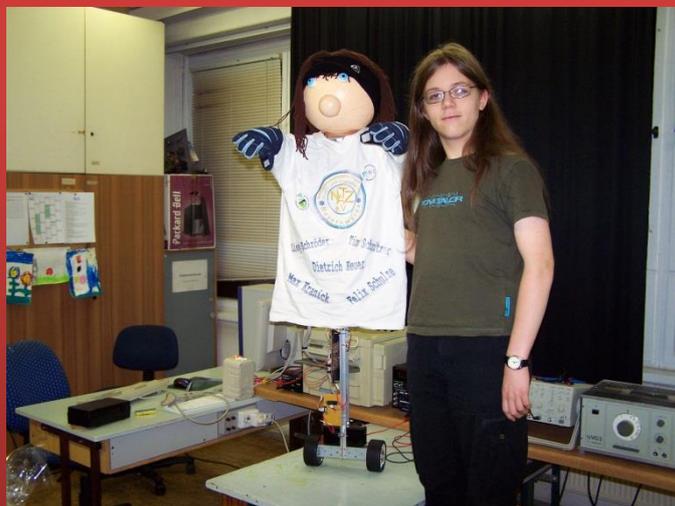


# Das Balance-Mobil

Besondere Lernleistung

Von Alicius Schröder

2013



# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

1	PROBLEMSTELLUNG .....	3
2	Arbeitsprozess .....	4
3	HARDWARE .....	7
3.1	Überblick.....	7
3.2	Funktionsweise des Beschleunigungssensors .....	8
3.3	Funktionsweise des Gyroskops.....	8
4	Das Regelsystem .....	10
4.1	P-Regler.....	10
4.2	I-Regler.....	11
4.3	D-Regler .....	11
4.4	Zusammenspiel der Regler .....	12
5	DAS PROGRAMM.....	13
5.1	Umsetzung des Regelsystems.....	15
5.2	Wertekorrektur.....	16
6	ERGEBNISSE .....	17
7	AUSBLICK .....	17
8	Quellenverzeichnis .....	18

# Besondere Lernleistung - Das Balance-Mobil

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Ziel war die Entwicklung eines Systems zur automatisierten Stabilisierung im Raum auf zwei Rädern.

Das System soll Lageänderungen eigenständig erfassen und Strategien zur automatischen Korrektur der Änderungen besitzen.

Technische Voraussetzungen für die Realisierung des Projektes bietet das Naturwissenschaftlich-Technische Zentrum in Hoyerswerda unter der Leitung von Frau Nagel. Weiterhin wurde die Entwicklung durch Herrn Heuer, Mitarbeiter des NATZ, betreut.

Die Elektronik zur Balancierung wurde mit modernen mikromechanischen Systemen entwickelt und in den mechanischen Aufbau integriert, wobei die Hard- und Softwarekomponenten ein sich auf die Senkrechtposition stabilisierendes Regelsystem bilden.

Erforderlich war, sich intensiv mit der physikalischen Wirkungsweise von Gyroskop und Beschleunigungssensor auseinanderzusetzen. Sie dienen der Lageerfassung des Mobils im Raum.

Die Informationen der Sensoren werden im Mikrorechner verarbeitet und als entsprechende Stellgröße an die Motoren ausgegeben, so dass Kipp-Vorgängen entgegengewirkt wird.

Entscheidend für die Funktion des Balance-Mobils sind die Parameterbestimmung der Proportional- und Integralregler und deren Umsetzung als Programmcode.

Zur Programmierung des Mikroprozessors ATMEGA 32 wird die Software BASCOM, ein Basic-Dialekt, verwendet.

## 2 Arbeitsprozess

Nach einer grundlegenden Problemanalyse entschied ich mich zunächst zum Einsatz eines Beschleunigungssensors zur Erfassung der Winkelbeschleunigung. Für die Verarbeitung wollte ich einen ATMEGA8 einsetzen.

Angelehnt an einen Menschen, der einen Besen auf seiner Handfläche balanciert, wollte ich den Gesamtaufbau konstruieren. So ordnete ich zwei Aluminium-Stangen parallel an, an deren Enden ich zwei Motoren befestigte. Weiterhin plante ich eine Platine für den Beschleunigungssensor, bei der durch eine Spannung die Kapazität ermittelt werden sollte. Auch einen Verstärker für das Signal plante ich auf dieser Platine mit ein.

Im nächsten Schritt entwarf ich alle notwendigen Platinen mit der Layout-Software EAGLE. Hier entwarf ich noch eine Platine für den ATMEGA, auf der die Stromversorgung, ein 16MHz-Quarz, die Ports und eine ISP-Schnittstelle vorgesehen waren.

Außerdem war noch eine Steuerplatine für die Motoren notwendig, weil über den ATMEGA maximal 50mA fließen dürfen. Diese Platine ist neben der Prozessorplatine zusätzlich mit der Stromversorgung verbunden, und schaltet den Strom mittels Feldeffekttransistoren abhängig von den Signalen des Prozessors.

Nach dem Entwurf aller Platinen erstellte ich eine Liste der notwendigen Materialien, die ich dann bestellte. Mein Betreuer besitzt ein Gerät, welches EAGLE-Layouts einliest und anschließend fräst. So entstanden meine Platinen und ich begann mit dem Bestücken und Löten.

Gyro-Sensor

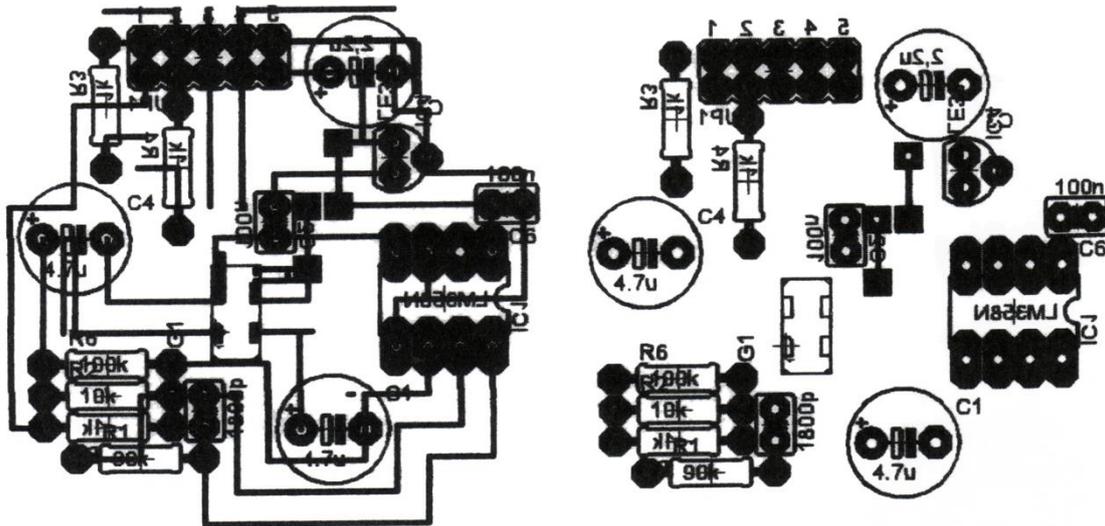
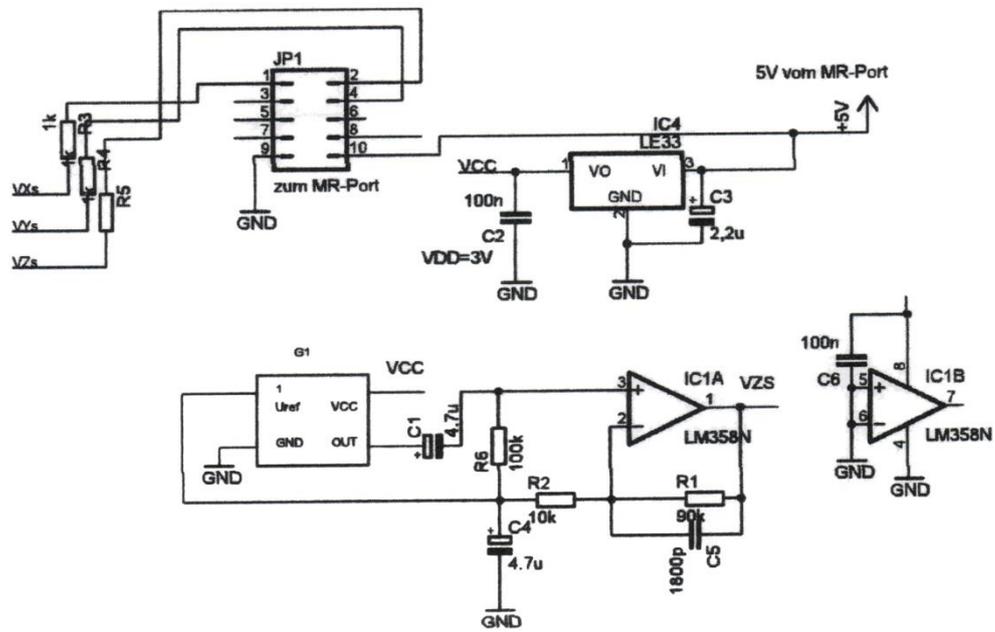


Abbildung 1: Entwurf der Gyroskop-Platine mit Schaltkreis und Bestückungsplan

Fertig zusammengebaut begann ich nun mit der Programmierung des ATMEGA per Bascom. Hier entstand schnell das Problem, dass zum Debugging einzelne LEDs, die ich an die Ausgänge des Prozessors anschloss, nicht ausreichen.

Die ISP bietet die Möglichkeit zur seriellen Datenübertragung zur Laufzeit, allerdings sind zur Balancierung schnelle Reaktionen erforderlich. Überträgt man zur Laufzeit Daten, wird das System derart träge, dass keine Stabilisierung mehr möglich ist.

Deshalb fertigte ich eine LCD-Platine an, auf der Daten ausgegeben werden können. Da jedoch selbst das Ansteuern der Platine zu lange dauert, fertigte ich zusätzlich eine weitere Prozessorplatine mit einem ATMEGA8 an. Nun überträgt mein Hauptprozessor die Werte an den zweiten Mikroprozessor, der sich dann ausschließlich um die Steuerung des Displays kümmert.

Die neuste kürzlich durchgeführte Änderung ist schließlich noch der Austausch der Prozessorplatine gegen eine neue Prozessorplatine, in die ein ATMEGA32 einsetzbar ist. Diese Änderung war nötig, weil das Programm mittlerweile die maximale Programmgröße des ATMEGA8 in Höhe von 8kb überschritten hatte.

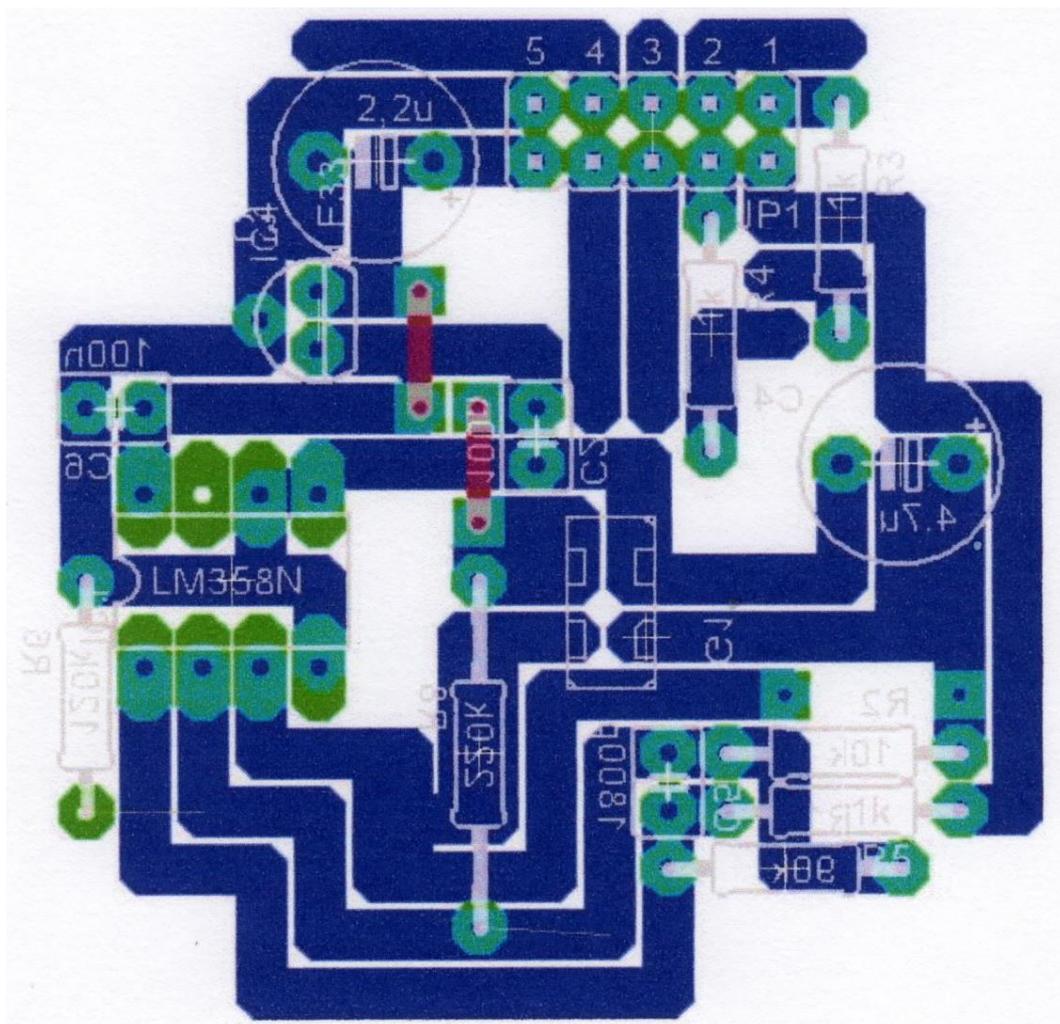


Abbildung 2: Entwurf der Platinen-Layouts zur Fräsung der Platinen

## 3 HARDWARE

### 3.1 Überblick



Abb. 3: Prüfung der neuen Prozessor-Platine

Die zur Fortbewegung benutzten Räder sind parallel angeordnet und befinden sich ganz am Ende zweier Aluminium-Stangen. Diese Stangen tragen die daran festgeschraubte Prozessor-Platine, die Motoren-Platine, die LCD-Platine sowie die Sensor-Platinen.

Als Stromversorgung dient ein Blei-Akku. Seine Spannung wird an der Prozessor-Platine auf 5V heruntergeregelt. Über diese Platine programmiere ich den ATMEGA32 per ISP (In-System-Programmierung). Über Pfosten-Stecker werden die Verbindungen von den Sensoren sowie die Verbindungen zu dem Display und der Motoren-Platine hergestellt.

Bei den Motoren handelt es sich um starke Motoren aus Akku-Bohr-Schraubern. Um große Ströme am Mikroprozessor (die ihn zerstören würden) zu vermeiden, steuert die Prozessor-Platine eine zusätzlich angefertigte Steuer-Platine an. Diese besitzt eine Reihe von Feldeffekttransistoren, welche die hohen Ströme verarbeiten können. Der Leistungsteil für die Ansteuerung der Motoren ist direkt mit dem Akku verbunden.

Der Beschleunigungssensor liefert den Wert für die jeweilige Position des Balance-Mobils, während das Gyroskop die Winkelgeschwindigkeit der Kipp-Bewegung ausgibt. Die Werte des Beschleunigungssensors sind nur nutzbar, wenn die Werte des Gyroskops verwendet werden, um auf das Umkippen zu reagieren.

Das Gyroskop ist hinsichtlich seiner Signalausgabe mit einem Kreiselkompass vergleichbar und teilt mir relative Abweichungen als Spannungsänderungen mit.

Diese wertet der Prozessor nach einer Verstärkung aus. Auf diesem Weg werden jederzeit Abweichungen festgestellt und zur Regelung der Motoren verwendet.

Für zukünftige Ziele wie die erweiterte Raumkoordination, z.B. Hinderniserkennung, sowie zur Programmsteuerung besitzt das Mobil zusätzlich einen Entfernungsmesser.

## 3.2 Funktionsweise des Beschleunigungssensors

Der Beschleunigungssensor ist ein Sensor, der die Beschleunigung misst, indem die auf eine Testmasse wirkende Trägheitskraft bestimmt wird. Dies ermöglicht die Erfassung von Geschwindigkeitszu- und -abnahmen. Dabei erfasst der von mir verwendete Beschleunigungssensor die Änderungen in allen drei Achsen des Raumes, wobei für mein Programm lediglich die Achse der Fahrtrichtung relevant ist.

Viele Beschleunigungssensoren beruhen auf piezoelektrischen Elementen. Der von mir verwendete Beschleunigungssensor berechnet aus der Veränderung der Kapazität die Beschleunigung.

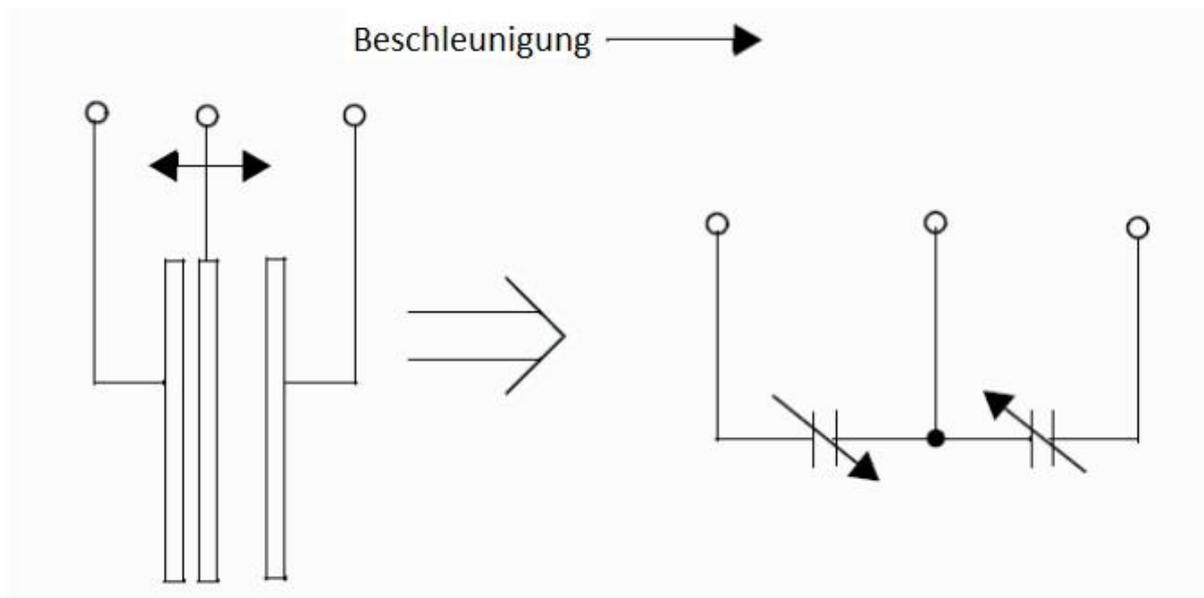


Abb. 4: Vereinfachte Skizze des kapazitiven Beschleunigungssensors

Wird der Sensor beschleunigt, wirkt auf Grund der Trägheit eine Kraft auf die mittlere Platte, weswegen sie sich gegenüber den anderen beiden Platten verschiebt, bis die Federkraft so groß wie die durch die Trägheit erzeugte Kraft ist. Durch die Verschiebung der mittleren Platte verändern sich auch die Kapazitäten der Kondensatoren. Der Unterschied der Kapazitäten ist durch eine Spannung messbar, die anschließend verstärkt wird, damit am Analog-Digital-Wandler (ADC) des Mikroprozessors Veränderungen deutlich werden.

## 3.3 Funktionsweise des Gyroskops

Das Gyroskop ist eine Art Kreisel, der in einer Aufhängung befestigt wurde. Mit Gyroskopen misst man die Winkelbeschleunigung, da auf Grund des Drehimpulses der Kreisel des Gyroskops seine Lage bei einer Drehung im System nicht verändert, sondern nur die Aufhängung. Diese Eigenschaft ist im Gegensatz zum Beschleunigungssensor unabhängig von der Schwerkraft.

Bei meinen ersten Versuchsaufbauten setzte ich nur einen Beschleunigungssensor ein. Wenn das Mobil aber kippt, befindet es sich im freien Fall. Da hier die Beschleunigung konstant ist, erkennt das Mobil nicht, dass es umkippt. Außerdem reagiert das Gyroskop wesentlich

sensibler als der Beschleunigungssensor auf Lageveränderungen. Daher erfasse ich momentan zur Beschleunigungsgeschwindigkeit durch den Beschleunigungssensor zusätzlich die Winkelgeschwindigkeit durch das Gyroskop.

## 4 Das Regelsystem

Das Regelsystem sollte so konzipiert werden, dass die Regler selbsttätig eine physikalische Größe unter Reduzierung von Störeinflüssen auf ein vorgegebenes Niveau regeln.

Dazu vergleichen jeweils die Regler des Beschleunigungssensors und des Gyroskops innerhalb eines Regelkreises einen vorher berechneten Sollwert mit dem gemessenen und zurückgeführten Istwert des Sensors und ermitteln aus dem Unterschied der beiden Größen – der Regelabweichung – eine Stellgröße, die auf die Motoren gegeben wird, welche die Regelstrecke so beeinflusst, dass die Regelabweichung im eingeschwungenem Zustand zu einem Minimum wird.

In meinem Projekt verwende ich einen Proportional-, einen Integral- und einen Differentialregler.

### 4.1 P-Regler

Die Regelgröße ändert sich proportional ohne zeitliche Abhängigkeit zur Abweichung. Wegen des fehlenden Zeitverhaltens reagiert der P-Regler unmittelbar. Um ein Überschwingen zu vermeiden, muss die Verstärkung zum Teil reduziert werden. Außerdem würde ohne einen Integralanteil die Regelabweichung konstant bleiben, da eventuelle Regelfehler nicht korrigiert werden würden. Ich verwende ihn für ein schnelles Eingreifen in den Regelprozess durch eine sofortige Stellwirkung beim Auftreten einer Regeldifferenz.

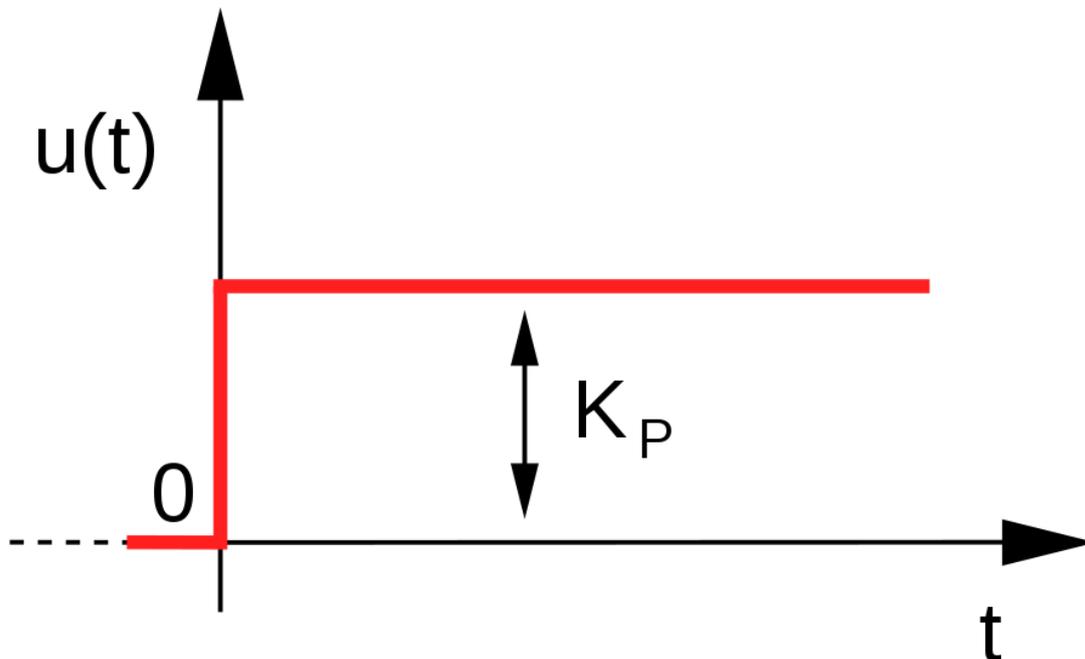


Abbildung 5: Proportionales Ausgangssignal, unabhängig von der Zeit

## 4.2 I-Regler

Beim I-Regler werden die Regelabweichungen zeitlich integriert. Der I-Regler ist durch seine (theoretisch) unendliche Verstärkung ein genauer, aber langsamer Regler. Will man hier eine geringe Integrierzeit erreichen, ist eine hohe Anstiegsgeschwindigkeit erforderlich. Da hohe Anstiegsgeschwindigkeiten aber schnell zum Überschwingen führen, verlängert sich oft die Integrierzeit.

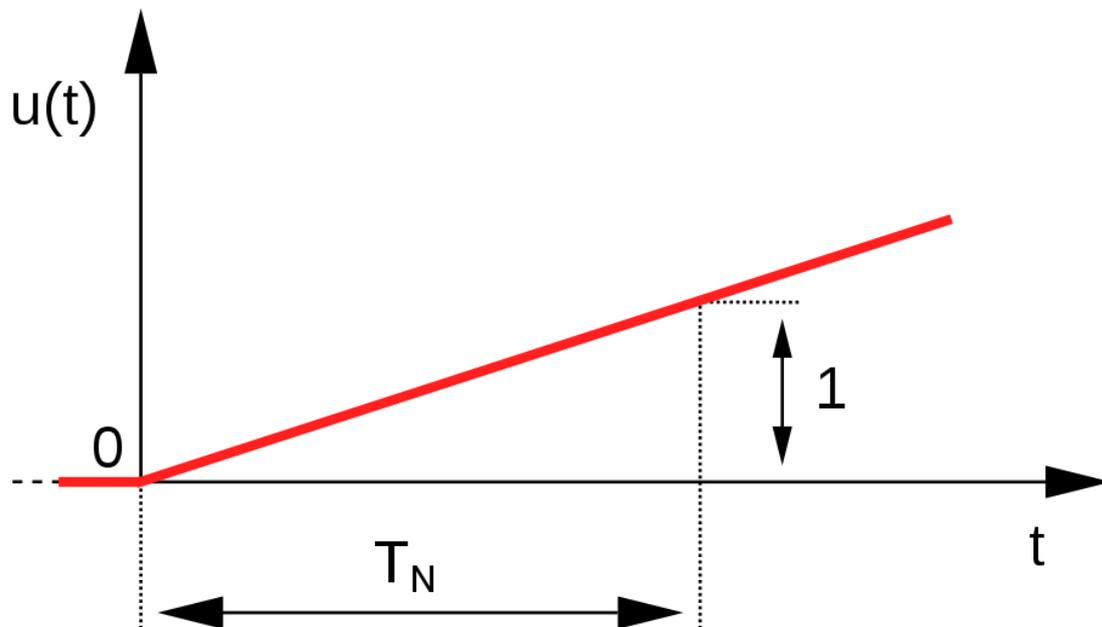


Abbildung 6: Sprungantwort des idealen I-Reglers: Stetiger Anstieg der Regelgröße über die Zeit

## 4.3 D-Regler

Das D-Glied wird hier in Verbindung mit dem I-Glied eingesetzt. Es reagiert nicht auf die Höhe der Regelabweichung, sondern nur auf deren Änderungsgeschwindigkeit. Er reagiert deshalb noch wesentlich schneller als der P-Regler: Selbst bei kleiner Regeldifferenz erzeugt er große Stellamplituden, sobald eine Amplitudenänderung auftritt. Eine bleibende Regelabweichung erkennt der D-Regler hingegen nicht, denn, ganz unabhängig davon, wie groß sie ist, ihre Änderungsgeschwindigkeit ist gleich null.

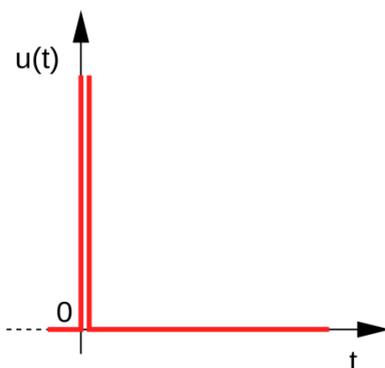


Abbildung 7: Sprungantwort des idealen D-Reglers

#### 4.4 Zusammenspiel der Regler

Die einzelnen Regler werden durch Faktoren gewichtet und wirken parallel zusammen. Durch die Vielzahl der Möglichkeiten, die einzelnen Regler und deren Gewichtung einzustellen, erhält man ein sehr universelles Regelsystem. Im Zusammenspiel machen sich vor allem die Eigenschaft des Integralreglers, etwas träge aber genau zu regeln, und die Eigenschaft des P-Reglers, in sehr kurzer Zeit durch eine große Stellamplitude sich dem Sollwert zu nähern, bemerkbar.

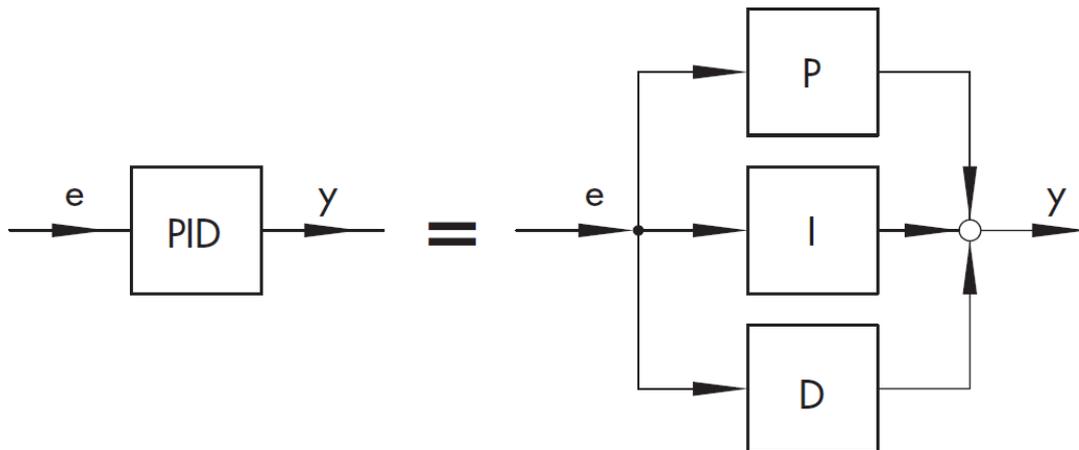


Abbildung 8: Elemente des PID-Reglers

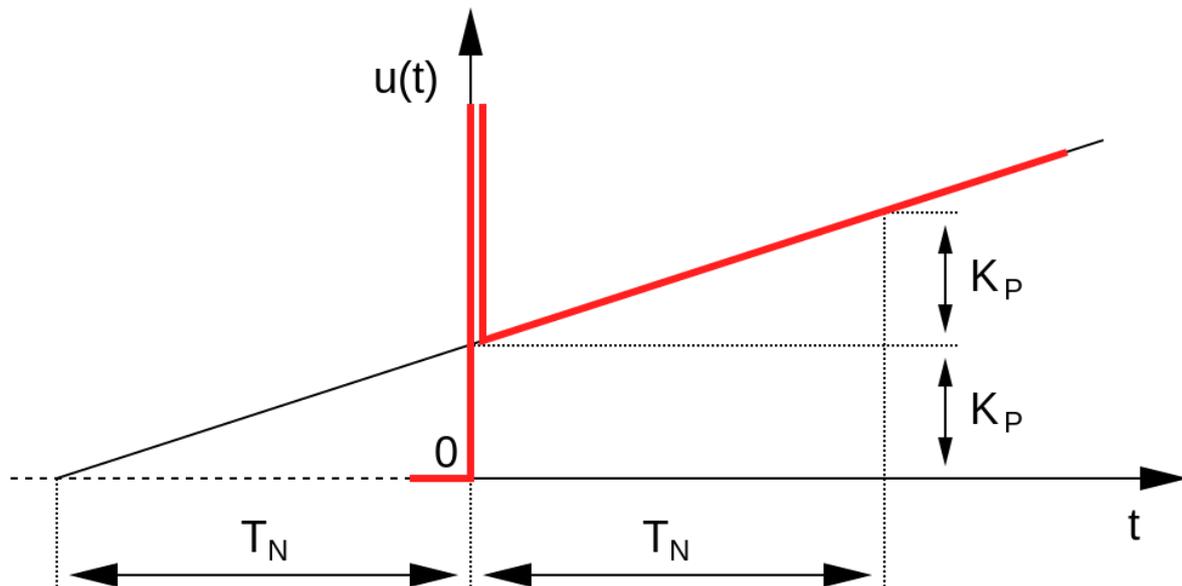


Abbildung 9: Sprungantwort des idealen PID-Reglers

## 5 DAS PROGRAMM

Zuallererst müssen wesentliche Parameter initialisiert werden, so z.B. viele Startvariablen und das Puls-Weiten-Modulations-Signal des Motors.

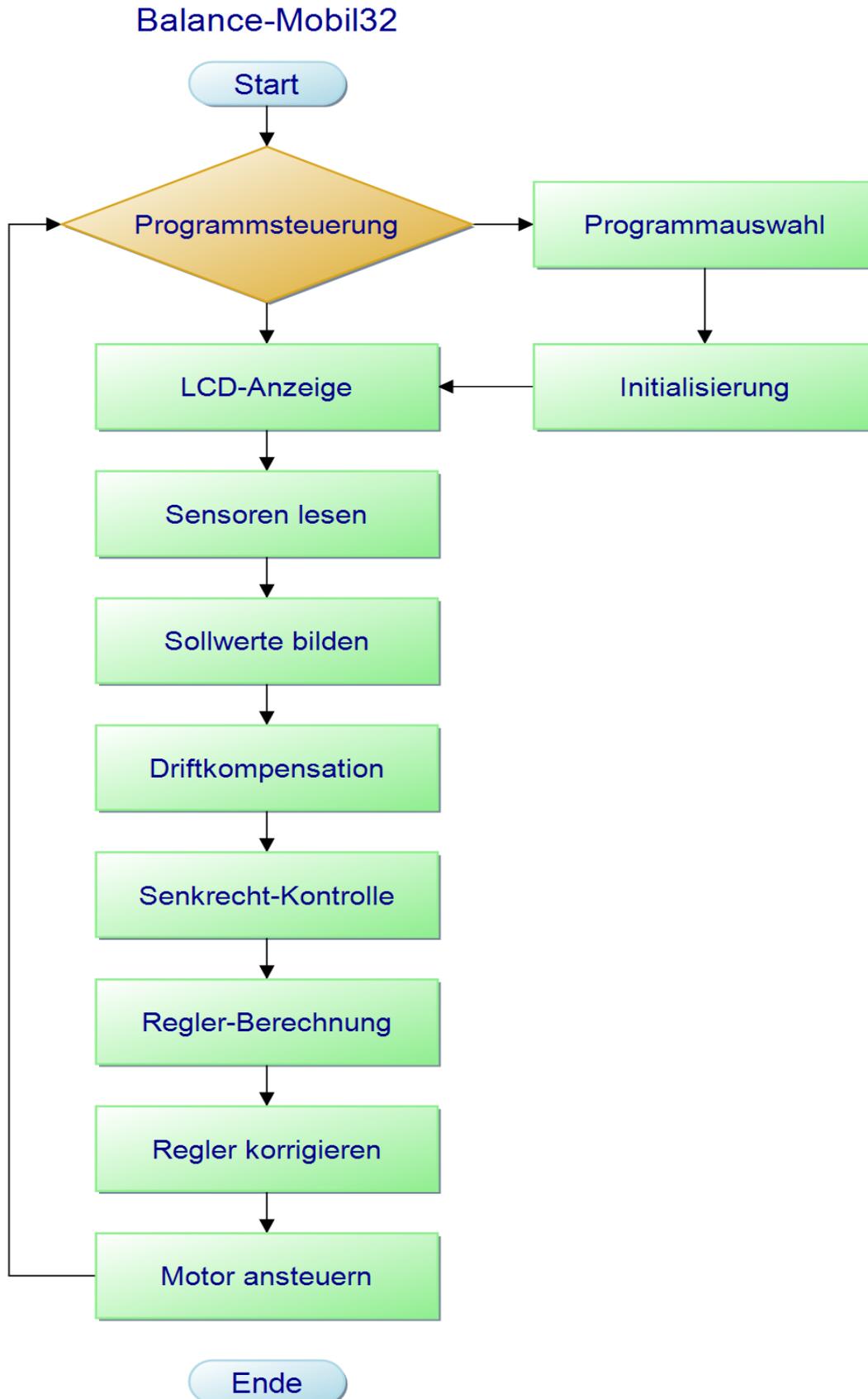
Der Nutzer startet das Hauptprogramm durch ein Signal des Entfernungsmessers mit der Hand. Nun wird die Senkrechtposition durch die Sensoren erfasst. So genannte Soll-Werte werden gebildet.

Nach der Initialisierung arbeitet der Mikroprozessor eine Reihe von Unterprogrammen ab. Anfangs werden die neuen Sensor-Werte geladen. Anschließend erfolgt das komplexe Regeln. Hierzu werden die Daten des Gyroskops und des Beschleunigungssensors ausgewertet. Zusätzlich werden Korrektur-Routinen ausgeführt, um das Verhalten des Mobils zu verbessern.

Wenn das Regelsystem die Werte für die Motoren errechnet hat, bestimmt eine Motoren-Routine die Richtung der Motoren und steuert die Platine zur Motoren-Steuerung an. Damit ist die Richtung festgelegt.

Anschließend wird das Signal der Puls-Weiten-Modulation gebildet.

Zur Signaldarstellung werden im Hauptprogramm zusätzlich eine Routine zur Ansteuerung eines LC-Displays und eine zum Ansteuern einiger LEDs ausgeführt. Diese Routinen erleichtern die Fehlerbehebung sehr.



1. Abbildung 10: Gesamt-Ablaufplan des BASCOM-Programms

## 5.1 Umsetzung des Regelsystems

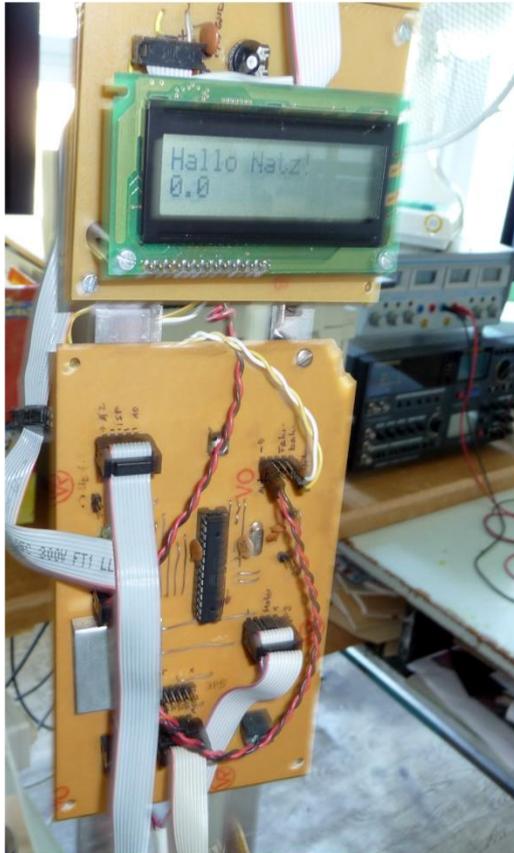


Abbildung 11: Prozessor-Platine und Display

Wie bereits beim Regelsystem erklärt, werden mit dem Beschleunigungssensor und mit dem Gyroskop jeweils ein Integral-, ein Differential- und ein Proportionalregler gebildet. Somit können vier Regler genutzt werden, die das Verhalten des Mobils bestimmen. Jeder dieser Regler besitzt einen Faktor, der bestimmt, wie groß der Anteil des Reglers am Gesamtergebnis ist.

Die Proportionalregler enthalten die Abweichung der Sensor-Werte vom Soll-Wert. Die Werte der Integralregler verändern sich in Abhängigkeit von der Dauer der Abweichung. Die Regelung erfolgt über die Motoren derart, dass die Abweichungen von der Senkrechten jeweils vermindert werden und das Balance-Mobil nicht umfällt.

Um Überläufe der Variablen, insbesondere bei den Integralreglern, zu vermeiden, werden hier Maximal-Werte gesetzt, die nicht überschritten werden können.

## 5.2 Wertekorrektur

Die Werte, die mit den Sensoren erfasst werden, unterliegen vielen Störungen. Da sich sowohl der Beschleunigungssensor als auch das Gyroskop am oberen Ende der Stangen des Mobils befinden, wird die erfasste Bewegung durch übertragene Schwingungen stark verfälscht. Hinzu kommt, dass die Elektronik Temperaturschwankungen unterliegt, welche sich besonders stark beim Gyroskop bemerkbar machen. Hier reicht bereits ein Windzug aus, um die erfassten Werte des Sensors dramatisch zu verändern.

Zu dem thermischen Verhalten kommen noch ungerade Ausrichtung durch den Benutzer und umgebungsbedingte Ungenauigkeiten (z.B. unebener Boden) hinzu.

Neben den elektronischen Störungen können auch programmbedingte Störungen auftreten. So ist beispielsweise das Überschwingen ein großes Problem: Wenn das Balance-Mobil kippt, reagiert es stärker gegen das Kippen; diese Reaktion wird als Kippen aufgefasst und es reagiert stärker gegen seine erste Reaktion, anschließend reagiert es mit noch mehr Kraft gegen seine letzte Reaktion usw...

Diese Gründe sprechen für eine gründliche und gut durchdachte Korrekturroutine, da ohne sie das Regelprinzip nur in der Theorie ohne die genannten Störungen funktionieren würde.

Um diesen Fehlern zu begegnen, wird in jedem Durchlauf der Soll-Wert des Beschleunigungssensors verändert, abhängig von der Geschwindigkeit und Richtung der Motoren. So wird bei einer mittleren Motorgeschwindigkeit der Soll-Wert erst stark verschoben. Sobald die Geschwindigkeit noch größer wird, wird die Änderung des Soll-Wertes wieder abgeschwächt. Sollte sich der Motor nur wenig bewegen, wird keine Korrektur durchgeführt.

Diese Vorgehensweise wirkt sehr effektiv gegen das Überschwingen und schafft zugleich eine größere Stabilität.

Die zweite Korrekturmaßnahme kontrolliert, ob der Wert des Motors und der Wert des Gyroskops bzw. des Beschleunigungssensors das gleiche Vorzeichen besitzen. Nur wenn das der Fall ist, wird der Proportionalteil des Sensors errechnet. Mit diesem Ansatz werden die durch den Einsatz realer elektronischer Bauteile bedingten Störungen wirksam gefiltert. Seit dem Einsatz dieser Routine kam es kaum noch zu Fehlverhalten durch Temperaturveränderungen.

## 6 ERGEBNISSE

Nach mehrfacher Umgestaltung ist schließlich ein System entstanden, das die technischen Voraussetzungen zur Erfassung aller Neigungsänderungen bietet. Dabei auftretende, durch die Qualität der verwendeten Materialien bedingte Störungen konnten durch ein gut abgestimmtes Zusammenspiel von Hardware und Software kompensiert werden. Dank des flexiblen, mittlerweile gut abgestimmten Regelsystems ist der ordnungsgemäße Betrieb auch bei äußeren Einflüssen, wie leichten Stößen, gewährleistet. Insgesamt ist ein sehr zufriedenstellendes System entstanden.

Rückblickend ist vor allem der Wissenszuwachs während der Entwicklung des Projektes enorm. Es begann mit elektrischen Grundlagen und der Bedienung von EDA-Software für den Platinen-Entwurf. Es folgten der Umgang mit Mikroprozessoren, das Untersuchen physikalischer Prozesse und die Beschäftigung mit Baugruppen zur Lageerfassung. Schließlich dann die Aneignung des Wissens zu Regelsystemen und deren Implementierung in einer Software unter Berücksichtigung der Hardware-Bedingungen.

## 7 AUSBLICK

Als nächstes soll das Balance-Mobil nicht nur stabil stehen, sondern außerdem dazu in der Lage sein, eigenständig fahren zu können. Da es bereits einen Entfernungsmesser besitzt, wären dann z.B. Routinen zur Orientierung im Raum, zum Folgen von Menschen oder zum Fahren von vorgegebenen Routen denkbar.

Auf längere Sicht soll Patrick nicht ein Mobil bleiben, sondern ein innovatives und revolutionäres Verkehrsmittel werden. Sowohl Produzenten als auch Käufer können einen hohen Nutzen aus solchen Fahrzeugen ziehen, weil mit dieser Idee Material und Verkehrsraum eingespart sowie Verschleißteile reduziert werden können.

Denkbar ist ein elegantes Einrad mit automatischer Stabilisierung, welches komfortabel und ohne Übung für jeden benutzbar wäre.

Eine weitere Idee sind effizientere und markantere Autos, welche insbesondere im Zeichen des zunehmenden Verkehrs eine hervorragende Alternative darstellen.

## 8 Quellenverzeichnis

### Bücher

Heinz Unbehauen: Regelungstechnik I: Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme: 1 (Studium Technik). Vieweg+Teubner Verlag, 2008.

Peter Kopacek: Identifikation zeitvarianter Regelsysteme. Vieweg+Teubner Verlag, 2008.

Klaus Wüst: Mikroprozessortechnik: Grundlagen, Architekturen, Schaltungstechnik und Betrieb von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

Cornelius Schneider: Messtechnik mit dem ATmega. Franzis, 2010.

Claus Kühnel: Programmieren der AVR RISC Microcontroller mit BASCOM-AVR: 3. bearbeitete und erweiterte Auflage. Skript Verlag Kuehnel, 2010.

Rolf Mahnken: Lehrbuch der Technischen Mechanik - Dynamik: Eine anschauliche Einführung. Springer, 2011.

André Kethler: Leiterplattendesign mit EAGLE 5. Mitp, 2009.

### Webseiten

Regelkreis, <http://de.wikipedia.org/wiki/Regelkreis>, 22.02.2013

Regler und Regelstrecken, [http://www.samson.de/pdf\\_de/l102de.pdf](http://www.samson.de/pdf_de/l102de.pdf), 22.02.2013

### Bilder

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/Idealer\\_P\\_Sprungantwort.svg/250px-Idealer\\_P\\_Sprungantwort.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/Idealer_P_Sprungantwort.svg/250px-Idealer_P_Sprungantwort.svg.png)

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/Idealer\\_I\\_Sprungantwort.svg/350px-Idealer\\_I\\_Sprungantwort.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/Idealer_I_Sprungantwort.svg/350px-Idealer_I_Sprungantwort.svg.png)

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/17/Idealer\\_D\\_Sprungantwort.svg/200px-Idealer\\_D\\_Sprungantwort.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/17/Idealer_D_Sprungantwort.svg/200px-Idealer_D_Sprungantwort.svg.png)

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Idealer\\_PID\\_Sprungantwort .svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Idealer_PID_Sprungantwort.svg)