

Rekonstruktion von natürlichen Laufbewegungen der Ratte mit Hilfe von Magnet- und Inertialsensoren

Diplomarbeit

Lehrstuhl Kognitive Neurowissenschaften
Wilhelm Schickard-Institut für Informatik
Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften
Universität Tübingen

von

Martin Zeiß

Betreuer: Dr. Johannes Thiele

1. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel
2. Gutachter: Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot

Tag der Abgabe: 2.3.2009

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Tübingen, den 2.3.2009

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein Sensorknoten entwickelt, der von einer Ratte getragen werden kann und mit Hilfe von Inertial- und Magnetsensoren deren Bewegungen aufzeichnet. Ziel ist die Rekonstruktion von Position und zurückgelegter Wegstrecke des Tieres unter Anwendung eines Dead Reckoning-Ansatzes. Die Arbeit beschreibt die Funktionsweise der Sensoren, die Komponenten der Hard- und Software des Sensorknotens und die Kalibrierung der Sensoren. Es wird ein Aufbau vorgestellt, in dem experimentelle Daten mit Versuchstieren aufgezeichnet und mit den tatsächlichen Bewegungen verglichen werden kann. Verfahren zur Schritterkennung und zur Fusion von Gyroskop- und Kompassdaten werden angewandt, um die nötigen Informationen für den Dead Reckoning-Ansatz zu erhalten. Zum Schluss werden die Ergebnisse zur Rekonstruktion der Trajektorien präsentiert und bewertet. Außerdem werden nötige Anpassungen für einen Einsatz des Sensorknotens in realistischer Umgebung diskutiert.

Danksagung

Ich möchte mich vor allem bei Dr. Johannes Thiele für die gute Betreuung und die unermüdliche Hilfe bei der Erstellung der vielen Hardware-Revisionen bedanken, sowie bei Okuary Osechas für gute Ratschläge im theoretischen Teil der Arbeit.

Besonderen Dank auch an Ruth Raschke und Sabine Pohl für die langwierige Arbeit des Korrekturlesens.

Und zuletzt will ich auch den restlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls danken für die wirklich angenehme Arbeitsatmosphäre während des letzten Jahres.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
1.1	Das Ratpack-Projekt	2
1.2	Zielsetzung der Diplomarbeit	3
1.3	Übersicht	4
2	Grundlagen	6
2.1	Positionsbestimmung durch Dead Reckoning	6
2.2	Verfügbare Sensortypen	6
2.2.1	Accelerometer	6
2.2.2	Gyroskope	7
2.2.3	Magneto-resistive Sensoren	8
2.3	Datenaufbereitung: Der Kalmanfilter	12
3	Konzeption des Sensorknotens	14
3.1	Beschreibung der Hardware-Komponenten	15
3.1.1	Eingesetzte Sensoren	15
3.1.2	Der Mikroprozessor CC2430	17
3.1.3	Energieverbrauch	18
3.2	Beschreibung der Software	18
3.2.1	Die Bibliothek Nanostack	18
3.2.2	Datenaufzeichnung und Kommunikation	20
4	Kalibrierung der Sensoren	22
4.1	Integrierter 2D-Kompass	22
4.1.1	Fehlerabschätzung	23
4.2	Gyroskop	24
4.2.1	Fehlerabschätzung	24
4.3	Accelerometer	25
4.3.1	Fehlerabschätzung	26
5	Versuche	28
5.1	Die Versuchsumgebung	28
5.1.1	Aufbau	28
5.1.2	Ablauf der Versuche	29
6	Analyse der Messdaten	32
6.1	Detektion von Schrittereignissen	32
6.1.1	Vorverarbeitung: Filter	33
6.1.2	Regelbasierte Identifizierung von Schrittereignissen	34
6.1.3	Analyse der Schrittparameter	35
6.2	Richtungsschätzung	37
6.2.1	Fusion von Gyroskop- und Kompassdaten	38
6.2.2	Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen	40
6.3	Rekonstruktion der Trajektorien	40
6.3.1	Selektion relevanter Daten	40
6.3.2	Fusion von Trajektorien	42

7	Diskussion	46
7.1	Implementierung des vorgestellten Verfahrens	46
7.2	Umsetzung für reale Anwendungen	47
8	Zusammenfassung und Ausblick	50

1 Einführung

Für die Erforschung des Sozialverhaltens von Tierarten in ihren natürlichen Lebensräumen ist es in hohem Maße interessant, die Bewegungen einzelner Tiere kontinuierlich nachverfolgen zu können. Zahlreiche Fragestellungen wie die Strategien bei der Futtersuche, die Orientierung in großen Aktionsgebieten oder die Interaktion zwischen den Individuen können mit Hilfe von aufgezeichneten Bewegungsprofilen untersucht werden. Bisher wurden für die Erhebung solcher Daten zum Beispiel von den Tieren getragene Radiosender verwendet, die durch Anpeilen aus verschiedenen Richtungen je nach Abstand auf einige 100 Meter genau geortet werden können [1]. Außer der relativ ungenauen Positionsbestimmung und der Abschirmung des Radiosignals durch Objekte in der Sichtlinie zum Sender ist auch der hohe personelle Aufwand für die manuellen Peilungen von Nachteil. Im Zuge der Miniaturisierung von Elektronikkomponenten wurden in den letzten Jahren GPS-Empfänger verfügbar, die von größeren Säugetieren getragen werden können. Der Vorteil besteht in der Möglichkeit einer absoluten Positionsbestimmung im Bereich von wenigen Metern, Voraussetzung dafür ist allerdings eine Sichtverbindung zu mindestens drei GPS-Satelliten. Für Tiere, die sich hauptsächlich unter der Erdoberfläche aufhalten, sind also andere Hilfsmittel nötig. In [2] wird ein System vorgestellt, das mit Hilfe von Inertial- und Strömungssensoren sowie einem elektronischen Kompass die Verfolgung von Meeressäugern unterhalb der Wasseroberfläche erlaubt, dabei wird ein sogenannter Dead-Reckoning-Algorithmus verwendet. Aufgrund der Geschwindigkeitsmessung durch Strömungssensoren ist dieses System allerdings auf den Einsatz unter Wasser angewiesen. Für andere größtenteils unter der Erdoberfläche lebenden Säugetiere, wie zum Beispiel viele Nagetiere, existieren noch keine geeigneten Mittel zur Aufzeichnung eines Bewegungsprofils.

1.1 Das Ratpack-Projekt

Diese Diplomarbeit ist Teil des *Ratpack*-Projekts, das sich zum Ziel gesetzt hat, die technischen Voraussetzungen für die Beobachtung von Wanderratten (*Rattus norvegicus*) zu schaffen. Trotz der weit verbreiteten Verwendung in Laborexperimenten ist über das Verhalten dieser Tierart in ihrer natürlichen Umgebung wenig bekannt. Viele immer noch aktuelle Erkenntnisse über das Sozialverhalten der Wanderratte basieren auf Untersuchungen, die z.B. 1963 von J.B. Calhoun publiziert wurden [3]. Darin wurde unter anderem die Struktur von Rattenbauen durch die Ausgrabung der Gangsysteme erforscht, ein Beispiel dafür ist in Abb.1 zu sehen. Im Rahmen des *Ratpack*-Projekts soll ein von den Tieren tragbarer Sensorknoten entstehen, der seine Position bestimmen und protokollieren kann, und so auf nondestruktive Weise die Rekonstruktion eines solchen Gangsystems ermöglicht. Dabei sollen die Daten drahtlos übertragen werden, sobald ein Tier seinen Bau verlässt und sich in die Nähe einer Empfangsstation begibt. Innerhalb des Gangsystems, wenn der Erdboden den Funkkontakt unterbindet, sollen die Daten zwischengespeichert werden. Beim gleichzeitigen Einsatz mehrerer Sensorknoten sollen diese untereinander ein Netz aufbauen können, um aufgezeichnete Daten über mehrere Netzknoten an die Erdoberfläche übertragen zu können. Aus den Informationen über die Konnektivität des Netzes lassen sich auch Begegnungen der Tiere registrieren. Zur Untersuchung weiterer Aspekte des Sozialverhaltens werden zusätzliche Sensoren in Betracht gezogen, z.B. wird an einem Ultraschall-Detektor für die Klassifikation von Rattenschreien gearbeitet. Im Vorfeld der Diplomarbeit waren mit einem Accelerometer ausgestattete Prototypen von Sensorknoten auf Basis der MICA2DOT-Plattform [4] im Einsatz, die erfolgreich auf Versuchstieren getestet wurden. Um die Sensorknoten mit weiteren Sensoren bestücken zu können und eine höhere Rechenleistung bei geringerem Stromverbrauch zu erhalten, wurde für die Entwicklung neuer Prototypen im Rahmen der Diplomarbeit der Transceiver CC2430 von Texas Instruments verwendet [5].

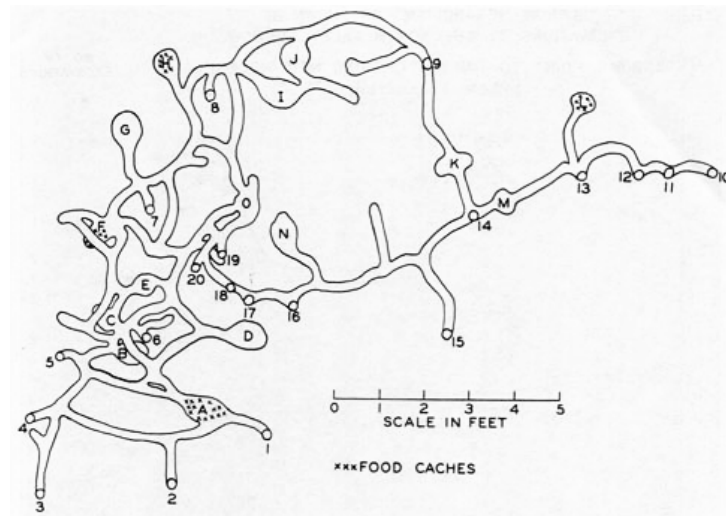


Abb. 1: Gangsystem eines Baues der *Rattus norvegicus* nach Calhoun [3]

1.2 Zielsetzung der Diplomarbeit

In dieser Diplomarbeit soll untersucht werden, ob es mit der gegebenen Plattform und passenden Inertial- und Magnetsensoren möglich ist, mit einem Dead Reckoning-Ansatz die von Ratten zurückgelegten Wegstrecken zu verfolgen. Das Ziel soll die Rekonstruktion eines von Versuchstieren durchlaufenen Gangsystems anhand der aufgezeichneten Daten sein. Dazu sind folgende Unteraufgaben zu bearbeiten:

- Entwurf einer Hardware-Schaltung des Sensorknotens, die die Anforderungen des neuen Transceivers und der eingesetzten Sensoren berücksichtigt
- Erstellen einer Software auf Basis des gegebenen Frameworks, die das Auslesen, Bearbeiten und Übertragen der Sensordaten implementiert
- Programmierung einer Basisstation zum Empfang und Abspeichern der Daten
- Durchführung von Kalibrierungsmessungen für alle Sensoren
- Aufbau einer geeigneten Versuchsumgebung mit einem künstlichen Gangsystem
- Einsatz des Sensorknotens an Tieren in der Versuchsumgebung, Aufzeichnung einer genügend großen Anzahl von Läufen
- Aufbereitung der Daten für die Anwendung des Dead Reckoning-Algorithmus
- Finden eines Verfahrens zur Rekonstruktion des Gangsystems und Bewertung der Qualität des Ergebnisses

1.3 Übersicht

Der Rest der Diplomarbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 werden die Grundlagen zu den verwendeten Sensoren und Verfahren beschrieben. Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Aufbau der Hard- und Software des Sensorknotens. Die Kalibrierung der Sensoren und Abschätzungen zu deren Qualität werden in Kapitel 4 behandelt. Es folgt Kapitel 5 mit der Beschreibung der Versuchsumgebung und der Aufzeichnung von Testläufen. In Kapitel 6 wird die schrittweise Auswertung der Daten gezeigt und das Ergebnis der Rekonstruktion eines Gangsystems präsentiert. Kapitel 7 beschreibt die Implementierung der Auswertungsroutinen und gibt eine Einschätzung ab, ob eine Umsetzung für den Einsatz in realen Umgebungen möglich ist. Zuletzt fasst Kapitel 8 die behandelten Aspekte der Diplomarbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf die Fortführung der Entwicklung.

2 Grundlagen

2.1 Positionsbestimmung durch Dead Reckoning

Die Begriff des „Dead Reckoning“ geht auf die frühe Seefahrt zurück, wo er für eine mit den damaligen Mitteln mögliche Art der Navigation stand: In regelmäßigen Abständen wurde der Steuerkurs per Kompass bestimmt und gleichzeitig die Geschwindigkeit zur Wasseroberfläche mit einem Handlog ermittelt. Zusammen mit den Annahmen, dass in der Zeit zwischen zwei dieser Messungen Geschwindigkeit und Steuerkurs konstant bleiben und die Meeresströmung keinen großen Einfluss ausübt, konnte damit zu jedem Zeitpunkt die relative Positionsänderung eines Schiffes seit dem letzten exakt bekannten Aufenthaltsort (Landmarke, Hafen) berechnet werden. Dieses Verfahren akkumuliert allerdings die Ungenauigkeiten aller vorausgegangenen Positionsbestimmungen. Die genannten Annahmen treffen umso weniger zu, je länger die Zeitintervalle zwischen den Messungen ausfallen, was die Fehler in jedem Schritt weiter vergrößert. Heute haben im Bereich der Seefahrt neue technische Möglichkeiten zur Positionsbestimmung wie Radar und das Global Positioning System (GPS) das Dead Reckoning abgelöst. Navigation und Positionsbestimmung werden aber mittlerweile auch in Bereichen interessant, in denen kein GPS-Signal zur Verfügung steht. Forschungsprojekte wie z.B. ein Navigationssystem für Fußgänger innerhalb von Gebäuden [6], die schon erwähnte Verfolgung von Meeressäugern [2] oder die Positionsbestimmung eines auf der Marsoberfläche operierenden Roboters [7] versuchen daher, auf Dead Reckoning basierende Verfahren mit einer für den jeweiligen Zweck ausreichenden Genauigkeit der Positionsbestimmung zu entwickeln. Mit Hilfe verschiedener elektronischer Sensoren werden in diesen Projekten die nötigen Parameter der Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung indirekt bestimmt, typisch ist die Messung der Beschleunigungen, Winkelgeschwindigkeiten und Magnetfeldstärken. Die verwendete Technik erlaubt es, die Zeitintervalle zwischen den Messungen sehr klein zu halten und damit eine der Fehlerquellen des Dead Reckoning zu minimieren. Zusätzlich wird in [2] versucht, Messungenauigkeiten durch redundante Beobachtung einer Messgröße mit verschiedenen Sensortypen auszugleichen, um die Qualität der Positionsbestimmung weiter zu erhöhen.

2.2 Verfügbare Sensortypen

2.2.1 Accelerometer

Accelerometer sind darauf ausgelegt, lineare Beschleunigungen zu messen. Die Fortschritte in der Herstellung von Strukturen im μm -Bereich haben es ermöglicht, solche Sensoren in sogenannter „Micro-Electro-Mechanical Systems“ (MEMS)-Technologie zu konstruieren. Dabei wird aus einer Schicht Silizium eine Probemasse mit exakt bekanntem Gewicht herausgeätzt, so dass sie über filigrane Verbindungsstücke mit einem Rahmen verbunden ist. Diese Verbindungsstücke werden allein durch ihre geringe Dicke und ihre Anordnung in Schlaufen biegsam und übernehmen die Rolle einer Federaufhängung. In Abb.2 ist ein solcher Aufbau mit einer in allen drei Achsen beweglichen Masse zu sehen.

Wirkt von Außen eine Beschleunigung ein, wird die Masse aus ihrer Ruhelage ausgelenkt und beginnt zu schwingen, bis die kinetische Energie durch die Dämpfung der Federn absorbiert ist. Sind außer der Probemasse m noch die Federkonstante D und die Dämpfung k des Systems bekannt, kann der Zusammenhang zwischen der Größe der Beschleunigung a und der Auslenkung x nach dem 2. Newtonschen Gesetz als

$$\frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + s \cdot k/m + D/m} \quad (1)$$

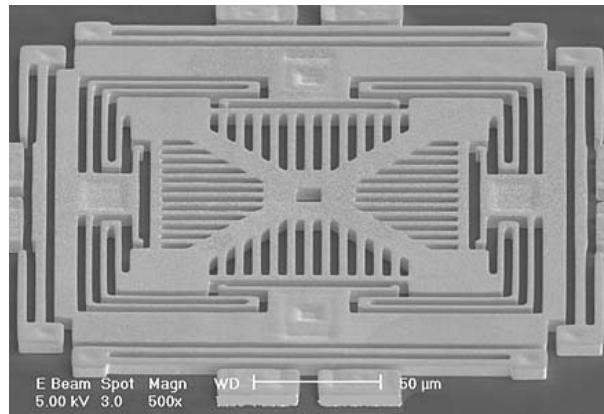


Abb. 2: Mikrostrukturen eines 3D-Accelerometers. Quelle: [8]

beschrieben werden [9]. Um die Auslenkung der Probemasse zu registrieren, wird diese als Teil eines Plattenkondensators konzipiert. Dazu sind Kammstrukturen in die Masse eingearbeitet, die in verschiedenen Teilbereichen orthogonal zueinander angeordnet sind. In einer Ebene unter der Probemasse sind die entsprechenden Gegenstücke platziert. Die Kapazität eines Plattenkondensators mit einer von beiden Platten gemeinsam bedeckten Fläche A , deren Abstand d und den Dielektrizitätskonstanten ϵ_0 , ϵ_r ist gegeben durch

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} . \quad (2)$$

Die Kammstrukturen der Platten sind so angeordnet, dass die Fläche A in Ruhelage maximal ist. Wird die Probemasse in eine Richtung senkrecht zu einer solchen Struktur ausgelenkt, verkleinert sich die von beiden Platten gemeinsam überdeckte Fläche, was zu einer Verringerung der Kapazität führt. Bei den längs zur Bewegungsrichtung stehenden Kämmen ändert sich A nicht, folglich bleibt C konstant. So können die zu den Platten parallelen Komponenten einer externen Beschleunigung gleichzeitig registriert werden. Eine Beschleunigung senkrecht zu den Platten bewirkt eine Änderung des Abstands d , der die Kapazitäten aller Teilkondensatoren beeinflusst. Konstant einwirkende Beschleunigungen wie z.B. die Gravitation bewirken eine konstante Abweichung der Position der Probemasse von der Ruhelage und können mit dem Verfahren ebenfalls registriert werden. Die variablen Kapazitäten in jeder Achse werden von einer integrierten Schaltung üblicherweise in Analogspannungen umgewandelt, deren Betrag sich proportional zur einwirkenden Beschleunigung verhält. Störende Einflüsse für den Sensor können elektrische Felder sein, die eine Ladungsverschiebung auf den Kondensatorplatten verursachen.

2.2.2 Gyroskope

Der Aufbau von MEMS-Gyroskopen besitzt Ähnlichkeiten zu den beschriebenen Accelerometern. Es werden ebenfalls Probmassen in Mikrostrukturen gefertigt, deren Bewegungen durch kapazitive Effekte erfasst werden. Verschiedene Bauformen sind möglich, das Funktionsprinzip beruht aber immer auf der Detektion der Corioliskraft, die bei der Rotation des Sensors um seine sensitive Achse entsteht. In Abb.3 ist ein Beispiel eines möglichen Aufbaus zu sehen.

Im Zentrum liegt eine runde Scheibe, die beweglich in einem Rahmen aufgehängt ist. In diese Scheibe sind zwei Probmassen eingelassen, die ebenfalls an Federn befestigt sind, so dass sie sich entlang einer Achse bewegen können. Diese Massen werden beide zu einer definierten

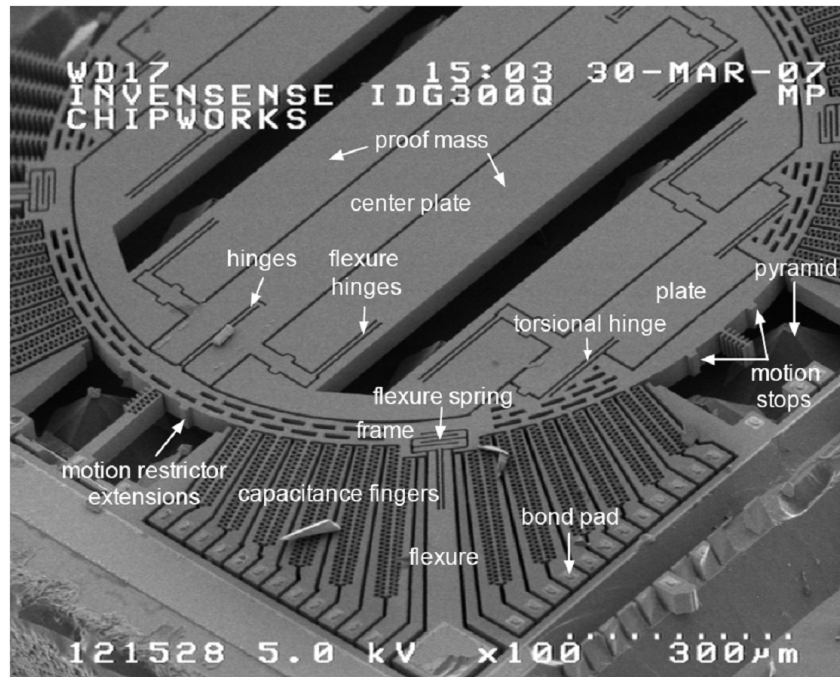


Abb. 3: Aufbau eines Gyroskops zur Detektion von Drehbewegungen um eine Achse. Quelle: [10]

Schwingung angeregt. Die Corioliskraft wirkt in einem rotierenden Koordinatensystem mit Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ auf eine bewegte Masse m mit Geschwindigkeit \vec{v} als

$$\vec{F} = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad . \quad (3)$$

Bei einer externen Rotation des Sensors um die Achse, die senkrecht zur Auslenkungsrichtung der Probmassen in der Aufhängungsebene der Scheibe liegt, wirkt demnach eine Kraft senkrecht zu dieser Ebene. Die Scheibe wird folglich in Richtung dieser Kraft aus der Ebene ausgelenkt und fängt an zu schwingen. Die Kammstrukturen am Rand der Aufhängung dienen als Plattenkondensator, der durch die Änderung seiner Kapazität die Auslenkung der Scheibe messbar macht. Aus der Proportionalität von \vec{F} und der Auslenkung kann bei bekanntem \vec{v} die einwirkende Winkelgeschwindigkeit ω ermittelt werden. Wie in den Accelerometern sind in den Sensor Schaltungen zur Aufbereitung und Ausgabe der Messgrößen als Analogspannungen integriert.

2.2.3 Magneto-resistive Sensoren

Das Erdmagnetfeld Das Erdmagnetfeld bietet eine Möglichkeit, an fast jedem beliebigen Ort der Erde die Orientierung bezüglich der Nordrichtung festzustellen. Seine Entstehung ist noch nicht vollständig geklärt, nach heutiger Auffassung ist der Geodynamo-Prozess die Ursache. Dabei erzeugen, analog zu elektrischem Strom, langsam fließende Konvektionsströme aus flüssigem, ionisierten Eisen im äußeren Erdmantel jeweils ein Magnetfeld senkrecht zur Flussrichtung.

Die Kombination aller dieser Felder kann an der Erdoberfläche in erster Näherung durch einen magnetischen Dipol im Erdkern beschrieben werden [12]. Dabei muss beachtet werden, dass der magnetische Nordpol nicht mit dem geographischen übereinstimmt und seine Position sich täglich in der Größenordnung von 100m verschiebt. In Deutschland beträgt die Missweisung zwischen Feldlinien und geografischem Nordpol momentan 0-2°. Wie in Abb.4 zu sehen, tauchen die

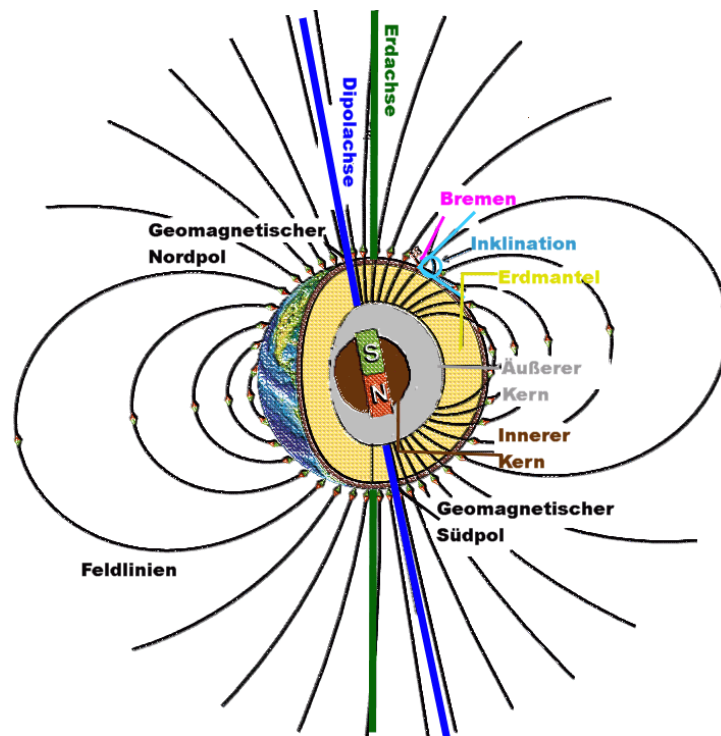


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Erdmagnetfelds durch einen Dipol. Quelle: [11]

Feldlinien abhängig von der geographischen Breite mit unterschiedlichen Inklinationen δ in die Erdoberfläche ein. Der Wert für δ liegt für Deutschland bei ca. $63\text{-}70^\circ$. Magnetisierte Gesteinsschichten in der Erdkruste können das Hauptmagnetfeld überlagern und so die genannten Werte lokal beeinflussen.

Aufbau des Sensors Die ferromagnetische Nadel des klassischen mechanischen Kompass richtet sich bei horizontaler Lagerung stets parallel zur horizontalen Komponente des Magnetfelds aus und zeigt damit in Richtung des magnetischen Nordpols. Im Gegensatz dazu besitzen magnetoresistive Sensoren keine beweglichen Komponenten. Sie messen nicht direkt die Richtung, sondern die Stärke einer Komponente des Magnetfelds und verwenden dazu folgenden Aufbau:

- Eine Legierung aus etwa 81% Nickel und 19% Eisen, sogenanntes μ -Metall, besitzt eine besonders hohe magnetische Permeabilität. Diese Legierung wird in einem dünnen Film auf ein Silizium-Substrat aufgebracht. Es werden Leiterbahnen geformt, die in regelmäßigen Abständen im Winkel von 45° von gewöhnlichem leitenden Material gekreuzt werden.
- Durch Anlegen eines starken Magnetfelds beim Herstellungsprozess werden die einzelnen aus μ -Metall bestehenden Segmente so magnetisiert, dass der Magnetisierungsvektor parallel zum Verlauf der Leiterbahn steht.
- Wird an eine solche Leiterbahn eine Spannung angelegt, fließt ein Strom jeweils über die kürzeste Wegstrecke durch ein μ -Metall-Segment, d.h. im Winkel von 45° zur Leiterbahn.
- Der Widerstand von μ -Metall ist abhängig vom Winkel zwischen dem Magnetisierungsvektor und der Richtung des Stromflusses; das Maximum wird erreicht, wenn beide Größen

parallel orientiert sind. Ein externes Magnetfeld addiert sich zu dem Magnetisierungsvektor und ändert damit den Gesamtwiderstand der Leiterbahn.

- Vier dieser Leiterbahnen werden entsprechend Abb.5 zu einer Wheatstone-Brücke angeordnet. Verläuft das zu messende Magnetfeld in der Abbildung horizontal, sind die Widerstände der Leiterbahnen der rechten und der linken Seite der Schaltung gleich groß, und damit auch die Spannungen an den Ausgängen *Out+* und *Out-*. Verläuft es horizontal, ergeben sich für die beiden Seiten jeweils unterschiedliche Winkel zwischen Magnetisierungsvektor und Stromfluss. Daher wird die angelegte Spannung im Verhältnis der Widerstände beider Seiten geteilt. Die Differenzspannung zwischen *Out+* und *Out-* ergibt das Ausgangssignal.

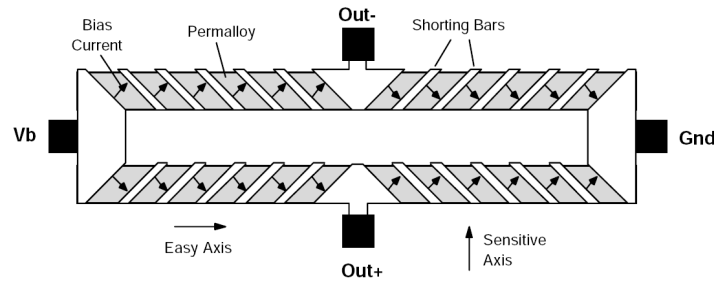


Abb. 5: Sensor bestehend aus einer Wheatstone-Brücke mit magnetoresistiven Elementen. Die Pfeile zeigen den Stromfluss an. Quelle: [12]

Kritisch für den Sensor ist eine konstant bestehende Magnetisierung des μ -Metalls. Daher sind um die vier Leiterbahnen herum Spulen gewickelt, mit denen bei Bedarf durch Set- bzw. Reset-Strompulse die Magnetisierung in definierter Stärke wiederhergestellt oder aber umgepolt werden kann. Durch Messungen bei wechselnder Polung der Magnetisierung lässt sich der Offset eliminieren, der z.B. durch temperaturbedingt verstärkte Unterschiede im Gesamtwiderstand der beiden Seiten der Wheatstone-Brücke entsteht.

Richtungsmessung mit 2D-Sensor Werden zwei der beschriebenen magnetoresistiven Sensoren in einem 90° -Winkel zueinander orientiert und in eine horizontale Lage gebracht, kann die Verteilung der Komponenten des Magnetfelds auf die sensitiven Achsen dazu verwendet werden, die Orientierung zur Nordrichtung zu berechnen. Seien H_x und H_y die gemessenen horizontalen Komponenten des Magnetfelds und Ψ der Azimuthwinkel, dann gilt:

$$\tan(\Psi) = \frac{-H_y}{H_x} \Rightarrow \Psi = \arctan\left(\frac{-H_y}{H_x}\right) = f(H_x, H_y) \quad (4)$$

Im Folgenden soll der Einfluss der Lage des Sensors bezüglich der Horizontalen abgeschätzt werden. Um die Einflüsse untersuchen, die zu einem geringfügig abweichenden Messwert $\Psi + \Delta\Psi$ führen, kann man (4) nach Taylor entwickeln und nach der 1. Ordnung abbrechen:

$$\Psi + \Delta\Psi = f(H_x, H_y) + \frac{\partial f(H_x, H_y)}{\partial H_y} \Delta H_y + \frac{\partial f(H_x, H_y)}{\partial H_x} \Delta H_x \quad (5)$$

Anwendung der bekannten Ableitung

$$\arctan(z)' = \frac{1}{1+z^2} \quad (6)$$

mit

$$z = \frac{-H_y}{H_x} \quad , \quad \frac{\partial z}{\partial H_x} = \frac{H_y}{H_x^2} \quad , \quad \frac{\partial z}{\partial H_y} = \frac{-1}{H_x} \quad , \quad (7)$$

und (6) in (7)

$$\frac{\partial}{\partial H_x} \arctan(z) = \frac{H_y}{H_x^2} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{-H_y}{H_x}\right)^2} = \frac{H_y}{H_x^2 + H_y^2} \quad , \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial H_y} \arctan(z) = \frac{-1}{H_x} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{-H_y}{H_x}\right)^2} = \frac{-H_x}{H_x^2 + H_y^2} \quad (9)$$

ergibt beim Einsetzen in (5):

$$\Psi + \Delta\Psi = \arctan\left(\frac{-H_y}{H_x}\right) + \frac{H_y\Delta H_x - H_x\Delta H_y}{H_x^2 + H_y^2} \quad (10)$$

Durch einfache geometrische Überlegungen kann der Vektor des Erdmagnetfelds H_e in Abhängigkeit seiner Projektion in der Horizontalen H_h und der Inklination δ als

$$H_e = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = H_h \begin{pmatrix} \cos \Psi \\ -\sin \Psi \\ \tan \delta \end{pmatrix} \quad (11)$$

geschrieben werden. Einsetzen in (10) liefert:

$$\Delta\Psi = \frac{-\sin \Psi \Delta H_x - \cos \Psi \Delta H_y}{\cos^2 \Psi + \sin^2 \Psi} = -\sin \Psi \Delta H_x - \cos \Psi \Delta H_y \quad (12)$$

Für kleine Nick- und Rollwinkel Θ und Φ können ΔH_x und ΔH_y wie folgt abgeschätzt werden:

$$\frac{\Delta H_x}{H_z} \approx \Delta\Theta \quad \Rightarrow \quad \Delta H_x = \Delta\Theta \tan \delta \quad (13)$$

$$\frac{\Delta H_y}{H_z} \approx \Delta\Phi \quad \Rightarrow \quad \Delta H_y = \Delta\Phi \tan \delta \quad (14)$$

Es ergibt sich mit (12):

$$\Delta\Psi = -\Delta\Theta \cdot \tan \delta \cdot \cos \Psi - \Delta\Phi \cdot \tan \delta \cdot \sin \Psi \quad (15)$$

Wird für die Inklination des Magnetfelds der mittlere Wert in Deutschland von 65° eingesetzt, beträgt $\tan \delta \approx 2$. Neigungen von Θ und Φ um 1° zur Horizontalen können also eine Abweichung von bis zu 2° für $\Delta\Psi$ verursachen.

2.3 Datenaufbereitung: Der Kalmanfilter

Die Messung einer physikalischen Größe gibt nie exakt deren tatsächlichen Wert wieder. Abhängig vom Messverfahren beeinflussen viele Parameter das Ergebnis, die nicht direkt beobachtet und kompensiert werden können. Beispielsweise ist jeder als Analogspannung übertragene Messwert dem thermischen Rauschen im elektrischen Leiter ausgesetzt. Da aber die meisten Rauschprozesse eine charakteristische statistische Verteilung ihrer Einflussgrößen besitzen, können sie modelliert werden und so zu einer Einschätzung der Güte eines Messwerts verwendet werden. Der Kalmanfilter erlaubt die Modellierung von Messgrößen, die nur durch mit weißem Rauschen überlagerte Messungen beobachtet werden können. Die erwarteten Änderungen der Messgröße werden durch eine Zustandsübergangsfunktion charakterisiert, die ebenfalls von einer Zufallskomponente überlagert wird.

Der Algorithmus Der Zustand eines Prozesses zum Zeitpunkt k wird durch den Vektor x_k beschrieben, der die wahren Werte aller betrachteten Größen enthält. Der Übergang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zuständen ist durch die Gleichung

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (16)$$

gegeben, wobei die linearen Abbildungen A und B die Zustandsübergänge des Prozesses und den Einfluss der Steuergrößen u_k beschreiben. Der Messwert z_k wird durch

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (17)$$

modelliert, dabei beschreibt H die Abbildung der Messgröße durch den Sensor. Die Zufallsvariablen w_k und v_k stehen für das Prozess- und das Messrauschen. Der Kalmanfilter gibt nun ein iteratives Verfahren an, das mit Hilfe von fünf Gleichungen zu jedem Zeitschritt eine *a priori*-Schätzung \hat{x}_k^- des momentanen Zustands bietet, sowie eine durch den aktuellen Messwert korrigierte *a posteriori*-Schätzung \hat{x}_k . Die Gleichungen für die Phase der Vorhersage lauten:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (18)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (19)$$

P_k steht dabei für die gesamte Fehler-Kovarianz und P_k^- für deren *a priori*-Wert. Q beschreibt die Kovarianz des Prozessrauschens. In der Korrektur-Phase werden folgende Gleichungen iteriert:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (20)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (21)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (22)$$

Dabei bezeichnet R die Kovarianz des Messrauschens und K_k wird Kalman-Gain genannt [13].

Ein einfaches Prozessmodell Will man den Verlauf einer einzelnen Messgröße a modellieren, genügen zur Beschreibung des Zustands der aktuelle Wert der Größe a_k und seine zeitliche Änderungsrate \dot{a}_k . Im einfachsten Fall werden die Abbildungen A , B und H sowie die Kovarianzen Q und R als zeitinvariant angesehen. Wenn die Messgröße linear gemessen wird, kann auch H unkompliziert formuliert werden. Es ergibt sich:

$$x_k = \begin{pmatrix} a_k \\ \dot{a}_k \end{pmatrix}, \quad A(\delta t) = \begin{pmatrix} 1 & \delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Dabei steht $A(\delta t)$ für den Übergang zwischen zwei diskreten Zuständen mit dem zeitlichen Abstand δt . Da es bei dem Messvorgang keine kontrollierten Einflüsse von außen gibt, kann der Term Bu_k aus (18) weggelassen werden. Zuletzt müssen noch die Kovarianzen Q und R festgelegt werden. Für R kann einfach die Varianz des am Sensor gemessenen Rauschens eingesetzt werden. Die Beschreibung von $Q(\delta t)$ für den diskreten Fall hängt vom Prozessmodell ab und muss nach [14] aus der kontinuierlichen Zustandsübergangsfunktion A berechnet werden:

$$Q(\delta t) = \int_0^{\delta t} e^{A\tau} Q e^{A^T\tau} d\tau \quad \text{mit} \quad A = \begin{pmatrix} 0 & t \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & q \end{pmatrix} \quad (24)$$

Einsetzen der Definition des Matrixexponentials $e^A = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} A^k$ liefert:

$$Q(\delta t) = \int_0^{\delta t} \left[I + \begin{pmatrix} 0 & \tau \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right] Q \left[I + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \tau & 0 \end{pmatrix} \right] d\tau \quad (25)$$

$$= \int_0^{\delta t} \begin{pmatrix} q\tau^2 & q\tau \\ q\tau & q \end{pmatrix} d\tau = \begin{pmatrix} \frac{q\delta t^3}{3} & \frac{q\delta t^2}{2} \\ \frac{q\delta t^2}{2} & q\delta t \end{pmatrix} \quad (26)$$

Der Parameter q für das Prozessrauschen wird dabei empirisch nach dem gewünschten Verhalten in der jeweiligen Anwendung bestimmt.

3 Konzeption des Sensorknотens

Ein erstes Ziel im Rahmen dieser Diplomarbeit war die Entwicklung eines Systems, das mit ausgewählten Sensoren genügend Daten erfasst, um damit Laufbewegungen seines Trägers zu analysieren. Die Auslegung des Systems für die Beobachtung von Nagetieren in Größe einer Ratte bringt herausfordernde Beschränkungen mit sich:

- Das beobachtete Tier kann nur eine geringe zusätzliche Masse mit sich tragen, ohne seine Beweglichkeit und Gesundheit wesentlich zu beeinträchtigen. Eine Studie, die mit verschiedenen schweren Radiosendern versehene Ratten auf erhöhte Sterblichkeit untersucht hat, empfiehlt eine Nutzlast von maximal 4% des Körpergewichts des Tieres [15]. Somit sollte der Sensorknотen mitsamt seiner Energieversorgung bei einem durchschnittlichen Gewicht der Versuchstiere von 300g eine Masse in der Größenordnung von 12g besitzen.
- Wenn das Tier sich in natürlicher Umgebung ungehindert fortbewegen können soll, ist auch die Größe des Systems stark eingeschränkt. Die Gänge eines Baus der Art *Rattus norvegicus* haben in der Natur mit einem Durchmesser von ca. 8,3cm nicht nennenswert größere Maße als das Tier selbst [3]. Der Sensorknотen müsste also idealerweise implantiert werden können und eine dementsprechende Größe besitzen. Dies wird im Zuge der Miniaturisierung von Sensoren und Mikroprozessoren in den nächsten Jahren sicherlich möglich werden, ist mit momentan verfügbaren Komponenten allerdings noch nicht realisierbar. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Erprobung des Sensorknотens in einem künstlich angelegten Rattenbau, dessen Gänge einen Durchmesser von 12cm besitzen. Damit kann das System auch auf dem Rücken des Tieres befestigt werden, ohne das Begehen der Gänge zu behindern.
- Der Sensorknотen sollte für möglichst lange Zeit Daten erfassen können, d.h. er muss energiesparend arbeiten und eine ergiebige Energiequelle besitzen. Erste Versuche mit 3V-Knopfzellen haben gezeigt, dass deren Versorgungsspannung rasch einbricht und damit für bestimmte Sensoren nicht mehr ausreichend ist. Vielversprechender ist die Verwendung von Lithium-Polymer(LiPo)-Akkus, die eine gute Energiedichte besitzen, eine höhere Spannung (max. 3,7V) liefern und den Vorteil haben, kaum Einfluss auf das umgebende Magnetfeld auszuüben, was für den Einsatz eines Kompass wichtig werden kann.

Mehrere Prototypen wurden entwickelt, um die genannten Anforderungen zu erreichen. Das Ergebnis ist ein 18,5g schwerer Sensorknотen, der mit Maßen von 39 x 110mm auf dem Rücken einer Ratte getragen werden kann. Das relativ hohe Gewicht wird dabei vor allem durch die beiden Akkus verursacht, die zusammen 8g wiegen. Die einzelnen Komponenten wurden in einen Träger aus Leder eingenäht, der die Komponenten vor der Umgebung und Abstreifversuchen der Ratte schützt. Dieser Träger kann mit Klettverschlüssen auf einem Rucksack befestigt werden, der von der Ratte um Rumpf und Vorderbeine getragen wird. Sein Aufbau ist in Abb.6 zu sehen und wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

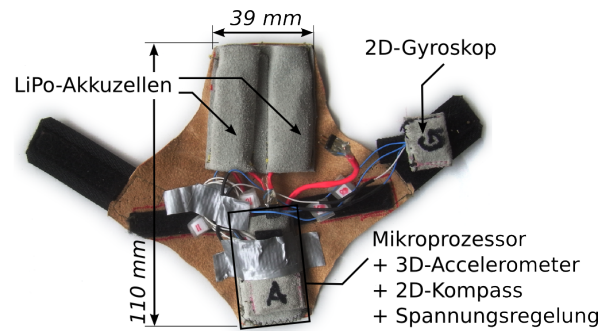


Abb. 6: Aufsicht des Sensorknotens

3.1 Beschreibung der Hardware-Komponenten

Herzstück des Systems ist der Mikroprozessor CC2430 von Texas Instruments [5]. Er liest die Daten der verschiedenen Sensoren ein, bereitet sie auf und funkt sie über einen eingebauten Transceiver zu einer nahegelegenen Basisstation. Wie im Schaltplan in Abb.7 zu sehen, steuert er über eine Selbsthaltungs-Schaltung auch die Spannungsversorgung für das komplette System: Bei Bedarf kann er den eingebauten Spannungsregler deaktivieren und damit den Sensorknoten insgesamt abschalten. Der Spannungsregler ist nötig, um die von den LiPo-Akkus gelieferte, im Betrieb von 3,7V langsam abfallende Spannung konstant auf 3,3V zu halten. Vorausgegangene Tests hatten gezeigt, dass die Messwerte aller verwendeten Sensoren abhängig von der Versorgungsspannung driften. Auch die durch den Spannungsregler verursachten hochfrequenten Spannungsschwankungen äußerten sich durch verrauschte Messwerte, diese konnten aber durch einen parallel zu den Verbrauchern geschalteten Kondensator $C1$ gemindert werden. Die komplette Abschaltung des Sensorknotens ist wichtig, um beim Unterschreiten einer Spannung von 2.9V vor einer Tiefentladung zu schützen, die die LiPo-Akkus schädigen kann. Die Widerstände $R1$ und $R2$ sind vom I^2C -Standard zur Terminierung der Übertragungsleitungen vorgeschrieben.

3.1.1 Eingesetzte Sensoren

Zur Datenerfassung ausgewählt wurden das in drei Achsen messende Accelerometer A7260 von Freescale [16], das zweiachsige Gyroskop IDG300 von Invensense [10] und der integrierte 2D-Kompass HMC6352 von Honeywell[17].

- Der Kompass besteht intern aus zwei magnetoresistiven Elementen, deren sensitive Achsen orthogonal zueinander angeordnet sind, sowie Signalverstärkern, Set-/Reset-Spulen und einem eigenen Mikroprozessor. Dieser hat die Aufgabe, die Messungen der Sensoren mit Hilfe von intern gespeicherten Offsets und Verstärkungsfaktoren in einen Azimuthwinkel umzurechnen. Diese Daten können von einem Host-Prozessor über eine Inter-Integrated Circuit (I^2C)-Schnittstelle abgerufen werden. Der über dieses Protokoll implementierte Befehlssatz lässt auch weitere Einstellungen zu: Bei Bedarf kann die Set-/Reset-Prozedur gesteuert werden, um wie in 2.2.3 beschrieben die Temperaturdrift der Sensoren auszugleichen. Des Weiteren steht ein stromsparender Sleep-Modus zur Verfügung, der mit $1\mu A$ nur ein Tausendstel der Energie im Normalbetrieb benötigt. Da das Magnetfeld nur in zwei Achsen gemessen wird, kann der Kompass nur verlässliche Azimuthwinkel ausgeben, wenn er horizontal gelagert ist. Auf dem Träger des Sensorknotens ist er daher so angebracht, dass er mittig auf dem Rücken des Versuchstiers liegt und seine sensitive Achse in Laufrichtung zeigt. Diese Lösung zur Azimuthmessung ist eine Kompromiss-Entscheidung,

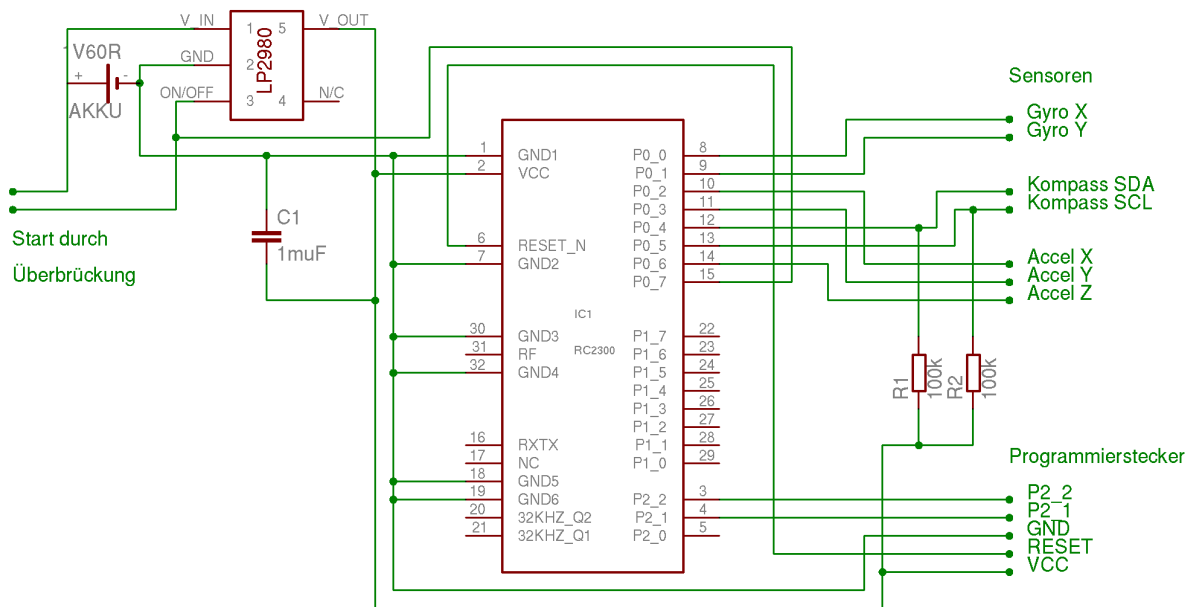


Abb. 7: Schaltplan des Sensorknötens

nachdem vorausgegangene Prototypen mit einzelnen Sensoren für alle drei Raumachsen gezeigt hatten, dass die oben genannten Kompensationsschaltungen zu viel Platz benötigen und trotzdem nicht die gewünschte Temperaturunabhängigkeit der Messungen besitzen.

- Das Accelerometer wird eingesetzt, um die auf den Sensorknötens einwirkenden Beschleunigungen zu messen. Zu erwarten sind z.B. die Beobachtung von Laufbewegungen des Versuchstiers, die bestimmte Muster in den Beschleunigungsdaten zeigen. In Ruhelage hingegen kann die Orientierung des Sensors zur ständig wirkenden Erdbeschleunigung bestimmt werden. Kombiniert man die Kompassmessungen mit dieser Information, können Aussagen über deren Verlässlichkeit getroffen werden. Daher ist es auf dem Träger direkt über dem Kompass und parallel zu dessen sensitiven Achsen fixiert. Der Messbereich liegt bei $-6g$ bis $6g$, die analogen Messwerte werden für die drei Achsen auf getrennten Pins ausgegeben. Auch hier ist ein Stromsparmodus vorhanden, der über einen separaten Pin gesteuert werden kann und den Verbrauch von $500\mu A$ auf $3\mu A$ senkt.
- Um die Bewegungen der Versuchstiere mit einem weiteren Verfahren zu erfassen, wurde dem Sensorknötens ein Gyroskop hinzugefügt, das die Winkelgeschwindigkeiten in zwei Achsen misst. Außer den wiederkehrenden Drehungen des Körpers beim Laufen sollte man Änderungen der Bewegungsrichtung aus den Daten rekonstruieren können. Dazu muss der Sensor so getragen werden, dass er hochkant steht und damit eine seiner sensitiven Achsen parallel zur senkrechten Drehachse steht. Dies ist auf dem Rücken des Tieres nicht möglich, ohne Behinderungen beim Laufen durch enge Gänge zu verursachen. Daher wird der Sensor mit einem Klettverschluss variabel am Bauchgurt des Trägers befestigt, so dass er jeweils senkrecht auf der rechten Seite des Tieres hängt. Die Winkelgeschwindigkeiten werden im Bereich von $\pm 500^\circ/s$ gemessen und können über zwei Pins analog ausgelesen werden. Der Stromverbrauch ist relativ hoch und mit maximal $10mA$ angegeben.

3.1.2 Der Mikroprozessor CC2430

Der Mikroprozessor CC2430 ist ein System on a Chip (SoC), das einen Rechenkern der Intel 8051-Architektur mit einem Transceiver kombiniert, der kompatibel zum IEEE 802.15.4-Standard drahtlos kommunizieren kann. Des Weiteren ist eine für Mikroprozessoren übliche Peripherie integriert: 2 USART-Schnittstellen, 4 Timer, ein ADC-Wandler mit 8 Kanälen und ein DMA-Controller.

Die dem Mikroprozessor zugrunde liegende Intel 8051-Architektur hat folgende Charakteristika:

- Sie ist eine Harvard-Architektur, d.h. Instruktionen und Daten liegen in physikalisch und logisch getrennten Speichern vor und werden über separate Busleitungen gelesen.
- Die Arithmetisch-logische Einheit (ALU) rechnet in 8 Bit. Es wird nur Festkomma-Arithmetik unterstützt.
- Der Datenbus hat eine Breite von 8 Bit, der Adressbus 16 Bit.
- Es sind sowohl ein Akkumulator als auch 8 Register vorhanden, die jeweils einen 8 Bit - Wert speichern.
- Das einzige vom Programmierer verwendbare 16 Bit-Register ist der Datenzeiger [18]. Er wird von Befehlen genutzt, die indirekt auf den Speicher zugreifen.
- Die Ausführung eines Maschinenbefehls benötigt in der ursprünglichen Implementierung 12 Taktzyklen.
- Zusätzlich zum internen Speicherbereich DATA gibt es einen größeren externen Datenspeicher XDATA mit höherer Zugriffszeit. Er kann nur indirekt adressiert werden und besitzt daher auch eigene Zugriffsbefehle.

Im Rechenkern des CC2430 ist eine erweiterte Version der 8051-Architektur implementiert. Der Befehlssatz ist dabei unverändert zur ursprünglichen Version. Folgende Änderungen wurden eingeführt, um die Performanz zu verbessern:

- Jeder Maschinenbefehl wird in nur einem Taktzyklus abgearbeitet.
- Es wurde ein zweiter Datenzeiger eingeführt.
- Der Speicher ist physikalisch unabhängig vom Speichermodell implementiert: Es stehen 128 KiB als Programmspeicher im ROM bereit. Da 16 Bit - Adressen nur 64 KiB ansprechen können, ist dieser Speicher in 4 Bänke aufgeteilt, die bei Bedarf in den Adressraum einblendet werden können. Die Speicherbereiche DATA und XDATA liegen physikalisch im gleichen SRAM. Die Zugriffszeiten unterscheiden sich jedoch: Der Zugriff auf XDATA mit 16 Bit-Adressen erfolgt wie das Lesen des ROM über den Adressbus, während der Zugriff auf DATA parallel zum Code über den Datenbus erfolgen kann.
- Von den 8 verfügbaren CPU-Registern sind 4 Bänke verfügbar. Somit sind schnelle, z.B. durch Interrupts ausgelöste Kontextwechsel möglich. Das zuvor nötige Retten der Registerinhalte auf den Stack fällt weg.

Da der CC2430 vor allem für mobile Anwendungen mit beschränkter Energieversorgung entworfen wurde, bietet er 4 Betriebszustände mit unterschiedlichem Energieverbrauch an:

- PM0: In diesem Zustand ist der Prozessor voll funktionsfähig bei einer Taktfrequenz von 32MHz und hat den höchsten Energieverbrauch. In den Spezifikationen angegeben sind ca. 7mA bei einer Betriebsspannung von 3,0V (ohne drahtlose Kommunikation).

- PM1: Der Prozessor arbeitet mit einer Taktfrequenz von $32kHz$ und ist ansonsten voll funktionsfähig. Der Verbrauch liegt bei $0,3mA$.
- PM2: Der interne Spannungsregler wird abgeschaltet, lediglich der Sleep Timer und die I/O-Ports sind noch aktiv. Der Verbrauch sinkt auf $0,9\mu A$.
- PM3: Im verbrauchsärmsten Zustand mit $0,6\mu A$ kann der Prozessor nur durch an den I/O-Ports ausgelöste Interrupts wieder aufgeweckt werden.

Um z.B. die analogen Ausgangsspannungen der Sensoren auszuwerten, steht ein ADC-Wandler bereit, der über einen Multiplexer auf 8 Eingangs-Pins zugreifen kann. Er arbeitet nach dem Delta-Sigma-Verfahren und verwendet eine Abtastfrequenz von $4MHz$. Durch die Wahl des Oversamplings kann eine Auflösung der Umwandlung zwischen 8 und 14 Bit bei einer zugehörigen Umwandlungsdauer von $20\mu s$ bis $132\mu s$ erreicht werden.

3.1.3 Energieverbrauch

Um die Betriebsdauer des Sensorknotens abschätzen zu können, wurde der Stromverbrauch während der Ausführung des Messprogramms inklusive der Datenübertragung gemessen. Dabei wurden die Stromspar-Funktionen der einzelnen Komponenten noch nicht genutzt. Die Messung mit einem seriell zur Versorgungsspannung von $3,4V$ geschaltetem Multimeter liegt bei einem Wert von $41,3mA$. In Verbindung mit den verwendeten Akkus mit einer Gesamtkapazität von $320mAh$ ergibt sich daraus eine theoretische Betriebsdauer von $7,75h$. Die praktisch verwendeten Einsatzzeiten sind etwas kürzer, da die Spannung der Akkus schon eine gewisse Zeit vor der kompletten Entleerung unter den Wert von $3,3V$ sinkt, wodurch die Messungen der Sensoren unzuverlässig werden.

3.2 Beschreibung der Software

3.2.1 Die Bibliothek Nanostack

Die Firma Sensinode stellt für die Entwicklung von Anwendungen auf dem CC2430-Chip unter dem Namen Nanostack eine Software-Bibliothek bereit, die Aufgaben eines Betriebssystems übernimmt und eine Implementierung des 6LoWPAN-Protokollstacks zur drahtlosen Datenübertragung über den integrierten $2,4GHz$ -Transceiver enthält. Auf der PC-Seite werden der Compiler *SDCC* zum Übersetzen und ein Programmierer zum Übertragen von selbst entwickelten Programmen auf den Sensorknoten mitgeliefert. Der Routing-Dienst *nRouted* kann über das von Sensinode definierte *nRP*-Protokoll einen über USB angeschlossenen Transceiver ansprechen. Benutzerprogramme können über das gleiche Protokoll Datenpakete mit *nRouted* austauschen und so mit mehreren Sensorknoten gleichzeitig kommunizieren. In Abb.8 sind die einzelnen an der Kommunikation beteiligten Software-Module abgebildet.

Die komplette Software ist in ANSI-C geschrieben, der Quelltext ist frei verfügbar. Die Betriebssystem-Komponente auf dem Sensorknoten wird von einer modifizierten Version des Open Source Projekts *FreeRTOS* übernommen. Es unterstützt folgende Funktionen:

- Die dynamische Speicherverwaltung wird mit den Funktionen *pvPortMalloc()* und *vPortFree()* realisiert. Damit können während der Laufzeit eines Programms Speicherbereiche im XRAM angefordert und wieder gelöscht werden. Drei Varianten sind vom Programmierer wählbar, die sich in Flexibilität und Aufwand unterscheiden. In diesem Projekt wird die Implementierung aus *heap_2.c* verwendet, die sich im Vergleich zu auf PCs verfügbaren

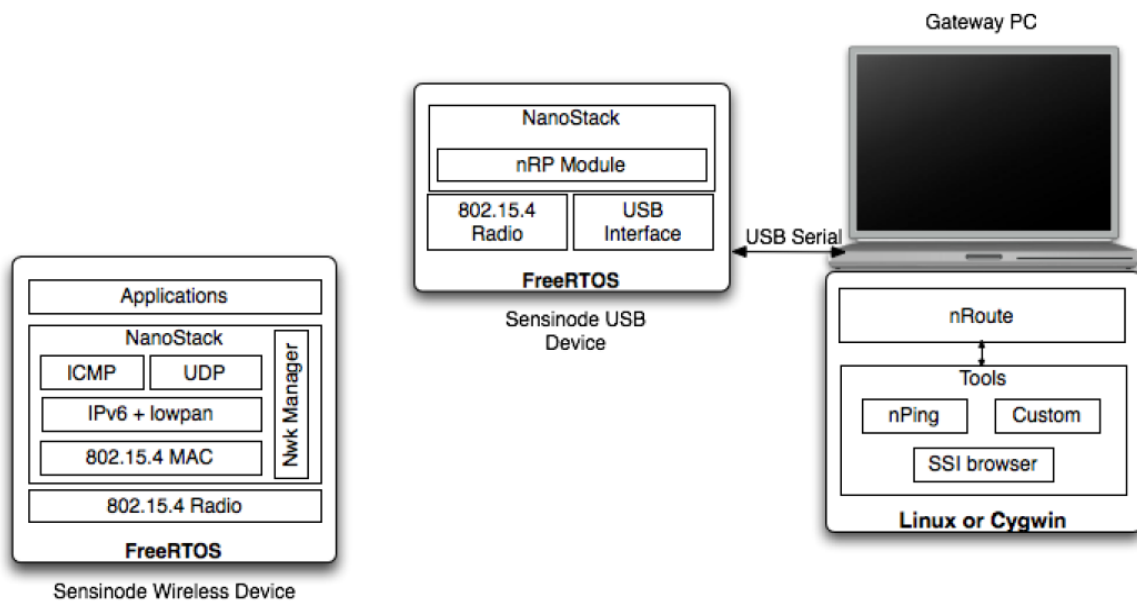


Abb. 8: Module der Nanostack-Bibliothek[19]

Funktionen *malloc()* und *free()* dadurch unterscheiden, dass Speicherbereiche zwar wieder freigegeben werden können, aber keine Defragmentierung stattfindet [20]. Daher besteht die Gefahr, dass nach einiger Zeit große Speicheranforderungen nicht mehr bearbeitet werden können. In diesem Projekt wird daher vermieden, Speicher dynamisch zu allozieren, lediglich die internen Routinen des Protokollstacks und der Taskverwaltung verwenden diese Funktionalität.

- FreeRTOS erlaubt das Anlegen einer begrenzten Anzahl von Tasks, die unabhängig voneinander laufen und untereinander mit Queues und Semaphoren kommunizieren können. In regelmäßigen Intervallen wird eine der in diesem Moment nicht blockierten Tasks ausgewählt und gestartet. Jede Task verwaltet einen eigenen Software-Stack, in den bei einem Kontextwechsel die momentanen Registerinhalte gesichert werden. Die als nächstes zu startende Task lädt daraufhin die von ihr zuletzt gespeicherte Belegung aus ihrem Stack. Das Zeitintervall zwischen den Kontextwechseln ist durch die Konfiguration eines Timer-Interrupts frei wählbar und wurde in diesem Projekt auf *1ms* festgelegt, um die Tasks zeitlich besser steuern zu können um möglichst exakte Abtastraten der Sensoren zu erreichen.
- Mit Funktionen wie *vTaskDelay()* oder *vTaskDelayUntil()* können Tasks für ein Zeitintervall bzw. bis zu einem bestimmten Zeitpunkt pausiert werden. Ist eine andere Task verfügbar, wird diese in der Zwischenzeit ausgeführt. Damit können auf einfache Art zeitabhängige Steuerungen realisiert werden, ohne Rechenzeit zu verschenken.
- Die Queues in FreeRTOS bieten eine Thread-sichere Implementierung von Ring-Puffern und sind damit zum Austausch von Daten zwischen den Tasks geeignet. Ihre Größe wird beim Initialisieren festgelegt. Daten werden durch Kopieren, nicht als Referenz in die Queue eingefügt, damit nicht mehrere Tasks dieselben Daten verändern können.

Der 6LoWPAN-Protokollstack baut auf diesen FreeRTOS-Funktionen auf. Er wird mit dem Aufruf von `stack_start()` in einer eigenen Task gestartet. Danach können Sockets geöffnet und an eines der verfügbaren Übertragungsprotokolle gebunden werden. Die Funktion `socket_buffer_get()` liefert den Zeiger auf einen Sende-Puffer, der mit Daten gefüllt und mit `socket_sendto()` über den Transceiver an eine bestimmte MAC-Geräteadresse verschickt werden kann. Intern durchlaufen die Daten dabei den Protokollstack von oben abwärts, z.B. vom UDP-Layer bis zum Hardware-Layer des 802.15.4-Standards. Vom Transceiver empfangene Daten durchlaufen den Stack in umgekehrter Richtung. Der Aufruf von `socket_read()` liefert dann einen Zeiger auf den Puffer mit den empfangenen Daten.

Speicherverbrauch Um den zur Verfügung stehenden Speicher für Auswertungsroutinen auf dem Sensorknoten abschätzen zu können, wurde ein Minimalprogramm geschrieben, das die Nanostack-Module einbindet und nur leere Datenpakete verschickt. Die aus der Protokolldatei des Linkers entnommenen Angaben zeigen, dass dieses Programm $60,5\text{kiB}$ der vorhandenen 128kiB im Flash-Speicher verbraucht. Von den verfügbaren 8kiB RAM werden $4,8\text{kiB}$ belegt. Zum Vergleich wurde auch das in den in Kap. 5 beschriebenen Versuchen verwendete Programm untersucht. Die Speicherbelegung von Flash-Speicher und RAM lag dort bei $71,7\text{kiB}$ und $4,9\text{kiB}$. Den Hauptanteil an zusätzlichem Programmcode besitzt dabei die Implementierung des I^2C -Protokolls und das Einbinden einer Software-Bibliothek für Fließkommaberechnung. Der im CC2430 implementierte Speicher ist somit für die Anwendung inklusive Reserven ausreichend. Für zukünftige Umsetzungen einer komplett auf dem Sensorknoten durchgeführten Positionsbestimmung werden die begrenzten Ressourcen jedoch eine größere Rolle spielen.

3.2.2 Datenaufzeichnung und Kommunikation

Das für den Sensorknoten geschriebene Programm hat die Aufgabe, alle Sensoren in möglichst präzisen Abständen auszulesen, die Daten in kompakter Form zu speichern und an einen mit Empfänger ausgestatteten Host-PC zu verschicken. Die dafür nötigen Routinen werden zyklisch in einer Task ausgeführt, die nach dem Boot-Vorgang gestartet wird und endlos läuft. Darin werden nacheinander die fünf Kanäle des ADC-Wandlers abgefragt, an denen die Ausgangsspannungen der Accelerometer- und Gyroskopachsen anliegen. Zur Umwandlung ist die maximale Genauigkeit von 14Bit eingestellt, als Referenz dient die Versorgungsspannung V_{cc} ($3,3\text{V}$ vom Ausgang des Spannungsreglers). Die Versorgungsspannung selbst wird auch überwacht. Dazu wird über einen Spannungsteiler $V_{cc}/3$ abgegriffen und mit einer im Mikroprozessor intern geregelten Referenzspannung von $1,8\text{V}$ verglichen. Die Dauer einer einzelnen Umwandlung beträgt laut Datenblatt $132\mu\text{s}$. Die Kommunikation mit dem Kompass läuft über die aus zwei Leitungen bestehende I^2C -Schnittstelle, deren Protokoll mangels Hardware-Unterstützung in Software implementiert werden musste. Der als Host agierende Mikroprozessor generiert dabei auf der Leitung SCL ein Taktsignal und schickt zum Start jeder Kommunikation auf der zweiten Leitung SDA eine Sequenz von Datenbytes, die die Adresse des Empfängers, den auszuführenden Befehl weitere zugehörige Argumente enthalten. Der Kompass antwortet daraufhin ebenfalls auf der SDA -Leitung mit einem Bestätigungs-Bit und gegebenenfalls mit den angeforderten Daten. Diese Funktionalität wird durch `compass_send_command_rX()` und `compass_read_data()` implementiert, wobei X für die Anzahl der zu sendenden Befehlsargumente steht. Bei der vom I^2C -Standard festgelegten Übertragungsrate von 100kBit/s dauert die Abfrage des vom Kompass gemessenen Azimuth $450\mu\text{s}$. Die Zeitpunkte der Messungen aller Sensoren innerhalb eines Zyklus liegen damit maximal $(6 \cdot 132 + 450)\mu\text{s} \approx 1,2\text{ms}$ auseinander, was als gleichzeitig gewertet werden kann und damit im weiteren Verlauf vernachlässigbar ist.

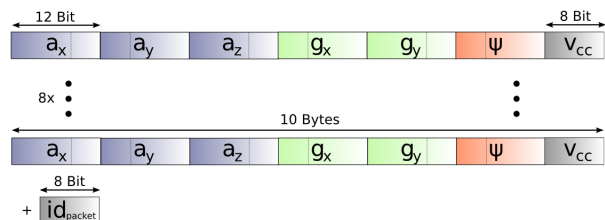


Abb. 9: Definition eines Datenpakets vom Sensorknoten an den Host-PC

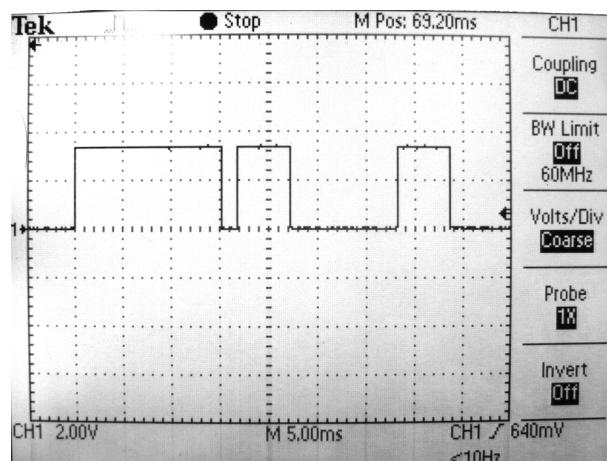


Abb. 10: Dauer von Messzyklen mit und ohne Senden der Daten: Hi-Pegel im Signal bedeuten eine beschäftigte CPU

Datenreduzierung Die gesammelten Daten werden anschließend platzsparend in einen Sendepuffer eingetragen. Dabei werden Informationen aus der Kalibrierung der Sensoren genutzt: Da jeweils nur ein bestimmter Wertebereich interessant ist, werden die Accelerometerdaten skaliert ein Offset subtrahiert, so dass ein Intervall von ca. $\pm 2g$ in einen 12Bit-Wert codiert wird. Die Gyroskop-Messungen werden auf diese Weise im Intervall $\pm 2600^\circ/s$ abgebildet. Die Versorgungsspannung wird in ein Byte codiert. Damit fallen pro Messzyklus $6 \cdot 1,5 + 1 = 10$ Byte an Daten an. Diese werden jeweils über 8 Zyklen gesammelt (siehe Abb.9) und über den Transceiver an den Host-PC gesendet. Diese Zusammenlegung reduziert den Overhead des 6loWPAN-Protokolls. Ein ans Paket angehängter fortlaufender 8Bit-Wert *packet_id* ermöglicht es dem Empfänger, Paketverluste zu detektieren.

Abtastrate der Sensoren Um die maximal mögliche Abtastrate zu ermitteln, wurde die Gesamtlaufzeit eines Abtast-Zyklus aller Sensoren gemessen: Auf einen Ausgangs-Pin des Mikroprozessors wurde zu Beginn jedes Durchlaufs ein High-Pegel geschrieben, am Ende ein Low-Pegel. Anschließend wartete die Task, bis ein bestimmtes Zeitintervall seit dem Start vergangen war. Ein an den Ausgangs-Pin angeschlossenes Oszilloskop lieferte die Aufzeichnung in Abb.10. Man kann ablesen, dass ein Zyklus $14ms$ dauert, wenn ein Datenpaket gesendet wird. Die kürzeren Zeitintervalle von $5ms$ zeigen Zyklen, in denen nur Daten gemessen und zwischengespeichert wurden. Die Zeit zwischen zwei Low-High-Übergängen liegt in dieser Messung konstant bei $16ms$, was mit der programmierten Wartezeit zwischen zwei Zyklus-Starts übereinstimmt. Wie man sieht, kann diese Wartezeit nicht weiter verkürzt werden. Es ergibt sich damit die im Weiteren verwendete maximal mögliche Abtastrate von $62,5Hz$.

Verarbeitung am PC Auf dem Host-PC liest das Programm *nMoteRatpackReceiver* die von *nRouted* empfangenen Daten über das *nRP*-Protokoll ein. Aus den gepackten Daten werden wieder die ursprünglichen Messwerte errechnet. Anschließend werden sie pro Datenpaket mit einem Zeitstempel der Systemzeit versehen und durch Leerzeichen getrennt fortlaufend in einer Datei gespeichert. Die Auswertung dieser Dateien wird in Kapitel 6 beschrieben.

4 Kalibrierung der Sensoren

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Kalibrierung des Kompasses und der Inertialsensoren beschrieben. Die verwendeten Achsenbezeichnungen sind in Abb.11 definiert.

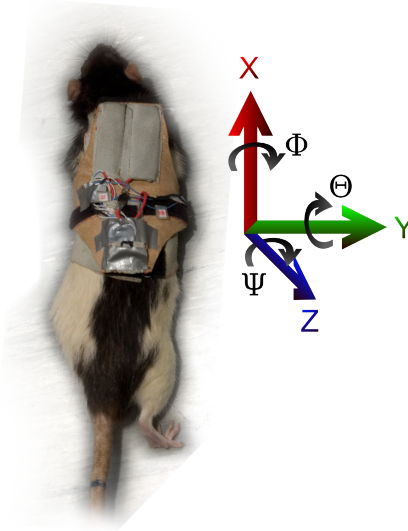


Abb. 11: Definition der Koordinatenachsen und Drehwinkel des Sensorknotens

Die X-Achse zeigt somit in Laufrichtung des Tieres, die Y-Achse relativ dazu nach rechts und die Z-Achse in Richtung Boden. Die Nick- und Rollwinkel sowie der Azimuth sind mit Θ , Φ und Ψ bezeichnet.

4.1 Integrierter 2D-Kompass

Der eingesetzte Kompass HMC6352 misst das umgebende Magnetfeld mit zwei orthogonal angeordneten magnetoresitiven Sensoren. Aus den Messwerten wird intern ein Azimuthwinkel Ψ berechnet, der auf 0.1° genau in einen 12 Bit-Wert codiert ist. Dieser kann über eine I^2C -Schnittstelle ausgelesen werden. Da die Stärke des Erdmagnetfelds lokale Schwankungen aufweist und durch bestimmte Materialien in der Umgebung beeinflusst wird (siehe Abschnitt 2.2.3), stellt der Kompass einen Kalibrierungsmodus bereit. Dieser erfordert wie in [17] beschrieben zwei vollständige Drehungen des kompletten Sensorknotens in der Horizontalen innerhalb von wenigstens 20s. Dabei werden die für die Umrechnung der Sensordaten nötigen Offsets und Verstärkungswerte bestimmt. Durch diese interne Kalibrierung werden also die lokale Magnetfeldstärke und der Einfluss von mitbewegten ferromagnetischen Materialien, z.B. Teile der Akkus, berücksichtigt.

Eine solche Kalibrierung wurde am Ort des später verwendeten Versuchsaufbaus durchgeführt, um die durch das umgebende Gebäude verursachten Abweichungen des Magnetfelds einzubeziehen. Der Sensorknoten wurde im Kalibrationsmodus innerhalb von 30s zweimal vollständig gedreht. Danach wurde der Sensorknoten an der gleichen Position in 20° -Schritten um insgesamt 360° gedreht und dabei die Ausgaben des Kompass aufgezeichnet, die Ausrichtung erfolgte visuell anhand auf dem Boden vorgezeichneter Linien. In Abb.12 sind die wahren Azimuthwinkel Ψ_{wahr} als gepunktete Geraden eingezeichnet. Man kann ablesen, dass der Fehler

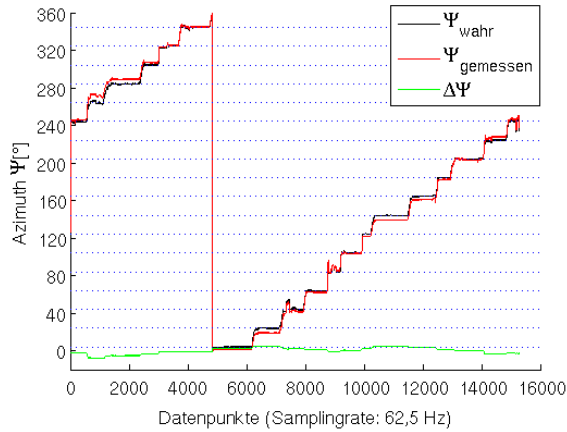


Abb. 12: Kompassdaten einer Drehung in 20°-Schritten

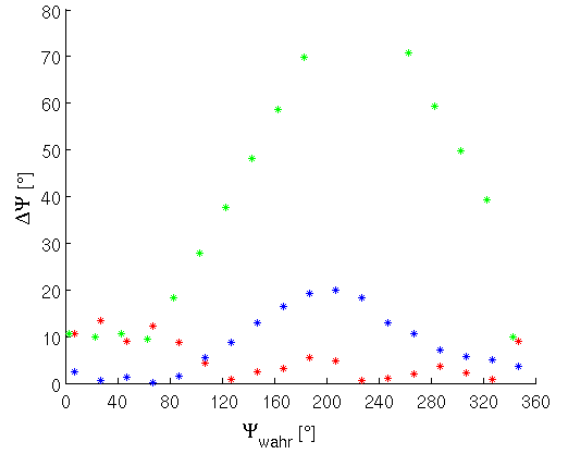


Abb. 13: Fehler $\Delta\Psi$ dreier Messungen in Abhängigkeit vom wahren Azimuth

$\Delta\Psi = \Psi_{gemessen} - \Psi_{wahr}$ bis zu $7,1^\circ$ beträgt. Diese Messungen wurden mit unveränderter interner Kalibrierung des Kompass an verschiedenen nahegelegenen Positionen wiederholt. Das Ergebnis ist in Abb.13 zu sehen: Darin wurden für jede Ausrichtung die über 100 Werte gemittelten Azimuthwinkel bestimmt und die Fehler $\Delta\Psi$ in Abhängigkeit vom wahren Azimuth dargestellt.

4.1.1 Fehlerabschätzung

Die über 500 Messungen ermittelte Standardabweichung der Rohdaten liegt mit unbewegtem Kompass bei $0,178^\circ$. Nimmt man bei der visuellen Ausrichtung des Sensorknotens an einer 100mm langen Linie eine durchschnittliche seitliche Abweichung von 1mm an, ergibt sich für den Azimuth bereits eine Standardabweichung von $\Delta\Psi = \text{atan}(\frac{1\text{mm}}{100\text{mm}}) \approx 1,146^\circ$. Den größten Einfluss auf die Messgenauigkeit kann man aber von weichmagnetischen Materialien erwarten, die sich in der näheren Umgebung des Sensorknotens befinden. Wären die in Abb.13 gezeigten großen Abweichungen im Bereich von 20° Folgen einer fehlerhaften internen Kalibrierung des Kompass, müsste ein eindeutiger Zusammenhang zwischen $\Delta\Psi$ und Ψ_{wahr} erkennbar sein, was aber nicht der Fall ist. Messungen mit einem analogen Kompass rund um die Kalibrierungsumgebung zeigen, dass sich auch hier der gemessene Azimuth zwischen zwei Messpositionen im Abstand von 30cm um bis zu 25° unterscheidet. Ursachen können z.B. im Boden des Gebäudes eingelassene Stahlträger sein, die sowohl die Richtung der Magnetfeldlinien als auch die Feldstärke lokal ändern. Allein eine Änderung der Inklination δ des Magnetfelds hat in der Projektion auf die durch X- und Y-Achse definierte Ebene des Sensorknotens die gleiche Auswirkung wie eine nicht in horizontaler Ebene durchgeführte Messung, was nach (15) für $\Delta\delta = 1^\circ$ zu Abweichungen von bis zu $\Delta\Psi = 2^\circ$ führt. Der vom Kompass gemessene Azimuth kann also nur in Kenntnis der durch Nick- und Roll-Winkel angegebenen Orientierung zur Horizontalen verwendet werden. Innerhalb von Gebäuden sind außerdem zusätzliche Informationen nötig, wie z.B. eine Abschätzung der lokalen Abweichung des Magnetfelds an der Position der Messung.

4.2 Gyroskop

Das in zwei Achsen messende Gyroskop IDG300 wird so eingesetzt, dass es Drehungen um die X- und Z-Achse detektiert. Die Analogspannungen der beiden Messausgänge sind abhängig von der Winkelgeschwindigkeit um die jeweilige Achse. Sie werden vom Mikroprozessor eingelesen und im A/D-Wandler in einen 14-Bit-Wert umgesetzt. Für die Kalibrierung der Werte wurde das Gyroskop auf einer motorgetriebenen Drehscheibe so montiert, dass die jeweils zu kalibrierende Achse verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten ausgesetzt war. Um die gemessenen Werte mit den wahren Winkelgeschwindigkeiten ω_{wahr} vergleichen zu können, wurden bei einer fest eingestellten Versorgungsspannung des Antriebsmotors für jeweils ca. 50s die Anzahl der vollständigen Umdrehungen mitgezählt und die zugehörige Zeitspanne per Stoppuhr gemessen. Die Werte $\omega_{gemessen}$ wurden aus dem Mittelwert von je 100 Messwerten ermittelt.

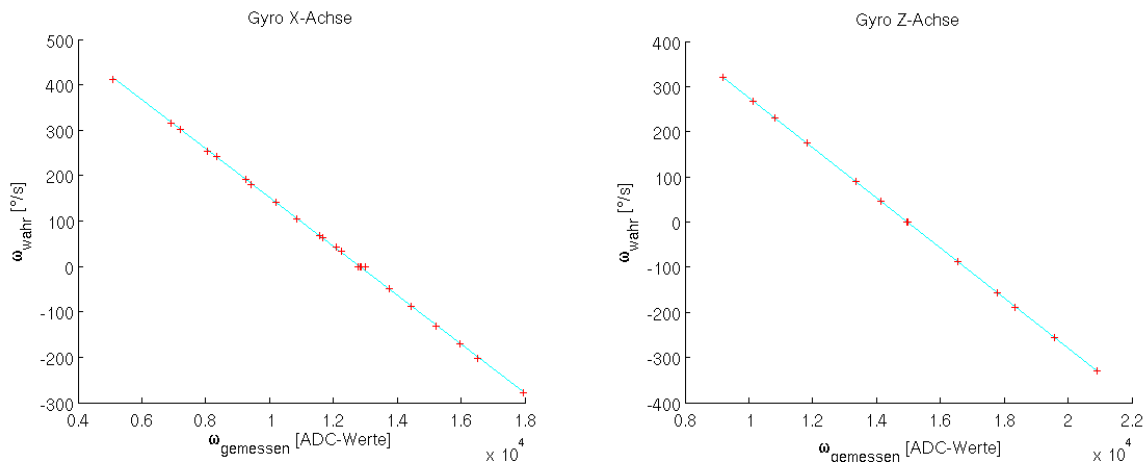


Abb. 14: Abhängigkeit zwischen gemessener und wahrer Winkelgeschwindigkeit

In Abb.14 wird der eindeutig lineare Zusammenhang zwischen $\omega_{gemessen}$ und ω_{wahr} sichtbar. Die eingezeichnete Fit-Gerade $g(x) = ax + b$ wurde durch die Minimierung der quadratischen Abweichung $\sum_x (\omega(x) - g(x))^2$ bestimmt. Die Umrechnung auf kalibrierte Werte ist damit durch $\omega_{cal} = a \cdot \omega_{gemessen} + b$ gegeben.

4.2.1 Fehlerabschätzung

Die Standardabweichung der 100 Einzelmessungen in Ruhe beträgt $0,25^\circ$, bei konstanter Geschwindigkeit liegt sie durchschnittlich bei $2,22^\circ/s$. Das übersteigt den im Datenblatt angegebenen Wert von $0,0014^\circ/s/\sqrt{Hz}$ [10], kann aber seine Ursache in der nicht exakten Übereinstimmung der sensitiven Achse des Gyroskops mit der Achse der Drehbewegung haben. Die quadratischen Abweichungen der Fit-Geraden auf der X- und Z-Achse betragen $2.15^\circ/s$ bzw. $0.18^\circ/s$. Das ist akzeptabel im Hinblick darauf, dass vor allem die Drehgeschwindigkeiten um die Z-Achse genau erfasst werden müssen, um Änderungen der Bewegungsrichtung des Tieres zu detektieren.

4.3 Accelerometer

Das verwendete 3D-Accelerometer liefert für die X- Y- und Z-Achse jeweils eine Analogspannung. Diese wird über den A/D-Wandler des Mikroprozessors in einen 14-Bit-Wert umgesetzt. Jeder der drei Sensorwerte ist abhängig von seiner Orientierung zum Vektor \vec{g} der Erdbeschleunigung. Für die Kalibrierung der Messwerte wurde diese Tatsache ausgenutzt:

- Um eine genauere Ausrichtung zu ermöglichen, wurde die Platine des 3D-Accelerometers so auf einem Kantholz befestigt, dass die sensitiven Achsen parallel zu dessen Kanten verlaufen.
- Auf eine senkrecht stehende Fläche wurden Linien gezeichnet, die Neigungen von $\alpha_i = i \cdot 10^\circ$ gegen die Horizontale aufweisen.
- Das Kantholz mit Sensor wurde für jede Achse nacheinander an allen diesen Linien ausgerichtet, so dass die der Neigung entsprechenden Anteile $a_i = \sin(\alpha_i) \cdot |\vec{g}|$, $i = 1, \dots, 36$ der Erdbeschleunigung gemessen werden konnten.

Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abb.15 zu sehen.

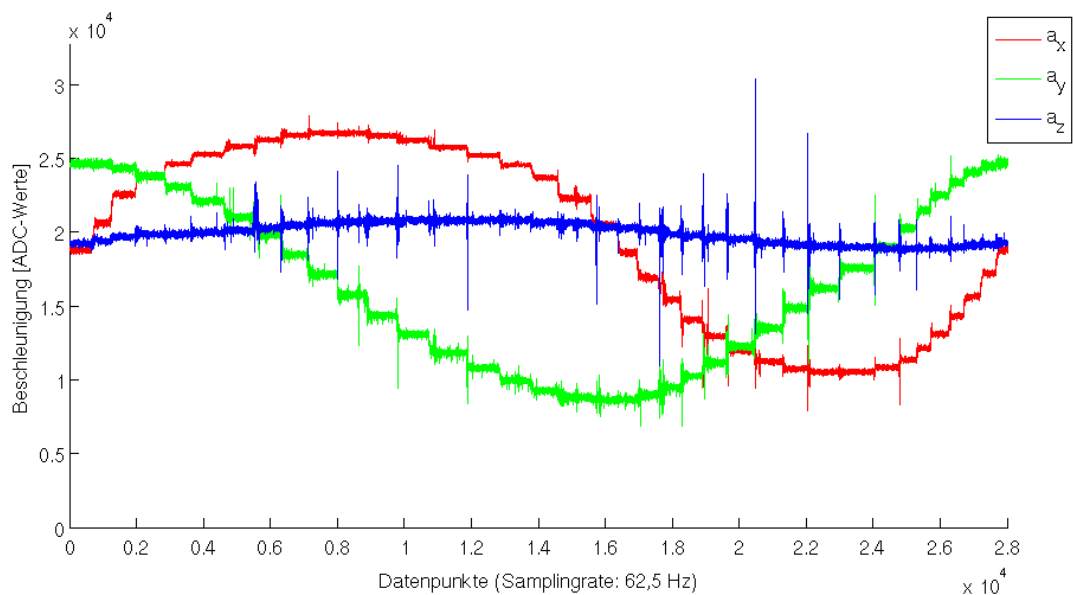


Abb. 15: ADC-Messwerte der drei Achsen bei einer Drehung um die Z-Achse

Zur Kalibrierung wurde für alle Ausrichtungen je ein Zeitintervall mit konstanter Orientierung gewählt. Pro Intervall wurde ein Mittelwert von 100 Messwerten berechnet, um das Rauschen der Messungen zu kompensieren. Somit wurden für jede Achse 36 gemittelte Werte a_{-g} bis a_g für Beschleunigungen zwischen $-\vec{g}$ und $|\vec{g}|$ bestimmt. Der Nullpunkt a_0 in Abwesenheit einer Beschleunigung wurde als Mittel der Werte bei einer Orientierung α von 90° und 270° bestimmt. Da die Nichtlinearität des Sensors in [16] mit maximal $\pm 1\%$ des Messbereichs von $6 \cdot |\vec{g}|$ angegeben ist, wurde zuerst eine lineare Umrechnung der Messwerte in Vielfache der Erdbeschleunigung nach folgender Formel gewählt:

$$a_c = (a - a_0) / (a_0 - a_{-g}) \quad (27)$$

Wie Abb.16 zeigt, ist die Annahme der Linearität auf dem gesamten Messbereich nur für die Y-Achse gerechtfertigt: Die auf die Amplitude bei Einwirkung von $|\vec{g}|$ normierte Abweichung

$$\Delta a = \frac{(a_g - a_{-g}) - a_0}{(a_g - a_{-g})/2} \quad (28)$$

beträgt auf der Y-Achse $\approx 0,63\%$, auf der X- und Z-Achse jedoch $\approx 21,2\%$ bzw. $\approx 23,9\%$. Die Ursache könnte ein nicht korrekt arbeitender Sensor oder eine fehlerhafte Verstärkerschaltung auf der Sensor-Platine sein. Um diesen systematischen Messfehler auszugleichen, wurde die Kennlinie in einer Lookup-Tabelle(LUT) abgespeichert. Diese enthält zu jeder der 36 verfälschten Messungen $a_{gemessen}$ der X- und Z-Achse die Differenz zum wahren Messwert a_{wahr} . Zur Korrektur eines Messwerts wird der zugehörige Fehler aus den beiden nächstgelegenen Werten in der Tabelle linear interpoliert und von diesem subtrahiert. Sei im Folgenden $a = a_{gemessen}$, und e_x der Fehler bei einer zugehörigen Erdbeschleunigung von x . Für $a > a_g$ wird dann der Fehler als

$$\Delta a = \frac{e_g - e_{g/2}}{a_g - a_{g/2}} \cdot (a - a_g) \quad (29)$$

approximiert, was durch die beobachtete lineare Zunahme des Fehlers für $a > a_{g/2}$ gerechtfertigt ist. Für $a < a_{-g}$ wird $\Delta a = 0$ gesetzt. Nach Anwendung der gerade beschriebenen Regeln erhält man die korrigierten Beschleunigungen $a_{korrigiert} = a - \Delta a$. Abb.17 zeigt die Größe des Fehlers Δa vor der Korrektur und $\Delta a_{korrigiert} = a_{korrigiert} - a_{wahr}$ als verbleibenden Fehler danach.

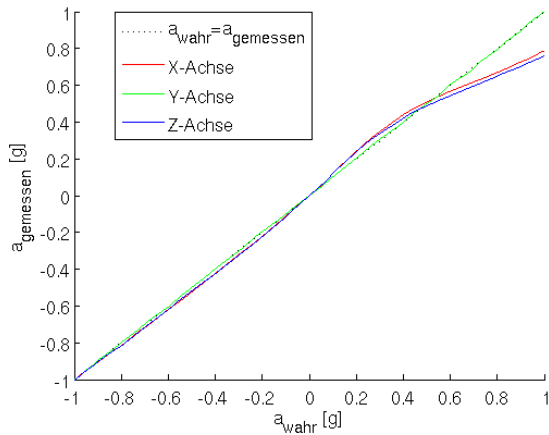


Abb. 16: Nichtlinearität der X- und Z-Achse

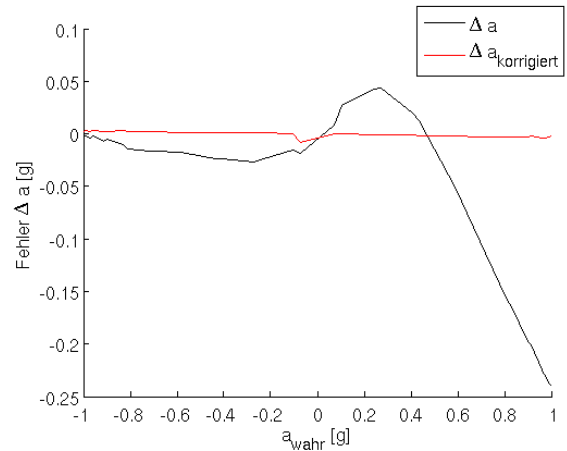


Abb. 17: Größe der Fehler von Messwerten der Z-Achse vor und nach der Korrektur

4.3.1 Fehlerabschätzung

In Abb.18 sind die Messdaten einer schrittweisen 360° -Drehung um die Y-Achse nach Anwendung der Kalibrierung zu sehen. Im Hinblick auf die Verwendung zur Bestimmung der Abweichung der Sensororientierung bezüglich der Horizontalebene kann der relevante Messbereich für alle Achsen auf Werte von $\pm|\vec{g}|$ eingeschränkt werden. Solange außer der Erdbeschleunigung zusätzliche Beschleunigungen auf den Sensorknoten einwirken, kann ohnehin keine Aussage über die momentane Orientierung getroffen werden. Die Genauigkeit der Messungen kann anhand einer Rekonstruktion der Rollwinkel Θ und Nickwinkel Φ aus den Daten abgeschätzt werden. Diese werden aus dem normierten Vektor bestehend aus den kalibrierten Beschleunigungen a_x , a_y und

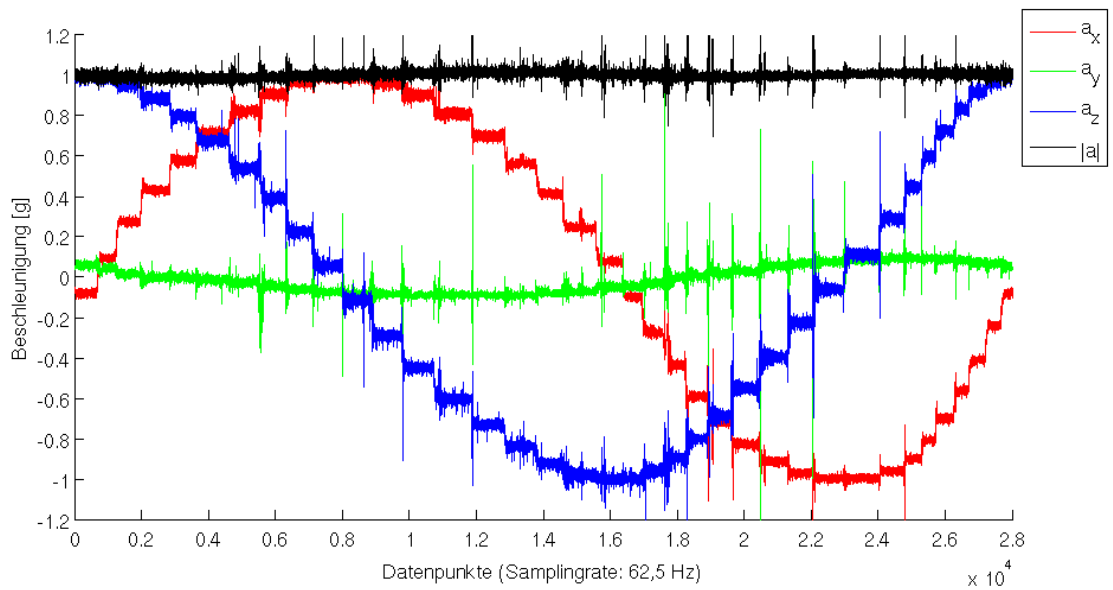


Abb. 18: Kalibrierte Beschleunigungswerte der drei Achsen bei einer Drehung um die Z-Achse

a_z mit $\Theta = \arctan(a_x/a_z)$ und $\Phi = \arctan(a_y/a_z)$ bestimmt. Eine Messung bei einer bekannten Neigung von jeweils 20° ergab Werte von $\Theta \approx 21,1^\circ$ und $\Phi \approx 21,0^\circ$. Die durch Rauschen der Messungen verursachten Standardabweichungen auf den Achsen betragen $\sigma_x \approx 1,617\%$, $\sigma_y \approx 1,746\%$ und $\sigma_z \approx 1,473\%$ des Ausschlags von $|\vec{g}|$, was bei 45° Neigung einen durchschnittlichen Fehler von $\Delta\Theta = 1,38^\circ$ bzw. $\Delta\Phi = 1,41^\circ$ bedeutet. Die Fehler der Kalibrierung liegen also unterhalb der durch das Rauschen begrenzten möglichen Genauigkeit.

5 Versuche

Der Sensorknoten sollte nun auf dem Rücken von Versuchstieren der Art *Rattus norvegicus* eingesetzt werden, um deren Bewegungsabläufe mit Hilfe aller integrierten Sensoren aufzuzeichnen. Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, ist das Ziel dieser Diplomarbeit zu evaluieren, inwiefern und mit welcher Genauigkeit es möglich ist, aus den aufgezeichneten Daten den zurückgelegten Weg nachzuverfolgen. Ein wünschenswertes Ergebnis wäre die Rekonstruktion eines Rattenbaus aus der Kombination vieler aufgezeichneter Läufe einer Ratte durch dessen Gangsystem. Um diese Problemstellung unter kontrollierten Bedingungen nachzuempfinden, wurde ein künstlicher Rattenbau konstruiert.

5.1 Die Versuchsumgebung

5.1.1 Aufbau

Die Versuchsumgebung ist in Abb.19 zu sehen. Der Bau besteht aus zwei Kammern, die durch einen Rundgang miteinander verbunden sind. Der Gang ist aus PVC-Rohren mit einem Durchmesser von 12cm zusammengesetzt. In beiden möglichen Verbindungswegen zur jeweils anderen Kammer sind je eine enge und eine langgezogene Kurve mit einem Winkel von 90° eingebaut.

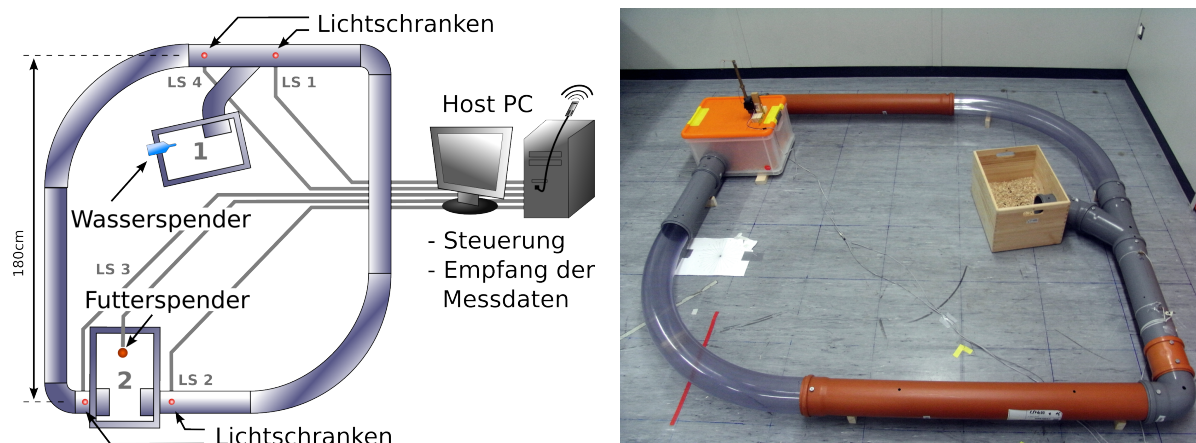


Abb. 19: Versuchsumgebung: Künstlicher Rattenbau

An den zwei Eingängen jeder Kammer sind Lichtschranken in die Wand des Ganges eingelassen, so dass sie beim Vorbeilaufen einer Ratte ausgelöst werden. In Kammer 1 wurde während der Versuche ein Wasserspender platziert. Am Deckel von Kammer 2 ist ein Futterspender montiert, der mit einem Servomotor hinter einem Gitter befindliche Futter-Pellets wahlweise verstecken oder ausfahren kann, so dass sie vom Tier erreichbar sind. Eine am Lehrstuhl entwickelte Hardware-Schnittstelle verbindet die Steuerungsleitung des Futterspenders und die Ausgänge der Lichtschranken mit dem Parallel-Port des Host-PCs. Dort registriert eine Software die Auslösung der Lichtschranken und speichert sie zusammen mit einem Zeitstempel ab. Sie übernimmt auch die Steuerung des Futterspenders.

Einfluss des Standorts Der Versuchsaufbau befindet sich in einem Raum innerhalb eines Hochhauses. Die in näherer Umgebung des Aufbaus befindlichen Raumtrenner bestehen aus ferromagnetischen Materialien. Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben ist diese Umgebung nicht

ideal für den Einsatz des entwickelten Sensorknotens, da nicht von einem homogenen Magnetfeld ausgegangen werden kann, mit dessen Hilfe die Ausrichtung des Sensorknotens bestimmt werden soll. Die Durchführung der Versuche in einer kontrollierten Umgebung mit wesentlich geringeren Störeinflüssen innerhalb einer Holzhütte wurde vorbereitet, konnte aber aus jahreszeitlichen Gründen nicht durchgeführt werden. Um die zu erwartenden Abweichungen abzuschätzen, wurden entlang der Gänge in regelmäßigen Abständen Kompassdaten mit dem Sensorknoten aufgezeichnet. Dabei wurde anhand eines auf dem Boden unter dem Versuchsaufbau aufgezeichneten Gitters in 30cm-Raster die Position der Messung bestimmt sowie die immer gleiche Orientierung des Sensorknotens überprüft. Die größte Differenz zwischen zwei gemessenen Azimuth-Abweichungen betrug dabei 55.8° , zwischen zwei benachbarten Messpositionen waren es maximal $22,6^\circ$. Dieses Ergebnis zeigt, dass während der Versuche aufgenommene Kompassdaten unbearbeitet nicht zu verwenden sind. Eine Korrektur durch die hier gemessenen Azimuth-Abweichungen ist jedoch möglich (siehe Abschnitt 6.2.2).

5.1.2 Ablauf der Versuche

Zu Beginn eines Versuchs wird dem Tier der Rucksack angezogen und auf diesem der Sensorknoten befestigt. Dabei wird das Gyroskop seitlich so befestigt, dass die für die Messung der Gierbewegung vorgesehene sensitive Achse möglichst senkrecht orientiert ist. Das Tier wird dann in die Kammer 1 gesetzt und die Datenaufzeichnung gestartet. Um ein Durchlaufen des Gangsystems zu motivieren, wird das Tier mit Futtergaben in Kammer 2 belohnt: Bei einer Aktivierung der Lichtschranke *LS1* fährt der Futterspender für eine Dauer von 65s seine Pellets aus. Nach Ablauf dieser Zeit werden die Pellets wieder zurückgefahren und das Tier muss für eine weitere Aktivierung zu *LS1* zurücklaufen.

Trainingsphase: Während 20 Versuchstagen wurden zwei Versuchstiere abwechselnd in den Bau eingesetzt, um Sensorknoten und Rucksack zu testen und bis zur Einsatzfähigkeit optimieren. Gleichzeitig wurden die Tiere an das Laufen mit dem Rucksack gewöhnt und sie erlernten den Mechanismus, nach dem sie den Futterspender aktivieren können. Nach Ablauf dieser Zeit liefen die Tiere mit aufgesetztem Sensorknoten mit einer Geschwindigkeit vergleichbar zu der ohne die zusätzliche Last. Die Laufleistung erhöhte sich stetig und die Tiere liefen größtenteils zielstrebig und ohne Pausen von einer Kammer zur anderen, wobei der Weg vorbei an *LS1* signifikant häufiger begangen wurde.

Versuchsphase: An den 10 darauffolgenden Versuchstagen wurde der Sensorknoten in der Konfiguration eingesetzt, wie sie in Kapitel 3 beschrieben ist. Je nach Motivation des Tieres dauerten die einzelnen Versuchsläufe 20–45 Minuten, bei längerer Inaktivität wurde der Versuch abgebrochen. Die subjektive Beobachtung und erste Analysen der Daten im Bewegungsablauf zeigten keinen Unterschied zwischen den zwei Tieren (siehe Abschnitt 6.1.3, Abb.24). Daher wurde für diese Versuche nur Tier 1 verwendet, das sich beim Anlegen des Rucksacks kooperativer zeigte und bessere Laufleistungen lieferte. Ein Beobachter protokollierte während eines Versuchs zusätzlich zur Aufzeichnung der Sensordaten jeweils manuell, in welchem Gang und in welche Richtung sich das Tier bewegte. Insbesondere konnten dadurch in den Daten voraussichtlich schwierig zu detektierende Bewegungen wie das Rückwärtslaufen oder das Klettern an den Wänden einer Kammer registriert werden. Auch die korrekte Positionierung der Sensoren wurde überwacht und bei Bedarf korrigiert. Durch die alleinige Belohnung der Aktivierung von *LS1* bevorzugte das Versuchstier im Verlauf der Versuchstage immer mehr den Verbindungsgang zwischen *LS1* und *LS2*. Um mehr Daten über den gegenüberliegenden Gang zu erhalten, wurde daher an Versuchstag 27 auf eine Belohnung durch Aktivieren der Lichtschranke *LS4* umgestellt,

was eine merkliche Zunahme der Läufe im Gang zwischen $LS3$ und $LS4$ zur Folge hatte. Insgesamt wurden in der Versuchsphase 100 verwertbare Läufe zwischen den Lichtschranken $LS1$ und $L2$ aufgezeichnet, zwischen $LS3$ und $LS4$ waren es 29. Diese Daten bilden die Grundlage für die folgende Analyse und den Versuch, daraus die Geometrie des Gangsystems zu rekonstruieren.

6 Analyse der Messdaten

6.1 Detektion von Schrittereignissen

Die erste Hürde auf dem Weg zur Anwendung eines Dead-Reckoning-Algorithmus ist die verlässliche Detektion einzelner Schritte eines laufenden Versuchstieres. Forschungsgruppen, die sich mit Schrittdetektion und Schrittweitenbestimmung bei Fußgängern beschäftigt haben, verwendeten vorwiegend am Gürtel der Versuchsperson befestigte Inertial-Messsysteme ([6], [21]). Die in der Z-Achse gemessenen Beschleunigungen spiegelten dabei die auf den Sensor wirkende Beschleunigung beim Heben und das ruckartige Abbremsen beim Aufsetzen des Fußes wieder. Gefiltert lieferten diese Daten während des Laufens eine charakteristische Schwingung, deren Extrema als Schrittereignisse interpretiert werden konnten. Da die Laufbewegung trotz der unterschiedlichen Körpermechanik auch bei Ratten einen sich zyklisch wiederholenden Ablauf darstellt, werden auch hier in den verfügbaren Sensordaten wiederkehrende Muster erwartet. Bisher ist hierzu allerdings noch wenig bekannt.

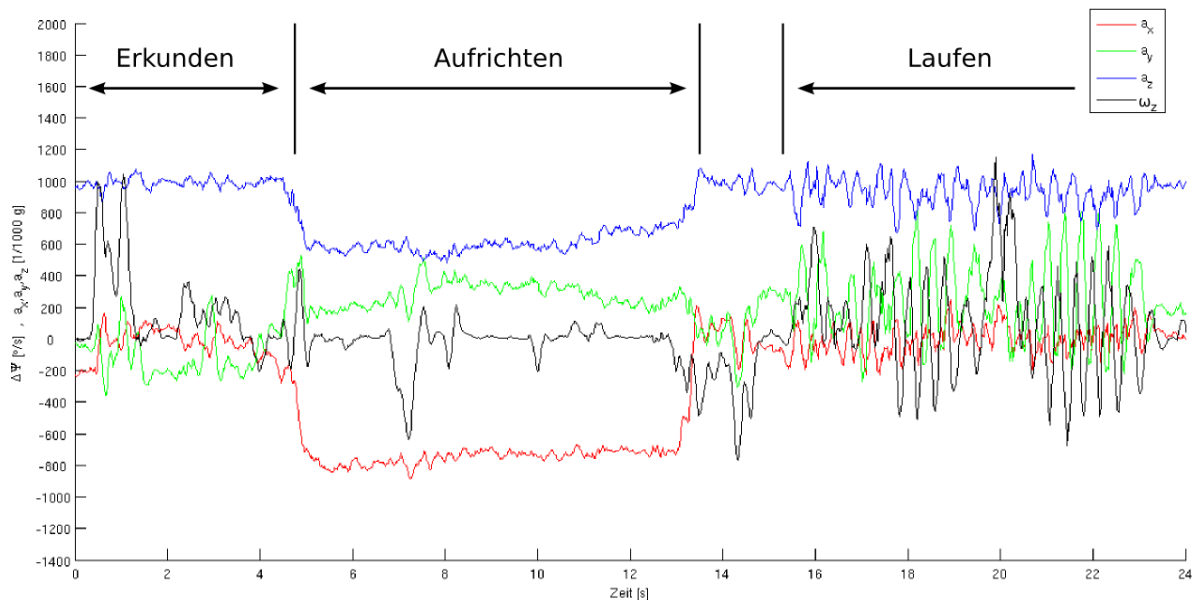


Abb. 20: Sensordaten bei verschiedenen Aktivitäten des Versuchstiers

In Abb.20 sind typische Aufzeichnungen der Beschleunigungen a_x, a_y, a_z aus den Accelerometerdaten zusammen mit der Winkelbeschleunigung ω_z des Gyroskops während verschiedener beobachteter Aktivitäten zu sehen:

- Deutlich erkennbar ist die Phase, in der das Tier sich an der Wand einer Kammer auf zwei Beinen stehend aufrichtet. In diesem Moment wirkt die Erdbeschleunigung entgegengesetzt zur X-Achse des Sensorknotens und schlägt sich in negativen Werten von a_x nieder.
- Während des Laufens zeigen sich vor allem in den a_y - und ω_z -Werten Schwingungen mit übereinstimmender und relativ konstanter Frequenz, während die Beschleunigung a_z mit weitaus kleineren Amplituden schwankt.

- Das Erkunden der Umgebung wird durch einzelne Drehungen um die Z-Achse bei nahezu konstanter Beschleunigung a_z charakterisiert.

Die gemessene Drehbewegung um die Z-Achse beim Laufen wird durch Beobachtungen während der Versuche bestätigt: Die Wirbelsäule der Tiere biegt sich bei zwei aufeinanderfolgenden Schritten von oben betrachtet abwechselnd nach links und rechts. In [22] werden die Bewegungsabläufe kleiner Säugetiere, darunter auch der *Rattus norvegicus* beschrieben. Dort wird eine laterale Bewegung der Wirbelsäule ebenfalls festgestellt, wenn auch nicht quantitativ untersucht. Demnach entsprechen die Nulldurchgänge der Schwingungen in den Messungen von a_y und ω_z Anfang und Ende einer Schrittbewegung. Problematisch bei dieser Interpretation eines Schrittereignisses ist die Überlagerung mit anderen Bewegungen. Der Offset der Accelerometerdaten ändert sich mit der Neigung des Sensorknotens auf dem Rücken des Tieres, beim Gyroskop addiert sich die Winkelgeschwindigkeit beim Laufen um eine Kurve. All diese Effekte ändern die Zeitpunkte der Nulldurchgänge. Im Folgenden werden daher Pseudo-Schrittereignisse verwendet, die durch Extrema in den Daten definiert werden. Aufgrund der regelmäßigeren Oszillationen während der Laufbewegungen und des geringeren Rauschens des Gyroskops (siehe Abschnitt 4.2.1) wurde die Winkelgeschwindigkeit ω_z für die Schritterkennung gewählt.

6.1.1 Vorverarbeitung: Filter

Alle durch die Sensoren erfassten Messgrößen werden durch verschiedene Rauschprozesse beeinflusst. Um dieses Rauschen zu verringern, kann zum Beispiel ein Kalmanfilter eingesetzt werden. Oft wird aber ein einfacher Mittelwertfilter zur Glättung der Werte verwendet ([6], [21]).

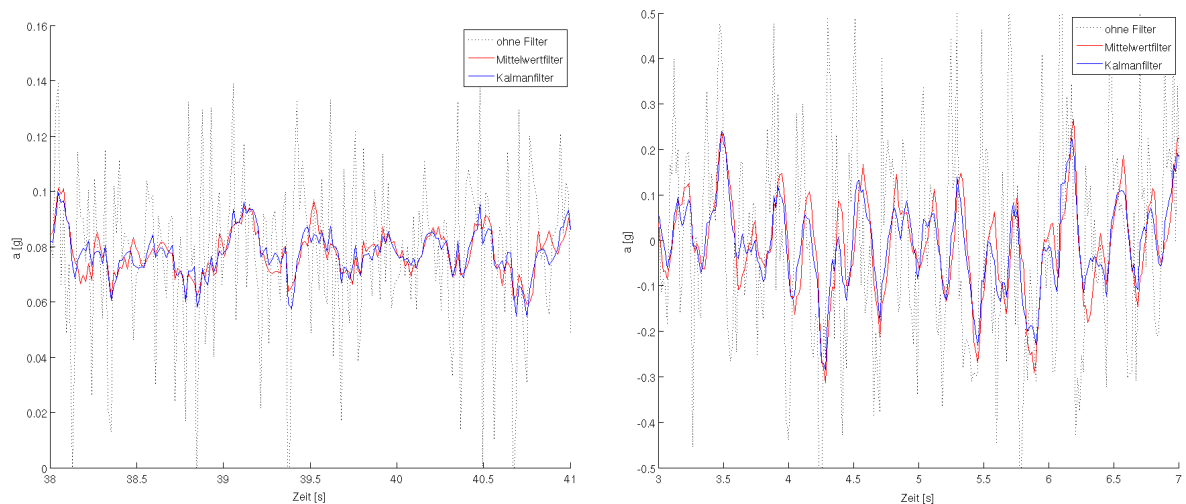


Abb. 21: Vergleich von Kalman- und Mittelwertfilter für die Beschleunigung a in Ruhelage (links) und während des Laufens (rechts)

Um zu entscheiden, welche Filterung für dieses Projekt geeigneter ist, wurde ein Kalmanfilter mit dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Prozessmodell auf die Daten des Accelerometers angewendet. Zum Vergleich wurde ein Mittelwertfilter mit einer Fenstergröße von 8 Werten

herangezogen, bei dem der gefilterte Wert \bar{a}_k aus den Messwerten a_k nach

$$\bar{a}_k = \frac{1}{8} \sum_{n=k-7}^k a_n \quad (30)$$

berechnet wird. Im Kalmanfilter wurde für die Kovarianz des Messrauschens R der in Ruhelage des Sensors gemessene Wert von 0,03 eingesetzt. Der Parameter q zur Definition des Prozessrauschens wurde so angepasst, dass die Standardabweichung der gefilterten Werte in der Ruhelage den Wert von 0,0076g annimmt, der der Standardabweichung des Mittelwertfilters auf den gleichen Daten entspricht. In Abb.21 ist das Ergebnis zu sehen: Links sind die gefilterten Daten in Ruhelage zu sehen, wo sie das Rauschen erwartungsgemäß gleich gut unterdrücken. Rechts daneben ist die Anwendung der Filter ohne Veränderung der Parameter während einer Laufbewegung abgebildet. Die Extrema der einzelnen Schritte werden durch beide Filter deutlich wiedergegeben. Es ist jedoch auffällig, dass die Kalman-gefilterten Daten oft kleinere Extrema innerhalb der dominanten Schrittbewegungen zeigen. Ob diese Daten eher der Realität entsprechen, kann nicht beurteilt werden. Es ist jedoch ersichtlich, dass die durch den Mittelwertfilter berechneten Werte ausreichen, um z.B. aus den Accelerometerdaten weniger verrauschte Nick- und Rollwinkel zu berechnen oder Gyroskopmessungen für die Detektion von Schrittereignissen zu optimieren. Alle im Folgenden verwendeten Sensordaten wurden durch den beschriebenen Mittelwertfilter vorbearbeitet.

6.1.2 Regelbasierte Identifizierung von Schrittereignissen

Wie in Abschnitt 6.1 ausgeführt, wird für die Schritterkennung nach lokalen Extrema im Signal von ω_z gesucht. Seien im Folgenden ω_k der k -te Messwert in ω_z , m ein lokales Maximum und \bar{m} ein lokales Minimum. Die Bedingungen für die Extrema können damit unkompliziert aufgestellt werden:

$$m = \text{wahr} \quad \forall k \mid \omega_k > \omega_{k-1} \wedge \omega_k > \omega_{k+1}$$

$$\bar{m} = \text{wahr} \quad \forall k \mid \omega_k < \omega_{k-1} \wedge \omega_k < \omega_{k+1}$$

Lokale Extrema treten natürlich sehr häufig durch das Rauschen des Datenstroms auf. Daher muss auch die Amplitude a_i des i -ten Extremums berücksichtigt werden. Dazu wird ein Schwellwert b eingeführt, der vom Betrag der Differenz $|\omega_k - a_{i-1}|$ überschritten werden muss, damit das Kriterium für ein Schrittereignis erfüllt wird. Die Anwendung dieses Kriteriums kann dazu führen, dass z.B. in einer Sequenz m, \bar{m}, m das Minimum nicht als Schrittereignis akzeptiert wird und zwei Maxima aufeinanderfolgen. Da aufgrund des Bewegungsablaufs jedoch abwechselnd Maxima und Minima vorkommen müssen, wird in diesem Fall das Maximum mit der kleineren Amplitude verworfen. In Abb.22 ist der komplette Algorithmus für die Schritterkennung dargestellt. Darin ist Bedingung m_i wahr, wenn das i -te Extremum ein lokales Maximum darstellt, \bar{m}_i steht für die Negation dieser Bedingung.

Wie in Abb.23 zu sehen ist, markiert der vorgestellte Algorithmus nur Extrema, die von den Laufbewegungen verursacht wurden. Doppelspitzen in einer Schwingung sowie die überlagerte Drehung kurz vor Ende des Laufs behindern die Detektion der Schritte nicht. Auch das „Zittern“ der Werte bei Stillstand des Tieres verursacht keine Fehldetektionen. Im Hintergrund sind die Beschleunigungen a_y eingeblendet, die übereinstimmende Schrittmuster zeigen und damit die Ergebnisse der Detektion bestätigen.

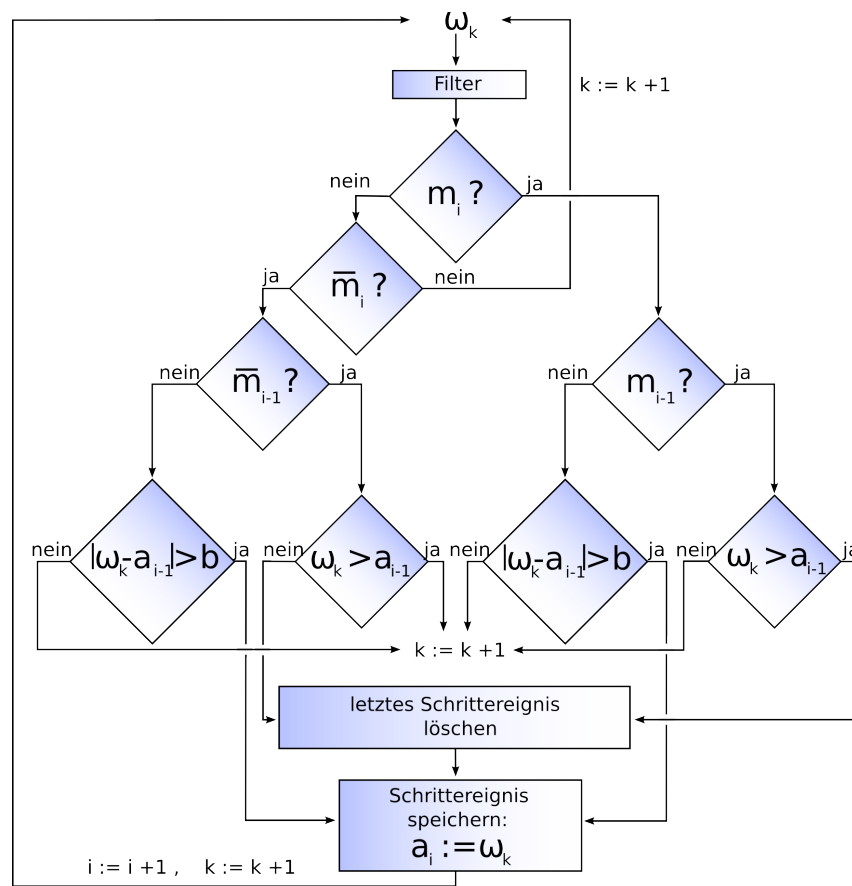


Abb. 22: Algorithmus zur Detektion von Schrittereignissen

6.1.3 Analyse der Schrittparameter

Um Aussagen über Schrittlängen und den zurückgelegten Weg treffen zu können, wurden die Parameter der detektierten Schritte von zwei Versuchstieren untersucht. Vorausgegangene Versuche innerhalb des Ratpack-Projekts hatten ergeben, dass ein Zusammenhang zwischen der Laufgeschwindigkeit eines Tiers und den Zeitabständen zwischen zwei Schrittereignissen besteht [23]. Daher wurden auch die in dieser Diplomarbeit aufgezeichneten Daten auf diesen Zusammenhang hin überprüft. Da sich zeigte, dass die Dauer eines kompletten Schrittzklus aus je einem Schritt des linken und des rechten Hinterbeins stabiler ist als die Einzelabstände, wurde diese für die folgenden Betrachtungen verwendet. Abb.24 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Dauer der Schrittzklen getrennt für beide Versuchstiere.

Für Tier 1 wurden dafür alle Daten aus 10 Versuchstagen verwendet, für Tier 2 sind Daten von 3 Tagen aus der Trainingsphase eingeflossen. Man erkennt bei beiden Tieren eine signifikante Häufung mit einem Spitzenwert bei einer Dauer von genau $0,38s$. Die geringen, aber immer noch vorhandenen Häufigkeiten im Intervall $[1,2]s$ erklären sich durch kurze Pausen zwischen zusammenhängenden Schrittfolgen. Aus diesen Daten kann man folgern, dass die Dauer der Schrittzklen in diesem Versuchsaufbau nur in engem Rahmen variiert und auch der Unter-

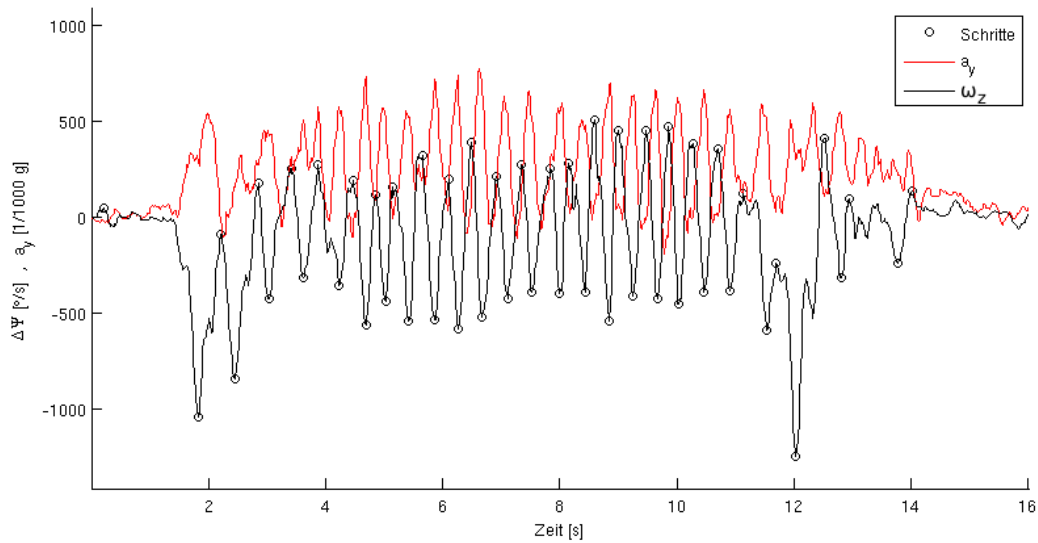


Abb. 23: Bewegungsmuster in Accelerometer- und Gyroskopdaten und detektierte Schrittereignisse

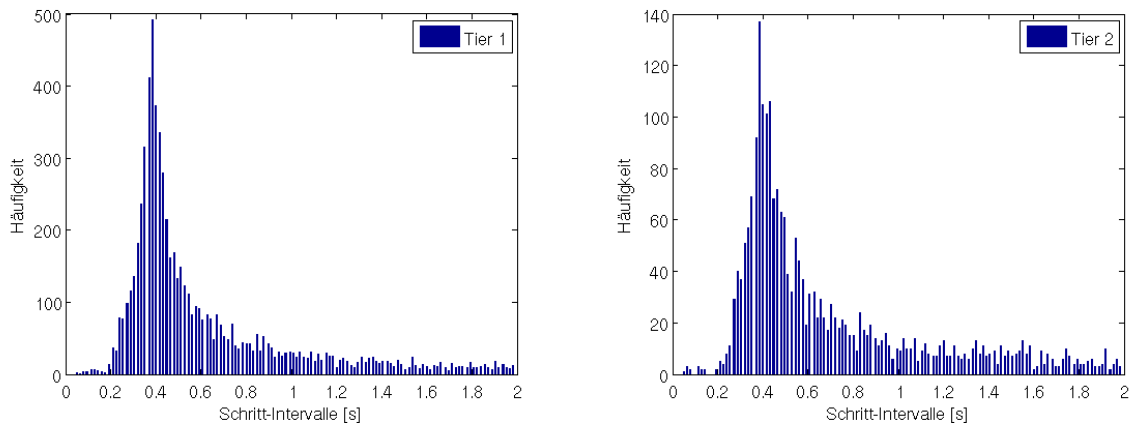


Abb. 24: Verteilung der Dauer eines Schrittzklus bei Versuchstier 1 und 2

schied zwischen den Tieren nicht groß ist. Eine weitere Informationsquelle zur Analyse bieten die Auslözeitpunkte der Lichtschranken. Extrahiert man aus den Daten Zeitabschnitte, in denen das Versuchstier die Wegstrecke zwischen zwei Lichtschranken ohne Pausen zurückgelegt hat, kennt man durch die gegebene Geometrie des Aufbaus für jede Strecke i sowohl die Distanz d_i als auch die dafür benötigte Zeit t_i . Des Weiteren kann durch Anwendung der beschriebenen Schritterkennung die Anzahl der Schritte n_i auf der jeweiligen Strecke ermittelt werden. Aus diesen Angaben lässt sich eine mittlere Schrittdauer $\tau_i = t_i/n_i$ sowie eine mittlere Schrittlänge $\delta_i = d_i/n_i$ berechnen.

Abb.25 zeigt den Zusammenhang zwischen τ_i und δ_i für alle untersuchten Wegstrecken. Die eingezeichnete Fit-Gerade ist durch die kleinste quadratische Abweichung zu den Werten definiert.

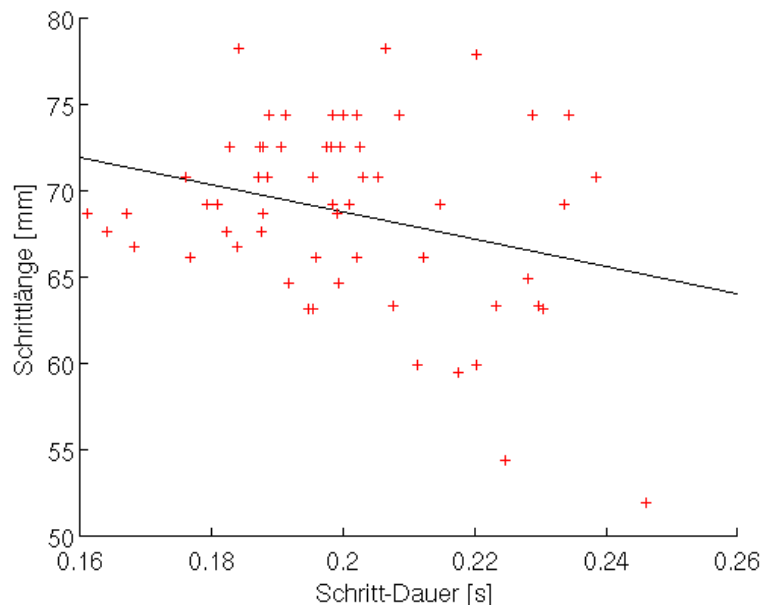


Abb. 25: Zusammenhang zwischen Schrittdauer und Schrittlänge

Wie man erwarten kann, verringert sich die Schrittlänge bei längeren Schrittdauern, was mit der Beobachtung in [23] übereinstimmt, dass die Schrittdauer mit höherer Geschwindigkeit abnimmt. Allerdings ist der Effekt mit einem Einfluss von $7,9\text{mm}$ im gesamten vorkommenden Wertebereich von $[0,16..0,26]\text{s}$ gering und mit einer Standardabweichung der Schrittlänge von $5,1\text{mm}$ zur Fit-Geraden zu stark gestreut, um ihn in der Schrittlängenbestimmung zu berücksichtigen. Dieses Ergebnis beruht allerdings auf der Mittelung der variierenden Geschwindigkeit eines Tieres während des Laufens, die im verwendeten Versuchsaufbau nicht direkt gemessen werden konnte. Parallel zu dieser Diplomarbeit wurden die Schrittbewegungen von Ratten in einer geschlossenen Umgebung parallel mit aufgesetztem Sensorknoten und mit einem Video-Tracking-System untersucht, das Laufgeschwindigkeiten durch Verfolgen der Position direkt bestimmen kann. Die Kenntnis der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Auftretens bestimmter Schrittdauern könnte den Zusammenhang beider Größen genauer erfassen, die Versuche laufen allerdings noch. Da Abb.25 aber auch zeigt, dass die Schrittlängen durchschnittlich nur um $9,1\%$ des Mittelwerts von 66mm abweichen und die Abweichungen nahezu gleichverteilt sind, ist die Annahme einer konstanten Schrittlänge in der Größe des Mittelwerts für die weiteren Betrachtungen akzeptabel. Eine ähnliche Abschätzung für konstante gemittelte Schrittdauern wurde in [21] erfolgreich angewendet.

6.2 Richtungsschätzung

Nach der Abschätzung der Distanzen zurückgelegter Streckenabschnitte ist die Ermittlung der Bewegungsrichtung die zweite Bedingung für die Anwendung eines Dead-Reckoning-Algorithmus. Im Unterschied zu anderen Projekten ([21], [24]) steht hierfür aus Platz- und Kostengründen statt eines 3D-Kompass nur ein in zwei Achsen messender Sensor zur Verfügung. Die Konsequenzen sind wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben Abhängigkeiten der Azimutwerte von der Lage des Sensorknotens. Eine weitere Herausforderung ist die Erkennung und Reduzierung des Einflusses von lokalen Störungen im Magnetfeld auf die Richtungsschätzung. In [24] wird aus

drei magnetoresistiven Sensoren der Vektor der Magnetfeldstärke bestimmt. Ändert sich dessen Betrag oder seine Inklination, wird dies als Störung interpretiert und die Azimuthbestimmung verworfen. Eine solche Detektion oder eine Lagekorrektur des gemessenen Azimuthwinkels ist mit dem verwendeten 2D-Kompass prinzipiell nicht möglich. In [25] wird ein Algorithmus beschrieben, der bei Kenntnis der Nick- und Rollwinkel sowie der Magnetfeldstärken H_x und H_y und des lokalen Inklinationswinkels des Erdmagnetfelds den Wert der dritten Komponente H_z abschätzt. Der hier verwendete Kompass gibt jedoch den intern berechneten Azimuthwinkel Ψ aus, der lediglich in horizontaler Lage auf die Werte $s_x H_x = \cos \Psi$ und $s_y H_y = -\sin \Psi$ schließen lässt. Für Abweichungen aus der Horizontalen ist dieser Zusammenhang nicht gegeben (siehe Abschnitt 2.2.3). Die vom 2D-Kompass ausgegebenen Werte für Ψ sind folglich nur verwendbar, wenn gleichzeitig die Nick- und Rollwinkel klein sind.

6.2.1 Fusion von Gyroskop- und Kompassdaten

Informationen über den Azimuthwinkel können aber auch über die vom Gyroskop gemessenen Winkelgeschwindigkeit um die Z-Achse ω_z gewonnen werden. Um Ψ zum Zeitpunkt t_1 zu bestimmen, wird ω_z über das Zeitintervall $[t_0, t_1]$ integriert:

$$\Psi(t_1) = \int_{t_0}^{t_1} \omega_z(t) dt + \Psi(t_0) \quad (31)$$

Dabei gibt t_0 den Zeitpunkt des letzten bekannten Werts für Ψ an. Das Problem dieses Vorgehens ist allerdings die Drift des Gyroskops: Der Messwert von w_z wird bei Stillstand aufgrund von Rauschen und Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung nie genau Null annehmen. Durch die Integration dieser fehlerbehafteten Größe driftet der berechnete Azimuthwinkel um mehrere Grad pro Sekunde. Der Vorteil besteht aber in der Unabhängigkeit der so berechneten Drehbewegung von den oben genannten Störeinflüssen der Kompassmessung. Eine Lösung, die die Vorteile von Kompass und Gyroskop kombiniert, wird in [21] vorgestellt. Dort wird die Drift der Gyroskopmessungen wie folgt ermittelt: Seien w_i die gemessene Winkelgeschwindigkeit, b_i der Betrag der momentanen Drift und ϵ_i eine Abschätzung des Messrauschens. Die wahre Winkelgeschwindigkeit setzt sich dann zusammen als

$$\omega_i^{wahr} = \omega_i - b_i + \epsilon_i \quad \Leftrightarrow \quad b_i - \epsilon_i = \omega_i - \omega_i^{wahr} \quad . \quad (32)$$

Wenn sich der Sensor in Ruhelage befindet, also $\omega_i^{wahr} = 0$, ergibt sich nach (31) für den Azimuth:

$$\Psi(t_1) = \int_{t_0}^{t_1} b(t) - \epsilon(t) dt + \Psi(t_0) \quad \Rightarrow \quad \Psi(t_1) - \Psi(t_0) = \sum_{i=t_0}^{t_1} b_i - \underbrace{\sum_{i=t_0}^{t_1} \epsilon_i}_{\rightarrow 0} \quad . \quad (33)$$

Die mittlere Driftrate \bar{b} beträgt dann

$$\bar{b}_{t_0} = \frac{1}{t_1 - t_0} \sum_{i=t_0}^{t_1} b_i = \frac{1}{t_1 - t_0} (\Psi(t_1) - \Psi(t_0)) \quad . \quad (34)$$

Nimmt man \bar{b} innerhalb von kurzen Zeitintervallen als konstant an, lassen sich damit die in der Zeit $[t_1, t_2]$ zwischen zwei Ruhelagen bestimmten Azimuthwinkel korrigieren:

$$\Psi(t_i)^{korrigiert} = \Psi(t_i) - (t_i - t_1) \cdot \bar{b}_{t_2} \quad (35)$$

Somit kann das Gyroskop die Azimutmessung des Kompass übernehmen, falls kurzzeitig magnetische Störungen detektiert werden. Nach einer Zeit Δt akkumulieren sich allerdings die Fehler durch die Annahme einer konstanten Drift, so dass bei wieder verfügbaren verlässlichen Kompassdaten eine weitere Korrekturrechnung durchgeführt wird mit dem Ansatz

$$\bar{b} = \frac{1}{\Delta t} (\Psi^{Gyro} - \Psi^{Kompass}) \quad . \quad (36)$$

Dieser Ansatz wurde auch in der Diplomarbeit implementiert. Da wie im letzten Abschnitt erklärt aus den verfügbaren Messwerten lokale magnetische Störungen nicht explizit detektiert werden können, wurde die Bestimmung der Drift angepasst: $\Psi^{Kompass}$ und Ψ^{Gyro} werden immer dann abgeglichen, wenn der Kompass sich in horizontaler Lage befindet und damit in ungestörter Umgebung den wahren Azimuth liefert. Dies ist vor allem während der Laufbewegungen kurzzeitig der Fall; steht das Tier still, liegt der Kompass oft leicht geneigt auf dem Rücken. Abb.26 zeigt die Azimuthbestimmung während des Laufs eines Tiers von Kammer 1 nach Kammer 2 mit und ohne Datenfusion von Kompass und Gyroskop. Zusätzlich sind die Zeitpunkte der Abgleiche markiert.

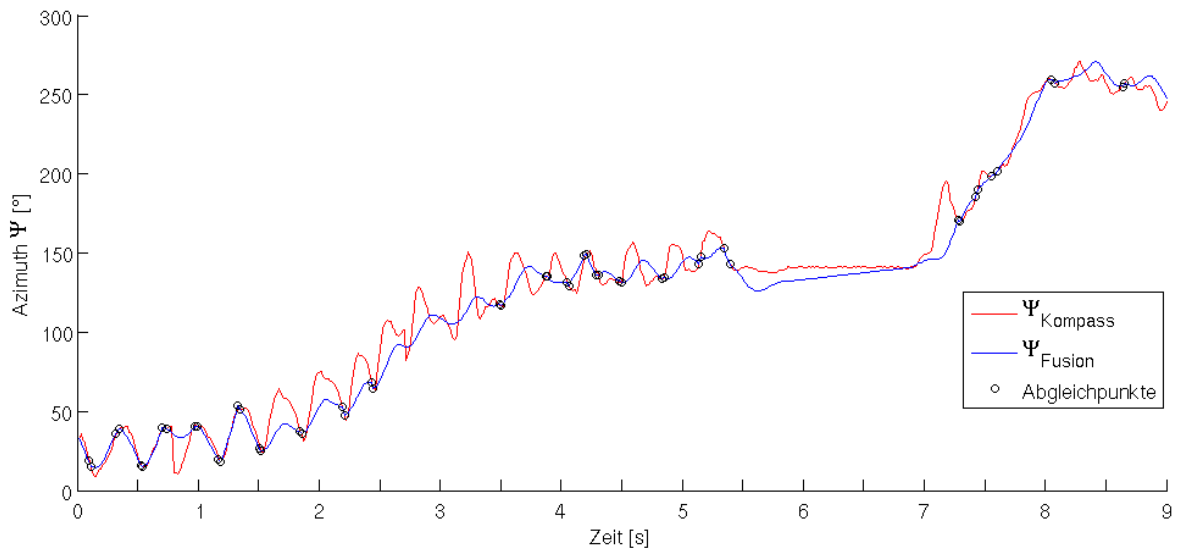


Abb. 26: Verbesserung der Azimuthbestimmung durch Datenfusion von Kompass und Gyroskop

Die für eine horizontale Lage gestellte Bedingung ist ein Nick- und Rollwinkel von maximal 4° . Man sieht, dass diese Bedingung oft genug erfüllt ist, um einen größeren Einfluss der Drift zu vermeiden. Die fusionierten Azimuthwinkel stimmen nicht mit dem Mittelwert der durch die Laufbewegungen schwankenden Kompassdaten überein, was auf einen leicht schief getragenen Rucksack zurückzuführen ist. Der Einfluss dieser Schiefelage auf den Azimuth wird also durch das Verfahren abgeschwächt. Versuche, die horizontale Lage strenger zu definieren, ergaben große Abweichungen für Ψ^{Gyro} aufgrund der längeren Zeitintervalle ohne Abgleich. Der Grund hierfür könnten zusätzlich zu einer variablen Driftrate nicht entdeckte Nichtlinearitäten in den Gyroskopmessungen sein. Während der Laufbewegungen treten Spitzenmesswerte von über $1000^\circ/s$ auf, während der Aufbau zur Kalibrierung nur Winkelgeschwindigkeiten bis zu $300^\circ/s$ erzeugen konnte (siehe Abschnitt 4.2.1).

6.2.2 Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen

Um den Einfluss der lokalen Anomalien im Magnetfeld am Ort des Versuchsaufbaus auf die Ergebnisse des Versuchs gering zu halten, werden die in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Messungen der Azimuth-Abweichungen entlang des Gangsystems für eine Korrekturrechnung verwendet. Dazu wurde zu jedem Messpunkt die Lauflänge von Lichtschranke $LS1$ in Richtung $LS2$ bestimmt. Bereits bekannt sind für jeden aufgezeichneten Lauf zwischen zwei Lichtschranken die Anzahl der Schritte n , die Gesamtlänge und damit die durchschnittliche Schrittlänge δ (siehe Abschnitt 6.1.3). Also kann zu jedem Schrittereignis n_k die zurückgelegte Strecke $d_k = n_k \cdot \delta$ angegeben werden. Dazu werden die Messpunkte i, j mit minimalem Abstand zu d_k gesucht, so dass $d_i \leq d_k < d_j$. Die Azimuth-Abweichung $\Delta\Psi_k$ wird an der Position d_k dann linear interpoliert mit

$$\Delta\Psi_k = (1 - a) \cdot \Psi_i + a \cdot \Psi_j \quad , \quad a = \frac{d_k - d_i}{d_j - d_i} \quad . \quad (37)$$

$\Delta\Psi_k$ wird dann vom jeweils an der Position gemessenen Azimuth subtrahiert. Die Genauigkeit dieser Korrektur hängt von der Varianz der Schrittlänge sowie von der Annahme ab, dass die Azimuth-Abweichungen zwischen den Messpunkten interpoliert werden können. Dennoch zeigt die folgende Rekonstruktion der Laufwege der Versuchstiere, dass das Ergebnis durch die Korrektur deutlich verbessert werden kann.

6.3 Rekonstruktion der Trajektorien

Die vorausgegangenen Verarbeitungsschritte liefern nun Schrittereignisse, denen jeweils eine Schrittlänge δ und eine Bewegungsrichtung Ψ zugeordnet sind. Damit können fortlaufende Positionen \vec{r} in Abhängigkeit zur zurückgelegten Wegstrecke s durch folgendes Wegintegral berechnet werden:

$$\vec{r}(i) = \oint_0^i r(s)' ds = \oint_0^i \begin{pmatrix} -\cos \Psi(s) \\ \sin \Psi(s) \end{pmatrix} \cdot \delta(s) ds \quad (38)$$

Im diskreten Fall kann das Integral rekursiv ausgewertet werden:

$$\vec{r}_{i+1} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\cos \Psi_i \\ \sin \Psi_i \end{pmatrix} \cdot \delta_i \quad (39)$$

Die Annahme einer konstanten Bewegungsrichtung zwischen zwei Schrittereignissen führt zu Fehlern, die sich in der berechneten Position aufintegrieren. Daher werden zwischen zwei Schrittereignissen 10 Stützstellen eingefügt, an denen das Wegintegral ausgewertet wird. Der Azimuth an diesen Stützstellen wird linear aus den Werten an den benachbarten Schrittereignissen interpoliert.

6.3.1 Selektion relevanter Daten

Eine Schwachstelle des Sensorplots ist die Notwendigkeit, dass der Kompass in gewissen Zeitabständen in eine horizontale Lage gelangen muss, um eine korrekte Messung für Ψ zu liefern. Geschieht dies nicht, steigt die Ungenauigkeit der Schätzung von Ψ aufgrund der Drift des Gyroskops. Um die Daten, bei denen dieses Problem auftritt, zu identifizieren, wurde eine Bewertungsfunktion definiert. Seien s_h die Anzahl der Datenpunkte, für die die Nick- und Rollwinkel zugleich $< 4^\circ$ sind und n die Anzahl der Schrittereignisse auf einer Wegstrecke. Für jede zwischen zwei Lichtschranken aufgezeichnete Wegstrecke wurde der Quotient s_h/n berechnet. Lag dieser Wert unter 1, wurde die betreffende Wegstrecke von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Ebenfalls entfernt wurden Daten, bei denen während der Aufzeichnung notiert wurde,

dass das Tier rückwärts läuft. Das Ergebnis der Rekonstruktion aller ausgewählten Trajektorien von $LS1$ nach $LS2$ ist in Abb.27 zu sehen. Für den Startpunkt der Trajektorien wurde berücksichtigt, dass der Kompass sich in Laufrichtung ca. 12cm hinter dem Kopf des Tieres befindet, der von der Lichtschranke zuerst detektiert wird.

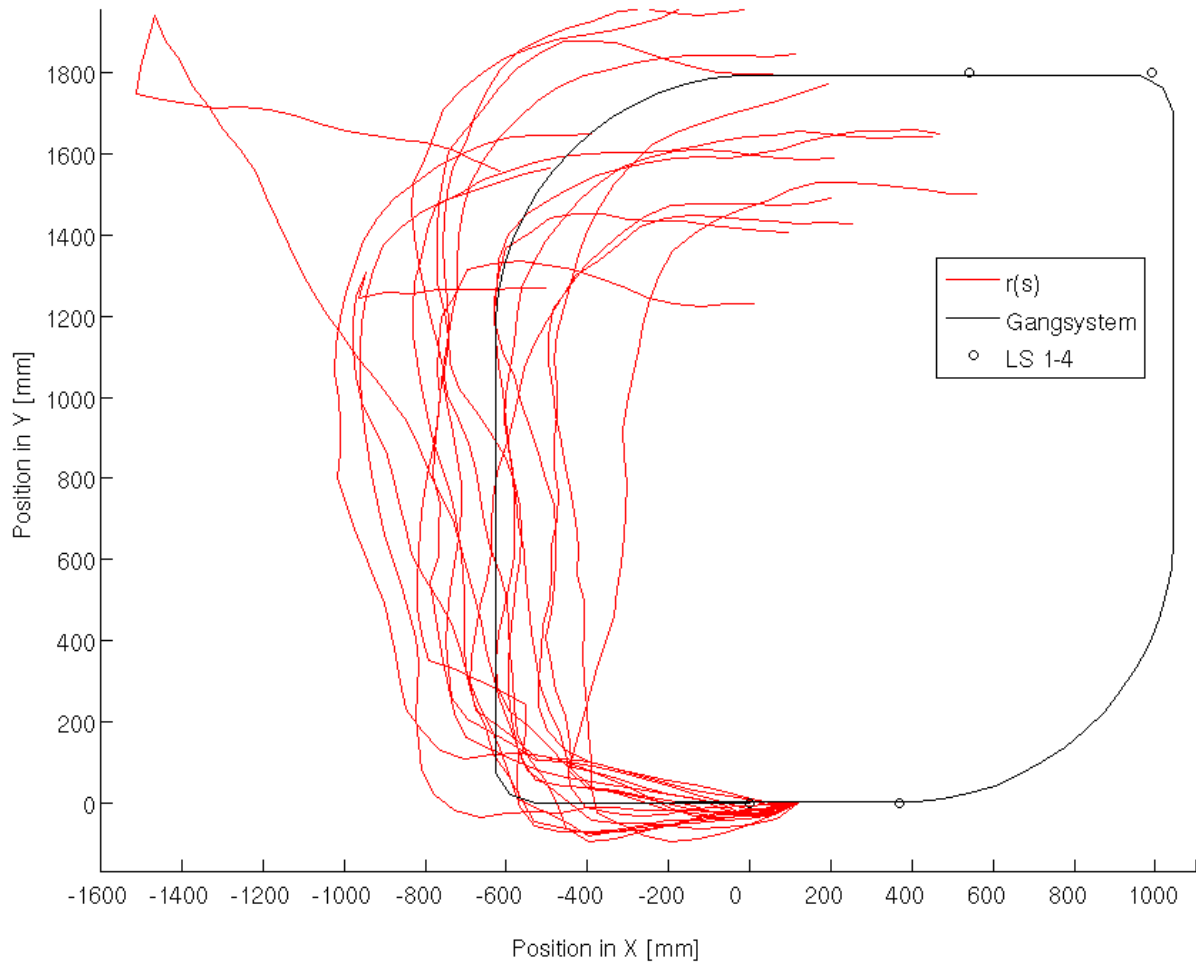


Abb. 27: Trajektorie von $LS1$ nach $LS2$ mit Ψ aus Gyro- und Kompassdaten und lokalen Korrekturen des Magnetfelds

Jede einzelne Trajektorie gibt die markanten Begebenheiten des tatsächlichen Gangverlaufs wieder, also eine kurze Gerade, darauf folgend eine enge Rechtskurve um 90° , ein langes Geradenstück und eine langgezogene Kurve um 90° . Deutlich ist aber auch eine vom Ausgangspunkt stetig wachsende Streuung der Laufrichtungen zwischen den einzelnen Trajektorien. Als Ursachen kommen sowohl ein jeweils etwas anders geneigter Sensor-knoten als auch eine lokale Ungleichverteilung der Schrittlängen in Frage. Auffällig ist jedoch, dass bis auf eine Ausnahme alle Trajektorien im Mittel dem tatsächlichen Gang folgen. Für eine Rekonstruktion bietet sich demnach eine Kombination aller verfügbaren Daten an.

6.3.2 Fusion von Trajektorien

Nach den vorausgegangenen Beobachtungen bietet sich für die Fusion der Trajektorien eine Art der Mittelwertbildung an. Dazu wurde folgende Annahme getroffen: Jede Trajektorie auf der Wegstrecke zwischen zwei Lichtschranken wurde in eine Anzahl von gleich langen Abschnitten unterteilt, d.h. die zurückgelegte Wegstrecke an deren Ende sollte bei allen Trajektorien gleich lang sein. Im Anschluss wurden die Positionen für die Endpunkte der Abschnitte berechnet. Aus diesen Werten wurden für X- und Y-Koordinate getrennt jeweils der Mittelwert und der Median bestimmt. Die daraus entstandenen gemittelten Trajektorien sind in den folgenden Abbildungen 28 - 30 zu sehen. Die zur Mittelung verwendeten Wegstrecken sind gepunktet eingezeichnet. Die

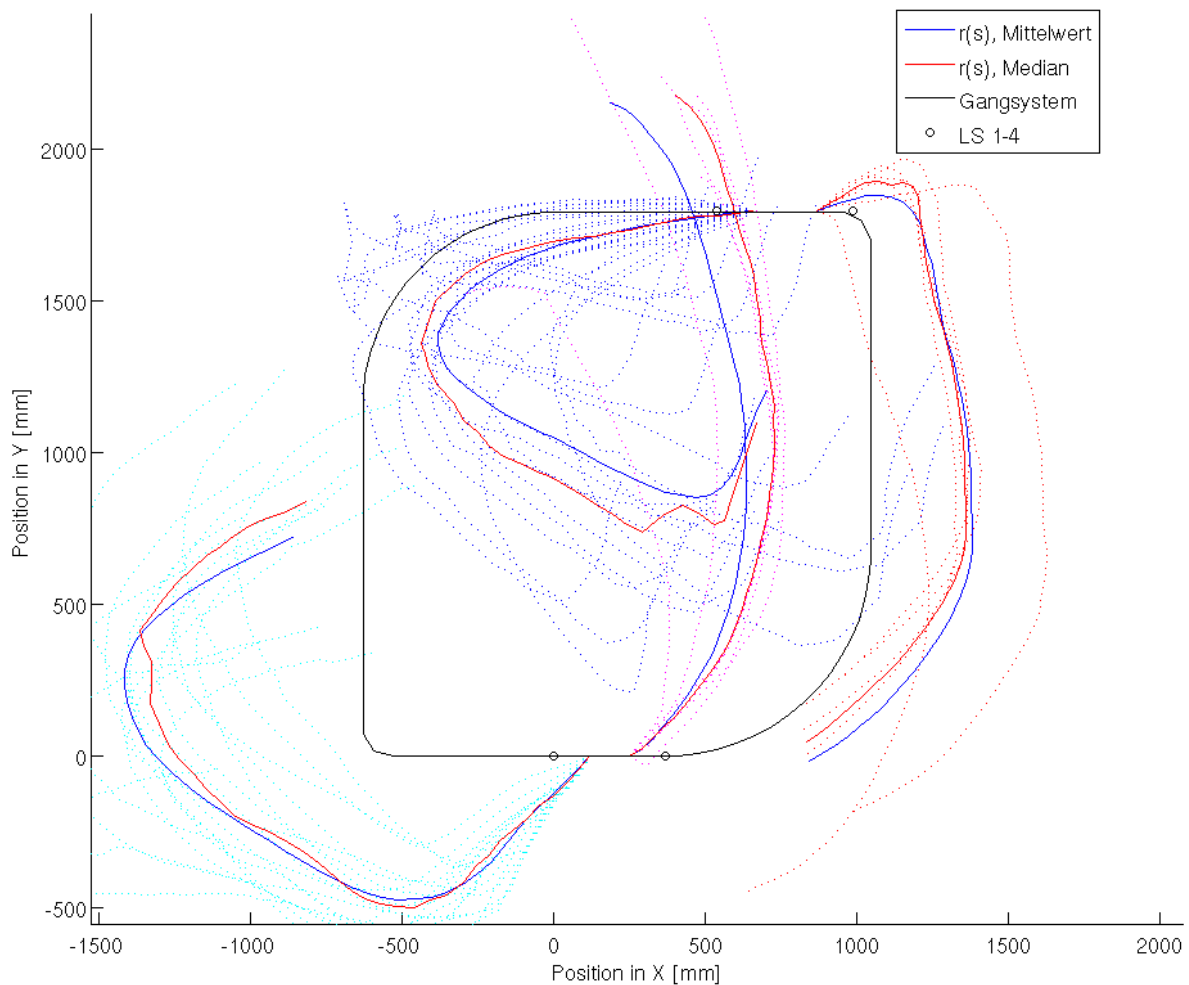


Abb. 28: Trajektorien mit Ψ aus unbearbeiteten Kompassdaten

Rekonstruktion mit Hilfe von unbearbeiteten Kompassdaten in Abb.28 zeigt Trajektorien, die sowohl in ihrer Grundrichtung als auch in den Winkelbeträgen der durchlaufenen Kurven inakzeptabel große Abweichungen aufweisen. Nach der Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen stimmen die Laufrichtungen in etwa mit der Realität überein, die Kurven vor allem der Trajektorien zwischen $LS1$ und $LS2$ beschreiben allerdings immer noch keinen rechten Winkel (Abb.29). Erst die zusätzliche Verbesserung der Azimuttschätzung durch Gyroskopdaten in Abb.30 gibt die Charakteristika der Wegstrecken akzeptabel wieder. Die über den Mittelwert berechneten

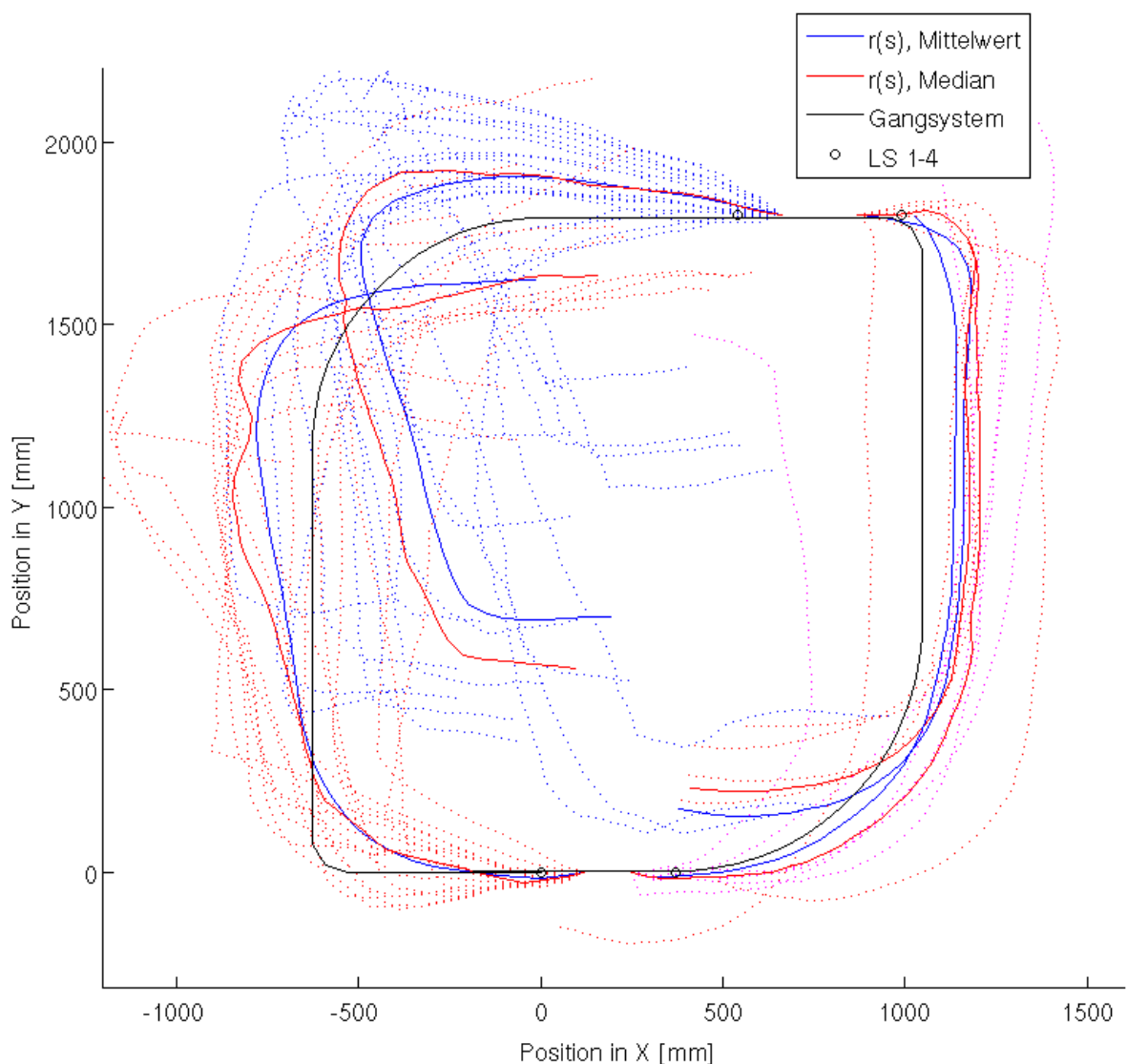


Abb. 29: Trajektorien mit Ψ aus Kompassdaten mit Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen

Trajektorien lieferten jeweils etwas bessere Ergebnisse als die über den Median ermittelten. Die Abweichung des Endpunkts einer Trajektorie von ihrer tatsächlichen Position liegt für die Wegstrecke mit Startpunkt bei $LS1$ bei $41,6\text{cm}$, was $14,0\%$ der zurückgelegten Distanz entspricht. Bei der Strecke mit Startpunkt bei $LS2$ liegt die Abweichung bei $59,7\text{cm}$ oder $20,1\%$. Die Werte für Startpunkt $LS3$ betragen $14,4\text{cm}$ bzw. $6,2\%$ und für den Startpunkt $LS4$ sind es $2,6\text{cm}$ bzw. $1,1\%$. Die erheblich genauere Rekonstruktion zwischen $LS3$ und $LS4$ kann unter Anderem damit zusammenhängen, dass auf dieser Strecke eine schwächere Inhomogenität des Magnetfelds gemessen wurde. Eine weitere Variante der Bestimmung der gemittelten Trajektorie, wie sie in [1] für Positionsdaten aus dem Radio-Tracking vorgeschlagen wird, wurde getestet. Dabei wurde in jedem Abschnitt der Mittelwert eines Fensters über die letzten und die folgenden Positionen der einzelnen Trajektorien gebildet. Das Ergebnis war aber nahezu identisch mit der einfachen Mittelung und wird daher hier nicht weiter betrachtet.

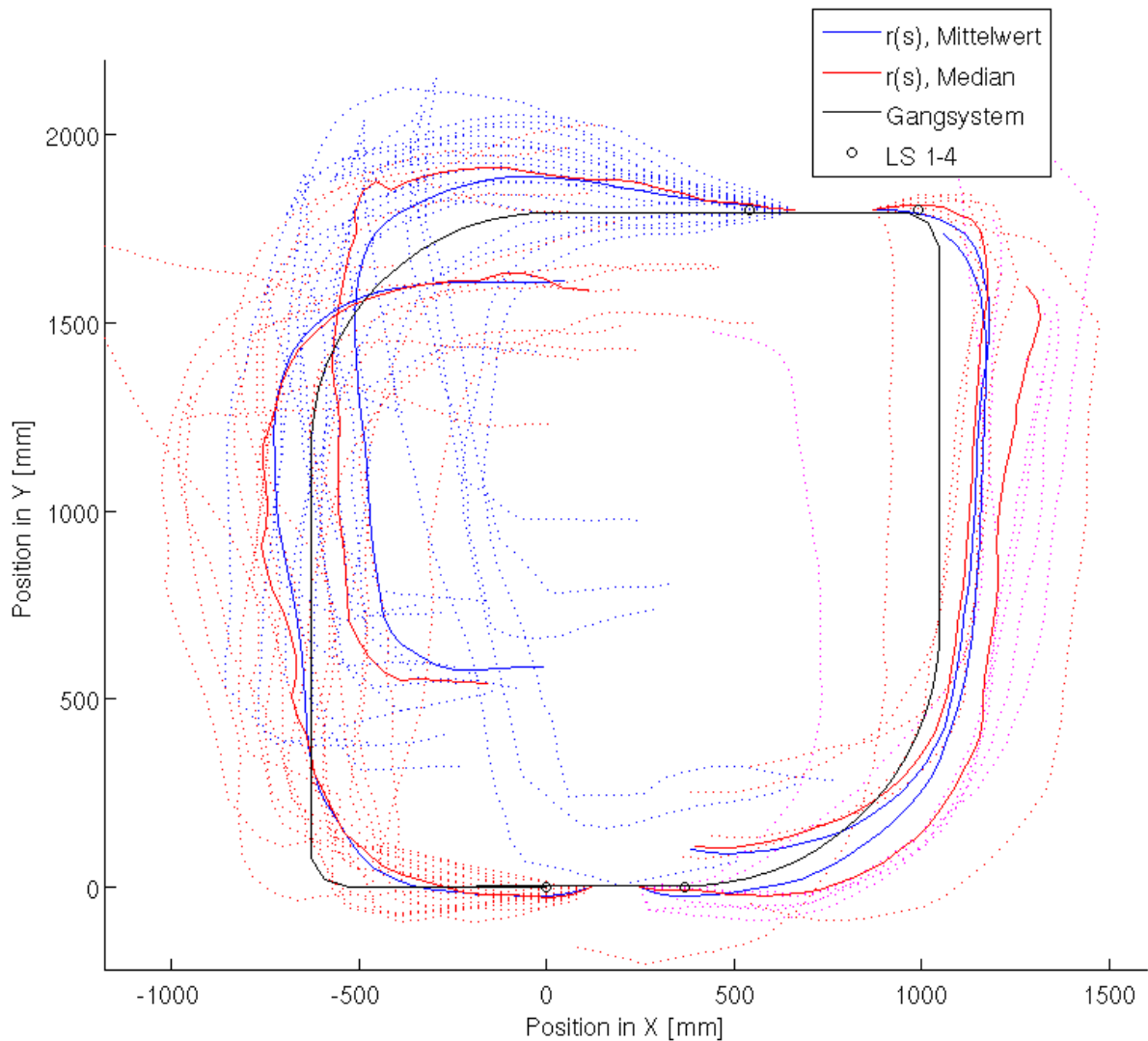


Abb. 30: Trajektorien mit Ψ aus Gyro- und Kompassdaten mit Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen

In Abb.31 sind für jede gemittelte Position der Trajektorie Ellipsen eingezeichnet, deren Breite und Höhe den Standardabweichungen der X- und Y-Koordinaten entsprechen. Interessant ist dabei die Beobachtung, dass die Unsicherheit der Position vor allem jeweils im ersten Streckenabschnitt rasch anwächst, später jedoch nur noch langsam zunimmt. Dies lässt die Vermutung zu, dass vor allem zu Beginn der Laufphase eines Tieres die Längen der einzelnen Schritte breit gestreut sind und die Annahme einer konstanten Schrittlänge erst nach einer gewissen Strecke zutrifft. In Anbetracht der nicht ideal geeigneten Versuchsumgebung kann die Rekonstruktion des Gangsystems als erfolgreich betrachtet werden. Man kann davon ausgehen, dass beim Einsatz des Sensorknotens in natürlicher Umgebung wegen des zu erwartenden wesentlich homogenen Magnetfelds ähnliche oder bessere Ergebnisse erzielt werden können.

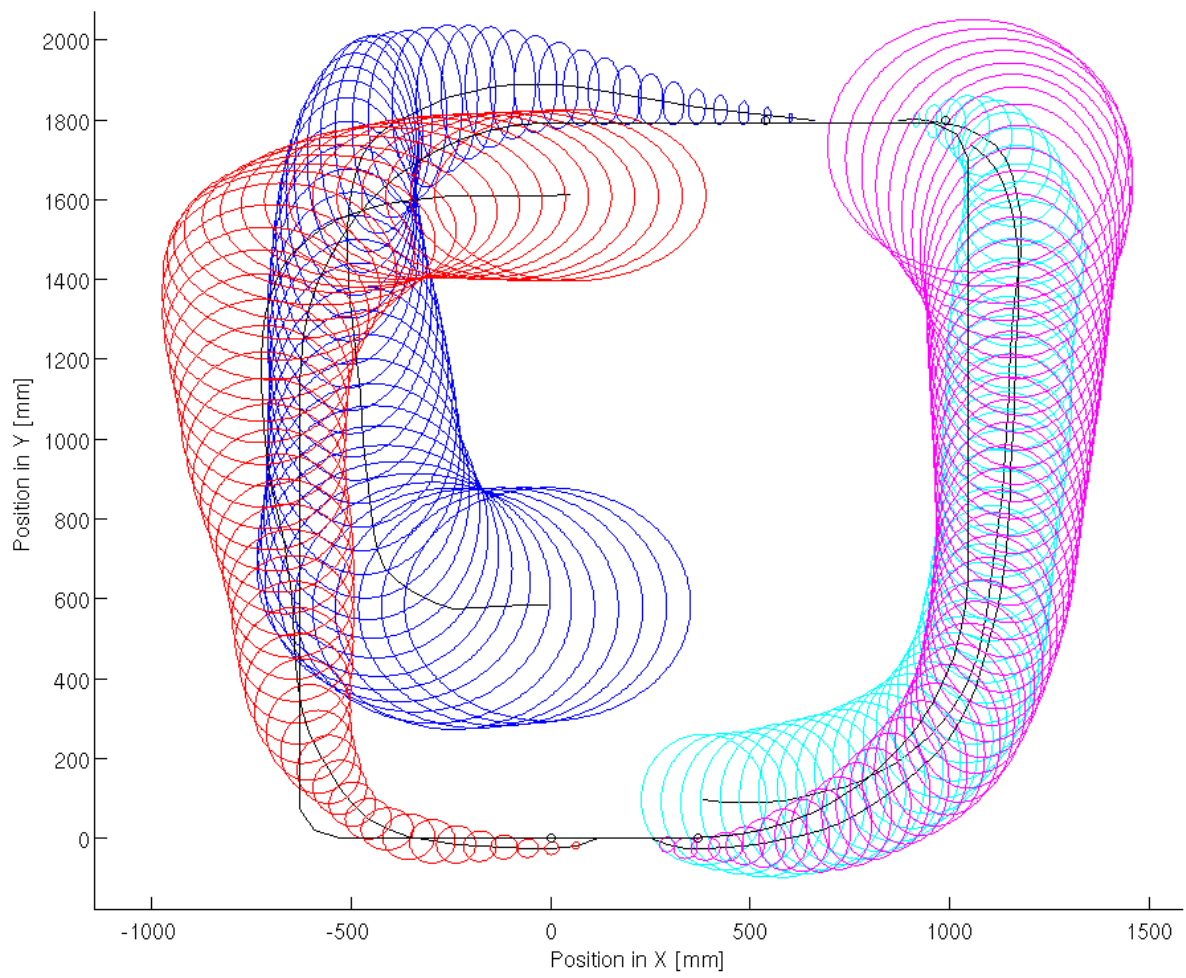


Abb. 31: Standardabweichungen für jeden Positionsmittelwert der Trajektorien

7 Diskussion

7.1 Implementierung des vorgestellten Verfahrens

Das im letzten Kapitel beschriebene Verfahren zur Rekonstruktion der Trajektorien aus den Daten des Sensorknotens wurde zur Konzeption in der Sprache MATLAB implementiert. Als Eingabe dienen die vom Host-PC abgespeicherten Dateien, in denen die während eines Versuchstags aufgezeichneten Sensordaten sowie die Aktivierungszeiten der Lichtschranken enthalten sind. Im Folgenden wird eine Übersicht über die Abfolge der Auswertungsfunktionen gegeben. Abb.11 zeigt schematisch den Datenfluss, dabei arbeitet jede Funktion immer auf den kompletten Daten des jeweiligen Sensors.

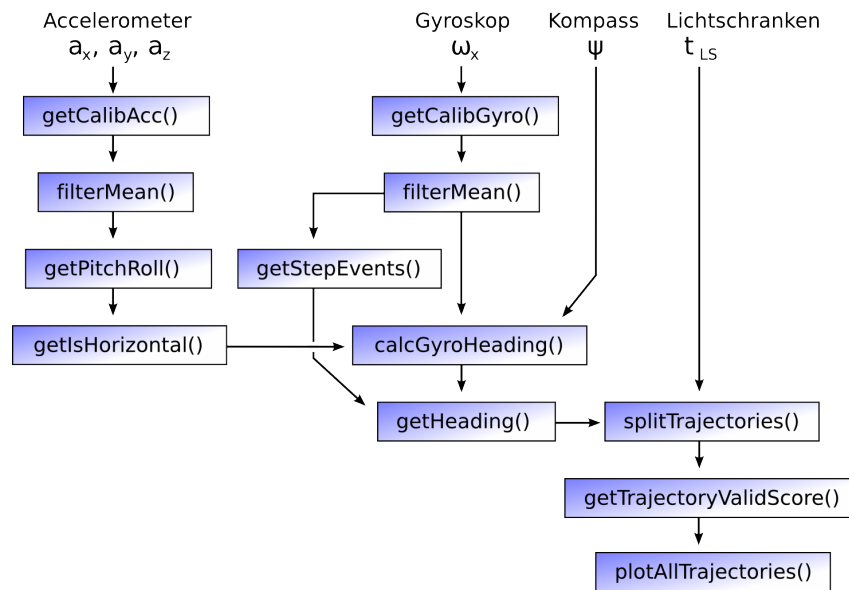


Abb. 32: Datenfluss in der Implementierung der Rekonstruktion

Die unbearbeiteten Accelerometerdaten werden in der Funktion *getCalibAcc()* mit Hilfe einer Lookup-Tabelle linearisiert und in Einheiten der Erdbeschleunigung $|\vec{g}|$ umgerechnet. In *filterMean()* wird auf die Daten ein Mittelwertfilter angewendet. Die gefilterten Werte der drei Achsen werden in *getPitchRoll()* jeweils auf $|\vec{a}| = 1$ normiert und daraus die Nick- und Rollwinkel bestimmt. Diese werden verwendet, um in *getIsHorizontal()* Bereiche in den Daten zu markieren, in denen der Sensorknoten mit einer Toleranz von 4° horizontal orientiert ist. Die Winkelgeschwindigkeit ω_x wird mit *getCalibGyro()* in die Einheit $^\circ/s$ umgerechnet und ebenfalls gefiltert. *getStepEvents()* wendet den in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Algorithmus zur Schritterkennung auf den Gyroskopdaten an. Sowohl ω_x als auch die Azimutwinkel Ψ vom Kompass und die Informationen über Messungen in horizontaler Lage fließen in die Funktion *calcGyroHeading()* ein. Darin wird die Fusion von ω_x und Ψ aus Abschnitt 6.2.1 vollzogen. Mit Hilfe der Information über den Zeitpunkt der detektierten Schritte wird von *getHeading()* für jedes Schrittereignis eine Bewegungsrichtung ausgegeben. In *splitTrajectories()* werden die Informationen über die Aktivierung der Lichtschranken dazu verwendet, um die gesamten Aufzeichnungen in Abschnitte zu zerlegen, die je einen Lauf zwischen zwei Lichtschranken darstellen. Jeder dieser Abschnitte wird von der Funktion *getTrajectoryValidScore()* bewertet, um fehlerhafte Aufzeichnungen auszusortieren. In *plotAllTrajectories()* werden schließlich die einzelnen Trajektorien durch Dead-Reckoning berechnet und dargestellt.

7.2 Umsetzung für reale Anwendungen

Der Einsatz des Sensorknotens in realer Umgebung reicht über den Fokus dieser Diplomarbeit hinaus, dennoch sollen hier einige Bemerkungen zu den dafür nötigen Anpassungen gemacht werden. In einem unterirdischen Gangsystem ist der Funkkontakt zwischen Sensorknoten und Basisstation für längere Zeitabschnitte unterbrochen. Daher muss die Menge der zu übertragenden Daten reduziert werden, um sie im nur begrenzt verfügbaren Speicher zwischenlagern zu können. Würde im Idealfall die momentane Position direkt auf dem Sensorknoten berechnet, wäre es ausreichend, diese in relativ roßen Zeitabständen von etwa einer Sekunde zu speichern, solange das Tier läuft. Die im letzten Abschnitt beschriebene Implementierung kann so abgeändert werden, dass die Position in jedem Messzyklus aktualisiert wird. Dabei müssen die durch den eingesetzten Mikroprozessor verursachten Einschränkungen beachtet werden: Da eine Hardware-Unterstützung für Fließkomma(FP)-Berechnungen fehlt, muss diese zeitintensiv durch eine Software-Emulation ersetzt werden. Lohnender ist jedoch die Berechnung möglichst vieler Zwischenschritte in 16Bit-Ganzzahlen, auf denen die meisten Operationen innerhalb eines Prozessortakts ausgeführt werden können. Die auf FP-Berechnungen basierende Kalibrierung der Sensordaten sollte daher so selten wie möglich erfolgen.

- Eine testweise erstellte Implementierung des Mittelwertfilters, die auf den unkalibrierten Daten arbeitet, benötigt pro Messzyklus und Eingang lediglich 7 Ganzzahl-Additionen und 3 Bit-Shift-Operationen. Besondere Aufmerksamkeit verlangt dabei die Vermeidung von Überläufen der 16Bit-Werte.
- Die Schrittdetektion kann ebenfalls auf den unkalibrierten Daten ausgeführt werden, dazu müssen die letzten 3 gefilterten Werte zur Bestimmung der Extrema verfügbar sein, sowie die Parameter des letzten Schrittereignisses, das eventuell überschrieben werden muss (siehe Abschnitt 6.1.2). Maximal sind zur Detektion pro Messzyklus 4 Bedingungen abzufragen.
- Statt einer Berechnung der Nick- und Rollwinkel aus kalibrierten Accelerometerdaten können in den Rohdaten Schwellwerte definiert werden, die zur Detektion einer horizontalen Lage des Sensorknotens dienen. Dafür reichen 6 Vergleiche von Ganzzahlwerten aus, die Berechnung trigonometrischer Funktionen kann eingespart werden.
- Für die Fusion der Gyroskop- und Kompassdaten müssen die integrierten Winkelgeschwindigkeiten jeweils ab der letzten in horizontaler Lage erfolgten Messung zwischengespeichert werden, um sie nachträglich korrigieren zu können. Dazu genügt die Addition der Änderungen relativ zum zuletzt festgelegten Nullwert, das Ergebnis braucht nur zu den Zeitpunkten eines Schrittereignisses zwischengespeichert werden. Lediglich zur Korrektur der Drift müssen die aufintegrierten Gyroskopwerte mit 3 FP-Operationen pro Wert in eine Änderung des Azimuthwinkels umgerechnet werden. Der Regel der Bewertungsfunktion aus Abschnitt 6.3.1 folgend kann die Zwischenspeicherung der Werte auf eine bestimmte Anzahl begrenzt werden, da die Gyroskopdaten nach längerer Integration nicht mehr zu einer Verbesserung der Azimuthbestimmung beitragen.

Damit können auf dem Sensorknoten relative Positionsänderungen mit relativ geringem Rechenaufwand bestimmt werden. Geht man von einem Paar von FP-Werten pro Sekunde für die X- und Y-Koordinaten aus, fallen pro Stunde $4\text{Bytes} \cdot 2 \cdot 3600 = 28,8\text{kiB}$ an Daten an. Diese Datenmenge könnte leicht in externen EEPROMs gespeichert werden, die in Größenordnungen von bis zu 128kiB verfügbar sind. Nahezu unbegrenzter Speicher (bis zu 4GiB) für längere Aufnahmezeiten kann durch den Einsatz von microSD-Karten erreicht werden. Analog zum vorgestellten

Versuchsaufbau können an den Eingängen eines Rattenbaus Lichtschranken zur absoluten Positionsbestimmung installiert werden. Die Fusion der aufgezeichneten Trajektorien kann dann mit den vom Sensorknoten gelieferten relativen Positionen und den Lichtschrankenereignissen so erfolgen wie in der bereits vorgestellten Implementierung in MATLAB. Im Gesamten betrachtet ist es also möglich, das vorgestellte Verfahren in einer realen Umgebung umzusetzen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Motiviert durch eine Anwendung in der Verhaltensforschung wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein Sensorknoten entwickelt, der von einer Ratte getragen werden kann und deren Bewegungen mit Inertialsensoren und einem Kompass aufzeichnet. Zuerst wurden die Grundlagen zu den gemessenen physikalischen Größen, zur Funktionsweise der Sensoren und zu möglichen Verfahren der Datenaufbereitung erläutert. Danach wurde der Aufbau von Hard- und Software des Sensorknotens beschrieben und damit die technischen Rahmenbedingungen dokumentiert. Um die Sensordaten auswerten zu können, wurde eine Kalibrierung durchgeführt und die Genauigkeit der Messungen abgeschätzt. Ein Versuchsaufbau wurde angefertigt, in dem die Sensoren auf dem Rücken der Tiere eingesetzt werden konnten und der einen Vergleich zwischen den aufgenommenen Daten und den tatsächlichen Bewegungen ermöglichte. Es wurde gezeigt, dass die für eine Positionsbestimmung durch Dead Reckoning nötigen Parameter der Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung aus den aufgezeichneten Daten rekonstruiert werden können. Dazu wurde ein Algorithmus zur Schrittdetektion aus Gyroskopdaten entwickelt sowie die Schrittlängen der Versuchstiere untersucht. Des Weiteren wurde ein Verfahren zur Fusion der Daten von Kompass und Gyroskop vorgestellt, das die Schätzung der Bewegungsrichtung signifikant verbessert. Als Ergebnis der Anwendung der vorgestellten Verfahren wurde eine Rekonstruktion der Trajektorien im Versuchsaufbau gezeigt, dabei wurde durch die Kombination mehrerer Trajektorien ein akzeptables Ergebnis erreicht. Nach einer Übersicht über die Implementierung der Auswertungsfunktionen wurden die für einen Einsatz in realen Umgebungen nötigen Anpassungen diskutiert. Dabei konnten Lösungsansätze für die Umsetzung der Positionsbestimmung auf dem Sensorknoten unter den gegebenen Bedingungen eingeschränkter Rechenleistung und knappen Speichers gefunden werden.

Ausblick Die größten Verbesserungen in der Genauigkeit der Positionsbestimmung können von der Einbeziehung zusätzlicher Messgrößen erwartet werden. Im Verlauf dieser Diplomarbeit wurde z.B. ein integrierter 3D-Kompass in der gleichen Baugröße wie der hier eingesetzte verfügbar, der das Magnetfeld in allen drei Raumachsen misst. Der Einsatz dieses Sensors würde die Azimutmessung in jeder Lage des Sensorknotens erlauben und könnte auch die Gesamtstärke des Magnetfelds überwachen, um lokale Störungen festzustellen. Die Qualität der Azimuthbestimmung über das Gyroskop könnte signifikant verbessert werden, in dem es achsenparallel zu den anderen Sensoren fixiert wird. Damit wäre es möglich, die gemessenen Winkelgeschwindigkeiten mit Hilfe der Accelerometerdaten in Drehungen um die Achse parallel zu $|\vec{g}|$ umzurechnen, was der tatsächlichen Richtungsänderung beim Laufen entspräche. Um eine weitere mögliche Fehlerquelle für die Gyroskopdaten zu überprüfen, könnte eine verbesserte Kalibrierungsumgebung eingesetzt werden, die Rotationsgeschwindigkeiten bis zu $1000^\circ/s$ erzeugen kann, wie sie in den Versuchen kurzzeitig vorkamen. Ein Einsatz des Sensorknotens in echten Rattenbauten wird realistischer mit der geplanten Miniaturisierung des Sensorknotens durch die Integration aller Komponenten auf einer einzelnen Platine. Bestückt mit weiteren Sensoren wie z.B. Ultraschall-Detektoren kann der Sensorknoten ein vielversprechendes Werkzeug zur Beobachtung von Ratten und auch anderer unterirdisch lebender Tierarten ähnlicher Größe werden.

Abbildungsverzeichnis

1	Gangsystem eines Baus der <i>Rattus norvegicus</i>	3
2	Mikrostrukturen eines 3D-Accelerometers. Quelle: [8]	7
3	Aufbau eines Gyroskops zur Detektion von Drehbewegungen um eine Achse	8
4	Vereinfachte Darstellung des Erdmagnetfelds durch einen Dipol	9
5	Sensor bestehend aus einer Wheatstone-Brücke mit magnetoresistiven Elementen	10
6	Aufsicht des Sensorknotens	15
7	Schaltplan des Sensorknotens	16
8	Module der Nanostack-Bibliothek	19
9	Definition eines Datenpakets vom Sensorknoten an den Host-PC	21
10	Dauer von Messzyklen mit und ohne Senden der Daten	21
11	Definition der Koordinatenachsen und Drehwinkel des Sensorknotens	22
12	Kompassdaten einer Drehung in 20°-Schritten	23
13	Fehler $\Delta\Psi$ dreier Messungen in Abhängigkeit vom wahren Azimuth	23
14	Abhängigkeit zwischen gemessener und wahrer Winkelgeschwindigkeit	24
15	ADC-Messwerte der drei Achsen bei einer Drehung um die Z-Achse	25
16	Nichtlinearität der X- und Z-Achse	26
17	Größe der Fehler von Messwerten der Z-Achse vor und nach der Korrektur	26
18	Kalibrierte Beschleunigungswerte der drei Achsen bei einer Drehung um die Z-Achse	27
19	Versuchsumgebung: Künstlicher Rattenbau	28
20	Sensordaten bei verschiedenen Aktivitäten des Versuchstiers	32
21	Vergleich von Kalman- und Mittelwertfilter für die Beschleunigung a	33
22	Algorithmus zur Detektion von Schrittereignissen	35
23	Bewegungsmuster und detektierte Schrittereignisse	36
24	Verteilung der Dauer eines Schrittzklus bei Versuchstier 1 und 2	36
25	Zusammenhang zwischen Schrittdauer und Schrittlänge	37
26	Verbesserung der Azimuthbestimmung durch Datenfusion	39
27	Trajektorie von $LS1$ nach $LS2$	41
28	Trajektorien mit Ψ aus unbearbeiteten Kompassdaten	42
29	Trajektorien mit Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen	43
30	Trajektorien mit Korrektur der lokalen Magnetfeldstörungen	44
31	Standardabweichungen für jeden Positionsmittelwert der Trajektorien	45
32	Datenfluss in der Implementierung der Rekonstruktion	46

Literatur

- [1] J. J. Millspaugh, J. M. Marzluff
Radio Tracking and Animal Populations
in *Academic Press, Elsevier, San Diego, USA, 2001*
- [2] G. H. Elkaim, E. B. Decker, G. Oliver, B. Wright:
Marine Mammal Marker (MAMMARK) Dead Reckoning Sensor for In-Situ Environmental Monitoring
In *Proc. IEEE/ION PLANS 2006, pages 976–987, San Diego, CA, April 2006*
- [3] J. B. Calhoun
The Ecology and Sociology of the Norway Rat
In *Bethesda, MD: U.S. Department of Health, Education and Welfare, USA, 1963*
- [4] Crossbow
MICA2DOT Datasheet
http://www.xbow.com/products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICA2DOT_Datasheet.pdf
- [5] Chipcon Products from Texas Instruments:
CC2430 Manual
<http://www.ti.com/lit/gpn/cc2430>
- [6] L. Fang, P.J. Antsaklis, L.A. Montestruque, M.B. Mickell, M. Lemmon, Y. Sun, H. Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, M. Xie, X. Xie:
Design of a Wireless Assisted Pedestrian Dead Reckoning System – The NavMote Experience
in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.54, No.6, Dezember 2005*
- [7] S. I. Roumeliotis, G. S. Sukhatme, G. A. Bekey:
Smoother based 3D Attitude Estimation for Mobile Robot Localization
In *Proc. IEEE Robotics and Automation, Vol.3, 1999, S.979-1986*
- [8] D. F. Guillou
Packaging MEMS: New Manufacturing Methodology Substantially Reduces Smart MEMS Costs
In *Sensors, http://archives.sensorsmag.com/articles/1203/20/main.shtml, Dezember 2003*
- [9] N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi:
Micromachined inertial sensors
In *Proc. IEEE Volume 86, Issue 8, August 1998, S.1640-1659*
- [10] InvenSense:
Integrated Dual-Axis Gyro IDG 300 Datasheet
<http://www.invensense.com>
- [11] Wikipedia
Erdmagnetfeld
<http://www.wikipedia.de>
- [12] Deutsches Geoforschungszentrum Potsdam
Das Erdmagnetfeld
<http://www.gfz-potsdam.de>

- [13] G. Welch, G. Bishop
An Introduction to the Kalman Filter
In *ACM Siggraph, 2001, Course 8*
- [14] G. Welch
The Kalman Filter Learning Tool, Dynamic and Measurement Models
In http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/kftool_models.pdf
- [15] J. Theuerkauf, S. Rouys, C. Chatreau
Mortality of radio-tracked wild rats in relation to transmitter weight and resilience of transmitters in relation to their design
In *Journal of the Royal Society of New Zealand Volume 37, Number 3, September, 2007, pp 85–90*
- [16] Freescale:
A7260 Three Axis Accelerometer Datasheet
http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf?pspll=1
- [17] Honeywell:
HMC6352 Manual
<http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/HMC6352.pdf>
- [18] Intel 8051:
Beschreibung von Architektur und Befehlssatz
<http://www.8052.com/>
- [19] Sensinode:
Nanostack Manual
<http://www.sensinode.com>
- [20] FreeRTOS:
User Documentation
<http://www.freertos.org>
- [21] Q. Ladetto, J. van Seeters, S. Sokolowski, Z. Sagan, B. Merminod:
Digital Magnetic Compass and Gyroscope for Dismounted Soldier Position
in *Military Capabilities enabled by Advances in Navigation Sensors, Sensors & Electronics Technology Panel, NATO-RTO meetings, Istanbul, Türkei, 2002*
- [22] M.S. Fischer, N. Schilling, M. Schmidt, D. Haarhaus, H. Witte:
Basic limb kinematics of small therian mammals
in *The Journal of Experimental Biology 205, 2002, S.1315–1338*
- [23] J. Thiele, O. Osechas, J. Bitsch, K. Wehrle:
Smart Sensors for Small Rodent Observation
in *IEEE Sensors 2008, Lecce, Italien, Oktober 2008*
- [24] D. Jurman, M. Jankovec, R. Kamnik, M. Topič
Calibration and Data Fusion Solution for the Miniature Attitude and Heading Reference System
in *Elsevier Sensors and Actuators A 138, 2007, S.411–420*

- [25] S.Y. Cho, C.G. Park:
Tilt Compensation Algorithm for 2-Axis Magnetic Compass
in *IEE Electronics Letters*, Vol.39, No.22, Oktober 2003