VierLING
Vierbeinige Laufmaschine mit integrierter Neuronaler Gleichgewichtssteuerung

Thomas Röfer

ZKW Bericht Nr. 3/94

ZENTRUM FÜR KOGNITIONSWISSENSCHAFTEN
Universität Bremen

Herausgeber
Bernd Krieg-Brückner, Gerhard Roth, Helmut Schwegler

ISSN 0947-0204

© 1994 bei den Herausgebern

Kontaktadresse:
Dipl. Inform. Thomas Röfer
Institut für Formale Methoden der Softwaretechnik und
Zentrum für Kognitionswissenschaften
FB 3 Mathematik und Informatik
Universität Bremen
Postfach 330 440
D-28334 Bremen
Tel.: +49-421-218-3495
Fax: +49-421-218-3054
Telex: 245 811 uni D
e-mail: roefer@informatik.uni-bremen.de

ZKW

VierLING
Vierbeinige Laufmaschine mit Integrierter Neuronaler Gleichgewichtssteuerung

Thomas Röfer

ZKW Bericht Nr. 3/94

September 1994

Zusammenfassung

Laufmaschinen sind ein aktuelles Thema der Forschung. Sie können sich in Gebieten bewegen, in denen radgetriebene Fortbewegungsmittel versagen. Aufgrund der enormen Komplexität ihrer Beweglichkeit sind neue Architekturen notwendig, um solche Maschinen sicher zu steuern. Dieser Bericht beschreibt die adaptive Steuerung der vierbeinigen Laufmaschine "VierLING". Die Maschine wurde aus Fischertechnik konstruiert und ist recht wackelig. Dennoch lernt sie, beim Laufen nicht umzufallen. Sie tut dies durch Versuch und Irrtum, allein aufgrund der Informationen, die ihr ihre beschränkte Sensorik liefert. Die sensorischen Daten werden von künstlichen neuronalen Netzen verarbeitet und gelernt. Die Maschine erwirbt ihr "Wissen" ohne Lehrer und ist daher in der Lage, sich nachträglich an Veränderungen in der Umwelt oder eigene Verschleißerscheinungen anzupassen.

ZENTRUM FÜR KOGNITIONSWISSENSCHAFTEN

Universität Bremen

Inhalt

1. Einleitung 1
1.1. Motivation 1
1.2. Aufbau des Berichts 1
2. Überblick über Laufmaschinen 2
2.1. Motivation 2
2.2. Historischer Überblick 3
2.3. Teilprobleme bei der Realisierung 7
2.4. Zusammenfassung 12
3. Fischertechnik-Laufmaschine 13
3.1. Abgrenzung zu anderen Laufmaschinen 13
3.2. Komponenten der Laufmaschine 14
4. Steuerung der Laufmaschine 17
4.1. Grundbewegungsteuerung 17
4.2. Gangsteuerung 26
4.3. Neigungssteuerung 29
4.4. Schrittsteuerung 38
4.5. Zusammenfassung 41
5. Ergebnisse 42
5.1. Geländebeschaffenheit 42
5.2. Beispieldurchlauf 42
5.3. Bewertung 45
6. Zusammenfassung 46
7. Ausblick 47
8. Literatur 48

1. Einleitung

In diesem Bericht wird die Steuerung der aus Fischertechnik konstruierten Laufmaschine *VierLING* beschrieben. Eine Laufmaschine ist ein mobiler Roboter, der sich mit Hilfe von Beinen fortbewegt. *VierLING* steht für *Vierbeinige Laufmaschine mit Integrierter Neuronaler Gleichgewichtssteuerung* und ist der Titel meiner gleichnamigen Diplomarbeit [Röf93].

1.1. Motivation

Während meiner Arbeit in dem studentischen Projekt FORANN (FORmalisierung und Anwendung Neuronaler Netze) habe ich mich bereits frühzeitig mit der Steuerung von Robotern durch künstliche neuronale Netze beschäftigt. Erste Versuche unternahm ich in [Röf92a], wo ein mit [BeiHap92] simulierter Roboter von zwei neuronalen Netzen gesteuert wurde. Damals stellte ich fest, daß Simulationen die Wirklichkeit zu idealisiert wiedergeben. Viele Probleme realer Hardware, wie z.B. Ungenaugkeiten der Mechanik oder der von Sensoren gemessenen Werte, treten in Simulationen nicht auf und können daher auch nicht gelöst werden. Daher verwendete ich für [Röf92b] bereits einen realen Roboter, der - wie die hier vorgestellte Laufmaschine - aus Fischertechnik konstruiert war. Aufgrund meiner positiven Erfahrungen mit dem Roboter entschloß ich mich, wieder einen Fischertechnik-Roboter zu steuern, nur sollte diesmal der Komplexitätsgrad höher und damit einer Diplomarbeit angemessen sein. Da das Gebiet der Laufmaschinen ein faszinierendes Thema darstellt, beschloß ich, eine Laufmaschine zu bauen. Im Gegensatz zu anderen Maschinen neuerer Entwicklung, die meist sechsbeinig sind, sollte sie nur vier Beine haben, um den Hardware- und Verkabelungsaufwand möglichst gering zu halten. Diese Materialersparnis wird durch einen erhöhten Steuerungsaufwand erkauft, der dafür sorgt, daß die Maschine beim Gehen nicht umfällt.

1.2. Aufbau des Berichts

Kapitel 2 führt in das Thema der Laufmaschinen ein. Neben der Motivation, Laufmaschinen zu konstruieren, werden auch ihre Vor- und Nachteile behandelt. Ein historischer Rückblick zeigt die Entwicklung dieses Bereiches der Robotik. Die Fischertechnik-Laufmaschine VierLING wird im 3. Kapitel vorgestellt. Dabei wird die Funktionsweise ihrer wesentlichen Elemente erklärt. Danach wird im 4. Kapitel die Steuerung dieser Laufmaschine beschrieben. Sie besteht aus vier Modulen: der Grundbewegungs-, Gang-, Neigungs- und Schrittsteuerung. In Kapitel 5 werden ein Beispiel des Lauftrainings von VierLING beschrieben und die dabei auftretenden Phänomene erklärt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 6 und einem Ausblick auf weitere Entwicklungen in Kapitel 7.

2. Überblick über Laufmaschinen

Dieses Kapitel soll in den Bereich der Laufmaschinen einführen und eine Übersicht über historische und aktuelle Entwicklungen auf diesem Sektor geben.

2.1. Motivation

Eine Laufmaschine ist ein mobiler Roboter, der sich mit Hilfe von Beinen fortbewegt. Damit stellen Laufmaschinen eine Alternative zu Rad- bzw. Kettenfahrzeugen dar. Im Gegensatz zu Radfahrzeugen, die sich nur auf Straßen oder Schienen bewegen können, sind Laufmaschinen in der Lage, sich in unstrukturiertem Gelände zu bewegen. Ihre Beweglichkeit ist dabei höher als die von Kettenfahrzeugen, die auf einen halbwegs ebenen und zusammenhängenden Untergrund angewiesen sind. Kettenfahrzeuge haben zudem eine schlechte Energieausnutzung und verursachen große Umweltschäden. Laufmaschinen haben daher ihr Haupteinsatzgebiet dort, wo man keine Straßen bauen kann oder aus ökologischen oder finanziellen Gründen nicht bauen will.
[BerFie91] nennen folgende Vorteile von Laufmaschinen gegenüber Rad- und Kettenfahrzeugen:

- Laufmaschinen benötigen nur einige, von den Beinen erreichbare Aufsetzpunkte; bei Fahrzeugen wird ein kontinuierlicher Pfad vorausgesetzt. Die Aufsetzpunkte können so gewählt werden, daß Hindernisse oder Kanten überstiegen werden, während ein Radfahrzeug unter Umständen keinen Pfad finden kann.
- Laufmaschinen haben wesentlich mehr Freiheitsgrade als Radfahrzeuge. Dadurch ist eine aktive Entkopplung der Körperbewegung von Bodenunebenheiten möglich, so daß eine sehr gleichmäßige, genau definierte Bewegung erreicht werden kann.
- Im Gegensatz zu Radfahrzeugen kann bei Laufmaschinen dynamische Stabilität sehr vorteilhaft genutzt werden. Dynamische Stabilität ermöglicht z.B. das Überspringen von Hindernissen und trägt damit nochmals zu einer deutlichen Steigerung der Mobilität bei. Gleichzeitig kann dadurch auch die Geschwindigkeit erhöht und Energie eingespart werden.

Die Vorteile der Laufmaschinen stellen gleichzeitig die größten Probleme für ihre Steuerung dar. Letztere ist so kompliziert, daß ein Mensch sie nicht vollständig übernehmen kann (s. Abschnitt 2.2.). Daher muß der Bediener (Fahrer) einer Laufmaschine durch eine automatische Steuerung zumindest unterstützt werden. Trotz umfangreicher Forschungen auf diesem Gebiet existieren bisher noch keine wirklich vollständigen und praktikablen Lösungen.
Laufmaschinen benötigen eine aufwendige Sensorik, um die Struktur des Untergrundes erfassen und die Beinbewegungen entsprechend anpassen zu können. Dabei müssen die Beine so geführt werden, daß die Maschine nicht stolpert, und Aufsetzpunkte für die Beine gefunden werden, die das Gewicht der Maschine tragen können. Außerdem muß stets gewährleistet sein, daß die Maschine nicht umfällt.

2.2. Historischer Überblick

Bereits im vorherigen Jahrhundert wurden Untersuchungen zu Laufmaschinen durchgeführt und erste Konzepte für deren Realisierung ausgearbeitet. 1850 entwickelte Chebyshev einen Mechanismus, mit dem ein Fuß eine Bahn beschreibt, die für das Laufen günstig ist (s. Abb. 1). Zwei dieser Mechanismen sollten phasenversetzt angeordnet werden, so daß ein Fuß stets den Boden berührt, während der andere in der Luft ist [Rai91].
Muybridge machte im 1872 die ersten Photos der Laufbewegung von Tieren. Dies ermöglichte zum ersten Mal ein Studium des Laufverhaltens von Tieren und damit von vierbeinigen Individuen, deren Bewegungen man zuvor wegen ihrer Geschwindigkeit nicht nachvollziehen konnte. 1893 ließ sich L. A. Rygg sein *Mechanical Horse* patentieren, das einen Pedalantrieb hatte und mit den Zügeln gelenkt wurde [Rai91]. Die Laufbewegung war durch die Mechanik fest vorgegeben. Die Maschine wurde allerdings nie gebaut.
Erst in den späten 50er Jahren unseres Jahrhunderts wurden Versuche unternommen, die Beinbewegungen flexibler zu machen. Diese zusätzlichen Freiheitgrade mußten von dem Fahrer kontrolliert werden. Der *General Electric Walking Truck*, der von Ralph Mosher 1968 entwickelt wurde, war eine dieser Maschinen [LisMos68]. Der *Walking Truck* lief mit einer Geschwindigkeit von etwa 8 km/h, konnte größere Hindernisse überwinden und sogar einen Geländewagen aus dem Schlamm ziehen. Allerdings war die Bedienung der Maschine für den Fahrer so anstrengend, daß er sie höchstens 20 Minuten steuern konnte.
Aus diesen Erfahrungen entstand die Erkenntnis, daß Laufmaschinen eine vollautomatische Steuerung haben müßten, um den Fahrer zu entlasten. Ebenfalls 1968 wurde von Frank und McGhee das *Phoney Poney* vorgestellt, das bereits eine digitale Steuerung besaß [BerFie91]. *Phoney Poney* war allerdings nur ein kleines Gerät, beschränkte sich auf Schritt und Trab in Vorwärtsrichtung und war bei weitem nicht so leistungsfähig wie der *Walking Truck*.
Eine der ersten industriell genutzten Laufmaschinen war *Big Muskie* [Rai91]. Die 1969 gebaute Maschine wog 12.000 Tonnen und wurde zum Abbau von Kohle verwendet. Die Maschine nutzte ihren Rumpf als weiteres Bein, d.h. sie stand entweder auf ihren Beinen und bewegte den Rumpf oder sie stand auf dem Rumpf und bewegte die Beine.

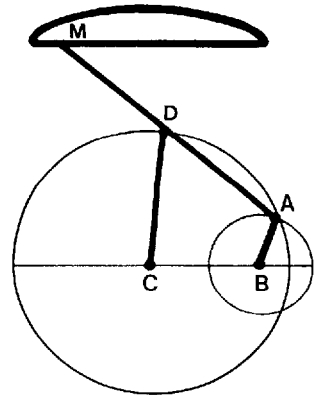
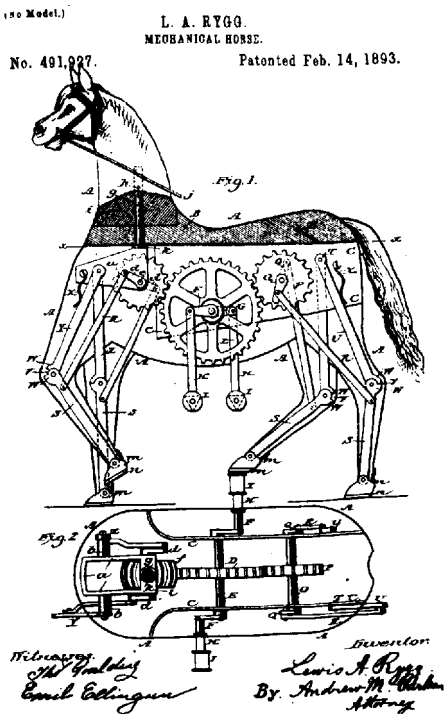


Abb. 1: *Mechanismus zur Beinbewegung in frühen Laufmaschinen. Wenn der Hebel AB rotiert, bewegt sich der Ausgabepunkt M entlang der geraden Strecke, während der Fuß den Boden berührt, und entlang des Bogens, wenn er nach vorn gesetzt werden soll.*


(No Model.)

L. A. RYGG.

MECHANICAL HORSE.

No. 491,827. Patented Feb. 14, 1893.

Fig. 1.

Fig. 2.

Witnesses:
Emil Ellingen

Inventor:
Lewis A. Rygg
By. Andrew M. Clarke
Attorney

Abb. 2: *Das Mechanical Horse, das 1893 für Lewis A. Rygg patentiert wurde.*

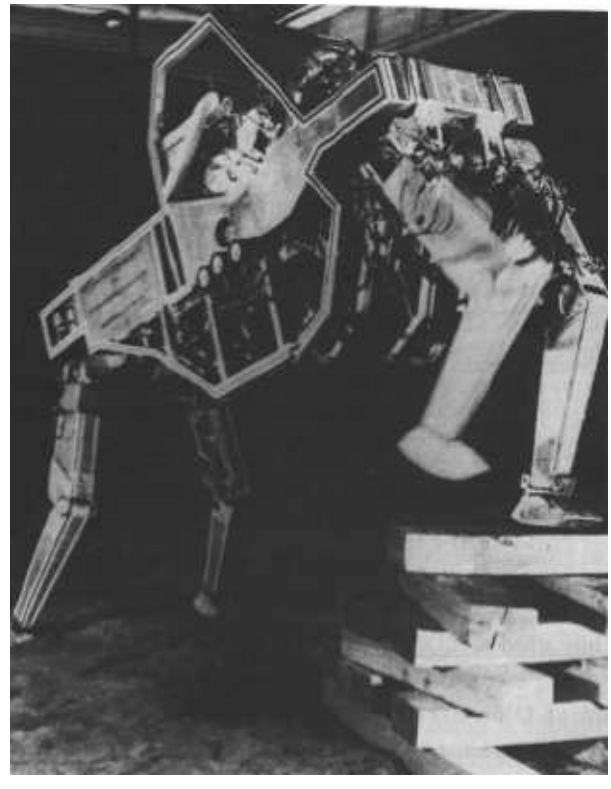


Abb. 3: *Der Walking Truck von General Electrics*

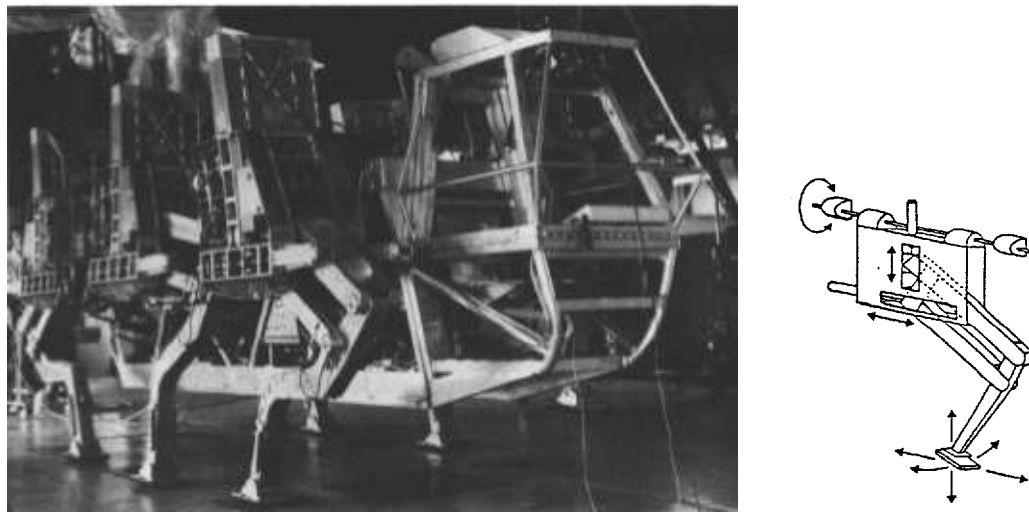


Abb. 4: *Das Adaptive Suspension Vehicle und eine Prinzipdarstellung des verwendeten Pantograph-Mechanismus, bei dem die beiden Hauptbewegungsrichtungen entkoppelt werden. Nur bei der Seitwärtsbewegung folgt der Fuß einer Kreisbahn.*

1977 bauten Robert McGhee und seine Gruppe an der Ohio State University die sechsbeinige Laufmaschine *Hexapod*, die verschiedene Gangarten beherrschte, sich drehen, seitwärts laufen und kleinere Hindernisse überwinden konnte [Rai91]. Die Beine waren - wie bei Insekten - in zwei Dreierreihen seitlich montiert. Ein Computer löste kinematische Gleichungen, um die 18 Motoren, die die Beine bewegten, steuern zu können.
1980 entwickelten Hirose und Umetani den *Pantograph*-Mechanismus, eine Stangenkonstruktion, mit der sich die einzelnen Bewegungsrichtungen eines Beines entkoppeln lassen (s. Abb. 4)[Heg92].
Diese Entwicklung wurde 1982 von K. Waldron an der Ohio State University aufgegriffen und bildet die Basis für das bisher ehrgeizigste und aufwendigste Laufmaschinenprojekt, das *Adaptive Suspension Vehicle* [WalVoh84]. Diese 1987 fertiggestellte Maschine hatte sechs Beine, wog drei Tonnen und bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 8 km/h. Sie war nicht für eine spezielle Anwendung gedacht, sondern stellte eine Demonstration des Machbaren dar. Es kamen erstmals Sensoren zum Einsatz, die das Gelände erfaßten (Laser Range Finder). Allerdings gab es bei der Auswertung der Sensordaten Schwierigkeiten wegen der begrenzten Rechnerkapazität.
Ein weiteres Projekt dieser Größenordnung wurde 1988 an der Carnegie Mellon University begonnen [BarHeb89]. *Ambler* soll sich auf fremden Planeten völlig autonom bewegen und dabei fehlertolerant gegenüber ausfallenden Mechanikteilen sein. *Ambler* ist 3,5 m hoch und hat sechs Beine, von denen immer nur eines bewegt wird, damit er auf den anderen fünf stabil stehen kann. Eine Besonderheit ist, daß sich die Beine um den gesamten Rumpf herum bewegen können, ohne sich dabei gegenseitig zu blockieren (s. Abb. 6). Der Roboter soll Steigungen bis zu 60% überwinden können und sich mit einer Geschwindigkeit von einem Kilometer pro Tag bewegen. Ähnliche Einsatzmöglichkeiten schlägt Brooks für seine 35 cm lange, sechsbeinige Laufmaschine *Attila* vor [Bro87]. Ganze Heerscharen dieser Maschine sollen die Erforschung fremder Planeten ermöglichen.
Alle bisher vorgestellten Laufmaschinen verwirklichen statisch stabile Gangarten, d.h. ihre Bewegungen können jederzeit angehalten werden, ohne daß die Maschinen umfallen. Das

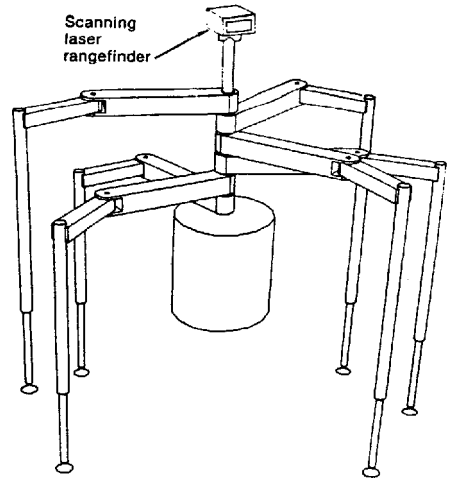


Abb. 6: Ambler

liegt daran, daß bei ihnen der Schwerpunkt der Maschine immer zwischen den Standbeinen liegt, d.h. den Beinen, auf denen die Maschine gerade steht.
M. H. Raibert war einer der ersten, der Laufmaschinen baute, die ihre Stabilität aus der Dynamik erhielten, also umfallen würden, wenn man sie anhält. Um sich nicht mit der Koordination der Beine beschäftigen zu müssen, konstruierte Raibert zuerst einen Einbeiner, die *One-Legged Hopping Machine* [Rai91]. Diese hielt rechnergestützt ihr Gleichgewicht und konnte auch äußere Einflüsse wie z.B. Stöße kompensieren. Durch einfache Erweiterungen konnte der Algorithmus auch die *Biped-* bzw. *Quadruped Running Machine* steuern. Die *Biped Running Machine* war die erste Laufmaschine, die einen Salto beherrschte, zumindest in 90% aller Fälle [BerFie91]. Die *Quadruped Running Machine* verwendete den gleichen Algorithmus wie die zweibeinige Variante, jedoch wurden jeweils zwei Beine zu einem *virtuellen* Bein zusammengefaßt. Je nach dem, welche Beine zusammengefaßt wurden, ent-

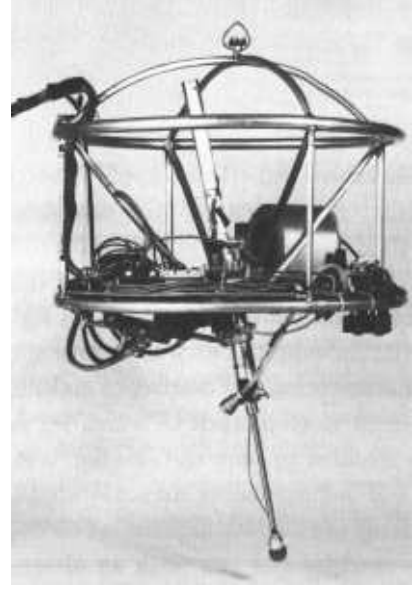


Abb. 5: *Die One-Legged-Hopping-Machine*

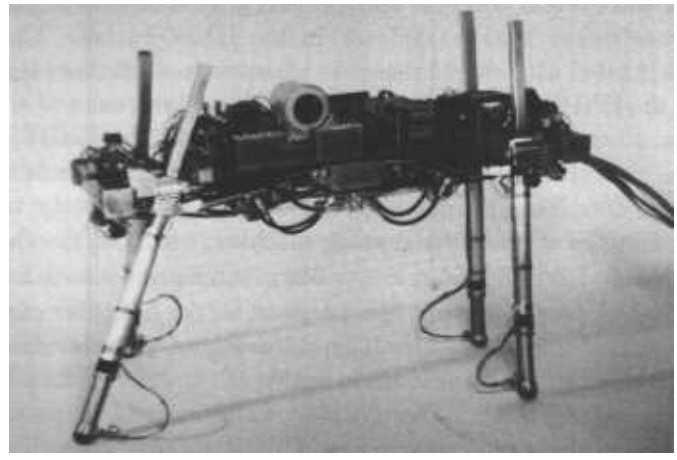


Abb. 7: *Die Four-Legged-Running-Machine*

standen verschiedene Gangarten, die auch bei Tieren zu beobachten sind [Rai91].
Schon in den siebziger Jahren begann Kato, zweibeinige Laufmaschinen zu bauen [BerFie91]. Nachdem diese zuerst durch große Fußflächen statisch stabil liefen, bewegen sie sich mittlerweile dynamisch stabil und sind mit Kameras ausgestattet, um Hindernisse erkennen und übersteigen zu können. Die Grundlagen für ihre menschenähnliche Gangart legte Vukobrativic, der mit seinem *Exosceletons*, das er seit 1967 entwickelt und ständig verbessert, sowohl einem Metallskelett als auch gelähmten Menschen bedingt das Gehen ermöglicht.
Die meisten Laufmaschinen, die einen dynamisch stabilen Gang realisieren, benötigen einen immensen Rechenaufwand, um das Gleichgewicht zu halten, und funktionieren nur auf ebenem Untergrund [BerFie91].
Erste Versuche, einen dynamisch stabilen Gang lernen zu lassen, unternahmen M. Snaith und O. Holland [SnaHol92]. Ihre vierbeinige Laufmaschine bewegte sich bei einer Schrittweite von 10 cm mit einer Geschwindigkeit von 25 cm/sek. Die Steuerung basiert auf einem System von Reflexen und neuronaler Hardware.

2.3. Teilprobleme bei der Realisierung

Das Hauptziel aller Entwicklungen besteht in der Konstruktion von Maschinen, die eine energetisch effiziente Bewegung erlauben und in unterschiedlichem Gelände verwendet werden können. Dabei ist sowohl an strukturiertes Gelände, wie z.B. Häuser mit Treppen, als auch an unstrukturiertes gedacht, das aus Unebenheiten, Hindernissen und Boden unterschiedlicher Festigkeit besteht. Die Laufmaschinen sollten eine vom Untergrund unabhängige Fortbewegung ermöglichen, zuverlässig und störunempfindlich sein.
Mit folgenden Teilaufgaben muß sich der Entwickler von Laufmaschinen befassen [BerFie91]:

- Bei der Konstruktion der Mechanik ist vor allem die Struktur, Anzahl und Anordung der Beine wichtig. Die hier getroffenen Entscheidungen bestimmen zum einen Flexibilität und Effizienz der Maschine, zum anderen aber auch die Komplexität der Steuerung. Neben der Struktur müssen natürlich auch die Dimensionen und Werkstoffe gewählt

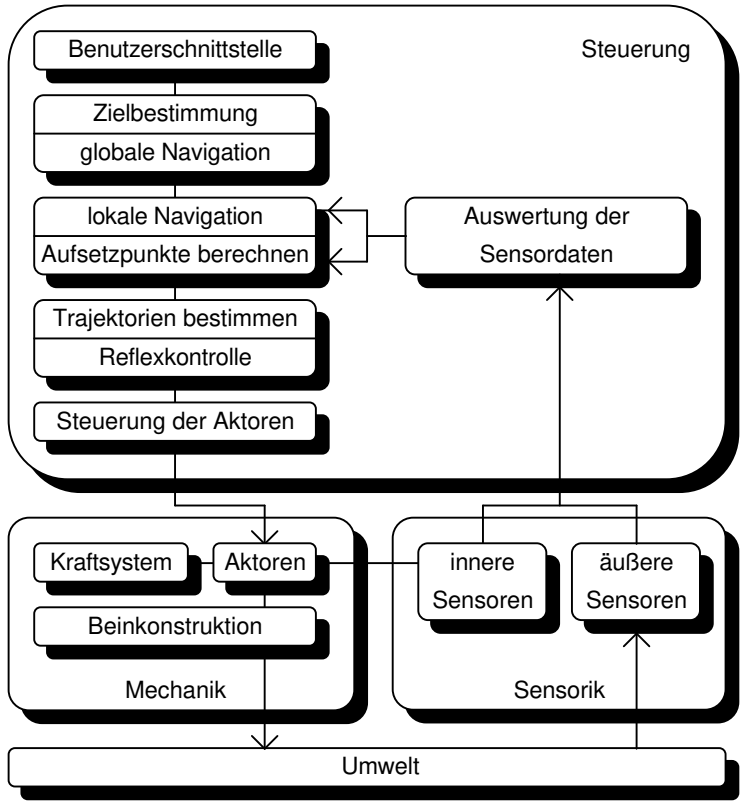


Abb. 8: *Struktur einer Laufmaschine [BerFie91]*

werden. Leistung und Art der Aktoren sowie des Kraftsystems müssen bestimmt werden.

- Die Wahl der Sensoren hängt prinzipiell vom Einsatz der Laufmaschine ab. Die Sensorpalette reicht dabei vom einfachen Berührungssensor über Kraft- bzw. Momentenfühler und Kamera bis zum *Laser Range Finder*. Da die Möglichkeiten des Systems wesentlich von der Wahrnehmung abhängen, ist genau zu prüfen, wieviel Umweltdaten notwendig sind und wieviele von den Prozeßrechnern in Echtzeit verarbeitet werden können.
- Die Steuerung muß die Aktoren unter Zuhilfenahme der Sensordaten derart ansprechen, daß die geforderten Bewegungen ausgeführt werden. Dazu sind Algorithmen notwendig, die folgendes leisten: lokale Navigation, geeignete Fußaufsetzpunkte suchen, Trajektorienbestimmung, Reflexkontrolle, Steuerung der Aktoren, Auswertung der Sensordaten. Falls ein autonomes System zu entwickeln ist, kommen noch globale Navigation und Zielfestlegung hinzu. Zusätzlich ist eine geeignete Hardware zu wählen oder zu entwickeln, um diese Algorithmen schnell genug abarbeiten zu können.

2.3.1. Mechanik

Wie die Mechanik einer Laufmaschine zu konstruieren ist, hängt unmittelbar von der geplanten Anwendung ab, z.B. vom Einsatzgebiet der Maschine oder von ihrer Größe. [BerFie91] behaupten, daß sich die Komplexitäten von Steuerung und Mechanik umgekehrt

proportional zueinander verhalten. Im folgenden werden die wichtigsten Merkmale der Laufmaschinenmechanik aufgezählt:

- Die Anzahl der Beine bestimmt die Gangarten und die Stabilität der Maschine beim Laufen. Bisher wurden Maschinen mit einem bis zu acht Beinen realisiert. Einbeiner müssen dynamisch die Balance halten können, aber keine Beinkoordination vornehmen. Um stabil stehen zu können, werden mindestens drei Beine benötigt. Um statisch stabil laufen zu können, braucht die Laufmaschine mindestens vier Beine. Bei sechs oder mehr Beinen ist ein statisch stabiler Gang mit einer Geschwindigkeit möglich, die der Bewegungsgeschwindigkeit der einzelnen Beine entspricht, d.h. alle Beine sind ständig in Bewegung. Hat eine Maschine mehr Beine als sie für ihre Gangart benötigt, kann sie den Ausfall dieser überschüssigen Beine tolerieren. Je mehr Beine eine Maschine hat, desto größer ist der Steuerungs- und Koordinierungsaufwand für diese Beine, insbesondere dann, wenn ein möglicher Defekt einiger Beine kompensiert werden soll. Außerdem treibt eine große Anzahl an Beinen den Energieverbrauch in die Höhe.
- Die meisten Laufmaschinen ordnen ihre Beine in zwei Reihen an, wodurch die Hauptbewegungsrichtungen (vorwärts und rückwärts) vorgegeben werden. Eine kreisförmige Anordnung - wie bei *Ambler* - ist ebenfalls möglich.
- Aufgrund der Bauweise der Beine teilt man Laufmaschinen in Säuger-, Insekten- und Reptilientyp ein. Maschinen vom Säugertyp, bei denen der Schwerpunkt relativ hoch liegt, eignen sich besonders für dynamisch stabile Gangarten.
- Die Konstruktion der Beine ist sehr wichtig, da diese zum einen mechanisch sehr stark belastet werden, zum anderen einen großen Einfluß auf die Effizienz der Maschine haben. Die starke Beanspruchung durch Stöße ist hauptsächlich ein Problem des verwendeten Materials und läßt sich konstruktiv nur teilweise lösen. Die Effizienz des Ganges hängt allerdings ganz wesentlich von der Konstruktion ab, z.B. kann dadurch Treibstoff gespart werden, daß die Energie, die beim Belasten eines Beines auftritt, wieder zum Anheben desselben genutzt wird. Außerdem bestimmt sich durch die Bauweise der Beine auch deren Gewicht, das aus Gründen des Energieverbrauchs möglichst gering sein sollte.
- Die Mobilität einer Laufmaschine beruht auf der Anzahl der Freiheitsgrade ihrer Beine. Bei den meisten Konstruktionen sind dies drei pro Bein. Durch weitere Freiheitsgrade kann ein ruhigerer Gang mit weicheren Bewegungen und eine Verbesserung eines dynamisch stabilen Gangs erreicht werden, z.B. haben Zweibeiner oft deutlich mehr als drei Freiheitsgrade pro Bein.

Die Beine von Laufmaschinen sind großen Belastungen ausgesetzt. Insbesondere beim dy-

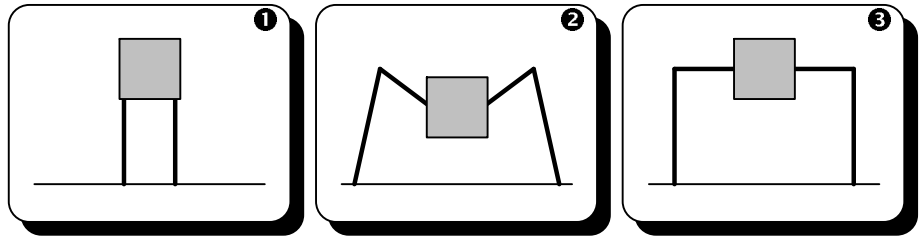


***Abb. 9:** Bauarten der Beine: ❶ Säugertyp, ❷ Insektentyp, ❸ Reptilientyp*

namisch stabilen Laufen werden sie zeitweise mit einem Vielfachen des Körpergewichtes der Laufmaschine belastet. Für große Maschinen gibt es kaum Materialien, die den auf sie einwirkenden Kräften lange standhalten können, zumal die Forderung nach der Stabilität der Beine im Gegensatz zu der nach einem geringen Gewicht steht.
Bei Laufmaschinen wird das Energiesystem nicht gleichmäßig sondern impulsartig belastet, was bei größeren Maschinen zu Schwierigkeiten bei der Energieversorgung führt. Kleinere Maschinen haben dagegen das Problem, daß sie keinen Benzinmotor mitführen können, so daß ein Kompromiß zwischen der Leistungsfähigkeit und dem Gewicht der mitgeführten Batterien gefunden werden muß.

2.3.2. Sensorik

Bei Rad- und Kettenfahrzeugen übernimmt der Fahrer selbst die Steuerung. Er stellt dabei auch den größten Teil der Sensorik, z.B. seine Augen oder Ohren. Das Fahrzeug verfügt nur über einfache, den Fahrer unterstützende Sensoren, wie z.B den Tachometer oder die Tankuhr. Wie bereits erläutert wurde, müssen Laufmaschinen dagegen hauptsächlich von einer automatischen Steuerung gelenkt werden. Daher müssen sie auch eine Sensorik bereitstellen, die die Steuerung mit den notwendigen Informationen versorgt. Dabei wird zwischen inneren und äußeren Sensoren unterschieden:

- Innere Sensoren überwachen den internen Zustand der Maschine. Sie messen z.B. Gelenkwinkel, Gelenkwinkelgeschwindigkeiten oder die Neigung der Maschine.
- Äußere Sensoren können wesentlich komplexer sein. Von Berührungssensoren über Abstandssensoren bis zu Videokameras und Laser Range Findern kann eine Laufmaschine mit Sensorik ausgerüstet werden. Je mehr und je leistungsfähigere Sensoren verwendet werden, desto besser und gleichmäßiger kann sich die Laufmaschine bewegen, aber desto komplizierter ist die Realisierung ihrer Steuerung.

Die verschiedenen äußeren Sensoren verleihen einer Laufmaschine unterschiedliche Fähigkeiten:

- Berührungssensoren ermöglichen der Maschine, auf Kontakte mit dem Boden oder einem Hindernis zu reagieren. Da die Berührung bereits eingetreten ist, wenn die Sensoren sie melden, kann die Maschine nur sehr schnell und ruckhaft reagieren.
- Abstandssensoren können Hindernisse schon vor einer Kollision ausmachen und ermöglichen damit der Steuerung, Hindernisse zu umgehen, ohne sie zu berühren, wodurch der Gang gleichmäßiger wird.
- Durch die Verwendung von Videokameras kann die Laufmaschine das Gelände der weiteren Umgebung erfassen. Um die Ermittlung der dreidimensionalen Geländestruktur aus dem zweidimensionalen Bild der Kamera zu erleichtern, werden *Laser Range Finder* benutzt (s. Abb. 10). Diese projezieren ein Gitter auf das Gelände, das aus anderem Winkel von einer Kamera erfaßt wird. Durch die Verzerrungen des Gitters lassen sich die dreidimensionalen Strukturen des Geländes ermitteln. Durch diese Technik kann die Steuerung eine längerfristige Streckenplanung vornehmen, die potentiellen Hindernissen schon frühzeitig ausweicht.

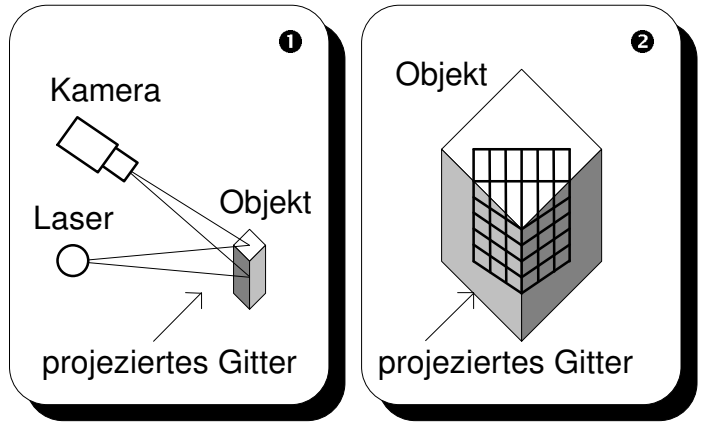


Abb. 10: *Laser Range Finder: ❶ Der Laser projeziert ein gleichmäßiges Gitter auf das Objekt, das von der Kamera aufgenommen wird. ❷ Das Kamerabild zeigt dieses Gitter verzerrt, wodurch auf die Form des Objekts geschlossen werden kann.*

Da die Auswertung leistungsfähiger Sensoren komplizierter ist, wächst die Komplexität einer Laufmaschinensteuerung mit Anzahl und Leistung der verwendeten Sensoren, was ebenfalls ein großes Problem für die Entwicklung von Laufmaschinen darstellt.

2.3.3. Steuerung

Die Steuerung einer Laufmaschine muß die von der Sensorik gelieferten Daten auswerten und unter Berücksichtigung der momentanen Zielvorgaben in Bewegungen der Mechanik umsetzen. Die Aufgaben lassen sich in mehrere Teile zerlegen und wurden bereits in Abbildung 8 dargestellt:

- Die oberste Stufe einer Laufmaschinensteuerung stellt die Benutzerschnittstelle dar. Hier kann der Benutzer die Ziele der Maschine festlegen. Dies sollte auf möglichst abstrakter Ebene geschehen, damit er sich nicht unnötig mit den Interna der Laufmaschine beschäftigen muß, z.B. könnte er einen Zielort vorgeben, zu dem die Maschine dann automatisch läuft. Dieser und die nächsten drei Teile der Steuerung können auch in Radfahrzeugen eingesetzt werden, da sie keine speziell auf Laufmaschinen zugeschnittenen Elemente haben.
- Die Zielbestimmung legt die Ziele der Laufmaschine fest. Diese können durch einen Benutzer vorgegeben werden (s.o.) oder werden schon indirekt bei der Konstruktion der Maschine festgelegt, z.B. bei einem Erkundungsroboter für fremde Planeten, der versucht, möglichst unterschiedliche Orte aufzusuchen und zu erforschen.
- Wenn ein Ziel bestimmt wurde, ermittelt die globale Navigation den Weg dorthin. Dieser sollte so beschaffen sein, daß der Roboter ihn möglichst schnell und mit geringem Energieverbrauch zurücklegen kann.
- Die lokale Navigation befaßt sich mit Problemen, wie z.B. der Umgehung oder Überwindung des nächsten Hindernisses. Hierbei muß sie natürlich die Möglichkeiten der Maschine berücksichtigen.

- Um die Beine sinnvoll bewegen zu können, müssen die nächsten Aufsetzpunkte für die Füße berechnet werden. Diese sollten den Füßen Halt und einen stabilen Stand bieten und sich gut in den momentan gewählten Gangrhythmus einpassen.
- Sind die Aufsetzpunkte bestimmt, müssen die Trajektorien (Bewegungsbahnen der Beine) bestimmt werden. Diese sollten so gewählt werden, daß die Beine auf ihrer Bahn keine Hindernisse berühren.
- Die Reflexkontrolle reagiert auf von der Steuerung unerwartete Ereignisse mit einfachen Verhaltensweisen, z.B. stoppt ein Bein sofort, wenn es mit einem Hindernis kollidiert.
- Die unterste Stufe ist die direkte Steuerung der Aktoren. Sie setzt die Anweisungen der anderen Stufen in eine Bewegung der Beine um. Falls die anderen Stufen es nicht tun, berechnet sie auch die Winkel und Winkelgeschwindigkeiten der Gelenke aus den kartesischen Koordinaten für die Bewegung der Füße.

In Abbildung 8 ist die Steuerung klassisch in einzelne Stufen aufgeteilt, die von oben nach unten durchlaufen werden. Diese Zerlegung hat den Nachteil, daß die Steuerung nur als Ganzes funktionsfähig ist. Daher sind Änderungen an mittleren Ebenen schwer durchzuführen, ohne auch andere Stufen anpassen zu müssen. Ein alternativer Ansatz ist die *Subsumption Architecture* von Brooks [Bro86], bei der alle Stufen parallel arbeiten und höhere Stufen das Verhalten niederer unterdrücken können.

2.4. Zusammenfassung

Neben dem Problem der geeigneten Materialien, das die Informatik nicht lösen kann, bleibt die Steuerung von Laufmaschinen die zentrale, bisher nicht zufriedenstellend gelöste Aufgabe für die Zukunft. Dabei fehlt es zum einen an ausreichender Rechenleistung und zum anderen an geeigneten Algorithmen, um die große Flut von Sensordaten bewältigen zu können. Hier könnten künstliche neuronale Netze große Dienste leisten, wenn sie - wegen der Geschwindigkeit - als Hardware realisiert werden. Sie könnten die Zusammenhänge zwischen Sensorik und Motorik zumindest für die unteren Stufen der Steuerung lernen und sich bei Veränderungen der Mechanik anpassen. So würden sie zu einer robusten Steuerung beitragen, die zwangsläufig auftretende Verschleißerscheinungen der Maschine kompensiert.

3. Fischertechnik-Laufmaschine

Die Laufmaschine VierLING ist ein vierbeiniger Roboter, der auf Basis des Fischertechnik-Computing-Systems gebaut wurde. Dieses Kapitel soll die Unterschiede zu anderen Laufmaschinen aufzeigen und die einzelnen Elemente von VierLING vorstellen.

3.1. Abgrenzung zu anderen Laufmaschinen

Wie in Kapitel 2 bereits beschrieben, sind bereits viele Laufmaschinen konstruiert worden, die teilweise sehr beachtliche Leistungen vollbringen. Mit diesen Maschinen muß sich die in dieser Arbeit vorgestellte Laufmaschine VierLING vergleichen lassen. Sie verfügt über eini-

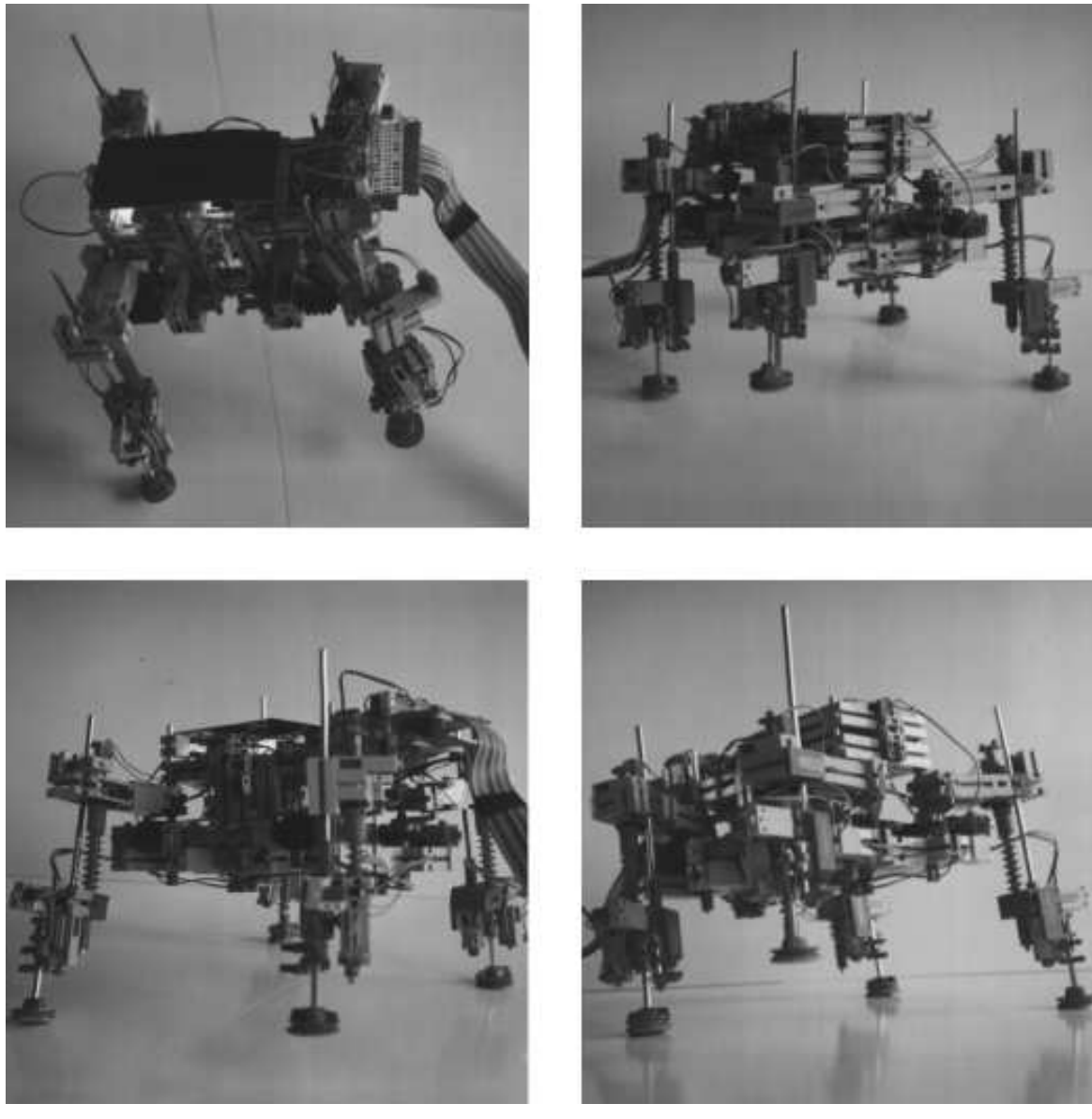


Abb. 11: *Vier Ansichten der Laufmaschine VierLING*

ge Eigenschaften, die sie von den anderen Laufmaschinen unterscheidet:

- Die meisten neueren, statisch stabilen Laufmaschinen haben sechs Beine, wodurch sie in jeder Phase des Laufvorgangs einen stabilen Stand haben. Daher tritt das Problem der Gewichtsverteilung - der Kernpunkt dieser Arbeit - bei sechsbeinigen Maschinen nicht auf.
- Die Beine der Fischertechnik-Laufmaschine haben eine sehr geringe Steifigkeit, d.h. alles ist sehr wackelig. Im Gegensatz dazu wurden andere Laufmaschinen meist aus Metall gefertigt und setzen Bewegungen viel präziser um.
- Die Sensorik der Fischertechnik-Laufmaschine ist vergleichsweise primitiv: Bis auf die Neigungsdetektoren sind alle Sensoren binär. Andere Laufmaschinen können auftretende Kräfte messen und die Meßergebnisse in die Steuerung einfließen lassen.
- Bei Laufmaschinensteuerungen existieren kaum Ansätze, die Zusammenhänge zwischen Sensorik und Motorik lernen zu lassen. Meist werden komplexe mathematische Modelle verwendet, um diese Beziehung zu beschreiben.

VierLING zeichnet sich also gegenüber anderen Laufmaschinen dadurch aus, daß geringere Präzision und ein einfacheres mathematisches Modell durch ein lernfähiges Steuerungssystem kompensiert werden.

3.2. Komponenten der Laufmaschine

Die Laufmaschine ist aus mehreren Komponenten aufgebaut. Sie besteht aus einem Rumpf, in dem zwei Neigungsdetektoren integriert sind. Seitlich am Rumpf sind jeweils links und rechts zwei Beine montiert. Hinten sind zwei Flachbandkabel angebracht, die die Verbindung zu zwei Fischertechnik-Interfaces herstellen, und eine Stromleitung, die die Lampen der Neigungsdetektoren mit einem konstanten Strom versorgt. Auf die wesentlichen Komponenten - die Beine und die Neigungsdetektoren - soll im folgenden näher eingegangen werden.

3.2.1. Beine

Die Laufmaschine verfügt über vier Beine, die alle gleich aufgebaut sind. Jedes Bein ist über eine Achse mit dem Rumpf der Maschine verbunden. Um diese Achse kann es durch einen Motor nach vorne und hinten geschwenkt werden. Der Unterschenkel wird mit einem weiteren Motor verkürzt bzw. verlängert, wodurch der Fuß angehoben oder abgesetzt wird. Die zur Bewegung verwendeten Motoren sind Schrittmotoren. Jedes Bein kann in sieben Stufen geschwenkt und in 19 Stufen ausgefahren werden.
Um feststellen zu können, ob der Fuß den Boden berührt, ist er mit einem Druckschalter (Taster) ausgerüstet, der gedrückt wird, wenn der Fuß auf den Boden aufsetzt. Ein zweiter Taster ist so installiert, daß er gedrückt wird, wenn ein Hindernis von vorne gegen den Fuß oder das Schienbein stößt. Beide Taster liefern binäre Signale, d.h. sie sind entweder gedrückt oder nicht gedrückt. Da eine gewisse Kraft nötig ist, um die Taster zu aktivieren, können mit ihnen nur Berührungen ab einer gewissen Stärke festgestellt werden.

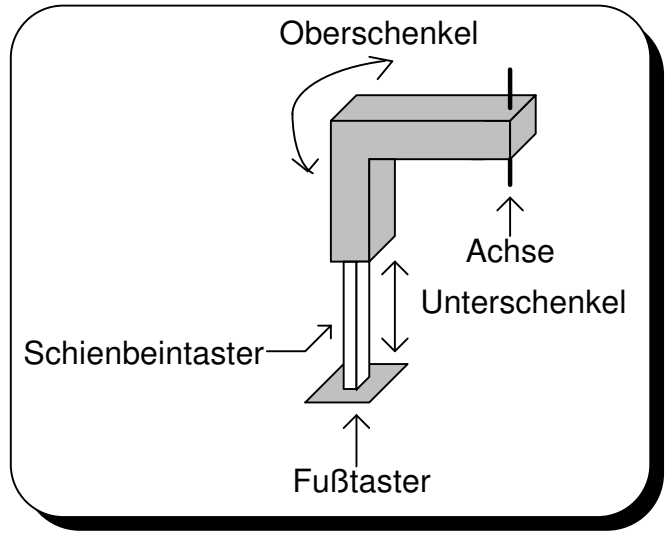


Abb. 12: *Prinzipdarstellung eines Beines der Laufmaschine*

Durch die Verwendung von Fischertechnik und die Realisierung der Fuß- und Schienbeintaster ist die Steifigkeit der Beine relativ gering. Dadurch kann sich der Fuß - bei gleichen Motorstellungen - relativ zum Maschinenrumpf an unterschiedlichen Positionen befinden, je nach dem, welche Kräfte gerade von außen auf das Bein einwirken. Diese ungewollte Beweglichkeit stellt eines der Probleme dar, die die Laufmaschinensteuerung lösen muß.

3.2.2. Neigungsdetektoren

Die Laufmaschine verfügt über zwei Detektoren, mit denen die Neigung des Maschinenrumpfes festgestellt werden kann. Der eine mißt die Neigung in Längsrichtung (also wie weit sich die Maschine nach vorne oder hinten neigt), der andere die in Querrichtung (Links- bzw. Rechtsneigung).
Jeder Neigungsdetektor besteht aus einem Pendel, das auf einer Achse aufgehängt ist und aufgrund seines Gewichts stets senkrecht hängt. An dem Pendel ist eine Röhre befestigt, in deren obere Öffnung Licht einer seitlich angebrachten Lampe fällt. Am unteren Ende der Röhre ist ein Sensor installiert, der die Helligkeit des in die Röhre einfallenden und von den Innenwänden reflektierten Lichts mißt. Bei unterschiedlichen Neigungen ändert sich der

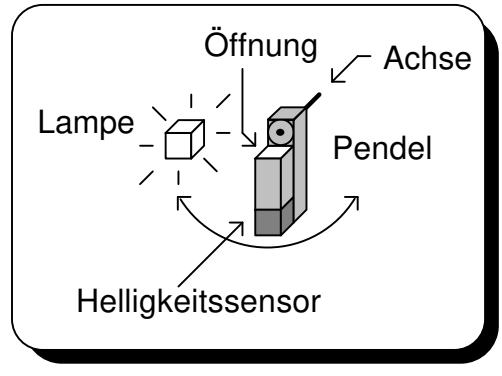


Abb. 13: *Prinzipdarstellung eines Neigungsdetektors*

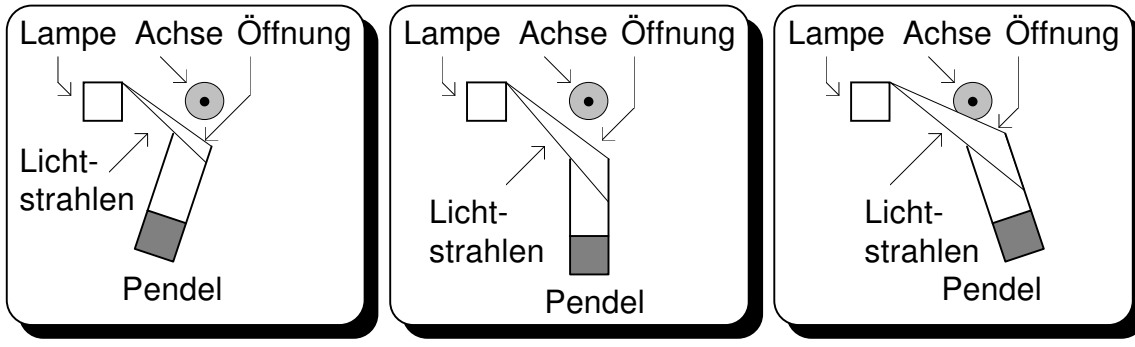


Abb. 14: *Lichteinfall bei verschiedenen Neigungen*

Winkel zwischen Lichtquelle und Rohröffnung und damit die Intensität des Lichts, das den Helligkeitssensor erreicht. Abbildung 14 zeigt den Lichteinfall bei unterschiedlichen Neigungen. Das von den Innenwänden der Röhre reflektierte Licht, das zu den Helligkeitssensoren gelangt, ist der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet.
Lichtquelle und Pendel sind so angeordnet, daß die Meßwerte bei Neigungsänderungen in die eine Richtung ansteigen und bei Änderungen in die entgegengesetzte Richtung kleiner werden. Zwischen den Meßwerten der Detektoren und der Neigung der Maschine (z.B. in Grad oder Prozent) besteht eine bijektive Beziehung: Man kann von einem Meßwert auf eine Neigung schließen und von einer Neigung auf einen Meßwert, allerdings unter Vorbehalt eines gewissen Meßfehlers. Die dazu benötigte Umrechnungsfunktion hängt von Parametern wie der Entfernung zwischen Lampe und Pendel, des Reflexionsgrads der Röhre und der Kennlinie des Sensors ab und ist wegen dieser Komplexität schwer zu ermitteln.
Bei ruckartigen Bewegungen der Maschine geraten die Neigungsdetektoren ins Pendeln. Dies kann zur Messung völlig falscher Neigungen führen. Daher werden die Sensoren immer so lange ausgelesen, bis zwei aufeinanderfolgende Messungen nahezu gleiche Ergebnisse liefern. Dadurch werden Meßwerte erst dann verwendet, wenn die Pendelbewegung aufgehört hat.
Nachdem die einzelnen Elemente der Laufmaschine vorgestellt wurden, werden in den nächsten Abschnitten die Bestandteile der Laufmaschinensteuerung besprochen.

4. Steuerung der Laufmaschine

Die Laufmaschinensteuerung besteht aus vier Teilen: Die Grundbewegungssteuerung sorgt dafür, daß sich die anderen drei Teile nicht direkt mit der Hardware-Steuerung auseinandersetzen müssen, sondern einfache Bewegungsmuster verwenden können. Die Gangsteuerung koordiniert die Bewegung der Beine und gibt damit die Reihenfolge, in der sie bewegt werden, vor. Die Neigungssteuerung verlagert das Gewicht der Maschine so, daß das von der Gangsteuerung vorgegebene Bein angehoben werden und einen Schritt ausführen kann. Diese Schrittausführung wird von der Schrittsteuerung vorgenommen. Sowohl Neigungs- als auch Schrittsteuerung verwalten jedes der vier Beine getrennt, so daß an der Maschine auch unterschiedliche Beine zum Einsatz kommen könnten.

4.1. Grundbewegungsteuerung

In dieser Arbeit werden kurze Beinbewegungen als *Grundbewegungen* bezeichnet. Um eine Grundbewegung handelt es sich z.B., wenn sich ein Bein ein Stück nach vorne bewegt. Die Grundbewegungen werden entweder von anderen Modulen der Laufmaschinensteuerung oder interaktiv von einem Benutzer ausgelöst.
Für jedes Bein existieren vier Grundbewegungen, die das Bein ein Stück weiter nach vorne

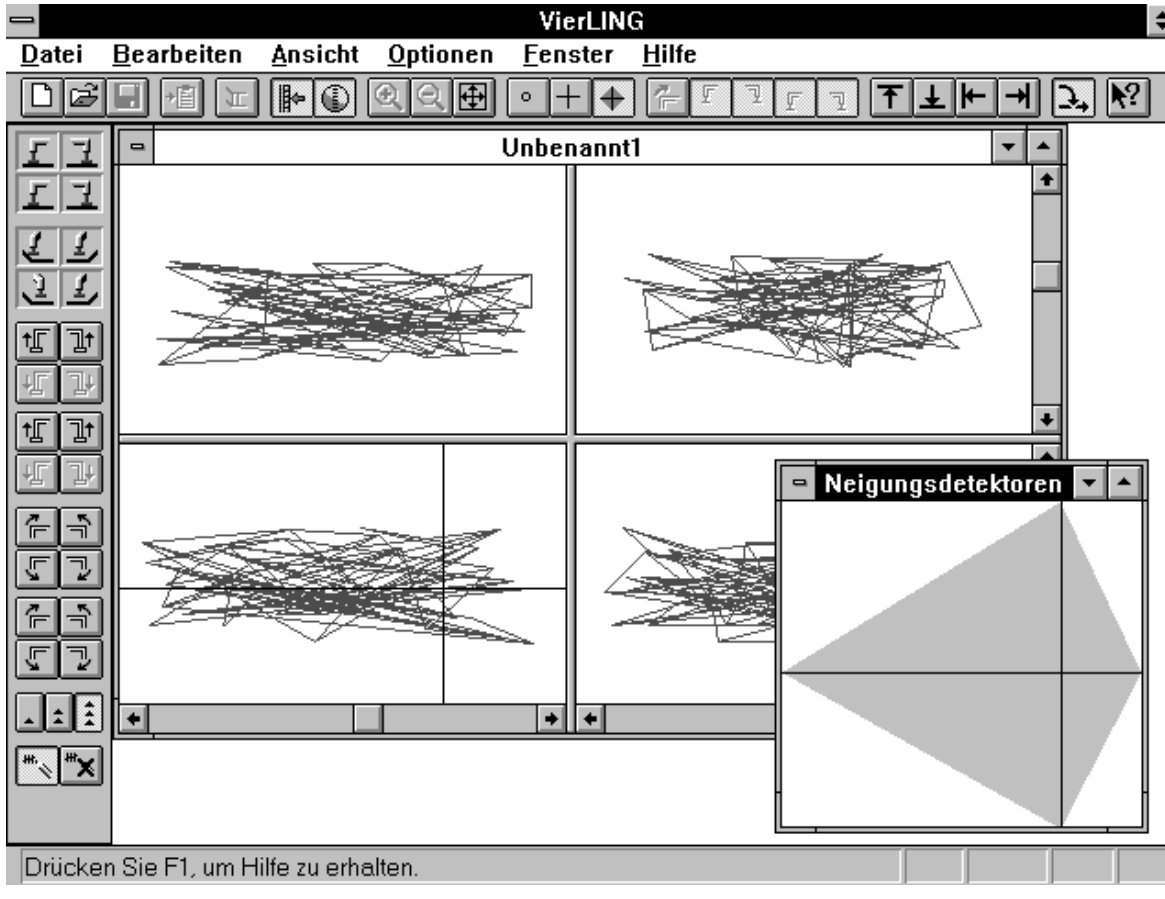


Abb. 15: *Das Programm zur Steuerung von VierLING*

bzw. hinten bewegen oder es weiter ein- oder ausfahren. Keine der Grundbewegungen ist jederzeit ausführbar, so kann z.B. ein Bein nicht weiter nach vorne geschwenkt werden, wenn es sich bereits in der vordersten Position befindet.
Jedes Bein verfügt über zwei Schrittmotoren, die es in unterschiedlichen Richtungen bewegen. Jeder Motor hat eine minimale und eine maximale Position, über die er sich nicht hinausbewegen sollte, weil sich die Maschine sonst selbst beschädigt. Zwischen der Grundbewegungsauslösung und den Motoren muß also eine Kontrollinstanz vorhanden sein, die überprüft, ob die ausgelösten Grundbewegungen ausgeführt werden dürfen. Wenn die Ausführung einer Grundbewegung nicht möglich ist, wird sie unterdrückt und der Auslöser darüber informiert.
In diesem Abschnitt soll eine neuronale Realisierung der Grundbewegungssteuerung vorgestellt werden, um die Möglichkeiten des Einsatzes neuronaler Netze zu verdeutlichen. Da alle vorgestellten Netze statisch und damit nicht lernfähig sind, wurde in dem zu diesem Bericht erstellten Programm auf ihre Implementierung verzichtet und die Logik der Grundbewegungssteuerung konventionell kodiert. Hätte die Implementierung mit Hilfe von Neuro-Hardware stattgefunden, wären die hier vorgestellten Modelle verwendet worden.

4.1.1. Grundbewegungskontrolle des Ein- bzw. Ausfahrens der Beine

Diese Kontrolleinrichtung kann mit einem neuronalen Netz realisiert werden. In diesem Abschnitt wird ein Netz vorgestellt, das das Ein- bzw. Ausfahren der Beine kontrolliert. Im Abschnitt 4.1.2. wird ein entsprechendes Netz für das Vor- und Zurückschwenken beschrieben.
Für jedes der vier Beine der Laufmaschine existiert eine Version des hier beschriebenen Netzes zur Kontrolle des Ein- und Ausfahrens der Beine. Es hat zwei Eingänge, von denen jeder für eine Grundbewegung steht. Wenn der Eingang *Z-* auf *1* gesetzt wird, soll das Bein ein Stück weiter eingefahren werden. Legt man am Eingang *Z+* eine *1* an, wird das Bein um ein Stück verlängert. *Z-* stellt also die *Einfahren-* Grundbewegung dar und *Z+* den für das Ausfahren eines Beines.
Von dem Netz, das in Abbildung 16 zu sehen ist, wird ein Wert *Z* im Bereich *[0..1]* verwaltet, der die "Ausgefahrenheit" eines Beins repräsentiert. Ist dieser Wert *0*, ist das Bein ganz eingefahren, ist er *1*, ist es ganz ausgefahren. Andere Werte stehen für Zwischenpositionen. Wenn sich *Z* ändert, verändert sich dadurch auch automatisch die Beinposition, d.h. wenn *Z* größer wird, fährt sich das Bein weiter aus, wenn *Z* kleiner wird, verkürzt es sich.
Die Aufgabe des Netzes besteht darin zu verhindern, daß *Z* den Bereich *[0..1]* verläßt, da sich sonst die Beine weiter ein- oder ausfahren würden, als die Mechanik dies zuläßt. Um dies zu erreichen, werden Grundbewegungen, durch die dieser Bereich verlassen würde, unterdrückt, d.h. nicht ausgeführt. Damit sich auch der Auslöser der Grundbewegung informieren kann, ob eine bestimmte Grundbewegung ausführbar ist oder ausgeführt wurde, hat das Netz außer *Z* noch vier weitere Ausgänge. *?Z-* ist *1*, wenn die Grundbewegung *Z-* ausführbar ist, ansonsten *0*. *Z-?* ist *1*, wenn *Z-* ausgeführt wurde. *Z+*, *?Z+* und *Z+?* stehen in entsprechender Beziehung zueinander. Hierdurch ergeben sich zwei Nutzungsmöglichkeiten: Zum einen kann man erst abfragen, ob eine Grundbewegung ausführbar ist und sie erst dann aktivieren, zum anderen kann man eine Bewegung unabhängig von ihrer Ausführbarkeit auslösen und im Nachhinein feststellen, ob sie ausgeführt wurde.
Das eigentliche neuronale Netz besteht aus fünf Neuronen:

❶ Das erste Neuron stellt fest, ob die Bewegung *Z-* ausgelöst wurde und ob sie ausführbar ist. Es bekommt dazu das Signal *Z-* und die Ausgabe des Neurons 4, das die Ausführbarkeit ermittelt, als Eingabe. Diese Signale können nur 0 oder 1 sein und werden beide mit 1 gewichtet und summiert. Ist die Summe gleich 2, wird die Ausgabe des Neurons aktiviert (auf 1 gesetzt), ansonsten ist die Ausgabe 0. Das Neuron führt also eine UND-Verknüpfung zwischen den beiden Eingängen durch. Die Ausgabe dieses Neurons steht auch an *Z-?* bereit.

❷ Das zweite Neuron ist analog zum ersten aufgebaut, verknüpft aber die Ausgaben von *Z+* und Neuron 5. Es stellt damit fest, ob die Grundbewegung *Z+* ausführbar ist. Die Ausgabe dieses Neurons ist auch die von *Z+?*.

❸ Neuron 3 speichert den Wert *Z*. Es erreicht dies, indem es seine eigene Ausgabe als Eingabe verwendet. Solange die anderen beiden Eingaben *0* sind, bleibt seine Aktivität konstant. Ist eine der beiden anderen Eingaben *1*, verändert sich der gespeicherte Wert. Wenn der Eingang aus Richtung Neuron 1 aktiv ist, wird dieser mit einem Wert -Δ multipliziert und zur momentanen Aktivität hinzugezählt. Dadurch wird *Z* verringert. Ist der Eingang aus Richtung Neuron 2 aktiviert, wird *Z* um Δ erhöht. Die Konstante Δ steht für die kleinste Änderung, die an *Z* vorgenommen werden kann und somit für die kleinste Bewegung, die von den Beinen durchgeführt werden kann. Da sich *Z* bei jedem Durchrechnen des Netzes verändert, wenn *Z-* oder *Z+* aktiv sind, verändert sich *Z* umso stärker, desto länger die jeweilige Grundbewegung aktiviert wird. *Z* kann den Bereich *[0..1]* nie verlassen, da die Neuronen 1 und 2 nur aktiv sein können, solange eine Änderung in die entsprechende Richtung noch zulässig ist.

❹ Das vierte Neuron überprüft, ob *Z* verringert werden könnte, wenn die Grundbewegung *Z-* ausgelöst würde. Es stellt dazu fest, ob der aktuelle Wert von *Z* größer oder gleich Δ ist. Ist dies der Fall, kann er weiter verringert werden und die Ausgabe des Neurons wird aktiv. Ansonsten kann *Z* nicht mehr um Δ verringert werden, ohne den Bereich *[0..1]* zu verlassen, weshalb die Ausgabe des Neurons *0* ist. An *?Z-* kann der Wert dieses Neurons ausgelesen werden.

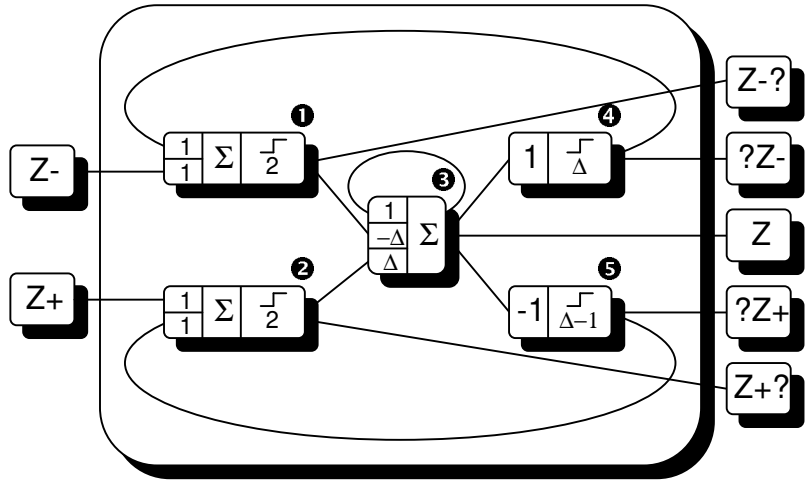


Abb. 16: *Neuronales Netz zur Kontrolle der Grundbewegungen zum Ein- und Ausfahren der Beine*

❺ Das letzte Neuron nimmt eine ähnliche Aufgabe wie Neuron 4 wahr. Es prüft, ob *Z* um Δ erhöht werden könnte, wenn die Bewegung *Z+* ausgelöst würde, ohne daß der Bereich *[0..1]* verlassen würde. Dazu wird die Eingabe mit *-1* multipliziert und mit Δ-*1* auf *größer-oder-gleich* verglichen. Dies entspricht dem Vergleich $Z \leq 1-\Delta$. Die Ausgabe dieses Neurons ist auch die von *?Z+*.

4.1.2. Grundbewegungskontrolle des Vor- bzw. Rückschwenkens der Beine

Für die Motoren, die das Ein- und Ausfahren der Beine bewirken, ist das eben beschriebene Modell ausreichend. Für die anderen Motoren, die die Beine nach vorne oder hinten schwenken, sind allerdings weitere Überprüfungen notwendig. Ein Bein kann nämlich nur geschwenkt werden, wenn es keinen Bodenkontakt hat oder wenn alle anderen Beine, die ebenfalls auf dem Boden stehen, die gleiche Bewegung ausführen. So wird vermieden, daß Verspannungen zwischen den Beinen auftreten. Außerdem darf ein Bein, das in der Luft ist, nicht vorwärts bewegt werden, wenn sein Schienbeintaster gedrückt ist.
Auch diese weiteren Bedingungen lassen sich durch ein neuronales Netz überprüfen. Dieses Netz stellt eine Erweiterung des Netzes aus Abschnitt 4.1.1. dar. Der Wert *X* repräsentiert die Schwenkposition des Beines. Ist *X=1*, befindet sich das Bein ganz vorne, ist *X=0*, ist es ganz nach hinten geschwenkt. Die Grundbewegung *X-* schwenkt das Bein ein Stück nach hinten, *X+* bewegt es nach vorne.
Das Netz, das in Abbildung 17 zu sehen ist, enthält folgende Änderungen gegenüber dem Netz aus Abbildung 16:

❶ Neuron 1 erhält zwei weitere Eingänge. An einem dieser Eingänge, *F*, liegt der aktuelle Zustand des Fußtasters des zugehörigen Beines an, am anderen *?A-*. *?A-* ist aktiv, wenn alle Beine, die den Boden berühren, nach hinten geschwenkt werden sollen und auch können. Wenn der Fußtaster *F* nicht gedrückt ist, verhält sich Neuron 1 wie in Abbildung 16, d.h. seine Aktivierung hängt allein von *X-* und Neuron 4 ab. Ist er jedoch ge-

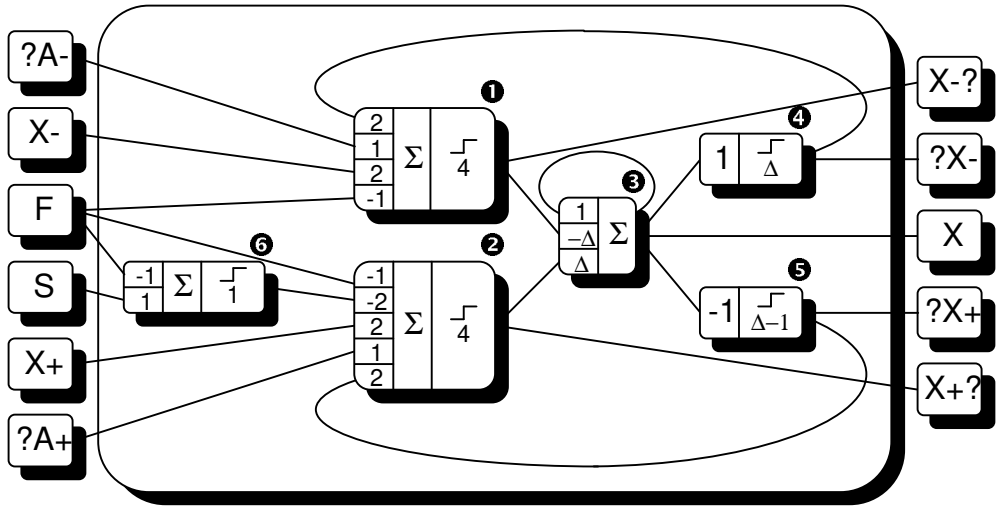


Abb. 17: *Neuronales Netz zur Kontrolle der Grundbewegungen zum Vor- und Zurückschwenken der Beine*

drückt, bedarf es dafür neben den Aktivitäten von *X-* und Neuron 4 auch noch der von *?A-*. Die Eingänge aus Richtung *X-* und Neuron 4 müssen in diesem Netz höher gewichtet werden, um zu gewährleisten, daß wie im Netz der Abbildung 16 beide aktiviert sein müssen, damit der Schwellenwert des Neurons erreicht wird.

❷ Neuron 2 wird auf ähnliche Weise erweitert. Hier wird allerdings ein Eingang mit *?A+* verbunden, das nur dann aktiv ist, wenn alle Beine, die Bodenkontakt haben, nach vorne schwenken. Außerdem gibt es noch einen weiteren Eingang, der über Neuron 6 mit dem Schienbeintaster *S* verbunden ist. Die Gewichtungen der fünf Eingänge von Neuron 2 sind etwas komplex: Der Schwellenwert von *4* kann nur erreicht werden, wenn sowohl *X+* als auch Neuron 5 aktiv sind. Eine Eingabe von Neuron 6 verhindert die Erreichung der Schwelle auf jeden Fall. Ist der Fußtaster *F* aktiv, fehlt zum Schwellen-

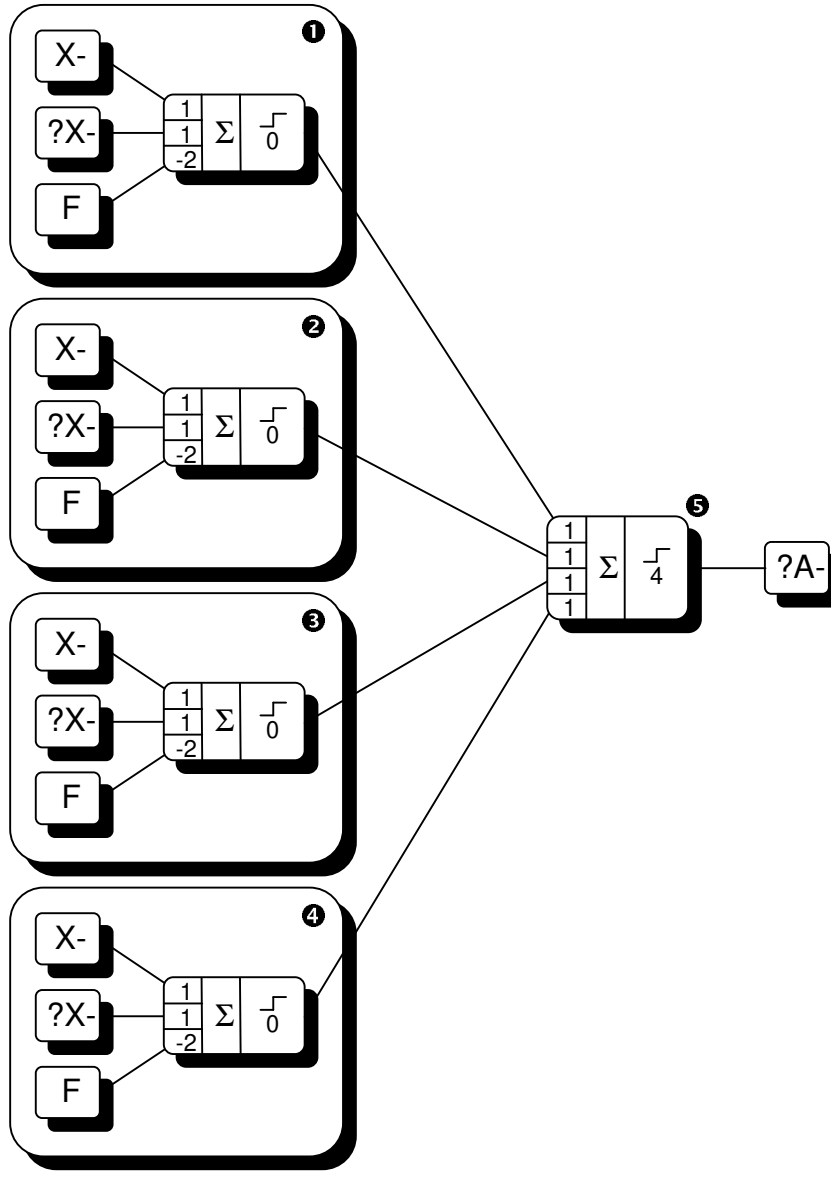


Abb. 18: *Neuronales Netz, das ermittelt, ob alle Beine mit Bodenkontakt nach hinten geschwenkt werden*

wert genau der Summand, den *?A+* liefern kann, d.h. *?A+* gleicht *F* aus.

❻ Da die Information, die der Schienbeintaster *S* liefert, nur relevant ist, wenn das zugehörige Bein angehoben ist, wird ein sechstes Neuron verwendet, um das Signal des Schienbeintasters zu unterdrücken, wenn der Fußtaster aktiv ist.

Die Netze, die *?A-* und *?A+* als Ausgabe liefern, unterscheiden sich nur durch ihre Eingaben. *?A-* soll aktiv sein, wenn alle Beine, die den Boden berühren, nach hinten geschwenkt werden.
In Abbildung 18 sind die vier Neuronen 1, 2, 3 und 4 zu sehen. Wenn der Fußtaster nicht gedrückt ist, liefert jedes dieser Neuronen die Ausgabe *1*. Wenn er gedrückt ist, bedarf es sowohl des Befehls (*X-)* als auch der Möglichkeit (*?X-*), das Bein zurückzuschwenken, um das Neuron zu aktivieren. Das Neuron 5 berechnet eine UND-Verknüpfung der Ausgaben der Neuronen 1-4 und liefert nur eine *1* als Ausgabe, wenn alle Eingänge aktiviert wurden, d.h. alle Neuronen "feuern".
Das Netz, das *?A+* berechnet, ist analog aufgebaut. Im Unterschied zum Netz, das *?A-* zur Ausgabe hat, bekommen die Neuronen 1-4 die Werte von *X+* und *?X+* des jeweiligen Beines als Eingabe.

4.1.3. Virtuelle Grundbewegungen

Die in Abschnitt 4.1.1. vorgestellten Grundbewegungen zum Ein- und Ausfahren können nur innerhalb der Beweglichkeit eines Beines ausgeführt werden. Folglich müssen beim Auslösen von Grundbewegungen alle Spezialfälle ihrer momentanen Unausführbarkeit berücksichtigt werden. Dies würde für die anderen Module der Laufmaschinensteuerung einen nicht zu unterschätzenden Verwaltungsaufwand darstellen. Um sie davon zu entlasten, wurde eine weitere Bewegungsart in die Steuerung aufgenommen. Diese nutzt die Tatsache aus, daß für die Neigungs- sowie Schrittsteuerung nur die Kontrolle über Änderungen der Längenunterschiede zwischen den Beinen erforderlich ist. Insbesondere die Neigungssteuerung benötigt Grundbewegungen, die die Längenunterschiede der Beine zueinander und damit die Neigung der Maschine ändern. Dabei ist es von Vorteil, wenn sie sich nicht um absolute Beinpositionen und somit um die Höhe des Maschinenrumpfes über dem Boden kümmern muß (s. Abb. 19).
Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden Bewegungen eingeführt, mit denen angegeben werden kann, welche Beine ausgefahren werden sollen. Wenn die Beine tatsächlich weiter ausgefahren werden können, werden die Bewegungen wie normale Grundbewe-

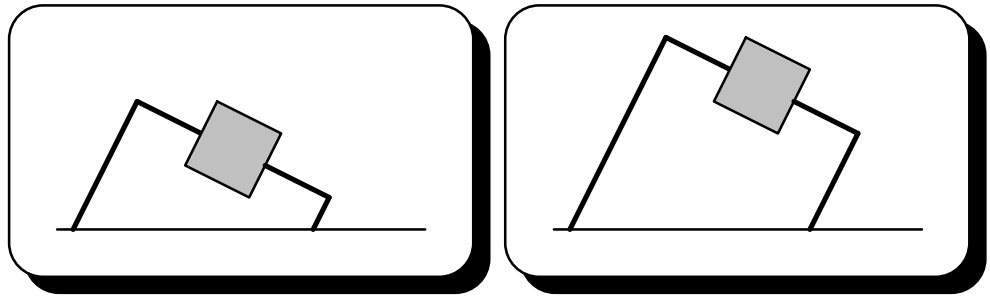


Abb. 19: *Gleiche Neigung, unterschiedliche Höhe*

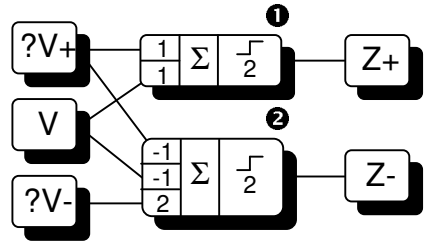


Abb. 20: *Neuronales Netz zur Realisierung der virtuellen Grundbewegung V eines Beines*

gungen aus Abschnitt 4.1.1. ausgeführt. Besteht diese Möglichkeit nicht, wird stattdessen versucht, die Beine, die nicht ausgefahren werden sollten, einzufahren, um so die gleichen Längendifferenzen zwischen den Beinen zu erreichen. Daher werden diese Bewegungen als *virtuelle Grundbewegungen* bezeichnet.
Für eine neuronale Realisierung wird für jedes Bein ein Netz benötigt, das die virtuelle Grundbewegung *V* für das Ausfahren dieses Beines in die Grundbewegungen *Z+* und *Z-* aus Abbildung 16 umsetzt. Jedes dieser Netze benötigt neben dem Eingang *V* noch zwei weitere Eingaben, *?V+* und *?V-*. *?V+* ist aktiv, wenn alle Beine, die verlängert werden sollen, dieses auch können. *?V-* sagt dagegen aus, daß alle Beine, die nicht ausgefahren werden sollen, eingefahren werden können. Die Funktion der beiden Neuronen im einzelnen:

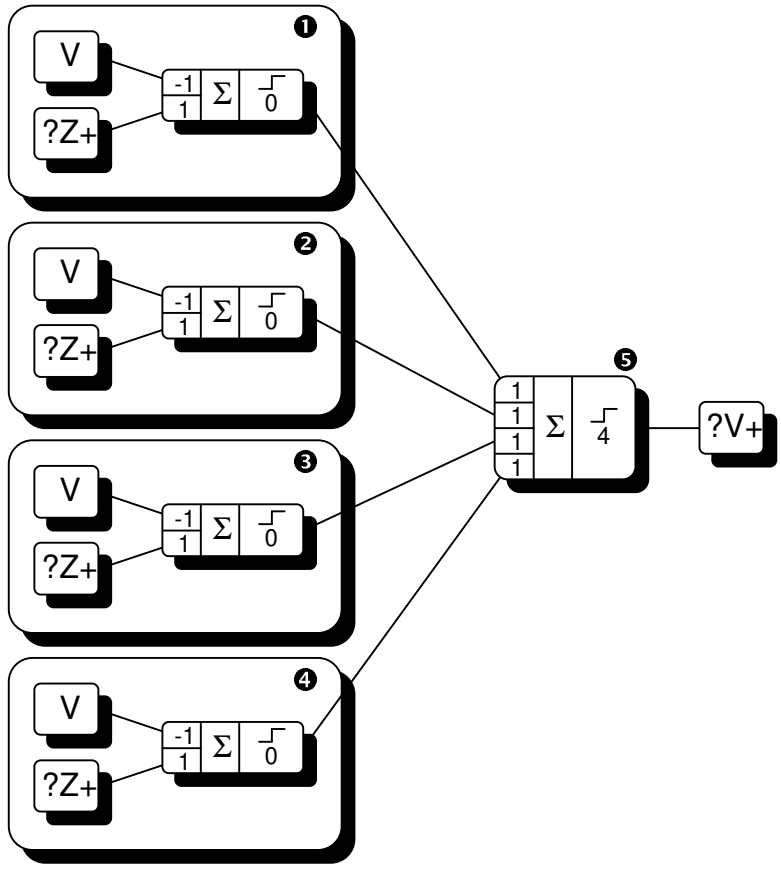


Abb. 21: *Neuronales Netz, das feststellt, ob alle Beine, die ausgefahren werden sollen, auch ausgefahren werden können*

❶ Neuron 1 wird aktiviert, wenn das Bein ausgefahren werden soll. Dazu muß die Grundbewegung *V* ausgelöst worden sein und alle Beine, deren Grundbewegung *V* aktiviert wurde, müssen diesen auch ausführen können (*?V+*). Die Summe der beiden mit *1* gewichteten Eingänge muß *2* sein, um die Grundbewegung *Z+* auszulösen.

❷ Das zweite Neuron wird aktiv, wenn das zugehörige Bein eingefahren werden soll. Dieses setzt voraus, daß nicht alle Beine, die ausgefahren werden sollen, dies auch können. Daher verhindert ein aktives *?V+* die Ausführung der Grundbewegung *Z-*. Zweite Bedingung ist, daß die Grundbewegung *V* des zugehörigen Beines nicht aktiv ist, da ja gerade die Beine eingefahren werden sollen, die nicht ausgefahren werden sollten. Außerdem müssen sich natürlich alle Beine, die nun eingefahren werden sollen, auch wirklich verkürzen lassen, was von *?V-* geprüft wird.

Die Netze, die *?V+* und *?V-* berechnen, sind sehr ähnlich aufgebaut. Beide bestehen aus fünf Neuronen, von denen vier für jedes Bein prüfen, ob die jeweilige Grundbewegung gewünscht und möglich ist. Beim Netz, das *?V+* ermittelt und das in Abbildung 21 zu sehen ist, werden die Neuronen 1-4 aktiviert, wenn entweder keine zugehörige Grundbewegung *V* vorliegt oder wenn sowohl *V* aktiv ist, als auch die daraus resultierende Grundbewegung *Z+* ausführbar ist, was durch *?Z+* ermittelt wird (s. Abb. 16).
Die Neuronen 1-4 in Abbildung 22 - dem Netz, mit dem *?V-* berechnet wird - sind hingegen

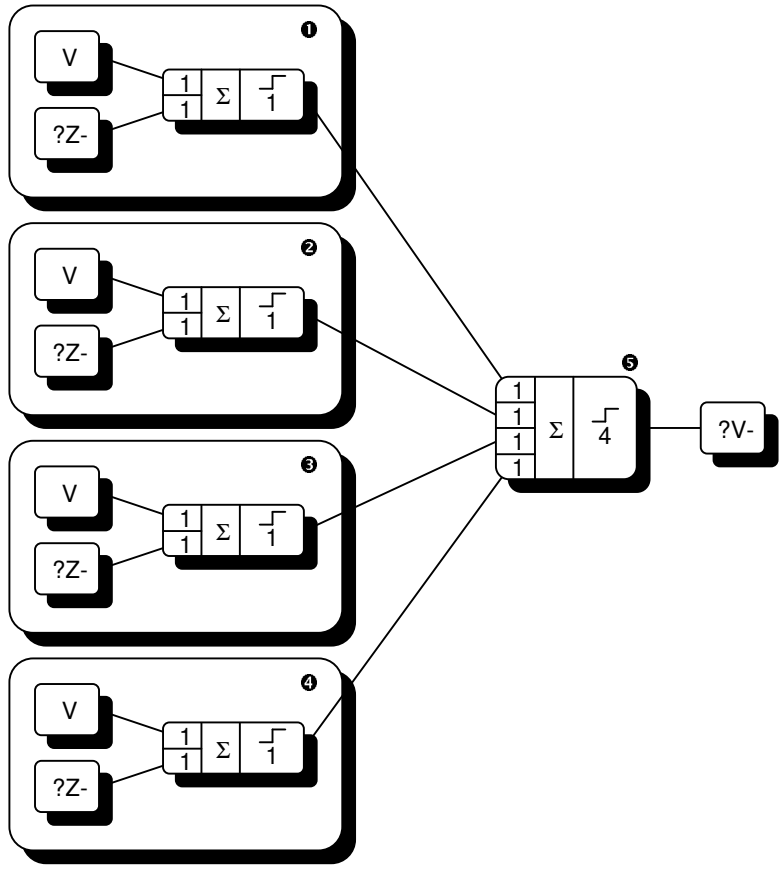


Abb. 22: *Neuronales Netz, das ermittelt, ob alle Beine, die nicht ausgefahren werden sollen, eingefahren werden können*

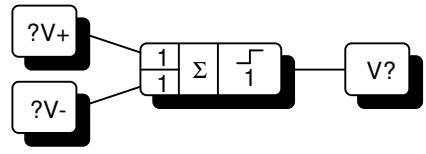


Abb. 23: *Neuronales Netz, das ermittelt, ob eine virtuelle Grundbewegung ausgeführt wurde*

aktiv, wenn entweder die zugehörige Grundbewegung *V* ausgelöst wurde oder wenn sie nicht aktiviert wurde und die daraus resultierende Grundbewegung *Z-* zum Einfahren des Beines ausführbar ist. Die Ausführbarkeit wird von *?Z-* in Abbildung 16 ermittelt. Die Ausführbarkeit wird also gerade dann geprüft, wenn die Grundbewegung *V* nicht aktiv ist. Dies muß so sein, da ja versucht wird, alle Beine einzufahren, die nicht ausgefahren werden sollten.
In beiden Netzen bildet das fünfte Neuron eine UND-Verknüpfung der Ausgaben der vier anderen Neuronen, stellt also sicher, daß die jeweilige Bedingung für alle Beine erfüllt ist.
Letztendlich müssen die anderen Module der Laufmaschinensteuerung noch ermitteln können, ob eine virtuelle Grundbewegung wirklich ausgeführt werden konnte. Diese Information liefert *V?*, dessen Berechnung in Abbildung 23 zu sehen ist. Wenn entweder *?V+* oder *?V-* oder beide aktiv sind, konnte die virtuelle Grundbewegung ausgeführt werden. *V?* ist nur dann *0*, wenn sich die Beine weder aus- noch einfahren ließen.
Die 14 möglichen virtuellen Grundbewegungen werden in Abbildung 24 gezeigt. Sie sind als Quadrat mit vier Kreisen dargestellt. Jeder schwarze Kreis steht dabei für eine aktivierte *Ausfahren*-Bewegung des jeweiligen Beines, jeder weiße dafür, daß die jeweilige Grundbewegung inaktiv ist. Die Anordnung der Kreise entspricht einem Blick von hinten auf die Laufmaschine, d.h. die oberen Kreise gehören zu den vorderen Beinen und die unteren zu den hinteren. Diese Darstellungsart der virtuellen Grundbewegungen wird in weiteren Abbildungen beibehalten.

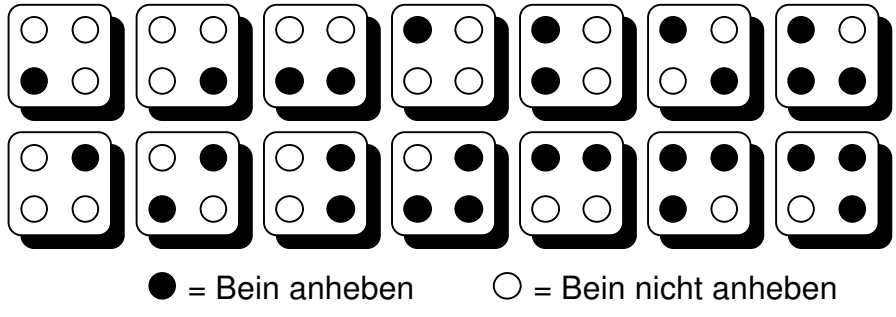


Abb. 24: *Die möglichen virtuellen Grundbewegungen*

4.2. Gangsteuerung

Die Gangsteuerung legt fest, welche Beine sich in welcher Reihenfolge bewegen. Diese Schrittreihenfolge bezeichnet man auch als *Gangart*. Von letzterer existieren verschiedene, so daß geklärt werden muß, welche davon sich für VierLING am besten eignet.
Es gibt Gangarten, bei denen mehrere bzw. alle Beine in Bewegung sind und solche, bei den sich nur ein Bein zur Zeit bewegt. Man kann einen Gang in einzelne Phasen zerlegen. In den Abbildungen 25, 26 und 27 werden unterschiedliche Gangarten gezeigt. Die Pfeile zeigen darin Bewegungen in der Luft an, während die gepunkteten Linien Beine verbinden, die Bodenkontakt haben.

4.2.1. Dynamisch stabile Gangarten

Je weniger Phasen ein Gang hat, desto schneller ist er. Der zweiphasige Gang, bei dem Rumpf und alle Beine ständig in Bewegung sind, ist daher der schnellste. Allerdings berühren dabei immer nur die Hälfte aller Beine gleichzeitig den Boden, weshalb eine Laufmaschine mindestens sechs Beine haben muß, um während aller Bewegungsphasen einen stabilen Stand zu haben. Bei Laufmaschinen mit weniger Beinen nennt man eine solche Gangart *dynamisch stabil*, weil die Maschine ihre Stabilität nur durch die Bewegung aufrechterhalten kann. Wenn man eine Laufmaschine bei einem solchen Gang plötzlich anhält, fällt sie um.
VierLING verfügt weder über die Sensorik noch über die Stabilität, um einen dynamisch stabilen Gang umzusetzen. Daher kommen nur Gangarten in Frage, bei denen nur ein Bein zur Zeit bewegt wird. Hier gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: einen fünfphasigen und einen sechsphasigen Gang.

4.2.2. Statisch stabile Gangarten

Ein *statisch stabiler* Gang zeichnet sich im Gegensatz zum dynamisch stabilen dadurch aus, daß die Laufmaschine in jeder Phase der Bewegung auf mindestens drei Beinen stabil steht.

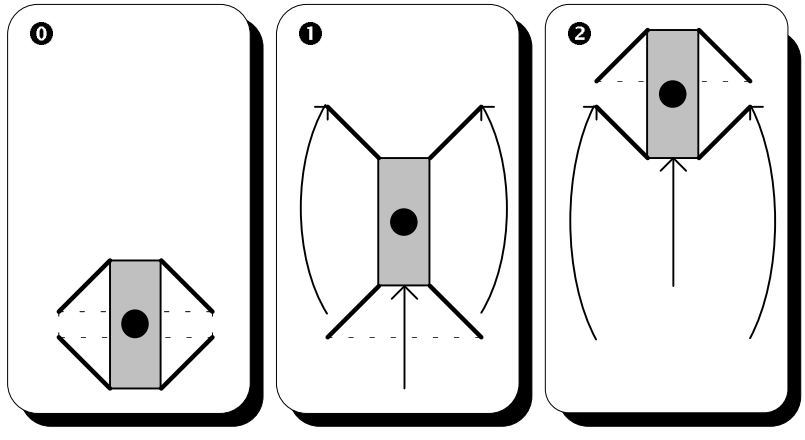


Abb. 25: *Dynamisch stabiler Gang in zwei Phasen mit angedeuteten Standflächen und Schwerpunkt des Maschinenrumpfes*

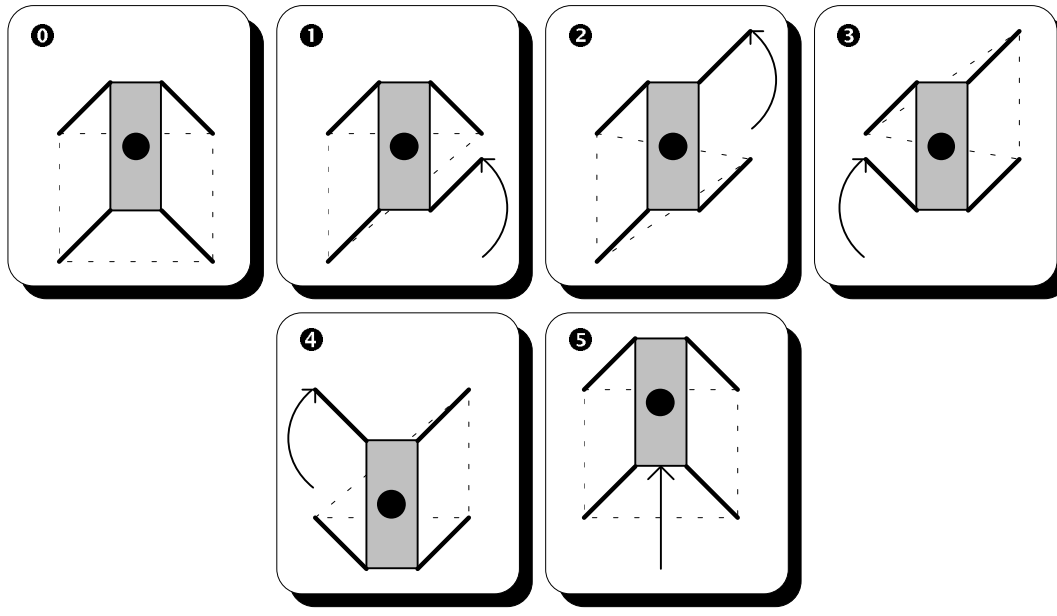


Abb. 26: *Statisch stabiler Gang in fünf Phasen mit angedeuteten Standflächen und Schwerpunkt des Maschinenrumpfes*

Für die Bewertung der Stabilität des Standes ist die Betrachtung der *Standfläche* vonnutzen. Die Standfläche ist die Fläche, die von den Beinen gebildet wird, die Bodenkontakt haben. Befindet sich der Schwerpunkt der Maschine außerhalb dieser Fläche, fällt die Laufmaschine um. Je zentraler er innerhalb der Standfläche liegt, desto stabiler steht die Maschine.
Bei einem Gang in fünf Phasen wird nur ein Bein zur Zeit angehoben, die drei anderen bleiben auf dem Boden. Die Standfläche ist also mindestens ein Dreieck. Wie aber in Abbildung 26 zu sehen ist, liegt der Schwerpunkt der Laufmaschine in den Phasen zwei und drei genau

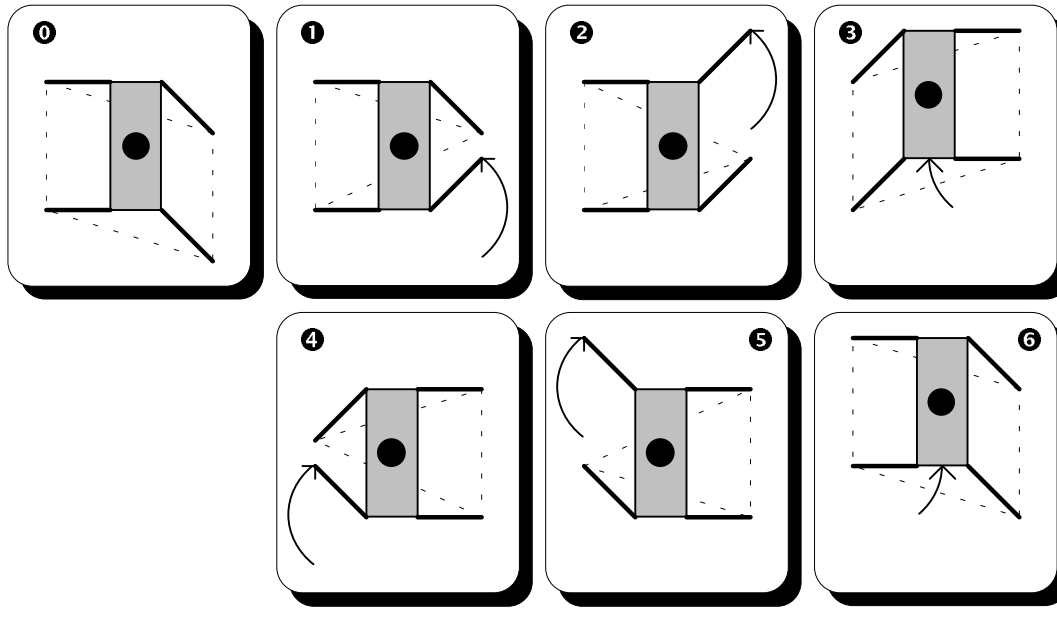


Abb. 27: *Statisch stabiler Gang in sechs Phasen mit angedeuteten Standflächen Standflächen und Schwerpunkt des Maschinenrumpfes*

auf dem Rand der Standfläche. Daher kann die Maschine in diesen Phasen leicht umkippen. Dagegen wird in Abbildung 27 deutlich, daß bei einem sechsphasigen Gang der Schwerpunkt der Laufmaschine das Zentrum der Standfläche nie verläßt [Ghe68]. Beim fünfphasigen Gang würden in der letzten Phase die Beine, die bei ihrer Bewegung ja Kreisbahnen beschreiben, die Laufmaschine förmlich zusammendrücken. Die Stabilität des sechsphasigen Gangs wird auch benötigt, weil die Beine wegen ihre Wackeligkeit nie die genauen Positionen in den Abbildungen einnehmen, sondern unter Umständen eine viel kleinere Standfläche bilden können.

4.2.3. Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Gangarten vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile besprochen. Da es nicht das Ziel dieser Arbeit ist, eine möglichst schnelle Laufmaschine zu bauen, wurde der sechsphasige Gang für VierLING gewählt. Die Gangsteuerung führt dabei die Phasen 3 und 6 selbst aus und überläßt die anderen vier der Neigungssteuerung, da das Vorsetzen eines Beines nur in Abhängigkeit von der Neigung des Laufmaschinenrumpfes möglich ist.

4.3. Neigungssteuerung

Die Laufmaschine verwendet einen Gang, bei dem lediglich ein Bein zur Zeit angehoben wird. Während dieses Anhebens steht die Laufmaschine auf den drei übrigen Beinen. Da ein Bein nur angehoben werden kann, wenn der Schwerpunkt der Maschine auf den drei anderen Beinen, den Standbeinen, lagert, muß vor dem Anheben des Schrittbeines das Gewicht der Maschine so verlagert werden, daß das Schrittbein den Boden verlassen kann, ohne daß die Maschine in seine Richtung umfällt. Die Maschine kann ihr Gewicht nur verlagern, indem sie die Neigung ihres Körperrumpfes ändert. Diese Neigungsänderung, die vor dem Anheben eines jeden Beines stattfindet, wird von der Neigungssteuerung kontrolliert. Jedes Bein hat seine eigene Neigungssteuerung, weil der Maschinenrumpf für das Anheben verschiedener Beine unterschiedlich geneigt sein muß. Der Zusammenhang zwischen der Körperneigung und dem Anheben der Beine wird von der Neigungssteuerung gelernt, da er relativ kompliziert ist.
Der Lebenszyklus der Laufmaschine ist nicht in eine Lern- und eine Anwendungsphase aufgeteilt. Die Maschine lernt, während sie sich bewegt, und bewegt sich auf Basis dessen, was sie bereits gelernt hat. Dieses Lernverhalten hat einige Vorteile:

- Da es keine zeitliche Grenze zwischen Trainings- und Anwendungsphase gibt, muß nicht entschieden werden, wann das Training ausreichend ist und zur Anwendung des Gelernten übergegangen werden kann.
- Da die Maschine immer lernt, kann sie zu jeder Zeit Änderungen an ihrem Verhalten vornehmen, also immer noch etwas "dazulernen".
- Die Maschine kann von Anfang an eingesetzt werden. Sie läuft zu Beginn lediglich erheblich langsamer.

Dieses Verhalten wird dadurch ermöglicht, daß die Maschine nur lernt, wenn sie Fehler macht. Der einzige Fehler, den die Neigungssteuerung kennt, ist das Nichtfunktionieren des Anhebens eines Beines.

4.3.1. Anheben eines Beines

Ob ein Bein in einer bestimmten Situation angehoben und somit ein Schritt ausgeführt werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab:

- Stellung der Oberschenkel: Die Stellung der Oberschenkel bestimmt zusammen mit den Toleranzen der Mechanik die Standfläche, deren Bedeutung bereits in Abschnitt 4.2.2. beschrieben wurde. Da die für die Laufmaschine gewählte Gangart feste Phasen hat, sind die Oberschenkelstellungen beim Hochnehmen eines bestimmten Beines immer gleich, d.h. die Standfläche bleibt im Rahmen der mechanischen Toleranzen unverändert.
- Neigung des Körpers: Die Neigung des Körpers bestimmt die Verteilung des Gewichts auf die einzelnen Beine. Nur wenn die Neigung so gewählt ist, daß das gesamte Maschinengewicht auf den Standbeinen lagert, sobald das Schrittbein angehoben wird, kippt die Maschine nicht um.

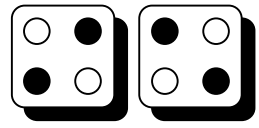


Abb. 28: *Virtuelle Bewegung/Gegenbewegung zum Ausfahren des hinteren linken Beines*

- Bodenkontakt der Standbeine: Nur, wenn die Standbeine auf dem Boden stehen, können sie mit dem gesamten Maschinengewicht belastet werden, während das Schrittbein angehoben wird. Der Bodenkontakt der Standbeine wird sichergestellt, indem alle Beine, die nicht angehoben werden sollen, wieder ausgefahren werden, sobald sie den Boden verlassen. Um nicht mit einem der in Abbildung 35 gezeigten virtuellen Reflexe eine Endlosschleife zu bilden, wird ein virtueller Reflex gewählt, dessen Gegenreflex - ein Reflex, der eine genau gegenteilige Bewegung ausführt - in der übrigen Neigungssteuerung nicht verwendet wird. Eine Endlosschleife tritt ein, wenn beim Ändern der Neigung ein Bein angehoben und gleich wieder ausgefahren wird, damit es Bodenkontakt hat. Da dadurch wieder der alte Zustand hergestellt wird, würden beide Bewegungen ständig wiederholt und es ergäbe sich eine Endlosschleife. Dies wird durch die Verwendung eines virtuellen Reflexes vermieden.
- Toleranzen der Mechanik: Die Wackeligkeit der Konstruktion verändert die Standfläche. Das Unangenehme an den Toleranzen ist, daß sie im Gegensatz zu den drei bisher aufgezählten Punkten nicht meßbar sind, d.h. von der Maschine nur in ihren Auswirkungen registriert werden, z.B. wenn die Maschine umfällt, obwohl ein Bein bei gleicher Neigung früher schon einmal angehoben werden konnte.

4.3.2. Neigung des Rumpfes

Um den Rumpf in eine bestimmte Neigung versetzen zu können, muß man die Möglichkeit haben, die Neigungen der Maschine zu messen. Dabei ist der Gedanke nicht ganz abwegig, diese aus der Stellung der Beine ermitteln zu können. Dies funktioniert aber nur, solange der Untergrund, auf dem die Maschine läuft, eben ist. Ist er uneben, sagt die Beinstellung nichts über die Neigung aus, wie in Abbildung 29 zu sehen ist. Um die Neigung dennoch messen zu können, verfügt VierLING über zwei Neigungsdetektoren, die in Quer- bzw. Längsrichtung im Maschinenrumpf montiert sind. Die Daten, die diese Sensoren liefern, geben zwar keine Neigung in Grad oder Prozent wieder, können aber zum Wiedererkennen einer bereits bekannten Neigung und zum Bestimmen der Richtung von Neigungsänderungen benutzt werden. Das bedeutet im einzelnen:

- Wenn die Detektoren zu zwei verschiedenen Zeitpunkten die gleichen Meßwerte liefern, kann man davon ausgehen, daß der Maschinenrumpf zu beiden Zeitpunkten gleich geneigt war.
- Aus Änderungen der Meßwerte kann auf die Richtung der Neigungsänderung geschlossen werden. Wenn sich z.B. der Meßwert des Querneigungssensors erhöht, hat sich die Laufmaschine weiter nach rechts (von hinten aus betrachtet) geneigt.

Die Neigungssteuerung macht sich beide Eigenschaften zunutze.

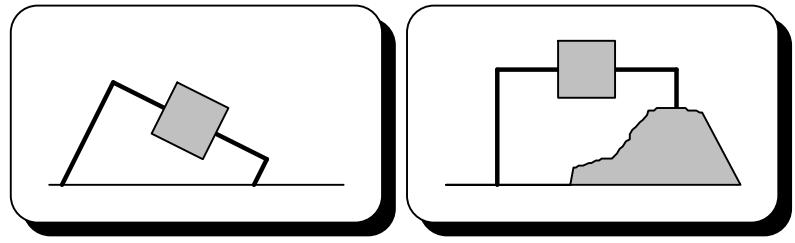


Abb. 29: *Gleiche Beinstellung, unterschiedliche Neigung*

4.3.3. Auswertung der Neigungsdetektoren

Es ist Aufgabe der Neigungssteuerung, anhand der Meßwerte der beiden Neigungsdetektoren zu entscheiden, ob das Schrittbein angehoben werden kann, oder ob sich die Laufmaschine noch weiter in eine bestimmte Richtung neigen muß. Da diese Beziehung relativ kompliziert ist, wird sie nicht vorgegeben, sondern soll von der Neigungssteuerung *gelernt* werden. Die zu lernende Funktion bildet die Meßwerte der zwei Detektoren auf die Eigenschaft *Bein-anhebbar* ab, wobei die Neigungsdetektoren Werte im Bereich *[0..1]* liefern. Es handelt sich also um eine Abbildung *f : [0..1] % [0..1] D {0,1}*.
Diese Funktion kann man graphisch darstellen, indem man die Meßwerte des Querneigungsdetektors horizontal, die des Längsneigungsdetektors vertikal aufträgt und die von beiden bezeichnete Koordinate entsprechend der Anhebbarkeit des Beines einfärbt. Man erhält dadurch eine Art Karte, aus der zu ersehen ist, bei welchen Neigungen ein Bein angehoben werden kann. Die Darstellung in Abbildung 30 geht noch einen Schritt weiter: Der weiß gefärbte Bereich ist der, beim dem nicht bekannt ist, ob das Schrittbein angehoben werden kann. Im hellgrauen Bereich ist das Anheben möglich, während es im schwarzen

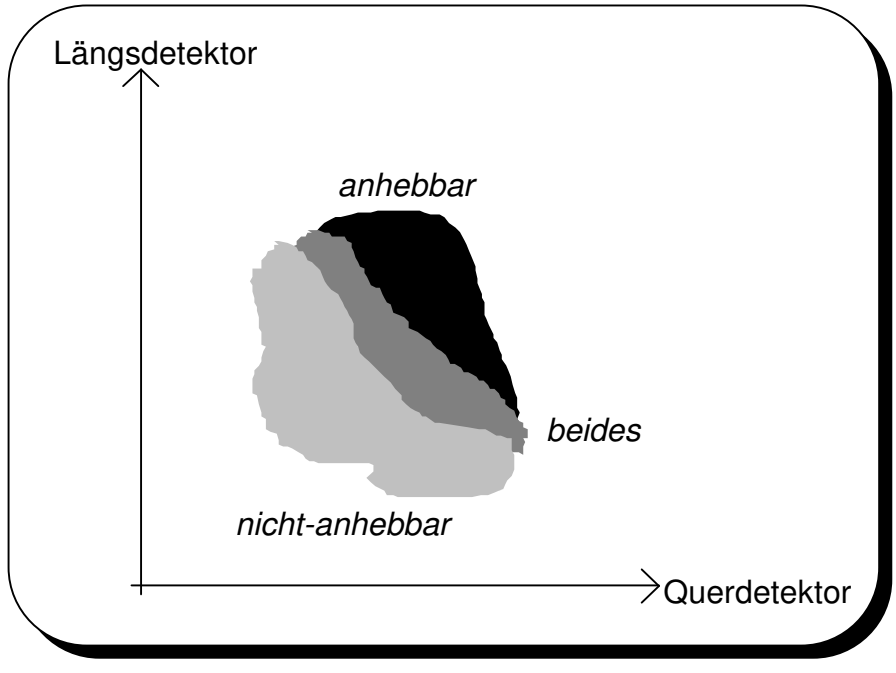


Abb. 30: *Zuordnung der Neigung zu anhebbar / nicht-anhebbar / beides*

nicht möglich ist. Der dunkelgraue Bereich ist der, bei dem die Toleranzen in der Mechanik bestimmen, ob das Schrittbein angehoben werden kann oder nicht, d.h. es läßt sich keine eindeutige Entscheidung treffen.
Da es nicht nützlich ist zu wissen, wann ein Bein vielleicht hochgenommen werden könnte, werden der hellgraue und der dunkelgraue Bereich in Abbildung 31 vereint. Es wird also nur noch unterschieden zwischen einem Bereich, über den man nichts oder noch nichts weiß (Farbe: weiß), einem, in dem das Schrittbein nicht immer angehoben werden kann (Farbe: hell- und dunkelgrau) und einem, wo es auf jeden Fall angehoben werden kann (Farbe: schwarz).

4.3.4. Grundidee des Lernverfahrens

Da das Aussehen der Karte nicht bekannt ist, könnte man sie durch Ausprobieren zeichnen, d.h. lernen lassen. Ein einfaches Lernverfahren würde nun so aussehen, daß man mit einer leeren, weißen Karte beginnt. Durch zufällige Bewegungen versucht man, möglichst viele unterschiedliche Neigungen zu erreichen. Ist bei einer Neigung nichts oder ein schwarzer Punkt eingezeichnet, hebt man das Bein an. Wenn dies gelingt, markiert man die Stelle schwarz, sonst grau. Wichtig ist, daß man, sobald feststeht, daß sich das Bein bei einer bestimmten Neigung nicht anheben läßt, das Heben nie wieder ausprobiert. Damit wird sichergestellt, daß alle Neigungen, bei denen sich ein Bein einmal nicht anheben ließ, grau gefärbt bleiben.
Dieses einfache Lernverfahren verursacht zwei Probleme:

- Es gibt unendlich viele Neigungen, die in die Karte eingetragen werden müßten, da die Meßwerte der Neigungsdetektoren reellwertig sind.
- Das Lernverfahren ist nicht zielstrebig, d.h. es versucht, die Karte zu erzeugen, nicht

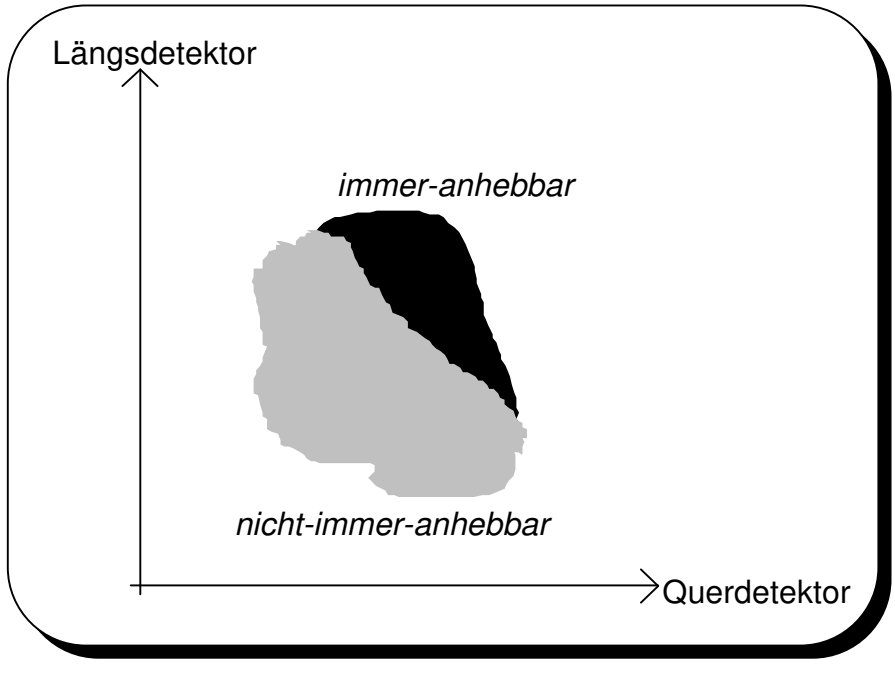


Abb. 31: *Zuordnung der Neigung zu nicht-immer-anhebbar / immer-anhebbar*

aber das Schrittbein möglichst schnell anzuheben, um einen möglichst schnellen Gang zu erreichen.

Wenn man annimmt, daß die Flächen für die Eigenschaften *nicht-immer-anhebbar* und *immer-anhebbar* jeweils zusammenhängend sind, muß man nicht alle Neigungen einzeln behandeln, sondern kann zwei Gebiete jeweils gleicher Eigenschaft bilden. Um festzustellen, ob für eine bestimmte Neigung bereits eine der beiden Eigenschaften bekannt ist, muß man nur bestimmen, ob und wenn ja, innerhalb welcher der beiden Flächen sich die Neigung befindet. Wie in [RitMar90] gezeigt wurde, können sich Kohonen-Netze [Koh82] besonders gut geometrischen Formen anpassen. Daher liegt es nahe, zwei Kohonen-Netze zu verwenden, um beide Flächen zu beschreiben.

4.3.5. Kohonen-Netze

Kohonen-Netze werden typischerweise als verzerrtes Gitter dargestellt. Die Knotenpunkte dieses Gitters sind die Gewichtsvektoren jeweils eines Neurons. Die Arbeitsweise eines Kohonen-Netzes läßt sich in zwei Phasen zerlegen: In der ersten Phase wird das Neuron ermittelt, dessen Gewichtsvektor dem Reizpunkt am nächsten ist. In der zweiten Phase bewegen sich die Gewichtsvektoren in unterschiedlicher Stärke auf den Reizpunkt zu. Für die Ermittlung der Flächenzugehörigkeit einer Neigung wird nur die erste Phase benötigt.
Vorerst wird angenommen, daß jeweils ein Kohonen-Netz die Flächen für *nicht-immer-anhebbar* und *immer-anhebbar* überdeckt. Wenn die aktuelle Neigung beiden Netzen in Form eines Reizes präsentiert wird, ermittelt jedes Netz dasjenige seiner Neuronen, dessen Gewichtsvektor die geringste Entfernung zu dieser Neigung hat. Vergleicht man die Entfernungen zwischen den Gewichtsvektoren der jeweiligen Neuronen und der aktuellen Neigung, läßt sich das Netz bestimmen, das der aktuellen Neigung am nächsten ist. Mit diesem

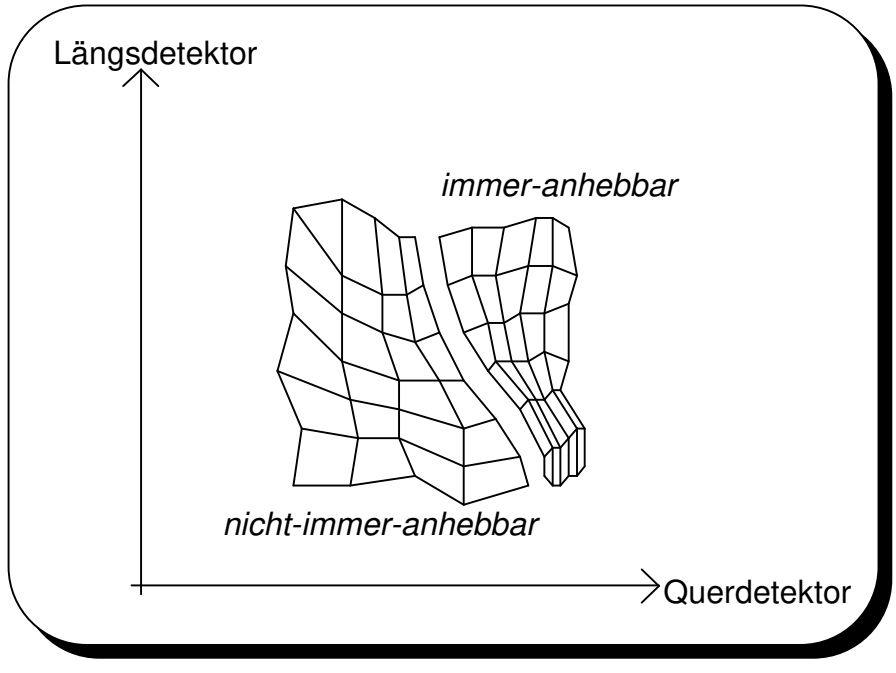


Abb. 32: *Zuordnung durch zwei Kohonen-Netze*

Algorithmus wird zwar nicht festgestellt, innerhalb welcher Fläche sich eine Neigung befindet, dafür aber, welcher Fläche sie eher zuzuordnen ist. Der weiße Bereich, der das unerforschte Gebiet darstellte, kommt in diesem Modell nicht mehr vor.

4.3.6. Initialisierung

Im Gegensatz zum Ansatz aus Abschnitt 4.3.4., bei dem mit einer leeren Karte begonnen wurde, müssen die Kohonen-Netze mit Anfangsgewichten initialisiert werden. Daher überdecken sie bereits Flächen, bei deren Neigungen die Anhebbarkeit bzw. Nichtanhebbarkeit eines Beines noch nicht ausprobiert wurde. Dabei besteht das Risiko, daß die Initialisierung bereits eine Vorauswahl für die zu ermittelnden Flächen der Eigenschaften *immer-anhebbar* und *nicht-immer-anhebbar* vornimmt und damit eine korrekte Ausbreitung beider Netze verhindert. Um dies zu vermeiden, werden die Gewichte beider Netze völlig zufällig initialisiert, wodurch beide Netze in etwa die gesamte Karte überdecken und völlig ungeordnet sind. Da sich die Netze überlappen, können dicht beieinander liegende Neigungen einmal dem einen und einmal dem anderen Netz zugeordnet werden. Außerdem bewegen sich die Netze am Anfang ihres Trainings noch relativ stark, weshalb jede Neigung die Chance hat, jedem der beiden Netze zugeordnet zu werden. Daher ist eine Beeinflussung der endgültigen Karte durch den Anfangszustand der Netze praktisch ausgeschlossen.

4.3.7. Lernverfahren

Damit das eine Kohonen-Netz das Gebiet überdeckt, das sich über alle Neigungen erstreckt, bei denen sich das Schrittbein anheben läßt, und das andere die Fläche, innerhalb der das Anheben nicht möglich ist, müssen beide Netze trainiert werden.
Der Versuch, ein Bein anzuheben, beginnt damit, daß die aktuelle Neigung gemessen und den beiden Netzen präsentiert wird. Ist sie dem Gewichtsvektor eines Neurons des *nicht-immer-anhebbar* Netzes näher, kann die Maschine das Bein bei ihrer momentanen Neigung nicht anheben. Sie muß daher ihre Neigung ändern, um das Bein anheben zu können. Da das *immer-anhebbar*-Netz Neigungen speichert, bei denen das Bein angehoben werden kann, ist es günstig, den Maschinenrumpf in eine Neigung zu versetzen, die in diesem Netz enthalten ist. Die Neigung mit dem geringsten Unterschied zur aktuellen ist die, die das *immer-anhebbar*-Netz als Reaktion auf die aktuelle Neigung liefert. Um dieser Neigung näher zu kommen, führt die Laufmaschine eine Bewegung aus, und der Algorithmus beginnt von vorne.
Wurde durch die Präsentation der aktuellen Neigung das *immer-anhebbar*-Netz ausgewählt, versucht die Schrittsteuerung, das Bein anzuheben und nach vorne zu setzen. Gelingt dies, wird das *immer-anhebbar*-Netz mit der vor dem Bewegen des Beines gemessenen Neigung trainiert. Ließ sich das Bein nicht nach vorne bewegen, wird statt dessen das *nicht-immer-anhebbar*-Netz trainiert.

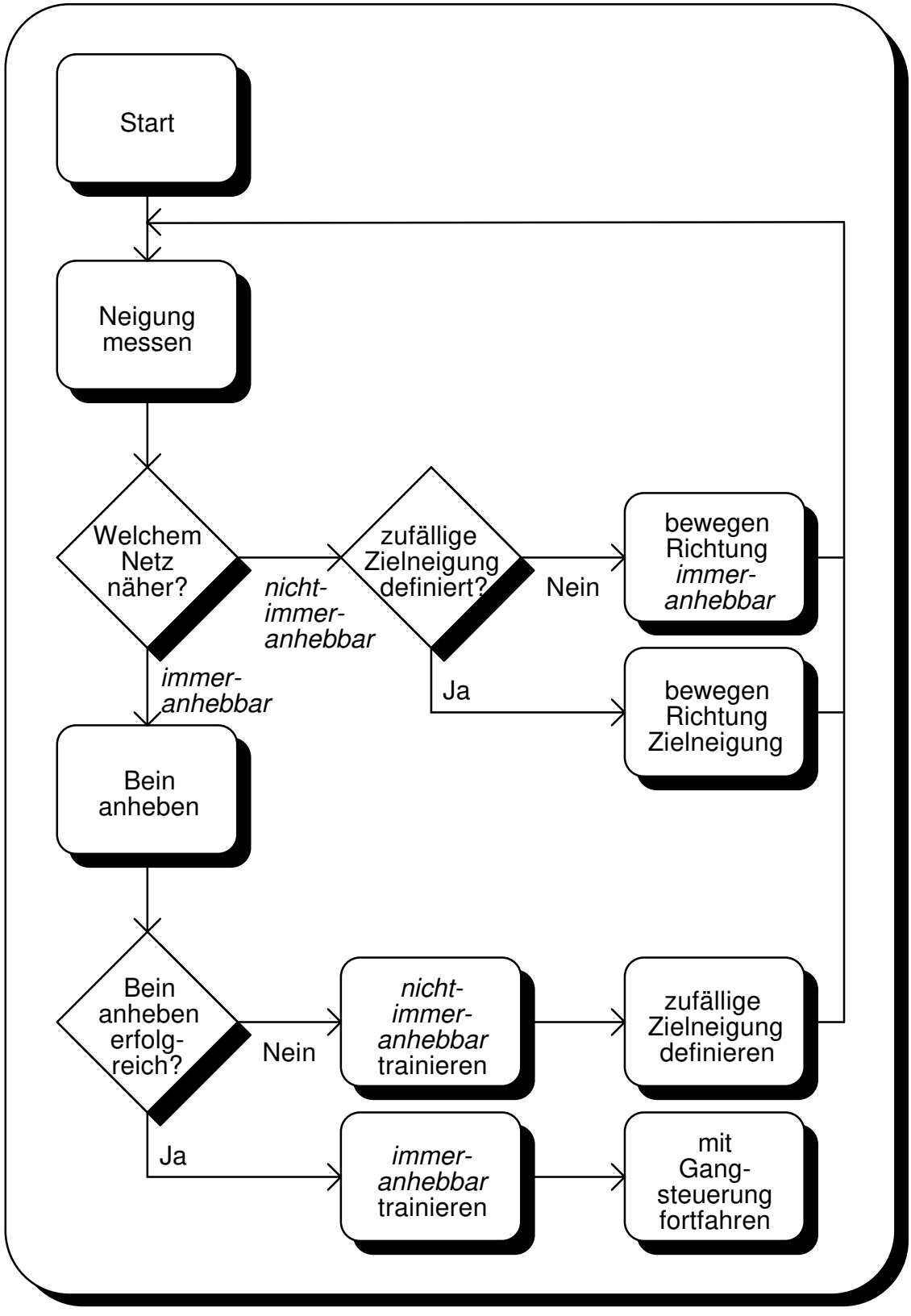


Abb. 33: *Ablauf des Lernverfahrens*

Nach einem vergeblichen Versuch, ein Bein anzuheben, befindet sich die Laufmaschine in einer ungünstigen Lage: Das Schrittbein ist ganz eingefahren und berührt den Boden. Die Maschine neigt sich stark in seine Richtung. Aus dieser Stellung einen weiteren Anhebeversuch zu unternehmen, ist aussichtslos. Das *immer-anhebbar*-Netz muß falsch ausgerichtet sein, da die Maschine sonst beim Anheben des Beines nicht umgefallen wäre. Eine Neigung aus diesem Netz erreichen zu wollen, wäre also ebenfalls sinnlos, da ein Anheben wahrscheinlich wieder nicht funktionieren würde. Die einzige Möglichkeit besteht darin, etwas völlig Neues auszuprobieren. Daher wird eine zufällige Neigung ausgewählt, die die Maschine anzunehmen versucht. Dies entspricht einer Wiederholung des Algorithmus' mit dem Unterschied, daß bei Neigungsänderungen nicht das *immer-anhebbar*-Netz als Ziel verwendet wird, sondern diese zufällige Neigung. Da das Bein bei der zufälligen Neigung nicht unbedingt anhebbar sein muß, werden so lange neue Zielneigungen ausprobiert, bis das Bein angehoben und vorbewegt werden kann.
Durch das zufällige Erzeugen von Zielneigungen werden die verschiedensten Neigungen ausprobiert und beide Netze können sich - unabhängig von ihren Initialisierungen - optimal ausrichten. Da die zufälligen Neigungen nur ausprobiert werden, nachdem ein Fehler aufgetreten ist, ist ein flüssiger Gang möglich, sobald die Netze sich korrekt ausgerichtet haben. Es ist der Maschine aber auch jederzeit möglich, sich geänderten Gegebenheiten anzupassen, sobald das gelernte Verhalten nicht mehr funktioniert.

4.3.8. Annäherung an eine gewünschte Neigung

Wenn die Neigungssteuerung festgestellt hat, daß die Laufmaschine eine andere Neigung einnehmen muß, um das Schrittbein anheben zu können, wird ein virtueller Reflex ausgelöst, der die Maschine der Zielneigung näher bringen soll. Um zu ermitteln, welcher Reflex der richtige ist, wird die Richtung bestimmt, in die sich die Maschine aus ihrer momentanen

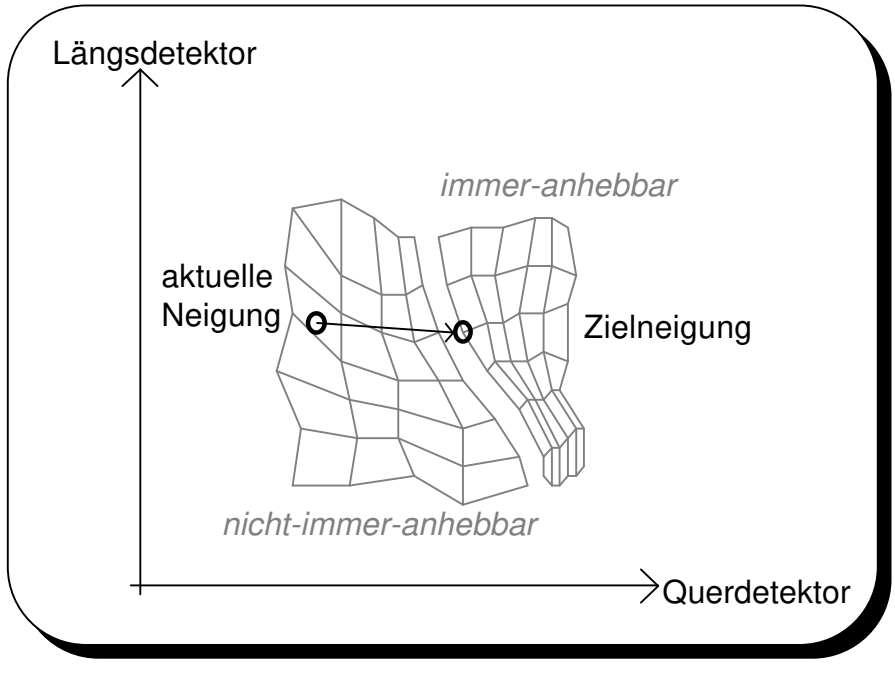


Abb. 34: *Ermittlung der erforderlichen Neigungsänderung*

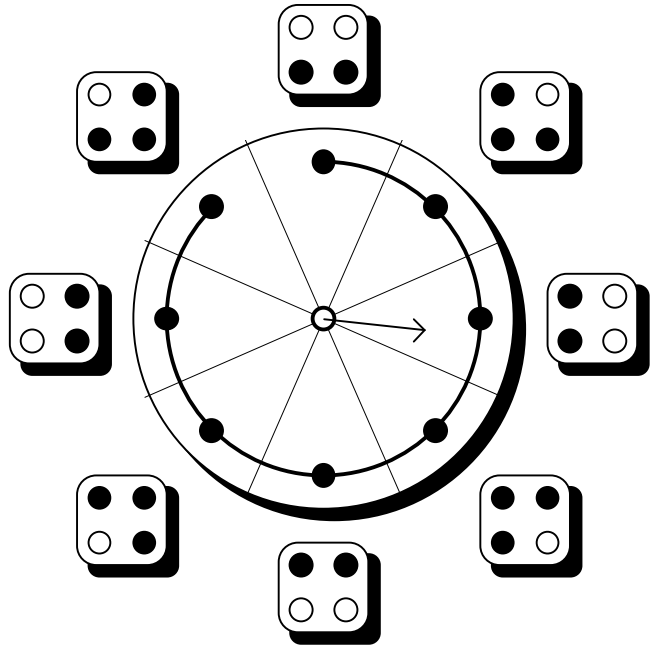


Abb. 35: *Zuordnung der Richtung der Neigungsänderung zu virtuellen Reflexen*

Neigung bewegen muß, um die Zielneigung zu erreichen. Diese Richtung ist in Abbildung 34 eingezeichnet. Sie wird berechnet, indem durch Subtraktion der momentanen Neigung von der Zielneigung ein Richtungsvektor gebildet wird. Dieser Richtungsvektor wird einem Richtungsoktanten zugeordnet, der wiederum bestimmt, welcher virtuelle Reflex ausgelöst wird, um die notwendige Neigungsänderung zu bewirken. Diese Zuordnung ist in Abbildung 35 dargestellt.
In der Abbildung wird außerdem eine Methode gezeigt, mit der man die Umwandlung des Richtungsvektors in einen Reflex vornehmen kann. Man legt dazu ein eindimensionales Kohonen-Netz (eine Kohonen-Kette) kreisförmig um den Ursprung des Richtungsvektors. Die Gewichtsvektoren der Neuronen werden genau in die Mitte der Oktanten plaziert. Das Netz ist statisch, d.h. es wird nie trainiert und ändert daher seine Gewichtsvektoren nicht. Jedem Neuron wird der passende virtuelle Reflex zugeordnet, d.h. wird des Neuron aktiviert, wird der zugehörige virtelle Reflex ausgelöst. Präsentiert man nun dem Netz den Endpunkt des Richtungsvektors, wird immer genau das Neuron ausgewählt, in dessen Oktant sich der Vektor befindet, da alle Punkte in dem Oktanten dem Gewichtsvektor dieses Neurons näher sind als jedem anderen Gewichtsvektor. So wird aus dem Richtungsvektor der passende virtuelle Reflex erzeugt.

4.3.9. Zusammenfassung

Es wurde ein selbstorganisierendes, lernfähiges und ständig adaptives Verfahren vorgestellt, mit dem sich das Problem der Neigungssteurung der Laufmaschine lösen läßt. Da dabei alle Beine getrennt behandelt werden, ist es auch nicht notwendig, daß sie gleich konstruiert sind. Einzige Bedingung für das Funktionieren der Neigungssteuerung ist das Vorhandensein von Mechanismen, mit denen sich die Neigung der Maschine ändern läßt.

4.4. Schrittsteuerung

Wenn die Neigungssteuerung die Laufmaschine in eine Position gebracht hat, in der das Bein, das den nächsten Schritt durchführen soll, angehoben werden kann, wird die Schrittsteuerung aktiviert. Ein Schritt besteht aus drei Phasen: das Anheben und das Vorschwenken des Beines und das Absetzen des Fußes. Dabei muß auf verschiedene Situationen reagiert werden:

- Ein Bein kann beim Hochheben weiter Bodenkontakt haben, weil sich die Maschine in Richtung dieses Beines neigt, wie es im dritten Bild der Abbildung 36 dargestellt ist. In diesem Fall muß die Neigungssteuerung informiert werden.
- Beim Vorschwenken des Beines kann der Fuß gegen ein Hindernis stoßen, so daß das Bein weiter angehoben werden muß, um das Hindernis zu überwinden.
- Da auch die virtuellen Reflexe in der Beweglichkeit der Beine begrenzt sind, müssen verschiedene ausprobiert werden, wenn sich ein Reflex nicht ausführen läßt.

In den folgenden drei Abschnitten werden die drei Phasen beschrieben und durch die Abbildungen 37, 38 und 39 veranschaulicht. Da die Reflexe für das Bewegen unterschiedlicher Beine symmetrisch zueinander sind, werden in den Abbildungen nur die virtuellen Reflexe für das Bewegen eines Beines, und zwar des hinteren linken, dargestellt.

4.4.1. Anheben eines Beines

Für das Anheben eines Beines werden die anderen Beine ausgefahren, solange es die Reflexsteuerung zuläßt. Danach befindet sich das anzuhebende Bein in seiner höchsten Position. Wenn der Fußtaster in dieser Position noch gedrückt ist, besteht noch immer Bodenkontakt, d.h., daß das Bein nicht angehoben wurde, sondern die Maschine, wie im dritten Bild der Abbildung 36, umgekippt ist. Wenn der Fußtaster nicht gedrückt ist, das Bein also wie im zweiten Bild der Abbildung 36 angehoben wurde, wird mit dem Vorschwenken des Beines fortgefahren.

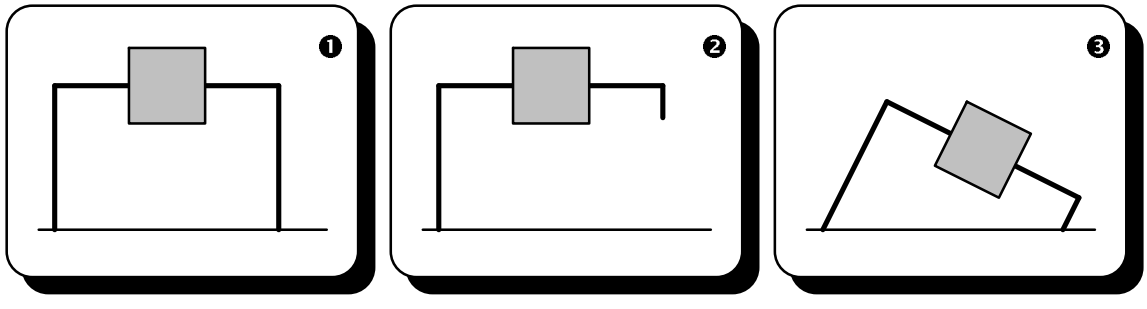


Abb. 36: *Erfolg und Mißerfolg beim Anheben eines Beines*

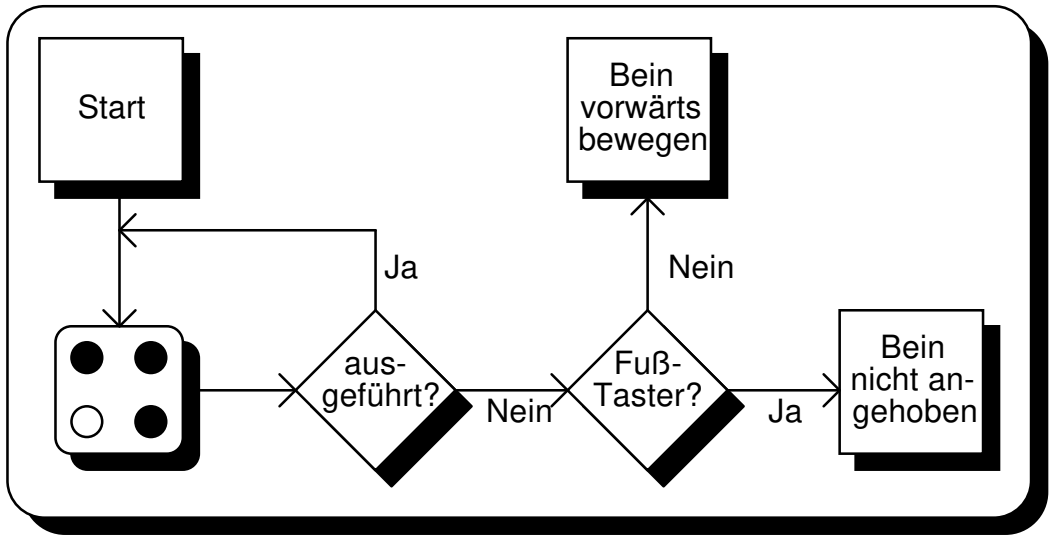


Abb. 37: *Ablauf beim Hochheben eines Beines*

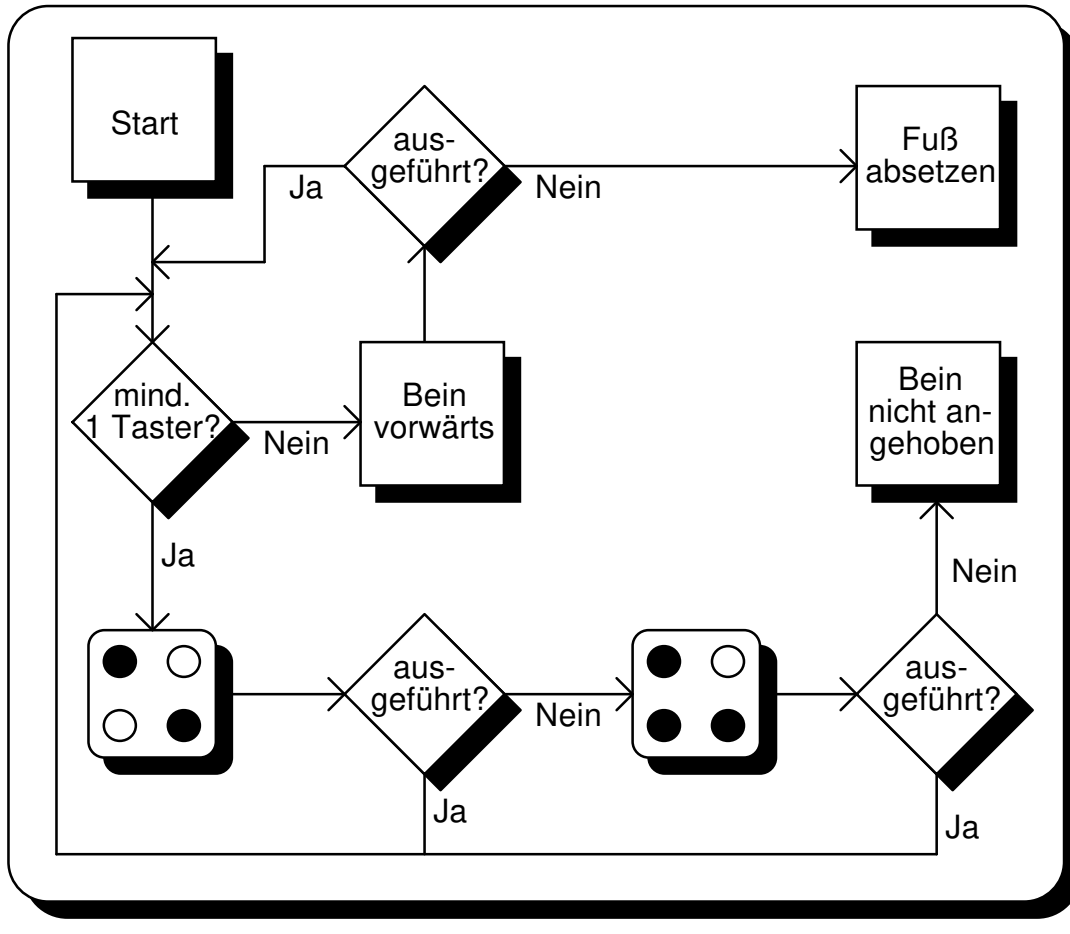


Abb. 38: *Ablauf beim Vorschwenken eines Beines*

4.4.2. Vorschwenken eines Beines

Das Vorschwenken eines Beines gestaltet sich etwas komplizierter als das Anheben. Wenn während der Vorwärtsbewegung ein Hindernis berührt wird, wird versucht, das Bein noch weiter anzuheben. Dazu werden die dem Schrittbein unmittelbar benachbarten Beine weiter ausgefahren, wodurch, weil es sich um einen virtuellen Reflex handelt, das anzuhebende und das gegenüberliegende Bein eingefahren werden. Dadurch wird zum einen das Schrittbein noch weiter angehoben und zum anderen neigt sich die Maschine noch weiter in die Richtung des gegenüberliegenden Beines, wodurch das Schrittbein noch höher gehoben wird. Läßt sich dieser Reflex nicht mehr ausführen, wird nur noch das gegenüberliegende Bein eingefahren. Sobald weder Fußtaster noch Schienbeintaster gedrückt sind, wird die Vorwärtsbewegung so lange fortgesetzt, bis das Bein seine vorderste Position erreicht hat.
Kann das Bein nicht hoch genug angehoben werden, um das Hindernis zu überwinden, wird die Beinbewegung abgebrochen und die Neigungssteuerung darüber informiert. Hat das Bein die vorderste Position erreicht, wird mit dem Absetzen des Fußes fortgefahren.

4.4.3. Absetzen des Fußes

Um den Fuß abzusetzen, wird das Schrittbein wieder ausgefahren, bis der Fußtaster gedrückt und somit der Boden berührt wird. Reicht das Ausfahren des Schrittbeines nicht aus,

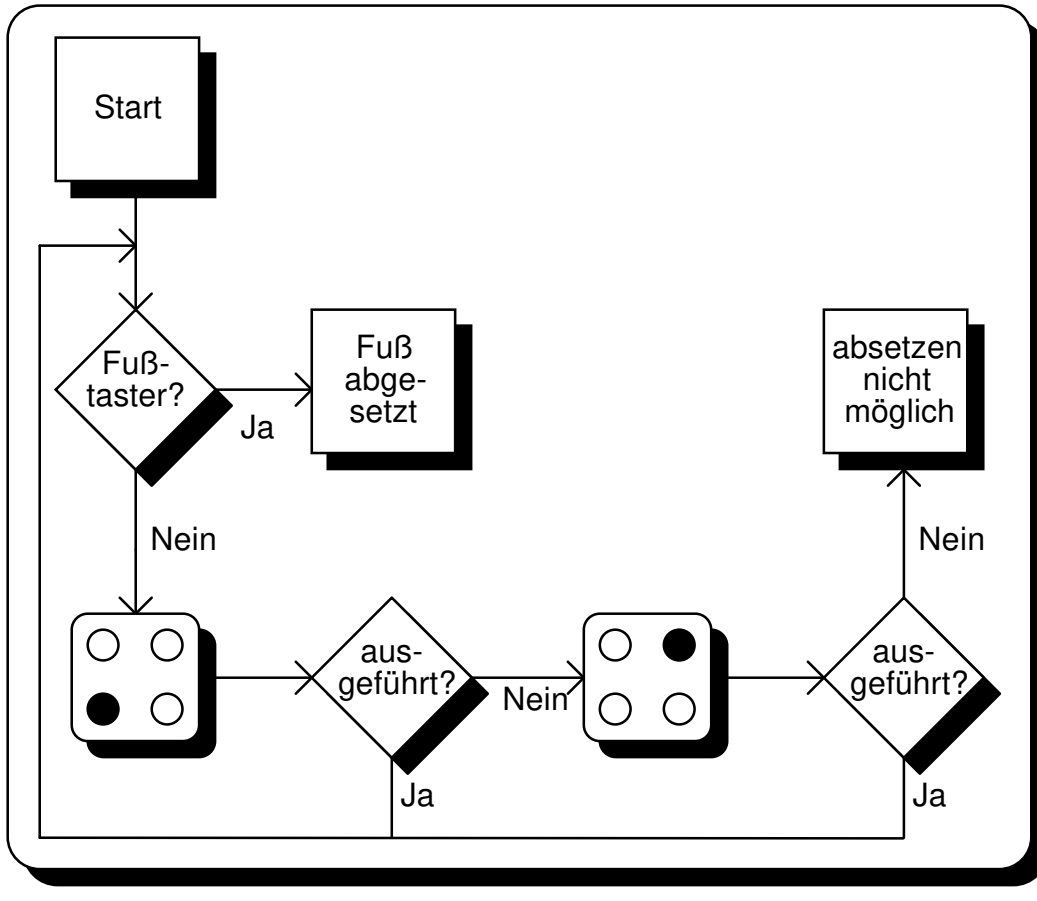


Abb. 39: *Ablauf beim Absetzen des Fußes*

wird das gegenüberliegende Bein ebenfalls ausgefahren. Wird dabei kein Boden erreicht, kann die Maschine den Fuß nicht absetzen, weil sich an der Position des Fußes ein Loch im Boden befindet oder weil die Laufmaschine hochgehoben wurde.

4.5. Zusammenfassung

Die Laufmaschinensteuerung besteht aus vier Teilen, deren Interaktion hier kurz zusammengefaßt werden soll: Die Gangsteuerung realisiert einen sechsphasigen Gang, der aus vier Phasen besteht, in denen jeweils ein Bein vorwärts gesetzt wird, und aus zwei Phasen, in denen alle vier Beine nach hinten und der Körper damit nach vorne bewegt werden. Letztere Phasen werden von der Gangsteuerung selbst durchgeführt. Die anderen werden von der Neigungssteuerung vorbereitet und von der Schrittsteuerung ausgeführt.
Die drei Steuerungen erzeugen alle Aktionen in Form von Reflexen, die von der Reflexsteuerung bereitgestellt werden. Besonderheit der Reflexsteuerung sind die virtuellen Reflexe, die Neigungsänderungen der Maschine ermöglichen und ihre Höhe dabei selbst verwalten.
Die Neigungssteuerung verlagert das Gewicht der Maschine so, daß die Schrittsteuerung es anheben kann. Dazu ändert sie die Neigung des Rumpfes. Diese Neigungen werden durch ein Lernverfahren ermittelt, das nach dem *Trial and Error*-Prinzip funktioniert.

5. Ergebnisse

Um die Laufmaschinensteuerung zu testen, wurden einige Laufversuche unternommen. Die Maschine mußte sowohl über ebenes Gelände als auch über mehrere Bücher unterschiedlicher Höhe laufen. Dabei zeigte sich, daß sie auf beiden Untergründen lernte, den Körper in jeweils günstige Neigungen zu versetzen, um die Beine anzuheben.

5.1. Geländebeschaffenheit

Auf glattem Gelände wird der Gang in etwa 30 Minuten gelernt, was bei ca. ein bis drei Sekunden pro Reflexausführung relativ schnell ist. Nach diesem Zeitraum sind keine Fehler mehr zu erwarten, d.h. es werden keine zufälligen Neigungen mehr eingenommen.
Auf unebenem Untergrund dauert der Lernvorgang etwa doppelt so lange, da die Anzahl unterschiedlicher Neigungen, die eingenommen werden können, größer ist und die Maschine dichter an den Grenzen ihrer Beweglichkeit operiert. Die Laufmaschine hat allerdings manchmal Probleme, die Beine anzuheben, da der Bewegungsspielraum der Beine beim Ein- und Ausfahren nicht ausreicht, um die Höhenunterschiede des Untergrundes auszugleichen und außerdem noch den Rumpf in die richtige Neigung zu versetzen. Dabei handelt es sich um Schwierigkeiten, die auf die Bauweise der Fischertechnik-Laufmaschine zurückzuführen sind und durch die Neigungssteuerung nicht gelöst werden können.

5.2. Beispieldurchlauf

Beim dem hier vorgestellten Versuch muß die Maschine auf ebenem Untergrund laufen. Alle acht Kohohen-Netze - zwei pro Bein - verwenden dieselben Parameter. Jedes Netz besteht aus 5 x 5 Neuronen. Die Gewichte der Neuronen werden mit zufälligen Werten initialisiert, die alle innerhalb des von den Neigungsdetektoren meßbaren Bereichs liegen. Der Lernparameter ε (s. Kapitel 4.2 in [RitMar90]) ist zu Beginn *1* und wird mit der Zeit kleiner, bis er nach 500 Lernschritten *0,1* erreicht. Der zweite Lernparameter σ (s. Kapitel 4.2 in [RitMar90]) sinkt von anfänglich *5* auf *1* nach ebenfalls 500 Lernschritten ab. Oberhalb der Grenze von 500 Schritten bleiben beide Parameter konstant.
Da die Netze je nach Bein unterschiedlich oft trainiert werden, lernen die verschiedenen Netze unterschiedlich schnell. Daher ist es nicht sinnvoll anzugeben, wie sich die Maschine nach 50, 100 oder 500 Lernschritten verhält, da diese Angaben für jedes Netz unterschiedlich sind. Aus diesem Grund macht sich die folgende Beschreibung an Zeitpunkten fest. Die zu den Beschreibungen abgebildeten Netze sind entsprechend einem Blick von hinten auf die Laufmaschine angeordnet, d.h. die Netze der vorderen Beine sind oben zu sehen, die der hinteren Beine unten. Die *nicht-immer-anhebbar*-Netze sind schwarz und die *immer-anhebbar*-Netze grau dargestellt. Wenn Netze sehr klein sind, deutet ein Kreis in ihrer Farbe ihre Position an.

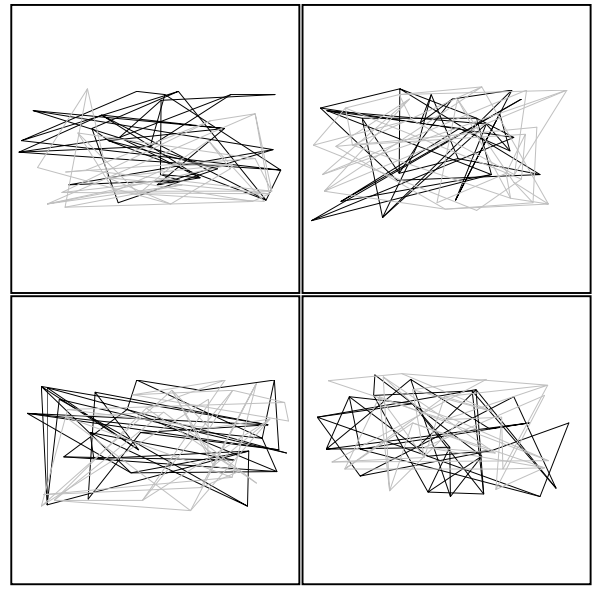


Abb. 40: *Initialisierung der Kohonen-Netze zu Beginn*

5.2.1. Zu Beginn

Die Netze sind zufällig ausgerichtet und überlappen sich (s. Abb. 40). Die Maschine benötigt jeweils relativ lange, um die hinteren Beine anzuheben, d.h. sie muß dazu viele zufällige Neigungen ausprobieren.
Das Anheben der vorderen Beine gelingt ihr schneller. Das liegt daran, daß der Schwerpunkt der Maschine beim Anheben der vorderen Beine zentraler über dem Standdreieck liegt und daher die erforderlichen Neigungen des Maschinenrumpfes weniger extrem ausfallen müssen, um ein Bein anheben zu können.

5.2.2. Nach 10 Minuten

Der Maschine bereitet das Bewegen der vorderen Beine keine Schwierigkeiten mehr. Die *immer-anhebbar-* und *nicht-immer-anhebbar*-Netze dieser Beine haben sich jeweils zu Punkten verdichtet. Das Anheben der hinteren Beine gelingt immer noch nicht sicher. Da verschiedene Neigungen für das Anheben ausprobiert werden, richten sich die Netze entlang dieser Neigungen aus und bilden so eine Grenze zwischen der Anhebbarkeit und der Nichtanhebbarkeit der Beine (s. Abb. 41).

5.2.3. Nach 20 Minuten

Die Laufmaschine hat gelernt, die hinteren Beine anzuheben. Die beiden Netze für die Anhebbarkeit der Beine sind zu Punkten geschrumpft, während sich die *nicht-immer-anhebbar*-Netze aufgrund der langen Suche nach geeigneten Neigungen über größere Flächen ausgebreitet haben (s. Abb.42).

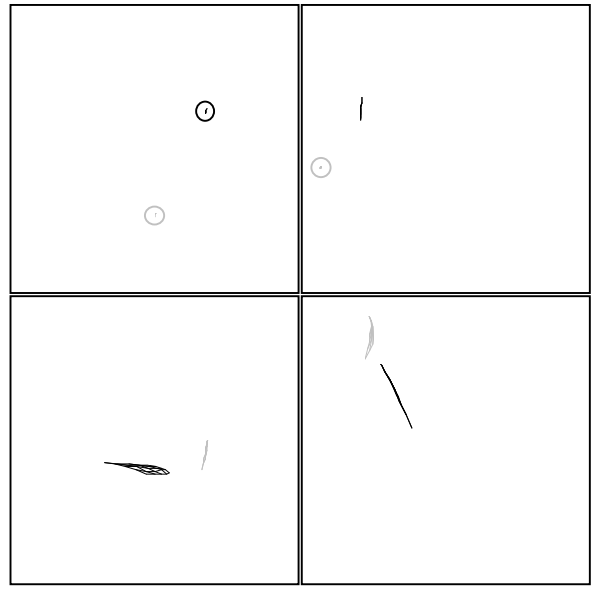


Abb. 41: *Ausrichtung der Kohonen-Netze nach 10 Minuten, Vergrößerung 250%*

Das Problem der Laufmaschine zu diesem Zeitpunkt sind die vorderen Beine. Es zeigt sich, daß die vorschnell eingenommenen punktförmigen Positionen der Netze der vorderen Beine ungünstig waren. Die Maschine neigt sich ständig zu weit nach vorne, um die Beine anheben zu können. Das Umlernen der Netze dauert jetzt relativ lange, da die Beweglichkeit der Gewichtsvektoren (die Parameter ε und σ) bereits stark abgenommen hat.
Da das Lernverfahren auf dem Erzeugen von zufälligen Neigungen beruht, müssen erst einige richtige Neigungen erzeugt werden, bevor sich die Netze so umorientieren, daß das Anheben der Beine wieder funktioniert. Dieses Verhalten kann durch andere Parameterwahl verbessert werden, allerdings auf Kosten der Stabilität des Gelernten gegenüber Fehleinschätzungen, z.B. wenn der Benutzer die Maschine anhebt.

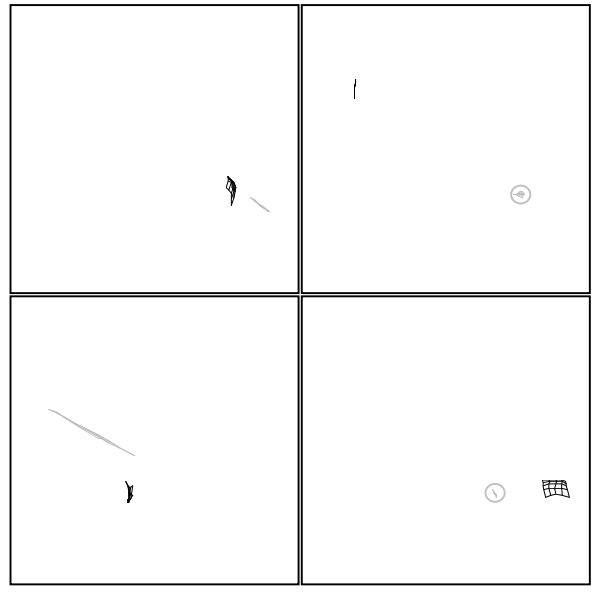


Abb. 42: *Ausrichtung der Kohonen-Netze nach 20 Minuten, Vergrößerung 250%*

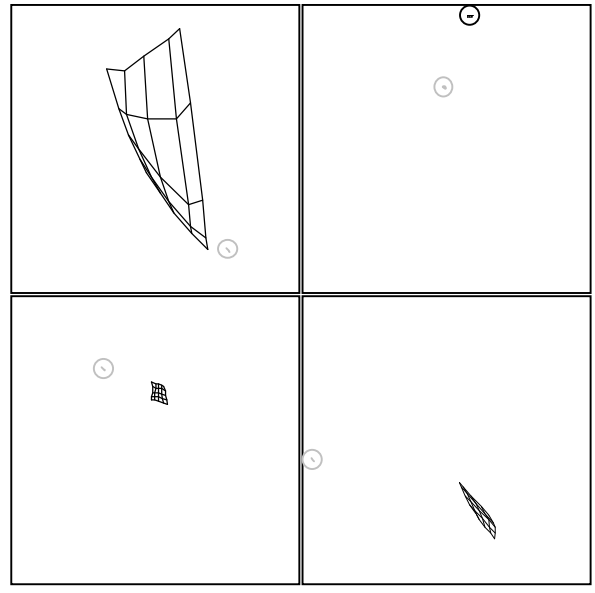


Abb. 43: *Ausrichtung der Kohonen-Netze nach 30 Minuten, Vergrößerung 300%*

5.2.4. Nach 30 Minuten

Nach 30 Minuten läuft die Maschine problemlos. Während das rechte vordere Bein - durch Zufall - sehr schnell eine geeignete Neigung zum Anheben gefunden hat, war die Suche des linken vorderen Beines sehr zeitaufwendig. Entsprechend stellen sich auch die Ausbreitungen der Netze in Abbildung 43 dar: Während das *nicht-immer-anhebbar*-Netz des vorderen rechten Beins quasi punktförmig ist, hat sich das des vorderen linken Beines stark ausgebreitet. Die *immer-anhebbar*-Netze aller vier Beine sind auf Punkte zusammengeschrumpft.

5.3. Bewertung

Wie in den Abbildungen 40, 41, 42 und 43 zu sehen ist, breiten sich die Netze sehr unterschiedlich aus. Vor allen Dingen fällt dabei die teilweise sehr geringe Größe der Netze auf. Diese kommt immer dann zustande, wenn Netze sehr frühzeitig richtige Positionen einnehmen. Die Maschine probiert dann keine anderen Neigungen mehr aus, wodurch die Netze immer mit derselben Neigung trainiert werden. Da die Beweglichkeit der Gewichtsvektoren anfangs noch sehr groß ist, ziehen sich die Netze auf diese Neigung zusammen.
Bei den unterschiedlichen Ausbreitungen der Netze muß man bedenken, daß nicht die Flächen, die die Netze überdecken, wichtig sind, sondern die unsichtbare Trennlinie, die zwischen den beiden Netzen eines Beines verläuft und an der sich entscheidet, welche Neigungen einem bestimmten Netz zugeordnet werden. Diese Grenze wird durch die beiden Netze aufgespannt und trennt den gesamten Eingaberaum in den *immer-anhebbar*- und *nicht-immer-anhebbar*-Bereich. Wenn sie lediglich eine Gerade ist, kann sie auch von zwei punktförmigen Netzen aufgespannt werden. Für eine Kurve müssen sich die Netze großflächiger ausbreiten.

6. Zusammenfassung

Das 2. Kapitel gab einen Überblick über das Gebiet der Laufmaschinen. Dabei wurden Vor- und Nachteile von Laufmaschinen gegenüber anderen Fortbewegungsmitteln diskutiert. Ein historischer Rückblick zeigte die Entwicklung der Laufmaschinen von 1850 bis in die Gegenwart. Die dabei erwähnten Teilprobleme - Mechanik, Sensorik und Steuerung - wurden im Anschluß ausführlicher behandelt. Im 3. Kapitel wurde die Fischertechnik-Laufmaschine VierLING vorgestellt. Dabei wurde ihre Konstruktion dargestellt und die Funktionsweise ihrer Sensorik erklärt. Das 4. Kapitel beschieb die Steuerung der Fischertechnik-Laufmaschine und stellte damit den Kernpunkt dieser Arbeit dar. Die Steuerung wurde in vier Abschnitten beschrieben, die jeweils eines ihrer Module darstellten: die Reflex-, Gang-, Neigungs- und Schrittsteuerung. Zentrales Modul war dabei die Neigungssteuerung, die ihre Aufgabe unter Zuhilfenahme eines Lernverfahrens erfüllt. Ein weiterer Schwerpunkt wurde auf die Reflexsteuerung gelegt, deren mögliche Umsetzung mit statischen neuronalen Netzen aufgezeigt wurde. Den Abschluß bildete ein Beispieldurchlauf des Lauftrainings der Maschine in Kapitel 5. Dabei wurde das Verhalten der Maschine beschrieben, die Entwicklung des "Wissens" der Neigungssteuerung dargestellt und die dabei auftretenden Phänomene erklärt.
Diese Arbeit hat gezeigt, daß sich unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze Probleme der sensomotorischen Kopplung lösen lassen, ohne ein genaues mathematisches Modell von ihnen aufstellen zu müssen. Das vorgestellte Lernverfahren zeichnet sich dadurch aus, daß es autonom (ohne Lehrer) lernt, einen stabilen Zustand erreicht und dennoch ständig anpassungsfähig ist. Die Maschine lernt das Laufen, obwohl die Informationen, die die Steuerung über die Maschine hat, überaus gering sind. Weder ihr Gewicht und seine Verteilung, ihre Größe oder die Länge der Ober- bzw. Unterschenkel sind bekannt, noch wurden die Neigungsdetektoren geeicht oder ermittelt, wie stark die Mechanik unterschiedlichen Belastungen nachgibt. Durch die Lernfähigkeit werden all diese Informationsdefizite kompensiert. Dadurch wurde gezeigt, wie die Implementierung von Steuerungen durch die Verwendung von Lernverfahren drastisch vereinfacht werden kann.
Das Verhalten der Maschine basiert auf zwei Prinzipien:

- Lernen durch Fehler: Es wird nur etwas Neues ausprobiert, wenn Fehler gemacht wurden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß sehr schnell ein stabiler Zustand erreicht wird und keine zufälligen Aktionen mehr durchgeführt werden. Der Nachteil ist, daß irgendeine funktionierende Lösung gefunden wird, aber nicht unbedingt die beste.
- Lösung durch Annäherung: Die Maschine versucht nicht, die richtige Neigung zu errechnen und in einem Schritt einzunehmen. Sie sorgt vielmehr dafür, daß sie ihr in jedem Schritt näherkommt. Dadurch ist das Verfahren nicht von der Präzision der Motorik abhängig und gleicht Störfaktoren wie z.B. Materialermüdung aus.

Diese Herangehensweise an die Lösung eines Problems ließe sich für viele Probleme anwenden, bei denen es auf schnelles Lernen ankommt und kein Wert auf optimimale Lösungen (möglichst schnell, energiesparend usw.) gelegt wird. Das Verfahren kompensiert motorische Ungenauigkeiten, erfordert allerdings, daß anfängliches Fehlverhalten bei der Lösung des Problems tolerierbar ist.

7. Ausblick

Künstliche neuronale Netze können in zunehmendem Maße die Steuerung von Robotern übernehmen. Dabei denke ich nicht an intelligente Wesen, die sich wie Menschen verhalten, sondern vielmehr an Maschinen, die sich einer veränderlichen Umwelt und ihrer eigenen Veränderung z.B. durch Verschleiß veränderlichen Mechanik anpassen können. Dies kann z.B. Kosten senken, weil Maschinen weniger präzise konstruiert und seltener repariert werden müssen, wenn sie kleinere Ungenauigkeiten und Defekte automatisch kompensieren. Die künftigen Anwendungen für Laufmaschinen stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit ihrer Leistungsfähigkeit und ihren Kosten. Laufmaschinen werden z.B. für den Bereich der Raumfahrt entwickelt, um sich auf unwegsamen Planeten zu bewegen.
Die militärische Nutzung von Laufmaschinen ist ebenfalls wahrscheinlich, da dort ein Bedarf an Fortbewegungsmitteln besteht, die sich in unwirtlichem Gelände bewegen können. Aus diesem Grunde die Erforschung neuronaler Netze und dadurch gesteuerter Laufmaschinen ruhen zu lassen, wäre aber keine Lösung, da die Gefahr des Mißbrauchs technischer oder informatischer Neuentwicklungen wohl immer besteht. Man kann nur hoffen, daß in Zukunft die zivile Anwendung neuer Technologien die militärische weit überwiegt, zumal die Existenz der Menschheit zunehmend bedroht ist, z.B. von Unfällen in Chemiefabriken oder Atomkraftwerken oder dem immer mehr aus der Kontrolle geratenden Nuklearmaterial der ehemaligen Sowjetunion. Auf diesen Gebieten gäbe es wahrscheinlich viele nützliche Anwendungsfälle für autonome Roboter. Zu denken wäre z.B. an den Einsatz von Robotern bei der Bekämpfung von Chemieunfällen in kontaminierten Gebieten. Das Leben und die Gesundheit von Menschen könnten dadurch geschützt werden, weil diese nicht mehr selbst zu den großen Gefahrenquellen vordringen müßten, sondern sich darauf beschränken könnten, an sicherem Ort die Tätigkeit der größtenteils autonomen Roboter zu überwachen. Laufmaschinen wären für solche Aufgaben besonders geeignet, da sie sich auf zerstörtem Gelände bewegen könnten, wo Radfahrzeuge versagen würden.
Bei dem heutigen Stand der Forschung an Robotersteuerungen klingt dies wie Zukunftsmusik. Aber vielleicht dauert es gar nicht mehr so lange, bis z.B. die ersten Laufstühle große Verbreitung erfahren. Diese könnten als Rollstuhlersatz Gehbehinderten eine größere Beweglichkeit in einer für laufende Menschen konzipierten Welt verschaffen. Um die Geschwindigkeit und Energieausnutzung zu verbessern, könnte man sie mit Rädern ausstatten, so daß in Abhängigkeit von der Umgebung jeweils die günstigere der beiden Antriebsarten gewählt werden kann. Diese Möglichkeit bestünde auch für andere Laufmaschinen, wenn es für ihr Anwendungsgebiet sinnvoll erscheint. Auf dem Weg zu derartigen lebenserleichternden Anwendungen sind noch viele Probleme zu lösen. So muß z.B. eine kompakte und praktische Bauweise angestrebt werden, die auch sparsam genug mit der Energie der Laufmaschine umgeht. Außerdem muß für die Anwendung von Laufmaschinen im Alltag eine kostengünstige Produktion erreicht werden. Das größte Problem dürfte aber auch weiterhin die Steuerung sein, die sich zwar durch den Einsatz neuronaler Netze vereinfachen ließe; diese müßten aber selbst erst ausreichend erforscht werden.
Wir stehen noch am Anfang einer Entwicklung, die einmal vielleicht zur Lösung großer Probleme beitragen kann und wird. Daher gilt es, die Entwicklung in der Neuro-Informatik voranzutreiben.

8. Literatur

[BarHeb89] Bares, J. / Hebert, M. / Kanade, T. / Krotkov, E. / Mitchell, T. / Simmons, R. / Whittaker, W.: "Ambler - An autonomous rover for planetary exploration" in "Computer", 18-25, Juni 1989.

[BeiHap92] Beier, M. / Hapke, S. / Hoppe, C. / Körtge, N. / Röpnack, A. / Siems, U.: "simSalaBIM", im Abschlußbericht des Projekts FORANN, FB 3 - Informatik, Universität Bremen, 1992

[BerFie91] Berns, K. / Fiegert, M.: "Laufmaschinen - von der Fiktion zur Realität - eine Übersicht", Studie, FZI Karlsruhe, 1991

[Bro86] Brooks, R. A.: "A robust layered control system for a mobile robot" in "IEEE Journal of Robotics and Automation",Vol. RA-2, Nr. 1, März 1986

[Bro87] Brooks, R. A.: "A robot that walks; emergent behaviours from a carefully evolved network", MIT, A. I. Memo 1091, Vol. 2, 1989

[Ghe68] McGhee, R. B.: "Some finite-state aspects of legged locomotion" in "Mathematical Biosciences", 2:67-84, 1968

[Heg92] Heger, M.: "Hierarchisches konnektionistisches Konzept zur Reflexkontrolle einer Laufmaschine", Diplomarbeit, FZI Karlsruhe, 1992

[Koh82] Kohonen, T.: "Self-organized formation of topologically correct feature maps", Biological Cybernetics, 43:59-69, 1982

[LisMos68] Liston, R. A. / Mosher, R. S.: "A versatile walking truck" in "Proceedings of the Transportation Engeneering Conference", Institution of Civil Engeneers, London, 1968

[Rai91] Raibert, M. H.: "Legged robots" in "Research Directions in Computer Science", 371-406, MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1991

[RitMar90] Ritter, H. / Martinetz, T. / Schulten, K.: "Neuronale Netze", Addison-Wesley, München, 1990

[Röf92a] Röfer, T.: "Lernen durch Koinzidenzenbildung", im Abschlußbericht des Projekts FORANN, FB 3 - Informatik, Universität Bremen, 1992

[Röf92b] Röfer, T.: " Ein Roboter sieht rot", im Abschlußbericht des Projekts FORANN, FB 3 - Informatik, Universität Bremen, 1992

[Röf93] Röfer, T.: "VierLING - Vierbeinige Laufmaschine mit Integrierter Neuronaler Gleichgewichtssteuerung", Diplomarbeit, FB 3 - Informatik, Universität Bremen, 1993

[Röf94] Röfer, T.: VierLING - Quadruped with Integrated Neural Balance Control, in: M. Marinaro, P. Morasso (Eds.): Proc. Int. Conf. Artificial Neural Networks, Springer Verlag, 1311-1314, 1994

[SnaHol92] Snaith, M. / Holland, O.: "The application of Temporal Difference Learning to the neural control of quadruped locomotion" in "Towards a Practise of autonomous systems", MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1992

[WalVoh84] Waldron, K. J. / Vohnout, V. J. / Pery, A. / McGhee, R. B.: "Configuration design of the adaptive suspension vehicle" in "International Journal of Robotics Research", 3:37-48, 1984