

**Entwicklung und Erprobung einer
Geschwindigkeitsregelung zum Einsatz in
einem elektrisch unterstützten Kajak -
PADDELEC**

Diplomarbeit

eingereicht an der Fakultät
E L E K T R O T E C H N I K
der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

D I P L O M I N G E N I E U R (F H)

vorgelegt
von

André Nassonow
geb. am 26. September 1983

D I P L O M A U F G A B E
für
Herrn André Nessonow

Thema:

Entwicklung und Erprobung einer Geschwindigkeitsregelung zum Einsatz in einem elektrisch unterstützten Kajak – PADDELEC

Aufgabenstellung:

Im Projekt PADDELEC soll eine bedarfsgerechte elektrische Schubunterstützung von muskelbetriebenen Booten wie Paddelbooten, Kajaks oder Kanus entwickelt werden. Das Gesamtsystem besteht aus einem Paddel (sog. iPaddel), das über Sensoren die vom Nutzer aufgebrachte Kraft erfasst und das zugleich auch als interaktive Schnittstelle dient, und einem Boot mit unterstützendem batterieelektrischem Antrieb. Der Antrieb erfolgt prinzipiell proportional zur Leistung des Nutzers. Die notwendige Kommunikation zwischen Paddel und Antrieb erfolgt drahtlos über Bluetooth Low Energie.

In dieser Diplomarbeit soll ein Längsgeschwindigkeitsregler konzipiert, entwickelt und erprobt werden. Im ersten Schritt wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Nutzer nicht aktiv ist bzw. keine Sensordaten zum menschlichen Antrieb für die Geschwindigkeitsregelung nutzbar sind.

Folgende Teilaufgaben sind zu bearbeiten:

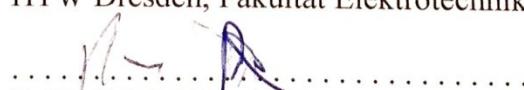
- Entwicklung einer lesenden Schnittstelle zum Kommunikationsbus (RS485) der Motorsteuerung sowie einer schreibenden Schnittstelle zur Nachbildung des Schubhebelsensors
- Entwicklung einer GUI zur Darstellung aktueller Prozessdaten der Motorsteuerung, vorzugsweise als Liniengrafik
- Modellierung des Gesamtsystems aus Boot (Masse, Fahrwiderstände) und el. Antrieb
- Reglerentwurf und Aufbau einer modellbasierten Simulation mit dem entworfenen Regler, wobei der Regler die Sollwerte zügig und stationär genau umsetzt
- Analyse und ggf. Optimierung der Regelung
- Umsetzung und Erprobung der Regelung am Boot (Torqeedo-Propellerantrieb mit träger Sollwertannahme)
- Entwicklung von Prüfszenarien zur Darstellung von Funktionstüchtigkeit und Einsatzgrenzen
- Diskussion der Ergebnisse und Ableitung von Steuer- bzw. Regelstrategien

Ausgehändigt am: 27. Mai 2019

Einzureichen bis: 27. Sep. 2019


Prof. Dr.-Ing. Th. Bindel
Dekan der Fakultät

Betreuer:


Prof. Dr.-Ing. St. Zipser
HTW Dresden, Fakultät Elektrotechnik

R. Budich M.Sc.
HTW Dresden, Fakultät Elektrotechnik

Abstract

Es wurde ein Systemmodell der Längsdynamik eines per Propeller elektrisch angetriebenen Kajaks (Paddelboot) entworfen und mittels Simulationssoftware aufgebaut. Auf dieser Grundlage wurde ein Regelkreis für die Bootsgeschwindigkeit erstellt und der Regler optimiert. Der Regelalgorithmus sowie Schnittstellen zur Ansteuerung des Motors und zur Geschwindigkeitsmessung wurden in einen Mikrocontroller implementiert. Schließlich wurde die Funktionsweise an einem realen Freizeitkajak mit batterieelektrisch betriebenem Außenborder validiert. Als Ziel der Regelung gilt das zügige Erreichen und minimaltolerante Einhalten einer vorgegebenen, konstanten Fahrgeschwindigkeit über Grund ("Tempomat"), auch unter dem Einfluss von Störgrößen wie der Wasserströmung oder der Paddelaktivität der Insassen.

- Das Modell wurde mit der Software "MATLAB/Simulink" erstellt und beinhaltet wesentliche Fahrwiderstände des Bootes im Wasser sowie das Drehzahl-Schubkraft-Übertragungsverhalten des Propellerantriebs.
- Die Regelstrecke konnte als Proportionalglied mit Verzögerung zweiter Ordnung (PT_2) charakterisiert und eine Stabilisierungsmöglichkeit des Regelkreises durch einen PI-Regler sichergestellt werden.
- Die Reglerparameter wurden softwareseitig durch Simulation optimiert.
- Als Stellglied kam der kommerzielle elektrische Bootsantrieb "Ultralight 403" des Herstellers Torqeedo zum Einsatz, für den eine Möglichkeit der digitalen Emulation des Schubhebels entwickelt wurde.
- Die Messung der Bootsgeschwindigkeit wurde mittels satellitengestützter Positionsbestimmung (GPS) auf dem Anwendungsboard "C94-M8P" des Herstellers u-blox realisiert.
- Die Programmierung der Regeleinheit erfolgte durch automatische Code-Generierung in Simulink, die Schnittstellen für die Stell- und Regelgröße wurden manuell in der Programmiersprache C entworfen.
- Der komplette Algorithmus wurde in einen "STM32"-Mikrocontroller auf einem "Nucleo"-Evaluationsboard des Herstellers ST implementiert.
- Als Referenz und Versuchsträger wurde das Kunststoff-Zweierkajak "Grampus II" des Herstellers Kaitts eingesetzt.
- Es wurde keine rückwärts gerichtete, aktiv gebremste oder gelenkte Fahrt betrachtet.

Ergebnisse:

- Das Simulationsmodell konnte das reale Beschleunigungsverhalten des Referenzbootes sehr gut abbilden. Die größte Geschwindigkeitsdifferenz beträgt 0,3 km/h.
- Für den PI-Regler wurden die Parameter $K_p = 0,75$ und $T_n = 2$ gewählt.
- In realen Fahrversuchen konnte der Regelvorgang in bestimmten Arbeitspunkten grundsätzlich nachgewiesen werden. Zur Erhöhung der Robustheit sowie zur Kompensation der Nichtlinearitäten des Systems sind jedoch weiterführende Anpassungen zu untersuchen und umzusetzen.
- Die Systemgrenzen sind durch die maximale Drehzahl des Motors, die Aktualisierungsrate der GPS-Daten sowie durch die Trägheit und Rumpfgeschwindigkeit des Bootes gekennzeichnet.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Verzeichnis der Formelzeichen	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Vorgehensweise	3
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Versuchskajak	5
2.2 Elektrischer Bootsantrieb	6
2.3 Mikrocontroller-Board	9
2.4 Geschwindigkeitsmessung / GPS-Modul	11
3 Theorie der Längsdynamik	15
3.1 Grundlagen	15
3.2 Parameter	16
3.3 Fahrwiderstand	18
3.3.1 Reibungswiderstand	19
3.3.2 Wellenwiderstand	21
3.4 Propellerantrieb	27
4 Simulationsmodell.....	30
4.1 Modellbildung	30
4.2 Analyse und Plausibilisierung	36
4.3 Charakterisierung der Regelstrecke	40
4.4 Bestimmung und Optimierung des Reglers	42
5 Programmierung	47
5.1 Ansteuerung des Antriebs	47
5.1.1 Analyse des Kommunikationsbus	47
5.1.2 Schubhebel-Emulation	50
5.2 Auslesen des GPS-Moduls	54
5.3 Implementierung der Regelung	56
6 Funktionsnachweis	59
7 Zusammenfassung und Ausblick	66
Literaturverzeichnis	67
Erklärung über die eigenständige Erstellung der Arbeit.....	69

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BLDC	Brushless Direct Current (motor)
CAD	Computer-aided Design
CEP	Circular Error Probable
CFD	Computational Fluid Dynamics
COM	Communication port
DGPS	Differential Global Positioning System
DIN	Deutsches Institut für Normung (e.V.)
DMA	Direct Memory Access
DOP	Dilution of Precision
FEM	Finite-Elemente-Methode
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
GSM	Gleichstrommaschine
GUI	Graphical User Interface
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IEC	International Electrotechnical Commission
ITTC	International Towing Tank Conference
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LSB	Least Significant Bit
MSB	Most Significant Bit
NMEA	National Marine Electronics Association
PWM	Pulsweiten-Modulation
RTK	Real Time Kinematic
SSI	Synchronous Serial Interface
TTFF	Time to first fix
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Verzeichnis der Formelzeichen

a	Beschleunigung
A	projizierte Stirnfläche
A_0	Flächeninhalt des Propeller-Außendurchmessers
A_E	wirksame Gesamtfläche der Propellerblätter
A_M	Hauptspan-Querschnittsfläche
B	Breite der Wasserlinie
c	Phasengeschwindigkeit einer Welle / Lichtgeschwindigkeit
c_B	Blockkoeffizient
c_F	Reibungskoeffizient
c_P	prismatischer Koeffizient
c_W	Koeffizient des Luftwiderstands
D	Propeller-Außendurchmesser / Dämpfungsgrad / mech. Reibungskoeffizient
e	Regeldifferenz / Eulersche Zahl
η	dynamische Viskosität
f	mathematischer Funktionswert
F_A	Auftriebskraft
F_G	Gewichtskraft
Fr	Froude-Zahl
F_S	Schubkraft
F_{SS}	Standschub
F_W	Widerstandskraft
g	Gravitationskonstante
G	Übertragungsfunktion
I	elektrische Stromstärke
J	Fortschrittsgrad / Trägheitsmoment
K	Formfaktor / Verstärkung
k	Motorkonstante
K_p	Proportionalanteil der Verstärkung
K_{PI}	PI-Reglerverstärkung
K_S	Streckenverstärkung
k_T	Schubkoeffizient
L	Länge der Wasserlinie / elektrische Induktivität
λ	Wellenlänge
m	Masse

n	Drehzahl
ω	Winkelgeschwindigkeit
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung
$\ddot{\omega}$	Winkelruck
p	Steigung
P_E	elektrische Eingangsleistung
π	Kreiskonstante
P_V	mechanische Vortriebsleistung
R	Ohmscher Anteil des elektrischen Widerstands
Re	Reynolds-Zahl
R_F	Reibungswiderstand
ρ	Dichte
R_T	Gesamtwiderstand
R_W	Wellenwiderstand
S	benetzte Fläche
δ	Steigungswinkel
T	Tiefgang / Zeitkonstante
t	Zeit
T_D	Differenzierzeit
T_g	Ausgleichszeit
T_I	Integrierzeit
T_n	Nachstellzeit
T_u	Verzugszeit
U	elektrische Spannung
v	Geschwindigkeit / Strömungsgeschwindigkeit
V	verdrängtes Volumen
v_H	Rumpfgeschwindigkeit
w	Führungsgröße
x	Translation / Regelgröße / Abszisse
\dot{x}	translatorische Geschwindigkeit
\ddot{x}	translatorische Beschleunigung
x_i	Messgröße
y	Stellgröße / Ordinate
z	Störgröße / Applikate

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Signalflussplan eines klassischen Regelkreises	2
Abb. 2: Entwicklungsschema der Geschwindigkeitsregelung	2
Abb. 3: Prinzip der Geschwindigkeitsregelung [Torqeedo GmbH / eigene Darstellung]....	3
Abb. 4: Zweierkajak Kaitts "Grampus II" [3].....	5
Abb. 5: Hauptkomponenten Torqeedo "Ultralight 403" (nach [5])	6
Abb. 6: Propeller mit patentierter Geometrie [6]	7
Abb. 7: Steigung und Wölbung eines Propellerblatts (nach [7]).....	7
Abb. 8: Mikrocontroller-Entwicklungsboard "STM32 Nucleo-64 F401RE"	9
Abb. 9: Funktionszuweisung der Pins in STM32CubeMX	10
Abb. 10: Prinzip der satellitengestützen Positionsbestimmung [10].....	12
Abb. 11: Applikationsboard u-blox "C94-M8P".....	14
Abb. 12: Kräftegleichgewicht am Boot im gleichförmig bewegten Zustand.....	15
Abb. 13: Darstellung der Wasserlinie (oben: seitlich, unten: frontal).....	17
Abb. 14: Aufteilung des Gesamtfahrwiderstands im Wasser (nach [17])	18
Abb. 15: Ermittlung des Reibungskoeffizienten [19]	19
Abb. 16: Profilwiderstand durch Strömungsabriss (nach [20])	20
Abb. 17: Wellenmuster eines fahrenden Bootes (a) Draufsicht (b) Seitenansicht [22].....	21
Abb. 18: Wellenwiderstandswerte von Holzkajaks [23]	22
Abb. 19: Regression und Nachbildung der Kennlinie des Wellenwiderstands	23
Abb. 20: Verlauf des modellierten Wellenwiderstands.....	24
Abb. 21: Qualitativer Verlauf des Gesamtfahrwiderstands	25
Abb. 22: Plausibilisierung des Gesamtwiderstandsverlaufs.....	25
Abb. 23: Vergleich der Rumpfformen (Fotomontage)	26
Abb. 24: Steigung eines Propellerblatts [15]	27
Abb. 25: Propellerblätter Steigungswinkel und wirksame Fläche (nach [26]).....	28
Abb. 26: Wageningen B-Serie (Auszug) [27].....	29
Abb. 27: Deklaration der Modellparameter (MATLAB-Skript)	31
Abb. 28: Modellierung: Bewegungsgleichung	31
Abb. 29: Modellierung: Reibungswiderstand	32
Abb. 30: Modellierung: Wellenwiderstand	32
Abb. 31: Modellierung: Propellerdrehzahl	33
Abb. 32: Simuliertes Anlaufverhalten des Propellermotors.....	33
Abb. 33: Modellierung: Propeller	34
Abb. 34: Modellierung: Gesamtsystem Längsdynamik.....	35
Abb. 35: Simulation: Motordrehzahl, Geschwindigkeit.....	36
Abb. 36: Simulation: Antriebskraft, Antriebsleistung, Beschleunigung	36
Abb. 37: Simulation: Reibungswiderstand, Wellenwiderstand, Luftwiderstand	37
Abb. 38: Simulation: Standschub	37
Abb. 39: Simulation und Vergleich der Widerstandskurven	38
Abb. 40: Modellvalidierung positive Sprungantwort.....	39
Abb. 41: Modellvalidierung negative Sprungantwort	39
Abb. 42: Sprungantworten von Strecken mit Energiespeichern.....	40
Abb. 43: Wendetangente, Verzugszeit und Ausgleichszeit	41
Abb. 44: Grafisch-numerische Ermittlung der Zeitkonstanten.....	41
Abb. 45: Ermittlung des Proportionalbeiwerts	42
Abb. 46: Funktionsschema eines Regelkreises.....	42

Abb. 47: Regelkreis mit Regelstrecke, PI-Regler und Störgröße	43
Abb. 48: Einstellen der Reglerparameter in Simulink	44
Abb. 49: Stellgrößenbegrenzung des Reglers.....	44
Abb. 50: Regelungssimulation $K_p=0,38 / T_n=7,2$	45
Abb. 51: Regelungssimulation $K_p=0,75 / T_n=1,38$	45
Abb. 52: Regelungssimulation $K_p=0,75 / T_n=2$	46
Abb. 53: Regelungssimulation elektrisch unterstütztes Paddeln	46
Abb. 54: Paketaufbau "TQ Bus" / Request-Reply-Verfahren [Torqeedo GmbH].....	47
Abb. 55: "TQ Bus"-Monitor auf MATLAB GUI.....	48
Abb. 56: Visualisierung der Messdaten aus "TQ Bus"	49
Abb. 57: Kontaktlose Übertragung der Schubhebelposition	50
Abb. 58: Funktion des Drehwinkelsensors "AS5045" [asm AG / eigene Darstellung]	50
Abb. 59: Pin- und Kabelbelegung [asm AG / eigene Darstellung]	51
Abb. 60: Schema der Datenübertragung über SSI [31]	51
Abb. 61: Programmablaufplan Schubhebel-Emulation	52
Abb. 62: Kalibrierung mit dem Mikrocontroller "Arduino Due"	53
Abb. 63: Zustandsautomat zur Motorsteuerung (Ausschnitt).....	53
Abb. 64: Schnittstellen des GPS-Boards (nach [13])	54
Abb. 65: Konfiguration UART DMA-Interrupt in STM32CubeMX	55
Abb. 66: Implementierung: Pinbelegung und UART-Konfiguration	56
Abb. 67: Implementierung: Aktivierung Interrupts.....	56
Abb. 68: Implementierung: Freistellen des Reglers, Erstellung Subsystem	57
Abb. 69: Implementierung: Auswahl Zielgerät "Embedded Coder"	57
Abb. 70: Implementierung: Debug-Funktion zum Übertragen des Programmcodes	58
Abb. 71: Anschlussbelegung des "Nucleo-F401RE" (nach [33]).....	59
Abb. 72: Verbindung der Komponenten	59
Abb. 73: Szene einer Versuchsfahrt.....	60
Abb. 74: Modellierung: Einfluss einer Strömung (current of water).....	61
Abb. 75: Modellierung: Quantisierung der Messgröße (sample and hold)	61
Abb. 76: Modellierung: Stellglied mit Totbereich (Kennlinie).....	62
Abb. 77: Erweitertes Modell des Regelkreises	62
Abb. 78: Simulation: Testfahrt 1	62
Abb. 79: Simulation: Testfahrt 1, GPS-Rate 1 Hz.....	63
Abb. 80: Simulation: Testfahrt 1, optimierter Regler	63
Abb. 81: Simulation: optimierter Regler, vgl. Abb. 51	64
Abb. 82: Nichtlinearität der Regelstrecke (nach Sprunghöhe)	65
Abb. 83: Nichtlinearität der Regelstrecke (nach Arbeitspunkt).....	65
Abb. 84: Ein PADDELEC im Einsatz (Symbolbild)	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Regelkreiskomponenten in der Anwendung	2
Tabelle 2: Katalogdaten Kajak "Grampus II" [3]	5
Tabelle 3: Kenndaten Motoreinheit [5]	6
Tabelle 4: "TQ Bus" Datenformat und Zugriffsprinzip	8
Tabelle 5: GPS-relevante Datensätze nach NMEA-Standard.....	12
Tabelle 6: Aufschlüsselung eines NMEA-Datensatzes am Beispiel VTG	13
Tabelle 7: Leistungsdaten GNSS-Modul "NEO-M8P" (Auszug, [13]).....	14
Tabelle 8: Parameter des Modells der Längsdynamik.....	16
Tabelle 9: Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick (für PI-Regler)	43

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Entwicklung einer Geschwindigkeitsregelung eines elektrisch angetriebenen Kajaks fand im Rahmen der hier vorliegenden Diplomarbeit an der Fakultät Elektrotechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden statt. Der Fachbereich "Elektrische Mobilität" beherbergt Forschungsprojekte zu zahlreichen Themen der Elektrifizierung von Fortbewegungsmitteln und Arbeitsmaschinen. Stimuliert durch die gegenwärtig weitreichende Diskussion nachhaltiger Antriebslösungen sowie die merklichen Fortschritte hierin -insbesondere hinsichtlich der Energiedichte und Ladezeit von elektrischen Energiespeichern- werden kontinuierlich neue Einsatzfelder untersucht.

Auch vor Wasserfahrzeugen und -geräten macht dieser Wandel keinen Halt. Effizient geregelte Propeller- oder Wasserstrahlantriebe (Jets) in Einheit mit leichten Batteriepaketen auf Lithium-Basis bieten einerseits das Potential, ihre geräusch- und abgasreicheren Pendants mit Verbrennungsmotoren zu ersetzen und eröffnen andererseits ganz neue Möglichkeiten der Arbeit und Mobilität auf oder unter dem Wasser, z. B. bei der Lebensrettung [1].

Die Relevanz dieser Diplomarbeit ergibt sich aus dem am Fachbereich laufenden Projekt PADDELEC, welches elektrisch vortriebsunterstütztes Paddeln in einem Kajak verfolgt und den Siegeszug des Pedelecs (ugs.: "E-Bike", Fahrrad mit elektrischem Hilfsantrieb) von der Straße auf dem Wasser fortführen soll [2]. Von den Ergebnissen der Arbeit soll das Projekt in der Form profitieren, dass ein "Tempomat" als Komfortfunktion für das Kajak denkbar wäre, vor allem aber auch, dass ein Systemmodell für zukünftige Untersuchungen des dynamischen Verhaltens und des spezifischen Energiebedarfs als Teil der Machbarkeitsanalyse zur Verfügung steht.

Als übergeordnete Motivation für PADDELEC ist perspektivisch die Fertigung eines kommerziellen Produkts ("E-Boot") für den Freizeit- und Tourismusbereich zu nennen. Verkaufsargumente sind u. a. die Steigerung der Attraktivität des Paddelbootfahrens für bestimmte Zielgruppen durch Minderung des notwendigen körperlichen Einsatzes bzw. Erhöhung von Geschwindigkeit und Reichweite dank eines sensorbasierten, auf den Paddelschlag abgestimmten und bedarfsgerechten Assistenzantriebs, der ansonsten keinen negativen Einfluss auf die gewohnte Bootscharakteristik hat.

1.2 Zielsetzung

Die angestrebte Geschwindigkeitsregelung entspricht einem klassischen Regelkreis (Abb. 1) gemäß DIN IEC 60050-351, in der es heißt:

"Regeln, Regelung: Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst."

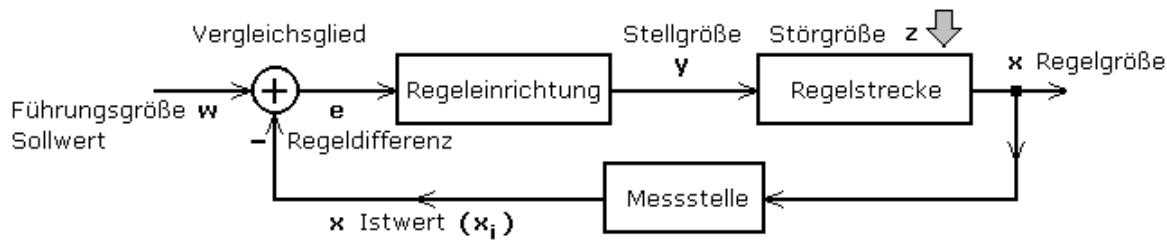


Abb. 1: Signalflussplan eines klassischen Regelkreises

Diesbezüglich lassen sich in der hiesigen Arbeit für die konkrete Anwendung die in Tabelle 1 aufgeführten Zuordnungen treffen:

Tabelle 1: Regelkreiskomponenten in der Anwendung

Bezeichnung	Fz. ¹	Zuordnung
1. Führungsgröße	w	gewünschte Sollgeschwindigkeit
2. Regelgröße	x	momentane Bootsgeschwindigkeit
3. Vergleichsglied & Regeleinrichtung		Algorithmus in einem Mikrocontroller
4. Stellgröße	y	Steuersignal an den Motor
5. Regelstrecke		längsdynamisches Verhalten des Bootes mit Antrieb
6. Störgröße	z	spontaner Krafteinfluss z. B. durch Wellen u. Paddeln
7. Messstelle		Messung der Bootsgeschwindigkeit

Anmerkung: In der Literatur findet sich nach dem Regler oft zusätzlich ein dediziertes Stellglied, welches die Stellgröße y ausgibt und vom Regler eine Steuergröße u erhält. In jenem Fall würde man es dem Elektromotor zuordnen, da er mit Hilfsenergie den Signalfluss der Regelstrecke steuert. Die Aufteilung ist (unter Beachtung der Wandlung der Größen) jedoch eine reine Definitionsfrage, so dass der Motor in dieser Arbeit aufgrund seines speziellen und nur oberflächlich dokumentierten Verhaltens (s. Kap. 2.2) der Regelstrecke zugeordnet wird.

In einem ersten Ansatz ergibt sich ein Entwicklungsschema (Abb. 2), welches die folgenden Teilziele aufstellen lässt:

- Modellierung und Charakterisierung von Antriebsverhalten und Fahrwiderstand
- Entwurf und Programmierung eines Reglers in einem Mikrocontroller
- Analyse und Programmierung einer Schnittstelle zur Motoransteuerung
- Auswahl einer Methode und Programmierung einer Schnittstelle zum Messen der Bootsgeschwindigkeit

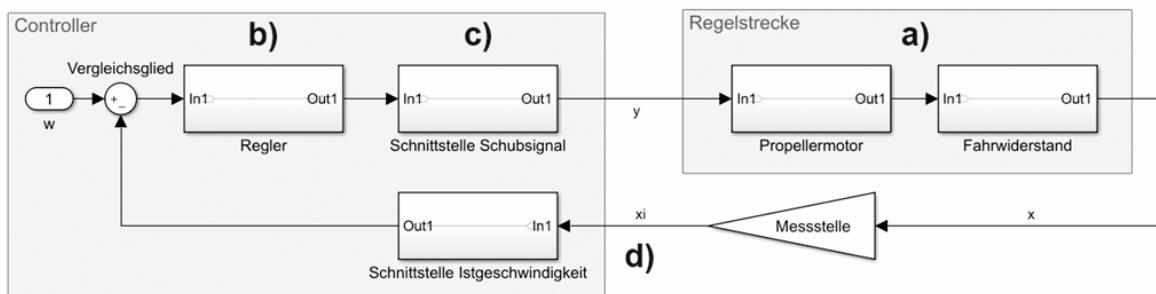


Abb. 2: Entwicklungsschema der Geschwindigkeitsregelung

¹ Formelzeichen nach DIN

1.3 Vorgehensweise

Zur Untersuchung der Grundlagen soll zunächst ein Simulationsmodell für das Zusammenspiel eines typischen Freizeitkajaks, also Kleinbootes, mit einem motorisierten Propellerantrieb handelsüblicher Bauweise (ähnlich Abb. 3) zur Analyse des längsdynamischen, d. h. rein vorwärts fahrenden Beschleunigungsverhaltens im Wasser (ohne Paddeln) entstehen. Da bislang im Umfeld der Hochschule weder Bedarf daran bestand, noch es -im Gegensatz zur Dynamik von Landfahrzeugen- Teil des Studienlehrplans war, ist hier elementare Recherche einzubringen. Als Referenz zur Verfügung stehen jedoch ein gut vier Meter langes Zwei-Personen-Kajak aus Kunststoff sowie ein ebenso im Fachhandel erworbener elektrischer Außenbordmotor mit Propeller, Batterie und einer manuellen Steuerung über einen Schubhebel (s. Kap. 2).

Das Modell soll innerhalb der Umgebung und mit den Möglichkeiten der auf Blockdiagrammen basierenden Simulationssoftware "MATLAB/Simulink" erstellt werden. Ihm muss letztlich zu entnehmen sein, auf welche Schubanforderung welcher Verlauf der Beschleunigung bzw. Geschwindigkeit folgt. Dazu sind relevante Antriebs- und Widerstandskräfte zu determinieren sowie Systemgrenzen zu kennzeichnen. Benötigte Parameter für das Modell werden vom Versuchsträger übernommen und die Ergebnisse damit auf Plausibilität überprüft. Ein Abgleich mit Referenzdaten aus realen Messfahrten ist unerlässlich und deren Gewinnung ebenfalls konzeptionell zu erarbeiten.

Auf dieser Systemnachbildung aufbauend ist eine Charakterisierung des elektrifizierten Bootes als Regelstrecke möglich. Das bedeutet, mit Kenntnis des o. g. Übertragungsverhaltens sowie der aktuellen Istgeschwindigkeit lässt sich das Schubsignal in der Form geregelt einspielen, dass das Kajak eine definierte Sollgeschwindigkeit so schnell wie möglich anfährt und auch unter dem Einfluss externer Störungen wie Wasserströmung, Paddelbewegung, Wind etc. so genau wie möglich hält (Abb. 3). Das Modell soll um einen solchen quasikontinuierlichen Regelkreis erweitert werden. Hierfür ist ein geeigneter Regler als weiterer Block in Simulink nach den gängigen Methoden aus Theorie und Praxis auszuwählen und zu parametrieren. Seine Arbeitsweise und Einsatzgrenzen sind anhand realistischer Szenarien zu prüfen. Hierfür soll ebenfalls die Möglichkeit der Vorabsimulation am Computer genutzt werden.

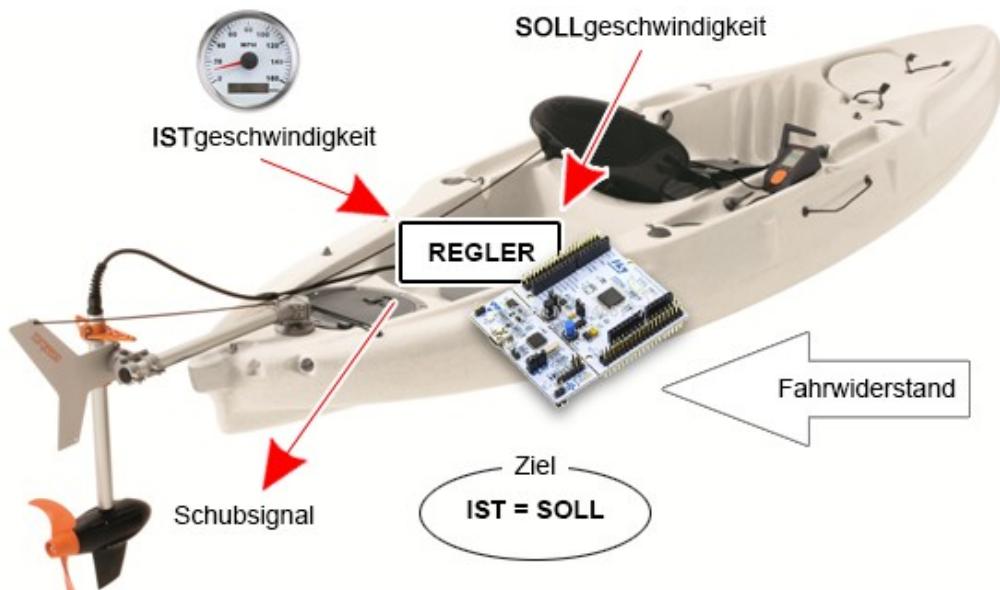


Abb. 3: Prinzip der Geschwindigkeitsregelung [Torqeedo GmbH / eigene Darstellung]

Der sich ergebende Regelalgorithmus soll als Programmcode zur Ausführung auf einen Mikrocontroller portiert werden. Das vorliegende, händisch zu bedienende Antriebssystem ist mit Fokus auf eine möglichst aufwandsarme, sichere und controllertaugliche (maschinelle) Ansteuermöglichkeit zu untersuchen. Außerdem wird für die Rückführung der Geschwindigkeit auf dem Wasser eine geeignete Messeinrichtung benötigt – existierende Verfahren sind zu recherchieren, zu evaluieren und für den Einsatz am Controller auszuwählen. Zur physischen Anbindung und Verarbeitung der Ein- und Ausgangssignale sind entsprechende Schnittstellen zu programmieren.

Abschließend soll die Regelung am realen Versuchsträger auf dem Wasser getestet werden. Dabei ist zu bewerten, wie schnell der "Tempomat" die vorgegebene Geschwindigkeit erreicht, in welchem Toleranzbereich sie eingehalten wird und inwiefern er auf welche Art von Störungen reagiert. Etwaige Abweichungen vom Modell oder Fehlverhalten sollen erkannt und wenn möglich erklärt werden.

2 Stand der Technik

2.1 Versuchskajak

Das für die Regelungsaufgabe und Referenzmessungen konkret zur Verfügung stehende Kajak (ugs.: Paddelboot) ist als klassisches Freizeitboot für zwei Personen in simpler, aber robuster Kunststoff-Bauweise zu beschreiben (Abb. 4). Es stammt vom Hersteller Kaitts mit der Bezeichnung "Grampus II" und ist zugunsten des Komforts und der Stabilität auf dem Wasser bewusst breiter ausgeführt als beispielsweise Sportkajaks.



Abb. 4: Zweierkajak Kaitts "Grampus II" [3]

Der im Thermoplast-Gussverfahren gefertigte Rumpf lässt -im Gegensatz zu bspw. Schlauchbooten- praktisch keine Verformung oder sonstige nennenswerte Änderungen der Materialeigenschaften durch eine gewöhnliche Nutzung zu. Ein vergleichsweise geringer Kaufpreis sowie die Tatsache, dass zur Zielgruppe laut Hersteller auch Angler und Bootsvermieter gezählt werden können [3], lassen dieses Exemplar als typischen, vielseitigen und massentauglichen Vertreter seiner Kategorie erscheinen. Versuche, die mit diesem Modell gemacht werden, können -so die Annahme- auf eine Vielzahl von anderen auf dem Markt befindlichen Kajaks übertragen werden.

Mehr als die in Tabelle 2 angegebenen Kenndaten oder gar technische Zeichnungen standen leider nicht zur Verfügung. Darüber hinaus benötigte Parameter wurden mit mehr oder weniger großen Toleranzen direkt am Boot oder mit Hilfe von Foto- und Videoaufzeichnungen abgemessen.

Tabelle 2: Katalogdaten Kajak "Grampus II" [3]

Gesamtlänge:	4,34 m
maximale Breite:	0,84 m
Eigengewicht:	34 kg
Gesamttragkraft:	250 kg
Material:	Polyethylen (PE)

2.2 Elektrischer Bootsantrieb

Für den zu generierenden Vortrieb wurde ein Komplettsystem der Firma Torqeedo beschafft. Das deutsche Unternehmen ist spezialisiert auf elektrische Bootsmotoren verschiedener Leistungsklassen mit der Kernkompetenz, deren Wirkungsgrad und Anwenderfreundlichkeit zu optimieren. Nach einer groben Marktanalyse ist festzuhalten, dass Torqeedo-Produkte weltweit zum Einsatz kommen, nicht selten in der Riege der Mitbewerber für Vergleichstests herangezogen werden und man sich selbst als Vorreiter in der industriellen Produktion jener Antriebe sieht [4]. Vor diesem Hintergrund ist es nicht abwegig, ein "Tempomat"-Modul auch mit Blick auf die Option des Vertriebs als Zubehörprodukt zu entwerfen.

Das gewählte System "Ultralight 403" wurde für Kajaks, Kanus und andere sehr leichte Boote konzipiert, wiegt insgesamt 8,9 kg und besteht zzgl. Befestigungs- und Lenkvorrichtung im Wesentlichen aus folgenden Komponenten (Abb. 5):

- (1) Außenbord-Elektromotor mit 2-Blatt-Propeller
- (2) Lithium Hochleistungsakku mit integriertem GPS-Empfänger
- (3) manueller Ferngashebel mit drei Eingabetasten und digitaler Anzeige (LCD)

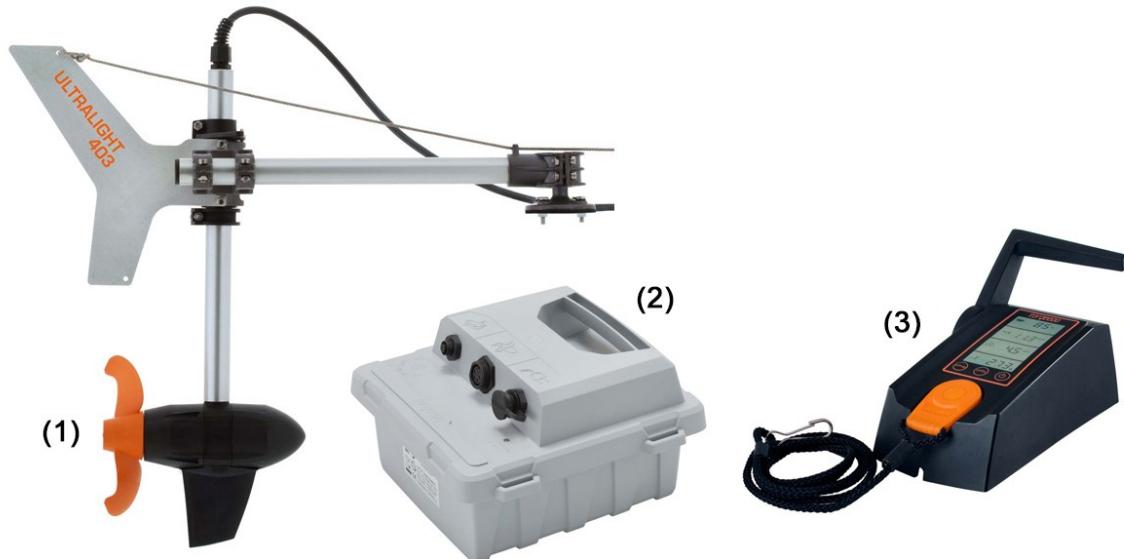


Abb. 5: Hauptkomponenten Torqeedo "Ultralight 403" (nach [5])

Die herstellerseitigen Angaben zu Merkmalen und Leistungsdaten der Motoreinheit inkl. Propeller sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Kenndaten Motoreinheit [5]

bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC) mit Permanentmagneten im Außenläufer	
digitale Motorsteuerung auf 35 kHz-Basis (proprietary)	
Eingangsleistung $P_{E\max}$ 400 W	$P_E = U \cdot I$
Vortriebsleistung $P_{V\max}$ 180 W	$P_V = F_S \cdot v$
Standschub F_S 33 lb (147 N)	$F_S(v=0)$
Propellerdrehzahl n_{\max} 1200 min ⁻¹	(Getriebeuntersetzung unbekannt)

Der die Schubkraft erzeugende Kunststoffpropeller hat einen Durchmesser von 20 cm, entstammt einem Patent der Torqeedo GmbH und wurde auf der Grundlage einer mehrdimensionalen Optimierungsrechnung entwickelt (Abb. 6).



Abb. 6: Propeller mit patentierter Geometrie [6]

Die zwei Propellerblätter sind gekennzeichnet durch eine entlang des Radius variable Steigung und Wölbung (vgl. Abb. 7 und Kap. 3.4), die segmentweise für die Anströmverhältnisse optimiert wurden und dadurch eine besonders hohe Effizienz aufweisen sollen. Durch eine solche individuelle Geometrie gestaltet es sich jedoch ebenso schwierig, den Propeller mathematisch zu erfassen um konventionelle Formeln zur Leistungsberechnung anwenden zu können.

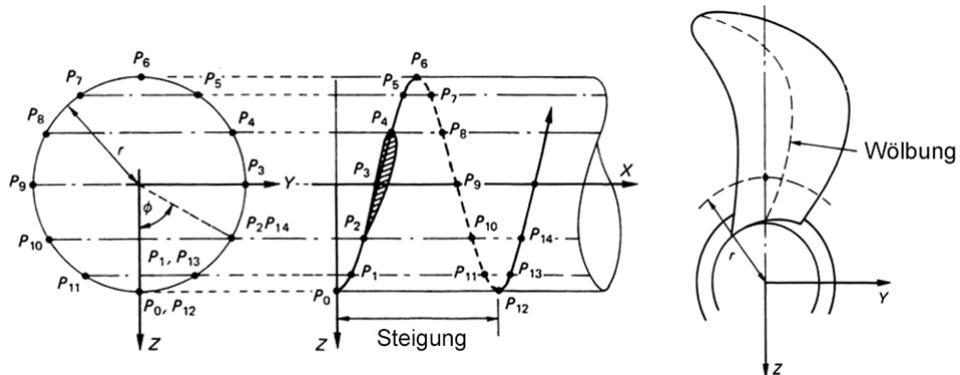


Abb. 7: Steigung und Wölbung eines Propellerblatts (nach [7])

Motor und Ferngasmodul werden jeweils mit mehrpoligen Kabeln an den Akku als Zentraleinheit angeschlossen und das System über die Eingabetasten in Betrieb genommen. Auf dem Multifunktionsdisplay lassen sich Einstellungen vornehmen (z. B. Kalibrierung) sowie neben Status-/Fehlermeldungen folgende Prozessgrößen im metrischen oder nautischen Einheitensystem anzeigen:

- Batterie-Ladestand (in %)
- verbleibende Reichweite bei aktueller Geschwindigkeit
- Geschwindigkeit über Grund
- aktueller Leistungsverbrauch (in W)

Dem Datenblatt wurde entnommen, dass sämtlicher Austausch von Mess- und Steuerdaten -also auch das Schubsignal an den Motor- über diese Kabel mittels digitaler Botschaften auf einem RS485-Kommunikationsbus parallel zur Energieübertragung stattfindet. Jede Komponente besitzt dafür ein eigenes Steuergerät und speichert zahlreiche Systemdaten (u. a. auch für Gewährleistungsansprüche).

RS485 ist als elektrische (physische) Schnittstelle basierend auf zwei Leitungen und allein der Spannungsdifferenz zwischen beiden als relevante Information definiert. Damit ist dieser Standard besonders unanfällig gegenüber elektromagnetischen Einflüssen, die z. B. durch einen hohen Motorstrom verursacht werden können, beschreibt allerdings nicht, in welchem Format die Daten genau übertragen werden. Hier konnte letztlich nur der Hersteller selbst helfen und sendete auf Anfrage freundlicherweise eine Dokumentation seines selbst definierten, sogenannten "TQ Bus" zu. Darin ist der Kommunikationskanal wie in folgender Tabelle 4 beschrieben.

Tabelle 4: "TQ Bus" Datenformat und Zugriffsprinzip

digitale Schnittstelle:	UART (seriell)
Symbolrate:	19200 Baud
Daten- / Stop-Bits:	8 / 1
Paritätsbit:	nein
Zugriffsprinzip:	Single Master - Multiple Slaves (request / reply)

Dank dieser Angaben ist es möglich, die Nachrichtenpakete nach Abgriff der Leitungen mittels Terminal-Software am PC mitzulesen. Eine echte Teilnahme mit Übermittlung eigener Nachrichten erfordert jedoch einen ungleich höheren Aufwand (s. Kap. 5.1.1).

Des Weiteren läuft der Motor zwar augenscheinlich drehzahlgeregelt, verfügt nach Herstellerangaben [5] und eigenen Beobachtungen allerdings auch über mehrere integrierte Schutzfunktionen, wie z. B. einen Temperaturschutz (automatische Leistungsreduzierung) oder eine Beschleunigungskontrolle, d. h. eine bewusst träge, situationsabhängige Reaktion der Drehzahl auf Änderungsvorgaben zum Schutz der Mechanik und vor Überstromspitzen. Extrem zu spüren bekommt das der Anwender bei stillstehendem Motor. Hier vergeht ab Betätigung des Hebels eine ganze Sekunde Totzeit bis die Drehmomentbildung überhaupt einsetzt. Aus einer bestehenden Rotation heraus oder bei der Schubrücknahme ist die Ansprechzeit deutlich kürzer.

Fasst man alle Merkmale zusammen, hat der Endkunde mit dieser "Plug-and-Play"-Lösung² zwar den Nutzen, nach wenigen Handgriffen ein sicheres, effizientes und wahrscheinlich langlebiges Produkt mit nützlichen Informationen über dessen aktuellen Zustand verwenden zu können, für die Einbindung in einen Regelkreis ergeben sich dadurch allerdings zusätzliche Herausforderungen. Zum einen muss man natürlich überhaupt in der Lage sein, kontrollierte Signale an den Motor als Stellglied zu senden, was nach jenen Erkenntnissen entweder eine Teilnahme an der Bus-Kommunikation und Kenntnis vom Aufbau der Botschaften oder aber die Überlegung einer alternativen Ansteuermöglichkeit erfordert. Zum anderen profitiert die Stabilität jedes Regelkreises von einem linearen und zeitinvarianten Verhalten aller Glieder. Hier birgt die vom Hersteller fest einprogrammierte und nicht genau dokumentierte Anlaufträgeit das Risiko, ein Stellglied mit Hysterese und anderem nichtlinearen "Eigenleben" einzusetzen zu müssen. Dieses Risiko ist dem Aufwand, bis in die Wicklungsebene des Elektromotors vordringen und eine gänzlich neue Steuerung entwickeln zu müssen gegenüberzustellen.

² "anschließen und loslegen", Begriff aus dem Gebiet der Computertechnologie

2.3 Mikrocontroller-Board

Als Herzstück der Regelungsdatenverarbeitung wurde das Entwicklungs- und Evaluationsboard "Nucleo-64 F401RE" des Herstellers ST auf Basis des Mikrocontrollers "STM32" gewählt (Abb. 8). Eine solche Platine bietet zahlreiche steckbare und relativ frei konfigurierbare Pins (Anschlüsse zum Prozessor) für die analoge und digitale Kommunikation mit Peripheriegeräten (bis 5V) sowie eingebaute Taster und LED. Sie hat den Verwendungszweck, die Arbeit mit dem eigentlichen Mikrocontroller im prototypischen Bereich zu vereinfachen. Dies wird zusätzlich unterstützt durch spezielle, für die meisten Boards erhältliche Tools (Hilfssoftware), die per USB am Computer bei der Konfiguration, Programmierung und Fehlerbeseitigung (engl.: debugging) komfortabel assistieren. Als digitale Schnittstellen stehen u. a. I²C, UART oder für allgemeine Zwecke nutzbare Ein- und Ausgänge (GPIO) zur Verfügung. Der Prozessor läuft mit einem Takt von 84 MHz, was für die zu erwartende Aufgabe genügen sollte, insbesondere da er -im Gegensatz zu einem Betriebssystem- stets nur den einen vom Anwender bestimmten Prozess ausführt. Die grundlegende Programmiersprache für diesen Mikrocontroller ist C.

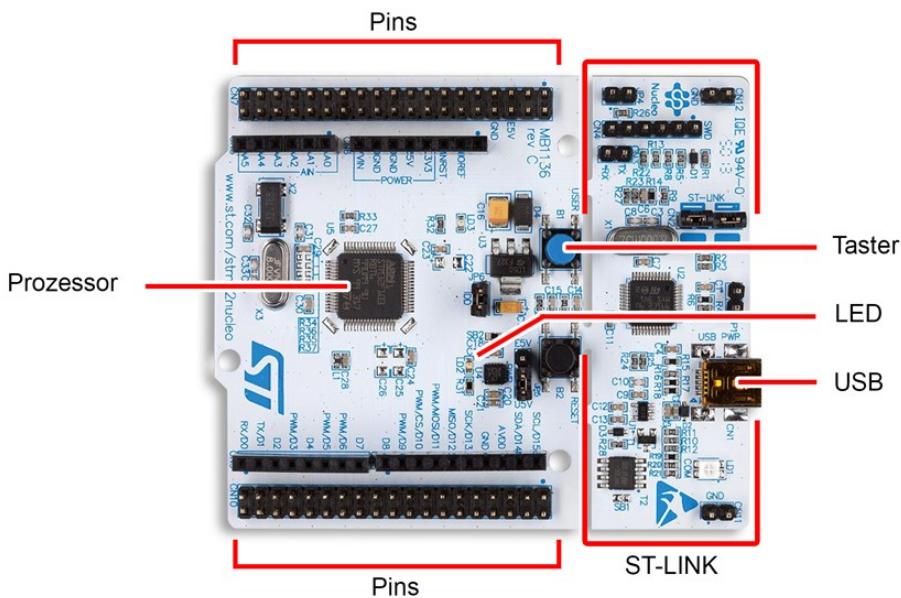


Abb. 8: Mikrocontroller-Entwicklungsboard "STM32 Nucleo-64 F401RE"

Programmiert wurde mit einer Kombination aus dem vom Hersteller angebotenen Konfigurationsassistenten "STM32CubeMX" und der generischen Entwicklungsumgebung "TrueSTUDIO" der Firma Atollic. In ersterem werden auf Grundlage des spezifischen, zu Beginn zu ladenden Board-Layouts alle gewünschten Schnittstellen (Signalein- oder Ausgang, analog oder digital) und jeweiligen Protokolle den entsprechend benötigten Pins zugeordnet (Abb. 9) sowie ggf. mit speziellen Funktionen versehen, z. B. einer erhöhten Verarbeitungspriorität (Interrupt³). Anschließend wird aus den Einstellungen "auf Knopfdruck" ein Code generiert, der den Rahmen für die eigentliche Programmierung der Funktionen bildet. Alle notwendigen Datendeklarationen und Routinen sind darin bereits enthalten und die Bereiche, in die benutzereigene Algorithmen eingefügt werden können, markiert. Der Code kann entweder nur abgespeichert oder zusätzlich in eine zuvor gewählte Entwicklungsumgebung geladen werden - in diesem Fall TrueSTUDIO.

³ vorübergehende Unterbrechung eines laufenden Programms, um einen anderen, in der Regel kurzen, aber zeitlich kritischen Vorgang abzuarbeiten

Dieses bietet einen mächtigen Funktionsumfang als Unterstützung für das syntaktisch korrekte Programmieren, Kompilieren und Übersetzen in maschinenlesbaren Binärcode sowie für das Übertragen auf ein Zielgerät.

Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Funktionalität des Boards, mit dem angebundenen Modul "ST-LINK" während der Laufzeit des im Zielgerät ausgeführten Codes an beliebigen Unterbrechungspunkten angehalten und bezüglich des Speicherinhalts zu diesem Zeitpunkt vom PC aus untersucht werden zu können, was z. B. bei einer Fehleranalyse hilfreich sein kann.

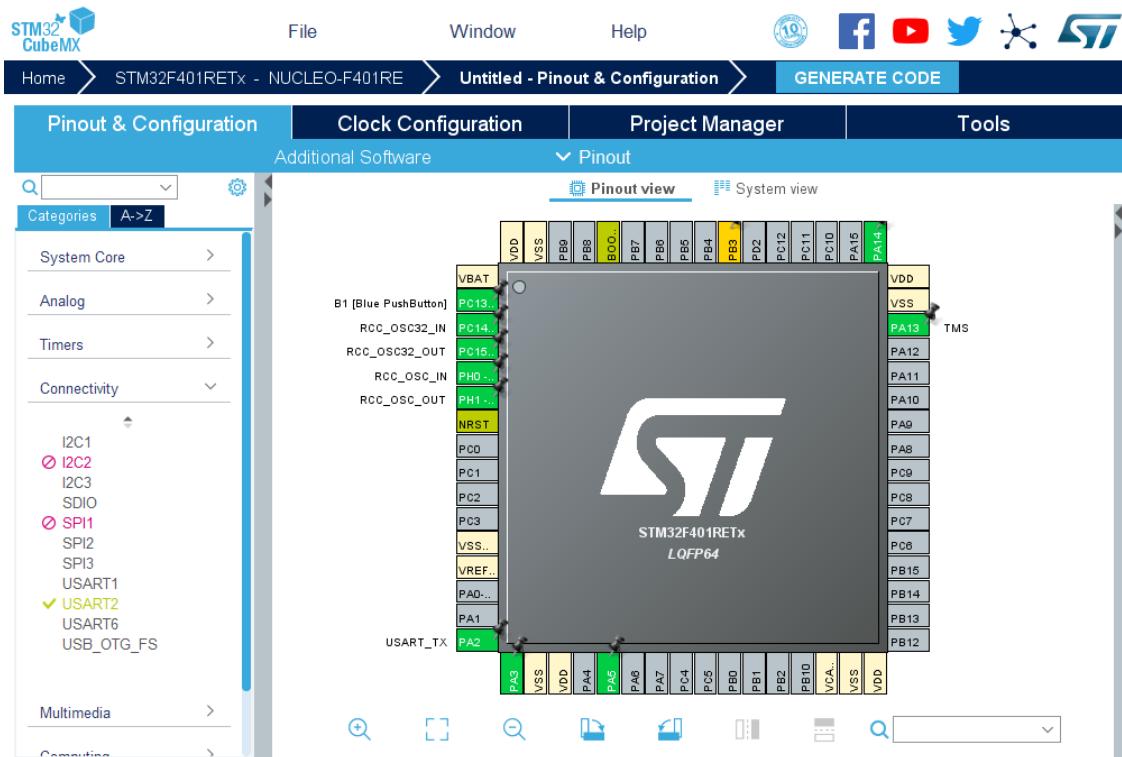


Abb. 9: Funktionszuweisung der Pins in STM32CubeMX

2.4 Geschwindigkeitsmessung / GPS-Modul

Im Gegensatz zu bewegten Objekten, die eine Haftung auf ihrer Fahrbahn vorweisen können (z. B. ein Auto über seine Räder), erweist sich die Feststellung der absoluten Geschwindigkeit eines Bootes auf dem Wasser als weniger trivial, da das Bezugssystem (der Erdboden) durch ein Medium vom Boot getrennt ist, welches sich selbst in Bewegung befinden kann - und dies zudem durchaus inhomogen. Lange Zeit blieb den Seefahrern nichts anderes übrig, als die Geschwindigkeit lediglich relativ zur Wasserströmung zu bestimmen. Ein historisches Mittel aus dem 17. Jahrhundert war ein an einem Seil befestigter Holzscheit, der während der Fahrt in das Wasser geworfen wurde. Das Seil wurde alle sieben Meter mit einem Knoten versehen, man ließ es durch die Hand gleiten und zählte im Zeitfenster einer durchlaufenden Sanduhr (üblicherweise 14 Sekunden) die Anzahl der Knoten – woher die noch immer gebräuchliche, inzwischen definierte Einheit ($1 \text{ kn} = 1,852 \text{ km/h}$) stammt. Auch der Messbegriff des "Loggens" hat darin seinen Ursprung, da ein Holzscheit im Englischen "log" heißt [8].

Heutzutage sind zwei Verfahren bekannt, um auf einer Wasserfläche den Bezug zum erdfesten Inertialsystem herzustellen. Eine kostspielige und selten im Privatbereich angewandte Methode ist das Sonar (engl. Akronym von "sound navigation and ranging"). Hier werden Schallimpulse mit einer Frequenz von 50 bis 80 kHz in Richtung des Grundes ausgesendet, dort reflektiert und deren Laufzeit bis zum Wiederreichen eines Empfängers an der Quelle gemessen. Mittels bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich so nicht nur die Tiefe des Wassers an der Stelle errechnen, sondern dank einer hohen Auflösung auch die dreidimensionale Struktur des Bodens aufnehmen (Navigationslot, [9]). Mit Mitteln der digitalen Bildverarbeitung ließe sich deren zeitliche Veränderung und damit auch eine Geschwindigkeit registrieren. Aufgrund von Fehlerquellen wie Fischen oder falscher Parametrierung und eines schlicht zu hohen Aufwands, kann diese Methode rasch verworfen werden.

Deutlich verbreiteter, seit 1978 möglich und längst im Alltag angekommen ist die Nutzung eines satellitengestützen Positionierungssystems, allgemein -wenngleich nicht immer korrekt- bekannt als GPS (Global Positioning System). Denn weltweit sind verschiedene solcher Systeme in Betrieb (daneben GLONASS, GALILEO, Beidou u. a.). Sie unterscheiden sich hauptsächlich durch den Betreiber sowie die Konzepte der Datenübertragung. Gemeinsam werden sie unter dem Begriff GNSS (Global Navigation Satellite Systems) zusammengefasst. Vereinfachend und exemplarisch soll hier dennoch der Begriff GPS weiterverwendet werden. Das Prinzip der Geschwindigkeitsmessung per GPS beruht auf der zeitlichen Ableitung der Position eines Messempfängers in erdbezogenen Koordinaten. Alle Navigationssysteme wenden die gleiche Technik an, um diese Koordinaten zu bestimmen: Satelliten, mit $3,9 \text{ km/s}$ ca. 25000 km über der Erde kreisend und bis zu vier Atomuhren an Bord, senden regelmäßig (jede Millisekunde) einen individuellen Code, das aktuelle Systemzeitsignal und ihre Position in Form von Bahndaten (Ephemeriden) aus. Anhand der vom Empfänger gemessenen Laufzeit (elektromagnetische Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = 299792458 \text{ m/s}$) wird dessen Entfernung zum jeweiligen Satelliten und mittels Triangulation schließlich seine Position im Raum berechnet (Abb. 10). Theoretisch wären dafür nur drei Satelliten nötig. Da die Empfänger jedoch in den seltensten Fällen ebenfalls mit synchronisierten Atomuhren ausgestattet sind, braucht es mindestens ein viertes Zeitsignal als Referenz. Eine hohe Anzahl von Navigationssatelliten (zwischen 30 und weit über 100 je nach System) und definierte Umlaufbahnen sollen dies jederzeit gewährleisten [10] [11].

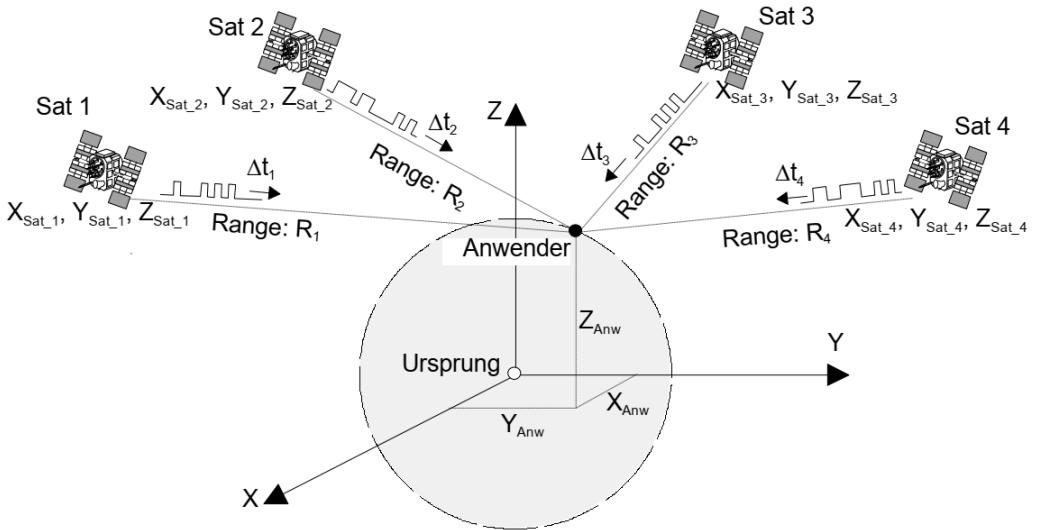


Abb. 10: Prinzip der satellitengestützten Positionsbestimmung [10]

Der Betreiber des GPS garantiert dem Anwender des zivilen Standard-Service eine horizontale Genauigkeit von 9 m (oder besser). Dies liegt in verschiedenen Fehlerquellen, wie dem atmosphärischen Einfluss, ungenauen Ephemeridendaten, den Satellitenuhren (eine Abweichung um 1 μ s generiert einen Entfernungsfehler von 300 m) und schlicht der Qualität des Empfängers begründet. Durch zusätzliche Bemühungen, z.B. mehrere gekoppelte Empfänger (DGPS), eine längere Messzeit oder spezielle Phasenmessung der Trägerfrequenz (Doppler-Effekt, [12]), kann die Bestimmungsgenauigkeit jedoch bis in den Millimeterbereich gesteigert werden, was auch die Errechnung eines genaueren Differenzenquotienten ermöglicht und damit die Attraktivität als Messstelle für den Regelkreis enorm steigert.

Die Information, die ein GPS-Empfänger heute grundsätzlich bereitstellt, entspricht dem 1980 von einer Vereinigung der Schifffahrtsindustrie initiierten Standard NMEA-0183. Er spezifiziert die Kennzeichnung und den Aufbau von ca. 100 Datensätzen, die für eine einheitliche maritime Kommunikation erteilt wurden. Handelsübliche GPS-Empfänger nutzen davon in der Regel einen überschaubar kleinen Teil (s. Tabelle 5).

Tabelle 5: GPS-relevante Datensätze nach NMEA-Standard

Kzg. ⁴	Beschreibung Original	Beschreibung Deutsch
GGA	GPS Fix Data	Status der Positionsermittlung
GLL	Geographic Position: Latitude / Longitude	Geographische Position: Breitengrad / Längengrad
GSA	GNSS DOP and Active Satellites	Genauigkeitsangabe und aktive Satelliten
GSV	GNSS Satellites in View	Satelliten mit Sichtkontakt
RMC	Recommended Minimum Specific Data	Empfohlener minimaler spezifischer Datensatz
VTG	Course over Ground and Ground Speed	Horizontaler Kurs und horizontale Geschwindigkeit
ZDA	Time and Date	Zeitstempel und Datum

Man erkennt, dass es einen eigenen Datensatz für die Geschwindigkeit über Grund gibt und somit anspruchsvolle Transformationen der reinen Positionsangaben entfallen. Ein Beispiel für die Ausgabe im ASCII-Format lautet:

⁴ Abkürzung: Kennzeichnung

\$GPVTG,014.2,T,015.4,M,001.46,N,002.70,K*4F<CR><LF>

Die Bedeutung der einzelnen durch Kommas getrennten Zeichen oder Zeichengruppen ist in Tabelle 6 erklärt.

In diesem Zusammenhang sei jedoch auch bemerkt, dass ein einzelner GPS-Empfänger nicht zu erkennen vermag, ob er sich innerhalb seiner Orientierung vorwärts, rückwärts oder seitwärts bewegt, was ein prinzipbedingtes Problem darstellt und hinsichtlich einer Regelung in alle Richtungen weiterführende Überlegungen erfordert. Insgesamt wird die GPS-Methode dennoch, auch dank bereits digital und standardisiert vorliegender Daten, als vielversprechendste Methode erachtet, die Istgeschwindigkeit des Bootes bei reiner Vorwärtbewegung als Regel- bzw. Rückführgröße einzubinden.

Tabelle 6: Aufschlüsselung eines NMEA-Datensatzes am Beispiel VTG

Feld	Beschreibung
\$	Beginn des Datensatzes (Trennzeichen)
GP	Informationen stammen von einem GPS-Gerät (alternativ: GN für kombinierte GNSS Daten)
VTG	Kennzeichnung des Datensatzes
014.2	14,2° (T)
T	Kurs in einem Winkel relativ zum kartografischen Nordpol
015.4	15,4° (M)
M	Kurs in einem Winkel relativ zum magnetischen Nordpol
001.46	1,46 kn (N)
N	Horizontale Geschwindigkeit in Knoten
002.70	2,7 km/h (K)
K	Horizontale Geschwindigkeit in km/h
*	Trennzeichen für Prüfsumme
4F	Prüfsumme des gesamten Datensatzes
<CR><LF>	Ende des Datensatzes: Wagenrücklauf (carriage return) und neue Zeile (line feed)

Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgangen sein, dass das in Kap. 2.2 vorgestellte Antriebssystem bereits über eine GPS-basierte Ausgabe der Geschwindigkeit verfügt. Diese zu nutzen wurde aus folgenden Gründen nicht verfolgt: Zum einen macht die Kommunikation mit dem RS485-System des "TQ Bus" eine Pegelwandlung erforderlich. Ein zusätzlicher Transceiver wäre dazwischenzuschalten, der eine potentielle Fehlerquelle darstellt. Zum anderen befindet sich der Empfänger im Akku-Gehäuse, welches aus Platzgründen nicht (immer) mit der für die Signalübertragung erforderlichen Sichtfreiheit zum Himmel im Kajak platziert werden kann.

Nach einer Marktrecherche wurden zwei Empfängermodule unterschiedlichen Preisniveaus getestet. Als ein wesentliches Kriterium galt hierbei neben der Genauigkeit eine UART-Schnittstelle zur Einsicht und Übertragung der Datensätze auf den Mikrocontroller. Während das günstigere Modell eines weniger namhaften Herstellers in Ruhelage Abweichungen von bis zu 2 km/h bei einer Aktualisierungsrate von 1 Hz erkennen ließ, konnte das auf Entwicklungsvorhaben spezialisierte Modell "C94-M8P" (Abb. 11) des in der Halbleiterbranche sehr präsenten schweizer Herstellers u-blox eine deutlich bessere Performance liefern (s. Tabelle 7).

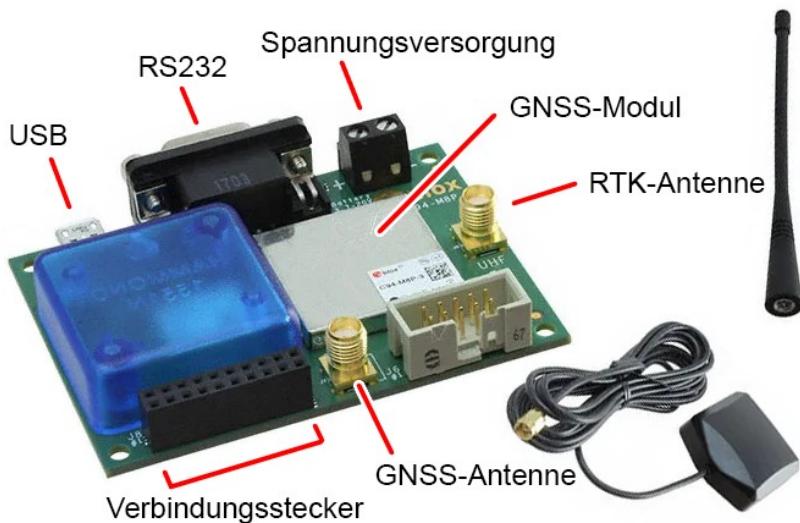


Abb. 11: Applikationsboard u-blox "C94-M8P"

Dieses Applikationsboard bietet gleich mehrere Schnittstellen, wie USB, UART (über Pins am Verbindungsstecker) und RS232, um navigationsrelevante Daten aus dem eigentlichen GNSS-Modul ("NEO-M8P") empfangen zu können, sowie die Möglichkeit, über die herstellereigene, frei verfügbaren PC-Software "u-center" per USB eine Vielzahl an Parametern zu konfigurieren. So kann die Aktualisierungsrate, mit der die Koordinaten berechnet und ausgegeben werden, bspw. auf bis zu 10 Hz erhöht werden. Außerdem werden standardmäßig zwei Systeme (GPS und GLONASS) parallel verarbeitet und verknüpft, was die Anzahl nutzbarer Satelliten und damit die Einsatzgeschwindigkeit nach Inbetriebnahme erhöht.

Eine weitere Besonderheit dieses Produkts stellt die Real-Time-Kinematics-Funktionalität (RTK) dar, die Genauigkeiten im Zentimeterbereich ermöglichen soll. Dafür sendet ein zweites, in der Nähe ortsfixiertes RTK-fähiges Modul ("Base"), das seine exakte Position und damit die Abweichung von der aktuell gemessenen Position kennt, entsprechende Korrekturdaten über eine dauerhafte Funkverbindung im GHz-Bereich an den "Rover", das eigentliche Messmodul. Dieses Prinzip funktioniert, da beide den gleichen Fehlerquellen unterliegen, also Daten von denselben Satelliten erhalten, sticht jedoch nicht durch eine besonders hohe Alltagstauglichkeit hervor, da das "Base"-Modul erst langwierig eingemessen werden muss und die Funkverbindung eine maximale Reichweite von 300 m hat.

Tabelle 7: Leistungsdaten GNSS-Modul "NEO-M8P" (Auszug, [13])

	ohne RTK	mit RTK
Bestimmungsgenauigkeit (horizontal)	2,5 m CEP ⁵	0,025 m CEP
max. Aktualisierungsrate:	10 Hz	5 Hz
Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung:	0.05 m/s	
max. Dauer bis Positionsermittlung nach Start (TTFF):	29 s	

⁵ Circular Error Probable (Streukreisradius): 50 % der Messungen liegen in Kreis mit Radius X

3 Theorie der Längsdynamik

3.1 Grundlagen

Um das dynamische Verhalten eines motorisierten Bootes zu modellieren, sind wesentliche mit ihm interagierende Kräfte, Momente, Energiewandlungen und Wirkungsgrade mit best möglicher Präzision zu ermitteln und zu formulieren. Aufgrund der in dem flüssigen Medium Wasser rasch ansteigenden Komplexität einer annähernd exakten Nachbildung anhand analytischer Formeln, besteht in Forschung und Entwicklung oft nach wie vor der Status quo, empirische Untersuchungen an kleinskalierten, realen Modellbooten in Strömungskanälen durchzuführen [14]. Unter Berücksichtigung vergleichbarer Bedingungen können die Ergebnisse anschließend auf das große Boot bzw. Schiff transferiert werden. Es lohnt daher, mindestens die Stärke und grundlegende Abhängigkeiten der verschiedenen Einflüsse zu kennen, um sie sinnvoll wichtigen und die resultierende Geschwindigkeit mit einer hinreichend geringen Toleranz -auch ohne aufwendige Experimente- vorhersagen zu können.

Wie an jedem physikalischen Körper herrscht auch an einem Kajak im Zustand der gleichförmigen Bewegung ein Gleichgewicht der Kräfte und Momente. Kennzeichnet man die drei Achsen des räumlichen Koordinatensystems eines frei beweglichen Bootes auf dem Wasser, ergeben sich in erster Näherung das hydrostatische Gleichgewicht zwischen der vertikalen Gewichts- und Auftriebskraft (archimedisches Prinzip⁶) sowie zwischen allen gegeneinander gerichteten Kräften in der Horizontalen. Bei der für die Geschwindigkeitsregelung relevanten Längsdynamik betrachtet man hauptsächlich die Wechselwirkung zwischen antreibenden und abbremsenden Kräften auf der Längsachse (x-Achse) des Bootes (Abb. 12). Effekte der Geschwindigkeit auf den Auftrieb sowie Querkräfte (z. B. durch Querströmung) und die Momente um alle drei Achsen (z. B. beim Lenken) werden vernachlässigt, da sie im anvisierten Arbeitsbereich der geradlinigen Verdrängerfahrt in Binnengewässern hinreichend gering auftreten. Das spezifische Modell besteht somit aus den Teilsystemen der Schubkraft des Propellerantriebs (F_S) und des ihm entgegen wirkenden Gesamtfahrwiderstands (F_W). Aus der Differenz beider Komponenten lässt sich mit der Formel

$$F_S(t) - F_W(t) = m \cdot \ddot{x}(t) \quad (1)$$

und bekannter Gesamtmasse m ein Geschwindigkeitsverlauf $\dot{x}(t)$ des Bootes berechnen.

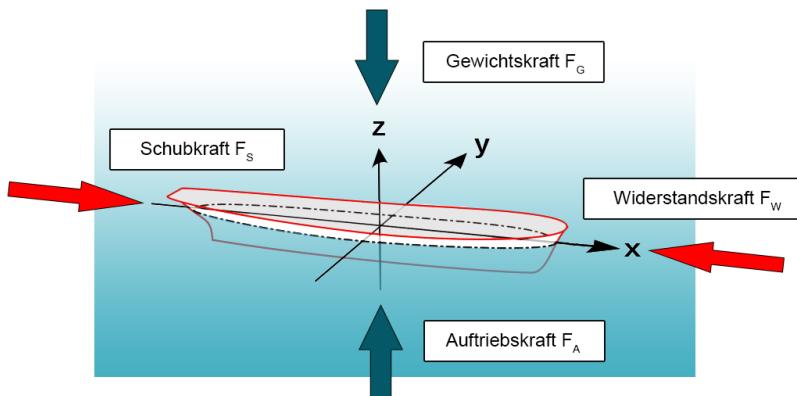


Abb. 12: Kräftegleichgewicht am Boot im gleichförmig bewegten Zustand

⁶ Der statische Auftrieb eines Körpers in einem Medium ist genauso groß wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums.

3.2 Parameter

Für die Modellbildung des Versuchsträgers sind zahlreiche Parameter notwendig bzw. hilfreich um die Genauigkeit zu steigern. Sowohl ein Bootskörper, als auch die Medien Wasser und Luft, als auch das "unverstandene Wesen" Propeller [15] können in einer Detailtiefe beschrieben werden, die es kaum noch möglich macht, auf numerische Simulationssprogramme der Konstruktion und Strömungsmechanik (CAD, FEM, CFD usw.) verzichten zu können. Selbst dann kann höchstens die Toleranz des Ergebnisses hinreichend minimiert werden, da die schiere Anzahl an Variablen eines realitätsnahen Modells den Aufwand der Erstellung immens vergrößern würde.

Die Dimensionsanalyse in dieser Arbeit wird sich nach Recherche und Abwägung aus Effizienzgründen in den nächsten Kapiteln daher auf die Parameter in Tabelle 8 beschränken und alle Berechnungen darauf aufbauen lassen. Alle Werte sind toleranzbehaftet und gemäß Kap. 2 gegeben bzw. Konstanten der Natur oder selbstständig gemessen.

Tabelle 8: Parameter des Modells der Längsdynamik

Länge Wasserlinie	$L = 4,0 \text{ m}$	gemessen
Breite Wasserline	$B = 0,8 \text{ m}$	gemessen
Tiefgang	$T = 0,18 \text{ m}$	gemessen
Dichte Wasser	$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ (Süßwasser, 20 °C)	gegeben
dynamische Viskosität Wasser	$\eta = 0,001 \text{ kg/(m*s)}$ (Süßwasser, 20 °C)	gegeben
Gesamtmasse	$m = 250 \text{ kg}$	gegeben / gemessen
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	gegeben
Außendurchmesser Propeller	$D = 0,2 \text{ m}$	gegeben
Gesamtfläche Propellerblätter	$A_E = 0,006 \text{ m}^2$	gemessen
Propellerdrehzahl maximal	$n_{\max} = 1200 \text{ min}^{-1}$	gegeben
Steigungswinkel Propellerblatt	$\delta = 20^\circ$ (bei 70 % Radius)	gemessen

Der Wasserspiegel, in den der Bootsrumpf eintaucht, markiert eine Linie entlang seiner Außenfläche – die Wasserlinie (Abb. 13). Sie ergibt sich aus dem hydrostatischen Gleichgewicht. Es tritt ein, wenn die Masse des verdrängten Wasservolumens V gleich der Gesamtmasse des Bootes m ist. Gemäß

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

ergibt sich für den Versuchsträger mit der o. g. Masse ein verdrängtes Volumen von $V = 0,25 \text{ m}^3$. Mit diesem Wert und einem digitalen dreidimensionalen Abbild des Bootskörpers ließe sich der Wasserlinienverlauf (bei wellenloser Wasseroberfläche) durch Integration rechnerisch exakt ermittelt. Mangels CAD-Daten wurde auf die Foto- und Videoanalyse einer Testfahrt zurückgegriffen und die sichtbare Lage mit bekannten Abmessungen verglichen. Die Länge dieser Wasserlinie ist ihre einfache, projizierte Strecke von Bug- bis Heckkante. Die Breite ist der größte Abstand der Verläufe beider Seiten. Der Tiefgang ist das Lot von der Wasserlinie bis zum tiefsten Punkt des Kiels.

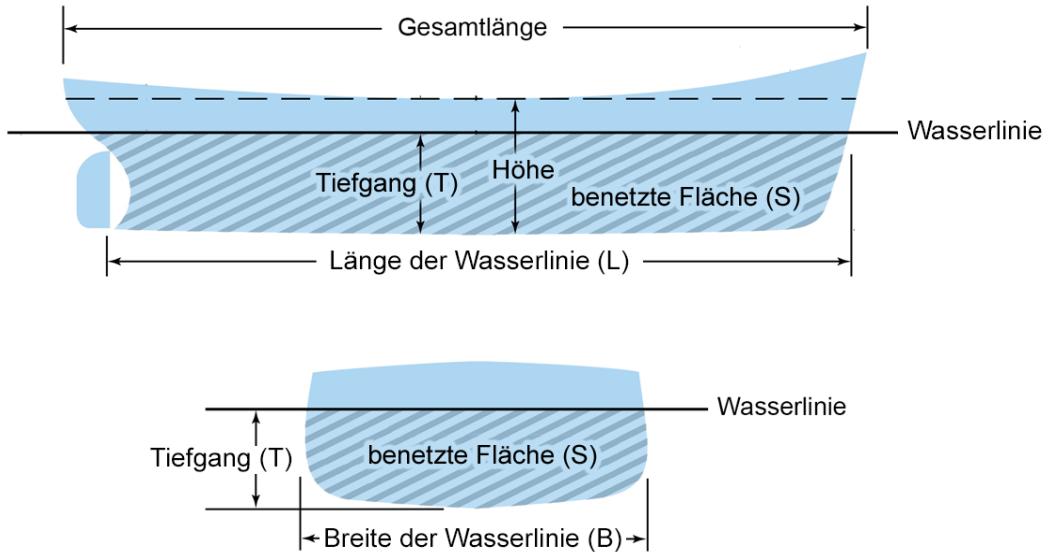


Abb. 13: Darstellung der Wasserlinie (oben: seitlich, unten: frontal)

Weiterhin begrenzt die Wasserlinie die benetzte Fläche S . Sie umhüllt den Teil des Rumpfes, der ganz im bzw. unter Wasser liegt und wird ebenfalls für die Berechnungen benötigt. Ihre exakte Ermittlung ist auch ein Fall für das 3D-Modell. Es kann mit bekannter Wasserlinie allerdings eine Annäherung über einfache geometrische Formen erfolgen. Sie kann außerdem mit Formeln abgeschätzt werden, die auf umfangreichen Messreihen basieren und durchschnittliche Rumpfformen abdecken sollen, z. B. nach Froude [16]:

$$S = V^{\frac{2}{3}} \cdot \left(3,4 + \frac{L}{2 \cdot V^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (3)$$

oder nach Denny-Mumford [16]:

$$S = 1,7 \cdot T + B \cdot c_B \quad \text{mit } c_B = \frac{V}{L \cdot B \cdot T} \quad (4)$$

c_B wird als Blockkoeffizient (auch Völligkeitsgrad) bezeichnet.

Aus beiden Ansätzen ergibt sich für den Versuchsträger eine benetzte Fläche von $S \approx 2,6 \text{ m}^2$. Mit der Annäherungsmethode per Maßband wurden 3 m^2 gemessen.

3.3 Fahrwiderstand

Über Jahrtausende existierten im Schiffsbau lediglich Faustformeln, um sich mit den vorhandenen Mitteln möglichst effizient auf dem Wasser zu bewegen. Bei den vorwiegend eingesetzten Segelschiffen, deren erster Nachweis bis vor 5000 v. Chr. zurückreicht, bediente man sich beispielsweise reinen Erfahrungswerten, um die Größe der Segel zu dimensionieren. Gründlichere Ansätze wurden erst ab Mitte des 19. Jahrhunderts mit der Entwicklung und Auslegung dampfbetriebener Schiffe aus Eisen und Stahl notwendig. Man definierte den Schiffswiderstand als die Kraft, die aufgewendet werden muss, um das Schiff in ruhigem Gewässer mit konstanter Geschwindigkeit vorwärts zu ziehen. Denn während ein ruhender Körper auf dem Wasser lediglich hydrostatischem Druck in Form des Auftriebs ausgesetzt ist, tritt bei dessen Bewegung zusätzlich eine ihr entgegengerichtete hydrodynamische, also von der Geschwindigkeit abhängige Widerstandskraft auf. Diese lässt sich nach Maßgabe ihrer Ursachen in verschiedene Komponenten aufteilen, von denen einige auch Rückwirkungen untereinander haben (Abb. 14), was je nach Detaillierungsgrad zu einem hohen Modellierungsaufwand führen kann.

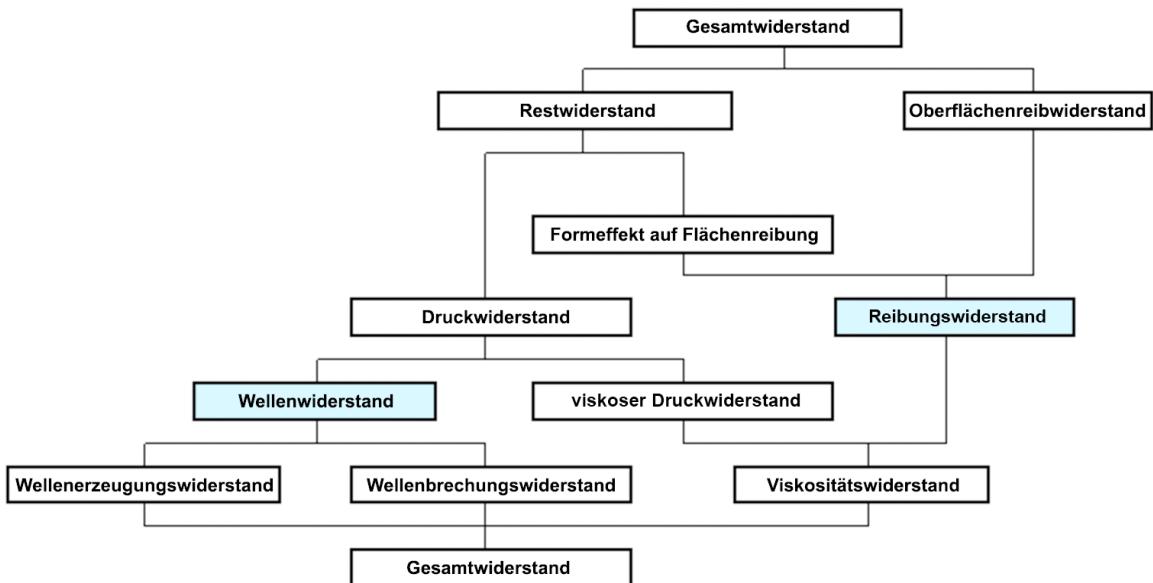


Abb. 14: Aufteilung des Gesamtfahrwiderstands im Wasser (nach [17])

Prinzipiell zerfällt der Fahrwiderstand eines Schiffes in den sogenannten Glattwasserwiderstand und Zusatzwiderstände durch Umgebungsbedingungen, wie Wind oder Seegang, welche man nicht prädizieren kann und somit den Störgrößen der Regelung zuordnen muss. Der Glattwasserwiderstand wiederum setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen [14]:

- Reibungswiderstand (hervorgerufen durch Scherkräfte auf molekularer Ebene)
- Wellenwiderstand (dominierender Anteil des Druckwiderstands, aufgrund inhomogener Wasserdrukverteilung entlang des Bootskörpers)

Die dritte Komponente ist der Luftwiderstand durch Eigenfahrtwind nach bekannter Formel, fügt sich jedoch bei der Maximalgeschwindigkeit eines Freizeitkajaks (und Windstille) nachweislich mit einem Anteil von weniger als 5 % in die Gesamtsumme ein.

3.3.1 Reibungswiderstand

Wasser besteht aus Molekülen (H_2O). Den Grenzbereich zwischen der benetzten Oberfläche des Rumpfs und dem offenen Wasser kann man sich für ein besseres Verständnis des viskosen Reibungswiderstandes in Schichten dieser Moleküle vorstellen. Während die rumpfnächste Schicht durch Adhäsion an der Außenhaut haftet, sind im Fortlauf der Bootsbewegung Kohäsionsbindungen von einer Schicht zur nächsten zu überwinden, was sich in Form eines Scherspannungsgradienten (am Rumpf am größten) als Widerstand bemerkbar macht. Nicht nur aufgrund der Dimensionierung der Spannung als Kraft pro Fläche ist zu erkennen, dass der Reibungswiderstand R_F (friction resistance) maßgeblich von der Größe der benetzten Fläche bestimmt wird.

William Froude (1810 - 1879) war einer der Ersten, die dem Schiffswiderstand zugrunde liegende Effekte genauer untersuchten und führte Schleppversuche an untergetauchten, längs angestromten Platten durch. Er maß die Widerstandskraft und setzte diesen Wert gleich mit dem Anteil der Reibung am Gesamtwiderstand eines Schiffes, das die gleiche Glätte und Größe der Rumpfaußenseite besitzt. Er hielt fest, dass er damit die Effekte der Rauhigkeit des Rumpfes und der Zähigkeit (Viskosität) des Wassers isoliert bestimmen konnte. Auf die Unvollkommenheit dieser Annahme wurde er bereits zu Lebzeiten hingewiesen (die Zähigkeitskräfte verursachen am Schiff auch Wirbel und Wellen [18]), für den hiesigen Anspruch soll die von ihm getroffene Aussage über die Abhängigkeiten des Reibungswiderstands jedoch genügen:

$$R_F = c_F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v^2 \quad (5)$$

Der eingeführte dimensionslose Reibungskoeffizient c_F wurde mittlerweile in mehreren Veröffentlichungen aus zusammengefassten Ermittlungen der einzelnen Scherspannungen genauer bestimmt (Abb. 15). Meist wird er nach wie vor durch die ITTC⁷-Linie von 1957 angenähert:

$$c_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (6)$$

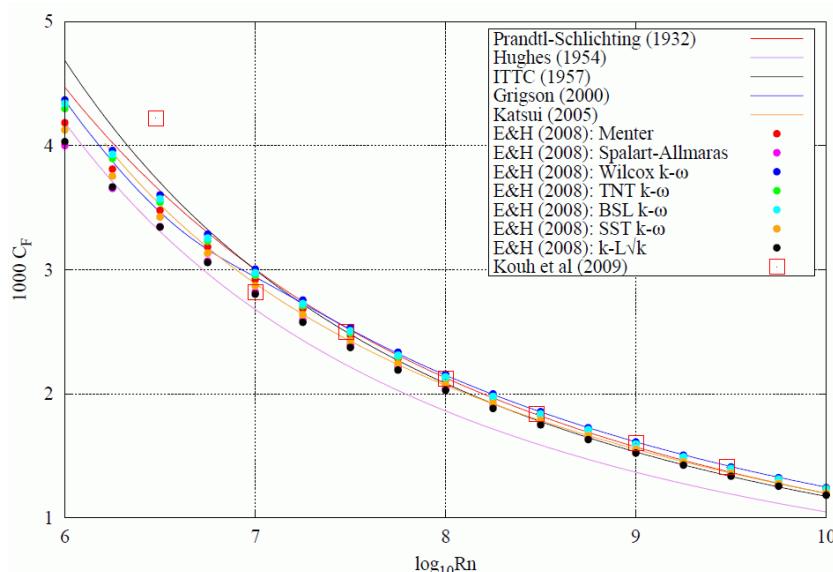


Abb. 15: Ermittlung des Reibungskoeffizienten [19]

⁷ International Towing Tank Conference, weltweiter Zusammenschluss von Organisationen zur Leistungsbestimmung von Schiffen und Schiffsanlagen

Mit der Reynolds-Zahl ⁸:

$$Re = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\eta} \quad (7)$$

Schließlich muss der Reibungskoeffizient noch mit einem Formfaktor ($1+K$) multipliziert werden, der dem Effekt des Profilwiderstands Rechnung trägt. Zur Vereinfachung hier faustformelmäßig (nach [20]) angegeben mit:

$$K \approx 19 \cdot \left(c_B \cdot \frac{B}{L} \right) \quad (8)$$

D. h. je breiter ein Rumpf im Vergleich zu seiner Länge ist, umso stärker bildet sich aufgrund von Strömungsabrisseffekten eine hecklastige Grenzschicht, in der der stets normal zur Außenfläche angreifende Wasserdruck geschwächt wird und der Gegendruck somit überwiegt (Abb. 16). Auch daher sind sowohl für die Bug- als auch für die Heckform schmale Spitzen sowie ein großes L/B-Verhältnis zu bevorzugen.

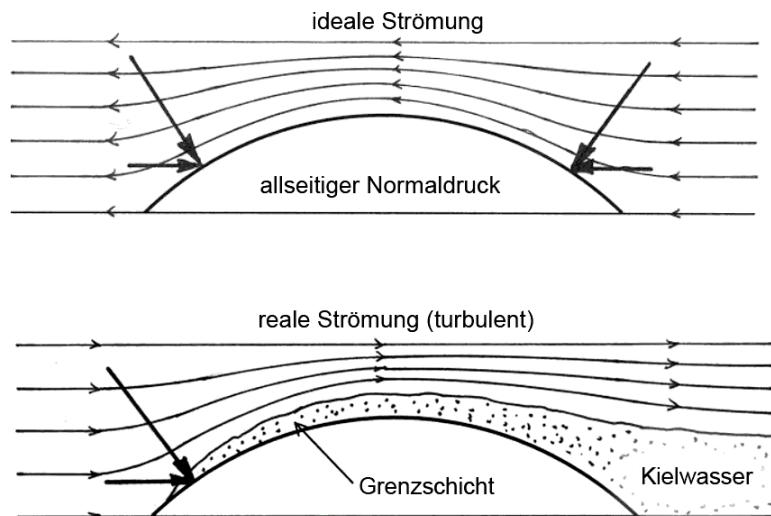


Abb. 16: Profilwiderstand durch Strömungsabriß (nach [20])

⁸ Osborne Reynolds (1842 - 1912), britischer Physiker

3.3.2 Wellenwiderstand

Ein Boot, das sich an der Wasseroberfläche bewegt, verursacht durch seine Verdrängungswirkung eine Ausweichströmung des Wassers. Die dabei entstehenden Druckunterschiede (Druckerhöhung an Bug und Heck, Druckminderung an den Seiten) äußern sich überwiegend als Oberflächenwellen. Jedes Objekt erzeugt sowohl divergente Diagonalwellen, die stets im gleichen Winkel von $19,5^\circ$ von ihm weg verlaufen, als auch transversale Wellen quer zur Bewegungsrichtung (Abb. 17 a). Die Energie, die das Boot beim Verdrängen des Wassers und Erzeugen dieser Wellen aufbringen muss, steht ihm nicht mehr für die Beschleunigung zur Verfügung und stellt den Wellenwiderstand R_w (wave resistance) dar. Im Gegensatz zum viskosen Widerstand ist er deutlich komplizierter und mangels Theorien nur über Modellversuche genauer zu ermitteln [21]. Er hängt von viel mehr Rumpfparametern und anderen Faktoren ab (z. B. Querschnitt, Mittelpunkt des Auftriebs, Winkel der Rumpfenden etc.), deren genaue Aufschlüsselung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Eine gute Methode der Abschätzung zu finden, ist also essentiell, da er einen großen Einfluss auf den Gesamtwiderstand hat.

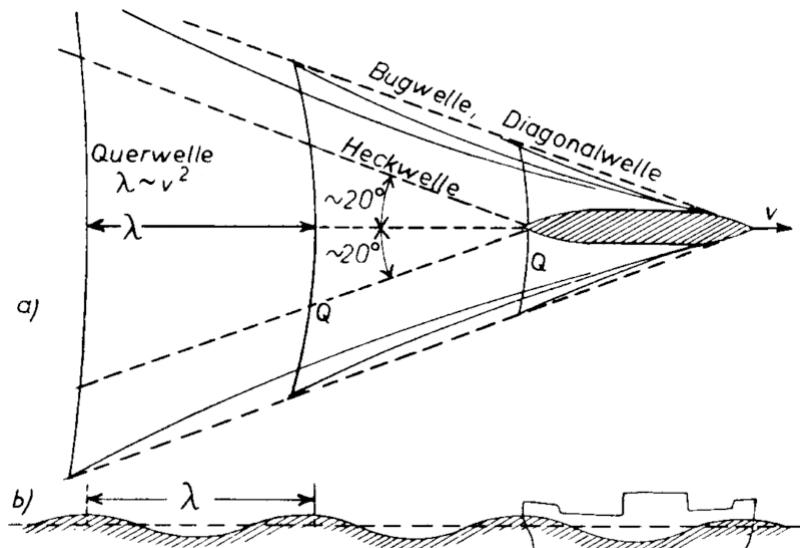


Abb. 17: Wellenmuster eines fahrenden Bootes (a) Draufsicht (b) Seitenansicht [22]

Auch hier leistete William Froude Pionierarbeit und erkannte einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit eines Schiffes und der Wellenausbreitung, die von ihm ausgeht. Er stellte fest, dass die Transversalwellen hauptsächlich zum Widerstand beitragen und deren Wellenlänge mit der Fahrgeschwindigkeit zunimmt. Demzufolge gibt es eine kritische Geschwindigkeit, bei der die Wellenlänge die des Schiffes erreicht, sich also zwei benachbarte Wellenberge genau an Bug und Heck des Schiffes befinden und Bug- mit Heckwelle überlagert (vgl. Abb. 17 b). Diese fiktive Größe wird Rumpfgeschwindigkeit v_H (hull speed) genannt und kennzeichnet das Maximum, bei dem ein Bootskörper noch in der reinen Verdrängerfahrt operiert. Herzuleiten ist sie über die Gleichung zur Berechnung der Phasengeschwindigkeit einer allgemeinen Welle:

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}} \quad (9)$$

Nach Gleichsetzen von λ mit der Länge L (Wasserlinie) und Ersetzen von c durch die gesuchte Geschwindigkeit v_H ergibt sich

$$v_H = Fr \cdot \sqrt{g \cdot L} \quad (10)$$

mit $Fr = 0,4$ als kennzeichnende Größe für das in diesem Fall herrschende, um die Gravitationskonstante erweiterte Verhältnis zwischen Länge und Geschwindigkeit des Bootes. Sie wird zu Ehren des Forschers Froude-Zahl genannt und in vielen Bereichen des Schiffswesens verwendet. Schiffe im Zustand der gleichen Froude-Zahl besitzen gleiche dynamische Eigenschaften, weswegen man für die Darstellung von Zusammenhängen oft diesen dimensionslosen Koeffizienten statt der Geschwindigkeit selbst heranzieht. Bei $Fr > 0,4$ würde sich das Heck in das nun unter ihm entstehende Wellental absenken und der Rumpf gegen den Wellenberg anfahren, was den Widerstand exponentiell erhöht. Das Boot ginge aus dem Verdrängen in das bei seiner Rumpfform ineffiziente und instabile Gleiten über. Davon ausgenommen sind explizit dafür konstruierte Gleiter, wie z. B. klassische Motorboote.

Allein mit Kenntnis der Bootslänge lässt sich also jede Rumpfgeschwindigkeit ermitteln. In metrischen Einheiten (m/s) formuliert:

$$v_H = 1,25 \cdot \sqrt{L} \quad (11)$$

Für den Versuchsträger erhält man $v_H = 2,5 \text{ m/s} = 9 \text{ km/h}$, was zur Plausibilisierung des Modells in Form eines oberen Grenzbereichs beitragen kann.

Aus in [23] erfolgten Messungen und Berechnungen mit Holzkajaks von ca. 4 bis 6 m Länge und ca. 50 - 70 cm Breite -also deutlich schlanker, doch dem Versuchsträger innerhalb der Recherche immer noch am ähnlichsten- geht der Verlauf des Wellenwiderstands mit zunehmender Geschwindigkeit ähnlich dem einer exponentiellen Funktion hervor (Abb. 18). Eine genauere Bildungsvorschrift ist bislang nicht bekannt. Die Rumpfgeschwindigkeiten betragen hier zwischen 4,8 und 5,8 kn. Der Wertebereich von 10 lb (Pfund) beträgt umgerechnet ca. 45 N⁹. Die im unteren Bereich von Abb. 18 hinzugefügten Widerstandswerte beziehen sich auf das längenmäßig am besten vergleichbare Modell "Storm SLT" mit $L = 4,25 \text{ m}$ (Gesamtlänge: 4,72 m) und $B = 0,5 \text{ m}$.

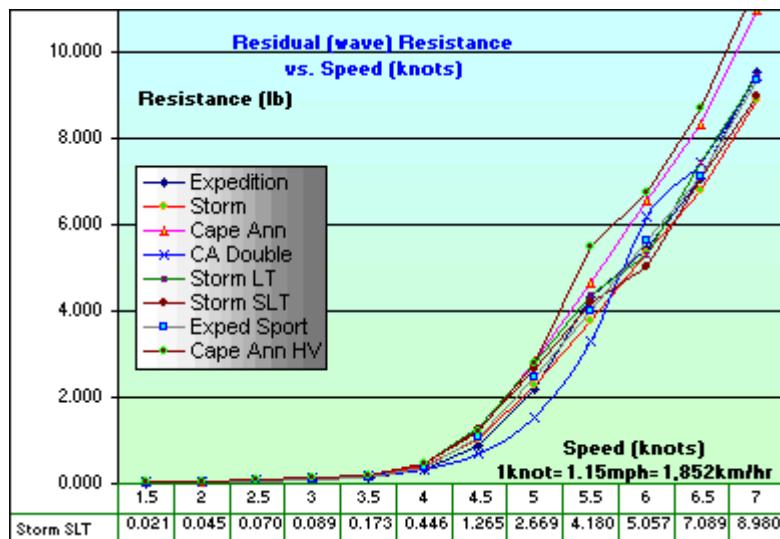


Abb. 18: Wellenwiderstandswerte von Holzkajaks [23]

⁹ 1 lb = 4,45 N

Es wurde nun angenommen, dass der Versuchsträger einer ähnlichen Entwicklung seines Wellenwiderstands unterliegt. Für das Modell wird eine statische Funktion (Kennlinie) benötigt, die diesen Verlauf nachstellt. Dazu wurden folgende Überlegungen getroffen:

1. Die Funktion muss exponentielles Verhalten aufweisen (vgl. e^x).
2. Sie muss im Koordinatenursprung beginnen (vgl. $x \cdot e^x$ oder $e^x - 1$).
3. Sie muss die Länge der Wasserlinie L als Parameter beinhalten.
4. Kleinere L müssen einen früheren Anstieg verursachen (vgl. $e^{x/L}$).
5. Oberhalb von v_H muss der Anstieg spürbar größer werden (vgl. $e^{x/v_H(L)}$).
6. Die Größenordnung des Wertebereichs muss der aus Abb. 18 entsprechen.

Zunächst wurden die von Abb. 18 abgelesenen Datenpunkte im metrischen System in das Programm "Microsoft Excel" übertragen und eine Regressionskurve erstellt (Abb. 19 oben). Daraus ergab sich eine kubische Funktion mit negativem Wertebereich, die händisch zu einer etwa deckungsgleichen Exponentialfunktion gewandelt wurde (Abb. 19 unten). Gemäß der Überlegungen 2. - 5. wurde sie mit der Variablen (v) als zusätzlichem Faktor und der Rumpfgeschwindigkeit im Nenner des Exponenten sowie zwei weiteren Korrekturfaktoren versehen.

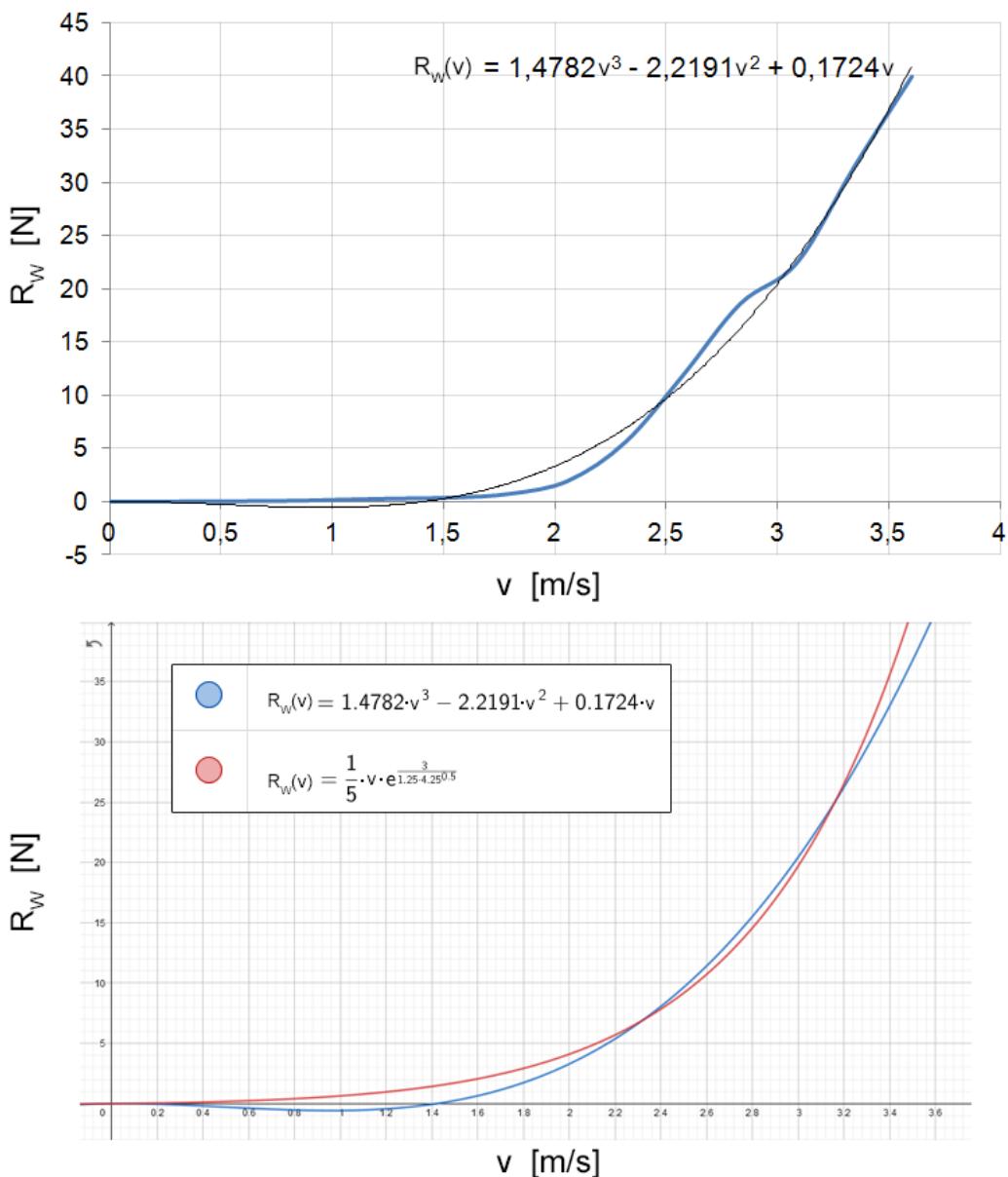


Abb. 19: Regression und Nachbildung der Kennlinie des Wellenwiderstands

Es ergab sich eine vorläufige Kennlinie der Form:

$$R_W = f(v) = \frac{1}{5} \cdot v \cdot e^{\left(\frac{3 \cdot v}{1,25 \cdot \sqrt{L}}\right)} \quad (12)$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit stellte sich nach dem Abgleich mit realen Messdaten heraus, dass die Kurve für "Grampus II" zu Beginn einen deutlich steileren Anstieg erhalten muss als ihn die Kurve von "Storm SLT" besitzt, d. h. der Wellenwiderstand wirkt sich am Versuchsträger bereits bei niedrigen Geschwindigkeiten stärker aus. Erklärbar ist dies anhand des prismatischen Koeffizienten c_P (auch Schärfegrad) des Bootsrumpfs. Ein hoher Schärfegrad verursacht einen hohen Verdrängungswiderstand. Er ist definiert als

$$c_P = \frac{V}{A_M \cdot L} \quad (13)$$

mit A_M als eingetauchte Hauptspantfläche (Querschnittsfläche unter dem Wasserspiegel), die nicht bekannt und nur schwer messbar ist.

Die o. g. miteinander verglichenen Kajaks haben zwar eine ähnliche Länge, doch verdrängt der Versuchsträger im Verhältnis zu seinem größten Querschnitt offensichtlich das größere Volumen. Das bedeutet schlicht, dass dessen Rumpfenden weniger spitz ausgeführt sind, weil es mittschiffs über einen längeren Bereich hinweg "bauchig" bleibt. Bemerkt man, dass "Grampus II" ein Zweier-Kajak ist und "Storm SLT" ein Einer, wird zügig klar, warum.

Nach den Anpassungen durch die Modellvalidierung konnte schließlich die (physikalisch natürlich nicht korrekte) Zuordnungsvorschrift

$$R_W(v) = 5 \cdot v \cdot e^{\left(\frac{v}{1,25 \cdot \sqrt{L}}\right)} \quad (14)$$

mit der Geschwindigkeit v in m/s, dem Wellenwiderstand R_W in N und der Länge der Wasserlinie L in m bestimmt werden.

Zum Vergleich mit Abb. 18 wurde ein Simulations-Plot in den gleichen nautischen Einheiten erstellt (Abb. 20). Bei der Rumpfgeschwindigkeit von ca. 4,5 kn hat das vollbesetzte "Grampus II" einen 4-fach höheren Wellenwiderstand.

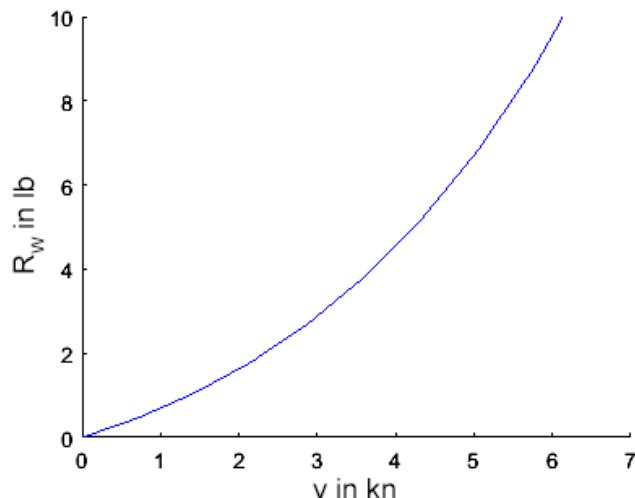


Abb. 20: Verlauf des modellierten Wellenwiderstands

Laut Theorie sollte der Verlauf der Widerstandskomponenten qualitativ Abb. 21 entsprechen. Der darin zu sehende lokale Einbruch des Wellenwiderstands, der eintritt wenn das Tal der Bugwelle den Wellenberg am Heck auslöscht ($Fr \approx 0,56$), wurde an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

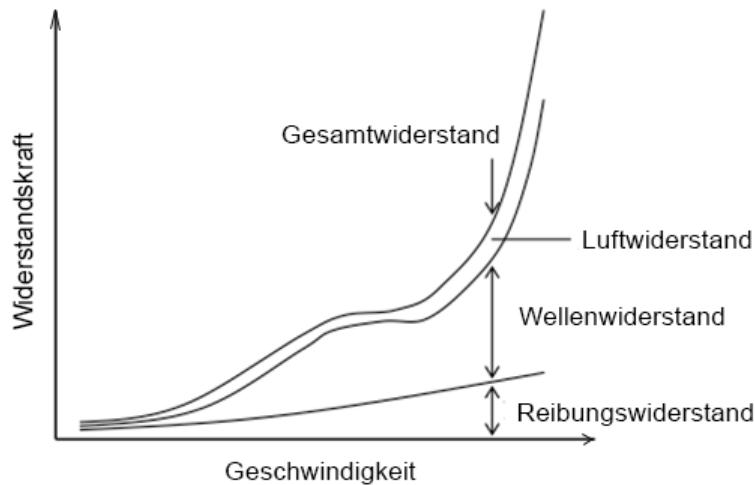


Abb. 21: Qualitativer Verlauf des Gesamtfahrwiderstands

In einem Validierungsansatz durch die grafische Vereinigung der Kurven des Gesamtwiderstands aus [23], den eigenen Simulationsdaten für "Grampus II" sowie den Ergebnissen einer automatischen Analyse durch das frei verfügbare Modellierungsprogramm "FREE!ship" entstand Abb. 22. Im Mittel ist der selbst errechnete Widerstand doppelt so hoch wie das Ergebnis der Software und drei mal so hoch wie die der "sportlicheren" Kajaks. Darunter soll in einer Collage (Abb. 23) verdeutlicht werden, in welchen Verhältnissen die Rumpfformen zueinander dimensioniert sind - mit angegebener Gesamtlänge, Gesamtbreite und dem halben Eintrittswinkel der Bugspitze. Zum Vergleich wurden ein Holzmodell und der blaue Versuchsträger "ineinander" gelegt (Mitte).

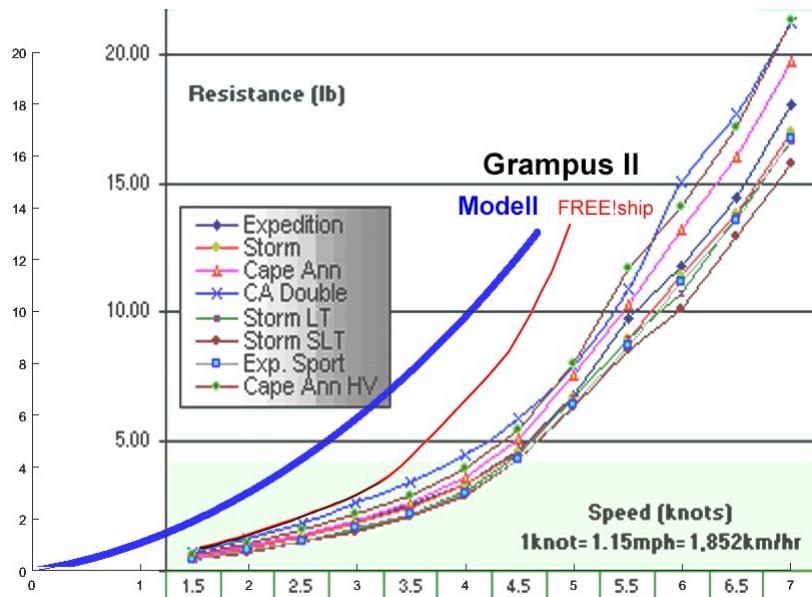


Abb. 22: Plausibilisierung des Gesamtwiderstandsverlaufs



Abb. 23: Vergleich der Rumpfformen (Fotomontage)

Alles in allem ist diese Methode wohl eher unkonventionell und beruht auf nur wenigen Vergleichsdaten. In Ermangelung an weiteren Referenzen und um umfangreiche Messungen der Rumpfgeometrie und/oder aufwendige Zugversuche im Wasser zu vermeiden, wurde sie jedoch als zweckdienlichste Variante erachtet, den Wellenwiderstand zumindest mit seiner Größenordnung und Abhängigkeit im Modell hinterlegen zu können.

3.4 Propellerantrieb

Das in dieser Arbeit komplexeste Teilsystem stellt wohl die Geometrie des Propellers und dessen Wechselbeziehung mit dem Wasser dar. Bei der Analyse des erzeugten Schubs muss aus den vielschichtigen Gesetzen der Physik ein endlich-dimensionales Modell entwickelt werden. Dazu existieren ganze Theorieklassen und innerhalb derer auch unterschiedliche Ansätze [7] [24]. Erste theoretische Methoden begannen sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu entwickeln. Ein frühes Werk war die Impulstheorie von Rankine, die von der Blattelement-Theorie Froudes dicht gefolgt wurde. Die moderneren Untersuchungen basieren wiederum auf den grundlegenden Arbeiten in der Aerodynamik (Wirbeltheorie) aus den frühen Jahren des letzten Jahrhunderts.

Für eine Integration in die Regelung sollen simplere Betrachtungsweisen genügen. Durch Rotation der geneigten Blätter generiert ein Propeller eine Schubkraft, die mit Zunahme seiner eigenen translatorischen Geschwindigkeit durch die zusätzliche Anströmung des Wassers abgeschwächt wird. Zunächst wurde daher sein theoretischer Standschub errechnet. Ein Ansatz, der hierfür herangezogen wurde, stützt sich auf der Definition der physikalischen Größe der Kraft, die eine bestimmte Masse mit einer bestimmten Beschleunigung vorantreibt ($F = m \cdot a$). In diesem Fall wird die Masse einer Menge Wasser aus dem Ruhezustand auf eine Austrittsgeschwindigkeit beschleunigt, die sich aus der Steigung p der Propellerblätter und deren Drehzahl ergibt. Die Steigung ist der virtuelle Weg, den die Blattspitze während einer Umdrehung aufgrund der Blattschräge in einem festen Medium zurücklegen würde (ähnlich einer Schraube, vgl. Abb. 24).

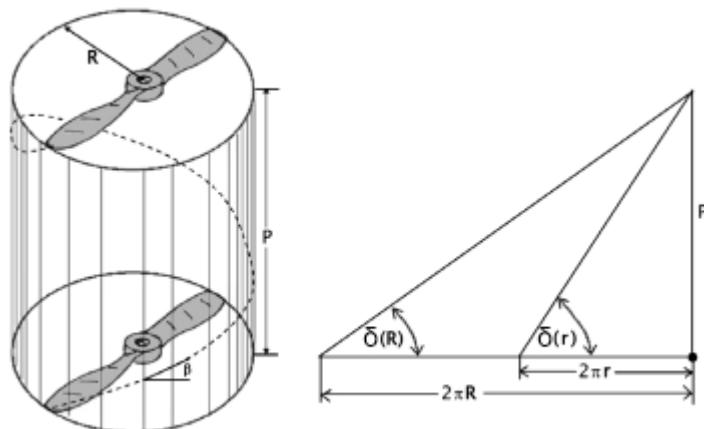


Abb. 24: Steigung eines Propellerblatts [15]

Die Wassermasse errechnet sich aus dem Volumen und das wiederum aus der antreibenden Grundfläche mal der Steigung. Dies mündet in der Formel:

$$F_{SS} = \rho \cdot A_E \cdot (p \cdot n)^2 \quad (15)$$

mit $p = \pi \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\delta \cdot \pi}{180^\circ}\right) = 0,23 \text{ m}$ (16)

Der Steigungswinkel δ ist dabei ein Mittelwert der bei 70 % des Gesamtradius gemessen wird [25], die wirksame Fläche der Propellerblätter A_E ist ein Schätzwert, der als Anteil (2/10) an der Gesamtfläche ($A_0 = \pi \cdot D^2 / 4$) grafisch ermittelt wurde (Abb. 25).

Für den Standschub ergibt sich damit: $F_{SS} = 131 \text{ N}$

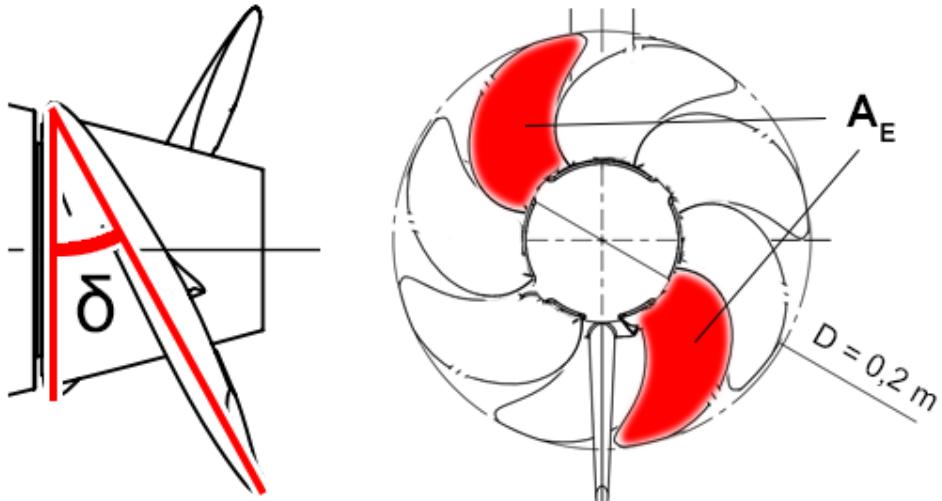


Abb. 25: Propellerblätter Steigungswinkel und wirksame Fläche (nach [26])

Die Abweichung von der Herstellerangabe (147 N, s. Tabelle 3) könnte vor allem mit der erwähnten speziellen Blattgeometrie zusammenhängen, deren wirksamer Steigungswinkel ein anderer, als der gemessene sein kann. Mit dem Einsatz eines (groben) Federkraftmessers wurden in einfachen Zugversuchen am realen Versuchsträger 120 N gemessen, womit die Größenordnung bestätigt werden kann.

Die Intensität, mit der dieser initiale Schub nun abfällt, hängt einerseits vom Fortschrittsgrad J ab. Er ist definiert mit:

$$J = \frac{v}{n \cdot D} \quad (17)$$

Das Formelzeichen v bezieht sich an dieser Stelle auf die Geschwindigkeit der Anströmung. Ein stehendes Gewässer vorausgesetzt, kann sie mit der des Bootes gleichgesetzt werden, anderenfalls müsste man sie gesondert messen, z. B. mit einem Staurohr oder Flügelrad.

Der andere Einfluss auf den Abfall wird durch die Charakteristik des Propellers selbst bestimmt. Hierfür existiert eine prominente Messreihe, die "Wageningen B-Serie" [27], die eine Sammlung von Kennlinien zahlreicher gängiger Propellerbauformen beinhaltet. Sie sind kategorisiert nach der Anzahl der Blätter, dem Flächenverhältnis und dem Verhältnis von Steigung zu Durchmesser.

Für den eingesetzten Propeller gilt: $A_E/A_0 = 0,2$ $p/D = 1,15$ Blattanzahl: 2

Die dazu passendste Kurvenschar aus der Messreihe ist in Abb. 26 dargestellt.

Anhand des Fortschrittsgrades lässt sich daraus ein Schubkoeffizient k_T ermitteln (linke Skala, abfallende Kennlinie). Da das Diagramm auf einem abweichenden Flächenverhältnis beruht, wurde k_T bei $J_0 = 0$ manuell aus dem Standschub berechnet:

$$k_{T0} = \frac{F_{SS}}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = 0,2 \quad (18)$$

Um eine vollständige Kennlinie zu erhalten, wird ein zweites Wertepaar benötigt. Den Berechnungen des Gesamtwiderstands in Kap. 3.3 ist zu entnehmen, dass der Antrieb bei der Höchstgeschwindigkeit von 8,5 km/h (2,36 m/s) insgesamt 60 N aufbringen muss um sie zu halten. Setzt man diese Werte in Gleichung (17) respektive (18) ein, erhält man:

$$J_1 = 0,59 \quad \text{und} \quad k_{T1} = 0,09$$

Die Kennlinie kann als Geradengleichung der Form $y=mx+n$ betrachtet und entsprechend aufgelöst werden:

$$k_T = 0,2 - 0,18 \cdot J \quad (19)$$

bzw.

$$F_S = \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \cdot (0,2 - 0,18 \cdot \frac{v}{n \cdot D}) \quad (20)$$

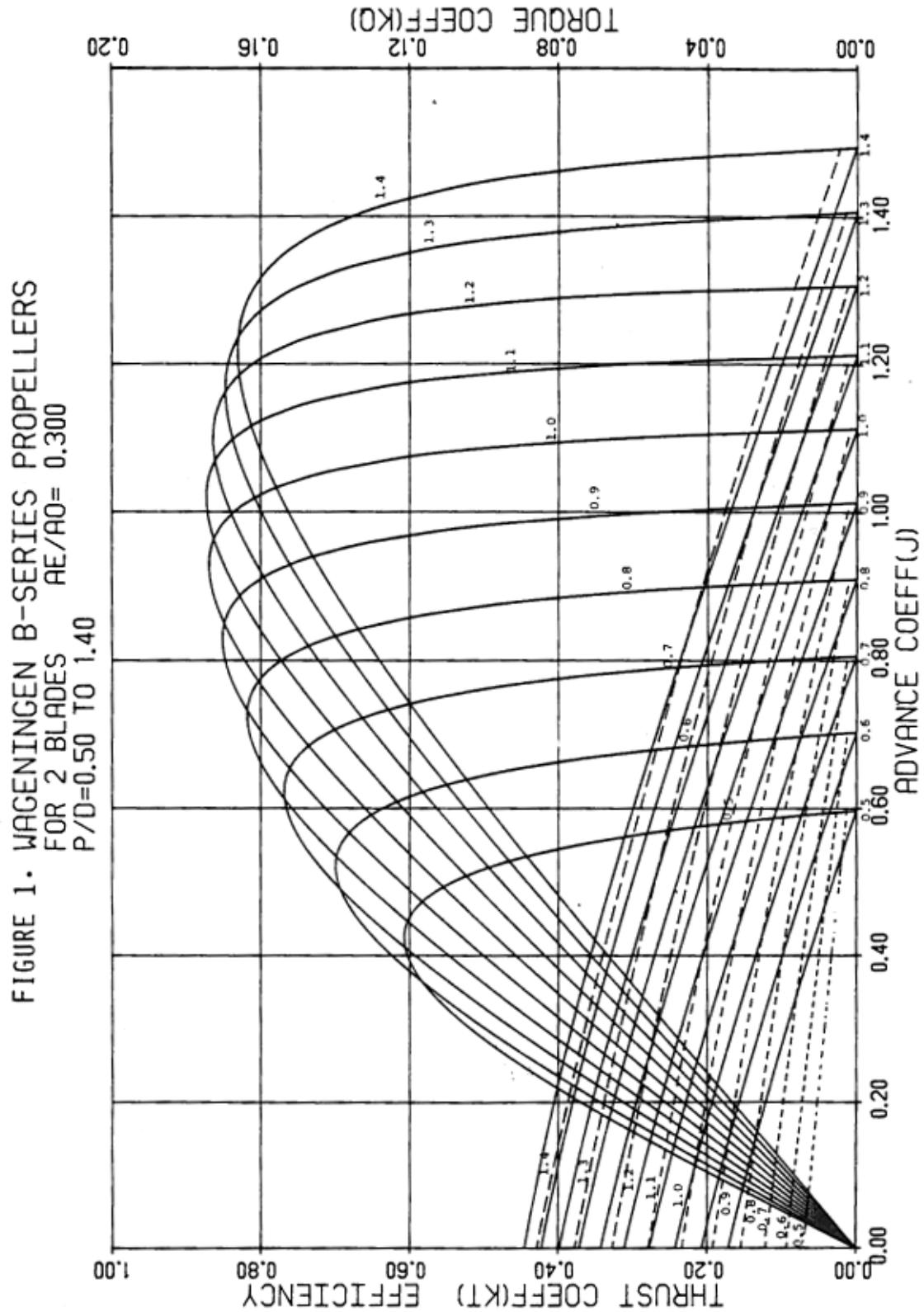


Abb. 26: Wageningen B-Serie (Auszug) [27]

4 Simulationsmodell

4.1 Modellbildung

Die Verwendung eines digitalen Simulationsmodells entwickelt sich für den Ingenieur zunehmend als unverzichtbares Werkzeug. Eine Simulation ist definiert als eine Vorgehensweise zur Analyse eines Systems, bei der Versuche an dessen Modell durchgeführt werden mit dem Ziel, die aus den Modellbeobachtungen gewonnenen Erkenntnisse auf das Verhalten des Systems zu übertragen. Für das Modell werden Annahmen auf Grundlage der Realität getroffen, die durch abgeleitete Algorithmen und Beziehungen beschrieben werden. Meist sind Simulationen dadurch schneller, kostengünstiger, ungefährlicher und im Prinzip beliebig oft wiederholbar im Vergleich zu Versuchen am realen System, welches möglicherweise (noch) nicht einmal existiert.

Im Kontext eines dynamischen Prozesses ist dieses Modell aus mathematischen Gleichungen und physikalischen Beziehungen aufgebaut. Eine genaue analytische Beschreibung stellt aufgrund der Komplexität der Vorgänge im Wasser eine große Herausforderung in der Modellierung dar, so dass auf akzeptierte Hypothesen und Beziehungen wie die lineare Approximation zurückgegriffen wird. In einem bestimmten (Arbeits-)Bereich sind hierbei vereinfachte, proportionale Zusammenhänge zulässig. Eine weitere Methodik ist die empirische Modellierung. Das Prinzip basiert auf Beobachtungen des Systemverhaltens, um die Eigenschaften des Modells daran anzupassen und wird hier als Ergänzung zum erstgenannten verwendet.

Man kann zwei Arten von Simulationen unterscheiden: diskrete oder kontinuierliche, je nachdem, ob sprunghafte Ereignisse oder ein stetiger Zeitverlauf vorliegen. Auch wenn das modellierte physikalische System dem Diktat der Zeit unterliegt, zieht die Anwendung einer Software genau betrachtet immer nur eine taktweise (digitale) Verarbeitung nach sich. Diesen Takt (step size, zeitlicher Abstand zwischen zwei Simulationsschritten) kann und sollte man sinnvoll einstellen. Dabei ist ein Kompromiss zwischen gewünschter Auflösung der Wertänderung und der dafür nötigen Rechenzeit zu wählen, hier: 0,01 s.

Das vorliegende Simulationsmodell wurde mit einem Softwarepaket des Unternehmens MathWorks erstellt, bestehend aus den Teilen MATLAB und dem darauf aufbauenden Simulink. Während MATLAB einer Programmiersprache gleicht, werden in Simulink grundlegende mathematische und informationstechnische Operatoren in grafischen Blöcken dargestellt, die über spezifische Ein- und Ausgänge zu einem Gesamtsystem miteinander verbunden werden. Diese Blöcke können zahlreiche vordefinierte und parametrierbare Funktionen beinhalten sowie auch auf Daten aus dem Arbeitsbereich (workspace) von MATLAB zugreifen, da hinter jedem Block im Grunde ein Algorithmus dieser Sprache steht.

Zur Verwaltung des Datenstands der Systemparameter wurde ein MATLAB-Skript angelegt (s. Daten-CD: "laengsdynamik\parameter.m"), welches bei der Ausführung alle Werte als Variablen in den Zwischenspeicher schreibt. Die Simulation in Simulink bezieht sich nur noch auf diese Variablen und lässt sich dadurch komfortabel, zentralisiert und widerspruchsfrei auf ein anderes System (z. B. größeres Boot) anwenden (Abb. 27).

Zur Einsicht in den simulierten Prozess und Darstellung bestimmter Variablen können Blöcke angebunden werden, die den zeitlichen Verlauf in Form von Diagrammen anzeigen. Die meisten der nachfolgenden Grafiken entstammen dieser Funktionalität.

```

% Modellparameter Längsdynamik
clearvars;
v0 = 0; % m/s                                ... Initialgeschwindigkeit
% Konstanten
g = 9.81; % m/s                             ... Erdbeschleunigung
rhoW = 998; % kg/m³                         ... Dichte, Süßwasser (20 °C)
nue = 0.001; % kg/(m*s)                      ... dynamische Viskosität, Süßwasser (20 °C)
rhoA = 1.2; % kg/m³                          ... Dichte, Luft (20 °C, Tiefland)
cW = 0.8; %                                     ... Luftwiderstandsbeiwert (Mensch)
% Abmessungen Rumpf
L = 4; % m                                    ... Länge der Wasserlinie
B = 0.8; % m                                  ... Breite der Wasserlinie
T = 0.18; % m                                 ... Tiefgang
m = 250; % kg                                ... Gesamtmasse (inkl. Insassen)
A = 0.3; % m²                                 ... Querschnittsfläche, frontal (inkl. Insassen)
% Berechnungen Rumpf
V = m/rhoW; % m³                            ... verdrängtes Volumen
LBT = L*B*T; % m³                           ... umhüllender Quader
cB = V/LBT; %                                 ... Blockkoeffizient
K = 19*((cB*(B/L))^2); %                     ... Formfaktor
S1 = (V^(2/3))*(3.4+(L/(2*(V^(1/3))))); % ... benetzte Oberfläche (nach Froude)
S2 = L*((1.7*T)+(B*cB)); %                   ... benetzte Oberfläche (nach Denny-Mumford)
S = 0.5*(S1+S2); %                           ... benetzte Oberfläche (Mittelwert)
RA = 0.5*rhoA*cW*A; %                        ... Luftwiderstand (rechn. Faktor)
% Abmessungen Propeller
D = 0.2; % m                                 ... Außendurchmesser Propeller
AE = 0.006; % m²                            ... wirksame Gesamtfläche der Rotorblätter
% Leistungsangaben Propeller
PS = 400*0.9; % W (N*m/s)                  ... Wellenleistung (maximal, Eingang * Wirkungsgrad)
n = 1200/60; % 1/s                           ... Drehzahl (maximal)
% Berechnungen Propeller
A0 = (pi/4)*(D^2); % m²                     ... Kreisfläche Propeller
TS = (2*rhoW*AE*(PS^2))^(1/3); % N        ... Standschub (maximal)
kT = TS/(rhoW*(n^2)*(D^4)); %                 ... Schubkoeffizient

```

Abb. 27: Deklaration der Modellparameter (MATLAB-Skript)

Gemäß Gleichung (1) aus Kap. 3 umfasst das zu simulierende System die Entstehung und Bilanzierung aller auf das Kajak einwirkenden, (auch negativ) beschleunigenden Kräfte. An dessen Signalausgang soll die interessierende Geschwindigkeit anliegen (Abb. 28).

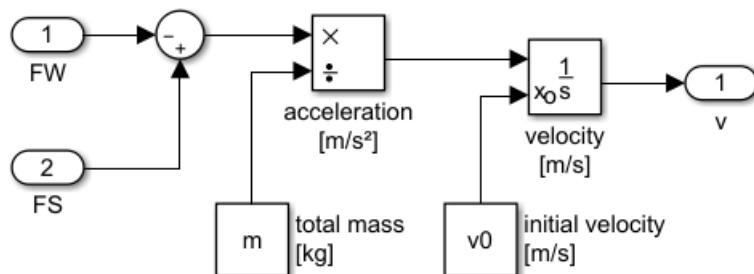


Abb. 28: Modellierung: Bewegungsgleichung

Die Gesamtwiderstandskraft F_w setzt sich aus dem Reibungswiderstand und dem Wellenwiderstand zusammen ($F_w = R_F + R_W$).

Nach den Gleichungen (5) bis (8) wurde der Reibungswiderstand wie in der folgenden Abb. 29 modelliert.

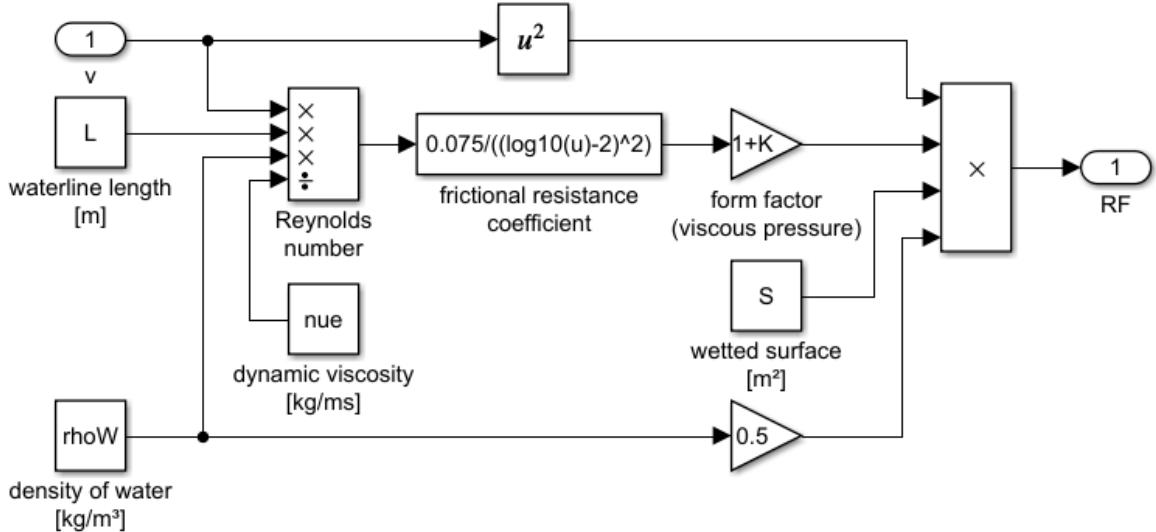


Abb. 29: Modellierung: Reibungswiderstand

Die für den Wellenwiderstand ermittelte Gleichung (14) wurde als Übertragungsfunktion in das Modell eingebracht (Abb. 30). Wie auch beim Reibungswiderstand ist für die Simulation zu beachten, dass die Geschwindigkeit betragsmäßig, also nicht-negativ eingehen muss, da die Widerstände in der Realität in beiden Richtungen wirken.

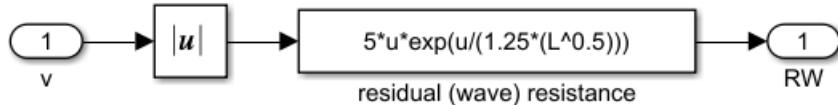


Abb. 30: Modellierung: Wellenwiderstand

Das Anlaufverhalten des Propellermotors wurde zunächst auf der Grundlage von optischen und akustischen Beobachtungen abgeschätzt. Seine maximale Drehzahl hat er aus der Ruhelage nach etwa 2 Sekunden erreicht. Auch wenn es sich um einen BLDC-Motor handelt, dessen Winkelbeschleunigung von einer integrierten Stromregelung bestimmt wird, soll zur Modellierung der Ansatz für die klassische (ungeregelte) Gleichstrommaschine herangezogen werden. Die auf diese Weise dem Modell hinzugefügte Verzögerung ist nicht exakt, doch in jedem Falle um ein Vielfaches kleiner, als die der Bootsträgheit und beeinflusst das Verhalten des Gesamtsystems damit nicht maßgeblich.

Die verwendete Methode folgt der Betrachtung der über die Motorkonstante k gekoppelten elektrischen und mechanischen Beziehungen der GSM [28]:

$$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + k \cdot \omega \quad \text{und} \quad J \cdot \dot{\omega} = k \cdot i - D \cdot \omega \quad (21)$$

mit dem ohmschen Widerstandsanteil R , der Induktivität L , dem Trägheitsmoment J und dem Reibungskoeffizienten D sowie den Prozessgrößen Spannung u , Stromstärke i und Winkelgeschwindigkeit ω .

Das Ergebnis der Kopplung ist eine Differentialgleichung zweiten Grades:

$$u = \frac{L \cdot J}{k} \cdot \ddot{\omega} + \frac{R \cdot J + L \cdot D}{k} \cdot \dot{\omega} + \left(k + \frac{R \cdot D}{k} \right) \cdot \omega \quad (22)$$

Sie kann mit

$$u = a \cdot \ddot{\omega} + b \cdot \dot{\omega} + c \cdot \omega \quad (23)$$

als PT_2 -Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{c}}{1 + \frac{b}{c} \cdot s + \frac{a}{c} \cdot s^2} \quad (24)$$

formuliert werden. Geht man nun davon aus, dass die Position des Schubhebels im realen System die (geregelte) Drehzahl des Propellers vorgibt, so nimmt sie unter der oben gemachten Annahme den Platz der Spannung ein und man erhält einen Übertragungsblock zwischen der Stellgröße t ("throttle", Hebelstellung zwischen 0 und 1) und eben dem daraus folgenden Drehzahlverlauf (Abb. 31).

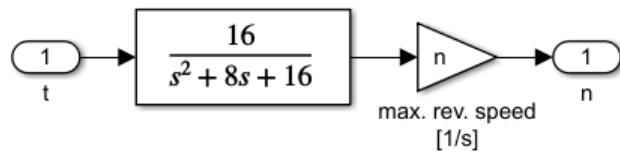


Abb. 31: Modellierung: Propellerdrehzahl

Die genaue Parametrierung des PT_2 -Glieds ist nur in dem Maße von Bedeutung, als dass der Endwert nach 2 s erreicht und der (nicht schwingende) aperiodische Grenzfall durch zwei gleiche Zeitkonstanten T sowie eine Verstärkung $K = 1$ sichergestellt sein muss:

$$G(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T \cdot s + 1} \quad (25)$$

Durch iteratives Annähern an den gewünschten Kurvenverlauf (Abb. 32) ergaben sich die Werte aus Abb. 31 bzw. die Zeitkonstante(n) $T_1 = T_2 = T = 1/4$ s

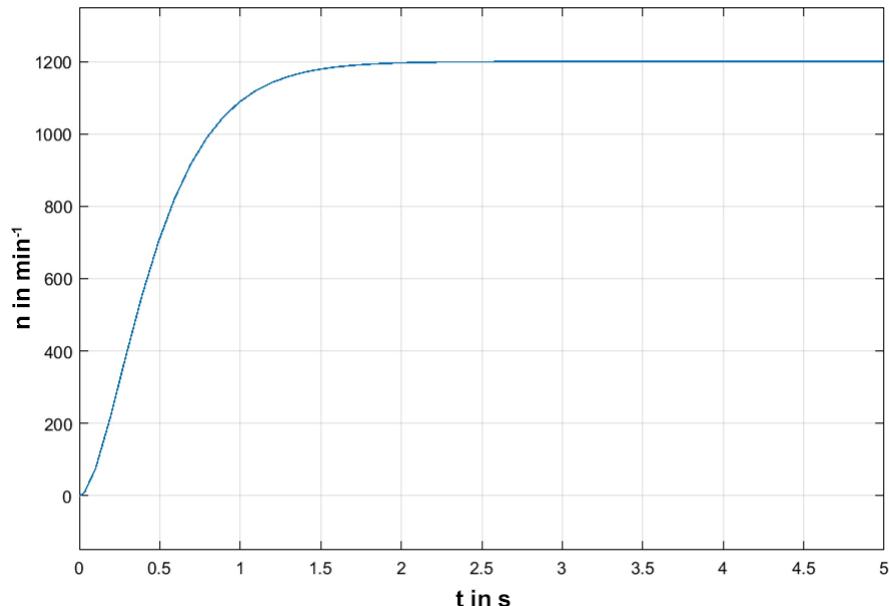


Abb. 32: Simuliertes Anlaufverhalten des Propellermotors

Schließlich konnte die Wirkung des Propellers durch die Verarbeitung des Schubkoeffizienten und den Forschrittsgrad als Variable in Form einer Bildungsvorschrift in das Blockmodell eingesetzt werden. Während letzterer aufgrund seiner Abhängigkeit von den Prozessgrößen faktorweise aufgebaut werden musste, konnte k_{T0} bereits im Skript der Parameter berechnet werden.

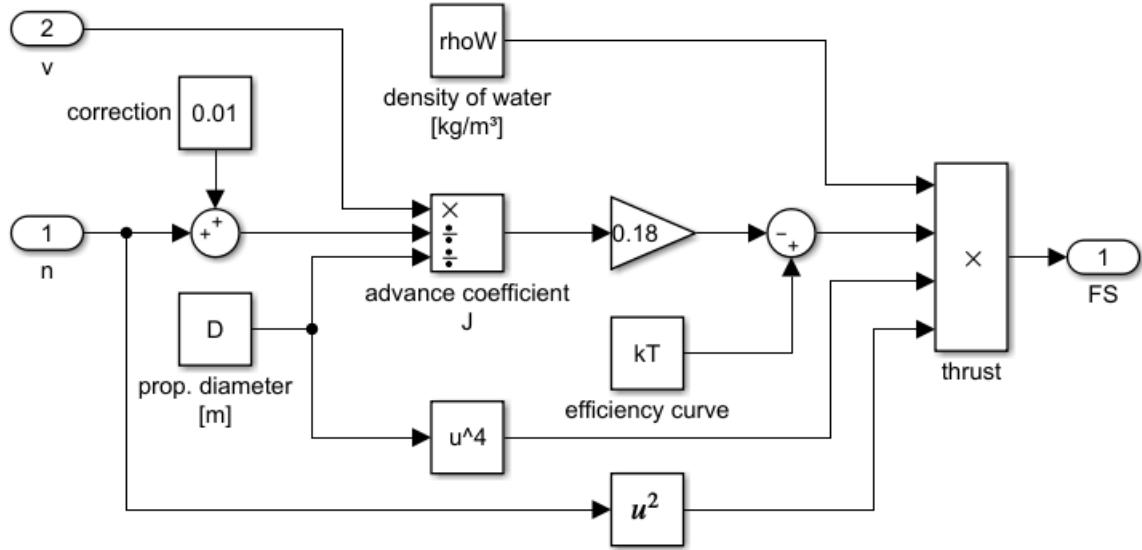


Abb. 33: Modellierung: Propeller

Damit bei Stillstand des Motors keine Division durch Null erfolgen muss, wurde der Drehzahl ein minimaler Hilfssummand hinzugefügt.

Zum Nachweis des vernachlässigbaren Einflusses ist eine Abschätzung und Einbindung der Luftwiderstandes durch Eigenfahrtwind vorgenommen und dem Gesamtwiderstand hinzugefügt worden. Die Berechnung des Faktors ($\rho/2 \cdot c_w \cdot A$) erfolgt bereits im Skript der Parametererfassung und muss hier lediglich mit der quadrierten Geschwindigkeit multipliziert werden. Für die projizierte Fläche A und den Beiwert c_w (Mensch) wurden Standardwerte angenommen bzw. geschätzt.

Zu guter Letzt wurde dem System mit Hinblick auf die Simulation des Regelkreises ein Signaleingang für die Störgröße spendiert, die als Kraftbetrag bzw. -verlauf in Newton anliegen muss.

Das zusammengesetzte Modell des Gesamtsystems ist in Abb. 34 dargestellt (s. Daten-CD: "\laengsdynamik\laengsdynamik.slx").

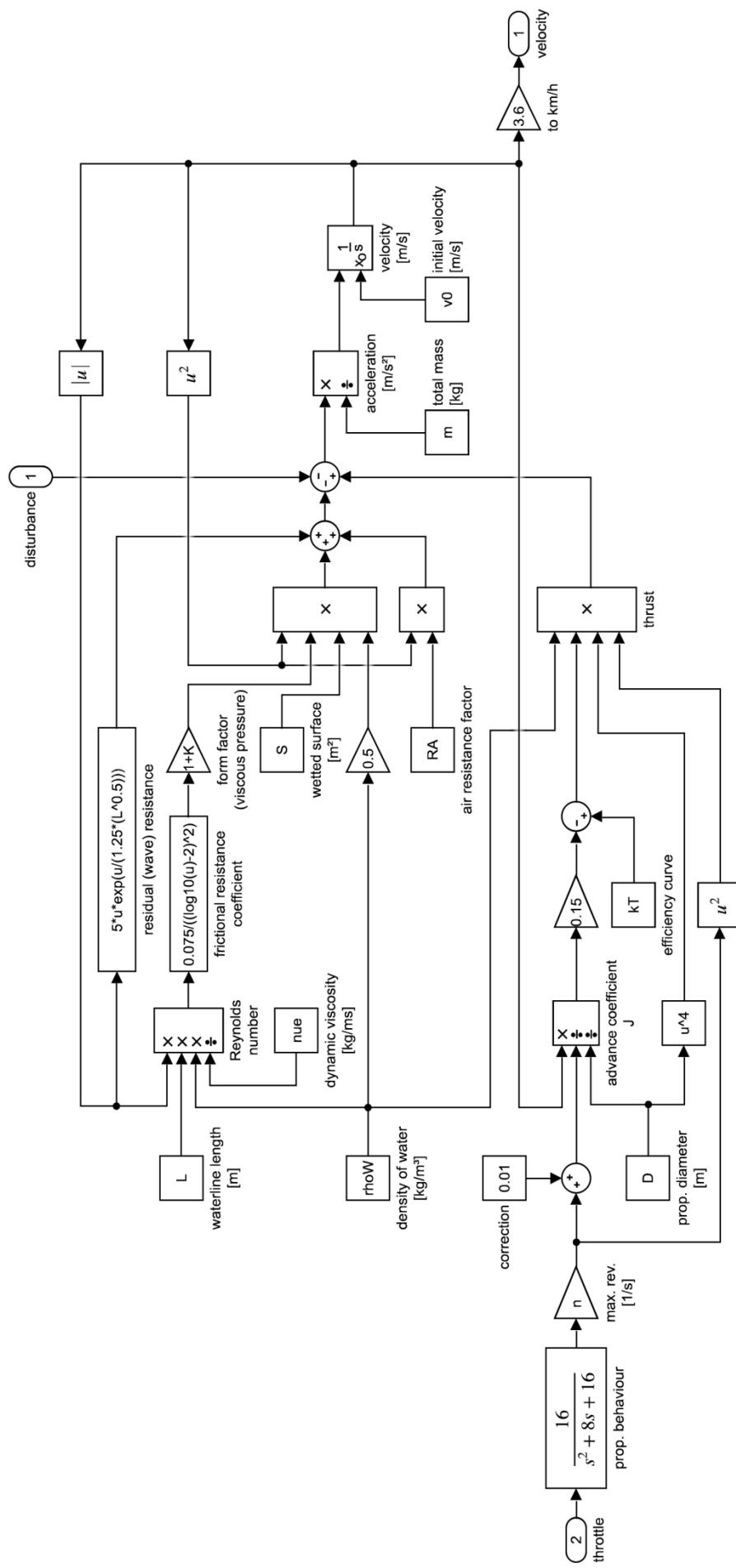


Abb. 34: Modellierung: Gesamtsystem Längsdynamik

4.2 Analyse und Plausibilisierung

Für die folgenden Darstellungen wurde das Stellsignal an den Motor zum Zeitpunkt $t = 0$ mit dem Maximalwert von 1, also einem Sprung beaufschlagt.

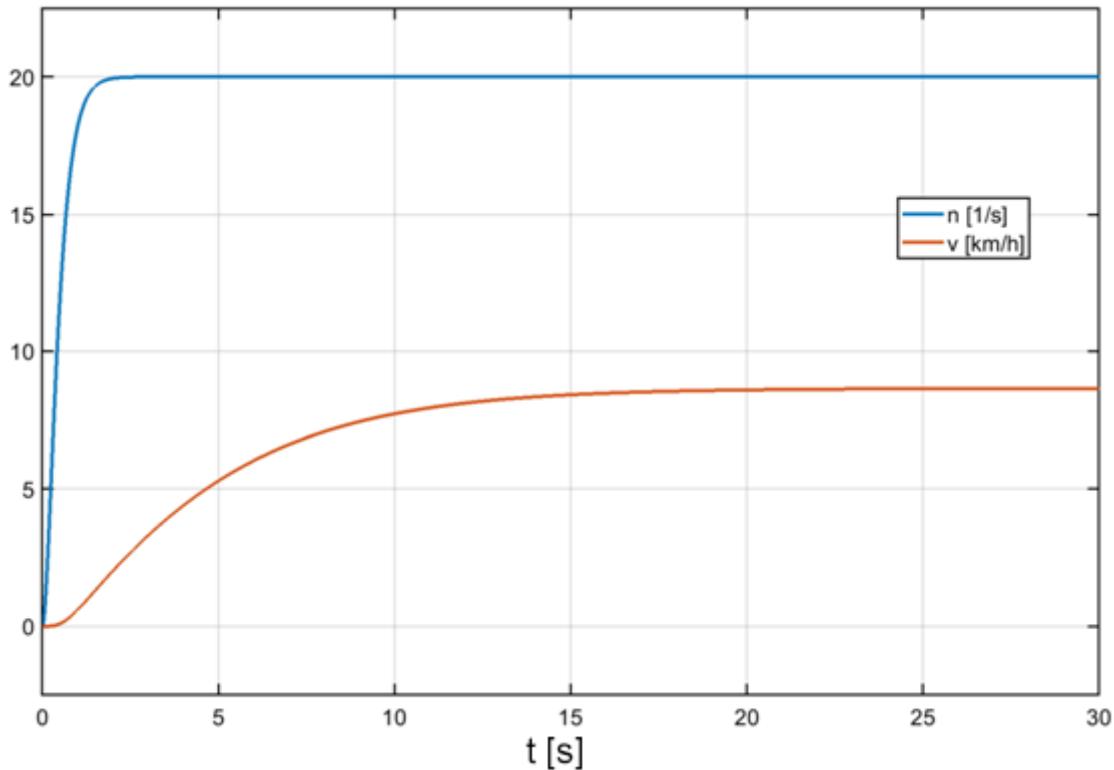


Abb. 35: Simulation: Motordrehzahl, Geschwindigkeit

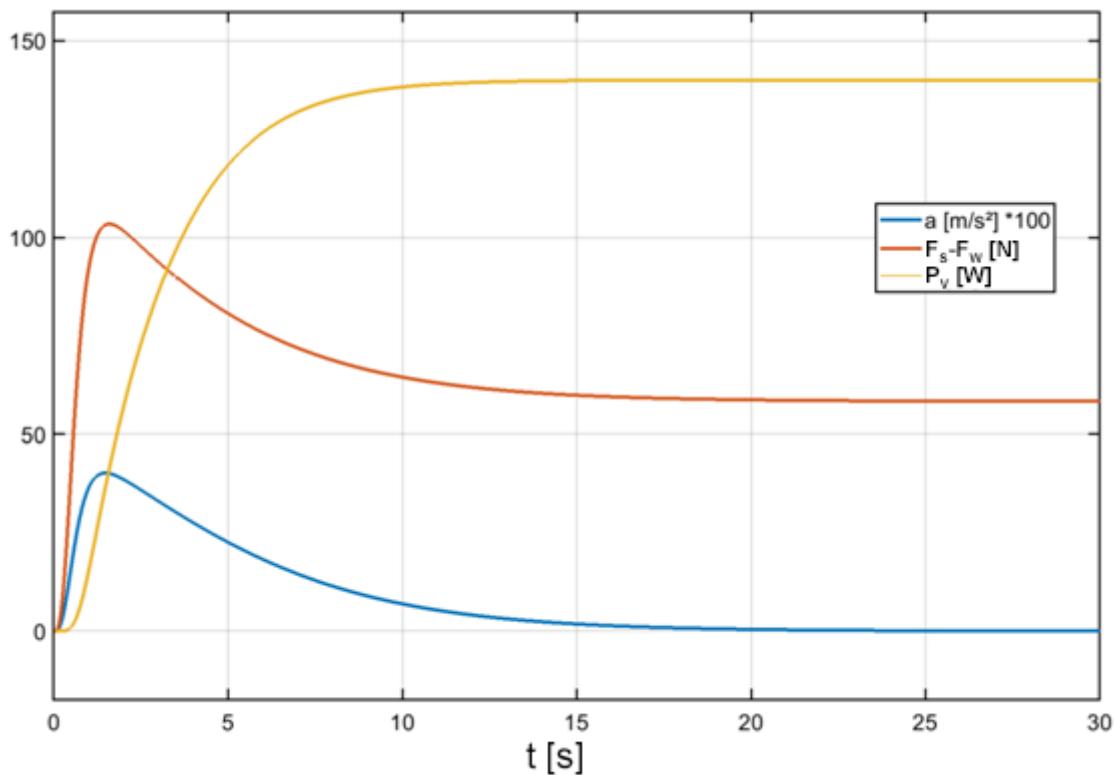


Abb. 36: Simulation: Antriebskraft, Antriebsleistung, Beschleunigung

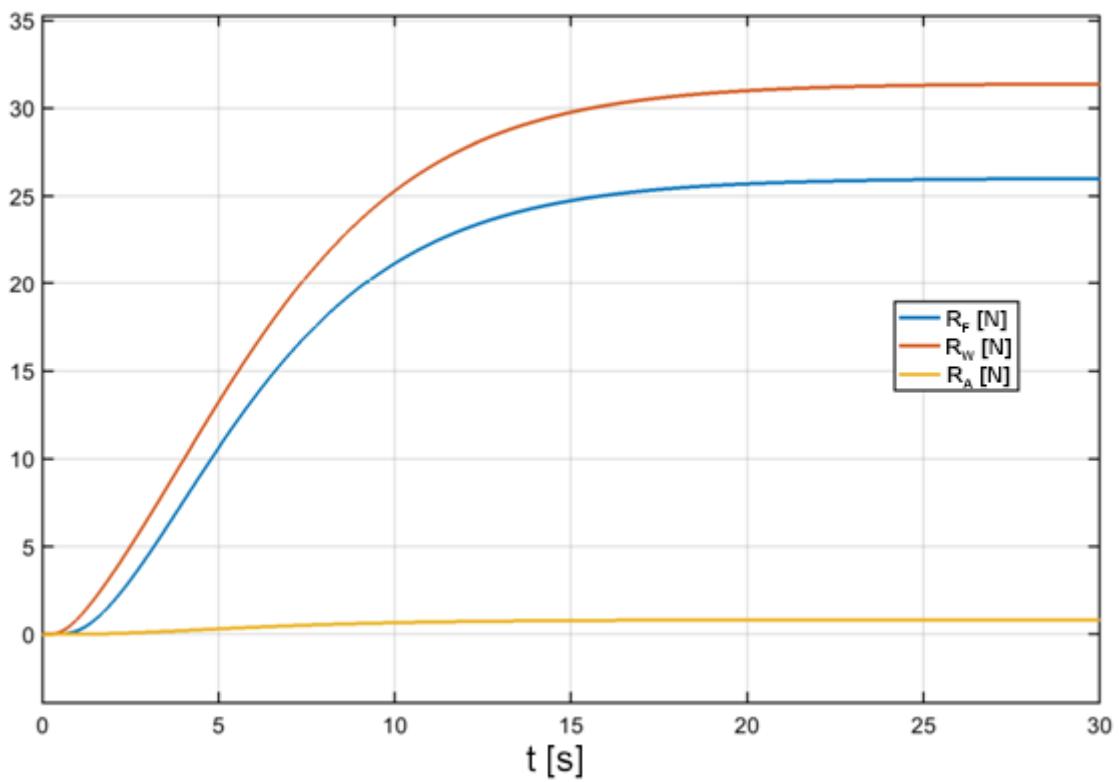


Abb. 37: Simulation: Reibungswiderstand, Wellenwiderstand, Luftwiderstand

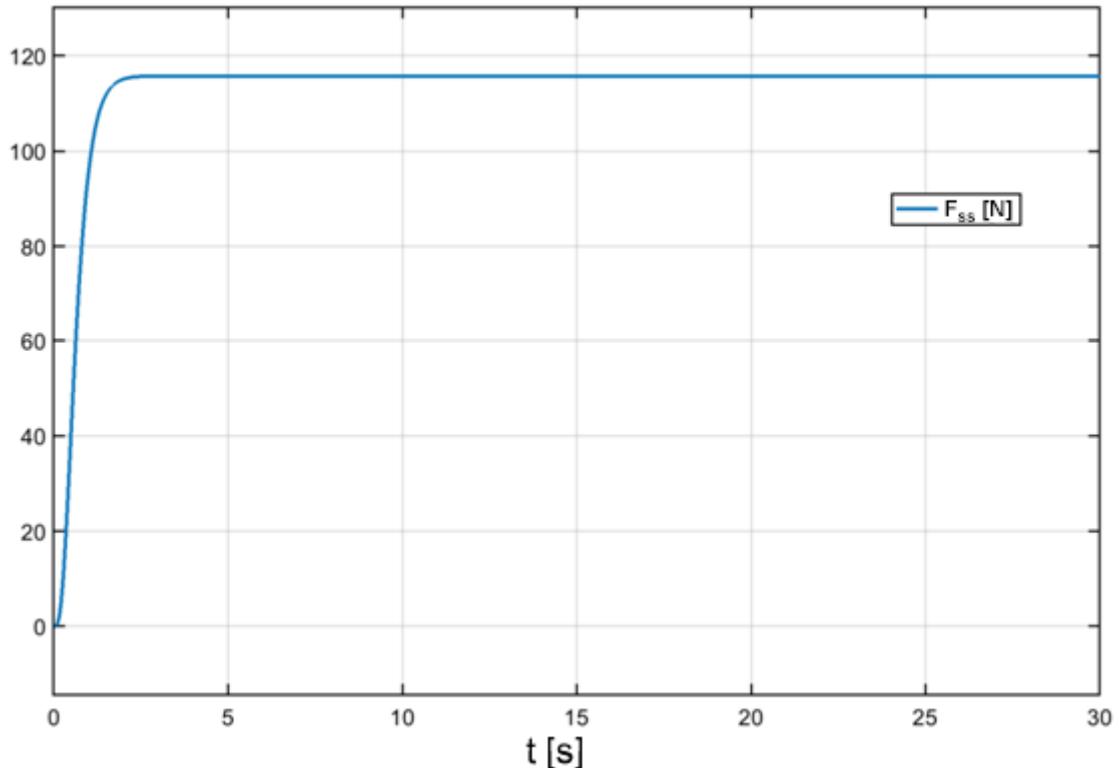


Abb. 38: Simulation: Standschub¹⁰

¹⁰ Zur Aufzeichnung des Standschubs wurde die Antriebskraft vom System getrennt.

Erste Erkenntnisse und Bewertungen sind aus den Kurvenverläufen ableitbar:

- Die Geschwindigkeit (Abb. 35) strebt einer Asymptote kurz unterhalb der Rumpfgeschwindigkeit von 9 km/h entgegen, was eine realistische Größenordnung darstellt.
- Beschleunigung und Antriebskraft (Abb. 36) erreichen ihren Maximalwert nach etwa 2 Sekunden und fallen danach deutlich ab. Zu diesem Zeitpunkt erreicht der Propeller seine maximale Drehzahl und ist gleichzeitig noch nicht der Anströmung ausgesetzt, die durch die Translation des Bootes im Wasser entsteht.
- Die werksseitig beworbene maximale Vortriebsleistung von 180 W kann nur zu etwa 80 % (140 W) erfüllt werden (Abb. 36).
- Ebenfalls 80 % der Werksangabe von 147 N betragen die 116 N des Standschubs (Abb. 38). Aufgrund der relativ groben Modellierung der Propellereffizienz und naturgemäß "aufgerundeter" Werte dieser Art in den Verkaufsprospekt, können die Abweichungen im Rahmen des Regelungsvorhabens toleriert werden.

Für die folgende Aufzeichnung der Widerstandskurven jenseits der Rumpfgeschwindigkeit in einem XY-Plot musste die Maximaldrehzahl virtuell verdoppelt werden. Im Laufe der Recherche konnte ein Diagramm gleicher Art ausfindig gemacht werden, welches dem Simulationsergebnis hinzugefügt wurde (Abb. 39). Die Beschreibung im Original dazu lautet: *"Die Widerstandskurve entstand bei Schleppversuchen, die ich unter der dankenswerten Mithilfe von Herrn Büsgen, einem bekannten deutschen Modellsegler, im Sommer '82 durchführte."* [29] Bei den Modellbooten handelt es sich um die sogenannte "M-Klasse" mit einer reglementierten Länge von 127 cm. Daher wurden beide Diagramme auf die Froude-Zahl normiert, der Wertebereich allerdings skaliert. Die Ähnlichkeit der Verläufe ist dennoch auffallend hoch.

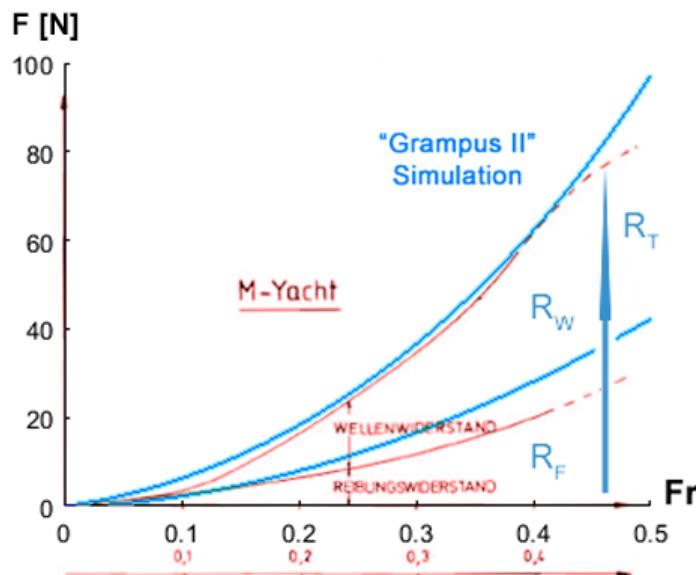


Abb. 39: Simulation und Vergleich der Widerstandskurven

Schließlich wurden projektbegleitend Messfahrten unternommen, bei denen das reale System mit vergleichbaren Signalsprüngen versehen wurde, d. h. "volle Fahrt voraus" zu Messbeginn in Abb. 40 und unmittelbare Schubrücknahme mit Auslauf in Abb. 41. Hier wird die Plausibilität des Modells am deutlichsten. Inklusive der in Kap. 2.2 bereits genannten Totzeit (1 s) liegen die Geschwindigkeitsverläufe von Modell (rot) und Realität (blau) fast schon identisch beieinander. Die größte Differenz beträgt 0,3 km/h.

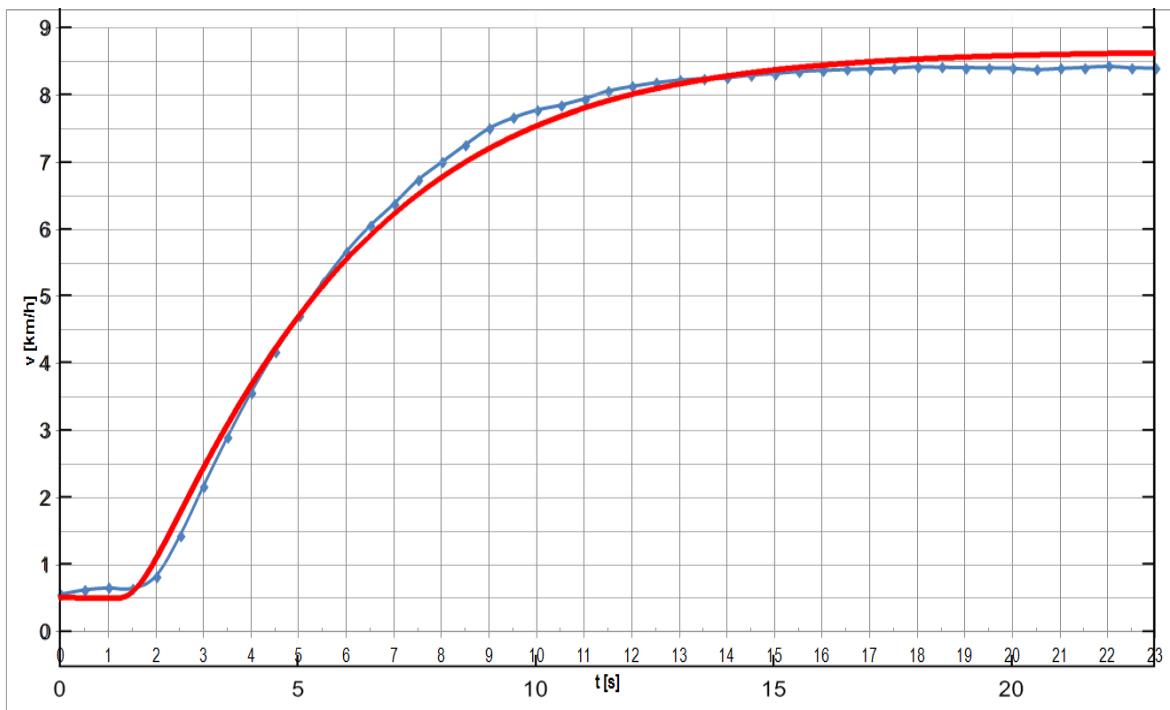


Abb. 40: Modellvalidierung positive Sprungantwort

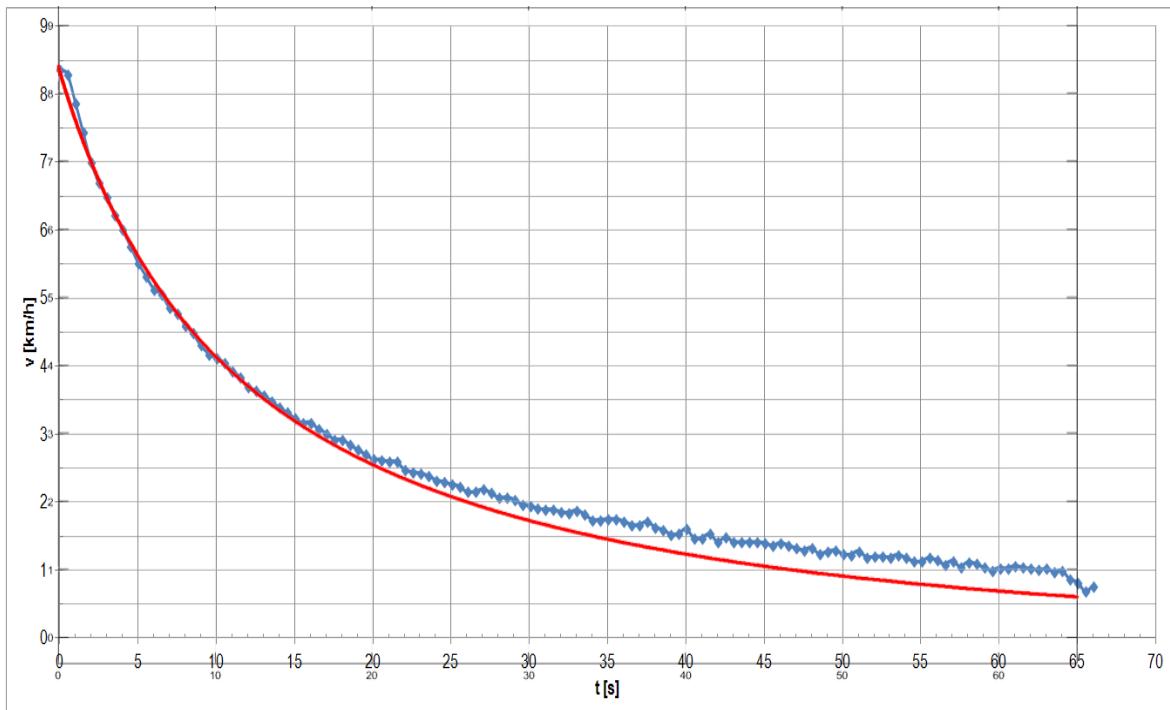


Abb. 41: Modellvalidierung negative Sprungantwort

Insbesondere beim Auslaufenlassen spielen die Strömungsverhältnisse des Gewässers natürlich keine unwe sentliche Rolle. Da die Messfahrt auf einem kleineren Kiessee stattfand, sollen sie an dieser Stelle aber nicht gesondert behandelt werden.

Im dargestellten Einsatzbereich bis 9 km/h wird das Modell somit als hinreichend genaue Grundlage zur Bestimmung der Regelstreckenparameter bewertet.

4.3 Charakterisierung der Regelstrecke

Die Sprungantwort aus Kap. 4.2 zeigt anschaulich, in welcher Weise die Regelgröße auf eine Stellgrößenänderung reagiert. Bei diesem System handelt es sich um eine Strecke mit Ausgleich, die bei jeder Stellgrößenänderung asymptotisch einem neuen stationären Endwert zustrebt. Für alle nachfolgenden Betrachtungen wird die situationsabhängige Totzeit vernachlässigt, da vorgesehen ist, sie operativ zu minimieren (s. Kap. 5.3).

Da der stationäre Endwert nach endlicher Zeit erreicht wird und sich während dieser Zeit auch die Änderungsgeschwindigkeit der Prozessgröße ändert, spricht man von einer Regelstrecke mit Energiespeicher(n). Jede Energieaufnahme oder -abgabe bzw. Zustandsänderung läuft zeitverzögert und stetig ab. Man unterscheidet solche Strecken nach der Anzahl ihrer wirksamen Verzögerungen und leitet davon ihre Ordnung ab. So enthält eine Strecke 2. Ordnung bspw. zwei Energiespeicher. Bestimmend für die Charakterisierung ist die größte dieser Verzögerungen. Aus dem Anstieg der Kennlinie ist abzuleiten, ob es sich um eine Strecke erster oder höherer Ordnung handelt (Abb. 42), entsprechend bezeichnet man das Verhalten als PT_1 bzw. PT_n – mit P als Verstärkung (Proportionalität) und T_1 bis T_n als Zeitkonstanten des Systems. Je größer eine Zeitkonstante ist, umso träger ändert sich die Regelgröße, umso flacher beginnt der Kurvenanstieg. Ein System mit mehreren Zeitkonstanten ist in entsprechend viele Teilsysteme einzelner Konstanten zerlegbar.

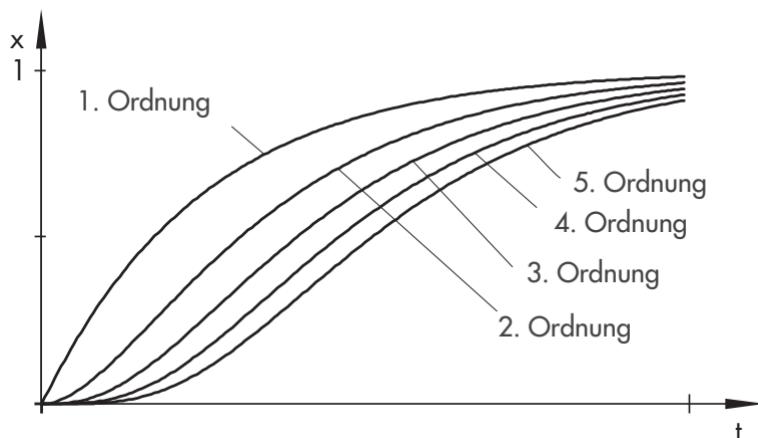


Abb. 42: Sprungantworten von Strecken mit Energiespeichern

Aus dem modellierten wie auch realen Kurvenverlauf der vorliegenden Strecke (Abb. 35 und Abb. 40) werden zwei relevante Verzögerungen ersichtlich – zum einen beim Hochlauf der Propellerdrehzahl und zum anderen natürlich bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit des Kajaks. Zwar wurde das Motor-Ansprechverhalten bereits als PT_2 modelliert (vgl. Abb. 31), dominiert hier jedoch mit Zeitkonstanten von $1/4$ s nicht das System. Die Sprungantwort der Regelgröße zeigt einen für Strecken höherer Ordnung charakteristischen Wendepunkt, der vom Maximum der Änderungsgeschwindigkeit gekennzeichnet wird und so auch ermittelbar ist. Zur Charakterisierung definiert man mit Hilfe der Tangenten in diesem Wendepunkt die Verzugszeit T_u und die Ausgleichszeit T_g (Abb. 43). Vom Verhältnis der beiden Größen hängt die Regelbarkeit ab [30]:

$$\frac{T_g}{T_u} < 3 \text{ schwierig, } 3 < \frac{T_g}{T_u} < 10 \text{ noch regelbar, } \frac{T_g}{T_u} > 10 \text{ gut zu regeln}$$

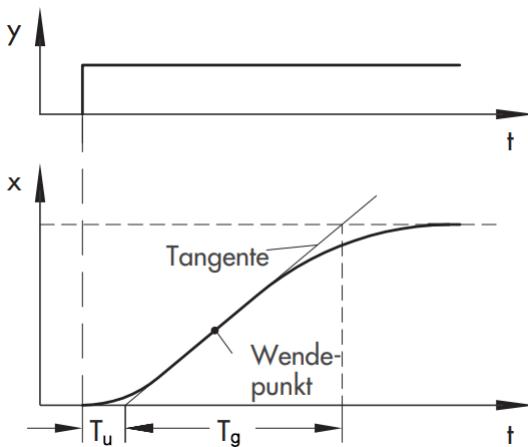


Abb. 43: Wendetangente, Verzugszeit und Ausgleichszeit

Anhand der Simulation wurde über die Kurve der Beschleunigung der Wendepunkt und der Anstieg der Tangente in diesem Punkt bestimmt. Mit der bekannten Geradengleichung ($y=mx+n$) konnte die Tangente dann hinzugefügt werden (Abb. 44). Ihre Schnittpunkte mit dem Initial- und Endwert wurden numerisch ermittelt:

$T_u \approx 0,6 \text{ s}$ $T_g \approx 6 \text{ s}$ $T_g/T_u \approx 10$ Die Strecke ist somit gut regelbar.

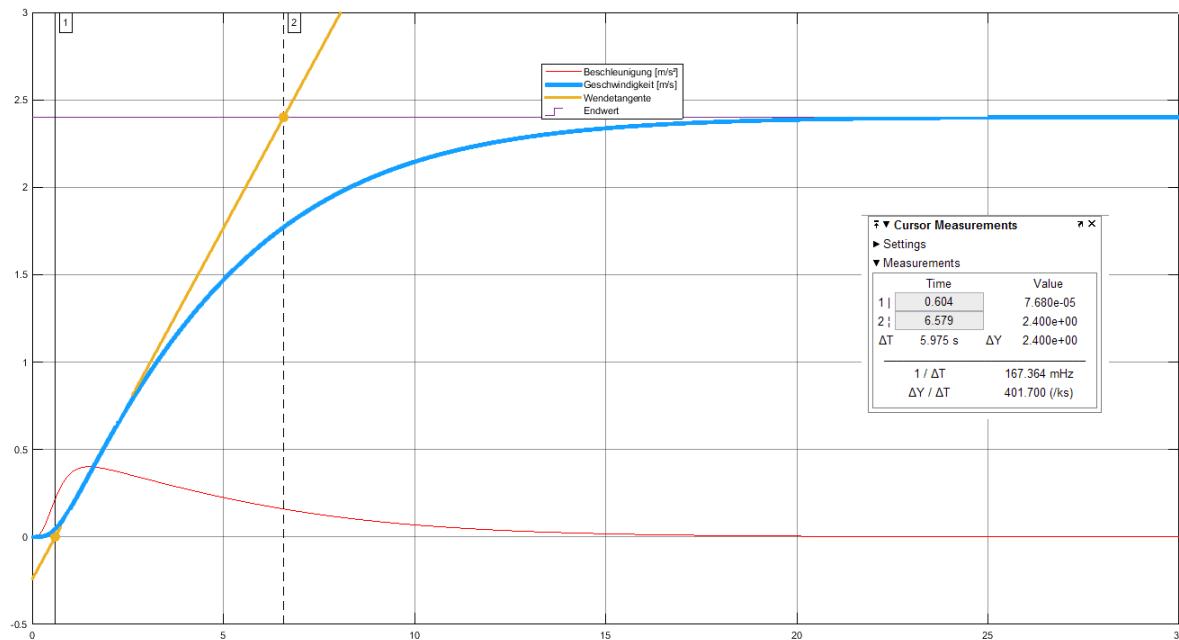


Abb. 44: Grafisch-numerische Ermittlung der Zeitkonstanten

Eine weitere wichtige Regelungstechnische Größe ist die Streckenverstärkung (oder Proportionalbeiwert) K_s . Sie sagt aus, in welchem Verhältnis sich die Regelgröße zur Stellgröße im stationären Zustand des Gleichgewichts ändert und kennzeichnet die Linearität des Systems. Dazu muss dieser Zustand über eine entsprechend lange Einschwingdauer hergestellt werden. Zur simulativen Ermittlung wurde die Stellgröße langsam und kontinuierlich rampenförmig hochgefahren und die Regelgröße darüber aufgezeichnet (Abb. 45). Für den Anstieg ergibt sich über einen weiten Stellbereich:

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{(8,6 - 2,1) \text{ km}}{(1 - 0,3)} = \frac{6,5 \text{ km}}{0,7} \approx 9,3 \text{ km/h} \quad (26)$$

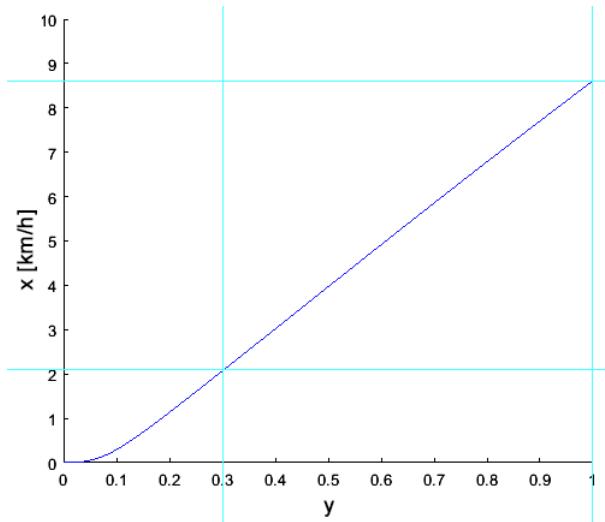


Abb. 45: Ermittlung des Proportionalbeiwerts

Im Bereich nahe des Koordinatenursprungs ist ein veränderlicher Anstieg der Kennlinie zu erkennen, der auf eine Nichtlinearität des Systems hinweist. Gemäß der Prämisse aus Kap. 4.1 sollen zunächst allerdings nur Arbeitspunkte im linearen Bereich betrachtet werden. Eine Diskussion des nichtlinearen Charakters erfolgt in Kap. 6.

4.4 Bestimmung und Optimierung des Reglers

Ein Regler hat die Aufgabe, die zu regelnde Strecke über ein Stellsignal so zu beeinflussen, dass die Regelgröße dem Wert der Führungsgröße entspricht. Er besteht aus einem Vergleichs- und einem Regelglied (Abb. 46). Das Vergleichsglied bildet aus der Differenz von Führungs- (w) und rückgeführter Regelgröße (x) die Regeldifferenz (e), während das Regelglied aus der Regeldifferenz (e) die Stellgröße (y) erzeugt. Im geschlossenen Regelkreis führt ein Sprung der Führungsgröße zunächst zu einem sprunghaften Anstieg der Regeldifferenz. Aufgrund des Regeleingriffes und der Rückführung wird die Regeldifferenz mit der Zeit verringert bis schließlich die Regelgröße -stabilem Regelverhalten vorausgesetzt- einen neuen stationären Zustand einnimmt.

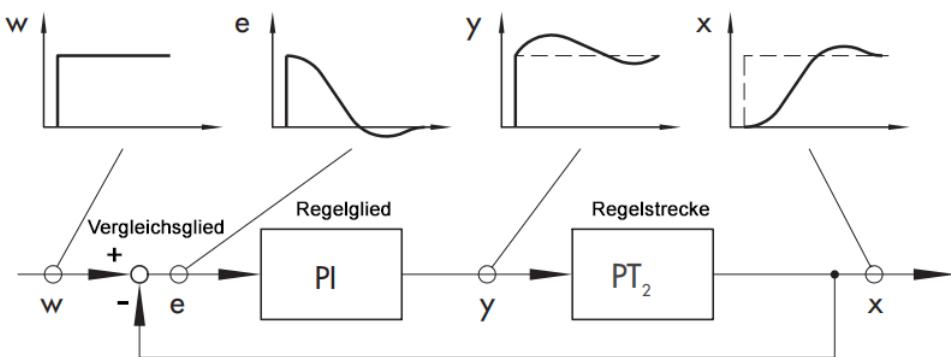


Abb. 46: Funktionsschema eines Regelkreises

Der Regler kann die Regeldifferenz entweder unmittelbar verstärken (P-Regler) oder sie über einen Zeitraum T_I aufintegrieren (I-Regler) bzw. über T_D differenzieren (D-Regler) und mit dem jeweiligen Resultat zusätzlich verstärken oder aber eine Kombination aller drei Funktionen realisieren (PI, PD, PID). Die Auswahl und Auslegung richtet sich nach der Analyse der Strecke sowie den Bedingungen der Anwendung.

In der Praxis kommen am häufigsten PI- und PID-Regler vor. Mit einem PI-Regler erreicht man ein moderates dynamisches Regelverhalten, ohne dass bleibende Abweichungen zwischen Ist- und Sollgröße auftreten. Mit ihm sind viele Regelungsaufgaben lösbar. Sind jedoch trotz großer Streckenverzögerungen möglichst kurze Stellzeiten erforderlich, ist ein PID-Regler zu wählen. Durch den D-Anteil erreicht man eine höhere Dynamik, geht bei unvorteilhafter Parametrierung allerdings auch ein höheres Risiko der Instabilität (Schwingvorgänge) ein. In Anbetracht des Vorzugs der Stabilität gegenüber einer stark überschwingenden, möglicherweise unkomfortablen Regelung wurde für den "Tempomaten" ein PI-Regler gewählt (Abb. 47). Seine Stellgröße berechnet sich aus:

$$y(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_n} \cdot \int e dt \quad \text{mit } \frac{K_p}{T_n} = \frac{1}{T_I} = K_{PI} \quad (27)$$

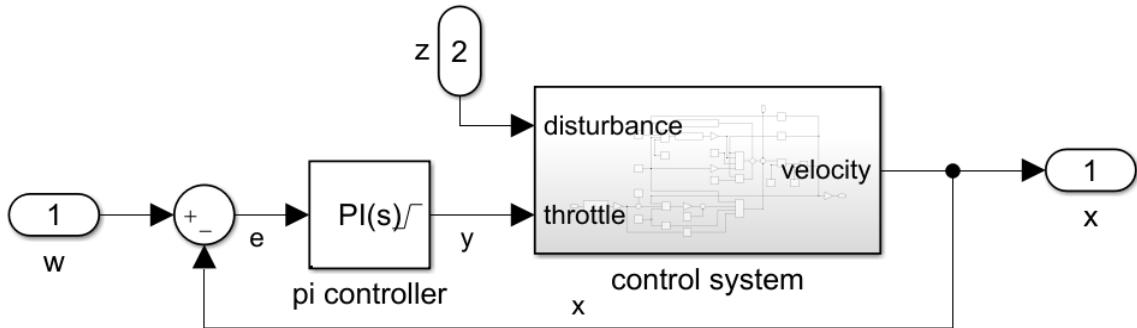


Abb. 47: Regelkreis mit Regelstrecke, PI-Regler und Störgröße

Eine passende Einstellung der Reglerparameter K_{PI} (Reglerverstärkung) bzw. K_p und T_n (Nachstellzeit) ist dabei der wichtigste Aspekt, da sie auf das Streckenverhalten abgestimmt sein müssen. Meist ist hierbei ein Kompromiss zu treffen zwischen einer sehr stabilen aber langsamen Regelung oder einem sehr dynamischen aber "unruhigeren" Systemverhalten, das unter Umständen zum Schwingen neigen kann.

Zur Ermittlung existieren verschiedene, oft faustformelmäßige Verfahren, die im Nachgang spezifisch auf das System abgestimmt werden sollten. Eine dieser Einstellregeln ist die Methode nach Chien, Hrones und Reswick (Tabelle 9). Auf Grundlage der Streckenparameter schlägt sie günstige Reglerwerte vor, die davon abhängen, wie hoch die Toleranz des Überschwingens ist sowie, ob die Priorität bei der Erreichung des Sollwerts oder der Störgrößenkompensation liegt.

Tabelle 9: Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick (für PI-Regler)

Regler		Aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20 % Überschwingen	
		Störung	Führung	Störung	Führung
PI	K_p	$0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,35 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,7 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$	$0,6 \cdot \frac{T_g}{T_u \cdot K_s}$
	T_n	$4 \cdot T_u$	$1,2 \cdot T_g$	$2,3 \cdot T_u$	$1 \cdot T_g$

Für K_p erhält man Werte zwischen 0,38 und 0,75.

Für T_n erhält man Werte von 2,4 und 7,2 bzw. 1,38 und 6.

Bei der eigentlichen Parametrierung ist darauf zu achten, ob T_n , T_I oder K_{PI} verlangt wird.

Im Simulink-Modell, das gemäß Abb. 47 um den Regelkreis erweitert wurde, ist eine Einstellung nach der Parallelstruktur des Reglers vorgesehen (Abb. 48):

$$Y(s) = E(s) \cdot (P + I \cdot \frac{1}{s}) \quad (28)$$

mit $P = K_p$ und $I = K_p/T_n$

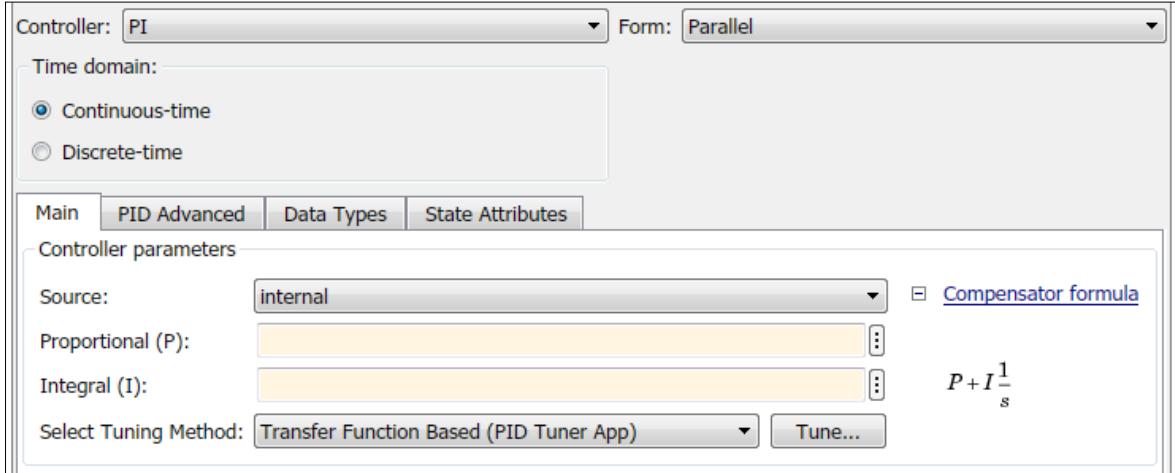


Abb. 48: Einstellen der Reglerparameter in Simulink

Als essentielle Randbedingung des in diesem Anwendungsfall einzusetzenden digitalen Reglers ist eine Stellgrößenbegrenzung einzurichten. Im Gegensatz zu seinem theoretischen Modell kann der echte Motor nicht über seine Maximaldrehzahl hinaus betrieben werden, was normiert einen Definitionsbereich von 0 bis 1 bedeutet (Abb. 49). Da außerhalb dessen auch der I-Anteil (Aufintegration der Regeldifferenz) nicht aktiv sein darf, ist "clamping" (Festsetzen des zuletzt berechneten Integrals) als Behandlungsmethode auszuwählen ("Anti-windup-method").



Abb. 49: Stellgrößenbegrenzung des Reglers

Man beginnt die Simulation des Regelverhaltens mit der stabilsten Kombination, d. h. mit dem kleinsten K_p und dem größten T_n (Abb. 50). Als Sollwert wurden 5 km/h eingestellt, was nach eigenen Messungen in etwa das Niveau durchschnittlichen "Freizeitpaddelns" repräsentiert. Nach 30 s Simulationszeit soll eine Störung von 50 N eintreten, was grob das spontane Schleppen eines zweiten mitfahrenden Kajaks darstellen könnte, welches sich nach 60 s wieder ausklinkt. Das Ergebnis wirkt wie zu erwarten sehr träge, die halbe Höchstgeschwindigkeit als Sollwert wird gerade noch nach 30 s erreicht.

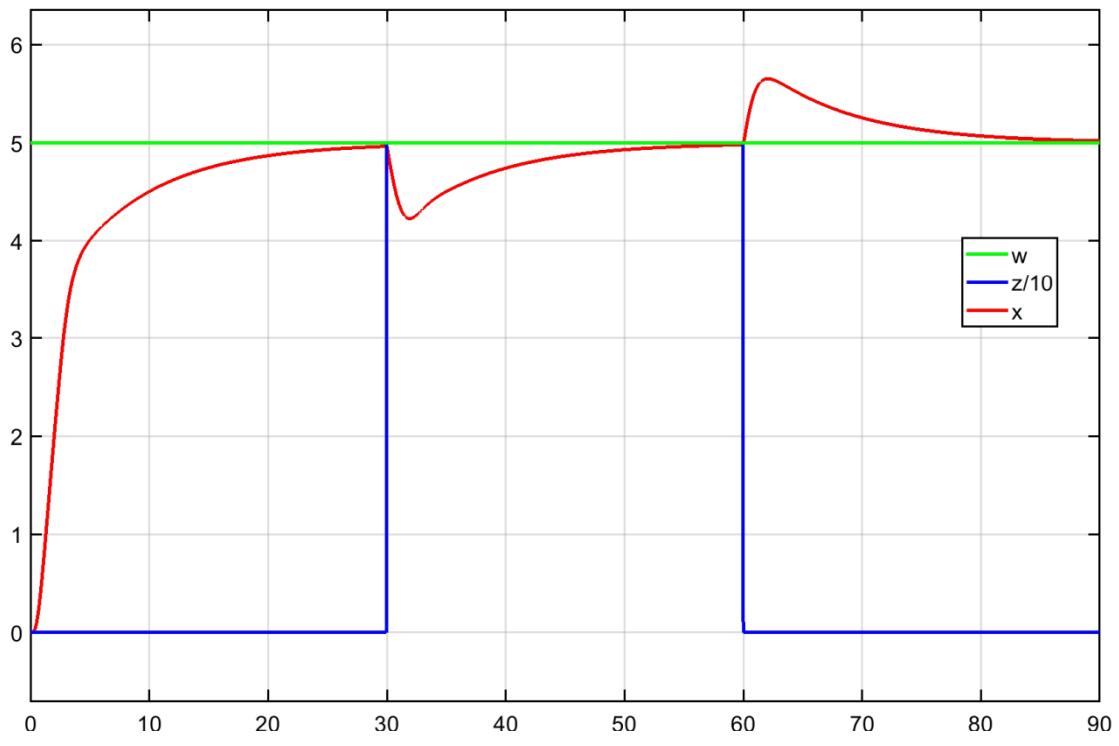


Abb. 50: Regelungssimulation $K_p=0,38$ / $T_n=7,2$

Im zweiten Schritt wurde die "aggressivste" Variante mit dem größten K_p und dem kleinsten T_n simuliert (Abb. 51). Sie regelt bereits erstaunlich gut, so dass nicht einmal die softwareeigene "Tuner"-Funktion auf Basis der Evaluation des Frequenzgangs ein sichtbar besseres Ergebnis hervorbringen konnte. Im Gegenteil, das System zeigte stärkeres Überschwingen.

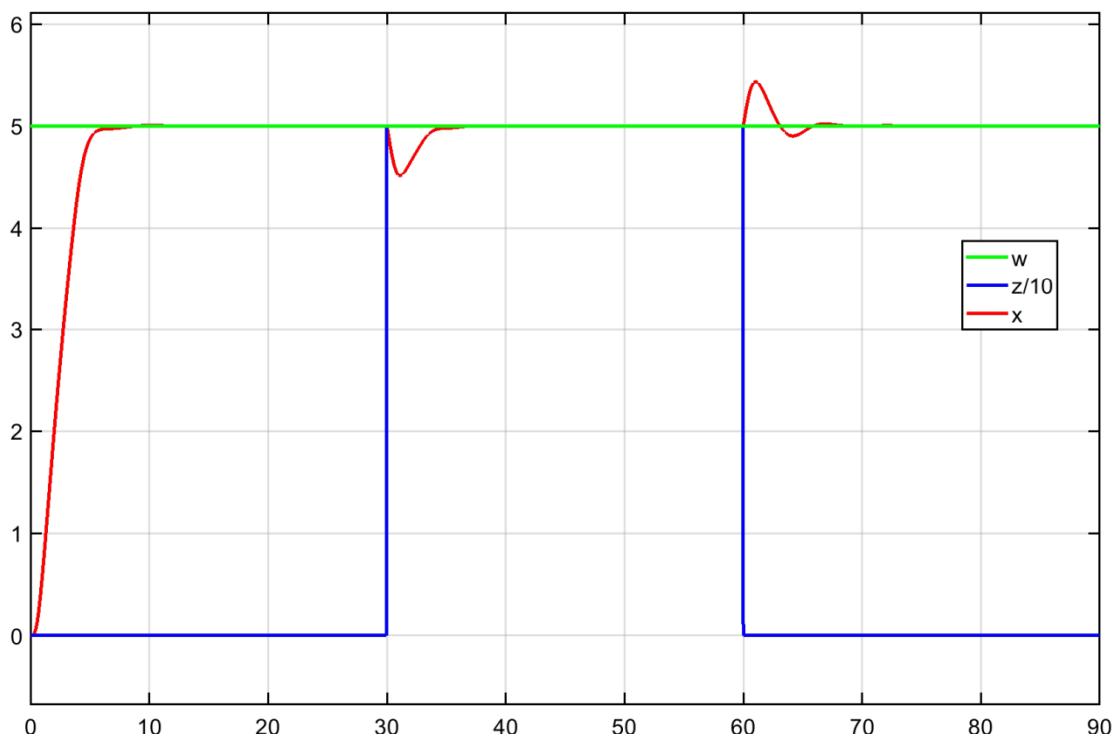


Abb. 51: Regelungssimulation $K_p=0,75$ / $T_n=1,38$

Nach einer händischen Erhöhung der Nachstellzeit auf 2 s zugunsten des Komforts eines "sanfteren" Heranfahrens an den Sollwert, vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten, und da die GPS-Messung ohnehin nur alle 0,5 s aktuelle Daten liefert, konnten die finalen Parameter festgehalten werden: $P = K_p = 0,75$ und $T_n = 2$ bzw. $I = K_p/T_n = 0,375$

Die Simulation mit diesen Daten bei einem Sollwert von 2 km/h sowie der zusätzlichen Darstellung der normierten Propellerdrehzahl lieferte folgende zufriedenstellende Abb. 52:

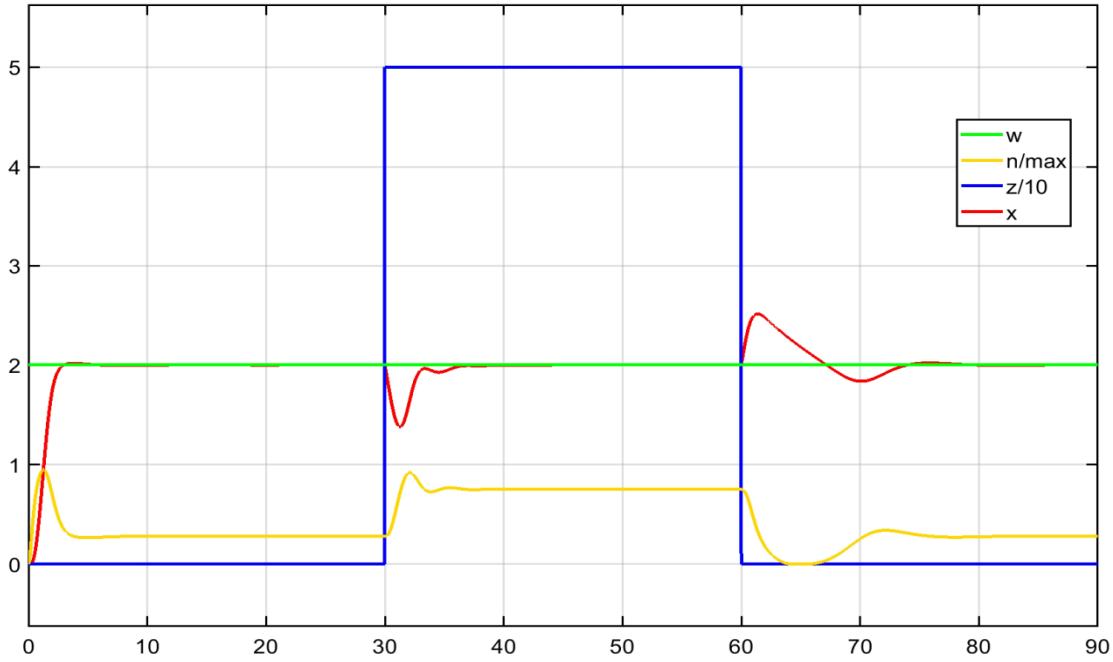


Abb. 52: Regelungssimulation $K_p=0,75 / T_n=2$

Abschließend wurde die ursprüngliche Intention der Regelung untersucht - das elektrisch unterstützte Paddeln. Ein als halbe Sinuskurve mit 0,5 Hz und 50 N Amplitude simulierter Paddelschlag, der das Boot im Modell auf entspannte 4 km/h bringt, wurde nun durch den "Tempomaten" dabei unterstützt, konstante 8 km/h zu erreichen - mit dem Ergebnis eines praktisch synchronen Motoreinsatzes (Abb. 53).

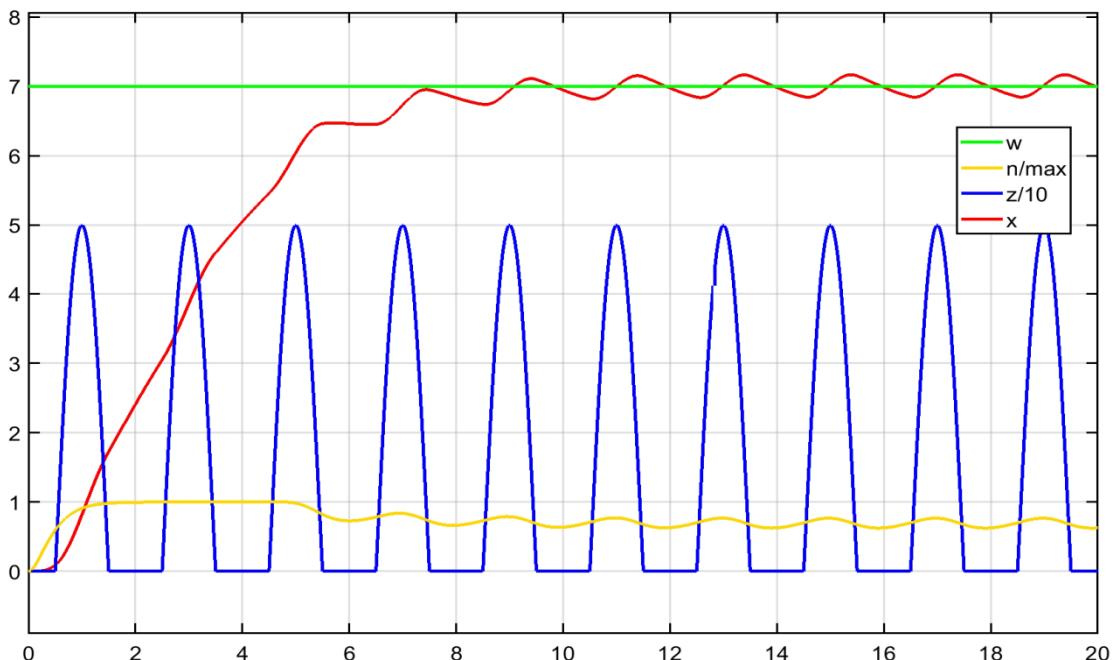


Abb. 53: Regelungssimulation elektrisch unterstütztes Paddeln

5 Programmierung

5.1 Ansteuerung des Antriebs

5.1.1 Analyse des Kommunikationsbus

Wie in Kap. 2.2 beschrieben, erfolgt die Kommunikation zwischen den Torqeedo-Komponenten über ein Bus-System. Der Sinn eines Bus ist ein einziger Datenkanal, auf dem alle Teilnehmer Nachrichten senden können und jeder Teilnehmer grundsätzlich jede Nachricht erhält. Besonders bei stark verzweigten Teilnehmernetzen ist damit eine große Einsparmöglichkeit von Verbindungsleitungen gegeben. Die Ordnung, mit der die Nachrichten auf dem Bus anliegen, muss jedoch strikt geregelt sein. Der "TQ Bus" ist laut der von Torqeedo zugesandten Dokumentation nach dem Single-Master-Multiple-Slaves-Prinzip geregelt. Der Master ist dabei das Steuergerät des Akkus, die Komponenten Motor und Ferngashebel sind Slaves. Alle Sendevorgänge werden vom Master nach dem Request-Reply-Verfahren initiiert. D. h. egal, ob er selbst einen eigenen Status (z. B. Ladestand) oder ein zweiter Teilnehmer eine Nachricht einem dritten übermitteln soll - stets gibt der Master das zeitliche Kommando und die Art der Nachricht vor. Dies klingt nach einer robusten Methode, bei der es nicht zu Kollisionen durch gleichzeitiges Senden kommen dürfte, bringt jedoch auch einige Restriktionen mit sich. Zunächst müssen alle Nachrichten, da sie ja von allen Teilnehmern gleichzeitig gelesen werden, adressiert sein. Hinzu kommt die Angabe einer ID (eine festgelegte Kennung des Inhalts z. B. Batterie-Ladestand) sowie Anhänge, die die Datenkonsistenz kontrollieren sollen, meist eine Prüfsumme. Alle Informationen werden zusammengefügt und als Paket bezeichnet (Abb. 54 oben). Diese Pakete werden vom Master in einem festgelegten Takt gesendet, da die Slaves über keine Funktion verfügen, etwaige Übertragungsfehler zu "melden". Wenn der Master also innerhalb eines Takt-Zeitfensters keine (konsistente) Antwort erhält, kann er die Anfrage erneut senden oder auf diesen Fehler reagieren und Maßnahmen ergreifen.

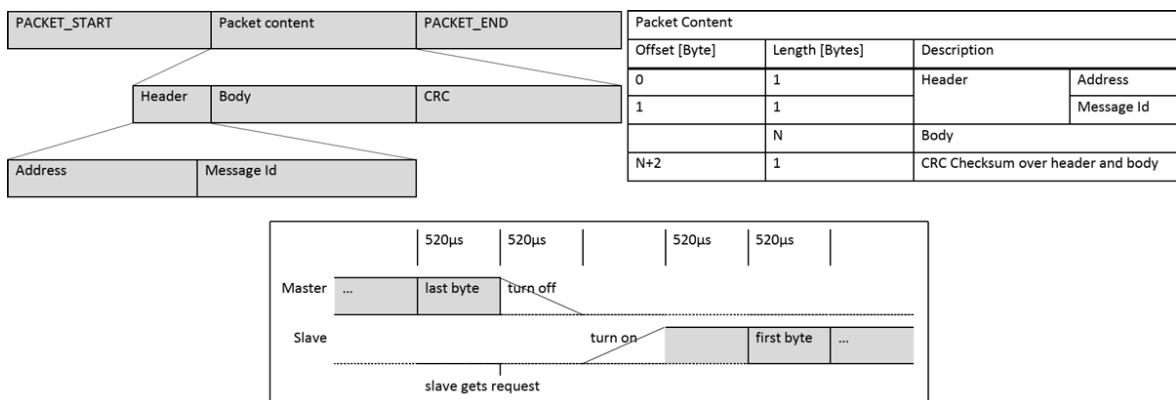


Abb. 54: Paketaufbau "TQ Bus" / Request-Reply-Verfahren [Torqeedo GmbH]

Diese Beschreibung soll verdeutlichen, wie kritisch die Programmierung des Schubhebels als Teilnehmer des Bus-Systems werden kann. Die Routine muss im Fall des "TQ Bus" in der Lage sein, alle 25 ms (eine Taktdauer) die Adresse und ID jedes Pakets zu analysieren und auf eine mögliche Anforderung "Welche Schubhebelstellung?" innerhalb von 520 µs (s. Abb. 54 unten) mit einer korrekt codierten und um die richtige Prüfsumme ergänzten Antwort starten.

Dabei stellt sich vor allem die Frage, inwiefern es zum Konflikt mit dem eigentlichen, noch am Bus befindlichen Ferngashebel kommt, der ebenfalls reagieren wird. Würde man das Ferngasmodul entfernen wollen, bliebe zu prüfen, ob der Master nicht regelmäßig weitere (Status-)Antworten von ihm erwartet, die man ebenso berücksichtigen müsste. Angesichts dieser Unsicherheiten wurde nach einer Alternative gesucht (s. Kap. 5.1.2).

Um dennoch eventuell nützliche Informationen mitlesen und loggen zu können, wurde ein einfacher Monitor auf der grafischen Oberfläche (GUI) von MATLAB für die serielle COM-Schnittstelle am PC entworfen (Abb. 55). Mit einer Einstechverbindung als elektrischer Abgriff und einem RS485-USB-Adapter decodiert das Tool jedes Datenpaket, filtert die gewünschte ID und ahmt das Display des Ferngasmoduls nach, indem der entsprechende Wert lesbar und in Echtzeit angezeigt wird. Außerdem wurde implementiert, dass parallel alle Werte nebst selbst generierterem Zeitstempel in einer formlosen Textdatei gespeichert werden (s. Daten-CD: "\tq_bus\tq_bus_monitor.m").

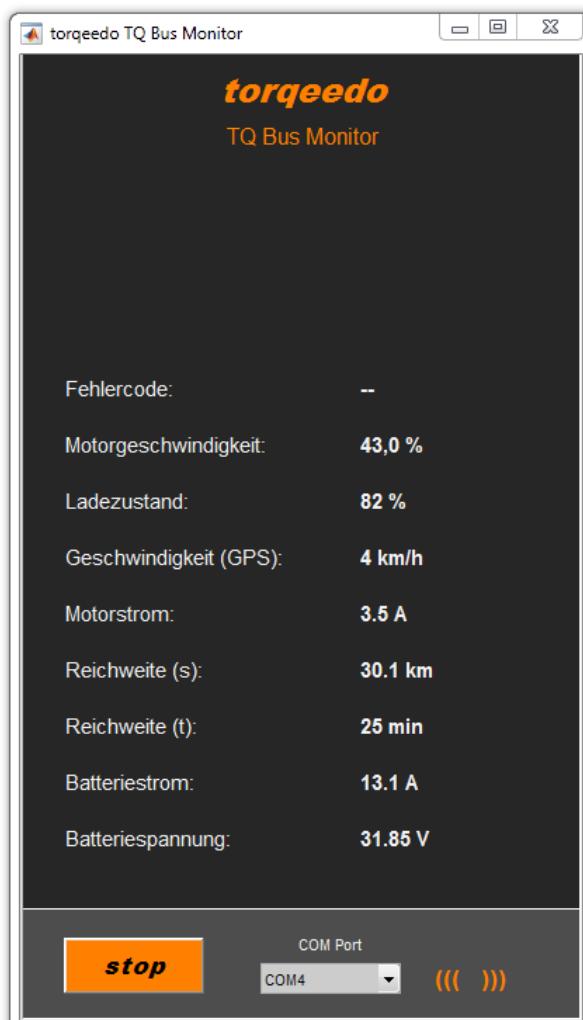


Abb. 55: "TQ Bus"-Monitor auf MATLAB GUI

Da die Dokumentation in Aussicht stellte, u. a. die Prozessgrößen Motorstrom und -drehzahl empfangen zu können, die für eine Analyse der internen Drehzahlregelung von Bedeutung sind, wurde mit der Vorrichtung eine Messfahrt unternommen, in der vorwiegend Schubrampen und -sprünge auf den Maximalwert abgefahren wurden. Nach einer Durchsicht der Daten wurde die ernüchternde Erkenntnis erlangt, dass sie nur unzureichend als Messwerte zu gebrauchen sind. Gemäß der Zeitstempel erfolgte eine Übertragung im Durchschnitt jede halbe Sekunde. Diese Auflösung genügt nicht, um das Hochfahren des Motors innerhalb von weniger als zwei Sekunden von 0 auf 1200 Umdrehungen pro Minute sinnvoll analytisch untersuchen zu können. Die mittels MATLAB-Skript umgesetzte Visualisierung (s. Daten-CD: "\tq_bus\tq_bus_analyzer.m") eines Beispieldatensatzes findet sich in nachfolgender Abb. 56.

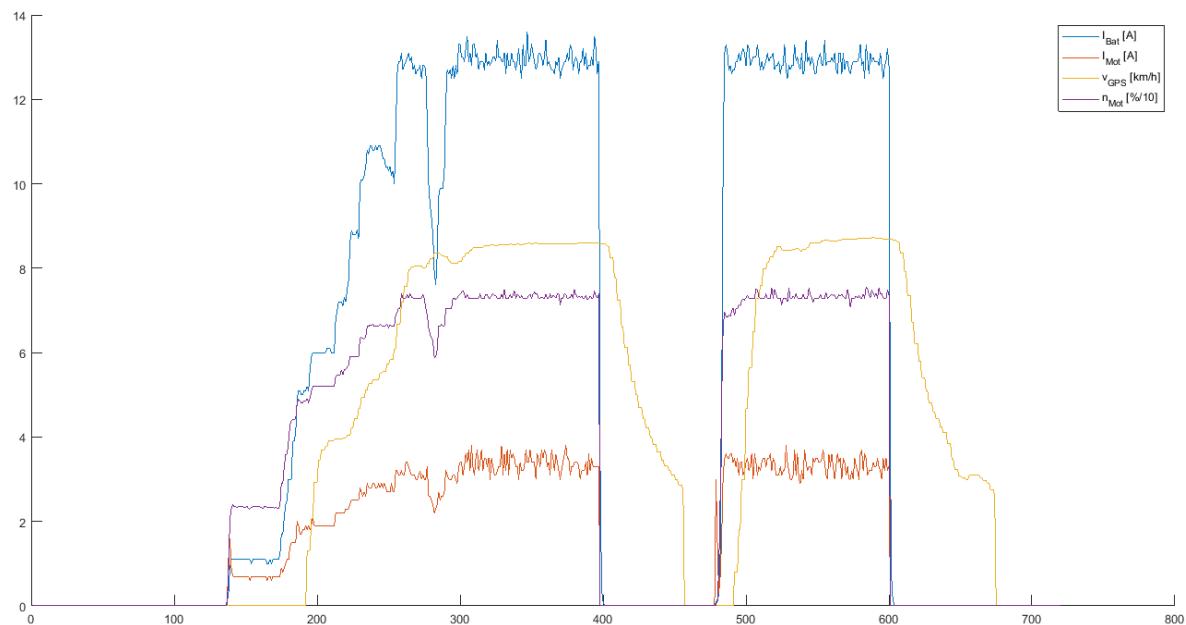


Abb. 56: Visualisierung der Messdaten aus "TQ Bus"

Weitere Beobachtungen betreffen die Geschwindigkeit (gelbe Kurve), welche im Bereich bis ca. 2 km/h praktisch nicht übertragen wird (siehe Sprünge auf Null), was die Entscheidung für einen externen GPS-Empfänger bekräftigte, sowie die angegebene Motordrehzahl (violette Kurve), deren Maximalwert mit ca. 75 % übertragen wurde, was bei den Versuchen nicht der Fall war.

Zusammenfassend kann behauptet werden, dass die Nutzung der Daten auf dem "TQ-Bus" nicht gesichert zum Entwurf der Regelung beitragen kann. Dass davon energetische Betrachtungen profitieren könnten, soll jedoch nicht ausgeschlossen werden.

5.1.2 Schubhebel-Emulation

Bei der Recherche der Funktionsweise des Ferngasmoduls wurde auch dessen Gehäuse geöffnet, um den Signalfluss vom Hebel zum "TQ Bus" nachvollziehen und nach bester Forschermanier "Einstiegspunkte" suchen zu können. Dabei wurde erkennbar, dass die Übermittlung der Hebelposition -sicherlich aus Gründen der beworbenen und notwendigen Schutzklasse IP67¹¹- nicht mechanisch, sondern kontaktlos erfolgt (Abb. 57 links und Mitte). Auf der Gegenseite der Hebelachse im Gehäuseinneren befindet sich ein Chip, der auf einer kleinen Platine verbaut und über ein 6-poliges Flachbandkabel mit der Hauptplatine des Moduls verbunden ist (Abb. 57 rechts).

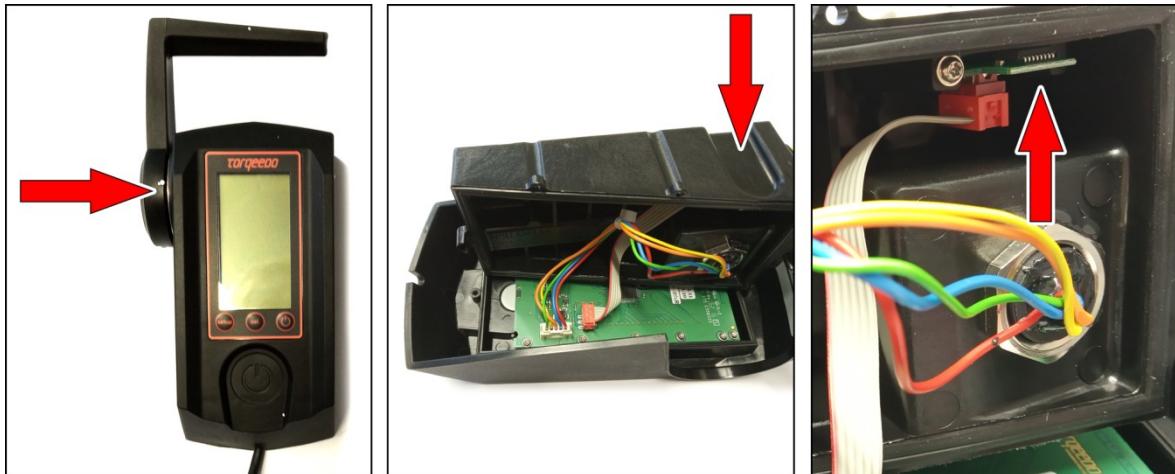


Abb. 57: Kontaktlose Übertragung der Schubhebelposition

Dieser gab sich gemäß Aufdruck als "AS5045", ein gut dokumentierter 12-Bit-Drehwinkelsensor des Herstellers asm, zu erkennen [31]. Es handelt sich hierbei um ein System-on-a-Chip, d. h. Messung, Konditionierung und Bereitstellung der zu messenden Größe findet in einem einzigen Baustein statt. Der Sensor nutzt den Hall-Effekt, um die rotatorische Lage eines Zweipolmagneten in seiner Nähe über den gesamten Bereich von 360° bestimmen zu können (Abb. 58 Mitte). Hier befindet sich dieser Magnet im Mittelpunkt des Hebels innen (Abb. 58 links). Die generierte Hall-Spannung wird in einen Wert zwischen 0 und 4095 (12 Bit) übersetzt und über eine Synchron-Serielle Schnittstelle (SSI) oder als PWM-Signal ausgegeben (Abb. 58 rechts).

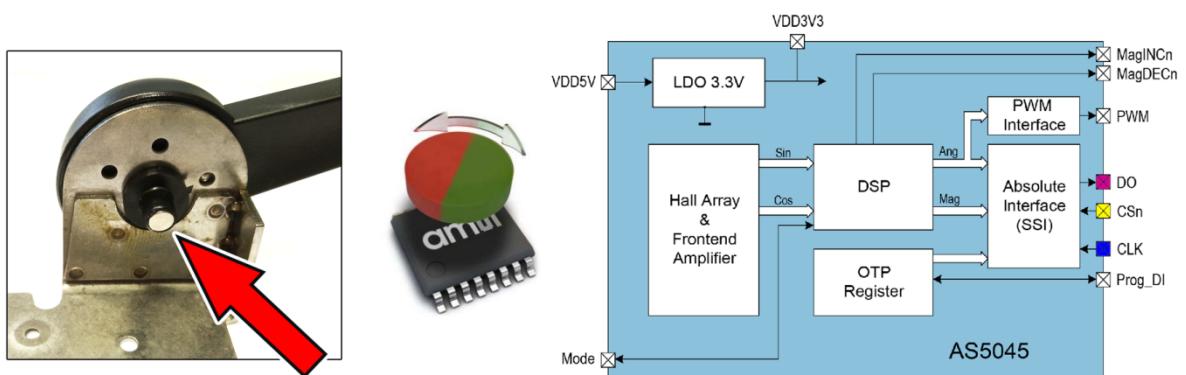


Abb. 58: Funktion des Drehwinkelsensors "AS5045" [asm AG / eigene Darstellung]

¹¹ Schutz vor zeitweiligem Untertauchen bis maximal 1 Meter Wassertiefe für maximal 30 Minuten

Das Ziel dieser Herangehensweise ist nun die Emulation der Hebelstellung durch Senden des entsprechenden Zahlenwerts an das Ferngasmodul mit dem Mikrocontroller.

Durch optische Untersuchung der Sensoranschlüsse konnte geklärt werden, dass hier nur die SSI-Variante zur Anwendung kommt. Die dafür nötigen Pins und deren Belegung gehen aus dem Datenblatt des Sensors hervor (Abb. 59 links, die rote Markierung hebt die Orientierungshilfe hervor). Somit konnte auch die Belegung der Adern des Flachbandkabels bestimmt werden (Abb. 59 rechts).

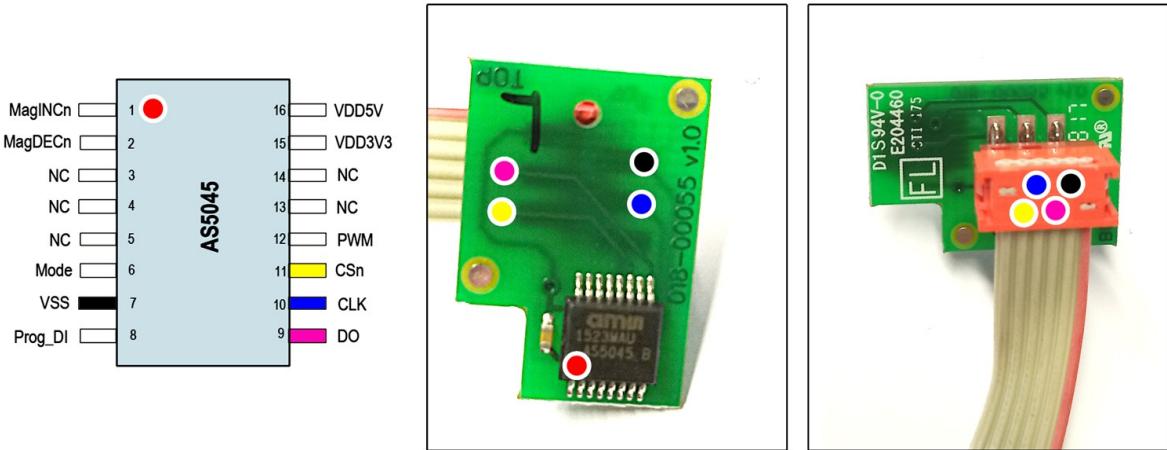


Abb. 59: Pin- und Kabelbelegung [asm AG / eigene Darstellung]

SSI wurde als reine Sensorschnittstelle entwickelt. Die drei farblich markierten Leitungen DO, CLK und CSn (Masse schwarz) erfüllen darin folgende Funktion:

Neben dem eigentlichen Datenausgang des Sensors (DO), gibt es eine Taktleitung (CLK) und eine Steuerleitung (CSn), die vom auslesenden Gerät, hier dem Ferngas-Steuergerät, kontrolliert werden. Der Sensor füllt permanent ein paralleles Schieberegister mit dem jeweils aktuell gemessenen Wert. Das Steuergerät kann jederzeit einen Auslesevorgang starten, indem es die Steuerleitung auf logisch LOW setzt (Abb. 60). Daraufhin schaltet der Sensor vom parallelen Schreiben auf das serielle Senden des Registers um. Das Steuergerät gibt nun den Takt vor, zu dem der Sensor bei jeder steigenden Flanke ein Bit des Registers zu übertragen hat. Nach einer festen Anzahl von Takten (hier 18) ist die Übertragung automatisch beendet und das Register wird wieder befüllt. Bis zu 10420 Werte (Samples) pro Sekunde können so mit einer Taktrate von max. 1 MHz ausgelesen werden.

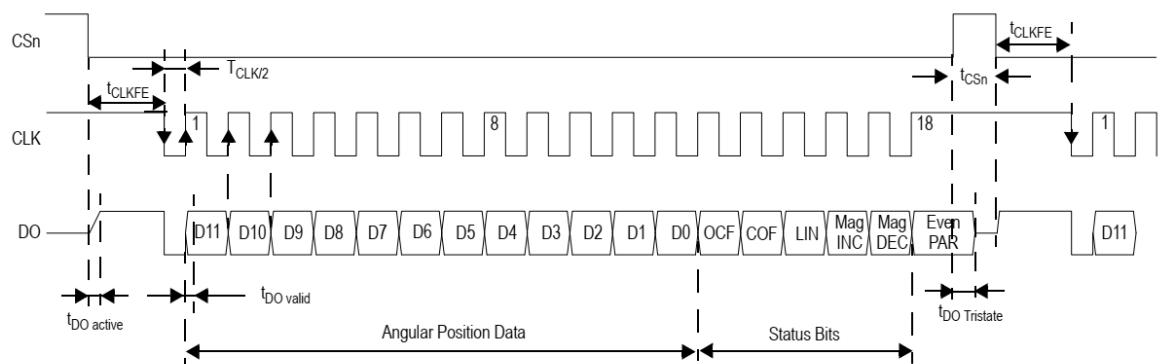


Abb. 60: Schema der Datenübertragung über SSI [31]

Um den Sensor imitieren zu können, muss demnach ein Algorithmus geschrieben werden, der auf die Flanken, also den Wechsel der logischen Zustände von CSn und CLK reagieren kann und die 12 Bits des Wertes, der die Hebelstellung repräsentiert (zuzüglich 6 Status-Bits gemäß Datenblatt) taktweise vom MSB zum LSB¹² ausgibt. Der Programmablaufplan ist Abb. 61 zu entnehmen und beruht auf der Vorarbeit aus [32]. CSn und CLK wurden als GPIO-Pins mit externem Interrupt deklariert, also allgemeine digitale Eingänge, die eine Funktion auslösen, sobald sich deren logischer Pegel ändert - unabhängig vom gerade ablaufenden Hauptprogramm. In diesem kann entsprechend losgelöst die Ermittlung und Wertzuweisung der gewünschten Hebelstellung in einer Dauerschleife erfolgen. Ein kritisches Zeitfenster oder gar die Übermittlung zusätzlicher Daten muss das Programm nicht einhalten. Hinsichtlich des Taktes, dem die Übertragung folgt, gilt es einzige zu beachten, dass sich der Pegel von CLK durch das "Zurückspringen" auch während eines Bits ändert und damit einen Interrupt auslöst. Dies wurde mit einer künstlichen Verdoppelung der Bitfolge und dem Schreiben von zwei quasi "halben" Bits auf den als Ausgang deklarierten GPIO-Pin (DO) bewältigt.

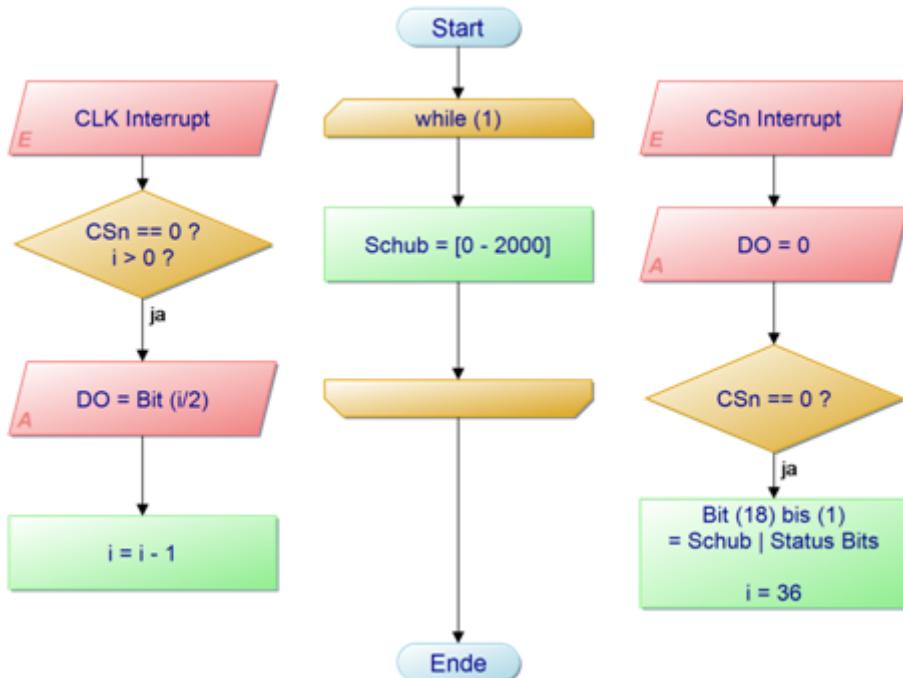


Abb. 61: Programmablaufplan Schubhebel-Emulation

Da die werksseitige Zuordnung zwischen Hebelstellung und Zahlenwert nicht vorlag und das Ferngas ohnehin nur in Nullstellung in Betrieb genommen werden kann, wurde auf die Möglichkeit der Kalibrierung zurückgegriffen und eine neue Zuordnung erstellt. 4096 Werte decken standardmäßig eine volle Umdrehung ab, entsprechend wurde definiert, dass die eine etwa halbe Umdrehung umfassende Skala des Hebels folgenden Wertebereich der natürlichen Zahlen erhält:

- 0 voller Rückwärts-Schub (-100 %)
- 1000 Nullstellung
- 2000 voller Vorwärts-Schub (+100 %)

¹² MSB: most significant bit (höchste Wertigkeit), LSB: least significant bit (geringste Wertigkeit)

Auf Grundlage des entwickelten Programmablaufs wurde dazu eine Routine geschrieben (aus Ressourcengründen zunächst auf einem Arduino-Mikrocontroller, s. Daten-CD: "kalibrierung.ino") und die Controller-Pins mit den inzwischen durchtrennten Leitungen des Flachbandkabels verbunden. Während des Ablaufs stellt die Routine die drei Stützwerte nacheinander 10 Sekunden lang auf der Datenleitung zur Verfügung und kennzeichnet das durch unterschiedlich schnelles Blinken der integrierten LED. Im Kalibriermodus hat man so die Chance, die neuen "Endlagen" des virtuellen Hebels einlesen zu lassen und sie zu entsprechend zu bestätigen (Abb. 62).

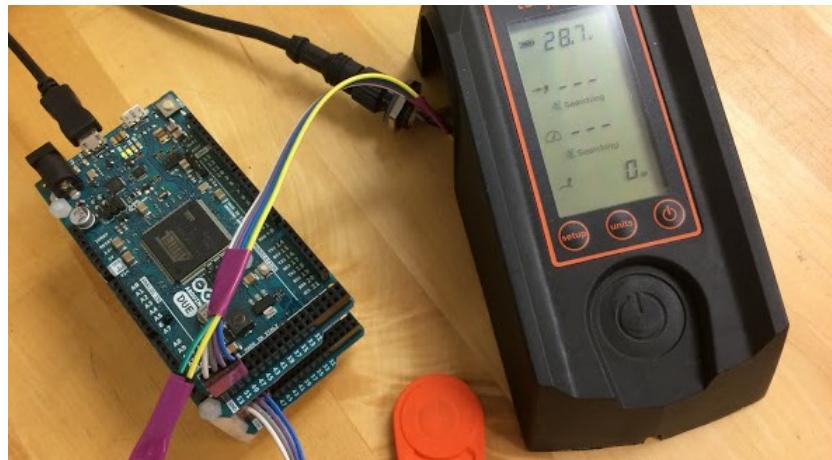


Abb. 62: Kalibrierung mit dem Mikrocontroller "Arduino Due"

Fortan war es jetzt möglich, eine beliebige zeit- oder interaktionsabhängige Funktion als Motorsteuersignal zu implementieren. Erste Tests mit konstanten Werten und periodischen Verläufen wurden erfolgreich absolviert. Zu einem späteren Zeitpunkt wurde das Programmgerüst für den STM32-Microcontroller in C-Code umgeschrieben.

Als Grundlage für die Eignungsprüfung zur Integration des Regelalgorithmus aus Simulink wurde ein einfacher Zustandsautomat (Stateflow) erstellt, der dem Motorsignal mit jeder Betätigung des Tasters am Controller einen anderen Wert zuweist (Abb. 63). Die hier beispielsweise verwendeten Variablen "button" und "throttle" sind die Schnittstellen für das Einlesen und Ausgeben im C-Code, also elementar (s. Daten-CD: "stateflow.slx").

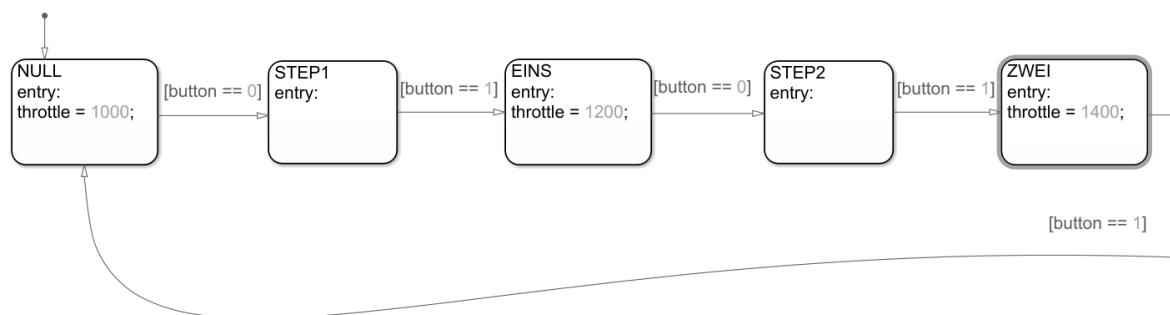


Abb. 63: Zustandsautomat zur Motorsteuerung (Ausschnitt)

Die Funktionsweise konnte ebenfalls erfolgreich getestet werden - der Propellermotor änderte seine Drehzahl auf Knopfdruck. Die genauen Schritte der Code-Generierung aus Simulink werden in Kap. 5.3 beschrieben.

5.2 Auslesen des GPS-Moduls

Das aus 2.4 bekannte GPS-Applikationsboard "C94-M8P" offeriert mehrere Schnittstellen zur Ein- und Ausgabe bestimmter Daten. Darunter findet sich ein RS232-Anschluss, der jedoch nur für die Parametrierung und Kontrolle des Korrekturdatenstroms im RTK-Modus vorgesehen ist und außerdem einen zusätzlichen Pegelwandler für die 5V-Logik des Mikrocontrollers benötigen würde. Der USB-Anschluss stellt den größten Umfang zur Verfügung: sowohl NMEA-Daten, als auch zahlreiche Zusatzinformationen, wie eine zurückgelegte Strecke, Ephemeriden etc., die über das herstellereigene UBX-Protokoll im Hexadezimalformat übertragen werden. Dieses decodieren zu können bedarf allerdings eines längeren Studiums der teilweise vorhandenen Dokumentation. Außerdem wäre auch hier eine nicht-triviale Adapter- und Treiberlösung für den UART-Anschluss des Controllers zu suchen.

Schlussendlich bietet sich nur eine Verbindung auf der mit "J8" bezeichneten Steckerleiste an (Abb. 64). Der hier grün markierte Pin Nr. 10 ist der klassische serielle Transmit-Kanal (Tx) des Boards auf 5V-Level und überträgt (nur) NMEA-Datensätze in der über "u-center" vorkonfigurierten Aktualisierungsrate. Auf einem PC-Terminal kann der Datenstrom mitgelesen werden. Dabei wurde festgestellt, dass bereits eine Rate von 5 Hz gelegentlich zum "Einfrieren" der Kommunikation führt. Ob es am GPS-Gerät oder dem USB-Adapter für den PC gelegen hat, ist bislang unklar. Aus Sicherheitsgründen wurde die Rate daher für die weiteren Zwecke auf 2 Hz eingestellt.

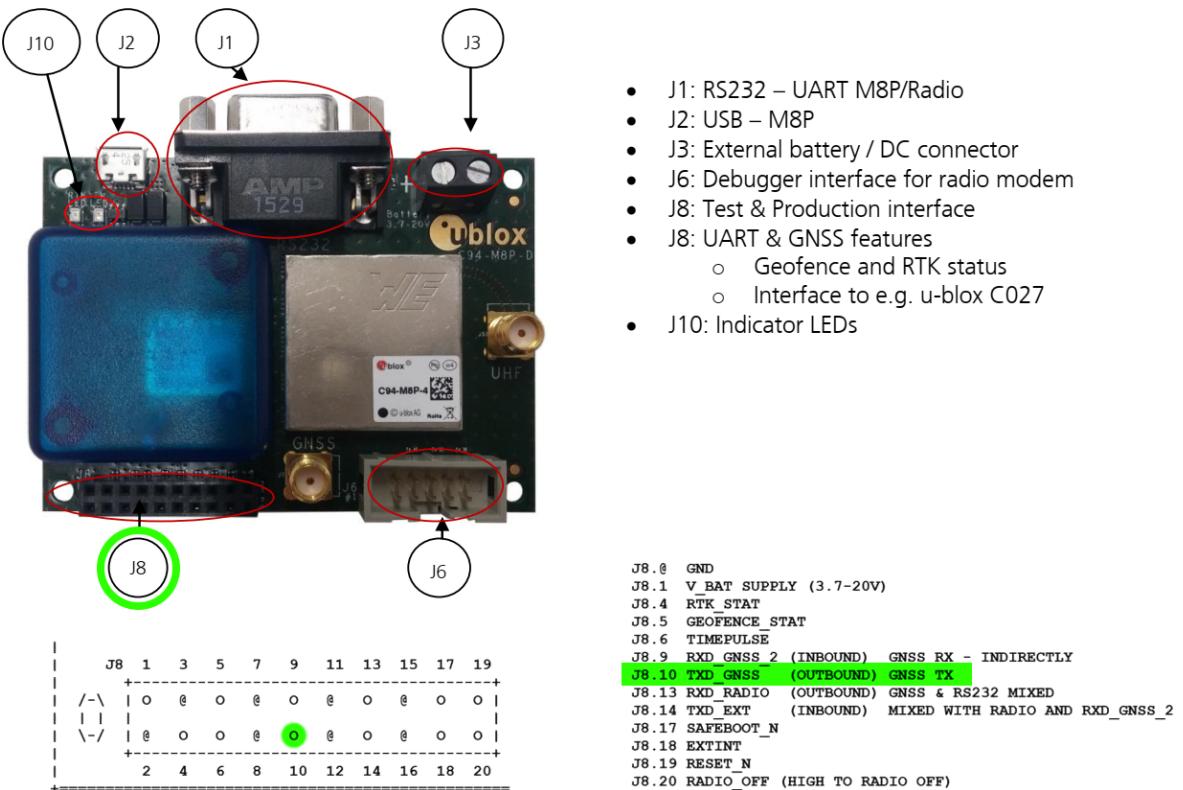


Abb. 64: Schnittstellen des GPS-Boards (nach [13])

Damit liefert Pin 10 jede halbe Sekunde die in Kap. 2.4 aufgeführten Standard-Datensätze zeilenweise im ASCII-Format. Der Präfix unterscheidet sich allerdings vom Beispiel. Da das "NEO-M8P"-Modul die Daten aus den Systemen GPS und GLONASS zusammenführt, beginnen dessen Datensätze mit "GN" (statt "GP") - der Hauptteil ändert sich nicht:

\$GNVTG,014.2,T,015.4,M,001.46,N,002.70,K*4F<CR><LF>

ist in diesem Fall das Beispiel für den relevanten Datensatz mit der Information der Geschwindigkeit. Mit dieser Angabe kann ein relativ einfacher Text-Parser¹³ in den Controller programmiert werden. Dazu muss zunächst jedoch der kontinuierlich anliegende Datenstrom sinnvoll in den Speicher geladen werden. Aus vorangegangenen Arbeiten wuchs die Erfahrung, dass entweder ein in der Größe ausreichend ausgelegter Ringpufferspeicher einzusetzen oder jedes Zeichen einzeln einzulesen ist (1 Byte Puffergröße). Aufgrund der hohen Leistung des Controllers und der relativ geringen Zeichenmenge pro Zeiteinheit wurde die zweite Variante gewählt. Erneut sollte (wie in Kap. 5.1.2) mit Interrupts gearbeitet werden, um das Hauptprogramm (den Regelalgorithmus) nicht zu behindern. Der hier zu verwendende UART-Kanal des Controllers unterscheidet sich glücklicherweise in der Belegung und Behandlung von dem bereits belegten GPIO-Pins der Motorsteuerung. So konnten in STM32CubeMX die Pins für UART aktiviert und mit DMA-Interrupt-Funktionalität versehen werden (Abb. 65). DMA steht für Direct Memory Access und ermöglicht Peripheriegeräten, Datenübertragungen zum oder vom Speicher ohne den Prozessor einzuleiten.

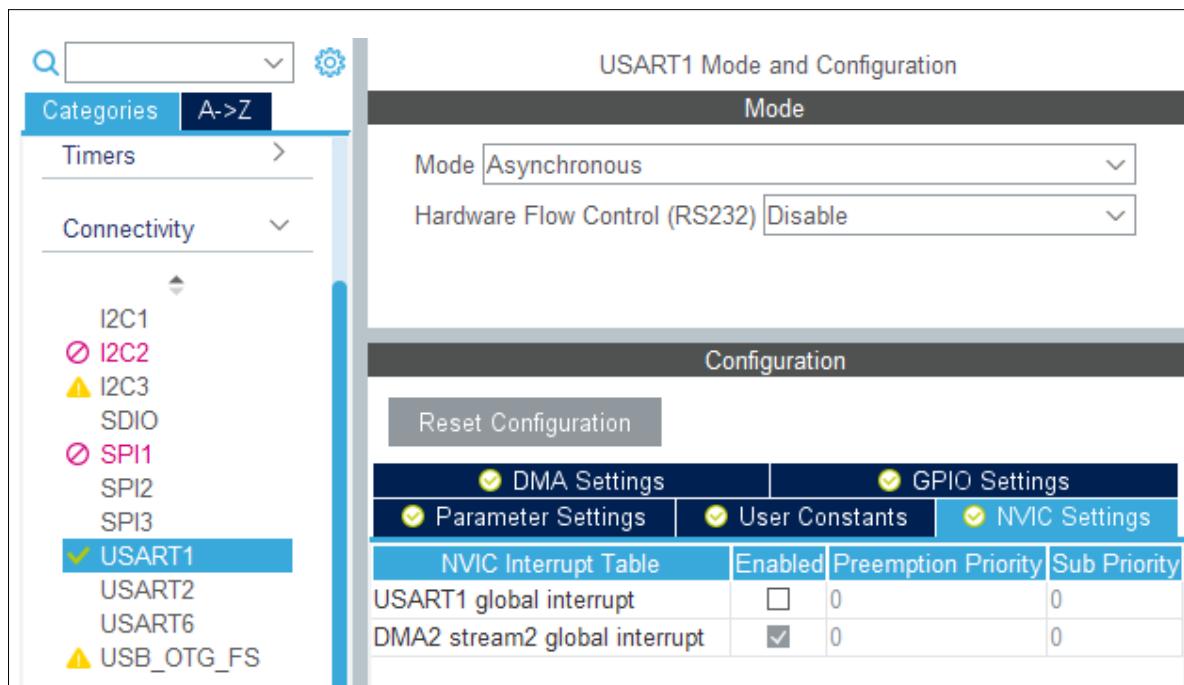


Abb. 65: Konfiguration UART DMA-Interrupt in STM32CubeMX

Im C-Programmcode muss die Empfangsbereitschaft mit

```
HAL_UART_Receive_DMA(&huart1, &nmea, 1);
```

einmalig hergestellt und ein "Callback" als Interrupt deklariert werden:

```
void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
```

Der Inhalt dieser Funktion wird ausgeführt, sobald der Übertragungspuffer gefüllt ist, d. h. nach 1 Byte (1 Zeichen). Sie vergleicht das aktuelle mit vorgegebenen Zeichen, zählt Kommas etc. und wandelt schließlich das zusammengesetzte Zeichen-Array der Geschwindigkeit in eine Gleitkommazahl. Diese wird der Variablen *vgps* zugewiesen, die zwei Mal pro Sekunde aktualisiert zur Verfügung steht (s. Daten-CD: Projekt "gps_stm").

¹³ Zerteiler langerer Zeichenketten

5.3 Implementierung der Regelung

Die Programmierung der Teilstufen Motoransteuerung und Geschwindigkeitsmessung erfolgte jeweils in Einzelprojekten. Die Zusammenführung mit dem Kernelalgorithmus der Regelung ist in einer ähnlichen Verfahrensweise zu bewerkstelligen und beinhaltet auch die jeweiligen Voreinstellungen akkumuliert. D. h. alle Pinbelegungen des Controllers, Aktivierungen von Interrupts, Funktionsdeklarationen usw. werden in ein gemeinsames Projekt übernommen. Das Vorgehen bei der Erstellung steht exemplarisch für jedes Projekt und soll daher im Folgenden schrittweise beschrieben werden.

- 1) Erstellung eines neuen Projekts in STM32CubeMX auf Basis des Bord-Layouts "NUCLEO-F401RE" (Es empfiehlt sich die Übernahme der standardmäßig belegten Pins.)
 - 2) In "Pinout view": Markierung und Benennung der benötigten (noch freien) Pins gemäß ihrer Eignung durch Anklicken und Auswählen der Funktionalität (Abb. 66 links)
 - CS: GPIO_EXTI (PA6)
 - USART1_RX (PA10)
- CLK: GPIO_EXTI (PA7) DO: GPIO_Output (PB6)
USART1_TX (PA9)¹⁴

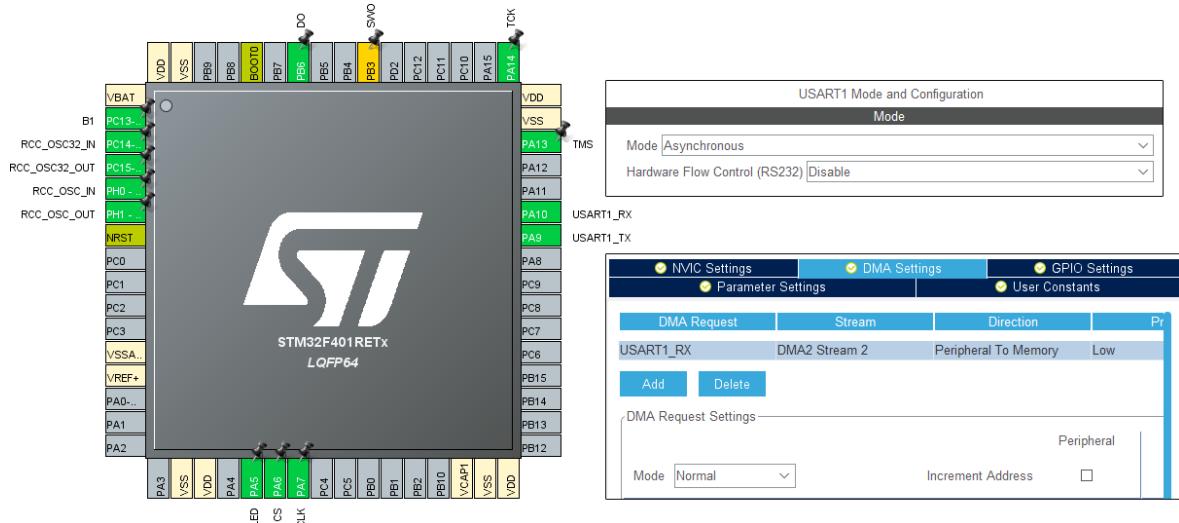


Abb. 66: Implementierung: Pinbelegung und UART-Konfiguration

- 3) Connectivity / USART1: Aktivierung durch "Mode: Asynchronous", Hinzufügen des DMA-Streams für USART1_RX (Abb. 66 rechts)
- 4) In "System view" / NVIC: Aktivierung der Interrupts "EXTI line[9:5]" für GPIO und "DMA2 stream2 global" für USART1 (Abb. 67)

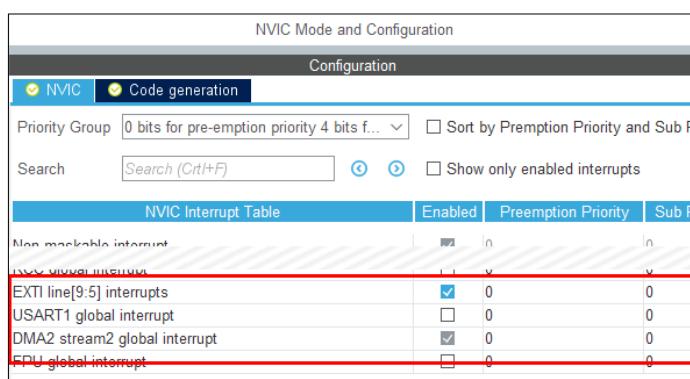


Abb. 67: Implementierung: Aktivierung Interrupts

¹⁴ Pinbelegung wird automatisch erstellt, aber nicht benötigt.

- 5) In "Project Manager": Vergabe eines Projektnamens und Speicherorts, Auswahl Toolchain / IDE: "TrueSTUDIO", Abschließen durch "GENERATE CODE"
- 6) Projekt in TrueSTUDIO öffnen lassen
- 7) Wechsel zu MATLAB/Simulink, Regelkreismodell öffnen
- 8) Regler mit Differenzglied freistellen, Anschlüsse mit Quell- bzw. Zielport versehen und diese mit den zu verwendenden Variablennamen bezeichnen (Abb. 68 links)

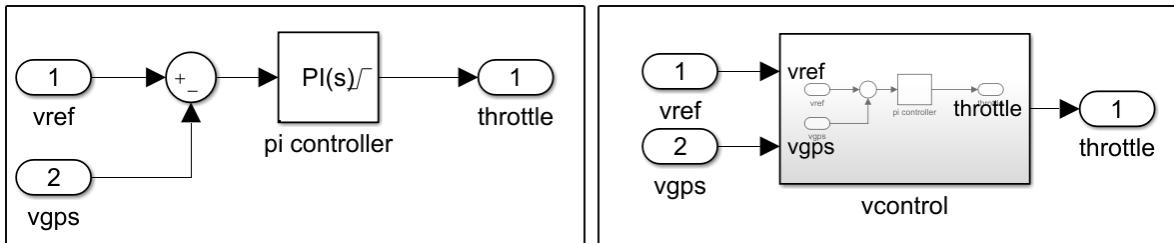


Abb. 68: Implementierung: Freistellen des Reglers, Erstellung Subsystem

- 9) Subsystem erstellen und dieses mit einem (vorzugsweise prägnanten) Arbeitstitel bezeichnen, da es der Name der später zu integrierenden Funktion ist (Abb. 68 rechts)
- 10) In "Code Generation Options...": Auswahl "System target file: ert.tlc" (Abb. 69)

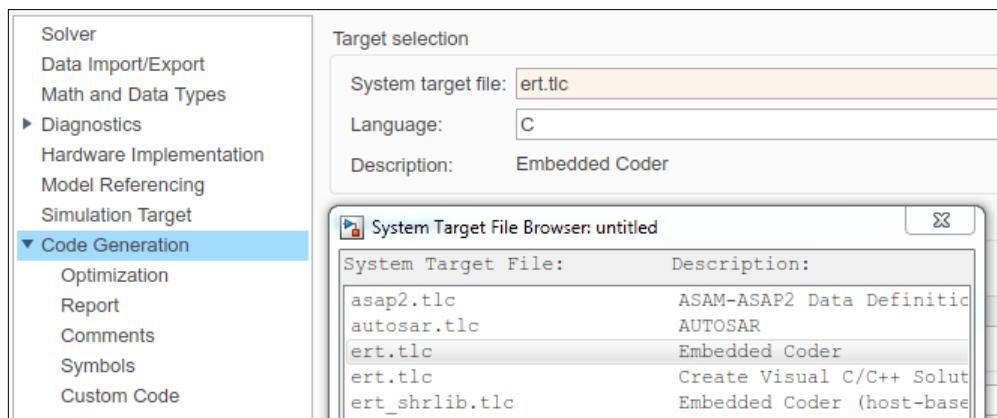


Abb. 69: Implementierung: Auswahl Zielgerät "Embedded Coder"

- 11) Rechtsklick auf Subsystem: "C/C++ Code" > "Build This Subsystem". Nach Bestätigen mit "Build" wird der Code generiert und im Arbeitsverzeichnis abgelegt.
 - 12) Zurück zu TrueSTUDIO: Rechtsklick auf den Projektnamen im "Navigator" und Import des neu erzeugten Verzeichnisses mit dem Arbeitstitel (hier: "\vcontrol_ert_rtw")
 - 13) Verschieben der darin enthaltenen Hauptdateien: "vcontrol.c" in den Ordner "\Src" und "vcontrol.h" in den Ordner "\Inc"
 - 14) Öffnen der Datei "main.c" - hier wird der individuelle Code eingearbeitet:
- ```

USER CODE BEGIN Includes: alle benötigten Header inkl. "vcontrol.h"
USER CODE BEGIN 0: alle globalen Variablendeklarationen
USER CODE BEGIN 1: alle Initialisierungen der Variablen
USER CODE BEGIN SysInit: vcontrol_initialize();15
USER CODE BEGIN 2: HAL_UART_Receive_DMA(&huart1, &nmea, 1);16

```

<sup>15</sup> Initialisierung der Regler-Funktion

<sup>16</sup> Empfangsbereitschaft der GPS-Daten über UART

USER CODE BEGIN 4: Hier befinden sich alle (drei) Interrupt-Funktionen, also quasi die Takt- und Steuerleitungen des Ferngasmoduls sowie die Analyse der GPS-Zeichen. Ein Austausch der Daten findet über die global angelegten Variablen statt.

15) `while(1)`-Dauerschleife: Hier werden folgende Funktionen umgesetzt

- Bedingung des Programmbetriebs (z. B. nur wenn Taste gedrückt)
- Eingangsgrößen der Regelung werden mit den zugehörigen Variablen belegt (`vref` konstant, `vgps` bestimmt durch Kap. 5.2)
- Auslösen eines(!) Iterationsschritts der Regelung: `vcontrol0_step()`;
- Einlesen des gelieferten Wertes  $t$  für die Motorsteuerung zwischen 0 und 1
- Anpassung des Wertebereichs auf 1000 bis 2000 und Ganzzahligkeit sicherstellen
- ggf. weitere (bedingte) Komfort- oder Schutzfunktionen, z. B. Grunddrehzahl
- finale Zuweisung des Motorsignals

16) Das Motorsignal steht damit als globale Variable bereit, von den Interrupt-Funktionen verarbeitet und an das Ferngasmodul gesendet zu werden.

17) Ergebnis siehe Daten-CD: Projekt "tempomat"

18) Kompilieren, Bauen und Übertragen des Programmcodes auf den (per USB angeschlossenen) Mikrocontroller über die Schaltfläche "Debug" (Abb. 70)

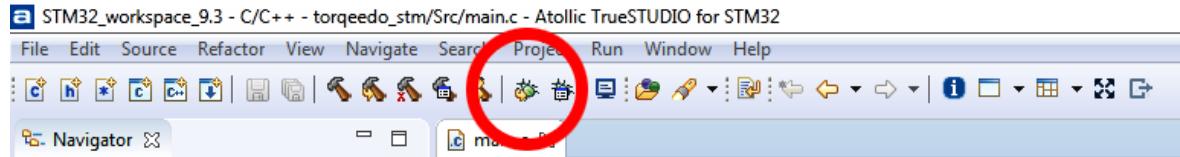


Abb. 70: Implementierung: Debug-Funktion zum Übertragen des Programmcodes

Bemerkungen / Hinweise zur Implementierung:

Als Betriebsbedingung wurde das Gedrückthalten des standardmäßig vordefinierten, blauen Tasters des Controllers gewählt, um eine einfache, aber relativ sichere Methode zu erhalten, den Propeller nicht ohne Aufsicht drehen zu lassen ("Totmanneinrichtung").

Im aktiven Grundzustand wird dem Motor eine für den Vortrieb unwirksame, niedrige Drehzahl zugewiesen, die sich aus der folgenden Beobachtung ergab: Aus dem Stillstand heraus arbeitet der Torqeedo-Antrieb mit ca. 1 Sekunde Totzeit bis eine Rotation erfolgt, was evtl. von den in Kap. 2.2 erwähnten Schutzfunktionen herrührt. Eine deutlich dynamischere Reaktion ist zu registrieren, sobald eine Drehzahl größer Null vorherrscht. Dann greift nur noch die im Regelkreis als verzögterer Anstieg berücksichtigte Strombegrenzung ein. Aufgrund dieses stark unterschiedlichen (hystereseähnlichen) und schwer zu modellierenden Verhaltens wurde eine Minimaldrehzahl (ca.  $150 \text{ min}^{-1}$ ) gewählt, die außerdem den Vorteil mit sich bringt, dass nun sehr deutlich zu erkennen ist, ob die Regelung aktiv ist oder nicht.

Die Initialisierung der Variablen für die GPS-Geschwindigkeit erfolgt mit 999 km/h, da es bei den sonst üblichen Null-Werten umgehend zur maximalen Ausregelung kommen würde bis die ersten "echten" Werte verfügbar sind. Eine Prozedur bei ausbleibenden GPS-Messwerten ist zum gegenwärtigen Stand nicht berücksichtigt.

## 6 Funktionsnachweis

Vor dem Einsatz der Geschwindigkeitsregelung müssen die Komponenten selbstverständlich korrekt miteinander verbunden werden. Der Konfiguration aus Kap. 5.3 sind die Bezeichnungen der einzelnen Pins des Controllers zu entnehmen. Leider stimmen sie mit dem Aufdruck auf dem Board nicht überein. Hier schafft das Datenblatt Abhilfe [33]. Die Anschlüsse der gewählten Pins sind in Abb. 71 gekennzeichnet.

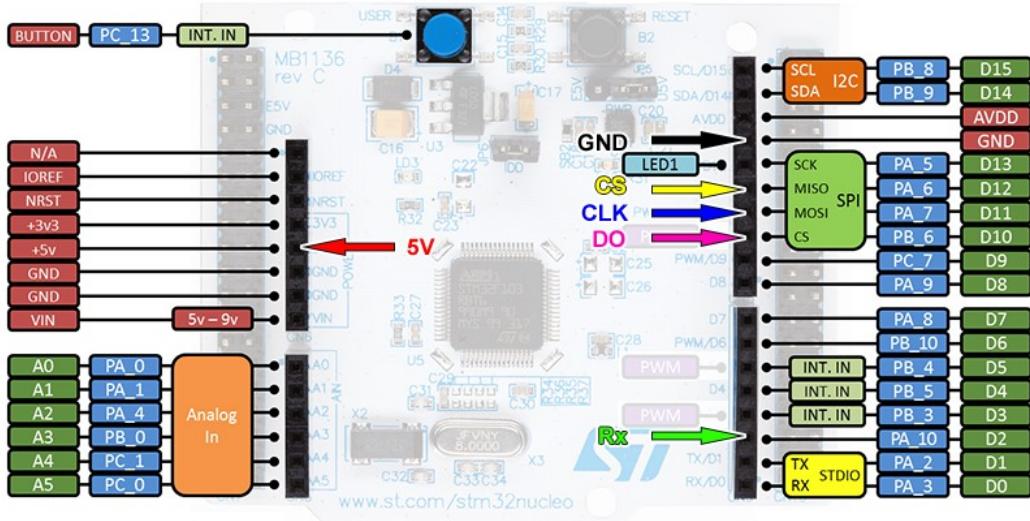


Abb. 71: Anschlussbelegung des "Nucleo-F401RE" (nach [33])

Im eigenständigen, vom USB getrennten Betrieb kann die markierte 5-Volt-Leitung als Versorgungseingang dienen. In der hiesigen Anwendung wird das GPS-Board von einem Batterie-Paket gespeist und stellt auf diese Weise das Spannungsniveau für beide Geräte bereit (Abb. 72). Dem Controller sollte eine Hochlaufzeit von einigen Sekunden gewährt werden bevor das Ferngas hinzugeschaltet wird. Im Falle eines Fehlercodes "E21", "E22" oder "E23" (unplausible Schubhebelstellung) ist der Antrieb neu zu starten.

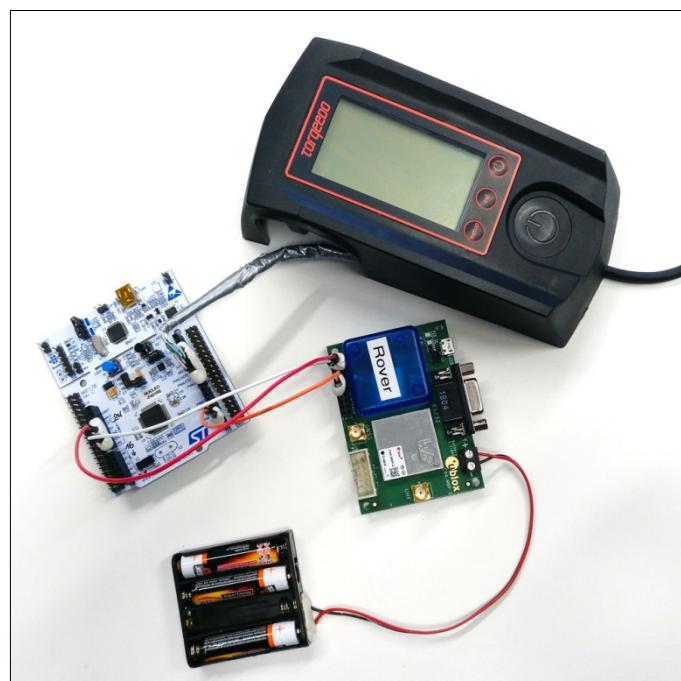


Abb. 72: Verbindung der Komponenten

Im Einsatz ist darauf zu achten, dass die GPS-Antenne mit uneingeschränktem Sichtkontakt zum Himmel auf dem Boot platziert wird. Ein erfolgreicher Datenempfang wird durch Blinken einer blauen LED auf dem GPS-Board signalisiert.

Testfahrt 1: Der erste Funktionstest fand umständlicherweise auf einem Fluss, d. h. mit vorherrschender Strömung statt. Auch wenn die Simulationen stets mit den Randbedingungen eines ruhenden Gewässers durchgeführt wurden, sollte die Regelung somit gleich einer Härteprüfung unterzogen werden. Bei einer kurzen "Treibfahrt" konnte der Strömung durch Ablesen der GPS-Daten auf dem Display eine bis zu 5 km/h hohe Geschwindigkeit in dem befahrenen Uferbereich des Flusses attestiert werden. Auch für solche Fälle, in denen eine hohe Stellgrößenreserve verfügbar sein muss, wurde die Führungsgröße (Sollgeschwindigkeit) vorsorglich auf einen niedrigen Wert eingestellt. Zum Startzeitpunkt  $t_0$  der Regelung in Fahrtrichtung gegen die Strömung konnten folgende Bedingungen mehr oder weniger genau festgehalten werden.

$$w = v_{ref} = 2 \text{ km/h} \quad x_0 = v_{gps} \approx 1 \text{ km/h} \quad v_{Strömung} = -4 \text{ km/h}$$

$$\text{Reglereinstellungen: } K_p = 0,75 \quad I = 0,375 \quad (T_n = 2 \text{ s})$$

Mit der aus vorangegangenen Versuchen bekannten Leistungsgrenze sollte demnach eine Geschwindigkeitsreserve von 2 bis 3 km/h vorliegen.

Nach  $t \approx 2$  s konnte ein Regeleingriff hörbar registriert werden, das Boot beschleunigte auf den (abgelesenen) Zielgeschwindigkeitsbereich. Nach wiederum 2-3 Sekunden jedoch setzte der Antrieb aus und erst wieder ein, nachdem das Boot durch die Strömung bereits stark abgebremst wurde und drohte, in die Rückwärtsfahrt zurückzufallen. Dieser Vorgang wiederholte sich mehrfach bis die Testfahrt abgebrochen wurde. Es erweckte sich der Eindruck eines zweipunktregler-ähnlichen, stark schwingenden Verhaltens, das den eingeschwungenen Zustand -wenn überhaupt- inakzeptabel spät erreicht.

Testfahrt 2: Daraufhin sollte die Dämpfung dieser Schwingung verstärkt werden, indem die Nachstellzeit mit  $T_n = 7,5$  s ( $I = 0,1$ ) auf den nach Tabelle 9 größten Wert angehoben wird. Aus Sicherheitsgründen (um nicht abzutreiben) wurde auch die Sollgeschwindigkeit verdoppelt. Eine erneute Testfahrt ergab ein spürbar ausgeglicheneres Regelverhalten mit längeren Schubphasen, nach wie vor allerdings auch mit Phasen des Aussetzens und Zurückfallens. Eine genaue Protokollierung des Verlaufs war aus logistischen Gründen nicht möglich, da beide Insassen mit der Bedienung der Regelung bzw. der anspruchsvollen Manövrierung durch die Strömung beschäftigt waren.



Abb. 73: Szene einer Versuchsfahrt

Zurück am Simulationsmodell sollten die beobachteten Effekte natürlich ergründet werden. Zunächst wurden aus Überlegungen heraus folgende bislang unberücksichtigte Aspekte zur simulativen Wiedergabe und Analyse in das Modell eingearbeitet:

(1) Einfluss der Strömung:

Sie wirkt nicht (unmittelbar) als klassische Störung in Form einer Kraft, sondern vielmehr als Relativgeschwindigkeit, die für die korrekten Berechnungen von Widerstand und Schubkraft hinzu addiert werden muss. Die dem Regler aus der Messung zur Verfügung stehende absolute Geschwindigkeit bleibt davon unberührt (Abb. 74).

(2) Quantisierung der Messgröße:

Während die Simulation bislang mit zeitkontinuierlich vorliegenden Werten der aktuellen Regelgröße arbeitet, aktualisiert das GPS-Modul die gemessene Geschwindigkeit lediglich 2 mal pro Sekunde, also zeitdiskret. Je stärker das Boot während dieser halben Sekunde beschleunigt, desto stärker weicht auch die gemessene Istgröße von der tatsächlichen ab. Der Regler verarbeitet dann den fehlerbehafteten Systemzustand mit einem für das reale System suboptimalen Regeleingriff. Es ist ein Halteglied nullter Ordnung (sample and hold) in den Rückführzweig einzufügen (Abb. 75).

(3) Totbereich des Stellglieds:

Nach einer konkreten Untersuchung wurde festgestellt, dass eine Rotation des Propellers erst nach 30 % des verfügbaren Stellwinkels des Schubhebels einsetzt. An diesen "toten" Bereich muss die Kennlinie der Stellgröße sowohl im Modell, als auch im Programmcode angepasst werden (Abb. 76).

Die jeweilige Umsetzung ist in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

zu (1)

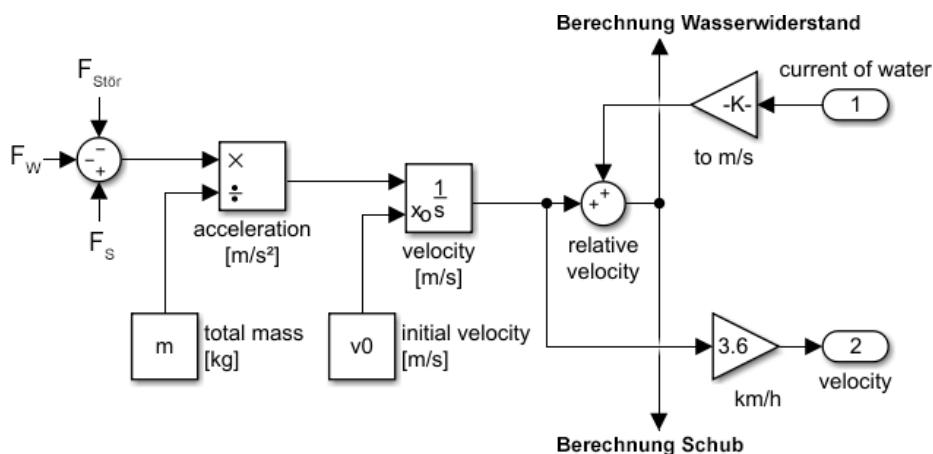


Abb. 74: Modellierung: Einfluss einer Strömung (current of water)

zu (2)

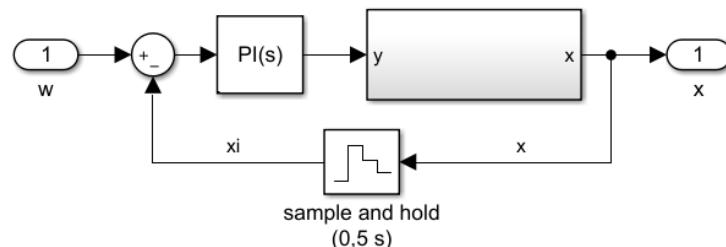


Abb. 75: Modellierung: Quantisierung der Messgröße (sample and hold)

zu (3)

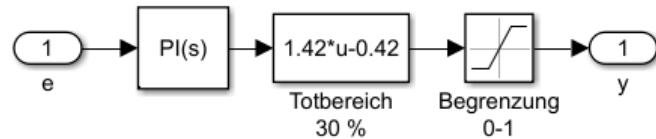


Abb. 76: Modellierung: Stellglied mit Totbereich (Kennlinie)

Das um die genannten Anpassungen ergänzte Modell konnte nun der Simulation der Fahrversuche dienen (Abb. 77).

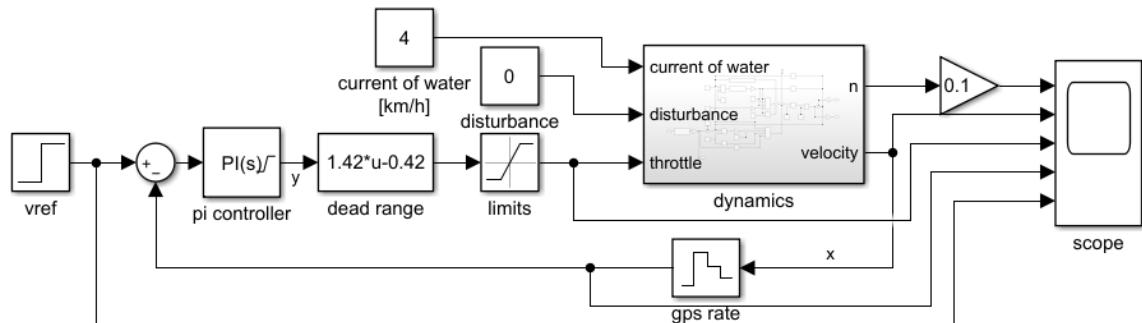


Abb. 77: Erweitertes Modell des Regelkreises

Der simulierte Verlauf mit den Daten aus Testfahrt 1 zeigt eine ebenfalls oszillierende Regelgröße (Abb. 78). Zwar klingt die Schwingung rascher ab, als im Fahrversuch, doch prinzipiell deutet das Ergebnis auf den erwarteten Optimierungsbedarf des Reglers hin.

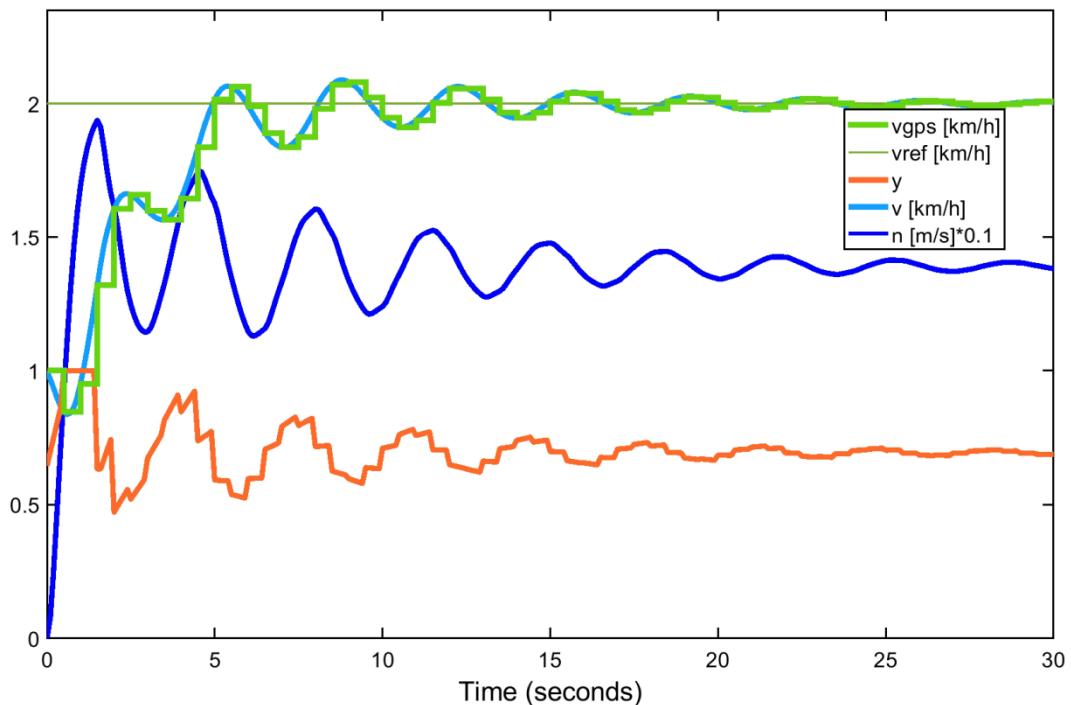


Abb. 78: Simulation: Testfahrt 1

Noch extremer würde der Regler reagieren wenn man dem GPS-Modul unterstellt, aktualisierte Geschwindigkeitsdaten nur jede volle Sekunde bereitzustellen (Abb. 79). Zur Erinnerung: Einfache Empfänger unterstützen nicht einmal Raten oberhalb von 1 Hz.

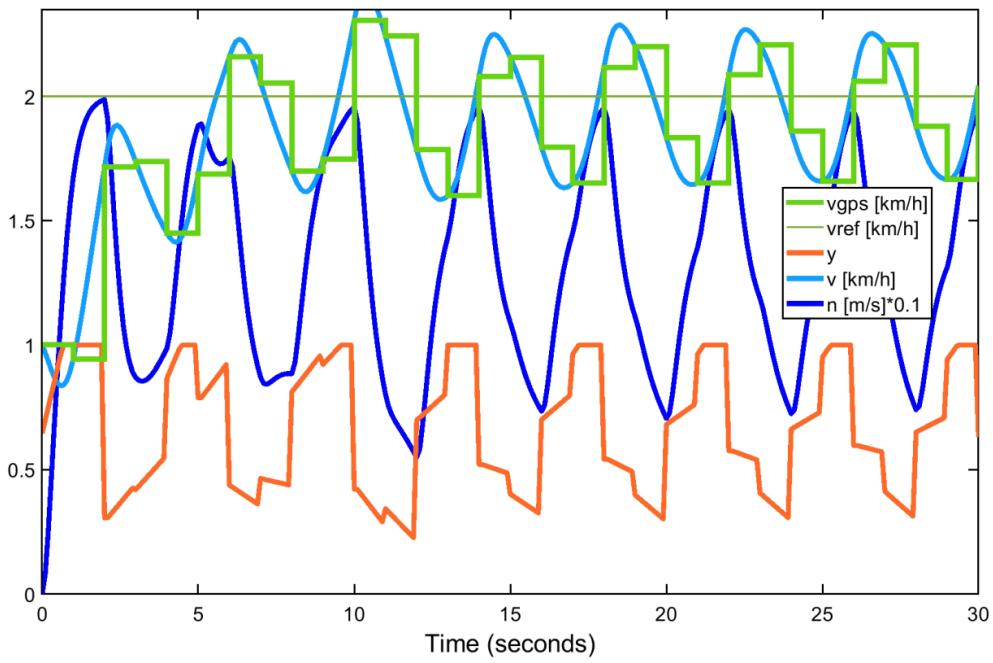


Abb. 79: Simulation: Testfahrt 1, GPS-Rate 1 Hz

Eine Kompensation des Totbereichs des Stellglieds führte immerhin zum Abklingen der Schwingung nach ca. 60 s. Diese Anpassung erweist sich also als durchaus notwendig.

Nach dem erneuten Einsatz des "PID-Tuner" von Simulink mit dem Ziel, die Schwingung zu tilgen, erhielt man jetzt eine wesentlich kleinere Reglerverstärkung im Bereich um 0,2 (zuvor 0,75) sowie eine Nachstellzeit um 3,5 s (zuvor 2 s). Händisch wurden weitere Szenarien von Sollwertsprüngen und Störeinflüssen simuliert und die Regelparameter im Sinne eines Kompromisses zwischen Anregelzeit und Überschwingverhalten justiert, woraus sich ergab:

$$K_p (\text{neu}) = 0,3 \quad T_n (\text{neu}) = 3 \text{ s} \quad (I = 0,1)$$

Das Ergebnis der Simulation der (fiktiven) Testfahrt 1 bezeugt eine deutlich höhere Regelgüte und ist in folgender Abb. 80 zu sehen.

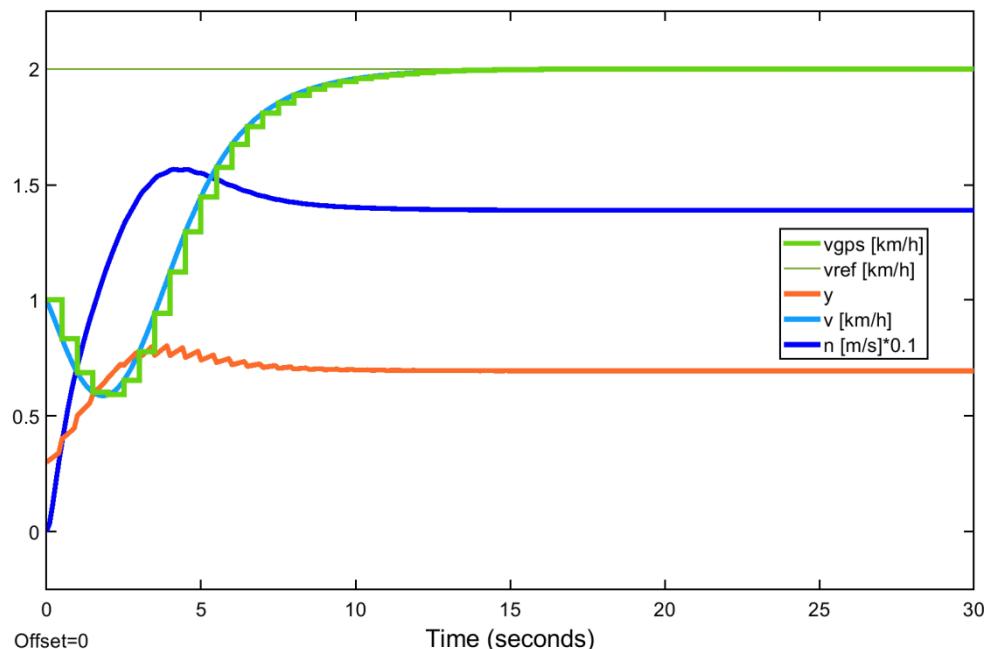


Abb. 80: Simulation: Testfahrt 1, optimierter Regler

Im Vergleich zur vermeintlich optimalen Auslegung in Abb. 51 (Kap. 4.4) hat das Systemverhalten auch bei einem größeren Sollwertsprung inkl. Störeintrag ( $F_{St}$ ) nicht merklich an Dynamik oder Stabilität verloren, s. Abb. 81.

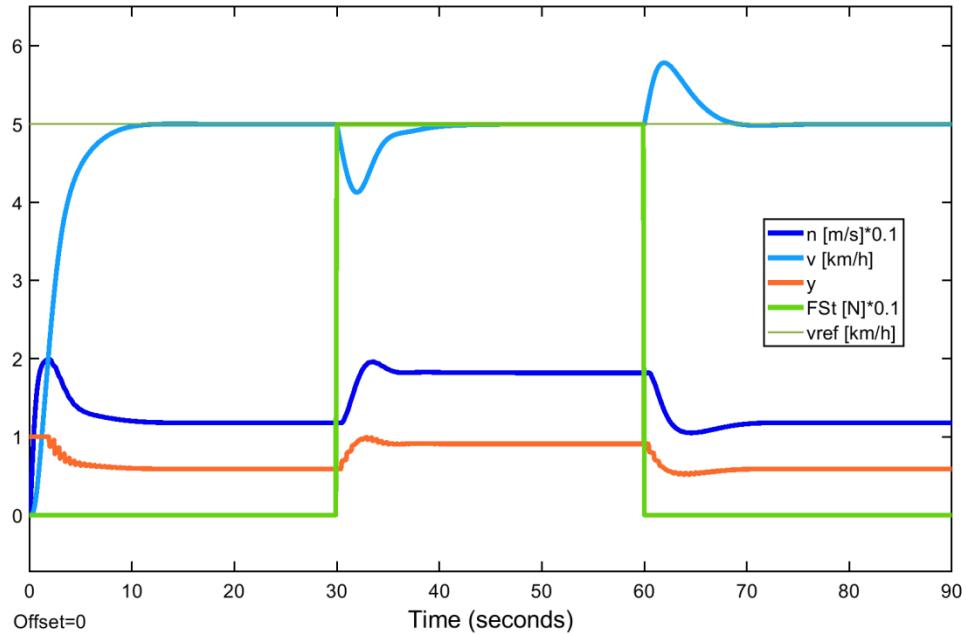


Abb. 81: Simulation: optimierter Regler, vgl. Abb. 51

Die mit den "alten" Parametern noch akzeptierten minimalen Überschwingvorgänge scheinen sich bei kleinen Sprunghöhen auf niedrigem Regelgrößenniveau fatal auszuwirken. Eine Erklärung dessen könnte die bereits angedeutete Nichtlinearität der Regelstrecke liefern. Sie liegt vor wenn der Verlauf des Streckenausgangs zu dem des Eingangs in einer nicht immer rein proportionalen Beziehung steht.

Die Berechnung der geschwindigkeitsbestimmenden Schubkraft und Fahrwiderstände des Bootes erfolgt u. a. durch Quadrierung, Logarithmierung oder Exponenzierung der rückgeführten Geschwindigkeit selbst. Zwischen den Größen besteht kein linearer Zusammenhang (allein) durch einen skalaren Faktor. Die Simulation des Übertragungsverhaltens erzeugte eine (fast) lineare Kennlinie (Abb. 45). Der quadratische Anstieg der Schubkraft scheint den annähernd quadratisch ansteigenden Fahrwiderstand zu "tilgen". Berücksichtigt man jedoch die Zeitspanne, also den Verlauf, bis sich am Ausgang der jeweilige stationäre Endwert eingestellt hat, wird die Nichtlinearität ersichtlich.

Verdeutlichen lässt sich das z. B. durch Auftragen der Streckenzeitzkonstante  $T_{63\%}^{17}$  über der jeweiligen Sprunghöhe ab Nullniveau (Abb. 82). Sie ist streng genommen nur für lineare Systeme definiert und da auch tatsächlich konstant. Ähnlich lässt sich auch eine Abhängigkeit des Regelgrößenverlaufs vom Arbeitspunkt (und damit Nichtlinearität) nachweisen, indem man der Strecke Eingangssprünge einheitlicher Höhe, aber unterschiedlichen Anfangsniveaus zuführt (Abb. 83, blaue Kurve). Sowohl die veränderliche Verstärkung, als auch der veränderliche Anstieg am Ausgang (rote Kurve) sagen aus, dass die Parameter eines Reglers für diese Strecke optimalerweise dynamisch oder auf den zu erwartenden Arbeitspunkt abgestimmt sein müssten. Ein statischer Regler kann hier ansonsten immer nur als relativ grober Kompromiss aller Arbeitspunkte auszulegen sein.

<sup>17</sup> Dauer bis 63 % des Endwerts erreicht sind

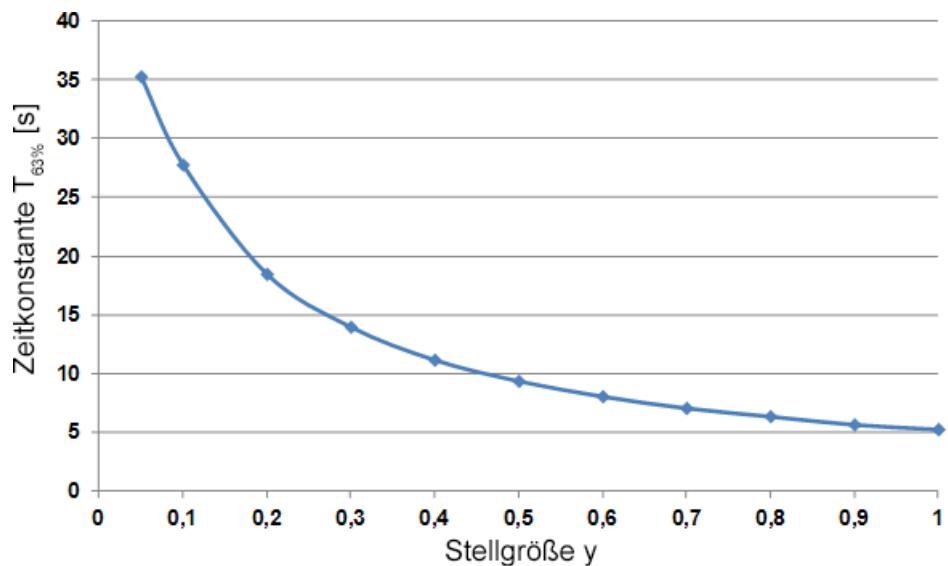


Abb. 82: Nichtlinearität der Regelstrecke (nach Sprunghöhe)

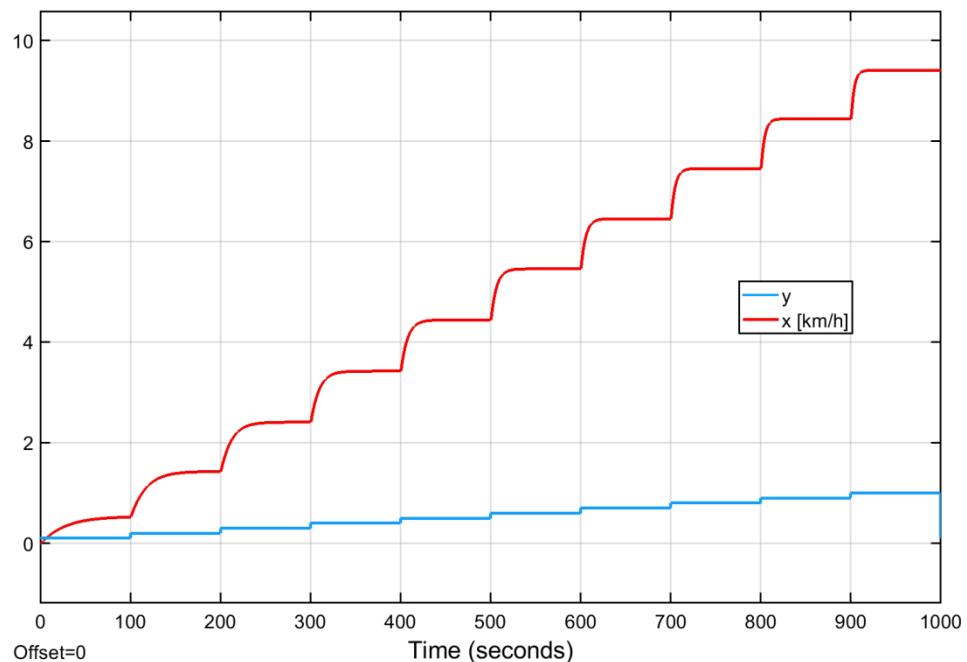


Abb. 83: Nichtlinearität der Regelstrecke (nach Arbeitspunkt)

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das in MATLAB/Simulink entwickelte Simulationsmodell der Längsdynamik eines elektrisch propellergetriebenen Kajaks konnte das reale System, bestehend aus Schubkraftgenerierung und Fahrwiderstandskomponenten, für den vorliegenden Versuchsträger zufriedenstellend abbilden. Trotz Vereinfachungen bei der mathematischen Beschreibung aufgrund der hohen Komplexität in Verbindung mit dem Medium Wasser stimmte der berechnete Verlauf der Geschwindigkeit in ausgewählten Szenarien über weite Bereiche mit dem gemessenen Fahrverhalten des Bootes überein.

Auf dieser Grundlage konnte ein Geschwindigkeitsregelkreis erstellt werden. Das System wurde als Strecke vom Typ PT<sub>2</sub> mit einem Zeitkonstantenverhältnis von 10 charakterisiert und durch einen PI-Regler ergänzt. Mit den Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick sowie anhand einzelner simulierter Führungs- und Störgrößensprünge wurden die Reglerparameter  $K_p = 0,75$  und  $T_n = 2$  s gewählt.

Der Regelalgorithmus wurde als Programmcode auf einen Mikrocontroller übertragen und mit selbst entwickelten Schnittstellen zur definierten Motoransteuerung über eine Emulation des Schubhebels sowie zur Messung der Absolutgeschwindigkeit mittels GPS-Empfänger erweitert.

Eine Versuchsfahrt konnte die grundsätzliche Funktion der Regelung nachweisen, zeigte jedoch auch die Notwendigkeit weiterer Anpassungen des Reglers insbesondere an das nichtlineare Streckenverhalten auf. Diese wurden bis dato nur simulativ validiert.

Um eine Robustheit im Großteil der möglichen Arbeitspunkte zu gewährleisten, muss die Verstärkung auf  $K_p = 0,3$  gesenkt und die Nachstellzeit auf  $T_n = 3$  s erhöht werden. Bei der Ansteuerung des Motors ist die bestehende Totstrecke zu Beginn des Schubhebelwegs zu eliminieren. Die Aktualisierungsrate der GPS-Daten von 2 Hz ist nicht zu unterschreiten, ggf. ist eine Signalglättung vorzusehen. Zur Optimierung der Regelung sollten weiterführend Kompensationsmethoden wie eine dynamische Parametrierung oder die Einbindung der Inversen der Nichtlinearität untersucht werden.

Perspektivisch kann die Funktionalität durch eine integrierte Fahrtrichtungserkennung und aktives Bremsen erheblich aufgewertet werden (z. B. für "elektronisches Ankern").



Abb. 84: Ein PADDELEC im Einsatz (Symbolbild)

## Literaturverzeichnis

- [1] „EMILY - Robotic Rescue Boat“ Hydronalix Inc., Sydney (AUS), [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://www.emilyrobot.com.au>
- [2] „Absatz von E-Bikes in Deutschland von 2009 bis 2018“ Statista GmbH, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152721/umfrage/absatz-von-e-bikes-in-deutschland>
- [3] Kaitts Ltd. (UK), „Produktseite: "Grampus II" (Kajakprofi)" [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://www.kajakprofi.de/zweierkajak/kunststoff-kajak/kaitts-zweierkajak-grampus-ii\\_1010009627\\_6135](https://www.kajakprofi.de/zweierkajak/kunststoff-kajak/kaitts-zweierkajak-grampus-ii_1010009627_6135)
- [4] „Wie das deutsche Tesla den Bootsmotor revolutioniert“ Handelsblatt, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/torqeedo-auf-der-boot-2018-wie-das-deutsche-tesla-den-bootsmotor-revolutioniert/20872732.html>
- [5] Torqeedo GmbH, „Produktseite: Ultralight 403“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://www.torqeedo.com/de/produkte/aussenborder/ultralight/ultralight-403/1404-00.html>
- [6] Torqeedo GmbH, „Propellertechnik“ September 2019. [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://www.torqeedo.com/de/technik-und-umwelt/propeller-technology.html>
- [7] J. S. Carlton, Marine propellers and propulsion, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [8] K. Beckmann, „Planet Wissen“ Westdeutscher Rundfunk Köln, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://www.planet-wissen.de/geschichte/persoenlichkeiten/james\\_cook\\_entdecker\\_aus\\_leidenschaft/p\\_wiewissensfrage534.html](https://www.planet-wissen.de/geschichte/persoenlichkeiten/james_cook_entdecker_aus_leidenschaft/p_wiewissensfrage534.html)
- [9] „Echolot / Navigationslote und Fischfinder“ Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Echolot#Navigationslote\\_und\\_Fischfinder](https://de.wikipedia.org/wiki/Echolot#Navigationslote_und_Fischfinder)
- [10] J.-M. Zogg, GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten, 2011.
- [11] „Globales Navigationssatellitensystem“ Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Globales\\_Navigationssatellitensystem](https://de.wikipedia.org/wiki/Globales_Navigationssatellitensystem)
- [12] T. J. Chalko, „High accuracy speed measurement using GPS (Global Positioning System)“, 2007.
- [13] *NEO-M8P Data Sheet*, u-blox AG (CH), 2017.
- [14] S. Krüger, „Strömungsmechanische Grundlagen zum Glattwasserwiderstand“ Technische Universität Hamburg (TUHH), 2009.
- [15] K. L. Schulte, „Der Propeller - das unverstandene Wesen“ K.L.S. Publishing, 2007.

- [16] J. Bakker und P. van Vlaardingen, „Wetted surface area of recreational boats“ RIVM Report 2017-0116, National Institute for Public Health (NL).
- [17] „Ship resistance and propulsion“ Wikipedia, The Free Encyclopedia, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ship\\_resistance\\_and\\_propulsion](https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_resistance_and_propulsion)
- [18] Rothe, Der Widerstand und Antrieb von Schiffen, Nabu Press, 2011.
- [19] L. Eça, „The numerical friction line“ *Journal of Marine Science and Technology*, November 2008.
- [20] U.S. Naval Academy Course, „Resistance and Powering of Ships“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://www.usna.edu/NAOE/\\_files/documents/Courses/EN400/02.07%2520Chapter%25207.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/02.07%2520Chapter%25207.pdf)
- [21] K. Kleppestø, Empirical prediction of resistance of fishing vessels (Masterarbeit), NTNU Trondheim, 2015.
- [22] C. F. Mayer, Schiffstechnik und Schiffbautechnologie, Hamburg: Seehafen-Verl., 2006.
- [23] V. Stejskal, „Kayak Design comparison (oneoceankayaks.com)“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <http://www.oneoceankayaks.com/kayakpro/kayakgrid.htm>
- [24] N. Kornev, „Propellertheorie“ Universität Rostock, 2009.
- [25] S. Krüger, „Schiffspropeller“ Technische Universität Hamburg (TUHH), 2005.
- [26] Torqeedo GmbH, „Technische Zeichnung Ultralight 403“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://media.torqeedo.com/technical-drawings/torqeedo-ultralight-403-measurements.pdf>
- [27] M. Barnitsas, D. Ray und P. Kinley, „Kt, Kq and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers“ 1981.
- [28] R. Schönfeld und H. W., Elektrische Antriebe und Bewegungssteuerungen, VDE, 2005.
- [29] G. Mentges, „Deutsche Klassenvereinigung und Ausschuss RC-Segeln im DSV“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://www.radiosailing.de/technik/konstruktion/161-1983-modelljachtkonstruktion>
- [30] M. Reuter und S. Zacher, Regelungstechnik für Ingenieure, Vieweg+Teubner, 2008.
- [31] „AS5045 Rotary Sensor“ ams AG, [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://ams.com/as5045>
- [32] „GitHub - DashZhang/AS5045: Dash's AS5045 library for Arduino“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: <https://github.com/DashZhang/AS5045>
- [33] „User Manual: UM1724 STM32 Nucleo-64 boards (MB1136)“ [Online, Stand: 25.10.2019]. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105823.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105823.pdf)
- [34] J. Holtrop und G. Mennen, „An approximate power prediction method“ *International Shipbuilding Progress, ISP, Volume 29*, 1982.

## **Erklärung über die eigenständige Erstellung der Arbeit**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorgelegte Arbeit mit dem Titel

**"Entwicklung und Erprobung einer Geschwindigkeitsregelung  
zum Einsatz in einem elektrisch unterstützten Kajak - PADDELEC"**

selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit als solche und durch Angabe der Quelle gekennzeichnet habe. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Mir ist bewusst, dass die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden Prüfungsarbeiten stichprobenartig mittels der Verwendung von Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft.

Ferner gestatte ich der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, die beiliegende Diplomarbeit unter Beachtung insbesondere urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

Es ist mir bekannt, dass für die Weitergabe oder Veröffentlichung der Arbeit die Zustimmung der HTW Dresden sowie der an der Aufgabenstellung und Durchführung der Arbeit unmittelbar beteiligten Partnereinrichtungen erforderlich ist.

Dresden, 25.10.2019

---

André Nassonow