

**Angewandte Sicherheitsprinzipien und  
Risikobewertung zum ultraleichten, elektrischen  
Antriebssystem für Luftsportgeräte**

Bearbeiter: Joachim Geiger  
Version: 1.6  
Datum: 08.03.2020



—

Risikobewertung nach DIN-EN: ..... 2

1. Die Luftschraube: ..... 2

2. Der Motor: ..... 3

3. Die Steuerung / Energieversorgung: ..... 4

4. Das Batteriemanagementsystem: ..... 7

5. Der Akkumulator: ..... 8

—

—

## Risikobewertung nach DIN-EN:

Um das vom Antriebssystem ausgehende Gefahrenpotenzial zu bewerten, wurde folgende Risikobewertung nach industriellen und europäischen Sicherheitsrichtlinien und Normen durchgeführt, welche sich auf die nachfolgende Steuerungsauslegung auswirkt:

**Im Folgenden werden die einzelnen Baugruppen des Antriebes auf Restrisiken untersucht und bewertet:**

### 1. Die Luftschraube:

Es werden ausschließlich Luftschrauben verwendet, die von renommierten Luftschraubenherstellern gefertigt werden und für die Verwendung an den Motoren geeignet sind.

Vom Propeller gehen zwei Risiken aus:

1. Rotierende Luftschraube am Boden
2. Unwucht durch eine beschädigte Luftschraube

Diesen Risiken wird mit Anweisungen im Handbuch entgegnet:



**Vor jedem Betrieb der Luftschraube sind die Blätter und die Nabe auf Beschädigung hin zu kontrollieren. Bei einem Verdacht auf Beschädigung senden Sie den Propeller umgehend an den Hersteller zur Inspektion bzw. Reparatur.**



**Es ist bei jedem Betrieb der Luftschraube auszuschließen, dass Gefahr für Leib und Leben von Menschen und Tiere entstehen kann.**



**Das Antriebssystem warnt durch das Bedieninterface Akustisch, wenn die Betriebsbereitschaft des Motors gegeben ist.**

*Siehe auch die Bedienungsanleitung des Antriebssystems*

## 2. Der Motor:

Bei den Motoren der HPD x Reihe handelt es sich um permanentmagneterregte Synchronmotoren. Die Motoren besitzen eine sehr hohe Leistungsdichte und sind somit in der Lage große und langsam drehende Luftschrauben anzutreiben. Dabei gehen vom Motor zwei grundsätzliche Risiken aus:

1. Die rotierende Luftschraube (siehe Luftschraube)
2. Die Oberflächentemperatur  $<100^{\circ}\text{C}$



Es sollte vor einer direkten Berührung des Motors gewarnt werden. Leichte Verletzungsgefahr!  
In der Nähe befindliche Bauteile sollten einen Mindestabstand zu diesem Bauteil aufweisen.

*Siehe auch die Bedienungsanleitung des Antriebssystems*

### 3. Die Steuerung / Energieversorgung:

#### Die elektrische Auslegung:

Die Auslegung der Spannungshöhe der Steuerung und Energieversorgung wurde bewusst auf max. 58,8V Gleichspannung ausgelegt, das entspricht der Ladeschlussspannung von 14 Zellen Lilo Akku's, in Reihe geschaltet. Mit dieser Auslegung ist die Obergrenze von 60V Gleichspannung, so wie sie nach DIN EN 61140 als SELV (Safety Extra Low Voltage) definiert ist, eingehalten.

*SELV (früher „Schutzkleinspannung“) ist eine kleine elektrische Spannung, die aufgrund ihrer geringen Höhe und der Isolierung im Vergleich zu Stromkreisen höherer Spannung besonderen Schutz gegen einen [elektrischen Schlag](#) bietet.*

*Mit SELV betriebene Geräte, die selbst keine höheren Spannungen erzeugen, werden gemäß [DIN EN 61140 \(VDE 0140-1\)](#) mit der [Schutzklasse III](#) bezeichnet.*

*Die [Spannung](#) ist so klein, dass elektrische Körperströme im Normalfall ohne Folgen bleiben. Die Spannungsquelle kann entweder ein Generator sein, zum Beispiel ein [Fahrraddynamo](#), oder eine [Batterie](#).*

Da es sich bei dem Motor um einen permanentmagneterregten Synchronmotor handelt, ist zum Betrieb ein Frequenzumrichter mit digitalen Eigenschaften und hoher Leistungsdichte unbedingt erforderlich. Dieser Frequenzumrichter im Weiteren kurz mit MC(Motorcontroller) bezeichnet, erzeugt ein magnetisches Drehfeld, dem der Rotor des Motors folgt. Naturgemäß ergibt sich bei einer Störung am MC immer der sichere Zustand eines nicht mehr drehenden Motors.

Die im Motorcontroller integrierten Steuerungsalgorithmen übernehmen dabei die Sollwertvorgabe und die permanente Überwachung von relevanten Betriebsgrößen. Der MC ermöglicht somit den sicheren und komfortablen Betrieb des Motors und die Schnittstelle zum Bediener/Piloten.

## Das grundlegende Sicherheitskonzept der Steuerung für das elektrische Antriebssystem.


Die Sicherheitspyramide:




*Siehe auch die Bedienungsanleitung der Steuerung*

Von der Steuerung gehen prinzipiell zwei Restrisiken aus:

1. Motorausfall durch Bauteilversagen

 Bei einem Bauteilversagen kann der Motor in den sicheren „Aus-Zustand“ kommen, was bei einem Fluggerät einer Notlandesituation gleichkommt. Diesem Risiko wird mit multiplen Überwachungen, redundanter Teilauslegung und Regelungsalgorithmen begegnet. Bei den Duplexmotoren wird dieses Risiko durch redundante Auslegung weiter massiv minimiert

2. Unbeabsichtigter Motoranlauf durch eine Pilotenfehlbedienung

 Beim Verbrennungsmotor ist die Anlaufbereitschaft durch die Wahrnehmung eines im Leerlauf laufenden Motors gegeben. Beim Elektromotor gibt es diese Phase nicht. Deswegen wird die Anlaufbereitschaft durch eine Bereitschaftsmeldung am Interface, sowie durch eine akustische Warnung vom Interface (Beepsignal) angezeigt.

## 4. Das Batteriemanagementsystem:

Das Batteriemanagementsystem kurz BMS ist integraler Bestandteil eines jeden Akkumulators. Das BMS hat dabei die Aufgabe den Akkumulator in jeder Phase des Betriebszustandes zu Überwachen und dafür zu sorgen, dass der Akkumulator innerhalb seiner Spezifikation betrieben und nicht überlastet wird. Zudem wird durch die Integration des BMS der Akkumulator transportfähig im Sinne der UN-Transportvorschriften.

Zu den elementaren Aufgaben des BMS gehören: Zellschutz, Ladekontrolle, Lastmanagement, Bestimmung des Ladezustandes, Bestimmung der Zellgesundheit, Ausbalancieren der Zellen, Historie, Authentifizierung und Identifizierung, Kommunikation und Thermomanagement.

Über das Akkumanagement hinaus übernimmt das BMS eine wesentliche Sicherheitsfunktion für das Antriebssystem, den aktiven Leistungsschalter (Powerswitch). Der Leistungsschalter gibt immer genau soviel Strom an das Antriebssystem frei, wie dies vom Akku fordert. Wird aufgrund eines Überlastungsfalls des Antriebs mehr Strom abgefordert als der Antriebssollwert vorgibt, schaltet das BMS den Laststrompfad innerhalb einer Latenzzeit  $< 9\mu\text{s}$  ab. Das gleiche Überlastmanagement gilt für den Ladestrompfad. Beide Leistungsausgänge sind somit nicht nur kurzschlussicher, sondern sichern den Anwender vor den praktisch auftretenden Gefahren beim Einsatz von Hochleistungsakkus (z.B.: Fehlkommutierung, Wechselrichter Querschuss, Motorwindungsschluss, Kurzschluss, Wartung etc.)

Vom BMS geht prinzipiell ein Risiko aus:



Bei einem Bauteilversagen im BMS wird der Motorcontroller nicht mehr mit Energie versorgt. Diesem Risiko wird mit Parallelschaltung von Akkupacks in redundanter Ausführung begegnet.

*Siehe auch die Bedienungsanleitung des Antriebssystems*


## 5. Der Akkumulator:

Der Akkumulator besteht aus mehreren in Serie und/oder parallel geschalteten Einzelzellen.


### Vom Akku gehen zwei wesentliche Risiken aus:

1. Brandgefahr bei massiver mechanischer Beschädigung oder thermischer Einwirkung.

*Bei massiver mechanischer Beschädigung des Akkupacks, kann es zu Hitzeentwicklung oder einem Auslaufen des Elektrolytes kommen. Elektrolyt ist entflammbar. Im Falle eines Auslaufens des Elektrolytes, die Batterie sofort außer Reichweite des Feuers bringen.  
Toxizität: Dämpfe, verursacht durch brennende Batterien, können zu Reizungen der Augen, Haut und Atemwege führen.*

 Dieses Risiko wird minimiert, indem ausschließlich Zellen eingesetzt werden, die den UN-Test 38.3 bereits auf Zellenebene erfüllen und deren Gehäuse auf Zellenebene z.B.: aus Stahlbecher bestehen. Ebenso erfüllen die Akkupacks den UN-38.3 Standard. Die Befestigung der Akkupacks müssen die maximal zu erwartenden G-Kräfte aushalten.

2. Hohe Kurzschlussleistung, Tiefenladung, Überladung, sowie der Betrieb außerhalb von Betriebsgrenzen.

 Die Handhabung, der Transport und der Betrieb wird durch ein im Akkupack integriertes BMS mit umfangreichen Kontrollmechanismen abgesichert. (siehe BMS)

*Siehe auch die Bedienungsanleitung des Antriebssystems*



## Weitere Maßnahmen zum Erreichen der erforderlichen Sicherheits-, und Verfügbarkeitsintegrität

### Normenbezug und Auslegung:

- EU – Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EG
- DIN IEC61140 SELV (Safety Extra Low Voltage)
- UN38.3 Akku Transport und Prüfvorschrift

### Weiterführende Maßnahmen

- Konsequente Anwendung des Ruhestromprinzips
- Einsatz eines mit dem Antriebskommunizierenden Batteriemangagementsystems mit elektronischem Überlast- und Kurzschlusschutz
- Überwachung sämtlicher, relevanter Antriebsstrang – Parameter wie Temperaturen, Ströme und Spannungen, um im Grenzfall oder bei Drahtbruch Abregelung vor Abschaltung zu realisieren! → Hochverfügbarkeit
- Parallelschaltung von Teilmotoren; Akkus und Teilschaltkreisen um redundante Eigenschaften zu erreichen
- Maximales Spannungslevel 60V DC → (Safety Extra Low Voltage)

### CE - Konformität

Diese Geräte genügen den einschlägigen und zwingenden EU-Richtlinien.  
Diese sind im Folgenden:

- EN 1050 – Leitsätze zur Risikobeurteilung und Gefahrenanalyse
- EN 954-1 - Maschinenrichtlinie
- EU – Maschinenrichtlinie 98/37 EWG (MSRL) (entspricht 9. Verordnung des Gerätesicherheitsgesetzes)
- EU – Niederspannungsrichtlinie *2014/35/EG*
- EN61000-6-1 bis 4 EMV Emission/Immission
- EN 62311 - Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern
- **UN Transportvorschriften** (nach **UN Prüfhandbuch Teil III, Abschnitt 38.3 Lithiumbatterien** / Part III: Classification Procedures, Test Methods and Criteria relating to Class 3, Class 4, Division 5.1 and Class 9 – Section 38.3).