

Hochauflösende Messungen akustischer Signale unter Feldbedingungen

*G. Kell, O. Hochmuth, B. Meffert, F. Winkler
Humboldt-Universität zu Berlin, *Fachhochschule Brandenburg

1. Einordnung der Themenstellung

Eine Möglichkeit zur Kontrolle von Abrüstungs- und Friedensabkommen liegt in der Überwachung regionaler oder lokaler Begrenzungen für schwere militärische Landfahrzeuge. Im Rahmen des Bochumer Verifikationsprojektes wurden seit 1989 eine Reihe von Experimenten mit dem Ziel durchgeführt, schwere Militärfahrzeuge anhand ihrer spezifischen akustischen, seismischen und magnetischen Signale zu identifizieren [1]. Bestandteil dieses Vorhabens war ein im Jahre 1999 begonnenes und vom BMBF gefördertes Projekt „Sensorverifikation von Begrenzungen schwerer Landfahrzeuge - Nachweisverfahren und -system“, woran neben der Ruhr-Universität Bochum/Experimentelle Physik III auch das Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin beteiligt sind.

2. Zielstellung und technische Randbedingungen

Die Arbeiten im Rahmen des Projektes wurden mit dem Ziel durchgeführt, eine autonom arbeitende Sensorstation zur Aufnahme und Auswertung akustischer und seismischer Signale zu entwickeln. Aus früheren Untersuchungen konnten die für eine zuverlässige Erkennung bestimmter Fahrzeuge signifikanten Spektralanteile und der erforderliche Dynamikbereich abgesteckt werden. Auf dieser Basis wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Sensoren ausgewählt.

Sensor	Mikrofon	Geofon
Typ	4188	SM-6
Hersteller	Brüel&Kjaer	Input/Output Inc.
Bemerkung	m. Vorverstärker	$R_{damp} = 10k\Omega$
Rauschgrenze	$3,7\mu V$	$5,2\mu V$
Größtes Signal	typ. 1V max.10V	5,2V
Frequenzbereich	8Hz - 12,5kHz	4,5Hz - >1kHz

Tabelle 1: Für die Station ausgewählte Sensoren

Die technischen Parameter der Sensorstation sollten an die Sensorparameter weitgehend angepasst sein; repräsentativ hierfür stehen der Dynamikbereich und die Abtastfrequenz. Insbesondere der Wunsch nach einer hohen Dynamik bis über 120 dB gab Anlass zu einer Eigenentwicklung; handelsübliche Lösungen mussten entweder aufgrund ihrer sonstigen technischen Parameter oder aufgrund ihrer hohen Kosten verworfen werden.

3. Gesamtkonzept

Bei der Aufstellung des Gesamtkonzeptes wurden zwei Schwerpunkte gesetzt:

- Entwicklung der Eingangsbaugruppen vom Sensoranschluss bis zur Übergabe eines digitalisierten Datenstromes
- Rechnerkonzept für die Steuerung, Datenvorverarbeitung, Zwischenspeicherung und Übergabe an eine Schnittstelle

Der vorliegende Beitrag befasst sich hauptsächlich mit dem ersten Schwerpunkt. Die Station soll über vier gleichwertige Kanäle für den wahlweisen Anschluss eines Geofones oder eines Mikrophones verfügen. Dabei soll die Realisierung eines Kanales beide Sensortypen

zulassen. Für einen Kanal wurde eine Grundstruktur nach Bild 1 festgelegt.

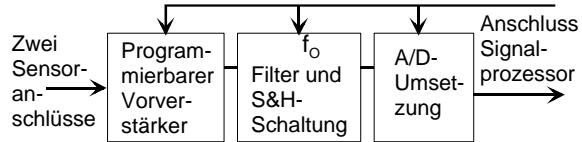


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Kanales

Die vier gleichartig aufgebauten Kanäle werden im folgenden unter dem Begriff „Analogteil“ zusammengefasst. Die sich somit ergebende Gesamtstruktur ist in Bild 2 dargestellt.

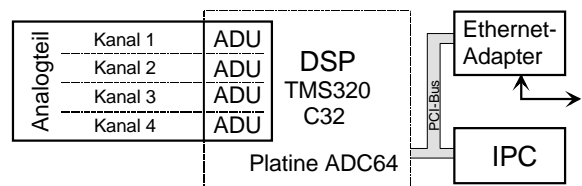


Bild 2: Wesentliche Komponenten der Sensorstation (IPC = Industrie-PC)

Speziell für die Auswertung der akustischen Signale spielt die Erfassung meteorologischer Daten eine Rolle. Auch für die Überwachung der Betriebsbedingungen der Sensorstation sind bestimmte Umgebungsparameter wie etwa die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur interessant. Deshalb wurden in das Konzept unter Nutzung der vorhandenen technischen Ressourcen auch Sensoren für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck integriert.

4. Aufbau des Analogteiles

4.1 Analoge Vorverarbeitung

Hierzu zählen die Komponenten Vorverstärker, Filter und Sample-and-Hold-Schaltung. Das Eingangssignal kommt umschaltbar von einer 2- bzw. 7-poligen Lemo-Buchse an den Eingangsvorverstärker. Er wurde als echter Differenzverstärker mit hoher Gleichtakterdrückung auch bei höheren Frequenzen ausgelegt. Dabei stellte sich heraus, dass die komplett realisierten handelsüblichen Instrumentenverstärker hinsichtlich des Rauschens schlecht an die niedrigen Quellimpedanzen der verwendeten Sensoren angepasst sind. Daher wurde für diesen Schaltungssteil ein Konzept unter Verwendung des Operationsverstärkers LT1128 der Firma Linear Technology verwendet. Um Eingangssignale bis unter $1\mu V$ auflösen zu können, wurde eine Umschaltung verschiedener Vorverstärkungswerte von $v_0 = 1; 2; 4$ oder 8 realisiert. Es schließt sich ein Bessel-Tiefpassfilter sechster Ordnung an, welches die Aliasing-Effekte bei der Abtastung unterdrücken soll. Um einen Dynamikbereich >120 dB zu erreichen, musste es in konventioneller Analogtechnik aufgebaut werden. Die gleiche Forderung steht auch für die Sample-and-Hold-Schaltung, weshalb der SHC 5320 von Burr-Brown ausgewählt wurde. Am Ausgang stehen die Abtastwerte mit einer Droop-Rate von besser als $26\mu V/ms$ zur Verfügung.

4.2 Das Konzept der A/D-Umsetzung

Zunächst bieten sich für hohe Dynamikforderungen A/D-Umsetzer nach Sigma-Delta-Modulation an. Betrachtet man jedoch in dieser Klasse von Umsetzern die effektive Auflösung bei einer Abtastrate von ≥ 20 kHz, so reduziert sie sich auch bei den besten verfügbaren IC's auf weniger als 18 bit. Deshalb wurde ein Konzept gewählt, das ein Ergebnis faktisch in Gleitkomma-darstellung liefert. Ein 16-Bit-ADU nach sukzessiver Approximation liefert den Mantissenwert. Er erhält sein Signal von einem umschaltbaren Verstärker. Mit einer schnellen Komparator-kette wird unmittelbar nach dem Eintreffen eines neuen Abtastwertes der gültige Bereich detektiert und der Verstärker über einen EPLD im Bereich von $v_1 = 1$ bis 256 eingestellt. Gleichzeitig generiert der EPLD den zugehörigen 4-Bit-Exponenten. Die Struktur ist in Bild 3 dargestellt. Da der nachfolgende A/D-Umsetzer für den Mantissenwert eine eigene Sample-and-Hold-Schaltung besitzt, kann während seiner Umsetzzeit bereits der nächste Exponent ermittelt werden, so dass die maximale Abtastfrequenz nur unwesentlich verringert wird.

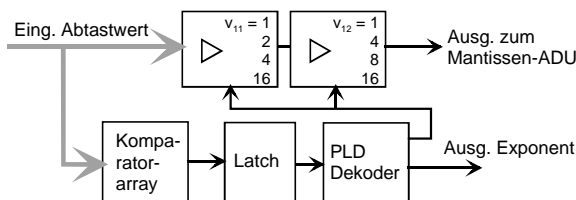


Bild 3: Exponententeil des A/D-Umsetzers

4.3 Ergebnisse

Die gesamte Sensorstation wurde in einem ersten Design fertiggestellt und sowohl im Labor als auch im realen Feldeinsatz getestet. Außerdem wurden verschiedene Messungen der technischen Parameter durchgeführt.

Einfach zu realisieren waren die Messungen zum Rauschverhalten. Die äquivalente Rauschspannung u_r betrug $< 0,5 \mu V_{SS}$ im autonomen Laborbetrieb und bis zu $15 \mu V_{SS}$ innerhalb der Sensorstation im Feldeinsatz.

Die Messungen zur Linearität im Mantissenbereich erwiesen sich als etwas problematischer, da Präzisions-Digitalvoltmeter mit wesentlich niedrigeren Abtastraten arbeiten und deshalb die exakten Abtastzeitpunkte nicht synchron sind. Durch Approximationen und Rückrechnungen konnte jedoch ermittelt werden, dass der Linearitätsfehler in der Größenordnung von einem Digit bezogen auf den jeweiligen Mantissenbereich liegt. Die Bemessung der Tiefpassfilter erwies sich als ausreichend. Im Zusammenwirken mit den Tiefpassfunktionen der Sensoren selbst konnten bei verschiedenen Tests mit angeschlossenen Sensoren keine Aliasing-Anteile in den Abtastwerten nachgewiesen werden.

Bei der Diskussion der Ergebnisse stellt sich auch die Frage, wie die digitalen Werte im Umschaltbereich zwischen zwei benachbarten Exponenten abgebildet sind. Weil die verfügbare Zeit für die Entscheidung der Komparatoren auf wenige 100 ns begrenzt war, ist der Wechsel des Exponenten kein scharfer Punkt, sondern ein Übergangsbereich mit gleitenden Wahrscheinlichkeiten. Bild 4 zeigt ein Beispiel für die Messung eines solchen Überganges. Da die Verstärkungswerte geringfügig von ihren Idealwerten abweichen, ist auch mit einem Monotoniefehler zu rechnen.

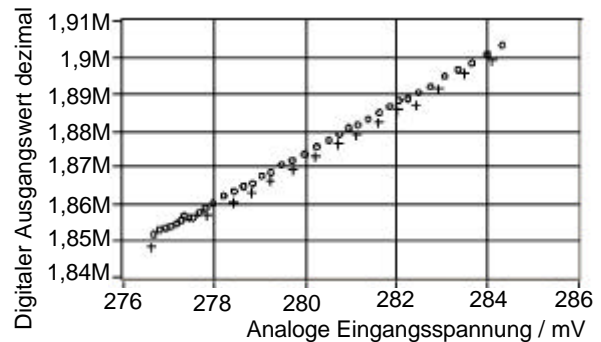


Bild 4: Kanal 1, oberer Übergang Exponent $2^6 \rightarrow 2^7$

Mit „o“ und „+“ sind die Exponenten 6 und 7 zur Basis 2 verknüpft. Man erkennt sowohl den gleitenden Wechsel zwischen beiden Zahlendarstellungen wie auch den Versatz der Abschnitte, welcher entweder durch analogen Abgleich oder durch eine Korrekturrechnung auf dem DSP kompensiert werden sollte. Ohne Korrektur betragen diese Differenzen bis zu 0,4% des aktuellen Wertes. Mit analogem Abgleich lassen sie sich etwa auf 100 ppm reduzieren, durch digitale Nachbearbeitung jedoch bis auf 1 Digit genau korrigieren. Das LSB entspricht - je nach Exponentenwert - einer Eingangsspannung von $1,19 \mu V$ bis $305 \mu V$, die Vorverstärkung v_0 ist hierbei 1. Unter Berücksichtigung der möglichen Vorverstärkungswerte lassen sich die digitalen Ausgangswerte auch im Festkommaformat darstellen. Legt man für den Vorverstärkungswert 3 Bit, 8 Bit für den Exponent, 1 Bit für das Vorzeichen und einen 15-Bit-Mantissenwert zugrunde, ergibt sich ein äquivalenter Festkomma-Wertevorrat von $\pm 2^3 \cdot 2^8 \cdot 2^{15} = \pm 67.108.864$, wobei nur die ersten 5 Dezimalstellen (d.h. die führenden 15 Bit) signifikant sind. Bei $v_0 = 8$ und Eingangsspannungen $< 4,5$ mV ergibt sich rechnerisch eine kleinste Auflösung von ca. 150 nV, während bei $V_0 = 1$ die maximale Eingangsspannung 10 V beträgt.

5. Ausblick auf weitere Arbeiten

Die erreichten Ergebnisse belegen, dass die technische Realisierbarkeit der Sensorstation mit den geforderten Parametern unter vertretbarem Aufwand gegeben ist. Es wurden bereits eine Vielzahl von Messdaten aufgenommen, die gegenwärtig ausgewertet werden. Erste Ergebnisse hierzu werden unter [2] vorgestellt. Die aktuelle technische Lösung lässt sich noch in einigen Details verbessern. Dies betrifft einerseits das technische Design; beispielsweise sollten sich Störungen vom Schaltnetzteil und verschiedenen digitalen Schaltungskomponenten noch besser unterdrücken lassen. Andererseits lassen sich das Steuerungskonzept und die Algorithmen zur Datenaufbereitung weiter optimieren. Geplant ist weiterhin eine Reduzierung des Energiebedarfes, um die Versorgung auch über ein Solarpaneel vornehmen zu können.

Literatur:

- [1] Altmann, J. et al: Ground vibration, acoustic waves and magnetic disturbance produced by land vehicles of the North-Atlantic Treaty Organization, Bochum Universitätsverlag 1993
- [2] Altmann, J.; Linev, S.; Weiß, A.: Akustisch-seismische Messungen zur Verifikation von Fahrzeugbeschränkungen, DAGA 2001