

Stand der RAP-Geräteentwicklung

Erich Steveling und Martin Leven, Göttingen

1 Einleitung

Das RAP-System (RAM-Apparatur) besteht aus einem Datenlogger zur Aufzeichnung sehr niederfrequenter elektrischer Signale unter Geländebedingungen, Tellurikverstärkern, Tiefpaßfiltern, einer DCF-Uhr und einem Ausleseinterface zur Datenübertragung in einen PC. Über einen RAP-Prototyp war von den Autoren während des Kolloquiums in Borkheide berichtet worden. Inzwischen wurde das System verbessert und erweitert, und mehrere Exemplare sind im Geländeeinsatz gewesen. Über die Erweiterungen soll hier berichtet werden.

2 Datenlogger und SRAM-Speicher

Unter dem Datenlogger im engeren Sinne soll hier die geschlossene 19"-Einschubkassette bestehend aus Tastatur, Display und 7 Einschubkarten verstanden werden. Die Einschubkarten haben folgende Aufgaben und Bezeichnungen:

| | |
|---|--------|
| Mikrorechner | RAPCPU |
| Uhrenkarte | RAPUHR |
| Controller für Tastatur und Display | RAPLCD |
| 16 bit A/D-Wandler für 8 Datenkanäle | RAPAD1 |
| Zwischenspeicher und Ansteuerung für 16 bit ADC | RAPAD2 |
| 12 bit A/D-Wandler für Kontrollfunktionen | RAPSER |
| Spannungswandler für die Stromversorgung | RAPPOW |

Auf der RAPCPU-Karte ist der einfache Z84C00-Prozessor des Prototyps durch einen "Intelligent Peripheral Controller" Z84C1310VEC ersetzt worden. Dieser IPC enthält neben der Z80 CPU noch 2 SIOs (Serial I/O Logic Unit), 4 CTCs (Counter/Timer Logic Unit), CGT (Clock Generator/Controller) und WDT (Watch Dog Timer).

Mit Hilfe der SIO ist einerseits der Anschluß einer externen DCF-Uhr und andererseits die serielle Datenübertragung in einen PC über eine serielle Schnittstelle realisiert worden. Die CTCs werden teilweise als Interruptcontroller und teilweise zur Messung der Uhrenabweichung zwischen interner und externer Referenzuhr (z.B. DCF) benutzt. Der WDT überwacht den Ablauf der Mikrorechnerprogramme. Ein von der WDT erkannter Fehler wird protokolliert.

Der Spannungswandler RAPPOW erzeugt aus einer unregelmäßigen 12V-Akuspannung geregelte $\pm 5V$ und zweimal $\pm 12V$. Die interne Grundlast des Datenloggers beträgt ca. 1W, die externe am Akku bei dieser Grundlast ca. 1,9W. Externe Geräte, z.B. Tellurikverstärker, Tiefpaßfilter und Magnetometer, können mit den Ausgangsspannungen des Wandlers versorgt werden. Die zusätzliche Belastung der $\pm 12V$ darf maximal $\pm 100mA$ betragen. Diese zusätzliche Belastung um 2,4W sekundär führt zu einer Gesamtbelastung des Akkus von ca. 4,8W primär. Unter Geländebedingungen getestet worden ist bisher die Versorgung von Tellurikverstärkern und von EDA- Fluxgatemagnetometern. Da die internen DC/DC-Wandler der EDA-Magnetometer bei dieser Anordnung überflüssig geworden sind, konnte die Gesamtstromaufnahme des Systems deutlich verbessert werden.

Die Bedienung des Datenloggers erfolgt über eine HEX-Tastatur und ein 16-zeiliges LC-Display. Sie wird erleichtert durch eine Menüführung mit Baumstruktur. Als Beispiel für ein Menü ist in Abb.1 das Hauptmenü wiedergegeben.

```

|==== MAIN-MENU ====|
| Sub Menus:         |
| CLOCK              < >|
| START/STOP        < >|
| PARAMETER         < >|
| DATATRANSFER     < >|
| TESTS             < >|
|-----|
| 12.07.94 16:35:28  |
| *** NO RECORDING ***|
| BC:00000 RAMC:000000|
| 1 Bx 8000|2 By 8000 |
| 3 Bz 8000|4 Ex 8000 |
| 5 Ey 8000|  XXX8000 |
|           XXX8000|  XXX8000|
| B/V 12.5|T/K 293.1 |

```

Abb.1: RAP-Hauptmenü als Beispiel einer LCD-Anzeige

Das Hauptmenü füllt lediglich die obere Hälfte des Displays. Durch Verschieben des Cursors in die entsprechende Zeile und Drücken der ENTER-Taste können die einzelnen Untermenüs erreicht werden.

In der unteren Displayhälfte werden Datum und Uhrzeit, der Status der momentanen RAP-Aktivität, Anzahl der aufgezeichneten Blöcke und Bytes, Informationen über die 8 Datenkanäle, Spannung des externen Akkus und die interne Gerätetemperatur in Kelvin angezeigt.

Im SRAM-Speicher werden die aufgezeichneten Daten abgelegt. Er ist als geschlossene Einschubkassette ausgelegt, wird zum schnellen (parallelen) Auslesen der Daten aus dem System herausgezogen und über ein Interface an einen PC angeschlossen. Durch Erweiterung um eine "Huckepack-Platine" konnte der Speicher von 2MByte auf maximal 8MByte erweitert werden. Die Speicheraufrüstung kann in Stufen von 512KByte erfolgen. Speichergröße und SRAM-Speichernummer werden jetzt automatisch vom System erkannt. Die Spannung der internen Lithium-Pufferbatterie, die den Datenerhalt sicherstellt, kann abgelesen werden und wird im Headerblock gespeichert.

Es ist auch möglich, den SRAM-Speicher im RAP-System zu belassen und dann die Daten über die serielle Schnittstelle mit 9600 Baud (also relativ langsam!) in einen PC einzulesen. Das neue C-Programm RAMTRA kann die Daten wahlweise parallel oder seriell übertragen.

Durch die Aufzeichnung einer Prüfsumme für jeden Datenblock konnte die Sicherheit des Datentransfers vom SRAM-Speicher zum PC deutlich verbessert werden. Falls die nach dem Auslesen berechnete Prüfsumme nicht mit der ursprünglichen übereinstimmt, wird der Auslesevorgang des fehlerhaften Blocks (falls nötig mehrfach) wiederholt.

Technische Daten RAP und SRAM-Speicher:

Anzahl Kanäle: 8x analog, Bereich $\pm 5V$, zusätzliche Kanäle für Temperatur, Akku-Spannung und SRAM-Batterie

Analog/Digital-Wandler: 8x 16 bit-ADC, $1LSB = 152,59\mu V$

Mikrorechner: Z84C13 Intelligent Peripheral Controller, 32 kByte nichtflüchtiges RAM, 32 kByte EPROM mit RAP-Software

Frequenzbereich: z.Zt. DC - 0.5 Hz

Taktraten: z.Zt. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60 sec

Speicher: max. 8 MByte CMOS-SRAM Wechselspeicher

Registrierdauer: (Beispiele für 8 MByte SRAM)

5,5 Tage für Takt 1s und 8 Kanäle

17,5 Tage für Takt 1s und 5 Kanäle

269 Tage für Takt 30s und 5 Kanäle

Uhr: TCXO-Ansteuerung, ± 1 ppm ($-20^{\circ}C$ bis $+70^{\circ}C$)

Eingabe: HEX-Tastatur mit Doppelfunktion

Anzeige: LC-Display 16x20 Zeichen, Bedienungsführung über Menüs

Interface: Spezial-PC-Adapter zum Auslesen des SRAM-Speichers, zusätzlich langsames Auslesen über RS232-Schnittstelle

Mechanischer Aufbau: Europakarten in spritzwassergeschütztem Gehäuse

Stromversorgung: 12 V Akku, 1.5 - 2.5 W

3 Datenorganisation

Jede Aufzeichnung beginnt mit einem 1024 Byte großen Headerblock. Der Header enthält im ASCII-Format allgemeine Informationen über Art und Umfang der aufgezeichneten Daten. Die Header-Daten werden teilweise in den Parameter-Menüs durch den Benutzer eingegeben und teilweise automatisch vom System eingesetzt.

Das Beispiel in Abb.2 gibt den Block exakt in der abgespeicherten Form wieder. Das Ausleseprogramm RAMTRA legt diese Daten in einem separaten Headerfile (*.r99) ab.

Die obersten 7 Zeilen des Headerblocks sind mehr oder weniger selbsterklärend. Vom Benutzer über spezielle Parameter-Menüs frei gewählt worden sind ein Kurzname und eine Nummer des Registrierorts, die Taktrate der Aufzeichnung und die Anzahl der Kanäle. In Zeile 7 werden die EPROM-Version der Ablaufsteuerung und die Prüfsumme des Headers gespeichert.

In den folgenden 9 Zeilen stehen vom Benutzer eingegebene Informationen über die maximal 8 Aufzeichnungskanäle. Die Spalten 1 bis 8 haben folgende Bedeutungen: Kanalnummer, Kanalbezeichnung, Kurzname des angeschlossenen Sensors, Mantisse des Skalenfaktors, Exponent des Skalenfaktors, Verstärkungsfaktor, Filtereinstellung, Länge der Tellurikstrecken.

Falls Kanäle nicht benutzt werden, sollten sie durch ein Leerzeichen anstelle der Kanalnummer markiert werden. Die Skalenfaktoren von Magnetometern sollten in $[nT/mV]$ angegeben werden. Tellurikkanäle enthalten nur Eintragungen in den Spalten für Verstärkungsfaktor, Filter und Tellurikstrecke. Die Skalenfaktoren können dann später aus diesen Angaben berechnet werden.

Den Zeilen mit Kanalinformationen folgen 3 Zeilen mit Zeitangaben. Die Startzeit kann vom Benutzer bezüglich Datum, Stunde und Minute vorgewählt werden. Die Aufzeichnung wird gestoppt, nachdem der Benutzer den entsprechenden Stoppbefehl über das Menü ausgelöst hat und die nächste volle Minute erreicht wird (genauer: volle Minute minus Taktrate).

Hinter den Start- und Stoppzeiten stehen noch Zeitabweichungen der internen Uhr zur Start- bzw. Stoppzeit. Diese Eintragungen erfolgen (automatisch) nur dann, wenn über die serielle Schnittstelle eine externe Referenzuhr (siehe Kapitel DCF-Uhr) angeschlossen war.

In der dritten Zeile werden die Anzahl der während der Aufzeichnung erkannten Fehler und die Uhrzeit des erstmaligen Auftreten eines Fehlers protokolliert. Ausgelöst wird die Fehlererkennung durch den oben beschriebenen Watch Dog Timer (WDT). Die Fehlermeldung bedeutet in den weitaus überwiegenden Fällen lediglich eine Warnung, meistens sind keine Auswirkungen auf die Registrierung erkennbar!

Die 3 letzten Blockzeilen enthalten die Anzahl der aufgezeichneten Blöcke (dezimal) sowie die Anzahl der Bytes (hexadezimal) und die Blockende-Markierung @@@@.

Die von den ADCs gewandelten Daten werden binär mit 2 Bytes pro Kanal gespeichert. Ein Datensatz umfaßt die gleichzeitig gewandelten Kanalwerte eines bestimmten Zeitpunktes. 60 Datensätze werden zu einem Datenblock zusammengefaßt. Jeder Datenblock beginnt mit einem 48 Byte langen Blockheader (ASCII-String). Der String enthält Blocknummer, Fehlerflag, Prüfsumme, Datum, Uhrzeit, Batteriespannung und Temperatur.

```
RAP-No.:      00003
Site (Name, No.):      GTT 00001
SRAM Store (No., kB, V): 00003 12*512 3.11
Sequ.Clock: 00001 sec.
Channels:12345
Range (mV, Bit):      10000 16
EPROM: V. 2.16 Checksum: 218
```

```
K CMP EQP SFM SFE AMP F/s TEL/m
1 Bx F951 100 -3 00001 240 000.00
2 By F951 100 -3 00001 240 000.00
3 Bz F951 100 -3 00001 240 000.00
4 Ex TA03 00001 000 200 120 93.50
5 Ey TA04 00001 000 200 120 112.00
XXX 0000 00001 000 00001 120 000.00
XXX 0000 00001 000 00001 120 000.00
XXX 0000 00001 000 00001 120 000.00
```

```
Start Time: 20.07.94 06:38:00   Time Deviation: 20.07.94 06:36:43   +000 ms
Stop Time: 20.07.94 15:29:59   Time Deviation: 20.07.94 15:29:59   -007 ms
001 Errors: 20.07.94 11:16:34
Last Block Number:      00532
End of Record HEX:      0005 4750
```

@@@@@@

Abb.2: Headerblock einer Datenaufzeichnung (Beispiel)

Die Daten (digitalisierte Zeitreihen) werden blockweise strukturiert im SRAM gespeichert. Jeder Datenblock beginnt mit einem Datenblockheader, jeder Datenblock enthält 60 Kanalsätze, wobei ein Kanalsatz aus den gleichzeitig digitalisierten Kanälen (bei MT z.B. 5) besteht. Die 16 Bits jedes Kanals benötigen 2 Byte SRAM-Speicher, und der Datenblockheader ist 48 Bytes lang, so daß für 5 Kanäle ein Datenblock $2 * 5 * 60 + 48 = 648$ Bytes umfaßt.

Das Datentransferprogramm liest die Daten blockweise aus dem SRAM-Speicher und schreibt sie aufgeteilt in mehrere ASCII-Files auf die Festplatte eines PCs. Jedes dieser Files enthält zusätzlich zu den Kanalsätzen am Anfang den Headerblock (vgl. Abb.2). Der Anfang der dem Headerblock folgenden Informationen ist in Abb.3 wiedergegeben.

Zeile 1 enthält eine Angabe über die Nummern der im File enthaltenen Blöcke. Es folgt eine Zeile mit der HEX-Adresse für den Blockanfang im SRAM-Speicher. In der 3. Zeile stehen der Datenblockheader und am Ende eine nach dem Datentransfer erneut ermittelte Prüfsumme.

Jeder Datenblockheader beginnt mit `***`. Daran schließen die Blocknummer (dezimal), ein Fehlerflag, die während der Registrierung berechnete Prüfsumme, Datum, Uhrzeit, Spannung [V] des externen Akkus und interne Gerätetemperatur [K] an.

Dem Datenblockheader folgen 60 Zeilen mit je einem Kanalsatz im HEX-Format. Jeder Kanal ist in dieser Darstellung 4 HEX-Zeichen lang. Die Spannungen am Analog/Digital-Wandler sind (vereinfacht) wie folgt den HEX-Zahlen zugeordnet:

$-5V \Leftrightarrow 0000$ $\pm 0V \Leftrightarrow 8000$ $+5V \Leftrightarrow FFFF$

```
Bereich in dieser Datei:      1 -   150
000688
*** 00001  0 111 20.07.94 06:38:00 13.9V 297.5K Prüfsumme: 111
72f38c7c81e77b42724b
72f38c7d81e77b3f7247
72f38c7e81e77b3b7245
72f28c7e81e77b377241
72f28c7f81e77b34723e
72f28c8081e77b30723b
72f28c8081e77b2c7238
72f28c8181e77b287236
72f28c8181e67b247233
72f28c8281e67b207231
```

Abb.3: Anfang eines Datenfiles (Blockheader weggelassen)

4 Tellurikverstärker und Tiefpaßfilter

Die Tellurikverstärker wurden völlig neu entwickelt. Besonders hervorzuheben sind aufwendige Schutzmaßnahmen am Eingang vor Überspannungen (z.B. bei Gewittern), ein besonders hoher Eingangswiderstand, Bessel-Tiefpaßfilter 7. Ordnung und die Vermeidung von Beeinträchtigungen der Verstärkerdaten infolge von Kontaktproblemen bei den Umschaltern für Filterperiode und Verstärkung.

Technische Daten Tellurikverstärker:

Eingang: Differenzverstärker (integrierter Instrumentenverstärker), Eingangswiderstand typisch $10G\Omega$, dreifacher Überspannungsschutz, Auslösen von Schmelzsicherungen bei Überspannungen $> 90V$, Eingänge über 3 Telefonbuchsen (2 für Elektroden, 1 für Massehörung als Bezugsmasse)

Verstärkungsfaktoren: 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, über Analogmultiplexer einstellbar

Kompensation: Standardbereich $\pm 50mV$, intern umsteckbar auf $\pm 100mV$ oder $\pm 200mV$, 10-Gang Wendepotentiometer

Tiefpaßfilter: 7-poliges Besselfilter ($-140dB/Dekade$), umschaltbar 10s, 120s (über hermetisch dichte Relais)

Spannungsversorgung: $\pm 12V$, $\pm 18mA$ über VG-Leiste

Ausgänge: Miniatur-Koaxial-Buchse in der VG-Leiste, zusätzlich entkoppelter BNC-Ausgang auf der Frontplatte

Mechanischer Aufbau: silikonbeschichtete Europakarte in geschirmter Aluminium-Einschubkassette für 19"-Aufnahmen

Der Besseltiefpaß des Tellurikverstärkers ist 4-stufig aufgebaut (Index $k = 1, 2, 3, 4$). Die komplexe Übertragungsfunktion F_k jeder Stufe k kann wie folgt berechnet werden:

$$\operatorname{Re}(F_k) = \frac{A_k}{A_k^2 + B_k^2} \quad \operatorname{Im}(F_k) = \frac{-B_k}{A_k^2 + B_k^2}$$

mit den Abkürzungen

$$A_k = 1 - \omega^2 T_{k1} T_{k2} \quad B_k = \omega(T_{k2} + T_{k3}) \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Die T_{kl} sind Abkürzungen der Filter-RC-Kombinationen. Für die Abschneideperiode 10s können die Werte Tabelle 1 entnommen werden:

| | l=1 | l=2 | l=3 |
|-----|--------|--------|--------|
| k=1 | 0.5847 | 1.4706 | 0.2711 |
| k=2 | 0.8033 | 0.9494 | 0.3722 |
| k=3 | 1.1756 | 0.5130 | 0.1764 |
| k=4 | 0.0000 | 0.9449 | 0.0000 |

Tabelle 1: Werte der RC-Kombinationen T_{kl} für Tiefpaß 10s

Die vollständige komplexe Filterübertragungsfunktion F ist das Produkt der 4 Filterstufen:

$$F = \prod_{k=1}^4 \left(\frac{1}{A_k + iB_k} \right)$$

Für die Abschneideperiode 10s können einzelne Stützwerte der Übertragungsfunktion aus Tabelle 2 entnommen werden. Die gleiche Tabelle gilt auch für die Abschneideperiode 120s. Die Periodenwerte der ersten Spalte müssen in diesem Fall nur mit 12 multipliziert werden.

| Periode[s] | Realteil | Imaginärteil | Amplitude | Phase |
|------------|-------------|--------------|------------|--------|
| 1.0 | -.55507E-05 | .39431E-05 | .68087E-05 | -575.4 |
| 1.5 | -.11278E-03 | .15007E-04 | .11377E-03 | -547.6 |
| 2.0 | -.76948E-03 | -.29326E-03 | .82347E-03 | -519.1 |
| 3.0 | -.20302E-02 | -.12229E-01 | .12396E-01 | -459.4 |
| 4.0 | .57366E-01 | -.41052E-01 | .70541E-01 | -395.6 |
| 5.0 | .17832E+00 | .90702E-01 | .20006E+00 | -333.0 |
| 6.0 | .67042E-01 | .34403E+00 | .35051E+00 | -281.0 |
| 7.0 | -.22790E+00 | .41901E+00 | .47698E+00 | -241.5 |
| 8.0 | -.49062E+00 | .29914E+00 | .57463E+00 | -211.4 |
| 9.0 | -.64323E+00 | .89280E-01 | .64939E+00 | -187.9 |
| 10.0 | -.69444E+00 | -.13354E+00 | .70716E+00 | -169.1 |
| 12.0 | -.61196E+00 | -.49680E+00 | .78823E+00 | -140.9 |
| 15.0 | -.33242E+00 | -.79299E+00 | .85985E+00 | -112.7 |
| 20.0 | .87178E-01 | -.91492E+00 | .91906E+00 | -84.6 |
| 30.0 | .53351E+00 | -.80212E+00 | .96334E+00 | -56.4 |
| 50.0 | .81969E+00 | -.54921E+00 | .98667E+00 | -33.8 |
| 80.0 | .92784E+00 | -.35875E+00 | .99478E+00 | -21.1 |
| 100.0 | .95356E+00 | -.28992E+00 | .99666E+00 | -16.9 |
| 150.0 | .97924E+00 | -.19521E+00 | .99851E+00 | -11.3 |
| 200.0 | .98830E+00 | -.14692E+00 | .99916E+00 | -8.5 |
| 300.0 | .99479E+00 | -.98191E-01 | .99963E+00 | -5.6 |
| 500.0 | .99812E+00 | -.58989E-01 | .99987E+00 | -3.4 |
| 800.0 | .99927E+00 | -.36884E-01 | .99995E+00 | -2.1 |
| 1000.0 | .99953E+00 | -.29510E-01 | .99997E+00 | -1.7 |

Tabelle 2: Filterfunktion 7-poliger Bessel-Tiefpass mit der Abschneideperiode 10s

Außer den Tellurikverstärkern wurden als separate Einschübe Tiefpaßfilter für Magnetometer (z.B. EDA-Fluxgatemagnetometer) entwickelt. Bezüglich der Filtereigenschaften sind diese Einschübe identisch mit den Tellurikverstärkern.

Technische Daten Tiefpaßfilter:

Eingang: Eingangswiderstand $10k\Omega$, Eingang über BNC-Buchse auf der Frontplatte

Verstärkungsfaktor: 1

Tiefpaßfilter: 7-poliges Besselfilter (-140dB/Dekade), umschaltbar 10s, 120s (über hermetisch dichte Relais), identisch mit Filter des Tellurikverstärkers

Spannungsversorgung: $\pm 12V$, $\pm 6mA$ über VG-Leiste

Ausgang: Miniatur-Koaxial-Buchse in der VG-Leiste

Mechanischer Aufbau: Europakarte in geschirmter Aluminium-Einschubkassette für 19"-Aufnahmen

5 DCF-Uhr

Die DCF-Uhr ist ein eigenständiges Gerät mit einem kommerziellen DCF-Empfangseinschub, Antenne, internem Akku und eingebautem Ladegerät für den Akku.

Die DCF-Uhr zeichnet sich gegenüber einfacheren Systemen dadurch aus, daß sie auch das dem DCF-Sendesignal überlagerte Phasenrauschen mit einer pseudozufälligen Bitfolge (PZF) auswertet und damit eine höhere absolute Zeitgenauigkeit erreicht.

Über eine serielle Schnittstelle gibt die Uhr jede Sekunde folgendes 32 bit langes Zeittelegramm aus:

```
StxD:15.08.91;T:5;U:14.15.41;##S!Etx
```

Stx = Start of Text (02h)

Stx = End of Text (03h)

keine PZF-Synchronisation

* Freilauf auf Quarzbasis

S Sommerzeit

! Ankündigung vor der Zeitumschaltung

Technische Daten DCF-Uhr

Empfänger: Meinberg PZF 535, alphanumerisches LED-Display für Datum, Uhrzeit und Zusatzinformationen

Antenne: aktive Ferritantenne als 19"-Einschubkassette

Serielle Schnittstelle: RS232C, 9600 Baud, 7 bit, Even Parity, 2 Stop

Ausgangsimpuls: jede Sekunde, 5V-Pegel, 200ms, Abweichung der Sekundenimpulse zweier Systeme, die höchstens 80km auseinander liegen, typ. 10 μ s

Interner Akku: 6V, 4Ah Blei-Gel-Akkumulator ,ausreichend für mehrstündigen (typ. 12h) Dauerbetrieb

Gleichspannungsversorgung: externer 12V-Akkumulator (10V - 15V), Verpolungsschutz

Wechselspannungsversorgung: 230V Netzspannung

Ladegerät: intern, geregelt, sowohl über Gleich- als auch über Wechselspannungsversorgung

Tiefentladeschutz: Abtrennung des internen Akkumulators bei 5,5V

LC-Display: 3 1/2 -stellig umschaltbar für Ladestrom, Stromaufnahme der DCF-Uhr, Spannung des internen Akkumulators

Gehäuse: spritzwassergeschütztes 19"-Gehäuse (halbe Breite), mit verstellbarem Tragbügel