



Wie eine Kaulquappe im Wasser

Bau eines lautlosen Unterwasserroboters

Wir konstruierten einen lautlosen Unterwasserroboter, der einer Kaulquappe nachempfunden ist. Für das Antriebssystem nutzten wir eine Formgedächtnislegierung. Wir entwarfen zusätzlich eine programmierbare Elektronik, die dafür sorgt, dass der Roboter sich autonom fortbewegen kann.

1 Einleitung

Bei der Verhaltensforschung von Unterwassertieren ergibt sich häufig das Problem, dass durch die Antriebstechnik eines Beobachtungssystems störende Geräusche entstehen. Dadurch können die Tiere in ihrem Verhalten beeinflusst werden. Wir sahen in einem bionischen Antriebssystem eine Möglichkeit, das Problem zu vermindern. Wir nahmen uns die Kaulquappe zum Vorbild und bauten ihren primären Bewegungsapparat mit der Formgedächtnislegierung Nitinol nach. Nitinol nutzten wir, weil es die Bewegungseigenschaften von Muskeln gut nachahmen kann und dabei keine Geräusche erzeugt.

2 Nitinol

Nitinol („Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory“) ist eine Formgedächtnislegierung aus Nickel und Titan mit besonderen thermomechanischen Eigenschaften. Sie wurde 1962 im Naval Ordnance Laboratory in White Oak, Maryland, entwickelt.

Die besondere Eigenschaft dieser Formgedächtnislegierung ist, dass eine Temperaturveränderung zu einer Gitterumwandlung führt. Dadurch kann sich das Nitinol verformen, ausdehnen oder zusammenziehen. Bei Temperaturen unter einer bestimmten Umwand-

lungstemperatur befindet sich das Nitinol in der Martensitstruktur. Die Gitterstruktur oberhalb der Umwandlungstemperatur nennt man Austenit. Unter Belastung bildet sich sowohl aus dem Martensit bei den tieferen Temperaturen als auch aus dem Austenit bei den höheren Temperaturen ein ausgerichteter Martensit (siehe Abb. 1). Die Umwandlungstemperatur hängt von der Legierungszusammensetzung ab und kann etwa zwischen $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen.

Für die Bewegungselemente unseres Roboters nutzen wir die Pseudoelastizität von Nitinol und den Zweivegeeffekt:

Autoren

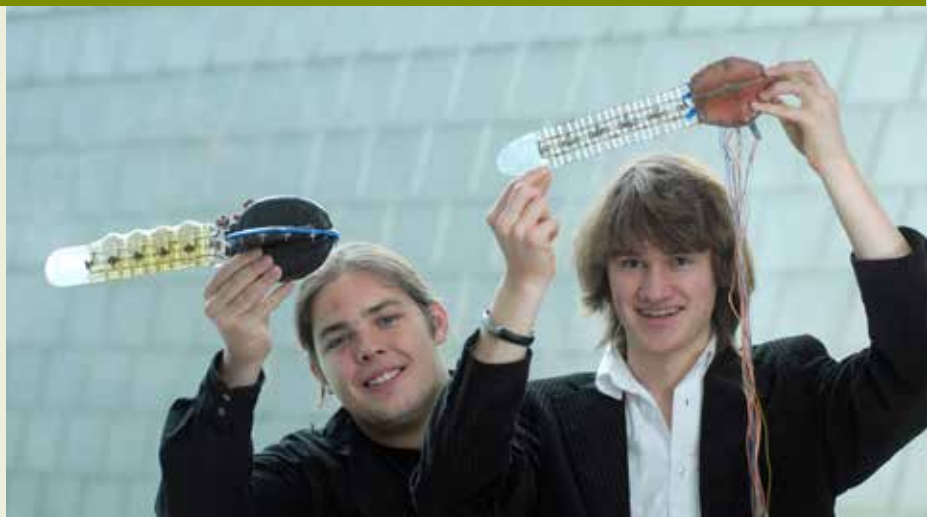
Niclas Müller, *1989
Kaufungen

Philipp Jäger, *1990
Kaufungen

PhysikClub Kassel,
Kassel

Eingang der Arbeit:
Januar 2008

Zur Veröffentlichung angenommen:
Februar 2008



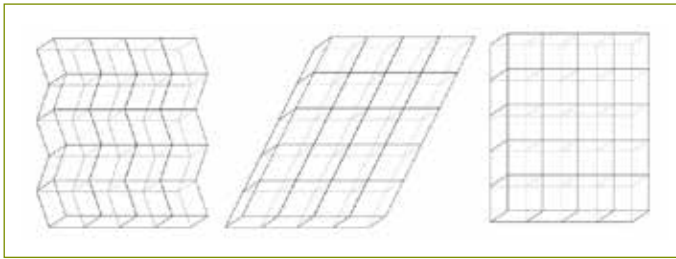


Abb. 1: Verschiedene Gitterstrukturen von Nitinol (Schema); von links nach rechts: Martensit, ausgerichtetem Martensit, Austenit

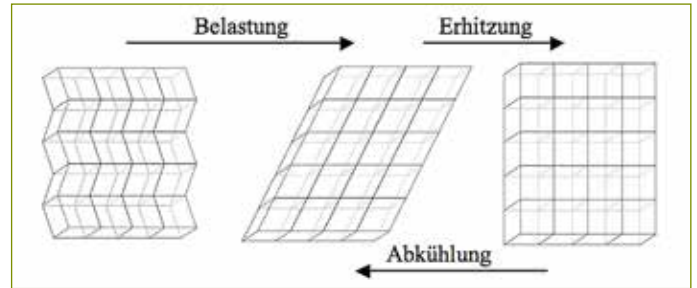


Abb. 2: Schematische Darstellung des Zweirichtungseffektes der Gitterstruktur

Pseudoelastizität: Man kann bei Nitinol, welches sich in der Austenitstruktur befindet, den ausgerichteten Martensit durch mechanische Belastung erzwingen. Dieser wird instabil, wenn die mechanische Belastung nachlässt, so dass das Gitter wieder zurück in die Austenitstruktur springt. Dadurch verformt sich das Nitinol wieder zurück in sein Formgedächtnis. Diesen Effekt nennt man Pseudoelastizität. Er wird zum Beispiel bei Brillendrähnen ausgenutzt, die sich nach einer starken Verformung immer wieder gerade biegen können.

Zweirichtungseffekt: Wenn man Nitinol unterhalb der Umwandlungstemperatur unter mechanische Belastung setzt, induziert man den ausgerichteten Martensit und der Draht dehnt sich aus. Wenn man ihn nun erhitzt, findet eine Gitterumwandlung in den Austenit statt und der Draht zieht sich zusammen. Wenn man den Draht wieder abkühlt, kann er sich, da er unter Belastung steht, ausdehnen, bis er sich wieder im ausgerichteten Martensit befindet. Diesen Kontraktionszyklus kann man beliebig oft wiederholen. Er wird Zweirichtungseffekt genannt (Abb. 2).

Aufgrund der vielen besonderen Eigenschaften, der hohen Korrosionsbeständigkeit und der guten Biokompatibilität von Nitinol gibt es viele Anwendungen in der Medizintechnik, der Automobilindustrie, dem Maschinenbau und der Luft- und Raumfahrt.

3 Bau eines lautlosen Unterwasserroboters

Ergebnis unserer Arbeit ist ein autonomer Unterwasserroboter, der sich annähernd lautlos

fortbewegen kann und einer Kaulquappe nachempfunden ist (siehe Abb. 3).

Er besteht grob eingeteilt aus einem Antriebssystem, welches sich wie ein Kaulquappenschwanz schlängeln kann, und einem wasserdichten Kopf, in dem die Ansteuerungselektronik untergebracht ist. Das Antriebssystem setzt sich aus fünf Bewegungsbausteinen und einer zusätzlichen elastischen Flosse zusammen. Der Roboter ist insgesamt 42 cm lang.

3.1 Funktionsweise des Antriebssystems und der Bewegungsbausteine

Das Antriebssystem ist eine Nachempfindung des primären Bewegungsapparates einer Kaulquappe. Bei einer Kaulquappe entsteht die schlängelnde Bewegung des Schwanzes dadurch, dass Muskelgruppen auf beiden Seiten der axialen Ebene alternierend nacheinander, längs des Schwanzes, kontrahieren. Solche Myomerenpaare werden durch elektrische Impulse von Spinalnerven angeregt.

Ein solcher Antrieb erwies sich für einen Nachbau unter der Verwendung von Nitinol als vorteilhaft, da man die Muskelpaare durch eine paarweise Anordnung von Nitinoldrähten gut simulieren kann (siehe Abb. 4). Die Nitinoldrähte werden durch Stromimpulse erhitzt, verkürzen sich und kontrahieren wie ein Muskel. Durch das Wasser werden die Nitinoldrähte nach der Erhitzung schnell abgekühlt. Dabei dehnen sie sich wieder aus und können dann durch erneutes Erhitzen wieder zusammengezogen werden. Hier wird also der Zweirichtungseffekt der Formgedächtnislegierung ausgenutzt.

Der gesamte Bewegungsbaustein (Abb. 4) besteht neben den zwei dünnen Nitinoldrähten noch aus einem pseudoelastischen Mitteldraht (in Abb. 4 blau eingezeichnet). Dieser besteht ebenfalls aus Nitinol, hat aber eine andere Legierungszusammensetzung, so dass die Umwandlungstemperatur unter dem Gefrierpunkt liegt und der Draht sich permanent im Austenit befindet. Wenn sich nun die Seitendrähte nach einem Stromimpuls zusammenziehen und verkürzen, wird der Mitteldraht verbogen. Hat sich der Seitendraht dann wieder abgekühlt und entsprechend ausgedehnt, entfällt für den pseudoelastischen Mitteldraht die mechanische Beanspruchung und er nimmt wieder seine Ausgangsform an. Nun befindet sich der Bewegungsbaustein wieder im gestreckten Zustand. Anschließend kann sich der ganze Vorgang in derselben oder entgegengesetzter Richtung wiederholen.

Unser System setzt sich aus fünf aneinander geketteten Bewegungsbausteinen zusammen, die jeweils ein Myomerenpaar nachahmen. Werden sie mit Stromimpulsen zur richtigen Zeit angesteuert, kann man mit diesem Verbund die schlängelnde Bewegung eines Kaulquappenschwanzes nachahmen.

3.2 Test des Konzepts und Prototypen

Der erste Prototyp für einen Bewegungsbaustein (siehe Abb. 5 ganz oben) besteht aus einem Nitinolrohr als Mitteldraht und mehreren Seitendrähten, die in einem Gerüst aus Platinen und Stahlstangen fixiert und verbunden sind. Er ist fast 20 Zentimeter lang und die Seitendrähte erfordern einen hohen elektrischen Strom, um ausreichend erhitzt zu werden. Durch das Lochraster

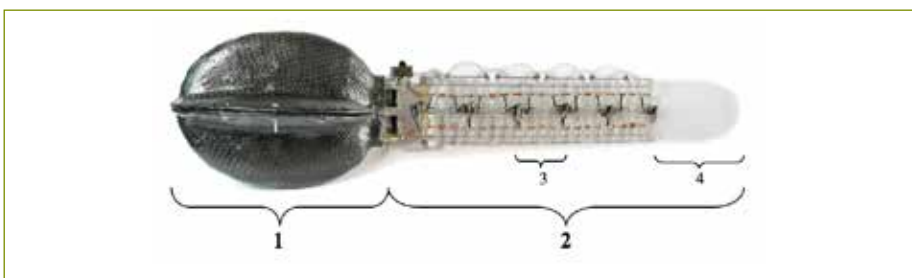


Abb. 3: Gesamtansicht des 42 cm langen Roboters: (1) wasserdichter Kopf, (2) Antriebssystem, (3) Bewegungsbaustein, (4) elastische Flosse

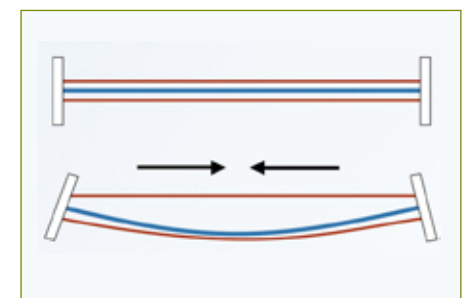


Abb. 4: Funktionsschema eines Bewegungsbausteins

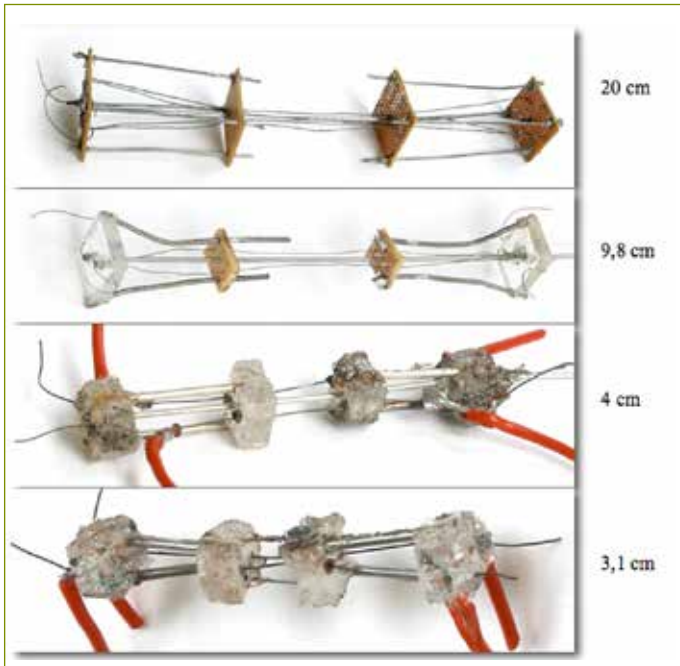


Abb. 5: Entwicklung der Bewegungsbausteine

der Platinen konnten wir den Abstand der Seitendrähte zum Mitteldraht einstellen, was uns ermöglichte, das Verhältnis zwischen der benötigten Zugkraft der Seitendrähte und der Biegestärke des Bewegungsbausteins einzustellen. Dabei erreichte der Bewegungsbaustein eine Biegung von bis zu 20°.

Nach dieser Bestätigung unseres Antriebskonzeptes verbesserten wir den Bewegungsbaustein mit dem Ziel, weniger Strom bei einer Biegung zu verbrauchen und eine stärkere Bie-



Abb. 6: Weiterentwicklung eines Bewegungsbausteins von einem zu zwei Mitteldrähten (blau)

gung zu erreichen (Abb. 5). Wir verkleinerten ihn bis auf eine Länge von ca. drei Zentimetern und konnten deshalb auch dünnere Drähte verwenden, wodurch der Stromverbrauch sank. Außerdem ersetzten wir den Mitteldraht durch zwei Nitinoldrähte, die in der axialen Ebene lagen (blau gefärbt), aber nicht mehr zwischen den Seitendrähten (rot gefärbt) (Abb. 6). So konnten die kontrahierenden Drähte näher zusammen rücken. Die Biegung, die von dem Bewegungsbaustein erreicht wurde, konnte so auf etwa 25° gesteigert werden. Außerdem konnte so verhindert werden, dass Kurzschlüsse mit den Mitteldrähten entstehen und die Bewegungsrichtung der Bewegungsbausteine war stabiler.

3.3 Der endgültige Bewegungsbaustein

Der kleinste Bewegungsbaustein in Abb. 5 erfüllt zwar alle benötigten Eigenschaften mit Blick auf die Größe und benötigte Erhitzungsleistung, eignet sich aber noch nicht für eine Aneinanderkettung zur Nachahmung eines

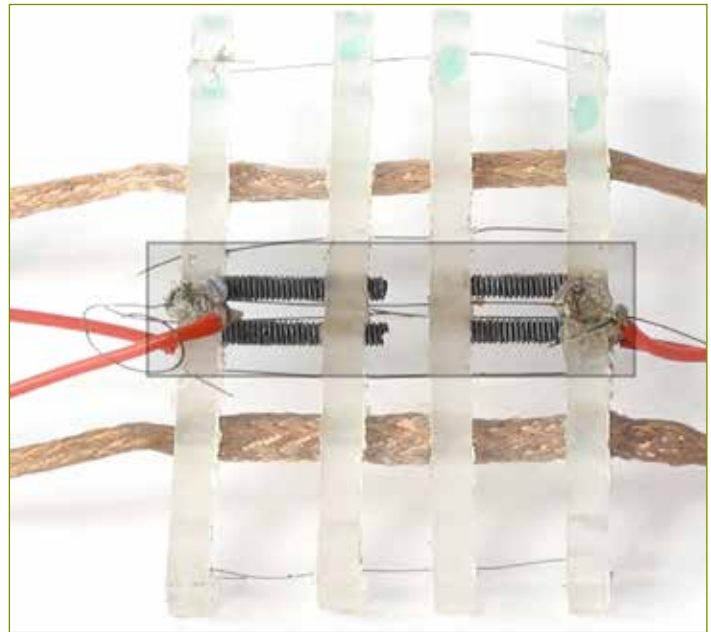


Abb. 7: Bewegungsbaustein aus Plexiglasrippen (das vorhergehende Modell ist hervorgehoben)

Kaulquappenschwanzes. Hierfür entwickelten wir ein Modell, welches unter anderem aus Plexiglasrippen besteht (Abb. 7). Diese erlauben es, die Bewegungsbausteine durch das Einschmelzen von Drähten in die äußeren Rippen zu verbinden. Dunkel hervorgehoben erkennt man den ursprünglichen Bewegungsbaustein. Durch jeden dieser Bewegungsbausteine sind zwei Kupfergeflechte gelegt, die als Hauptstromleitungen dienen und mit gebogen werden können.

Das gesamte Antriebssystem (Abb. 8) besteht aus fünf Bewegungsbausteinen, die intern verschaltet sind, sowie einer elastischen Flosse zur Verstärkung des Vortriebs.

Um gezielt von der Vorderseite des Antriebs aus bestimmte Bewegungsbausteine ansteuern zu können, sind zwischen ihnen immer zwei Leistungstransistoren angebracht, die im angesteuerten Zustand jeweils einen Seitendraht mit der Hauptstromleitung verbinden, so dass er erhitzt wird.

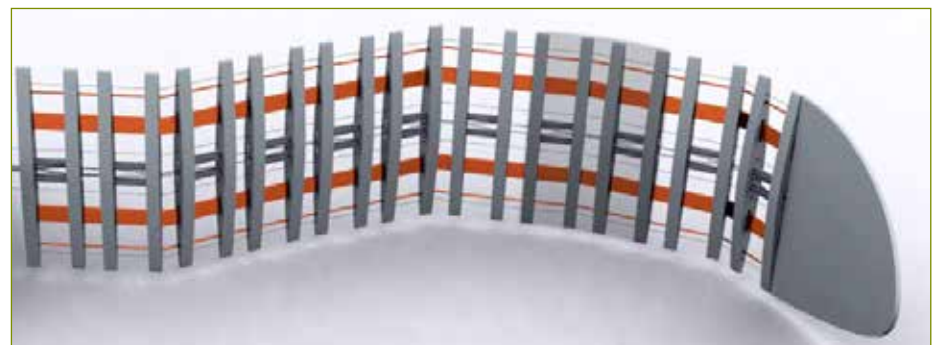


Abb. 8: Schematische Darstellung des Antriebssystems mit einem markierten Bewegungsbaustein (Grafik von Amin Cyal Sass)

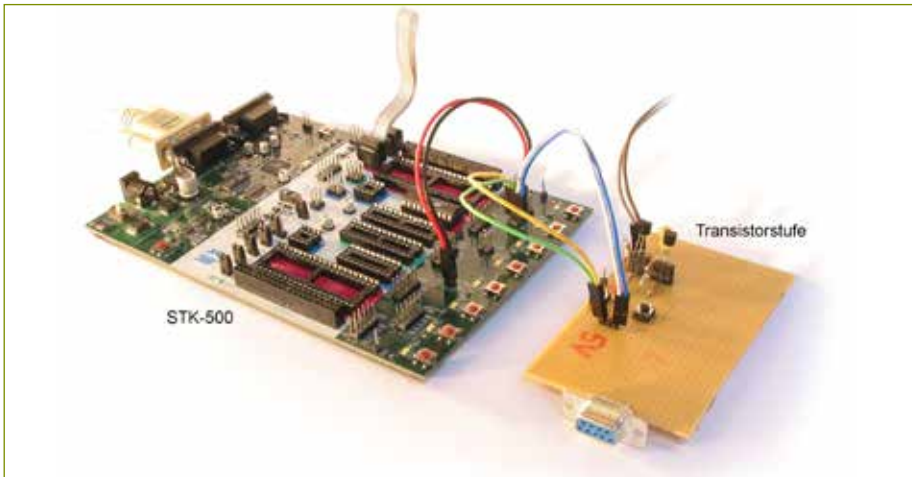


Abb. 9: Elektronik zur Ansteuerung einzelner Bewegungsbausteine



Abb. 10: Elektronik zur Ansteuerung des Antriebs mit einem Computer

Von jedem Leistungstransistor führt eine dünne Ansteuerungsleitung zur Vorderseite des Antriebs. Ein solches Antriebssystem hat eine ähnliche Form wie ein Kaulquappenschwanz und ist bei der richtigen Ansteuerung in der Lage, das Bewegungsmuster einer echten Kaulquappe annähernd nachzuahmen.

3.4 Ansteuerungselektronik

Für die Ansteuerung der einzelnen Seiten der Bewegungsbausteine sind an jedem Bewegungsbaustein zwei Leistungstransistoren angebracht. Diese verbinden im angesteuerten Zustand die jeweiligen Seitendrähte mit der Hauptstromleitung, so dass diese erhitzt werden. Von jedem Leistungstransistor führt eine dünne Ansteuerungsleitung zur Vorderseite des Antriebs. Um die effektive Erhitzungsleistung digital regeln zu können, verwenden wir phasenmodulierte Signale (PWM). Hierbei handelt es sich um eine Rechteckspannung, deren An- und Ausphasen verändert werden können. Da nun die Seitendrähte immer nur in einer Anphase mit der Hauptstromleitung verbunden sind, wird der effektive Stromfluss von der Phasenmodulation bestimmt.

Die ersten Versuche zur Ansteuerung der Bewegungsbausteine haben wir mit einem AT Mega-

16 Mikroprozessor durchgeführt. Dieser befand sich auf einem STK500 Programmierboard und wurde ergänzt durch eine Transistorstufe (siehe Abb. 9). Wir konnten so eine einfache Ansteuerung realisieren und die Funktion der Bewegungsbausteine testen.

Als nächstes entwickelten wir eine Steuerelektronik auf Basis zweier AT Tiny2313-Controller (Abb. 10). Diese befinden sich auf einer Platine mit einer Festspannungsversorgung. Sie gewährleistet einen Schutz der Prozessoren vor Überspannung. Auf einer zweiten Platine befinden sich Transistorstufen, die die PWM Signale auf jeweils zwei Steuerleitungen umschalten können. Außerdem wurde mit Leuchtdioden eine Anzeige realisiert, um die eingeschalteten Bewegungsbausteine zu überwachen.

Die Platine ist in der Lage, von einem Computer über die serielle Schnittstelle kommende Signale in Steuerbefehle umzusetzen. Mit dieser Entwicklung ist es uns möglich, das Antriebssystem von außen anzusteuern.

Zuletzt entwickelten wir eine neue Elektronik auf der Basis eines AT Mega 1280-Controllers (Abb. 11). Diese musste im Kopf Platz finden und sollte dennoch auf einer Lochrasterplatine realisiert werden. Alle Verbindungen zu anderen Kompo-

nenten sind steckbar ausgeführt, um Wartungsarbeiten zu vereinfachen. Ein Festspannungsregler liefert stabile fünf Volt für den Prozessor. Die Elektronik war erstmals in der Lage, jede Seite der Bewegungsbausteine des Antriebssystems einzeln anzusteuern. Über einen n-Kanal MosFET-Transistor kann der Stromfluss zum Antrieb durch die Software oder über einen Reedschalter unterbrochen werden. Diese Elektronik wird von Akkus gespeist, die das Antriebssystem ungefähr 15 Minuten mit Strom versorgen können.

3.5 Kopf des Roboters

Der Kopf besteht aus zwei Schalen, die miteinander wasserdicht verschraubbar sind (Abb. 12). Die Schalen bestehen aus einem Kohlefaser-gewebe und einem Polyesterlaminat. Zwischen ihnen befindet sich ein Dichtungsring aus Moosgummi.

Im Kopf findet die gesamte Steuerelektronik Platz (Abb. 13). Diese ist mit ihm steckbar verbunden

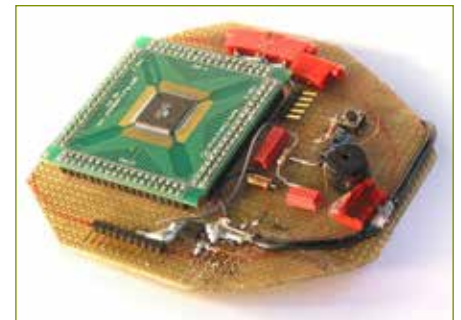


Abb. 11: Elektronik zur autonomen Ansteuerung, die im Kopf Platz findet



Abb. 12: Wasserdichter Carbonkopf, der über Stecker mit dem Antrieb verbunden wird



Abb. 13: Innenansicht des Kopfes mit eingebauter Elektronik

und kann über eingebaute Verbindungen ihre Funktion erfüllen. An die Elektronik sind die ebenfalls im Kopf untergebrachten Akkus angeschlossen. Auf der Rückseite befindet sich eine Steckleiste, an der sämtliche elektrischen und mechanischen Verbindungen zum Antriebssystem untergebracht sind.

Am Kopf befindet sich ein Schalter, um die Elektronik zu deaktivieren. Außerdem wurde ein Stecker zur Programmierung des Prozessors angebracht, und LEDs im vorderen Bereich zeigen die Aktivität. Sind sie ausgeschaltet, ist die Elektronik stromlos; leuchten sie dunkel, ist die Elektronik in Betrieb, aber der Stromfluss zum Antriebssystem unterbrochen. Wenn sie hell leuchten, ist das System voll aktiviert. Auf der Innenseite des Kopfes befindet sich noch ein Reedschalter, der durch einen Magneten ausgelöst wird und den Stromfluss im Antrieb unterbricht. So ist eine Notabschaltung möglich.

4 Programme und Bewegungstests

Die Elektronik zur externen Ansteuerung des Antriebssystems enthält zwei Programme. Das erste Programm läuft auf einem Computer, das Zweite ist in zwei AVR Controllern untergebracht. Das Computerprogramm liest einen Algorithmus ein, der sich in einer Textdatei befindet (siehe Abb. 14). Diese enthält Informationen über die Zeit der Auslenkung und die gewünschte Erhitzungsleistung der jeweiligen Nitinoldrähte. Die Daten werden in zwei Bytes codiert und über die serielle Schnittstelle an die AVR Controller gesendet. Diese werten die Daten aus und steuern die passenden Nitinoldrähte im Antrieb über eine Verstärkerstufe an. Dabei wird die zugeführte Leistung über ein PWM-Signal gesteuert.

Bei der autonomen Steuerung übernimmt das Programm unserer internen Elektronik im Atmega 1280 die Aufgabe, über 10 PWM-Ports die einzelnen Seiten der Bewegungsbausteine phasenmoduliert anzusteuern (siehe Abb. 15).

Der Bewegungsalgorithmus wird im Flash-Speicher des Controllers gespeichert. Hierzu wird dieser in binären Werten codiert. Dabei werden immer abwechselnd zwei zusammengehörige Werte ausgelesen. Entweder werden Steuerleitung und Erhitzungsrate angegeben oder es wird ein Pausenzeichen und eine Pausendauer angegeben. Zusammengesetzt wird mit diesen Angaben das Antriebssystem angesteuert. Beim Auslesen des Algorithmus aus dem Flash-Speicher haben wir eine Sicherung eingebaut, die verhindert, dass beide Seitendrähte eines Bewegungsbausteins gleichzeitig erhitzt werden.

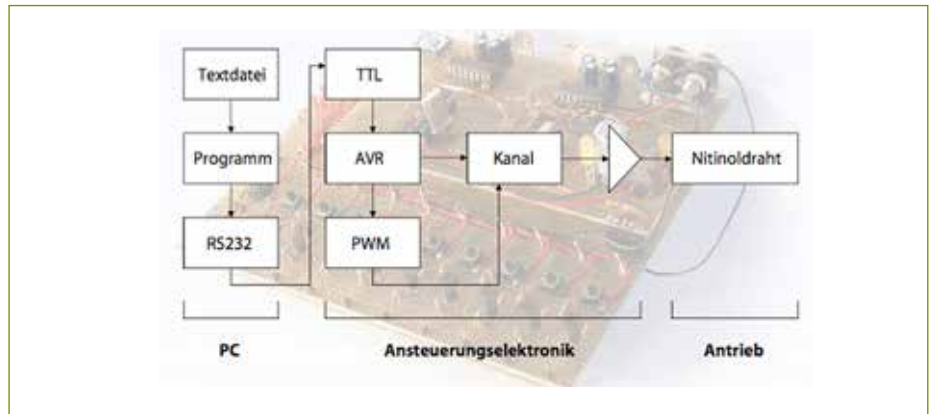


Abb. 14: Schema für die externe Ansteuerung mit dem Computer

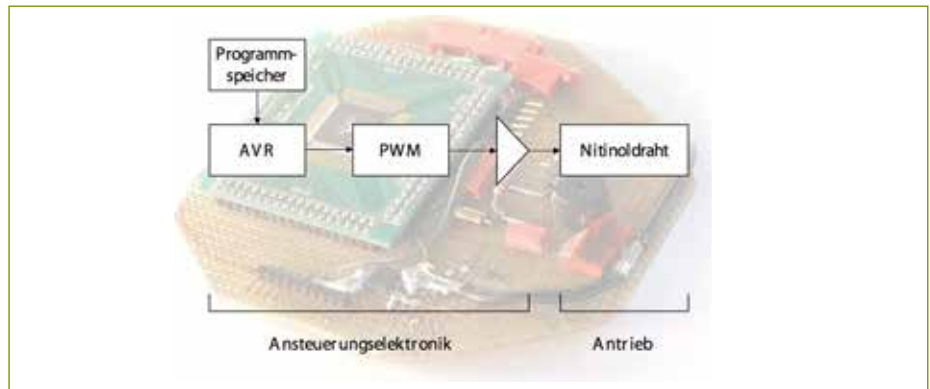


Abb. 15: Schema der Elektronik für eine autonome Ansteuerung

Als Bewegungsalgorithmus erwies sich das Prinzip der Undulation als am geeignetsten. Es handelt sich hierbei um das Fortbewegungsprinzip einer Kaulquappe.

Diese erreicht durch eine schlängelnde Bewegung ihres Schwanzes einen Vortrieb. Die Bewegung verläuft ähnlich wie eine Sinusschwingung mit steigender Amplitude, die den Schwanz von vorne nach hinten durchläuft.

In der dargestellten Bildfolge (Abb. 16) sieht man den Vergleich zwischen der Fortbewegung einer Kaulquappe und der Nachahmung durch unseren Roboter.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Während unserer Arbeit ist es uns gelungen, einen annähernd lautlosen Unterwasserantrieb zu entwickeln, der ähnlich wie der Bewegungsapparat einer Kaulquappe funktioniert. Diesen haben wir zu einem Roboter erweitert, der sich autonom unter Wasser fortbewegen kann. Damit haben wir unsere anfangs gesetzten Ziele erreicht.

Auf der Webseite der North-Eastern University in Massachusetts, USA [3], haben wir von einem ähnlichen Projekt gelesen. Hier wurde ein Neunauge nachgebaut. Für den Antrieb wurde auch Nitinol verwendet, welches an den Seiten von elastischen Kunststoffplatten fixiert wurde. Wenn die fixierten Seitendrähte erhitzt werden,

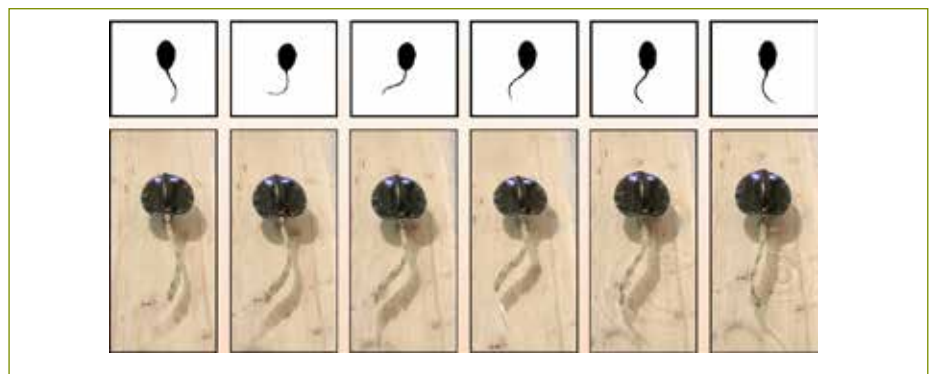


Abb. 16: Obere Bildreihe: Momentaufnahmen einer schwimmenden Kaulquappe; untere Bildreihe: Vergleichbare Aufnahmen der Roboterbewegung

biegt sich die Kunststoffplatte ähnlich wie der von uns entworfene Bewegungsbaustein. Der Vorteil unserer Bewegungsbausteine ist, dass sie sich durch den komplexeren Aufbau stärker biegen können. Dadurch kann unser Roboter mit langsameren Bewegungen einen vergleichbaren Vortrieb erreichen.

Folgende Weiterentwicklungen können wir uns für unseren Roboter vorstellen: Er könnte durch ein Sensorsystem erweitert werden, welches die Orientierung unter Wasser ermöglichen würde. Außerdem wäre eine Nutzlast, wie zum Beispiel eine Kamera, denkbar, um Messdaten aufzunehmen. Der Bewegungsalgorithmus könnte durch einen genetischen Algorithmus verbessert werden, der sich selbst optimieren würde und sich an die Umgebungsbedingungen anpasst.

Mit einer Nutzlast könnte der Roboter wegen seiner Lautlosigkeit bevorzugt in der Verhaltensforschung von Unterwassertieren eingesetzt werden. Durch seine dynamische Form und die glatte Oberfläche könnte er sich auch besser durch stärker bewachsene Gewässer fortbewegen als ein durch eine Schiffsschraube angetriebenes System.

Literatur und Quellen

- [1] Siewing, Rolf (Hrsg.): Lehrbuch der Zoologie, Bd.1, 3. Aufl., Stuttgart, New York, 1980
- [2] Musolff, André: Formgedächtnislegierungen – Experimentelle Untersuchung und Aufbau von adaptiven Strukturen, Dissertation TU Berlin, 2005
- [3] Webseite des Projektes der North-Eastern University in Massachusetts: <http://www.neurotechnology.neu.edu/lamprey.html>
- [4] Webseite der Universität Kassel: <http://www.ifm.maschinenbau.uni-kassel.de/~helm/shape-memory-alloys-1.html>

Dank

An dieser Stelle wollen wir allen danken, die uns bei dieser Arbeit unterstützt haben. Primär ist hier Klaus-Peter Haupt, der Leiter des PhysikClubs Kassel zu nennen, der uns in unserer zweijährigen Arbeit intensiv gefördert hat. Des Weiteren danken wir Amin Cyal Sass, einem Mitarbeiter des PhysikClubs, für das Anfertigen von Grafiken und Mike Vogt, der uns insbesondere bei der Programmierung unterstützt hat.