

Grundprojekt
Jan Alexander Thies

Charakterisierung eines induktiven Sensors zur Zustandsüberwachung von Flutschutztoren

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informatik

Faculty of Engineering and Computer Science
Department Computer Science

Fachlicher Betreuer:
Prof. Dr. Thomas C. Schmidt

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG
Hamburg University of Applied Sciences

Jan Alexander Thies

Thema der Arbeit

Charakterisierung eines induktiven Entfernungssensors zur Zustandserfassung von Flutschutztoren

Stichworte

Induktive Sensoren, Sensor-Linearisierung, Flutschutztore, Wertetabelle, Eingebettete Systeme, Hochwasserschutz, Rescue-Mate

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Eignung induktiver Entfernungssensoren zur Zustandserfassung von Flutschutztoren im Rahmen des Rescue-Mate-Projekts. Der Sensor DW-AD-509-M18 von Contrinex wird über einen Messbereich von 0-11mm charakterisiert.

Zur Linearisierung der Ansprechkurve werden lineare Regression, Suchtabelle (LUT) und polynomielle Regression verglichen. LUTs mit 16 Stützpunkten und linearer Regression erreichen einen Root Mean Square Error (RMSE) unter 0.1mm bei geringem Ressourcenbedarf. Das Messrauschen wird quantifiziert und kann durch 5 bzw. 20 Samples um 50% bzw. 75% reduziert werden. Der Energieverbrauch beträgt 5.5-12mJ pro Messvorgang. Die Ergebnisse zeigen, dass induktive Sensoren für die Zustandsüberwachung von Flutschutztoren geeignet sind. Für den Feldeinsatz wird eine Kalibrierstrategie empfohlen.

Abkürzungsverzeichnis

LUT Suchtabelle

RMSE Root Mean Square Error

ADC Analog Digital Converter

PLA Polylactide

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Entfernungsmessung mit induktiven Sensoren	3
2.2 Rescue Mate	3
2.3 Methoden zur Modellierung der Ansprechkurve	4
3 Related Work	5
3.1 Vorevaluation von Sensoren	5
3.2 Parallelarbeit zur Evaluation von Reed Sensoren	5
3.3 Weiterverarbeitung erhobener Daten	6
4 Analyse	7
4.1 Erhebung der Anforderungen	7
4.2 Vermessung des Sensors	8
4.3 Modellierung des Ansprechverhaltens	11
4.4 Reduktion des Messrauschens	17
4.5 Worst-Case Energieverbrauch	19
5 Diskussion	22
6 Fazit	23
7 Ausblick	25
Literaturverzeichnis	26
A Anhang	v
A.1 Oszilloskop-Messungen Energieverbrauch	v

Abbildungsverzeichnis

4.1	Flutschutztor schwenkbar klein	8
4.2	Temporäre Befestigung eines Reed Sensors	8
4.3	Typische Ansprechkurven des Sensors nach Material [1]	9
4.4	Metallstück 0mm über Sensor	10
4.5	Metallstück 11mm über Sensor	10
4.6	Gemessene Ansprechkurve des DW-AD-509-M18	11
4.7	Lineare Regression mit absolutem Fehler	13
4.8	Vergleich linearer Regressionen, die auf Teilbereichen der Eingabedistanz gefittet wurden	13
4.9	RMSE in Abhängigkeit der Anzahl der LUT-Einträge	14
4.10	Darstellung verschiedener LUT mit 2 bis 32 Stützpunkten N	15
4.11	RMSE in Abhängigkeit des Polynomgrades (Ungerade Grade, mit skalier- ter Berechnung).	16
4.12	Visualisierung von Polynomregressionen mit ungradem Grad zwischen 1 und 11	17
4.13	Variationskoeffizient in Abhängigkeit zur Entfernung	18
4.14	Reduktion des Standardfehlers in mm in Abhängigkeit der Samples. Dif- ferenziert werden verschiedene Distanzbereiche	19
4.15	Prozentuale Reduktion des Fehlers in Abhängigkeit der erhobenen Samp- les. Differenziert werden verschiedene Distanzbereiche	19
4.16	Schaltplan des zur Energiemessung verwendeten Aufbaus	20

1 Einleitung

Hamburg ist als Hafenstadt an der Elbe besonders von Hochwasser bedroht. Der Hochwasserschutz der Hamburger Binnengewässer umfasst mehr als 103 km Schutzanlagen, darunter Deiche, Hochwasserschutzwände und mobile Schutzsysteme [4, S. 26]. Diese Anlagen müssen im Ernstfall zuverlässig funktionieren, um kritische Infrastrukturen wie den Hafen und Wohngebiete in Wilhelmsburg und der HafenCity zu schützen [4].

Eine zentrale Komponente sind Flutschutztore, die Durchlässe in Deichen und Polder verschließen. Im Katastrophenfall ist deren aktueller Zustand – offen, geschlossen oder teilweise geschlossen – eine kritische Information für Einsatzleitungen. Traditionell erfolgt die Überwachung manuell durch Begehungen, was zeitaufwendig ist und keine Echtzeitinformation liefert [3, S. 37].

Das vom BMBF geförderte Projekt Rescue-Mate entwickelt eine digitale Datenplattform, die Sensordaten in Echtzeit zusammenführt [5, 2]. Ein Teilaspekt ist die automatisierte Zustandserfassung von Flutschutztoren mittels Sensoren. Induktive Entfernungssensoren scheinen geeignet, da sie berührungslos arbeiten und robust gegenüber Schmutz, Feuchtigkeit und mechanischer Belastung sind. Zudem liefern sie ein kontinuierliches Signal, das nicht nur binäre Information „offen/geschlossen“ erfasst, sondern auch die exakte Torposition.

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit lautet: *Wie zuverlässig und genau kann ein induktiver Entfernungssensor die Position eines Flutschutztors messen?* Dazu wird der induktive Analogsensor DW-AD-509-M18 von Contrinex unter Laborbedingungen charakterisiert. Untersucht werden drei Aspekte:

1. **Modellierung des Ansprechverhaltens:** Die nichtlineare Sensorkennlinie wird linearisiert. Verschiedene Approximationsmethoden werden hinsichtlich ihrer Güte evaluiert.

2. **Charakterisierung der Messgenauigkeit:** Das Messrauschen wird über den gesamten Messbereich quantifiziert. Es wird die Fehlerreduktion durch mehrfaches Sampling untersucht.
3. **Energieverbrauch:** Der höchste Energieverbrauch wird bestimmt, um einen Referenzwert für den Batteriebetrieb zu erhalten.

Die Datenübertragung und Netzwerkintegration sind nicht Teil dieser Arbeit und werden in parallelen Arbeiten des Rescue-Mate Projekts adressiert [18].

2 Grundlagen

2.1 Entfernungsmessung mit induktiven Sensoren

Entfernungen können mittels induktiver Sensoren gemessen werden. Ein induktiver Sensor erzeugt durch eine stromdurchflossene Spule ein oszillierendes Magnetfeld. Wenn sich ein metallisches Objekt diesem Magnetfeld nähert, werden in dessen Oberfläche Wirbelströme induziert. Diese Wirbelströme erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld, welches dem ursprünglichen Feld entgegenwirkt. Durch diese elektromagnetische Kopplung wird dem Oszillator im Sensor Energie entzogen, was zu einer Dämpfung der Schwingungsamplitude führt. Die Stärke dieser Dämpfung hängt von der Entfernung zum metallischen Objekt ab. Je näher das Objekt, desto stärker die Wirbelströme und desto größer die Dämpfung. Der Sensor misst kontinuierlich diese Amplitudenänderung und wandelt sie in ein Ausgangssignal um, welches die Entfernung zum Objekt repräsentiert [12].

Die Nichtlinearität der Sensorkennlinie ergibt sich aus der physikalischen Natur der elektromagnetischen Kopplung. Die Stärke der induzierten Wirbelströme nimmt mit zunehmender Entfernung quadratisch ab, da sowohl die Feldstärke abnimmt als auch die geometrische Kopplung schwächer wird [10]. Die typische S-förmige Kennlinie resultiert aus der Sättigung der Dämpfung im Nahbereich und dem quadratischen Abfall im Fernbereich.

Die Genauigkeit induktiver Sensoren ist materialabhängig, da die elektrische Leitfähigkeit des Messobjekts die Stärke der Wirbelströme bestimmt. Eine Referenzgrafik lässt sich im Datenblatt finden [1].

2.2 Rescue Mate

Rescue-Mate ist ein vom BMBF gefördertes Forschungsprojekt. Das Projekt entwickelt eine digitale Datenplattform für Behörden und Einsatzorganisationen im Katastrophen-

fall. Im Hamburger Hafen und den Stadtteilen Wilhelmsburg und HafenCity soll ein gemeinsames Lagebild entstehen, das verschiedene Sensordaten in Echtzeit zusammenführt [14].

Die Plattform verknüpft statische Daten wie Objekteigenschaften und Standorte mit dynamischen Sensordaten wie Wasserstände, Wetterdaten und Infrastrukturzustand. Im Hochwasserfall ist der Zustand von Flutschutztoren eine kritische Information für Einsatzleitungen [14].

2.3 Methoden zur Modellierung der Ansprechkurve

Die Modellierung nichtlinearer Sensorkennlinien kann durch verschiedene Ansätze erfolgen. Analoge hardwarebasierte Verfahren nutzen spezialisierte Schaltungen wie Curve Shapers oder Offsetting-Verstärker [7, S. 114], bieten geringe Latenz, sind jedoch im Vergleich zu softwarebasierten Methoden weniger schnell von Hand anpassbar.

Softwarebasierte Ansätze umfassen neben den hier untersuchten Verfahren (lineare Regression, LUT, Polynome) auch Spline-Interpolation [7, S. 120] und neuronale Netze [11]. Für ressourcenbeschränkte eingebettete Systeme haben sich Look-Up Tabellen mit linearer Interpolation und Polynomapproximation als Standard etabliert, da sie einen guten Kompromiss zwischen Speicherbedarf, Rechenaufwand und Genauigkeit bieten [19].

3 Related Work

Für diese Arbeit von besonderer Relevanz sind weitere Arbeiten und Projektberichte, die im Kontext des Rescue-Mate Projekts erstellt wurden, da hier die Datenweiterverarbeitung, sowie weitere projektspezifische Fragen geklärt werden.

3.1 Vorevaluation von Sensoren

Die Entscheidung über die Art der verwendeten Sensoren wurde vom Projektkontext festgelegt. In zwei Voruntersuchungen wurden bereits konkrete Reed Sensoren, sowie induktive Sensoren betrachtet [15, 17]. Neben einer ersten Evaluation wie die benannten Sensoren zur Zustandsüberwachung von Flutschutztoren eingesetzt werden könnten, wird auch auf eventuelle Schwierigkeiten bei der Implementation eingegangen. Die Fortführung von Rupelt 2024 bildet Rupelt 2025 [16]. Die Voruntersuchung von Thies 2024 wird in dieser Arbeit fortgeführt.

3.2 Parallelarbeit zur Evaluation von Reed Sensoren

In Rupelt 2025 wird als Teil des Rescue-Mate Projekts der Einsatz von Reed Sensoren zur Überwachung von Flutschutztoren untersucht [16]. Als Teil der Arbeit von Rupelt wurde der im Hauptteil dieser Arbeit verwendete Testaufbau konzeptioniert und implementiert. Details zu den verwendeten Scripten zur Interaktion mit dem Sovol SV08 Drucker können hier entnommen werden. Darüber hinaus wurde das Auslöseverhalten von zwei Reed Sensoren über 1000 Auslösungen hinweg untersucht. Es konnte eine hohe Zuverlässigkeit der untersuchten Sensoren festgestellt werden.

3.3 Weiterverarbeitung erhobener Daten

Bisher wurde die Erhebung von Daten zur Zustandsmessung von Flutschutztoren untersucht. In [18] wird die Konzeptionierung und Implementierung eines Radio Gateways für IoT Geräte im Kontext des Rescue Mate Projekts gezeigt. Neben der Vorstellung der Systemarchitektur werden Einsatzszenarien des Geräts diskutiert.

4 Analyse

4.1 Erhebung der Anforderungen

4.1.1 Problembeschreibung

Die zentrale Frage ist: Wie zuverlässig und genau kann ein induktiver Entfernungssensor die Position eines Flutschutztors messen? Die Sensoren müssen unter rauen Umgebungsbedingungen funktionieren. Schmutz, Feuchtigkeit und mechanische Belastungen sind zu erwarten. Die Befestigung muss ohne Bewegungsspiel erfolgen, um eine genaue Messung zuzulassen. Die Messwerte dürfen über längere Zeiträume nicht wandern.

Ein zentrales Problem ist die Materialabhängigkeit induktiver Sensoren. Die Ansprechkurve im Datenblatt gilt für Stahl als Messobjekt. Das tatsächliche Material des Flutschutztors kann davon abweichen. Auch der konkrete Messaufbau beeinflusst das Sensorverhalten. Um die rohen Sensorwerte sinnvoll interpretieren zu können, soll ein Treiber auf einem an den Sensor angeschlossenen Mikrocontroller entwickelt werden. Der entwickelte Treiber muss daher eine dynamische Anpassung der Ansprechkurve ermöglichen. Um gegenüber der eingesetzten Hardware agnostisch zu sein, soll der Treiber für das RiotOS Echtzeitbetriebssystem entwickelt werden [6].

Um die Langzeitstabilität und Wiederholgenauigkeit des Sensors zu bewerten, ist eine statistisch aussagekräftige Anzahl von Messungen notwendig. Eine einmalige Kalibrierung des Sensors reicht nicht aus – es muss gezeigt werden, dass die Messwerte auch nach tausenden Messzyklen nicht drifteten. Dazu wird das Sensorverhalten unter kontrollierten Laborbedingungen untersucht. Der Sensor wird mechanisch präzise über einen definierten Distanzbereich verfahren und die Messwerte mit den tatsächlichen Positionen abgeglichen. So lassen sich systematische Abweichungen und Drift quantifizieren.

4.1.2 Vor Ort Evaluation

Zum besseren Problemverständnis wurden mehrere Vor-Ort Besichtigungen der Flutschutztore auf dem Gelände im Stadtteil Veddel der Hamburg Port Authority durchgeführt. In Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 ist ein mit der Hand bedienbares, schwenkbares Flutschutztor, sowie eine temporäre Sensorhalterung zu sehen. Nach einer ersten Besichtigung wurde die Notwendigkeit eines Gegenstücks für die jeweils verbauten Sensoren erkannt. Einerseits wird hierdurch eine unkompliziertere Montage der Sensoren ermöglicht, da nur die Halterung, nicht aber die jeweiligen Sensoren samt Verkabelung im Durchgangsbereich des Flutschutztors liegen. Andererseits sinkt der Kalibrierungsaufwand eines jeden Sensors, da die Gegenstücke den Sensor in bekanntem Maß beeinflussen. Um die Inbetriebnahme zu vereinfachen, müssen die Sensoren nach der Installation leicht zu kalibrieren sein. Um auch verschiedene Tortypen bedienen zu können, muss der Treiber zur Laufzeit durch Konfigurationsparameter angepasst werden können.



Abbildung 4.1: Flutschutztor schwenkbar klein



Abbildung 4.2: Temporäre Befestigung eines Reed Sensors

4.2 Vermessung des Sensors

Um den induktiven Entfernungsmesssensor DW-AD-509-M18 von Contrinex [1] auch über das Datenblatt hinaus besser zu verstehen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Testaufbau konzeptioniert. Das Ansprechverhalten des Sensors laut Datenblatt ist in Abbildung 4.3 dargestellt und zeigt eine typische S-förmige Kennlinie. Die Kurvenform hängt vom Material des Messobjekts ab, wobei verschiedene Metalle unterschiedliche Ansprechkurven aufweisen [1].

Für die Messungen in dieser Arbeit wird ein Metallgegenstück aus nicht näher spezifiziertem Stahl mit den Maßen $3\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (H×L×B) verwendet.

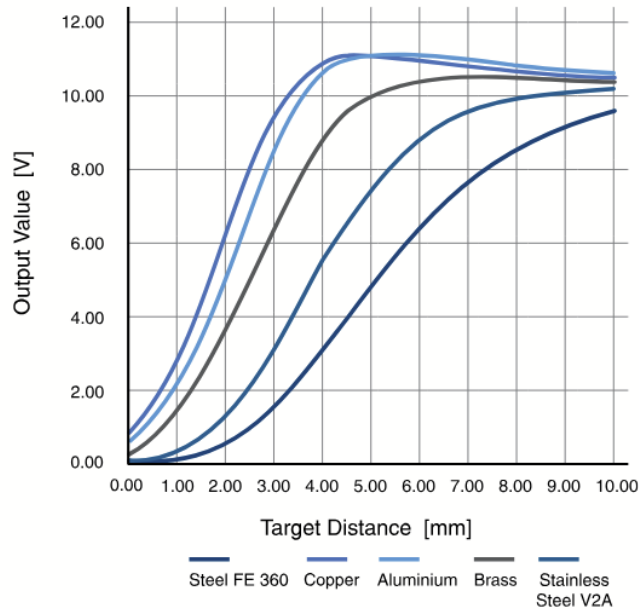


Abbildung 4.3: Typische Ansprechkurven des Sensors nach Material [1]

4.2.1 Testaufbau

Der Testaufbau soll wiederholt und automatisiert ein Metallstück dem Sensor annähern, um das genaue Ansprechverhalten des Sensors besser charakterisieren zu können. Zur automatisierten und wiederholbaren Positionierung wurde ein Sovol SV08 3D-Drucker verwendet. Der Drucker bietet Z-Achsen-Bewegung mit 0.1mm Auflösung und eine programmierbare Steuerung über G-Code. Der Bau und die Konzeptionierung eines separaten Testaufbaus mit Schrittmotor und Linearführung würden bei deutlichem Mehraufwand ein Mehr an Genauigkeit liefern, dies ist für die Anforderungen dieser Arbeit allerdings nicht nötig.

Zwei 3D-gedruckte Halterungen wurden am Drucker befestigt, um einerseits den Sensor in Position zu halten und andererseits das Metallstück mithilfe der Z-Achsen Bewegung des Druckers zu steuern. In Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 sind Sensor und Metallstück im Kontext des Versuchsaufbaus zu sehen.

Der Sensor wird per Spannungsquelle mit 20V versorgt. Ein feather-nrf52840-sense Mikrocontroller liest die rohen Spannungswerte per Analog Digital Converter (ADC) ein. Die vorher gemessenen maximal 11.4V Ausgangsspannung werden mit einem Spannungsteiler (2kOhm und 1kOhm) auf die maximale Eingangsspannung des ADC herunterskaliert. Über eine serielle Schnittstelle mit dem Sovol SV08 werden die rohen ADC Werte bereitgestellt. Auf dem Sovol SV08 wird ein Python Script ausgeführt, welches die Z-Achsen Position des Druckers kontrolliert, die Daten des Mikrocontrollers per serieller Schnittstelle abfragt und anschließend die interne Z-Position des Druckers, sowie die Sensordaten in einer CSV-Datei abspeichert.

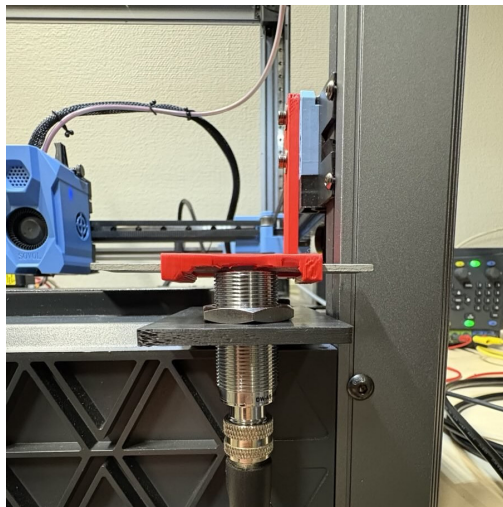


Abbildung 4.4: Metallstück 0mm über Sensor

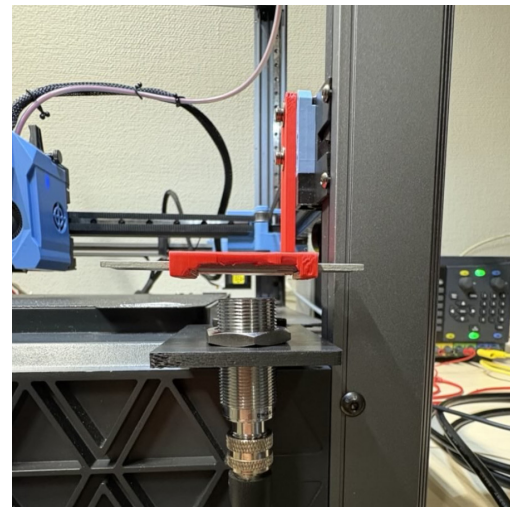


Abbildung 4.5: Metallstück 11mm über Sensor

4.2.2 Messdaten

Aufgrund des mechanischen Versatzes des Sensors, welcher sich durch die 3D-gedruckte Halterung ergibt, liegt das Metallgegenstück genau dann auf dem Sensor auf, wenn der Z-Achsenwert des 3D-Druckers bei 10mm liegt. Dieser Versatz wurde bei der Verarbeitung der Daten bereits berücksichtigt.

Dargestellt in Abbildung 4.6 ist das Ansprechverhalten des DW-AD-509-M18 auf Basis der im Versuch erhobenen Messdaten. Ein Metallstück mit den Maßen 3 mm × 50 mm × 12 mm (H×L×B) wurde in den Versuchsaufbau eingespannt, siehe Abbildung 4.4. Die Halterung des Gegenstücks bis zum Kontakt an den Sensor herangeführt. Die Halterung

des Gegenstücks wurde automatisiert in 0.1mm Schritten vom Sensor entfernt und nach 110 Messschritten, also 11mm über dem Sensor angehalten. Pro Messschritt wurden fünf ADC-Samples erhoben, wobei in Abbildung 4.6 nur das jeweils erste Sample eines Messschritts dargestellt ist. Das vorhandene Messrauschen wird hier entsprechend nicht weiter beachtet.

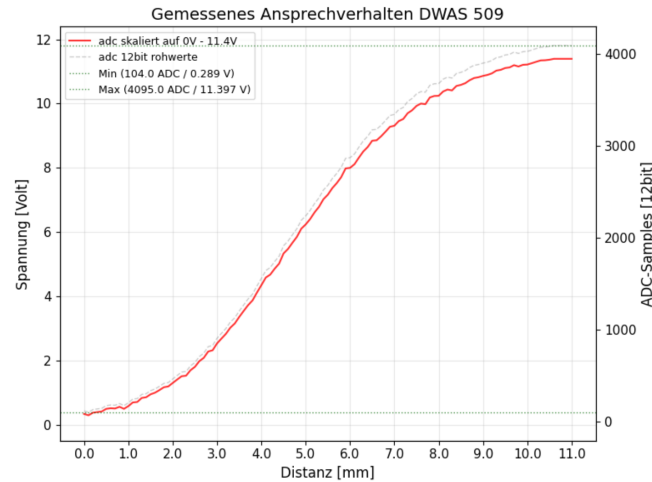


Abbildung 4.6: Gemessene Ansprechkurve des DW-AD-509-M18

Die Visualisierung der Messreihe in Abbildung 4.6 zeigt die jeweils gemessenen ADC-Werte in Abhängigkeit der Distanz. Die Spannungswerte wurden linear aus den ADC-Werten berechnet. Gemeinsam haben die gemessene und theoretische Ansprechkurve eine S-Form und die geringe Spannung bei 0mm Entfernung des Gegenstücks. Die Ansprechkurven unterscheiden sich allerdings darin, dass laut Datenblatt die maximale Spannung bei 10mm Entfernung des Gegenstücks ausgegeben wird. Die gemessenen ADC-Werte erreichen allerdings erst bei 11mm Distanz ihr Maximum von 4095. Bei genauerer Betrachtung der Ausgangsspannung mit einem Multimeter zeigte sich, dass eine maximale Spannung von 11.4V erreicht wurde.

4.3 Modellierung des Ansprechverhaltens

Um die rohen ADC Werte in sinnvolle Entfernungswerte zu übersetzen, soll das Ansprechverhalten modelliert werden. Die Modellierung ist ein allgemein bekanntes Problem welches in der Literatur ausgiebig beschrieben wird [7, S. 110].

Für die Auswahl geeigneter Approximationsmethoden sind folgende Kriterien relevant: (1) Rechenaufwand auf dem Mikrocontroller, (2) Speicherbedarf, und (3) Approximationsgüte. Da der Treiber auf einem ressourcenbeschränkten Mikrocontroller läuft, müssen die Berechnungen effizient durchführbar sein.

Nachfolgend werden drei verbreitete Ansätze evaluiert:

- Lineare Regression [13, S. 117]: Einfachste Form, dient als Vergleichswert
- Look-Up Tabelle: Standardansatz in eingebetteten Systemen für nichtlineare Kennlinien [19]
- Polynomielle Regression [13, S. 118]: Kompaktere Darstellung als LUT, aber höherer Rechenaufwand

Andere Interpolationsmethoden wie Spline-Interpolation [13, S. 111] oder rationale Funktionen wurden nicht betrachtet, da sie für den gegebenen Anwendungsfall keinen signifikanten Vorteil bei erhöhter Komplexität bieten würden.

Um die diskutierten Ansätze hinsichtlich ihrer Güte vergleichen zu können, wird die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) betrachtet. Zur Klarheit werden für die Regressionsanalyse Spannungswerte, die direkt aus den ADC-Werten hervorgehen, verwendet. Die Umrechnung der Werte kann sowohl vor, als auch nach der Linearisierung mithilfe eines Umrechnungsfaktors getätigt werden.

4.3.1 Lineare Regression

Um die vom Sensor ausgegebenen und vom ADC eingelesenen Spannungswerte in Distanzwerte umzurechnen, kann eine lineare Regression verwendet werden. Aufgrund der beobachteten Nichtlinearität im Anspruchsverhalten des Sensors, wie in Abbildung 4.6 zu erkennen, ist mit einem verhältnismäßig großen Fehler an den Randbereichen zu rechnen. Abbildung 4.7 zeigt eine lineare Regression der ADC Werte. Bei Betrachtung des absoluten Fehlers fällt auf, dass die punktuelle Abweichung besonders an den Rändern und Bäuchen der angenäherten Funktion besonders groß ist.

Bei genauerer Betrachtung der in Abbildung 4.6 gezeigten ADC-Werte, fällt die weniger starke Krümmung im Bereich des Wendepunktes der ADC-Werte auf. In Bezug auf den Echtwelteinsatz des Sensors werden folgende Annahmen auf Basis der genannten Beobachtung getroffen getroffen. 1. Das Metallgegenstück wird nicht exakt bis auf 0mm an

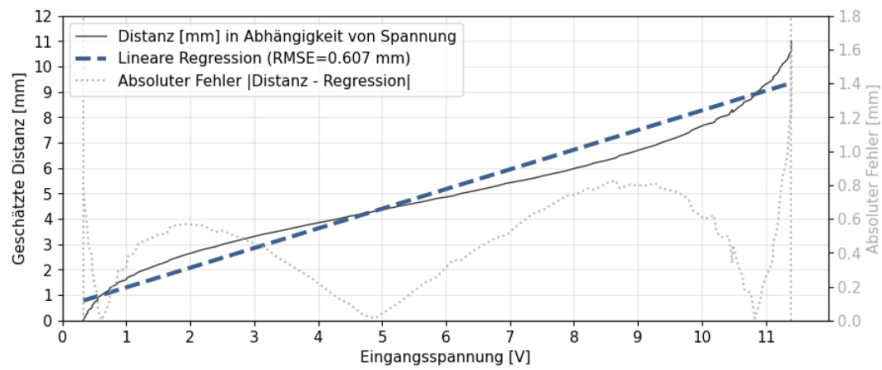


Abbildung 4.7: Lineare Regression mit absolutem Fehler

den Sensor herangeführt, um einen Sicherheitsabstand zu wahren. 2. Umso weiter das Metallgegenstück von der finalen und damit geschlossenen Position des Tors entfernt ist, desto unwichtiger sind exakte Messwerte. Mit anderen Worten, Ungenauigkeiten am unteren und oberen Messbereich des Sensors sind unwesentlich, da der Schließmechanismus des Tors ausschließlich im mittleren Messbereich des Sensors abgebildet werden kann. In Abbildung 4.8 werden weitere lineare Regressionen vorgestellt, die nur auf einen Teil der ADC-Werte um den Distanzwert 4,5mm gefittet wurden. Der schattierte Hintergrund markiert das Gültigkeitsintervall der jeweiligen Regression.

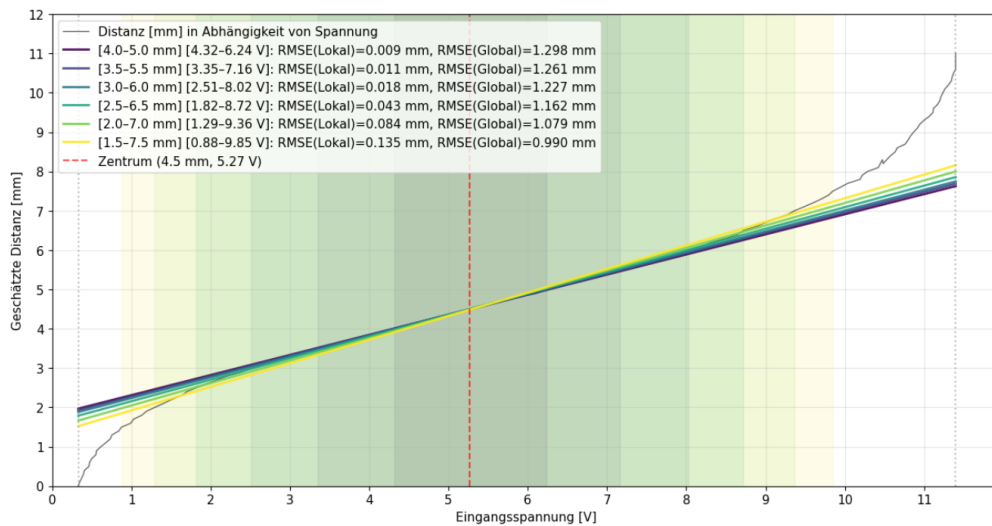


Abbildung 4.8: Vergleich linearer Regressionen, die auf Teilbereichen der Eingabedistanz gefittet wurden

Es fällt auf, dass der lokale RMSE der jeweiligen Regression umso größer ist, da die lokale Optimierung die Krümmung zum Rand des Messbereichs vernachlässigt. Abschließend lässt sich sagen, dass durch Anwendung der genannten Heuristik eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der linearen Regression erreicht werden kann. Es wird eine geringere Genauigkeit am Rand des Messbereichs in Kauf genommen, um Genauigkeit in der Mitte des Messbereiches zu gewinnen.

4.3.2 Look-Up Tabelle

Nachfolgend wird eine Look-Up Tabelle (LUT) zur Annäherung des Ansprechverhaltens evaluiert. Die Idee ist, mehrere Stützpunkte auf der Ansprechkurve auszuwählen und die entsprechenden Wertepaare (Eingangsspannung, Distanz) zu speichern. Ist ein angefragter Spannungswert s_0 in der LUT hinterlegt, kann die entsprechende Distanz sofort zurückgegeben werden. Liegt der angefragte Spannungswert s_0 jedoch zwischen zwei gespeicherten Werten s_1 und s_2 , wird der gesuchte Distanzwert d_0 durch lineare Interpolation ($d_0 = d_1 + \alpha(d_2 - d_1)$ mit $\alpha = \frac{s_0 - s_1}{s_2 - s_1}$) zwischen den bekannten Distanzen d_1 und d_2 bestimmt. Umso mehr Wertepaare gespeichert werden, desto genauer kann die LUT das Ansprechverhalten modellieren.

Bei einer gleichmäßigen Auswahl von N Wertepaaren ergeben sich die in Abbildung 4.9 dargestellten RMSE-Werte.

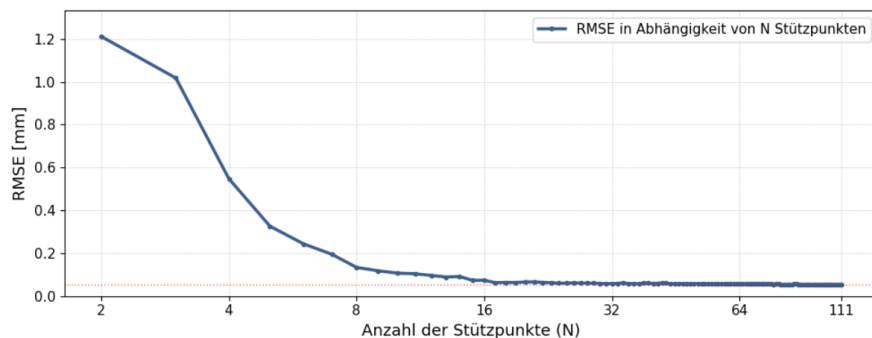


Abbildung 4.9: RMSE in Abhängigkeit der Anzahl der LUT-Einträge

Bei nur zwei hinterlegten Wertepaaren ist der RMSE mit ca. 1.2mm am größten. Es fällt auf, dass sogar die naive lineare Regression einen niedrigeren Fehler hat. Dies liegt daran, dass die lineare Regression den RMSE im Rahmen der Möglichkeiten minimiert, wohingegen die LUT mit zwei Wertepaaren nur die minimale und maximale Eingangsspannung

hinterlegt. Die Interpolation ist entsprechend im Bereich der Bäuche der S-Kurve besonders unzutreffend. Abbildung 4.9 zeigt, dass der Fehler ab bereits 8 Stützpunkten nur noch langsam verkleinert wird. Weiter fällt auf, dass selbst die Maximalanzahl an Stützpunkten den RMSE nicht auf 0mm senkt. Dies lässt sich teilweise durch Ungenauigkeiten in der Messung erklären, wurde allerdings nicht im Detail untersucht.

Die Darstellung mehrerer LUT in Abbildung 4.10 mit einer verschiedenen Anzahl an Stützpunkten zeigt, dass bereits einige wenige Stützpunkte ausreichen, um eine genaue Modellierung der Ansprechkurve über den gesamten Wertebereich zu erzielen. Bereits 8 Stützpunkte reichen dabei aus, um eine ähnliche RMSE auf dem gesamten Eingabebereich zu erzielen, welche die lokal gefitteten linearen Regressionen nur auf dem Trainingsintervall erreicht haben.

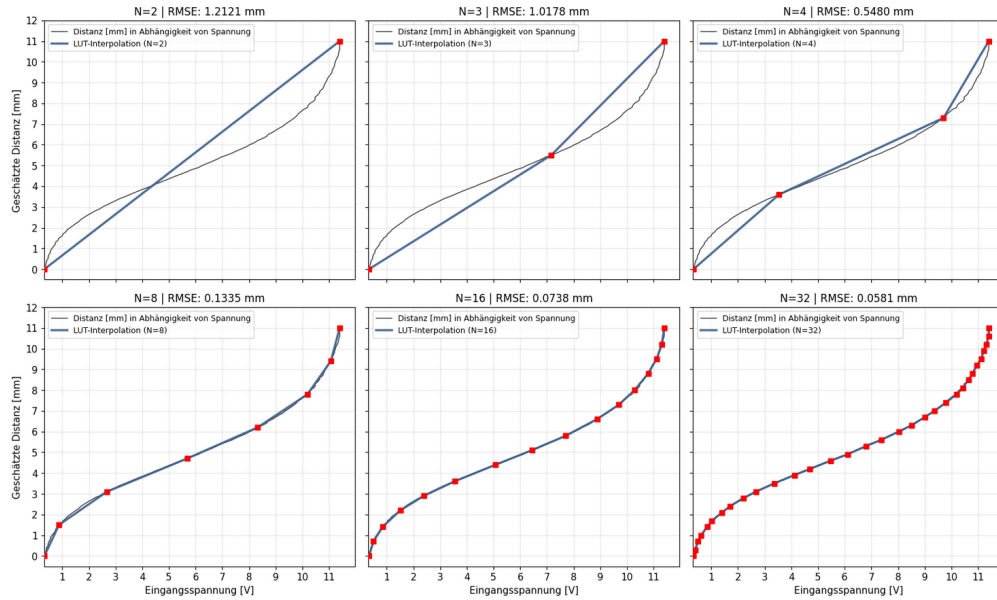


Abbildung 4.10: Darstellung verschiedener LUT mit 2 bis 32 Stützpunkten N .

Eine weitere Optimierungsstrategie wäre die Auswahl ungleichverteilter Wertepaare. Hierbei könnten für eine gegebene Anzahl N an Stützpunkten gezielt diejenigen Paare ausgesucht werden, die den Interpolationsfehler und damit den RMSE minimieren. Dies würde vermutlich darauf hinauslaufen, dass mehr Wertepaare an den Randbereichen des der Eingangsspannung verwendet würden.

4.3.3 Polynomielle Regression

Eine weitere Methode zur Modellierung der nichtlinearen Sensorkennlinie ist die polynomielle Regression. Diese Methode verwendet Polynomfunktionen höherer Ordnung, um die einfache lineare Beziehung zu erweitern und die Krümmung der gemessenen Datenpunkte genauer abzubilden.

Zur Charakterisierung des Ansprechverhaltens wurden ungerade Polynomgrade von 1 bis 11 evaluiert.

Bei einer ersten naiven Berechnung der Polynome höherer Grade (ab Grad 5) stieg der RMSE stark an und die Ergebnisse wurden unbrauchbar. Diese numerische Instabilität lässt sich durch die große Spannweite der ADC-Werte, welche im Bereich von 100 bis 4000 liegen erklären. Die Monome höherer Ordnung (z. B. $a \cdot x^{11}$), brauchen extrem kleine Koeffizienten a , um den gewünschten Wertebereich abzubilden. Eine kurze Berechnung zeigt, dass $4000^{11} > 10^{38}$, entsprechend muss a einen Wert in der Größenordnung $a \sim 10^{-38}$ annehmen, um die Zielwerte auf dem Intervall $[0, 11 \text{ mm}]$ darzustellen. Dies führte vermutlich zu Fehlern in der Berechnung.

Zur Behebung dieses Problems wurden die ADC-Werte vor der Polynomtransformation skaliert (MinMax-Skalierung). Dies standardisierte den Eingabebereich auf $[0, 1]$ und ermöglichte die Berechnung stabiler Koeffizienten.

Abbildung 4.11 zeigt die Entwicklung des RMSE für ungerade Polynome bis Grad 30. Einzelne Polynome bis Grad 11 sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Höhergradige Polynome als Grad 11 senken den Fehler allerdings nicht in bedeutendem Maß.

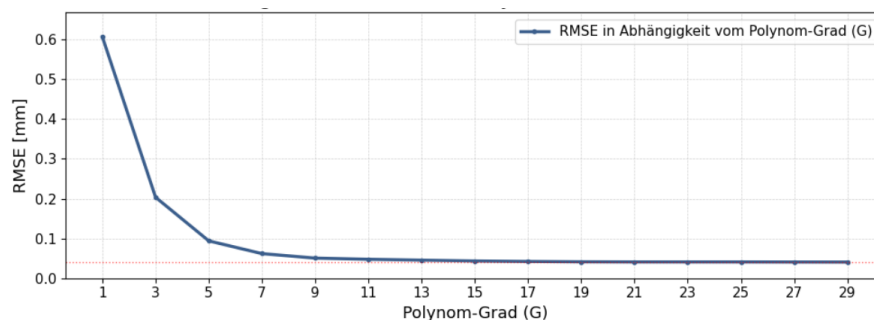


Abbildung 4.11: RMSE in Abhängigkeit des Polynomgrades (Ungerade Grade, mit skaliertem Berechnung).

Der Polynomgrad 1 entspricht der einfachen Linearen Regression und erzielt, wie zu erwarten, den gleichen RMSE von ≈ 0.607 mm wie die bereits untersuchte lineare Regression. Bereits der Polynomgrad 3 reduziert den Fehler stark auf ≈ 0.20 mm. Es ist festzuhalten, dass höhergradige Polynome die Ansprechkurve ähnlich gut wie eine Look-Up Tabelle annähern.

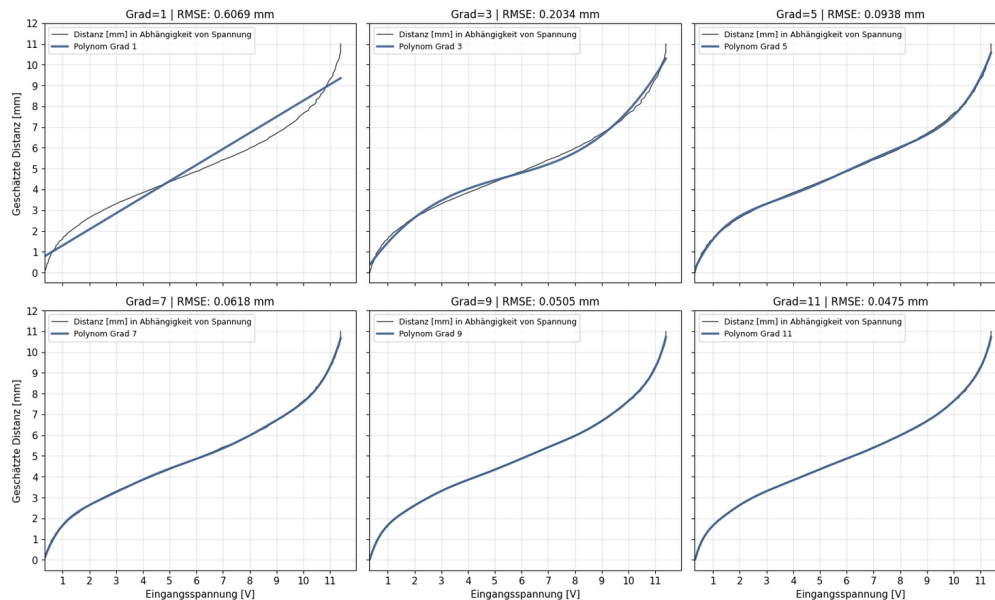


Abbildung 4.12: Visualisierung von Polynomregressionen mit ungeradem Grad zwischen 1 und 11

4.3.4 Fazit

Für den Einsatz im entwickelten Treiber scheint die Look-Up Tabelle am geeignetsten. Im Vergleich zu den lokal optimierten linearen Regressionen wird ein kleiner Fehler über den gesamten Eingabebereich erzielt. Im Vergleich zu den Polynomregressionen wird keine wiederholte Potenzierung, sowie besonders kleine Koeffizienten benötigt. Konkret scheinen ca. 16 Stützwerte ausreichende Genauigkeit zu erzielen.

4.4 Reduktion des Messrauschens

Nachfolgend soll das Messrauschen des Sensors charakterisiert werden. Es wurde eine weitere Messreihe aufgenommen, die das Metallgegenstück in 0.1mm Schritten von 0mm

Entfernung vom Sensor bis auf 11mm Entfernung vom Sensor bewegt. Pro Schritt wurden 100ADC-Samples mit 10ms Verzögerung aufgenommen.

In Abbildung 4.13 ist der Variationskoeffizient ($VC = \frac{\sigma}{\mu}$, wobei σ = Standardabweichung und μ = Mittelwert) in Abhängigkeit zur Messentfernung dargestellt. Der hyperbolische Abfall des Variationskoeffizienten deutet auf ein annähernd konstantes absolutes Messrauschen hin. Im Nahbereich des Sensors bis 1mm Entfernung liegt der Variationskoeffizient bei über 0.1, was bedeutet, dass die Standardabweichung der ADC-Messwerte mehr als 10% des Mittelwerts beträgt. Dies führt dort zu einer relativen Messunsicherheit von über 10%. Es stellt sich die Frage: Wie oft muss gesampelt werden, um das Messrauschen durch Mittelung angemessen zu verringern.

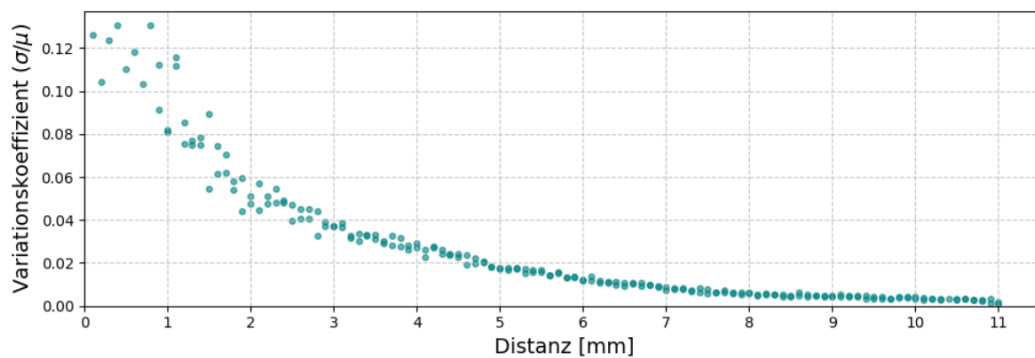


Abbildung 4.13: Variationskoeffizient in Abhängigkeit zur Entfernung

Abbildung 4.14 zeigt den Standardfehler in Abhängigkeit zur Anzahl der Samples für fünf Distanzbereiche. Als Referenz dient das arithmetische Mittel aus 100 ADC-Samples pro Messreihe. Für jede Stichprobengröße n wurden wiederholt n Samples zufällig ausgewählt, der Mittelwert berechnet und die mittlere Abweichung vom Referenzwert als Standardfehler (in mm) dargestellt. Die 100-Sample-Referenz bietet mit einem theoretischen Standardfehler von $\sigma/\sqrt{100}$ eine hinreichend genaue Basis zur Bewertung kleinerer Stichprobengrößen.

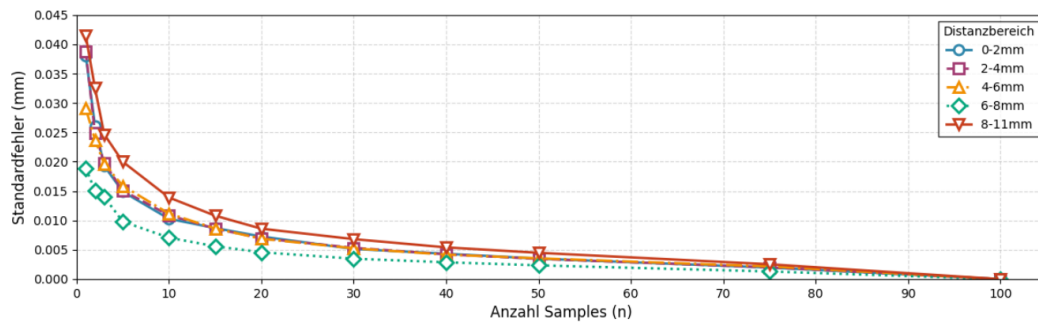


Abbildung 4.14: Reduktion des Standardfehlers in mm in Abhängigkeit der Samples. Differenziert werden verschiedene Distanzbereiche

Zur Bestimmung der Fehlerreduktion in Abbildung 4.15 wurde die prozentuale Verbesserung des Standardfehlers von Samplegruppen mit mehr als einem Wert im Vergleich zum Standardfehler eines einzelnen Samples berechnet und dargestellt. Es lässt sich beobachten, dass bereits fünf Samples genügen, um für den gesamten Messbereich des Sensors eine Fehlerreduktion um 50% zu erreichen. Um eine Fehlerreduktion von 75% zu erreichen, müssten bereits 20 Samples erhoben werden.

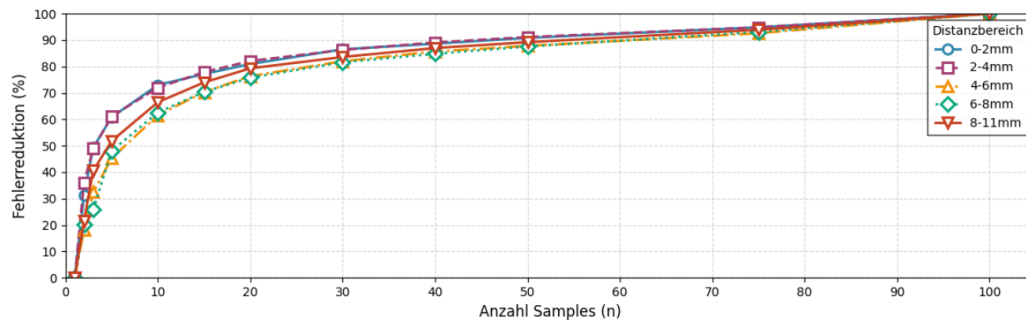


Abbildung 4.15: Prozentuale Reduktion des Fehlers in Abhängigkeit der erhobenen Samples. Differenziert werden verschiedene Distanzbereiche

4.5 Worst-Case Energieverbrauch

Für den Betrieb des Sensors ist der Energieverbrauch pro Messvorgang relevant. Im Folgenden wird der Worst-Case Stromverbrauch bestimmt.

Das Worst-Case Szenario wird folgendermaßen beschrieben: Der Sensor wird aus dem ausgeschalteten Zustand gestartet. Laut Datenblatt des DW-AD-509-M18 [1] beträgt die

Bereitschaftsverzögerung 20ms. Für das Sampling der Sensorwerte wird eine Verzögerung von 1ms pro Sample angenommen.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Der Sensor wird über einen High-Side Switch geschaltet. Die Strommessung erfolgt über den Shunt-Widerstand R2 zwischen TestPoint 1 und TestPoint 2. Ein Funktionsgenerator gibt ein Steuersignal an Pin J1, welches Q2 schaltet. Q2 setzt die Base von Q1 auf Gnd, wodurch wiederum den Sensor mit Spannung versorgt wird.

Um den ungünstigsten Fall für den ADC zu simulieren, wird der maximale Laststrom am Analog_Out des Sensors eingestellt. Der Ausgang Analog_Out liegt im Bereich [0.4V, 11.4V] bei einem maximalen Laststrom von 10mA. Daraus ergibt sich $\frac{11.4V}{R} \leq 10\text{ mA}$ und somit $R \geq \frac{11.4V}{10\text{ mA}} = 1140\Omega$. Es wird daher ein Widerstand von annähernd 1140Ω verwendet.

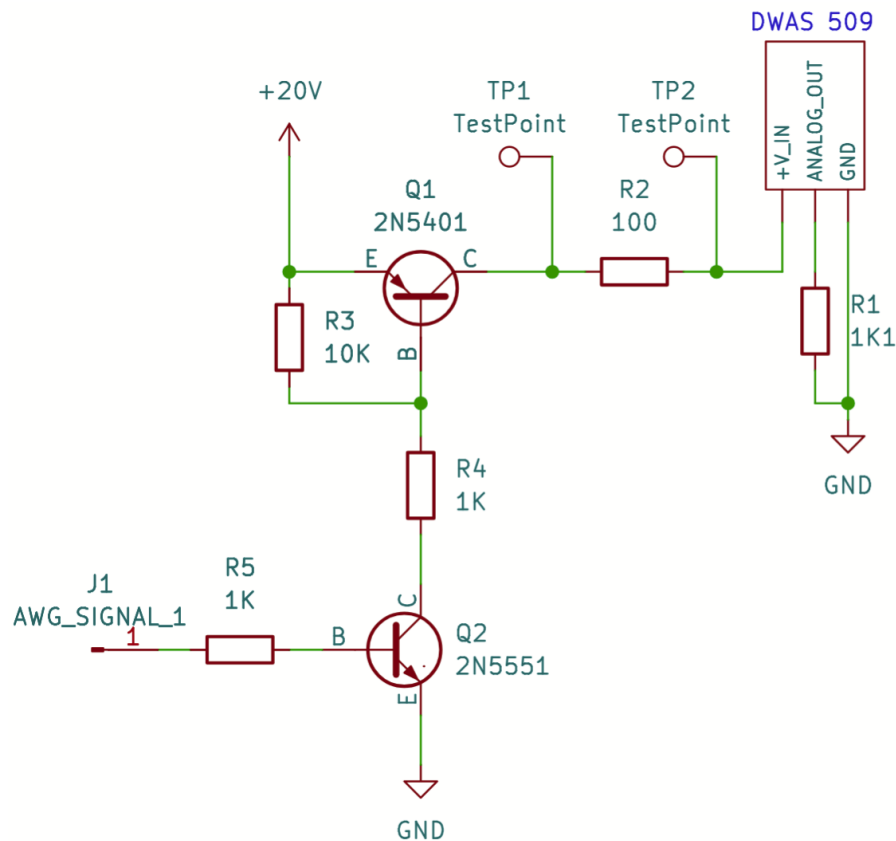


Abbildung 4.16: Schaltplan des zur Energiemessung verwendeten Aufbaus

Für die Messung werden zwei Konfigurationen betrachtet:

- 5 ADC Samples (50% Fehlerreduktion): $20\text{ ms} + 5\text{ ms} = 25\text{ ms}$ Einschaltdauer
- 20 ADC Samples (75% Fehlerreduktion): $20\text{ ms} + 20\text{ ms} = 40\text{ ms}$ Einschaltdauer

Eine erste theoretische Abschätzung des Energieverbrauchs ergibt sich wie folgt: Im Dauerbetrieb bei 20V zeigt das Netzteil eine Stromaufnahme von ca. 13mA an. Der Sensor wird für mindestens 25ms (untere Schranke) bzw. maximal 40ms (obere Schranke) eingeschaltet.

Für die untere Schranke: $[0.013\text{ A} \cdot 0.9] = 0.011\text{ A}$. Die Energie beträgt somit $E_{\min} = 20\text{ V} \cdot 0.011\text{ A} \cdot 0.025\text{ s} = 5.5\text{ mJ}$.

Für die obere Schranke: $[0.013\text{ A} \cdot 1.1] = 0.015\text{ A}$. Die Energie beträgt somit $E_{\max} = 20\text{ V} \cdot 0.015\text{ A} \cdot 0.040\text{ s} = 12\text{ mJ}$.

Der theoretische Energieverbrauch liegt im Bereich von 5.5mJ bis 12mJ pro Messvorgang.

Die Messung mit dem Oszilloskop, dargestellt in Anhang A.1, über den Shunt-Widerstand R2 ergibt 7.4mJ für 5 ADC Samples (25ms) und 13mJ für 20 ADC Samples (40ms) ohne Metallobjekt. Mit Metallobjekt in Sensornähe sinkt der Verbrauch auf 5.94mJ bzw. 8.86mJ durch Dämpfung der Oszillation.

Der real gemessene Energieverbrauch liegt damit etwas höher als die theoretischen Werte, wobei es hierfür mehrere Gründe gibt. Die Strommessung des Netzteils, auf dessen Basis die theoretischen Werte berechnet wurden, ist ungenau. Die in Abbildung 4.16 gezeigte Schaltung ist nicht 100% effizient.

Für eine Abschätzung der Batterielebensdauer wurden zwei gängige Knopfzellen betrachtet [8, 9]: Die CR2032 (235 mAh, 3V) ermöglicht bei 7.4 mJ pro Messung etwa 343,000 Messvorgänge, bei 13 mJ etwa 195,000 Messvorgänge. Die größere CR2450 (620 mAh, 3V) ermöglicht entsprechend etwa 905,000 bzw. 515,000 Messvorgänge. Bei einer Messfrequenz von einer Messung pro Minute entspricht dies für die CR2032 Laufzeiten von etwa 238 Tagen (7.4 mJ) bzw. 135 Tagen (13 mJ), für die CR2450 etwa 629 Tagen (7.4 mJ) bzw. 358 Tagen (13 mJ). Diese Werte berücksichtigen keinen Spannungswandler-Wirkungsgrad, welcher bei der Umsetzung von 3V auf 20V die reale Anzahl um etwa 10-15% reduzieren würde. Ebenso wenig wird der Energieverbrauch eines Mikrocontrollers sowie der Übertragungslogik betrachtet.

5 Diskussion

Die Güte der vorgestellten Messergebnisse basieren auf der Genauigkeit der Datenerhebung. So wurde die vom 3D-Drucker übermittelte Position als wahr angenommen und nicht weiter überprüft. Die Genauigkeit des Testaufbaus müsste im Detail untersucht werden, um die in dieser Arbeit getätigten Aussagen zu bekräftigen.

Die Halterung des Sensors und des Metallgegenstücks wurden mit einem 3D-Drucker aus Polylactide (PLA) Plastik hergestellt. Bauart- und Materialbedingt sind Mängel in der Steifigkeit zu erwarten, welche sich zumindest teilweise, besonders aber nach einer Bewegung, im Messrauschen wiederfinden. Eine statische Messung des Messrauschens könnte genutzt werden, um zumindest den Einfluss dieser Fehlergröße genauer zu spezifizieren.

Das Messrauschen des verwendeten ADC wurde nicht weiter betrachtet. Die Charakterisierung des Sensors stellt somit viel eher eine Charakterisierung des Gesamtsystems dar. Für eine bessere Spezifizierung des Gesamtsystems hätte allerdings der final verwendete Gleichstromwandler zur Erzeugung der 20V Betriebsspannung verwendet werden sollen, stattdessen wurde ein Labornetzteil verwendet.

Der Einfluss verschiedener Metallgegenstücke auf die gelesenen ADC-Werte wurde nicht weiter untersucht. Es ist zu erwarten, dass andere Metallgegenstücke zu anderen Messergebnissen führen. Die Wiederholgenauigkeit des DW-AD-509-M18 wird im Datenblatt mit 0.2mm angegeben [1]. Eine explizite Untersuchung fand nicht statt. Temperatur hat einen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit von Materialien. Es ist davon auszugehen, dass das Ansprechverhalten des Sensors temperaturabhängig ist.

Der Energieverbrauch des Sensors wurde aufgrund der schnellen Schaltzeiten mittels Oszilloskop und Spannungsabfall über einen Widerstand gemessen und mit theoretischen Werten in Relation auf seine Plausibilität überprüft. Für diesen Anwendungsfall speziell entwickelte Power-Profiler erlauben eine höhere vertikale Auflösung. Dies würde die Wahl eines kleineren Shunt-Widerstands erlauben, was wiederum zu weniger Beeinflussung des zu messenden Sensors führen würde.

6 Fazit

Diese Arbeit untersuchte die Eignung des induktiven Analogensors DW-AD-509-M18 von Contrinex für die automatisierte Zustandserfassung von Flutschutztoren im Rahmen des Rescue-Mate Projekts. Der Fokus lag auf drei zentralen Aspekten: Modellierung des nichtlinearen Ansprechverhaltens, Charakterisierung der Messgenauigkeit und Bestimmung des Energieverbrauchs.

Zur Modellierung der S-förmigen Sensorkennlinie wurden drei Approximationsmethoden verglichen: lineare Regression, LUT und polynomielle Regression. Die Evaluation anhand des RMSE zeigte, dass eine LUT mit 16 gleichverteilten Stützpunkten ($\text{RMSE} \approx 0.09$ mm) die beste Balance zwischen Rechenaufwand, Speicherbedarf und Genauigkeit für den Einsatz auf einem ressourcenbeschränkten Mikrocontroller bot. Polynome höherer Grade (Grad 9-11) erreichten vergleichbare Genauigkeit, erforderten jedoch numerisch instabile Berechnungen mit sehr kleinen Koeffizienten. Lokal optimierte lineare Regressionen auf einem eingeschränkten Arbeitsbereich (3-6 mm) reduzierten den Fehler auf 0.20 mm, vernachlässigten jedoch die Randbereiche – ein akzeptabler Trade-off für den Anwendungsfall der Torpositionserfassung.

Die Rauschanalyse ergab ein annähernd konstantes absolutes Messrauschen über den gesamten Messbereich, was sich in einem hyperbolisch abfallenden Variationskoeffizienten zeigte. Im Nahbereich (< 1 mm) lag der Variationskoeffizient über 0.1, was auf eine relative Unsicherheit von mehr als 10% hindeutete. Durch Multisampling konnte der Standardfehler reduziert werden: 5 Samples reduzierten den Fehler um 50%, 20 Samples um 75%.

Der gemessene größte Energieverbrauch betrug 7.4 mJ (5 Samples, 25 ms) bzw. 13 mJ (20 Samples, 40 ms) ohne Metallobjekt. Diese Werte ermöglichen bei einer CR2032 Knopfzelle (235 mAh, 3V) Betriebszeiten von 238 bzw. 135 Tagen bei einer Messfrequenz von einer Messung pro Minute.

Die Ergebnisse demonstrieren die grundsätzliche Eignung induktiver Analogsensoren für die berührungslose Positionserfassung von Flutschutztoren. Die entwickelten Modellierungsverfahren und Sampling-Strategien bieten eine Grundlage für die Integration in das Rescue-Mate System.

7 Ausblick

Für den Übergang vom Labor zum Feldeinsatz sind drei Entwicklungsschritte erforderlich:

Die Laborwerte müssen bei der Installation anpassbar sein. Ein automatisiertes Kalibrierungsverfahren sollte entwickelt werden, dass 3-5 Referenzpunkte erfasst und daraus die LUT ableitet. Die Materialabhängigkeit sollte durch Messungen mit verschiedenen Stahlliegierungen quantifiziert werden.

Der gemessene Sensorverbrauch (7.4-13 mJ) berücksichtigt weder Mikrocontroller noch Spannungswandler (3V→20V) oder Funkmodul. Eine hybride Strategie, bei der Reed-Switches den induktiven Sensor nur bei Torbewegung aktivieren, könnte die Batterielebensdauer deutlich verlängern. Verschiedene Messfrequenzen (1/min, 1/5min, ereignisgesteuert) sollten hinsichtlich des Kompromisses zwischen Aktualität und Lebensdauer evaluiert werden.

Die Labormessungen müssen durch Feldtests verifiziert werden. Installation von Prototypen an 2-3 Flutschutztoren würde Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit, Verschmutzung) auf Messgenauigkeit und Drift quantifizieren.

Literaturverzeichnis

- [1] DW-Ax-509-M18 Datasheet / Contrinex. Schweiz. – Forschungsbericht. – URL <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0530/8196/4695/files/DW-Ax-509-M18-3x0.pdf>. – Zugriffsdatum: 2025-11-17
- [2] : *Interdisziplinäres Projekt zur Bewältigung von Katastrophen und Großschadenslagen - hamburg.de.* – URL <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/behoerde-fuer-inneres-und-sport/themen/katastrophenschutz/projekt-rescue-mate-93600>. – Zugriffsdatum: 2025-11-17
- [3] Hochwasserschutz für die Hamburger Binnengewässer / Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer. Hamburg, 2009. – Forschungsbericht. – URL <https://lsbg.hamburg.de/resource/blob/784554/6a88a68e6f802d161d2280d59923060f/bericht-nr-3-hochwasserschutz-fuer-die-hamburger-binnengewaesser-data.pdf>. – Zugriffsdatum: 2025-11-17
- [4] Gewässer und Hochwasserschutz in Zahlen / Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg. Hamburg, 2012. – Forschungsbericht. – URL <https://lsbg.hamburg.de/resource/blob/784540/c0d31415b6e7d9c89a84bab7385e80a8/bericht-nr-14-gewaesser-und-hochwasserschutz-in-zahlen-data.pdf>. – Zugriffsdatum: 2025-11-17
- [5] Dynamische Lageerstellung und Unterstützung für Rettungskräfte in Krisensituationen mittels Datenfusion und intelligenten Drohnenschwärmen (RESCUE-MATE) / Bundesministerium für Bildung und Forschung. URL https://www.sifo.de/sifo/shareddocs/Downloads/files/projektumriss_rescue-mate.pdf?__blob=publicationFile&v=2, November 2025. – Forschungsbericht

- [6] BACCELLI, Emmanuel ; GUNDOGAN, Cenk ; HAHM, Oliver ; KIETZMANN, Peter ; LENDERS, Martine S. ; PETERSEN, Hauke ; SCHLEISER, Kaspar ; SCHMIDT, Thomas C. ; WAHLISCH, Matthias: RIOT: An Open Source Operating System for Low-End Embedded Devices in the IoT. In: *IEEE Internet of Things Journal* 5 (2018), Dezember, Nr. 6, S. 4428–4440. – URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8315125/>. – ISSN 2327-4662, 2372-2541
- [7] DE SILVA, Clarence W.: *Sensors and actuators: control systems instrumentation*. Boca Raton, FL : CRC Press, 2007. – ISBN 978-1-4200-4483-6
- [8] ENERGIZER: *Energizer CR2032 Technical Data*. – URL <https://data.energizer.com/pdfs/cr2032.pdf>. – Zugriffsdatum: 2025-11-17
- [9] ENERGIZER: *Energizer CR2450 Technical Data*. – URL <https://data.energizer.com/pdfs/cr2450.pdf>. – Zugriffsdatum: 2025-11-17
- [10] KRIEZIS, E.E. ; TSIBOUKIS, T.D. ; PANAS, S.M. ; TEGOPOULOS, J.A.: Eddy currents: theory and applications. In: *Proceedings of the IEEE* 80 (1992), Oktober, Nr. 10, S. 1559–1589. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/168666/>. – ISSN 00189219
- [11] MONICO, Chris: *An elementary proof of a universal approximation theorem*. Dezember 2024. – URL <http://arxiv.org/abs/2406.10002>. – arXiv:2406.10002 [cs]
- [12] POP, Septimiu S. ; FLUTUR, Alexandru-Florin ; FODOR, Alexandra: Design and Implementation of an Inductive Proximity Sensor with Embedded Systems. In: *Sensors* 25 (2025), Oktober, Nr. 19, S. 6258. – URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/19/6258>. – ISSN 1424-8220
- [13] PRESS, William H. (Hrsg.): *Numerical recipes: the art of scientific computing*. 3rd ed. Cambridge, UK ; New York : Cambridge University Press, 2007. – ISBN 978-0-521-88068-8
- [14] RESCUE-MATE: *RESCUE-MATE*. – URL <https://rescue-mate.de/>. – Zugriffsdatum: 2025-10-29
- [15] RUPELT, Timon: Investigating Reed Sensors for Monitoring Closing Mechanisms of Flood Protection Gates / HAW Hamburg. Hamburg. – Forschungsbericht. – URL https://inet.haw-hamburg.de/teaching/ss-2024/project-class/fw1_timon_rupelt.pdf. – Zugriffsdatum: 2025-10-31

- [16] RUPELT, Timon: Project Report Investigation of using Reed Sensors for Monitoring Flood Protection Gates / HAW Hamburg. Hamburg. – Forschungsbericht.
– URL https://inet.haw-hamburg.de/teaching/ss-2025/project-class/prj1_timon_rupelt.pdf. – Zugriffsdatum: 2025-11-13
- [17] THIES, Jan: Induktive Entfernungsmessverfahren zur Positionsbestimmung von Flutschutztoren / HAW Hamburg. Hamburg. – Forschungsbericht.
– URL https://inet.haw-hamburg.de/teaching/ss-2024/project-class/fw1_jan_thies.pdf. – Zugriffsdatum: 2025-10-31
- [18] WEISS, Kevin ; ROTTLEUTHNER, Michel ; ALAMOS, José ; PANG, Bozheng ; FATEMI, Bahareh ; SCHMIDT, Thomas C. ; WÄHLISCH, Matthias: AirBridge Pro – A Programmable Multiradio Outdoor Gateway for IoT Research & Measurement. In: *IEEE INFOCOM 2025 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/11152988/>, Mai 2025, S. 1–2. – ISSN: 2833-0587
- [19] WILCOX, Chris ; STROUT, Michelle M. ; BIEMAN, James M.: Mesa: automatic generation of lookup table optimizations. In: *Proceedings of the 4th International Workshop on Multicore Software Engineering*. Waikiki, Honolulu HI USA : ACM, Mai 2011, S. 1–8. – URL <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1984693.1984694>. – ISBN 978-1-4503-0577-8

A Anhang

A.1 Oszilloskop-Messungen Energieverbrauch

Die folgenden Abbildungen zeigen die Oszilloskop-Aufzeichnungen des Stromverbrauchs während der Sensormessungen. Das Oszilloskop misst die Spannung vor (C2) und nach (C3) dem Shunt-Widerstand $R_2 = 100\ \Omega$. Die Math-Funktion F(x) berechnet den Strom als $I(t) = \frac{U_{C2}(t) - U_{C3}(t)}{100\ \Omega}$. Die Integration dieser Funktion liefert die Ladung $Q = \int I(t) dt$. Das Oszilloskop zeigt das Ergebnis in der Einheit Weber (Wb) an, da es standardmäßig Spannungsintegrale anzeigt ($\int U dt = V \cdot s = Wb$). Da jedoch bereits der Strom integriert wird, entspricht der angezeigte Wert direkt der Ladung in Coulomb: $Q[C] = \text{Anzeige}[\mu Wb] \cdot 10^{-6}$. Die Energie berechnet sich über $E = U \cdot Q$, wobei $U = 20\ V$ die Versorgungsspannung ist.

A.1.1 Messung 25ms ohne Metallgegenstück



Stromverbrauch bei 5 ADC Samples ohne Metall: $Q = 370\ \mu\text{C}$, $E = 20\ \text{V} \cdot 370 \times 10^{-6}\ \text{C} = 7.4\ \text{mJ}$

A.1.2 Messung 25ms mit Metallgegenstück bei 0mm



Stromverbrauch bei 5 ADC Samples mit Metalledektion: $Q = 297\ \mu\text{C}$, $E = 20\ \text{V} \cdot 297 \times 10^{-6}\ \text{C} = 5.94\ \text{mJ}$

A.1.3 Messung 40ms ohne Metallgegenstück



Stromverbrauch bei 20 ADC Samples ohne Metall: $Q = 650 \mu\text{C}$, $E = 20 \text{ V} \cdot 650 \times 10^{-6} \text{ C} = 13 \text{ mJ}$

A.1.4 Messung 40ms mit Metallgegenstück bei 0mm



Stromverbrauch bei 20 ADC Samples mit Metaldetektion: $Q = 443 \mu\text{C}$, $E = 20 \text{ V} \cdot 443 \times 10^{-6} \text{ C} = 8.86 \text{ mJ}$