

Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften

Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik

Lehrstuhl Kognitive Neurowissenschaften

Diplomarbeit Bioinformatik

Ganganalyse und Pfadrekonstruktion mittels Dead Reckoning bei Ratten

Thomas Schulte

20. Januar 2010

Betreuer: Dr. Johannes Thiele

1. Gutachter: Prof Dr. Wolfgang Rosenstiel

2. Gutachter: Prof Dr. Hanspeter A. Mallot

Universität Tübingen
Wilhelm-Schickard-Institut
72076 Tübingen

Schulte, Thomas:

Ganganalyse und Pfadrekonstruktion mittels Dead Reckoning bei Ratten

Diplomarbeit Bioinformatik

Eberhard Karls Universität Tübingen

Abgabetermin: 18.12.2009

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden mithilfe eines bereits entwickelten Sensorknotens, der mit Inertial- und Magnetsensoren ausgestattet ist, die Laufbewegungen von Ratten aufgezeichnet und analysiert. Ziel ist die Verbesserung der Rekonstruktion der von Ratten zurückgelegter Wegstrecken mittels Dead Reckoning anhand der Analyse des Rattenganges. Dazu werden mit Sensorknoten ausgerüstete Versuchstiere auf ein Laufband gesetzt, ihre Position verfolgt und unter Berücksichtigung der Laufbandgeschwindigkeit die Geschwindigkeit der Tiere bestimmt. Durch die Korrelationen zwischen Geschwindigkeit und Sensordaten lässt sich die Schrittweite sogenannter Pseudo-Schritte ermitteln, durch die eine Verbesserung der Pfadrekonstruktion erreicht werden kann. Der Schwerpunkt innerhalb dieser Arbeit lag zum einen in der Implementierung der Laufbandsteuerung und zum anderen in der Entwicklung der Auswertungsroutinen zur Ermittlung der Wechselbeziehung zwischen Sensordaten und Schrittlänge. Es gelang diese Wechselwirkung aufzuzeigen, welches sich nun in zukünftigen Arbeiten des Ratpack-Projekts zur Verbesserung der Rekonstruktion von Laufpfaden einsetzen lässt.

Danksagung

Hiermit möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Speziell möchte ich mich bei meinem Betreuer Dr. Johannes Thiele bedanken, der mir sowohl Lehrer, als auch Freund war und den ich stets um Rat fragen konnte.

Besonders möchte ich auch Claudia Eisbrenner für die moralische Unterstützung und die Korrektur dieser Arbeit danken.

Zum Schluss ein Dank an alle Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaften, die durch die Schaffung einer angenehmen Arbeitsatmosphäre die Arbeit angenehm gemacht haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Verzeichnis der Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Gliederung	2
2 Grundlagen	5
2.1 Verwandte Arbeiten	5
2.2 Vorarbeit innerhalb des Ratpack-Projekts	8
2.3 Das Verhalten von Ratten	11
2.3.1 Ökologie	11
2.3.2 Sozialverhalten	14
2.3.3 Bewegungsapparat	15
3 Material und Methoden	23
3.1 Der Sensorknoten des Ratpack-Projekts	23
3.1.1 Sensorknoten-Hardware	25
3.1.2 Sensorknoten-Software und -Entwicklung	28
3.2 Die Versuchsumgebung: Laufband	29
3.2.1 Aufbau des Laufbands	30
3.2.2 Versuchskonzept	35

3.2.3	Implementierung der Versuchssteuerung	35
3.2.4	Lichtschranken und Futterspender	36
3.2.5	Steuerung des Laufbands	36
3.2.6	Positionsbestimmung der Ratte und Regelung der Laufbandgeschwindigkeit	38
3.2.7	Aufzeichnung der Laufband- und Sensordaten	41
3.3	Versuchstiere und Experimentalphasen	43
3.4	Auswertungsroutinen	44
3.4.1	Aufbereitung der Sensor- und Laufbanddaten	45
3.4.2	Berechnung von Pseudo-Schrittereignissen	47
3.4.3	Erstellung der Versuchsstatistik	48
3.4.4	Rekonstruktion der Laufwege	49
3.4.5	Geschwindigkeitsberechnung	52
3.4.6	Zusammenstellung geeigneter Auswertungsbereiche	54
3.4.7	Korrelation der Laufparameter	56
3.4.8	Auswertung der Versuchsstatistiken	57
4	Ergebnis	59
4.1	Allgemeine Versuchsstatistiken	59
4.2	Laufparameter	61
4.2.1	Schrittintervall	61
4.2.2	Schrittlänge	63
4.3	Korrelation der Laufparameter	65
4.3.1	Korrelation Schrittintervall ↔ Geschwindigkeit	65
4.3.2	Korrelation Schrittweite ↔ Geschwindigkeit	67
4.3.3	Korrelation Schrittintervall ↔ Schrittweite	68
5	Diskussion und Ausblick	71
5.1	Diskussion	71
5.1.1	Allgemeine Statistik	71
5.1.2	Laufparameter	72

5.1.3	Korrelation der Laufparameter	72
5.2	Ausblick	73
	Literaturverzeichnis	75

Abbildungsverzeichnis

2.1	Radiosender, HERMES-Satellit, Weißwedelhirsch mit AVED	6
2.2	DTAG-Project	7
2.3	Ratte mit Mica2Dot-Sensorknoten	9
2.4	Trajektorie	10
2.5	Versuchsumgebung Calhouns und Rattenbau	12
2.6	Rattenbau	13
2.7	Wirbelsäulenbewegung der Ratte	16
2.8	Konfiguration der Vorder- und Hinterextremitäten beim Aufsetzen und Abheben	17
2.9	Skelett der Ratte	18
2.10	Schrittzklus der Ratte	20
3.1	Sensorknoten-Prototyp mit Tragemontur	24
3.2	Aufbau des RF Transceiver Moduls RC2301AT	25
3.3	NanoStack-Architektur	29
3.4	NanoStack Ad-hocTopologie	29
3.5	Aufbau der Laufband-Versuchsumgebung	31
3.6	Befestigung des Futterspenders	32
3.7	Kontrollplatine der Lichtschranken	33
3.8	Controllerschaltbild des Kontrollapparats zur Laufbandsteuerung	34
3.9	Wandlerschaltbild des Kontrollapparats zur Laufbandsteuerung	34
3.10	Kommunikationsstruktur der Versuchssteuerung	38
3.11	Lichtschrankenunterbrechung durch Ratte	40

3.12	Aufteilung der Aufenthaltszeiten während eines Versuchs	46
3.13	Positionsungenauigkeit der Ratte auf dem Laufband	50
3.14	Korridore, gebildet von maximaler und minimaler Rattenposition	51
3.15	Vergleich der Positionsberechnung bei 1- und 2-Schritt-Vorverarbeitung	52
3.16	Regression für v_{tm} in alter TDC-Konfiguration	53
3.17	Regression für v_{tm} in neuer TDC-Konfiguration	54
3.18	Ermittlung eines konstanten Geschwindigkeitsbereichs aus den Daten eines Laufs	55
4.1	Boxplot: Verteilung der Schrittingteralle des Versuchtiers R6	62
4.2	Boxplot: Verteilung der Schrittingteralle des Versuchtiers R6, aufgeteilt in Links- und Rechts-Pseudo-Schritte	62
4.3	Boxplot: Verteilung errechneter Schrittingtlängen des Versuchtiers R6	64
4.4	Boxplot: errechnete Schrittingtlängen des Versuchtiers R6, aufgeteilt in Links- und Rechts-Pseudo-Schritte	64
4.5	Korrelation von Schrittingtervall und Geschwindigkeit für einen Versuchsdatensatz der Ratte R6	65
4.6	Korrelation von Schrittingtervall und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R6	66
4.7	Korrelation von Schrittingtervall und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R689	66
4.8	Korrelation von Schrittingtweite und Geschwindigkeit für einen Versuchsdatensatz der Ratte R6	67
4.9	Korrelation von Schrittingtweite und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R6	68
4.10	Korrelation von Schrittingtweite und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R689	68
4.11	Korrelation von Schrittingtervall und Schrittingtweite für einen Versuchsdatensatz der Ratte R6	69
4.12	Korrelation von Schrittingtervall und Schrittingtweite aller Versuchsdaten der Ratte R6	70

4.13 Korrelation von Schrittintervall und Schrittweite aller Versuchsdaten der Ratte R689	70
--	----

Tabellenverzeichnis

2.1	Segment- und Gelenkwinkel des Vorderbeins von <i>R. norvegicus</i>	22
2.2	Segment- und Gelenkwinkel des Hinterbeins von <i>R. norvegicus</i>	22
4.1	Statistik der Experimentalphase P1	60
4.2	Versuchsstatistik der Experimentalphase P2	60
4.3	Versuchsstatistik der Experimentalphase P3	60
4.4	Versuchsstatistik der Experimentalphase P4	60
4.5	Kennwerte der Boxplots der Abb.4.2	63
4.6	Kennwerte der Boxplots der Abb.4.4	63

Verzeichnis der Abkürzungen

VHF	Very High Frequency
ICARUS	International Cooperation for Animal Research Using Space
GPS	Global Positioning Systems
AVED	Animal-borne video and environmental data collection systems
DTAG	Digital Accoustic Recording Tag
ISM-Band	Industrial, Scientific and Medical Band
RAM	Random Access Memory
DTN	Delay Tolerant Network
CPU	Central Processing Unit
RF	Radio Frequency
LiPo-Akku	Lithium-Polymer-Akku
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
SMT	surface-mounting technology
SMD	surface-mounted device
I²C	Inter-Integrated Circuit
SoC	System-on-Chip
MPU	Microprocessor Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PHY	Physical Layer
MAC	Medium Access Control
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
SRAM	Static Random Access Memory
OSI-Modell	Open Systems Interconnection Reference Model
DMA	Direct Memory Access
ADC	Analog-to-Digital-Converter
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
I/O	Input/Output
ALU	Arithmetic Logic Unit
PM	Power Mode
RC	Resistor Capacitor
LCC	Leadless Chip Carrier

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
MEMS	Microelectromechanical System
6LoWPAN	IPv6 over Low power WPAN
IPv6	Internet Protocol Version 6
WPAN	Wireless Personal Area Networks
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
SDCC	Small Device C Compiler
nRP	nRoute Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
LB	Light Barrier
TCD	Treadmill Control Device
PWM	Pulsweitenmodulation
OPV	Operationsverstärker
stdin	Standardeingabe
stdout	Standardausgabe
stderr	Standardfehlerausgabe

Kapitel 1

Einleitung

Ein wichtiger Bestandteil der biologischen Grundlagenforschung ist die Verhaltensbiologie. Sie stellt die Frage nach Ursache, Entwicklung und Funktion von Tierverhalten und trägt so unter anderem zum Verständnis von allgemeinen natürlichen Prinzipien bei, die Aufschluss über Funktion und Mechanismen menschlichen Verhaltens geben können [Kap06]. Am Anfang steht dabei das Beobachten des Verhaltens von Tieren, seien es Strategien zur Navigation, Habitatwahl und Nahrungssuche oder die soziale Interaktion zwischen Individuen. Dabei bedarf die Beobachtung von Tierarten in ihrem natürlichen Lebensraum einer Technik, die nur minimal, im besten Fall keinen Einfluss auf sie ausübt, um Verfälschungen der Verhaltensdaten zu vermeiden. Je nach Tierart sind unterschiedliche Herangehensweisen notwendig, die an Habitat und Verhalten der Tiere angepasst werden müssen und gleichzeitig durch diese beschränkt werden.

Wanderratten (*Rattus norvegicus*) werden vielfältig als Labortiere genutzt und viel ist bereits über ihr Verhalten bekannt und wird weiter erforscht [WK05]. Eine der ersten großen Studien über das Verhalten von *R. norvegicus* in ihrem natürlichen Habitat wurde 1963 von J.B. Calhoun veröffentlicht [Cal63]. Diese und viele andere nachfolgende Studien haben gemein, dass die Erkenntnisse über das Sozialverhalten aus oberirdischen Beobachtungen semi-natürlicher Habitate stammen und die Struktur von Rattenbauten (siehe Abb. 2.5) aus nachträglichen Ausgrabungen der Gangsysteme rekonstruiert werden konnten. So basieren die Erkenntnisse über das unterirdische Verhalten auf den Rückschlüssen, die sich aus den gefundenen Spuren ziehen lassen. Ein System zur Beobachtung des Verhaltens unter der Erdoberfläche existiert jedoch noch nicht.

Seit 2006 wird in Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Kognitive Neurowissenschaften an der Universität Tübingen mit der Abteilung “Verteilte Systeme“ der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen ein System entwickelt, das es ermöglichen soll Wanderratten in ihrer natürlichen Umgebung zu beobachten und ihr Verhalten unterirdisch zu verfolgen. Innerhalb des “Ratpack“-Projekts wird an einem Sensorknoten gearbeitet, der Laufwege und Kommunikationsverhalten von Wanderratten protokolliert,

und Mithilfe von *Dead Reckoning* die Rekonstruktion von Laufpfaden und der unterirdischen Bauten ermöglicht. Die Sensorknoten werden dabei von den Tieren getragen und nehmen einerseits verschiedenartige Sensordaten auf, die bis zur Weiterleitung vorverarbeitet und zwischengespeichert werden, andererseits bilden die Sensorknoten ein drahtloses dynamisches Netzwerk, über das die vorverarbeiteten Daten an Basisstationen weitergeleitet werden, die an den Ausgängen des Rattenbaus positioniert sind [OTLW08]. Die Erzeugung eines drahtlosen dynamischen Netzwerks durch eine Vielzahl von Sensorknoten und die dadurch ermöglichte Informationsweiterleitung reduziert die zu zwischenspeichernde Datenmenge. Da die Sensorknoten immer nur dann Funkkontakt haben, wenn sich zwei Ratten in direkter Nähe befinden, gibt die zeitliche Variation der Verbindungen im Netzwerk Aufschluss über die Häufigkeit und Art der Begegnungen zwischen den Tieren und lässt damit Schlüsse auf ihr Sozialverhalten zu. Unter anderem wird diesbezüglich zur Zeit daran gearbeitet, ein System für den Sensorknoten zu entwickeln, das Rattenlaute klassifiziert und die Klassifikationsergebnisse speichert und weiterleitet [STL08].

In der bereits abgeschlossenen Diplomarbeit von Martin Zeiß ([ZT09]) konnte schon die grundsätzliche Eignung der Nutzung von Inertialsensoren in Kombination mit einem 2D-Kompass für die Rekonstruktion von Laufwegen gezeigt werden. Innerhalb dieser Diplomarbeit sollen durch die Untersuchung des Laufverhaltens der Tiere und der Korrelation der Sensordaten mit Laufparametern Verbesserungen in der Trajektorienberechnung zur Pfadrekonstruktion erzielt werden. Dazu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Entwicklung einer geeigneten Versuchsumgebung zur Erzeugung von Sensordaten, die beim Laufen entstehen
- Protokollierung von Sensordaten, die beim Laufen der Sensorknoten tragenden Ratten bei verschiedenen Geschwindigkeiten erzeugt werden
- Auswertung der Daten hinsichtlich unterschiedlicher Schrittweiten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten
- Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse zur Verbesserung des Sensorknotens
- Bewertung der Ergebnisse

1.1 Gliederung

Die vorliegende Diplomarbeit gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden zunächst gebräuchliche und aktuelle Methoden der Verhaltensbeobachtung von Tieren erläutert, sowie deren Einsatz in verwandten Arbeiten vorgestellt

(Abschnitt 2.1). Unter anderem soll deutlich gemacht werden, warum Verfahren wie Radiotelemetrie und GPS zur Positionsbestimmung von *R. norvegicus* unbrauchbar sind und ebenso der Einsatz von Datenloggern problematisch ist. Im Anschluss erfolgt eine Einführung in das Ratpack-Projekt, in der dessen Entwicklung von der Idee einer brauchbaren Beobachtungsmethode bis hin zum Prototypen eines Sensorknotens kurz vor Beginn dieser Diplomarbeit erläutert wird (Abs. 2.2). Eine Zusammenfassung des Verhaltens von *R. norvegicus* bezüglich Ökologie, Sozialverhalten und Bewegungsapparat beschließt dieses Kapitel (Abs. 2.3) und soll zum einen die besonderen Anforderungen an die Entwicklung geeigneter Beobachtungsverfahren verdeutlichen, die durch die Lebensumstände der Wanderratte entstehen, vor allem aber die Prinzipien der Fortbewegung der Ratte erläutern, die für die Selektion und Auswertung der Sensordaten bedeutend sind.

In Kapitel 3 wird zunächst beschrieben, wie diese Anforderungen sich in der Konzeption des Sensorknotens ausgewirkt haben. Es werden detailliert die Hardwarekomponenten des aktuellen Sensorknoten-Prototyps beschrieben und die entstehenden Sensordaten erläutert. Mit der Vorstellung der verwendeten Betriebs- und Entwicklungssoftware wird die Beschreibung des Sensorknotens abgeschlossen. Es folgt die Darstellung der Laufband-Versuchsumgebung zur Datenerhebung. Es werden Entwicklung und Aufbau der Versuchsstruktur und -steuerung beschrieben. Schließlich folgt die Erläuterung der Datenaufzeichnung und der Auswertungsroutinen für die Korrelation von Sensordaten und Laufparameter.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Versuche vorgestellt.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Interpretation der Ergebnisse und der Bewertung ihrer Aussagekraft, sowie den möglichen Einfluss auf zukünftige Arbeiten innerhalb des Ratpack-Projekts. Eine Zusammenfassung und ein kurzer Ausblick beschließen diese Arbeit.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Verwandte Arbeiten

Positionsverfolgung durch Radiotelemetrie

Ein klassische Methode der Positionsverfolgung von Tieren besteht darin, sie mit einem Mini-Radiosender (VHF - very high frequency) auszustatten, der durch Triangulation auf einige 100 Meter genau geortet werden kann (Abb. 2.1, links). Dabei peilen 3 Radioempfänger (mobil oder stationär) simultan die Richtung des vom Sender ausgestrahlten Signals an und können so, durch zusätzliche Kenntnis der eigenen Position, den Aufenthaltsort des Tieres bestimmen [MM01]. Heutzutage werden nicht nur mobile Handempfänger oder auf Türmen installierte Radioempfänger zur Triangulation genutzt, sondern ebenfalls Flugzeuge und Satelliten zur Ortung eingesetzt (Abb. 2.1, Mitte). Hier zu nennen ist das seit über 30 Jahren bestehende ARGOS System, das mittlerweile über 5 Satelliten zur Ermittlung von Positionsdaten verfügt, oder die 2002 ins Leben gerufene Icarus Initiative [ICA], bei der durch Zusammenarbeit von Princeton Universität und NASA der Satellit Hermes entwickelt wurde, welcher in niedriger Erdumlaufbahn Migrationsrouten kleiner Vögel verfolgen soll. Bei der Icarus-Methode handelt es sich genau genommen nicht um Triangulation, sondern um eine einfache Richtungsbestimmung aus großer Höhe mit einer Messgenauigkeit von 10-50 km.



Abbildung 2.1: Techniken zur Beobachtung von Wildtieren. links: Miniaturradiosender [ICA], Mitte: Hermes Satellit, entstanden durch die Zusammenarbeit von Princeton Universität und NASA [ICA], rechts: Weißwedelhirschkuh mit AVED [MMB⁺09]

Positionsverfolgung per GPS

Die Entwicklung des Global Positioning Systems (GPS) bedeutete einen großen Fortschritt für die Beobachtung von Tieren, da die Messgenauigkeit der Positionsdaten auf wenige Meter erhöht wurde und nur ein einziger mobiler Empfänger notwendig ist, der die Positionsbestimmung selbständig aus den Signallaufzeiten verschiedener Satelliten bestimmt. In [MMB⁺09] wurde ein System vorgestellt, das zusätzlich mit Kameras und Mikrofonen ausgestattet zur Beobachtung von Weißwedelhirschen eingesetzt wurde (Abb. 2.1, rechts). Diese AVEDs (Animal-borne video and environmental data collection systems) ermöglichen es den mittels GPS ermittelten Positionen durch Video- und Audiodaten eine Bedeutung zuzuweisen, indem sie Aufschluss über die Tätigkeit der Tiere geben. So kann der Frage nachgegangen werden, warum ein Tier sich gerade an einem bestimmten Ort aufhält. GPS-Empfänger werden vor allem zur Beobachtung von größeren Tieren eingesetzt, denn sie sind meist größer als Radiosender, weil sie mehr Energie und Speicherplatz für die Protokollierung der Positionsdaten benötigen.

Positionsverfolgung mittels *Dead Reckoning*

Der Nachteil bei den oben vorgestellten Positionsverfolgungstechniken ist, dass für die erfolgreiche Lokalisierung eine ungestörte Signalübertragung für die Triangulation benötigt wird. Handelt es sich um Tiere, die größtenteils unter Wasser oder unterirdisch leben, so versagt die Positionsbestimmung per GPS und es bedarf eines anderen Ansatzes. *Dead Reckoning*-Algorithmen bieten hier eine vielversprechende Alternative. Der Begriff *Dead Reckoning* stammt ursprünglich aus der Seefahrt und bezeichnet dort die

Ortsbestimmung durch Koppelung der Bewegungsrichtung mit der Geschwindigkeit. Heutzutage wird der Begriff auch im Bereich der Robotik verwendet, wenn Roboter Ihre Position nur aus Ihrem Vortriebssystem berechnen. Beim Dead Reckoning wird zu jedem Messzeitpunkt die relative Position zur vorherigen Position bestimmt, unter der Annahme, dass Richtung und Geschwindigkeit innerhalb des Messintervalls konstant waren. Da zu Beginn der Navigation der Startpunkt meist bekannt ist (z.B. Hafen), sind die folgenden relativen Positionsbestimmungen noch ziemlich korrekt. Jedoch akkumulieren sich Messungenauigkeiten und diese sind um so größer, je größer die Zeitintervalle zwischen einzelnen Messungen sind. Die heutige Technik erlaubt es, diese Zeitintervalle sehr klein zu halten und somit die Fehler zu minimieren. In [JT03] wurde ein System vorgestellt, welches die Verfolgung von Walen unter der Wasseroberfläche mithilfe von Inertialsensoren, Magnetometern und Tiefendrucksensoren ermöglicht, die in einem Anhänger untergebracht sind. Dieser sogenannte DTAG (Digital Accoustic Recording Tag) wird wie in Abbildung 2.2 mittels Saugnäpfen an der Walhaut angebracht und verbleibt dort solange, bis der Datenspeicher voll ist. Der DTAG löst sich dann ab und treibt auf der Wasseroberfläche, bis er eingesammelt wird. Während eines Pilotversuchs wurde die Position des Wales zusätzlich mittels Triangulation durch Echosignale bestimmt: Der Vergleich der DTAG-Positionsdaten mit den Triangulations-Positionsdaten zeigt, dass das System zwar noch einiger Verbesserung bedarf, der Dead Reckoning Ansatz jedoch prinzipiell funktioniert.



Abbildung 2.2: Beobachtung von Walen mittels DTAG. links: Digital Accoustic Recording Tag (DTAG), Mitte: Verfolgung eines Wals zur Anbringung des DTAGs, rechts: DTAG mittels Saugnäpfen an Wal befestigt [JT03]

Datenlogger

Sowohl AVEDs, als auch DTAGs sind sogenannte Datenlogger, welche die jeweils gesammelten Verhaltensdaten temporär speichern. Anders als bei aktiv sendenden Systemen, sind die protokollierten Daten erst dann wieder verfügbar, wenn der zuständige Forscher den Logger einsammelt. Voraussetzung für das Einsammeln des Loggers ist dessen Ortung, nachdem er sich von seinem Trägertier abgelöst hat. Dazu bedient man sich meist erneut der Radiotelemetrie [JT03], wofür wiederum eine ungestörte Signalübertragung notwendig ist. Da diese Systeme zusätzlich verhältnismäßig groß sind

(vgl. Abbildung 2.2 und 2.1, rechts), sind diese für kleine unterirdisch lebende Tiere nicht geeignet.

2.2 Vorarbeit innerhalb des Ratpack-Projekts

Der “Ratpack“-Ansatz: Ein flexibles, selbst organisiertes Funknetzwerk zur Erhebung von Verhaltensdaten

Die Nutzung von Dead Reckoning-Algorithmen bietet eine vielversprechende Möglichkeit zur Positionsbestimmung von *R. norvegicus*. Die Entwicklung eines reinen Datenloggers zur Protokollierung wäre jedoch unzureichend gewesen, da die geringe Größe der Tiere auch beträchtlich Größe und Gewicht des Datenspeichers einschränken. Dies hat zur Folge, dass nach kurzer Zeit der Datenspeicher voll ist, und somit neue Daten nicht protokolliert oder bereits gespeicherte Daten überschrieben werden. Daher musste zusätzlich eine Methode gefunden werden, aufgezeichnete Daten rechtzeitig weiterzuleiten. Es entstand die Idee ein dynamisches drahtloses Ad-hoc-Netzwerk aus Sensorknoten zu bilden, die Informationen untereinander austauschen. Drahtlose Ad-hoc-Netzwerke basieren nicht auf einer festen Infrastruktur mit einem Router, der für die Weiterleitung von Daten zuständig ist. Stattdessen bilden Netzknotten (Nodes), die sich innerhalb ihrer Reichweite befinden ein dezentralisiertes Netzwerk, in dem sie durch bestimmte Routing-Protokolle eigenständig Daten an andere Netzknotten innerhalb dieses Netzes weiterleiten. Ein Sensorknoten - auch bekannt als Mote - ist ein spezieller Netzknotten, der zum Sammeln und Bearbeiten von Sensorinformationen fähig ist. Ein Mote besteht aus folgenden Komponenten:

- Microcontroller, zur Verarbeitung der Daten und zur Steuerung der übrigen Komponenten
- Transceiver, zum Austausch von Daten über Radiosignale im ISM (Industrial, Scientific and Medical Band) Frequenzbereich
- Datenspeicher, bestehend aus RAM und Flash-Speicher, zur Speicherung des Steuerungsprogramms und der Sensordaten
- Energiequelle und zusätzlichen Sensoren

Zusätzlich zu der Ad-hoc-Struktur bilden die Sensorknoten, mit denen Ratten eines Baus ausgestattet werden sollen, wie in [OTLW08] vorgestellt ein verzögerungstolerantes Netzwerk (DTN, delay tolerant network). Diese in [Fal03] beschriebene DTN-Architektur zeichnet aus, dass sie auch in Netzwerken, mit extrem beschränkter Speicher- und CPU-Kapazität und häufiger Verbindungsunterbrechung sehr gute Leistung beim Transfer von Daten erbringt. Das gewünschte Beobachtungsszenario sieht vor, dass bei der Begegnung zweier Ratten eines Baus (Unterschreitung der Sendereichweite) die Sensorknoten ihre gesammelten Daten austauschen. Ist eine Ratte in Sendereichweite zu einer der Basisstationen, welche an den Eingängen des Rattenbaus postiert sind, so werden die Daten an diese weitergeleitet. Erste Versuche im Labor mit Prototypen wie in Abbildung 2.3 lassen diesen Lösungsansatz zur Beobachtung von Ratten vielversprechend erscheinen.



Abbildung 2.3: *Rattus norvegicus* mit Sensorknoten Mica2Dot [OTLW08].

Zur Zeit wird parallel an mehreren Sensorknoten-Prototypen gearbeitet. Einer ist ausgestattet mit einem Mikrofon, und kann Rattenlaute im Ultraschallbereich detektieren und klassifizieren [STL08]. Der andere Prototyp, mit dem in dieser Diplomarbeit gearbeitet wurde, soll die Rekonstruktion der Laufwege von *R. norvegicus* ermöglichen [ZT09]. Er ist ausgestattet mit einem 2D-Kompass, 3D-Accelerometer und 2D-Gyroskop. Mit diesen Daten sollen Laufrichtung, Beschleunigungen und mögliche Schrittereignisse, sogenannte Pseudo-Schritte, bestimmt werden (siehe Kapitel 3.1). Eine Analyse der Daten und Fusion der Trajektorien ermöglicht die Rekonstruktion der Versuchsstruktur, wobei es jedoch - wie in Abbildung 2.4 zu sehen - zu merklichen Abweichungen kommt.

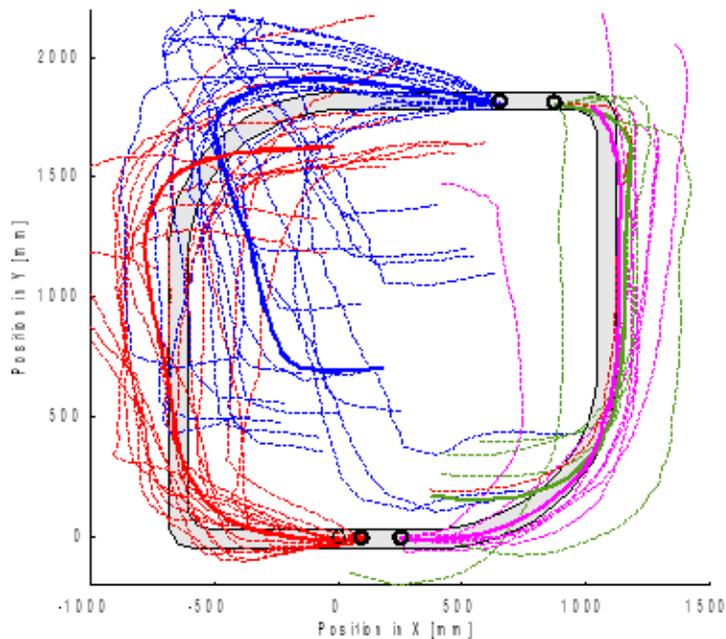


Abbildung 2.4: Fusionierte und korrigierte Trajektorien (blau, rot, grün und magenta dargestellt) von Rattenläufen innerhalb eines Versuchsaufbaus (grau dargestellt) [ZT09].

Ziel dieser Arbeit

Eine der möglichen Fehlerursachen, die zur Abweichung der berechneten Trajektorien von den tatsächlichen Laufpfaden führt, ergibt sich bei der Berechnung der Geschwindigkeit. Diese wird indirekt über die Anzahl der Pseudo-Schritte pro Zeiteinheit gemessen. Allen Pseudo-Schritten wurde bisher eine konstante Schrittweite zugewiesen, die sich aus der Berechnung des Durchschnitts aller detektierten Schritte über eine bekannte Strecke ergab. In Abschnitt 2.3.3 wird gezeigt, dass die Annahme einer konstanten Schrittweite ungerechtfertigt ist. In dieser Diplomarbeit wird größtenteils der Frage nachgegangen, inwieweit sich aus den protokollierten Laufdaten die Schrittweite ermitteln lässt und wie dies zur Verbesserung der Pfadrekonstruktion beiträgt. Entwurf und Aufbau des Sensor-knotens im Detail werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

2.3 Das Verhalten von Ratten

2.3.1 Ökologie

R. norvegicus wurde erstmals 1769 vom englischen Naturforscher John Berkenhout beschrieben, damals noch unter dem Namen *Mus norvegicus*. Die Art wird zur Familie der Langschwanzmäuse (*Muridae*) und zur Unterfamilie der Altweltmäuse (*Murinae*) gezählt und war ursprünglich lediglich im Südosten Sibiriens, im Nordosten Chinas und in Teilen Japans heimisch [IUC08]. Dort entwickelte sich ein Kommensalismus zwischen Ratten und Menschen, eine Form des Zusammenlebens, bei dem die Ratte Nutznießer von Nahrung, Wärme und Schutz vor Raubtieren wurde. Als Omnivore können sie sich sowohl von pflanzlicher (z.B. Blätter, Rinde) als auch tierischer Nahrung (z.B. Mäuse, Insekten) ernähren. In der Nähe von Menschen nutzen sie dessen Abfälle als Nahrung. Sie folgten den Menschen entlang der Migrations- und Handelsrouten in Schiffen oder im Gepäck und wurden so in menschlichen Siedlungen Europas heimisch [Han04a]. Im Zuge dieses Kommensalismus leben viele Rattenpopulationen heutzutage in menschlichen Bauten, auch wenn dies nicht mehr ihrer natürlichen Lebensweise entspricht. Diese Lebensweise wurde von John B. Calhoun in einer semi-natürlichen Umgebung beobachtet und analysiert [Cal63]. Abbildung 2.5 zeigt eine Fotografie der ca. 900 qm großen Versuchsumgebung Calhouns (links oben), sowie ihren Grundriss (rechts) und einen Plan der nachträglich freigelegten Rattenbauten (links unten).

Meist beginnen trächtige Rattenweibchen kurz vor dem Werfen mit dem Graben einer Nisthöhle, die dann im Laufe der Zeit ausgebaut wird. Zunächst wird ein Tunnel gegraben, der zu einer Höhlung ausgeweitet wird, wobei die ausgegrabene Erde neben dem Zugang aufgeschüttet wird. Nistmaterial wird aus der Nähe besorgt und der Eingang sorgfältig mit Gras oder ähnlichem abgedeckt. Nach dem Werfen von 4-12 Jungen gräbt die Rattenmutter von der Höhle aus einen weiteren Ausgang, der zum einen als Fluchtweg dienen kann, durch den zum anderen aber auch die Erde des nun folgenden Ausbaus transportiert wird. Kurz vor der Ablaktation der Jungen wird nämlich ein weiterer Tunnel mit anschließender Vorratshöhle gegraben. Ein solchermaßen eingerichteter Bau (Abbildung 2.6) kann nun als Ausgangspunkt für komplexe Rattenbauten dienen (Abbildung 2.5, links unten), die nach dem selben Schema erweitert werden. Gelegentlich werden Zugänge versehentlich, beim Aufschütten ausgehobener Erde, oder absichtlich permanent verstopft. Folgende Werte, welche aus 44 Rattenbauten gemittelt wurden [Han04b], charakterisieren einen typischen Bau:

- 16 Tunnelpassagen mit folgenden Medianwerten: Breite: 8,3 cm ; Länge: 29,8 cm
- 6,8 Ausgänge
- 4,5 Kammern (Nist- und Vorratshöhlen) mit Mediagröße: 18,5 cm x 22,1 cm
- 5,5 erwachsene Ratten

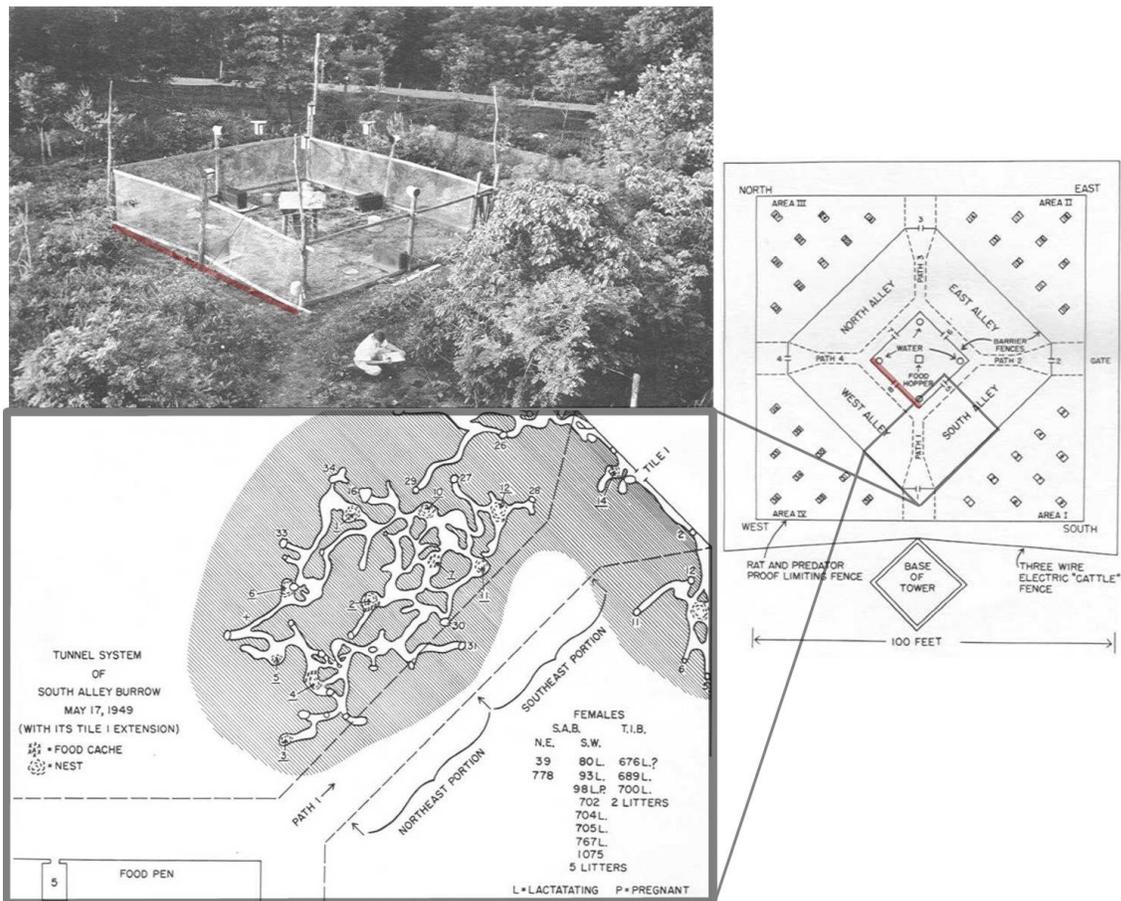


Abbildung 2.5: Links oben: Fotografie von Calhouns Versuchsumgebung. Zu sehen ist die eingezäunte Futterquelle, deren Zugänge auf Aktivität überwacht werden, sowie ein Beobachter, der die Entwicklung des Rattenbaus notiert. rechts: Grundriss des Versuchsaufbaus. Um die eingezäunte Futterquelle (Entsprechung zum Bild ist mit rotem Balken markiert) ist die Umgebung in weitere Bereiche aufgeteilt. Zunächst in Quadranten (I,II,III,IV) und weiter in einen Bereich wo Rattenpaare ihre lokalen Kolonien gründen (außen in einem von neun Holzkisten pro Quadrant), sowie den “Alleys“, in deren Bereich die Ratten später ihre Bauten “frei“ graben. Links unten: Struktur des Rattenbaus unter dem südlichen Bereich (siehe Ausschnitt). Die Zugänge sind in der Reihenfolge ihres Auftretens nummeriert. Fehlende Nummern entstanden durch die Blockierung von Zugängen durch die Ratten. Sämtliche Teilabbildungen sind [Cal63] entnommen.

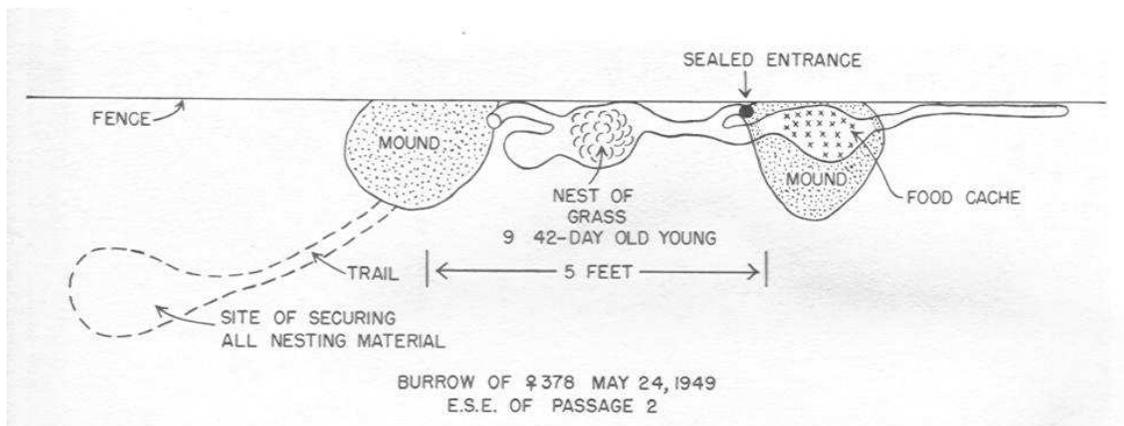


Abbildung 2.6: Aufsicht auf einen einfachen Rattenbau. In der Mitte ist die Nisthöhle erkennbar, links davon der Initialeingang. Ein zweiter, bereits wieder verschlossener Eingang ist rechts davon zu erkennen, ebenso wie die zweite Höhle, die als Vorratsspeicher dient. Neben den Eingängen befinden sich Erdaufschüttungen aus den Grabungsarbeiten. Links ist der Bereich eingezeichnet, aus dem Nistmaterial gesammelt wurde [Cal63].

Calhoun fielen folgende Punkte bei der Erweiterung eines Rattenbaus auf:

1. Ratten graben ihre Bauten gerne gegen vertikale Oberflächen (Zäune, Mauern) oder unter horizontale Oberflächen (Bretter, Kisten). Er bezeichnete dies als thigmotropische Antwort.
2. Ratten bauen bevorzugt dort, wo sie von oben geschützt sind (Sträucher, niedrig hängende Bäume)
3. Ansteigendes Gelände wird vor flachem Gelände bevorzugt, wobei die Erweiterung des Rattenbaus hangaufwärts erfolgt.
4. Der Ausbau erfolgt in Richtung der Nahrungsquelle oder eines anderen erstrebenswerten Ziels.

Weiterhin besteht eine direkte Beziehung zwischen der Struktur des Rattenbaus und der sozialen Struktur, sodass bei Gruppen von Ratten, deren Sozialstruktur weniger ausgebildet ist, Teile des Baus verfallen, oder von vornherein kein gemeinsamer Bau existiert. Bei Populationen mit starker Sozialstruktur lassen sich komplexe Bauten finden.

2.3.2 Sozialverhalten

Wanderratten leben in Kolonien mit bis zu mehreren hundert Individuen. Solch eine Kolonie lässt sich in lokale Kolonien unterteilen, die sich in der Populationsdichte und Sozialstruktur, und in Abhängigkeit davon auch im Paarungs- und agonistischen Verhalten unterscheiden. Gemeinhin gibt es je lokaler Kolonie sowohl bei Männchen als auch Weibchen ein hochdominantes Individuum, einige untergeordnete Weibchen und sehr wenige untergeordnete Männchen, letztere meist Nachkommen des dominanten Weibchens, sowie juvenile Nachkommen, welche gemeinsam in einem Bau leben. In der Regel ist es dem dominanten Männchen vorbehalten sich mit den Weibchen seines Territoriums zu paaren. Ihm obliegt auch die alleinige Verteidigung seines Reviers und dessen Bewohnern, während die geduldeten Männchen der lokalen Kolonie nicht zur Verteidigung derselben beitragen. Derartige lokale Kolonien, mit geringer Populationsdichte und klarer hierarchischer Struktur, können als hochrangig kategorisiert werden und sind sehr erfolgreich was Reproduktion und Aufzucht betrifft. Lokale Kolonien die sich aus weniger dominanten und vertriebenen Individuen zusammensetzen erreichen schnell eine hohe Populationsdichte. Da kein Männchen eine absolute Dominanz über seine gleichgeschlechtlichen Artgenossen erreichen kann, versuchen die Männchen sich in dieser Situation so oft wie möglich zu paaren, was für die brünstigen Weibchen bedeutet, dass sie mehrere hundert mal pro Nacht bestiegen werden. Die Weibchen sind dadurch so hohem Stress ausgesetzt, dass dieser sich negativ auf die Reproduktion auswirkt. Lokale Kolonien mit bereits hoher Populationsdichte wachsen daher nur sehr langsam und erreichen schließlich eine relativ konstante Populationsgröße.

Eine wichtiges Verhalten, das teilweise eine hohe Beweglichkeit erfordert, ist das agonistische Verhalten. Am Anfang steht die Aufmerksamkeitsphase, in der sich die Ratten bewegungslos anstarren. Während dieser Phase kann es auch zu Drohgebärden kommen. Das Fell sträubt sich, die Ratten machen einen Buckel, klopfen mit den Füßen, werfen mit den Hinterläufen Erde oder machen Vor- und Rückwärtsbewegungen [Han04b]. Beim anschließenden Angriff laufen sie schnell auf ihren Gegner zu und boxen, ringen oder beißen sich. Beim Boxen richten die Tiere sich auf ihre Hinterläufe auf und stoßen sich mit den Vorderpfoten. Beim Ringen greifen die Ratten einander und rollen laut quiekend über den Boden. Möglich sind auch Sprungangriffe, bei denen die Ratte mit allen vier Pfoten voraus auf den Gegner zuspringt. Der Kampf endet mit der Flucht des Verlierers und oft mit einer anschließenden Verfolgungsjagd durch den Gewinner. Handelt es sich um einen Kampf zur Verteidigung des Reviers, so wird der Verlierer lediglich bis zum Rand des Territoriums gejagt und schließlich ignoriert, solange er sich auf Distanz hält. Allgemein kann eine Verfolgungsjagd über mehr als 20m verlaufen und endet wenn die Distanz zwischen Jäger und Gejagtem zu groß wird, der Jäger den Gejagten aus den Augen verliert oder ein nicht unmittelbar überwindbares Hindernis zwischen den beiden steht.

2.3.3 Bewegungsapparat

R. norvegicus erreicht je nach Alter und Geschlecht ein Gewicht von 140 bis 500 g, bei einer durchschnittlichen Länge von 400 mm von Kopf bis Schwanz. Die Weibchen sind in der Regel kleiner als die Männchen. Der Körperbau der Ratte entspricht dem Grundbauplan der Nagetiere und weist, außer bezüglich des Körpergewichts, nur wenige geschlechtsspezifische Unterschiede auf. Neben den Vorder- und Hinterextremitäten ist auch die Wirbelsäule sehr stark an der aktiven Fortbewegung der Tiere beteiligt. Im Folgenden wird nun der Aufbau des Bewegungsapparates beschrieben und eine Übersicht über die Bewegungsabläufe bei verschiedenen Gangarten gegeben:

Wirbelsäule

Die Wirbelsäule von *R. norvegicus* ist sehr flexibel und ist in Hals-, Brust-, Lenden-, Sacral- sowie einer langen Schwanzregion eingeteilt. Bewegungen der Wirbelsäule werden durch die Beugung und Streckung von nebeneinanderliegenden Verbindungsstücken verursacht, die zwischen den Lendenwirbeln liegen. Die Bewegung der W. ist vor allem in schnelleren Gangarten ein wichtiger Bestandteil der Vorwärtsbewegung. Sie ist aber auch in der langsamen Gangart "Gehen" sichtbar (vgl. Abb. 2.7), bei der sie eine Auslenkung um ca. 12° erfährt [FSS⁺02]. Die Kreuzwirbel der Ratte sind zusammengewachsen und stützen dadurch das Becken, das bei der Bewegung der Wirbelsäule ebenfalls eine messbare Auslenkung erfährt. In schnelleren Gangarten hat das Becken beim Abheben der Hinterbeine vom Untergrund eine fast horizontale Ausrichtung, beim Aufsetzen ist es geneigt. Diese Ausrichtungen sind beim Gehen jedoch nicht erkennbar (vgl. Abb. 2.8). Allerdings erfolgen Drehungen des Beckens um die Dorsoventral- und die Longitudinalachse in allen Gangarten. Der Schwanz, den die Ratte dazu benutzt das Gleichgewicht zu halten, besteht abhängig von seiner Länge aus einer unterschiedlichen Anzahl an Schwanzwirbeln.

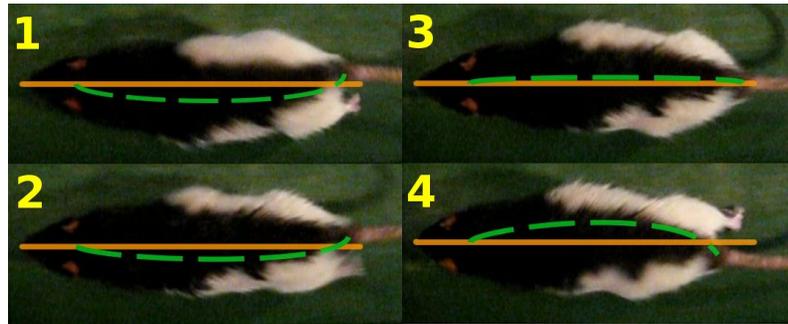


Abbildung 2.7: vereinfachte Darstellung der Wirbelsäulenbewegung der Ratte. Beim Laufen entsteht eine Seitwärtskrümmung der Wirbelsäule (grün) zur Längsachse (orange).

Extremitäten

Vorder- und Hinterextremitäten bestehen aus jeweils drei Segmenten: Die Vorderglieder sind an der Scapula (Schulterblatt) angebracht und bestehen aus Humerus (Oberschenkelknochen), Ulna und Radius (Elle und Speiche) und der Vorderhand (mehrere Knochen). Die Hinterglieder sind am Hüftknochen - bestehend aus Ilium, Ischium und Pubis - angebracht und gliedern sich in Femur (Oberschenkelknochen), Tibia und Femula (Schienbein und Wadenbein) und Hinterfuß (mehrere Knochen) (vgl. Abb. 2.9). Sie besitzen eine Zick-Zack-Konfiguration, d.h. die in der Saggitalebene liegenden Gelenkwinkel sind abwechselnd auf gegenüberliegenden Seiten der jeweiligen Extremität angeordnet. Beim Vorderbein liegen Schulter- und Handgelenkwinkel caudal, der dazwischenliegende Ellbogengelenkwinkel cranial. Beim Hinterbein liegen die Winkel des Hüft und Fußgelenks cranial, der des Knigelenks caudal (vgl. Abb. 2.8).

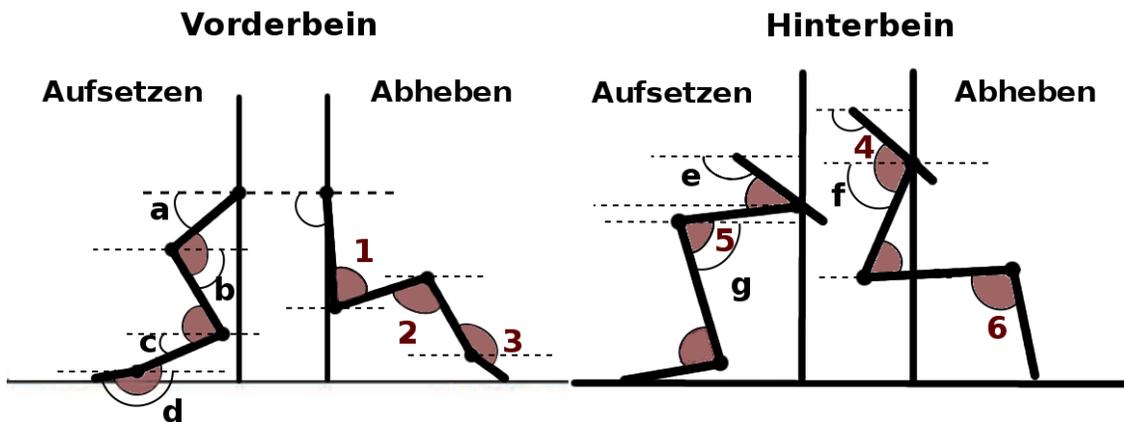


Abbildung 2.8: Konfiguration der Vorder- und Hinterextremitäten beim Aufsetzen und Abheben während des Gehens. Die braun eingezeichneten Gelenkwinkel zwischen den Gliedsegmenten sind gegenüberliegend angeordnet. Beim Vorderglied sind dies die Winkel von Schulter- (1), Ellbogen- (2) und Handgelenk (3). Beim Hinterbein sind dies die Winkel von Hüft- (4), Knie- (5) und Fußgelenk (6). Die weiß eingezeichneten Winkel bezeichnen die Auslenkung der Gliedsegmente zur Frontalebene. Beim Vorderbein sind dies Winkel der Scapula (a), des Humerus (b), des Unterarms (c) und der Hand (d), beim Hinterbein die des Beckens (e), des Oberschenkels (f), und des Unterschenkels (g). (Nach Fischer [FSS⁺02])

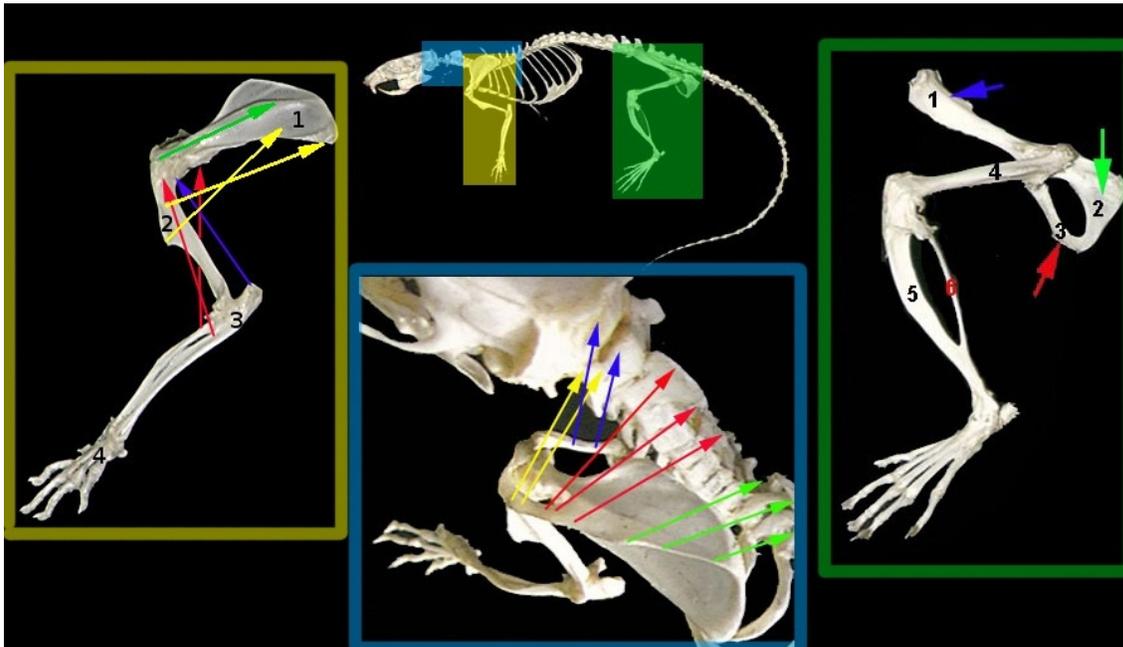


Abbildung 2.9: Skelettstruktur von *R. norvegicus* (Teilbilder aus [Ken05]). Oben mittig: Skelett, die gefärbten Areale sind die in den übrigen Teilbildern erläuterten Vorder- und Hinterextremitäten (gelb und grün), sowie der Schultergürtel (blau). Links: Vorderextremität mit eingezeichneten Muskelverläufen; die roten Pfeile bezeichnen den *biceps brachii* und den *brachialis*, die zur Flexion dienen, der blaue den *triceps brachii* zur Extension. Gelb eingezeichnete Pfeile markieren die zur Retroversion benötigten Muskel *spinodeltoideus* und *teres major*, der grüne den *supraspinatus* zur Anteversion. Die Knochen, an denen die Muskeln befestigt sind, sind *Scapula* (1), *Humerus* (2), *Ulna* und *Radius* (3) welche am Handgelenk (4) endet. Unten mittig: Schulterbereich mit eingezeichneten Verläufen der Muskel zur Adduktion (*Clavotrapezius*, blau) und Rotation (*Acromiotrapezius*, rot; *Spinotrapezius*, grün; *Levator scapulae ventralis*, gelb). Rechts: Hinterextremität. Die Pfeile zeigen die Knochen an, die zusammen den Hüftknochen bilden; mit Zahlen bezeichnet: *Ilium* (1), *Ischium* (2), *Pubis* (3), *Femur* (4), *Tibia* (5) und *Fibula* (6).

Muskulatur

Auch wenn die Grundstruktur der Vorder- und Hinterextremitäten gleich ist, so bestehen doch Unterschiede aufgrund der verschiedenen Aufgaben. Während die Hinterläufe hauptsächlich eine Stützfunktion haben, so benötigen die Vorderbeine vornehmlich eine hohe Beweglichkeit [Ken05]. Dies wird auch in der Ausprägung der Skelettmuskulatur deutlich. Sämtliche Muskeln in den Hinterextremitäten sind deutlich kräftiger als die Muskeln gleicher Funktion der Vorderextremitäten. Die Funktionen lassen sich in 3 Gruppen einteilen (vgl. Abb. 2.9):

- Muskeln zur Flexion (Beugung) und Extension (Streckung), zur Bewegung eines Drehgelenks, z.B. des Ellbogens.
- Muskeln für Retro- und Anteversion. Eine Bewegung parallel zur Längsachse in dorsaler Richtung (Retroversion), respektive ventraler Richtung (Anteversion) an einem Kugelgelenk, z.B. dem Schultergelenk.
- Muskeln zur Adduktion und Abduktion. Eine Bewegung eines Skelettbestandteils wird zur Längsachse des Körpers hin- (Adduktion) oder weggeführt (Abduktion), z.B. das Schulterblatt.

Zur Bewegung der Gliedmaßen werden die einzelnen Muskeln dieser Gruppen in einem bestimmten Muster aktiviert, so dass Vorder- und Hinterextremitäten einem charakteristischen Bewegungsmuster folgen.

Schrittzyklen und Gangart

Allen drei Gangarten, “Gehen“, “Trab“ und “Galopp“ liegt der Schrittzzyklus zugrunde. Ein Schrittzzyklus besteht aus Stützphase und Schwungphase. Die Stützphase beginnt mit einer Anfangsflexion des Beins, bedingt durch das Tragen des Körpergewichts. Es folgt eine Extension des Glieds innerhalb der Stützphase, die den Körper nach vorne beschleunigt. Die Extremität löst den Kontakt zum Untergrund und geht in die Schwungphase über, wo erneut eine Beugung des Körperglieds erfolgt. Zusätzlich bewegt sich das Bein relativ zum Körper nach vorne um sich in der zweiten Hälfte der Schwungphase zur Vorbereitung auf die kommende Stützphase zu strecken (vgl. Abbildung 2.10). Jedes Bein durchläuft diesen Schrittzzyklus nur einmal je *stride*¹, welcher mit dem Aufsetzen eines Fußes beginnt und nach Durchlauf eines Schrittzzyklus mit dem folgenden Aufsetzen des gleichen Fußes endet. Die *stride*-Parameter ändern sich mit der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit der Ratte kann nämlich als Funktion von *stride*-Länge und *stride*-Dauer ausgedrückt werden. Ratten erhöhen ihre Geschwindigkeiten sowohl durch Vergrößerung der *stride*-Länge, als auch durch Verkürzung der *stride*-Dauer. Dieser Tatsache wird in der Auswertung in Kapitel 3.4 Bedeutung zukommen. Bei der Verkürzung der *stride*-Dauer ist zu berücksichtigen, dass vor allem die Stützphase verkürzt wird, während sich die Schwungphase nur wenig verändert. Neben der Veränderung der *stride*-Parameter verändert sich auch die Koordination der Gliedmaßen mit zunehmender Geschwindigkeit, was zu den unterschiedlichen Gangarten führt.

¹*stride* wird wie *step* mit Schritt übersetzt, meint aber etwas anderes und wird daher weiter verwendet. Beim Menschen entspricht der *stride* einem Doppelschritt, also einem vollständigen Schrittzzyklus beider Beine



Abbildung 2.10: Schrittzyklen der Ratte (Gangart "Gehen"). 1: Erster Schrittzklus. Das aufgesetzte Hinterbein ist am Beginn der Stützphase gebeugt, während das Vorderbein gestreckt ist und kurz vor dem Übergang zur Schwungphase ist. 2: Das Hinterbein drückt durch Extension den Körper nach vorne, der Vorderlauf befindet sich in der zweiten Hälfte der Schwungphase in der Vorwärtsbewegung und streckt sich. 3: Der Hinterlauf drückt sich ab und geht in die Schwungphase über, das Vorderbein ist in der Stützphase. 4: Der Hinterlauf ist in gestreckter Haltung kurz vor Ende der Schwungphase, das Vorderbein hat die Stützphase bereits wieder verlassen. 5: Das Hinterbein hat seinen Schrittzklus durchlaufen, ein weiterer Schrittzklus erfolgt in den Teilbildern 5 bis 8.

Gehen ist eine Gangart zur Reduzierung der Energiekosten. In der ersten Hälfte der Stützphase jedes Glieds wird der Körper angehoben und gleichzeitig durch die Umwandlung von kinetischer in Potentialenergie abgebremst. In der zweiten Hälfte der Stützphase senkt sich der Körper ab, die Potentialenergie wird in kinetische Energie umgewandelt und der Körper beschleunigt. Zwei bis drei Füße sind ständig am Boden und treten zum Beispiel in folgender Reihenfolge auf: links hinten, links vorne, rechts hinten, rechts vorne. Die Geschwindigkeit beim Gehen liegt laut [WK05] zwischen 0 und 55 cm/s, in den Versuchen von Fischer et al. jedoch lag sie bei maximal 80 cm/s. Die Maximalgeschwindigkeit wird durch die Beinlänge begrenzt.

Trab vergrößert die Maximalgeschwindigkeit des Gehens durch hinzufügen einer Flugphase in den Schrittzyklus. Die Beine wirken außerdem eher wie Sprungfedern, denn in der ersten Hälfte der Stützphase wird die kinetische in elastische Energie umgewandelt. Mit dieser Energie wird der Körper beschleunigt und vom Untergrund abgedrückt. Es kommt zum Sprung während der Schwungphase, die nun zur Flugphase wird. Während des Trabs berühren die diagonal gelegenen Gliedmaßen gleichzeitig den Boden. Die Geschwindigkeit beim Trab liegt zwischen 55 und 80 cm/s

Galopp vergrößert die *stride*-Länge durch zusätzliches Beugen und Strecken der Wirbelsäule während des Laufens. Sowohl Vorder- als auch Hinterläufe berühren fast synchron den Boden, und je nach Geschwindigkeit sind ein, zwei oder gar keine Gliedmaßen gleichzeitig am Boden. Ratten galoppieren bei Geschwindigkeiten zwischen 70 und 100 cm/s.

Kinematik

In einer Studie von Fischer et al. [FSS⁺02] wurde die Kinematik eingehend untersucht. Die Analyse der Kinematik, umfasst die Bewegung der Vorder- und Hinterextremitäten, die sagittale Wirbelsäulenbewegung einschließlich der Auslenkungsmuster der Gliedersegmente, sowie den Beitrag einzelner Segmente zur Schrittlänge und Gelenkbewegung. Die Winkel der einzelnen Segmente und Gelenke (vgl. Abb 2.8) haben während der verschiedenen Phasen des Schrittzyklus unterschiedliche Auslenkungsbereiche (siehe Tabelle 2.1 und 2.2). Aus diesen Auslenkungen bestimmten Fischer et al., wieviel jedes Segment zur Schrittlänge prozentual beiträgt. Der Beitrag zur Schrittlänge wurde für die Schulterblätter mit 57%, für die Oberarm- & Unterarmknochen nur mit 16% bzw. mit 18% und für die Hand mit 9% bestimmt. Bei den Hinterbeinen beträgt der Beitrag zur Schrittlänge beim Becken -3%, beim Oberschenkel 69%, beim Unterschenkel 18% und beim Fuß 16%. Während der Hauptanteil der Bewegung hinten demnach aus den Oberschenkeln kommt, trägt vorne der Schultergürtel den Größten Teil zur Bewegung bei. Gemessen wurde *R. norvegicus* in [FSS⁺02] mit einer Laufgeschwindigkeit von 0,4 – 0,8 m/s, wobei sie dabei stets in der Gangart “Gehen“ blieb. Die spezifische Bewegung der Wirbelsäule ist in dieser Gangart nicht zwar nicht so maßgebend wie bei “Trab“ oder “Galopp“, ist aber dennoch messbar und ist in dieser Diplomarbeit von besonderer Bedeutung.

Segment/ Gelenk	Winkel beim Aufsetzen [°]	Winkel beim Abheben [°]	Auslenkung während Stand [°]
Scapula	32 – 51	79 – 103	44 – 68
Humerus	51 – 70	–28 – 4	63 – 94
Unterarm	18 – 33	106 – 130	84 – 110
Vorderhand	5 – 26	107 – 178	93 – 162
Schultergelenk	89 – 110	57 – 89	25 – 52
Ellbogengelenk	69 – 89	84 – 118	26 – 55
Handgelenk	177 – 200	115 – 197	55 – 127

Tabelle 2.1: Auslenkungsbereiche der in Abb. 2.8 (links) eingezeichneten Segment- und Gelenkwinkel des Vorderbeins von *R. norvegicus* beim Gehen. Quelle: [FSS⁺02]

Segment/ Gelenk	Winkel beim Aufsetzen [°]	Winkel beim Abheben [°]	Auslenkung während Stand [°]
Becken	32 – 43	28 – 43	4 – 11
Oberschenkel	–4 – 14	58 – 67	45 – 84
Unterschenkel	63 – 84	–17 – 5	69 – 84
Fuß	–4 – 15	77 – 118	79 – 110
Hüftgelenk	28 – 54	93 – 109	45 – 78
Kniegelenk	61 – 93	53 – 74	13 – 34

Tabelle 2.2: Auslenkungsbereiche der in Abb. 2.8 (rechts) eingezeichneten Segment- und Gelenkwinkel des Hinterbeins von *R. norvegicus* beim Gehen. Quelle: [FSS⁺02]

Kapitel 3

Material und Methoden

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ist die Annahme einer konstanten Schrittweite bei der Rekonstruktion der Laufwege der Ratten eine der möglichen Ursachen für die Abweichungen der Trajektorien von dem realen Verlauf der Laufpfade. In den in Kapitel 2.3.3 erläuterten Prinzipien der Fortbewegung der Ratte wird die Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Schrittweite dargelegt. In der vorliegenden Diplomarbeit wird diese Korrelation innerhalb der gemessenen Sensordaten gezeigt, um eine Verbesserung der Pfadrekonstruktion zu erzielen. In diesem Kapitel werden Entwicklung, Hardware und Software des Sensorknotens und des Versuchsaufbaus beschrieben, die zur Erhebung der Messdaten genutzt wurden. Anschließend werden die Routinen zur Datenaufzeichnung und die Methoden zur Auswertung und Korrelationsbestimmung vorgestellt.

3.1 Der Sensorknoten des Ratpack-Projekts

Im Laufe des Ratpack-Projekts wurden mehrere Prototypen entwickelt, die sowohl den Beschränkungen durch Lebensweise und Größe der Tiere, als auch den Anforderungen gerecht werden sollten, *R. norvegicus* über einen längeren Zeitraum mittels Dead Reckoning zu beobachten. Der letzte Sensorknoten dieser Reihe, der zu Beginn dieser Diplomarbeit zur Verfügung stand, ist mitsamt Energiequelle und Sensoren in Taschen auf einem Lederträger eingenäht (Abb. 3.1, links). Dieser lässt sich mittels Klettverschlüssen auf einer Lederweste befestigen¹, die von den Ratten getragen werden kann (Abb. 3.1, rechts).

¹Genau genommen lassen sich die Komponenten weiterhin ihren Taschen entnehmen oder sind in Taschen eingenäht, die sich mit Klett auf dem Lederteil befestigen lassen. Dies wurde aus Gründen der Austauschbarkeit der Komponenten in der Entwicklungsphase beibehalten.

Die Komponenten sind dabei so verteilt angeordnet, dass sie möglichst flach am Rattenkörper anliegen. Durch die Lederhüllen sind sie zusätzlich ausreichend vor äußeren Einflüssen, wie z.B. vor Abstreif-Versuchen der Ratte, geschützt. Der Umfang der Ratte um die Längsachse wird durch die Sensorweste von ca. 16 cm auf 20,5 cm vergrößert². Der derzeitige Prototyp wiegt inklusive Energieversorgung und Tragemontur ca. 34 g, also noch 22 g über dem errechneten Idealwert für Zusatzgewicht (siehe [ZT09]). Dabei wiegt der Sensorknoten 10,5 g, die Akkus 8 g und die Tragemontur ca. 15,5 g. Im derzeitigen Stadium des Projekts erscheint dieses Gewicht allerdings ausreichend gering, weil die Versuche mit den Tieren derzeit ohnehin nur wenige Stunden dauern, und unter ständiger Aufsicht eines Versuchsleiters in Laborumgebungen stattfinden. Grundbaustein des in dieser Arbeit verwendeten Motes ist das *RF Transceiver Modul RC2301AT* der Firma Radiocrafts, das über einen Mikroprozessor mit integriertem Transceiver, RAM und Flash-Speicher verfügt. Als Energiequelle werden Lithium-Polymer-Akkumulatoren (LiPo-Akkus) und als Sensoren 2D-Kompass, 3D-Accelerometer und 2D-Gyroskop verwendet. Im Folgenden werden die Komponenten im Detail beschrieben.

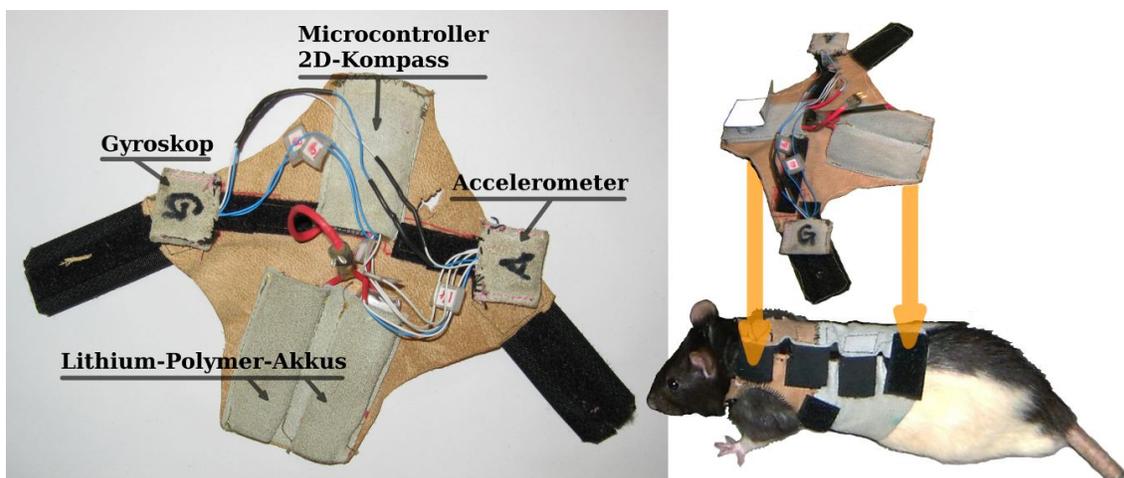


Abbildung 3.1: Prototyp des in dieser Diplomarbeit verwendeten Sensorknotens mit Tragemontur. Links: Der auf einem Lederträger aufgenähte Sensorknoten. Mikroprozessor, Kompass und LiPo-Akkus sind in Taschen auf dem Lederträger eingenäht, Gyroskop und Accelerometer befinden sich in Taschen, die mit Klettverschluss auf dem Lederträger angebracht sind. Rechts: Befestigung des Sensorknotens an der Tragweste mit Klettverschluss.

²Bei diesen Werten handelt es sich um Durchschnittswerte mehrerer Messungen um den Thorax der Ratte.

3.1.1 Sensorknoten-Hardware

Das RF Transceiver Modul RC2301AT: Dieses 12.7 mm x 25.4 mm x 2.5 mm große Modul der Firma Radiocrafts besitzt einen CC2430 Mikroprozessor (siehe folgenden Abschnitt), eine integrierte Antenne und verfügt neben dem Speicher des CC2430-Mikroprozessors zusätzlich über 4 KiB EEPROM. Es ist für die Oberflächenmontage (*surface-mounting technology*, SMT) zusätzlicher elektronischer Bauteile (*surface-mounted devices*, SMDs) ausgelegt und verfügt über eine *Location Engine*, die es ermöglicht, durch einen dezentralisierten Algorithmus die Position von Knoten innerhalb eines drahtlosen Ad-hoc-Netzwerks zu berechnen (vgl. mit [Rad07]). Diese Eigenschaften machen das RC2301AT-Modul zu einer geeigneten Plattform für die Entwicklung von Sensorknoten innerhalb des Ratpack-Projekts und zur Hauptkomponente unseres Motes. Sein Mikroprozessor liest die Daten der Sensoren ein, verarbeitet sie vor und sendet sie über den integrierten Transceiver zu einer nahe gelegenen Basisstation. Die Programmierung des Motes erfolgt über die I^2C -Debugging-Schnittstelle des Mikroprozessors.

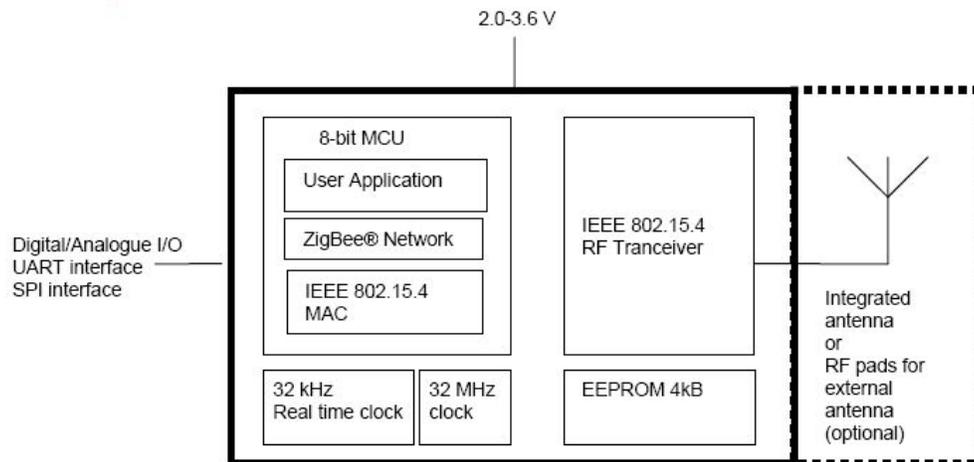


Abbildung 3.2: Aufbau des RF Transceiver Moduls RC2301AT. Durch Nutzung des CC2430 Mikroprozessors ist es für seine geringen Ausmaße relativ leistungsfähig. ([Rad07] entnommen).

Der Mikroprozessor CC2430: Dieser Mikroprozessor der Firma Chipcon, einer Tochtergesellschaft der Firma Texas Instruments, ist das Herzstück des aktuellen Sensorknoten-Prototyps. Es ist neben dem Einlesen, Vorverarbeiten und Senden der Daten für die Steuerung der Spannungsversorgung des kompletten Systems zuständig. Es handelt sich um ein System-on-Chip (SoC) und kombiniert eine MPU (Microprocessor Unit) der Intel 8051-Architektur mit einem Transceiver nach IEEE 802.15.4-Standard. Dieser Standard beschreibt ein Übertragungsprotokoll und spezifiziert die Schichten der

Bitübertragung (PHY, *Physical Layer*) und der Medienzugriffskontrolle (MAC, *Medium Access Control*) des OSI-Modells. Entsprechend der PHY-Spezifikation geschieht die Datenübertragung auf 16 Kanälen im 2,4 GHz ISM-Band unter Nutzung des DSSS-Frequenzspreizverfahrens (*Direct Sequence Spread Spectrum*) zur Reduzierung der Störfähigkeit. Das SoC verfügt ferner über 128 KiB permanenten Flash-Speicher, 2x4 KiB SRAM, eine I²C-Debugging-Schnittstelle, zwei Datenzeiger und über die für Mikroprozessoren übliche Peripherie (siehe [Chi05]).

Die Lithium-Polymer-Akkumulatoren: Als vielversprechende Energiequelle haben sich LiPo-Akkus erwiesen. Im Gegensatz zu anderen Akkus, wie z.B. dem Lithium-Ionen-Akku, besitzen LiPo-Akkus als Elektrolyt ein Gel, das schon bei Raumtemperatur seine volle Leistungsfähigkeit erreicht. Sie besitzen daher eine höhere Energie- und Leistungsdichte als Lithium-Ionen-Akkus und liefern eine maximale Spannung von 3,7 V (vgl. [L0909]). Da diese mit der Zeit langsam abfällt, sorgt der Spannungsregler der MPU für eine konstante Spannungsversorgung des gesamten Systems von 3,3 V. LiPo-Akkus sind elektrisch und thermisch empfindlich: Überladen, Tiefentladen, zu hohe Ströme, sowie der Betrieb bei zu hohen (größer als 60 °C) oder zu niedrigen Temperaturen (kleiner als 0 °C) und langes Lagern in entladenen Zustand schädigen oder zerstören den Akku in den meisten Fällen. Um die LiPo-Akkus vor einer schädigenden Tiefentladung zu schützen, schaltet der Mikroprozessor den gesamten Sensorknoten durch die Deaktivierung des Spannungsreglers ab, bevor die Spannung den Wert von 2,9 V unterschreitet.

Sensoren

Der Kompass HMC6352: Dieser Kompass der Firma Honeywell besteht aus zwei orthogonal zueinander angeordneten Achsen mit magnetwiderstandsbeständigen Sensoren. Überdies verfügt er über Set-/Reset-Spulen, einen eigenen Mikroprozessor, permanenten EEPROM und eine I²C-Schnittstelle (vgl. [Hon06]). Über Letztere lassen sich sowohl die vom Mikroprozessor errechneten Azimuth-Winkel abrufen, die zur Bestimmung der Laufrichtung der Ratte dienen, als auch Befehle zur Steuerung der Set-/Reset-Prozedur oder des stromsparenden Sleep-Modus senden. Da der HMC6352 sich in einem LLC-Gehäuse verbindet und sich für SMT eignet, wurde er zusammen mit dem Radiocrafts-Modul verbaut. Wie in [ZT09] ausführlich erläutert, gibt es jedoch zwei nicht zu unterschätzende Probleme bei der Verwendung des 2D-Kompasses, die zur Verfälschung des Azimuth-Winkels führen. Es handelt sich dabei zum einen um einen temperaturbedingten Drift, der durch Verwendung der Set-/Reset-Funktion ausgeglichen werden kann. Zum anderen entsteht ein Fehler bei der Verschiebung des Kompasses aus der Horizontalebene, der durch seine Positionierung in der Mitte des Rattenrückens vermindert wurde. An einer nachhaltigeren Lösung beider Probleme wurde in dieser Diplomarbeit

nicht gearbeitet.

Accelerometer MMA7260QT: Bei dem zur Messung von Beschleunigungen eingesetzten Accelerometer der Firma Freescale handelt es sich um ein Mikrosystem (MEMS, microelectromechanical system), das aus zwei kapazitiven Sensorzellen und einer anwendungsspezifischen integrierten Schaltung (ASIC, application specific integrated circuit) zur Signalaufbereitung besteht. Jede der Sensorzellen besitzt eine bewegliche, kapazitive Zentralmasse, die in einer Aufhängung befestigt ist. Masse und Aufhängung sind so konzipiert, dass sie wie Plattenkondensatoren funktionieren. Erfährt die Masse eine Auslenkung durch eine auf sie wirkende Beschleunigungskraft, so kann die Beschleunigung durch die veränderte Kapazität errechnet werden. Die Sensorzellen sind so angeordnet, dass sie die Beschleunigungen in drei Raumdimensionen messen können (vgl. [Fre06]). Eine Beschleunigungskraft die permanent wirkt ist die Gravitationskraft, sodass es möglich ist, die Orientierung des Accelerometers zur Erdbeschleunigung zu bestimmen, wenn sich dieser in Ruhe befindet. Mit dieser Information lassen sich so auch Aussagen über die Verlässlichkeit der Kompassdaten treffen. Weiterhin können mit dem Accelerometer Beschleunigungsmuster der Ratte untersucht werden. Eine einfache Geschwindigkeitsberechnung ist jedoch nicht möglich, da für jede Sensorzelle der auf sie wirkende Anteil der Erdbeschleunigung bei ungewisser Ausrichtung der Ratte nicht aus den Daten bestimmt werden kann. Der Messbereich des MMA7260QT reicht von -6 g bis $+6$ g.

Gyroskop IDG300: Das zweiachsige Gyroskop von Invensense besteht aus zwei voneinander unabhängigen MEMS zur Detektion von Rotationen und Messung von Winkelgeschwindigkeiten. Dabei verfügt jeder MEMS über eine Zentralmasse, die in einer Aufhängung befestigt ist und durch eine Verstärkungsregelungsschaltung kontrolliert zum Schwingen gebracht wird. Bei einer Rotation um die X-Achse, respektive die Y-Achse, kann eine durch die Corioliskraft erzeugte Vibration der Masse durch einen kapazitiven Aufnehmer registriert werden. Das dadurch erzeugte Signal wird durch interne Mikroelektronik verstärkt, demoduliert und geglättet um eine analoge Spannung proportional zur Winkelgeschwindigkeit zu erzeugen, die im Bereich von ± 500 °/sek gemessen werden kann (vgl. [Inv07]). Durch Integration des IDG300 in den Sensorknoten werden die beim Laufen erzeugten Seitwärtsdrehungen des Rattenkörpers gemessen, die durch die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Bewegung der Wirbelsäule erzeugt werden. Das Gyroskop wird dazu in einer Seitentasche an der Tragemontur angebracht, um eine der sensitiven Achsen parallel zur senkrechten Drehachse zu positionieren und gleichzeitig der Anforderung gerecht zu werden, den Sensorknoten möglichst enganliegend am Rattenkörper zu belassen (siehe Abb. 3.1). In [ZT09] konnten durch die Messung der Seitwärtsbewegung der Wirbelsäule (siehe Kap. 2.3.3) sogenannte Pseudo-Schritte bestimmt werden. Erfüllten die Gyroskopdaten bestimmte Voraussetzungen, wurde dies als Auftreten eines Pseudo-Schrittereignisses gewertet. In Abschnitt 3.4.2 wird die Bedeutung der Gyroskop-

daten im Detail erläutert. Produktion und Verkauf des IDG300 wurden mittlerweile eingestellt, sodass er für zukünftige Sensorknotenentwürfe nicht mehr zur Verfügung steht. Mit dem IDG-400 oder IDG-500 von Invensense bieten sich aber brauchbare Alternativen.

3.1.2 Sensorknoten-Software und -Entwicklung

Für die Entwicklung von Anwendungen werden die Entwicklungswerkzeuge der Firma Sensinode benutzt. Den Kern bildet dabei der 6LoWPAN-Protokollstack³ namens *NanoStack*TM v1.0.3, der auf dem Radiocrafts Modul RC2301AT eingerichtet wird und eine Vielzahl an Protokoll-Implementierungen (IPv6, UDP, ICMP, IEEE 082.15.4 MAC) für die drahtlose Datenübertragung enthält. Dieser kann um eigene Protokolle ergänzt werden. NanoStack baut auf *FreeRTOS*TM, einem Open-Source-Echtzeitbetriebssystem für eingebettete Systeme auf, das einen aus wenigen C-Dateien bestehenden Mikrokern zur Verfügung stellt (Abb. 3.3). Die Programmierung der Radiocrafts-Module erfolgt mit Hilfe der Sensinode-Entwicklungsplatine *devBoard D210* die über USB mit dem Rechner und über ein 6-Pin-Steckverbindung mit dem Sensorknoten verbunden werden kann. Sensinode stellt das devBoard zusammen mit Beispielprogrammen für einfache Aufgaben und einem Softwaregerüst zu Erstellung eigener Anwendung zur Verfügung. Anwendungen werden in der Sprache C geschrieben und durch den mitgelieferten Compiler SDCC (Small Device C Compiler) übersetzt. Das Kompilat wird dann mittels devBoard auf den Sensorknoten übertragen. Die Kommunikation mit den Sensorknoten des Drahtlosnetzwerks erfolgt unter Verwendung des Sensinode Protokolls nRP (nRoute Protocol) über den *NanoRouter*TM, einer USB-Platine mit integriertem Radiocrafts-Modul (s. Abb. 3.4). Der Routing-Dienst nRouted richtet einen TCP-Server ein, der die Verbindungen zwischen den Schnittstellen kontrolliert. Eine Anwendung kann nun eine Verbindung zum nRouted-Server herstellen und nach der Übertragung eines nRP-Konfigurationspakets Daten von einem Netzwerkknoten empfangen. Die von Sensinode dafür vorgesehene Client-Anwendung *nMoteReceiver* wurde unseren Zwecken angepasst und wird unter dem Namen *nRatMoteReceiver* verwendet. In ihr werden zunächst die Filter festgelegt, mit denen nRoute konfiguriert wird. Die Client-Anwendung legt einen TCP-Socket an, verbindet sich mit dem TCP-Server, erstellt das nRP-Konfigurationspaket entsprechend den Filterregeln und sendet es an nRouted. nRouted prüft das Paket und erteilt der Anwendung die Erlaubnis zum senden von Befehlspaketen. *nRatMoteReceiver* schreibt nun den Befehl zum Übertragen der Sensordaten auf den erstellten TCP-Socket und liest über selbigen die gesendeten Daten vom Sensorknoten (vgl. mit [Sen08]). Mehr zur Verwendung von nRouted und nRatMoteReceiver in Abschnitt 3.2.7.

³6LoWPAN ist in Akronym für *IPv6 over Low power WPAN*, bezeichnet also ein Kommunikationsprotokoll (IPv6, Internet Protokoll Version 6) für drahtlose Netze im persönlichen Bereich (WPAN, Wireless Personal Area Networks) mit niedrigem Energieverbrauch.

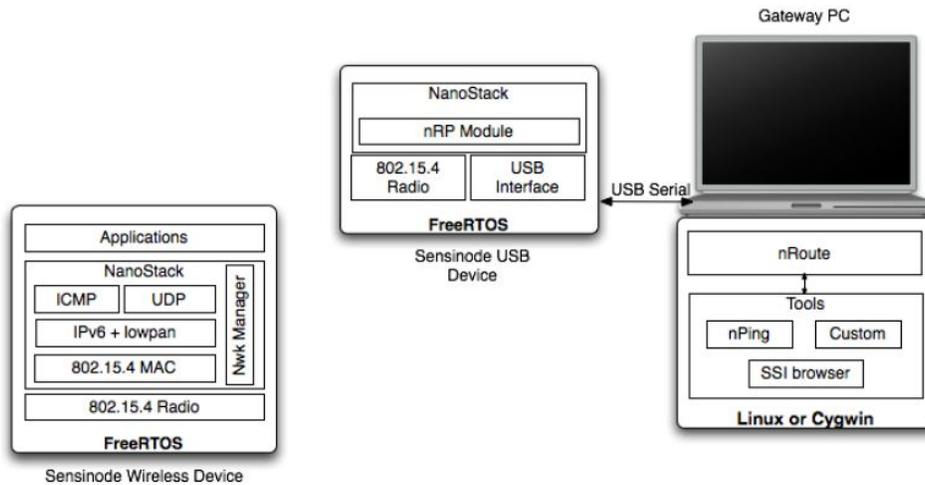


Abbildung 3.3: NanoStack-Architektur (aus [Sen08])

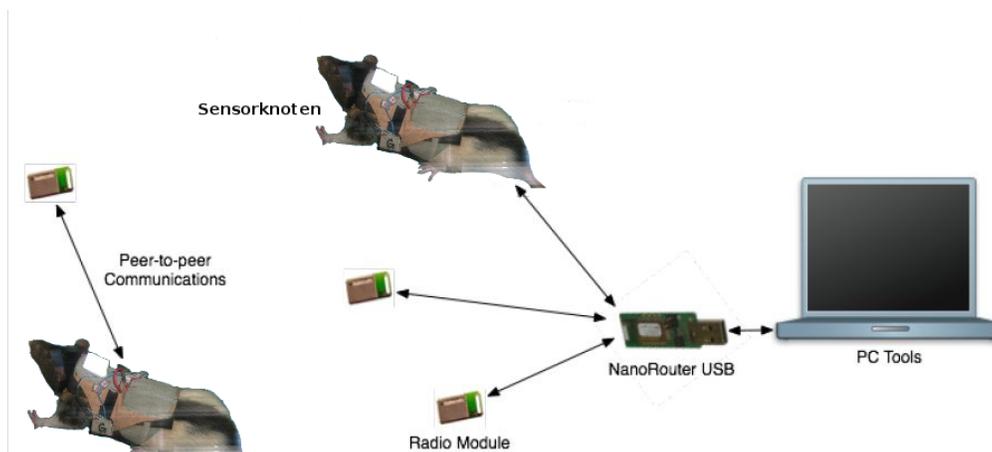


Abbildung 3.4: NanoStack Ad-hocTopologie

3.2 Die Versuchsumgebung: Laufband

Zur Erzeugung geeigneter Daten für die Korrelation zwischen Sensordaten und Laufparameter werden Versuchstiere mit einem Sensorknoten ausgerüstet und auf ein Laufband gesetzt. Das Laufband wurde zu Beginn dieser Diplomarbeit zur Verfügung gestellt, erfuhr jedoch in Aufbau, Steuerelektronik und Steuersoftware einiger Modifikationen unterschiedlichen Ausmaßes. Im Folgenden wird zunächst der Aufbau des Laufbands, sowie dessen Weiterentwicklung im Laufe dieser Diplomarbeit beschrieben. Anschließend die Implementierung von Versuchskonzept- und steuerung erläutert.

3.2.1 Aufbau des Laufbands

Das Grundgerüst des Laufbands stammt aus Versuchen in den 1970er Jahren und besteht aus einem Kunststoffband, das um eine Antriebs-, sowie eine Umlenktrummel und über 14 Tragrollen laufend eine Lauffläche von ca. 120 cm bietet. Angetrieben wird das Band über einen Gleichstrommotor mit Servoantrieb, der sich durch eine simple Steuerelektronik mit Drehregler manuell einstellen lässt. Durch die Arbeit von Dr. Johannes Thiele wurde das rudimentäre Laufband um wesentliche Komponenten erweitert (siehe Abb. 3.5). Es besitzt an seinem Anfang eine Aufenthaltskiste (B. *box*) für die Versuchstiere mit einem Wasserspender und an seinem gegenüberliegenden Ende einen Futterautomaten (vgl. [NWK00]), der bis zu 20 g an Futterpellets fasst, die den Tieren als Motivation dienen das Laufband zu überqueren. Zu den Seiten wird das Laufband mit 50 cm hohen Plexiglasscheiben abgeschirmt, die an Metallstreben aufgehängt sind und einen Abstand von 5 mm zur Lauffläche aufweisen. Die Scheiben bilden einen 20 cm breiten Korridor für die Versuchstiere, dessen Breite durch Stellschrauben verstellbar ist. An den Seiten des Laufbands und außerhalb dieses Korridors sind in Höhe von 35 mm dreizehn Lichtschranken (LB, *light barrier*) im Abstand von 10 cm angebracht, um die Position und Laufrichtung der Ratte auf dem Laufband zu verfolgen. Sowohl Futterspender (F.) als auch die LBs sind über eine Kontrollplatine mit der parallelen Schnittstelle des Steuer-PCs verbunden. Die Kontrollplatine (siehe Abb. 3.7) schreibt die LB-Ereignisse auf die parallele Schnittstelle, liest die Stellgrößen für den F. und sendet sie weiter. LB-Ereignisse sind ansteigende Taktflanken bei Unterbrechung der LBs und fallende Taktflanken bei erneutem Lichtkontakt der LBs. Der Motor wird mittlerweile über ein Kontrollapparat (TCD, *Treadmill Control Device*) geregelt, der über die serielle Schnittstelle mit dem Steuer-PC verbunden ist und über einen optischen Encoder am Laufband Geschwindigkeitsinformationen erhält.

Das TCD ist das elektronische Herzstück der Laufbandsteuerung, mit einem 8-Bit Microcontroller ATmega8 von ATMEL als Kern. Es liest von der parallelen Schnittstelle des Steuer-PCs Befehle zur Regelung der Laufbandgeschwindigkeit und schreibt die aktuelle Geschwindigkeit zurück. Diese erhält das TDC durch die Umrechnung der Ausgangssignale des optischen Encoders an der Laufbandantriebstrummel. Die Geschwindigkeit dient außerdem als Regelgröße (Istwert) des in der Controller-Schaltung realisierten P-Reglers (Abb. 3.8). Der P-Regler erzeugt abhängig vom Sollwert, der vom PC vorgegeben wird, einer Pulsweitenmodulation (PWM). Das PWM-Signal wird über einen Optokoppler zu einem Tiefpassfilter übertragen (Abb. 3.9), durch diesen demoduliert und schließlich als Steuerstrom zum Motor-Regler weitergeleitet. Der Optokoppler ermöglicht eine galvanische Trennung der Stromkreise der Controller- und der Wandler-Schaltung.

In einer alten Konfiguration waren zwischen TDC und Motor-Regler noch zwei Operationsverstärker (OPVs) in einer Brückenschaltung zwischengeschaltet. Das TDC selbst war

zu diesem Zeitpunkt anders aufgebaut, regelte aber ebenso durch eine Pulsweitenmodulation die Spannungsausgänge der OPVs. Dabei wurde der Ausgang eines OPVs invertiert, sodass seine Ausgangsspannung im Bereich 0 bis -40 Volt lag, die des nicht invertierten im Bereich von 0 bis 40 V. Der Motor konnte so mit einer Steuerspannung von 0 bis 80 V geregelt werden. In der alten Konfiguration kam es zu einer großen zeitlichen Verzögerung zwischen dem Eingang des Sollwertsignals und dem Erreichen des Geschwindigkeitssollwerts für Geschwindigkeiten größer null. Diese betrug für eine Geschwindigkeitsdifferenz von mehr als 20 cm/s mehrere Sekunden beim Beschleunigen und Abbremsen. Dies musste bei der Implementierung der Software zur Regelung der Laufbandgeschwindigkeit und der Versuchsplanung berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 3.2.2). Aufgrund eines Defekts an einem OPV, wurde die Schaltung von Dr. Thiele umgebaut und wird seitdem in ihrer jetzigen Konfiguration verwendet. Die Laufbandantwort auf Geschwindigkeitsbefehle hat sich merklich verbessert und deutliche Verzögerungen treten nur noch bei Beschleunigungen aus dem Stand auf Geschwindigkeiten kleiner 8 cm/s auf. Hierbei kann der Laufbandmotor mit der initialen PWM nicht die Massenträgheit des Laufbands überwinden. Das durch den optischen Encoder rückgekoppelte TDC erhöht die Pulsweite und lässt das Laufband dadurch kurz auf eine höhere Geschwindigkeit als den Sollwert beschleunigen, bevor es auf die befohlene Geschwindigkeit runtergeregelt wird.

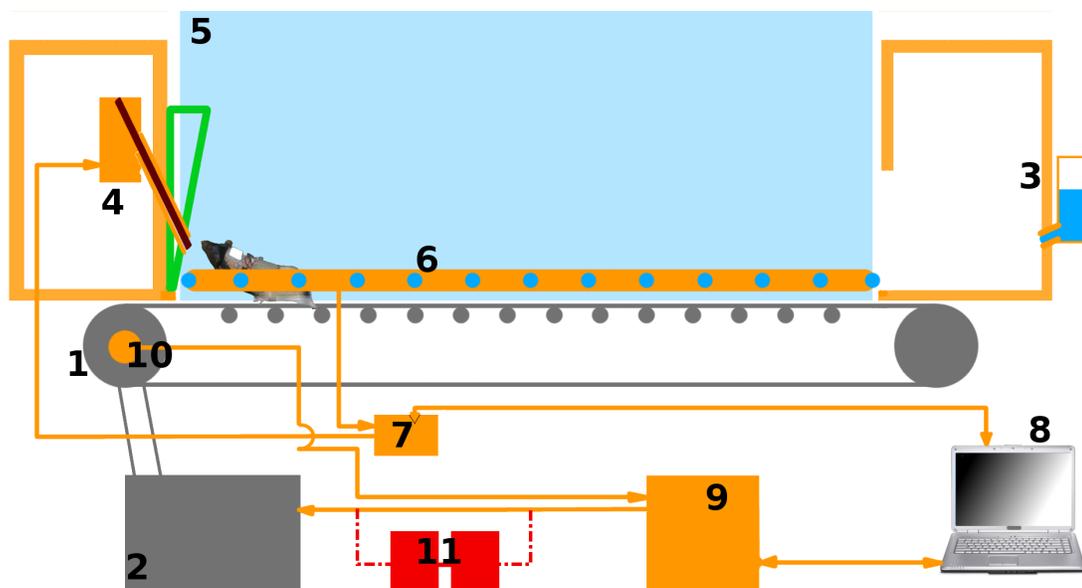


Abbildung 3.5: Aufbau der Laufband-Versuchsumgebung. Das rudimentäre Grundgrüst (grau) besteht aus Laufband (1) und Motor (2). Die Komponenten der Erweiterung durch Dr. Johannes Thiele (orange) sind die Aufenthaltskiste mit Wasserspender (3), der Futterautomat (4), die Plexiglasbegrenzung (5), die Lichtschranken (6), die Kontrollplatine (7), die 4 und 6 steuert und mit dem Steuer-Rechner (8) verbindet, sowie das TCD (9) zur Regelung von 2 unter Nutzung des Optischen Encoders (10). Der Aufbau verfügte in der alten Konfiguration (rot) über zwei OPVs (11).

Weitere Modifikationen wurden während des Verlaufs der Diplomarbeit an der Aufenthaltskiste und der F.-Halterung vorgenommen. So wurden die Holzkanten der Aufenthaltskiste mit Aluminimblenden abgedeckt, um sicherzugehen, dass die Ratten durch das Annagen keine Holzpartikel inhalieren können. Zu diesem Zeitpunkt war bereits ein Versuchstier aufgrund einer Pneumonie eingeschläfert worden, ein weiteres erkrankt. Zusätzlich wurde der Bereich unter dem Wasserspender mit Aluminiumblech versehen, um ein Verschimmeln des Holzbodens zu verhindern. Die Veränderung an der Befestigung des Futterspenders wurde aus Gründen der Verbesserung des Versuchsverlaufs vorgenommen. Bei der ursprünglichen Befestigung (Abb. 3.6.1) begannen die Ratten sich mit den Vorderhänden am Holzvorsprung festzukrallen und behielten ihre Position nahe des Futterspenders halb durch Ziehen, halb durch Laufen mit den Hinterbeinen bei. Dies geschah ab relativ hohen Geschwindigkeiten, sodass eine glatte Schräge eingebaut wurde, die dies verhindern sollte (Abb. 3.6.2). Die Versuchstiere konnten sich nun bei hohen Geschwindigkeiten nicht mehr festkrallen. Sobald die Geschwindigkeit jedoch einen bestimmten Schwellwert unterschritt, der es ihnen erlaubte mit den Hinterbeinen über längere Zeit schneller als das Laufband zu laufen, stützten sie sich mit den Vorderpfoten auf der Schräge ab. So wurde eine Befestigung mit Überhang montiert (Abb. 3.6.3), die gewährleistet, dass die Tiere bis zum Stillstand des Laufbands vollständige Laufbewegungen ausführen.

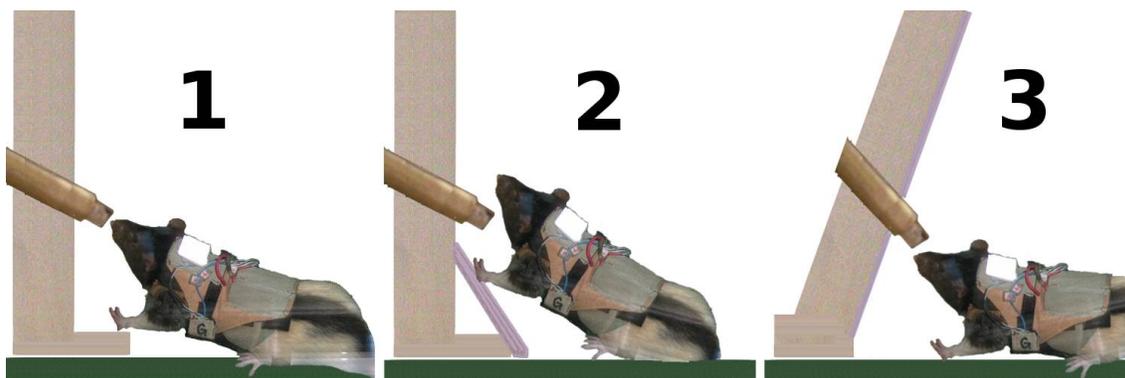


Abbildung 3.6: Befestigung des Futterspenders. 1: Ursprüngliche Befestigung, 2: Befestigung mit Schräge, 3: Befestigung mit Überhang

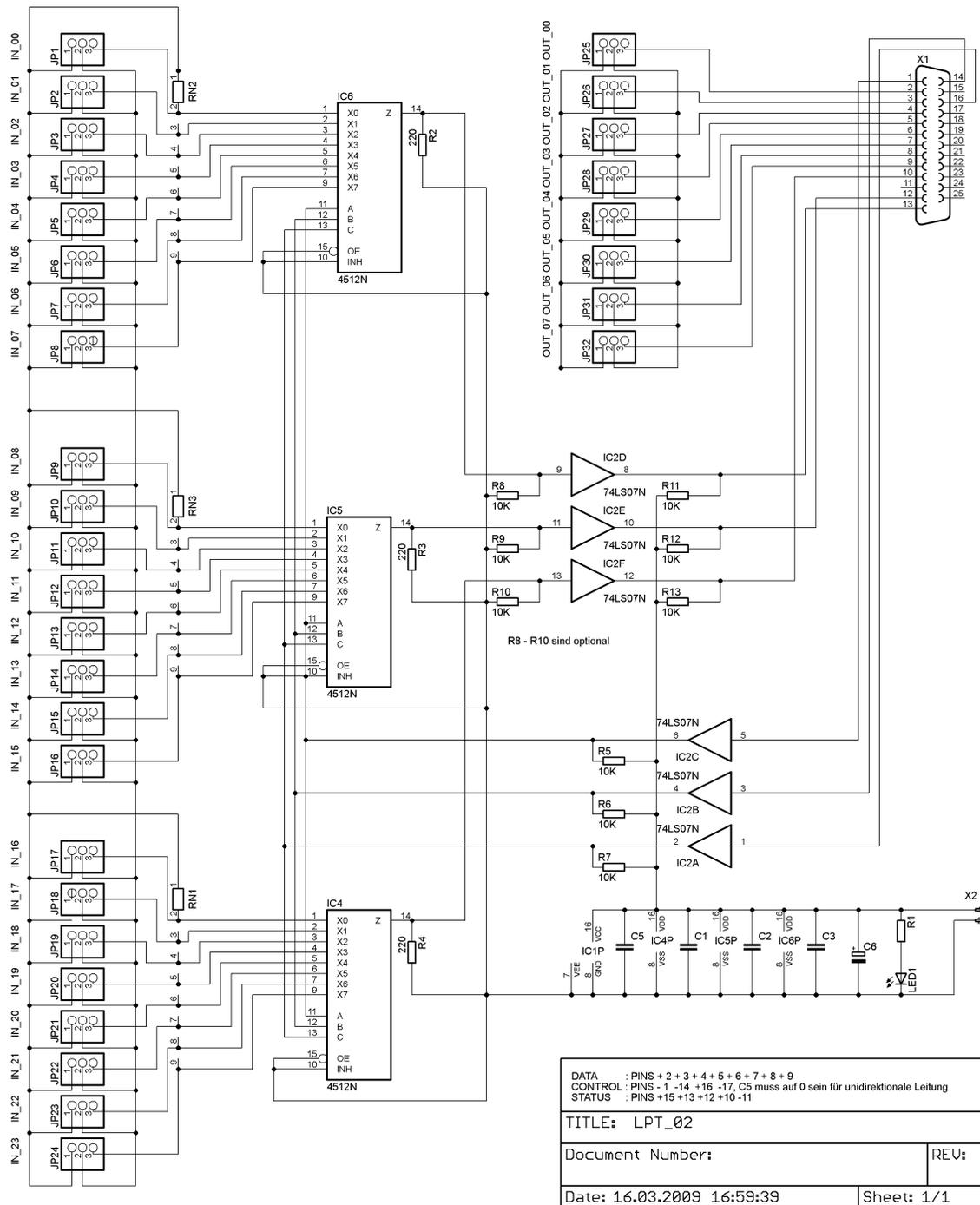


Abbildung 3.7: Schaltbild der Kontrollplatine zur Steuerung des Futterspenders und Weiterleitung der Lichtschrankenereignisse (von Dr. Johannes Thiele).

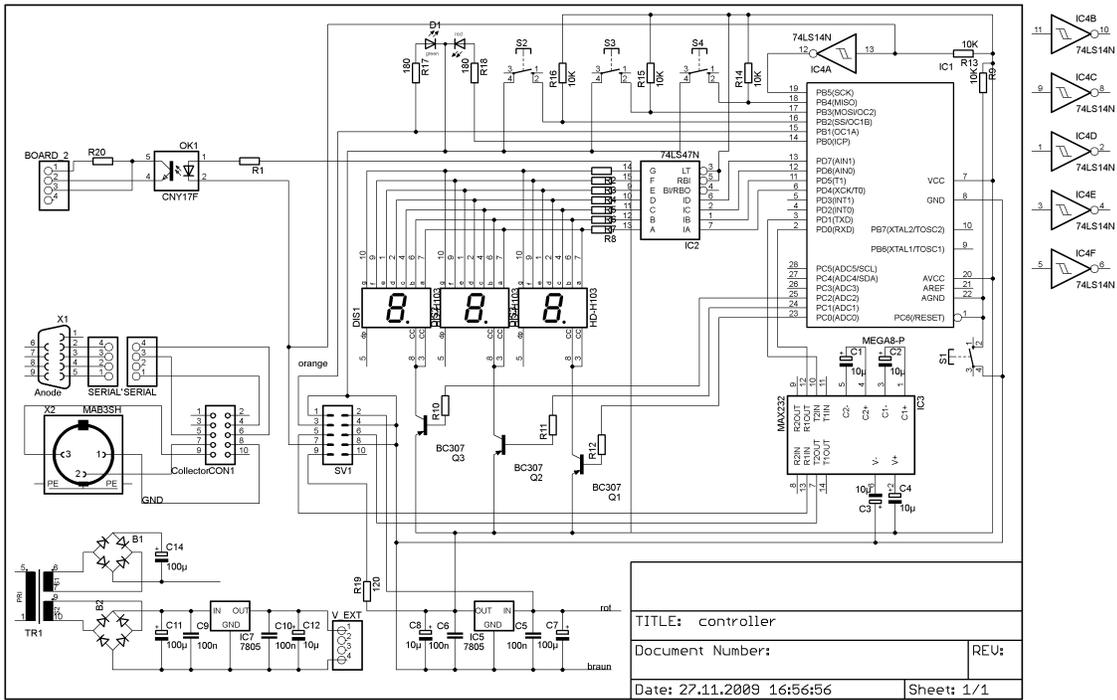


Abbildung 3.8: Controllerschaltbild des TDC zur Laufbandsteuerung (von Dr. Johannes Thiele).

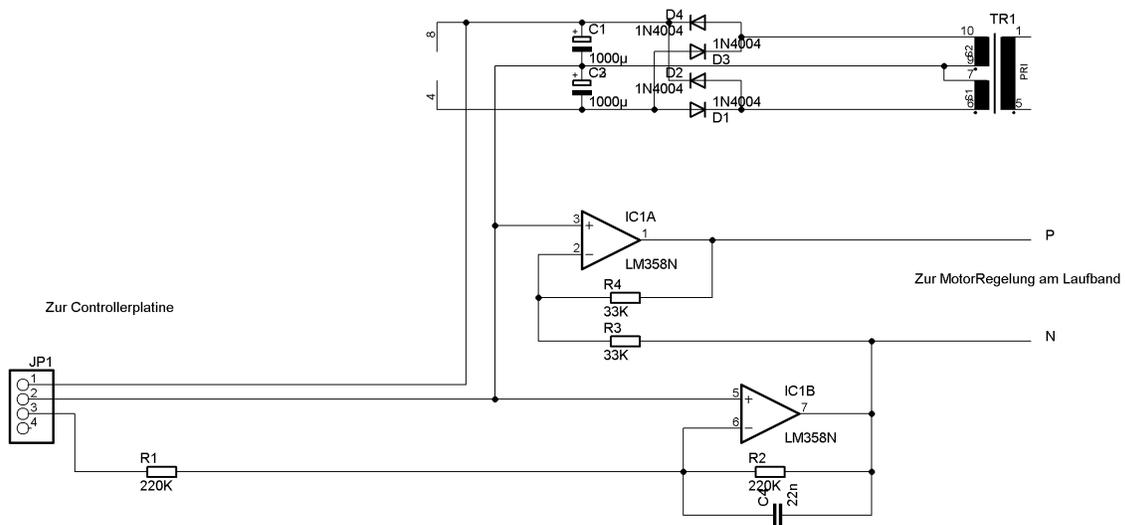


Abbildung 3.9: Wandlerschaltbild des TDC zur Laufbandsteuerung (von Dr. Johannes Thiele).

3.2.2 Versuchskonzept

Zum Sammeln von Laufdaten wird die Position des Versuchstiers auf dem Laufband durch die Lichtschranken verfolgt. Die Idee war zunächst, dass abhängig von der Position der Wanderratte die Laufbandgeschwindigkeit so geregelt werden sollte, dass das Versuchstier etwa mittig auf dem Laufband läuft und sich nur langsam dem Futterautomaten nähert. Dies hätte eine schnelle Anpassung der Laufbandgeschwindigkeit an die Bewegung des Tieres erfordert. Die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Verzögerung der Laufbandantwort in der alten Konfiguration führte dazu, den Versuchsablauf zu überdenken. Während die Ratte in Richtung Futterspender läuft, beschleunigt nun das Laufband bis zu einem bestimmten Wert, sodass das Tier vor dem Futterspender eine gewisse Zeit lang in einem stabilen Zustand läuft. Anschließend wird das Laufband bis zum Stillstand abgebremst und der Futterspender fährt zur Belohnung Futterpellets aus. Nach 12-15 Sekunden wird der Futterspender eingefahren und die Ratte muss zurück in die Aufenthaltsbox, um das System zurückzusetzen.

3.2.3 Implementierung der Versuchssteuerung

Das Programm zur Steuerung der Laufbandumgebung ist modular aufgebaut. Es besteht aus mehreren einzeln kompilierten C-Programmen, die innerhalb eines Python-Skripts ausgeführt werden. Dazu werden die C-Programme als sogenannte *Tasks* durch das *Rat-control*-Modul (Python Glue Code) in eine Subprozessliste eingetragen. Diese Subprozesse werden gleichzeitig und unabhängig voneinander ausgeführt. Durch die Zuordnung unterschiedlicher Präfixe wird es den C-Programmen außerdem ermöglicht, über die Standardeingabe (`stdin`), -ausgabe (`stdout`) und Standardfehlerausgabe (`stderr`) miteinander zu kommunizieren. Liest ein Programm ein ihm zugeordnetes Präfix, so wird es aktiv und verarbeitet Präfix und die eventuell dahinterstehende Information. Das Python-Skript bietet demnach sowohl Multithreading, als auch eine Kommunikationsstruktur und ermöglicht auch den Nicht-Informatikern des Ratpack-Projekts das Einbinden von C-Modulen auf einfache Art und Weise. Die Nutzung der Programmiersprache C zur Programmierung der einzelnen Module ergibt sich aus der Möglichkeit Hardware schnell und effizient anzusprechen. Die C-Module innerhalb der Kommunikationsstruktur sind gekapselt und jeweils für eine bestimmte Aufgabe zuständig. Zu Beginn dieser Diplomarbeit waren bereits zwei Module innerhalb dieser Struktur implementiert und wurden teilweise modifiziert und durch weitere Module ergänzt. Abbildung 3.10 zeigt das ursprüngliche, das modifizierte und die ergänzten Module, ihre Verbindung zur Hardware und ihre Kommunikation über `stdin/stdout` mithilfe der Präfixe. Mögliche Präfixe und Folgeinformationen sind:

- **feeder.show/.hide** : Präfixe zur Ansteuerung des Futterspenders (ausfahren/einfahren)
- **barrs.edge.X.Y** : Präfix signalisiert Lichtschrankenereignis und wird von der Information *X* zur Art der Taktflanke (R = ansteigende T. , F = abfallende T.) und der Information *Y* zur Identität der Lichtschranke (0-12) vervollständigt
- **v_set X** : Präfix signalisiert zu setzenden Sollwert (*X*) für die Laufbandgeschwindigkeit.
- **v_read X** : Präfix für die ausgelesene Laufbandgeschwindigkeit *X*.
- **starttime: X** : Präfix gefolgt von der Startzeit *X* zur Synchronisation zwischen einzelnen Programmen

3.2.4 Lichtschranken und Futterspender

Das Modul **pport** wird durch die Objekte *inits*, *LPT_IO_2*, *parallel2* und *feeds* gebildet. *inits* wird als ausführbare Datei kompiliert und als Task registriert. Wird der Task gestartet, so beansprucht *inits* unter Verwendung von *parallel2* Zugriff auf die parallele Schnittstelle. Es lässt *LPT_IO_2* auf Lichtschrankenereignisse hören und sobald diese erfasst werden unter Verwendung des Präfixes *barrs.edge* auf die Konsole ausgeben. Von der Standardeingabe erwartet *inits* die Präfixe *feeder.show/hide*. Werden diese gelesen, so werden durch *feeds* die entsprechenden Signale zum Aus- bzw. Einfahren des Futterspenders auf die Schnittstelle geschrieben.

3.2.5 Steuerung des Laufbands

Die Steuerung des Laufbands wird durch das Modul **sPort** geregelt, welches durch die Objekte *tmControl*, *v_getter* und *seriell* gebildet wird. Die Programmdatei *tmControl* wird als Task registriert und verwendet bei Taskstart *seriell* zum Öffnen und Konfigurieren der seriellen Schnittstelle. *seriell* liefert außerdem Funktionen zum schreiben und lesen von und auf die serielle Schnittstelle. Durch das Lesen des Präfixes *v_set* wird *tmControl* erneut aktiv und schreibt den Geschwindigkeitswert auf die Schnittstelle. *v_getter* liest durchgehend 8-Bit Werte von der seriellen Schnittstelle, fügt diese zu sinnvollen Geschwindigkeitswerten zusammen und gibt diese zusammen mit dem Präfix *v_read* auf der Standardausgabe aus.

Das Laufband kann außerdem außerhalb der automatisierten Steuerung durch die Verwendung eines Terminal-Programms wie *GTKTerm* (Linux) oder wie *HyperTerminal* (unter Windows) geregelt werden. Zunächst wird dazu die Verbindung zur seriellen Schnitt-

stelle hergestellt und mit den gleichen Parametern wie in *seriell* konfiguriert (Baudrate: 9600, Paritätsbit: keine, Stoppbits: 1). Nun lassen sich Steuerkommandos über die serielle Schnittstelle an das TDC senden, die von einem Programm (*pwm_steuerung* von Martin Zeiss) auf dem ATmega8 interpretiert werden. Vor allem während Versuchsphase 2 (siehe Abschnitt 3.3) fand die Steuerung via GTKTerm Verwendung.

Zu beachten ist, dass die Geschwindigkeitswerte nicht in Zentimetern pro Sekunde vom TDC verarbeitet werden. Dies geschieht aufgrund der Verwendung eines Umrechnungsfaktors innerhalb von *pwm_steuerung*, um die realen Geschwindigkeitswerte von ca. 0 – 100 cm/s auf einen größeren ganzzahligen Bereich abzubilden. Die Größe dieses Abbildungsintervalls änderte sich bei der Neukonfiguration der Steuerelektronik von [0,200] auf [0,400]. Im Nachhinein wurde bei der Auswertung der Daten dieser TDC-Geschwindigkeitswert korrigiert (siehe Abschnitt. 3.4.5).

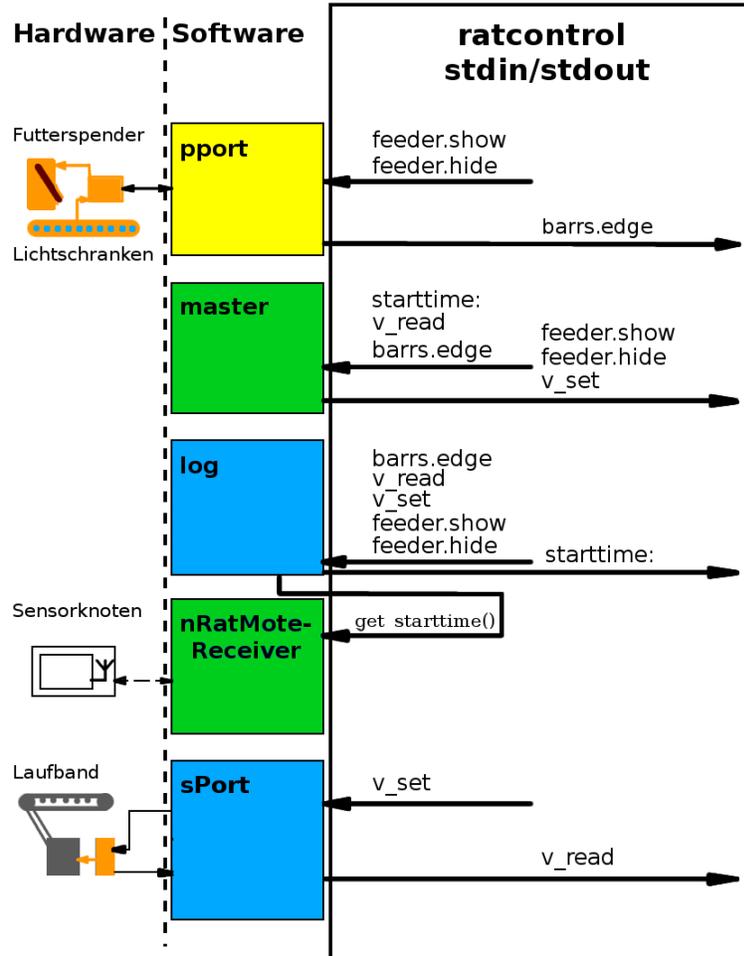


Abbildung 3.10: Kommunikationsstruktur der Versuchssteuerung. Eingezeichnet sind die ursprünglichen (gelb), modifizierten (grün) und hinzugefügten (blau) Module, sowie die entsprechenden Kommunikationswege zu den Hardwarekomponenten (links) und die Kommunikation über stdin/stdout (rechts) mittels der Präfixe untereinander.

3.2.6 Positionsbestimmung der Ratte und Regelung der Laufbandgeschwindigkeit

Das Modul, welches bestimmt wann der Futterspender ausgefahren und welche Geschwindigkeit das Laufband haben soll, ist das Modul **master**. Es besteht aus der Programmdatei *control*, die die Präfixe *barrs.edge*, *v_read* und *starttime* von der Standardeingabe einliest, deren Folgeinformation zur Bestimmung notwendiger Aktionen verarbeitet und diese Aktion durch das Schreiben der Präfixe *feeder.show/hide* und *v_set* auf die Standardausgabe anfordert. Die Aktionen werden entsprechend dem Versuchskonzept aus Abschnitt 3.2.2 bestimmt. Dazu wird aus den gelesenen Lichtschrankenereignissen

zunächst die Position des Versuchstiers bestimmt.

Positionsbestimmung und Laufrichtung Während der Fortbewegung auf dem Laufband unterbricht die Ratte mehrere Lichtschranken auf einmal (s. Abbildung 3.11). Abhängig von der Tätigkeit des Versuchstiers auf dem Laufband, entstehen dabei unterschiedliche Unterbrechungsmuster:

- Laufen: 2 – 4 Lichtschranken werden unterbrochen. Bei kontinuierlicher Vorwärtsbewegung werden die Lichtschranken in der Sequenz 2,3,2,... vom ca. 24 cm langen Körper des Versuchstieres unterbrochen. Eine vierte Lichtschranke kann durch die Bewegung des Schwanzes ausgelöst werden, wobei diese in 21,8 % der Fälle durch eine nicht-aktivierte Lichtschranke von den 2 – 3 zusammenhängenden Lichtschranken getrennt ist⁴.
- Kauern (Fressen/Schnuppern): 1 – 2 zusammenhängende Lichtschranken werden unterbrochen. Der Schwanz liegt flach auf dem Boden auf.
- Laufrichtung ändern: wie Kauern.
- Aufrichten: 0 – 1 Lichtschranken werden unterbrochen. Der Schwanz stützt die Ratte zusätzlich und liegt flach am Boden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Bewegungsrichtung zunächst unbekannt ist, kann nicht einfach die Lichtschranke am nächsten zum Futterspender oder zur Aufenthaltsbox als Position angenommen werden. Nimmt man für die Position einfach die Mitte der unterbrochenen Lichtschranken an, führt das Unterbrechungsmuster bei der Schwanzaktivierung von Lichtschranken zu einem Fehler in der Positionsbestimmung, der gerade bei der Antwortverzögerung der alten Laufbandkonfiguration zu gefährlichen Laufbandreaktionen für die Ratte führte. Daher wurde der sogenannte *contig-value* eingeführt:

$$\text{contig_value}_t = 2 \cdot \frac{\sum X_t}{|X_t|}, \text{ mit}$$

$$X_t = \{x_{LB_i} \mid x_{LB_i} = i, \text{ for } LB_i = \left\{ \begin{array}{l} LB_i \text{ aktiviert} \wedge (LB_{i+1} \vee LB_{i-1}) \text{ aktiviert} \\ \text{oder} \\ LB_i \text{ aktiviert} \wedge LB_j \text{ nicht aktiviert}, \forall j \neq i \end{array} \right\}$$

Der *contig_value* ist der mit dem Faktor 2 multiplizierte Mittelwert aus den LB-Bezeichnern (hier 1-13) der ununterbrochen aufeinanderfolgenden Lichtschranken. Der

⁴Dieser Wert wurde durch Anwendung der Funktion `forth_LB_test.m` auf alle erstellten Versuchsstatistiken ermittelt (siehe Kapitel 3.4.3)

Faktor 2 wurde lediglich gewählt, um den `contig_value` als Ganzzahl zu erhalten. Der `contig_value` liefert eine Positionsbeschreibung, die für die Laufbandsteuerung genau genug ist. Sollte der seltene Fall eintreten, dass 2 LBs aktiviert, aber durch eine nicht-aktivierte LB getrennt sind, wird der `contig_value` aus derjenigen LB berechnet, der in Laufrichtung liegt. Die Laufrichtung kann entweder bei der Berechnung des `contig_value`s aus der Schwanzaktivierung der Lichtschranken gewonnen werden, oder wird unter der Berücksichtigung der vorhergehenden Bewegungsrichtung aus der Differenz des alten und neuen `contig_value`s berechnet.

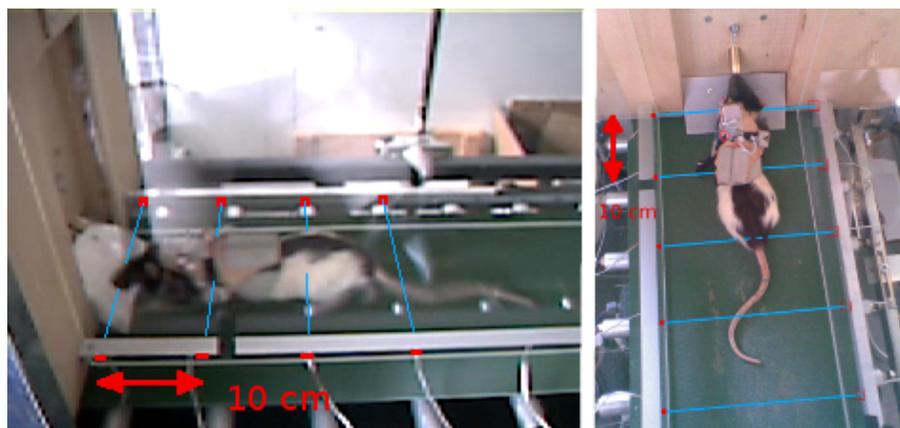


Abbildung 3.11: Die Ratte unterbricht beim Entlanglaufen des Laufbands eine unterschiedliche Anzahl an Lichtschranken.

Geschwindigkeitsregelung Bewegt sich die Ratte Richtung Futterspender, wird das Laufband unter Verwendung von `v_set` beschleunigt, bewegt sie sich Richtung Aufenthaltskiste, wird es abgebremst. Unter einem bestimmten `contig`-Schwellwert, der abhängig von der Maximalgeschwindigkeit `MAX_V` des Versuchs (z.B. `contig_value < 8` bei maximal 40 cm/s) ist, wird die Geschwindigkeit auf 0 gesetzt. Dies geschieht, damit sich die Ratte nicht an der Schwelle der Aufenthaltskiste verletzt. Beim Erreichen einer Zielzone vor dem Futterspender (`contig_value > 18`) wird die Geschwindigkeit auf `MAX_V` - abzüglich eines Zufallswertes - gesetzt. Sobald der Folgewert von `v_read` diesem Wert entspricht, wird ein Zähler gestartet, der ebenfalls einen Zufalls-Faktor enthält. Nach Ablauf des Zählers, wird die Geschwindigkeit langsam bis zum Stillstand heruntergeregelt und der Befehl zum Ausfahren des F. gegeben (`feeder.show`). Nach Ablauf der festgesetzten Futterzeit wird der Futterspender wieder eingefahren (`feeder.hide`). Wenn die Ratte vor dem Ablauf des Zählers, während des Abbremsvorgangs oder vor Ablauf der Futterzeit die Zielzone verlässt, muss sie zurück in die Aufenthaltskiste laufen, um das System zurückzusetzen. Sollte die Ratte zurücklaufen bevor die randomisierte Maximalgeschwindigkeit erreicht wurde, kann sie ohne Zurücksetzen des Systems erneut in die Zielzone laufen. Dies kann geschehen, wenn die Ratte ermüdet und durch Pausieren aus der Zielzone gefahren wird.

3.2.7 Aufzeichnung der Laufband- und Sensordaten

Zwei Module sind für die Aufzeichnung der Laufdaten zuständig. Das Modul **log** protokolliert die laufbandspezifischen Daten, das Modul **nRatMoteReceiver**, das mit dem Sensorknoten kommuniziert, zeichnet die übertragenen Sensordaten auf.

Aufzeichnung der Laufbanddaten

Das Modul **log** besteht aus der gleichnamigen Programmdatei, die als Task eingebunden wird. *log* legt die Startzeit zur Synchronisierung aller Ereignisse und Daten fest und schreibt sie unter Verwendung des Präfixes *starttime* auf die Standardausgabe. Als Ereignisse werden alle auf die Standardausgabe geschriebenen Präfixe und zugehörigen Folgeinformationen bezeichnet. Ereignisse werden von *log* hardware-spezifisch betrachtet. Sie bezeichnen die Aktivierung/Deaktivierung von Lichtschranken, das Aus-/Einfahren des Futterspenders und das Senden/Empfangen von Geschwindigkeiten für das Laufband. *log* legt bei Start des Tasks eine Protokolldatei mit dem Namen "rlogdXXYYZZhAABB.txt" an. Dabei wird durch die XXYYZZ-Sequenz im Namen das Datum festgehalten (XX=Tag, YY=Monat, ZZ=Jahr) und durch AABB die Startzeit des Versuchs (AA=Stunden, BB=Minuten). *log* liest alle Ereignisse von der Standardeingabe und zeichnet sie auf folgende Weise auf:

- *Zeit*: Zeitpunkt des hardware-spezifischen Ereignisses.
 - Lichtschranken: Zeitpunkt der Aktivierung
 - Futterspender: Zeitpunkt des Ausfahrens
 - Laufband: Zeitpunkt des Sendens/Empfangens von GeschwindigkeitswertenDer Wert wird als zeitliche Differenz zwischen Ereignis und Startzeit in Millisekunden angegeben.
- *I/O - Status*: gibt an, ob das Ereignis eine Signalübertragung vom PC zum Laufband oder vom Laufband zum PC darstellt

0 : *Laufband* → *PC*
1 : *PC* → *Laufband*

- *Ereignis-Bezeichner*: numerischer Bezeichner für die am Ereignis beteiligte Hardware-Komponente

0 – 12 : *Lichtschranke*
20 : *Futterspender*
30 : *Laufband*

- Wert:
 - Lichtschranken: Zeitdauer bis zur Deaktivierung in Millisekunden
 - Futterspender: Zeitdauer bis zum Einfahren in Millisekunden
 - Laufband: Geschwindigkeitswert in TDC-Geschwindigkeitseinheiten. Sollwert bei I/O-Status = 1, Istwert bei I/O-Status = 0.

Zeit, I/O-Status, Ereignis-Bezeichner und Wert werden bei abgeschlossenem Hardware-Ereignis mit dem Befehl *fflush()* als String in die Protokolldatei geschrieben. Während der Entwicklung der Steuerungssoftware wurden Laufbanddaten auch durch andere Programmdateien protokolliert. Da dies vor allem zu *Debugging*-Zwecken geschah, enthielten diese Dateien viel Redundanz, um dem Entwickler (**mir**) für jeden Zeitpunkt eine Übersicht über verschiedene Zustände des Systems zu geben. Die Protokolldateien lieferten aber in einem frühen Entwicklungsstadium schon auswertbare Daten:

- rawfileXXYYZZ_CC.txt: Protokollierung der Lichtschrankenereignisse durch Zeitpunkt, Lichtschranken-ID, Taktflanke. Zusätzliche Protokollierung des Zeitpunkts des Verlassens der Box, des Zeitpunkts des Erreichens des Futterspenders und des Zeitpunkts der Rückkehr zur Box.
- logfileXXYYZZ_CC.txt: Protokollierung abgeschlossener Lichtschrankenereignisse mit Startzeitpunkt, Lichtschranken-ID, Endzeit und Dauer
- tm_logfileXXYYZZ_CC.txt: Protokollierung von Zeitpunkt, der Lichtschranken-ID und Taktflanke, dem letzten gesetzten Geschwindigkeit-Sollwert, dem aktuellen Geschwindigkeits-Istwert, dem bestimmten *contig_value* und der Laufrichtung

Die Sequenz XXYYZZ_CC im Dateinamen gibt das Datum (XX=Tag, YY=Monat, ZZ=Jahr) und die Nummer des Versuchs (CC) an diesem Tag an. In der jetzigen Implementierung werden diese Protokolldateien nicht mehr erstellt, die bereits erstellten Dateien liegen aber für die Auswertung vor.

Aufzeichnung der Sensordaten

Das Modul **nRatMoteReceiver** nutzt, anders als die anderen Module, nicht die Kommunikationsstruktur des Python-Programms *ratcontrol*. Die Programmdatei wird lediglich als Task eingebunden um bei der Ausführung des Python-Skripts parallel zu den anderen Modulen als Subprozess gestartet zu werden. Zur Synchronisation der Daten holt

sich *nRatMoteReceiver* die Startzeit von *log* über die Funktion *get_starttime()*. Anschließend meldet sich *nRatMoteReceiver*, wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, als Client beim *nRoute*-Server an, um die Daten vom Sensorknoten empfangen zu können. Der Routing-Dienst *nRouted*, der diesen Server erstellt, muss zuvor separat gestartet werden. *nRatMoteReceiver* versieht die eingehenden Sensordaten mit einem Zeitstempel und speichert die Daten in der Datei "ratleg.txt" als String in folgender Reihenfolge:

- Zeitstempel
- Accelerometer: X-Achse, Z-Achse, Y-Achse
- Gyroskop: X-Achse, Y-Achse
- Kompass: Azimuth-Winkel
- Versorgungsspannung: vcc und vcc-real
- Datenpaket-ID

Datumsbezeichner werden manuell hinzugefügt und entsprechen in ihrer Form der jeweilig parallel geschriebenen Protokolldatei der Laufbanddaten.

3.3 Versuchstiere und Experimentalphasen

Die Versuche wurden mit 6 verschiedenen Versuchstieren durchgeführt, die im Folgenden mit den Bezeichnungen R3, R6, R689, R690, R691, und R699 referenziert werden. Bei allen handelte es sich um männliche Tiere des *Rattus norvegicus*-Stamms *Long Evans*. Innerhalb des Versuchszeitraums (18.03.2009 bis 08.12.2009) wurden die Tiere unterschiedlich eingesetzt, da sie während der Konditionierungsphase unterschiedliche Eignungen für die geplanten Versuchsaufgaben aufwiesen. Zusätzlich wurden parallel Veränderungen an Software und Aufbau der Versuchsumgebung vorgenommen, sodass sich der Versuchszeitraum in vier Phasen unterteilen lässt:

- *Experimentalphase P1, 18.03.09 bis 01.04.09*: Konditionierung der Tiere R689, R690, R691, und R699 auf unbewegtem Laufband, aber aktivem Futterspender. Die Ratten sollten lernen, den Futterspender als Nahrungsquelle zu nutzen und den nach einiger Zeit inaktivierten Futterspender durch zurücklaufen in die Aufenthaltsbox zu reaktivieren. Anschließend wurden sie an das Tragen der Weste gewöhnt. Zu diesem Zeitpunkt waren die Tiere zwischen 19 und 20 Monate alt.

- *Experimentalphase P2, 13.05.09. bis 10.06.09:* Die Ratten R689, R690, R691, und R699 wurden an ein sich bewegendes Laufband gewöhnt, das mit einer Geschwindigkeit von 3 – 5 cm/sek lief. Es wurden Messungen mit dem Sensorknoten bei konstanter Laufbandgeschwindigkeit gemacht. Die Laufbanddaten wurden in den Protokolldateien der Formate rawfileXXYYZZ_CC.txt und logfileXXYYZZ_CC.txt gespeichert, die Sensordaten in der Datei ratlegXXYYZZ_CC.txt.
- *Experimentalphase P3, 17.07.09 bis 26.08.09:* Die Ratten R691 und R699 wurden aufgrund schlechter Laufleistung zunächst nicht weiter verwendet. R689 und R690 wurden mit Sensorknoten weiterhin zur Protokollierung der Laufdaten eingesetzt. Die Geschwindigkeit des Laufbands wurde mittlerweile abhängig von der Rattenposition durch den Steuer-PC geregelt und wurde sobald die Versuchstiere den Futterspender erreichten für eine bestimmte Dauer auf der eingestellten Maximalgeschwindigkeit gehalten. Die Maximalgeschwindigkeit betrug zwischen 25 und 35 cm/sek. Dieser Versuchsabschnitt wurde durch einen irreparablen Defekt in der Steuerelektronik (bzw. einem OVP) beendet. Die Laufbanddaten wurden in den Protokolldateien der Formate rawfileXXYYZZ_CC.txt, logfileXXYYZZ_CC.txt und tm_logfileXXYYZZ_CC.txt gespeichert, die Sensordaten in der Datei ratlegXXYYZZ_CC.txt.
- *Experimentalphase P4, 26.10.09 bis 08.12.09:* Nach dem Umbau der Laufbandsteuerung wurden die Versuche mit den Tieren R689 und R690 fortgeführt. Während dieser Phase erkrankte R690 und musste eingeschläfert werden. R691 und R699 waren ebenfalls erkrankt oder verstorben. R3 und R6 wurden als Ersatztiere ausgewählt und nach einer kurzen Gewöhnungs- und Konditionierungsphase für Versuche eingesetzt. R3 und R6 waren zu Beginn dieser Versuchsphase 22 Monate, R689 bereits 28 Monate alt. Die Laufbanddaten wurden in der Protokolldatei des Formats rlogdXXYYZZhAABB.txt, die Sensordaten in der Datei ratlegdXXYYZZhAABB.txt gespeichert.

Ein detailliertes Versuchsprotokoll liegt als Open Office Tabellendokument vor, und ist unter anderem im Projektverzeichnis des vom Ratpack-Projekt verwendeten Versionskontrollsystem zu finden.

3.4 Auswertungsroutinen

Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt in MATLAB[®]. Sowohl für die älteren Daten aus den Experimentalphasen 2 und 3, als auch für die neueren Daten aus Experimentalphase 4 sind im Laufe dieser Diplomarbeit Auswertungsroutinen entwickelt worden. Die meisten Auswertungsroutinen für rlogd*Bezeichner*.txt- und ratlegd*Bezeichner*.txt-Dateien

wurden aus denen zur Auswertung der älteren Protokolldateien weiterentwickelt und sind an dem Namenssuffix “_v2“ und/oder dem Substring “_new_“ zu erkennen. Diese Auswertungsroutinen sind zu den älteren Dateien nicht kompatibel, da die v2-Funktionen zu Beginn der Auswertung das neue Datenformat erwarten. Durch eine Verbesserung von Laufzeit und Speicherplatzbedarf, erfolgt die Datenweiterleitung anders als bei den älteren Auswertungsfunktionen. Daher sind ältere Auswertungsroutinen, die in späteren Auswertungsphasen Verwendung finden auch nicht kompatibel zu aufbereiteten v2-Daten oder zu v2-Funktionen. In den folgenden Abschnitten werden die Verarbeitungsschritte anhand der v2-Funktionen erläutert. Die Verarbeitung älterer Daten unterscheidet sich zwar im Detail, ist aber prinzipiell gleich geblieben. Durch die Eingabe von “help Funktionsname“ in der MATLAB[®]-Umgebung lässt sich die Hilfe der jeweiligen Routine aufrufen, in der die Verwendung, Parameter und Ausgabe detailliert beschrieben sind. Sämtliche Versuchsdaten und Auswertungsroutinen werden innerhalb eines Subversion-Versionskontrollsystems verwaltet.

3.4.1 Aufbereitung der Sensor- und Laufbanddaten

Vor der eigentlichen Auswertung der Daten des Laufbands und des Sensorknotens, werden diese zunächst aufbereitet. Dazu wird die Funktion *merge_new_logs_v2(file_id)* aufgerufen, die den Bezeichner der Protokolldatei (dXXYYZZhAABB) als Parameter übergeben bekommt. Sie verwendet die Funktionen *get_new_logfile(rlog_name)* und *read_ratleg(ratleg_name)* zum Einlesen von Laufband- und Sensordaten. *get_new_logfile()* liest die entsprechende *rlogBezeichner.txt*-Protokolldatei als Matrix ein und teilt diese nach Hardware-Ereignis und zeitlich geordnet in 4 Matrizen ein:

- *lb_data*: $N \times 3$ – Matrix, in deren Spalten die Werte für Zeitpunkt, LB-Bezeichner und LB-Ereignis stehen
- *v_set_data*: $M \times 2$ – Matrix, in deren Spalten die Werte für Zeitpunkt und Soll-Geschwindigkeit stehen
- *v_get_data*: $K \times 2$ – Matrix, in deren Spalten die Werte für Zeitpunkt und Ist-Geschwindigkeit stehen
- *feeder_data*: $L \times 2$ – Matrix, in deren Spalten die Werte für Zeitpunkt und Futterspender-Ereignis stehen

Die Matrizen, im Folgenden als TM-Matrizen referenziert, werden in einem Konstrukt namens *new_logdata* auf dem MATLAB[®]-Workspace zwischengespeichert. *read_ratleg()* liest die dazugehörige *ratlegBezeichner.txt*-Datei als Matrix ein und teilt deren Spalten in

$N \times 1$ Vektoren, die dem Format entsprechend *time*, *a_x*, *a_z*, *a_y*, *g_x*, *g_y*, *winkel_x*, *vcc*, *vcc_real* und *packet_id* genannt werden (vgl. Abschnitt 3.2.7). Die Vektoren, im Folgenden RL-Vektoren genannt, werden in einem Konstrukt zusammengefasst und direkt an *merge_new_logs_v2()* übergeben.

Zur Filterung prägnanter Daten werden die Versuchsdaten in Läufe unterteilt. Als Lauf wird ein Zeitabschnitt bezeichnet, in dem die Ratte die Aufenthaltskiste verlässt und sich auf dem Laufband bewegt, bevor sie wieder in die Aufenthaltskiste zurückkehrt. Da nur Daten während dieser Zeitabschnitte für die Auswertung interessant sind, werden die Daten außerhalb der Läufe verworfen. Dadurch entfällt ein großer Teil an unnötigen Sensorknoten-Daten, die auch während der Pausen zwischen den Läufen protokolliert werden. Diese Pausen beanspruchen unter Umständen einen Großteil der Versuchszeit (vgl. Abb. 3.12). Da während eines zweieinhalbstündigen Versuchs ca. 30 MB an Sensordaten protokolliert werden ist diese Maßnahme auch in Hinblick auf den Speicherbedarf sinnvoll.

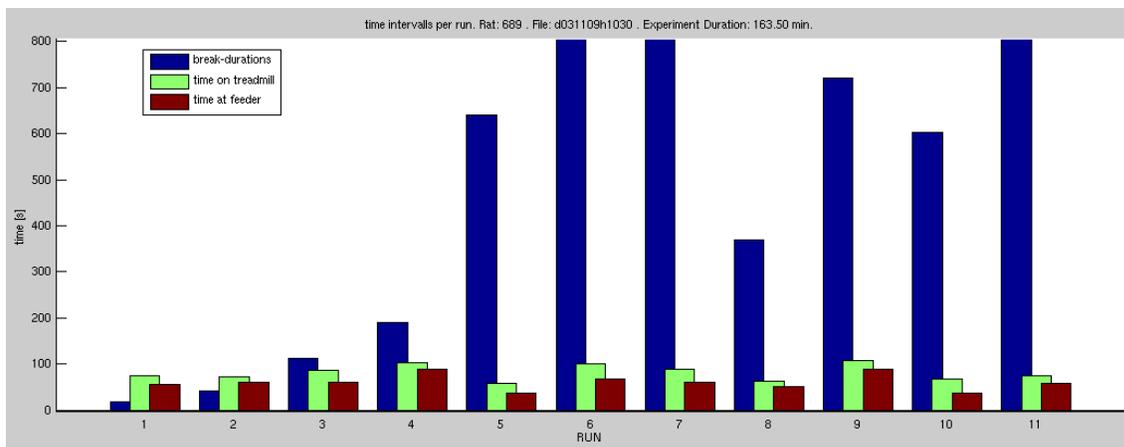


Abbildung 3.12: Aufteilung der Aufenthaltszeiten. Während dieses Versuches hat das Versuchstier nur ca. 20 von 164 Minuten auf dem Laufband verbracht, davon die größte Zeit am Futterspender. Die Abbildung wurde mit der in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Funktion erstellt.

Ein Lauf wird ab der Aktivierung der ersten Lichtschranke (LB-1) protokolliert, die nach dem Ende des letzten Laufs stattfindet. Ein Lauf wird als beendet gewertet, sobald keine Lichtschranken mehr aktiviert sind, vorausgesetzt, dass die zuletzt aktivierte Lichtschranke LB-1 gewesen ist. Damit wird ausgeschlossen, dass ein Lauf als beendet gilt, wenn sich die Ratte zwischen 2 LBs aufrichtet. Für jeden Lauf werden diejenigen Laufband- und Sensordaten, die innerhalb des betreffenden Zeitintervalls liegen, in TM-Matrizen und RL-Vektoren gespeichert, die das gleiche Format wie oben beschrieben besitzen. TM-Matrizen werden im Konstrukt *new_logdata* und RL-Vektoren im Konstrukt *ratleg_data* dem Konstrukt *merged_data* übergeben.

Zur Sichtbarmachung des Aktivierungsmusters der LBs, wird eine Matrix *lba_process* für jeden Lauf angelegt, die zeilenweise das Aktivierungsmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt enthält. Die Matrix enthält für die Lichtschranken LB-1 bis LB-13 in ihren Spalten 1-13 eine “1“ als Zeichen der Aktivierung und eine “0“ als Zeichen für nicht-aktive LBs. Spalte 14 enthält den jeweiligen Zeitwert. Die Matrix *lba_process* wird ebenfalls im Konstrukt *merged_data* gespeichert.

Das Konstrukt *merged_data* ist nun ein $1 \times N$ -Vektor, dessen Elemente jeweils aus *new_logdata*, *ratleg_data* und *lba_process* bestehen und dessen Länge N der Anzahl der Läufe entspricht. *merged_data* wird im MATLAB[®]-Workspace zwischengespeichert.

3.4.2 Berechnung von Pseudo-Schrittereignissen

Der nächste Schritt der Datenaufbereitung wird von der Funktion *compute_steps_v2()* übernommen. *compute_steps_v2()* benutzt die Algorithmen von Martin Zeiß zur Berechnung der Pseudo-Schritte aus den Gyroskop-Daten, und wendet sie auf *ratleg_data*-Daten jeden Laufs an. Pseudo-Schritte werden beim Auftreten von Minima bzw. Maxima der x-Achsen-Daten des Gyroskops nach bestimmte Regeln identifiziert (vgl. [ZT09]) und werden daher auch Maximal- bzw. Minimalschritte genannt. *compute_steps_v2()* schreibt das $1 \times N$ Konstrukt *step_events* in den MATLAB[®]-Workspace, das folgende Vektoren in jedem Element enthält:

- *g_x_c_f* ($1 \times N$): gefilterte Gyroskopdaten der X-Achse
- *gx_time* ($1 \times N$): den Gyroskopdaten zugehörige Zeitwerte in Sekunden
- *amp* ($1 \times M$): Amplituden der Pseudo-Schrittereignisse als Winkelgeschwindigkeiten in \hat{A}° pro Sekunde
- *t* ($1 \times M$): Indizes der Zeitpunkte der Pseudo-Schrittereignisse von *gx_time*
- *maximum* ($1 \times M$): Angabe, ob Maximum (1) oder Minimum (0) und somit Pseudo-Schritt rechts oder links
- *intervals* ($1 \times M$): Zeitintervalle zwischen Pseudo-Schritten

compute_steps_v2() besitzt eine Plot-Funktion zur graphischen Darstellung der X-Achsen-Gyroskopdaten und der Pseudo-Schrittereignisse.

3.4.3 Erstellung der Versuchsstatistik

Durch die Ausführung der Funktion *test_run_behaviour()* lässt sich für *merged_data* eine Versuchsstatistik erstellen, die bezeichnende Eckdaten enthält und die Rückschlüsse auf das Verhalten der Versuchstiere zulässt. Es lässt sich unter anderem dadurch bewerten, wie gut sich Tiere für die Versuche eignen und welchen Einfluss das Tragen der Sensorwesten auf sie hat. Weiterhin lässt sich ermitteln, ob und welchen Einfluss Veränderungen der Laufbandumgebung und -steuerung bzw. Veränderungen des Versuchsablaufs haben. Folgende Daten werden im Konstrukt *output* protokolliert:

- Gesamtzeit des Versuchs
- Eine $N \times 19$ -Matrix mit Statistiken zu jedem Lauf
- Der Verlauf zusammenhängend unterbrochener Lichtschranken
- Der Verlauf der LB-Aktivierungsmuster

Die $N \times 19$ -Matrix enthält für N Läufe in den Spalten Einträge für:

- Dauer der Pause vor einem Lauf.
- Anzahl der wiederholten Aktivierung/Deaktivierung von LB-1 vor dem eigentlichen Lauf, welches als "neugieriges Schnuppern" gewertet wird.
- Aufenthaltsdauer auf dem Laufband.
- Aufenthaltsdauer in der Zielzone vor dem Futterspender.
- 6 Spalten zur Speicherung der Häufigkeit der Anzahl simultan unterbrochener Lichtschranken. Einträge in Spalte 5 geben Aufschluss darüber, dass während des Versuchs eine oder mehrere LBs durch die Versuchsaufsichtsperson oder durch zusätzliche Gegenstände aktiviert wurden. Spalte 6 gibt die Anzahl des LB-Aktivierungsmusters an, bei denen keine LBs aktiviert wurden.
- 6 Spalten zur Speicherung der Häufigkeit der Anzahl zusammenhängend unterbrochener Lichtschranken. Zum Vergleich mit den 6 Spalten davor.
- Anzahl, wie häufig die Ratte sich aufgerichtet hat.
- Die maximale Laufbandgeschwindigkeit.
- Anzahl der detektierten Pseudo-Schritte.

test_run_behaviour() besitzt mehrere Plot-Funktionen zur graphischen Darstellung der Statistiken (siehe z.B. Abb. 3.12).

3.4.4 Rekonstruktion der Laufwege

Zur Bestimmung der Rattenposition auf dem Laufband zu einem bestimmten Zeitpunkt und somit zur Rekonstruktion der Laufwege, sind mehrere Verarbeitungsschritte notwendig.

Schritt 1: Vorverarbeitung

In der Funktion *position_preprocessing_v2()* wird zunächst die LB-Aktivierungsmuster-Matrix *lba_process* aus *merged_data* verwendet, um für jeden protkollierten Zeitpunkt den Raum zu ermitteln, den das Versuchstier auf dem Laufband einnimmt. Die Lauffläche von 1,20 m wird durch die Lichtschranken in 10 cm große Abschnitte unterteilt. Jeder LB lässt sich eine feste Position auf dem Laufband zuweisen, die der Entfernung von der Aufenthaltskiste in Zentimetern entspricht. LB-1 an der Aufenthaltskiste bezeichnet Position 0, LB-2 Position 10, bis hin zu LB-13, die Position 120 bezeichnet. Aus der Menge der zusammenhängend aktivierten Lichtschranken bezeichnet diejenige LB, die dem Futterspender am nächsten ist die maximale Position der Ratte. Diejenige LB, die der Aufenthaltsbox am nächsten ist, gibt die minimale Position an. Maximale und minimale Positionen beschreiben also die Grenzen des Raums, den die Ratte auf dem Laufband einnimmt. *position_preprocessing_v2()* berücksichtigt ebenfalls die Möglichkeit zusätzlich unterbrochener LBs durch den Versuchsleiter oder Fremdkörper, indem aktivierte Lichtschranken mit vorhergehenden und nachfolgenden Aktivierungsmustern verglichen werden.

position_preprocessing_v2() speichert im Konstrukt *pre_data* die maximale und minimale Position mit zugehörigem Zeitstempel und besitzt eine Plot-Funktion zur graphischen Darstellung dieser Daten. Dabei wird ersichtlich, dass durch den Verlauf von maximaler und minimaler Position ein "Korridor" entsteht, der die zeitliche Entwicklung, des von der Ratte eingenommenen Raums, darstellt. Optional wird die Funktion *position_preprocessing2_v2()* aufgerufen, die den zweiten Verarbeitungsschritt ausführt. Dies kann durch einen Übergabeparameter an *position_preprocessing_v2()* gesteuert werden.

Schritt 2: zusätzliche Vorverarbeitung

Dieser Verarbeitungsschritt wird zwar als optional angesehen, trägt allerdings aus Gründen, die im Folgenden erläutert werden, maßgeblich zur Verbesserung der Positionsbestimmung bei und wird daher standardmäßig verwendet (vgl. Abb. 3.15). Die Funktion *position_preprocessing2_v2()* verwendet die Daten aus *pre_data* zur erneuten Bestimmung der maximalen und minimalen Position.

Das Problem: Aktivierte Lichtschranken bedeuten, dass ein Teil des Rattenkörpers diese unterbrechen und das Versuchstier sich somit unter anderem an genau dieser Stelle befindet. Nicht-aktivierte Lichtschranken sagen aus, dass die Ratte sich an genau diesem Ort nicht aufhält. Betrachtet man zu einem beliebigen Zeitpunkt zwei benachbarte Lichtschranken, von denen eine aktiviert, eine deaktiviert ist, sagen diese jedoch nichts über den Raum zwischen ihnen aus. Die Ratte kann sich sowohl in unmittelbarer Nähe der aktiven Lichtschranke, als auch in unmittelbarer Nähe der nicht-aktiven LB befinden (vgl. Abb. 3.13). Der Ort an dem sich die Ratte aufhält, wird also nicht zu einem beliebigen Zeitpunkt durch die maximale und minimale Position begrenzt.

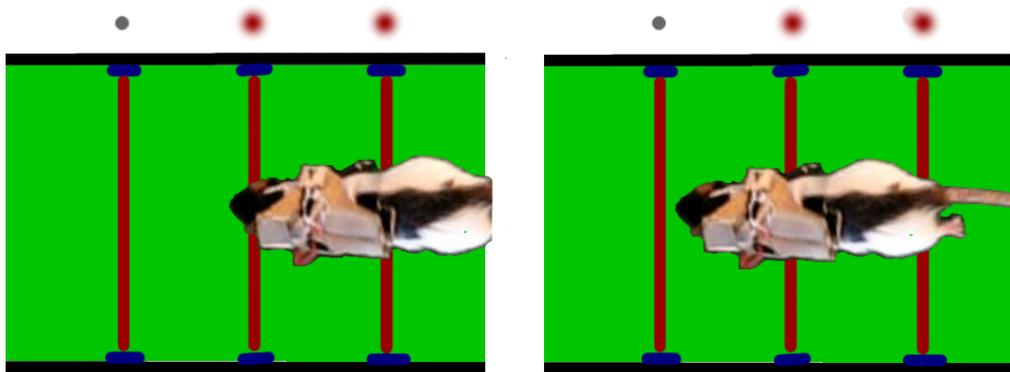


Abbildung 3.13: Positionsungenauigkeit der Ratte auf dem Laufband. Das Aktivierungsmuster eines gegebenen Zeitpunkts lässt keine genaue Aussage über die Grenzen des von der Ratte eingenommenen Raums zu.

Die Lösung: Betrachtet man jedoch den Verlauf der Aktivierungsmuster, so können zu bestimmten Zeitpunkten die Grenzen ganz exakt bestimmt werden, nämlich genau in dem Moment, wenn eine Lichtschranke aktiviert oder deaktiviert wird. Schaltet sie von nicht-aktiv auf aktiv, ist in diesem Moment gesichert, dass sich ein begrenzender Körperteil der Ratte an der LB-Position befindet. Schaltet sie von aktiv auf nicht-aktiv, weiß man, dass eine Millisekunde zuvor sich das Versuchstier noch dort aufgehalten hat.

`position_preprocessing_v2()` verwendet diesen Lösungsansatz zur Neuberechnung von maximaler und minimaler Position. Der ‘‘Korridor’’ wird verbreitert. Er beinhaltet jetzt nicht mehr nur den tatsächlichen Raum, der von der Ratte beansprucht wird, sondern teilweise auch Raum der ‘‘nur’’ sehr wahrscheinlich von der Ratte ausgefüllt wird (vgl. Abb. 3.14). Dies kann durch die funktionseigene Plot-Routine dargestellt werden. Trotzdem besitzen die neu berechneten Positionen eine höhere Genauigkeit und werden mit entsprechendem Zeitstempel im Konstrukt `pre_data2` im Workspace zwischengespeichert.

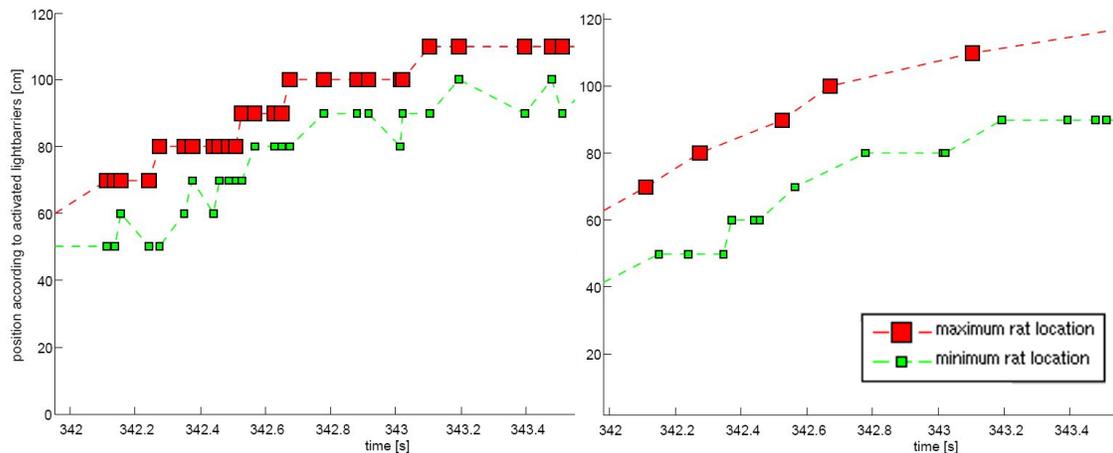


Abbildung 3.14: Korridore, die durch die minimalen und maximalen Rattenpositionen gebildet werden. Links: Der Korridor der Werte aus `pre_data` begrenzt einen Raum in dem sich das Tier ausschließlich befindet. Rechts: Neu berechneter Korridor, der eventuell auch Bereiche enthält, an denen sich die Ratte nur sehr wahrscheinlich aufhält.

Schritt3: Interpolation und Durchschnittsposition

Durch Verwendung der Funktion `interpolate_v2()` werden die maximalen und minimalen Positionen aus `pre_data2` interpoliert und für jeden Zeitpunkt aus den interpolierten maximalen und minimalen Positionen der Durchschnittswert berechnet. Dieser wird als Position der Ratte angenommen und als $1 \times N$ -Vektor `location` zusammen mit den entsprechenden Zeitwerten, sowie den interpolierten maximalen und minimalen Positionen in einem Vektorelement des Konstrukts `interpolated_data` im Workspace gespeichert. Die lineare Interpolation geschieht mithilfe der MATLAB[®]-Funktion `interp1()`. Auch `interpolate_v2()` besitzt eine Plotfunktion, mit der sich die Ergebnisse dieses Bearbeitungsschrittes graphisch darstellen lassen. Abbildung 3.15 zeigt den Vergleich zwischen Interpolationen und Positionsrechnungen mit korrigierten maximalen und minimalen Positionen.

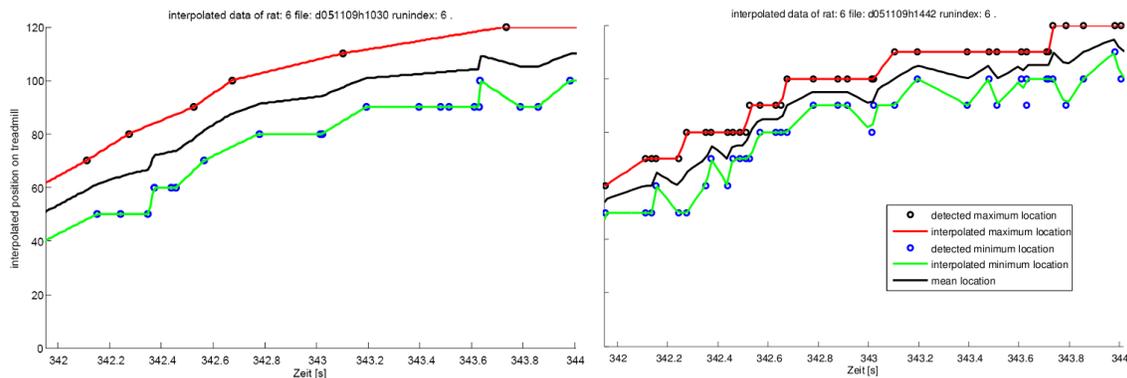


Abbildung 3.15: Vergleich der Positionsrechnung bei 1- und 2-Schritt-Vorverarbeitung. Links abgebildet ist die Interpolation und Positionsrechnung inklusive, rechts exklusive erweiterter Vorverarbeitung.

3.4.5 Geschwindigkeitsberechnung

Die Geschwindigkeit des Versuchstiers wird mithilfe der Funktion `compute_v_v2()` berechnet. Dazu werden die im Workspace verwendeten Daten des Konstrukts `interpolated_data` und Laufbandgeschwindigkeiten aus `merged_data.new_logdata` verwendet. Die absolute Rattengeschwindigkeit v_{rat} berechnet sich aus der relativen Rattengeschwindigkeit Δv , aus der Laufbandgeschwindigkeit v_{tm} und ist abhängig von der Bewegungsrichtung dir . Als relative Rattengeschwindigkeit wird die Positionsdivergenz Δd der Mittelwertpositionen aus `location` zwischen zwei Zeitpunkten über der Zeitdivergenz Δt dieser Zeitpunkte bezeichnet:

$$\Delta v = \Delta d / \Delta t, \text{ wobei } \Delta d = d_{t2} - d_{t1} \text{ und } \Delta t = t_2 - t_1.$$

Die Bewegungsrichtung dir berechnet sich wie folgt ebenfalls aus der relativen Rattengeschwindigkeit Δv und aus der Laufbandgeschwindigkeit v_{tm} :

$$\begin{aligned} dir &= 1, & \text{wenn } \Delta v - v_{tm} > 0 \\ dir &= 0, & \text{wenn } \Delta v - v_{tm} = 0 \\ dir &= -1, & \text{wenn } \Delta v - v_{tm} < 0 \end{aligned}$$

wobei $dir=1$ der Bewegung in Richtung Futterspender, $dir=0$ Stillstand und $dir=-1$ der Bewegung in Richtung Kiste entspricht. Für die absolute Rattengeschwindigkeit ergibt sich:

$$v_{rat} = dir \cdot (\Delta v + v_{tm})$$

Bei den Berechnungen ist zuvor die Umrechnung von v_{tm} , abhängig von den verwendeten Protokolldateien durchzuführen (siehe Abschnitt 3.2.5). Stammen die Dateien aus den Experimentalphasen P2/P3 wird eine andere Umrechnung benötigt als in der Phase P4. Sowohl für die alte, als auch für die neue TDC-Konfiguration wurden für 8 verschiedene Geschwindigkeitseinstellungen je 10 Zeitmessungen für eine bestimmte Wegstrecke durchgeführt. Für jede Geschwindigkeitseinstellung wurde die reale Geschwindigkeit zunächst aus den Messungen berechnet und anschließend eine lineare Regression durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den Abbildungen 3.16 und 3.17 dargestellt. Für die Umrechnung der Laufbandgeschwindigkeit werden folgende Regressionen verwendet:

$$f_{alt}(X) = 0,49 \cdot x - 2,37$$

$$f_{neu}(X) = 0,25 \cdot x - 1,16$$

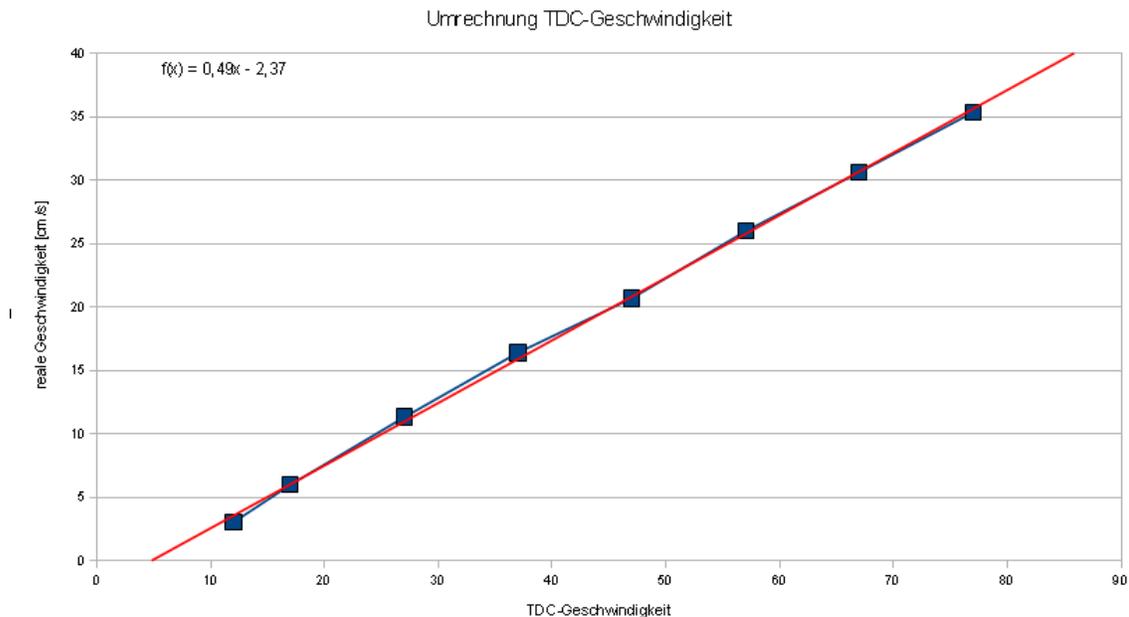


Abbildung 3.16: Umrechnung für v_{tm} in alter TDC-Konfiguration. Die blaue Linie repräsentiert die Interpolation durch gemessene Datenpunkte, die rote die lineare Regression. Links oben ist die Regressionsformel zu sehen.

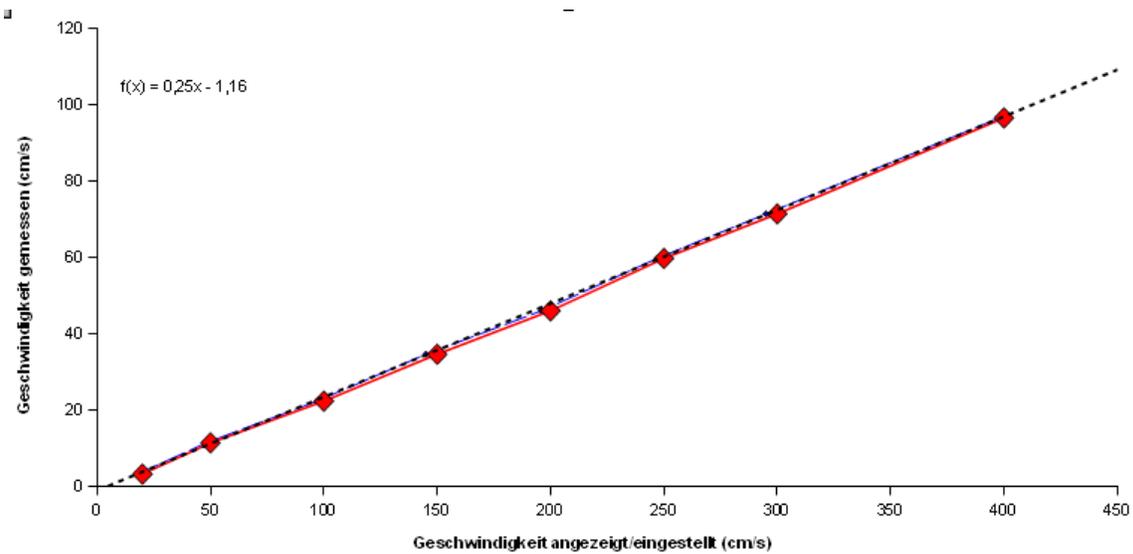


Abbildung 3.17: Umrechnung für v_{tm} in neuer TDC-Konfiguration. Die rote Linie repräsentiert die Interpolation durch gemessene Datenpunkte, die blaue die lineare Regression. Links oben ist die Regressionsformel zu sehen.

Aus Debugging-Gründen werden nicht nur Zeitwerte und v_{rat} , sondern auch Δd , Δt und v_{tm} als Spaltenvektoren einer Matrix gespeichert und in dem $1 \times N$ -Konstrukt v_data in den Workspace geschrieben. Die Plot-Funktion von `compute_v_v2()` ermöglicht die Darstellung der Laufwege, Laufband- und Rattengeschwindigkeit (rechte Teilabbildung in Schaubild 3.18).

3.4.6 Zusammenstellung geeigneter Auswertungsbereiche

Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Auswertungsroutinen werden durch die Funktion `compare_steps_to_log_v2()` aufgerufen. Mit den verarbeiteten Daten lassen sich theoretisch bereits Auswertungen bezüglich der Korrelation zwischen den aus den Laufbanddaten gewonnenen Geschwindigkeiten und den Schrittintervallen, die aus den Daten des Sensorknoten stammen, ermitteln. Als Schrittintervalle werden die Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden, als Pseudo-Schritte identifizierten Maxima bzw. Minima der Gyroskop-Daten bezeichnet. Wie in Abbildung 3.18 zu erkennen, wechseln sich während der Bewegung zur Zielzone kurze Phasen hoher Geschwindigkeit mit kurzen Phasen moderater Geschwindigkeit ab. Relativ konstante Geschwindigkeiten liefern uns die Versuchstiere vor allem während der stabilen Laufphase in der Zielzone vor dem Futterspender. Daher ruft `compare_steps_to_log_v2()` die Funktion `merge_constant_areas()` auf, die diese Bereiche innerhalb aller Läufe eines Versuchs ausfindig macht und zusammenfügt. Es wird ein modifizierter “seed and extend“-Algorithmus verwendet, der zunächst den Bereich mit maximaler Laufbandgeschwindigkeit als Start-

punkt bzw. -bereich wählt (seed) und diesen Bereich nach links und rechts ausweitet. Die Erweiterung des Bereichs erfolgt solange folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die Geschwindigkeit des Versuchstiers v_{rat} ist größer als 15 cm/s.
- v_{rat} weicht von der Laufbandgeschwindigkeit v_{tm} um nicht mehr als 15 cm/s ab.
- $v_{rat}(i+1)$ bzw. $v_{rat}(i-1)$ weicht von $v_{rat}(i)$ nicht um mehr als 8 cm/s ab

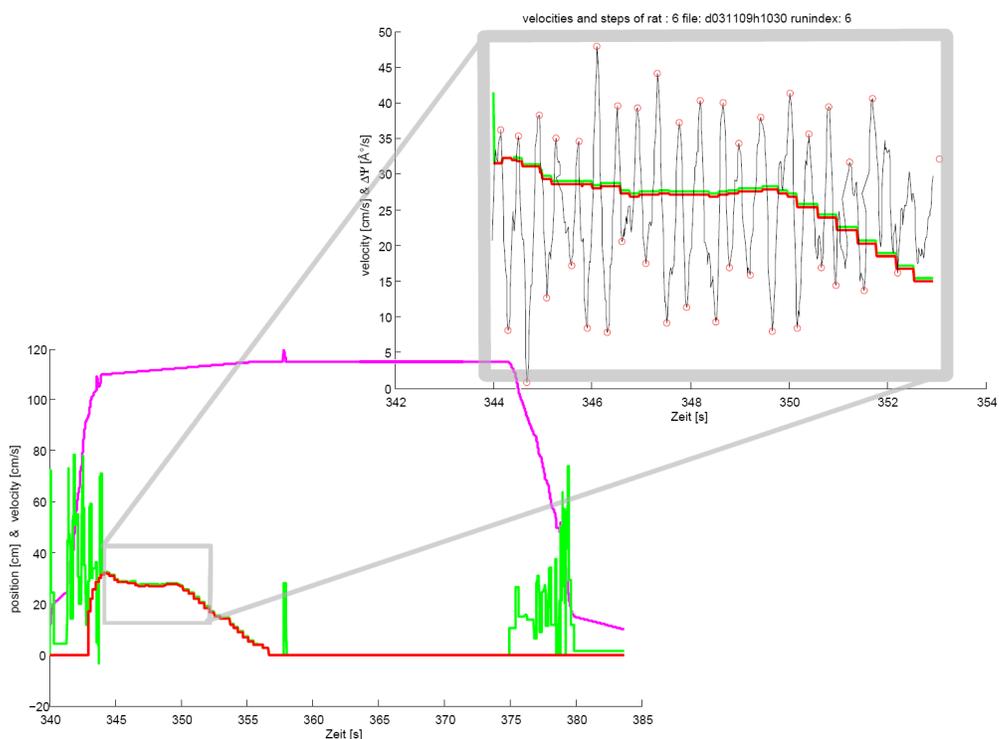


Abbildung 3.18: Ermittlung eines konstanten Geschwindigkeitsbereichs aus den Daten eines Laufs, der Phasen hoher Geschwindigkeitsänderungen enthält.

Diese Parameter sind nach der Auswertung einiger Versuche gewählt worden, sind aber durch Rückkopplung mit den Auswertungsergebnissen wahrscheinlich optimierbar. Die gefundenen Bereiche jedes Laufs werden als 1×3 -Konstrukt *merged_data_selection* mit den Einträgen *v_merged*, *gyro_merged* und *step_merged* in den Workspace geschrieben. Diese haben folgendes Format:

- *v_merged*: $N \times 2$ Matrix mit Zeitwerten $t_{v_{rat}}$ und Geschwindigkeit v_{rat} als Spaltenvektoren

- *gyro_merged*: $M \times 2$ Matrix mit Zeitwerten *gx_time* und Gyroskopdaten *g_x_c_f* als Spaltenvektoren
- *step_merged*: $P \times 2$ Matrix mit Zeitwerten *step_realtime* und Pseudo-Schritt-Amplitude *amp* als Spaltenvektoren

merged_data_selection besitzt Plot-Funktionen zur Darstellung der Rattengeschwindigkeit, Gyroskopdaten und Pseudo-Schritte für jeden Lauf und zur Darstellung dieser Daten für die zusammengeführten Bereiche aller Läufe.

3.4.7 Korrelation der Laufparameter

Abschließend ruft *compare_steps_to_log_v2()* die Funktion *check_on_steps_v2()* auf. Da *compare_steps_to_log_v2()* mit der Absicht entwickelt worden ist, Daten genau eines Versuchs aufzubereiten und auszuwerten, dient die abschließende Funktion *check_on_steps_v2()* sowohl zur Aufbereitung als auch zur Auswertung der Daten eines Versuchs. Die Aufbereitung besteht in der Zusammenstellung von sechs $N \times 2$ Matrizen. Drei für relevante Daten mit positiver Pseudo-Schritt-Amplitude (Schritte rechts) und drei für Daten mit negativer Amplitude (Schritte links). In den Spalten der je drei Matrizen werden folgende Daten gegenübergestellt:

- gemessene Zeitintervalle der Pseudo-Schritte (Schrittintervalle) \leftrightarrow gemessene, korrespondierende Geschwindigkeiten
- errechnete Schrittweiten \leftrightarrow gemessene, korrespondierende Geschwindigkeiten
- errechnete Schrittweiten \leftrightarrow gemessene, korrespondierende Schrittintervalle

Für jede Datengegenüberstellung (Zusammenfassung der Matrizen von Rechts und Links-schritten) wird eine robuste Regression berechnet, die sich zusammen mit den Daten durch die implementierten Plot-Funktionen darstellen lässt. Die Matrizen werden im Konstrukt *stepcheck* zusammengefasst. *stepcheck* wird zusammen mit *merged_data_selection* in einem Konstrukt als Rückgabewert der Funktion *compare_steps_to_log_v2()* verwendet.

Um den Korrelationsergebnissen eine hohe Aussagekraft zu verleihen werden die bisher beschriebenen Auswertungsroutinen nicht nur auf einen, sondern auf mehrere bzw. alle Versuche angewendet. Dazu wird die Funktion *final_evaluation(rat_id)* benutzt. *final_evaluation()* wird optional mit dem Parameter *rat_id* aufgerufen, der die numerische

Bezeichnung eines Versuchstiers enthält. Dadurch werden nur die Versuche des entsprechenden Tiers ausgewertet. Wird der Parameter nicht verwendet, oder enthält einen ungültigen Wert, werden standardmäßig alle Versuche ausgewertet. *final_evaluation()* ruft die Funktion *evaluate_new_data(rat_id)* auf, in der alle Versuche mit Namen eingetragen sind. Für jeden dem *rat_id*-Parameter entsprechenden Versuch werden dessen Daten zunächst mittels der Routine *merge_new_logs_v2()* aufbereitet um anschließend durch die Funktion *compare_steps_to_log_v2()* ausgewertet zu werden. Das Rückgabekonstrukt von *compare_steps_to_log_v2()* wird in Vektoren gespeichert. Jedem Tier ist für eine entsprechende Versuchsphase ein Vektor zugeordnet, dessen Benennung sich aus der Versuchstierbezeichnung, einem Dateiparameter *fpX* der Statistikroutine, der Bezeichnung der Experimentalphase und dem Suffix “_data“ zusammensetzt. z.B.:

$$r689fp1P4_data : \underbrace{r689}_{\text{Versuchstier}} \underbrace{fp1}_{\text{Auswertungsart}} \underbrace{P4}_{\text{Experimental phase}} \underbrace{_data}_{\text{Suffix}}$$

Die Vektoren werden in dem Konstrukt *rat_data* im Workspace zwischengespeichert, und durch die von *final_evaluation()* aufgerufenen Funktion *plot_evaluation()* genutzt, um alle Daten bezüglich der oben genannten Datengegenüberstellungen in den Auswertungsplots darzustellen (siehe Kap. 4.3). Aus Zeitgründen wurden die Routinen *evaluate_new_data()*, *final_evaluation()* und *plot_evaluation()* ausschließlich für Daten aus der Experimentalphase P4 entwickelt. Für die Daten aus den Phasen P2 und P3 existieren keine äquivalenten Funktionen. Teilweise sind außerdem Funktionen der Routine *compare_steps_to_log_v2()* nicht in der Version für P2/P3-Daten enthalten.

3.4.8 Auswertung der Versuchsstatistiken

Eine weitere Auswertung kann mittels der Routine *rat_statistics()* vorgenommen werden. Diese enthält wie *evaluate_new_data(rat_id)* die Namen aller Versuche eingeteilt nach Versuchstieren R3-R699, dem Dateiparameter *fpX* und nach den Versuchsphasen P1-P4. Die Versuche werden mit der in Abschnitt 3.4.3 vorgestellten Routine *test_run_behaviour(file_param, rat_id, file_id)* ausgewertet, die als Parameter den Dateiparameter *fpX*, den numerischen Bezeichner des Versuchstiers und die Bezeichnung der Protokolldateien übergeben bekommt. Der Dateiparameter *fpX* gibt an, welche Dateien ausgewertet werden:

- **fp0:** Es werden nur neue Protokolldateien der Laufbanddaten (*rlogBezeichner.txt*) ausgewertet. Dies dient vor allem der Untersuchung der Wechselwirkung von Versuchstierverhalten und Laufband mit Dateien, die aus Versuchen stammen, in denen die Tiere keine Sensorweste trugen.

- **fp1:** Es werden neue Protokolldateien der Laufband- und Sensorknotendaten ausgewertet. Es lassen sich Vergleiche zu *fp0*-Auswertungen ziehen.
- **fp2:** Wie *fp0*, nur mit Dateien alten Formats (*LogfileBezeichner.txt*).
- **fp3:** Wie *fp1*, nur mit Dateien alten Formats (*LogfileBezeichner.txt* und korrespondierende *Ratleg*-Datei).

Die Funktion speichert *rat_statistics()* den Rückgabewert von *test_run_behaviour()* in Vektoren, die ebenso wie in *evaluate_new_data()* benannt sind. Mit den Daten dieser Vektoren kann *rat_statistics()* unter anderem die erreichten Maximalgeschwindigkeiten der Versuche vergleichen oder die Verweildauern in Bereichen des Versuchsaufbaus bestimmen. Die Hauptaufgabe von *rat_statistics()* bleibt allerdings die Zusammenstellung der einzelnen Versuchsstatistiken. Weitere Auswertungen sind mit der Funktion *additional_rat_statistics()* möglich. Es lassen sich z.B. Daten über verschiedene Zeitspannen innerhalb der Versuche für jedes einzelne Versuchstier zusammenstellen oder die Anzahl der Läufe pro Versuchsstunde berechnen. So lassen sich Vergleiche zwischen den Versuchstieren ziehen. Einige Ergebnisse, die sich durch *additional_rat_statistics()* produzieren lassen, sind in Tabelle 4.4 zu sehen. Aus Zeitmangel wurde bei der Entwicklung von *additional_rat_statistics()* nur Daten aus der Experimentalphase P4 berücksichtigt.

Kapitel 4

Ergebnis

In diesem Kapitel wird eine Auswahl an Ergebnissen präsentiert, die mithilfe der Auswertungsroutinen aus Kapitel 3.4 generiert wurden. Da aus Zeitmangel bei der Entwicklung einiger Funktionen nur das Dateiformat der Protokolldateien aus der Experimentalphase P4 berücksichtigt werden konnte, werden in den Kapiteln 4.2 und 4.3 ausschließlich Daten aus P4 präsentiert. Auch in Kapitel 4.1 wurden nur für die Auswertung von P4-Daten Funktionen zur automatischen Erstellung der Versuchsstatistiken benutzt. Alle Daten und Auswertungsroutinen liegen jedoch sowohl am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaften der Universität Tübingen, als auch in der Abteilung “Verteilte Systeme“ der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen vor und können für weitere Arbeiten innerhalb des Ratpack-Projekts verwendet werden. Sie werden innerhalb eines Subversion-Versionskontrollsystems verwaltet.

4.1 Allgemeine Versuchsstatistiken

In den folgenden Tabellen sind Eckdaten zu den Versuchen der einzelnen Experimentalphasen dargestellt. Die Daten der Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3 wurden mithilfe des nebenbei geführten Versuchsprotokolls zusammengestellt. Dieses enthält verschiedene Informationen zu jedem Versuch, unter anderem Datum, Uhrzeit, Identität des Versuchstiers und die Namen der Protokolldateien. Das Versuchsprotokoll selbst wird hier nicht aufgeführt, ist aber ebenfalls im Projektarchiv des Versionskontrollsystems zu finden. Tabelle 4.1 enthält die Anzahl der Durchgänge und Ihre Gesamtzeiten für jedes verwendete Versuchstier, sowie für alle Versuchstiere gemeinsam. Es wird hier bevorzugt von Durchgängen als von Versuchen gesprochen, da die Tiere sich lediglich an die Laufbandumgebung gewöhnen und den Futterspender als Futterquelle kennenlernen sollten.

Versuchstier	R689	R690	R691	R699	gesamt
Anzahl durchgeführter Durchgänge	1	1	7	6	15
Gesamtdauer aller Durchgänge [Std.]	16:15,00	7:30,00	44:00,00	29:00,00	96:45,00

Tabelle 4.1: Statistik für die Experimentalphase P1, der ersten Konditionierungsphase. Erstellt aus den Daten des Versuchsprotokolls.

Versuchstier	R689	R690	R691	R699	gesamt
Anzahl durchgeführter Versuche	9	3	3	3	18
Gesamtdauer aller Versuche [Std.]	17:15,00	4:50,00	5:10,00	6:15,00	33:30,00
Davon mit Sensorknoten [Std.]	7:25,00	2:20,00	1:30,00	1:30,00	12:45,00

Tabelle 4.2: Versuchsstatistik für die Experimentalphase P2. Erstellt aus den Daten des Versuchsprotokolls.

Versuchstier	R689	R690	gesamt
Anzahl durchgeführter Versuche	9	14	23
Gesamtdauer aller Versuche [Std.]	21:00,00	34:35,00	55:35,00
Davon mit Sensorknoten [Std.]	13:20,00	12:05,00	25:25,00

Tabelle 4.3: Versuchsstatistik für die Experimentalphase P3. Erstellt aus den Daten des Versuchsprotokolls.

Versuchstier	R3	R6	R689	R691	gesamt
Anzahl durchgeführter Versuche	7	20	21	8	56
Gesamtdauer aller Versuche [Std.]	10:56,50	41:55,28	28:41,00	9:24,55	93:00,13
Gesamtdauer der Laufphasen [Std.]	4:55,02	14:11,04	6:44,44	2:07,35	27:59,15
Davon Läufe mit Sensorknoten [Std.]	0	1:49,34	3:17,41	0	5:07,15
Gesamtanzahl an Läufen	439	729	462	203	1896
Davon mit Sensorknoten	0	205	221	0	426
Anzahl Läufe/Std. ohne Mote	40,1	18,9	15,6	21,6	20,6
Anzahl Läufe/Std. mit Mote	0	17	13,6	0	15,1

Tabelle 4.4: Versuchsstatistik für die Experimentalphase P4. Erstellt aus den Daten der Versuchs-Einzelstatistiken durch die in Kapitel 3.4.8 beschriebenen Methoden.

Tabelle 4.2 gibt Auskunft über Experimentalphase P2 und enthält neben der Anzahl der durchgeführten Versuche und Ihrer Gesamtzeiten für jedes verwendete Versuchstier auch den zeitlichen Anteil der Versuche, in denen der Sensorknoten eingesetzt wurde. Die Tiere R689 und R690 wurden bevorzugt eingesetzt, da sie zuvor schon innerhalb des Ratpack-Projekts Verwendung fanden und bereits an das Tragen der Sensorweste gewöhnt waren. Daher ließen sich mit ihnen bereits Laufdaten protokollieren, während sich die Tiere R691 und R699 weigerten, mit der Sensorweste die Aufenthaltskiste überhaupt zu verlassen. Tabelle 4.3 zeigt Versuchsanzahl, Gesamtzeiten der Versuche und den zeitlichen Anteil der Versuche mit Sensorknoten für die Experimentalphase P3.

Tabelle 4.4 gibt Auskunft über die Versuche der Phase P4. Die Statistik wurde automatisch durch die in Kapitel 3.4.8 beschriebenen Funktionen generiert. Wie die Tabellen 4.2 und 4.3 enthält sie die Anzahl der durchgeführten Versuche und Ihrer Gesamtzeiten für jedes Versuchstier, sowie den zeitlichen Anteil der Versuche, in denen der Sensorknoten eingesetzt wurde. Der Eintrag “Anzahl durchgeführter Versuche“ für R691 täuscht dabei ein wenig. Die Statistikroutine zählt jede Protokolldatei als Versuch. Für R691 wurden an einem Versuchstag innerhalb von zweieinhalb Stunden 5 Protokolldateien angelegt, da die Parameter der Laufbandsteuerung neu eingestellt werden mussten. Weiterhin enthält die Tabelle die Anzahl der Läufe insgesamt und die Anzahl der Läufe mit Sensorknoten. Wie zu sehen ist, konnten die Tiere R3 und R691 nicht mehr zur Protokollierung von Sensordaten eingesetzt werden. R691 erkrankte und starb, R3 wurde aus Zeitgründen nicht mehr verwendet. Die letzten beiden Zeilen der Tabelle 4.4 enthalten die durchschnittliche Anzahl der Läufe die Ratten pro Versuchsstunde gelaufen sind.

4.2 Laufparameter

4.2.1 Schritintervall

Als Schritintervalle werden die Zeitintervalle zwischen denen als Pseudo-Schritten identifizierten Maxima bzw. Minima der Gyroskop-Winkelgeschwindigkeiten bezeichnet. Sie werden durch die in Kapitel 3.4.2 beschriebene Funktion *compute_steps_v2()* berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 unter Verwendung der Plot-Funktionen der Auswertungsroutine *check_on_steps_v2()* exemplarisch dargestellt. Sie zeigen die Verteilung der Schritintervallgrößen für eine Versuchssitzung der Ratte R6. Abbildung 4.1 zeigt die Verteilung aller Schritintervalle mit einem Medianwert von 380 Millisekunden. Das untere Quartil liegt bei 349 ms, das obere Quartil bei 409 ms. Der untere Whisker endet bei 295ms, der obere bei 476 ms. Im Schaubild 4.2 sind zwei Boxplots abgebildet. Zum Vergleich wird hier die Verteilung der Minima-Intervalle der Verteilung der Maxima-Intervalle gegenübergestellt, also der Schritte mit links den

Schritten mit rechts.

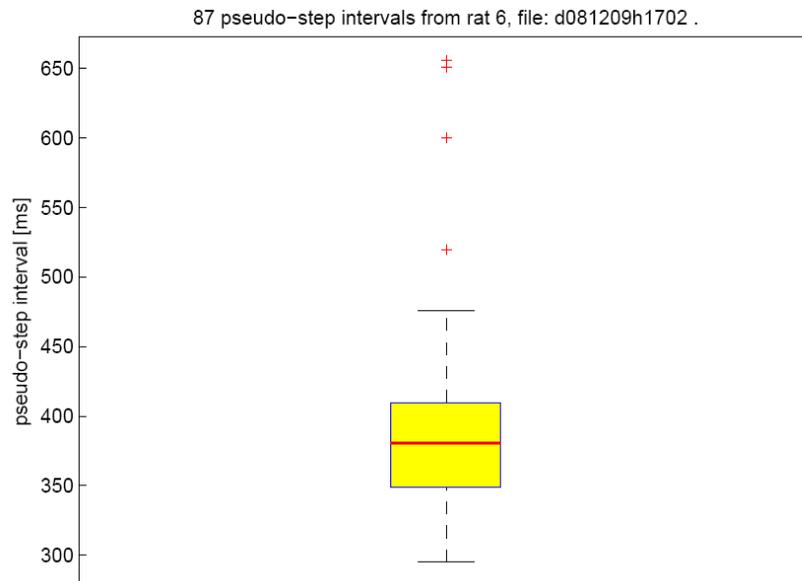


Abbildung 4.1: Verteilung der Schrittimteralle der Ratte R6 während eines Versuchs. Der Medianwert beträgt hier 380 ms.

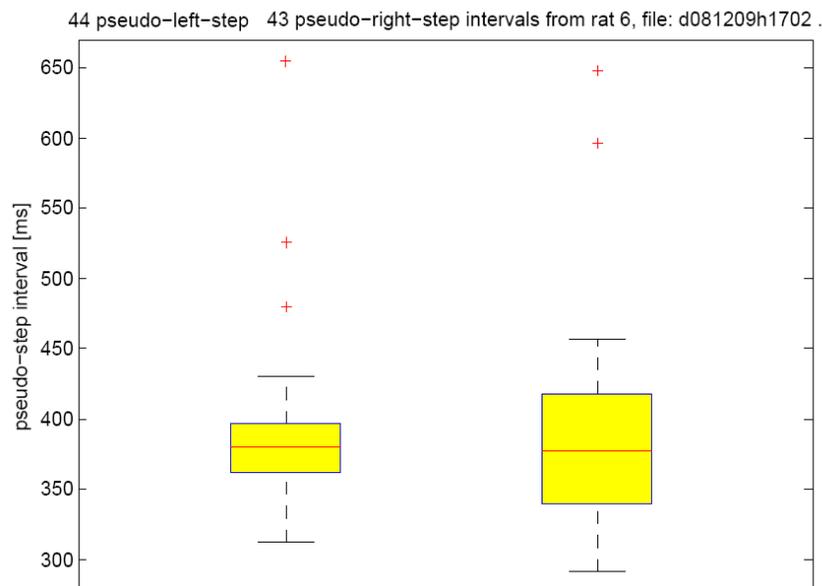


Abbildung 4.2: Verteilung der Schrittimteralle der Ratte R6 während eines Versuchs. Die Minima und Maxima der Pseudo-Schritt-Amplituden, welche der Bewegung nach links bzw. rechts entsprechen, wurden getrennt ausgewertet. Beide Mediane haben den Wert 380 ms.

Kennwerte [ms]	Pseudo-Step links	Pseudo-Step rechts
Oberer Whisker	428	460
Oberes Quartil	397	422
Median	380	380
Unteres Quartil	363	343
Unterer Whisker	316	295

Tabelle 4.5: Kennwerte der Boxplots der Abb.4.2

Kennwerte [cm]	Pseudo-Step links	Pseudo-Step rechts
Oberer Whisker	21	26,3
Oberes Quartil	17,2	10,5
Median	15,8	15,9
Unteres Quartil	14,5	13,3
Unterer Whisker	10,7	9,9

Tabelle 4.6: Kennwerte der Boxplots der Abb.4.4

Die Kennwerte der beiden Verteilungen lassen sich der Tabelle 4.5 entnehmen. Sowohl der Boxplot in Abbildung 4.1, als auch der in Abbildung 4.2 besitzt einige Ausreißer nach oben.

4.2.2 Schrittlänge

Die Länge der Pseudo-Schritte wird aus den Schrittingintervallen und den korrelierenden Geschwindigkeiten in der Auswertungsroutine *check_on_steps_v2()* berechnet. Mithilfe der Plot-Funktion lassen sich die Verteilungen dieser Pseudoschrittlängen darstellen, wie in den Abbildungen 4.3 und 4.4 exemplarisch zu sehen ist. Dabei werden Daten des gleichen Versuchs wie in Abschnitt 4.2.1 benutzt. Abbildungen 4.3 zeigt den Boxplot für die Schrittlängen, die aus allen Schrittingintervallen berechnet wurden. Der Medianwert beträgt hier 15,8 cm. Oberes und unteres Quartil liegen bei 18,4 cm bzw. bei 14,2 cm. Oberer und unterer Whisker enden bei 23 cm bzw. bei 9,2 cm. Die Verteilung besitzt einige Ausreißer nach oben. In Abbildung 4.4 werden der Verteilung der Minima-Schritte (links-Schritte) die Verteilung der Maxima-Schritte (rechts-Schritte) gegenübergestellt. Die Kennwerte beider Boxplots können der Tabelle 4.6 entnommen werden. Die Minima-Schritt-Verteilung besitzt einige Ausreißer nach oben, einen nach unten.

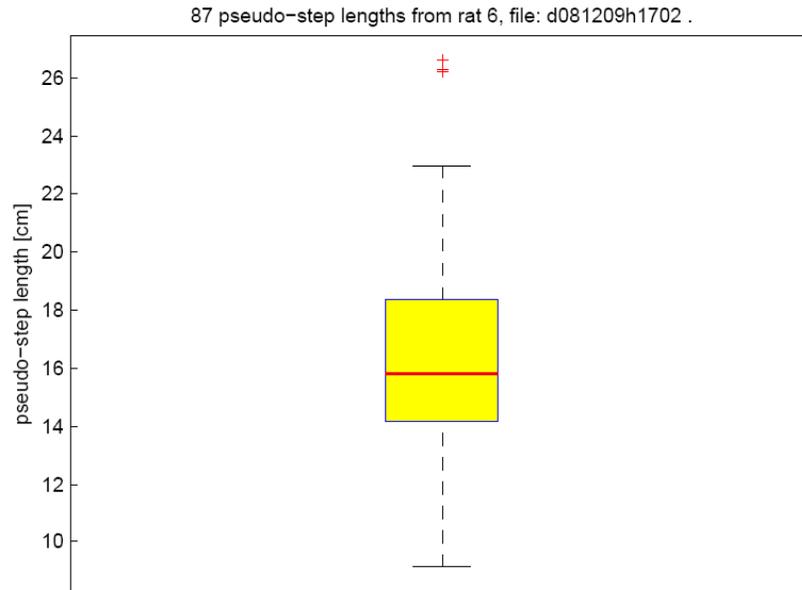


Abbildung 4.3: Verteilung der errechneten Schrittlängen der Ratte R6 während eines Versuchs aus allen Pseudo-Schritt-Amplituden. Der Median liegt bei 15,8 cm.

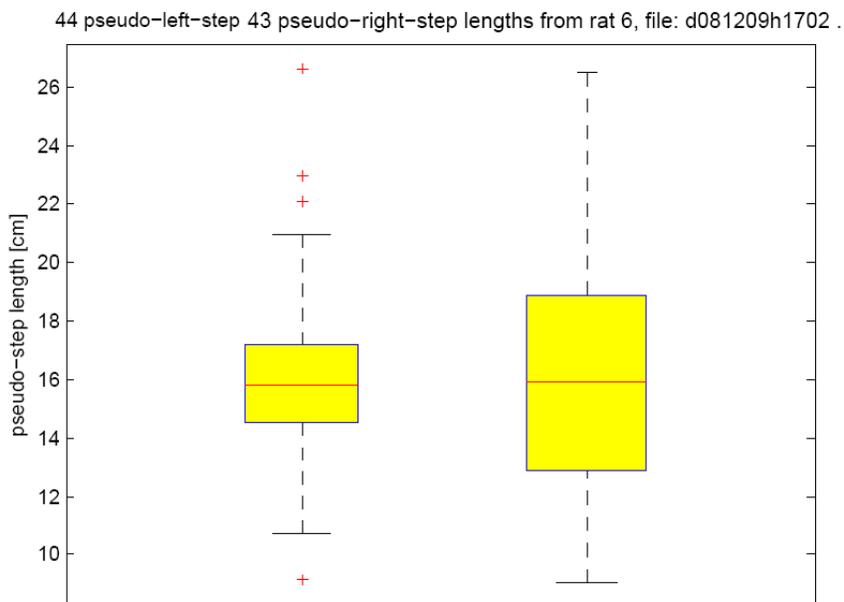


Abbildung 4.4: Errechnete Schrittlängen der Ratte R6 während eines Versuchs. Die Minima und Maxima der Pseudo-Schritt-Amplituden, welche der Bewegung nach links bzw. rechts entsprechen, wurden getrennt ausgewertet. Die Mediane liegen bei 15,8 cm bzw. 15,9 cm.

4.3 Korrelation der Laufparameter

4.3.1 Korrelation Schritintervall ↔ Geschwindigkeit

Im folgenden wird die Korrelation zwischen gemessenen Schritintervallen und korrespondierenden gemessenen Geschwindigkeiten dargestellt. In Abbildung 4.5 ist zunächst exemplarisch die Korrelation der Daten eines Versuchs der Ratte R6 dargestellt. Die links- und rechts-Schritte sind verschiedenfarbig dargestellt und für die gesamte Datenmenge wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die Regressionsgleichung lautet:

$$f(x) = 0,0048243 \cdot x + 23,9014$$

In den Abbildungen 4.6 und 4.7 sind die Daten-Korrelationen aller Versuche in P4 für die Versuchstiere R6 und R689 dargestellt. Auch hier wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die entsprechenden Gleichungen lauten:

$$f(x) = 0,00050803 \cdot x + 26,9769$$

$$f(x) = -0,0040197 \cdot x + 30,4084$$

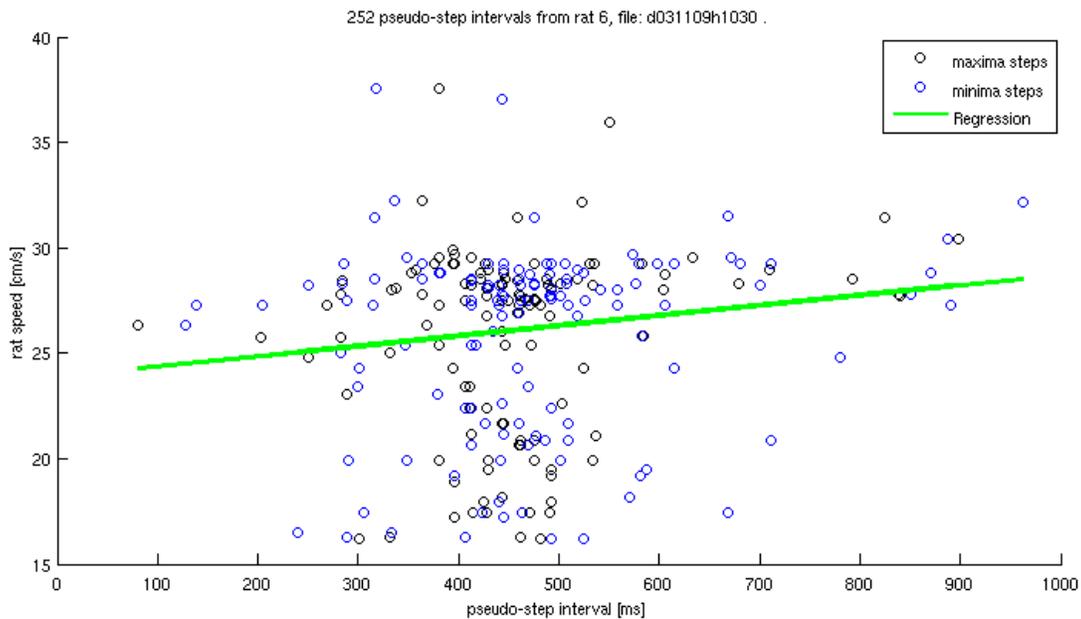


Abbildung 4.5: Korrelation von Schritintervall und Geschwindigkeit für einen Versuchsdatensatz der Ratte R6. Die Formel $f(x) = 0,0048243 \cdot x + 23,9014$ beschreibt die Regression.

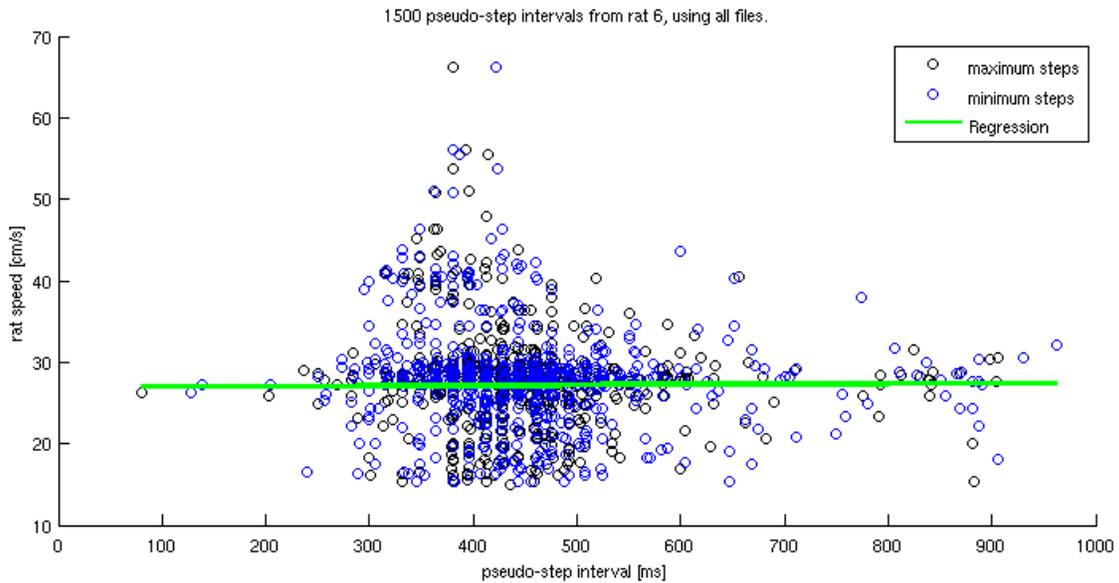


Abbildung 4.6: Korrelation von Schritintervall und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R6. Die Regressionsformel lautet: $f(x) = 0,00050803 \cdot x + 26,9769$.

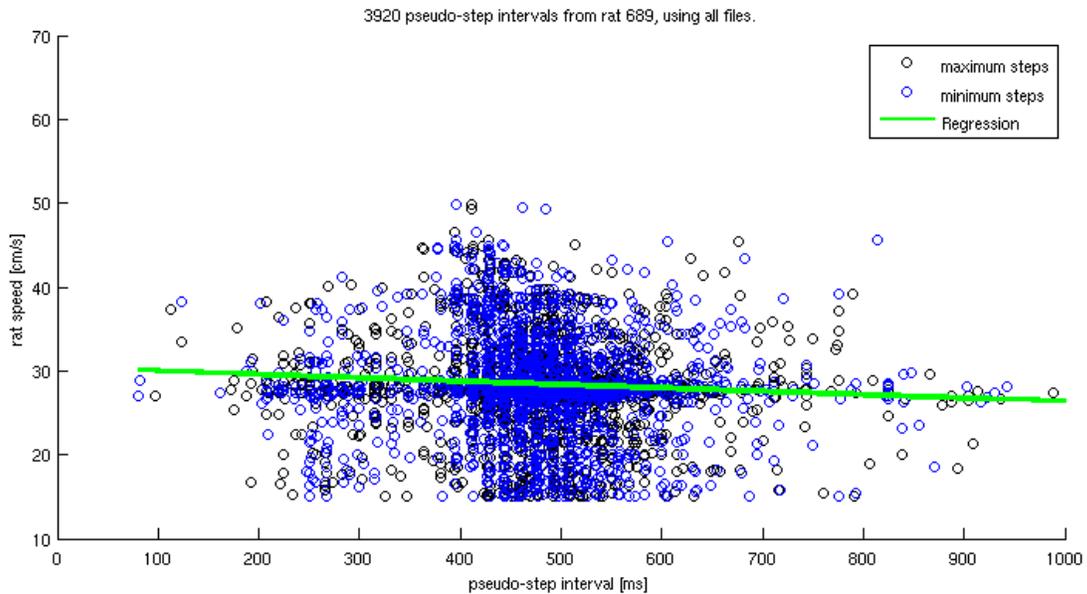


Abbildung 4.7: Korrelation von Schritintervall und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R689. Die Regressionsformel lautet: $f(x) = -0,0040197 \cdot x + 30,4084$.

4.3.2 Korrelation Schrittweite ↔ Geschwindigkeit

Die Korrelation zwischen berechneter Schrittweite und korrespondierender gemessener Geschwindigkeit wird in der Abbildung 4.8 zunächst exemplarisch für die Daten eines Versuchs der Ratte R6 dargestellt. Die links- und rechts-Schritte sind verschiedenfarbig dargestellt und für die gesamte Datenmenge wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die Regressionsgleichung lautet:

$$f(x) = 0,45696 \cdot x - 0,26627$$

In den Abbildungen 4.9 und 4.10 sind die Daten-Korrelationen aller Versuche in P4 für die Versuchstiere R6 und R689 dargestellt. Auch hier wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die entsprechenden Gleichungen lauten:

$$f(x) = 0,36634 \cdot x + 1,7944$$

$$f(x) = 0,41636 \cdot x + 1,6493$$

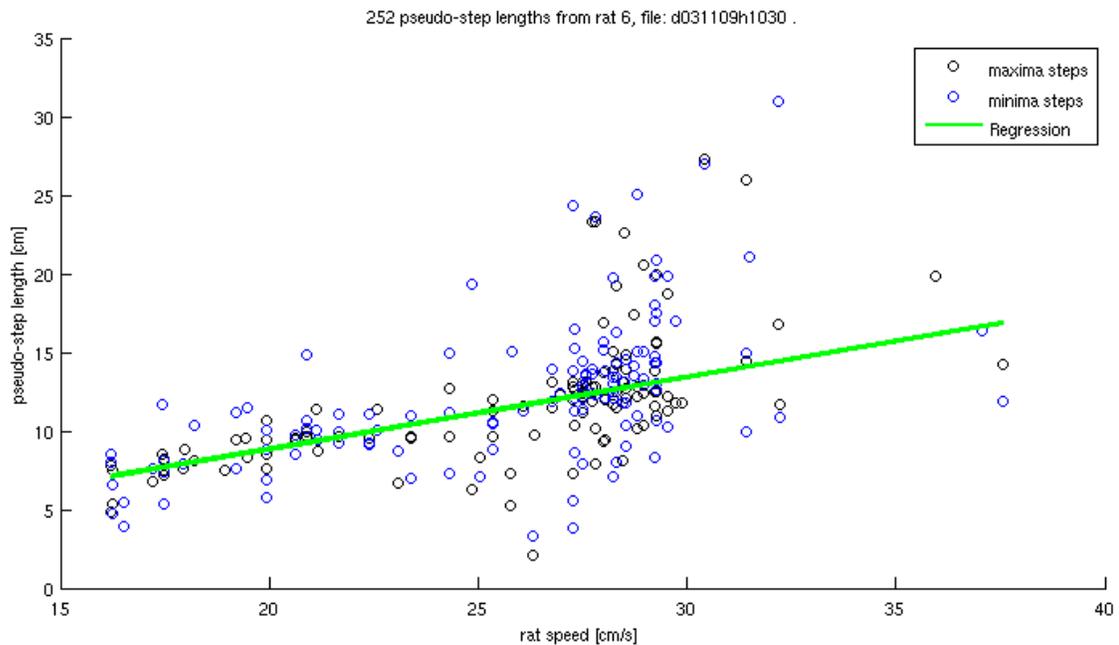


Abbildung 4.8: Korrelation von Schrittweite und Geschwindigkeit für einen Versuchsdatensatz der Ratte R6. Die Regressionsformel lautet: $f(x) = 0,45696 \cdot x - 0,26627$

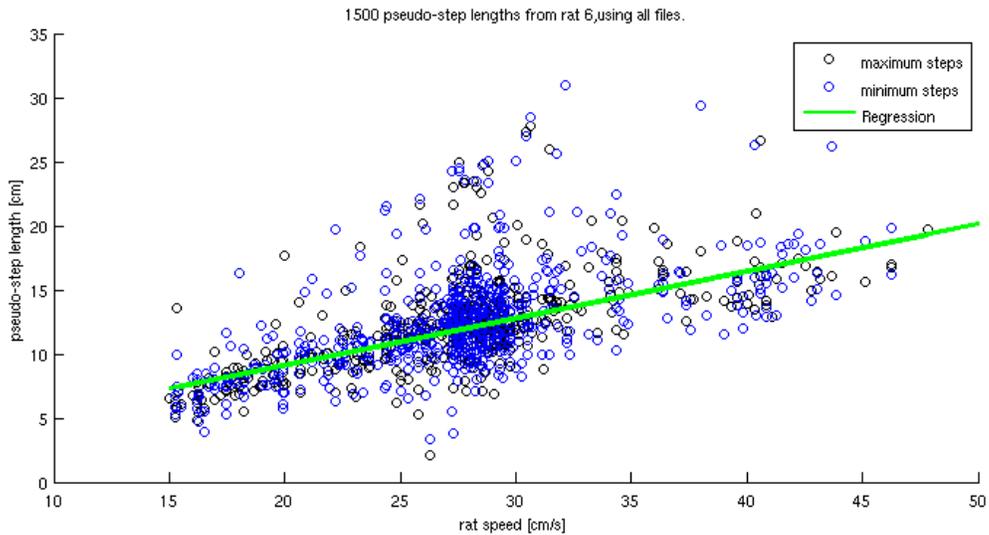


Abbildung 4.9: Korrelation von Schrittweite und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R6. Die Regression wurde mit der Funktion $f(x) = 0,36634 \cdot x + 1,7944$ durchgeführt.

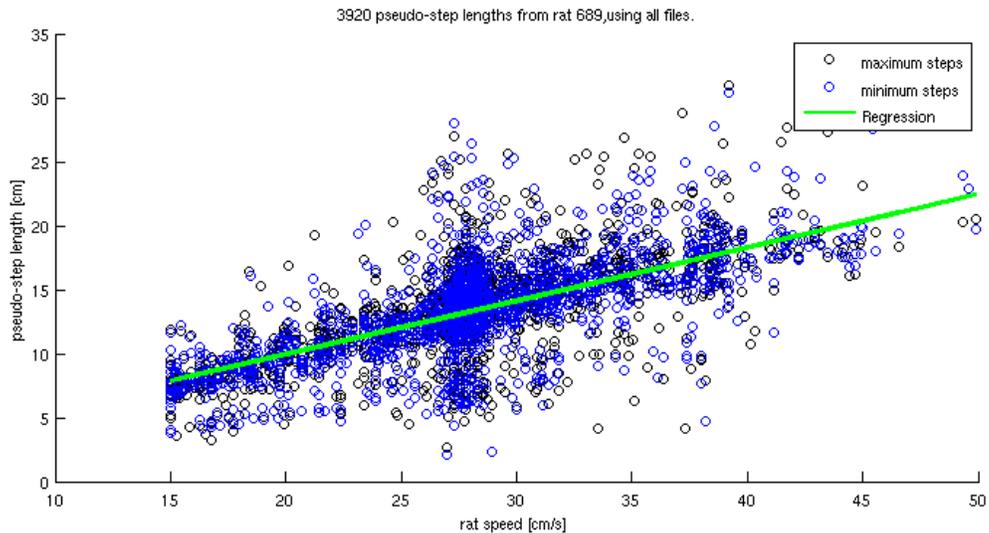


Abbildung 4.10: Korrelation von Schrittweite und Geschwindigkeit aller Versuchsdaten der Ratte R689. Die Formel $f(x) = 0,41636 \cdot x + 1,6493$ beschreibt die lineare Regression.

4.3.3 Korrelation Schrittintervall ↔ Schrittweite

Abschließend wird die Korrelation zwischen gemessenen Schrittintervallen und korrespondierenden berechneten Geschwindigkeiten dargestellt. In Abbildung 4.11 ist exem-

plarisch die Korrelation der Daten eines Versuchs der Ratte R6 dargestellt. Die links- und rechts-Schritte sind verschiedenfarbig dargestellt und für die gesamte Datenmenge wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die Regressionsgleichung lautet:

$$f(x) = 0,03008 \cdot x - 1,7232$$

In den Abbildungen 4.12 und 4.13 sind die Daten-Korrelationen aller Versuche in P4 für die Versuchstiere R6 und R689 dargestellt. Auch hier wurde eine lineare Regression durchgeführt. Die entsprechenden Gleichungen lauten:

$$f(x) = 0,028512 \cdot x - 0,50797$$

$$f(x) = 0,026716 \cdot x + 0,85011$$

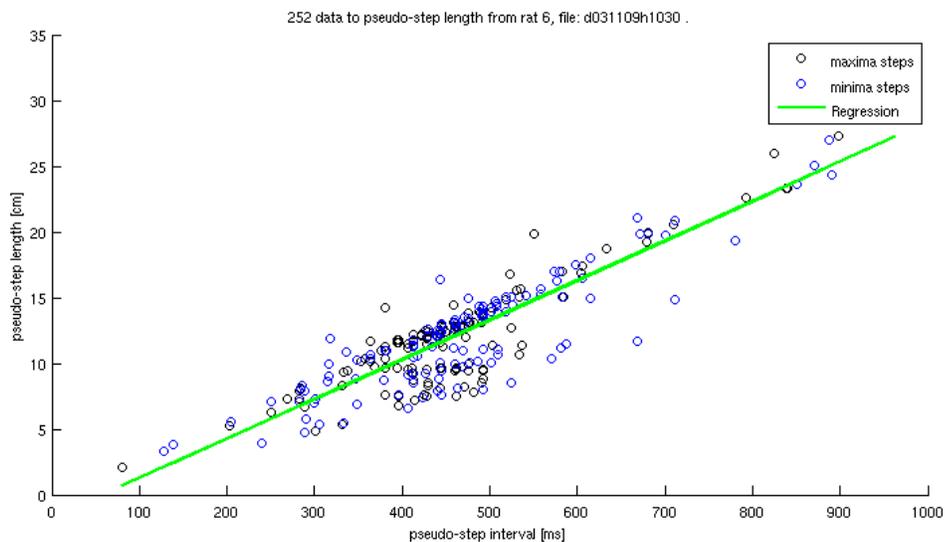


Abbildung 4.11: Korrelation von Schrittintervall und Schrittweite für einen Versuchsdatensatz der Ratte R6. Die Regressionsformel lautet: $f(x) = 0,03008 \cdot x - 1,7232$.

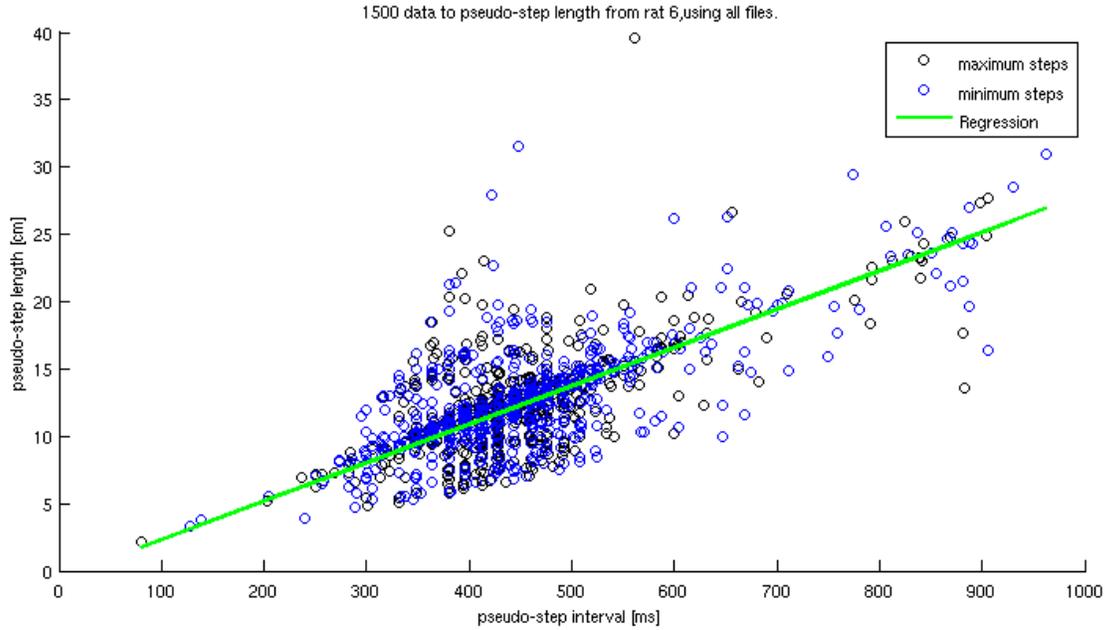


Abbildung 4.12: Korrelation von Schrittdintervall und Schrittweite aller Versuchsdaten der Ratte R6. Die Regression wurde mit der Funktion $f(x) = 0,028512 \cdot x - 0,50797$ durchgeführt.

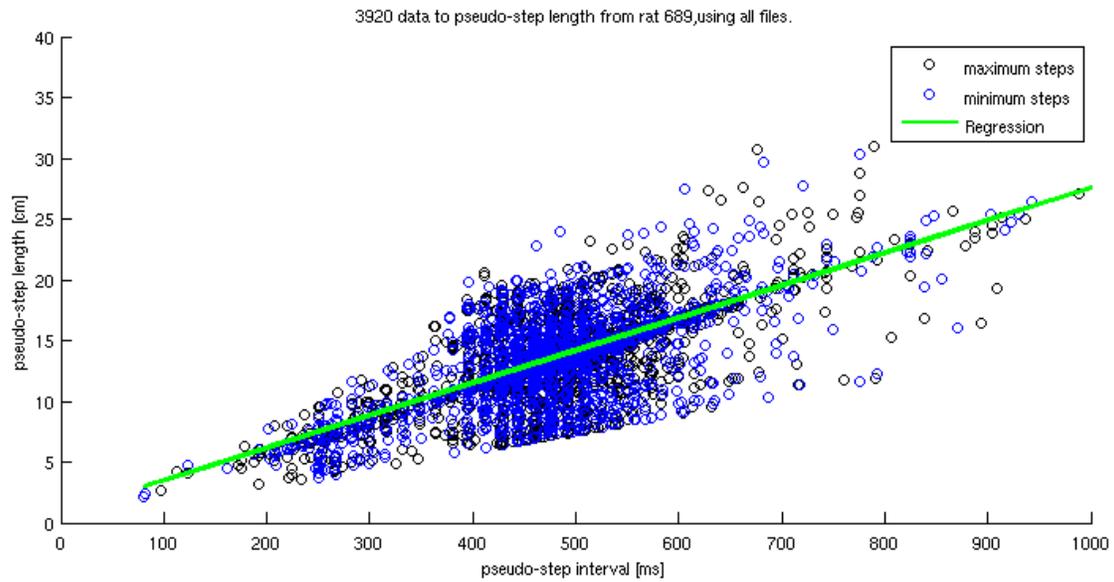


Abbildung 4.13: Korrelation von Schrittdintervall und Schrittweite aller Versuchsdaten der Ratte R689. Die Formel $f(x) = 0,026716 \cdot x + 0,85011$ beschreibt die Regression.

Kapitel 5

Diskussion und Ausblick

5.1 Diskussion

5.1.1 Allgemeine Statistik

In der allgemeinen Statistik in Kapitel 4.1 des Ergebnisteils wird allgemein ersichtlich, wie klein der zeitliche Anteil der gemessenen Läufe gegenüber der Versuchsgesamtzeit ist. Rechnet man die Gesamtversuchszeiten der Tiere R6 und R689 aus Tabelle 4.4 zusammen, kommt man auf über 70 Versuchsstunden, von denen nur insgesamt ca. 5 Stunden Laufband- und Sensordaten auswertbar sind. Dabei wird noch nicht berücksichtigt, dass durch die Funktion *merge_constant_areas()* aus diesen Daten noch geeignete Bereiche zur Auswertung herausgesucht werden. Es liegen dafür zwar keine konkreten Zahlen vor, aber wenn wir diesen Anteil großzügig mit $\frac{1}{4}$ überschlagen (vgl. Abb. 3.18), dann werden nur ca. 1,8% der protokollierten Daten zur Bestimmung der Schrittlänge verwendet.

Tabelle 4.4 enthält die durchschnittliche Anzahl der Läufe die Ratten pro Versuchsstunde gelaufen sind. Mit der Darstellung dieser Werte sollte gezeigt werden, dass die Sensorweste eindeutig die Bereitschaft zum Laufen herabsetzt. Den Daten ist dieser Zusammenhang allerdings nicht zwingend zu entnehmen. Zwar liegen sowohl bei R6, als auch bei R689 die Durchschnittswerte der Laufanzahl pro Stunde (LpS) bei den Versuchen ohne Mote höher als bei den Versuchen mit Mote, aber nur in geringem Maße. Der LpS-Wert von R6 für Läufe ohne Mote könnte allerdings durch zwei sehr lange Gewöhnungsdurchgänge zu Beginn von P4 auch stark verfälscht sein. In diesen Durchgängen gab es sehr lange Aktivitätspausen.

5.1.2 Laufparameter

Die Größe des Zeitintervalls eines Pseudo-Schrittes ist nach unten durch physikalische Gegebenheiten begrenzt. Die Ratte kann sich nur begrenzt schnell bewegen. Nach oben hin jedoch kann ein Zeitintervall sehr groß werden, nämlich dann, wenn sich die Ratte für einen bestimmten Zeitraum gar nicht bewegt. Daher handelt es sich bei der Verteilung der Pseudo-Schrittintervalle um eine Ungleichverteilung, wodurch der Median dem Mittelwert zu bevorzugen ist.

Die Darstellung der Pseudo-Schrittintervalle und Pseudo-Schrittlängen aufgeteilt in Pseudo-Schritte links und Pseudo-Schritte rechts (Abbildungen 4.2 und 4.4) wurde aufgrund der Beobachtung gewählt, dass bei den Versuchen mit der Zeit die Sensorweste verrutschte. Dies brachte das Versuchstier aus dem Gleichgewicht, was für eine Veränderung des Ganges sorgte. Schritte wurden mit einer Seite schneller ausgeführt, als mit der anderen Seite. Dies muss sich in den Sensordaten manifestieren. Die Überlegung geht nun dahin, dass sich das Verrutschen der Sensorweste gegebenenfalls durch eine Regelmäßigkeit in den Unterschieden der Pseudo-Schrittintervalle feststellen lässt. Die Fehler die durch diese Unterschiede in der Berechnung der Pseudo-Schrittlängen entstehen, könnten eventuell durch die Berücksichtigung dieser Regelmäßigkeit herausgerechnet werden. Allerdings müsste das Verrutschen erkennbar sein. Die Verteilung der Pseudo-Schrittlängen (Abb. 4.2) ist bei Pseudo-Schritten mit rechts breiter gestreut, als bei Pseudo-Schritten mit links. Allerdings sind die Mediane der Verteilungen mit 15,8 cm und 15,9 cm fast identisch. Leider kann aus Zeitmangel kein Signifikanztest mehr durchgeführt werden, und so bleibt die Frage zunächst offen, ob die höhere Variabilität der Pseudo-Schrittlängenverteilung rechts sich signifikant von der Verteilung links unterscheidet. Es kann auch keine Aussage getroffen werden, ob es hier wirklich einen Zusammenhang zwischen Verrutschen der Weste und Verteilung der Pseudo-Schrittlängen gibt.

Die Größe der Pseudo-Schrittlängen weist darauf hin, dass es sich nicht um wirkliche Schrittlängen handelt. Vielmehr handelt es sich um einen *stride*, der vom Zeitpunkt der maximalen Seitwärtsbewegung der Wirbelsäule bis zur nächsten maximalen Seitwärtsbewegung gemessen wird.

5.1.3 Korrelation der Laufparameter

In der Darstellung der Korrelation zwischen gemessenen Schrittintervallen und korrespondierenden gemessenen Geschwindigkeiten in den Abbildungen 4.6 und 4.7 scheint offenkundig, dass es einen bevorzugten Geschwindigkeitsbereich der Versuchstiere gibt,

der knapp unter 30 cm/s liegt. Zusätzlich gibt es vor allem im Schritintervall von 400 – 600 (Abb. 4.7) bzw. 320 – 520 (Abb. 4.6) eine Häufung an Datenpunkten. Die errechneten Regressionsgraden besitzen ähnliche Funktionen, die vor allem durch den konstanten Wert bestimmt werden.

Bei der Gegenüberstellung der berechneten Schrittweiten und der korrespondierenden Geschwindigkeiten (Abb. 4.9 und 4.10), erhält man eine lineare Regression augenscheinlich ziemlich gut ihre Korrelation wiedergibt. Auch hier ist ein Cluster von Datenpunkten erkennbar, der einerseits im Geschwindigkeitsbereich zwischen 25 und 30 cm/s liegt und andererseits im Bereich einer Pseudo-Schrittlänge von 10 – 18 cm (Abb. 4.10), bzw. 8 – 15 cm (Abb. 4.10) liegt.

Die lineare Regression der Korrelation der Schrittweiten und den Schritintervallen, ist nahezu eine Ursprungsgerade (vgl. Abb. 4.12 und 4.13). Weiterhin ist vor allem in Abbildung 4.13 erkennbar, dass die Menge der Datenpunkte durch eine obere und untere Ursprungsgerade begrenzt werden. Es sind erneut Datenhäufungen in dem bereits bekannten Zeitintervall und dem Schrittlängenbereich zu erkennen.

Die Regressionen des abgebildeten Einzelversuchs sind denen der entsprechenden kompletten Versuchsreihen prinzipiell ähnlich. Die Korrelationen der Laufparameter dieses zufällig ausgewählten Versuches scheinen dem Gesamtbild zu entsprechen.

Der Sensorknoten während der Versuche

Die Verwendung eines auf einer Lederweste angebrachten Sensorknotens zeigte in den Versuchen mehrere Nachteile. Die Bewegungsfreiheit der Tiere war eingeschränkt, was sich vor allem bei Richtungsänderungen bemerkbar machte. Der Sensorknoten verrutschte mit der Zeit und die Weste wurde von den Tieren angenagt. Manchmal konnten sich Versuchstiere auch aus der Weste befreien.

5.2 Ausblick

Es wurde erfolgreich eine Versuchsumgebung geschaffen, die die Protokollierung von Sensor- und Laufbanddaten ermöglicht, um Sensordaten mit Positions- und Geschwindigkeitsdaten zu synchronisieren. Weiterhin wurden Daten generiert und entsprechende Auswertungsroutinen zur Verarbeitung geschrieben. Es wurde ein Zusammenhang zwischen Laufparametern hergestellt, der nun in zukünftigen Arbeiten innerhalb des Ratpack-

Projekts genutzt werden kann, um in zusätzlichen Experimenten eine verbesserte Pfadrekonstruktion durchzuführen. Es kann ebenfalls versucht werden die gefundenen Zusammenhänge der Laufparameter auf den bereits bestehenden Daten von Martin Zeiß anzuwenden, um die Rekonstruktion der Pfadtrajektorien zu verbessern.

Vor einem Einsatz in einem semi-natürlichem oder gar natürlichem Habitat ist zu berücksichtigen, dass der bisher verfügbare Sensorknoten inklusive Tragweste eine nicht unerhebliche Behinderung für die Tiere darstellt. Die Beweglichkeit ist vor allem bezüglich der Wendigkeit des Tieres stark eingeschränkt, was nicht nur zu Problemen bei der Durchquerung des Rattenbaus führt, sondern auch starken Einfluss auf das Sozialverhalten nehmen kann. Mit Sensorknoten ausgerüstete Tiere haben einen starken Nachteil im Kampf um Dominanz und eventuell bei der Paarung gegenüber unausgerüsteten Individuen. Der Einsatz eines Sensorknotens dieser Größenordnung bringt so möglicherweise nicht die gewünschten Ergebnisse hinsichtlich des natürlichen Verhaltens in natürlicher Umgebung. Allerdings können im Zuge der technischen Entwicklung für spätere Versionen des Sensorknotens diese Nachteile wegfallen, indem anstelle von PCBs mehr mit On-Chip-Design gefertigt werden kann. Die Tragemontur kann darüber hinaus ganz wegfallen, indem der Sensorknoten implantiert wird. Das Ziel in näherer Zukunft kann jedoch erst einmal der Ersatz des 2D-Kompasses durch einen 3D-Kompass sein.

Literaturverzeichnis

- [Cal63] J.B. Calhoun. *The Ecology and Sociology of the Norway Rat*. U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Bethesda, Maryland, 1963.
- [Chi05] Chipcon. *Chipcon AS SmartRF® CC2430 PRELIMINARY*. Chipcon AS, Riedberghof 3 D-74379 Ingersheim, (rev. 1.01) edition, September 15 2005.
- [Fal03] K. Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. Technical report, Intel Research, Berkeley, February 26 2003.
- [Fre06] Freescale Halbleiter Deutschland GmbH, Technical Information Center Schatzbogen 7 81829 Muenchen, Germany. *Freescale Semiconductor Technical Data Document Number: MMA7260QT*, rev 0 edition, October 2006.
- [FSS⁺02] M.S. Fischer, N. Schilling, M. Schmidt, D. Haarhaus, and H. Witte. Basic limb kinematics of small therian mammals. *The Journal of Experimental Biology*, 205:1315–1338, 2002.
- [Han04a] A. Hanson. History of the norway rat (*rattus norvegicus*), November 2003, 2004. accessed November 2009.
- [Han04b] A. Hanson. Wild norway rat behavior, November 2003, 2004. accessed November 2009.
- [Hon06] Honeywell International Inc., 12001 Highway 55 Plymouth, MN 55441 Tel: 800-323-8295. *Digital Compass Solution HMC6352 Form No. 900307*, rev d edition, January 2006.
- [ICA] Icarus – international cooperation or animal research using space.
- [Inv07] InvenSense, Inc., 1197 Borregas Avenue, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A. *Integrated Dual-Axis Gyro IDG-300 Datasheet*, ds-idg-0300q-00-02 edition, 2007.
- [IUC08] IUCN. *Rattus norvegicus*, 2008.

- [JT03] M. P. Johnson and P. L. Tyack. A digital acoustic recording tag for measuring the response of wild marine mammals to sound. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28(1):3–12, January 2003.
- [Kap06] P. Kappeler. *Verhaltensbiologie*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [Ken05] Kenyon college - rat anatomy tutorial, October 11th 2005. accessed November 2009.
- [L0909] Lithium-polymer-akkumulator, November 2009. accessed November 26, 2009.
- [MM01] J. Millspaugh and J. M. Marzluff. *Radio Tracking and Animal Populations*. Academic Pr Inc, 2001.
- [MMB⁺09] R. J. Moll, J. J. Millspaugh, J. Beringer, J. Sartwell, Z. He, J. A. Eggert, and X. Zhao. A terrestrial animal-borne video system for large mammals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 66(2):133–139, May 2009.
- [NWK00] F. Neuhäusser-Wespy and B. König. Living together, feeding apart: How to measure individual food consumption in social house mice. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 32(1):169–172, 2000.
- [OTLW08] O. Osechas, J. Thiele, J. Á. Bitsch Link, and K. Wehrle. Ratpack: Communication in a sparse dynamic network. Seattle, Washington, USA., August 17 – 22 2008. SIGCOMM’08.
- [Rad07] Radiocrafts. *Radiocrafts AS RC230x Data Sheet*. Radiocrafts AS, (rev. 1.2) edition, ©2007.
- [Sen08] Sensinode Ltd. *NanoStack Manual v1.0.3*, 2008.
- [STL08] P. Schwedhelm, J. Thiele, and J. Á. Bitsch Link. Ratpack: Analysis of rodent ultrasonic vocalization using wearable sensor nodes. 2008.
- [WK05] I. Q. Whishaw and B. Kolb, editors. *the behavior of the laboratory rat - a handbook with tests*. Oxford University Press, 2005.
- [ZT09] M. Zeiß and J. Thiele. Rekonstruktion von natürlichen laufbewegungen der ratte mit hilfe von magnet-und inertialsensoren. Master’s thesis, Lehrstuhl Kognitive Neuowissenschaften, Universität Tübingen, März 2009.

Selbständigkeitserklärung

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

Tübingen, den 18. Dezember 2009

Thomas Schulte

