DTC 131 Maueraufprall mit einem Hochvoltfahrzeug:
Toyota Prius I vom 10.11.2011

Dynamic Test Center
Centrum für Dynamische Tests
Centre de Tests Dynamiques

Erstellt am: 14. März 2013
Datei: Crash_HochvoltfahrzeugToyota Prius_DTC131.docx
Autoren: Raphael Murri,
Andreas Meier

1 Einleitung

Lithium-Ionen-Batterien finden Einzug in den Automobilbereich. So sind bei den neusten Elektro- und Hybridfahrzeugmodellen (Mitsubishi i-Miev, Nissan Leaf, Opel Ampera, Chevrolet Volt, Tesla Roadster) bereits Lithium-Ionen Batterien eingebaut. Es stellt sich die Frage der Sicherheit dieser Technologie. Wie verhalten sich diese Zellen bei einem Fahrzeugbrand oder bei einem Crash?
Zur Beantwortung der Fragen bezüglich der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien wurden im ersten Teil der Arbeit zwei Testverfahren angewendet. Das erste Verfahren bestand aus einem Nail-Penetration-Test, wobei ein leitender Stahlnagel durch eine vollgeladene Zelle geschlagen wurde. Das zweite Verfahren beinhaltet den sogenannten Fire-Test. Hier wurde eine vollgeladene Zelle durch brennendes Benzin erhitzt.
Im zweiten Teil der Arbeit wurde auf die Sicherheit eines älteren Hybridfahrzeuges eingegangen. Der Anprallversuch mit einem Toyota Prius I der 1. Generation erfolgte mit 50.9 km/h, rechtwinklig und voller Überdeckung auf einen starren Betonblock. Mit dem Versuch soll einerseits aufgezeigt werden, dass Fahrzeuge mit alternativen Antrieben einen gleichwertigen Insassenschutz aufweisen wie Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben. Andererseits soll die Sicherheitskette von den eingebauten Nickel-Metallhydrid-Batterien im Crash bis zur Hochvoltabschaltung aufgezeigt werden. Als Insassen waren vorne zwei angegurtete HIII 50% Dummies auf dem Fahrer- und Beifahrersitz eingesetzt. Das Fahrzeug wurde im Fahrzustand mit laufendem Motor getestet.

2 Zusammenfassung

Bei Lithium-Ionen-Batterien gibt es grosse Unterschiede bei der Sicherheit der Zellen. Eine generelle Aussage, dass diese Batterien unsicher sind, kann nicht gemacht werden. Jede Zellkonstruktion hat bei einem Ereignis Vor-und Nachteile. So schneiden Rundzellen bei Feuer infolge des hermetisch dichten Zellkörpers gegenüber der Coffe-Bag-Bauweise schlechter ab. Jedoch sind sie von der Konstruktion her gegen äussere Einflüsse resistenter. Je nach eingesetzter Technologie und Kühlung innerhalb des Batteriepakets kann ein thermisches Weglaufen der Zellen verhindert werden. Die in den Lithium-Ionen-Batterien enthaltene Säure kann bei grösseren Batterien zu einem Gefahrenpotential für Insassen und Retter werden. Ausserdem stellt auch die hohe Spannung (insbesondere bei einem Versagen des Notabschaltsystems) ein Gefahrenpotential dar.
In Fahrzeugen mit alternativen Antrieben müssen meistens zusätzliche Komponenten wie Antrieb oder Akkus integriert werden, welche tendenziell zu einer Erhöhung des Fahrzeuggewichtes führen. Zudem wurde bei der Einführung neuer Technologien für die Zulassung der Anforderungskatalog reduziert. Diese

Eine Unternehmung der Privatwirtschaft und der Berner Fachhochschule, Fachbereich Automobiltechnik

Rahmenbedingungen führten dazu, dass Einschränkungen beim Insassenschutz in Kauf genommen werden mussten. Beim Crashtest mit dem Toyota Prius I lief alles nach Plan. Die Notabschaltung der Hochvoltbatterie reagierte unmittelbar nach dem Aufprall und die Temperatur der Akkumulatoren ist auch nach dem Crashtest stabil geblieben. Jedoch muss beachtet werden, dass auch bei erfolgreicher Deaktivierung des Hochvoltsystems eine kleine Restenergie durch die im Motorsteuergerät enthaltenen Kondensatoren erhalten bleibt. Diese Energie entlädt sich nur langsam über den parallel geschalteten hochohmigen Widerstand (innerhalb 10 Minuten). Durch die solide Kapselung des Motorsteuergerätes und damit auch der Kapazitäten, sowie dem doppelt isolierten Verkabelungssystems, war jedoch das Gefahrenpotential für die Insassen und die Retter in diesem Falle nicht höher als bei einem konventionell angetriebenen Fahrzeug. Bezüglich der Insassenbelastungen hat der durchgeführte Crashtest aufgezeigt, dass der Insassenschutz bei heutigen Serienfahrzeugen mit alternativen Antrieben gleichwertig zu Fahrzeugen mit konventionalen Antrieben ist.

Fazit: Der Insassenschutz ist bei Serienfahrzeugen mit alternativen Antrieben gleichwertig zu demjenigen herkömmlicher Fahrzeuge. Zudem kann das von modernen Akkumulatoren ausgehende Risiko im ähnlichen Rahmen wie bei konventionellen Antriebskonzepten eingestuft werden.

3 Gefahren nach einem Unfall

Die Gefahren für die Insassen, Retter und Drittpersonen können in fünf verschiedene Gefahrenkategorien eingeteilt werden:

- Elektrische Gefahren
- Chemische Gefahren
- Brand
- Explosion
- Organisatorische Gefahren

3.1 Elektrische Gefahren

Die hohe Spannung und hohen Ströme des elektrischen Systems birgt im Fehlerfall die Gefahr eines elektrischen Durchschlages. Auch wenn die Sicherheit des Batteriemanagements anspricht, so ist selbst nach dem Entkoppeln der Batterie in den im Motorsteuergerät enthaltenen Kapazitäten eine gefährliche Restenergie vorhanden.

3.2 Chemische Gefahren

Der in den Lithium-Ionen-Batterien enthaltene flüssige Elektrolyt wirkt ätzend und kann in Verbindung mit Wasser Flusssäure bilden. Im Fehlerfall kommt es bei defekten Zellen zur Ausgasung von Schadstoffen sowie zur Rauchgasentwicklung.

3.3 Brand

Der in den Lithium-Ionen-Batterien enthaltene Elektrolyt ist leicht brennbar und kann bei Überschreiten der kritischen Temperatur wärmeabgebend (exotherm) reagieren. Bei sehr hohen Temperaturen kann es zu Metallbränden kommen.

3.4 Explosion

Im Brandfall besteht bei Rundzellen durch die hermetisch dichte Kapselung ein beschränktes Expansionsvolumen. Fehlt eine Überdrucksicherung, so besteht im Fehlerfall eine Berstgefahr.

3.5 Organisatorische Gefahren

Fehlen geeignete Sicherungsmassnahmen, Schutzmassnahmen und Rettungskonzepte, sind nach einem Unfall auch die Rettungskräfte in Gefahr. Unklare Verantwortlichkeiten und fehlende Fachkenntnisse steigern das Gefahrenpotential zusätzlich.

4 Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien

Zu Testzwecken standen drei unterschiedliche Arten von Lithium-Ionen-Batterien zur Verfügung:

1. Lithium-Eisenphosphat [LiFePO4] [1] (neuwertig)
2. Lithium-Cobaltdioxid [LiCoO2] [2] (gebraucht, ca. 4 Jahre alt)
3. zwei Produkte auf der Basis Lithium-Polymer [LiPo] [3] (neuwertig)

Zwei Testverfahren wurden angewandt. Zum einen wurde ein Nail-Penetration-Test (Nageltest) durchgeführt, wobei ein leitender Stahlnagel durch eine vollgeladenen Zelle geschlagen wurde. Zum anderen wurde ein Fire-Test (Feuertest) ausgeführt, bei welchem eine vollgeladene Zelle durch brennendes Benzin erhitzt wurde. Die Tests wurden jeweils zwei Mal durchgeführt.

Um einen maximale Energiespeicherung zu garantieren, wurden die Zellen vor dem Test vollständig geladen. Damit wurde ein Crash oder ein Fahrzeugbrand nach einer Vollladung simuliert.

4.1 Nail-Penetration-Test

Mittels eines kleinen Krans wird ein Gewicht in Position gebracht. Dieses kann aus sicherer Distanz ausgelöst werden. Die Zelle ist in einem Schraubstock eingespannt, um ein Verrücken des Prüflings zu verhindern. Der Prüfnagel wird durch das Fallgewicht in die Zelle geschlagen. Das Personal befindet sich beim Test hinter dem Sicherheitsglas.

Abb. 2 Versuchsaufbau für den Nail-Penetration-Test

[1] Zellspannung 3.3 V, Kapazität 2.3 Ah, Hersteller A123

[2] Zellspannung 3.7 V, Kapazität 2 Ah, Hersteller UNBEKANNT

[3] Zellspannung 3.7 V, Kapazität 40 Ah, Hersteller Kokam
Batteriespannung 11.1 V, Kapazität 1.35 Ah, Hersteller DN Power

4.1.1 Verhalten der Lithium-Eisenphosphat Zelle

Die Zelle verhält sich nach dem Einschlag des Nagels unkritisch. Der enthaltene Elektrolyt reagiert mit der in der Umgebungsluft enthaltenen Feuchtigkeit. Es kommt zu einem Schäumen und Auslaufen von Flüssigkeit sowie zu einer leichten Rauchbildung. Die Zelle bleibt jedoch während der gesamten Zeit thermisch stabil.

Abb. 3 Nail-Penetration-Test LiFePO4-Zelle

Abb. 4 Ausgelaufene Zelle

4.1.2 Verhalten der Lithium-Cobaltdioxid Zelle

Die Zelle verhält sich nach dem Einschlag des Nagels unkritisch. Der enthaltene Elektrolyt reagiert mit der in der Umgebungsluft enthaltenen Feuchtigkeit. Gegenüber der Lithium-Eisenphosphat Zelle kommt es diesmal nicht zu einem Auslaufen von Flüssigkeit.

Abb. 5 Nail-Penetration-Test LiCoO2-Zelle

Abb. 6 Kein Auslaufen nach dem Durchschlag

4.1.3 Verhalten der Lithium-Polymer Zellen

LiPo-Zelle von DN Power

Die Zelle bläht sich kurz nach dem Einschlag auf und es kommt zu einem Entweichen von Rauchgas. Die Zelle reagierte bei dem Kurzschluss (< 0.1 Ω) heftig, jedoch kam es zu keiner Stichflamme.

Abb. 7 Nail-Penetration-Test LiPo-Zelle von DN Power

LiPo-Zelle von Kokam

Wie bei den vorherigen Zellen verhält sich auch dieser Zelltyp zu Beginn unauffällig. Jedoch kommt es nach wenigen Minuten zu einer leichten Rauchbildung sowie einer kleinen Flamme. Ab diesem Zeitpunkt dauert es nur noch wenige Sekunden bis zum Vollbrand. Die Zelle bläht sich auf und der enthaltene Elektrolyt reagiert heftig.
Beim zweiten Versuch reichte die Temperatur nicht aus, um einen Vollbrand mit Stichflamme auszulösen. Die kleine Flamme am Durchschlagspunkt wurde durch einen Windstoss ausgelöscht. Es kam lediglich zu massiver Rauchbildung und einer Zersetzung des Zellpolymers.

Abb. 8 Nail-Penetration-Test LiPo-Zelle von Kokam

4.1.4 Fazit des Nail-Penetration-Test

Die LiFePO4-Zelle ist wie erwartet am sichersten, da sie die höchste thermische Stabilität aller untersuchten Batterie-Technologien aufweist. Die LiCoO2-Zelle war wohl zu alt und konnte die Energie nicht liefern um eine kritische Temperatur aufzubauen. Eine Temperaturmessung ergab lediglich Werte zwischen 80 ^{0}C bis 100 ^{0}C. Dies ist für das thermische Weglaufen der Zelle nicht ausreichend. Es ist aber bekannt, dass bei hohen Temperaturen und bei einer Zellspannung über 4.4 V das Material eine starke exotherme Reaktion aufweist. Die LiPo-Zelle von Kokam konnte beim ersten Versuch genügend Energie für einen Vollbrand aufbringen, die Zelle hat nach wenigen Minuten Rauch abgegeben. Bis zum anschliessenden Vollbrand vergingen nur wenige Sekunden. Bei den LiPo-Zellen von DN Power hingegen konnte das thermische Weglaufen trotz Kurzschluss nicht provoziert werden.

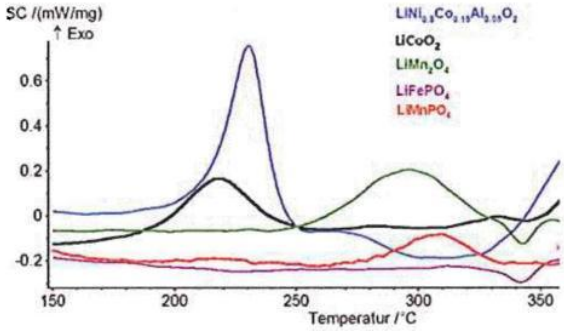

Abb. 9 Exotherme Energie als Funktion der Temperatur von unterschiedlichen Lithium-Techologien[4]

Bei den Versuchen gilt allgemein zu beachten:

- Ein Nagel ist für die Zelle wesentlich belastender als mehrere Durchschläge, da es dabei zu einem grösseren lokalen Kurzschlussstrom und damit auch grösserer Erwärmung kommt.

- Der Nagel muss zwingend gut leiten. Die Kurzschlussleistung ist dann maximal, wenn der Nagel den gleichen Widerstandwert wie die Zelle besitzt.

- Die Umgebungsbedingungen spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Wind und Konvektion kühlen die Zelle soweit ab, dass ein thermisches Weglaufen verhindert werden kann.

[4] BFH-Ti, Lithium-Ionen Batterie im Flurförderfahrzeug, Präsentation vom Nov. 2008, Dr. Sc. Andrea Vezzini

4.2 Fire-Test

Mittels Bleifrei-95-Treibstoff wurde ein kleines Feuer entfacht. Damit wird der Brand eines Hybridfahrzeuges simuliert, bei dem sich austretendes Benzin entzündet hat. Die Flammen erreichen eine Temperatur von geschätzten 600 ^{0}C bis 800 ^{0}C.

Die Einhaltung eines Sicherheitsabstands und geeignete Schutzmassnahmen (z.B. ein Sicherheitsglas) sind bei diesem Versuch zwingend, da durch die Explosion Personen- und Schachschaden entstehen kann.

Abb. 10 Versuchsaufbau Fire-Test

4.2.1 Verhalten der Lithium-Eisenphosphat Zelle

Die Zelle benötigt zwischen 8 und 10 Minuten um eine kritische Temperatur zu erreichen. Danach gibt es eine leichte Rauchentwicklung. 2 Minuten später sprengte sich die Abdeckung am Pluspol mit einem lauten Knall ab, wobei die Hülle mehrere Meter weit flog. Das Kathoden- und Anodenmaterial wurde dabei weiträumig verteilt.

Abb. 11 Fire-Test LiFePO4-Zelle

Abb. 12 Aluminium- und Kupferfolie

4.2.2 Verhalten der Lithium-Cobaltdioxid Zelle

Gegenüber der Lithium-Eisenphosphat Zelle benötigte dieser Zelltyp nur wenige Minuten um eine kritische Temperatur zu erreichen. Dabei entwichen Elektrolytgase, welche sich spontan entzündeten. Der Überdruck konnte durch einen Sicherheitsmechanismus entweichen. Es kam bei beiden Versuchen zu keiner Explosion der Zelle selbst.

Abb. 13 Fire-Test LiCoO2-Zelle

4.2.3 Verhalten der Lithium-Polymer Zellen

Nach wenigen Minuten blähten sich die Zellen auf, wobei Elektrolytgase austraten und sich spontan entzündeten. Bedingt durch die Konstruktion der Zelle selbst kann es hierbei nicht zu einem unzulässigen Überdruck innerhalb der Zelle kommen. Die Verpackung öffnet sich bereits bei leichtem Überdruck selbstständig.

Abb. 14 Fire-Test der LiPo-Zelle von DN Power

4.2.4 Hochtemperatur-Test mittels Schweissbrenner

Um noch höhere Temperaturen zu erreichen und so einen allfälligen Metallbrand zu provozieren wurde ein Schweissbrenner eingesetzt. Dabei wurden jeweils die beschädigten Rundzellen vom Nail-Penetration-Test verwendet, um so eine Explosion der Zellhülle auszuschliessen.

Abb. 15 Versuchsaufbau Hochtemperaturtest

Abb. 16 Hochtemperatur-Test LiPo-Zelle von DN Power

Abb. 17 Zelle nach Test

Bei diesem Versuch kam es zu keinem Metallbrand. Der enthaltene Elektrolyt reagierte, wobei es zu einer Rauchentwicklung kam. Wenig später schmolzen die einzelnen Lagen infolge der hohen Temperaturen.

Abb. 18 Zellmaterial der LiPo-Batterie nach Hochtemperatur-Test

Auch diese Zelle verhielt sich nicht aussergewöhnlich. Der Zellkörper wurde mittels des Schweissbrenners geöffnet, wobei das Metall schmolz. Auch hier kam es zu keinem Metallbrand, sondern lediglich zu einem Nachglühen der Zelle.

Abb. 19 Zellmaterial der LiCoO2-Zelle nach Hochtemperatur-Test

4.2.5 Fazit der Fire-Tests

Rundzellen schnitten infolge des hermetisch dichten Zellkörpers schlechter ab als die Coffee-Bag-Zellen. Falls keine Überdrucksicherung eingebaut ist, explodiert die Rundzelle nach etwa 5-10 Minuten. Daher ist beim Fire-Test ein Sicherheitsabstand zum Prüfpersonal zwingend einzuhalten.

Bei den Lithium-Cobaltdioxid-Zellen ist eine Überdrucksicherung eingebaut. Der Überdruck konnte so abgebaut werden, wobei die Elektrolytgase entwichen und dabei Feuer fingen. Es kam zu keiner Explosion der Zelle selbst. Die LiPo-Zellen blähen sich über dem Feuer auf, wobei Elektrolyt-Gase austreten und sich Entzünden. Ein Metallbrand konnte selbst mit einem Gasbrenner nicht erzwungen werden.

4.3 Schlussfolgerungen zur Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien

Eine generelle Aussage, dass Lithium-Batterien generell gefährlich sind, kann nicht gemacht werden.Zwischen den einzelnen Batterie-Technologien gibt es markante Unterschiede. Die Sicherheit der Zelle ist nicht nur von der verwendeten Technologie abhängig, sondern auch vom Gesundheitszustand (state of health; SOH) sowie dem Ladestand (state of charge; SOC) der Zellen. Folgende allgemeinen Aussagen können trotzdem gemacht werden:

- Rundzellen, welche hermetisch abgekapselt sind, müssen eine Überdrucksicherung enthalten um einer Explosion des Druckkörpers vorzubeugen.
- Externe Massnahmen (z.B. ein Battery Management System) können eine schlechte Batterie nicht sicherer machen, sondern nur für die Einhaltung der Grenzparameter sorgen.
- Sichere Zellen führen nicht zwangsläufig zu einem sicheren Batteriepaket. Eine einzelne Zelle kann die Reaktionswärme relativ gut an die Umgebung ableiten, so dass die kritische Temperatur nicht überschritten wird. Dies ist in einem Verbund in einem Batteriepacket nicht gewährleistet. Darum ist es auch möglich, mit sicheren Zellen ein unsicheres Batteriepacket zu konstruieren.

5 Crashtest mit Toyota Prius I

Beim getesteten Fahrzeug handelt es sich um einen Toyota Prius I der ersten Generation. Es wurde in den 90er-Jahren direkt aus Japan importiert, wobei es sich um ein rechtsgelenktes Fahrzeug handelt. Im Fahrzeug wurden 240 Nickel-Metallhydrid Batterien (NiMH) mit einer Kapazität von 6 Ah verwendet. Der Vorteil der NiMH-Batterien liegt darin, dass diese gegenüber den Lithium-Ionen-Batterien sicherer sind und grössere Erfahrungen im Umgang mit dieser Technologie vorhanden sind.

5.1 Testfahrzeug

Das Testfahrzeug wurde in Anlehnung an die FMVSS 208 mit 50 km/h bei voller Überdeckung unter 90° gegen eine starre Barriere gefahren. Aus Sicherheitsgründen wurde der Crashtest mit dem Hochvoltfahrzeug outdoor durchgeführt.

Marke:	Toyota
Typ:	Prius I
Fahrgestell-Nr.:	NHW100008386
Leergewicht:	1260 kg
Betriebsgewicht:	1437 kg
Jahrgang:	1998
Dummy:	2 x 50% HIII vorne Fahrer- und Beifahrersitz, angegurtet
Zuladung:	-
Bemerkungen:	Heckklappe wurde demontiert, um nach dem Crash den Zugang zum Akkutrennschalter sicher zu stellen.

Abb. 20 Toyota Prius I der 1. Generation im Anprallpunkt

Die Hochvoltbatterie war, bedingt durch die lange Standzeit und die hohe Selbstentladung der NiMH-Technologie, tiefentladen. Um den Motor zu starten braucht es jedoch das Hochvoltsystem. Die Batterie konnte langsam wieder auf die Nennspannung von 288 V gebracht werden, wodurch sich und der Motor wieder starten liess. Die Fahrzeugbatterie wurde so durch das interne System wieder vollständig geladen. Die Funktionsfähigkeit wurde bei einer kleinen Testfahrt geprüft. Dabei wurden folgende Fahrmodi getestet:

Abb. 21 Fahrzeugmonitor mit Energieflussdiagramm

- Beschleunigung mit Unterstützung des Elektromotors
- Bremsen mittels Elektromotor (Rekuperation)
- Reines Elektrisches Fahren

Das Hybridsystem war somit zum Zeitpunkt des Crash-Tests vollständig einsatzbereit.

Für den Crashtest wurde zusätzlich eine Betriebszustandslampe an das Hochvoltsystem angeschlossen, welche bei eingeschaltetem Hochvoltsystem leuchtet. Die LED wurde gut sichtbar beim hinteren Fenster rechts montiert. So konnte der Zustand des Hochvoltsystems aus sicherer Distanz beobachtet werden.

Abb. 22 LED zur Hochspannungsanzeige

Alle im Automobil befindlichen Hochvoltleitungen sind orange eingefärbt. Bei Arbeiten am Hochvoltsystem muss zwingend der orange Wartungsstecker im Fahrzeugheck gezogen und danach die Spannungsfreiheit festgestellt werden. Dadurch wird die Fahrzeugbatterie im inneren aufgetrennt, wodurch sich kein Stromkreis mehr schliessen kann.

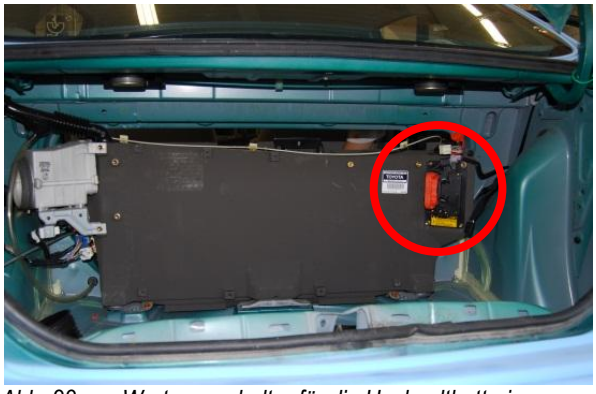
Abb. 23 Wartungsschalter für die Hochvoltbatterie

Nachfolgend ist die offene Hochvoltbatterie zu erkennen. Links unten im Alugehäuse ist das Batteriemanagementsystem (BMS) eingebaut (1). Im zentralen Bereich befindet sich der Ansaugstutzen (2) für die Batteriekühlung mit den Ventilatoren (3). Im Bereich rechts sind unterhalb der weissen Abdeckung die beiden Hochvoltrelais (4) zu finden. Sie trennen die Fahrzeugbatterie im Ruhezustand und bei einem Unfall beidseitig (Anode und Kathode). Im schwarzen Gehäuse eingekapselt befinden sich die NiMH-Batterie-Zellen (5).

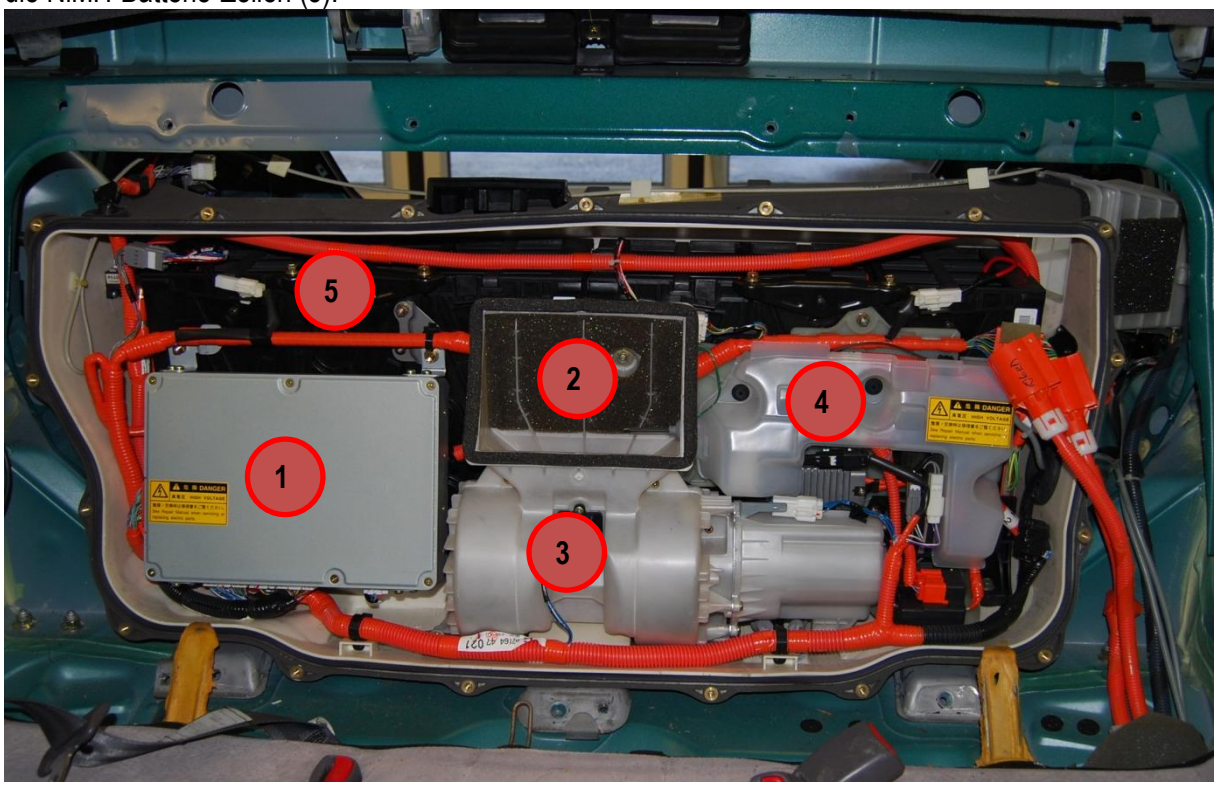

Abb. 24 Offene Hochvoltbatterie

5.2 Innsassen

Auf dem Fahrersitzplatz rechts war ein HIII 50% Dummy mit Indummy-Messtechnik und auf dem Beifahrersitzplatz ein HIII 50% Dummy mit konventioneller Messtechnik eingesetzt.

Abb. 25 Beifahrerseite mit HIII 50% ATD

Abb. 26 Fahrerseite mit HIII 50% ATD

Dummies und Messtechnik wurden für eine Schnelldemontage nach dem Crashtest entsprechend positioniert.

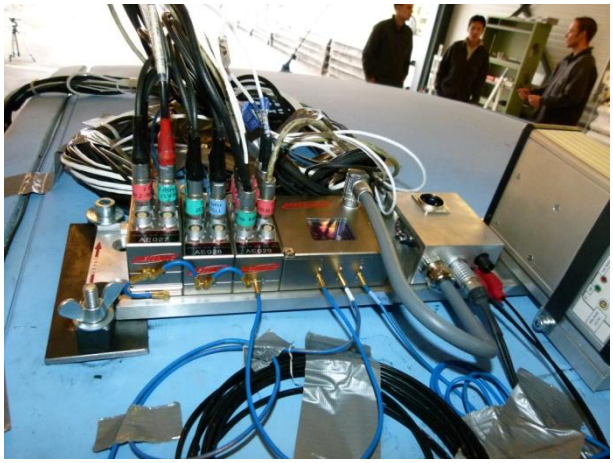

Abb. 27 Gateway und Logger auf dem Fahrzeugdach

5.3 Crashverlauf

14 ms nach Erstkontakt wird der Fahrerairbag und gezündet.

Abb. 28 Fahrer- und Beifahrerairbag gezündet

Das Rückhaltesystem von Gurt über Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer und Airbag hat fahrerseitig wie gewünscht funktioniert.

Abb. 29 Rückhaltesystem in Aktion, Fahrerseite

Auch beifahrerseitig konnten keine Mängel oder Defizite am Rückhaltesystem festgestellt werden.

Abb. 30 Rückhaltesystem Beifahrerseite

Der Toyota Prius I hat beim durchgeführten Crashtest gut funktioniert. Die Knautschzone ist deformiert, während die Fahrgastzelle keine übermässigen Deformationen aufweist. Die Rückhaltesysteme auf Fahrer- und Beifahrersitzplatz haben tadellos gearbeitet.

Abb. 31 Toyota Prius I nach dem Crashtest

Nach der Notabschaltung verbleibt noch eine Restspannung durch die innerhalb des Motorsteuergeräts erhalten Kondensatoren, welche sich nur langsam über einen hochohmigen Widerstand entlädt. Im schlimmsten Fall dauert dieser Entladevorgang 10 Minuten. Dieser Stromkreis kann auch nicht durch das Ziehen des orangen Wartungssteckers geöffnet werden. Beim Crash-Test leuchtete aus diesem Grund die Betriebszustandslampe einige Sekunden weiter. Das Erlöschen der Lampe zeigte danach eindeutig an, dass die Batterie erfolgreich entkoppelt wurde und das Sicherheitssystem des Fahrzeuges angesprochen hatte.

Abb. 32 Trotz der Notabschaltung des Hochvoltsystems war eine Restspannung kurz nach dem Crash vorhanden

5.4 Messdatenauswertung und Insassenbelastungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Messdaten und Auswertungen am Fahrzeug aufgelistet.

v0:	50.9 km/h
Stosszeit	74 ms
$a_{x\ min}$	-50.4 g
$a_{x\ mittel}$	-20.9 g
$a_{res\ max}$	59.1 g
$a_{res\ mittel}$	21.0 g
Δv_x	-55.0 km/h
Δv_y	-0.7 km/h
Δv_z	-1.8 km/h
s_{dyn}	577 mm
Bemerkungen	-

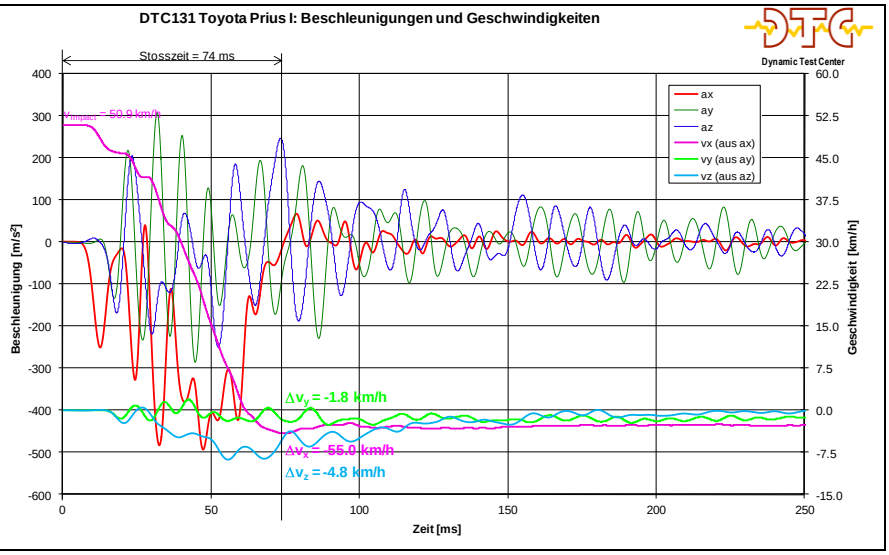

Abb. 33 Fahrzeugbeschleunigungen und Auswertungen

Die bewerteten Belastungen am Fahrerdummy lagen deutlich unter den biomechanischen Grenzwerten. Die höchsten Belastungen sind aufgrund des Lenkrades und Lenksäule am Thorax gemessen worden.

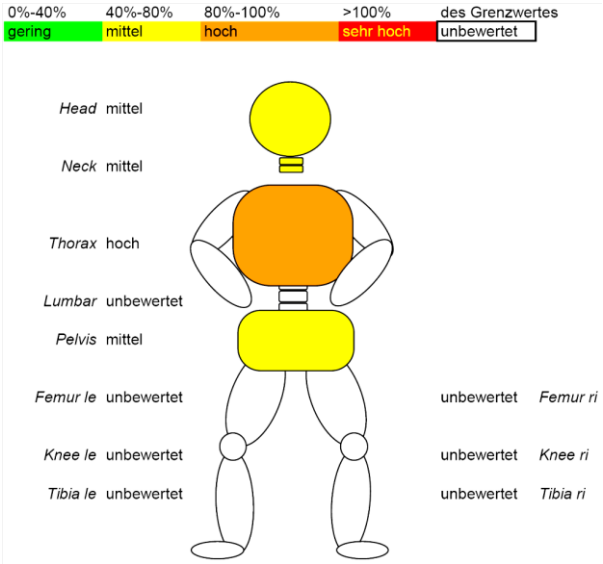

Abb. 34 Insassenbelastung Fahrer

Auch am Beifahrer wurden die biomechanischen Grenzwerte gut eingehalten. Der HIC (head injurance criterion) lag beifahrerseitig mit 584 nur geringfügig höher als fahrerseitig (540) und damit weit unter dem biomechanischen Grenzwert von 1000. Die leicht höher bewertete Belastung am Kopf wurde durch die 3ms-Spitzenbeschleunigung verursacht.

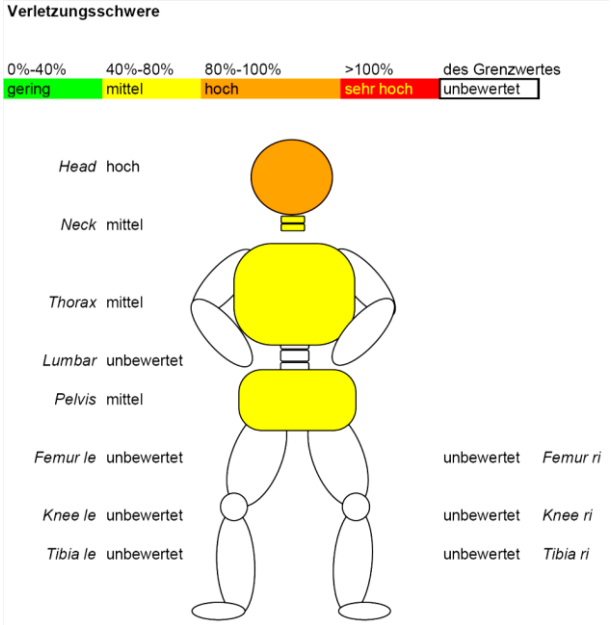

Abb. 35 Insassenbelastung Beifahrer

5.5 Schadenbeschrieb

5.5.1 3D-scan

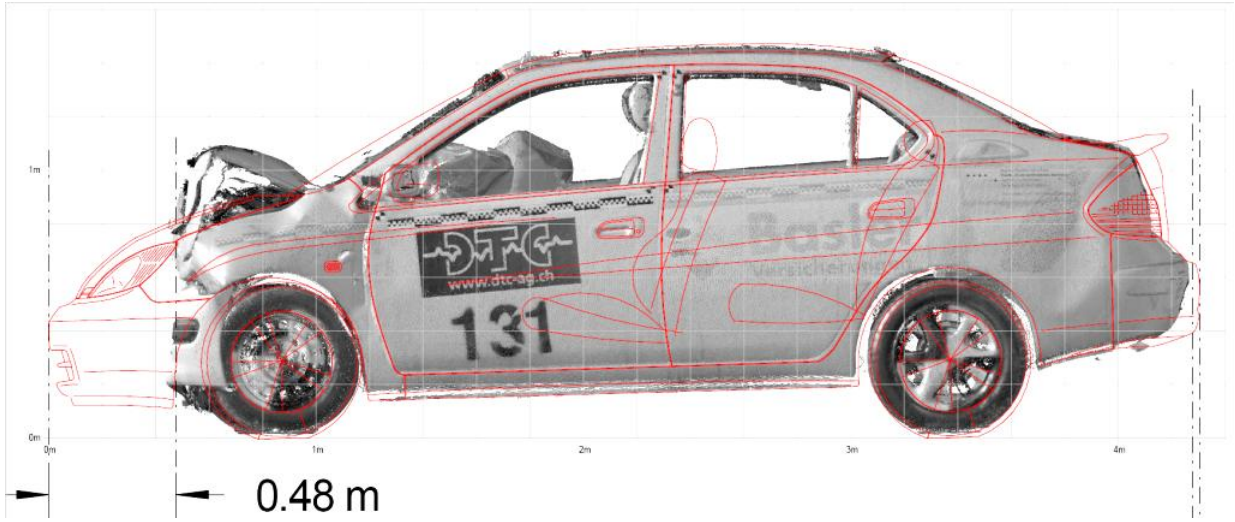

Abb. 36 Bleibende Deformationen am Toyota Prius

Die 3D-Scans aus der Vermessung des Toyota Prius nach dem Crash konnten mit den Massen vor dem Crash überlagert werden. Daraus kann eine bleibende Deformation der Knautschzone von 480 mm ermittelt werden. Die deutlich höhere dynamische Deformation aus den Beschleunigungsdaten von 577 mm kann einerseits durch Elastizitäten, aber durch die dynamische Rotation um die y-Achse während dem Crash begründet werden.
Die 3D-Scans zeigen zudem, dass die Fahrgastzelle und damit der Überlebensraum für die Insassen trotz der höheren Masse des Hybridfahrzeugs intakt geblieben sind.

5.5.2 Schadensbeschrieb

Unmittelbar nach dem Crashtest wurde das Fahrzeug bezüglich der Hochspannungsabschaltung überprüft und der der orange Wartungsstecker im Fahrzeugheck wurde gezogen. Danach wurde das Fahrzeug von der Beschleunigungsbahn weggestellt.

Während die Hochvoltbatterie thermisch überwacht wurde, sind die Dummies und die Messtechnik schnellstmöglich ausgebaut worden.

Abb. 37 Ausbau von Dummies und Messtechnik nach dem Versuch

Der Fussraum wurde sowohl Fahrer- wie auch Beifahrerseitig deformiert. An der Lenksäulenverkleidung waren Reibspuren des Kniekontaktes zu sehen.

Abb. 38 Fussraum Fahrerseite

Abb. 39 Fussraumdeformation Beifahrerseite

5.6 Schlussfolgerungen Crashtest

Die Sicherheitsabschaltung der Hochvoltbatterie hat reibungslos funktioniert, was durch die Überprüfung des dafür vorgesehenen Messpunktes im Fahrzeug bestätigt wurde. Einen Stromschlag zu erhalten, weil die Karosserie unter Spannung steht, ist fast ausgeschlossen, da sowohl der Pluspol wie auch der Minuspol doppelt gegen die Karosserie isoliert sind. Eine Gefährdung (Entladung der Kapazität) kann nur durch das gleichzeitige Verletzen beider Leiter verursacht werden. Die Energiemenge ist jedoch gegenüber jener der Hochvoltbatterie verhältnismässig gering. Die Batterie hat sich nach dem Crash nicht erwärmt. Es gab keinerlei Anzeichen eines inneren Kurzschlusses.
Die Fahrzeugdeformationen sowie die Insassenbelastungen lagen im gleichen Rahmen wie bei ähnlichen Fahrzeugmodellen mit konventionellen Antrieben.

6 Anhang

6.1 Messdaten Fahrzeug
6.2 Messdaten Fahrer
6.3 Messdaten Beifahrer
6.4 3D Scan