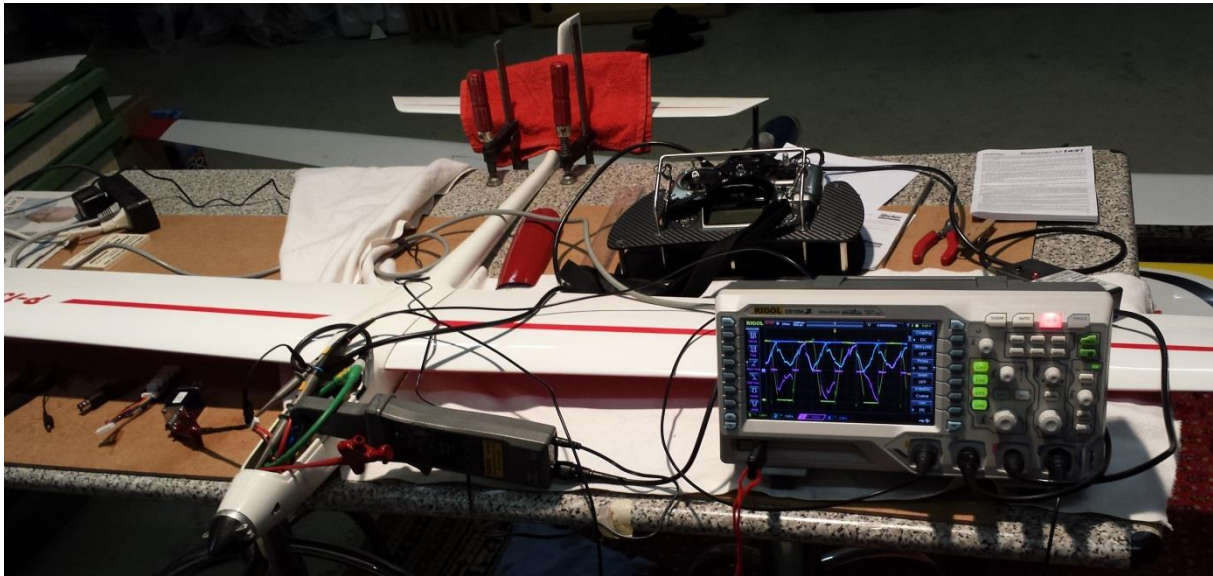


# Antriebsmessungen



Motor: AXi 2820/10    Poolzahl: 12     $k_v = 13000 / 11.4 = 1100 \text{ RPM/V}$      $R_{2w} = 20.5 \text{ m}\Omega$

Regler Marke unbkt.     $I_n: 30 \text{ A}$      $I_{\text{max}}: 40 \text{ A}$     PWM: 8 kHz

Batterie: 3S = 11.1 Volt, 2600 mAh,     $I_{\text{max}} = 35 \text{ C} * 2.6 \text{ A/C} = 90 \text{ A}$

**Klappflugschraube: CAM-Carbon 12x8" AeroNaut 7234/50**



$N = 1000 / 0.77 / 12 * 2 * 60 = 13'000 \text{ 1/Min.}$     (Gemäss Datenblatt im Anhang:  $12 * 1100 = 13'100 \text{ RPM}$ )

Im Folgenden wurden die Spannungen und Ströme aufgezeichnet:

- 1: Spannung an Motorterminal gegen Minuspol der Batterie gemessen
- 2: Strom im Motorterminal höhe Stecker
- 3: Strom aus der Batterie
- 4: Spannung der Batterie am Kontrollstecker gemessen

Sinn der Messungen war einerseits erste Erkenntnisse zu den Fragen, wie funktioniert ein Brushless DC-Regler generell, welche Grösse, welcher Sollwert wird mit dem Steuerknüppel vorgegeben, Drehzahl Strom/Moment oder nur schlicht die Motorspannung? Dazu habe ich mir ein Scope, sowie zwei Stromzangen gekauft die nun als erstes getestet werden sollten. Von zwei Büchern die ich ebenfalls erstanden habe hat mir vor allem dasjenige von Roland Büchi „Brushless-Motoren und – Regler“ sehr gute Dienste geleistet.

Was die Frage im Forum zum Steuerknüppel betrifft lässt sich festhalten:

- Die Knüppelstellung gibt die Phasenspannung vor welche wiederum über die BackEMF die maximale bzw. Leerlauf-Drehzahl vorgibt.
- Das geforderte Lastmoment zieht dazu einen entsprechenden Strom der über die Widerstände von Batterie und ohmschen Widerstand im Motor begrenzt wird. Der Spannungsabfall  $dU = R \cdot I_{ph}$  führt dabei zu einer geringeren, zur Kompensation der BackEMF zur Verfügung stehenden Spannung, welche wiederum in einer von der Leerlaufdrehzahl verringerten Last-Drehzahl resultiert.
- **Der Strom  $I_{ph}$  wird dabei so gross wie der Propeller an Drehmoment  $M = I_{ph} / kt$  fordert.**

## Leerlauf ohne Propeller bei maximaler Spannung/Knüppelstellung

$$N = 1000 / 0.76 / 12 \cdot 2 \cdot 60 = 13'000 \text{ RPM}$$



Der  $I_o$  von ca. 6 A bei maximaler Drehzahl scheint relativ hoch!

Erfahrungsgemäss handelt es sich dabei um folgende Verlustanteile relativ zur Nominalleistung:

- |                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| • (Um-) Magnetisierungsverluste | ca. 4 % |
| • Wirbelstrom                   | ca. 2%  |
| • Mechanische Reibung           | ca. 1%  |

Bei höherem Moment treten dann vermehrt die ohmschen Verluste im Motor und die Schaltverluste im Regler hervor die bei Nominallast nochmals ca. 12 % der Leistung schlucken.



## PWM bei reduzierter Spannung/Knüppelstellung



PWM: 8 kHz bei  $I_{bat} = 0.8 \text{ A}$  (im Mittel), Stromspitzen von 10 A bzw. 18 A in Motorphase!  
 Hier sieht man sehr deutlich, dass der Batteriestrom wesentlich kleiner ist als der Motorstrom.  
 Dies hat damit zu tun, dass die gegenmotorische Kraft bei tiefer Drehzahl entsprechend geringer ist.  
 Dank der Pulsweitenmodulation geschieht diese Spannungsanpassung praktisch verlustfrei!

## Stand Schub mit Propeller von Null bis Vollast



## Stand Schub bei tiefer Spannung während Anlaufphase mit PWM



Hier sieht alles noch sehr manierlich aus. Drehzahl=  $1000 / (6/4 * 10.3 \text{ ms}) * 60 = 3900 \text{ 1/Min.}$

Der Phasenstrom liegt im Mittel bei ca. 30 A, der Akkustrom bei ca. 12 A (Abschätzung aus Graf)

## Umschaltung von Anlauframpe auf Vollspannung bzw. Vollschub



**Hier geht's zur Sache, der Regler schaltet Rampe und PWM aus und geht auf Vollspannung!**

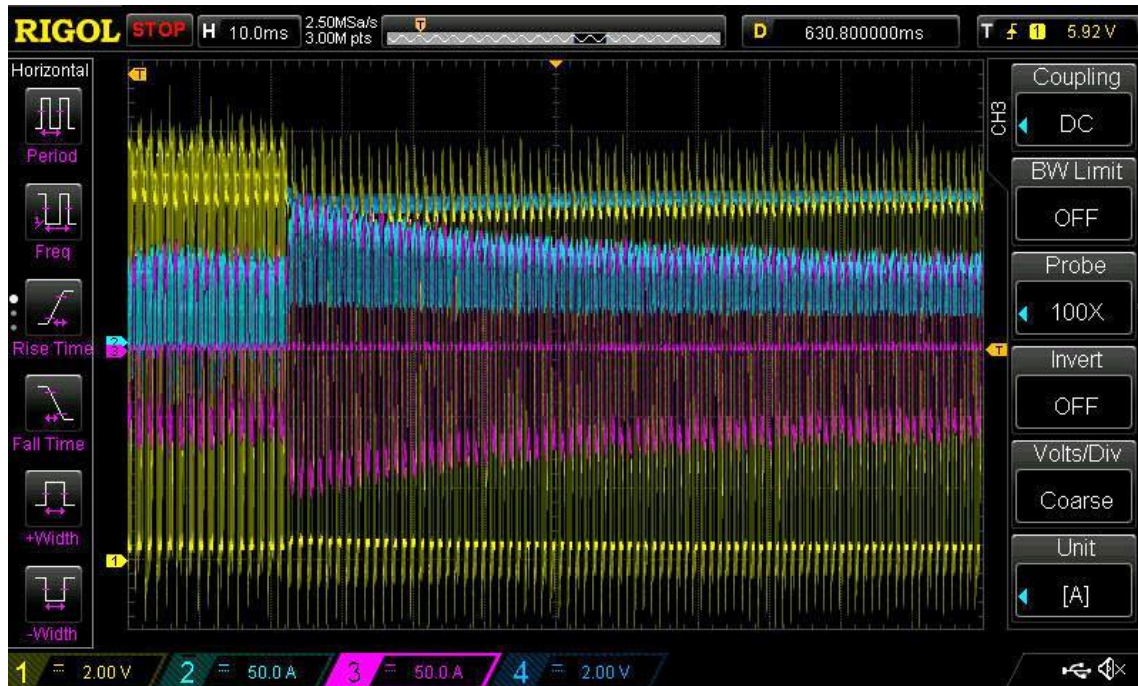
- (1) Die Rechteckspannung in der Motorphase beim Stecker bricht auf 9 Volt ein
- (2) Der Strom aus dem Akku erreicht im mittel ca. 80 A, Spitzenwerte bis 120 A
- (3) Die Stromspitzen in den Motorphasen erreichen ebenfalls Spitzenwerte von 120 A
- (4) Die Akkuspannung gemessen am Kontrollstecker bricht auf 10 Volt ein

**Nach einer 1/10 Sekunde beruhigt sich die Sache wieder. Es hat sich eine neue Gleichgewichtslage eingestellt nach dem die Drehzahl von 7500 auf 9000 1/Min. gestiegen ist!**

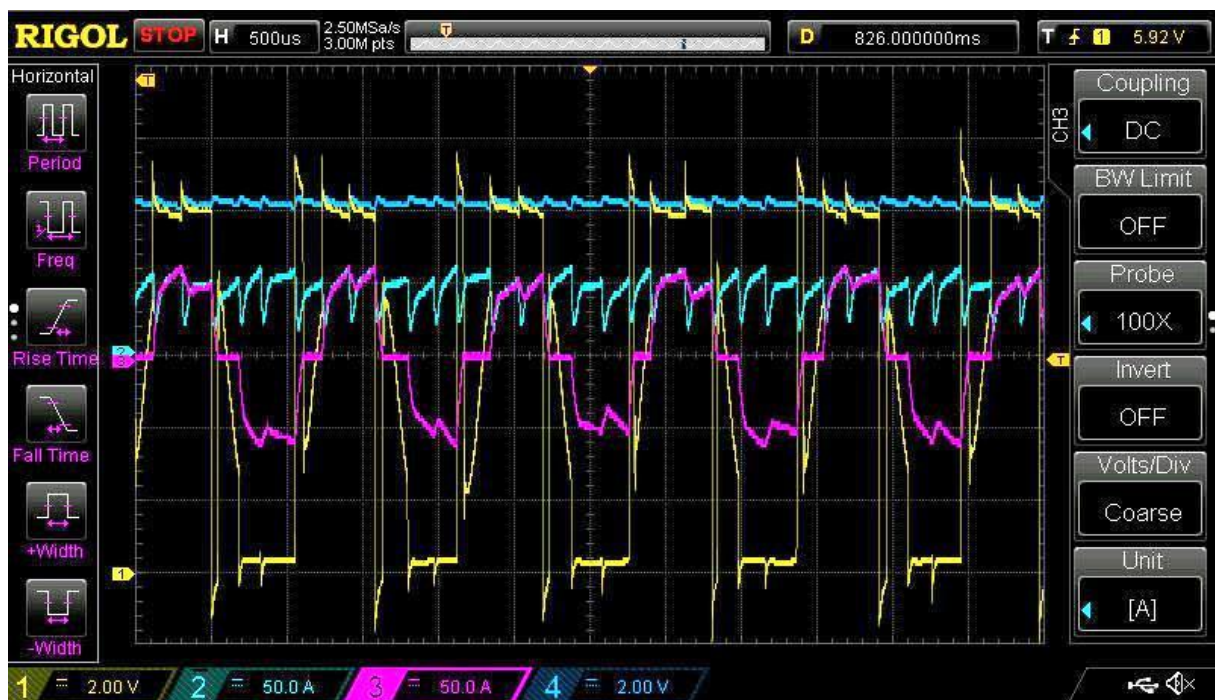
Die Erkenntnis aus der Geschichte: Die Beschleunigungsmomente (und damit die entsprechenden Ströme) können ganz erheblich werden. Dieses Drehmoment muss natürlich durch die Tragflächen aufgefangen werden, Backbord wird mehr belastet, Steuerbord wird entlastet.

(Falls die Tragflächen bereits nahe dem Stallpunkt betrieben werden besteht nun die Gefahr, dass die linke Tragfläche das zusätzliche Moment nicht mehr aufnehmen kann und der linke Flügel vor dem rechten einen Strömungsabriss erlebt, der Flieger ausleert und sich wieder in Einzelteile verwandelt was meiner Pulse geschehen ist. Klar wird nun wieso empfohlen wird nach dem Durchstarten anfänglich vorsichtig mit dem Gasknüppel umzugehen bis der Flieger wieder genügend Fahrt hat. )

## Beschleunigung von 7500 auf 9000 1/Min.



Nach 0.2 Sekunden pendeln sich Drehzahl und Stromamplituden auf zulässige vernünftige Werte ein!



$$N = 1000 / 1.1240 / 12 * 2 * 60 = 8900 \text{ RPM}$$

## Derselbe stationäre Zustand in höherer Auflösung



(2,3) Motor und Akkustrom sinken auf ca. 42 A (Maximalwert gem. Datenblatt!)

(1,4) Die Spannungen erholen sich auf ca. 10 Volt am Motorstecker gemessen.

Hervorgerufen wurde der Überstrom durch den Sollwert- bzw. Spannungssprung am Ende der Rampe, was einen sehr hohen Strom bzw. ein entsprechendes Beschleunigungsmoment bewirkte!

Klappfluchtschraube: **CAM-Carbon 12x8" AeroNaut 7234/50 Propeller**

Zur detaillierteren Erklärung des Zusammenhangs zwischen Drehzahlabfall infolge Lastmoments bzw. in diesem Fall beim Beschleunigen von Drehzahldifferenz zu Drehmoment und Motorstrom verweise ich auf die Literatur:

**Brushless Motoren und Regler von Roland Büchi** Seiten 35-62.

Dabei ist auf Seite 42 in Abweichung zu beachten, dass im Allgemeinen der Strom in der Motorwicklung das Drehmoment bestimmt und nicht wie erwähnt der Strom aus dem Akku, welcher nur teilweise mit dem ersten identisch ist, was aus obigen Messungen klar hervorgeht.

## Details nochmals höher aufgelöst zum Spannungs- und Stromverlauf

Im Vollastbetrieb ist die Pulsweitenmodulation zu Gunsten eines Bang-Bang Betriebes ausgeschaltet. Was bleibt ist ein einmaliges Einschalten des Leistungstransistors während einer Halbwelle also:

Spannung hoch – aus – Spannung tief - aus - während einer elektr. Periode von  $1120 \mu\text{s}$  \*)



Deutlich sichtbar sind jeweils die Spannungs-Zeit Flächen die  $L \cdot I_{\text{peak}}$  entsprechen und durch den Abbau der gespeicherten Energie im Magnetfeld der Wicklung entstehen. Die Energie wird dabei teilweise in die Batterie bzw. in die benachbarte Wicklung zurückgeführt wodurch während dieser Zeit ein Stromminderverbrauch aus dem Akku resultiert infolge Blindstroms.

Schaltvorgänge in den gegenüber liegenden Wicklungen

\*) Die  $1120 \mu\text{s}$  entsprechen einer  $1/6$  ( $= 2/12$ ) mechanischer Umdrehung, somit einer mechanischen von  $6.72 \text{ ms}$ , wiederum entsprechend einer mechanischen Drehzahl von ca.  $9000 \text{ U/Min}$ . und einer elektrischen von  $54'000 \text{ U/Min}$ !

## Zusammenfassung

Die vorliegende Messreihe zeigt in einem ersten Überblick einige Eigenschaften der BDC Motorregelung und beantwortet indirekt die Frage: **Was stellt der Knüppel?**

**Bei diesem Regler entspricht die Knüppelstellung ganz klar einem Spannungssignal** dem die Drehzahl über die BEMF-Spannung folgt. Allerdings „verzögert“ durch das Lastmoment welches über den Innenwiderstand von Akku und Motorwicklung (sowie Wicklungsinduktivität) einen Teil der



vorgegebenen Spannung schluckt. Von ursprünglich 11.1 Volt am Akku bleiben nun nur noch 10.1 Volt nach dem Regler und die Motorenwicklungen schlucken intern weitere ca. 1.5 Volt.

Von ca. 42 A aus dem Akku gehen dem Drehmoment ca. 5 A (Datenblatt  $I_0=1.9$  A) zur Kompensation der Wirbelstrom- und Magnetisierungsverluste (Hysterese im Eisen der Wicklungen) drauf.

Wirkungsgrad bei Maximalleistung =  $(10.1-1.15)/11.1 * (42-5)/42 * 100\% = 71\%$

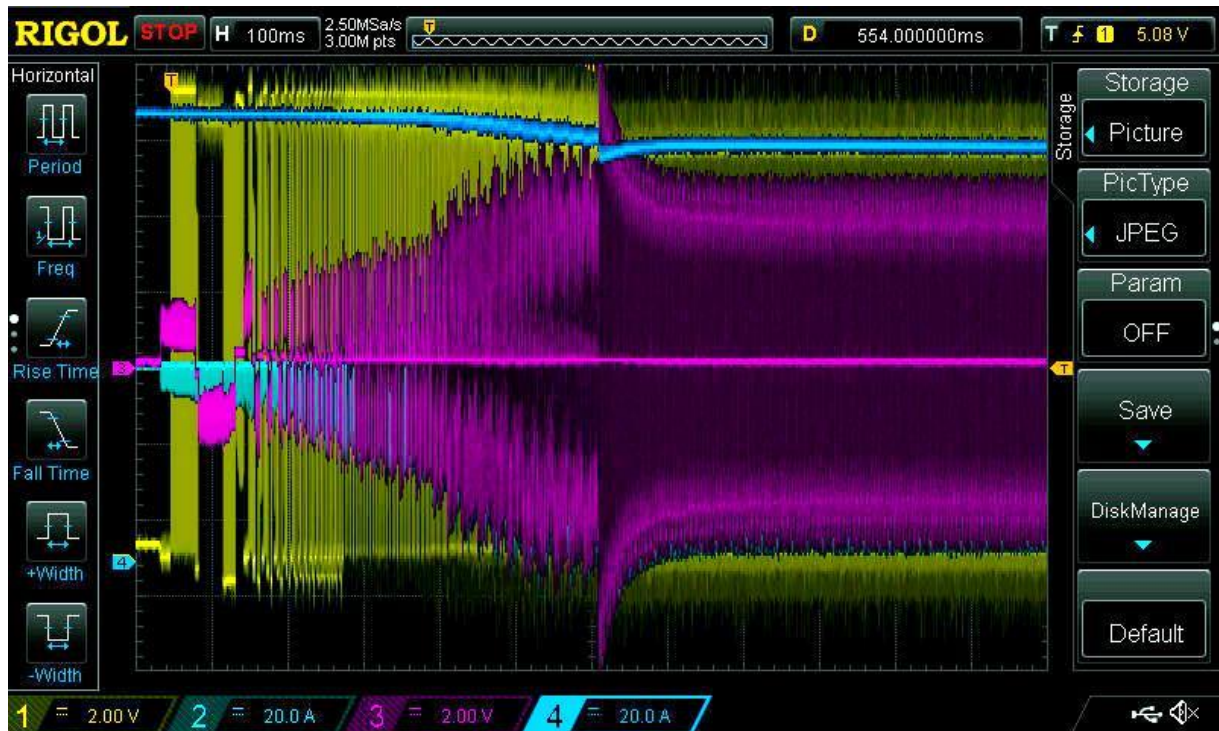
Gemäss Datenblatt wird der Motorwirkungsgrad mit 82 % angegeben allerdings bei halber Leistung was im Endeffekt heisst, dass die Verluste im Halblastbereich bei 2/3 der Knüppelstellung nur noch 9 % der Spitzenleistung betragen. Der E-Antrieb wird damit eindeutig zum König im Teillastbereich.

Nicht wirklich König ist der Antrieb in seiner Auslegung insgesamt, die kritisch erscheint und der Überprüfung bzw. Nachrechnung bedarf. Bemerkenswert ist, dass der 40A Regler die 120A schadlos überstand. So oder so erscheint Vollgas im Standschub nicht wirklich empfehlenswert. Im echten Flugbetrieb vor allem im Geradeausflug erwarte ich dann wesentlich tiefere Stromwerte. Selbst im fast vertikalen Steigflug werden Lastmoment und damit Spitzenstrom im Regler geringer ausfallen als im extremen Standschubbetrieb. Ich entschliesse mich trotzdem für einen kleineren Propeller.

### Neuer Propeller 10\*8“ anstelle 12\*8“

Akku Strom im Standschub:	34.5 A	/ eCalc Rechnung: 33.7 A
Stromspitze beim Umschalten auf Volllast:	ca. 80 A	
Akku Spannung bei Volllast Standschub:	11.1 Volt	/ eCalc Rechnung : 10.3 Volt
Drehzahl:	11'565 U/Min.	/ eCalc Rechnung: 9576 U/Min.

> Die Strömung hat abgerissen! Gemäss Rechnung ist dies nur bis 20 km/h der Fall, somit OK!



Man beachte die höhere Auflösung beim Strom von 20A/div.

## Anhang1 : Motordaten AXi 2820/10

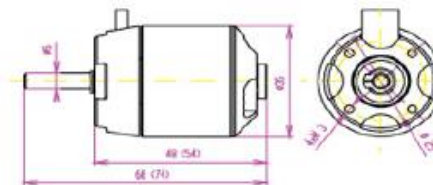
### AXi 2820/10

Brushless motors with neodymium magnets and rotating case are manufactured using advanced technologies from finest materials. Twin ballraced hardened steel shaft and overall robust but lightweight construction ensure very long lifetime. The unique design of the motors gives extremely high torque allowing to rotate large diameter and pitch propellers without need of a gearbox. More information also in [instruction manual](#).

Specification	
Nominal Voltage	8.0 V
Operating Voltage	7-12 V
No Load Motor Speed	8,800 RPM
RPM per Volt	1,100 RPM/V
Max. Efficiency with ESC	82%
Max. Efficiency Current	20-30 A
Max. Loading	42 A/60 s
No load Current / 10V	1,9 A
Internal resistance	39mohm
Dimensions	35x48 mm
Shaft Diameter	5 mm
Weight w/cables	152 g
Propeller range (direct drive)	10x6" - 12x8" 250/150 - 300/200



Recommended Power and Propeller Settings		
Model Weight	Power Pack	Propeller
1000-1500 g	7 cells	12x8"/300x200
1300-2000 g	8 cells	11x7"/280x180
1400-2500 g	10 cells	10x6"/250x150



### Example

Motor	Prop. w/o gearbox	Battery	I/A	RPM	U (V)	P-OUT (W)	P-IN (W)	Efficiency (%)
AXi 28/10	9x5 APC	7xRC 2000	14,6	7750	8	84,3	116,8	72,2
AXi 28/10	10x5 APC	7xRC 2000	17,1	7350	7,78	97,7	133	73,5
AXi 28/10	11x5 APC	7xRC 2000	22,7	6800	7,62	125,1	173	72,3
AXi 28/10	11x7 APC slim	7xRC 2000	24,2	6650	7,5	135,4	181,5	74,6
AXi 28/10	12x8 Aer	7xRC 2000	29,1	6010	7,12	140,9	207,2	68
AXi 28/10	9x5 APC	8xRC 2000	17,3	8700	9,1	119,2	157,4	75,7
AXi 28/10	10x5 APC	8xRC 2000	20,8	8300	9	140,6	187,2	75,1
AXi 28/10	11x5 APC	8xRC 2000	26,9	7600	8,8	174,6	236,7	73,8
AXi 28/10	11x7 APC slim	8xRC 2000	30,7	7400	8,62	186,6	264,6	70,5
AXi 28/10	12x8 Aer	8xRC 2000	36,7	6900	8,42	213,2	309	69
AXi 28/10	9x5 APC	10xRC 2000	22,8	10150	11	189,3	250,8	75,5
AXi 28/10	10x5 APC	10xRC 2000	27,3	9700	10,8	224,5	294,8	76,2
AXi 28/10	11x5 APC	10xRC 2000	35,8	8800	10,4	271	372,3	72,8
AXi 28/10	11x7 APC slim	10xRC 2000	39,2	8600	10,42	292,9	408,5	71,7
AXi 28/10	12x6 APC slim	10xRC 2000	40,5	8550	10,38	300,9	420,4	71,6

- P13 Sport

Fibreglass fuselage

Foam core balsa sheeted two-piece wing with fibreglass reinforcement

Made by CNC technology

Fibreglass canopy

Oracover on wings and balsa tail parts

Tight covering with all seams hand-sealed

Includes all necessary hardware

**RC function:** Rudder elevator ailerons motor

**Technical Data**

Wingspan : : 2500 mm

Length : : 1080 mm

Weight : : 800 g

Area : : 445 dm<sup>2</sup>

Airfoil : : S 3021

**Recommended Accessories**

Motor : 300 W ( MVVS 35 AXI 2820/x Mega AC 22/30/x )

Regulator : 40A

Batteries : 8-10 NiXX 3 LiPo

Servo : ailerons HS-81 elevator HS-422 rudder HS-422

Propeller : due engine manufacturer