempfindlicher. Einfache Sensoren, wie sie in Fernbedienungen usw. benutzt wurden, kommen mit der Feuchtigkeit langfristig nicht zurecht. Die Auswertung der Signale muss mit einem schnellen Mikrocontroller gemacht werden, da die zeitliche Auflösung hoch genug sein muss. (100Mhz mit einem Input Capture System ist gut zu verwenden). Eine Druckmessung mit integrierten Sensoren sollte mit einer Gore-Membran (oder Teflon Band) von dem direkten Einfluss der Umwelt geschützt werden. Hierbei entsteht ein gewisser Tiefpass, der für moderate Abtastraten im Minutenbereich keinen Einfluss haben sollte.

Aufbautechnisch empfiehlt es sich, beide Ultraschallsensoren und deren Verstärker räumlich zu separieren, damit hier keinerlei Übersprechen vom Sender in den Empfänger passiert.

Grundsätzlich kann man zwei verschiedenen Ansätze wählen:

Eine echte Pulslaufzeitmessung, oder eine Phasenmessung. Die Pulslaufzeitmessung ist aufwändiger aber kann prinzipiell jede Strömungsgeschwindigkeit richtig messen; die Phasenmessung ist deutlich einfacher, hat aber eine Geschwindigkeitsobergrenze, da die Phasen bei einer bestimmten Geschwindigkeit überläuft und das Ergebnis dann mehrdeutig wird. Für unsere Anwendung ist die Phasenmessung völlig ausreichend, da die Strömungsgeschwindigkeiten nicht so hoch werden.

Als Sensorrohre eignen sich neben den HD-Abflussrohren besonders auch die 150mm Kunststoffrohre aus der Ablufttechnik (Küchenabzugsrohre aus dem Baumarkt).



## Ultraschallsensor A-18P20

### Herausforderungen:

Die verfügbaren Ultraschallsensoren sind nicht für solche Anwendungen gedacht, und sie haben teils deutliche Toleranzen in ihrer Resonanzfrequenz. Idealerweise sollten beide Sensoren die gleiche Resonanzfrequenz haben. Daher ist hier eine gewisse Selektion der Bauteile nötig. Der Wandler mit der geringeren Resonanzfrequenz kann auch durch vorsichtiges Abschleifen der Stirnfläche auf die passende Frequenz gebracht werden.

Die finale Frequenz sollte vom Controller einstellbar gemacht werden und auf die selektierten Wandler angepasst sein. Es ist auch möglich diese Anpassung per Software vor den Messungen durchzuführen.

Bei der Phasenmessung sollten Reflektionen der Schallwelle vermieden werden, da sie Artefakt in die Messung bringen. Das kann z.B. mit Akustikschaumstoff erreicht werden. Eine relative kurze Messzeit pro Richtung kann hier auch helfen.

Die prinzipielle Kalibrierung kann mit einem selbstgebauten „Windkanal“ aus einem regelbaren PC-Lüfter gemacht werden, wenn man die dazugehörigen Lüfterkurven zur Verfügung hat. Die Genauigkeit ist natürlich nicht allzu hoch, aber meist ausreichend.

### Probleme:

Ein Problem kann eine mögliche Betauung besonders in wasseraktiven Höhlen werden. Sobald sich Wassertropfen auf den Ultraschallgebern bilden, wird die Messung stark verfälscht bis unbrauchbar.

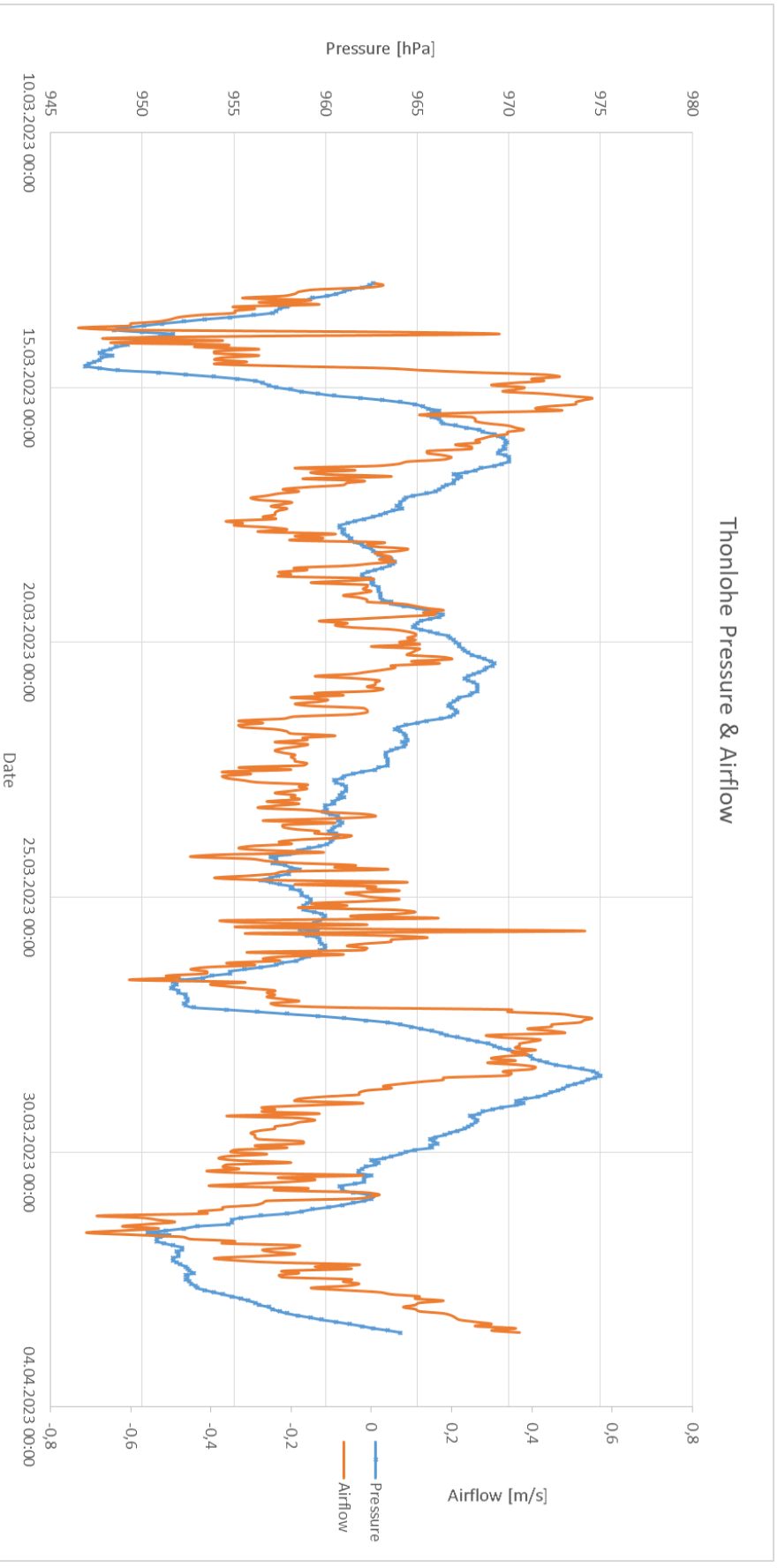
Barometrische Strömungsänderungen können sehr schnell sein und daher braucht man hier Abtastraten im Minutenbereich.

Systemkosten: ca. 100-200 Euro.



# Barometrischer Luftzug in der Pfallergrube

Thonlohe Pressure & Airflow



# Schätzung unbekannter Höhlenteile durch Druck- und Strömungsgeschwindigkeitsmessungen

In vielen Fällen kann die barometrische Bewetterung einer Höhle durch ein sogenanntes lineares Kleinsignalmodell nachgebildet werden, da der natürliche Luftdruck an einem Punkt der Erdoberfläche nur um wenige Prozent um den Mittelwert schwankt.

## Voraussetzungen:

- Ein dominanter Eingang,
- sehr enge kleinvolumige Gangstrecken wechseln sich mit großvolumigen Hallen oder Gangpassagen ab
- hinreichend gleichförmige Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen in der Höhle,
- der natürliche Luftdruck am Eingang schwankt nur um wenige Prozent um den Mittelwert (i.d.R. gegeben).

## Weitere Vereinfachung:

- Der Luftdruck wird in jedem Gangelement oder in jeder Halle als variabel, aber in dem jeweiligen Volumenelement als gleich angenommen.

Dann kann wie mit einem einfachen linearen elektrischen Modell gerechnet werden.

## Analogien:

elektrische Spannung  $\Leftrightarrow$  Luftdruck,

elektrischer Strom  $\Leftrightarrow$  Volumenstrom (= Luftgeschwindigkeit mal Querschnittsfläche)

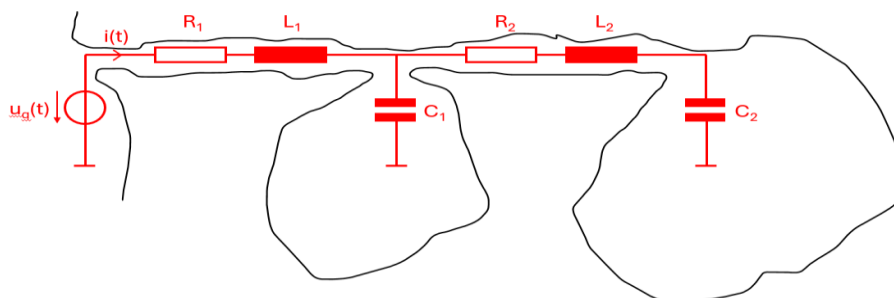
elektrischer Widerstand  $\Leftrightarrow$  Strömungswiderstand,

elektrische Induktivität  $\Leftrightarrow$  Fluidträgheit,

elektrische Kapazität  $\Leftrightarrow$  Druckspeicher,

elektrische Ladung  $\Leftrightarrow$  Luftvolumen bei Referenzdruck

(= Volumen einer Halle dividiert durch Referenzdruck mal aktuellem Druck)



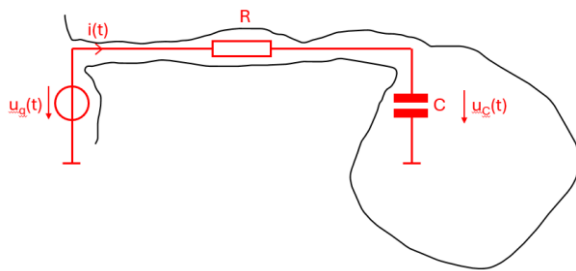


Somit kann mit in der Elektrotechnik gebräuchlichen Methoden zur linearen Netzwerksimulation (Lösung des beschreibenden Differentialgleichungs-systems z.B. über Laplace-Transformation) gerechnet werden.

Weiter können Methoden der Systemidentifikation (Instrumentalvariablen- und Schwarmverfahren) genutzt werden, um Modellelemente aus Luftdruck- und Luftgeschwindigkeitsmessungen zu ermitteln.

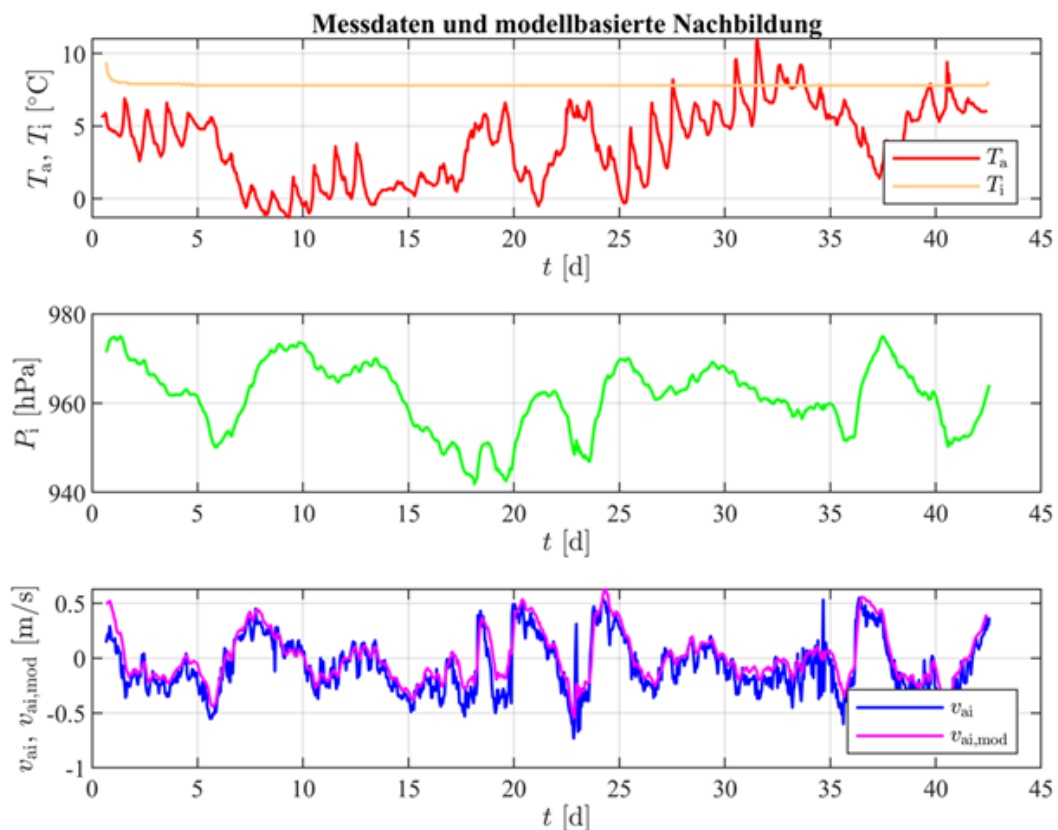
Anwendungsbeispiel: Schätzung unbekannter Räume hinter Versturzungspassage in Pfallergrube

Einfaches Ersatzmodell aus engem Gang und Halle:



Verwendung von gemessenen Druck- und Luftgeschwindigkeitsverläufen über gut 40 Tage an Messstelle in der Höhle zur Abschätzung der beiden Ersatzelemente Strömungswiderstand und Druckspeicher bei konstanter Höhlentemperatur.

Hinreichende Güte der Schätzung durch Nachbildung der Luftgeschwindigkeit am Modell bei Erregung mit Drucksignal über-prüfbar (höherer Modellgrad bringt nur geringe Verbesserungen)



### Ergebnis für Pfallergrube:

Strömungswiderstand von  $0,0387 \text{ d hPa} / \text{m}^3$  (d = Tag)

Druckspeicher von  $11,67 \text{ m}^3 / \text{hPa}$

Würden anfänglich konstante Bedingungen von 960 hPa Luftdruck vorliegen und dann der Druck dauerhaft um 1 hPa erhöht werden, würden  $11,67 \text{ m}^3$  Luft zu 961 hPa in die Höhle einfließen, bis der Druckausgleich in der Halle erfolgt ist.

Somit geschätztes Hallenvolumen: ca.  $11\,000 \text{ m}^3$

Anbindung an Mühlbachquellhöhle?

Wie lang ist enge verbrochene Gangpassage? 5 m oder 5 000 m?

Hier mit Strömungswiderstandswert leider keine klare Abschätzung möglich.

### Weiteres:

Durch den Mond bedingte Gezeiten im Luftdruck feststellbar: 2 Maxima und 2 Minima pro Tag

Allgemeine Schlussfolgerungen:

Treten in der Luftbewegung messbare Eigenresonanzen des Höhlensystems auf (z.B. zeitweilige Wechsel von Einströmen und Ausströmen bei massivem Luftdruckabfall außen), so können Gänge mit großen Querschnitten vermutet werden (schwingende Luftmassen). Bisher Bestätigung an einem Fallbeispiel in Deutschland.

## Fluorimeter

Fluorimeter dienen zum Aufzeichnen von Tracer-Durchgängen bei Karstwassermarkierungen.

Erhältliche Systeme sind in der Regel für private Unternehmungen unbezahlbar. Zwei verschiedene Konzepte sind im praktischen Einsatz in MBQH verwendet worden. Das Grundprinzip beinhaltet die Anregung der Farbstoffe durch kurzwelliges Licht mit etwa 400nm. Dieses Licht kann mittlerweile mit LEDs erzeugt werden, und man muss nicht mehr auf Dampf lampen und Monochromatoren zurückgreifen. Der Farbstoff emittiert dann in seiner charakteristischen Wellenlänge. Diese Wellenlänge kann bestimmt werden und die Intensität ist ein Maß für die Konzentration.

Für Uranin haben wir beispielsweise eine Wellenlängendifferenz von 20nm zwischen Anrege- und Emissionsmaximum.

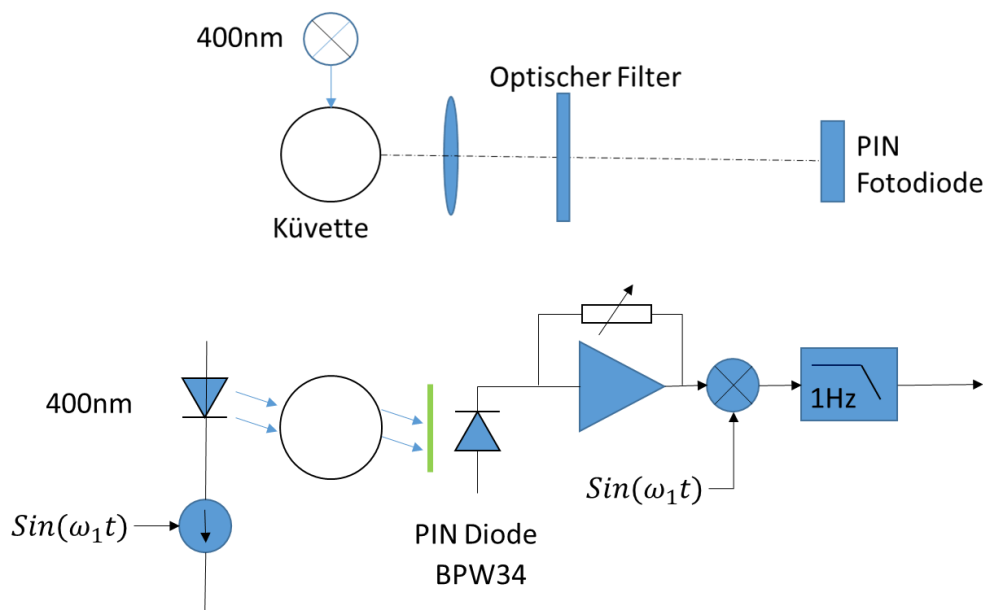
Will man die typischen Farbstoffe wie Uranin, Rhodamin, Naphtionat usw. erfassen, lässt sich die spektrale Zerlegung mit optischen Gittern realisieren und unter Verwendung einer CCD Zeile kann dann ein Zeilenbild des Spektrums aufgenommen werden. Ein Bereich von 400 bis 600 nm lässt sich gut realisieren. Bei diesen Systemen hat man es mit diversen Disziplinen zu tun, von der Optik über die damit verbundene mechanische Präzision, über die Auswerteelektronik bis hin zur Algorithmik ist hier alles gefordert.

Wichtig ist die Dynamik des Systems bezüglich der Konzentration der Farbstoffe. Da man in der Regel keine Ahnung von der zu erwartenden Konzentration hat, muss das System so entworfen werden, dass es auch mit hohen Konzentration zurechtkommt, ohne dass Bereichsüberschreitungen auftreten. Ansonsten lassen sich die Durchgangskurven nur unzureichend auswerten.

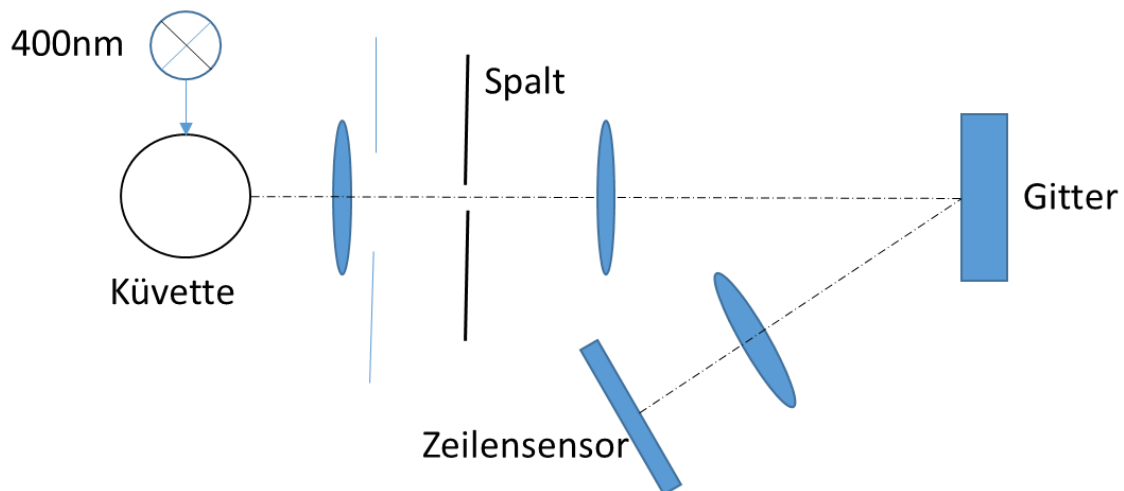
Will man sehr hohe Empfindlichkeit erreichen, wird man auf Photomultiplier oder zeitgemäßer auf SiPM Dioden setzen müssen. Damit steigen die Kosten und die Komplexität nochmals an.

Sind die zu erwartenden Farbstoffe am Messort bekannt, kann man auch über optische Kanalfilter die entsprechenden Farbstoffe separieren und die Komponenten wie optischer Spalt und Gitter entfallen dann, die Kanaltrennung ist aber je nach Farbstoff begrenzt. Diese Filter sind im Handel erhältlich.

### Anordnung mit Kanalfiltern:



## Spektrometer:



Spalt: Rasierklingen

Sensor: TDC1304DG

Grating: Thorlabs GR25-1205 (500nm, 1200/mm)

Zylinderlinse: LJ1622L1-A 25,4x28, f25,4

Kondensor: 25,5mm, f22.0 SK102

Bikonvex-Linse: 30,8mm, f31,25 C2W1

## Probleme:

Der inline Prozess der Messung in der Höhle hat mit einem grundsätzlichen Problem zu kämpfen: im Gegensatz zum Labor, in dem die Proben vorher über eine Zentrifuge von Trübstoffen befreit werden können, kann man hier nur über eine Filterung einen Teil der Trübstoffe entfernen. Allein das reduziert die Empfindlichkeit.

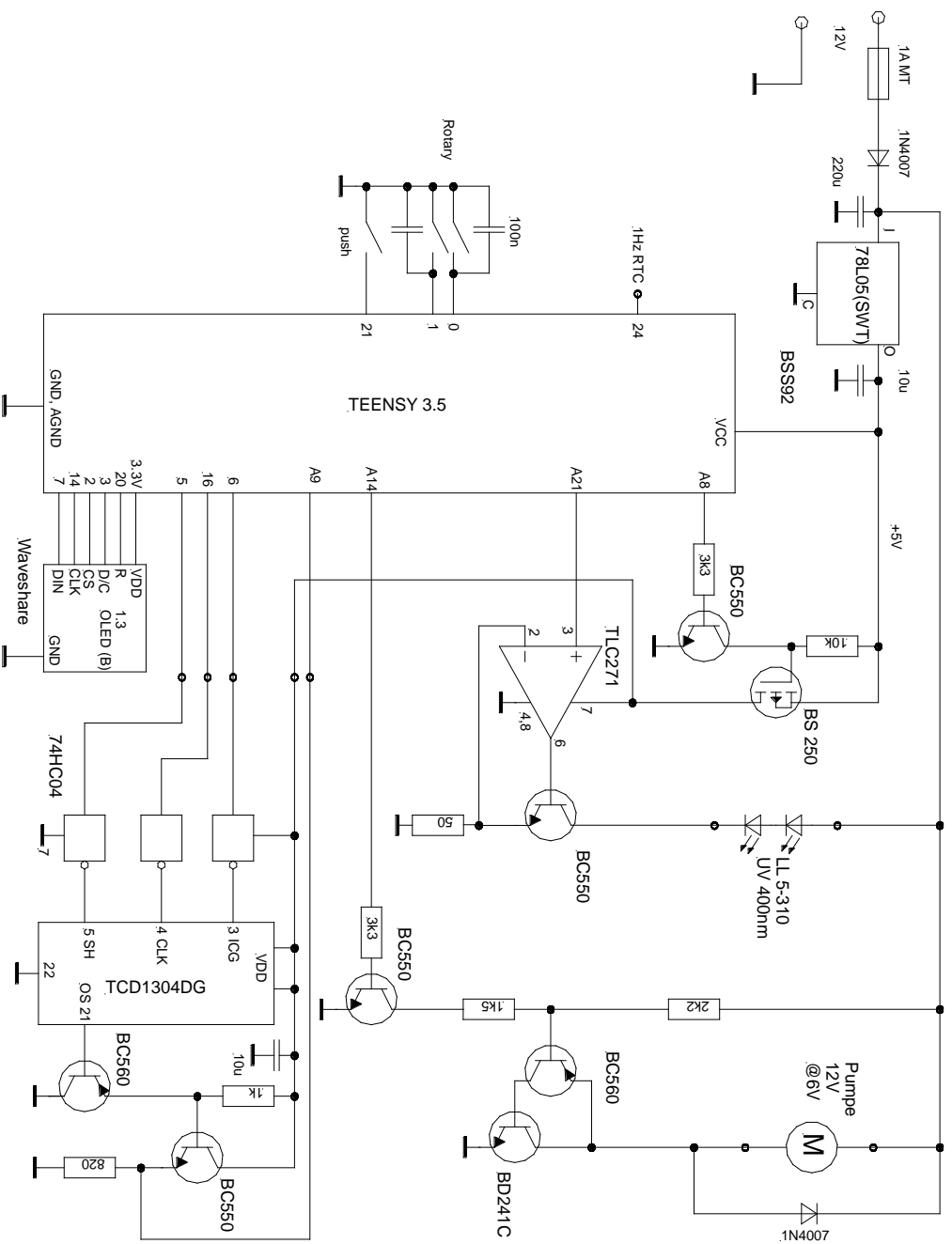
Die erreichbare Empfindlichkeit kann sich nicht mit Laborfluorimetern messen lassen. Das ist aber für viele Anwendungen in der Höhlenforschung nicht so relevant, da man die Konzentration der Farbstoffe hoch wählen wird, damit man sichere Ergebnisse erzielt. Die spektrale Auflösung kann sich auch nicht professioneller Technik messen, da hier Synchroscan-Methoden verwendet werden, die sich zwar prinzipiell auch im Selbstbau realisieren lassen, aber der Aufwand dann schon beachtlich wird.

Die erreichbare Nachweisgrenze für Uranin liegt bei solchen Anordnungen zwischen 0,02 und 1 µg/l.

Der Transport solcher mechanisch fragilen Systeme in die Höhle ist nicht zu unterschätzen- die Kalibrierung und Justierung der Optik ist kritisch, die Elektronik und besonders die optischen Gitter vertragen keinerlei Verunreinigung usw.

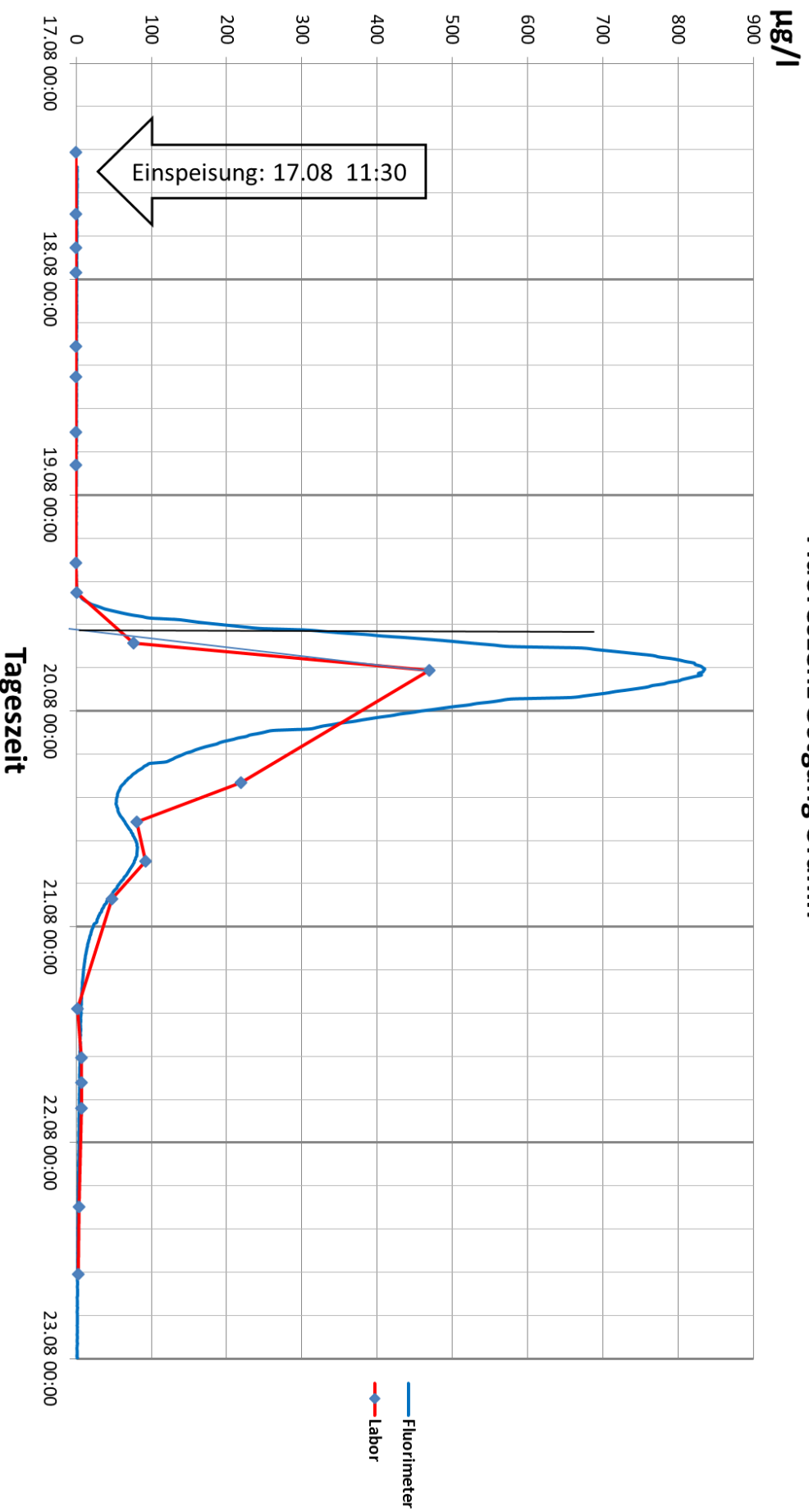
Systemkosten: ca. 500-1000 Euro

# Fluorimeter mit Zellenensor



# Konzentration

# Fluoreszenz Ostgang Uranin



## Langwellenpeilung:

Mit Hilfe einer Peilung eines elektromagnetischen Feldes lassen sich Vermessungen der Höhle gut überprüfen und gegebenenfalls auch korrigieren. Mit einem magnetischen Dipol in Form einer Rahmenantenne wird ein relativ niederfrequentes (ca. 3-10 kHz) Wechsellmagnetfeld erzeugt, dass dann auf der Oberfläche mit einer magnetischen Rahmenantenne empfangen werden kann. Die Ausrichtung der Antennen zueinander lässt Rückschlüsse über die Lage zu und man kann relativ genau bestimmen, wo sich die Antenne im Untergrund befindet (Ground Zero). Überdeckungen von 1000 Metern oder mehr lassen sich realisieren, auch wenn es Einbußen in der Genauigkeit gibt. Eine der größeren Probleme ist meist die Topologie der Oberfläche, dann Peilungen in extrem felsigem, steilem oder unwegsamem Gelände werden anspruchsvoll.

Die Frequenz des Signals ist prinzipiell unkritisch, aber man sollte unbedingt versuchen eine Frequenz zu wählen, die zwischen den Vielfachen von 50Hz liegt. Da die Empfangsbandbreite solcher Systeme im Bereich von 1 bis 10Hz liegt, kann man sich dann gut von den Störungen durch Netzoberwellen fernhalten.

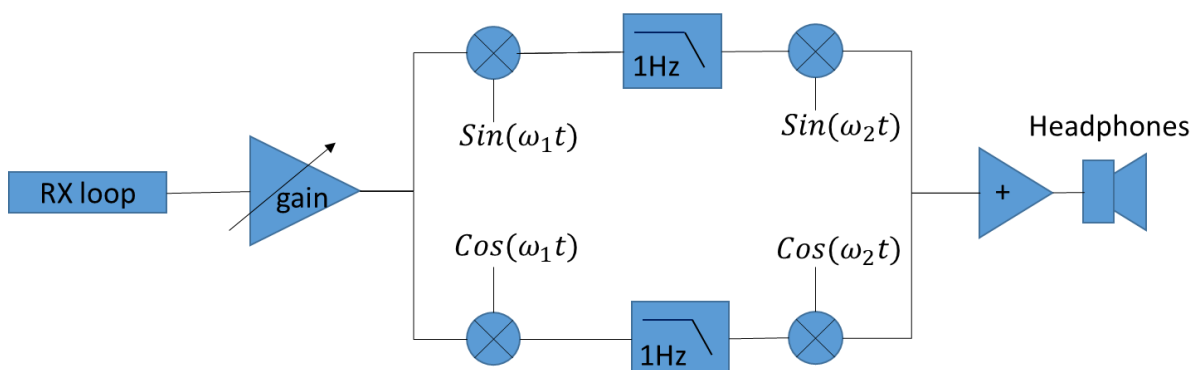
Die Tiefe der Sendeantenne lässt sich über eine Feldstärkebestimmung ermitteln. In der Praxis ist es einfacher die Empfangsantenne im Winkel von 45 Grad zu einer ebenen Oberfläche zu orientieren und diese dann vom "Ground Zero" Punkt (direkt über der Sendeantenne) zu entfernen, bis man ein Minimum an Empfangspegel hat. Dieser wird bei weiterer Entfernung dann wieder steigen. Aus dem Abstand vom „Ground Zero“ kann man die Tiefe berechnen. Allerdings funktioniert dies in der Praxis nur brauchbar, wenn man eine einigermaßen ebene Oberfläche hat, in der man die entsprechenden Antennenbewegungen durchführen kann. Im dichten Unterholz am Steilhang wird das allerdings nichts.

Grundsätzlich kann man auch Lawinen Sucher (LVS) verwenden, allerdings ist die Tiefe sehr begrenzt.

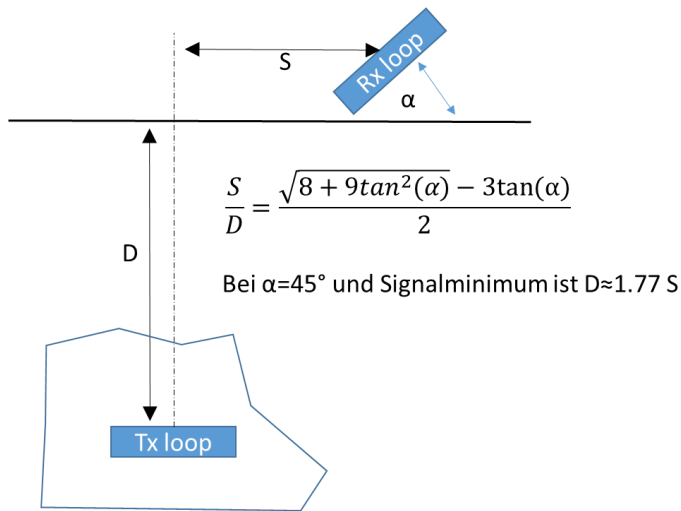
### Transmitter



### Beacon Receiver Principle

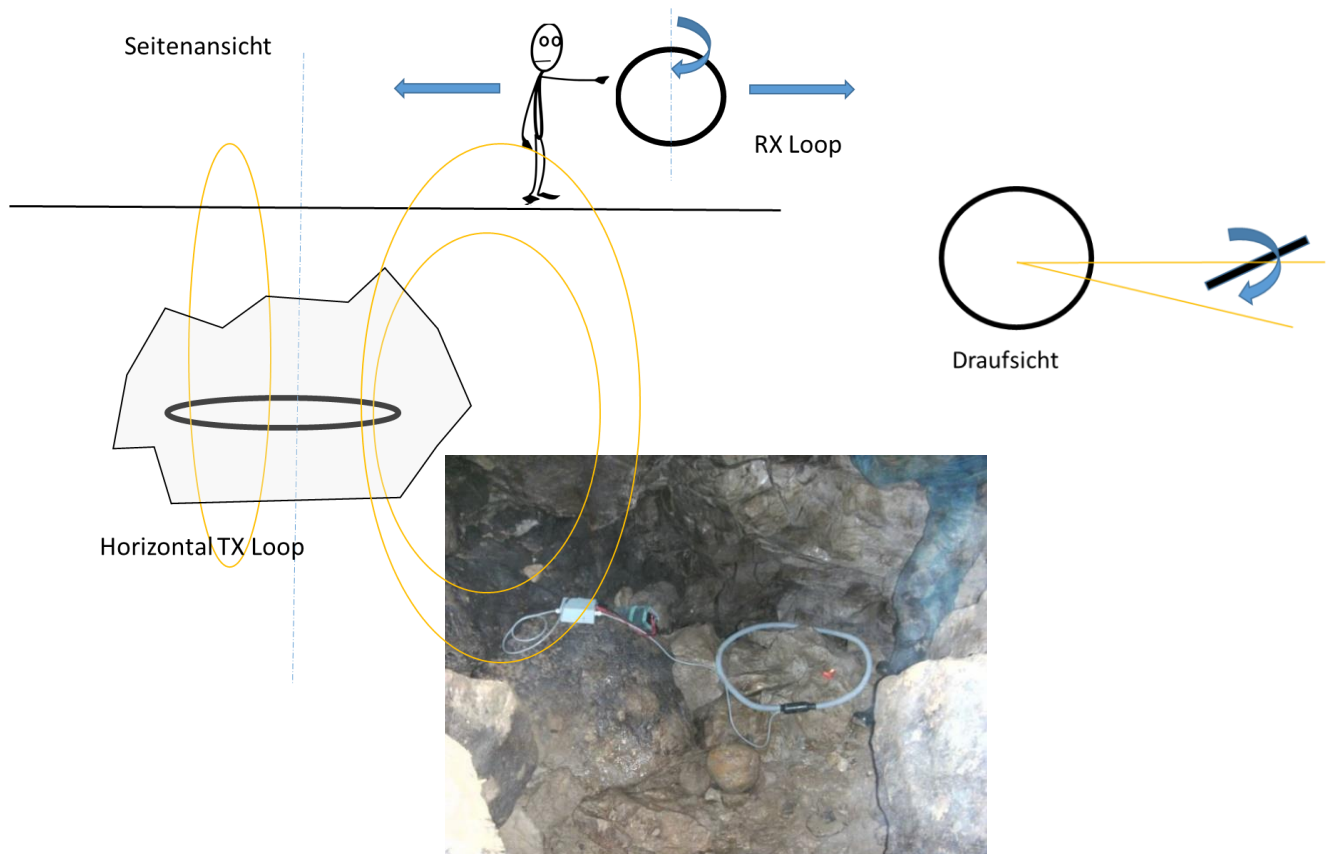


Die Tiefe beträgt etwa 1.77 des Abstandes von Ground Zero zum Ort der 45 Grad geneigten Antenne bei Signalminimum.



Ein gutes Schaltungskonzept ist von Brian Pease bei der British Cave Radio Association vorgestellt worden (BCRA No:24 von 1996) - die Frequenz sollte man noch anpassen (siehe Harmonische). Es ist im Anhang mit zur Verfügung gestellt. PLL und Feldstärkemessung kann man auch weglassen. Eine vergleichbare Lösung kann heute aber deutlich einfacher mit einem Mikrocontroller aufgebaut werden, da dann alle Mischer und Filter als digitale Lösung realisiert werden können.

Systemkosten: ca. 200 Euro





## Datenlogger:

Datenlogger mit denen man Pegel, Leitfähigkeit und Temperatur aufzeichnen kann, sind die Grundlage für hydrologische Untersuchungen. Es gibt hier einige Geräte am Markt - man muss also nicht unbedingt welche selber entwickeln. Allerdings steigt der Preis dann doch, wenn man z.B. Leitfähigkeit messen möchte. Daher kann eine Entwicklung durchaus sinnvoll sein. Außerdem kann die entstehende Entwicklung als Plattform für weitere System genutzt werden.

Die Pegelmessung kann über kapazitive Tauchrohrgeber realisiert werden, aber mittlerweile bekommt man Brunnensensoren mit 4-20mA Stromschleifenausgang in Edelstahl für um die 50 Euro.

Der Messbereich geht zwischen 1 und 5 Metern. Braucht man mehr, kann man auch über entsprechende Drucksensoren nachdenken.

Die Leitfähigkeitsmessung muss man grundsätzlich selber entwerfen, hier gibt es nichts Brauchbares.

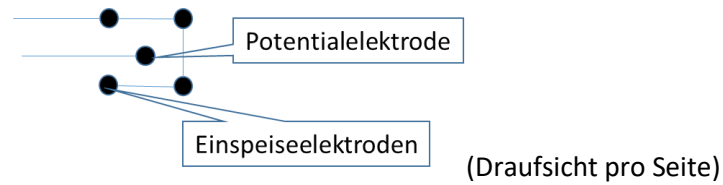
Entweder geht man auf 4-Leitermessung oder gibt sich mit 2-Leiter zufrieden. Da die 4-Leiter Messung keinen signifikanten Mehraufwand generiert, empfiehlt sich dieser Weg. Damit wird die Zellspannungsmessung von der Stromeinspeisung getrennt und man umgeht Probleme, die sich durch die Bildung von Doppelschichtkondensatoren im Medium ergeben. Als Elektrodenmaterial kann man Edelstahl verwenden, besser geeignet wäre „Schwarzplatin“, aber das ist schwer erhältlich.

Der mechanische Aufbau ist anspruchsvoll, da der Sensor immer unter Wasser liegt, und damit kommen eigentlich nur vergossene Lösungen in Frage. Wichtig ist, dass das Feld möglichst wenig aus dem Sensor greift und dieser auch nicht in stark strömenden Wasser angebracht wird, sonst entsteht ein „Leitfähigkeitsrauschen“.



Vergossener Leitfähigkeitsgeber mit integrierter Elektronik

Der Elektrodenaufbau der gegenüberstehend im Spalt angeordneten Elektroden, um eine gute Feldverteilung zu erreichen, ist nachfolgend skizziert. Die Außenelektroden sind miteinander verbunden. Die Elektroden bestehen aus Edelstahlschweißdraht mit 1mm Durchmesser. Edelstahlschrauben wären prinzipiell auch verwendbar.



Mechanisch vereinfachte Lösung mit etwas ungünstigerer Feldverteilung

Die Zellkonstante ergibt sich dann final aus der Geometrie der Anordnung. Kalibrierung kann sowohl über entsprechende Lösungen gemacht werden, oder einfach über den Vergleich mit einem Handmessgerät.

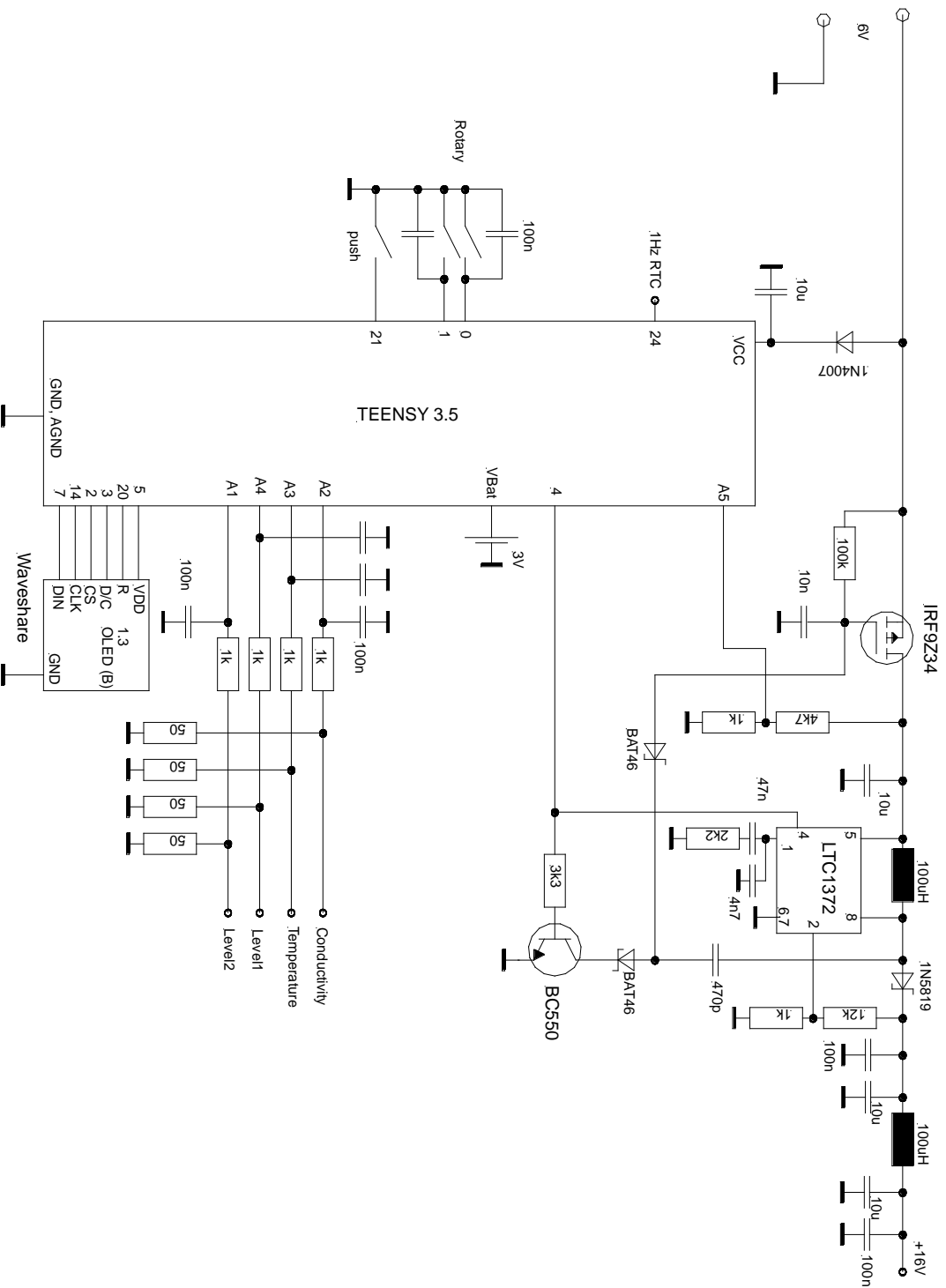
Die Temperaturmessung kann mit digitalen oder analogen Sensoren aufgebaut werden. Sie ist zwingend nötig, damit man die Leitfähigkeit temperaturkompensiert ermitteln kann.

Optional kann man auch noch eine optische Trübungsmessung bauen, die dann auch den Sedimenttransport mit aufzeichnen kann- zumindest qualitativ.

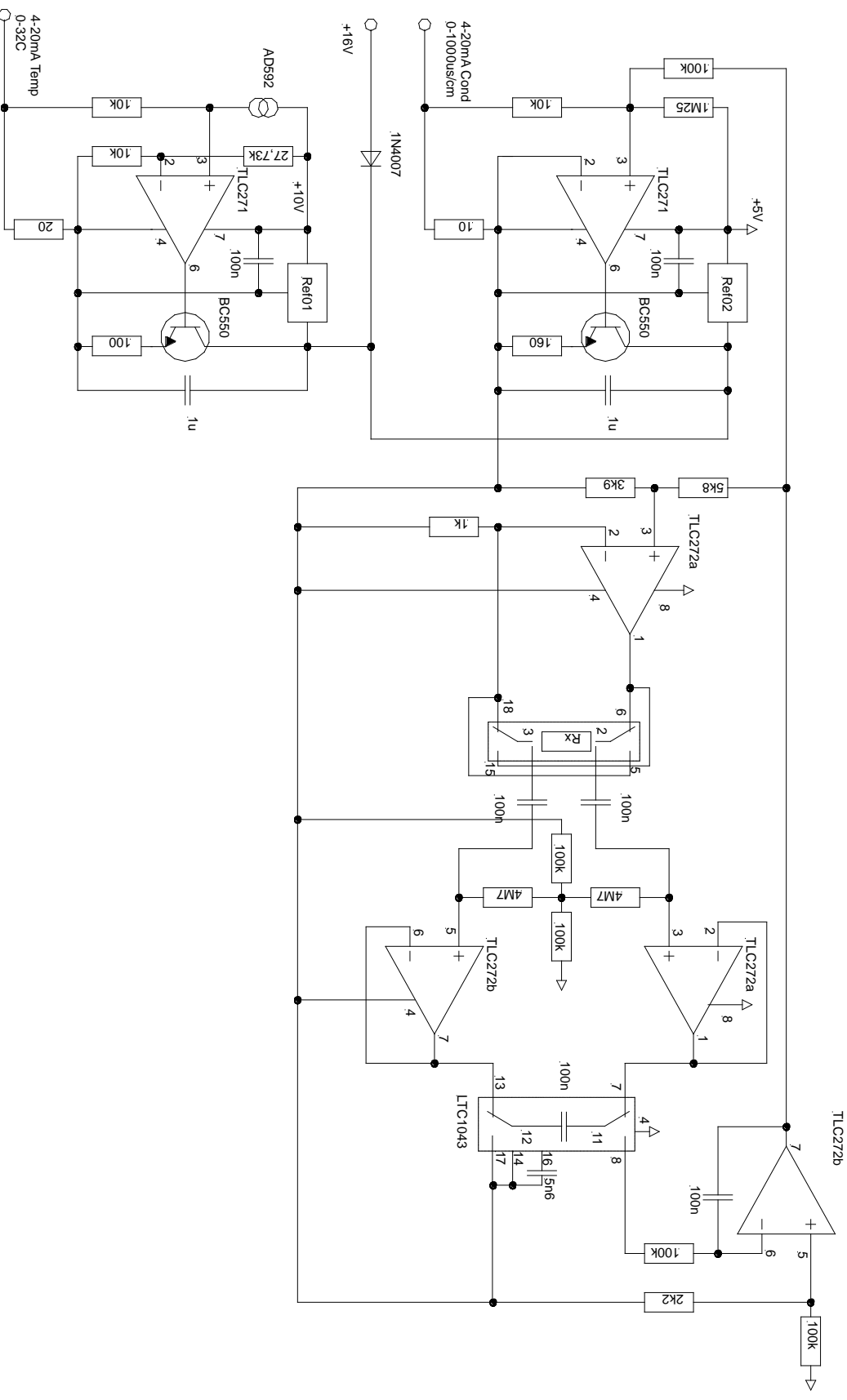
#### Herausforderungen:

Je autarker das System in der Höhle arbeiten muss, desto anspruchsvoller wird das Design aufgrund des Ruhestrombedarfs.

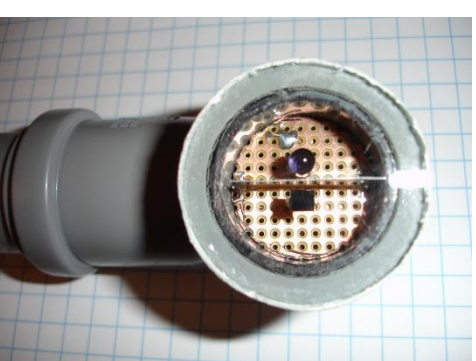
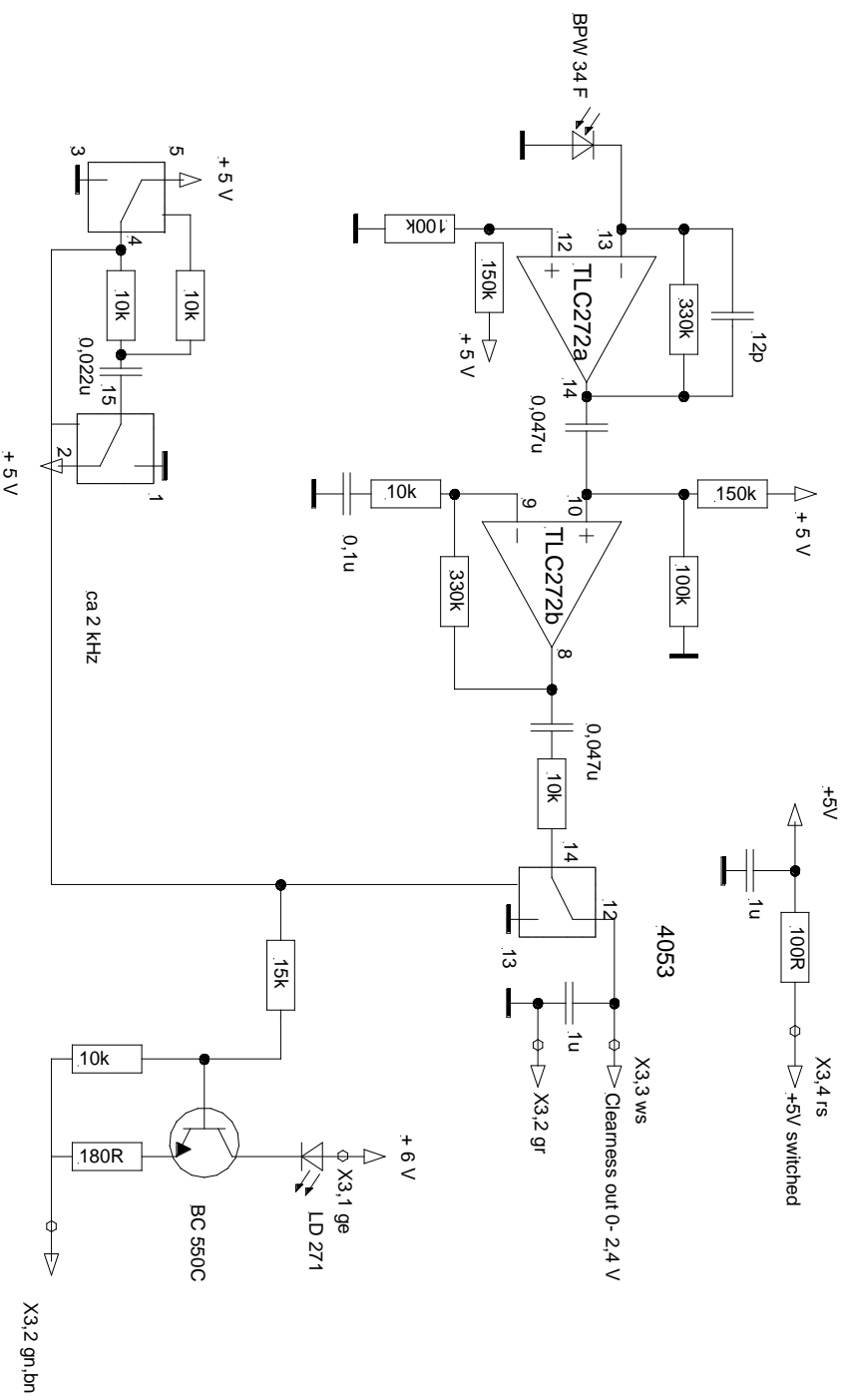
# Basis Loggermodul



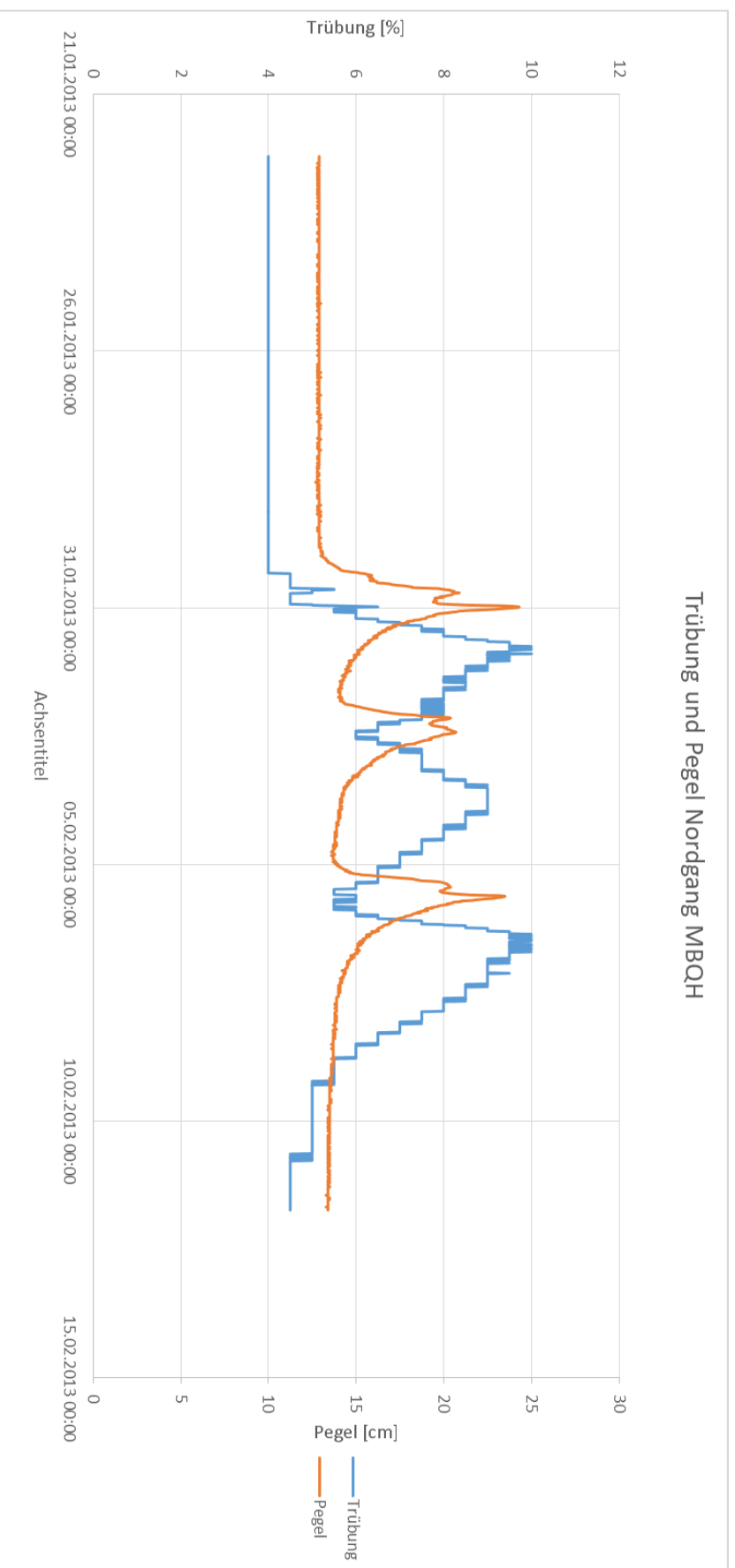
# Leitfähigkeit in 4-Leiter mit Temperatur (4-20mA)



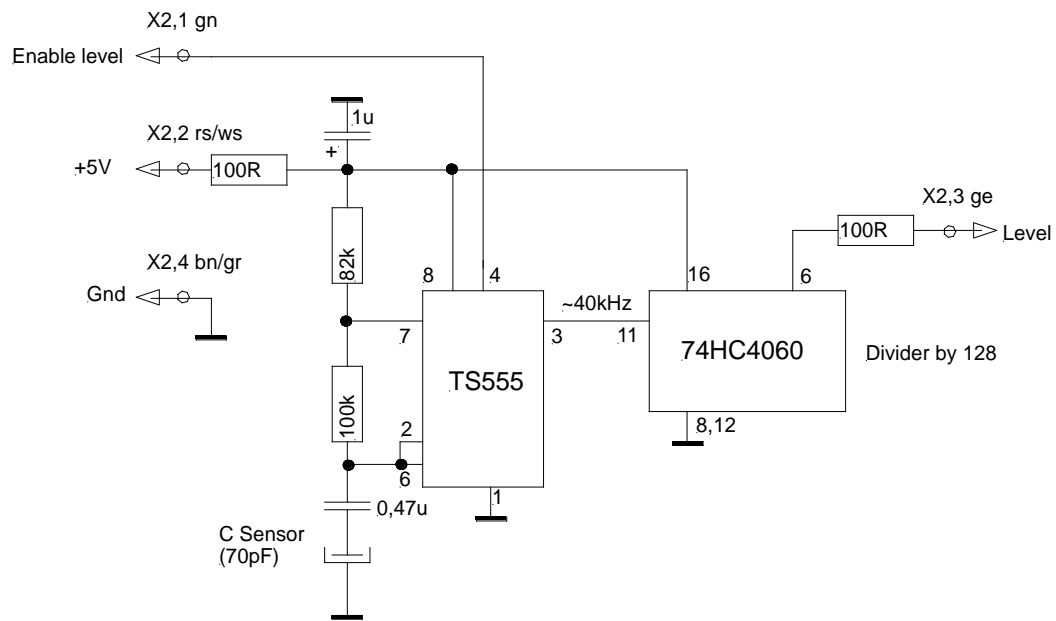
# Einfache Infrarot-Trübungsmessung



## Exemplarische Trübungsmessung in der MBQH

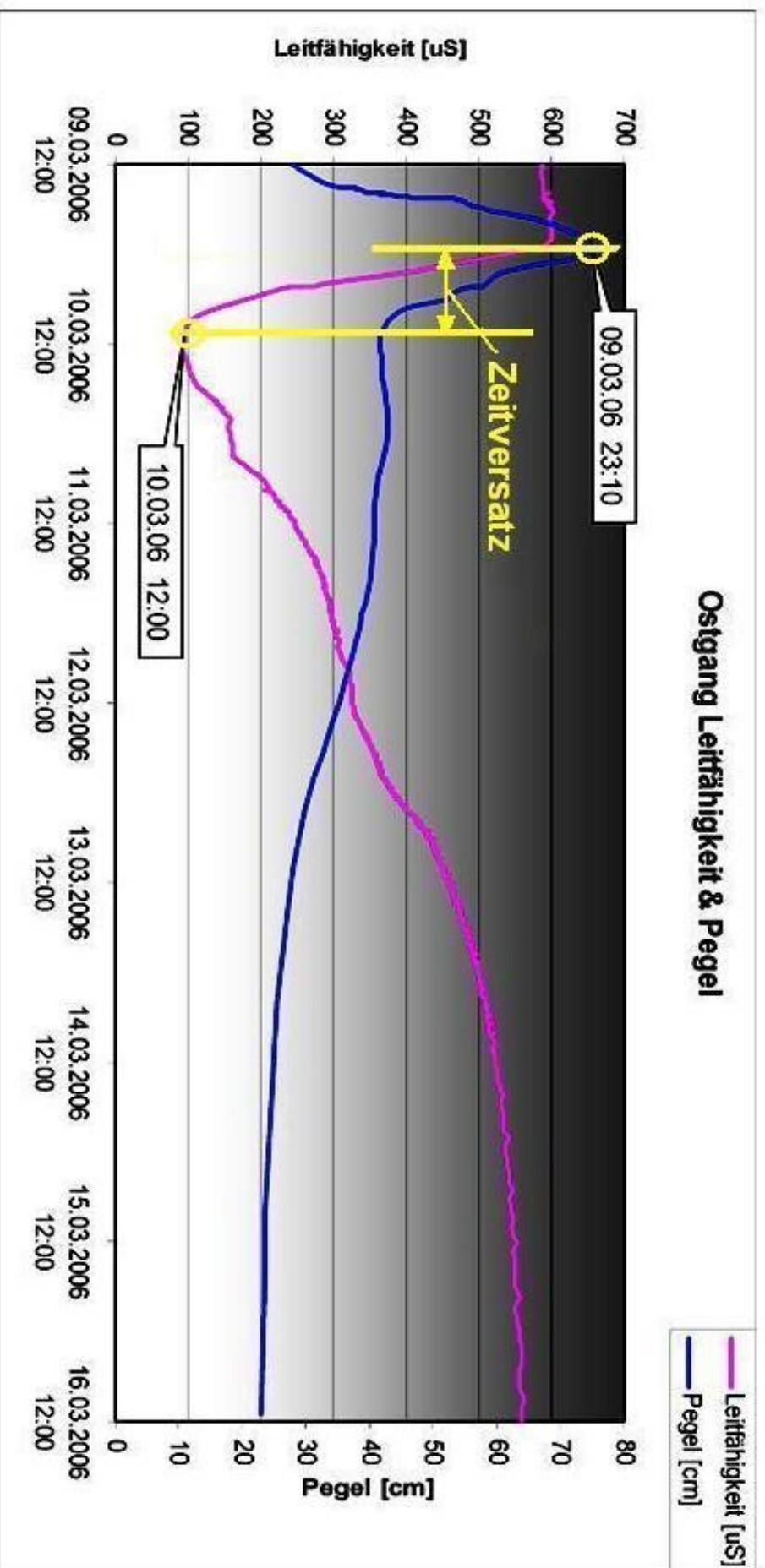


## Kapazitiver Tauchrohrgeberelektronik (50mm HD Rohr, 1m lang)



C Sensor ist der eigentliche Tauchrohrgeber in Form eines Zylinderkondensators. Die Aussenelektrode besteht aus Aluminiumfolie zwischen zwei ineinandergesteckten und verklebten HD Röhren. Die Innenelektrode ist ein 10mm Aluminiumrohr in einem Kunststoffrohr vergossen und zentral angeordnet.

# Beispiel Zeitversatz Pegel zu Leitfähigkeit in MBQH





## Lessons learned oder die Gotchas:

### *SD Karten:*

Je größer die Kapazität der SD Karte, desto höher ist der Ruhestrom. Es macht daher immer Sinn, die Karten vollständig von der Versorgung zu trennen und sie dann zum Beschreiben wieder zu initialisieren. Diesen Code unbedingt so bauen, dass mehrfache Versuche gemacht werden, bis die Initialisierung funktioniert hat. SD Karten sind kritisch was das Timing anbelangt. Daher muss man hier genau die Spezifikation einhalten und immer nur mit den Karten arbeiten, die man vorher auch getestet hat! Immer in den Systemen einen Header schreiben, in dem eine Geräteerkennung steht, damit man nicht Gefahr läuft, die Karten nach dem Transport aus der Höhle zu verwechseln.

Micro SD Karten sind mechanisch **sehr empfindlich** und brechen leicht - damit hat man meist völligen Datenverlust. Daher immer gut und geschützt verpacken!

### *Watchdogs:*

Es macht unbedingt Sinn, den Watchdog des Mikrocontrollers zu aktivieren, aber das sollte schon während der Entwicklung in der finalen Phase gemacht werden, damit man sicher sein kann, dass dieser auch richtig funktioniert und in allen Durchläufen der Programmteile nicht unabsichtlich auslöst.

### *RTCs (Real time clocks):*

RTCs sind für alle Loggersysteme notwendig. Wenn immer möglich, empfiehlt sich die Verwendung von dedizierten RTCs anstelle von selbst programmierten Lösungen. In jedem Fall sollte man sich von der Synchronität der Uhren überzeugen, damit die Zeitmarken nicht zu weit auseinander laufen. Hier können einige Überraschungen lauern.

### *Gegenseitige Beeinflussungen:*

Wenn man mit kapazitiven Tauchrohrgebern arbeitet, darf man nicht gleichzeitig eine Leitfähigkeitsmessung im selben Wasser in Betrieb nehmen. Der Tauchrohrgeber wird sich auf die Messfrequenz der Leitfähigkeit synchronisieren und vollkommen falsche Werte generieren.

### *Schalter, Taster, Buchsen:*

Am besten ganz vermeiden oder zumindest nicht nach Außen führen. Egal wie wasserdicht das Bauteil aussehen mag, es wird immer Probleme machen. Kunststofftasten und Folientastaturen sind für Logger, die lange in Höhlen verbleiben, unbrauchbar! Halgeber oder Reedkontakte mit externer Magnetbedienung schon deutlich besser. Kabeldurchführungen immer mit Kabelverschraubungen realisieren.

### *Wasserdichtigkeit:*

Eine der anspruchsvollsten Dinge überhaupt (painfull...). Nur professionelle O-Ringdichtungen sind langfristig stabil dicht. Jede selbstgeschnittene Neopren Dichtung lässt mit der Zeit Wasser durch. Grundsätzlich gilt zu bedenken, dass Kunststoffe nicht per se wasserdicht sind! Ein einfacher Putzeimer test funktioniert immer, aber Jahre in der Höhle werden einem eines Besseren belehren...

Elektronik, die unter Wasser arbeiten soll, wie z.B. Leitfähigkeitsmessungen vergießt man am besten mit geeignetem Kunstharz, auch wenn sie dann nicht mehr reparabel ist.

HT Abflussrohre sind eine gut geeignete Lösung um Elektronik unterzubringen. Besonders die Muffen mit Reinigungsöffnung zum Aufschrauben eignen sich gut, wie hier im Beispiel zu sehen:



Es hat sich absolut bewährt, die fertige Elektronik - außer Potis, USB Anschlüssen usw. - mit einem Isolations- oder Kunststoffspray zu lackieren. Dieses ist lötlbar und man kann hinterher immer noch was reparieren. Dafür hat man keine Korrosion und Dendritenbildung und die Schaltung läuft deutlich problemloser.

Zusätzlich ist Trockenmittel wie Silikagel gut geeignet und sollte immer mit verbaut werden: aber Vorsicht - bei optischen Geräten wie Fluorimetern darf man das Silikagel nur in den typischen Tyvek Beuteln verwenden, Silikagel produziert über die Zeit Staub und Brösel, die sich auch auf der Optik absetzen.

Be- und Entlüftung können für viele Geräte sinnvoll sein. Hierzu gibt es speziell Elemente mit einer Gore-Membran. Damit entsteht kein Unter- oder Überdruck in den Geräten.

#### *Verpolschutz:*

Unbedingt vorsehen! Nichts ist ärgerlicher als wenn nach dem Transport in die Höhle die Versorgung falsch angeschlossen wird und alles in die Jaggründe geht. Neben einfachen Lösungen mit Schottky-Dioden eignen sich besonders Mosfets hierfür.

#### *Bugs:*

Schwer auszurotten, und selbige treten immer erst in der Höhle bei einer ganz wichtigen und nicht wiederholbaren Messung auf- z.B. Tracerversuche. Daher muss man hier wirklich viel Zeit in die Tests und in die Entwicklung selbst stecken, idealerweise mit Reviews eines Partners und hier mit

verschiedenen Augen draufschauen. Immer mit retries und timeouts arbeiten, damit das System sich nicht wegen einer fehlenden Rückmeldung aufhängt – siehe auch Watchdogs.

#### *Sparen am falschen Ende:*

Sehr beliebt, aber völlig unsinnig. Bei dem getriebenen Aufwand an Zeit zum Bau, der Befahrungen, des Ausbringens der Geräte usw. sollte man auf keinen Fall am Geld sparen. Besser mit dem Mindset der Raumfahrt antreten. Nichts ist ärgerlicher, als ausgefallene Systeme, die man mit viel Aufwand konzipiert hat.

#### *Batterien und Akkus:*

Alle Geräte brauchen irgendeine Versorgung. Was im Einzelfall hier die sinnvolle Lösung ist, lässt sich nicht allgemein sagen. Die Selbstentladung ist immer mit einzubeziehen und auch die Temperatur von ca. 9 Grad oder auch weniger ist zu bedenken. Hier sollte man ernsthafte Hochrechnungen anstellen, wie lange das System funktionieren wird. Besonders der Ruhestrom ist von Bedeutung, da er rund um die Uhr gezogen wird. Damit liegt bei der Entwicklung ein essentieller Fokus auf den Powerdown und Sleepmodi. Leider sind diese nicht immer einfach zu handhaben, und je weniger Strom das System brauchen darf, desto anspruchsvoller wie die Programmierung. Final muss man auf jeden Fall den Verbrauch in den verschiedenen Betriebsarten nachmessen! Siehe auch der Hinweis bei den SD Karten, die echte Stromfresser sein können, und deren Aufnahme sehr stark schwanken kann. Die guten alten Alkalibatterien müssen nicht immer die schlechteste Lösung sein! Gerade Akkus sind für Langzeiteinsatz eigentlich nicht die beste Wahl.

#### *Transport in die Höhle:*

Auch hier gilt: alles wie ein rohes Ei verpacken, am besten in Folie einschweißen. Empfindliche Geräte in Blasenfolie einwickeln. Nicht zuletzt: einen geeigneten Träger mit dem notwendigen Bewusstsein auswählen.

#### *Kalibrierung in der Höhle:*

Es kann oft nötig sein, gewisse Kalibrierung in der Höhle vornehmen zu müssen. Das sollte man vorher schon überdenken und entsprechende Kalibrierungsmenüs usw. vorsehen. Das senkt die Fehlerquellen. Rückmeldungen von System, ob die Werte plausibel sind, sind am Ende eine große Hilfe. Auch wenn es „Overkill“ erscheint, es hilft die Bedienung so verstehbar und einfach wie möglich zu machen, falls man selber nicht in die Höhle kann oder andere Leute zum Auslesen geschickt werden, muss alles „Goofproof“ sein.

#### *Langzeitstabilität:*

Hier kommt man bei DIY Projekten an die Grenzen, denn man wird in den seltensten Fällen einen Klimaschrank zur Verfügung haben, aber auch mit Heißluftföhn und Haushalts-Kühlschrank lassen sich gewisse Überprüfungen machen, wie stabil die Anordnung funktionieren wird.