

Konzept für einen modularen EM-Empfänger

Stefan L. Helwig¹

Zusammenfassung

Die auf dem Markt befindlichen geophysikalischen Datenlogger sind nicht an die Anforderungen von LOTEM-Messungen angepasst, und am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln besteht ein akuter Bedarf nach einer neuen Apparatur. Da die Anforderungen an einen Datenlogger bei verschiedenen EM-Methoden ähnlich sind, schlage ich die Entwicklung eines Datenloggers vor, der durch einen modularen Aufbau an die Erfordernisse verschiedener Messverfahren angepasst werden kann. Verschiedene Entwickler könnten somit für eine spezielle Messaufgabe einzelne Module entwerfen oder verändern, müssten aber nicht die Entwicklungsarbeit für eine ganze Apparatur leisten. Ziel dieses Vorschlags ist es, als Diskussionsgrundlage und Anregung zu dienen. Bei der Durchführung des Projektes muss bewusst darauf geachtet werden, dass sich verschiedene Institute an der Entwicklung beteiligen können und dass die Quellen für Hard- und Software so weit wie möglich offen gehalten werden.

1. Einleitung



Abbildung 1: Empfänger-Equipment für eine LOTEM-Station mit fünf Komponenten ohne Sensoren (Gewicht 53 kg).

Die am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln für LOTEM-Messungen vorhandenen TEAMEX-Empfänger wurden Ende der 80er Jahre in Zusammenarbeit mit der DMT² auf Basis der Seismikapparatur SEAMEX entwickelt. Sie können beim Hersteller nicht mehr gewartet werden, und eine zunehmende Anzahl an Empfängern ist nur noch begrenzt einsatzfähig. Die von der DMT für Seismikmessungen entwickelte Nachfolgeapparatur SUMMIT ist der TEAMEX zwar deutlich überlegen, aber nur begrenzt für TEM-Registrierungen einsetzbar. Da auch andere auf dem Markt befindliche Data-Logger meist an die Bedürfnisse der Seismik oder der Magnetotellurik (MT) angepasst sind, wurde im vergangenen Jahr der Entschluss gefasst, eine neue Aufzeichnungseinheit zu entwickeln, die möglichst optimal auf die Bedürfnisse der TEM

¹Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

²Deutsche Montan Technologie, Essen

abgestimmt ist. Dabei soll die Erfahrung bei der Konstruktion und Nutzung von TEAMEX und SUMMIT mit in das neue Design einfließen.

Zunehmend werden LOTEM-Messungen auch in sehr unwegsamem Gelände durchgeführt. Dabei ist das bisherige Konzept eines Multikanalempfängers mit Kabeltelemetrie oft hinderlich. Das Verlegen und die Überwachung der Kabel ist in bergigem oder bewachsenem Gelände sehr aufwendig. Für den Betrieb einzelner unabhängiger Empfangsstationen ist das vorhandene Equipment aber zu groß und zu schwer. Die auf Abbildung 1 gezeigten Geräte werden alle benötigt, um eine einzige Station mit fünf Komponenten aufzeichnen zu können. Allein für die Datenaufzeichnung müssen bereits 53 kg ins Feld gebracht werden, dazu kommt noch das Gewicht der Sensoren.

Der Hauptvorteil der Telemetrie, alle Daten bereits während der Aufzeichnung zentral begutachten zu können, soll auch in einem neuen Design als Option erhalten bleiben.

2. Wunschdenken und notwendige Eigenschaften

Aus Erfahrungen zahlreicher Feldeinsätze und Tests ergibt sich eine Liste von Notwendigkeiten und Wünschen, die beim Bau eines neuen Empfängers berücksichtigt werden sollen. Dabei sollen insbesondere bekannte Probleme der bisherigen Empfänger, von denen die wichtigsten im Folgenden aufgelistet sind, vermieden werden.

- Störungen und Verzerrungen der Transienten bei Aufzeichnung in Sendernähe
- Räumlich weit entfernte Kanäle beeinflussen einander über die digitale Datenleitung
- Zu große Fertigungstoleranzen bei Filtereigenschaften und Analogteilen
- Filtereigenschaften sind nicht auf LOTEM optimiert
- Aufzeichnungsfenster sind zu kurz

Für TEM-Messungen ist generell eine hohe Dynamik erforderlich, da die Signale in sehr kurzer Zeit um mehrere Dekaden fallen (Strack, 1992). Neuere Einsatzgebiete von LOTEM mit Erkundungstiefen von einigen hundert Metern (Hördt et al., 2000) sowie eine genauere Berücksichtigung der Systemantwort machen eine höhere Abtastrate erforderlich. Kürzere Schaltperioden (Scholl, 2001) oder der Einsatz von Vibrotem (Helwig, 2000) lassen sich besser mit kontinuierlichen Aufzeichnungen durchführen. Wegen des Betriebs in Sendernähe und einer möglichst hohen Störfestigkeit muss bei der Konstruktion besonderen Wert auf elektromagnetische Verträglichkeit, auf eine optimale Trennung zwischen Analog- und Digitalteil sowie auf ein minimiertes Übersprechen der Kanäle untereinander geachtet werden. Sowohl in der Analog- als auch in der Digitalelektronik müssen Filter verwendet werden, die bei einer Stufenanregung nicht schwingen.

Um größtmögliche Flexibilität bei der Messung zu gewährleisten, ist ein autarkes System mit der zusätzlichen, aber nicht zwingenden Möglichkeit der Telemetrie zu einem zentralen PC wünschenswert. Die zeitliche Synchronität der einzelnen Empfänger sowie des Senders soll durch Kombination eines hochgenauen Quarz-Oszillators mit einer GPS-Zeitbasis gewährleistet werden. Da auch bei LOTEM zunehmend mehrere Komponenten an einer Station gemessen werden, sollen Empfänger mit 2, 3 sowie 5 Kanälen gebaut werden.

Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass die Empfänger möglichst leicht sind und einen geringen Stromverbrauch haben.

3. Modulares Konzept

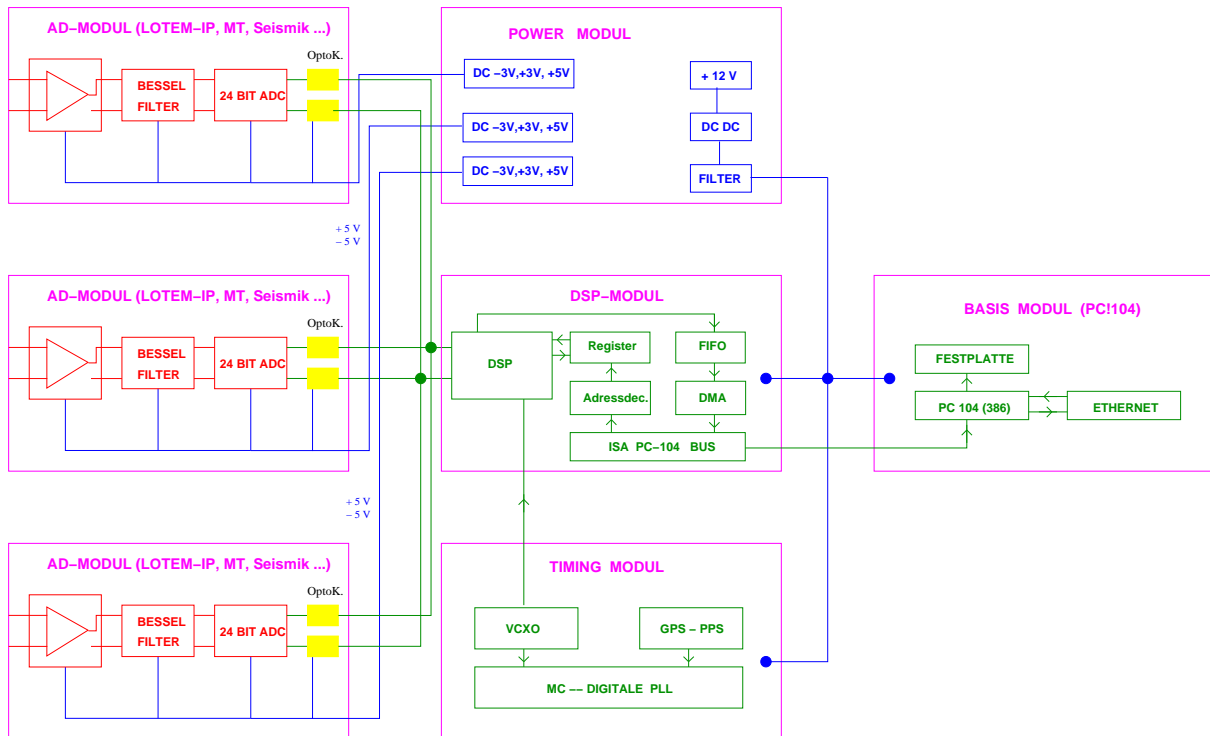


Abbildung 2: Modularer Aufbau für einen mehrkanaligen EM-Empfänger (drei Kanäle).

Um Anpassungsfähigkeit bei Nutzung und Weiterentwicklung zu gewährleisten, soll der neue Empfänger als modulares System aufgebaut werden, und es sollen so weit wie möglich einfach zu beschaffende Komponenten und frei verfügbare Ressourcen wie z.B. LINUX oder NetBSD genutzt werden.

Der grundsätzliche Aufbau und das Zusammenspiel zwischen den Modulen ist auf Abbildung 2 dargestellt. Die von den Sensoren kommenden Spannungen werden von Analog-Digital(AD)-Modulen analog verarbeitet, digitalisiert und auf einer konstanten Abtastrate (z.B. 48 oder 96kS/s) als kontinuierlicher Datenstrom an ein Digitales-Signalprozessor(DSP)-Modul weitergeleitet. Zwischen den AD-Modulen und dem DSP-Modul werden galvanische Trennungen über Optokoppler eingefügt. Diese sind notwendig, um die elektrischen Signale der unterschiedlichen Kanäle physikalisch voneinander zu trennen.

Im DSP-Modul werden die Daten digital tiefpassgefiltert, auf die gewünschte Datenrate reduziert und an das Basis-Modul weitergeleitet, wo sie auf Festplatte oder Flash-Karten gespeichert oder über Ethernet an einen PC weitergeleitet werden können. Der Zeittakt für das DSP-Modul wird von einem Timing-Modul erzeugt, und ein Power-Modul sorgt für die Spannungsversorgung aller beteiligten Module und Baugruppen.

Diese Art des Aufbaus ermöglicht eine große Flexibilität. Unterschiedliche Methoden wie LO-TEM, MT, IP oder auch Seismik erfordern jeweils spezielle Eingangsimpedanzen, Filter und

eventuell auch andere ADC. Durch Austausch bzw. Anpassung der AD-Module sowie der Software für DSP- und Basis-Module kann der Empfänger an die Bedürfnisse der jeweiligen Methode angepasst werden. Darüber hinaus können in der Entwicklungsphase Teilgruppen einfacher getestet werden.

3.1 Basis-Modul

Das Basis-Modul dient im Wesentlichen der Speicherung der Daten und der Kommunikation mit der Eingabe. Um seine Programmierung möglichst einfach zu gestalten und optimale Möglichkeiten zum Datenaustausch mit einem zentralen Rechner zu schaffen, soll es aus einem miniaturisierten PC bestehen.

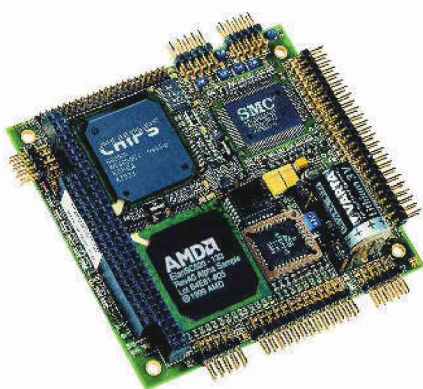


Abbildung 3: Miniaturisierter PC im PC-104 Format (92mm x 97mm).

Hier bietet sich z.B. das etablierte PC-104-System (siehe Abb. 3) an, für das es zahlreiche PC-Typen sowie Netzwerkkarten und Peripherie gibt. Bei den zu erwartenden maximalen Datenraten : z.B. 48kS/s, 32 bit/Sample, 6 Kanäle = 1.152 Mb/s reichen Karten mit ISA-Bus und 386 Prozessor aus, die in stromsparender Variante angeboten werden. Für Anwendungen, bei denen der Stromverbrauch besonders kritisch ist, wie bei langperiodischer MT, kann die zentrale Steuerung im Basismodul z.B. von einem IPC@Chip³ gebildet werden. Diese Streichholzschachtel großen Chips beinhalten einen 80186 PC mit Ethernetschnittstelle und Ansteuerungsmöglichkeiten für alle gängigen Speicher, arbeiten aber mit einer einzigen Versorgungsspannung von 5 V und verbrauchen wesentlich weniger Strom als PC-104 Module.

Da bei maximaler Datenrate ca. 4 Gb/h anfallen, müssen für derartige Messungen Festplatten als Datenspeicher benutzt werden. Bei geringeren Datenraten eignen sich auch Flash-Karten.

3.2 DSP-Modul

Für die Entwicklung des DSP-Moduls wurden Kontakte zur FH-Niederrhein hergestellt. Die Entwicklung wird von Texas-Instruments im Rahmen ihres Universitätsprogramms unterstützt. Das Modul soll so ausgelegt sein, dass es die Daten von bis zu sechs Kanälen mit Abtastraten von (48kS/s, 96kS/s) aufbereiten kann.

Die wesentliche Aufgabe des DSP-Moduls ist die digitale Tiefpassfilterung der Daten, die vom AD-Modul kommen. Die analogen Filter im AD-Modul sind als Anti-Alias-Filter auf die höchste Abtastrate, z.B. 96kS/s mit der entsprechenden Nyquist-Frequenz (Beispiel 48kHz), ausgelegt. Benötigt werden aber Daten auf einer niedrigeren Abtastrate, z.B. 10 kS/s, für die auch eine niedrigere Nyquist-Frequenz (Beispiel 5kHz) gilt. Daher müssen die digitalen Daten vor der Datenreduktion entsprechend der zur gewünschten Abtastrate gehörigen Nyquist-Frequenz tiefpassgefiltert werden. Erst danach darf eine Datenreduktion erfolgen. Tiefpassfilterung und Datenreduktion werden durch den DSP durchgeführt.

Der Hauptvorteil dieses inzwischen sehr gebräuchlichen Verfahrens ist, dass problemlos verschiedene Abtastraten realisiert werden können, ohne zusätzliche analoge Filter einbauen zu müssen. Darüber hinaus wird das Design des einzig notwendigen Analogfilters stark vereinfacht, und die

³BECK IPC GmbH, Wetzlar

Dynamik steigt. Durch den weitgehenden Verzicht auf analoge Filter entfällt auch das Problem der Filtertoleranzen.

Die digitalen Filter- und Dezimierungsroutinen werden auf die Bedürfnisse in der EM und dabei speziell auf LOTEM angepasst. Um die Schwingneigung des Empfängers bei stufenförmiger Anregung gering zu halten, sollen auch im Digitalteil Bessel-Filter zum Einsatz kommen.

Mit den neusten verfügbaren DSP ist es grundsätzlich möglich, die Funktionen des Prozessors im Basis-Modul mit zu übernehmen. Diese Lösung steht aber wegen der relativ aufwendigen Programmierung der DSP im Gegensatz zum modularen und offenen Charakter des Projektes.

3.3 LOTEM AD-Modul

Bei der Planung müssen die für LOTEM notwendigen Zeit- und Dynamikbereiche sowie die erforderliche Eingangsimpedanz berücksichtigt werden. Dazu kann auf Erfahrungen aus bisherigen Messungen und Entwicklungen zurückgegriffen werden.

Die höchsten Frequenzen treten bei der Messung der Systemantwort auf, die in unmittelbarer Nähe zum Sender durchgeführt wird. Bei einer Abtastrate von 4000 Samples/s waren diese Messungen meist noch unterampled. Tests mit der SUMMIT-Apparatur zeigten, dass die Systemantworten bei einer Abtastrate von 16000 Samples/s von ausreichender Qualität sind. Abtastrate und Anti-Alias-Filter sollten daher so kombiniert werden, dass Frequenzen bis 10000 Hz vollständig aufgelöst werden können. Das lässt sich mit üblicher Audiotechnik erreichen. Fraglich ist, ob die Stabilität dieser Technik ausreicht um die längsten bisher genutzten Schaltperioden von ca. 40s (0.025Hz) noch sauber abbilden zu können.

Als maximale Eingangsspannung ist ± 2.5 V in den meisten Fällen ausreichend. Lediglich bei den Messungen der Systemantworten kam es hier teilweise zu Übersteuerungen. Diese können aber durch Abschwächglieder vermieden werden.

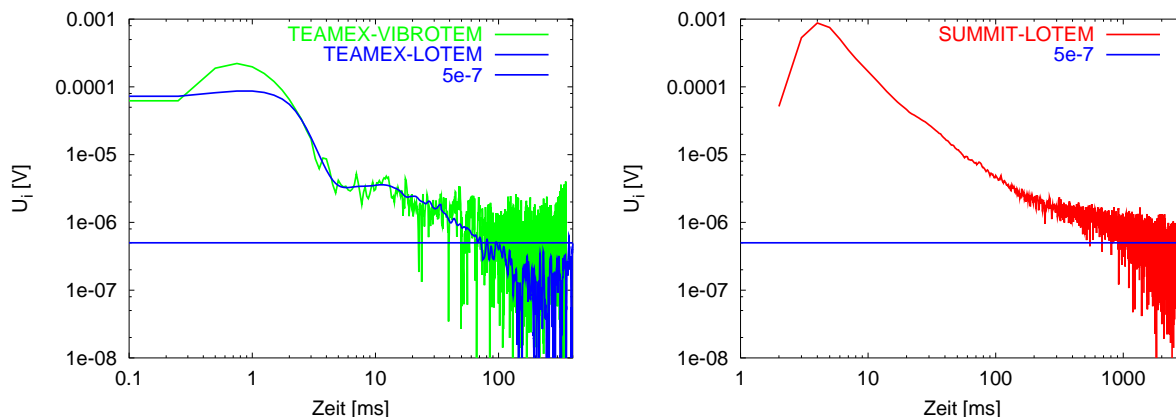


Abbildung 4: Beispiele gemittelter LOTEM Messspannungen für verschiedene Empfänger und Aufzeichnungsverfahren. Die gemessenen Signale sind bis etwa $5 \cdot 10^{-7} V$ nutzbar.

Das minimal detektierbare Signal lag bei bisherigen Messungen nach dem Stapeln hunderter Einzelmessungen im Bereich von ca. $\frac{1}{2} \mu V$. Abbildung 4 zeigt hierzu zwei Beispiele. Im linken Teil sind zwei Kurven, die mit LOTEM bzw. VIBROTEM unter Benutzung der TEAMEX-Apparatur aufgezeichnet wurden, dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt einen mit der SUMMIT-Apparatur aufgenommenen Transienten. Allen drei Beispielen liegen jeweils etwa 1000 Einzelmessungen zugrunde. Unabhängig von Apparatur und Aufzeichnungsverfahren verschwinden die Spannungswerte bei ca. $\frac{1}{2} \mu V$ im Rauschen. Diese Erfahrung wurde auf verschiedenen Messungen immer wie-

der gemacht. Eine neue Apparatur sollte daher auch Spannungen bis mindestens $\frac{1}{2} \mu\text{V}$ auflösen können.

Zwar lässt sich dieser Wert theoretisch durch Einsatz eines 24 bit Analog-Digital-Wandlers (ADC) ohne Vorverstärkung erreichen, praktisch sollte aber eine zuschaltbare Vorverstärkung berücksichtigt werden, damit sichergestellt ist, dass die ADC nicht im Grenzbereich arbeiten und somit das Quantisierungsrauschen gering gehalten wird.

Der Eingangswiderstand des Moduls muss aufgrund des Innenwiderstands der LOTEM-Empfangsspule (ca. $5 \text{ k}\Omega$) bei etwa $5 \text{ M}\Omega$ liegen.

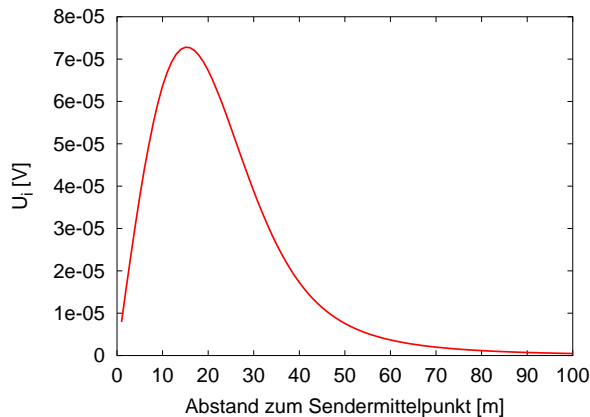


Abbildung 5: Spannung die in der Mitte des Senders in eine 1 cm^2 große Leiterschleife induziert wird.

gen Übersteuerungen verkraften können. Es darf nicht zu einer Sättigung der Verstärker kommen, die ein unvorhersagbares nichtlineares Abklingverhalten nach sich zieht.

Einen ersten Vorschlag für ein einfaches LOTEM AD-Modul zeigt Abbildung 6. Die von den Sensoren kommenden Spannungen werden über ein schwaches analoges Tiefpassfilter an einen Instrumentationsverstärker geleitet. Anschließend werden die Signale durch ein fest verdrahtetes Bessel-Filter in ihrem Frequenzgang begrenzt. Switched-Capacitor-Filter, die wegen ihrer einstellbaren Filtercharakteristik grundsätzlich attraktiv sind, sollen wegen ihres starken Rauschens nicht eingesetzt werden. Eine aus drei Operationsverstärkern bestehende Symmetrierschaltung bereitet die Signale für den Eingang eines symmetrischen 24 bit Sigma-Delta ADC auf. Nach der Analog-Digital-Wandlung werden die digitalen Daten optisch entkoppelt an das DSP-Modul weitergeleitet. Dieses Design ist nur eine Variante, die zur Zeit diskutiert wird. Hier sind Anregungen, Diskussion und Hilfe sehr willkommen.

Besonderen Wert muss bei der Konstruktion auf elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gelegt werden, da in Sendernähe sehr starke Felder auftreten. Abbildung 5 zeigt die Spannung dH_z/dt , die ein 1 km langer Sendedipol, durch den ein Strom von 1A fließt, in eine 1 cm^2 große Leiterschleife eine μs nach dem Umschalten induziert. Die Spannung ist aufgetragen gegen den senkrechten Abstand der Leiterschleife vom Mittelpunkt des Senders. Sind solche Schleifen auf den Platinen der Schaltung vorhanden, können ohne weiteres Spannungen in der Größe der Messsignale auftreten. Das muß durch sorgfältiges Platinenlayout und Abschirmung vermieden werden. Zusätzlich können in Sendernähe an den Sensoren zu frühen Zeiten große Spannungen abfallen. Der Empfänger muss diese kurzfristigen

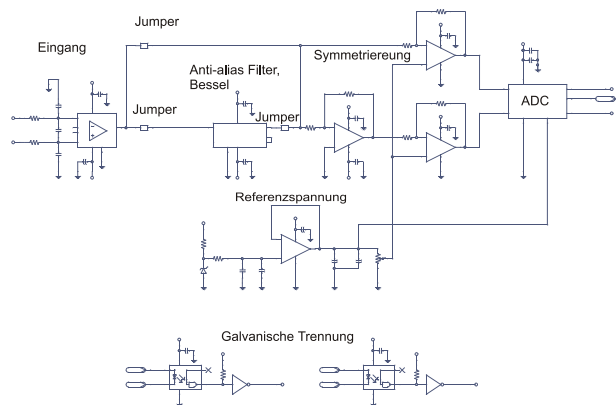


Abbildung 6: Grundschiung für ein LOTEM-AD Modul.

3.4 Timing Modul

Um auch bei höheren Abtastraten eine möglichst genaue Zeitbasis zu schaffen, ist vorgesehen, den Taktgenerator für den DSP, einen voltage controlled crystal oscillator (VCXO) in einer Hardware Phase-Locked-Loop (PLL) mit einem GPS-Zeitempfänger zu verknüpfen. Die Grundschaltung einer solchen PLL ist auf Abbildung 7 dargestellt. Die Takte von GPS und VCXO werden einem Phasendetektor zugeführt, der eine zur Phasenabweichung proportionale Spannung U_d erzeugt. Driftet der VCXO, so ändert sich die Phasenlage und somit auch U_d . Die Phaseninformation wird gefiltert und auf den Regeleingang des VCXO zurückgeführt, wodurch sich dessen Frequenz ändert und die Drift rückgängig gemacht wird.

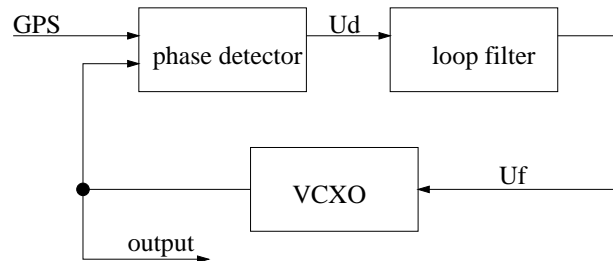


Abbildung 7: PLL mit VCXO und GPS.

Im Gegensatz zu der bisher üblichen Technik, den internen Takt per Software mit einem GPS Zeitempfänger abzugleichen, wird bei dieser Technik der Taktgenerator selber ständig nachge-regelt. Dadurch lässt sich eine höhere Genauigkeit erreichen.

Eine Schwierigkeit bei der Realisierung der PLL entsteht durch den großen Frequenzunterschied zwischen den beiden beteiligten Signalen. Das GPS liefert einen Puls pro Sekunde (PPS), und der VCXO oszilliert mit ca. 40 MHz. Zusätzlich zeigt das GPS zwar eine exzellente Langzeitstabilität, aber das PPS-Signal ist nur innerhalb einer Standardabweichung von $\sigma = \pm 50 ns$ bekannt. In diese Standardabweichung fallen aber schon zwei Perioden des VCXO.

Eine Lösung zum Aufbau einer solchen PLL zeigt Shera (1998). Die Phasendetektion wird dabei digital auf einer Zwischenfrequenz durchgeführt. Abbildung 8 zeigt das Prinzip. In der obersten Zeile ist die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreten eines PPS-Signals angedeutet. Ein GPS-Puls wird mit $\sigma = \pm 50 ns$ in der Mitte auftreten. Der digitale Phasendetektor misst die Zeit

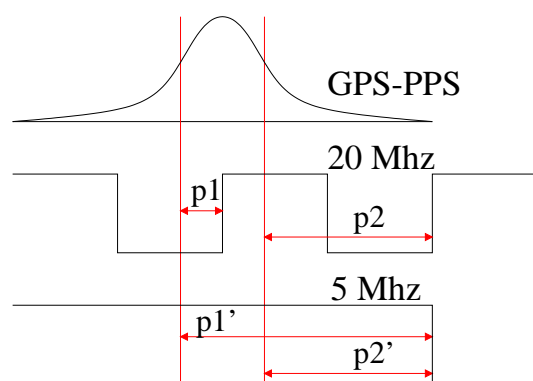


Abbildung 8: Prinzip der Phasendetek-tion zwischen GPS-PPS und VCXO Fre-quenzen von 20 Mhz bzw 5 Mhz..

zwischen dem Auftreten des Pulses und der nächsten steigenden Flanke der 20 Mhz Frequenz. Tritt ein Puls bei der ersten roten Linie auf, so ist die Phasen-verschiebung p_1 . Tritt bei einer Wiederholung der Phasenbestimmung ein zweiter Puls bei der zweiten roten Linie auf, so ist die Phasenverschiebung p_2 . Der Mittelwert von p_1 und p_2 ist aber nicht die korrekte Phasenverschiebung. Ganz anders sieht es bei einem 5 Mhz Signal (unterste Zeile) aus. Dieses Signal wird durch Teilung aus dem 20 Mhz Signal gewonnen und hat daher eine feste Phasenlage zum 20 Mhz Signal. Betrachtet man hier die beiden Bei-spielpulse, so werden die Phasenverschiebungen p'_1 und p'_2 gemessen. Ihr Mittelwert gibt die korrekte Phasenlage wieder. Eine ausführlichere Diskussion findet sich bei Helwig (2001).

3.5 Power Modul

Das Power Modul dient der Spannungsversorgung aller Baugruppen. Bei seinem Aufbau muss insbesondere bei den Spannungen für den Betrieb der AD-Module besondere Sorgfalt angewandt werden. Für diesen Teil schlage ich daher eine Versorgung mit separaten Akkus für jedes AD-Modul vor. Die Spannungen für die anderen Module können über DC-DC Wandler aus einer 12 V Quelle generiert werden. Wegen des starken Rauschens der DC-DC Wandler muss dieser Teil des Power-Moduls aber unbedingt separat geschirmt und räumlich von den anderen Baugruppen getrennt werden.

Danksagung und Aufruf

Ich bedanke mich bei Erich Steveling, Martin Leven und Rainer Bergers die mit Ihren Diskussionsbeiträgen weitergeholfen haben.

Durch den modularen Aufbau soll bewusst die Möglichkeit geschaffen werden, den Empfänger an andere Messaufgaben anzupassen. Es ist Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung möglichst offen zu gestalten. Alle interessierten Entwickler sind herzlich zur Diskussion und Mitarbeit aufgefordert.

Literaturangaben

Helwig, S. L., 2000, VIBROTEM: Doktorarbeit, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie.

Helwig, S. L., 2001, Timing and Synchronisation of Geophysical Measurements, Institut Teknologi Bandung & Universität der Bundeswehr München, Proceedings of the Indonesian-German conference on Instrumentation, Measurements and Communication for the future, Bandung, 68–73.

Hördt, A., Andrieux, P., Neubauer, F. M., Rüter, H., und Vozoff, K., 2000, A first attempt at monitoring underground gas storage by means of time-lapse multichannel transient electromagnetics: Geophys. Prospect., **48**, 489–509.

Scholl, C., 2001, Die Periodizität von Sendesignalen bei Long-Offset Transient Electromagnetics: Diplomarbeit, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie.

Shera, B., 6 1998, A GPS-based frequency standard: QST, pages 37–43.

Strack, K. M., 1992, Exploration with deep transient electromagnetics:, Methods in Geochemistry and Geophysics, Bd. 30 Elsevier, Amsterdam.