

ElektorWheelie

ZZZZOOM - die Elektronik des Elektro-Zweirads der besonderen Art

Von Christof Krohne (D)



Im ersten Artikel über den Selbstbau des sich selbst balancierenden einachsigen Elektro-Rollers stellen wir die kompakte Elektronik-Baugruppe vor. Ein ATmega32 verarbeitet die Steuer- und Sensordaten und regelt über die Leistungsstufen der beiden Motoren die Fahrtrichtung, die Fahrgeschwindigkeit und die Balance des elektrischen Stehrollers - vom Stillstand bis zu einer Geschwindigkeit von 18 km/h.

Die Elektronik des ElektorWheelie verarbeitet die Signale eines Steuerpotis, eines Beschleunigungssensors und eines Winkelsensors und steuert abhängig davon mittels PWM und MOSFETs die Drehrichtung und das

Drehmoment der beiden Motoren. Dadurch bleibt der einachsige Roller über den gesamten Geschwindigkeitsbereich in Balance. Dabei ist es auch möglich, praktisch auf der Stelle zu drehen.

Der Antrieb des ElektorWheelies besteht aus zwei 500-W-Gleichstrom-Getriebemotoren. Die Stromversorgung übernehmen zwei 12-V-Blei-AGM-Akkus. Die Elektronik besteht im Wesentlichen aus einer Steue-

Eigenschaften

- 2 x 500-W-DC-Getriebemotoren
- 2 x 12-V-Blei-Vlies-Akkus (AGM) mit 9 Ah
- 2 x 14 Zoll luftbereifte Kunststoffräder
- H-Brücken-PWM-Motorsteuerung mit bis zu 25 A
- Automatische Abschaltung beim Absteigen
- Fail-safe-Notabschaltung
- Akku-Ladestandsanzeige
- Max. Geschwindigkeit 18 km/h
- Reichweite: ca. 8 km
- Gewicht ca. 35 kg

Sensoren

- Gyroskop Invensense IDG300 (IDG500)
- Beschleunigungssensor Analog Devices ADXL 320
- Stromsensor Allegro ACS 755-SCB 100

Mikrocontroller

- AtMega32 (Motorsteuerung)
- ATtiny25 (Stromüberwachung)

Compiler

- BASCOM-AVR (Basic-Compiler)

Balancieren, lenken, bremsen

Entscheidend für das erfolgreiche Balancieren des Stehrollers ist, dass die Sensorik zuverlässige Informationen über den Neigungswinkel der Stehplattform und die Geschwindigkeit der Winkeländerung liefert - und natürlich auch, dass Regelung, Motorsteuerung und Motoren in geeigneter Weise dimensioniert sind.

Das Balancieren selbst ist dann relativ einfach. Neigt der Fahrer sich nach vorne, kippt die Plattform und die Motoren werden so beschleunigt, dass der Schwerpunkt des gesamten Systems wieder in Balance kommt. Das heißt, die Füße des Fahrers werden unter dem Schwerpunkt des Gesamtsystems (Fahrer plus Roller) nach vorne beschleunigt, so dass der Fahrer etwas nach hinten kippt und sich der Neigungswinkel wieder verringert.

Das ganze System neigt damit zu einem Aufschwingen, dem mit einem entsprechend stabilen Gehäuse und einer empirisch angepassten Filterfunktion begegnet wird. Die „Härte“ des Filters liegt also kurz vor der Schwingung des Systems.

Das Lenken erfolgt durch unterschiedlich starkes Beschleunigen beziehungsweise Abbremsen der Motoren. Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Lenkbewegung aus Sicherheitsgründen begrenzt werden muss. Der ElektorWheelie wird bei schnellen Richtungsänderungen so schnell nicht umkippen - dem Fahrer sind hingegen schon früher Grenzen gesetzt.

Irgendwann ist auch der schönste Motor mit seiner Leistung am Ende. Im Falle des ElektorWheelie hätte es aber fatale Folgen für den Fahrer, wenn die Motoren keine Leistung mehr haben, um eine Störung der Balance auszugleichen. Aus diesem Grund werden die Motoren nur mit einer maximalen Leistung von ca. 70 % belastet. Es muss immer eine Leistungsreserve bestehen, die es ermöglicht, den Fahrer auch beim Erreichen der Maximalgeschwindigkeit noch durch eine zusätzliche Beschleunigung soweit nach hinten zu „werfen“, dass eine automatische Verringerung der Geschwindigkeit erfolgt um den Fahrer auszubalancieren. Nach hinten lehnen bremsen den Wheelie ab, nach vorne neigen beschleunigt ihn.

rungs-Platine mit darauf aufgesetzter Sensorplatine.

Die Steuerung funktioniert nach dem Prinzip der dynamischen Stabilisierung. Ähnlich dem menschlichen Gleichgewichtssinn steuert der Roller mit Hilfe von Sensoren die Balance der Stehplattform. Droht diese nach vorne oder nach hinten zu kippen, beschleunigt der Roller proportional entgegen der Kippbewegung die beiden Motoren. Durch ein unterschiedlich starkes Ansteuern der Motoren lässt sich der Roller lenken.

Prinzipschaltung

Kern der in **Bild 1** im Blockschaltbild dargestellten Lageregelung und Motorsteuerung ist ein ATmega32 von Atmel. Dieser steuert über zwei PWM-Ausgänge und zwei MOSFET-H-Brückenschaltungen die beiden 24-V-DC-Motoren. Über einen Hall-effekt-Stromsensor überwacht ein zweiter Mikrocontroller, ein ATtiny25 von Atmel, den Motorstrom. In einer Überstromsituation mit einem Strom von fast 80 A (Kurzschluss) entzieht der ATtiny über den Enable-Pin des 15-V-Spannungsreglers die Treiberschaltungen der H-Brücken die Betriebsspannung. Für den Fall eines Kurzschlusses mit Totalausfall der Motorelektronik wird über eine rein elektromechanische Notstoppvorrichtung der Akkustrom unterbrochen, um ein „Durchgehen“ des Rollers unter allen Umständen auszuschließen.

Bewegt sich der Strom in den normalen Grenzen, meldet der Tiny25 dem Mega32 eine Überschreitung des

Nennstromes von fast 25 A und initiiert damit eine dynamische Anpassung des PWM-Signals.

Die Steuerinputs erhält der Mega32 über seinen A/D-Wandler (ADC) von

dem Gyroskop und dem Beschleunigungssensor der Sensorplatine sowie von einem hochzuverlässigen Steuerpoti, das mit dem Steuerhebel des ElektorWheelie verbunden ist. Die

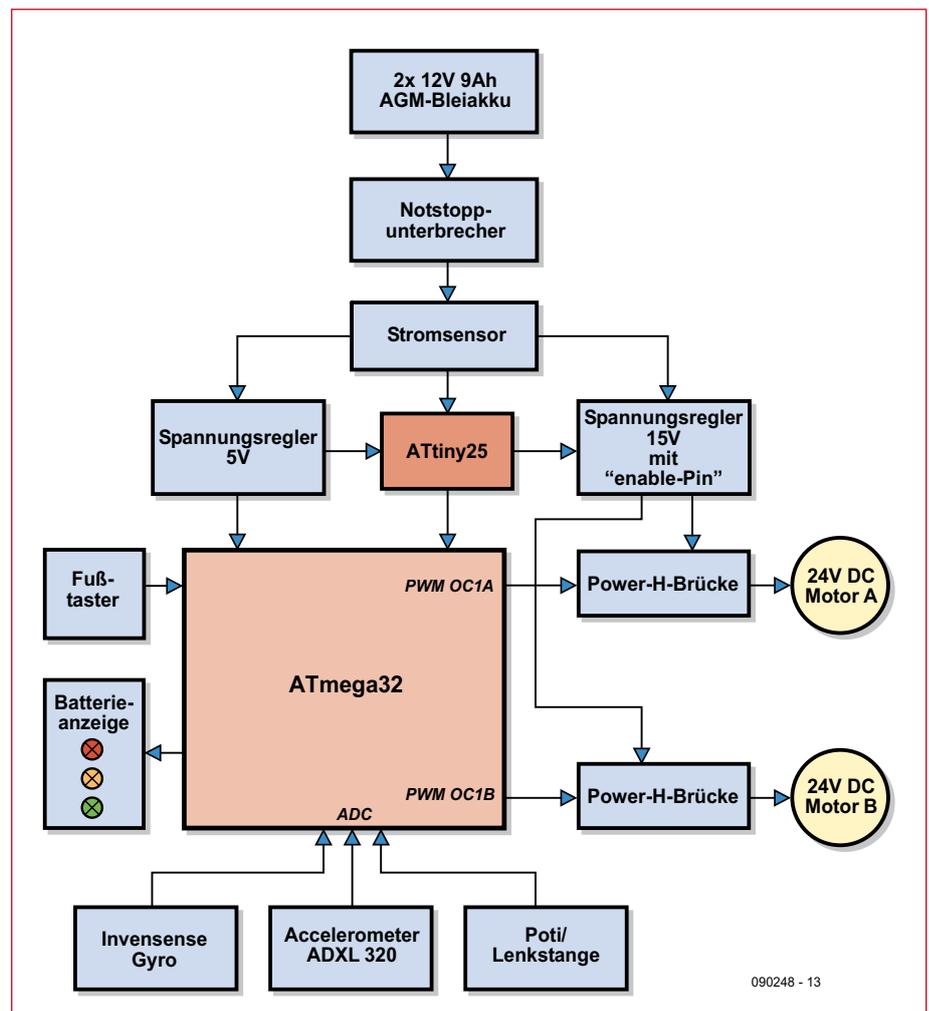


Bild 1. Die Motorsteuerung im Blockschaltbild.

Daten des ADC werden ca. 100 Mal pro Sekunde ausgelesen.

Als weiteres Sicherheitsfeature ist ein Fußkontakt (Fußtaster) mit dem ATmega32 verbunden. Wird dieser Taster nicht betätigt, weil der Fahrer abgestiegen (oder sogar abgesprungen) ist, schaltet der Mikrocontroller nach zwei Sekunden den Motorstrom ab. Somit wird verhindert, dass der Roller unbemannt weiterfährt. Die Akkuspannung wird ebenfalls über den A/D-Wandler des ATmega32 ausgewertet, der abhängig davon eine Anzeige der verbleibenden Betriebszeit mit drei LEDs steuert.

Sensorik und dynamische Stabilisierung

Die Lagesensoren sind auf einer eigenen kleinen Platine untergebracht, die auf die Hauptplatine der Steuerung aufgesteckt wird. In **Bild 2** ist die Schaltung der Sensorplatine zu sehen. Neben dem 2-Achsen-Gyroskop IDG300 [1] von Invensense befindet sich auch der 2-Achsenbeschleunigungssensor ADXL-320 [2] von Analog Devices auf dem Board. Der Spannungsregler IC3 versorgt die Sensoren mit der erforderlichen Spannung von 3 Volt, die gleichzeitig auch als Referenzspannung für den A/D-Wandler des Mega32 auf der Hauptplatine dient.

Das Gyroskop liefert eine Spannung proportional zur Drehrate (Winkelgeschwindigkeit). Neigt sich die Plattform schnell, erhält man eine große Spannungsänderung innerhalb einer gegebenen Zeitperiode. Im Ruhezustand liefert das Gyroskop eine Spannung, die etwa der halben Versorgungsspannung entspricht. Der Beschleunigungssensor misst in der waggerechten Lage die Erdbeschleunigung. Wird der Sensor geneigt, so ändert sich der Winkel, unter dem die Kraft der Erdbeschleunigung wirkt. Der Beschleunigungssensor funktioniert somit als Winkelsensor und liefert einen Wert proportional zum Neigungswinkel der Plattform.

Um eine bestmögliche Stabilisierung zu erreichen, ist es erforderlich, zu jedem Zeitpunkt den exakten Winkel

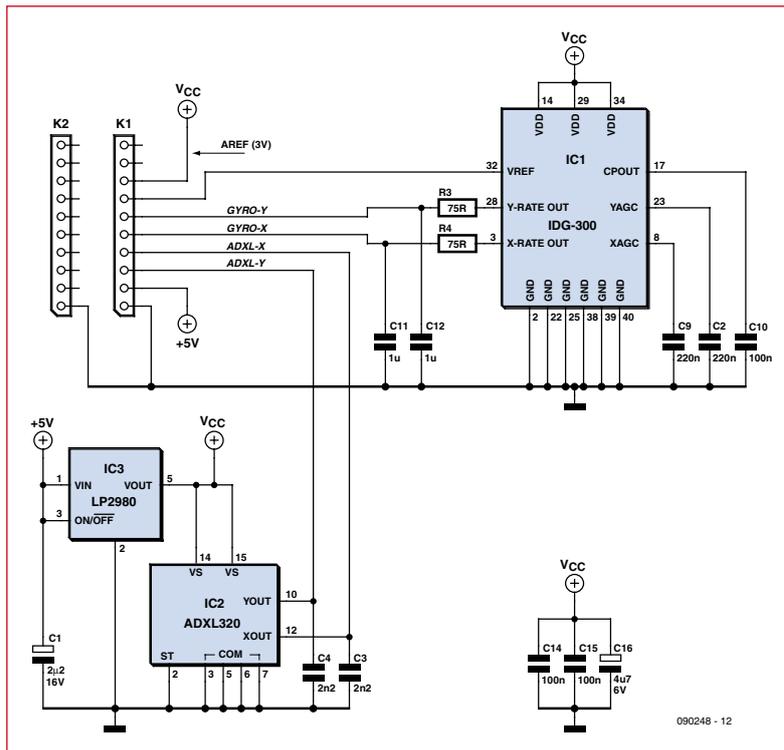


Bild 2. Die Schaltung der Sensorplatine mit Gyroskop und Beschleunigungssensor.

der Plattform bestimmen zu können. Der Wert des Beschleunigungssensors wird daher über einen längeren Zeitraum integriert, um ein geglättetes Signal zu erhalten. Hierzu wird nun der Spannungswert des Gyroskops addiert. Die Gewichtung wurde hierbei empirisch angepasst und optimiert. Der nötige Beschleunigungswert ergibt sich dann als Summe aus der Winkeldifferenz (Ist-Soll) und der Winkelgeschwindigkeit, mit der sich die Plattform neigt - mit unterschiedlicher Gewichtung dieser beiden Größen. Grundsätzlich gilt: Je größer die Winkelabweichung und je höher die Winkelgeschwindigkeit, desto größer ist die zur Stabilisierung nötige Motorbeschleunigung.

Motorsteuerung

Die Schaltung der Hauptplatine in **Bild 3** umfasst die gesamte Steuerung des Elektrowheelie inklusive Leistungselektronik. Lediglich die beiden Lagesensoren sind wie zuvor beschrieben auf einer separaten Platine untergebracht.

Die im Blockschaltbild angegebenen Funktionsgruppen lassen sich relativ leicht indentifizieren. Im Mittelpunkt steht der mit 16 MHz getaktete ATmega32, der über eine 10-polige Programmierschnittstelle (ISP-Connector K4) verfügt und die drei LEDs

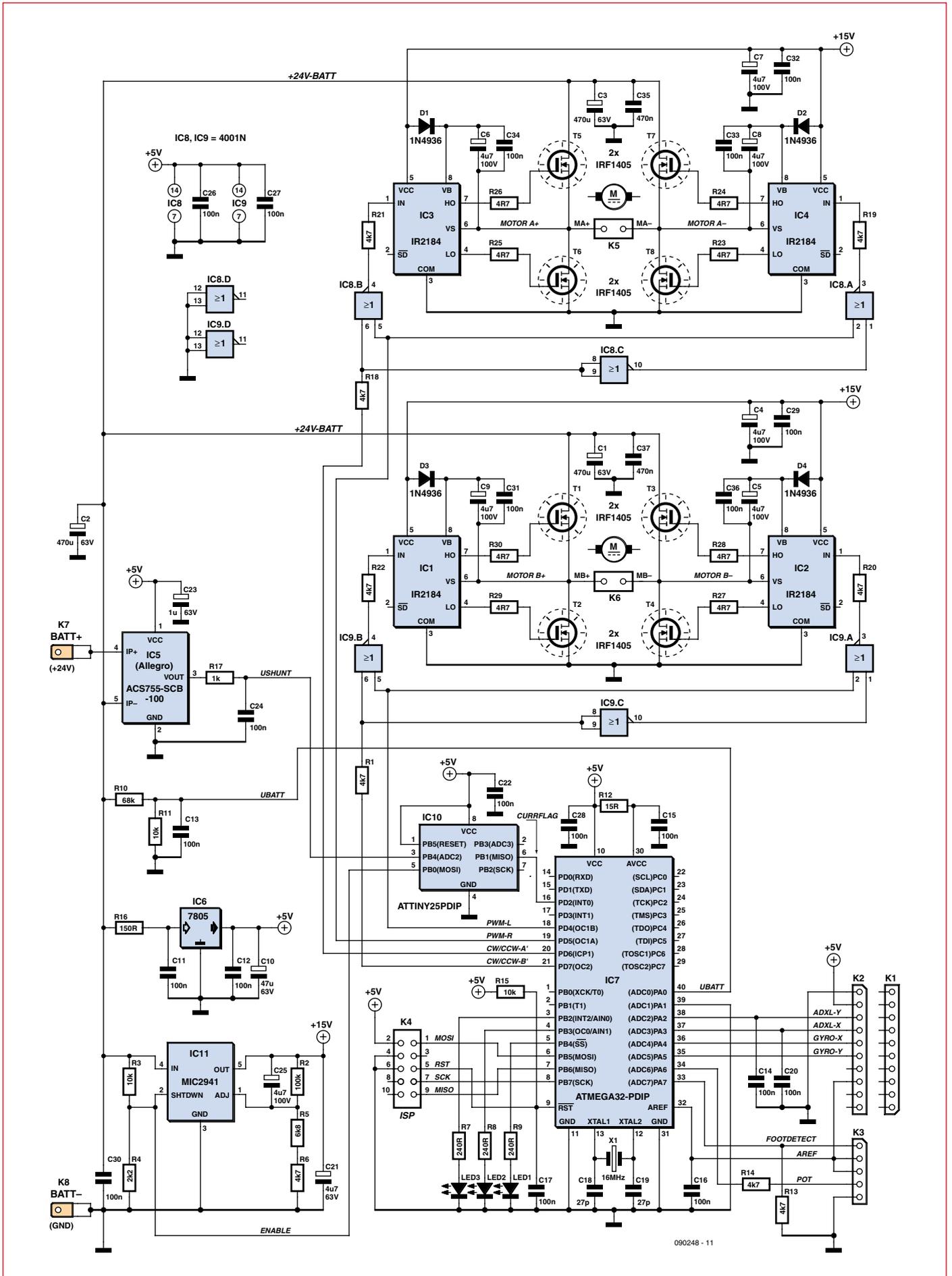
(LED1...3) für die Akkuanzeige direkt treibt.

Die Sensorplatine ist über K2 mit der Steuerung verbunden und liefert die X- und Y-Signale der beiden Lagesensoren an die A/D-Wandlereingänge ADC2...5 des ATmega32, der an Pin 32 (AREF) auch 3 V vom Spannungsregler des Sensor-Boards erhält. Diese 3 V liegen über K3 auch am Steuer-Poti an, dessen Schleifer wiederum eine von der Position des Steuerhebels abhängige Spannung an den ADC6-Eingang des ATmega32 liefert. Der A/D-Wandlereingang ADC0 misst über den Spannungsteiler R10/R11 die Akkuspannung, während ADC7

über K3 mit dem Fußschalter verbunden ist. Als weiteren Input erhält der ATmega an Pin 16 (INT0) noch ein Überstrom-Signal (CURRFLAG) von der Stromüberwachung mit dem ATTiny (IC10), der wiederum das Signal vom Stromsensor IC5 auswertet. IC5 ist ein integrierter Halleffekt-Stromsensor von Allegro MicroSystems, der in einem Bereich von 100 A linear arbeitet. CURRFLAG wird bei einem Strom von fast 25 A gesetzt und begrenzt über die PWM-Steuerung den Motorstrom, womit wir bei den Ausgangssignalen des ATmega angelangt wären.

Das Ergebnis der Verarbeitung der aufgeführten Eingangssignale sind die Signale an den vier Ausgangspins 18 bis 21, nämlich PWM-L/R und CW/CCW-A'/B'. CW/CCW-A' und CW/CCW-B' sind über Logikschaltungen (IC8 und IC9) mit den PWM-Ausgangssignalen PWM-L und PWM-R verknüpft und steuern jeweils die Drehrichtung des gesteuerten Motors, während die PWM-Signale über H-Brücken (Vollbrücken) den Motorstrom steuern. Für jeden Motor gibt es also zwei Steuerungssignale und eine H-Brückenschaltung. Jede H-Brücke besteht aus zwei Halbbrücken-Treiber-ICs vom Typ IR2184

Bild 3. Die Schaltung der Hauptplatine umfasst die gesamte Steuerung inklusive Leistungselektronik.



090248 - 11

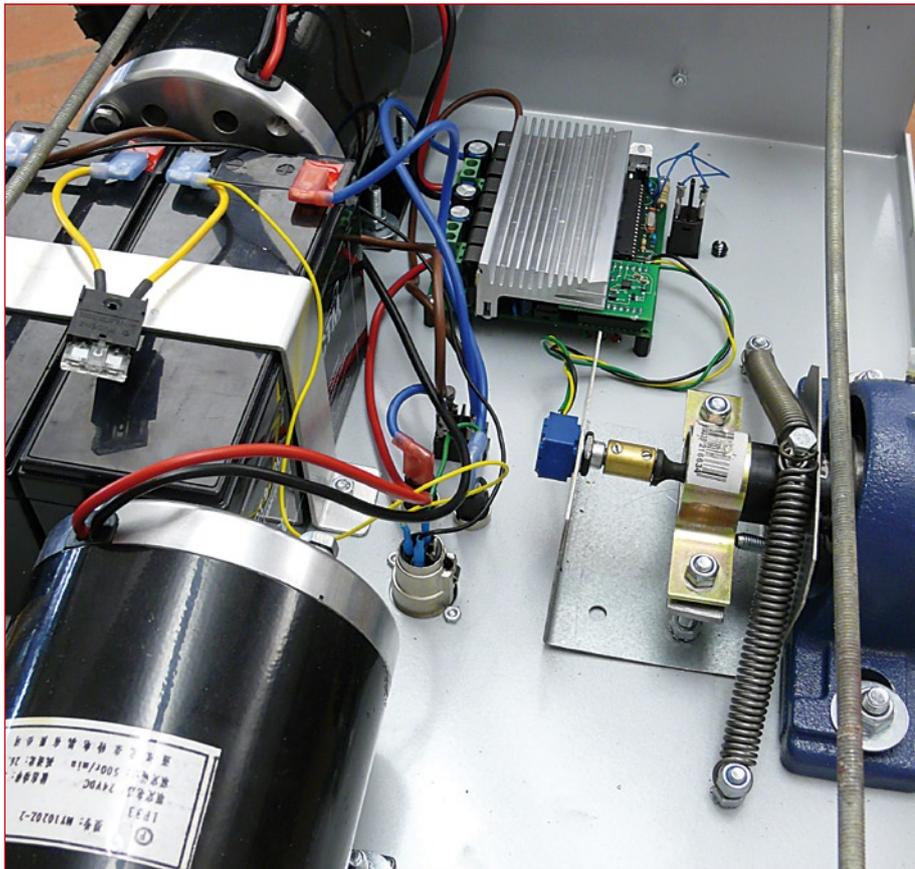


Bild 4. Auf der Unterseite des Metallchassis sind die Akkus und der Elektronikblock befestigt.

und vier MOSFETs vom Typ IRF1405. Für den linken Motor sind dies IC1 und IC2 sowie T1...T4, für den rechten Motor IC3 und IC4 sowie T5...T8. Die MOSFET-Brückenschaltungen lie-

gen über den Stromsensor IC5 an der 24-V-Spannung der beiden in Reihe geschalteten 12-V-AGM-Bleiakkus. Die Halbbrücken-Treiber-ICs werden über einen eigenen Spannungsreg-

ler vom Typ MIC2941 (IC11) mit 15 V versorgt. Dieses IC verfügt über einen Shutdown-Eingang (Pin 2), der mit dem Enable-Signal der Stromüberwachung (Pin5 des ATtiny IC10) verbunden ist. Dieses Signal schaltet bei Überstrom den Spannungsregler und damit die Brückentreiber-ICs ab, so dass die MOSFETs sperren und den Motorstrom unterbrechen. Alle anderen ICs erhalten über den Standard-Regler IC6 ihre Betriebsspannung von +5 V.

Kompakte Baugruppe

Der auf der Unterseite der Plattform (Metall-Chassis Bild 4) montierte Elektronik-Block (Bild 5) besteht aus der Hauptplatine mit der aufgesetzten Sensorplatine.

Die acht MOSFETs befinden sich in einer Reihe an der Rückseite der Hauptplatine und werden durch einen speziellen Kühlkörper gemeinsam gekühlt. Der Kühlkörper ist mit der Platine verschraubt und mit den MOSFETs über Klemmfedern verbunden. Eine selbstklebende Wärmeleitfolie zwischen den Transistoren und den Kühlkörpern sorgt für elektrische Isolation.

Die Hauptplatine ist im Gegensatz zur SMD-bestückten Sensorplatine vollständig mit bedrahteten Bauteilen aufgebaut. Die Platinen-Layouts im PDF-Format stehen wie immer auf der Webseite zum Projekt [3] als Gratis-Download zur Verfügung. Dort sind auch die Stücklisten zu den Platinen zu finden.

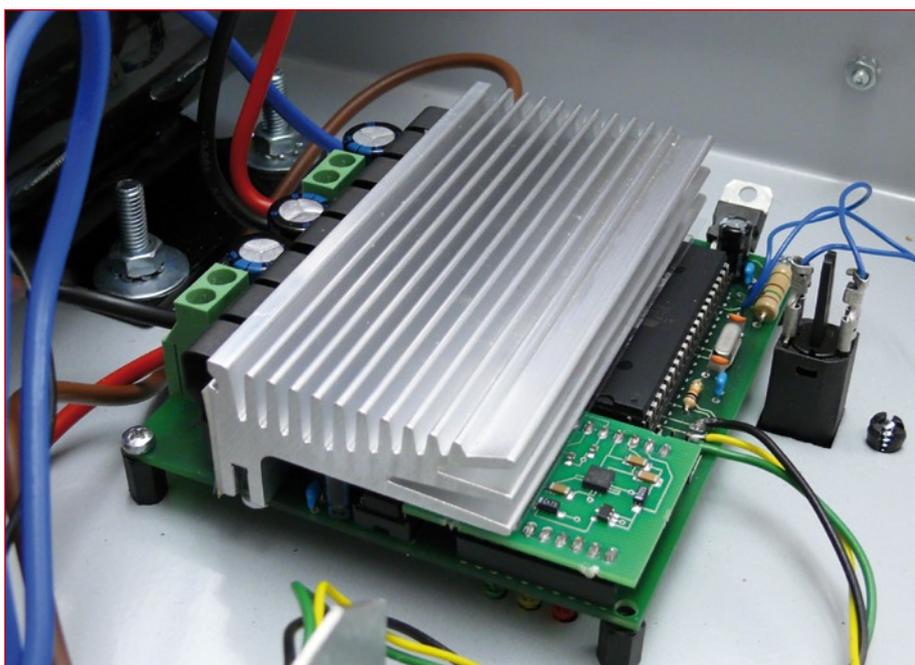


Bild 5. Die kompakte Elektronik besteht aus der Hauptplatine mit Kühlkörper und aufgesetzter Sensorplatine.

Software

Die Firmware beider Controller wurde mit BASCOM-AVR erstellt. Bild 6 gibt einen Überblick über die wichtigsten Funktionen der Motorsteuerung, die im Folgenden noch kurz beschrieben werden.

Funktion Init:

Initialisierung und Konfiguration von Timer0, Timer1/PWM, Variablen-Initialisierung, Kalibrierung für Gyroskop, Beschleunigungssensor und Lenkstangenpotentiometer.

Funktion Get_Angle:

Die Funktion liest die Werte der A/D-Kanäle (Gyro, ADXL320, Poti, Akkuspaltung, Fußtaster). Für Gyro, ADXL320 und Akkuspaltung werden die Werte über einen Zeitraum von 50 Durchläufen integriert.

Winkelrate(Angle_Rate) und absoluter Winkel(Tilt_angle) werden berechnet.
Poti-Stellung wird ausgelesen.

Funktion Filter:

Berechnet nötige Differenzbeschleunigung der Motoren (Balance_Diff), berechnet die Motorgesamtgeschwindigkeit (Drive_Speed).

Funktion process:

Berechnet auf Basis von Geschwindigkeit und Potistellung/Lenkstange die Geschwindigkeitsanpassung der Motoren, um eine entsprechende Lenkbewegung zu erhalten. Prüft, ob vom ATtiny eine „Überstromsituation“ gemeldet wurde und verringert entsprechend die Motorgeschwindigkeit (Drive_speed). Signalisiert durch Blinken der LEDs eine Warnmeldung („Überstromsituation“ oder „Fußtaster-Alarm“).
Ruft die Funktion Get_speed_batt auf.

Funktion Get_Speed_Batt:

Setzt eine zusätzliche Winkelkorrektur(Angle_Correction) beim Überschreiten der maximalen Geschwindigkeit und setzt entsprechend der Akkuspannung die 3 LEDs.

Funktion PWM_OUT:

Setzt entsprechend der Beschleunigung für Motor A und Motor B die PWM-Ausgänge und schaltet die Ausgänge für die Drehrichtung der Motoren.
Die Funktion begrenzt auch die maximale Leistung (PWM_MAX).

Funktion interrupt:

Wird vom Timer0 100 Mal pro Sekunde aufgerufen, ruft die Funktionen Get_Angle, Filter, Process und PWM_out auf.

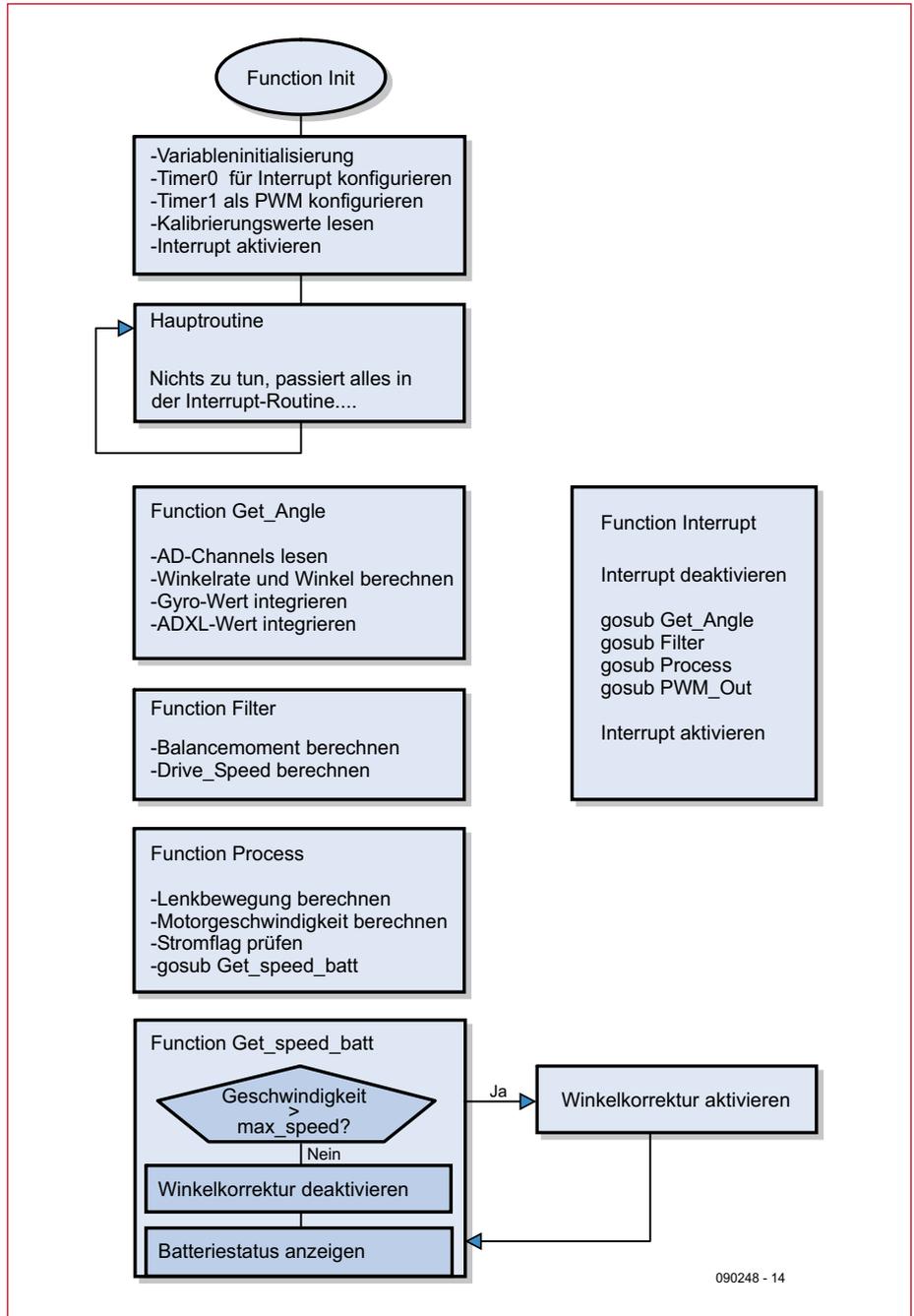


Bild 6. Funktionen der Steuerungssoftware.

Mechanik

Für die weniger elektronische Seite des ElektorWheelies ist der zweite und letzte Teil der Projektveröffentlichung vorgesehen. Neben der Beschreibung der mechanischen Konstruktion geben wir auch einen Überblick über den Zusammenbau und die Verdrahtung und natürlich auch einige Tipps für die Inbetriebnahme und Ideen für die Praxis.

(090248)

Mehr Informationen zum ElektorWheelie-Kit:
www.elektor.de/wheelie

Warn-Hinweis und Enthaltungs-Klausel:

- Der ElektorWheelie ist ein „Open Development“ (eine offene Entwicklung). Der Käufer ist frei in der Ausführung und kann Änderungen und Modifikationen der Hardware und Software des ElektorWheelie-Kits vornehmen.
- Für die Verwendung des ElektorWheelie auf öffentlichen Wegen und/oder öffentlichen Plätzen gelten nationale Gesetze sowie nationale und lokale Verordnungen und Bestimmungen. Es wurden keine Musterzulassungen beantragt. Eigentümer und Betreiber müssen für die Verwendung außerhalb von eigenen privaten Grundstücken (oder privaten Grundstücken mit Zustimmung des Grundstückseigentümers) die betreffenden nationalen und lokalen Bestimmungen beachten. Elektor kann hierfür keine Verantwortung übernehmen!
- Unter der Bedingung eines „Open Development“ (einer offenen Entwicklung) kann Elektor International Media beziehungsweise die Elektor-Verlag GmbH für sämtliche Schäden und Verletzungen, die durch den ElektorWheelie und seine Verwendung entstehen, keine Verantwortung übernehmen.