



**School of
Engineering**

InES Institute of
Embedded Systems

Bachelorarbeit

Messstation zur Registrierung von Geschiebe- Bewegungen im Fluss

Autoren

Tobias Keller
Tobias Welti

Betreuer

Prof. Hans-Joachim Gelke, Dipl. El. Ing FH
ZHAW Institute for Embedded Systems

Partner

Carlos Rodrigo Wyss
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Datum

14. Dezember 2014

Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit an der School of Engineering

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat. (Bei Gruppenarbeiten gelten die Leistungen der übrigen Gruppenmitglieder nicht als fremde Hilfe.)

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle zitierten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt nachgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten die Paragraphen 39 und 40 (Unredlichkeit und Verfahren bei Unredlichkeit) der ZHAW Prüfungsordnung sowie die Bestimmungen der Disziplarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

.....

Unterschriften:

.....

.....

.....

Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Bachelorarbeiten zu Beginn der Dokumentation nach dem Titelblatt mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.

Vorwort

Hier ein bisschen
von dir und mir

Kontakte

Verfasser

Tobias Keller
Schulstrasse 82
CH-8952 Schlieren

E-Mail: häsch überhaupt ä privati adrässe?

Tobias Welti, MSc ETH Zürich
Wissenschaftlicher Assistent ZHAW Institute for Embedded Systems
Technikumstrasse 9
CH-8401 Winterthur

E-Mail: tobias.welti@zhaw.ch
Homepage: <http://www.ines.zhaw.ch>

Betreuer

Prof. Hans-Joachim Gelke, Dipl. El. Ing FH
ZHAW Institute for Embedded Systems
Technikumstrasse 9
CH-8401 Winterthur

E-Mail: hans.gelke@zhaw.ch
Homepage: <http://www.ines.zhaw.ch>

Partner

Carlos Rodrigo Wyss
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf

E-Mail: carlos.wyss@wsl.ch
Homepage: <http://www.wsl.ch>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
1.1. Ausgangslage	8
2. Aufgabenstellung	9
2.1. Aufgabenstellung	9
2.1.1. Musskriterien	9
2.1.2. Wunschkriterien	10
2.1.3. Abgrenzungskriterien	10
3. Vorgehen	11
3.1. Überblick	11
3.2. Datenlogger	11
3.2.1. Messdaten sammeln	12
3.2.2. Kontrolle über das Bussystem	12
3.2.3. Steuerung des Betriebs	12
3.2.4. Schnittstelle nach Aussen	12
3.3. Sensoreinheit	12
3.3.1. Messdatenerfassung	12
3.3.2. Ereigniserkennung	13
3.3.3. Datenübertragung	13
3.4. Bussystem	13
4. Funktionale Anforderungen	14
4.1. Datenlogger (F1...)	14
4.1.1. F110 Busmaster	14
4.1.2. F120 Sensorerkennung	14
4.1.3. F130 Uhrzeit	14
4.1.4. F140 Timestamp verteilen	14
4.1.5. F160 Schnittstelle zum Steuerrechner	14
4.1.6. F170 Steuerung Betriebsmodus	14
4.1.7. F180 Daten sammeln	15
4.1.8. F190 Daten speichern	15
4.2. Sensoreinheit (F4...)	15
4.2.1. F410 Ereignisdetektion	15
4.2.2. F430 Datenübertragung	15
4.2.3. F450 Rohdatenaufzeichnung	15
5. Nichtfunktionale Anforderungen	16
6. Grundlagen	17
7. Hardware-Konzept	18
7.1. Hardware-Architektur	18
7.1.1. Datenlogger	18
7.1.2. Sensoreinheit	18
7.1.3. Bussystem	18
7.2. Komponentenauswahl	18
7.2.1. Mikroprozessor	18
7.2.2. Bus-System	22

7.2.3. Speichermedium	25
7.2.4. Sensor	26
7.2.5. Schnittstelle	26
7.3. Komponenten	26
7.3.1. Cortex M4 Mikroprozessor	26
7.3.2. Beschleunigungs-Sensor	26
7.3.3. CAN Bus	26
7.3.4. SD Karte	26
7.3.5. UART Schnittstelle	27
7.3.6. Gehäuse	27
7.4. Datenlogger	27
7.5. Sensoreinheit	27
8. Software-Konzept	29
8.1. Software-Stack	29
8.1.1. Überblick	29
8.1.2. Messdatenerfassung	29
8.1.3. Ereigniserkennung	29
8.1.4. Timestamp	33
8.1.5. Verwaltung der Messstation	33
8.1.6. Busprotokoll	35
8.1.7. Filesystem	35
8.1.8. UART-Kommandozeile	35
8.2. Funktionalität	35
8.3. Konfiguration	35
8.4. Parallele Prozesse	35
9. Resultate	36
10. Diskussion	37
11. Bedienungsanleitung	38
11.1. Produktbeschreibung	38
11.2. Aufbau der Messstation	38
11.3. Datenlogger	38
11.3.1. Anschlüsse	38
11.4. Sensor	39
11.4.1. Beschleunigungssensor	39
11.4.2. Mikroprozessor	39
11.4.3. Anschlüsse	40
11.5. Bussystem	40
11.5.1. Kabel	40
11.5.2. Abschlusswiderstände	40
11.5.3. Steckverbinder	40
11.6. Ereignis	42
11.7. Konfiguration	42
11.7.1. Anschluss eines Computers	42
11.7.2. Menü	45
11.7.3. Befehle	46
11.7.4. Konfigurationsdatei	53
11.8. Betrieb	54
11.9. Technische Daten	54
12. Verzeichnisse	55
Literaturverzeichnis	56

Abbildungsverzeichnis	57
Tabellenverzeichnis	58
Glossar	59
Akronyme	63
A. Anhang	I
A.1. Offizielle Aufgabenstellung	I
A.2. Projektmanagement	III
A.3. Weiteres	III
A.4. Schaltpläne	III
A.5. Datenblätter	VII
A.5.1. NXP LPC4088 32-bit ARM Cortex-M4 microcontroller	VII
A.5.2. Embedded Artists NXP LPC4088 QuickStart Board	IX
A.5.3. Analog Devices ADXL001 Beschleunigungssensor	XI
A.6. Source Code, Daten und Multimedia	XIII

Liste der noch zu erledigenden Punkte

Hier ein bisschen blabla von dir und mir	3
was gibt es bis jetzt? wie wirds gemacht? was gäbe es für alternativen?Mu LITERATURVERWEISE!	8
etwas über signalerfassung.	17
etwas über signalverarbeitung (aufwand hilbert etc.)	17
Sensorauswahl beschreiben	26
Schnittstellenauswahl beschreiben	26
Texten	26
Cortex M4 beschreiben	26
Flash Speicher beschreiben	26
SDRAM beschreiben	26
Sensor beschreiben	26
CAN Bus beschreiben	26
CAN Transceiver beschreiben	26
SD-Karte/MCI beschreiben	26
UART beschreiben	27
Gehäuse beschreiben	27
Datenlogger übersicht	27
Sensoreinheit übersicht	27
Prioritäten des Prozesse Messung, Erkennung, Übermittlung erklären, und wie wir das gelöst haben.	29
figure: umhüllende (matlab: hilbert())	29
Ereignis-FSM anpassen auf neue Stati	31
graphik zum einfluss des Neigungswinkels des Sensors auf den null-level.	31
Meldung ins Busprotokoll für den Verlust von Messwerten!	33
Zusammenhänge A/D-Wandlung und Ereigniserkennung und Übertragung beschreiben, dazu ein Kommunikationsdiagramm, wo synchron, wo asynchron.	33
Verschiedene Betriebsmodi mit Grafiken beschreiben	33
Berechnungen, in welchem Modus wie lange gemessen werden kann, und wie lange ein Sensor mit dem vorhandenen Speicher die Resultate zwischenspeichern kann. Allenfalls ein System erwähnen, das automatisch zwischen verschiedenen Modi hin- und herschalten kann. (Ist allerdings heikel). Wie viele Sensoren können in welchem Modus gleichzeitig am System betrieben werden, bei welcher Ereignisrate ist Schluss mit Busbandbreite.	33
Timestamp beschreiben, Rechnung über die Dauer der eindeutigen Zuweisung.	33
Busverwaltung beschreiben	33

Figur 8.6 aufteilen auf zwei Seiten. (PDF-crop)	33
Busprotokoll austüfteln. Darstellung siehe HW-Konzept Rioxo, genaue Beschreibung der Nachrichtentypen. Timestamp der einzelnen Peaks bezieht sich auf Offset vom Beginn des Impacts.	35
Kommunikationsdiagramm Bushandler	35
Interrupt-System des Bushandlers aufführen	35
Texten	35
Frage: wird für jeden Sensor ein eigenes File geführt? Kann man alle Files offen lassen oder ist das keine gute Idee? Was ist besser, jedes mal das File-Ende zu suchen um neues anzuhängen?	35
Dokumentation über die Kommandos, wird später für die Bedienungsanleitung gebraucht	35
Texten	35
Hier eine Art Bedienungsanleitung zur Konfiguration geben. Welches Kommando hat was zur Folge? (Wird Datenerfassung neu gestartet, werden allenfalls andere Sensoren deaktiviert etc.	35
läuft das Zeug?	36
wie viele sensoren mags leiden?	36
wie schnell kann fs sein?	36
wie lange kann man aufzeichnen?	36
was geht, was nicht?	36
was haben wir nicht erreicht?	36
wo haben wir mehr als gefordert erreicht?	36
haben wir erfüllt?	37
wo gabs schwierigkeiten?	37
worauf sind wir stolz	37
was könnte man jetzt weiter noch machen?	37
was ist noch geplant?	37
bildchen des Aufbaus der Messstation	38
figur über den logger	38
Stromverbrauch logger und pro sensor nennen	39
Föteli/Schema Abschlusswiderstand	40
Beschreibe hier die Ereignisse, die Detaillevel inklusive den tollen grafiken	42
logger status listing	47
sensorauswahl listet die sensoren auf, das noch einfügen	48
Länge des Ereignispuffers	50
Liste von Sensor-Statistiken ins Listing einfügen	51
Beispiel einer Uhrzeit einfügen	52
mehrere konfig-files und file löschen könnte man in den Ausblick nehmen, als zu verbessernde punkte	53
Zeitplan	
Besprechungsprotokolle oder Journals	III
dieser Abschnitt gehört in den Haupttext.	III

Spezifikationen u. Datenblätter der verwendeten Messgeräte und/oder Komponenten	
Berechnungen, Messwerte, Simulationsresultate	
Grafische Darstellungen, Fotos	XIII
Inhaltsverzeichnis der CD erstellen	
CD mit dem vollständigen Bericht als pdf-File inklusive Film- und Fotomaterial	XIII

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) betreibt Messstationen zur Registrierung von Geschiebe-Bewegungen im Fluss mittels Geophonen, die unter Stahlplatten montiert sind. Diese Platten sind in einer Betonkonstruktion eingelassen, um sie im Flussbett zu fixieren. Die Betonkonstruktion dient gleichzeitig als Kabelkanal. Jedes Geophone ist über ein Kabel mit einem Auswertungs-Rechner (Embedded PC) verbunden. Der Rechner wertet die Signale aller angeschlossenen Geophone kontinuierlich aus, um die Ereignisse zu detektieren. Bei mehreren Geophonen ist hier ein recht leistungsfähiger Rechner nötig, der eine entsprechend hohe Leistungsaufnahme hat. Die baulichen Massnahmen für die Installation der Geophone, der Auswertungsstation sowie der Stromversorgung sind sehr teuer. Da viele dieser Messstationen in Gebirgsbächen installiert werden, fallen hohe Transportkosten für die schweren Materialien an.

Wenn die Sensoren in einer Elastomerplatte integriert werden könnten und die Komplexität der Verkabelung reduziert würde, liessen sich viele dieser baulichen Massnahmen umgehen. Dies würde die Kosten drastisch senken.

es bis jetzt?
s gemacht? was
für alternati-

TURVERWEISE!

2. Aufgabenstellung

Die offizielle Aufgabenstellung befindet sich im Anhang A.1.

2.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll eine Lösung erarbeitet werden, um zukünftige Installationen günstiger zu machen. Da solche Messanlagen an sehr vielen Orten auf der ganzen Welt aufgebaut werden, kann durch eine Vereinfachung der Installation viel Aufwand gespart werden.

Die Projektidee stammt von Bruno Fritschi (WSL). Sein Vorschlag sieht vor, die aufgezeichneten Signale direkt am Sensor auszuwerten und nur die gewünschten Ereignis-Daten zu übertragen und zu speichern. Somit könnten die Daten über ein Bussystem übertragen werden und der Rechner für die Sammlung der Daten bräuchte weniger Rechenleistung.

Dank der Bustopologie kommt das Messsystem mit weniger Leitungen aus und kann einfacher installiert werden. Denkbar wäre die Integration in einer Elastomerplatte anstelle der Stahl- und Betonkonstruktion, da viel weniger Leitungen nötig sind. Die Elastomerplatte könnte einfacher im Bachbett verankert werden.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung der Auswertungshardware und des Bussystems. Die Qualität der gemessenen Signale soll mindestens erhalten werden. Die Auswertungsalgorithmen sind nicht Bestandteil der Arbeit und werden vom WSL zur Verfügung gestellt.

Die von der bisherigen Anlage gemachten Messdaten enthalten die Dauer und Intensität jedes Aufschlags (Ereignis) auf der Sensorplatte, sowie die Anzahl Ausschläge (Peaks) pro Aufschlag. Pro Minute wird ein Histogramm über die Intensitäten der Peaks gebildet und abgespeichert.

Denkbar wäre es, einen Prototyp für Vergleichsmessungen im Erlenbach (Alptal, SZ) an einer bestehenden Schwelle zu implementieren.

2.1.1. Musskriterien

- Die Anlage zeichnet den Geschiebetransport im Bachbett auf. Die bisherige Aufzeichnungsrate von 10'000 Messpunkten pro Sekunde soll nicht unterschritten werden.
- Die Anlage liefert eine minütliche Zusammenfassung über die Ereignisse an jedem Sensor. Diese Zusammenfassung enthält die Anzahl, Dauer und Intensität der einzelnen Ereignisse sowie ein Histogramm über die Intensitätsverteilung.
- Die Messstation ist fähig, mindestens zehn Sensoren zu betreiben und ihre Messsignale aufzuzeichnen.
- Es ist möglich, die kompletten Rohdaten von einem Sensor über eine Dauer von 30 Minuten aufzuzeichnen. Während einer solchen Messung dürfen die anderen Sensoren ihre Messung einstellen.
- Die Sensoren können über bis zu fünfzehn Meter im Bachbett verteilt sein.
- Die Leistungsaufnahme der Anlage beim Betrieb von 10 Sensoren ist kleiner als zehn Watt.
- Die Datenaufzeichnung erfolgt in einem eigens entwickelten Datenlogger.

- Am Datenlogger kann ein Laptop angeschlossen werden, um Kontrollparameter der Messanlage zu setzen und um den Status der Anlage abzufragen.
- Die erfassten Messdaten werden im Datenlogger auf einer Speicherkarte gespeichert. Dies ermöglicht ein einfaches Abholen der Daten im Feld, indem die Speicherkarte ausgetauscht wird.

2.1.2. Wunschkriterien

- Die Anlage liefert für jedes Ereignis die Rohdaten in voller zeitlicher Auflösung.
- Der Sensoraufbau ermöglicht es, die Sensoren in einer Elastomerplatte zu verpacken. Die Elastomerplatte kann ohne Betonkonstruktion im Bachbett verankert werden.
- Am Datenlogger kann ein Laptop angeschlossen werden, um die erfassten Messdaten herunterzuladen.

2.1.3. Abgrenzungskriterien

- Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, die Messeinheiten zur Produktreife zu bringen. Es wird lediglich aufgezeigt, wie solche Messeinheiten realisiert werden könnten.
- Eine Testinstallation in einem Bach ist nicht möglich. Allenfalls kann in der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich ein kleiner Testlauf stattfinden.
-

3. Vorgehen

3.1. Überblick

Das zu entwickelnde Messsystem kann grob in drei Komponenten aufgeteilt werden.

1. Datenlogger
2. Sensoreinheit
3. Bussystem

Der Datenlogger hat die Aufgabe, von mehreren Sensoreinheiten registrierte Ereignisse zu empfangen und zu speichern. Die Sensoreinheiten messen kontinuierlich die Beschleunigung, werten die Signale aus und erkennen Ereignisse, die einer vordefinierten Signalform entsprechen. Alle Sensoreinheiten sind über ein Bussystem mit dem Datenlogger verbunden, um miteinander kommunizieren zu können. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 3.1 ersichtlich. Die Stromversorgung der Anlage wird am Datenlogger angeschlossen. Parallel zum Kabel des Datenbusses wird die Stromversorgung der Sensoreinheiten geführt.

Diese drei Einheiten werden im Folgenden genauer definiert.

3.2. Datenlogger

Der Datenlogger hat verschiedene Aufgaben zu erfüllen:

- Sammeln und speichern der Messdaten der Sensoreinheiten.
- Kontrolle über das Bussystem.
- Steuerung des Betriebs der Anlage.
- Schnittstelle für die Konfiguration der Anlage und für das Auslesen der Messdaten.

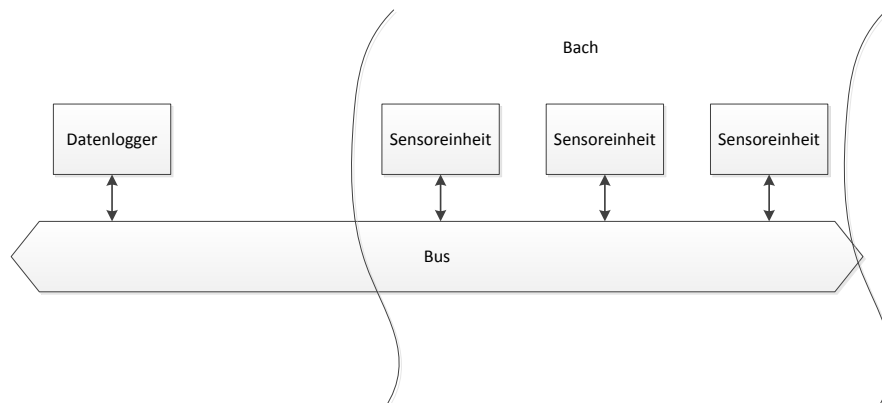


Abbildung 3.1.: Eine Messstation mit einem Datenlogger, der mehrere Sensoreinheiten im Bach steuert.

3.2.1. Messdaten sammeln

Für jede angeschlossene Sensoreinheit führt der Datenlogger eine Datensammlung, in der die registrierten Ereignisse zeitlich sortiert abgespeichert werden. Die Datensammlungen werden in Dateien abgelegt, die auf einem externen, auswechselbaren Medium abgespeichert werden. So können die Messdaten auf einfache Art für die weitere Auswertung abgeholt werden.

3.2.2. Kontrolle über das Bussystem

Als Busmaster hat der Datenlogger die Aufgabe, allen angeschlossenen Einheiten eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) zuzuweisen. Über diese ID erkennt der Datenlogger, von welcher Sensoreinheit Daten übertragen werden. Anhand der ID kann der Datenlogger Konfigurationsnachrichten an bestimmte Sensoreinheiten adressieren. Für die Zuordnung der Messdaten zu einem bestimmten Sensor benötigen die Sensoreinheiten ein fixes Erkennungsmerkmal, z.B. eine Seriennummer, die mit den Messdaten abgespeichert werden soll. Wurde einer Sensoreinheit einmal eine ID zugeteilt, wird diese Zugehörigkeit in einer Konfigurationsdatei auf dem Datenlogger abgespeichert, um bei einem Neustart des Systems die gleichen IDs zu vergeben.

3.2.3. Steuerung des Betriebs

Die Messstation hat verschiedene Betriebsmodi, die über den Datenlogger angewählt werden können. Der Datenlogger steuert die einzelnen Sensoreinheiten entsprechend an. Je nach Betriebsmodus werden mehr oder weniger detailreiche Daten über die Ereignisse abgespeichert.

3.2.4. Schnittstelle nach Aussen

Über eine Schnittstelle am Datenlogger kann ein Computer angeschlossen werden. Per Kommandozeile wird die Messstation konfiguriert, der Zustand überprüft und der Betriebsmodus gewählt.

3.3. Sensoreinheit

Die Aufgaben der Sensoreinheit umfassen:

- Erfassung von Messdaten.
- Erkennung von Ereignissen.
- Übertragung der Ereignisdaten an den Datenlogger.

3.3.1. Messdatenerfassung

Der Sensor zur Erfassung der Daten wird mit einer vordefinierten Abtastrate ausgelesen. Die Abtastrate muss so gewählt werden, dass einzelne Ereignisse erkannt werden können, ohne unnötig viel Messdaten zu generieren.

3.3.2. Ereigniserkennung

Im Mikroprozessor werden die Messdaten fortlaufend analysiert. Überschreitet das gemessene Signal einen gewissen Schwellenwert (Threshold), markiert dies den Beginn eines Ereignisses. Das Ereignis ist beendet, wenn der Signalpegel für eine gewisse Zeit (Timeout) unterhalb des Threshold bleibt. Für jedes Ereignis wird abgespeichert, wann es aufgetreten ist (Timestamp), wie lange es gedauert hat, wie hoch der Signalpegel maximal ausschlug und wie viele Signalspitzen (Peaks) aufgetreten sind. Allenfalls können auch die Höhen und Timestamps aller Peaks übertragen werden.

3.3.3. Datenübertragung

Die Sensoreinheit sendet die Messdaten regelmässig über das Bussystem an den Datenlogger. Nach Bestätigung des Erhalts werden die Messdaten aus dem Speicher der Sensoreinheit gelöscht.

3.4. Bussystem

Das Bussystem verbindet die Einheiten der Messstation miteinander. Die gesamten Messdaten und Steuerkommandos werden über den Bus übertragen. Das Bussystem muss die Datenmenge der angeschlossenen Sensoren bewältigen können, über die geforderte Distanz funktionieren und möglichst robust gegenüber äusseren Einflüssen sein. Der Busmaster hat die Möglichkeit, laufende Übertragungen von Sensoreinheiten zu unterbrechen, um Steuerkommandos zu senden.

4. Funktionale Anforderungen

4.1. Datenlogger (F1...)

4.1.1. F110 Busmaster

Der Datenlogger übernimmt die Kontrolle des Bussystem. Bei Inbetriebnahme des Systems tastet der Datenlogger den Bus nach Sensoreinheiten ab und erteilt jeder Sensoreinheit eine eindeutige Identifikationsnummer (ID). Die ID des Datenloggers soll so gewählt werden, dass er jederzeit Priorität hat, auf den Bus zu schreiben.

4.1.2. F120 Sensorerkennung

Die angeschlossenen Sensoren werden vom Datenlogger erkannt und mit einer ID versehen. Anhand der ID wird die Priorität bei der Datenübertragung festgelegt und der Sensor identifiziert. Ein Sensor, der bereits am System angeschlossen war, erhält wieder die gleiche ID, sofern die Konfigurationsdatei nicht gelöscht wurde.

4.1.3. F130 Uhrzeit

Der Datenlogger verfügt über eine interne Uhr, um die Ereignisse in den Dateien mit einem lesbaren Zeitstempel zu versehen.

4.1.4. F140 Timestamp verteilen

Der Datenlogger sendet ein Signal an alle Sensoreinheiten, dass der Zeitstempel (Timestamp) neu gestellt werden soll. Ab dann beziehen sich die Timestamps auf die Dauer seit dem jetzigen Zeitpunkt.

4.1.5. F160 Schnittstelle zum Steuerrechner

Der Datenlogger bietet eine Schnittstelle, an der ein Steuerrechner (Laptop, Personal Computer (PC)) angeschlossen werden kann. Über diese Schnittstelle kann der Betrieb der ganzen Anlage gesteuert werden.

4.1.6. F170 Steuerung Betriebsmodus

Der Betriebsmodus der Sensoren wird vom Datenlogger aus gesteuert: Wie viele und welche Art von Daten gesammelt werden soll und ob alle Sensoren oder nur bestimmte aktiv sein sollen.

Folgende Betriebsmodi sind verfügbar:

- Normaler Modus: Alle Sensoren übermitteln die verarbeiteten Ereignisdaten. Zeitpunkt, Intensität, Dauer und Anzahl Ausschläge jedes Ereignis werden gespeichert.
- Detaillierter Modus: Alle Sensoren übermitteln die verarbeiteten Ereignisdaten sowie die gesamten Messdaten für die Dauer des Ereignis.

- Rohdatenmodus: Ein Sensor übermittelt kontinuierlich Rohdaten, die anderen Sensoren werden vorübergehend abgeschaltet.

4.1.7. F180 Daten sammeln

Der Datenlogger fragt in regelmässigen Abständen bei den Sensoreinheiten an, ob Ereignisdaten zur Übertragung bereit sind. Diese übermitteln die vorliegenden Ereignisdaten.

4.1.8. F190 Daten speichern

Die Daten werden vom Datenlogger auf einer Speicherkarte in Dateien abgelegt. Nach entsprechenden Befehlen vom Steuerrechner kann die Karte entfernt und ausgetauscht werden, um die Daten abzuholen.

4.2. Sensoreinheit (F4...)

4.2.1. F410 Ereignisdetektion

Die Sensoreinheit liest den Sensor mit einer definierten Abtastrate aus und wertet die Messdaten aus. Der Prozessor erkennt Ereignisse anhand definierter Kriterien. Zu jedem Ereignis werden folgende Daten gespeichert: Zeitpunkt (Timestamp), Dauer, Anzahl Peaks und höchster Peak. In einem zweiten Betriebsmodus können alle Messpunkte während einem Ereignis gespeichert werden.

4.2.2. F430 Datenübertragung

Die Sensoreinheit übermittelt die Ereignisdaten über das Bussystem an den Datenlogger.

4.2.3. F450 Rohdatenaufzeichnung

In einem Sondermodus werden alle Messpunkte gespeichert und über das Bussystem an den Datenlogger übertragen. In diesem Betriebsmodus kann auch nur eine Sensoreinheit aktiv sein, die anderen werden auf Standby geschaltet.

5. Nichtfunktionale Anforderungen

- Die gesamte Messstation soll eine geringere Leistungsaufnahme haben als eine aktuelle Messstation mit Geophonen. Für zehn Geophone sind dies zur Zeit ungefähr zehn Watt.
- Die Installation soll weniger bauliche Massnahmen erfordern als eine aktuelle Messstation mit Geophonen.
- Die erfassten Ereignisdaten sollen mindestens so detailliert sein wie von den bisherigen Installationen.
- Sensoreinheiten müssen wasserdicht verpackt werden können.

6. Grundlagen

etwas über mems

etwas über signa
sung.

etwas über signa
beitung (aufwan
etc.)

7. Hardware-Konzept

7.1. Hardware-Architektur

Anhand der funktionalen Vorgaben für die Messstation werden der Datenlogger, die Sensoreinheit und das Bussystem im folgenden genauer spezifiziert und die Komponenten ausgewählt.

7.1.1. Datenlogger

Das Hardware-Konzept des Datenloggers ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Der Datenlogger sammelt die Daten der Sensoreinheiten über das Bussystem ein und speichert sie ab. Dafür benötigt er das Bussystem, einen Mikrokontroller, internen Speicher und ein leicht auswechselbares Speichermedium. Ausserdem soll über eine Schnittstelle ein Computer angeschlossen werden können, um den Betrieb der Messstation zu steuern. Der Datenlogger wird in einem wasserdichten Gehäuse untergebracht. Für den Austausch des Speichermediums wäre eine verschraubbare Öffnung denkbar.

7.1.2. Sensoreinheit

Die Sensoreinheit benötigt einen Beschleunigungssensor, um die Einschläge von Geschiebe zu messen. Über einen Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler, Englisch Analog Digital Converter (ADC)) werden die Messsignale digitalisiert. Die gemessenen Signale werden von einem Mikrokontroller verarbeitet, im internen Speicher zwischengespeichert und über das Bussystem an den Datenlogger übertragen. Abbildung 7.2 zeigt das Hardware-Konzept der Sensoreinheit.

7.1.3. Bussystem

Das Bussystem muss die Daten und Befehle zwischen Datenlogger und Sensoreinheiten übertragen. Die Reichweite des Bussystems muss genügen, um alle Komponenten der Messinstallation zu verbinden. Die Datenbandbreite muss die Übertragung der Messresultate aller Sensoren erlauben.

7.2. Komponentenauswahl

7.2.1. Mikroprozessor

Bei der Auswahl des Mikrokontrollers werden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Genügend Rechenleistung für allfällige zusätzliche Anforderungen.
- A/D-Wandler mit genügender Abtastrate und Auflösung (Bit-Breite).
- DSP integriert für die schnelle Verarbeitung der Messdaten.
- Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC).
- Ein-/Ausgänge für das Bussystem.
- Ein-/Ausgänge für den externen Speicher.

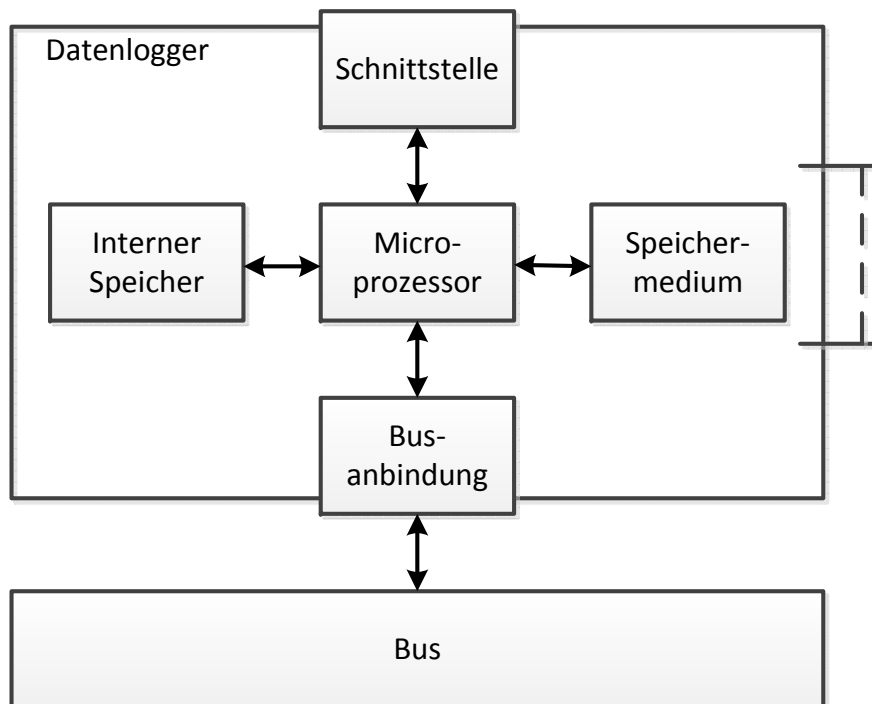


Abbildung 7.1.: Hardwarekonzept des Datenloggers.

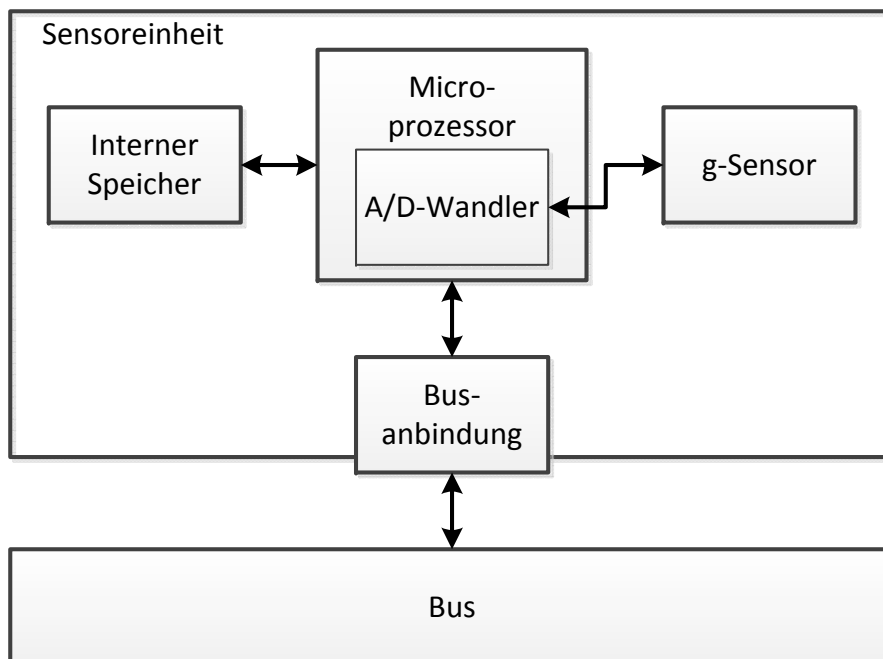


Abbildung 7.2.: Hardwarekonzept der Sensoreinheit.

- möglichst geringer Stromverbrauch.

Für die vorliegende Anwendung eignen sich Mobile-Prozessoren sehr gut. Sie sind für den Einsatz in mobilen Geräten konzipiert, d.h. für den Batteriebetrieb, sind aber trotzdem sehr leistungsfähig. Die *ARM Cortex*-Reihe bietet ein breites Spektrum an Prozessoren an. Im Mobile-Segment der *ARM Cortex*-Reihe sind vier Prozessoren erhältlich. Da nur ein Modell einen Digitaler Signal-Prozessor (DSP) aufweist, ist die Entscheidung einfach. Der *ARM Cortex-M4* ist auch der neueste Prozessor aus dem Mobile-Segment. Mit dem Ausblick, das Messsystem in einem zukünftigen Projekt zur Serienreife zu bringen, macht es nur Sinn, den neuesten Prozessor zu verwenden. Ein Auszug aus dem Datenblatt des *ARM Cortex-M4* befindet sich im Anhang A.5.1. Abbildung 7.3 zeigt die Fähigkeiten des *ARM Cortex-M4*.

Nested Vectored Interrupt Controller Ein Prozessor mit NVIC kann auf verschiedene Ereignisse reagieren, indem Interrupts ausgelöst werden. Jedem Interrupt kann eine Priorität zugewiesen werden, um festzulegen, ob ein Interrupt einen anderen unterbrechen darf, der gerade vom Prozessor abgearbeitet wird. Für das Messsystem wird ein NVIC benötigt, da mehrere zeitkritische Prozesse parallel ablaufen sollen. Einerseits muss die Abtastrate der Messwerterfassung genau eingehalten werden. Andererseits darf die Verarbeitung der Messwerte nicht zu lange unterbrochen werden, um einen Überlauf der Queue zu vermeiden. Die Daten der Ereignisse müssen parallel dazu an den Datenlogger übermittelt werden. Die Prioritäten dieser Prozesse müssen richtig gewählt werden. Im Abschnitt 8.4 wird näher darauf eingegangen.

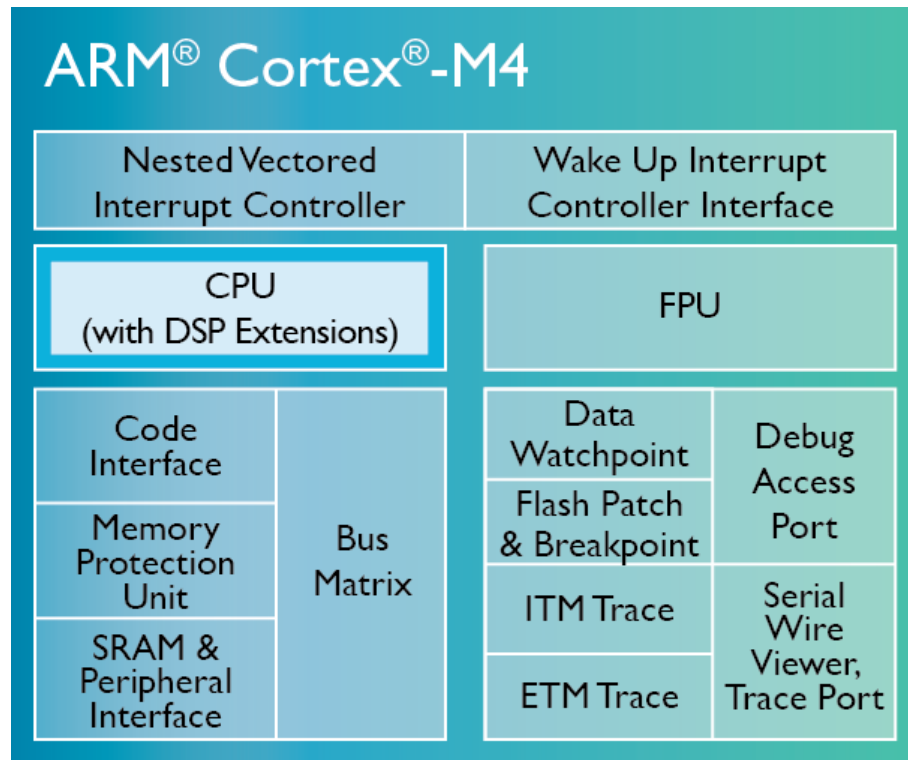
DSP Der *ARM Cortex-M4* verfügt über DSP-Funktionen, eine sog. single-cycle multiply-accumulate unit (MAC). In einer single-cycle MAC können Multiplikationen in einem einzigen Prozessorzyklus ausgeführt werden. Normalerweise benötigt ein Prozessor für eine Multiplikation bis zu mehreren zehn Zyklen, bis das Resultat vorliegt. Mit einem DSP ist es daher möglich, z.B. eine Filterfunktion viel effizienter zu berechnen als mit einem normalen Prozessor, da für diese viele Multiplikationen und Additionen ausgeführt werden müssen.

Floating Point Unit (FPU) Eine FPU führt Berechnungen mit Dezimalbrüchen sehr rasch aus. Für unsere Anwendung ist eine FPU keine Voraussetzung. Falls in einem späteren Projekt komplexere Filter oder andere Anwendungen berechnet werden müssen, könnte die FPU aber ein Vorteil sein.

Wake Up Interrupt Controller Interface Ein Wake Up Interrupt Controller Interface ermöglicht es, einen Prozessor in einen Stromsparmodus zu versetzen und ihn durch ein definiertes Signal wieder zu wecken. Damit ist es möglich, eine Sensoreinheit praktisch ganz abzuschalten, wenn sie keine Messungen durchführt. Durch eine Nachricht über das Bussystem kann die Sensoreinheit wieder eingeschaltet werden. Der Cortex-M4 verfügt über 240 mögliche Wake Up Interrupts, kann also für 240 Ereignisse programmiert werden, die ihn aufwecken oder in einen Stromsparmodus senden können (vgl. [3]).

Rechenleistung Die Rechenleistung des *ARM Cortex-M4* hängt von der Implementation ab. Die Firma ARM produziert den *ARM Cortex-M4* nicht selbst, sondern lizenziert Chip-Hersteller für die Verwendung der Architektur in ihren Prozessoren. Vom *ARM Cortex-M4* sind mehrere Ausführungen erhältlich. Verschiedene Chip-Hersteller implementieren eine Architektur des *ARM Cortex-M4* in ihren Prozessoren.

A/D-Wandler Bei den bestehenden Messstationen wird die Datenmenge stark reduziert, indem über eine Minute ein Histogramm mit den Peakintensitäten als Klassen berechnet wird. Die Intensitäten werden in 18 Klassen logarithmischer Abstufung eingeteilt. Das entspricht einer Bit-Breite von etwas mehr als vier Bit (4 Bit ermöglichen 16 Werte). Da für die Klasseneinteilung eine logarithmische Abstufung gewählt wurde, muss ein linearer A/D-Wandler trotzdem eine höhere Bit-Breite als vier aufweisen, um die gleiche Auflösung wie in den unteren logarithmischen Klassen zu erreichen. Mit 12 Bit Auflösung sind 4096 Stufen unterscheidbar, was für diese Anwendung genügt.

Abbildung 7.3.: Chipdiagramm der *ARM Cortex-M4* Architektur [3].

Peripherie Damit der Prozessor über das Bussystem kommunizieren und auf ein externes Speichermedium schreiben kann, sind genügend Ein- und Ausgabe-Pins nötig.

Wahl eines Prozessors Da der Entscheid für eine Hardware schon zu Beginn des Projekts gefällt werden musste, wurde auf eine grosszügige Sicherheitsmarge in Sachen Rechenleistung und Bit-Breite geachtet. Um Kosten und Baugrösse der Sensoreinheit klein zu halten, suchten wir nach einem Evaluationsboard mit *ARM Cortex-M4* Prozessor. Das *LPC4088 QuickStart Board* von *NXP Semiconductors* hat genügend Arbeitsspeicher für den Prozessor, verfügt über die benötigten Pins für die Peripherie und hat bei weitem genügend Rechenleistung. Die Fähigkeiten des NXP LPC4088FET208 Prozessors sind in Tabelle 7.1 dargestellt.

Auf dem *NXP LPC4088 QuickStart Board* sind zusätzliche Bauteile verbaut, z.B. Speicher (SDRAM und Flash) und Pin-Steckleisten, um CAN-Bus-Pins oder A/D-Eingänge anzuschliessen. Tabelle ?? listet die für dieses Projekt relevanten, zusätzlichen Eigenschaften auf.

Taktfrequenz	bis 120 MHz
NVIC	vorhanden
FPU	vorhanden
Programmspeicher	512 kByte
Arbeitsspeicher (intern)	96 kByte
CAN-Bus	2
USB	2
SD-Card	Anschlüsse vorhanden
A/D-Wandler	8 Eingänge, 12 Bit

Tabelle 7.1.: Fähigkeiten des NXP LPC4088 Prozessors [5].

Prozessor	NXP LPC4088FET208
Taktfrequenz	bis 120 MHz
Flash-Speicher	8 MByte
SDRAM	32 MByte
A/D-Wandler	6 Eingänge nutzbar, 12 Bit

Tabelle 7.2.: Zusätzliche Fähigkeiten des NXP LPC4088 QuickStart Boards von *Embedded Artists* [6].

7.2.2. Bus-System

Anhand folgender Kriterien wurde ein Bussystem ausgewählt:

- Übertragungsbandbreite genügend für fortlaufende Übertragung von Rohdaten einer Sensoreinheit.
- Reichweite mindestens 20 Meter.
- Robust gegenüber äusseren Einflüssen.
- Mindestens zwanzig Busteilnehmer möglich.

In Tabelle 7.3 sind die Eigenschaften diverser Bussysteme aufgeführt.

Kommentare SPI und I2C sind nur für kurze Distanzen geeignet und sind deshalb keine Option. Die Verwendung von Ethernet zur Datenübertragung würde zwei Schnittstellen auf jeder Sensoreinheit voraussetzen, um die Sensoren hintereinander zusammenzuhängen (Daisy Chain). Jedes Paket müsste vom Mikrokontroller weitergeleitet werden, wenn es für einen anderen Empfänger bestimmt ist. Dies führte zu einer zusätzlichen Belastung der Microcontroller. Stromversorgung über Ethernet ist mit PowerOverEthernet (PoE) zwar möglich, erfordert aber spezielle Geräte zur Speisung über den Stecker des Datenkabels. Dies verunmöglicht eine Daisy Chain mit PoE, neben dem Datenkabel wäre noch ein Kabel für die Stromversorgung notwendig.

Vergleich CAN-Bus und RS485 Die beiden Bussysteme CAN und RS485 sind nicht einfach zu vergleichen, da der RS485-Standard nur die elektrischen Eigenschaften des Systems beschreibt (OSI Layer 1). Der CAN-Standard beschreibt auch den Data Link Layer (OSI Layer 2). Der Data Link Layer beschreibt Methoden, die die Übertragung zuverlässig machen. Ein Beispiel dafür ist eine Prüfsumme, die es ermöglicht, eine fehlerhafte Übertragung im Empfänger festzustellen. Der Empfänger bestätigt bei korrekter Prüfsumme den Empfang. Stellt einer der Empfänger einen Fehler fest, sendet er eine Fehlermeldung über den Bus und stört damit die Übertragung. So ist es nicht möglich, dass einige Empfänger die Nachricht lesen konnten und andere nicht. Der Sender ist bei erfolgter Bestätigung sicher, dass seine Nachricht erfolgreich an alle Empfänger übertragen wurde (vgl. [10]).

CAN-Bus definiert auch eine Adressierung, Kollisions-Erkennung und -Auflösung, Prioritäten der Busteilnehmer und ein Nachrichtenformat. Bei RS485 besteht eine Nachricht aus einem einzelnen Zeichen. Der Data Link Layer muss gänzlich in Software gelöst werden. Dafür ist es möglich, das Protokoll komplett selbst zu definieren. Dies erlaubt beliebig lange Übertragungen von einem Busteilnehmer. CAN-Bus limitiert die Nachrichtenlänge auf 8 Bytes. Die Übertragung längerer Nachrichten muss über Software geregelt werden (vgl. [10]).

Bei beiden Standards ist der Stecker nicht definiert. Das lässt die komplette Freiheit für die Wahl eines wasserdichten Steckverbinders.

Da der CAN-Bus bereits mit dem Standard viele benötigte Merkmale mitbringt, fällt die Entscheidung nicht schwer.

	Bitrate	Distanz	Clients	Besonderheiten
CAN	1 MBit/s 125 kBit/s	40 m 500 m	> 20	<ul style="list-style-type: none"> + Collision Detection (CD) umgehen mit Polling durch Master. + Bei synchronem CAN wird CD durch ID gelöst. + CAN Controller sendet Interrupt Request bei erhaltener Nachricht.
SPI	..100 MBit/s	< 1 m	slave select	<ul style="list-style-type: none"> - Pro Client eine Slave Select Leitung - alternativ: Daisy Chain \Rightarrow alle Mikrokontroller (MC) beschäftigt. - Bei Ausfall eines MC ganzer Bus unterbrochen.
RS485	35 MBit/s 100 kBit/s	10 m 1200 m	>32	<ul style="list-style-type: none"> - Master am besten in der Mitte des Bus \Rightarrow ungünstig. - Braucht 2..4 Drähte (bei Full Duplex) - braucht pull-up und pull-down Widerstände \Rightarrow mehr Leistungsaufnahme.
Ethernet	100 MBit/s	100 m	> 20	<ul style="list-style-type: none"> + Stromversorgung bei Power over Ethernet (PoE) integriert. - kein Bus sondern allenfalls Daisy Chain. - bei Daisy Chain kein PoE möglich.
Feldbus				ist eine Familie von Bussen, z.B. CAN-Bus
I2C	0.4..5 Mbit/s	wenige Meter	< 20	nur für kurze Distanzen, Bitrate nimmt mit zunehmender Distanz rasch ab.

Tabelle 7.3.: Entscheidungsmatrix für die Auswahl des Bussystems.

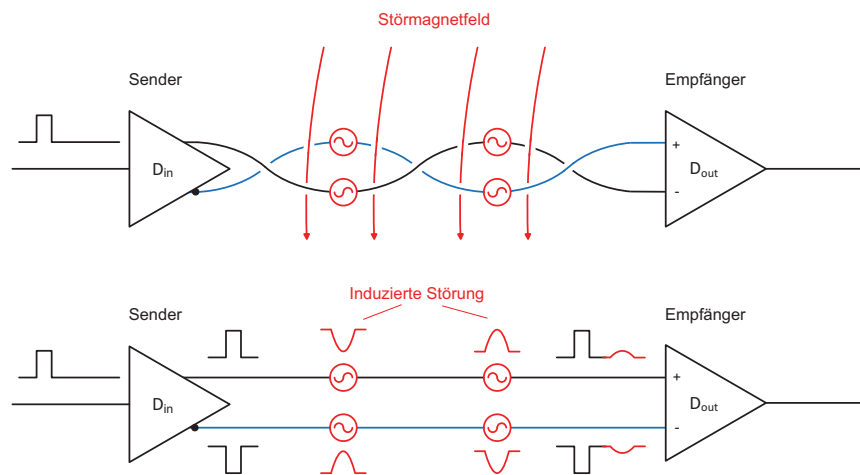


Abbildung 7.4.: Differentielle Leitung [4].

Entscheidung CAN-Bus erfüllt alle Kriterien und erlaubt es, den Busmaster am Ende des Bus zu platzieren. Dies ist ein weiterer Vorteil gegenüber RS485, wo der Master in der Mitte platziert werden sollte. CAN-Bus bietet bereits Collision Detection und Fehlererkennung, während dies bei RS485 in der Software gelöst werden muss. Für CAN-Bus sind Bus-Treiber (Transceiver) erhältlich, die mit hohen Spannungen umgehen können, was das Bussystem robuster gegenüber Umwelteinflüssen macht. Die Grösse der Datenpakete ist bei CAN-Bus auf 8 Byte begrenzt, bei RS485 werden die Datenpakete über die Software frei definiert, was einen Vorteil von RS485 darstellt. Insgesamt überwiegen die Vorteile von CAN-Bus klar.

CAN-Bus CAN-Bus ist ein Bussystem über eine differentielle Leitung. Auf zwei Drähten liegt eine bestimmte Spannung an. Der Empfänger misst den Spannungsdifferenz zwischen den beiden Drähten. Die Differenz wird vom Sender entweder klein oder gross gehalten, um ein 'dominantes' oder ein 'rezessives' Bit zu senden. 'Rezessiv' bedeutet dabei, dass ein anderer Busteilnehmer durch anlegen eines 'dominanten' Bits das 'rezessive' Bit überschreiben kann. Welche Spannungsdifferenzen 'dominant' und 'rezessiv' darstellen, ist vom Standard nicht definiert und lässt dem Entwickler damit freie Hand, die elektrischen Eigenschaften seiner CAN-Implementation seinen Bedürfnissen entsprechend zu definieren. Um Signalreflexionen am Ende der Leitungen zu vermeiden, wird ein Terminierungswiderstand an beiden Enden benötigt, der die beiden Leitungen abschliesst. (vgl. [1]).

Die beiden Drähte der differentiellen Leitung sind verdreht. Dadurch wird das Signal der Leitung besser vor äusseren Einflüssen geschützt. Elektrische und magnetische Felder induzieren in einem Draht einen Strom. Da das äussere Feld aber in beiden Drähten praktisch den gleichen Strom induziert, ändert sich an der Spannungsdifferenz in den Drähten kaum etwas (siehe Abbildung 7.4). Die beiden Drähte stellen auch eine Spule dar. Durch das verdrehen der Drähte ändert sich die Ausrichtung der Spule im äusseren Feld auf kurzen Abständen, induzierte Störungen heben sich so gegenseitig auf (vgl. [4, Kap. 2, S. 14]).

Die Kollisions-Erkennung und -Auflösung wird über ID-Nummern der Teilnehmer gelöst. Vor dem Start einer Übertragung prüft der Teilnehmer, dass der Bus zur Zeit frei ist. Dann sendet der Teilnehmer seine ID-Nummer. Falls zwei Teilnehmer gleichzeitig zu senden beginnen, werden sie irgendwann unterschiedliche Bits senden. Der Teilnehmer, der dann das 'dominante' Bit sendet, liest vom Bus den gleichen Wert, den er gerade sendet. Für ihn ist die Übertragung nicht gestört. Der Teilnehmer mit dem 'rezessiven' Bit liest aber das 'dominante' Bit des anderen Senders und muss seine Übertragung sofort abbrechen. Diese Art der Kollisionsauflösung hat den Vorteil, dass keine Übertragungszeit verloren geht, da einer der Teilnehmer seine Nachricht senden darf. Der Verlierer wartet, bis der Bus wieder frei ist und probiert dann erneut, die Nachricht zu senden (vgl. [1]).

	Breite	Pins	Stromverbrauch	Bemerkungen
SD-Card	24 mm	9	20..100 mA (0.2 mA)	4 bit breiter serieller Bus
CompactFlash	43 mm	50	max. 70 mA (k.A.)	paralleler Bus
USB-Stick	min. 12 mm	4	typ. 70 mA (k.A.)	

Tabelle 7.4.: Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Speichermediums [2, 7, 9].

Die korrekte Übertragung wird mittels eines Cyclic Redundancy Check (CRC)-Codes überprüft. Der Empfänger berechnet bereits während dem Empfang der Nachricht die CRC-Prüfsumme. Sobald die vom Sender mitgeschickte CRC-Prüfsumme übertragen ist, kann der Empfänger diese mit der berechneten CRC vergleichen. Stimmen die Prüfsummen überein, bestätigt der Empfänger die korrekte Übertragung (vgl. [1]).

7.2.3. Speichermedium

Kriterien Das externe Speichermedium soll möglichst klein sein, wenig Stromverbrauch haben und einfach auswechselbar sein. Bei Inaktivität sollte das Medium wenn möglich keinen Strom verbrauchen. Für einen mehrwöchigen unabhängigen Betrieb einer Messstation muss genügend Speicherkapazität bereitgestellt werden.

Datenmenge Pro Sensor werden bei hohem Geschiebeaufkommen maximal hundert Ereignisse pro Sekunde erwartet. Ein solches Geschiebeaufkommen stellt jedoch die Ausnahme dar. Ein Ereignis benötigt je nach verlangtem Detailgrad und Dauer des Ereignisses 10–200 Byte Speicherplatz. Für den normalen Betriebsmodus werden 50 Byte/Ereignis gerechnet, bei 5 Ereignissen pro Sekunde. Damit ergibt sich eine Datenrate von 250 Byte/s, die es pro Sensor abzuspeichern gilt. Mit zehn Sensoren im Einsatz müssen 2.5 kByte/s gespeichert werden.

Unabhängige Betriebsdauer Pro Gigabyte Speicherplatz können 111 Stunden Daten für zehn Sensoren gespeichert werden. Bei hohem Geschiebeaufkommen mit zwanzig mal mehr Ereignissen bleiben immer noch 5 Stunden Aufzeichnungszeit pro Gigabyte. Begnügt man sich mit weniger Details, fallen pro Sensor in zehn Sekunden rund 400 Byte Daten an. Bei dieser Datenrate reicht ein Gigabyte für rund 700 Stunden. Auch bei hohem Geschiebeaufkommen kann die Anlage mehrere Tage an Daten speichern.

Kapazität Heute sind Speichermedien mit Kapazitäten bis über 128 GB erhältlich, so dass die Detailrate kein entscheidendes Kriterium mehr darstellt.

Datentransfer Für den Transfer der Daten aus dem Datenlogger auf einen Computer gibt es grundsätzlich zwei Varianten. Entweder man liest die Daten über eine Schnittstelle auf den Computer aus, oder man tauscht das Speichermedium aus. Das Auslesen via Schnittstelle benötigt zusätzlich Strom, das Wechseln des Speichermediums setzt einen mehr oder weniger komfortablen und trotzdem wasserdichten Zugang zum Medium voraus. Da heute Speichermedien mit kleinem Platzbedarf erhältlich sind, kann ein solcher Zugang recht einfach mit einem Schraubverschluss realisiert werden.

Vergleich In Tabelle 7.4 werden verschiedene Speichermedien miteinander verglichen. In der Spalte 'Breite' ist aufgelistet, wie gross eine Öffnung mindestens sein muss, um das Speichermedium wechseln zu können. 'Pins' gibt an, wie viele Leitungen für den Anschluss des Mediums am Microcontroller nötig sind. Der Stromverbrauch in Klammern ist für den Standby-Modus des Speichermediums.

Entscheid Für einen verschraubbaren Verschluss ist die CompactFlash-Karte zu breit, das Gehäuse würde dadurch sehr gross werden. Die SD-Karte und der USB-Stick sind vergleichbar in der Grösse. Von der SD-Karte sind auch kleinere Varianten erhältlich. Eine Öffnung für den Austausch des Speichermediums kann eine gewisse Grösse ohnehin nicht unterschreiten, damit hineingegriffen werden kann. Da die SD-Karte im Standby den geringeren Stromverbrauch hat, wird der Datenlogger mit einem SD-Kartenleser ausgestattet.

7.2.4. Sensor

swahl beschrei-

7.2.5. Schnittstelle

zellenauswahl
oen

7.3. Komponenten

7.3.1. Cortex M4 Mikroprozessor

M4 beschreiben

Flash Speicher

eicher beschrei-

SDRAM

beschreiben

7.3.2. Beschleunigungs-Sensor

eschreiben

7.3.3. CAN Bus

s beschreiben

CAN Transceiver

ansceiver be-
n

7.3.4. SD Karte

e/MCI beschrei-

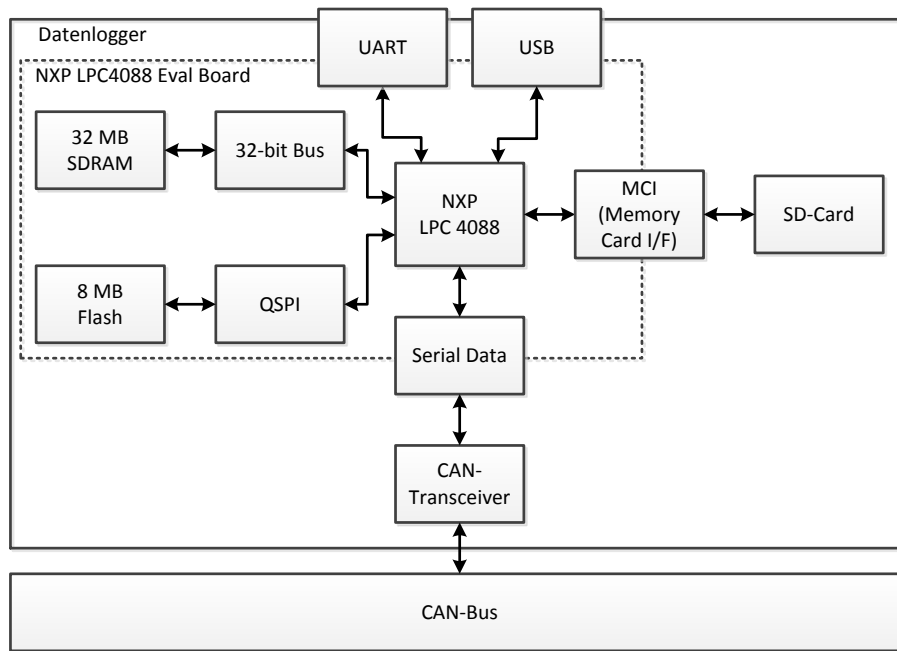


Abbildung 7.5.: Schematischer Hardware-Aufbau des Datenloggers.

7.3.5. UART Schnittstelle

UART beschreib

7.3.6. Gehäuse

Gehäuse beschre

7.4. Datenlogger

Datenlogger übe

7.5. Sensoreinheit

Sensoreinheit üb

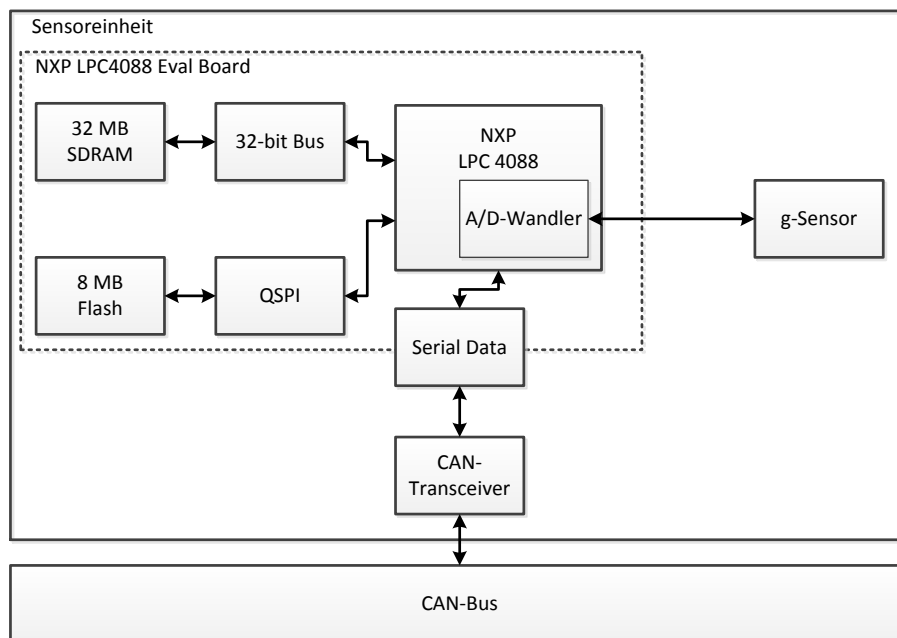


Abbildung 7.6.: Schematischer Hardware-Aufbau der Sensoreinheit.

8. Software-Konzept

8.1. Software-Stack

8.1.1. Überblick

8.1.2. Messdatenerfassung

Der NXP LPC4088 Mikroprozessor verfügt über einen 12-bit A/D-Wandler, der über einen Multiplexer auf acht Pins messen kann. Auf dem verwendeten Quickstart-Board stehen sechs Pins für A/D-Wandlung zur Verfügung. Für die geplante Anwendung reicht ein A/D-Pin, da der Beschleunigungs-Sensor die Beschleunigung nur auf einer Achse misst. Der A/D-Wandler des NXP LPC4088 wird mit einer Abtastrate von 10 kHz betrieben. Falls höhere Abtastraten nötig sind, kann der A/D-Wandler theoretisch mit bis zu 400 kHz betrieben werden.

8.1.3. Ereigniserkennung

Hilbert-Transformation

Von der WSL wurde die Ereigniserkennung bisher mittels Hilbert-Transformation gelöst. Die Hilbert-Transformation liefert die umhüllende Kurve des gemessenen Signals. Überschreitet die Umhüllende den Threshold, markiert dies den Start eines neuen Ereignisses. Fällt die Umhüllende unter den Threshold, ist das Ereignis beendet.

Die Berechnung der Hilbert-Transformation erfordert einigen Aufwand. Mittels diskrete Fourier-Transformation (DFT) wird das Spektrum des Signals berechnet. Negative Frequenzanteile werden auf null gesetzt und das resultierende Spektrum mittels inverse diskrete Fourier-Transformation (IDFT) wieder in ein Signal umgerechnet (vgl. [8]). Das resultierende Signal umhüllt das Eingangssignal. Für die DFT und die IDFT ist der Rechenaufwand je $N \cdot \log_2(N)$. Je mehr Datenpunkte in einem Schritt verrechnet werden (Blockgrösse), desto höher ist der Aufwand, aber desto genauer ist das Resultat. Mit einer Blockgrösse von 128 Messwerten benötigt die DFT und die IDFT je 896 komplexe Multiplikationen und Additionen (vgl. [12, Kap. 3, S. 48]). Pro Messwert sind das 7 komplexe Multiplikationen und Additionen. Dank der DSP-Fähigkeiten des gewählten Cortex™-M4 Prozessors liegt die zu erwartende Prozessorauslastung für die Hilbert-Transformation bei einer Abtastrate von 10 kHz bei wenigen Prozent.

Hilbert-Transformation als FIR-Filter

Die Hilbert-Transformation kann mittels eines FIR-Filters angenähert werden. Ein Allpass mit gerader Filter-Ordnung und geeignet gewählten Koeffizienten (Abbildung 8.3) liefert eine gute Näherung. Je nach gewählter Ordnung des Filters ist der Rechenaufwand aber in ähnlicher Grössenordnung wie mit DFT und IDFT.

Prioritäten des P
Messung, Erkenn
Übermittlung erk
und wie wir das
haben.

figure: umhüllen
lab: hilbert()

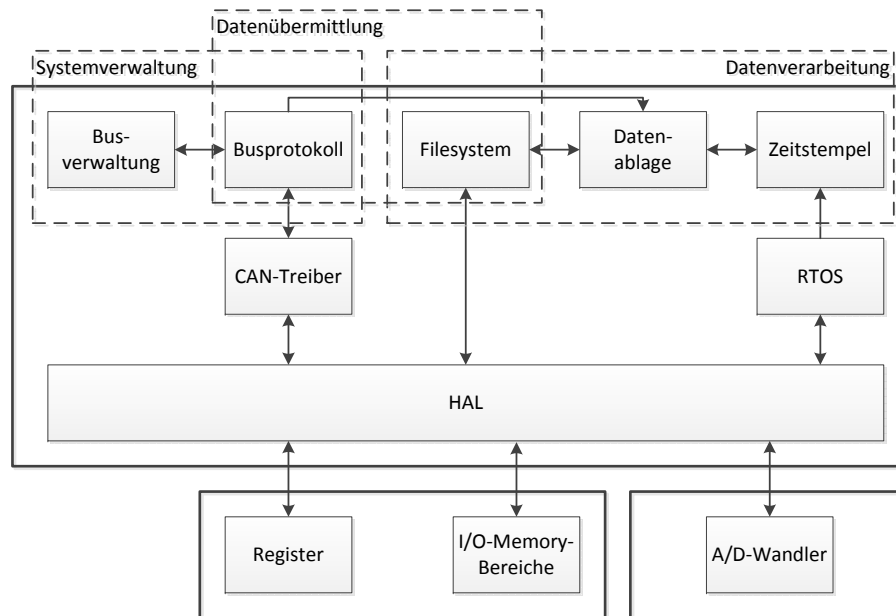


Abbildung 8.1.: Softwarestack des Datenloggers.

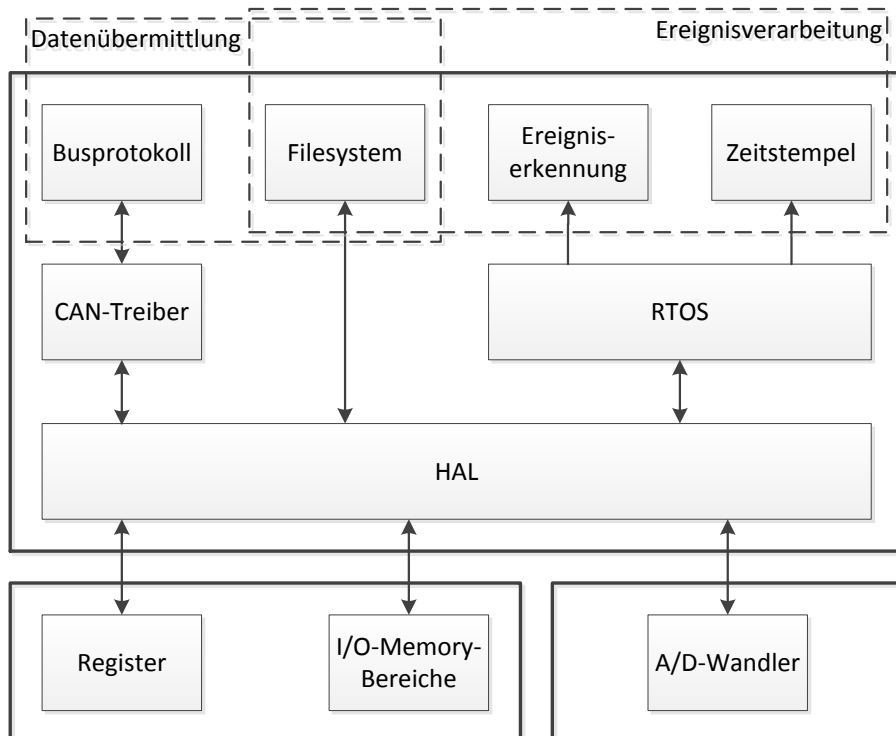


Abbildung 8.2.: Softwarestack der Sensoreinheit.

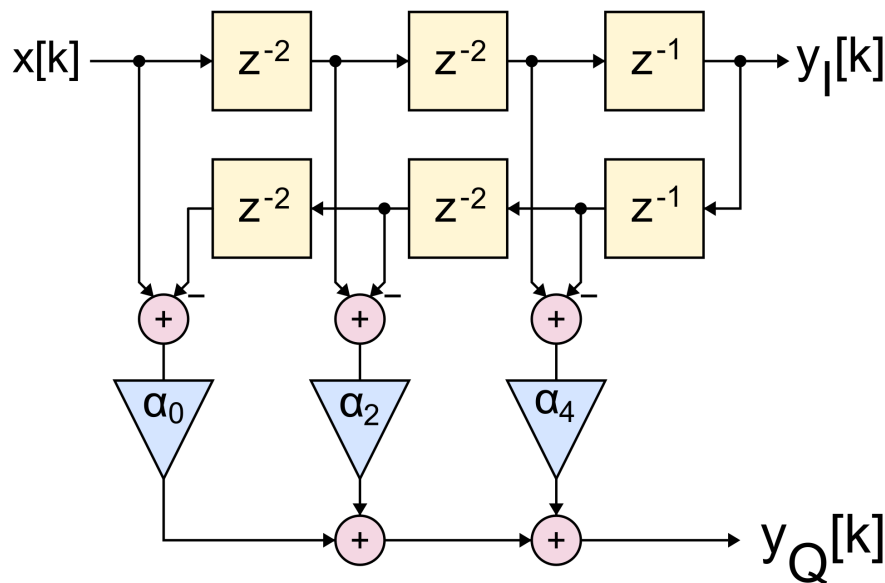


Abbildung 8.3.: Hilbert-Transformation als FIR-Filter [11].

Zustandsmaschine

Um den Rechenaufwand der Hilbert-Transformation zu umgehen, lösen wir die Ereigniserkennung mittels einer Finite State Machine (FSM). Das Zustandsdiagramm der Finite State Machine in Abbildung 8.4 zeigt alle möglichen Zustände der FSM und welche Ereignisse einen Übergang in einen anderen Zustand auslösen.

Ereignis-FSM an
auf neue Stati

Konfiguration der Zustandsmaschine Über Parameter wird definiert, welche Signalform als Ereignis erkannt werden soll. In Abbildung 8.5 sind die Parameter dargestellt.

Nullpegel Der Nullpegel kann angepasst werden, um die Erddanziehung, die als Beschleunigung auf den Sensor wirkt, zu kompensieren. Je nachdem wie der Sensor orientiert ist, ist die Erddanziehungskraft nicht parallel zur Mess-Achse des Sensors und damit nicht in jedem Fall gleich gross. Deshalb muss dieser Wert angepasst werden können.

threshold Der Threshold definiert, ab welcher Abweichung des Signalpegels vom Nullpegel die FSM einen Messwert als 'hoch' betrachten soll. Zu beachten ist, dass der Threshold auf beide Seiten des Nullpegels gilt. Da der Sensor sowohl Beschleunigungen nach oben wie auch nach unten erfährt, unterscheidet die FSM dies mit den Ereignissen 'hoch_positiv' resp. 'hoch_negativ'. Signalpegel, die den Threshold nicht überschreiten, werden als 'niedrig' eingestuft.

Timeout Da ein Ereignis nicht nur aus einem Peak besteht, muss eine Dauer (Timeout) definiert werden können, während der die FSM auf den Beginn eines neuen Peaks wartet. Tritt während des Timeouts kein neuer Peak auf, gilt das Ereignis als beendet.

graphik zum ein
des Neigungswin
Sensors auf den
level.

Ablauf der Zustandsmaschine

Im Folgenden wird der Ablauf in der Zustandsmaschine genauer erklärt. Im Zustandsdiagramm in Abbildung 8.4 sind die Namen der Zustände und Ereignisse ersichtlich. Der Übersichtlichkeit halber wurde auf die Auflistung der Aktionen im Diagramm verzichtet.

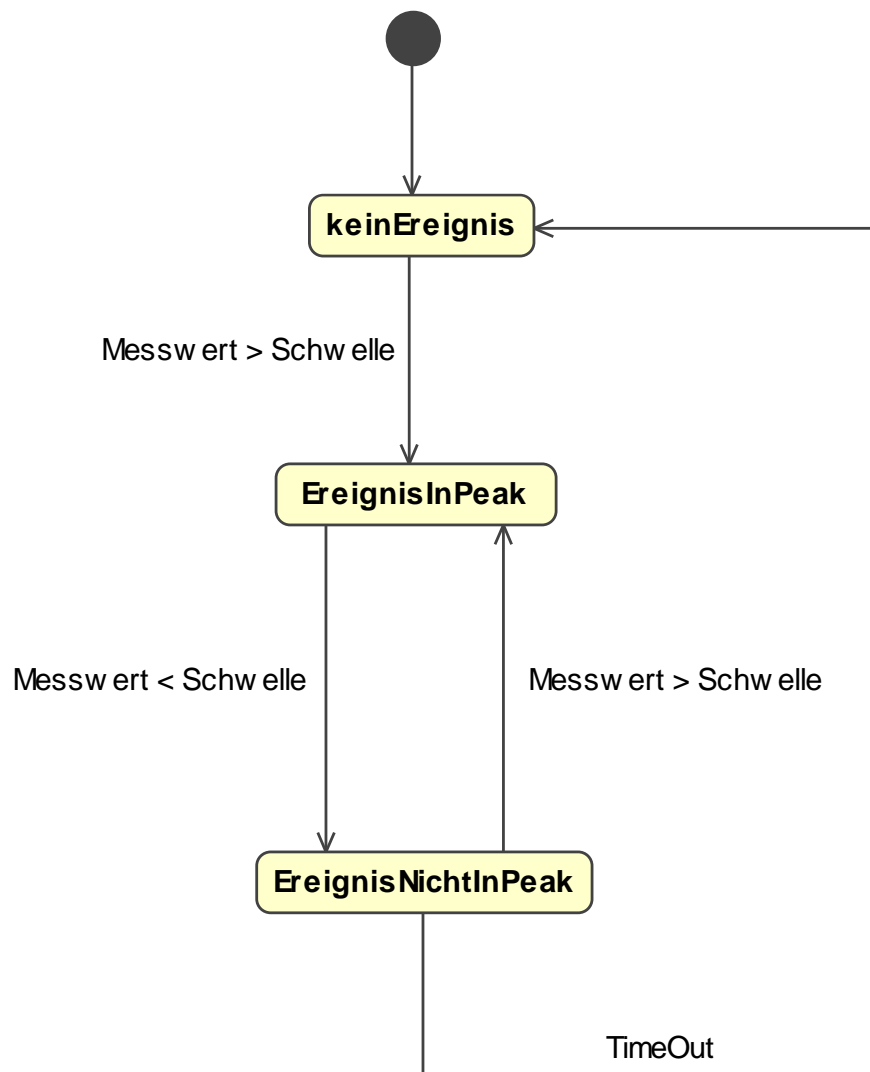


Abbildung 8.4.: Zustandsmaschine der Ereigniserkennung.

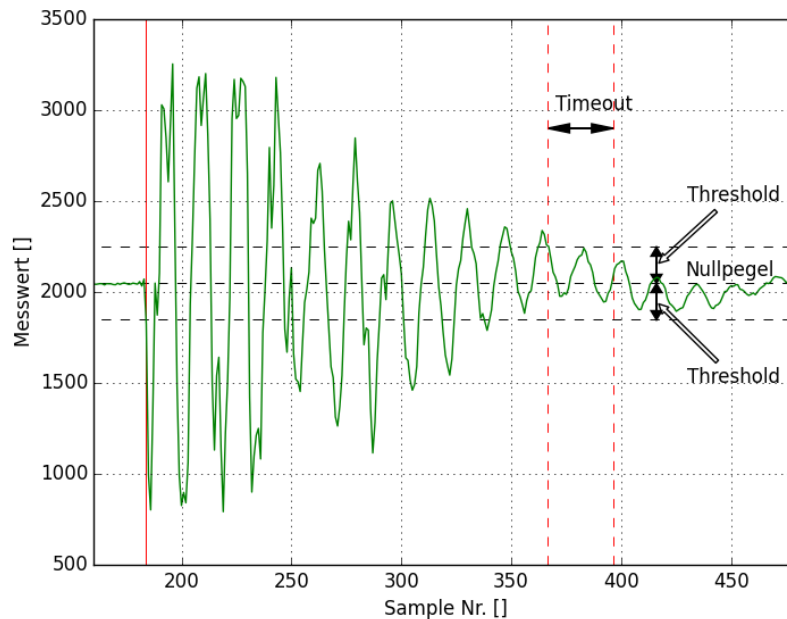


Abbildung 8.5.: Parameter der Ereigniserkennung.

Die FSM wird im Zustand 'keinEreignis' initialisiert. Tritt ein Messwert auf, der als 'hoch_positiv' klassiert wird, wechselt die FSM in den Zustand 'EreignisInPeak_positiv'. In diesem Zustand verbleibt die FSM, bis ein anders klassierter Messwert eintrifft.

Ein Messwert 'niedrig', also unterhalb des Thresholds, führt zu einem Übergang in den Zustand 'EreignisNichtInPeak'. Dieser Übergang startet einen Timer, der während der im Parameter 'Timeout' definierten Anzahl Messwerte läuft. Falls die FSM bis zum Ablauf des Timers keinen Messwert 'hoch_positiv' oder 'hoch_negativ' erhält, wechselt sie wieder in den Zustand 'keinEreignis' und übergibt die Ereignisdaten dem Prozess, der für die Übertragung zum Datenlogger zuständig ist.

Der Timer läuft nicht in Echtzeit, sondern zählt die Anzahl Messwerte seit seinem Start, da die Verarbeitung asynchron zur Erfassung der Messwerte läuft. Das bedeutet, dass die Verarbeitung problemlos während mehreren Messwerten stillstehen kann, ohne dass Messwerte verloren gehen. Dies ist möglich, da die Messwerte in eine Warteschlange (Queue) geschrieben werden, von wo sie von der FSM abgeholt werden. So lange die Queue nicht überfüllt wird, gehen keine Messwerte verloren. Die Verarbeitung der Messwerte in der FSM erfolgt im NXP LPC4088 Prozessor schnell genug, um theoretisch mit einer Abtastrate bis 200 kHz messen zu können.

8.1.4. Timestamp

8.1.5. Verwaltung der Messstation

Meldung ins Bus
koll für den Verle
Messwerten!

Zusammenhänge
Wandlung und E
erkennung und
tragung beschrei
zu ein Kommuni
diagramm, wo sy
wo asynchron.

Verschiedene Be
modi mit Grafike
schreiben

Berechnungen, in
chem Modus wie
gemessen werden
und wie lange ei
mit dem vorhand
Speicher die Res
zwischen speichern
Allenfalls ein St

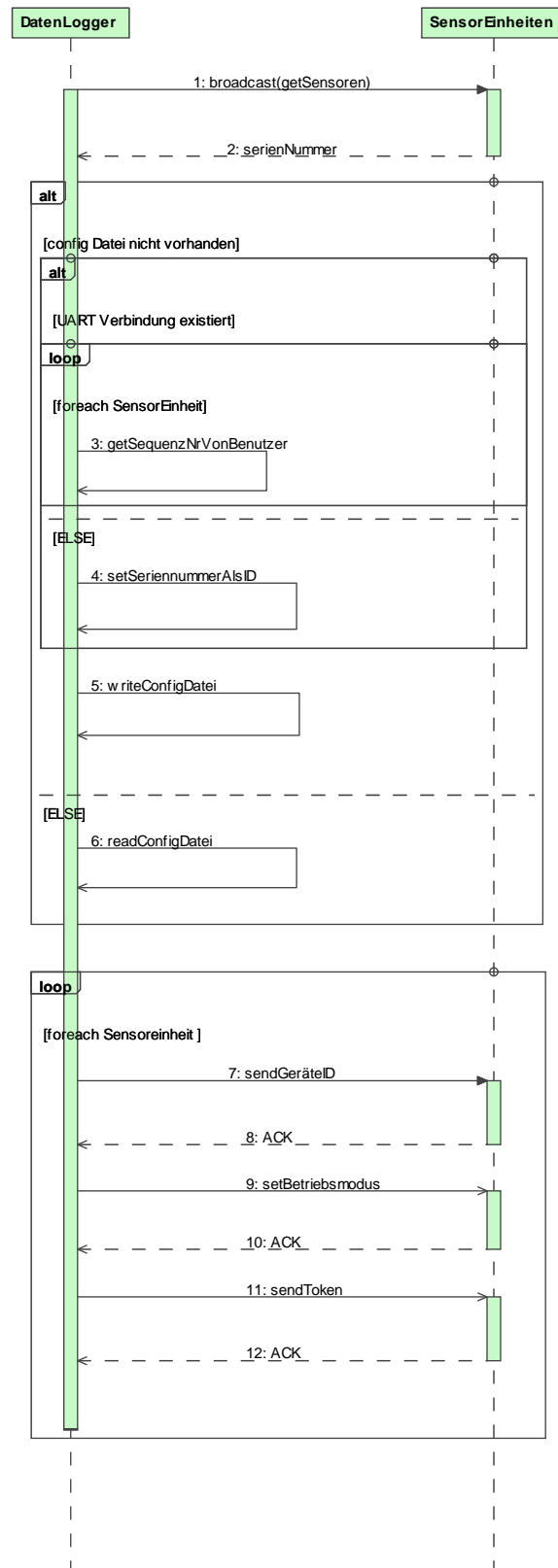


Abbildung 8.6.: Sequenzdiagramm des Startupvorgangs der Messstation.

8.1.6. Busprotokoll

8.1.7. Filesystem

8.1.8. UART-Kommandozeile

8.2. Funktionalität

8.3. Konfiguration

8.4. Parallele Prozesse

Busprotokoll aus
tehn. Darstellung
HW-Konzept Ric
naue Beschreibu
Nachrichtentypen
mestamp der ein
Peaks bezieht sic
Offset vom Begi
Impacts.

Kommunikations
Bushandler

Interrupt-System
Bushandlers auff

Texten

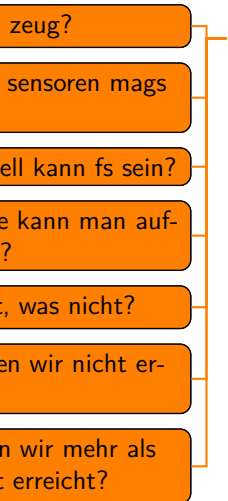
Frage: wird für j
Sensor ein eigene
geführt? Kann m
Files offen lassen
ist das keine gut
Was ist besser, j
mal das File-End
suchen um neues
hängen?

Dokumentation
Kommandos, wir
ter für die Bedie
anleitung gebrau

Texten

Hier eine Art Be
nungsanleitung z
figuration geben
ches Kommando
was zur Folge? (
Datenerfassung
startet, werden a
andere Sensoren
viert etc.

9. Resultate



10. Diskussion

haben wir erfüllt

wo gabs schwierigkeiten?

worauf sind wir s

was könnte man weiter noch mac

was ist noch gep

11. Bedienungsanleitung

11.1. Produktbeschreibung

Die Messstation wurde entwickelt, um Geschiebemessungen in einem Bach oder Fluss zu machen. Als Vorbild hat eine Messstation mit Geophone als Sensoren gedient, die einen Embedded-PC als Auswertungsrechner einsetzen. Der bauliche Aufwand für eine solche Messstation ist ziemlich gross, da viele Kabel verlegt und vor dem Geschiebe geschützt werden müssen. Mit dem Ziel, den Aufwand für die Konstruktion und die Verkabelung zu reduzieren, wurde eine neue Messstation entwickelt, die über ein Bussystem kommuniziert und die Messdaten gleich am Sensor auswertet. Auf diese Weise müssen nur noch die gewünschten, vorher spezifizierten Messdaten übertragen und gespeichert werden.

Mit der neuen Messstation können bis zu 20 Sensoren an einer Kontrolleinheit angeschlossen werden, die alle Messdaten aufzeichnet. Diese Anzahl kann nach eingehenden Tests wahrscheinlich noch erhöht werden. Die Obergrenze wird auch von der gewünschten Messdatenqualität abhängen, da das Bussystem eine begrenzte Übertragungskapazität hat.

11.2. Aufbau der Messstation

Die Messstation besteht aus einem Datenlogger der über ein Bussystem mit den Sensoreinheiten verbunden ist. Die Stromversorgung (12 V Gleichspannung) erfolgt über zwei zusätzliche Leitungen im gleichen Kabel wie für das Bussystem verwendet wird. Das Kabel verläuft vom Datenlogger zu Sensoreinheit zu Sensoreinheit.

des Aufbaus
station

Stromversorgung, Verdrahtung, Can-Bus, Terminator, R2D2, C3PO

Die Sensoreinheiten sind in einem wasserdichten Gehäuse verbaut und über wasserdichte Steckverbinder (IP68) untereinander verbunden.

11.3. Datenlogger

Das Herzstück der Anlage ist der Datenlogger, der die Kontrolle über die Kommunikation hat, die Messdaten speichert und den Anschluss eines Computers für die Konfiguration der Anlage ermöglicht. Im Datenlogger arbeitet ein *ARM Cortex-M4* Prozessor mit 120 MHz Taktgeschwindigkeit. Dieser Prozessor steuert die Kommunikation und wandelt die Messdaten für die Speicherung in lesbare Information um.

11.3.1. Anschlüsse

Der Datenlogger verfügt über vier Anschlüsse.

er den logger

Stromversorgung

Ein Anschluss ist für die Stromversorgung. Hier werden 12V Gleichspannung angeschlossen. Der Stromverbrauch ist abhängig von der Anzahl angeschlossener Sensoren.

Stromverbrauch
und pro sensor n

Busanschluss

Über den zweiten Anschluss wird das Kabel des Bussystems angeschlossen. Der Steckverbinder ist wasserdicht (IP68, Binder), damit kein Regen- oder Kondenswasser in den Datenlogger eindringen kann. Die Messstation verwendet CAN-Bus für die Kommunikation, da dieser Standard ein sehr robustes Protokoll für die Sicherstellung der korrekten und fehlerfreien Übertragung hat.

Schnittstelle zum Computer

Ein wasserdichter Steckverbinder für ein -Kabel erlaubt den Anschluss eines Computers oder auch einen Smartphones. Über eine serielle Schnittstelle kann dann die Messstation konfiguriert werden. Der Anschluss eines Computers und die Konfiguration ist in den Abschnitten 11.7.1 bis 11.7.3 ab Seite 42 im Detail beschrieben.

Speicherkarte

Die Speicherkarte kann über einen wasserdichten Schraubdeckel ausgewechselt werden, ohne dass das ganze Gehäuse des Datenloggers geöffnet werden muss. Der Umgang mit der Speicherkarte ist in den Abschnitt 11.7.3 bis 11.7.3 ab Seite 46 erklärt.

11.4. Sensor

Die Sensoreinheit der Anlage verfügen über einen Beschleunigungssensor und einen Mikroprozessor. Der Sensor misst über die Beschleunigung die Vibrationen, die vom Einschlag des Gieses verursacht werden. Der Mikroprozessor wertet die Messdaten aus und erkennt nach vorher definierten Kriterien die Ereignisse, deren Daten gesammelt werden sollen. Diese bereinigten Daten werden dann über das Bussystem an den Datenlogger übertragen.

11.4.1. Beschleunigungssensor

Der Beschleunigungssensor (*Analog Devices ADXL001-70*) misst Beschleunigungen zwischen -70 g und +70 g. Ein g entspricht der Beschleunigung durch die Erdanziehungskraft, ungefähr $10m/s^2$. Sollten die Vibrationen stärkere Beschleunigungen erzeugen, kann entweder die Konstruktion der Messanlage angepasst werden um die Vibrationen schwächer zu machen, oder der Sensor ausgewechselt werden. Aus der Baureihe *ADXL001* von *Analog Devices* sind auch Sensoren mit Messbereichen von ± 250 g und ± 500 g erhältlich. Diese Modelle geben Messsignale im gleichen Spannungsbereich aus wie das verwendete Modell *ADXL001-70* und können daher ohne Umkonfiguration oder Anpassungen an der Software verwendet werden.

11.4.2. Mikroprozessor

Der *ARM Cortex-M4* mit 120 MHz Taktfrequenz hat weit mehr Rechenleistung, als für die vorliegende Anwendung benötigt wird. Sollten komplexere Algorithmen für die Erkennung von Ereignissen, für die Filterung der Messdaten oder für die Verarbeitung der Signale benötigt werden, wäre dies dank der bereits vorhandenen Rechenleistung möglich.

Pol Nr.	Leitung	Anschluss Schraubklemme
1	Spannungsversorgung +12 V	+12V
2	Spannungsversorgung 0 V	GND
3	unbenutzt	
4	CAN-Bus High	CANH
5	CAN-Bus Low	CANL

Tabelle 11.1.: Steckerbestückung des Bussystems.

11.4.3. Anschlüsse

Die Sensoreinheit hat zwei Anschlüsse für das Bussystem. Mit dieser Bauweise ist es möglich, die Stichleitung zum Transceiver möglichst kurz zu halten, um die Signalqualität möglichst wenig negativ zu beeinflussen. Die Anschlüsse sind wasserdicht (IP68).

11.5. Bussystem

Als Bussystem wird CAN-Bus verwendet. Mit einer Datenübertragungsrate von 1 MBit/s bis zu einer Kabelgesamtlänge von 40 m, resp 125 kBit/s bis zu 500 m eignet sich CAN-Bus für diese Messstation sehr gut. Es sind keine Kabellängen zu erwarten, die weit über 40 m hinausgehen. CAN-Bus ist des Weiteren sehr robust gegenüber Umwelteinflüssen, die die Übertragung stören könnten.

11.5.1. Kabel

Die Kabel der Messstation verfügen über 4 Leitungen, die jeweils paarweise verdreht sind. Zusätzlich zu den Leitungen ist eine Zugentlastung zum Schutz vor mechanischer Beschädigung im Kabel enthalten. Um die zwei Aderpaare und die Zugentlastung ist ein metallisches Geflecht als Schild angebracht, das sowohl gegen mechanische Beschädigung als auch gegen elektrische Störeinflüsse schützt. Die PVC-Hülle des Kabels ist noch ein zusätzlicher mechanischer Schutz.

Ein Aderpaar wird für die Spannungsversorgung verwendet, das zweite Aderpaar für die Kommunikation auf dem Bussystem.

11.5.2. Abschlusswiderstände

Damit die Bus-Signale an den Enden der Leitung nicht reflektiert werden und die Übertragung stören, müssen an beiden Enden des Bussystems Abschlusswiderstände eingesetzt werden. Die Abschlusswiderstände ($120\ \Omega$) verbinden die Anschlüsse CANH und CANL auf der Leiterplatte und werden wie in Abbildung 11.1 angebracht.

chema Ab-
iderstand

11.5.3. Steckverbinder

Die Steckverbinder sind fünfpolig und wasserdicht (IP68). Die Pole sind gemäss Tabelle 11.1 bestückt. Auf der Leiterplatte der Sensoreinheit ist eine Schraubklemmenleiste mit 8 Anschlüssen angebracht. Jeweils zwei benachbarte Anschlüsse sind zusammengeschaltet, damit jede Leitung einzeln fest verschraubt werden kann. Es wird nicht empfohlen, zwei gleiche Leitungen in einer einzelnen Schraubklemme zusammen zu verschrauben.

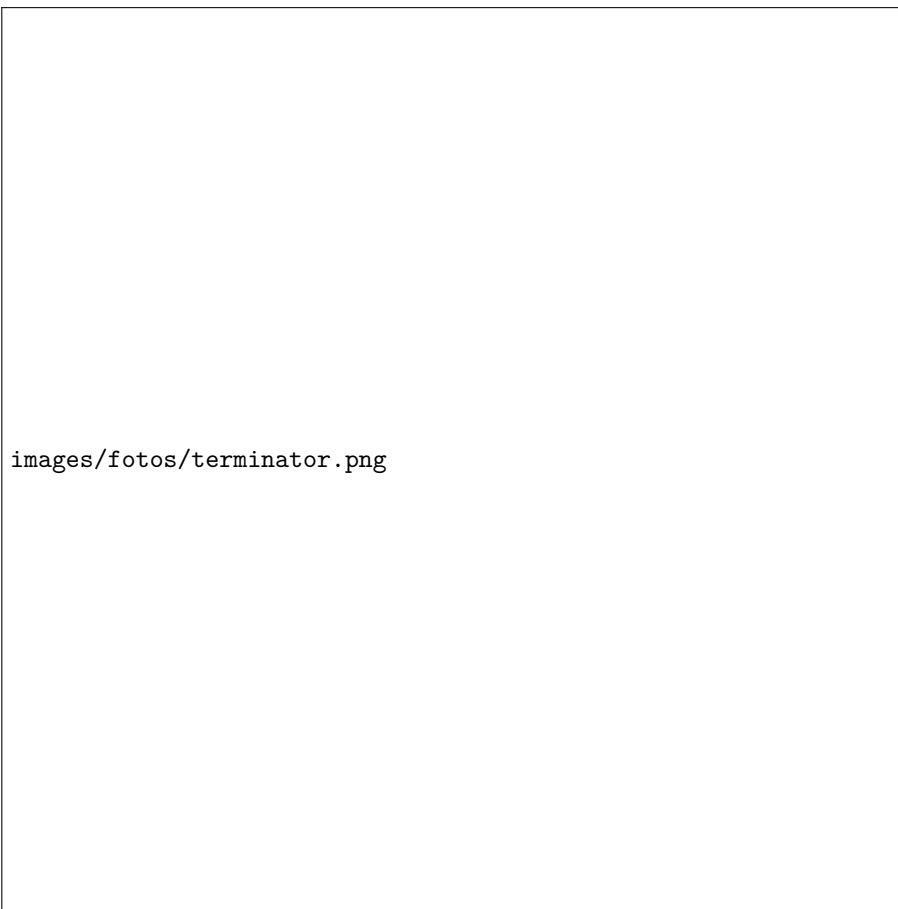


Abbildung 11.1.: Anbringung des Abschlusswiderstands.

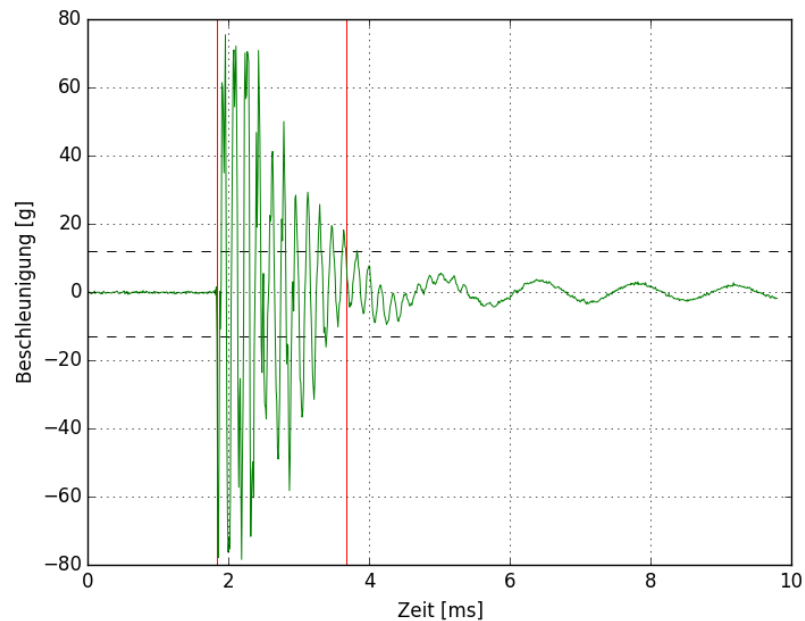


Abbildung 11.2.: Beispiel von Rohdaten.

11.6. Ereignis

be hier die Er-
die Detaillevel
den tollen gra-

11.7. Konfiguration

11.7.1. Anschluss eines Computers

Am USB-Anschluss des Datenloggers kann ein Computer angeschlossen werden, um auf die serielle Schnittstelle des Datenloggers zuzugreifen. Um die serielle Schnittstelle zu verwenden, wird ein Terminal-Emulator wie *PuTTY* oder *minicom* benötigt. um mit *PuTTY* eine Verbindung aufzubauen, muss die Schnittstelle und die Übertragungsrate (Baud) angegeben werden. Die Übertragungsrate ist 9600 baud, die Schnittstelle kann variieren.

Windows Unter *Windows* erfolgt die Verbindung auf eine der COMx-Schnittstellen. Die Nummer der COM-Schnittstelle kann im Geräte-Manager herausgesucht werden, die Bezeichnung lautet 'mbed Serial Port (COMx)', wobei 'x' eine Nummer ist. In *PuTTY* muss nur 'COMx' angegeben werden.

Linux Unter *Linux* findet man die Schnittstellenbezeichnung mit dem Befehl 'ls /dev/ttyACM*' heraus, in *PuTTY* wird dann '/dev/ttyACMx' angegeben.

Mac OS X Unter *Mac OS X* lautet der Befehl 'ls /dev/tty.usbmodem*', der in einem Terminal eingegeben werden muss. Als Terminal-Emulator kann 'screen' verwendet werden. Auf Apple Mac Computern mit USB 3.0 kann es zu Schwierigkeiten mit der Verbindung kommen. Den Herstellern des Prozessors ist dies bekannt, sie arbeiten an einer Lösung.

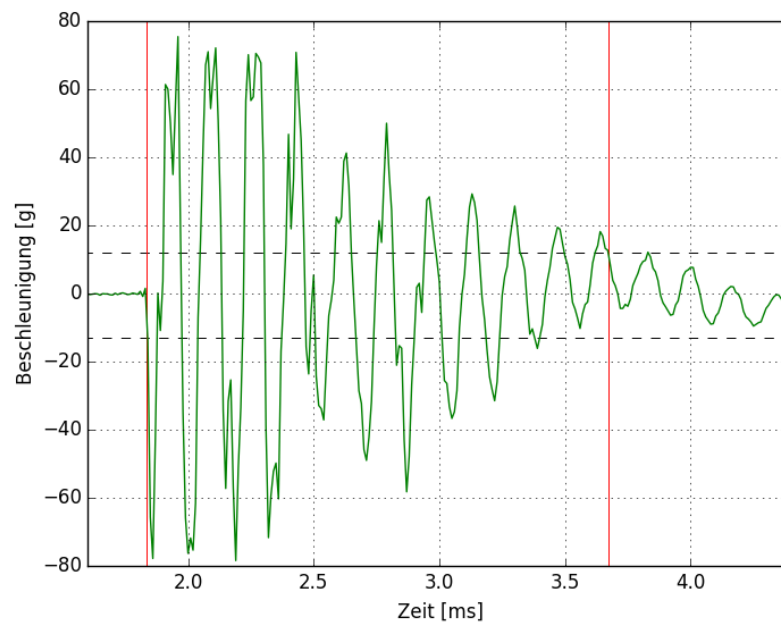


Abbildung 11.3.: Detail-Level 'raw'.

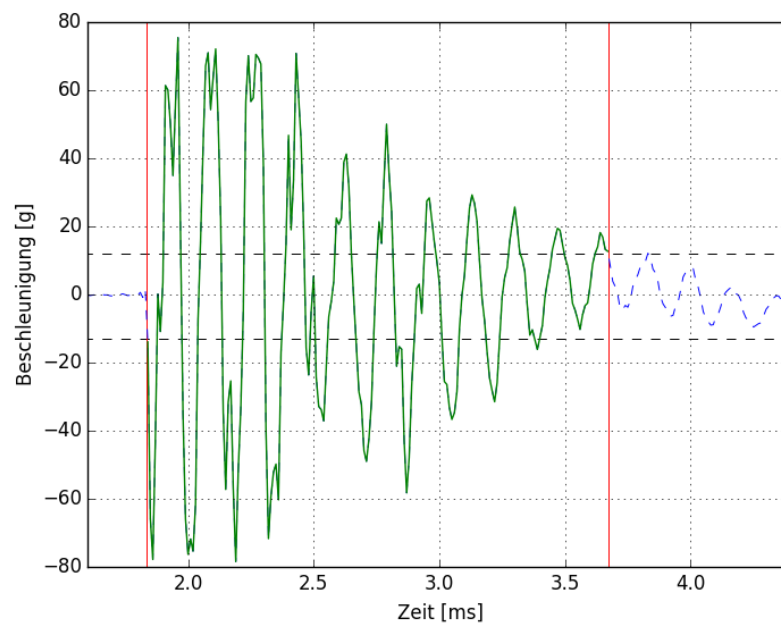


Abbildung 11.4.: Detail-Level 'detailed'.

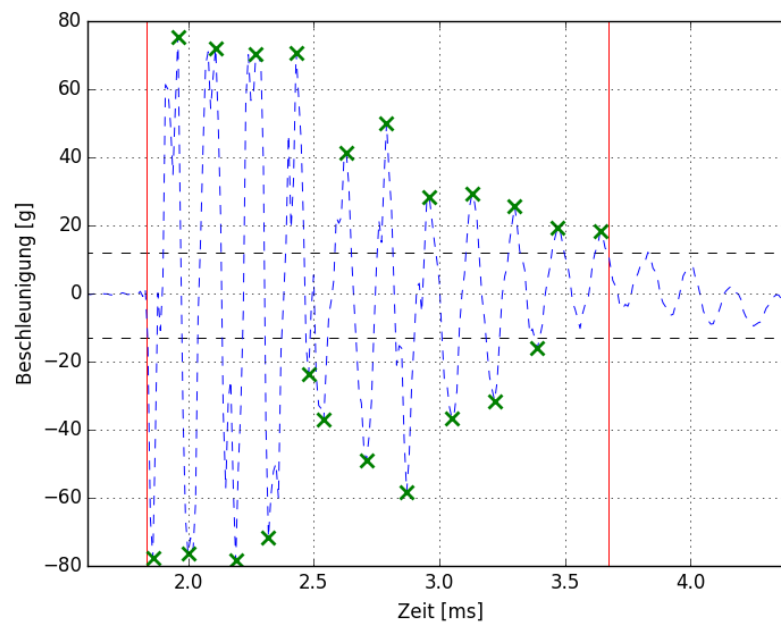


Abbildung 11.5.: Detail-Level 'peaks'.

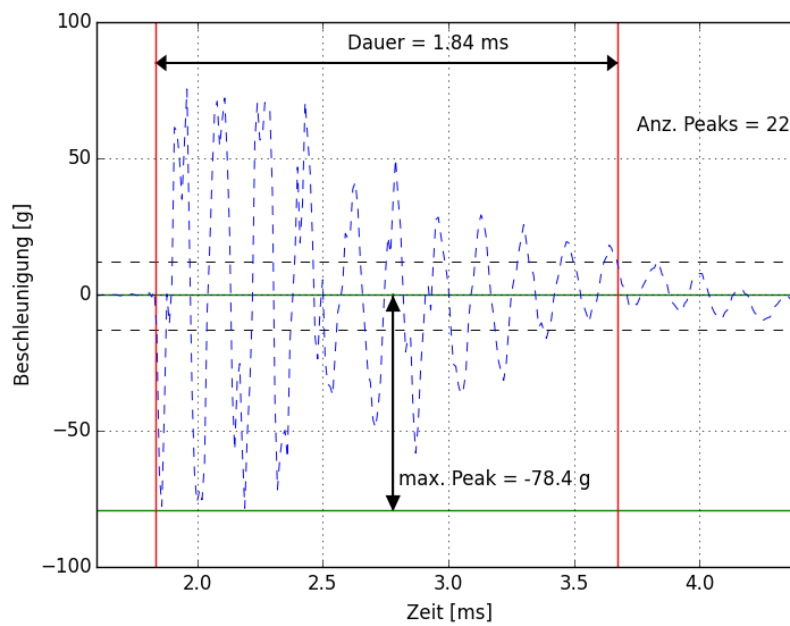


Abbildung 11.6.: Detail-Level 'sparse'.

Die Einstellungen für die serielle Schnittstelle sind normalerweise bereits korrekt gesetzt. Es werden 8 Datenbits verwendet, 1 Stopbit und keine Parität (parity).

Weitere Hilfe für die Verwendung eines Terminal-Emulators findet man unter <http://developer.mbed.org/handbook/Terminals>.

11.7.2. Menü

Beim Herstellen der Verbindung über einen Terminal-Emulator wird das Basis-Menü angezeigt. Durch Eingabe der Zahl wird der entsprechende Menü-Eintrag gewählt. Im Folgenden wird das gesamte Menü im Detail beschrieben.

Das Basis-Menü (siehe Listing 11.7.2) listet alle Überwachungs- und Konfigurations-Möglichkeiten auf.

```
1  1) list files
2  2) format SD card
3  3) mount SD card
4  4) unmount SD card
5  5) logger status
6  6) start/stop logging
7  7) sensor parameters
8  8) sensor states
9  9) reset timestamp
10 10) internal clock
11 11) config file
```

Dateien auflisten Mit dem Befehl 'list files' wird eine Liste aller Dateien auf der SD-Karte angezeigt. Die Liste enthält die Dateigröße sowie den Dateinamen, siehe Abschnitt ??.

SD-Karte formatieren Um die SD-Karte für den ersten Gebrauch vorzubereiten, sollte sie formatiert werden. Dies erfolgt von Vorteil auf einem Computer, kann aber auch im Datenlogger mit dem Befehl 'format SD card' gemacht werden, siehe Abschnitt 11.7.3.

SD-Karte anmelden Nach dem Einsetzen einer SD-Karte erkennt der Datenlogger dies normalerweise automatisch. Es kann jedoch vorkommen, dass der Datenlogger auf die neue Karte aufmerksam gemacht werden muss. Dies erfolgt mit dem Befehl 'mount SD card', siehe Abschnitt 11.7.3.

SD-Karte abmelden Vor dem Entfernen der SD-Karte müssen alle Dateien geschlossen werden. Dies erfolgt mit dem Befehl 'unmount SD card', siehe Abschnitt 11.7.3.

Status des Datenloggers Mit dem Befehl 'logger status' werden einige Betriebszustandsdaten des Datenloggers angezeigt, siehe Abschnitt 11.7.3.

Aufzeichnung starten/stoppen Um die Aufzeichnung im ganzen System zu starten oder zu stoppen wird der Befehl 'start/stop logging' verwendet, siehe Abschnitt 11.7.3.

Sensor-Einstellungen Mit dem Befehl 'sensor parameters' kann eine einzelne Sensoreinheit oder alle Sensoreinheiten zusammen konfiguriert werden. Siehe Abschnitt 11.7.3.

Status der Sensoreinheiten Der Betriebszustand aller angeschlossenen Sensoreinheiten kann mit dem Befehl 'sensor state' (siehe 11.7.3) aufgelistet werden.

Timestamp zurücksetzen Um den Timestamp in allen Sensoreinheiten auf Null zurückzustellen, wird der Befehl 'reset timestamp' verwendet. Siehe Abschnitt 11.7.3.

Interne Uhr Die interne Uhr wird mit den Befehl 'internal clock' eingestellt, Abschnitt 11.7.3 beschreibt dies im Detail.

Konfigurations-Datei Mit dem Befehl 'config file' wird die Konfiguration der Sensoren abgespeichert oder aus einer Datei eingelesen, siehe Abschnitt ??.

11.7.3. Befehle

Dateiliste

```
1  HIER LISTE DER FILES EINFueGEN
2  0) exit
```

SD-Karte formatieren

```
1  1) confirm formatting of SD card.
2  All data will be erased.
3  0) cancel
```

Listing 11.1: Untermenü SD-Karte formatieren

Beim Formattieren werden alle Dateien auf der SD-Karte gelöscht, inklusive der Konfigurationsdatei mit allen Sensor-Einstellungen. Der Befehl 'format SD card' holt vor der Ausführung nochmals eine Bestätigung ein, ob sich der Benutzer wirklich sicher ist, dass er alle Dateien löschen will (Listing 11.1). Während dem Formatieren wird die Meldung 11.2 angezeigt.

```
1  formatting SD Card
```

Listing 11.2: Statusmeldung SD formatieren

Sind beim Formatieren Fehler aufgetreten, erhält man die Fehlermeldung 11.3. In diesem Fall sollte die Karte in einem Computer geprüft und formatiert werden.

```
1  Formatting SD card FAILED. Please use a Computer to format the card.
```

Listing 11.3: Fehlermeldung SD formatieren

Bei erfolgreicher Formatierung wird die Meldung 11.4 ausgegeben.

```
1  Formatting done
2  Returning to base menu.
```

Listing 11.4: Erfolgsmeldung SD formatieren

SD-Karte anmelden

Damit Dateien auf die SD-Karte geschrieben werden können, muss sie vorher erkannt werden. Normalerweise geschieht dies, sobald die Karte eingesetzt wird. Wenn keine SD-Karte erkannt wird, wird dies im Basismenü angezeigt wie im Listing ???. Durch den Aufruf des Befehls 'mount SD card' im Basismenü (Listing 11.7.2) kann die eingesetzte SD-Karte angemeldet werden.

Nach erfolgreicher Anmeldung der SD-Karte wird das Basismenü angezeigt.

Wenn keine SD-Karte erkannt werden kann, wird eine Fehlermeldung 11.5 ausgegeben.

```
1 No SD card detected! Please insert card and try again!
```

Listing 11.5: Fehlermeldung SD-Karte anmelden

SD-Karte abmelden

Bevor die SD-Karte aus dem Datenlogger entfernt wird, sollte sie abgemeldet werden. Der Datenlogger schliesst bei diesem Vorgang alle geöffneten Dateien, um Datenverlust zu vermeiden. Da beim Abmelden der Karte die Aufzeichnung der Daten gestoppt wird, wird vorher eine Bestätigung verlangt (Listing 11.6).

```
1 1) unmount SD card
2   This will stop logging and close all data files.
3 0) cancel
```

Listing 11.6: Untermenü SD-Karte abmelden

Falls die Konfiguration der Sensoren verändert, aber noch nicht in die Konfigurationsdatei geschrieben wurde, wird eine Warnung angezeigt (Listing 11.7). Die Konfiguration bleibt im Speicher des Datenloggers erhalten, so lange die Spannungsversorgung angeschlossen ist und kann auch auf der neuen SD-Karte gespeichert werden.

```
1 *****
2 * WARNING: sensor configuration data has not been saved to file! *
3 * If you want to save config to file, cancel now.                *
4 *****
```

Listing 11.7: Warnung vor SD-Karte abmelden bei ungespeicherter Konfiguration

Logger-Status

Mit dem Befehl 'logger status' können einige Information über den Datenlogger angezeigt werden.

logger status list

Listing 11.8: Untermenü Logger-Status

Starten und stoppen der Aufzeichnung

Um die Datenspeicherung im Datenlogger zu unterbrechen oder wieder zu starten wird der Befehl 'start/stop logger' verwendet. Beim Aufruf des Befehls wird ein Untermenü gemäss Listing ?? angezeigt.

```
1  Logger is running.
2  1) stop the logging.
3  0) cancel
```

Listing 11.9: Untermenü Stoppen der Aufzeichnung

Da sich das Menü dem gegenwärtigen Zustand anpasst, sieht es bei gestoppter Aufzeichnung aus wie in Listing 11.10.

```
1  Logger is stopped.
2  1) start the logging.
3  0) cancel
```

Listing 11.10: Untermenü Starten der Aufzeichnung

Wenn die Aufzeichnung am Logger gestoppt wird, wird an alle Sensoreinheiten der Befehl zum Aufzeichnungsstopp gesendet. Die Einstellungen zum Detailmodus bleiben in der Sensoreinheit aber erhalten. Beim erneuten Starten der Aufzeichnung im Logger werden auch die Sensoreinheiten wieder gestartet. Es besteht auch die Möglichkeit, einzelne Sensoreinheiten zu stoppen (siehe Abschnitt 11.7.3). Eine gestoppte Sensoreinheit bleibt auch beim Starten der Aufzeichnung am Datenlogger gestoppt, da sie schon vor dem Stopp in diesem Zustand war.

Sensor-Parameter

Die Parameter der Datenerfassung und Ereigniserkennung können für alle Sensoreinheiten gemeinsam oder für jede Sensoreinheit individuell eingestellt werden. Die Auswahl einer einzelnen oder aller Sensoreinheiten erfolgt beim Einstieg in das Untermenü der Sensor-Parameter. Listing 11.11 zeigt die Auswahl der Sensoren. Die Auswahlliste enthält gleich die aktuellen Werte der Parameter, damit man eine Übersicht hat.

swahl listet die
auf, das noch

```
1  #) Select a sensor from the list.
2  99) Select all sensors.
3  0) cancel
```

Listing 11.11: Untermenü Sensor-Auswahl

Nach der Auswahl einer Sensoreinheit gelangt man zur Auswahl des anzupassenden Parameters, Listing 11.12. Ist ein einzelner Sensor ausgewählt, werden hier noch einmal die aktuellen Werte der Parameter angezeigt.

```
1  1) set sampling rate (current: 10000 Hz)
2  2) set threshold value (current: 200)
3  3) set baseline value (current: 2047)
4  4) set timeout (current: 30)
5  5) set detail level (current: peaks only)
6  6) start or stop recording (current: started)
7  0) exit
```

Listing 11.12: Untermenü Sensor-Parameter

Abtastrate Die Abtastrate legt fest, wie oft pro Sekunde ein Messwert vom Beschleunigungssensor eingelesen werden soll. Die Sensoreinheiten können in einem Bereich zwischen 100Hz und 200000Hz messen. Die Abtastrate kann in Schritten von 100Hz eingestellt werden, Listing 11.13.

Die Abtastrate hat einen wesentlichen Einfluss auf die zu übertragende und zu speichernde Datenmenge, die benötigte Rechenleistung. Davon wiederum hängt die Zeitspanne ab, wie lange die Messstation ohne Wartung betrieben werden kann. Es wird deshalb empfohlen, die Abtastrate nur so hoch einzustellen, wie es wirklich benötigt wird. Wie hoch dieser Wert ist, hängt stark von den geplanten Auswertungen ab.

```
1  #) Enter sampling rate in Hz. (multiple of 100 Hz in range
    100..200'000 Hz)
2  0) cancel
```

Listing 11.13: Untermenü Abtastrate

Bei Eingabe einer ungültigen oder nicht unterstützten Abtastrate wird eine Fehlermeldung ähnlich Listing 11.14 angezeigt.

```
1  Sampling rate 220000 Hz not supported, too high.
```

Listing 11.14: Fehlermeldung bei ungültiger Abtastrate

Bei einer Änderung der Abtastrate wird automatisch der Timestamp zurückgesetzt, damit die Zuweisung der Messdaten zu einem Zeitpunkt weiterhin erfolgen kann.

Ereigniserkennung Die Ereigniserkennung hat drei Parameter, die die Form der gesuchten Ereignisse bestimmen. Abbildung 11.7 illustriert die Zusammenhänge zwischen Threshold und Nullpegel sowie die Funktionsweise des Timeouts.

Threshold Der Threshold (Schwellenwert) ist ein Parameter der Ereigniserkennung. Er bestimmt, ab welcher Abweichung vom Nullwert ein Signal als Peak betrachtet werden soll. Bei der Wahl des Thresholds ist zu beachten, dass der Threshold auf beide Seiten des Nullwerts gilt. Daher darf die Summe des Nullpegels und des Thresholds nicht den maximalen Wert (4096) des A/D-Wandlers überschreiten. Ebenso muss der Wert des Thresholds kleiner sein als der Nullpegel, damit kein negativer Messwert anliegen müsste, um einen Peak zu erzeugen. Diese Einschränkungen werden bei der Eingabe noch einmal angezeigt, Listing 11.15.

```
1  #) Enter threshold value.
2  baseline + threshold must not exceed 4096
3  and
4  baseline - threshold must not be below 0
5  0) cancel
```

Listing 11.15: Untermenü Threshold

Bei Verletzung der Kriterien für den Threshold wird eine entsprechende Fehlermeldung angezeigt, Listing 11.16. Da die gleichen Kriterien auch bei der Einstellung des Nullpegels gelten, empfiehlt es sich, zuerst einen kleinen Wert für den Threshold zu wählen. Dann kann der Nullpegel ohne grosse Einschränkung eingestellt werden. Danach setzt man den passenden Threshold.

```
1  Invalid threshold value:
2  threshold + baseline must not exceed 4096
3  and
4  threshold must be smaller than baseline value.
```

Listing 11.16: Fehlermeldung ungültiger Threshold

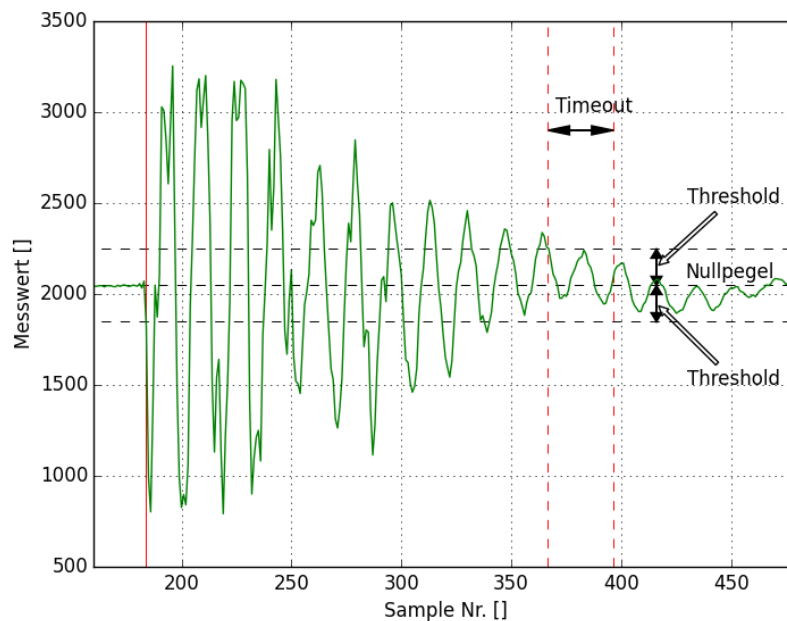


Abbildung 11.7.: Zusammenhänge der Parameter der Ereigniserkennung.

Nullpegel Der Nullpegel wird mit einer ähnlichen Maske (Listing 11.17) wie der Threshold eingestellt, auch die Einschränkungen für den Wertebereich sind die Gleichen.

```
1  #) Enter baseline value (default: 2047) .
2  0) cancel
```

Listing 11.17: Untermenü Null-Level

Die Fehlermeldung bei ungültigen Werten für den Nullpegel ist in Listing 11.18 aufgeführt.

```
1  Invalid baseline value:
2  threshold + baseline must not exceed 4096.
3  and
4  threshold - baseline must not be below 0 value
```

Listing 11.18: Fehlermeldung ungültiger Nullpegel

Timeout Der Timeout definiert, wie viele Samples der Signalwert unterhalb des Thresholds liegen kann, bevor das Ereignis als beendet betrachtet wird (Listing 11.19). Die einzige Einschränkung an den Timeout ist, dass er die Länge des Ereignispuffers nicht überschreiten darf.

```
1  #) Enter timeout in samples .
2  0) cancel
```

Listing 11.19: Untermenü Timeout

Bei zu langem (Listing 11.20) oder sehr kurzem (Listing 11.21) Timeout wird eine Fehlermeldung resp. Warnung angezeigt.

```
1  Timeout too long, can not exceed 512.
```

Listing 11.20: Fehlermeldung zu langer Timeout

```

1 Timeout 0 will end impact after each peak.
2 Timeout 0 in effect.

```

Listing 11.21: Warnung kurzer Timeout

Detaillevel Über die Wahl des Detaillevels wird bestimmt, wie viele und welche Daten von jedem Ereignis übertragen und gespeichert werden sollen (Listing 11.22). Die Detaillevel sind geordnet nach anfallender Datenmenge, beginnend mit dem grössten Aufwand. Die Detaillevel sind in Abschnitt 11.6, Seite 42 beschrieben.

```

1 1) raw (continuous data)
2 2) detailed (start time, all samples of impact)
3 3) peaks only (start time, nr of peaks, peaks
4 4) sparse (only start time, duration, nr of peaks, max peak)
5 5) off
6 0) cancel

```

Listing 11.22: Untermenü Detail-Level

Start/Stop Sensor Jede Sensoreinheit kann einzeln gestartet oder gestoppt werden, vorausgesetzt der Datenlogger ist gestartet. Im Untermenü ist ersichtlich, in welchem Zustand die ausgewählte Sensoreinheit gerade ist (listing 11.23). Falls die Konfigurationsänderung alle Sensoreinheiten betreffen soll, wird die Anzahl gestarteter und gestoppter Sensoren angezeigt (listing 11.24).

```

1 Selected sensor is currently stopped.
2 1) start
3 2) stop
4 0) cancel

```

Listing 11.23: Untermenü Start/Stop einzeln

```

1 Started sensors: 3
2 Stopped sensors: 0
3 1) start
4 2) stop
5 0) cancel

```

Listing 11.24: Untermenü Start/Stop alle Sensoren

Wenn ein Sensor gestartet wird, muss für die anfallenden Daten eine Datei erzeugt werden. Schlägt dies fehl, wird dies mit der Fehlermeldung 11.25 angezeigt. Der Sensor wird dann nicht gestartet. Es wird empfohlen, in diesem Fall die SD-Karte zu überprüfen. Möglicherweise verfügt die SD-Karte nicht mehr über genügend Speicherplatz.

```

1 Could not create or open file. Please check SD card for free space.

```

Listing 11.25: Fehlermeldung beim Starten eines Sensors

Sensor-Status

Um die Einstellungen aller Sensoren auf einen Blick zu überprüfen, kann mit dem Befehl 'sensor states' die Liste aller Einstellungen aufgerufen werden, Listing 11.26. In der Liste sind eine interne Nummer, die CAN-Bus-ID, die Seriennummer der Sensoreinheit sowie alle Einstellungen aufgeführt.

Liste von Sensor
ins Listing einfügen

```

1 Listing sensor config:
2 HIER EINFueGEN
3 0) continue

```

Listing 11.26: Untermenü Sensor-Status

Timestamp zurücksetzen

Der Timestamp kann manuell zurückgesetzt werden, dafür wird eine Bestätigung eingeholt: Listing 11.27. Das Zurücksetzen des Timestamps betrifft immer alle Sensoreinheiten.

```

1 1) re-synchronize timestamp
2 0) cancel

```

Listing 11.27: Untermenü Timestamp zurücksetzen

Interne Uhr

Anhand der internen Uhr werden die Timestamps vom Datenlogger in einen realen Zeitpunkt umgerechnet. Deshalb wird empfohlen, die interne Uhr auf die korrekte Uhrzeit einzustellen. Dies erfolgt über den Befehl 'internal clock', Listing 11.28. Hier kann das Datum (Untermenü 11.29) und die Tageszeit (Untermenü 11.30) eingestellt werden.

einer Uhrzeit

```

1 1) adjust date
2 2) adjust time
3 0) exit
4
5 current time: HIER EINFueGEN

```

Listing 11.28: Untermenü interne Uhr

Das Einstellen des Datums erfolgt mit Inkrementen resp. Dekrementen von 365, 30, 10 Tagen oder 1 Tag.

```

1 adjust internal date
2 1) adjust date +365 days
3 2) adjust date -365 days
4 3) adjust date + 30 days
5 4) adjust date - 30 days
6 5) adjust date + 10 days
7 6) adjust date - 10 days
8 7) adjust date + 1 day
9 8) adjust date - 1 day
10 0) exit
11
12 current time: HIER EINFueGEN

```

Listing 11.29: Untermenü Datum einstellen

Die Uhrzeit wird mittels Inkrementen resp. Dekrementen von 1 Stunde, 10 oder 1 Minute oder 1 Sekunde eingestellt. Die aktuelle Uhrzeit wird jeweils unterhalb des Menüs angezeigt.

```

1  adjust internal time
2  1) adjust time +1 hour
3  2) adjust time -1 hour
4  3) adjust time +10 minute
5  4) adjust time -10 minute
6  5) adjust time +1 minute
7  6) adjust time -1 minute
8  7) adjust time +1 second
9  8) adjust time -1 second
10 0) exit
11
12 current time: HIER EINFueGEN

```

Listing 11.30: Untermenü Uhrzeit einstellen

Konfigurations-Datei

Über den Befehl 'config file' (Listing 11.33) kann die aktuelle Konfiguration der Sensoreinheiten in die Konfigurationsdatei 'config.txt' abgespeichert werden, oder eine neue Konfiguration aus der Datei eingelesen und an die Sensoreinheiten gesendet werden. Es ist nicht möglich, aus mehreren Konfigurationsdateien auszuwählen.

```

1  1) read configuration from file and set up all sensors accordingly.
2  2) store current configuration in file. Old config file will be
   overwritten.
3  0) cancel

```

Listing 11.31: Untermenü Konfigurationsdatei

mehrere konfig-f
file löschen könn
in den Ausblick
men, als zu verb
punkte

Falls die Konfigurationsdatei nicht gespeichert werden kann, wird die Fehlermeldung in Listing 11.32 angezeigt. Um die Konfigurationsdatei trotzdem speichern zu können, kann die SD-Karte abgemeldet und ausgetauscht werden. Die Konfiguration bleibt erhalten, so lange die Spannungsversorgung besteht.

Um einem möglichen Konfigurationsdatenverlust vorzubeugen empfiehlt es sich, die Konfigurationsdatei zu speichern, sobald alle Einstellungen wie gewünscht gemacht wurden. Nach einem Unterbruch in der Spannungsversorgung wird nach automatisch die Konfiguration aus der

```

1  The config file could not be written. Please check the SD card in a
   computer.
2  The configuration data will remain stored in the logger unless you
   turn off power.

```

Listing 11.32: Fehlermeldung beim Speichern der Konfigurationsdatei

11.7.4. Konfigurationsdatei

In der Konfigurationsdatei werden die Einstellungen der Sensoreinheiten gespeichert. Die Datei kann auch auf einem Computer erstellt werden und über eine SD-Karte auf den Datenlogger übertragen werden. Ein Beispiel einer Konfigurationsdatei zeigt Listing 11.33. Die erste Zeile enthält die Anzahl Datensätze. Jeder Datensatz enthält die Konfiguration einer Sensoreinheit. Auf der zweiten und den folgenden Zeilen folgen die Datensätze.

Ein Datensatz enthält die CAN-Bus-ID, die Seriennummer der Sensoreinheit, die Abtastrate (ohne die hintersten zwei Nullen), den Threshold, den Nullpegel und den Timeout sowie den Detail-Level und ob der Sensor Daten aufzeichnen soll (1) oder nicht (0).

Der Datenlogger versucht nach dem Einschalten der Spannungsversorgung die Konfigurationsdatei von der SD-Karte zu lesen. Falls keine SD-Karte vorhanden ist, startet der Datenlogger den Betrieb nicht,

da keine Messdaten gespeichert werden können. Falls die SD-Karte vorhanden ist, aber keine Konfigurationsdatei 'config.txt' enthält, startet der Betrieb der Messstation im Standardmodus.

Standardmodus Im Standardmodus arbeiten alle Sensoreinheiten mit einer Abtastrate von 10000Hz , Threshold 200, Nullpegel 2047, Timeout 30. Der Detail-Level wird auf 'peaks only' gesetzt, siehe Abschnitt 11.6, Seite 42. Alle Sensoreinheiten werden gestartet.

```
1 {3,
2 {2, 461bdfd6, 100, 200, 2047, 30, 3, 1},
3 {3, 461b7b39, 100, 150, 2040, 30, 2, 1},
4 {4, 461b6dca, 100, 100, 2049, 30, 4, 1},
5 }
```

Listing 11.33: Beispiel einer Konfigurationsdatei

Falls Änderungen an der Konfiguration gemacht, aber nicht in die Konfigurationsdatei geschrieben wurden, erscheint im Basismenü die Information gemäss Listing 11.34.

```
1 Config has been modified but not saved to SD card.
```

Listing 11.34: Information bei ungespeicherter Konfiguration

11.8. Betrieb

11.9. Technische Daten

Cortex-M4 CAN-Bus/Transceiver Spannungen Stromverbrauch Kabel Stecker Sensoren SD-Karte g-Bereiche Messzeiten Puffergrößen logger und sensor anzahl sensoren (bandbreite/signalstärke/rechenleistungLogger)

12. Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- [1] CAN Specification 2.0, 09 1991.
- [2] SD Specifications, Physical Layer Simplified Specification, Version 4.10, o. J.
- [3] ARM Ltd. Cortex-M4 Processor, o. J.
<http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m4-processor.php>, Stand: 7.12.2014.
- [4] Thomas Müller. Vorlesung Kommunikationstechnik 1, 2013. Kap. 2, S. 14.
- [5] NXP Semiconductors. LPC4088FBD208 Processor Datasheet, o. J.
http://www.nxp.com/products/microcontrollers/cortex_m4/lpc4000/LPC4088FBD208.html,
Stand: 7.12.2014.
- [6] NXP Semiconductors. NXP LPC4088 QuickStart Board, o. J.
<http://www.nxp.com/demoboard/OM13063.html>, Stand: 7.12.2014.
- [7] o. V. Wikipedia: CompactFlash, 12 2014. <http://en.wikipedia.org/wiki/CompactFlash>, Stand: 8.12.2014.
- [8] o. V. Wikipedia: Hilbert-Transformation, 11 2014.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Hilbert-Transformation>, Stand: 6.12.2014.
- [9] o. V. Wikipedia: USB, 12 2014. <http://en.wikipedia.org/wiki/USB>, Stand: 8.12.2014.
- [10] o. V. CAN vs. RS485. White paper, IXXAT Automation GmbH, o. J.
- [11] 'wdwd'. FIR Hilbert Transform Filter. Licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported., 3 2013. URL:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FIR_Hilbert_Transform_Filter.svg License:
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.
- [12] Sigisbert Wyrsh. Vorlesung Digitale Signalverarbeitung 1, 2013. Kap. 3, DFT und FFT, S. 48.

Abbildungsverzeichnis

3.1. Eine Messstation mit einem Datenlogger, der mehrere Sensoreinheiten im Bach steuert.	11
7.1. Hardwarekonzept des Datenloggers.	19
7.2. Hardwarekonzept der Sensoreinheit.	19
7.3. Chipdiagramm der <i>ARM Cortex-M4</i> Architektur [3].	21
7.4. Differentielle Leitung [4].	24
7.5. Schematischer Hardware-Aufbau des Datenloggers.	27
7.6. Schematischer Hardware-Aufbau der Sensoreinheit.	28
8.1. Softwarestack des Datenloggers.	30
8.2. Softwarestack der Sensoreinheit.	30
8.3. Hilbert-Transformation als FIR-Filter [11].	31
8.4. Zustandsmaschine der Ereigniserkennung.	32
8.5. Parameter der Ereigniserkennung.	33
8.6. Sequenzdiagramm des Startupvorgangs der Messstation.	34
11.1. Anbringung des Abschlusswiderstands.	41
11.2. Beispiel von Rohdaten.	42
11.3. Detail-Level 'raw'.	43
11.4. Detail-Level 'detailed'.	43
11.5. Detail-Level 'peaks'.	44
11.6. Detail-Level 'sparse'.	44
11.7. Zusammenhänge der Parameter der Ereigniserkennung.	50
A.1. Hauptkomponenten des NXP LPC4088 QuickStart Boards von Embedded Artists.	IX
A.2. Pins des NXP LPC4088 QuickStart Boards von Embedded Artists.	IX

Tabellenverzeichnis

7.1. Fähigkeiten des NXP LPC4088 Prozessors [5].	21
7.2. Zusätzliche Fähigkeiten des NXP LPC4088 QuickStart Boards von <i>Embedded Artists</i> [6].	22
7.3. Entscheidungsmatrix für die Auswahl des Bussystems.	23
7.4. Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Speichermediums [2, 7, 9].	25
11.1. Steckerbestückung des Bussystems.	40

Glossar

A/D-Wandler Analog/Digital-Wandler, (Englisch: ADC). Ein A/D-Wandler misst die Spannung, die an einem Pin anliegt und gibt einen digitalen Wert aus, der die Höhe der Spannung angibt. Bei der Umwandlung in einen digitalen Wert erfolgt eine Quantisierung. Je grösser die Bit-Breite des A/D-Wandlers ist, umso kleiner wird die Schrittgrösse von einem digitalen Wert zum nächst-höheren Wert. 18, 20–22, 29, 49, *siehe* Quantisierung & Bit-Breite

Abschlusswiderstand Bei elektrischen Signalübertragungen treten am Ende der Leitung Signalreflexionen auf. Die Reflexionen pflanzen sich in der Leitung in entgegengesetzter Richtung fort und stören so die Übertragung. Um die Reflexionen zu verhindern, können Widerstände eingesetzt werden, die die elektrische Energie in Wärme umzuwandeln. Dadurch treten keine Reflexionen mehr auf. 41, 57

Abtastrate Definiert, in welchen zeitlichen Abständen ein Messwert erfasst werden soll. Üblicherweise wird dieser Wert in Hz oder s^{-1} angegeben. 15, 29, 33, 53, 54

Betriebsmodus Ein Modus bestimmt die Verhaltensweise eines Systems. Je nach gewähltem Modus können mit den gleichen Eingaben und Befehlen andere Aktionen ausgeführt und andere Resultate ausgegeben werden. 12

Bit-Breite Die Bit-Breite gibt an, wie viele Bit für die Darstellung eines Wertes verwendet werden. Je grösser die Bit-Breite, desto mehr unterschiedliche Werte können dargestellt werden. Mit einer Bit-Breite von n können 2^n Werte dargestellt werden. 18, 20, 21

Blockgrösse Anzahl Werte, die in einer DFT oder IDFT verrechnet wird. 29

Busmaster Ein Gerät, das die Kontrolle über ein Bussystem hat. Der Busmaster kann den anderen Busteilnehmern (Slaves) eine Genehmigung erteilen, Daten über das Bussystem zu übertragen. Der Busmaster hat aber jederzeit die Möglichkeit, einen Slave in der Übertragung zu unterbrechen. *siehe* Slave

Bussystem Ein elektrisches System für die Kommunikation zwischen mehreren Geräten. Ein Bussystem besteht aus Datenleitungen, über welche Signale gesendet werden, und aus Schnittstellen, an denen die Busteilnehmer angeschlossen werden. Die Besonderheit liegt darin, dass über ein Leitungssystem mehr als zwei Geräte miteinander kommunizieren können. Mittels eines Adressierungsschemas kann der/die Empfänger ausgewählt werden. 2, 9, 11, 13–15, 18, 22–24, 38–40, 58, *siehe* Signal

Collision Detection Kollisionserkennung. Als Kollision bezeichnet man den gleichzeitigen Versuch mehrerer Busteilnehmer, eine Nachricht zu übermitteln. Dies führt zu einer Überlagerung der Nachrichten und macht diese unlesbar. Gleichzeitig mit dem Schreiben liest der Transceiver die Signale vom Bus. Stimmen die gelesenen Signale nicht mit den Geschriebenen überein, bedeutet dies, dass ein anderer Teilnehmer ebenfalls auf den Bus schreibt und eine Kollision vorliegt. Das Verhalten bei einer Kollision ist vom Bussystem abhängig. 24, *siehe* Transceiver

Computer Englisch für Elektronenrechner. Unter einem Computer versteht man umgangssprachlich einen Personal Computer (PC) oder einen tragbaren Computer (Laptop). Heute sind Computer so leistungsfähig und so stark miniaturisiert, dass sie mühelos in einer Aktentasche Platz finden. Weniger leistungsfähig, dafür noch kleiner sind Embedded Systems, eingebettete Systeme, die Laien nicht als Computer erkannt werden. 12, 38, 39, 42, 45, 46, 53, *siehe* PC & Embedded System

CRC Cyclic Redundancy Check. Ein Codeverfahren, das eine Prüfsumme über eine Nachricht berechnet. Durch Nachrechnen der Prüfsumme im Empfänger kann die Nachricht auf Fehlerfreiheit überprüft werden. 25

Daisy Chain Englisch für Gänseblümchenkette. Gemeint ist das aneinanderreihen mehrerer Geräte. Im Unterschied zu einem Bussystem müssen die Geräte alle Nachrichten, die für andere Empfänger bestimmt sind, aktiv weiterleiten. Dies braucht Rechenleistung in den Geräten. Wenn ein Gerät ausfällt, gehen alle Nachrichten in diesem Gerät verloren. 22, 23

Datenlogger Ein Gerät zur Sammlung und Speicherung von Messdaten von mehreren Sensoreinheiten. 2, 9–15, 18–20, 25–27, 30, 33, 38, 39, 42, 45, 47, 48, 51–53, 57, *siehe* Sensoreinheit

DSP Digitaler Signal-Prozessor. Ein Mikroprozessor oder ein Bestandteil eines solchen, der dank spezieller Hardware fähig ist, Multiplikationen und Additionen extrem schnell auszuführen. Ausserdem verfügt ein DSP über Schieberegister, um Rechenoperationen über eine Serie der aktuellsten Messwerte auszuführen. Da bei der digitalen Signalverarbeitung oft für jeden Messwert viele Multiplikations- und Additions-Schritte ausgeführt werden müssen, ist es wichtig, dass Multiplikations-Operationen in einem Taktzyklus ausgeführt werden können. In einem normalen Prozessor werden für eine Multiplikation mehrere Taktzyklen benötigt. 18, 20, *siehe* Mikrokontroller

Embedded System Deutsch: eingebettetes System. Ein Computer, der nicht über die üblichen Ein- und Ausgabemöglichkeiten eines Computers wie Bildschirm und Tastatur verfügt. Oft werden deshalb Embedded Systems nicht als Computer wahrgenommen. Sie sind im Gegensatz zu PCs, die als Alleskönner konzipiert sind, auf eine bestimmte Aufgabe zugeschnitten und deshalb nur mit den nötigen Bedien-Elementen versehen. Oft genügen für die Aufgaben weniger leistungsfähige Prozessoren als in einem PC, sogenannte Mikroprozessoren. *siehe* Computer & Mikrokontroller

Ereignis Eine Abfolge von Messwerten, die einer vordefinierten Form entspricht. Es kann zum Beispiel ein Schwellenwert (engl. threshold) definiert sein. Das Überschreiten dieses Wertes kann dann den Beginn, das Unterschreiten des Schwellenwertes das Ende eines Ereignisses markieren. 9–15, 20, 25, 29, 31, 49–51, 60

Ereigniserkennung Auswertung von Messdaten um definierte Signalformen (Ereignisse) zu erkennen. 29, 31, 49, 50, 57, *siehe* Ereignis & Signal

Finite State Machine Englisch für Zustandsmaschine. Eine Finite State Machine definiert eine endliche Anzahl Zustände, die die Maschine einnehmen kann. Die FSM reagiert auf Ereignisse, indem sie Aktionen auslöst und allenfalls in einen anderen Zustand wechselt. Für jeden Zustand ist definiert, welche möglichen Ereignisse welche Aktionen auslösen, und in welchen Folgezustand gewechselt werden soll. 31

FIR-Filter Finite Impulse Response, Englisch für Filter mit endlicher Impuls-Antwort. Ein FIR-Filter hat immer eine endliche Impulsantwort, d.h. auf einen kurzen Impuls am Eingang des Filters folgt am Ausgang eine Antwort des Filters, die garantiert endet. Die Ordnung des FIR-Filters gibt an, wie lange die Antwort dauern wird. 29, 31, 57

FPU Floating Point Unit, ein Rechenwerk in der CPU, die Berechnungen mit Dezimalbrüchen sehr schnell ausführen kann. 20

Geophon Ein Messgerät für Vibrationen des Bodens. Ein Geophon misst Bewegungen mittels einer magnetischen Masse, die beweglich in einer Spule aufgehängt ist. Wird das Geophon in Bewegung versetzt, schwingt die magnetische Masse aufgrund ihrer Trägheit und induziert dadurch einen Strom in der Spule. Durch Messung dieses Stroms kann die Bewegung registriert werden. 8, 16, 38

Hardware Die Hardware ist das eigentliche Rechenwerk eines Computers, worauf die Software ausgeführt wird. Dazu gehören alle elektrischen, elektronischen und mechanischen Bauteile eines Computers. Die Central Processing Unit (CPU) eines Computers könnte mit dem Hirn verglichen werden, hier laufen fast sämtliche Informationen und Instruktionen zusammen. 18

Hilbert-Transformation Mathematische Umrechnung einer Wertfolge, um die umhüllende Kurve zu erhalten. 29, 31, 57

Interrupt Englisch für Unterbrechen. Durch ein spezielles Signal wird dem Prozessor mitgeteilt, dass ein Ereignis eingetreten ist. Der Prozessor unterbricht die laufende Funktion und ruft eine spezielle Routine, die Interrupt Service Routine (ISR) auf. Die ISR verarbeitet das Ereignis und gibt danach die Kontrolle an die vorher unterbrochene Funktion zurück. Mit einem Interrupt wird zwar die Abarbeitung einer Funktion kurzzeitig unterbrochen, dafür verliert der Prozessor keine Rechenzeit mit Polling. *siehe* Polling

Kommandozeile Eine Eingabeaufforderung auf dem Bildschirm, wo der Benutzer über eine Tastatur Befehle eingeben kann, die vom Computer interpretiert und ausgeführt werden. 12, *siehe* Computer

MAC Multiply-ACcumulate unit: Ein Rechenwerk in der CPU, wo Multiplikationen und Additionen ausgeführt werden. 20

Mikrokontroller Englisch Microcontroller (MC). Ein Prozessor mit weniger universellen Fähigkeiten als eine CPU, dafür mit weniger Stromverbrauch. Ein Mikrokontroller verfügt meistens über spezielle Ein- und Ausgänge (Pins), über die zum Beispiel die anliegende Spannung gemessen oder eine bestimmte Spannung ausgegeben werden kann. Durch die kleinere Bauform und die geringere Leistungsaufnahme eignen sich diese Prozessoren besonders für den Einsatz in Embedded Systems, die oft längere Zeit unabhängig vom Stromnetz funktionieren müssen. 18, 22, *siehe* Pin

Nested Vectored Interrupt Controller Wird benötigt, um möglichst rasch auf mehrere asynchron eintreffende Ereignisse reagieren zu können. Ein Prozessor mit NVIC kann auf verschiedene Ereignisse reagieren, indem Interrupts ausgelöst werden. Jedem Interrupt kann eine Priorität zugewiesen werden, um festzulegen, ob ein Interrupt einen anderen unterbrechen darf, der gerade vom Prozessor abgearbeitet wird. 20, *siehe* Interrupt

Nullpegel Signalpegel, wenn keine Beschleunigung gemessen wird. 31, 49, 50, 53, 54

PC PC oder umgangssprachlich Computer. Eine elektronische Rechenmaschine mit der sehr viele Rechenschritte in sehr kurzer Zeit ausgeführt werden können. Mit der richtigen Programmierung (Software) können PCs sehr unterschiedliche, umfangreiche Aufgaben lösen. *siehe* Software

Peak Englisch für Spitzenwert oder Signalspitze. 13, 31

Pin Ein Anschluss an einem Chip oder einer Leiterplatte. Über Pins werden elektronische Bauteile miteinander verbunden und Peripheriegeräte wie z.B. Sensoren angeschlossen. 21, 29, *siehe* Sensor

Polling Englisch für Abfragen. Bezeichnet das wiederholte Abfragen einer Funktion oder eines Wertes, bis ein bestimmtes Ereignis auftritt. Der Prozessor ist mit der Abfrage beschäftigt und verliert dadurch Rechenzeit. 23

Quantisierung Einteilung eines Werts aus einer kontinuierlichen Skala in eine abgestufte Skala. Bei der Quantisierung wird der nächstgelegene Wert auf der abgestuften Skala ausgewählt. Je nach Anwendung wird die abgestufte Skala mit konstanter Stufengrösse (linear) gewählt, oder mit unterschiedlichen Stufengrößen je nach absolutem Wert (z.B. exponentiell). Der Quantisierungsfehler entspricht der Differenz zwischen dem analogen und dem quantisierten, digitalen Wert. Je grösser die Bit-Breite der Quantisierung ist, desto kleiner wird der Quantisierungsfehler. *siehe* Bit-Breite

- SDRAM** Synchronous Dynamic RAM. Flüchtiger Arbeitsspeicher. Der Inhalt des Arbeitsspeichers muss regelmässig aufgefrischt werden, sonst geht die Information verloren. *siehe*
- Sensor** Ein Messgerät für physikalische Grössen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck oder Beschleunigung. 5, 6, 9, 10, 12–15, 18, 22, 25, 29, 33, 35, 38
- Sensoreinheit** Ein kombiniertes elektronisches Gerät zur Messung von physikalischen Daten und der Verarbeitung dieser Daten. Das Gerät verfügt über einen Mikroprozessor und einen Sensor. Optional kann auch eine Schnittstelle für die Kommunikation mit einem Datenlogger vorhanden sein. 2, 11–16, 18–22, 28, 30, 38–40, 45, 46, 48, 49, 51–54, 57, *siehe* , Sensor & Datenlogger
- serielle Schnittstelle** Eine Schnittstelle, über die Daten bitweise übertragen werden, im Gegensatz zu paralleler Übertragung, wo auf mehreren Leitungen mehrere Bits gleichzeitig übertragen werden. 62
- Signal** Ein Signal ist ein Informationsträger. Die Information wird einem Signalwert zugeordnet. Ein einfaches Beispiel ist die Spannung am Ausgang eines Beschleunigungs-Sensors. Der Sensor gibt über die Höhe der Spannung an, wie stark die Beschleunigung von einem definierten Referenzwert abweicht. Die Spannung trägt also eine Information über den Messwert und ist daher ein Signal. Aus dem Datenblatt kann herausgelesen werden, wie hoch die ausgegebene Spannung bei einer bestimmten Beschleunigung ist. So kann das Signal in Information umgewandelt werden. 29, *siehe* Sensor
- Slave** Ein Busteilnehmer, der nur Daten über den Busübertragen darf, wenn ihm der Busmaster die Genehmigung dafür erteilt. Dies kann z.B. in Form eines sog. Tokens geschehen. *siehe* Busmaster
- Software** Programm zur Steuerung der Rechenabläufe in einem Computer. Durch die Software wird einem Computer die Fähigkeit gegeben, bestimmte Aufgaben zu lösen und Resultate in einer für Menschen lesbaren Form darzustellen. Die Software enthält Instruktionen, die in der CPU des Computers ausgeführt werden. 39
- Speichermedium** Ein Stück Hardware, auf dem Daten gespeichert werden können. 18
- Stichleitung** Abzweigungsleitung an einer Busleitung. Um das Signal vom Bus zum Transceiver zu führen, wird eine Stichleitung benötigt, die wie eine T-Kreuzung von der Busleitung wegführt. Je länger die Stichleitung ist, desto stärker leidet die Signalqualität auf der Busleitung. 40, *siehe* Transceiver
- Terminal-Emulator** Ein Programm, das ein Terminal emuliert. Der Benutzer sieht ein Fenster mit einer Kommandozeile zur Befehlseingabe, das aussieht wie auf einem Terminal. 42, 45, *siehe* Terminal
- Threshold** Englisch für Schwellenwert. 13, 29, 31, 33, 49, 50, 53, 54
- Timeout** Englisch für Zeitüberschreitung. 13, 31, 49, 50, 53, 54
- Timestamp** Englisch für Zeitmarke. Mittels eines Timestamps kann ein Ereignis oder ein Messwert einem genauen Zeitpunkt zugeordnet werden. Der Timestamp wird dafür zu einem bestimmten Zeitpunkt auf null gesetzt (Reset) und in allen Messgeräten in vordefiniertem Takt erhöht. Der Timestamp gibt an, wie viel Zeit seit dem Reset vergangen ist. Durch die Wahl des Takts wird die zeitliche Auflösung definiert. 2, 3, 13–15, 33
- Transceiver** Ein Gerät das gleichzeitig Transmitter und Receiver, also Sender und Empfänger ist. Der Prozessor sendet die zu übertragenden Daten über eine serielle Schnittstelle an den Transceiver. Der Transceiver erzeugt dann die notwendigen elektrischen Signale auf dem Bus, um die Daten zu übertragen. Beim Empfangen einer Meldung liest der Transceiver die Signale vom Bus und übersetzt sie für die serielle Übertragung zum Prozessor. Ein Transceiver ist notwendig, wenn der Prozessor die vom Bus erwarteten elektrischen Signale nicht selbst erzeugen kann. 24, 40, *siehe* serielle Schnittstelle

Akronyme

ADC Analog Digital Converter 18, 59

CD Collision Detection 23

CD Compact Disc VII, XIII

CRC Cyclic Redundancy Check 25

DFT diskrete Fourier-Transformation 29, 59

DSP Digitaler Signal-Prozessor 20, 60

FPU Floating Point Unit 20

FSM Finite State Machine 31, 33, 60

ID Identifikationsnummer 12, 14

IDFT inverse diskrete Fourier-Transformation 29, 59

ISR Interrupt Service Routine 61

MAC multiply-accumulate unit 20

MC Mikrokontroller 23

NVIC Nested Vectored Interrupt Controller 18, 20

PC Personal Computer 14, 61

WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft 8, 29

Listings

11.1. Untermenü SD-Karte formatieren	46
11.2. Statusmeldung SD formatieren	46
11.3. Fehlermeldung SD formatieren	46
11.4. Erfolgsmeldung SD formatieren	46
11.5. Fehlermeldung SD-Karte anmelden	47
11.6. Untermenü SD-Karte abmelden	47
11.7. Warnung vor SD-Karte abmelden bei ungespeicherter Konfiguration	47
11.8. Untermenü Logger-Status	47
11.9. Untermenü Stoppen der Aufzeichnung	48
11.10Untermenü Starten der Aufzeichnung	48
11.11Untermenü Sensor-Auswahl	48
11.12Untermenü Sensor-Parameter	48
11.13Untermenü Abtastrate	49
11.14Fehlermeldung bei ungültiger Abtastrate	49
11.15Untermenü Threshold	49
11.16Fehlermeldung ungültiger Threshold	49
11.17Untermenü Null-Level	50
11.18Fehlermeldung ungültiger Nullpegel	50
11.19Untermenü Timeout	50
11.20Fehlermeldung zu langer Timeout	50
11.21Warnung kurzer Timeout	51
11.22Untermenü Detail-Level	51
11.23Untermenü Start/Stop einzeln	51
11.24Untermenü Start/Stop alle Sensoren	51
11.25Fehlermeldung beim Starten eines Sensors	51
11.26Untermenü Sensor-Status	52
11.27Untermenü Timestamp zurücksetzen	52
11.28Untermenü interne Uhr	52
11.29Untermenü Datum einstellen	52
11.30Untermenü Uhrzeit einstellen	53
11.31Untermenü Konfigurationsdatei	53
11.32Fehlermeldung beim Speichern der Konfigurationsdatei	53
11.33Beispiel einer Konfigurationsdatei	54
11.34Information bei ungespeicherter Konfiguration	54

A. Anhang

A.1. Offizielle Aufgabenstellung

Titel: Messstation zur Registrierung von Geschiebe-Bewegungen im Fluss

Betreuer: Hans-Joachim Gelke, gelk
Fachgebiet: Mikroelektronik (ME)
Studiengang: IT
Zuordnung: Institute of Embedded Systems(InES)
Industriepartner:

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL,
8903 Birmensdorf (<http://www.wsl.ch/>)

Bruno Fritschi, bruno.fritschi@wsl.ch (Projektidee)

Dieter Rickenmann, dieter.rickenmann@wsl.ch (Betreuung)

Gruppengrösse: 2,

Reserviert für: Tobias Welti (weltitob), Tobias Keller (kelleto1)

Ausgangslage:

Das WSL betreibt eine Messstation zur Registrierung von Geschiebe-Bewegungen im Fluss mittels Geophonen, die unter Stahlplatten montiert sind. Diese Platten sind in einer Betonkonstruktion eingelassen, um sie im Flussbett zu fixieren. Die Geophone sind über Kabel mit einem Auswertungs-Rechner (Embedded PC) verbunden, der die Signale auswertet. Die baulichen Massnahmen für die Installation der Sensoren, der Auswertungsstation sowie der Stromversorgung sind sehr teuer. Zukünftig sollen die Geophone durch eindimensionale MEMS Beschleunigungssensoren ersetzt werden, da diese kleiner sind.

Aufgabenstellung:

Um die Kosten zu senken und die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren, soll die Auswertung der Daten direkt am Sensor erfolgen. Somit könnten die Daten über ein Bussystem übertragen werden und der Auswertungsrechner bräuchte weniger Leistung.

Dank der Bustopologie ist das Messsystem weniger komplex und kann einfacher installiert werden. Denkbar wäre die Integration in einer Gummimatte anstelle der Stahl- und Betonkonstruktion, da viel weniger Leitungen nötig sind.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung der Auswertungshardware und des Bussystems. Die Auswertungsalgorithmen sind nicht Bestandteil der Arbeit und werden vom WSL zur Verfügung gestellt.

Denkbar wäre es, einen Prototyp für Vergleichsmessungen im Erlenbach (Alptal, SZ) an einer bestehenden Schwelle zu implementieren.

A.2. Projektmanagement

Zeitplan
Besprechungsprotokolle
oder Journals

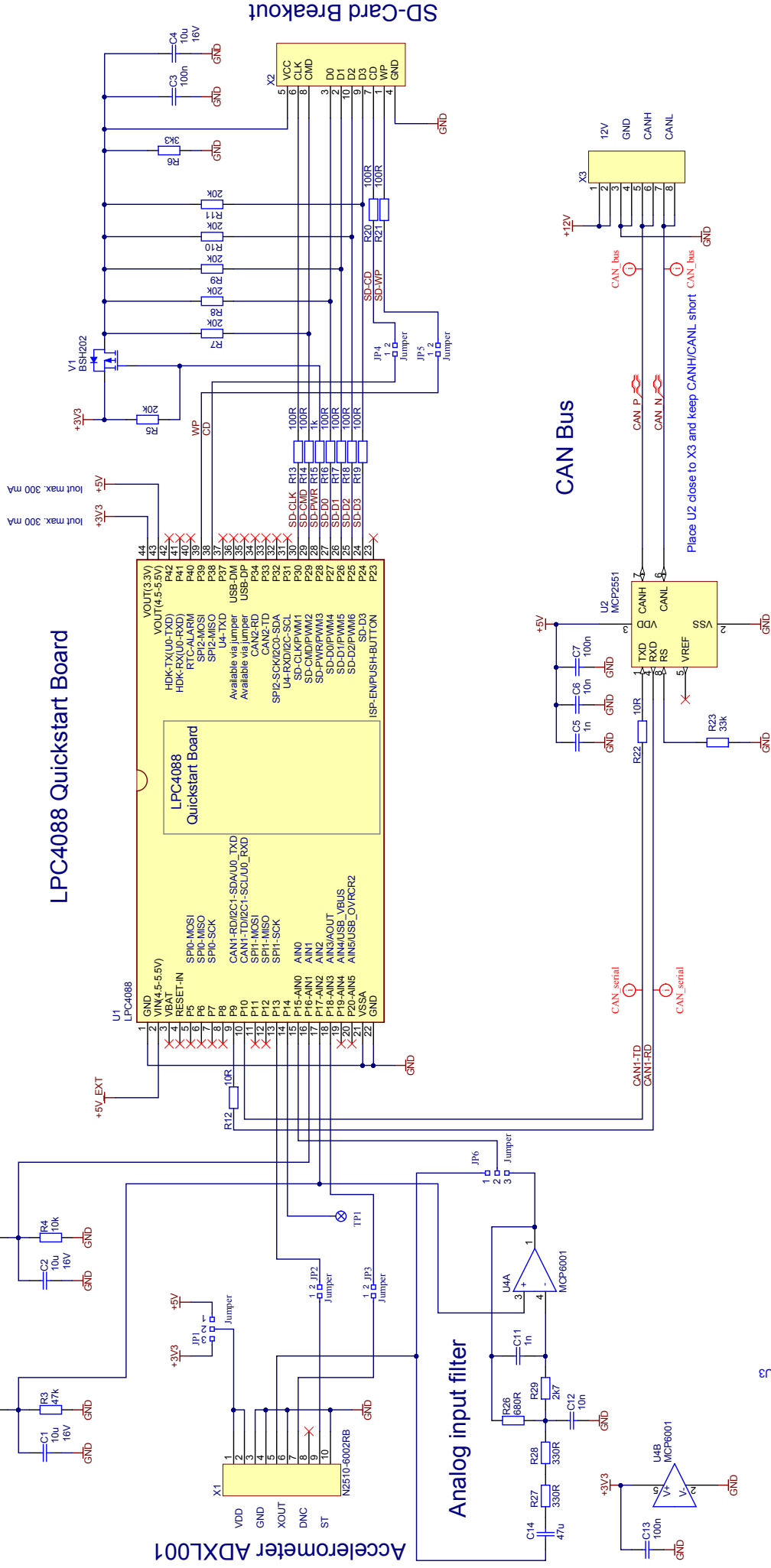
A.3. Weiteres

A.4. Schaltpläne

Für den Datenlogger und die Sensoreinheiten wurde mit der kompetenten Hilfe von Erich Ruff (ZHAW InES) und Valentin Schlatter (ZHAW InES) eine Leiterplatte entworfen sowie Gehäuse gebaut. Die Leiterplatte wurde so entworfen, dass über die Bestückung entschieden werden kann, ob ein Datenlogger oder eine Sensoreinheit gebaut wird. Für einen Datenlogger wird die Leiterplatte mit einem SD-Karten-Slot bestückt. Für die Sensoreinheit wird ein Tiefpassfilter und der Anschluss für den Sensor bestückt. Beide Varianten enthalten die Spannungsversorgung (12 V auf 5 V), einen CAN-Transceiver und die Anschlüsse für die Kabel. Der Schaltplan sowie das Leiterplattenlayout befindet sich im Anhang A.4

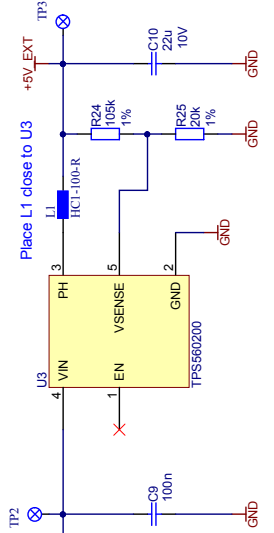
dieser Abschnitt
in den Haupttext

LPC4088 Quickstart Board



Power Supply 5V

Place C4 as close as possible to VIN and GND of U3



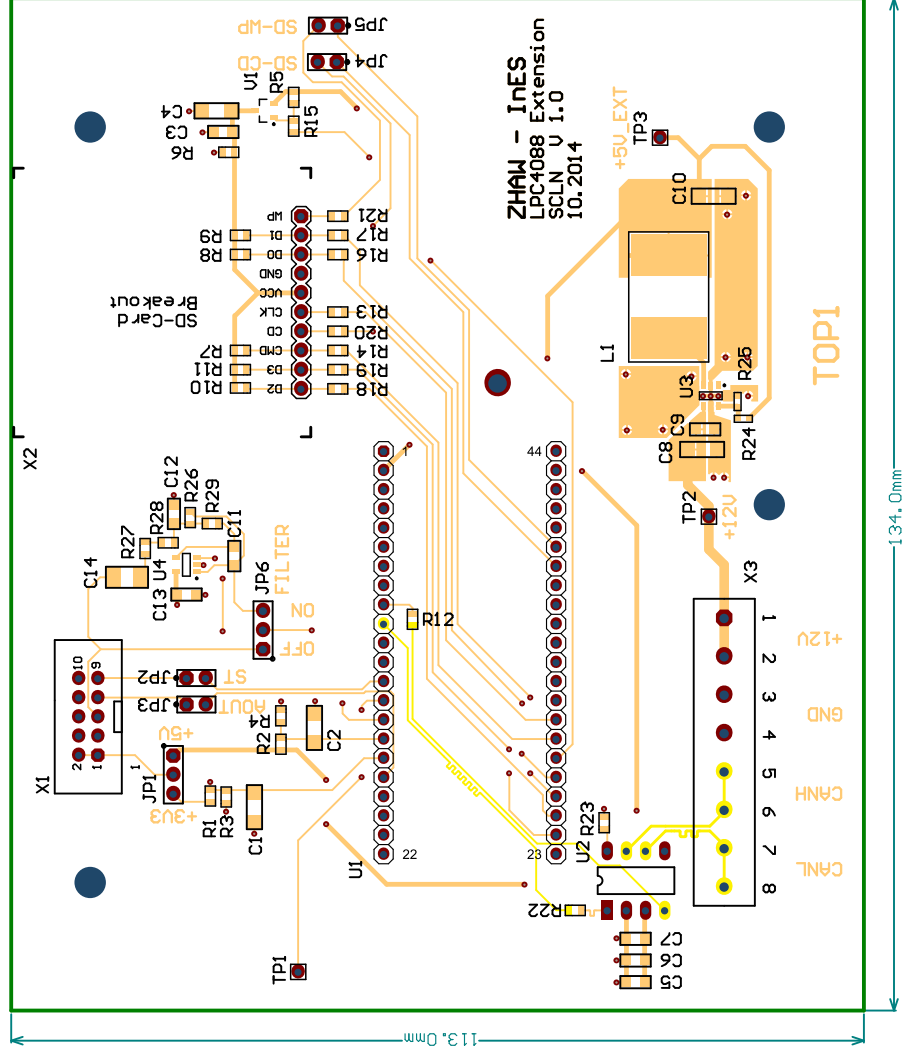
Rev	Date	Sign	Release Notes
1.0	26.09.2014	sch	Created for BA14_gelk_weltlob_kelleto1
1.1	01.10.2014	sch	1nF/10nF for MCP2551, Voltage Divider AIN1/AIN2, R23 QR->33k
1.2	02.10.2014	sch	Analog input filter added
1.3	06.10.2014	sch	bypass for analog input filter added

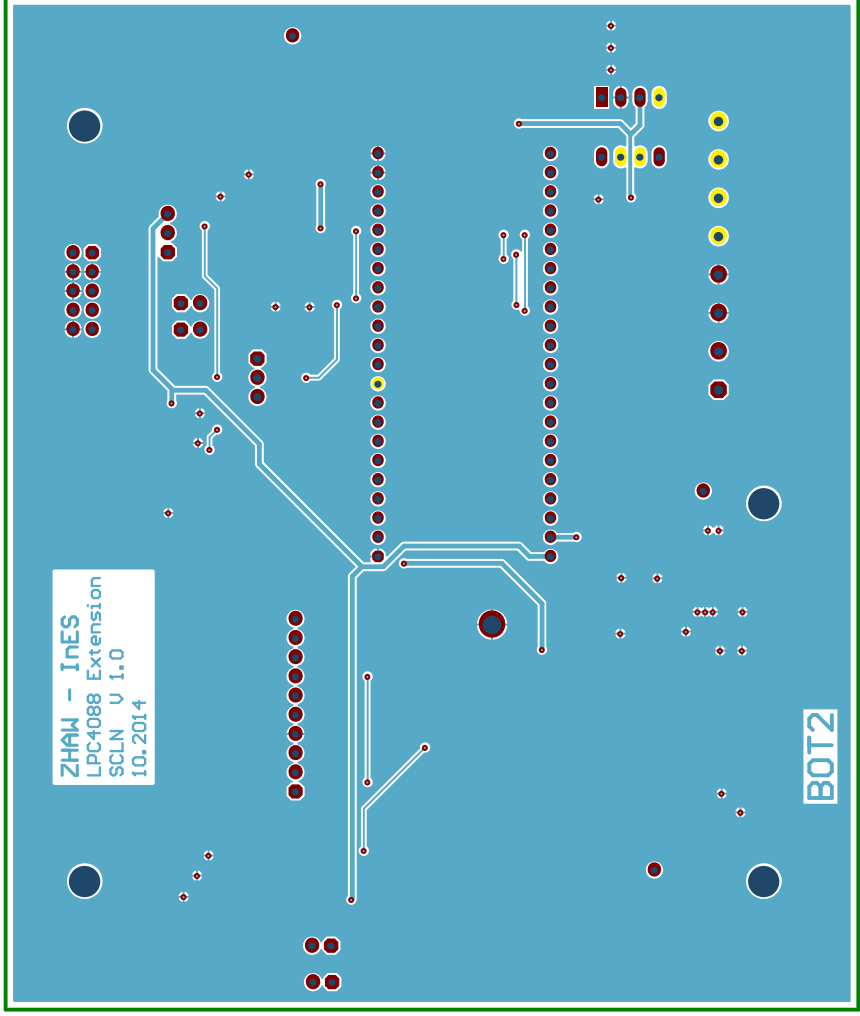
zhaw School of Engineering InES Institute of Embedded Systems	Zürich University of Applied Sciences InES Institute of Embedded Systems PO Box 8005 8401 Winterthur Switzerland
--	--

© InES This document is property of InES - Institute of Embedded Systems No copying or distribution without prior written permission of InES

Title LPC4088 Extension	Document Number A3	Revision 1.3
-----------------------------------	------------------------------	------------------------

Sheet 1 of 1 Print date: 07.10.2014 Drawn by: SCLN File: D:\Wulum Design\wulum BA_board\Altium Documents\LPC4088_Extension_SchDoc
--



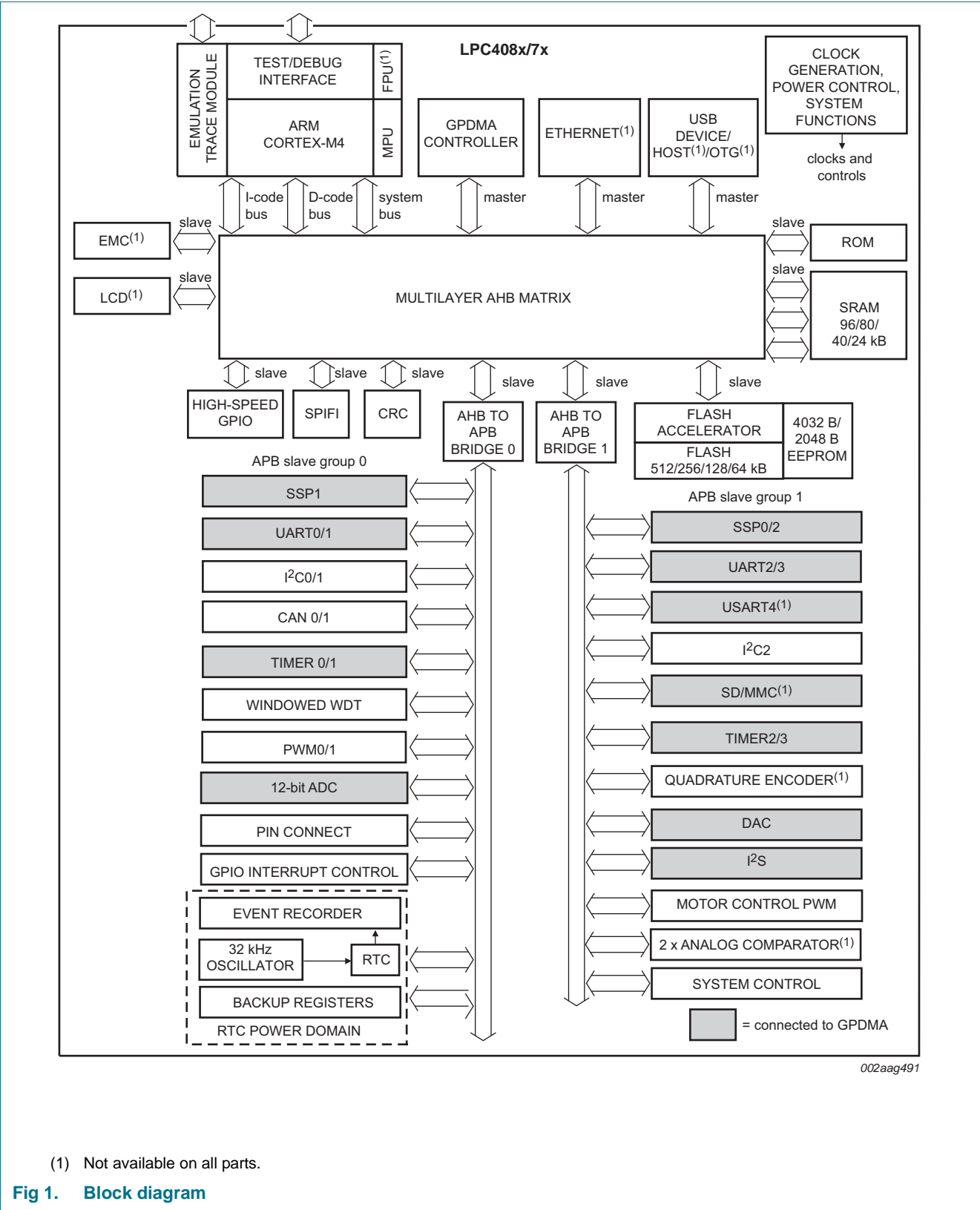


A.5. Datenblätter

Um die Dokumentation übersichtlich zu halten, wird der Grossteil der Datenblätter nicht mit der Dokumentation ausgedruckt, sondern auf der beiliegenden Compact Disc (CD) mitgeliefert.

A.5.1. NXP LPC4088 32-bit ARM Cortex-M4 microcontroller

5. Block diagram



A.5.2. Embedded Artists NXP LPC4088 QuickStart Board

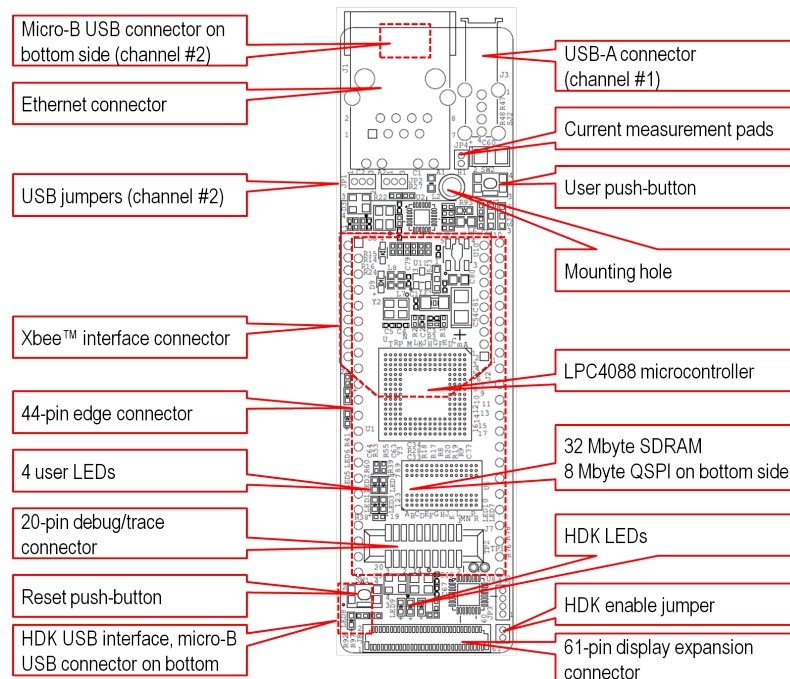


Abbildung A.1.: Hauptkomponenten des NXP LPC4088 QuickStart Boards von Embedded Artists.

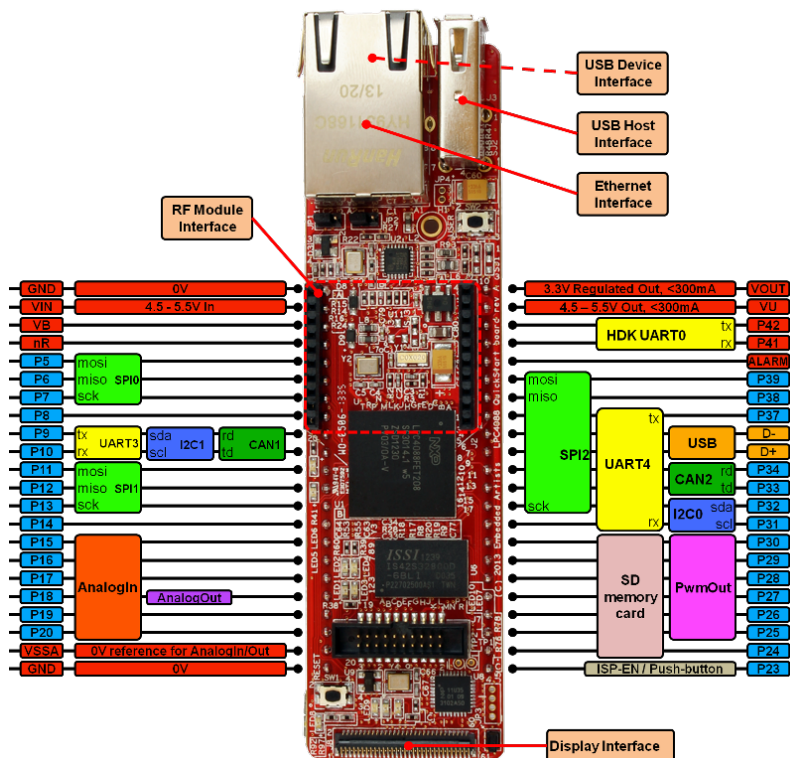


Abbildung A.2.: Pins des NXP LPC4088 QuickStart Boards von Embedded Artists.

(https://mbed.org/)

Users(/activity/) » [embeddedartists\(/users/embeddedartists/\)](#) » [Notebook\(/users/embeddedartists/notebook\)](#) » LPC4088 QuickStart Board - Hardware Information

LPC4088 QuickStart Board - Hardware Information

Page last updated 14 Nov 2013(14 Nov 2013), by [\(https://developer.mbed.org/users/embeddedartists/\) EmbeddedArtists AB\(https://developer.mbed.org/users/embeddedartists/\)](#). 17 replies [\(/users/embeddedartists/notebook/lpc4088-quickstart-board---hardware-information/#commentform\)](#)

LPC4088 QuickStart Board Hardware Features

MCU

- LPC4088, Cortex-M4F core running at up to 120MHz

Memory

- 512 KByte on-chip FLASH
- 96 KByte on-chip SRAM
- 4 KByte on-chip E2PROM
- 8 MByte QSPI FLASH (can execute program code and/or contain a file system)
- 32 MByte SDRAM with 32-bit databus access
- On-board globally unique MAC address.

Connectors

- 2x22 pin edge pins that are very compatible with the original 2x20 pin LPC1768 mbed pinning
- 10/100Mbps Ethernet (RJ45)
- USB-A (USB Host interface)
- USB-micro B (USB Device interface)
- USB-micro B (mbed HDK debug interface)
- 20 pos SWD/Trace connector (ARM standard debug connector)
- 61 pos 0.3mm pitch FPC connector for **display** expansion
- 20 pos **XBee** compatible connector for RF module add-on

Display expansion

- Up to 24-bit pixel data (16-bit most common) via 61 pos, 0.3mm pitch FPC connector.

Other

- Proper **ESD protection** on communication interfaces.
- On-board HDK (debug interface functions)
- Supported by the on-line mbed SDK.
- Supported by a lot of professional quality software and examples by EA.
- Industrial temperature specified (**-40 to +85** degrees Celsius).
- **ISO 9001** produced.
- Production compensated for carbon dioxide emission.
- Current consumption down to about **5 mA**.

Pin Usage

LPC4088 QuickStart Board - Hardware Information

Page owner: [\(https://developer.mbed.org/users/embeddedartists/\)](#)
[EmbeddedArtists AB\(https://developer.mbed.org/users/embeddedartists/\)](#)

Created 05 Sep 2013(05 Sep 2013).

Last updated 14 Nov 2013(14 Nov 2013)

A.5.3. Analog Devices ADXL001 Beschleunigungssensor

SPECIFICATIONS

SPECIFICATIONS FOR 3.3 V OPERATION

$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_S = 3.3\text{ V} \pm 5\%$ dc, acceleration = 0 g, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Conditions	ADXL001-70			ADXL001-250			ADXL001-500			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SENSOR											
Nonlinearity	Includes package alignment		0.2	2		0.2	2		0.2	2	%
Cross-Axis Sensitivity			2			2			2		%
Resonant Frequency			22			22			22		kHz
Quality Factor			2.5			2.5			2.5		
SENSITIVITY											
Full-Scale Range	$I_{OUT} \leq \pm 100\text{ }\mu\text{A}$	-70		+70	-250		+250	-500		+500	g
Sensitivity	100 Hz		16.0			4.4			2.2		mV/g
OFFSET	Ratiometric										
Zero-g Output		1.35	1.65	1.95	1.35	1.65	1.95	1.35	1.65	1.95	V
NOISE											
Noise	10 Hz to 400 Hz		85			95			105		mg rms
Noise Density	10 Hz to 400 Hz		3.3			3.65			4.25		mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$
FREQUENCY RESPONSE											
-3 dB Frequency			32			32			32		kHz
-3 dB Frequency Drift Over Temperature			2			2			2		%
SELF-TEST											
Output Voltage Change	To ground		400			125			62		mV
Logic Input High		2.1			2.1			2.1			V
Logic Input Low				0.66			0.66			0.66	V
Input Resistance		30	50		30	50		30	50		k Ω
OUTPUT AMPLIFIER											
Output Swing	$I_{OUT} = \pm 100\text{ }\mu\text{A}$	0.2		$V_S - 0.2$	0.2		$V_S - 0.2$	0.2		$V_S - 0.2$	V
Capacitive Load		1000			1000			1000			pF
PSRR (CFSR)	DC to 1 MHz		0.9			0.9			0.9		V/V
POWER SUPPLY (V_S)											
Functional Range		3.135		6	3.135		6	3.135		6	V
I_{SUPPLY}			2.5	5		2.5	5		2.5	5	mA
Turn-On Time			10			10			10		ms

A.6. Source Code, Daten und Multimedia

Da der Source Code sehr umfangreich ist, wird darauf verzichtet, ihn ausgedruckt zur Verfügung zu stellen. Er befindet sich auf der beiliegenden CD.

Spezifikationen u
tenblätter der ve
ten Messgeräte u
der Komponente
Berechnungen, M
te, Simulationsre
Grafische Darste
Fotos

Inhaltsverzeichnis
CD erstellen
CD mit dem voll
gen Bericht als p
inklusive Film- u
tomaterial