

# **Anforderungen an Energiespeicher in mobilen Stromversorgungen**

unter Berücksichtigung aktueller Funkverfahren

René Groß,

BaSyTec GmbH, Karlstr. 14, 89561 Dischingen

Tel.: +49-7327/921 614, Fax: +49-7327/921 621

rg@BaSyTec.de

## **Einleitung**

Wenn ein Gerät tragbar ausgelegt ist, kommt oft der Wunsch, es ohne Anschluß an die Steckdose zu betreiben. Das kann entweder dadurch bedingt sein, dass am Einsatzort kein Stromanschluß zur Verfügung steht, oder praktische Gründe haben, man denke zum Beispiel an einen Akkuschauber, eine Uhr oder die Fernsteuerung eines Fernsehgerätes.

Verschiedene Anwendungen stellen ihre spezifischen Anforderungen an die mobile Stromversorgung. Bei kleinerem Leistungsbedarf werden in der Regel elektrochemische Energiespeicher wie Batterien, Akkumulatoren oder auch Brennstoffzellen und Superkondensatoren eingesetzt.

Viele mobile Systeme kommunizieren heute mit anderen Systemen, sei es über eine Infrarot- oder eine Funkschnittstelle. Diese Kommunikationsschnittstellen, egal, ob sie ein zusätzliches Feature oder die Hauptfunktion eines Gerätes darstellen, stellen für die Stromversorgung des Systems eine besondere Aufgabe dar. Dieser Artikel soll die Besonderheiten moderner Kommunikationsverfahren hinsichtlich der Stromversorgung beleuchten und die Wechselwirkungen mit elektrochemischen Energiespeichern beschreiben. Zusätzlich wird noch auf die Auswahl geeigneter Speichersysteme eingegangen.

## **Übersicht über aktuelle und zukünftige Funkverfahren**

Heute gibt es eine Vielzahl verschiedener drahtloser Kommunikationsschnittstellen, die sich hinsichtlich Datenrate, Reichweite, Einsatzgebiet und Komplexität unterscheiden. Da die grundsätzlichen Anforderungen an eine Funkschnittstelle jedoch immer die selben (mit unterschiedlicher Gewichtung) sind, unterscheiden sich die verschiedenen Standards weniger als zu vermuten wäre.

GSM ist der in Europa zur Zeit aktuelle Mobilfunkstandard. Nahezu alle Handys arbeiten mit GSM, allerdings in verschiedenen Frequenzbändern. Viele Geräte lassen sich in mehreren Frequenzbändern einsetzen. In den USA wird für Handys meist das USDC (US Digital Cellular System) eingesetzt, in Japan das PDS (Personal Digital Cellular System).

Für schnurlose Festnetztelefone wird in Europa in der Regel DECT eingesetzt, in Japan PHS (Personal Handyphone System), während in USA noch weitgehend analoge Geräte in Verwendung sind (alle anderen bisher erwähnten Standards arbeiten mit digitaler Übertragung).

Für die kurzreichweitige Kommunikation verschiedenster Geräte im Haushalt soll in Zukunft Bluetooth eingesetzt werden. Speziell für die drahtlose Vernetzung von Computern wird seit kurzem auch Wireless-LAN nach IEEE802.11 (1Mbit) oder seit neuestem auch IEEE802.11b (10Mbit) eingesetzt.

Auf der dichtbesiedelten Erde unserer Zeit ist eine der wichtigsten Anforderungen an ein Funkverfahren, dass möglichst viele Teilnehmer des gleichen oder anderer Netze sich nicht gegenseitig stören.

Das wichtigste Verfahren, Störungen zu vermeiden, ist die räumliche Begrenzung des ausgesandten Signals. Bei Infrarotübertragung beschränkt sich die Reichweite (und damit verbunden auch die Störwirkung) eines Senders auf wenige Meter, maximal bis zur nächsten Wand. Bluetooth-Geräte haben eine Reichweite von bis zu 10m, DECT und Wireless-LAN erreichen wenige 100 Meter. GSM und das neue UMTS maximal 35km (auch durch Signallaufzeiten begrenzt), während das alte, analoge C-Mobilfunknetz unter günstigen Bedingungen durchaus bis zu 100 Kilometer überbrücken konnte. Ein weiterer positiver Effekt dieser Begrenzung ist, dass die Sendeleistung bei geringerer Reichweite gedrosselt werden kann, so dass der Leistungsverbrauch der Geräte ab- und damit die Akkulaufzeit zunimmt. In allen modernen Mobilfunknetzen ist spezifiziert, dass die Teilnehmer nur mit der minimal notwendigen Sendeleistung arbeiten. Dadurch lassen sich die Funkzellen in Ballungsgebieten in sehr geringen Abständen, oft weniger als ein Kilometer, einrichten.

Die wohl bekannteste Trennung verschiedener Systeme bzw. Teilnehmer kann durch die Verwendung unterschiedlicher Frequenzbänder geschehen (FDM, Frequency Division Multiplexing). Allerdings ist zumindest in den Industrienationen das zur Verfügung stehende Frequenzspektrum nahezu voll, so dass neue Standards in den oberen Frequenzbändern (1-5 Gigahertz) angesiedelt werden müssen, die bisher aufgrund technischer Probleme der Nutzung vorenthalten waren. Die Nutzung der Frequenzbänder muß aufgrund der hohen Nachfrage von staatlicher Seite reglementiert werden, anders wäre ein weitgehend störungsfreier Betrieb nicht zu gewährleisten. Die „Umwidmung“ bisher für „veraltete“ Verfahren genutzter Frequenzbänder ist sehr schwierig, da in der Regel heftiger Protest der bisherigen Nutzer einsetzt.

Die Bandbreite und damit der Kanalabstand verschiedener Sender ist fast direkt von der Nutzdatenrate abhängig: je höher die Nutzdatenrate, desto höher die hierfür benötigte Bandbreite und damit der Kanalabstand.

Eine relativ junge Möglichkeit, verschiedene Signale zu trennen, ist die Verwendung von CDM-Verfahren (Code Division Multiplexing). Die Nutzdaten werden hierbei mit einer bestimmten Codesequenz in ihrer Bandbreite gespreizt. Der Empfänger sucht das breitbandige Eingangssignal nach dieser Codesequenz ab und kann damit die Nutzdaten gewinnen. Mehrere Sender können bei diesem Verfahren auf der selben Frequenz senden, lediglich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nimmt mit der Zahl der Sender ab.

Ein Vorteil von CDM-Verfahren ist, dass der Empfänger den bei der Aufspreizung verwendeten Code kennen muß, das Verfahren also bereits von vorneherein verschlüsselte Übertragung bietet. Bei Verwendung ausreichend langer Codes ist diese Art der Verschlüsselung auch sehr sicher. Ein weiterer Vorteil liegt in der relativen Unempfindlichkeit gegenüber schmalbandigen Störern, da sich die Nutzdaten im gesamten verwendeten Frequenzband befinden. Allerdings ist das Verfahren technisch aufwendig und die notwendige Sendeleistung hängt von der Zahl der Mitnutzer des Frequenzbandes ab, so dass die Funkzellen mit der Zahl der Nutzer wachsen, sie „atmen“. CDM hat sich daher bisher nicht bewährt, wird jedoch in einigen Mobilfunknetzen, unter anderem in den USA, verwendet.

Ein wichtiges Verfahren zur Nutzung derselben Frequenz durch mehrere Teilnehmer ist das Zeitmultiplexing (TDM, Time Division Multiplexing). Die Zeitachse ist hierbei in sogenannte Slots eingeteilt, in jedem Slot ist jeweils nur ein Sender aktiv. Die Slots wiederholen sich meist periodisch, müssen aber nicht (z. B. bei Bluetooth und Wireless-LAN). Wird eine höhere Datenrate benötigt, können durch einen Sender auch mehrere Slots einer Periode benutzt werden.

Ein Vorteil des Zeitmultiplexing ist, dass die für den Sender benötigte Leistung linear von der Zahl der genutzten Slots abhängig ist, was sich vorteilhaft auf die Batterielaufzeit auswirkt. Trotzdem können die Geräte zum Erreichen der benötigten Reichweite mit hoher Leistung senden. Allerdings sind zwischen den Slots wegen der Signallaufzeiten und der Latenzzeiten des Senders Pausen notwendig, die die Nutzdatenrate verringern. Die Slots dürfen daher nicht zu kurz werden, als untere Grenze haben sich etwa  $500\mu\text{s}$  erwiesen (auch wenn in der originalen GSM-Spezifikation für die Zukunft noch  $230\mu\text{s}$ -Slots vorgesehen waren). Zur Steigerung der Datenrate nutzen modernere Verfahren (UMTS, Bluetooth) wieder geringfügig längere Slots und fassen mehrere Slots zusammen.

Für den Sender wie die Stromversorgung ist Zeitmultiplexing bei hoher Sendeleistung das härteste Multiplexverfahren, da hier hohe Peakleistungen gefordert werden.

Die wichtigsten Parameter der verschiedenen Verfahren sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 1: Übersicht über aktuelle Funkverfahren

	GSM	GSM 1800	UMTS	CDMA- IS95	PDC	USDC	DECT	PHS	WLAN IEEE 802.11, IEEE 802.11b	Bluetooth
Verbreitung	Europa	Europa	Europa, weltweit	USA, Korea	Japan	USA	Europa	Japan		
Frequenzen [MHz]	890-960,	1710-1855	1900-2400	824-894, 1900	810-956	824-894	1880-1900	1890- 1920	2400-2483, IR	2400-2483
Kanalabstand [kHz]	200	200	5000	1230	25	30	1728	300	5000 (11000)	1000
TDM-Periode [ms]	4.615	4.615	10	20		20	10	5	-	
Slotbreite [µs]	577	577	667	-		6700	416	625	130-4230 (65-2115)	625
Slots/Periode	8	8	15	-		3 (6)	24	8	-	
Multi-Slots	-	-	Ja, 1-14	-		-	0.2, 1, 4, 8, 16	1, 2, 4		1, 3, 5
Nutzdatenrate Daten	9.6/Slot	9.6/Slot	14-1920	1.2-19.2	9.6, 14.4	-	64-768	9.6-128		
Nutzdatenrate Sprache [kBit]	13 (6.5)	13 (6.5)	8-128	8.55		13	25.6	9.6		
Datenrate	270.8	270.8	15-1920	1228		48.6	1152	384	1000 (2000, 16000)	1000
CDM	nein	nein	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Sendeleistung [W]	2 (5,8,20)	0.25-1		0.5 (2,6,3)	0.3, 0.8, 2		<250mW	10mW (80mW)	100mW	1mW (2.5mW, 100mW)
Reichweite	35km	35km					<300m	100m	300m	10m

## Auswirkungen des Zeitmultiplexing auf den Energiespeicher

Das pulsförmige Belastungsprofil ist die wichtigste Auswirkung aktueller Kommunikationsschnittstellen auf die Performance des Energiespeichers. Wie im vorigen Abschnitt ersichtlich, liegen die Pulsdauern zwischen 0.5 und 7ms, die Periodendauern zwischen 5 und 20ms, in verschiedenen Anwendungen kommen die Belastungspulse auch in unregelmäßigen Zeitabständen.

Beim Betrieb des Energiespeichers gibt es zwei Möglichkeiten: Die Applikation wird direkt aus dem Haupt-Speicher versorgt, oder aber die Pulsbelastung wird durch einen Pufferkondensator abgemildert.

### Versorgung mit Pufferkondensator

Bei der Abschätzung der Größe des benötigten Pufferkondensators gilt die folgende Formel:

$$C = \frac{It}{\Delta U} \quad (1)$$

Mit: I Laststrom  
t Pulsdauer  
 $\Delta U$  zulässige Spannungsänderung

Unter Verwendung typischer Eckwerte für ein GSM-System (1A, 500 $\mu$ s, 500mV) ergibt sich eine Kondensatorkapazität von 1mF. Aufgrund der Größe und des Gewichts eines Kondensators dieser Größenordnung dürfte diese Lösung zumindest im Handybereich ausscheiden.

### Versorgung direkt aus der Batterie

Wird der Sender der Funkschnittstelle direkt aus der Batterie versorgt, gibt im wesentlichen drei Fragen, die zu stellen sind:

- 1) Kann die Batterie die benötigte Pulsleistung liefern?
- 2) Wie wird die Entladekapazität von der Pulsbelastung beeinflusst?
- 3) Wie wird die Lebensdauer der Batterie von der Pulsbelastung beeinflusst?

Speziell für Stand-by- und Notfalleanwendungen ergibt sich noch eine weitere Fragestellung:

- 4) Bis zu welchem Alterungszustand kann die Batterie die benötigte Pulsleistung über die benötigte Entladekapazität liefern?

Abgesehen von der Zyklenlebensdauer gelten die folgenden Betrachtungen sowohl für Primär- als auch für Sekundärbatterien (Akkumulatoren), die Betrachtungen über Pulsleistung und Lebensdauer auch für Superkondensatoren und Brennstoffzellen.

### Kann die Batterie die benötigte Pulsleistung liefern?

Die erste Fragestellung kann mit einem Blick ins Datenblatt relativ einfach zu beantworten sein: Ist der benötigte Entladestrom hier spezifiziert, ist die Batterie auch in der Lage, diesen in kurzen Pulsen zu liefern. Doch auch, wenn dies nicht der Fall ist, kann die Batterie für die

gewünschte Applikation noch geeignet sein, wie aus der typischen Entladecharakteristik eines elektrochemischen Energiespeichers zu erkennen ist:

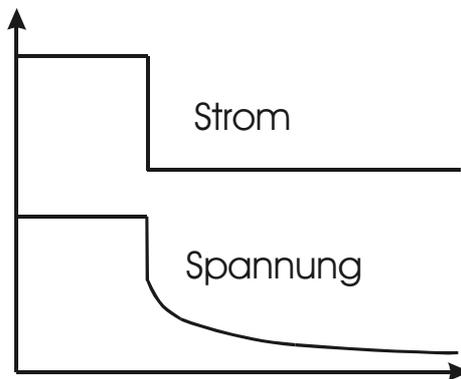


Abbildung1: Spannungsverlauf bei einsetzender Belastung

Nach Anlegen der Belastung kann der Verlauf der Spannungskurve in zwei Abschnitte geteilt werden:

1. Sofortiger Abfall direkt beim Anlegen des Stroms
2. Stetiger Abfall während der Belastung

Der erste, steile Abfall ist direkt mit den rein ohm'schen Widerständen der Batterie und auch der Zuleitungen verbunden. Er ist im allgemeinen ladezustandsabhängig, in der Regel wird er mit sinkendem Ladezustand größer.

Der folgende, stetige Abfall besitzt drei Komponenten, die je nach Batterietyp mehr oder weniger ausgeprägt sind:

- a. Ein exponentieller Abfall, verursacht durch die Doppelschichtkapazität des Energiespeichers (vergleichbar mit einem normalen Kondensator) – Zeitkonstante etwa bis zu einer Sekunde
- b. Ein Abfall proportional zur Wurzel der Zeit, durch Diffusionsvorgänge in der Batterie hervorgerufen – Zeitkonstante bis zu mehreren Stunden
- c. Ein ladezustandsabhängiger Spannungsabfall bei Batterietypen, deren Zellspannung vom Ladezustand abhängig ist

Für Belastungspulse im ms-Bereich sind in der Regel nur 1. und 2.a wesentlich, der durch 2.b und 2.c hervorgerufene Spannungseinbruch tritt bei solch kurzen Zeiten noch nicht auf. Da in den Datenblättern die mögliche Belastung unter Berücksichtigung von 2.a und b. für „lange“ Zeiten (mindestens Sekundenbereich) angegeben ist, ist die mögliche Pulsbelastung unter Umständen höher.

### Wie wird die Entladekapazität von der Pulsbelastung beeinflusst?

Eine messbare Beeinflussung der Entladekapazität durch ein GSM-Belastungsprofil gegenüber einer Gleichstromentladung mit gleichem mittleren Strom konnte bei keiner unserer Messungen festgestellt werden. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, da die pulsförmige Strombelastung weitgehend von der Doppelschichtkapazität der Batterie abgepuffert wird, so dass die energiespeichernden Bereiche die pulsförmige Belastung nicht sehen und daher durch diese nicht beeinflusst werden können.

Bei Batterien mit flacher Entladekurve und hohem Innenwiderstand ist jedoch nicht auszuschließen, dass die Entladeschlussspannung durch den Spannungseinbruch im Belastungspuls etwas früher erreicht wird. Bei diesen könnte jedoch, ohne die Batterie dadurch wesentlich zu schädigen, die Spannung direkt nach der hohen Belastung als Abschaltkriterium verwendet werden, die vom ohm'schen Spannungseinbruch unabhängig ist.

### **Wie wird die Lebensdauer der Batterie von der Pulsbelastung beeinflusst?**

Bei der Durchsicht der Datenblätter von aktuellen Lithium-Ionenbatterien fällt auf, dass der maximal zulässige (Dauer-) Entladestrom nie höher wie halbstündig angegeben wird und auch der Peakstrom diesen Wert nicht übersteigen darf.

Ein hoher Entladestrom kann eine Batterie über verschiedene Mechanismen schädigen:

1. Durch die an den ohm'schen Widerständen entstehende Wärme wird die Batterie so weit erwärmt, dass dadurch eine beschleunigte Alterung verursacht wird
2. Innerhalb der Batterie werden Bereiche hoher Übergangswiderstände so weit erhitzt, dass diese zerstört werden
3. Durch den hohen Entladestrom können die Ausgleichsvorgänge in der Batterie nicht schnell genug ablaufen, die Batterie wird lokal tiefentladen und dadurch geschädigt.

Dass Batterien bei erhöhter Temperatur schneller altern, weil die meisten chemischen Reaktionen beschleunigt ablaufen, ist schon lange bekannt und wird für künstlich beschleunigte Alterungsuntersuchungen verwendet. Inwieweit die Alterung jedoch beschleunigt wird, sind Erfahrungswerte und hängt sehr stark vom jeweiligen Batterietyp ab – bei Bleibatterien, wo sich dieses Verfahren am besten etabliert hat, spricht man von einer etwa doppelt so schnellen Alterung je 10° Temperaturerhöhung.

Bei der Betrachtung der Temperaturerhöhung ist zu beachten, dass die Verlustwärme mit dem Quadrat des Entladestroms steigt – doppelter Strom bedeutet daher vierfache Wärme. Dabei kann bereits eine geringfügige Erhöhung des Entladestroms die Batterie merklich schädigen.

Durch lokale Temperaturüberhöhung innerhalb der Batterie kann z. B. der Übergang zwischen Stromableiter und Aktivmasse so weit geschädigt werden, dass dieser irreversibel zerstört wird. Auch können durch diese lokalen Temperaturüberhöhungen chemische Reaktionen begünstigt werden, die unerwünscht sind, z. B. Elektrolytzersetzung oder Ausbildung von Passivschichten. Dadurch wird die Lebensdauer der Batterie verkürzt.

Vor allem verschiedene Lithium-Ionenbatterien sind sehr empfindlich gegen Tiefentladung, weil die Struktur der Interkalationselektrode zusammenbrechen kann, wenn zu wenig Lithium eingelagert ist. Wird aufgrund des zu hohen Entladestroms ein Bereich der Batterie zu tief entladen, kann dieser danach nicht mehr geladen werden, die Lebensdauer der Batterie sinkt.

### **Wie können elektrochemische Energiespeicher für diese Anwendungen getestet werden?**

Da die Auswirkungen der pulsformigen Belastungsprofile auf die Lebensdauer sowie die Auswirkung des Alterungszustands auf die Performance unter pulsformiger Belastung im Grenzbereich (d. h. möglichst kleine Batterie für die Anwendung) kaum abzuschätzen sind,

muß geprüft werden, ob die Batterie für die Anwendung geeignet ist. Diese Prüfung teilt sich in zwei Abschnitte:

1. Parametertest: In wenigen Entladungen mit charakteristischem Stromprofil wird geprüft, bis zu welcher Entladekapazität die Batterie die notwendigen Leistungsdaten liefert
2. Lebensdauertest: Die Batterie wird so lange wiederholt mit charakteristischem Stromprofil entladen und wieder geladen, bis deren Lebensdauerende bzw. das vorgesehene Ende der Applikation erreicht ist.

Beide Tests müssen natürlich mit einer ausreichenden Zahl von Prüflingen durchgeführt werden, um statistisch belastbare Aussagen zu erhalten.

Es versteht sich von selbst, dass das verwendete Testsystem – neben einer komfortablen Bedienung – in der Lage sein muß, die entsprechenden Pulsprofile zu generieren. Doch auch hier gibt es Unterschiede: Manche Systeme können Pulse nur in einem festen Raster generieren, andere können nur auf vorgefertigte Pulsmuster zurückgreifen, in wieder anderen Systemen müssen die Pulse in speziellen Editoren umständlich editiert werden. Was jedoch im Verborgenen liegt, ist die Genauigkeit der erzeugten Pulse: Bei einer Pulsbreite von nur etwa  $500\mu\text{s}$  entspricht eine Flankensteilheit von  $100\mu\text{s}$  20%, und dies sind 20% der Ladung! Schon  $100\mu\text{s}$  sind für eine „Stromquelle“ (nichts anderes stellt ein Batterietestsystem dar) sehr schnell und nur mit lineargeregelten Systemen zu erreichen.

Wenn auch bei flachen Flanken die Gesamtlänge der Pulse stimmt und die Flanken symmetrisch sind, würde man theoretisch keinen Fehler in der Ladungsbilanz erzeugen. Ausreichend symmetrische Flanken kann man allerdings kaum erwarten, deswegen muß die Zielstellung sein, ein Testsystem mit hinreichend steilen Flanken zu finden, siehe auch Abbildung 2:

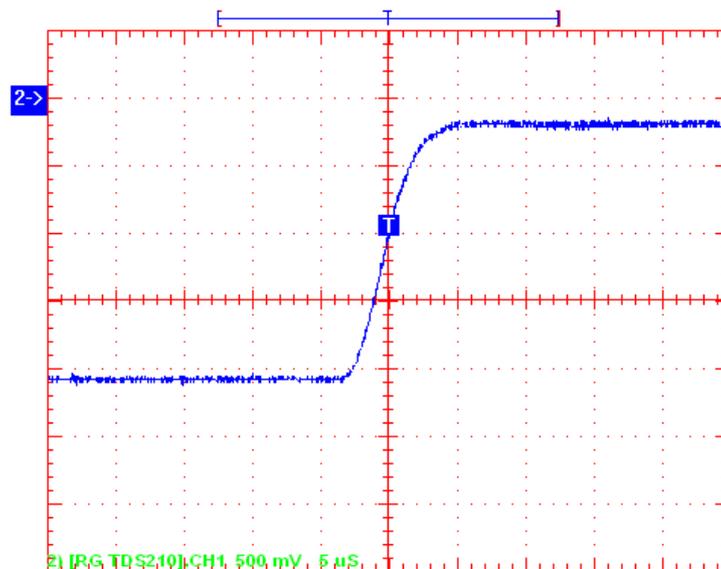


Abbildung 2: Stromverlauf am Ende eines Pulses ( $5\mu\text{s}/\text{div}$ , ca.  $1.2\text{A}/\text{div}$ )

Die Anstiegszeit beträgt hier weniger als  $5\mu\text{s}$ , bei einer Pulslänge von  $500\mu\text{s}$  erhält man daher deutlich weniger als 1% Fehler in der Ladungsbilanz.

Eine andere „Unart“ von Stromquellen stellen Überschwinger dar, siehe Abbildung 3:

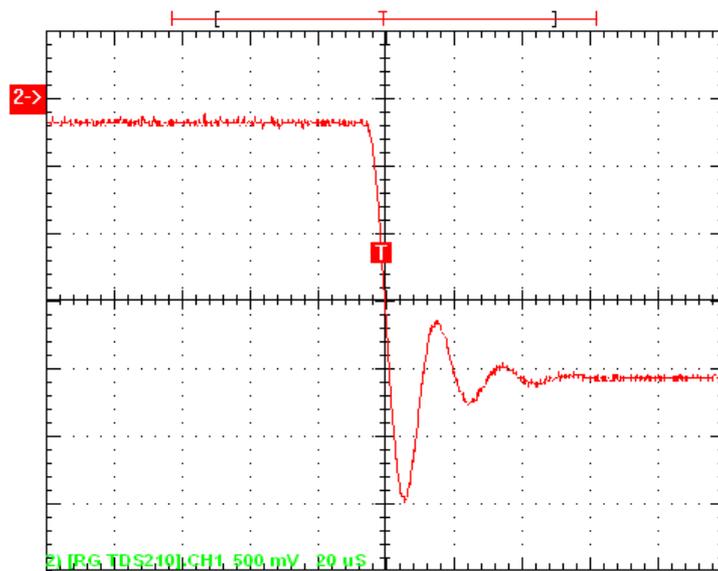


Abbildung 3: Stromverlauf am Ende eines Pulses (20 $\mu$ s/div, ca. 1.2A/div)

Hier wurde die Stromquelle so abgeglichen, dass Überschwinger entstehen. Diese sind zwar hässlich, für die Ladungsbilanz jedoch nicht so schädlich wie zu flache Flanken, da Überschwinger in der Regel mit steileren Flanken verbunden sind und sich die Oszillationen um den Sollwert gegenseitig teilweise kompensieren.

## Zusammenfassung

Fast alle modernen Funkverfahren arbeiten mit Zeitmultiplexing. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die mobile Stromversorgung, da die maximale Stromaufnahme in solchen Systemen deutlich über die mittlere Stromaufnahme hinausgeht. Allein mit einem zusätzlichen Pufferkondensator ist dies kaum zu kompensieren, so dass die Batterie (alternativ Akkumulator, Superkondensator, Brennstoffzelle) die Strompulse liefern muß.

Der Betrieb eines solchen Systems stellt erhöhte Anforderungen an die Batterie. Spätestens, wenn die Peak-Strombelastung über den vom Hersteller spezifizierten Wert hinausgeht, kommt man nicht umhin, selbst Parameter- und Lebensdauertests mit dieser Stromquelle durchzuführen. Insbesondere die Lebensdauer kann durch die Pulsbelastung abnehmen.

Bei der Auswahl eines Batterietestsystems für diese Anwendungen ist darauf zu achten, dass dieses auch im Pulsbetrieb eine hinreichend genaue Ladungsbilanz zu führen vermag. Außer einer hinreichend genauen Zeitmessung sind hierfür hinreichend steile und saubere Flanken der verwendeten Leistungselektronik wesentlich. Selbstverständlich dürfen jedoch auch die anderen Parameter des Systems (Bedienungskomfort, Zuverlässigkeit, Servicefreundlichkeit, Preis) nicht außer Acht gelassen werden.