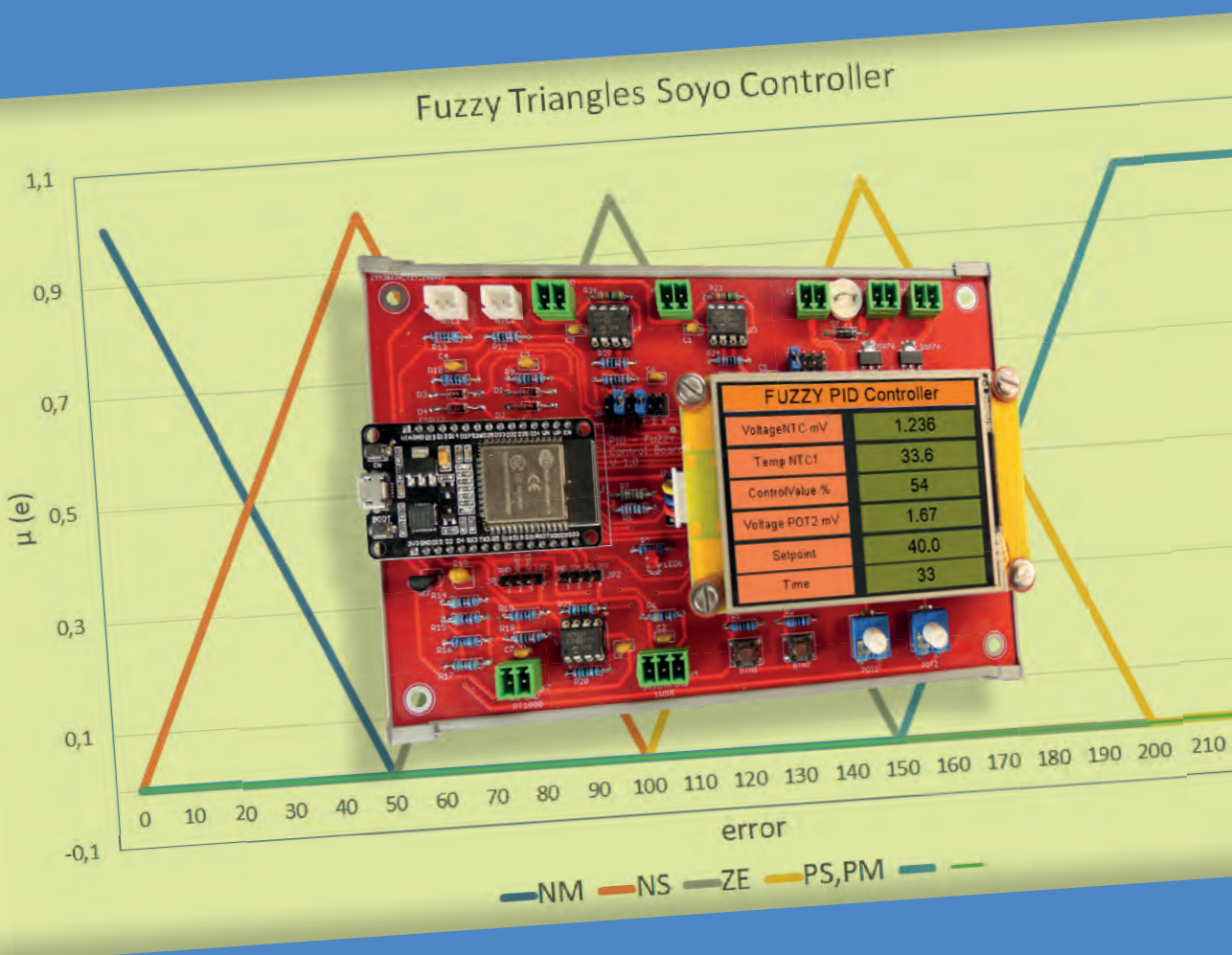


Regelungstechnik mit Fuzzy Logic

Praktische Anwendungen und Projekte
mit Arduino, ESP32 und RP2040



Josef Bernhardt

Regelungstechnik mit Fuzzy Logic

Praktische Anwendungen und Projekte mit
Arduino, ESP32 und RP2040



Josef Bernhardt

● © 2024: Elektor Verlag GmbH, Aachen.

1. Auflage 2024

● Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

● Erklärung

Autor, Übersetzer und Verlag haben sich nach besten Kräften bemüht, die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Informationen zu gewährleisten. Sie übernehmen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die durch Fehler oder Auslassungen in diesem Buch verursacht werden, unabhängig davon, ob diese Fehler oder Auslassungen auf Fahrlässigkeit, Versehen oder eine andere Ursache zurückzuführen sind, und lehnen jegliche Haftung hiermit ab.

● **ISBN 978-3-89576-646-6** Print

ISBN 978-3-89576-647-3 eBook

● Satz und Aufmachung: D-Vision, Julian van den Berg | Oss (NL)

Druck: Ipskamp Printing, Enschede (NL)

Elektor Verlag GmbH, Aachen

www.elektor.de

Elektor ist die weltweit wichtigste Quelle für technische Informationen und Elektronik-Produkte für Maker, Ingenieure und Elektronik-Entwickler und für Firmen, die diese Fachleute beschäftigen. Das internationale Team von Elektor entwickelt Tag für Tag hochwertige Inhalte für Entwickler und DIY-Elektroniker, die über verschiedene Medien (Magazine, Videos, digitale Medien sowie Social Media) in zahlreichen Sprachen verbreitet werden. www.elektor.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Kapitel 1 • Arduino Hardware für die Regelungstechnik	10
1.1 Arduino UNO	10
1.2 Arduino NANO	11
1.3 Espressif ESP32	13
1.4 Raspberry RP2040 Controller	14
1.5 ESP32 Fuzzy PID Controller Board	15
1.6 ESP32 Modbus RTU Controller Board	18
1.7 Programmieren der Arduino Boards	21
1.8 Das Nextion Grafik Display	22
1.9 Testsoftware für das ESP32 Board	23
1.10 Programmbeispiel mit dem ESP32	27
1.11 Arduino ESP32 Controller 12 Bit A/D-Wandler Test	33
1.12 Codeblocks Entwicklungsumgebung für Ansi C	40
1.13 Serial Data Reader	41
1.14 Serial Port Datareader	42
1.15 Der Espressif ESP32 als WebSocket-Server	43
Kapitel 2 • Sensoren	54
2.1 NTC Temperatursensoren	54
2.2 RTD Temperatursensoren	57
2.3 Lineare Interpolation	60
2.4 Thermoelemente	61
2.5 Anwendungen von Thermoelementen	62
2.6 Sensoren mit integrierter Elektronik	65
2.7 pH Sensoren	67
2.8 Drehgeber	69
2.9 Kraftmessung	71
2.10 Lineare Regression	74
2.11 Spline Interpolation	78
2.12 Polynomische Regression	82

Kapitel 3 • Stellglieder MOSFET und Solid State Relais	88
3.1 MOSFET BSP76	88
3.2 MOSFET Schaltung mit Optokoppler für 10 A	89
3.3 H-Brücke L298	90
3.4 H-Brücke mit BTS7960 von Infineon bis maximal 43 A	91
3.5 Thyristor Steller für Wechselspannung	93
Kapitel 4 • Steuerung, Regelung und Regelstrecken	94
4.1 Formelzeichen	94
4.2 Unterschied Steuern und Regeln nach IEC 60050-351	94
4.3 Beispiele zur Steuerungstechnik	95
4.4 Ansteuern einer realen Heizung	99
4.5 Ansteuerung eines DC Motors mit PWM (Pulsweitenmodulation)	110
Kapitel 5 • Zweipunkt und PID-Regler	121
5.1 Zweipunktregler	121
5.2 PID-Regler	126
5.3 Parameterbestimmung mit Ziegler-Nichols	128
5.4 Parameterbestimmung mit der Relay Methode	129
5.5 Arduino PID Regler mit PT2 Simulation	131
5.6 Arduino PID-Regler mit realer Strecke (ALU-Block)	137
5.7 Arduino PID-Regler für stehendes Pendel	147
Kapitel 6 • Fuzzy Logic Grundlagen	156
6.1 Fuzzy Logic Geschichte	156
6.2 Fuzzy Logic Regler Aufbau	157
6.3 Fuzzifizierung	157
6.4 Inferenz	157
6.5 Defuzzifizierung	158
6.6 Fuzzy Beispiel Lüftersteuerung	158
6.7 Regelung eines Inversen Pendels	164
6.8 Fuzzy Sets	169
6.9 Simulation einer Funktion mit Fuzzy Logic	178
6.10 Anwendung einer Fuzzy Funktion für ein Temperaturprofil	184

Kapitel 7 • Fuzzy Logic Temperaturregler	187
7.1 Fuzzy Regler mit PT2-Simulation	187
7.2 Fuzzy Regler mit dem ESP32 und realer Heizung	194
7.3 Fuzzy Beispiele mit Gauss, Bell und Sigmoid	207
Kapitel 8 • Fuzzy Logic Temperaturregler mit zwei Eingängen	208
8.1 Temperaturregler mit zwei Eingängen	208
8.2 Fuzzy Control Beispiel für eine Heizungsregelung	212
Kapitel 9 • Fuzzy-Regler Beispiele mit einem DC-Motor	221
9.1 DC-Motoren Grundlagen	221
9.2 Ansteuern des Motors mit PWM (Drehzahlsteuerung)	224
9.3 Ansteuern des Motors mit PWM und Drehzahlmessung	225
9.4 Motor Drehzahlregelung mit Fuzzy Logic	229
9.5 Motor Positionssteuerung	243
Kapitel 10 • Sliding-Mode-Regler	252
10.1 Allgemeine Beschreibung des Sliding Mode Reglers	252
10.2 Sliding Mode Regler Beispiel mit der PT2 Strecken Simulation	254
10.3 Sliding Mode Regler Beispiel mit realer Strecke	259
10.4 Optimierung der Parameter c_1 und c_2 mit Fuzzy Logic	270
Kapitel 11 • Neuronale Netze	274
11.1 Geschichte der neuronalen Netze	274
11.2 Biologisches Neuron	275
11.3 Grundlagen	275
11.4 Aktivierungsfunktionen	276
11.5 Das Perceptron	278
11.6 Feedforward Netze	279
11.7 Training des Neuronalen Netzes	281
11.8 ANN Beispiel XOR	284
11.9 Fuzzy Gauss Regler mit Neuronalem Netz	290
11.10 Einen Farbsensor mit dem Neuronalem Netz auswerten	297
11.11 Training eines neuronalen Netzwerks mit zwei Hidden Layern	310

Kapitel 12 • Fuzzy-Regler für die Stromeinspeisung ins Hausnetz324

 12.1 Einführung 324

 12.2 Shelly 3EM Energiemesser 324

 12.3 Messungen mit dem Shelly Plus 1PM 327

 12.4 Laderegler Victron Smart Solar 100 I 20. 330

 12.5 Windows Software SharpDevelop_Shelly3emWinform 333

 12.6 Soyo Micro Inverter für die Netzeinspeisung 334

 12.7 ESP32 PID Fuzzy Control Board für die Regelung. 336

 12.8 Fuzzy-Regler Funktion 341

Anhang A • Schaltungen Layouts und Stückliste343

Anhang B • Literaturverzeichnis 358

Anhang C • Weblinks 359

Anhang D • Beispielprogramme für den Arduino UNO und ESP32. 360

Index363