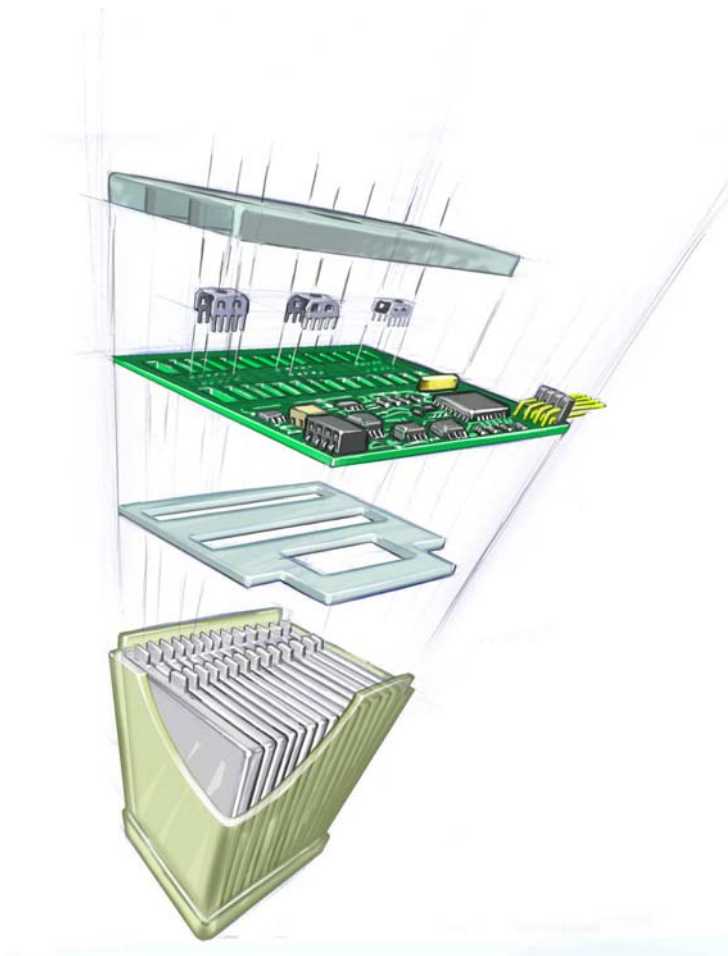


Mai 2003

# Spirit of Bike – Lithium-Polymer Batterien für das IntelliBike Schlussbericht



1	Projektbeschreibung	3
1.1	Spirit of Bike - Comeback des Bieler Innovationsgeistes	3
1.2	Ausgangslage	4
2	Systemüberlegungen	5
3	Technologie	7
3.1	Eigenschaften des Pakets	7
3.2	Lithium Akkumulatoren	8
3.3	Lithium-Ionen Akkumulator	9
3.4	Lithium-Polymer Akkumulator	9
3.5	Lithium-Ionen-Polymer Akkumulator	10
4	Die Spirit of Bike Lithium Ion Polymer Zelle	10
4.1	Der Aufbau des Spirit of Bike Blocks	11
4.1.1	Fertigungsschritte	12
4.1.2	Der Batmaster	17
4.1.3	Software zur CAN-Kommunikation	19
4.2	Probleme	21
4.2.1	Verkleben der Verbindungen	21
5	Telemetrie Überwachung	25
5.1	Einführung	25
5.1.1	Frontpanel des Telemetrieprogramm	26
5.2	Bedienungsanleitung	26
5.2.2	Struktogramm	27
5.2.3	Telemetriesoftware zum RS232-Modul	27
5.2.4	Protokoll Telemetrie	28
6	Messungen	30
6.1.1	Messung einer Einzelzelle	30
6.1.2	Messung eines Batterieblocks	32
6.1.3	Messung eines Intellipacks	34
7	Gefahren	35
8	Kommerzielle Realisation	36
9	Schlussfolgerungen	37
10	Anhang:	38
	Spirit of Bike: Ein Technologieprojekt der HTA Biel:	39
	Technische Spezifikationen	39
	Rennstatistik	42

# 1 Projektbeschreibung

## 1.1 Spirit of Bike - Comeback des Bieler Innovationsgeistes

Aus dem offiziellen Presstext des Projektes „Spirit of Bike“:

„Nach den grossartigen Erfolgen mit dem Solarrenner Spirit of Biel-Bienne 1990 und 1993 und dem Sieg des E-Bike-Teams Spirit of Bike 1999 an der World Solar Cycle Challenge haben die Bieler Ingenieure jetzt mit einem im Rahmen des Technologieprojekts HTA Biel/Spirit of Bike entwickelten E-Bike der absoluten Spitzenklasse für Furore gesorgt.

Spirit of Bike ist eine von der HTA Biel und von salis communication konzipierte Technologie- und Kommunikationsplattform. Ziel ist, in privaten und öffentlichen Institutionen einen Innovationsgeist zu schüren und beispielhaft schweizerische Spitzentechnologien im Dienste einer nachhaltigen Mobilität aufzuzeigen.

Spirit of Bike vereint Technologieinnovation, Sport, Lifestyle, Teamgeist und Nachhaltigkeit. Basis des ambitionierten Projekts ist eine von der HTA Biel in Zusammenarbeit mit spezialisierten Industriepartnern entwickelte E-Bike-Technologie, die intelligent Muskelkraft und E-Power verbindet und punkto Energieeffizienz und Performance völlig neue Massstäbe setzt.

Das neuartige E-Bike mit dem sinnigen Namen IntelliBike wurde in einer Reihe spektakulärer Events eingesetzt, namentlich an der World Solar Challenge über 3025 Kilometer quer durch Australien.



Bild 1: Offizielles Logo der World Solar Challenge und des Streckenverlaufs

In massgeblicher Partnerschaft mit [Siemens mobile](#) sowie mit [Swissca](#), [Toyota](#) und [ewz](#) ging das Team Spirit of Bike mit zwei Racebikes in Australien an der World Solar Challenge an den Start - mit dem Ziel, die weltweit härteste Rallye dieser Art über 3025 Kilometer quer durchs Outback in sechs Tagen abzuschliessen.“

Dieses ehrgeizige Ziel wurde sogar übertroffen, gelang es doch die Strecke in weniger als 46 Stunden mit einem Schnitt von rund 66km/h zurückzulegen (Anhang A). Einen massgeblichen Anteil am Erfolg des Projektes liegt sicher in der eingesetzten Batterietechnologie. Herzstück der IntelliBike-Technologie ist dabei die verwendete Li-Polymer Batterie, welche über überragende Eigenschaften bezüglich Energieinhalt und Leistungsfähigkeit verfügt.

Ziel des von Energie Schweiz unterstützten Teilprojektes war, die technischen Eigenschaften dieser Batterie zu dokumentieren und die praktische Umsetzung in ein Batteriesystem anlässlich des Rennens in Australien zu demonstrieren.

## **1.2 Ausgangslage**

Betrachtet man die bestehenden E-Bikes auf dem Schweizer Markt, so fällt auf, dass alle Produkte im Angebot mit Batterien geringer Energiedichte aber hoher Leistungsdichte ausgerüstet sind. Praktisch alle angebotenen Fahrzeuge werden mit Ni-Cd Batterien verkauft. Als Option lässt sich seit einiger Zeit aber auch eine Ni-MH Batterie nachrüsten. Damit lassen sich auch die allgemein als unzureichend bezeichneten Reichweiten bei gleichzeitig zufrieden stellenden Fahrleistungen erklären. Die HTA Biel beschäftigt sich schon seit über 15 Jahren mit Batterien verschiedenster Technologien und hat unter anderem erfolgreich einen Batterieprüfstand und ein Batterieladegerät entwickelt. Seit Ende des Jahres 2000 werden nun am Labor für Industrieelektronik Lithium-Polymer-Batterien geprüft (Zellen: 3.7V, 2.5Ah nominal). Unter Laborbedingungen sind dabei Energiedichten bis zu 195Wh gemessen worden.

Im Rahmen des Projektes Spirit of Bike wurden nun diese Zellen in ein Batteriesystem eingebaut, welches folgende Merkmale aufweist:

1. Hohe Packungsdichte
2. Dauernde Überwachung von Spannung und Temperatur aller Zellen
3. Intelligente Datenkommunikation über einen Standardbus aus dem Automobilbau
4. Eingebaute Strommessung und Ah- Zähler
5. Intelligenz, die es erlaubt „dumme“ Ladegeräte anzusteuern
6. Bereitstellen von Versorgungsspeisung anderer Verbraucher (Elektronik, Licht)
7. Softwarepakete zum Auslesen der gespeicherten Daten

Projektbeginn war Ende Juni 2001, die Projektdauer betrug ca. ein Jahr. Als spektakulärer Testlauf erwies sich die Teilnahme an der World Solar Challenge in Australien. Insgesamt wurden dabei 16 Batteriepakete mit einem Energieinhalt von rund 930Wh rund 150-mal geladen und entladen.

Dieser Bericht behandelt den technischen Aufbau der Spirit of Bike Batterie als auch Testresultate und Vorschläge für die Weiterentwicklung.

In einem weiteren Teil des Berichts werden kurz noch die Erfahrungen in dem Jahr nach dem Rennen zusammengefasst und eine interessante Weiterentwicklung der eingesetzten Batterieelektronik dokumentiert.

So hat die entwickelte Batterieüberwachungstechnologie den kommerziellen Einsatz nicht wie erwartet in einem E-Bike sondern in einem E-Flugzeug gefunden. Doch dazu später.

## 2 Systemüberlegungen

Die Batterie ist bei allen heutigen Lösungen für E-Bikes eine der grössten Schwachstellen. Dies ist nur zum Teil auf die schlechte Leistung der verfügbaren Technologie zurückzuführen.

In allen angebotenen Fahrrädern bemerkt der Beobachter als erstes die relativ grosse Batterie, welche zum Teil, aus der Not eine Tugend machend, noch farblich abgesetzt wird und als abnehmbare Einheit konstruiert wird. Die meisten Batteriesysteme erlauben nur minimale Diagnosemöglichkeiten.

Der Gedanke der abnehmbaren Batterie resultiert aus der beschränkten Reichweite, da schon nach der Fahrt ins Büro häufig ein Nachtanken fällig wird. Dies wird noch unterstützt durch eine häufig äusserst minimale Statusanzeige (z.B. durch nur gerade 3 LED's), so dass häufig aus reiner Vorsicht nachgeladen wird. Zudem ergeben sich durch das häufige Abnehmen auch Probleme mit den Verbindungen und dem Verschlussmechanismus. Bei schlechtem Wetter ist dies auch eine Stelle, an der Fehlfunktionen auftreten können.

Umgekehrt ist es so, dass diese Velos am Abend zum Schutz vor Wetter und Diebstahl meist in eine Garage oder einen Kellerraum gestellt werden. Da dort die elektrischen Installationen meist schon vorhanden sind, könnte die Ladung eigentlich direkt am Fahrrad erfolgen. Beim IntelliBike wurde deshalb die Batterie vollumfänglich in den Rahmen integriert und ist für den Fahrer gar nicht mehr als spezielles Teil des Fahrzeugs ersichtlich. Dies ist natürlich nur mit gleichzeitig weitaus besseren Eigenschaften als bei vergleichbaren Systemen möglich.

Beim IntelliBike werden aus diesem Grund Lithium-Polymer Batterien eingesetzt. Dieser Batterietyp wird im Moment mit grossem Aufwand bei tragbaren Computern und Telefonen eingeführt und wird von allen Fahrzeugherstellern als zukünftige Traktionsbatterie untersucht.

Die Batterie des IntelliBike muss jedoch vielmehr als Batteriesystem betrachtet werden, welche nebst den einzelnen Zellen der Lithium-Polymer Batterie noch eine Vielzahl von Sensoren und eine Überwachungselektronik enthält. Diese Elektronik liefert der übergeordneten Fahrzeugelektronik die benötigten Daten für die Fahrstrategien und dem Fahrer alle gewünschten Informationen. Des Weiteren lässt sich so auch ein Diagnosesystem implementieren.

Folgende Eigenschaften des Batteriesystems haben dem IntelliBike zu seinen herausragenden Eigenschaften verholfen.

1. Energiedichte um 200 Wh/kg (4-5 mal mehr als vergleichbare E-Bikes heute aufweisen)
2. Leistungsdichte um 500 Wh/kg für kurzzeitige Spitzenleistungen
3. Schnellladefähigkeit
4. Batteriemanagement, welches dauernd Spannungen, Ströme und Temperaturen erfasst
5. State-of-Charge Diagnose während des Ladens und Entladens (Restzeit bis Vollladung, noch mögliche Reichweite unter Berücksichtigung des Fahrerverhaltens)



*Bild 1.2.1: Blick ins Innere des Überwachungsfahrzeuges mit den Daten der beiden Laptops, welche die Daten der eingesetzten Batteriepacks anzeigen.*



*Bild 1.2.2: Die einzelnen Bestandteile des Batteriesystems: Überwachungselektronik, Gehäuseteile (Rapid Prototyping mit 3D-Stereolithographie) und Batteriezelle*

## 3 Technologie

### 3.1 Eigenschaften des Pakets

Zu Beginn des Projektes wurde eine Übersicht der zurzeit auf dem Markt erhältlichen Hochenergiebatterien auf der Basis von Li-Ionen und Li-Polymer erstellt. Gleich zu Beginn wurden Lösungen mit exotischeren Batterien wie Zink-Luft oder Silber-Zink verworfen. Dies geschah hauptsächlich aus der Überlegung, dass sich die Anzahl der Anbieter bei solchen Lösungen als sehr eingeschränkt erwies.

Li-Ionen, aber auch Li-Polymer-Akkumulatoren werden in kleineren Baugrößen schon in grossen Stückzahlen verwendet (z.B. Laptops und Handys). Die prinzipielle Tauglichkeit, sozusagen die chemische Seite solcher Systeme ist somit erwiesen und die Herausforderung beim Projekt Spirit of Bike bestand vor allem im Systemkonzept, dem Aufbau und dem Management der Batterie. Folgende Teilprobleme standen dabei im Vordergrund:

#### Packaging

1. Hohe Packungsdichte
2. Gute thermische Eigenschaften
3. Gute mechanische Eigenschaften
4. Geringe mechanische Beanspruchung der Anschlüsse
5. Einfache Handhabung bei Ein- und Ausbau

#### Management

1. Spannungs-, Strom- und Temperaturwerte aller Zellen
2. Unter- und Überspannungsschutzschaltung
3. Thermische Begrenzung der Leistung
4. Ladezustandsabhängige Begrenzung der Leistung
5. Temperaturabhängige Ladestrom- und Spannungskennlinie
6. Batterieidentifikation
7. Datenloggerfunktion
8. Speisespannung für IntelliBike-Elektronik oder Ladegerät

Insbesondere die unter Management aufgezählten Eigenschaften unterscheiden das Spirit of Bike Batteriepaket von herkömmlichen Akkumulatoren im Antriebstechnikbereich.

Da von Anfang an eine möglichst hohe Energiedichte gesucht wurde, konzentrierte sich die Auswahl auf Lithium basierte Systeme, welche zurzeit auf dem Markt erhältlich waren. Tabelle 2.1.1 gibt eine Übersicht der erhältlichen Batteriesysteme. Dabei wurden die anderen Batteriesysteme zum Vergleich auch noch aufgeführt.

Die aufgeführten Werte variieren stark je nach Hersteller und sind hier mit relativ konservativen Werten angegeben.

System	Blei-Säure	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Polymer
Anode	Pb	Cd	MH	LixC6	
Kathode	PbO2	NiOOH	NiOOH	LiCoO2(Li Mn2O4)	LiCoO2/(Li Mn2O4)
Nominale Zellspannung [V]	2,0	1,2	1,2	3,7 (3,5)	3,7 (3,5)
Arbeitsbereich	2,0-1,6	1,25-1,0	1,25-1,0	4,1-2,7	4,1-2,7
Grenzwert Entladeschlussspannung [V]	1,6	0,8	0,9	2,5	2,5
Max. Entladestrom [C]	10	20	2-3	2	2
Energiedichte-gravim. Wh/kg	30-40	40-60	50	100 (125)	120 (150)
Selbstentladung bei 20° in %NK/Monat	8	15	25	10	9
Verwendbarkeit Jahre	4-8	4-15	KA	KA	KA
Zyklusfestigkeit bei 100% Entladung	200-300	300-700	300-600	500 (1000)	500 (1000)

*Tabelle 2.1.1 Übersicht Batteriesysteme*

Es ist interessant zu sehen, dass Li-Polymer Batterien im ungünstigsten Fall ca. eine drei mal höhere Energiedichte als die gebräuchlichen Ni-Cd Batterien aufweisen und dabei auch weniger bedenkliche Materialien verwenden. Die etwas vorsichtig angegebenen Anzahl Zyklen hat sich in anderen Projekten bestätigt und ist durchaus mit den Zyklenzahlen von Ni-Cd oder Ni-MH zu vergleichen. Sie liegen jedoch näher bei 1000 als den angegeben 500.

Die kalendarische Lebensdauer ist hier nicht angegeben. Wie später gezeigt, erreicht man bei den Lithium-Polymer Batterien des Projektes Spirit of Bike knapp 3 Jahre (80% Ausfälle). Allerdings wurde hier die Batterie auch etwas ausserhalb des empfohlenen Betriebsbereichs verwendet.

Saft geht bei korrekter Verwendung ihrer Hochenergie-Lithium-Ionen Batterien von einer Lebensdauer bis 10 Jahre aus (39Ah, VRL Typ) und haben dies ihren Kunden auch garantiert. Somit kann man hier noch von weit reichenden Verbesserungen ausgehen.

### **3.2 Lithium Akkumulatoren**

Lithiumakkumulatoren ist der Oberbegriff für verschiedene Akkus, bei denen die Elektrode aus Lithium besteht.

Das Element Lithium wurde 1817 in einigen Mineralien entdeckt, und aufgrund seines Vorkommens ausschließlich in Gesteinen (griech. lithos =Stein) wurde es entsprechend benannt.

Als Metall ist es zuerst im Jahre 1855 durch Schmelzfußelektrolyse des Lithiumchlorids hergestellt worden. Aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften ist Lithium für die Batterieindustrie sehr attraktiv: Es besitzt das höchste elektrochemische Äquivalent aller Metalle und das höchste negative Standardpotential. Die große Reaktivität erschwerte jedoch erheblich die industrielle Anwendung; es reagiert sehr heftig mit Wasser, wobei sich Lithiumhydroxid (LiOH) bildet. Der dabei freigesetzte Wasserstoff kann sich durch die Reaktionswärme

entzünden (unter Umständen auch explosiv), so dass die Verarbeitung in sog. Trockenräumen erfolgen muss.

Batterien mit reinem Lithium als Kathode sind deshalb äusserst schwierig in der Herstellung und besitzen ein erhebliches Gefahrenpotential bei falscher Behandlung

Das Material der zweiten Elektrode ist von Typ zu Typ unterschiedlich, wodurch sich auch eine unterschiedliche Nennspannung im Bereich von ca. 3,0 bis 3,6 V ergibt.

### 3.3 Lithium-Ionen Akkumulator

Viel häufiger werden deshalb Lithium-Ionen Akkumulatoren hergestellt, deren Elektroden nicht aus reinem Lithium Metall bestehen sondern aus Lithium-Ionen, welche in ein Trägermaterial eingebettet sind (Li-Metall-Oxid für die Anode und Kohlestoffgitter für die Kathode). Diese Lithium Ionen wandern beim Laden und Entladen zwischen Kathode und Anode hin und her, weshalb Sie zum Teil auch als Swing oder Rocking Chair Batterien bezeichnet wurden. Bei Lithium Ionen Batterien wird ein flüssiger Elektrolyt und ein poröser Separator verwendet.

### 3.4 Lithium-Polymer Akkumulator

Seit Jahren arbeiten Wissenschaft und Industrie an der Entwicklung fester Polymerelektrolyte, die konventionelle flüssige organische Elektrolyte der Li-Ionen Batterie ersetzen sollen und einen klassischen Separator überflüssig machen. Das ursprüngliche Design der so genannten **Dry Lithium Polymer** Batterien stammt aus dem Jahr 1970 und verwendet anstelle eines mit flüssigem Elektrolyten getränkten Separators eine ionen-leitende Polymerfolie. Das Problem der Dry Lithium-Polymer Batterien ist jedoch der hohe Widerstand des Polymers, welcher eine hohe Leistungsabgabe verhindert. Erwärmt man die Zelle auf Temperaturen um 60°C sinkt zwar der Innenwiderstand, für die meisten Anwendungen ist dies jedoch nicht optimal. Zellen in Polymertechnik sind wieder aufladbar. Sie verfügen über eine hohe Energiedichte. Da sie keinen freien, flüssigen Elektrolyten besitzen, sind sie absolut auslaufsicher. Anstelle von Metallgefäßen als Zellengehäuse finden Aluminium- oder metallisierte Kunststofffolien Verwendung. Es lassen sich beliebige Formen realisieren, um beispielsweise in Geräten Hohlräume zu nutzen. Auch besonders flache, folienähnliche Anordnungen sind möglich.

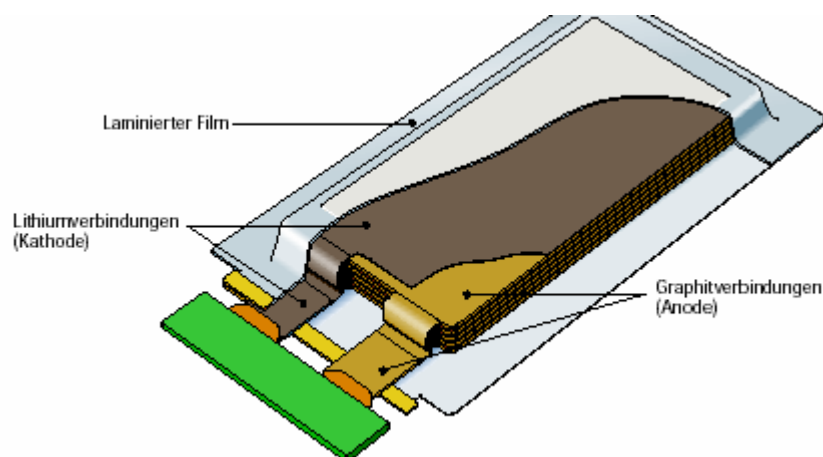


Abbildung 2.3.1: Aufbau einer typischen Lithium-Polymer Zelle

### 3.5 Lithium-Ionen-Polymer Akkumulator

Die meisten heute auf dem Markt erhältlichen so genannten Lithium-Polymer Batterien sind im strengen Sinn des Wortes keine eigentlichen Dry Lithium-Polymer Zellen. Vielmehr wird der Separator aus Polymer mit einem gelförmigen Elektrolyten getränkt. Somit können die gleichen flexiblen Kunststofffolienverpackungen verwendet werden. Diese so genannten Hybriden Lösungen werden schon weit in portablen Anwendungen eingesetzt.

## 4 Die Spirit of Bike Lithium Ion Polymer Zelle

Im Projekt Spirit of Bike wurde schliesslich eine Lithium Ion Polymer Zelle des Herstellers Kokam verwendet. Die wichtigsten Daten sind:

ITEM	RATED PERFORMANCE	REMARK
Rated Capacity	2500mAh (Ave.)	Rated Discharge <sup>1)</sup> Capacity After Rated Charge <sup>2)</sup> .
Rated Voltage	3.7V	Mean Operation Voltage During Rated Discharge After Rated Charge.
Voltage at end of Discharge	3.0V	
Maximum Charge Voltage	4.2V	
Maximum Continuous Charge Current	2.50A	
Maximum Continuous Discharge Current	4.50A	
Operation Temperature Range	Charge: 0 ~ 45°C	60 ρ 25% R.H.
	Discharge: -20 ~ 60°C	
Storage Temperature Range	-20 ~ 40°C	60 ρ 25% R.H.
Weight	52.5 ρ 0.5g	

*Tabelle 4.1: Die wichtigsten Eigenschaften der Kokam-Zelle*

Als weitere wichtige Grösse muss hier noch der Innenwiderstand der Zelle erwähnt werden, welcher mit weniger als 30 mOhm angegeben wird. Da beim Batteriepäck des IntelliBike insgesamt 7 Zellen parallel geschaltet wurden ergab sich so ein Innenwiderstand von weniger als 5 mOhm. Bei einem Entladestrom von 35A (entspricht 2C) konnte die Batterie somit ihre Spannung ohne Probleme halten.

Für das Projekt wurden insgesamt 16 Batteriesysteme gebaut, welche aus 98 einzelner Zellen zusammengesetzt wurden. Insgesamt über 1600 Zellen wurden beschafft, bei einem Preis von ca. 30 US\$ pro Zelle (Dies nach einem Rabatt, die ersten Zellen kosteten noch 50 US\$). Somit konnte man getrost behaupten, dass die Batterie eines IntelliBikes mehr kostete als ein normales -E-Bike.



*Bild 3.1: Die Kokam Zelle: Einmal als Einzelzelle und einmal zur Probe in einem Gehäusebecher. Der verwendete Kohlefaserbecher wurde jedoch nie verwendet, da man das Risiko, eines Kurzschlusses zwischen einer defekten Batterie und dem leitenden Gehäuse nicht eingehen wollte.*

#### **4.1 Der Aufbau des Spirit of Bike Blocks**

Die Explosionszeichnung des Blocks verdeutlicht sehr gut die endgültige Konstruktionsweise des Spirit of Bike Blocks.

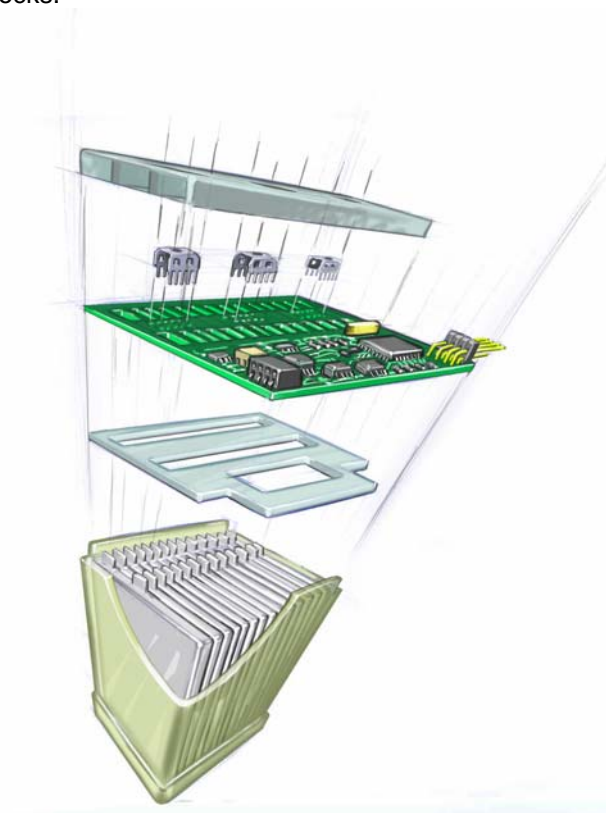


Bild 3.1.1 Aufbau des Batterieblocks.

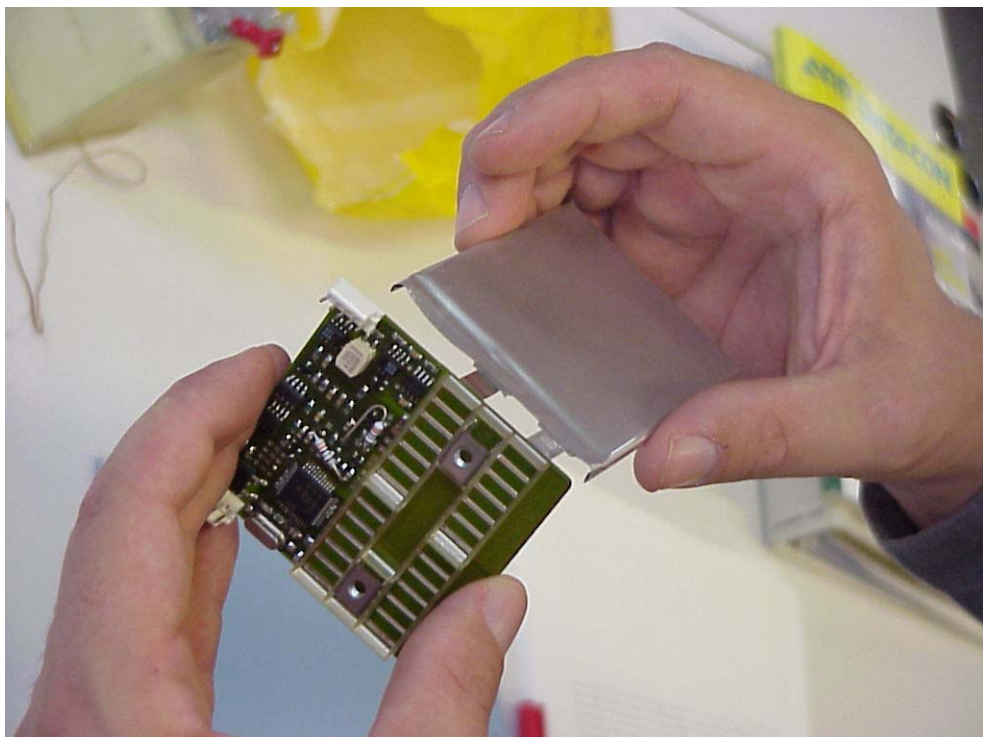
Pro Block wurden jeweils 14 Zellen verwendet, davon wurden jeweils 7 Stück parallel geschaltet und diese wiederum in Serie. Somit ergab sich pro Block eine Nennkapazität von 17.5Ah und eine Nennspannung von 7.4V. Die benötigte Anzahl Zellen, welche parallel geschaltet wurden ergab sich aus dem benötigten Spitzenstrom und einem zulässigen maximalen Entladestrom von 2C.

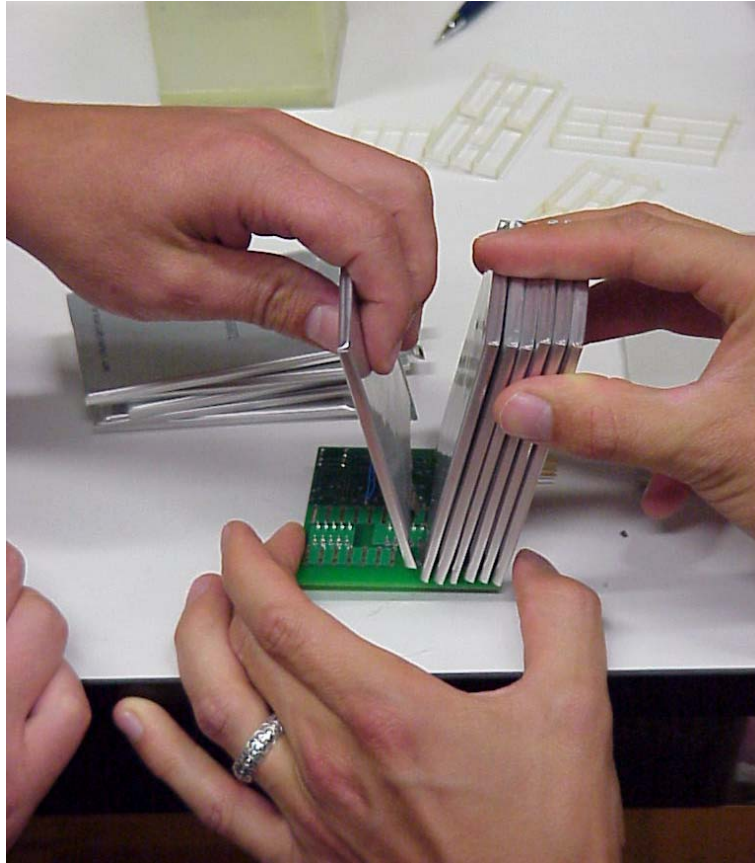
Jeder Batterieblock verfügt über eine eigene Überwachungselektronik, welcher die Spannung und die Temperatur jedes parallel geschalteten Paketes zu sieben Zellen überprüft und über einen CAN-Bus an den Master weitergibt. Die Platine wirkt gleichzeitig als Verbinder zwischen den einzelnen Zellen und besitzt die Anschlusspunkte für die Verbindung innerhalb des Batteriepaketes, Damit die Gefahr von Kurzschlüssen vermindert werden konnte, befinden sich ober- und unterhalb der Batterie Abdeckungen aus polymerisiertem Harz, welche mit der hausinternen Rapid-Prototyping Maschine hergestellt wurden.

Die 14 Zellen sind in ein aus Glasfasern gefertigtes Gehäuse gesteckt und dort schwimmend auf einem Bett von Silikon gelagert. Dadurch wird erreicht, dass die Spannung auf den aus Kupfer bestehenden Verbindern der einzelnen Batterieblöcke nicht dazu führt, dass die Anschlüsse aus der Platine gerissen werden. Die schwimmende Lagerung verhindert zudem, dass eine zu grosse Wechsellast aufgrund von Vibrationen auf die Lötanschlüsse einwirken kann.

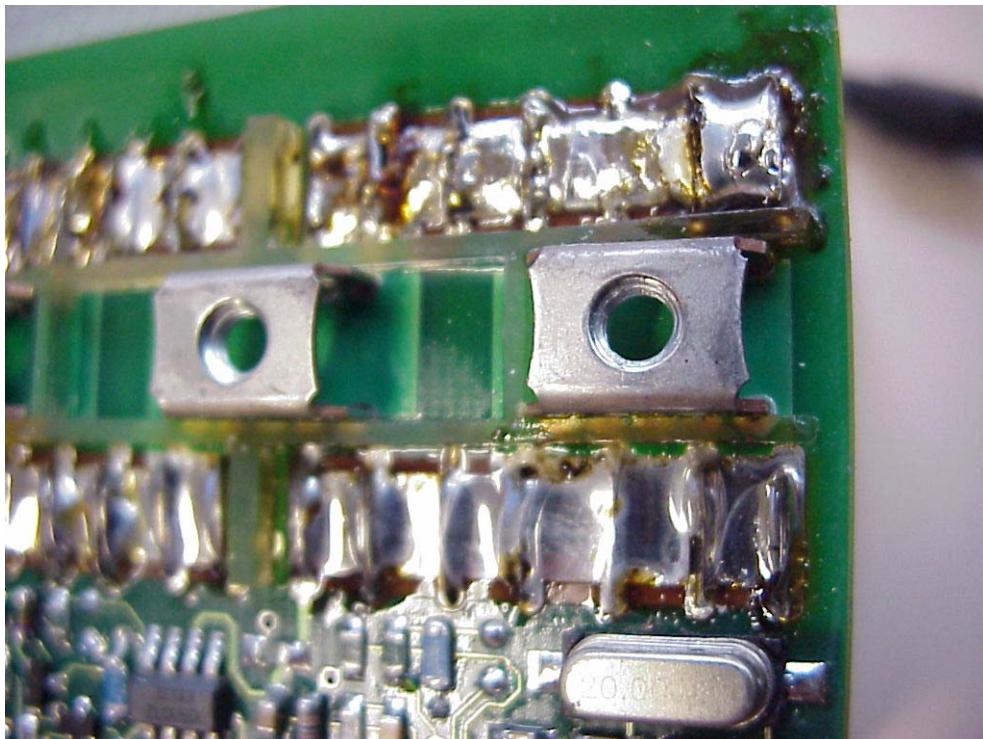
#### 4.1.1 Fertigungsschritte

Zuerst wurden die 14 Zellen einzeln in die Anschlüsse eingeführt und anschliessend mit Klebeband provisorisch befestigt.

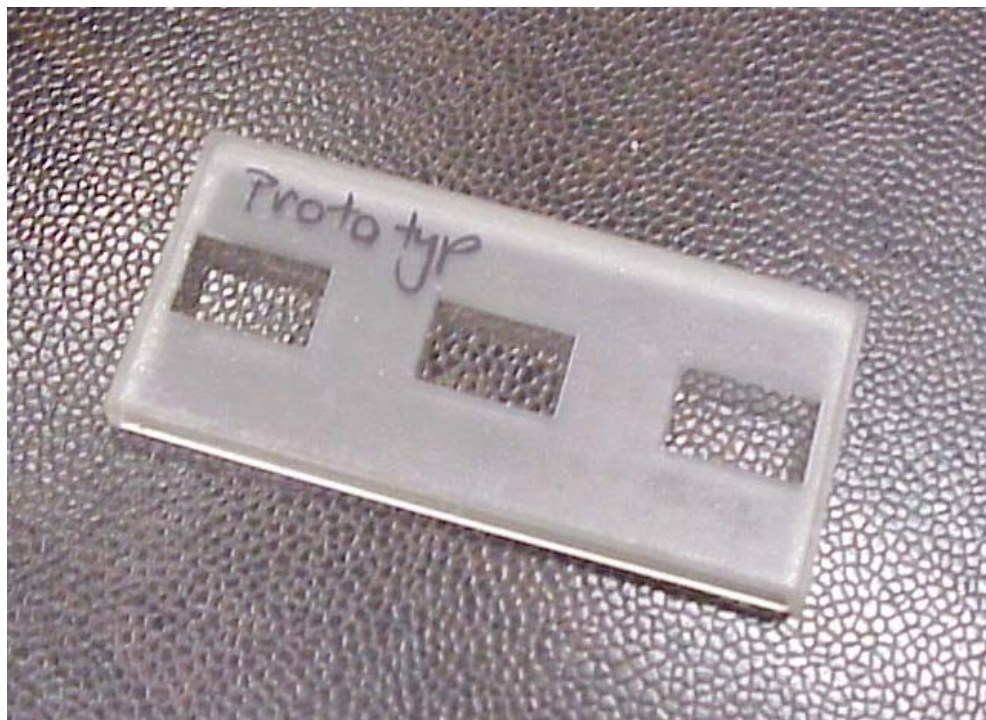




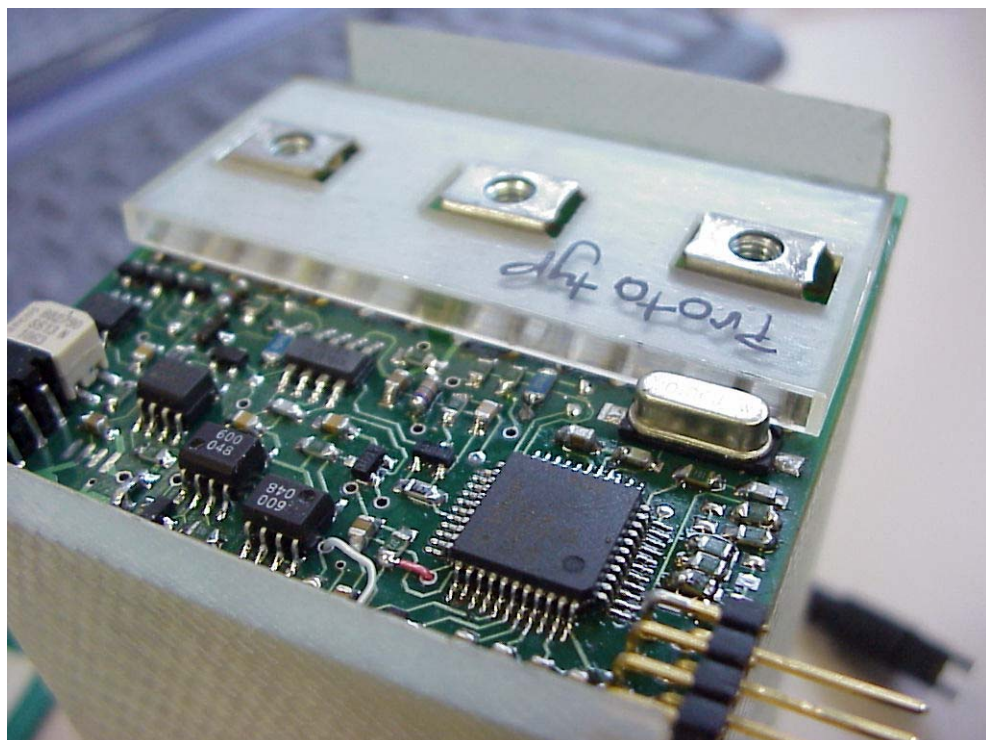
Dann wurde der Batterieblock gelötet. Dabei musste ein spezielles Lotflussmittel verwendet werden, welches erlaubte, die Aluminiumelektrode von ihrem Oxid zu befreien und gleich zu verzinnen.

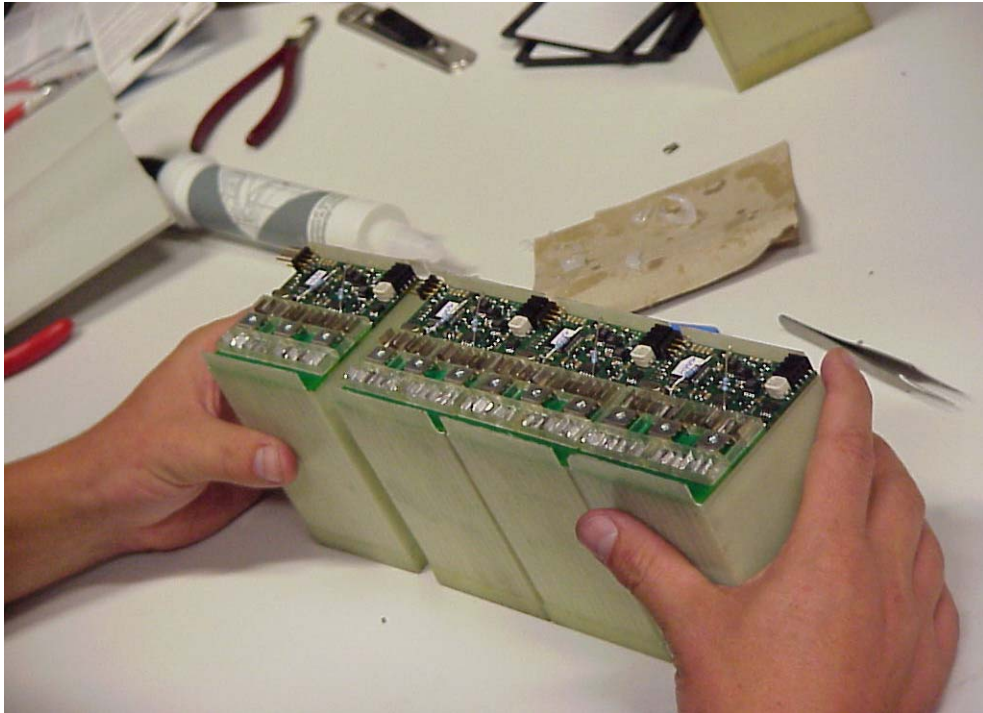


Anschliessend wurde noch eine Abdeckung zum Schutz der Lötanschlüsse aufgesetzt. Diese Kappe erwies sich mehr als einmal als wichtig, insbesondere beim Anschrauben der Verbinder. Ein Abgleiten des Schraubenziehers führte sonst zu Kurzschlüssen.

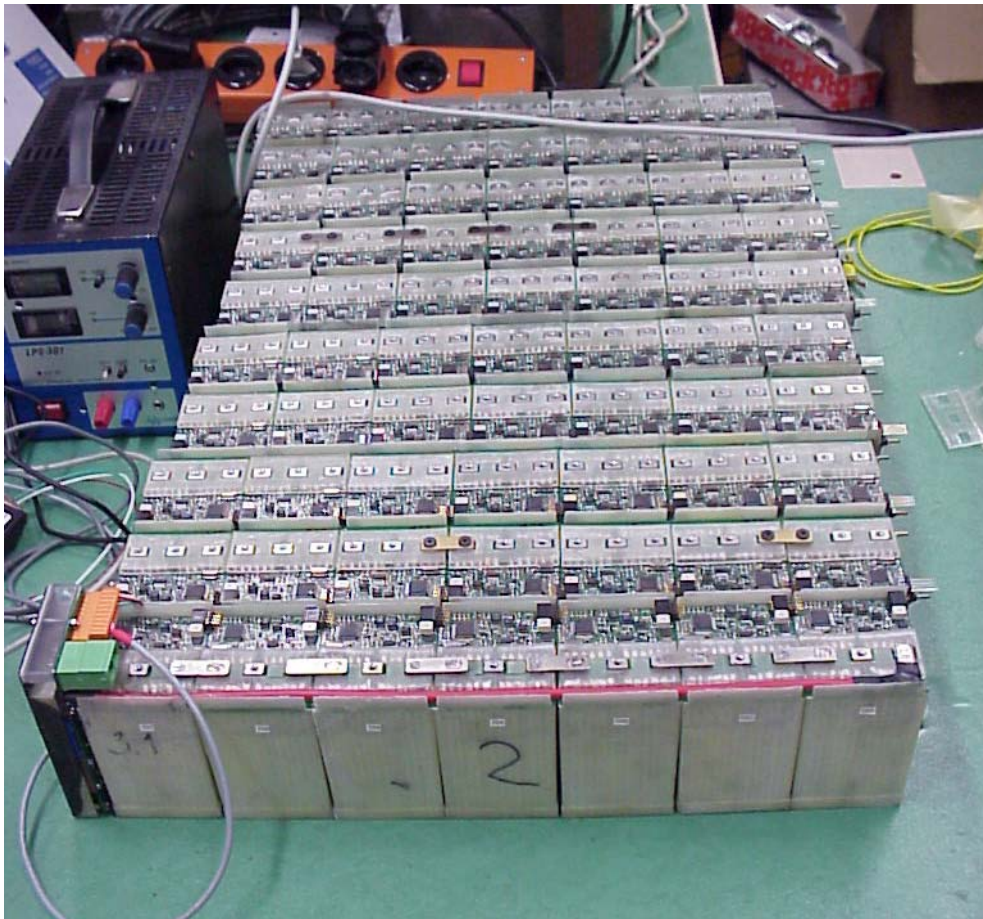


Die sieben Batterieblöcke wurden dann zu einer ganzen Batterie zusammengesetzt. Dadurch entstand eine Batterie mit insgesamt 98 Zellen (7 Parallel und 14 solche parallelen Blöcke in Serie). Die Nennspannung betrug somit insgesamt 51.8V, die Nennkapazität nominal 17.5Ah, was zu einer gesamten Energieinhalt von 930Wh führte.





Alle Batterieblöcke wurden dann zuerst parallel geschaltet und so gleichmässig aufgeladen. Anschliessend erfolgte ein Entladezyklus mit 1kW Entladeleistung. Dabei wurde die Temperatur überwacht und beobachtet, wann die Temperatur 60°C erreichte.



Ein zusätzlicher Block wurde mehrfach bei hoher Umgebungstemperatur (45°C) mit einer Last von 1C entladen. Dies wurde gemacht, um zu überprüfen, ob die Batterie innerhalb der geplanten Dauer von 40 Minuten pro Wechsel nicht überhitzen würde.

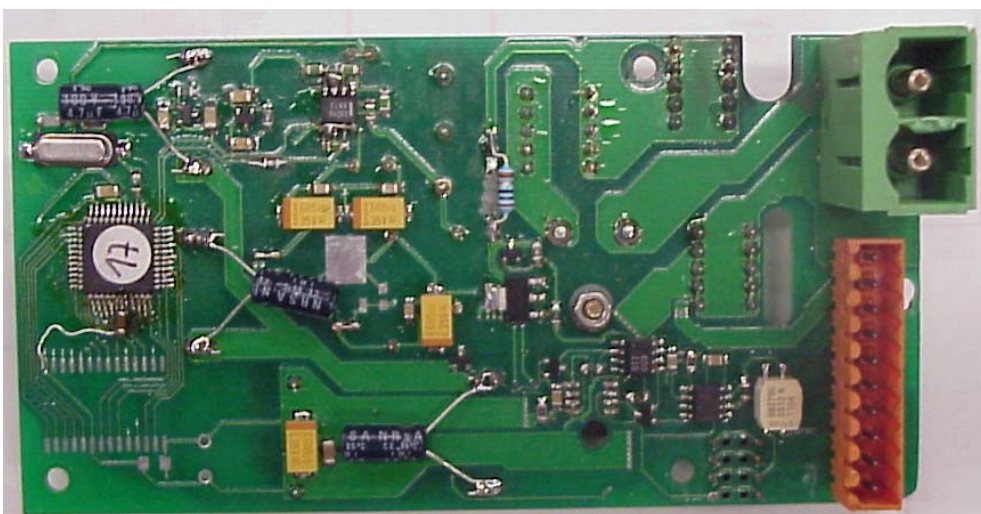


## 4.1.2 Der Batmaster

Jede Batterie bestehend aus 7 Blöcken und weist zudem noch einen Batmaster auf: Der Batmaster verfügt über eine Strommessung, eine Sicherung, Speisungen für die gesamte externe Elektronik und einen Ein-/Ausschaltmechanismus, welcher nicht nur die Überwachung der einzelnen Module über die CAN-Speisung an- und abschaltete, sondern auch gleich noch die gesamte Spirit of Bike-Elektronik.

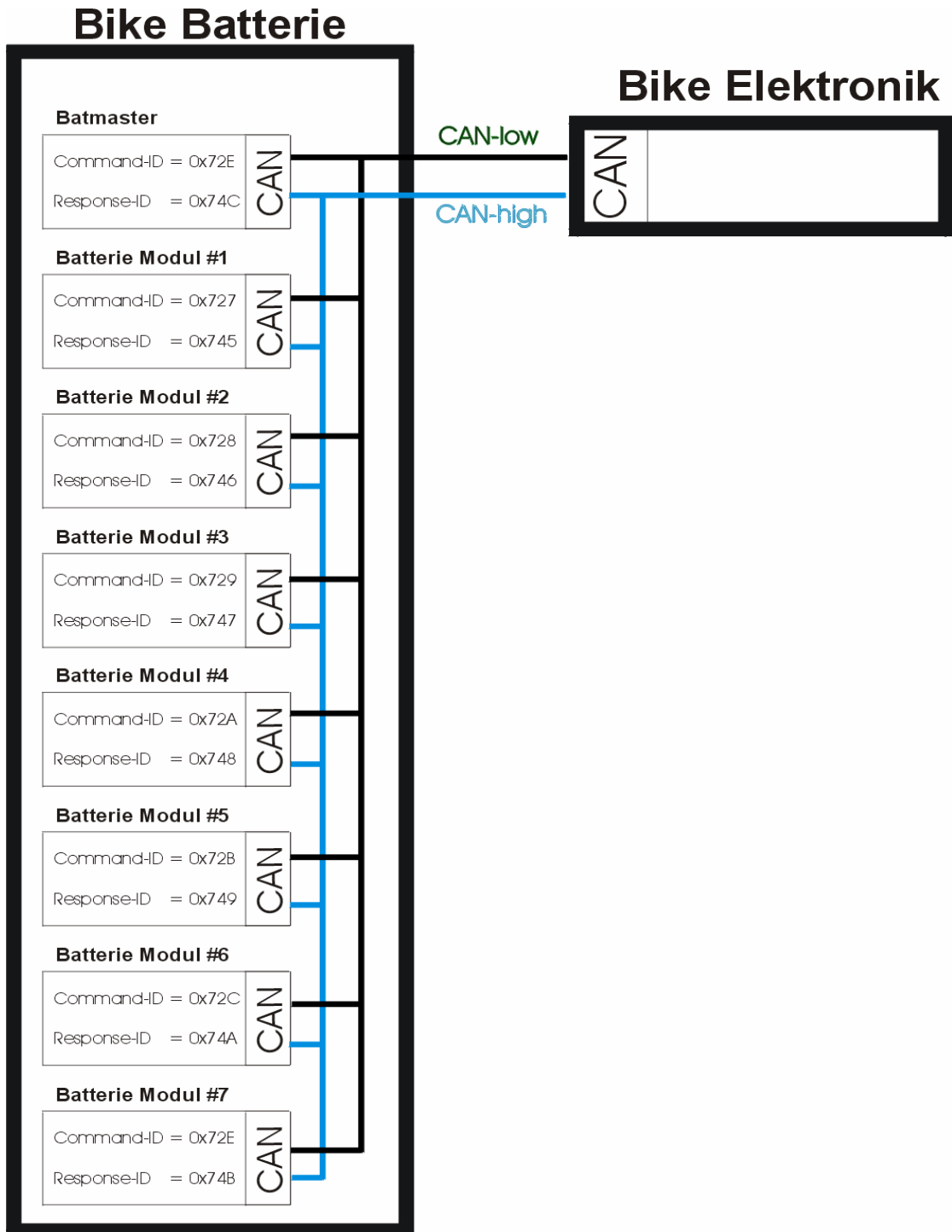


*Bild 4.1.2.1 Der gesamte Batterieblock ohne Gehäuse. Das rote Kabel ist die Rückführung des positiven Batterieanschlusses. Auf der Stirnseite ist der Batmaster erkennbar*



*Bild 4.1.2.2 Die Rückseite des Batmaster: Man erkennt den Prozessor, welche alle Daten der einzelnen Batterien sammeln kann und dann weiterverarbeitet an einen Master gibt. Im Falle eines „dummen“ Ladegerätes kann diese Prozessor auch die benötigten Ladeparameter selber einstellen.*

Auf dem Batmaster selbst befindet sich zudem noch ein Mikroprozessor, der ebenfalls über CAN kommuniziert und somit in der Lage ist, alle Daten der einzelnen Module abzufragen. Auf dem unbestückten Platz neben dem Mikroprozessor befindet sich übrigens der Platz für ein RAM/EEPROM, welches als Datenlogger verwendet werden kann.



*Bild 4.1.2.3 Das Blockschaftbild des Batteriesystems mit den Adressen der einzelnen Batteriemodule und dem Battmaster*

Die sieben Überwachungsschaltungen und der Batmaster sind je mit einem CAN-Interface ausgestattet. Jedes CAN-Interface besitzt eine eigene Command-ID um angesprochen zu

werden. Empfängt nun ein Interface seine eigene Command-ID, so werden die Daten, mit der eigenen Response-ID, umgehend auf den CAN-Bus gelegt. Je nachdem ob der Batmaster oder eine Überwachungsschaltung eines Batteriemoduls angesprochen wird, werden Zellendaten oder Stromdaten zurückgesendet.

Diese Command-IDs und Response-ID sind auf den jeweiligen Modulen mit Widerständen eingestellt. Eine Batterie besitzt die Command-ID's von 727h bis 72Eh und die Response-ID's von 745 h bis 74C h.

### 4.1.3 Software zur CAN-Kommunikation

Die CAN-Kommunikation wurde in einer periodischen Interrupt Routine implementiert. Periodisch, alle 60 Millisekunden Sekunden, wird der CAN-Bus angesprochen. Bei jedem Aufruf werden der Batmaster und ein Batteriemodul angesprochen. Zuerst werden die Daten abgespeichert, dann werden die zwei nächsten Command-ID ausgegeben. Die angesprochenen CAN-Interfaces senden bis zur nächsten Verarbeitung ihre Daten mit ihrer Response-ID zurück. Die erhaltenen Daten werden interpretiert und umgerechnet. Der Batteriestrom wird mit einen Spitzenwertfilter und einem Medianfilter gefiltert. Die Minimal- und Maximalwerte der Zellenspannungen und der Temperaturen werden ermittelt. Zum Schluss wird die Modulzählvariable neu berechnet. Mit dieser Ansteuerung sind jeweils nach sieben Durchgängen, dies entspricht 420 Millisekunden, alle Daten der Batterie abgespeichert und verarbeitet.

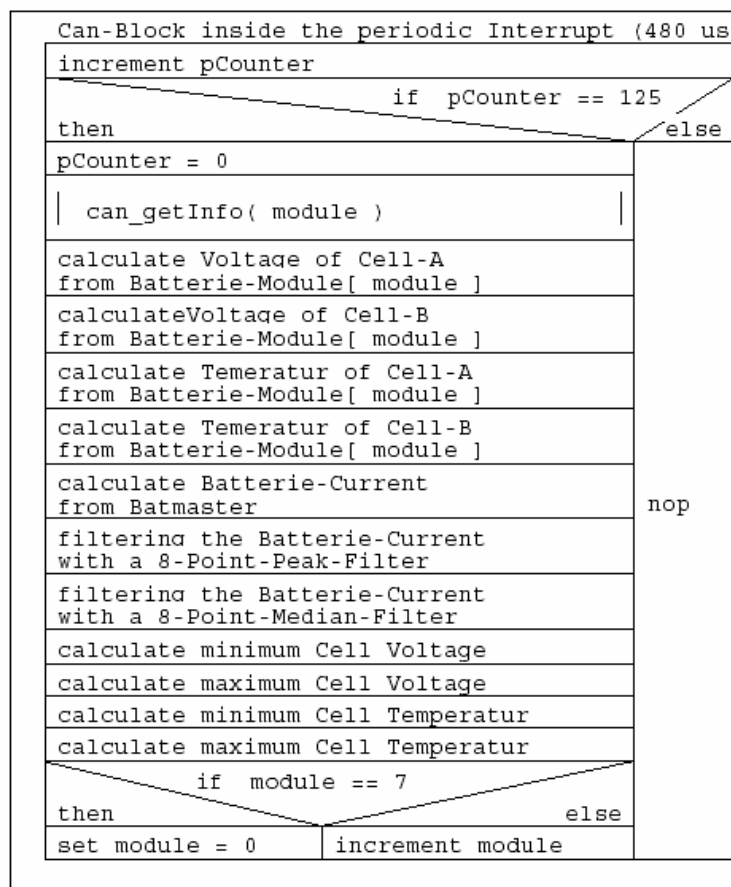
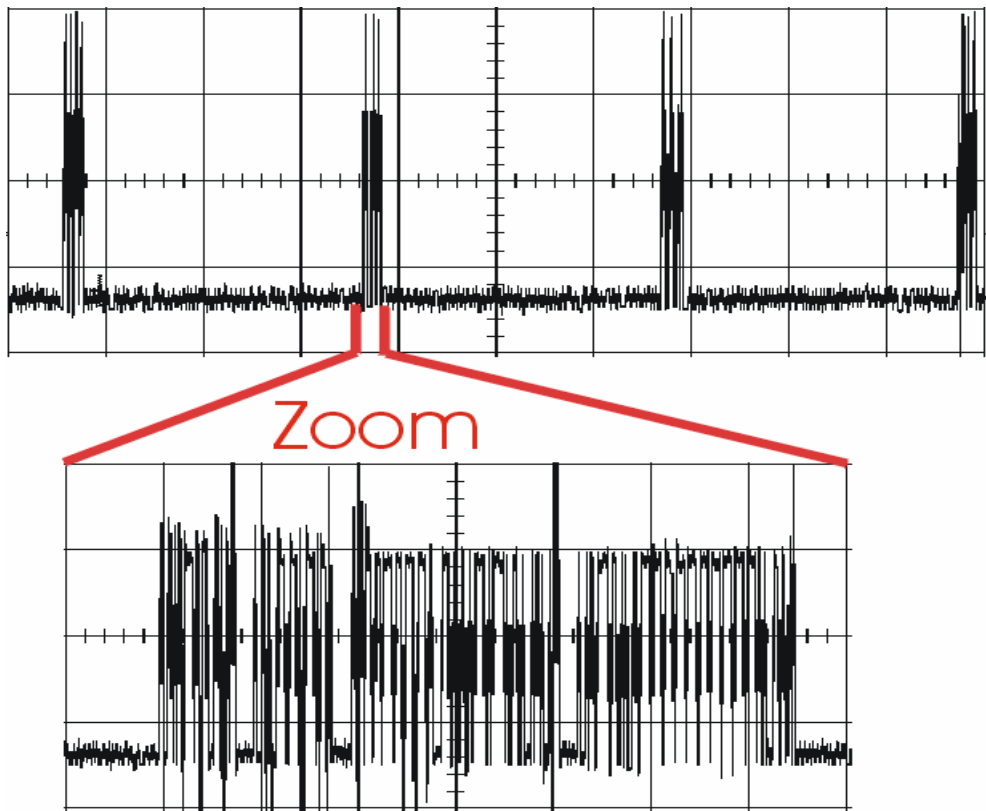


Bild 4.1.3.1 Das Flussdiagramm der Abfrageroutine

Bei der Kommunikation ist nicht gewährleistet, welches CAN-Interface als erstes antwortet. Jedoch sind die Receive Buffer mit den Response-ID's initialisiert. Somit ist eine Verwechslung der Daten ausgeschlossen.



*Bild 4.1.2.3 Das Oszilloskop des CAN-Datenflusses*

Die Messungen mit dem Oszilloskop wurden mit einer Spannungsauflösung von 1 volt/div. gemessen. Bei der Grobmessung beträgt die Zeitauflösung 20 ms/div. und bei der Vergrößerung noch 0.5 ms/div. In der Grobmessung ist das Intervall der Abfragen ersichtlich. In der Vergrößerung stellen die beiden kleineren Blöcke die zwei Command-Pakete des Microcontroller dar. Weiter zeigt das Bild die zwei Response-Pakete der Batterie. Diese Blöcke sind länger, weil sie acht Byte mit Daten enthalten.

## 4.2 Probleme

Im Gegensatz zu den restlichen Komponenten des IntelliBikes, die zur gleichen Zeit gefertigt wurden, besass man bei der Batteriesystemfertigung relativ wenig Erfahrung. Um das Risiko möglichst klein zu halten, wurden neue Ideen vorgängig jeweils ausgiebig getestet.

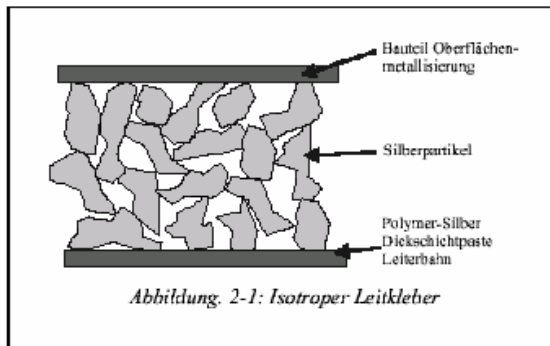
Folgende Probleme traten hierbei zu Tage:

### 4.2.1 Verkleben der Verbindungen

Die Lithium Polymer Batterien verfügen über zwei Anschlüsse, Ein Anschluss aus Nickel und ein Anschluss aus Aluminium. Aluminium gilt allgemein als äusserst schwierig zu löten. Da man also zuerst diese Aluminiumanschlüsse nicht löten wollte, wurde ein anderes Verfahren gesucht, Dabei stiess man auf leitende Klebstoffe, wie Sie in der Mikroelektronik verwendet werden.

#### Isotrope Leitkleber

Der Leitkleber, welcher als Verbindungsmaterial zwischen Bauteil und Substrat (Polyesterfolie) eingesetzt wird,



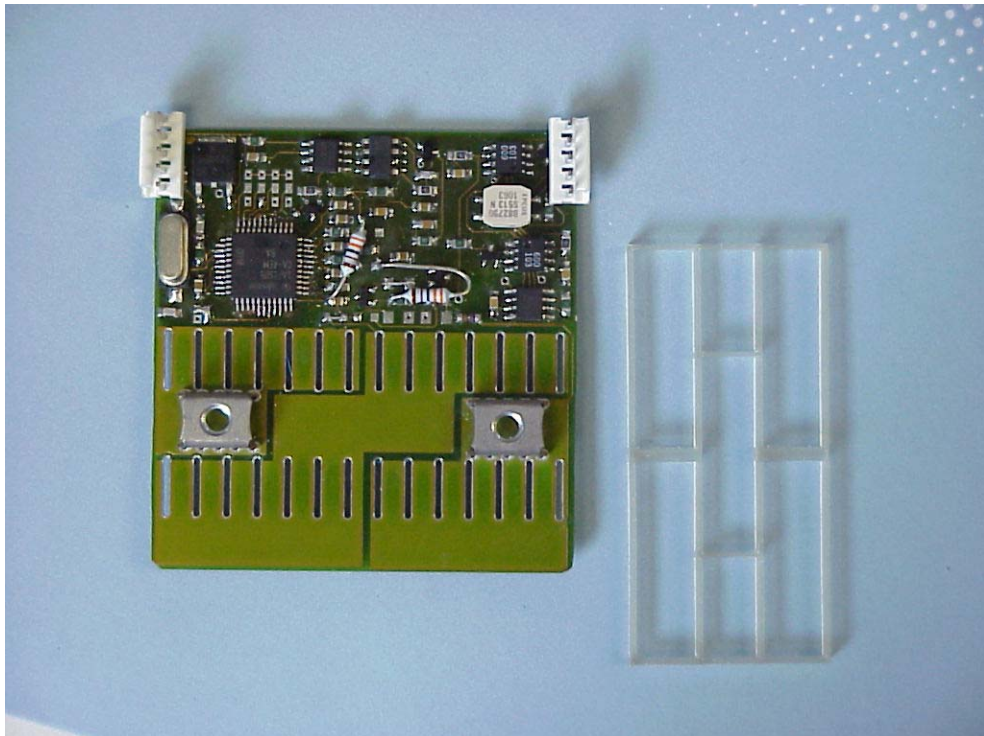
besteht aus einem leitfähigen Klebstoff, in der Regel ein Epoxid. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch das Füllen des Klebstoffs mit leitfähigen Partikeln erreicht, so dass sich die Partikel gegenseitig berühren (siehe Abbildung. 2-1). Die Schwelle, ab welcher die Anzahl der Partikel genügt, um eine sichere Leitfähigkeit herzustellen (=Perkolationsschwelle), liegt bei ca. 50 (Gewichts-%) Anteil von Partikeln in der Klebstoffmatrix. Um einen guten Leitwert des Leitklebstoffs zu erreichen, füllen die meisten Hersteller jedoch ihre Leitklebstoff mit 70-80 (Gewichts-%) Silberpartikel. Während der Aushärtung schrumpft der Klebstoff und die Silberpartikel werden

aneinandergedrückt. Dieser Kontaktdruck wird durch die Klebstoffmatrix über die Lebensdauer aufrecht erhalten.

Bild 4.2.1.1 Funktionsweise des Silberleitklebers

Schon die Beschaffung des Materials erwies sich als relativ umständlich, musste doch für das Silber im Silberleitkleber ein Edelmetallkonto eröffnet werden.

Die eigentlichen Probleme traten jedoch beim Verkleben auf. Da die Anschlüsse welche verklebt werden sollten relativ nahe beieinander lagen und somit die Gefahr eines Kurzschlusses durch fließenden Klebstoff gegeben war, liess man spezielle Kunststoffgehege fertigen, welche den Kleber zurück binden sollten:



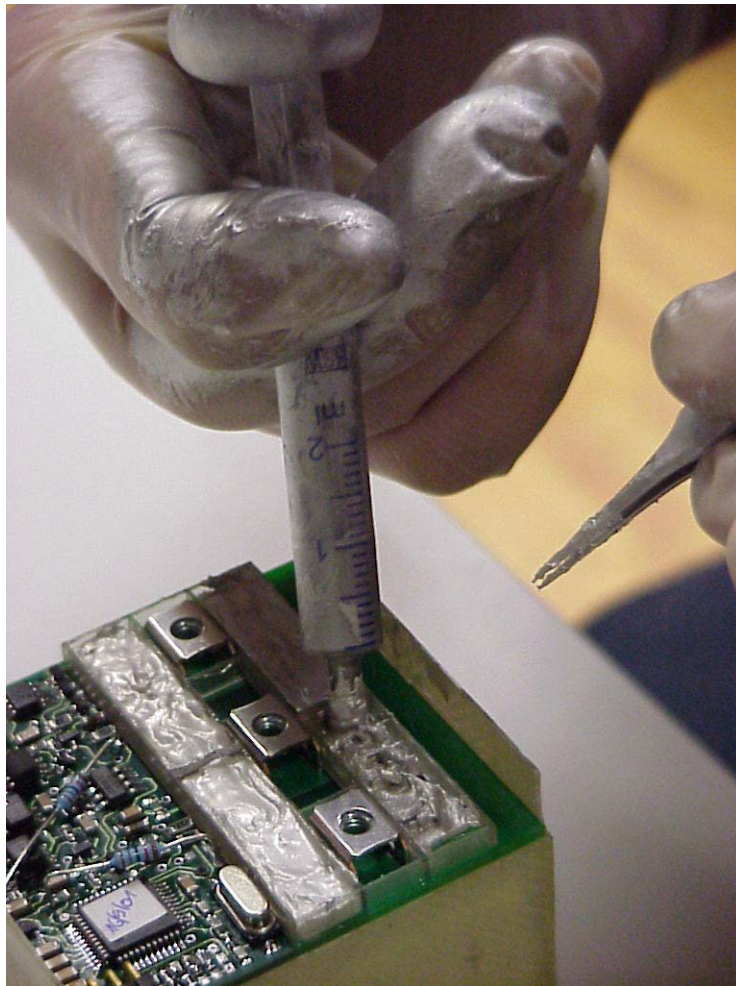
*Bild 4.2.1.2 Das Gatter zum Abdichten der Klebestelle.*

Das Aufbringen des Klebers musste jedoch äusserst gefühlvoll gemacht werden, da sonst der Kleber unter das Gatter durchdrückte und trotzdem einen Kurzschluss bilden konnte. Da im nicht trockenen Zustand die Leitfähigkeit nicht da war, hat man auch nichts gemerkt, sobald die Klebestellen jedoch trockneten und sich der Kleber zusammenzog und die Silberpartikel somit anfangen zu leiten, konnte es zu Kurzschlüssen kommen.

So kam es zum Beispiel vor, das ein durchaus anständig aussehendes Batteriepaket sich erst Stunden nach dem Zusammensetzen mit einem vernehmlichen „zschh..“ entzündete und nur knapp nicht komplett verbrannte.

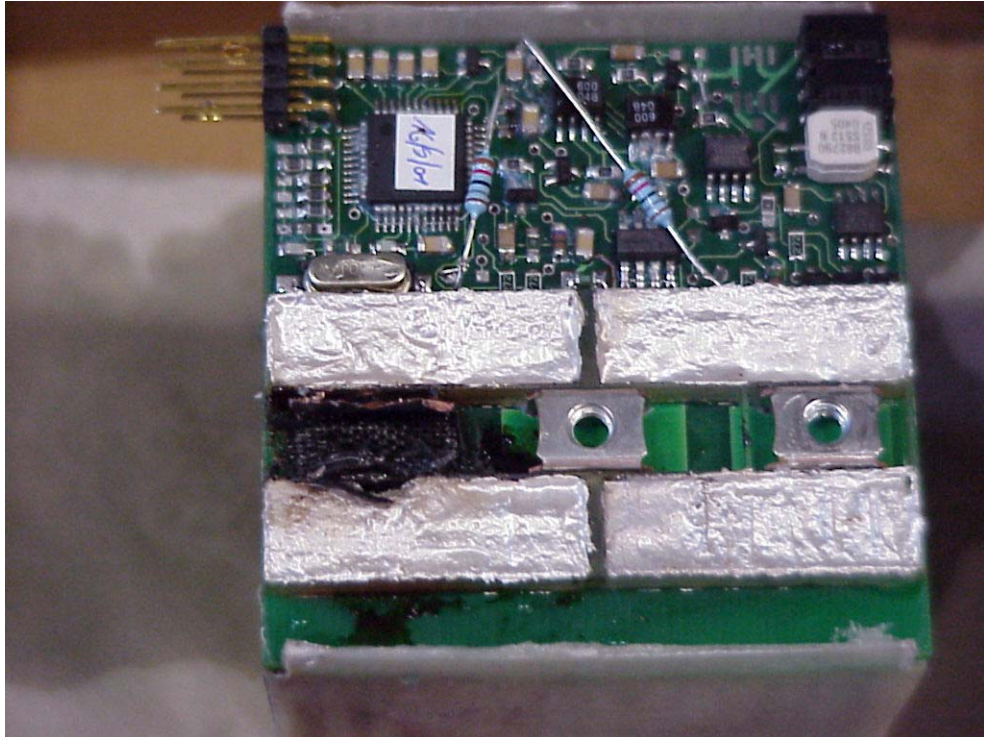
Der Leitkleber war zudem recht schwierig zu applizieren, da relativ zähflüssig. Da zudem nur von Hand gemischt wurde, kann man auch davon ausgehen, dass nicht eine optimale Verteilung der Silberpartikel erzielt wurde und es zu Stellen kam die relativ schlecht leitend waren.

Der Aufwand für einen Batterieblock war zudem auch von der Materialseite her ziemlich gross und aufgrund der ersten Erfahrungen musste man sogar von mehreren Kilo Klebstoff ausgehen. 1kg Klebstoff kostete jedoch rund 1600 CHF. Noch schmerzhafter als der Preis, war jedoch das recht hohe zusätzliche Gewicht.



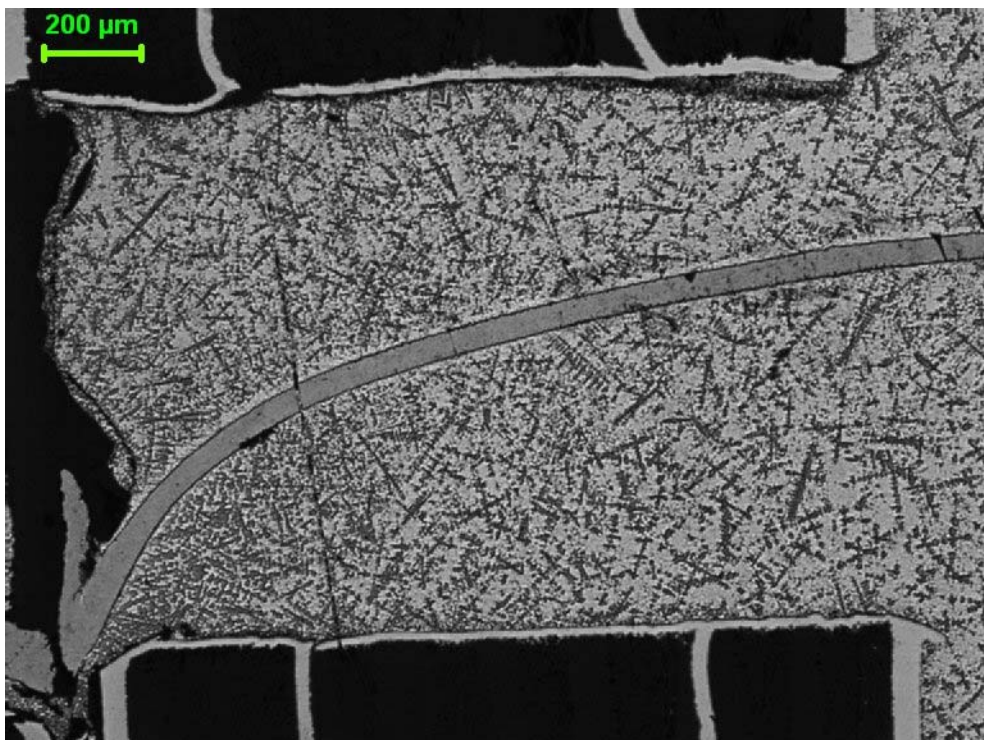
*Bild 4.2.1.3 Anbringen des Leitklebers*

Die ersten Tests waren zudem noch sehr entmutigend. Obwohl eine Probeverbindung die gewünschten Resultate gebracht hatten, war keiner der geklebten Batterieblöcke brauchbar. Zudem brach unter Last bei einem Batterieblock sogar ein Feuer auf. Ein Kurzschluss zwischen den beiden Anschlüssen durch inaktiven Kleber war unter Last (Hitze, führte zur weiteren Verhärtung des Klebers und somit zum leiten der Silberpartikel) leitend geworden und dann durchgebrannt.



*Bild 4.2.1.3 Die angebrannte Batterie: Fast 1000 SFr. In Sekunden zerstört!*

Als Alternative zum Kleben wurde deshalb wieder Löten in Betracht gezogen. Mit Hilfe eines Schliffbildes konnte dann bei der gefundenen Lösung auf noch die Güte der Verbindung überprüft werden:



*Bild 4.2.1.4 Schliffbilder der Lötverbindung: Man sieht, dass die Aluminiumoberfläche fast besser kontaktiert als die Zinnoberfläche des Prints*

Bis heute hat sich diese Lösung als sehr gut erwiesen und keine der Defekte ist auf eine schlechte Lötstelle zurückzuführen.

Beim Verlöten musste jedoch darauf geachtet werden, dass die zuerst mit dem Lotflussmittel behandelten Aluminiumanschlüsse möglichst rasch verlötet wurden. Ein Liegen lassen über Nacht führte zu einer erneuten Oxydationsschicht und somit zu schlechteren Lötigenschaften.

## 5 Telemetrie Überwachung

### 5.1 Einführung

Damit während einer Fahrt mit dem IntelliBike alle wichtigen Daten in einem Begleitfahrzeug zu Verfügung stehen, werden diese vom Controller bei entsprechender Anfrage über eine serielle Schnittstelle ausgegeben. An dieser Schnittstelle wird dann das Funkmodem angeschlossen. Auf der Gegenseite wird dann der Com-Port des Überwachungslaptop ebenfalls mit einem Modem verbunden, damit die Daten empfangen werden können. Die Daten werden mit dem LabView-Programm Telemetrie angefordert und ausgewertet.

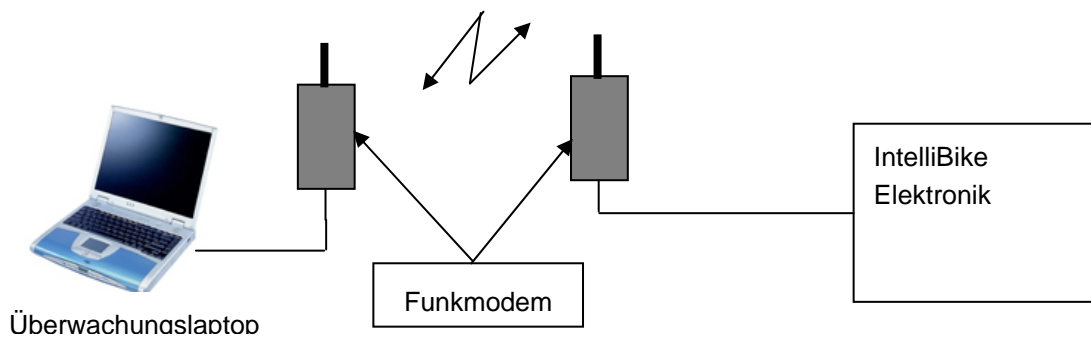


Bild 5.1.1 Aufbau des Telemetriesystems

## 5.1.1 Frontpanel des Telemetrieprogramm

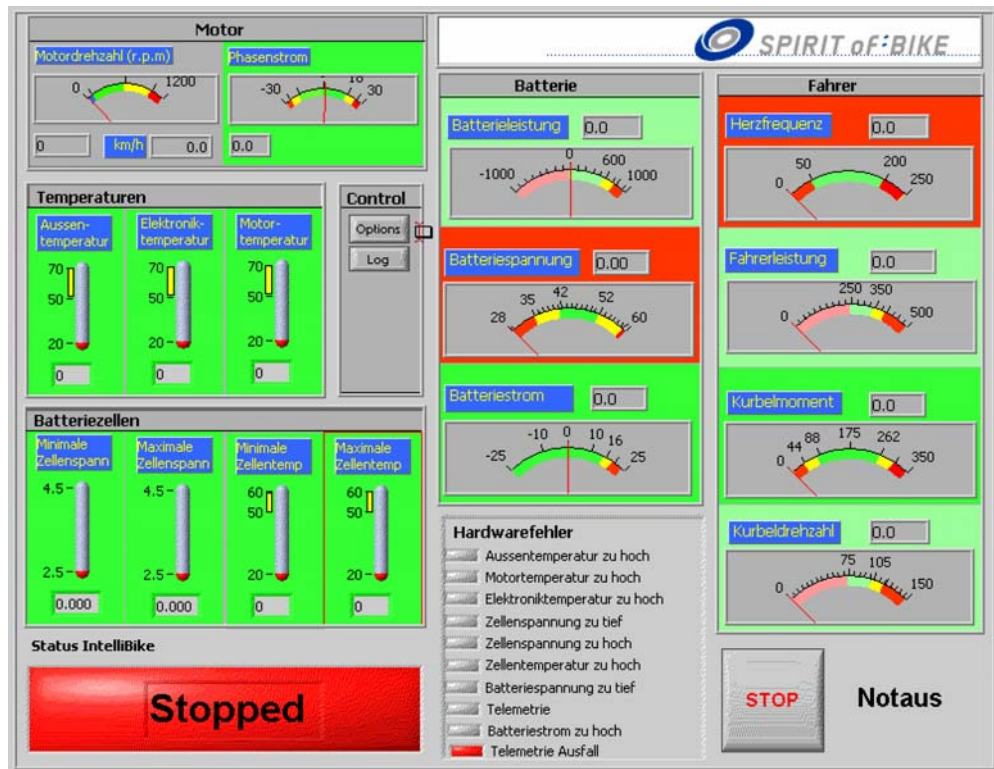


Bild 5.1.1.1 Das Telemetrie-Panel: neben allen Motor- und Batteriedaten wurden auch noch Daten des Fahrers übermittelt. Allerdings musste auf die ursprünglich gewünschte Herzfrequenzmessung verzichtet werden. Das Messgerät liess sich zu leicht von der Leistungselektronik stören.

## 5.2 Bedienungsanleitung

### 5.2.1.1 Schalter

Mit dem Notausschalter kann das IntelliBike über die Telemetrie ausgeschaltet werden. Allerdings bleibt die Telemetrie weiterhin aktiv. Wird der Notausschalter noch einmal gedrückt so kann das Fahrrad wieder weiter fahren. Es wurde davon abgesehen noch weitere Parameter bidirektional einzustellen, um den Fahrern nicht das Gefühl einer Fernsteuerung durch das Telemetriefahrzeug zu geben.

### 5.2.1.2 Anzeigen

Die Motoranzeigen geben Auskunft über die Drehzahl und den Phasenstrom des Motors. An den Temperaturanzeigen können die aktuellen Temperaturen der Elektronik, des Motors und der Umgebung kontrolliert werden. Die Batteriezellen geben Auskunft über den Ladezustand (minimale und maximale Zellenspannungen) der Batterie. Auf der IntelliBike-Elektronik wird die Batteriespannung gemessen und mit dem Batteriestrom, welcher vom Batmaster her bekannt ist, an die Telemetrie gesendet. Das LabView-Programm berechnet dann den momentanen Leistungsverbrauch. Die entsprechenden LED der Hardwarefehler leuchten rot auf, wenn der beschriebene Fehler aufgetreten ist. Wenn über die RS 232 Schnittstelle keine Daten empfangen werden, erleuchtet die Telemetrieausfall LED, und die restlichen Anzeigen behalten die zuletzt gespeicherten Werte. Die Statusanzeige ist grün, wenn das IntelliBike in Betrieb ist.

### 5.2.1.3 Erweiterungen

Einige Anzeigen sind erst nach den Erfahrungen im Rennen eingeführt und implementiert worden. Die Hardwarefehler werden auf der IntelliBike-Elektronik gesetzt und anschliessend gemäss Protokoll übertragen. Diese werden dann im LabView-Programm Bit für Bit ausgewertet werden und mit den entsprechenden LED verbunden. Die Übertragung des Statusbytes erfolgt auf die gleiche Weise. Zusätzlich ändert neben der Farbe der LED auch deren Beschriftung (Running und Stopped). Um das IntelliBike auf eine relativ einfache Art und Weise über die Telemetrie auszuschalten, senden wir nicht mehr nur ein „D“, um die Daten anzufordern, sondern, wenn es ausgeschaltet werden soll, ein „X“. Da die Kommunikation erhalten bleibt, erleuchtet die Telemetrie LED bei der nächsten Abfrage. Die Zellenspannungen und Zellentemperaturen werden gemäss Protokoll empfangen und dann Zeichen für Zeichen ausgewertet, anschliessend mit der jeweiligen Wertigkeit multipliziert und zum Schluss addiert. Damit auf der Telemetrie ersichtlich ist, ob überhaupt eine Kommunikation mit der IntelliBike-Elektronik besteht, wird nach der Datenanforderung geprüft, ob Daten empfangen wurden.

### 5.2.2 Struktogramm

Die Telemetrie sendet jede Sekunde ein „D“, um die Daten von der IntelliBike-Elektronik anzufordern, oder ein „X“ wenn der Notausschalter betätigt worden ist.

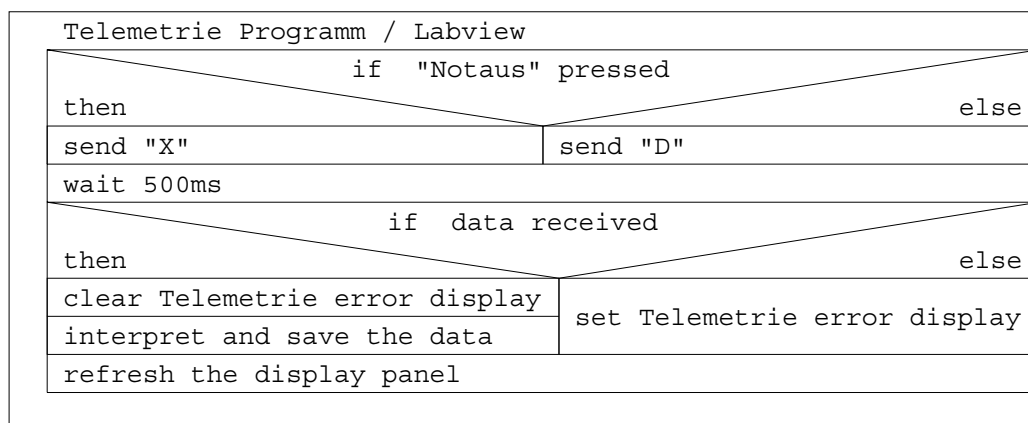


Bild 5.2.2.1 Struktogramm Telemetrie LabView

### 5.2.3 Telemetriesoftware zum RS232-Modul

Das Leitfahrzeug kommuniziert mit dem Labview-Telemetrieprogramm über ein Funkmodem mit dem IntelliBike. Das Modem des Bike ist an der RS232 Schnittstelle des QSM Modul (Queued Serial Module) des Mikrocontrollers angeschlossen. Die Routine wird beim jedem Empfangen oder Senden eines Bytes über den seriellen Bus aufgerufen. Empfängt der Controller ein „D“ oder „X“, wird der Hardwarefehler entsprechen behandelt, die Daten aufbereitet und ein Synchronisationsbyte geschickt. Von jetzt an beginnt die Übertragung der Daten gemäss dem erneuerten Protokoll. Das letzte Byte der Kommunikation beendet die Übertragung.

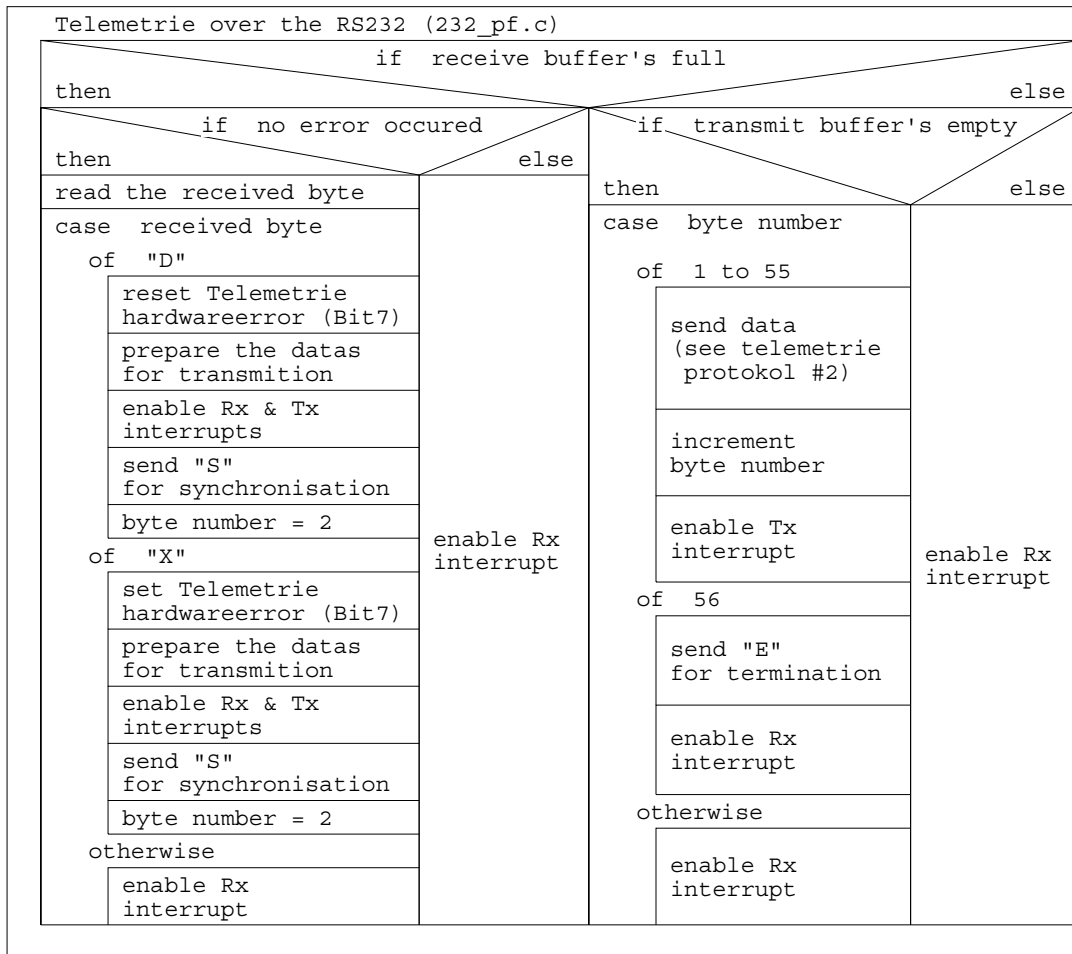


Bild 5.2.3.1 Struktogram Telemetrie RS-232 Modul

## 5.2.4 Protokoll Telemetrie

### 5.2.4.1 Protokoll 1

Dieses Protokoll verwendet das LabView-Programm, um die Daten von der IntelliBike-Elektronik anzufordern.

Zeichen	Bedeutung	Format
D	IntelliBike einschalten und Daten anfordern	ASCI-II
X	IntelliBike ausschalten und Daten anfordern	ASCI-II

Bild 5.2.4.1 Startbyte und dessen Bedeutung

### 5.2.4.2 Protokoll 2

Mit diesem Protokoll werden die Daten von der IntelliBike-Elektronik an das LabView-Programm geschickt. Bei jedem Wert wird zuerst die das Byte mit der grössten Wertigkeit übertragen.

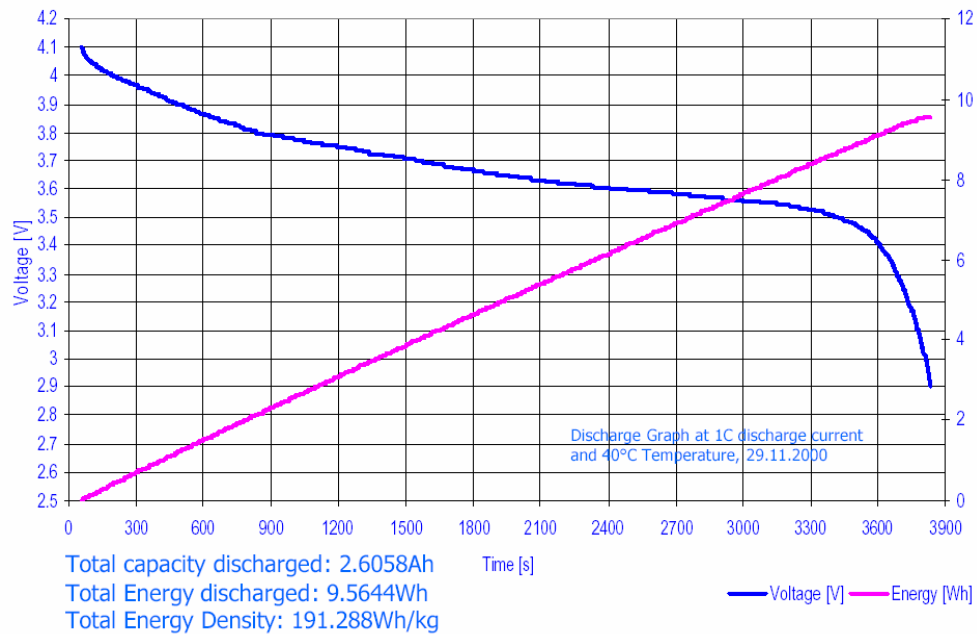
Byte Nr	Anzahl Byte	Zeichen	Bedeutung	Format
0	1	S	Daten Start	ASCII-II
1-4	4	00,00-99,99	Batteriespannung	ASCII-II
5-7	3	00,0-99,9	Phasenstrom	ASCII-II
8-10	3	000-999	Aussentemperatur	ASCII-II
11-14	4	0000-9999	Motorendrehzahl	ASCII-II
15-17	3	000-999	Motorentemperatur	ASCII-II
18-20	3	000-999	Minimale Zellentemperatur	ASCII-II
21-23	3	000-999	Maximale Zellentemperatur	ASCII-II
24-26	3	000-999	Elektroniktemperatur	ASCII-II
27-30	4	0,000-9,999	Minimale Zellenspannung	ASCII-II
31-34	4	0,000-9,999	Maximale Zellenspannung	ASCII-II
35-37	3	000-999	Test	ASCII-II
38-40	3	00,0-99,9	Batteriestrom	ASCII-II
41-44	4	000,0-999,9	Herzfrequenz	ASCII-II
45-48	4	000,0-999,9	Kurbeldrehzahl	ASCII-II
49-52	4	000,0-999,9	Kurbelmoment	ASCII-II
53	1		Hardwarefehler	Bitweise
54	1		Hardwarefehler	Bitweise
55	1		Status	Bitweise
56	1	E	Daten Ende	ASCII-II

*Bild 5.2.4.2 Dateninhalt: Insgesamt 55 Bytes*

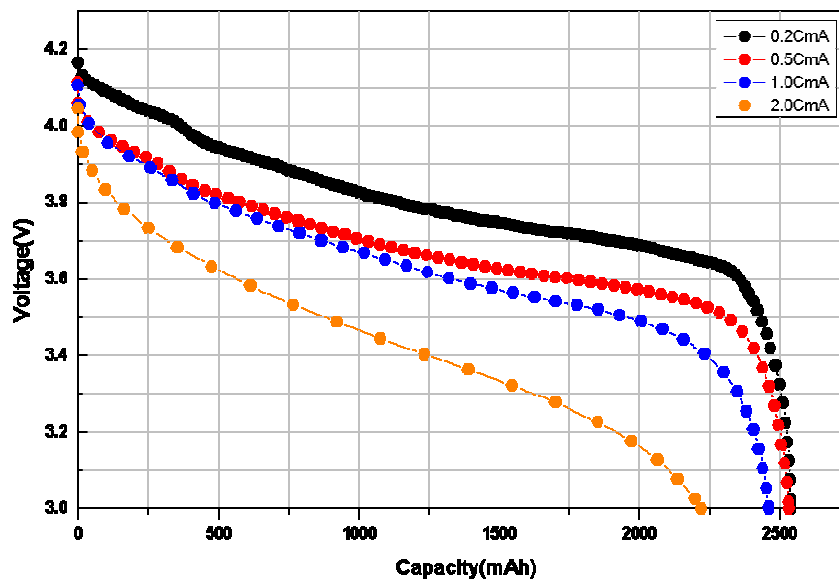
## 6 Messungen

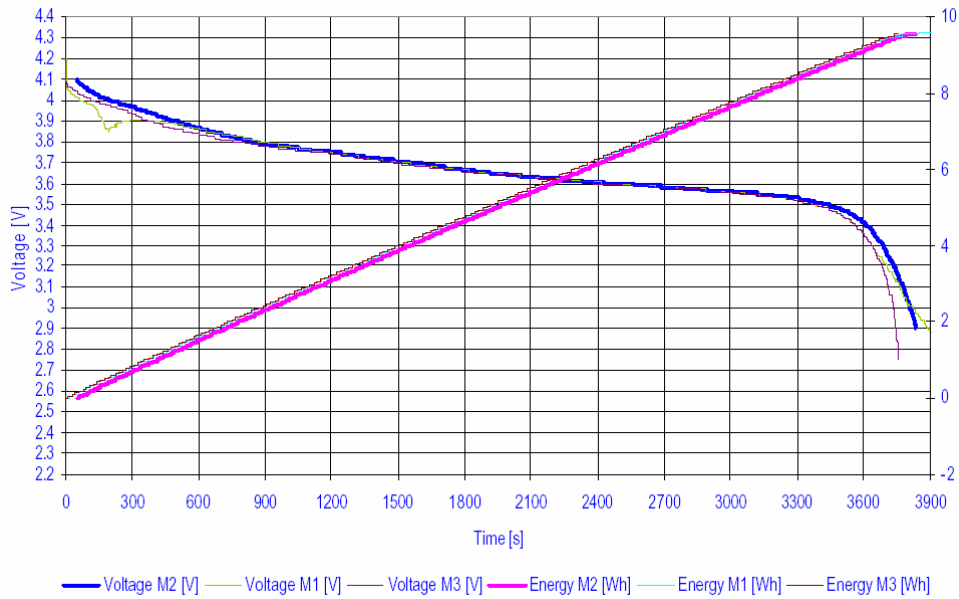
Im Folgenden sind die wichtigsten Messungen zusammengefasst:

### 6.1.1 Messung einer Einzelzelle



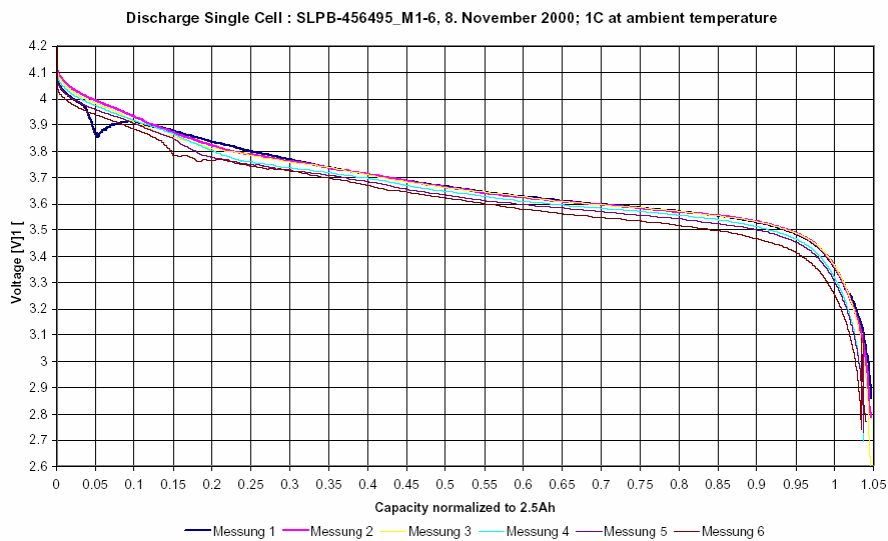
Die Messungen wurden alle bei 40°C im Ofen und bei 1C Entladestrom gemacht. Diese Messung einer Einzelzelle zeigt den höchsten realisierten Energieinhalt einer einzelnen Zelle. Dies wurde erreicht, nachdem die Zelle mehrfach auf 4.25V aufgeladen wurde. Im Vergleich dazu zeigt die nächste (offizielle) Messung von Kokam, dass die Kapazität bei Umgebungstemperatur trotz kleinerem Entladestrom (0.7C) nicht grösser wird.





Dies zeigt die gleiche Zelle bei drei verschiedene Entladungen (alle bei 40°C im Ofen und bei 1C Entladestrom). Erst gegen Ende der Entladung ist eine Variation des Spannungsverlaufes zu sehen.

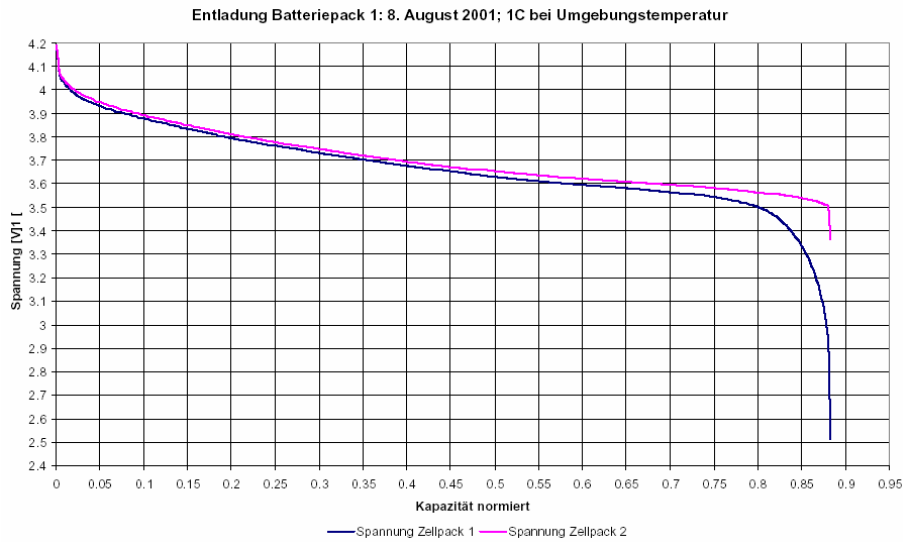
Diese Messung war äusserst wichtig, ob eine Aussage machen zu können, ob während des Rennens eine Ausgleichsladung erfolgen sollte.



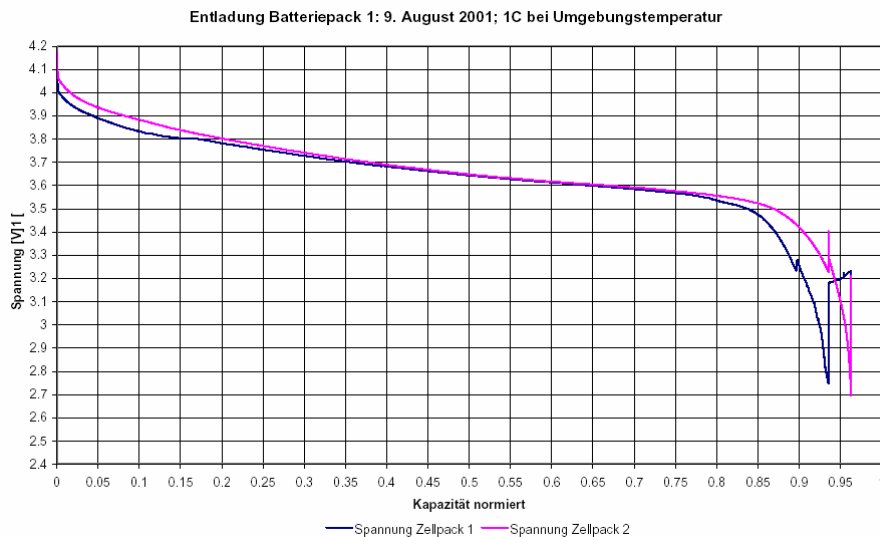
Hier die gleiche Darstellung nach weiteren 8 Entladungen und Ladungen

## 6.1.2 Messung eines Batterieblocks

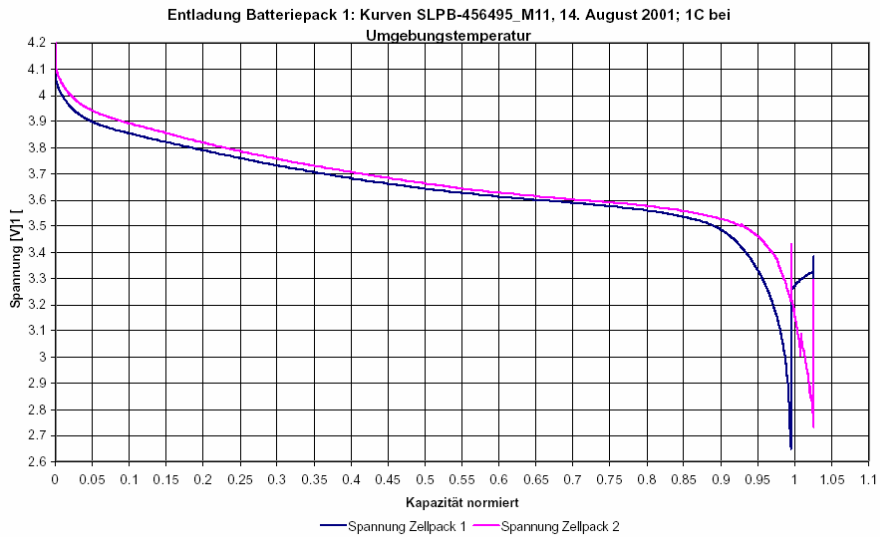
Bei der Messung des Batterieblocks wurde die Messung über die normierte Kapazität aufgezeichnet. Wieder wurde mit 1 C entladen, diesmal jedoch bei Umgebungstemperatur. Es wurde vor allem versucht, die Unsymmetrien der beiden Blöcke zu 7 Batterien zu untersuchen.



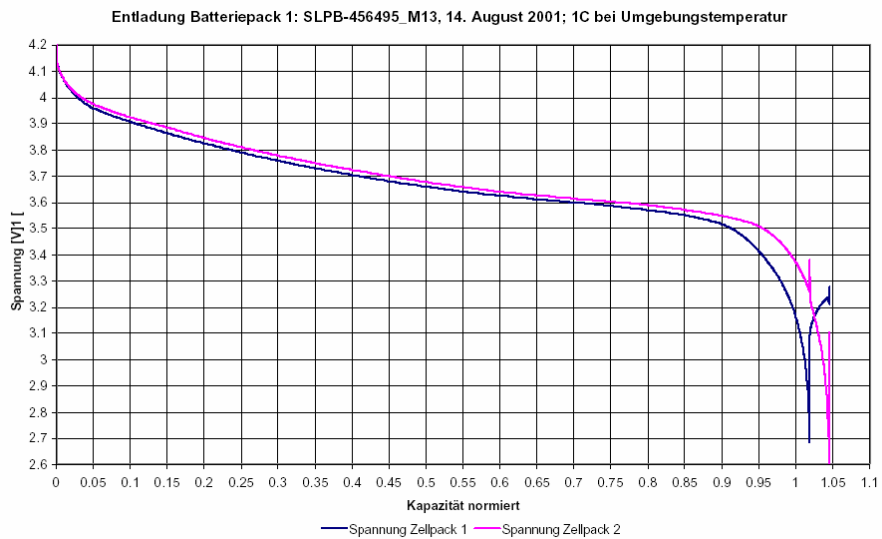
Bei zunehmender Zyklenzahl konnte festgestellt werden, dass eine Zunahme der gesamten Kapazität stattfand: zudem ist eine Kapazität von 95% der theoretischen möglichen Kapazität als sehr gut zu bezeichnen.



Es wurde versucht durch konsequentes Überladen auf 4.25V noch etwas mehr Energie zu speichern, was auch gelang. Allerdings sollte klar sein, dass dies auf Kosten der Lebensdauer geht und insofern nur für das Rennen sinnvoll war.



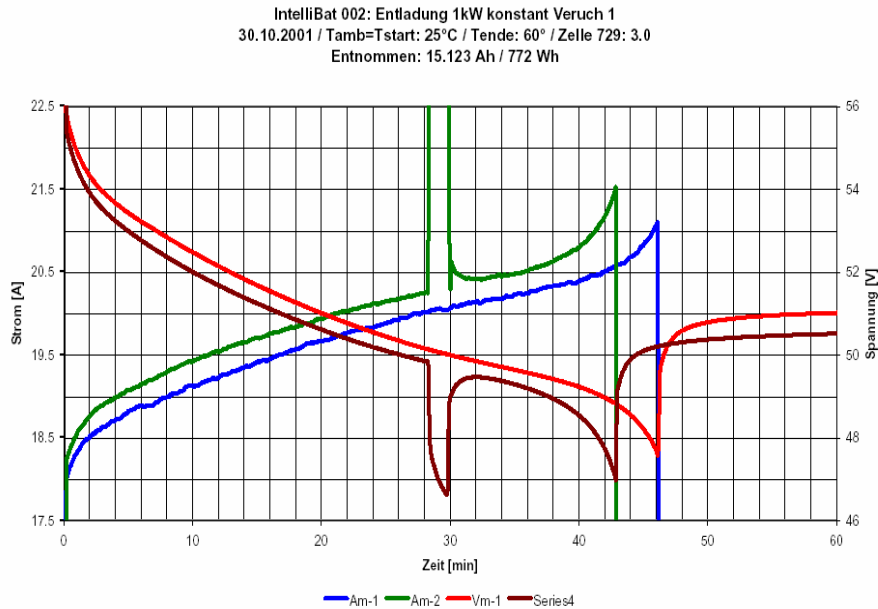
Maximal konnte etwa 102% der theoretischen Kapazität entnommen werden



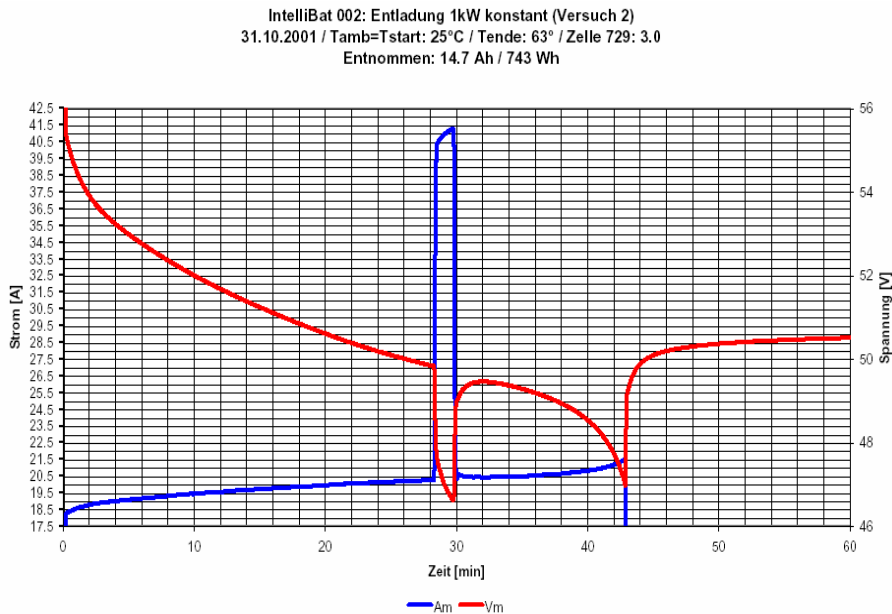
Im Rennen konnten diese Werte allerdings nicht mehr realisiert werden, da die Ladeeinrichtung zu primitiv ausgelegt war und ein längeres Nachladen aufgrund des Zeitdrucks nicht möglich war. Allerdings konnten die gewonnen Erkenntnisse beim Solarmobil von SolarMotions verwendet werden, welche den gleichen Batterietyp verwendeten.

### 6.1.3 Messung eines Intellipacks

Am Schluss wurde jede Zelle noch einmal mit einer Leistung von 1 kW entladen und der Ladevorgang erst abgebrochen, nachdem eine Temperatur von 60°C erreicht wurde:



Dabei wurde während 5 Minuten noch mit 40A weiter entladen. Dabei ging es vor allem um den Einsatz als Qualifikationsbatterien in Solarmobilen, eine Anfrage, die wir für ein amerikanisches Solarteam ausgeführt haben.



## 7 Gefahren

Schon während der Entwicklungszeit kam es einige Male zu gefährlichen Situationen, zum Glück jedoch immer nur einzelnen Zellen. Sobald die Systeme einmal komplett zusammengebaut waren und die Batterieüberwachung funktionierte, konnte der häufigste Fehlerfall, das Überladen vermieden werden.

Nach 2 Jahren zeigten sich allerdings einige Alterserscheinungen: So fielen mit der Zeit einige der Batterieüberwachungen aus: Meist war dies auf eine schlechte Verarbeitung des Prints zurück zu führen. Allerdings zeigte sich auch eine Schwachstelle in der Auslegung des Einschaltkreises: Falls dieser Ausfiel kam es zu einem dauernden Einschalten der Module, was nach einigen Wochen zu einem kompletten Entladen der Batterie führte. Da dies mit einem sehr kleinen Strom geschah war dies nicht weiter schlimm.

Ein Fehlmanipulation führt allerdings auch zur kompletten Zerstörung eines Batteriesatzes: Es wurde nur die Gesamtspannung der Batterie gemessen und auf eine genaue Überwachung mit LabView und dem Batteriemonitoring verzichtet. Da einige Zellen Defekt waren (komplett entladen) wurde ein erheblicher Teil der Zellen zu stark geladen. Durch die Erwärmung und das Überladen kam es in den Zellen zu lokalen Kurzschlüssen und diese wiederum erhitzen die Batterie noch mehr. Es kam schlussendlich zu einem thermischen Weglaufen und die Batterie fing Feuer. Nur dem beherzten Eingreifen eines Mitarbeiters ist es zu verdanken, dass es nicht zu einer grösseren Katastrophe kam. Im gelang die schwelende Batterie aus dem vierten Stock ins Freie zu bringen, wo schlussendlich das Feuer ganz ausbrach. Normale Feuerlöscher helfen in diesem Fall nichts, die herbeigerufene Feuerwehr musste Sand einsetzen.



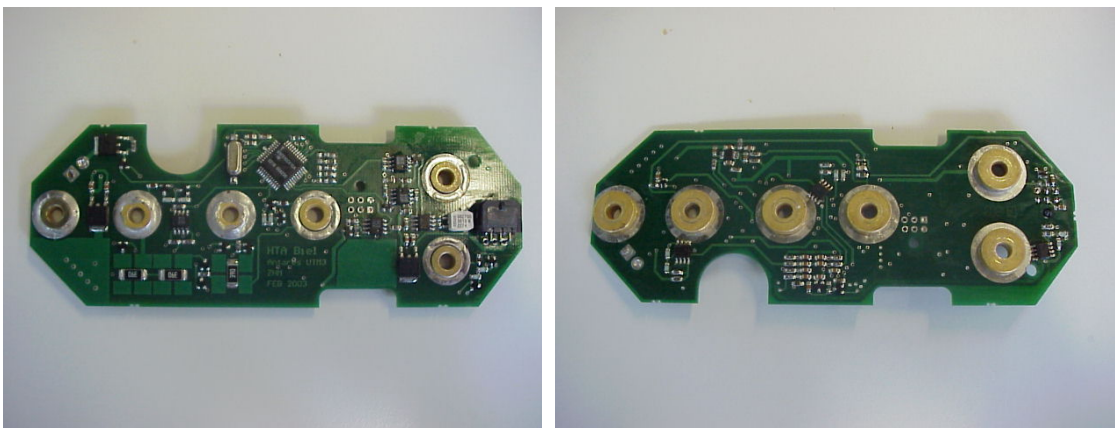
*Bild 7.1 Die vollständig zerstörte Batterie eingedeckt in Löschstaub. Zum Glück fiel dem Brand nur ein Wandtelefon am Ausgang zum Opfer. Der beste Beweis, dass ein ausgeklügeltes Batteriemangement bei Lithium Polymer-Batterien benötigt wird und auf keinen Fall durch menschliche Manipulation ausser Kraft gesetzt werden sollte.*

## 8 Kommerzielle Realisation

Eines der Ziele des Projektes war die kommerzielle Weiterentwicklung des Batteriesystems oder Teile davon. Obwohl direkt nach dem Rennen in Australien und dem damit verbundenen grossen Medieninteresse verschiedene Hersteller von E-Bikes, vorab in der Schweiz kontaktiert wurden, ist leider nichts daraus geworden.

Dafür konnte das Batterieüberwachungssystem (Print, CAN-Software) als Basis für das Batterie-Management-Systems (BMS) des Elektroseglers Antares eingesetzt werden. Einige Modifikationen, ein komplett umgestelltes Protokoll auf Basis des Can-Open Standards sind die Resultate dieser Weiterentwicklung.

Der Elektrosegler Antares von Lange Flugzeugbau verwendet insgesamt 72 Batterien der Saft-Li-Ionen Industriebaureihe, jeweils drei Zellen besitzen einen gemeinsamen Überwachungsprint. Somit kommunizieren insgesamt 24 Module über CAN zu einem gemeinsamen Master. Das Konzept der IntelliBike-Batterie konnte hier umgesetzt und verfeinert werden.



*Bild 7.1 Das Antares Modul*



*Bild 7.2 Die Saft Lithium Ionen Batterien und die vorgesehene Position des Antares Modul*

Lange Flugzeugbau sieht eine Jahresproduktion von 40 Motorsegelfliegern vor und hat nach eigenen Angaben noch vor dem Erstflug des 1 Serienfliegers schon 2 Jahresproduktionen verkauft. Damit ergeben sich Stückzahlen von 960 solchen Batteriemodulen.

## 9 Schlussfolgerungen

Die gemachten Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist mit auf dem Markt erhältlichen Li-Ionen Polymer Batterien intelligente Batteriepakete grösserer Leistung zusammenzustellen.

Eine wichtige Voraussetzung für den Betrieb eines solchen Paketes ist allerdings eine intelligente Überwachung, wie Sie für das Spirit of Bike auch realisiert wurde.

Die erzielten Resultate in Bezug auf Energie- und Leistungsdichte haben die Erwartungen erfüllt und betätigen die Tauglichkeit dieses Batterietyps auch für mobile Anwendungen.

Gelingt es den Preis solcher Systeme auf ein vernünftiges Preisniveau zu senken, so ist es möglich, dass der elektrische Antrieb in Strassenfahrzeugen wieder konkurrenzfähig wird.

Die Nutzbarkeit solcher Systeme im kommerziellen Umfeld konnte durch den Einsatz im Antares Elektromotorsegler nachgewiesen werden. Die HTA Biel steht weiterhin Interessenten in der Schweiz zur Verfügung um das in diesem Projekt gewonnene Know-How weiterzugeben.

Ich danke dem BfE ganz herzlich für die Unterstützung bei der Durchführung dieses Projektes.

Biel, 21.4.2002



Andrea Vezzini

## **10 Anhang:**

1. Spezifikationen IntelliBike
2. Rennstatistik

# Spirit of Bike: Ein Technologieprojekt der HTA Biel:

## Technische Spezifikationen

### Motor:

Typ:	Brushless-DC Permanentmagnet-Motor
Polpaarzahl:	14
Nenn Drehzahl:	570 U/min
Nennmoment:	17 Nm
Nennleistung:	1015 Watt bei 570 U/min (entspricht 68 km/h)
Nennstrom:	24.5 A <sub>eff</sub> / 30 A <sub>peak</sub> blockförmig kommutiert
Nennspannung:	35V <sub>peak</sub> (Leerlauf Phase - Phase)
Wirkungsgrad bei Nennleistung:	> 96%
Magnete:	Neodym-Eisen-Bor, Selten Erden Magnete Vacodym 633HR
Remanenzinduktion:	1.35T
Wicklung:	Stromdichte 2.3 A/mm <sup>2</sup>
Wicklungswiderstand:	15mOhm
Stranginduktivität:	161uH
Eisenblech:	Megaperm L
Eisenverluste:	0.2W/kg bei 1T und 50Hz

### Antriebselektronik

Typ:	Dreiphasen MOS-FET Wechselrichter
Nennspannung:	60 V
Nennstrom:	30 A (Wahlweise sinus- oder blockförmige Stromkommutierung)
Einschaltwiderstand:	4.25 mOhm bei 100 °C Junctiontemperatur
Schaltfrequenz:	Variabel: 16 – 48 kHz
Wirkungsgrad bei Nennleistung:	> 99%
Regelung:	Drehmomentregelung
Mikroprozessor:	Motorola MC68C376
Sicherheit:	Überspannungs- und Kurzschlussgeschützt, Temperaturkontrolliert
Schnittstellen:	4 Analog Input, 4 Digital input, 4 Digital Output
Kommunikation:	3 RS-232, 1 CAN 2.0B,
Integriertes Batteriemanagement:	CAN 2.0B Schnittstelle, Spannung, Strom, Temperatur
Integrierte Telemetrie-Elektronik:	2.4 GHz Band Funkmodem, 1000m Reichweite (offenes Gelände)

### Batterie:

Typ:	Kokam Lithium Polymer Batterie
Nennspannung:	52 V
Maximalspannung:	59.5 V
Minimalspannung:	38.5 V

**Batterie (Forts.):**

Nennkapazität:	17.5 Ah
Ladestrom max.:	12.5 A
Gewicht (nur Batterie):	5.1kg
Spez. Energiedichte:	> 175 Wh/kg
Vol. Energiedichte:	> 325 Wh/l
Entladetemperatur:	60 °C maximal, -25° minimal
Ladetemperatur:	40 °C maximal

**Bike:**

Form:	CAT Carbon-Monocoque;
Geometrie:	Sitzrohrwinkel 77°: Lenkkopf 72°
Rahmenhöhe:	verstellbar, Bereich 8cm
Lenker:	CAT Aero Handle Bars
Wechsel:	Mavic Mektronik
Übersetzung:	5 Gänge 60 : 11; 60 : 13; 60 : 15; 60 : 17; 60 : 18;
Distanz pro Kurbeldrehung max.:	10.827m
Hinterradumfang:	1.985m
Federung:	Full-Suspension:
Federung vorne:	CAT Headshock-System,
Federung hinten:	CAT monoblock Schwinge
Räder vorne:	CAT Three Spokes Wheel 26 Zoll MTB
Räder hinten:	full body carbon disk with integrated hub motor 26 Zoll MTB

**Gewichte:**

Rahmen:	2kg
Schwinge	950gr
Hinterrad (mit Motor):	10.5kg
Gabel (ohne Federung):	700 g
Federelement hinten:	400
Kurbel:	800gr
Vordere Federung:	2kg
Vorderrad (inkl. Pneu):	1.5kg
Lenker mit Bremsgriffen:	650gr
Windshield:	320gr
Batterie:	5.5kg
Motor:	9.7 kg,
Magnete:	300 gr
Stator und Wicklung (aktiver Teil):	5.58 kg
Leistungselektronik:	450gr

**Kontaktadressen:**

Gesamtleitung / Elektronik / Motor: Dr. Andrea Vezzini  
Labor für Industrieelektronik  
HTA Biel  
Quellgasse 21  
2502 Biel  
Tf. +41 32 321 63 72  
Fax +41 32 321 65 72  
Email: [andrea.vezzini@hta-bi.bfh.ch](mailto:andrea.vezzini@hta-bi.bfh.ch)

Bike: Ruedi Kurth  
CAT Carbon Bikes  
Länggass 51  
3292 Buswil  
Tf. +41 32 384 22 89  
Fax +41 32 384 11 48  
Internet: <http://www.catbikes.ch/>

Vezzini, 1.9.2001 (Rev. 1)

## Rennstatistik

Gefahrene Kilometer:	3002.3 km
Anzahl Velos pro Einsatz:	2
Totale Anzahl Velo:	4
Anzahl Fahrer:	10
Anzahl gefahrene Kilometer pro Velo:	1501.15 km
Effektive Fahrzeit <sup>1</sup> :	45 h 34 min
Durchschnittsgeschwindigkeit:	65.89 km/h
Anzahl Teamwechsel:	75
Durchschnittliche Abschnittslänge:	40.03 km
Durchschnittliche Einsatzdauer:	36 min 27 sek
Spitzengeschwindigkeit:	100.2 km/h
Längste Tagesetappe:	673.2 km
Längste Abschnittslänge <sup>2</sup> :	60.3 km
Höchster Etappendurchschnitt:	82.18 km/h
Längste Einsatzdauer <sup>3</sup> :	1 h 20 min
Gesamtenergieverbrauch:	54.6 kWh
Energieverbrauch pro Einsatz:	728 Wh
Anzahl Störungen <sup>4</sup> :	18
Anzahl platter Reifen <sup>5</sup> :	1

---

<sup>1</sup> Nach Abzug der Medienstops und Teamwechsel

<sup>2</sup> Anlässlich des Starts aus Darwin: 60 Minuten mit kleiner Geschwindigkeit

<sup>3</sup> dito

<sup>4</sup> Störungen: Führt zu Wechsel des Velos oder der Batterie

<sup>5</sup> Nach Ende der Etappe im Fahrerlager