

[JUNGE] wissenschaft

Jungforscher*Innen publizieren
online | **peer reviewed** | original

Verlag:
Physikalisch-
Technische
Bundesanstalt



Technik

Klettern wie Spider-Man

Konzeption, Realisierung und Erprobung eines mit Saugnäpfen ausgestatteten Kletteranzugs

Tiere können an Decken und Wänden klettern, der Mensch nicht, dabei wäre das z.B. bei Montage- oder Rettungsarbeiten nützlich. Daher wurde ein Kletteranzug entwickelt, der mit insgesamt vier selbstentwickelten Saugnäpfen, befestigt an Armen und Beinen, das Klettern an glatten und rauen Oberflächen ermöglicht.

DER JUNGFORSCHER



© Stiftung Jugend forscht e.V.

Vincent Weigl (*2009)
Kronberg-Gymnasium
Aschaffenburg

Eingang der Arbeit:

20.7.2025

Arbeit angenommen:

28.7.2025



Klettern wie Spider-Man

Konzeption, Realisierung und Erprobung eines mit Saugnäpfen ausgestatteten Kletteranzugs

1. Motivation und Fragestellung

Fast jeder, der einen der „Spider-Man“ Filme gesehen hat, wird begeistert gewesen sein von seinen Fähigkeiten, an Wänden, Decken und anderen Oberflächen zu klettern. Auch in der echten Welt gibt es Lebewesen, die genau dazu in der Lage sind, wie zum Beispiel Geckos.

Auch bei Menschen wäre diese Fähigkeit nicht schlecht, da Arbeitsbereiche und Orte wie Überhänge oder Deckenbereiche, die kaum oder nur mit schwerer Ausrüstung zugänglich sind, problemlos erreicht werden könnten: Rettungskräfte, wie beispielsweise die Feuerwehr, wären nicht mehr auf eine ausreichende Leiterhöhe angewiesen. Industriekletterer sowie andere Handwerker und Wartungstechniker müssten zum Besteigen von Tanks, Kühltürmen oder Windkraftträdern nicht mehr auf komplizierte Seilsysteme setzen. Auch im Militär, beispielsweise bei der Marine zum Besteigen von Schiffsrümpfen, könnte eine solche Fähigkeit von erheblichem Nutzen sein.

Ausgehend von diesen Einsatzszenarien ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Kletteranzug zu entwickeln, der es Menschen erlaubt, sich so sicher wie möglich sowohl an glat-

ten als auch an rauen Oberflächen dreidimensional im Raum zu bewegen.

2. Grundlagen und bisherige Lösungsansätze

2.1 Haftmethoden

Die Forschung in Bezug auf das Erklimmen von Wänden, die über die letzten Jahre betrieben wurde, fand vor allem im Bereich der Robotik statt. Dies liegt insbesondere daran, dass Roboter leichter sind als Menschen, und die Risiken, die ein Absturz mit sich bringt, nicht so hoch sind. Sogenannte Wall Climbing Robots (WCRs) nutzen im Wesentlichen vier verschiedene Haftmethoden: magnetische Kräfte, elektrostatische Kräfte, Haftkräfte durch Molekularkräfte oder Saugkräfte [12].

Roboter, die magnetische Haftung nutzen, sind mit Permanentmagneten oder Elektromagneten ausgestattet, während bei elektrostatischer Haftung, Anziehungskräfte über ein elektrisches Feld zwischen der haftenden Fläche und der Wand erzeugt werden. Ein Ansatz aus der Bionik ist das Imitieren der Mikro-

faserstruktur, das es Geckos durch das effektive Nutzen von Van-der-Waals-Kräften ermöglicht, an Oberflächen zu haften. Eine weitere Methode ist die Haftung durch Unterdruck. Hierbei wird ein Unterdruck mithilfe von Saugnäpfen oder Propellern zwischen dem Roboter und der Wand erzeugt.

All diese Methoden sind auch potenziell für einen Kletteranzug anwendbar. Bei genauerer Betrachtung erfüllen einige jedoch nicht die Anforderungen für den gewünschten Einsatz. Denn um einen im Alltag verwendbaren Kletteranzug zu bauen, muss beachtet werden, dass die meisten Gebäude aus Stein oder Beton bestehen und mit einer Art Putz versehen sind, was zu einer rauen Kletteroberfläche führt. Da die wenigsten Gebäude Metalloberflächen aufweisen, scheidet die magnetische Haftung weitgehend aus. Auch elektrostatische Haftung erweist sich aufgrund der geringeren Kraft und der rauen Beschaffenheit der Oberfläche als ungeeignet.

Hawkes et al. (2015) beschäftigten sich mit Gecko-Klettern und entwickelten einen Prototyp-Anzug [5], mit dem jedoch nur auf sehr glatten Flächen geklettert werden kann. Somit bleibt die Methode der Haftung durch Unterdruck die plausibelste Option für einen Kletteranzug mit vielseitiger Anwendbarkeit.

2.2 Bisherige Lösungsansätze

Bei Kletterrobotern, die die Haftung durch Unterdruck erreichen, kommen hauptsächlich Rotor- oder Pumpensysteme zum Einsatz. Bei rotorbasierten Ansätzen, wie beispielsweise der City-Climber [4] wird ein Unterdruck durch einen kontinuierlichen Luftstrom erzeugt. Dadurch wird das Tragen hoher Lasten und eine sichere Haftung auf sehr rauen Oberflächen ermöglicht, aber es erfordert große Bauvolumina und einen hohen Energieeinsatz, wodurch sich diese Systeme nur eingeschränkt für tragbare Anwendungen eignen.

Konzepte, die auf Vakuumpumpen basieren, stellen hingegen eine deutlich praktikablere Alternative dar. Longo und Muscato (2006) [10] entwickelten den Kletterroboter Alicia, der aus drei Segmenten besteht, von denen jedes mit einem starren Saugnapf ausgestattet ist. Die Saugnäpfe werden durch Vakuumpumpen evakuiert, was eine kontrollierbare Fortbewegung an vertikalen Oberflächen ermöglicht. Schon zuvor hatten La Rosa et al. (2002) [9] den Roboter SURFY entwickelt, der sich mithilfe von acht Saugnäpfen, die von einer zentralen Vakuumerzeugung gespeist werden, fortbewegt. Eine aktuellere Arbeit von Bilal et al. (2023) [1] beschreibt ein vierbeiniges System, bei dem jeder Saugnapf über eine eigene Vakuumpumpe verfügt. Diese dezentrale Verteilung der Vakuumpumpen ermöglicht ein sichereres Klettern und eine höhere Autonomie, während die modulare Struktur eine gleichmäßige Verteilung der Last ermöglicht und die Steuerung eine effiziente Fortbewegung mit geringem Energieeinsatz erlaubt.

In Bezug auf tragbare Klettersysteme, wie einen Spiderman-Anzug, sind Ansätze, die auf Pumpen basieren, eindeutig vorteilhafter. Sie können kompakter gebaut werden, bieten eine höhere Energieeffizienz und können durch die Möglichkeit, die Technik in die Form der menschlichen Gliedmaßen zu integrieren, die Last optimal verteilen. Im Gegensatz dazu erweisen sich rotorbasierte Systeme aufgrund ihres großen Bauvolumens und ihres hohen Energieverbrauchs für diese Anwendung als weniger praktikabel.

Trotzdem existieren bislang nur wenige Beispiele für tragbare Klettersysteme. Ein Projekt des Kinderkanals zeigte, wie Checker Tobi mithilfe von Vakuumsaugnapfen, wie sie von Glasern verwendet werden, an einer Glaswand hochklettert [2]. Bei dieser Methode wurde der Saugnapf auf das Glas aufgesetzt und die Luft manuell über eine Pumpe entfernt. Zum Ablösen wurde per Knopfdruck ein Ventil geöffnet, das Luft einströmen lässt. Dieses System funktioniert jedoch nur auf glatten Oberflächen.

Ein besserer Ansatz wurde in der Kindersendung Checkpoint 2020 gezeigt [2]: Zwei Staubsauger wurden an einem Rucksack befestigt und mit großen Saugnäpfen mit einer Schaumstoff-Gummi-Dichtung versehen. Die Saugnäpfe verfügen

über einen Griff und ein einfaches Ventil, um Luft einströmen zu lassen. Damit gelang es, eine Ziegelsteinwand mit rauer Oberfläche hochzuklettern. Die Technik des „Staubsaugerkletterns“ ist mittlerweile weit verbreitet, wie zahlreiche Videos und Artikel, in denen verschiedene Personen ein Klettersystem mit Staubsaugern bauten und testeten, zeigen. 2013 gab es zum Thema „Staubsaugerklettern“ sogar eine Jugend-forscht-Arbeit [11]. Allerdings haben alle Systeme mit Staubsaugern einige gemeinsame Nachteile: Staubsauger sind schwer, klobig und nicht speziell für das Klettern gedacht. Der Kletterer muss nicht nur ein großes Gewicht mit sich tragen, sondern es müssen wegen des zusätzlichen Gewichts sehr große Saugnäpfe verwendet werden. Der von Staubsaugern generierte Unterdruck ist zudem begrenzt, weil die Dichtungen innerhalb des Gerätes nicht für Vakuumverhältnisse gebaut sind. Das größte Problem besteht aber darin, dass Staubsauger zur Stromversorgung über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden sein müssen, was die Mobilität und Sicherheit des Kletterers erheblich einschränkt.

Der Techniker und Youtuber Jlaservideo nutzt bei einem Kletteranzug 2021 kleine Vakuumpumpen [7]. Der Anzug wurde mit Ventilen und Drucksensoren ausgestattet, die über LED-Anzeigen dem Kletterer den Unterdruck anzeigen. Dennoch weist das System erhebliche Nachteile auf: Es ist nur grob zusammengebunden und die Kabel sind sehr unordentlich platziert, wodurch der Anzug schwer an- und auszuziehen ist. Darüber hinaus stellt die Steuerung ein großes Sicherheitsrisiko dar. Ein Knopf an der rechten Hand löst den rechten Arm und das linke Bein, ein Knopf an der linken Hand den linken Arm und das rechte Bein. Auf diese Weise kann der Kletterer sich wie ein Salamander fortbewegen, was jedoch keine volle Kontrolle über jede Gliedmaße erlaubt. Zudem gibt es keine Sicherheitsvorkehrungen, die ein gleichzeitiges Lösen aller Saugnäpfe verhindern, was in großer Höhe lebensgefährlich sein kann.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel dieser Arbeit, eine deutlich sicherere und flexiblere Version eines Kletteranzugs von Grund auf zu entwickeln.

3. Vorversuche zu den Saugnäpfen

3.1 Das Pump-System

Der erste Schritt zur Entwicklung eines geeigneten Systems bestand darin, die Funktionalität des Konzepts experimentell zu überprüfen. Hierfür wurde zunächst eine Mini-Vakuumpumpe des Modells VN-C4 (YOU CHENG INDUSTRIAL Co.) angeschafft. Laut Herstellerangaben kann diese Pumpe bei einem Luftdurchfluss von 40 l/min einen Unterdruck von 15 kPa abs. erzeugen. Mit einer Leistung von 42 Watt stellt sie zudem die leistungsstärkste Pumpe ihrer Größe dar, die im Rahmen einer umfangreichen Recherche gefunden werden konnte.



Abb. 1: Die verwendete Pumpe

Die Entscheidung fiel auf die 12 V DC Version der Pumpe, da diese dieselbe Leistung wie die 24 V Variante erbringt, aber die Integration kompakter 12 V Akkus deutlich einfacher ist. Für eine flexible Einbindung in unterschiedliche Stromkreise wurden zudem Deans-T-Stecker an die Elektroden der Pumpe gelötet. (Abb. 1)

Anschließend wurden verschiedene Saugnapfe getestet, indem die Pumpe über ein Kabel an einen großen tragbaren Stromspeicher angeschlossen wurde.

3.2 Das Saugnapf-Design

Um die Pumpe an die Saugnapfe anzuschließen, wurde ein Druckluftschlauch mit einem Außendurchmesser von 10 cm und einem Innendurchmesser von 6,5 cm verwendet. Dadurch wurde ein hoher Luftdurchfluss gewährleistet und ein Zusammenziehen des Schlauches bei starkem Unterdruck vermieden. Die Wand des Schlauches ist gewebeverstärkt.

Um die optimale Haftung für den Kletteranzug zu ermitteln, wurden zunächst drei unterschiedliche Saugnapf-Designs entwickelt und getestet.

Für den Haftungstest wurde die Haftkraft der verschiedenen Saugnapfvarianten an unterschiedlichen Oberflächen experimentell gemessen, indem unterschiedliche Massen an den Saugnapfen

angebracht wurden, während diese senkrecht an einer glatten Betonwand sowie an einer durch Witterung angerauten Betonwand hafteten. Die Gewichtskräfte wirkten parallel zur Wand nach unten, sodass die Belastung die tatsächliche Haftkraft beim Klettern simulierte. (Siehe auch: Abb. 13)

3.2.1 Halbkugelförmiger Saugnapf:

Die erste Saugnapf Version (V1) bestand aus einer halbkugelförmigen Plastikschaale (Abb. 2). Der Schlauch wurde über ein Loch eingeführt und mit Heißkleber abgedichtet. Die Dichtung des Saugnapfs wurde aus dem Schaumstoffring einer Schwimmmatratze gebaut, der mit einer Gummischicht aus einem Terra-Band abgedeckt wurde. Dies ermöglichte eine gute Abdichtung auch auf rauen Oberflächen. Da der Durchmesser des Saugnapfs nur 10 cm betrug, konnte er trotz eines guten Haltes nicht viel Gewicht tragen, wie Tab. 1 zu entnehmen ist. Größere kreisförmige Saugnapfe kamen nicht in Frage, da sie nur dann die volle Länge des Armes ausnützen könnten, wenn sie über die Seiten hinausragten, was unpraktisch wäre. Daher war diese Variante für den Einsatz in einem Kletteranzug ungeeignet.

3.2.2 Rechteckiger Saugnapf

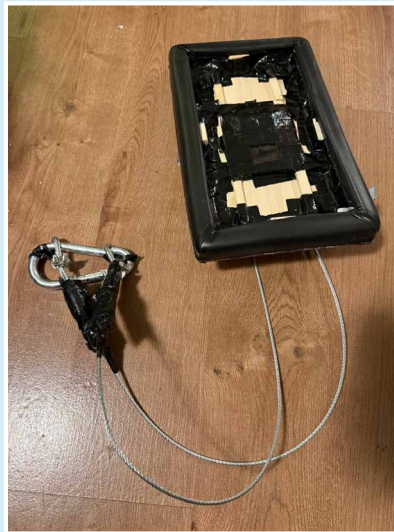
Um möglichst effektiv einen großen Flächeninhalt zu erhalten, wurde als zweites Design (V2) ein rechteckiger Saugnapf entwickelt (Abb. 2). Der Körper bestand aus einer Holzplatte, der mittels kleinerer Holzbalken eine hohle Struktur verliehen wurde. Die Dichtung bestand aus Schaumstoffstreifen, die mit Gummimaterial aus recycelten Fahrradschläuchen überzogen waren. In den Tests zeigte sich jedoch, dass diese rechteckige Form ungeeignet war: Es konnte kein gleichmäßiger Unterdruck aufgebaut werden, die Ecken in der Dichtung bildeten undichte Stellen. Die Methode des mit Gummi überdeckten Schaumstoffes erwies sich wegen des Abnehmens der Anpassung an die Oberfläche als nicht gut skalierbar. Folglich konnte der Saugnapf auf einer glatten Oberfläche über sein eigenes Gewicht hinaus nur etwa 10 Gramm tragen und hafte-

Tab. 1: Ergebnisse des Haftungstests

	Halbkugelförmiger Saugnapf (V1)	Rechteckiger Saugnapf (V2)	Ovaler Saugnapf (V3)
Gehaltene Massen bei glattem Beton in kg	2	0,02	>70
Gehaltene Massen bei rauem Beton in kg	0,5	0	>70



a)



b)

Abb. 2: Saugnapfversion 1 (links) und 2 (rechts)

te auf rauen Oberflächen überhaupt nicht. (Tab. 1) Auch diese Variante war für einen Kletteranzug ungeeignet.

3.2.3 Ovaler Saugnapf

Der dritte Saugnapf (V3) wurde als Kompromiss zwischen einem Kreis und einem Rechteck in ovaler Form konstruiert (Abb. 3). So konnte die gleichmäßige Dichtung eines Kreises mit der besseren Anpassung eines Rechtecks an die Form eines Arms kombiniert werden. Der Körper des Saugnapfs bestand erneut aus einer Holzplatte, die 29 cm lang war und 17,5 cm breit. Als Dichtung dieses Saugnapfs wurde eine Ersatzdichtung für einen Vakuumsaugheber verwendet, wie sie im Bauwesen beispielsweise zum Plattenverlegen verwendet werden. Sie besteht aus Schaumgummi, welches eine hervorragende Dichtung auf sämtlichen Oberflächen ermöglicht. Diese Dichtung hätte auch speziell für den Anzug hergestellt werden können, jedoch bot die Ersatzdichtung eine kostengünstige und praktikable Lösung. Mit dieser Form konnte ein hoher Unterdruck aufgebaut werden, sodass der Saugnapf das Körpergewicht des Autors in einer daran befestigten Schlaufe auch an rauen Wänden tragen konnte. (Tab. 1) Der angebrachte Griff trug jedoch nicht das Gewicht, da die Holzplatte, an die er angeschraubt war, nur drei Millimeter dick war. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, für zukünftige Versionen stabilere Materialien zu verwenden.

schenkeln wird jeweils ein Elektronikmodul befestigt, während an den Unterarmen und Schienbeinen die Saugnapfe angebracht sind.

Zum Klettern werden die Saugnapfe an die Wand gedrückt. Die Pumpe erzeugt innerhalb der Saugnapfe ein Vakuum, so dass das Körpergewicht daran aufgehängt werden kann. Zum Ablösen der Saugnapfe wird ein Schalter betätigt, der die Pumpe ausschaltet und gleichzeitig ein Ventil öffnet, um die Saugnapfe zu belüften.



a)



b)

Abb. 3: Der ovale Saugnapf: Oberseite mit Griff (links), Unterseite mit Abdichtung (rechts)

4. Der Kletteranzug

4.1 Funktion

Um ein schnelles und einfaches An- und Ausziehen des Klettersystems zu ermöglichen, basiert das System auf einem Go-Kart-Rennanzug, an dem die Einzelmodule mithilfe von Schnallen befestigt werden können. Die Wahl fiel auf diesen Anzug, da er atmungsaktiv ist und sich gut für sportliche Aktivitäten eignet. Gleichzeitig ist das Material weder zu flexibel noch zu dünn, sodass das Gewicht der Module den Anzug nicht verzieht. Alle Module inklusive Saugnapfe wiegen etwa 10 kg. Der etwas dickere, sehr widerstandsfähige Stoff ermöglicht zudem eine gleichmäßige Gewichtsverteilung (Abb. 4). An beiden Schultern und Ober-



a)



b)



c)



d)

Abb. 4: Der Kletteranzug (a) gesamter Anzug mit Elektronikmodul am linken Arm, (b) Nahaufnahme Elektronikmodul am linken Arm, (c) Nahaufnahme Schulterschnalle, (d) Schlaufen- und Schnallenplatzierung am Elektronikmodul

dellierte Lüftungsschächte, die nach unten geöffnet sind und nicht über der Steuerungselektronik liegen. Dadurch wird ein Hitzestau im Gehäuse verhindert, und gleichzeitig wird das Eindringen von Regenwasser vermieden.

Der Separator ist eine Trennwand, die in das Gehäuse eingeführt wird, um die 12-Volt-Elektronik von der 3- bis 5-Volt-Elektronik zu trennen. Dadurch erreicht man nicht nur eine bessere Übersichtlichkeit des Systems, sondern ermöglicht ein sicheres Anbringen des Mikrocontrollers oberhalb der 12-Volt-Kabel.

Die Laschen werden auf der Rückseite des Gehäuses und am Motor befestigt, damit das System später mithilfe von Bändern und Schnallen am Anzug befestigt werden kann.

Der Griff ist ein weitgehend ergonomisch geformtes Gehäuse für die Kontrollelektronik. Er verfügt über innere Kabelkanäle, passende Öffnungen für zwei Mikroschalter und zwei LEDs (Abb. 7). Ein Mikroschalter ist mit dem Armmodul verbunden, der andere mit dem Beinmodul der jeweiligen Körperhälfte. Die LEDs sind mit den entsprechenden Saugnapfen verbunden, die wiederum über ein Kabel mit dem jeweiligen Elektronikmodul, das an der Schulter oder am Oberschenkel liegt, verbunden sind. Der Griff weist in der Mitte eine große Aussparung auf, die mit einem Holzblock für zusätzliche Stabilität gefüllt wird. An dem Griff können Gurte befestigt werden. Der Saugnapf aus Polycarbonat ist mithilfe von Epoxidharzkleber und sechs

M3 Schrauben an den Griff und den Holzkern des Griffes befestigt. Ein Schlauchanschluss mit einer Filtermatte wurde in das dafür vorgesehene Loch eingeklebt.

Der Saugnapf ist passgenau auf die Dichtung geformt. Löcher ermöglichen das Festschrauben und Einführen des Schlauchadapters, während ein quadratisches Muster Stabilität bei gleichzeitig geringem Gewicht gewährleistet.

Abgesehen von dem Saugnapf wurden alle Teile mit dem Slicer BambuStudio bearbeitet und auf einem BambuLab X1C aus Polylactiden (PLA) gedruckt. PLA erwies sich als ideale Option, da es einfach zu verarbeiten, kostengünstig und um-

4.2 Die Saugnapfe und die Versorgungsmodule

Abb. 5 zeigt die Hauptbestandteile des Kletteranzugs.

Das Gehäuse umschließt passgenau alle Elektronikkomponenten (Abb. 6). Öffnungen an den Seiten ermöglichen das Durchführen von Kabeln, Schläuchen und weiteren Anschlüssen. Ein speziell gewählter stumpfer Winkel sorgt für einen leichten Knick im Gehäuse, wodurch sich dieses besser an die runde Form eines Arms oder Beins anpasst, während die beweglichen Teile an dieser Stelle ungehindert funktionieren können.

Der Deckel schützt die Elektronik und besitzt speziell mo-

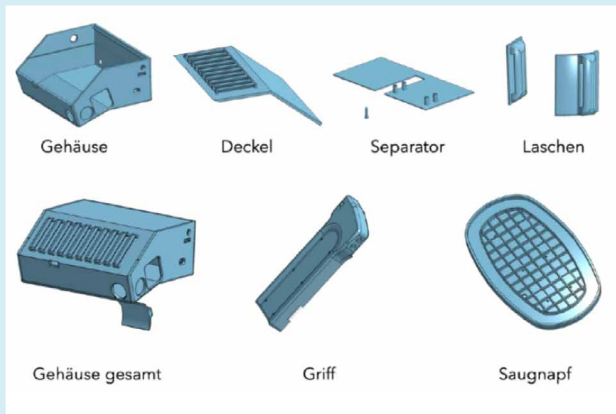


Abb. 5: CAD-Modell der Hauptbestandteile des Kletteranzugs

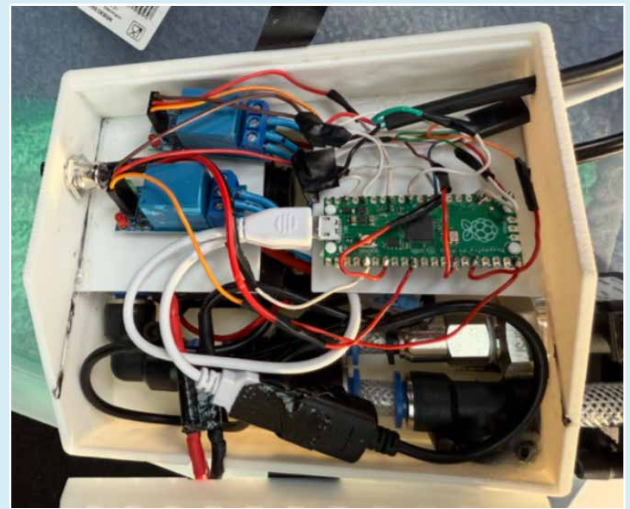


Abb. 6: Pumpe und Elektronik im Gehäuse

weltfreundlich ist – insbesondere, da es aus nachwachsenden Rohstoffen besteht und industriell kompostierbar ist. Der Saugnapf selbst wurde aus einer Polycarbonatplatte gefräst, da PLA für die erforderliche Stabilität zu weich und das Einbauen einer Holzplatte nicht möglich gewesen wäre. Polycarbonat stellte hier das beste Verhältnis aus Preis, Leistung und Gewicht dar und war daher deutlich geeigneter als beispielsweise Aluminium.

Innerhalb jedes Elektronikmoduls befinden sich folgende Komponenten: eine VN-C4 Vakuumpumpe, ein Magnetventil, ein Drucksensor, ein 12-5 V Step-Down-Wandler, eine 10 A Sicherung, ein An- und Ausschalter, 2 Relais, ein Raspberry Pi Pico Microcontroller. Diese Anordnung ermöglicht die Steuerung des Unterdrucksystems, die Sicherheitsüberwachung und die zentrale Kontrolle der Saugnäpfe.

Die Pumpe und das Ventil werden über die Relais geschaltet. Die beiden Relais sind identisch und parallel geschaltet, da ein einzelnes Relais dieses Typs den erforderlichen Stromfluss von 5 A nicht zuverlässig schalten kann. Um die Sicherheit des Kletterers zu maximieren, ist die Pumpe an den NC-Anschluss des Relais, also an den im Normalfall geschlossenen Stromkreis, angeschlossen, während das Ventil an den NO-

Anschluss, d.h. an den normal nicht geschlossenen Stromkreis, angeschlossen ist. So wird sichergestellt, dass bei einem Ausfall der Steuerung, der Saugnapf an der Wand befestigt bleibt. Die Relais werden vom Raspberry Pi Pico Microcontroller gesteuert, an den ebenfalls der Drucksensor und die Komponenten aus dem Griff angeschlossen sind ([Abb. 8](#)). [Abb. 9](#) zeigt noch die Skizze der Pneumatik.

Zur sicheren Befestigung am Arm werden an den Arm-Saugnapfen ein Handgelenkschoner und ein Gurt mit einer Kobraschnalle verwendet, wie sie beispielsweise bei Fallschirmen zum Einsatz kommt. Am Bein sorgen zwei Gurte mit Schnallen sowie ein Steigbügel aus Stahldraht für die Befestigung an den Füßen. ([Abb. 10](#))

Auf der Rückseite der Saugnäpfe werden die Akkus mittels Klettverschlusses befestigt. Hierfür wurden 5200 mAh 3s Li-Po-Akkus ausgewählt, die ausreichende Energie für den Betrieb der Pumpen und Elektronikmodule liefern.

4.3 Safety-Control

Die Safety-Control (SC) ist ein Sicherheitssystem im Kletteranzug, das ein versehentliches Ablösen von zu vielen Saugnäpfen verhindert. Sie ist als separates Modul am Gürtel des Anzugs angebracht und über jeweils ein dreiadriges Kabel mit allen Elektronikmodulen verbunden, um die Kommunikation zu gewährleisten. Zur Befestigung der Kabel an den Modulen werden wasserdichte Stecker mit Klammermechanismus verwendet, sodass ein versehentliches Lösen ausgeschlossen ist. ([Abb. 11](#))



Abb. 7: Innenansicht des Griffs mit Kabelkanal

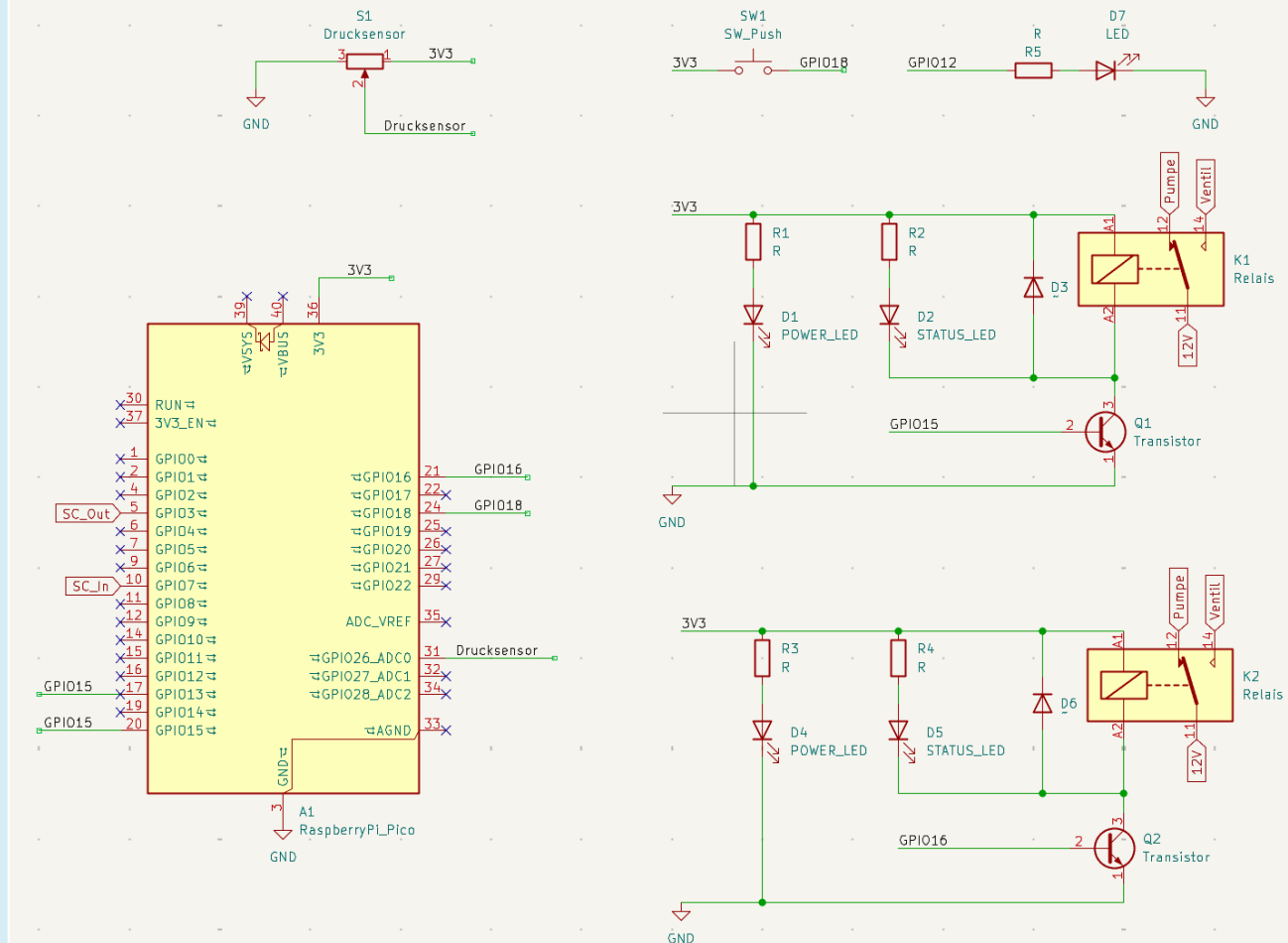


Abb. 8: Schaltplan der Elektronik

Innerhalb des SC-Moduls befinden sich ein weiterer Raspberry Pi Pico, ein 850 mAh, 3,7 V LiPo-Akku zur Stromversorgung des Mikrocontrollers, ein An- und Ausschalter sowie eine LED zur visuellen Bestätigung des eingeschalteten Zustands.

Im eingeschalteten Zustand blockiert die Safety-Control das Ablösen einzelner Saugnapfe so, dass stets ein Arm und ein Bein oder beide Beine gleichzeitig befestigt sein müssen. Das gleichzeitige Ablösen beider Arme wird nicht erlaubt, da der Kletterer sonst aus den Arm-Saugnapf-Befestigungen herausrutschen könnte – bei den Bein-Saugnapfen besteht dieses Risiko nicht. Die Konfiguration der Mindestanzahl an festgesaugten Saugnapfen kann an den Einsatz oder das Körpergewicht des Kletterers angepasst werden.

4.4 Steuerung und Software

Das Ablösen der Saugnapfe wird über jeweils zwei Schalter gesteuert, die sich unterhalb des Daumens befinden. Der obere

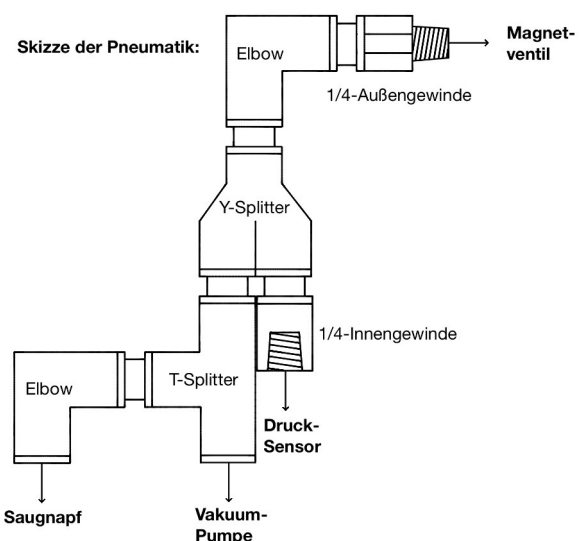


Abb. 9: Skizze der Pneumatik

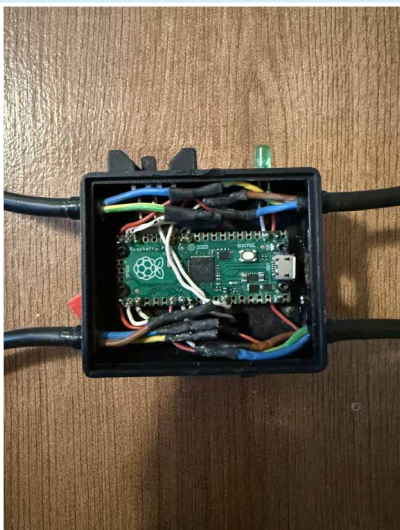


a)



b)

Abb. 10: Fertiges Arm-Saugnapf-System (links), fertiges Bein Saugnapf-System (rechts)



a)



b)

Abb. 11: Die Safety-Control Einheit

re Schalter löst den Saugnapf des Arms, der untere den Saugnapf des Beins. Neben den Schaltern befindet sich jeweils eine LED, die grün aufleuchtet, sobald der vom Schalter gesteuerte Saugnapf ausreichend festgesaugt ist.

Die Elektronikmodule und die Safety-Control wurden in MicroPython nach dem Schema in [Abb. 12](#) programmiert: Nach einer kurzen Boot-up-Sequenz gehen sowohl die Module als auch die Safety-Control in eine sich fortlaufend wiederholende Hauptschleife über. In den Modulen wird zunächst über den Drucksensor der Unterdruck im Saugnapf gemessen. Liegt dieser unter 0,65 bar abs., wird die Sicherheits-LED

aktiviert, um dem Kletterer anzuzeigen, dass der Saugnapf sicher haftet. Gleichzeitig wird der Output zur Safety-Control angeschaltet, um auch dieser mitzuteilen, dass der Saugnapf in einem sicheren Zustand ist. Die Information wird über einen kontinuierlich eingeschalteten Strom übertragen. Sollte das Verbindungskabel reißen, wird der Saugnapf von der Safety-Control automatisch als unsicher bewertet. Liegt der Druck unter dem Grenzwert, bleiben LED und Ausgangssignal aus. Anschließend wird überprüft, ob der Schalter zum Ablösen gedrückt wird. In diesem Fall wird das Ausgangssignal an die Safety-Control sofort abgeschaltet, da der Saugnapf nun nicht mehr als sicher gilt. Daraufhin prüft die Safety-Control, ob der Saugnapf gesperrt ist. Ist er nicht gesperrt, wird die Pumpe abgeschaltet und das Ventil zur Entlüftung des Saugnapfs geöffnet. Danach wird die Hauptschleife erneut durchlaufen. Die Safety-Control überwacht währenddessen die Sicherheitslogik: Ein Arm darf nur freigegeben werden, wenn jeweils der andere Arm und mindestens ein Bein oder beide Beine festgesaugt sind. Für die Freigabe der Beine muss lediglich sichergestellt werden, dass das andere Bein und mindestens ein Arm im sicheren Zustand sind.

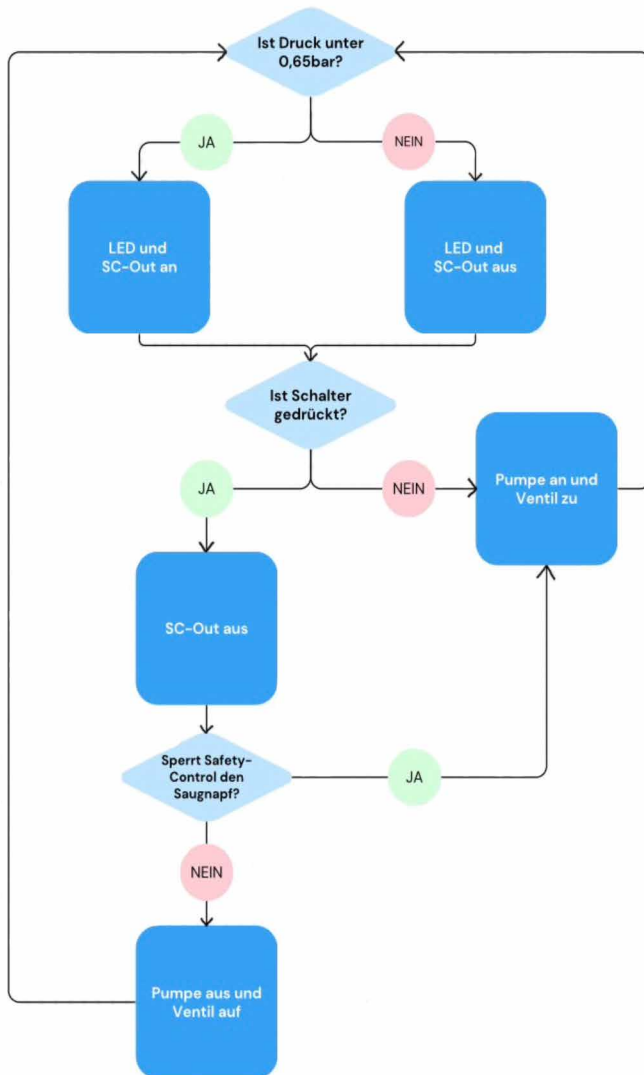
5. Anwendung

5.1 Berechnung der theoretischen Tragfähigkeit

Um die theoretische Tragfähigkeit des Klettersystems zu berechnen, müssen zwei verschiedene Szenarien betrachtet werden: das Klettern an einer horizontalen Oberfläche (Decke) und an einer vertikalen Oberfläche (Wand).

Der in einem Saugnapf erzeugte Unterdruck wurde mithilfe des eingebauten Drucksensors gemessen. Beim Ansaugen an einer Glasfläche betrug der Unterdruck etwa 40 kPa. Unter der Annahme, dass der Umgebungsdruck 1 bar bzw. 100 kPa beträgt, ergibt sich somit eine Druckdifferenz von 60 kPa. Mithilfe des von mir erstellten CAD-Modells in Onshape konnte der wirksame Flächeninhalt A , den dieser Druck im Saugnapf ausfüllt, bestimmt werden. Die Fläche A ist $0,023235 \text{ m}^2$ groß.

Modul Mainloop:



Safety-Control Mainloop:

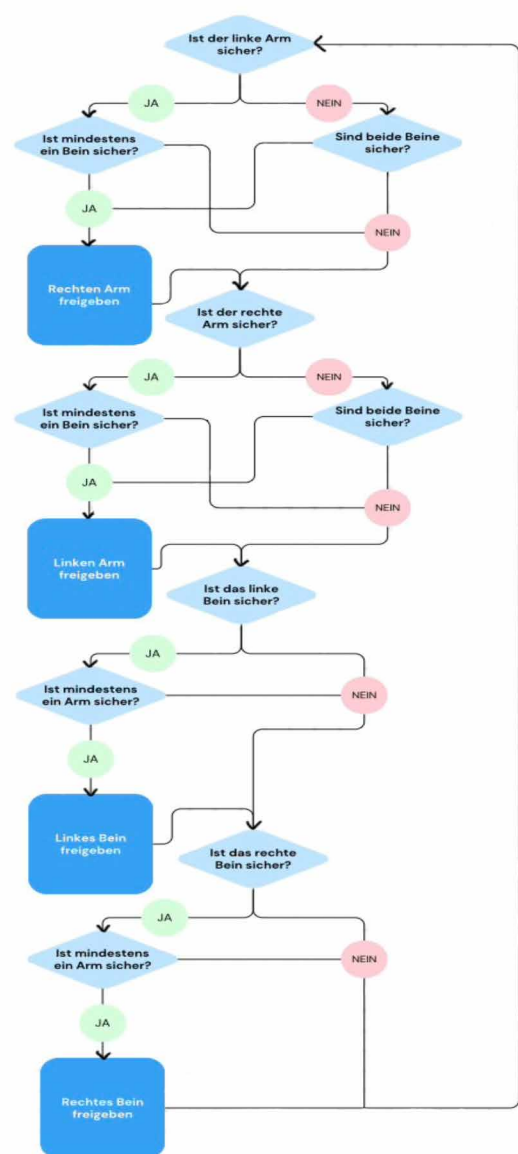


Abb. 12: Steuerung der Module und der Safety-Control

5.1.1 Horizontale Oberfläche

Beim Klettern an einer horizontalen Fläche (z. B. einer Decke) wirkt die Haftkraft F_H , die ausschließlich durch den atmosphärischen Druck erzeugt wird. (Abb. 13a) Sie berechnet sich nach der Formel:

$$F_H = \Delta p \cdot A,$$

wobei Δp die Druckdifferenz aus dem Umgebungsdruck und dem Druck im Saugnapf ist und A der wirksame Flächeninhalt, bei dem im Saugnapf ein Unterdruck herrscht.

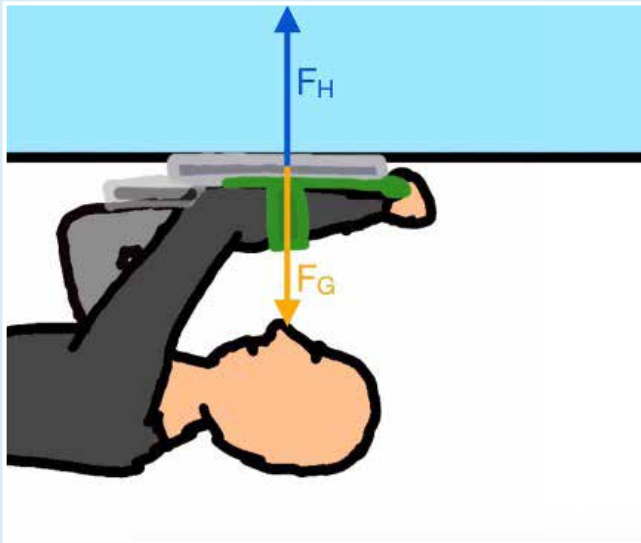
Mit den gemessenen Werten ergibt sich:

$$F_H = 60 \text{ kPa} \cdot 0,023235 \text{ m}^2 = 1394,1 \text{ N}$$

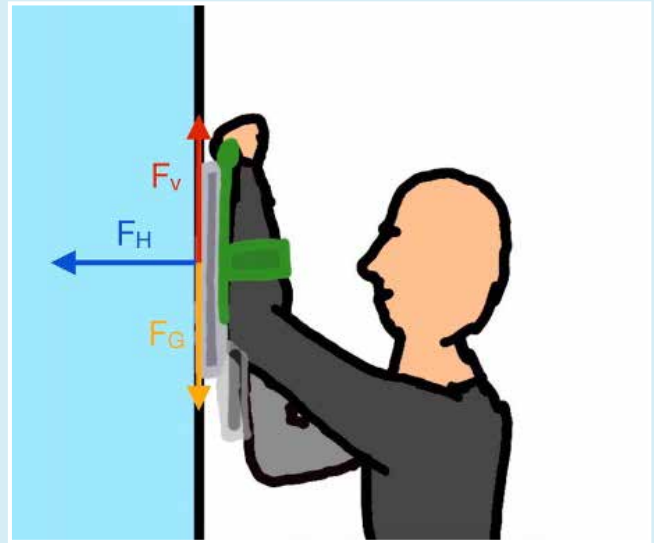
Das bedeutet, dass ein Saugnapf unter idealen Bedingungen theoretisch eine Masse von 142 kg halten kann.

5.1.2 Vertikale Oberfläche

An einer vertikalen Oberfläche sieht das Ganze etwas anders aus, da die Gewichtskraft des Kletterers F_G durch die Scherkraft F_v aufgebracht werden muss (Abb. 13b). Die Scherkraft entspricht der maximal übertragbaren Reibkraft, wobei die senkrecht zur Oberfläche wirkende Kraft die Haftkraft F_H ist.



a)



b)

Abb. 13: a) Kräfte beim Klettern an einer horizontalen Oberfläche, b) Kräfte beim Klettern an einer vertikalen Oberfläche

Zusammen mit dem Haftreibungskoeffizienten μ lässt sich die Scherkraft dann wie folgt berechnen:

$$F_v = \mu \cdot \Delta p \cdot A.$$

Eine exakte Berechnung der Scherkraft auf vertikalen Oberflächen ist demnach schwierig, da die effektiven Haft- und Reibungskräfte in hohem Maße von den Eigenschaften der Oberfläche, der Temperatur sowie dem verwendeten Dichtungs- bzw. Elastomermaterial abhängen. Kern [8] zeigte in seiner Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie, dass die Gesamtreibung eines Vakuumgreifers aus Hysteresreibung, Adhäsionsreibung und Formschluss besteht. Diese Faktoren reagieren sehr empfindlich auf Rauheit und Materialverhalten. Seine Messungen ergaben, dass pauschale Herstellerangaben (typisch $\mu \approx 0,5$) die Realität deutlich unterschätzen. So wurden für Plexiglas $\mu = 1,84$, für gestockten Granit $\mu = 1,14$ und für Schleifpapier $\mu = 1,42$ gemessen ([8] S. 11–12).

Darüber hinaus zeigte Kern, dass eine geeignete Strukturierung der Reibeinlage Haftreibungskoeffizienten um bis zu 30 % erhöhen kann. ([8] S. 11–12, 121–123) Daraus folgt, dass der tatsächliche Reibkoeffizient in praktischen Anwendungen meist um oder über $\mu \approx 1$ liegt. Die maximale Tragkraft des Systems wird daher nicht primär durch den Reibwert begrenzt. Eine theoretische Berechnung der vertikalen Haftkraft würde somit nur ungenaue Ergebnisse liefern und den realen Haftzustand nicht verlässlich abbilden.

5.2 Beschreibung einer Kletteraktion

Zur Validierung des Kletteranzugs wurde ein Auf- und Abstieg über eine Höhe von 22 Metern durchgeführt. Als Test-

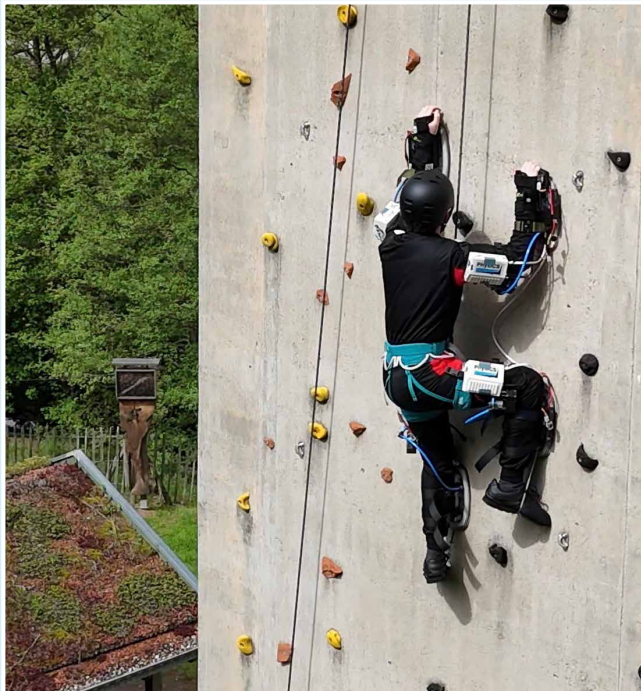
umgebung diente ein ehemaliger Brückenpfeiler aus Beton, der nach dem Abriss der Brücke mit Klettergriffen ausgestattet worden war. Dadurch konnte der Anzug unter realistischen Bedingungen, jedoch mit einer zusätzlichen Seilsicherung, risikofrei auf einer Betonoberfläche erprobt werden. Während der Tests wurde vollständig auf die Verwendung der vorhandenen Klettergriffe verzichtet.

Zur Fortbewegung an der Wand wurde zeitgleich immer nur ein Saugnapf abgelöst und neu positioniert - zunächst die Arme und anschließend die Beine. Danach begann der Zyklus wieder bei einem der Arme. Diese Klettertechnik erwies sich als gut kontrollierbar, einfach und sicher. Alternativ wären auch andere Bewegungsabläufe möglich, beispielsweise das gleichzeitige Umsetzen eines Arms und eines Beins, um eine höhere Klettergeschwindigkeit zu erreichen, allerdings auf Kosten der Stabilität.

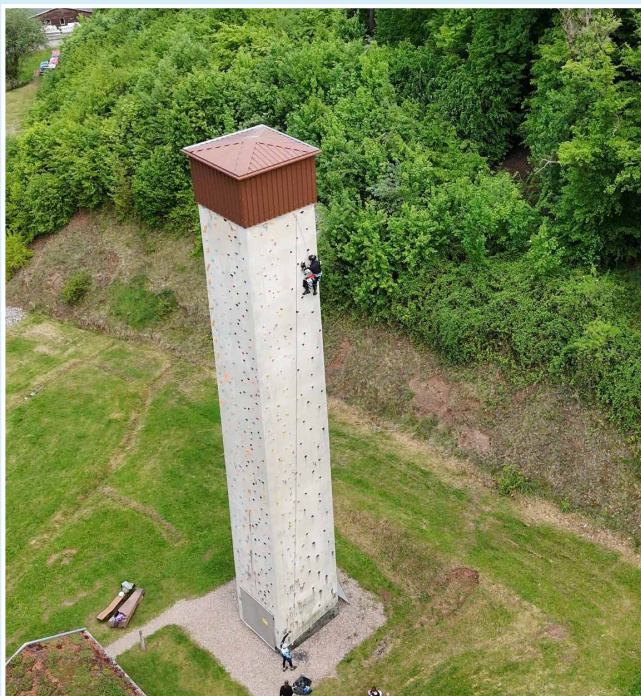
Die Höhe von 22 Metern wurde in 7 Minuten und 30 Sekunden erklommen, was einer durchschnittlichen Klettergeschwindigkeit von etwa 2,9 m/min entspricht.

Da die maximale Leistungsaufnahme des gesamten Systems 60 Watt beträgt, kann der Anzug mit den verwendeten LiPo-Akkus (5200 mAh, 3s) für mindestens eine Stunde betrieben werden. Bei konstanter Klettergeschwindigkeit und ohne Ermüdung würde dies einer potenziell erreichbaren Höhe von etwa 162 Metern entsprechen.

Abb. 14 zeigt die Erprobung des Kletteranzugs durch den Autor.



a)



c)



b)

Abb. 14: Erprobung des Kletteranzugs an einem 22 m hohen ehemaligen Brückenpfeiler



6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt trotz einiger Schwierigkeiten und Rückschläge insgesamt sehr erfolgreich verlaufen ist. Das in dieser Arbeit geschilderte System zeigt deutlich, dass ein funktionsfähiger Kletteranzug auf Basis von Vakuumhaftung realisierbar ist. Ein solches

System könnte künftig den Zugang zu bisher schwer oder gar nicht erreichbaren Orten ermöglichen.

Für Rettungskräfte, Handwerker und Wartungstechniker stellt der Anzug eine potenziell große Bereicherung dar, da er den Einsatz von Leitern oder komplexen Seilsystemen in vielen Situationen überflüssig machen könnte. Zwar beste-

hen noch Herausforderungen im Bereich der Sicherheit, insbesondere hinsichtlich redundanter Systeme und der Notfallsteuerung, sowie in der Optimierung der Produktion für eine leichtere Handhabung und Serienfertigung – doch das Grundprinzip des Kletteranzugs ist bereits erfolgreich umgesetzt.

Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] Bilal, H. M. (2023). Design and development of wall climbing robot (Preprint). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2301.05882>
- [2] Checkpoint. (2022, Dezember 10). Staubsauger-Klettern. Kika.de. Abgerufen am 1.1.2025, von <https://www.kika.de/checkpoint/videos/staubsauger-klettern-102>
- [3] CheXperiment. (2022, Februar 26). Die glatte Kletterwand?!. Kika.de. Abgerufen am 4.1.2025, von <https://www.kika.de/checker-welt/chexperiment/videos/die-glatte-kletter-wand-100>
- [4] Xiao, J., & Sadegh, A. M. (2006). City-Climber: A new generation wall-climbing robots. In Mobile Robots XXI (Vol. 6230). SPIE. https://www.researchgate.net/publication/221786260_City-Climber_A_New_Generation_Wall-Climbing_Robots
- [5] Hawkes, E. W., Eason, E. V., Christensen, D. L. & Cutkosky, M. R. (2014). Human climbing with efficiently scaled gecko-inspired dry adhesives. Journal Of The Royal Society Interface, 12(102), 20140675. Abgerufen am 4.1.2025, von <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0675>
- [6] Heim, G. (2016). Haftreibungskoeffizienten. rhetos.de. Abgerufen am 14. April 2025, von <https://www.rhetos.de/html/lex/haftreibungskoeffizienten.htm>
- [7] Jlaservideo (2021). Spider-Man Wall Climbing Suit. Youtube-Kanal Jlaservideo. Abgerufen am 4.1.2025, von https://www.youtube.com/watch?v=7L3DQU74v_s
- [8] Kern, P. (2016). Elastomerreibung und Kraftübertragung beim Abscheren von aktiv betriebenen Vakuumgreifern auf rauen Oberflächen [Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)]. KIT-Bibliothek. <https://doi.org/10.5445/IR/1000065103>
- [9] La Rosa, G., Messina, M., Muscato, G., & Sinatra, R. (2002). A low-cost lightweight climbing robot for the inspection of vertical surfaces. Mechatronics, 12(1), 71–96. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741580000465?via%3Dihub>
- [10] Longo, D., & Muscato, G. (2006). The Alicia³ climbing robot: A three-module robot for automatic wall inspection. IEEE Robotics and Automation Magazine, 13(1), 42–50. <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1598052>
- [11] Peters, L., Gahmig, M., Neufeld, D. (2013). Staubsaugerklettern. Jugendforscht Projektdatenbank. Abgerufen am 4.1.2025, von <https://www.jugend-forscht.de/projektdatenbank/staubsaugerklettern.html>
- [12] Pexa, R. (2024, Februar 26). Leitern: Unterschätztes Risiko. Sichere Arbeit Internationales Fachmagazin für Prävention in der Arbeitswelt. Abgerufen am 4.1.2025, von <https://www.sicherearbeit.at/ausgaben/2024/ausgabe-1-2024/leitern-unterschaetztes-risiko>
- [13] Zhu, J., Zhu, Y. & Zhang, P. (2024, September). Review of advancements in wall climbing robot techniques. ScienceDirect Magazin des Elsevier Verlags. Abgerufen am 4.1.2025, von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773186324000781#bib0023>

Als Schüler*in wissenschaftlich publizieren

Wie auch aus deiner Wettbewerbsarbeit eine zitierfähige Veröffentlichung wird

Was ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung?

Wissenschaftliche Publikationen, sogenannte Papers, sind ein zentrales Element wissenschaftlichen Arbeitens. In Papers werden nicht nur Zeitpunkt und Stand einer Erkenntnis öffentlich dokumentiert, sondern auch mit der Wissenschafts-Community geteilt. So lässt man Kolleg*innen derselben Fachrichtung an Ergebnissen teilhaben oder zeigt progressive Forschungsansätze auf.

Was kostet die Veröffentlichung?

Für die Autor*innen fallen keinerlei Veröffentlichungsgebühren (*page charges*) an. Alle Kosten z. B. für Redaktion, Lektorat, Layout, Website und App tragen Verlag und Sponsoren. Verlag ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, die das Projekt seit Gründung begleitet.

Was ist besonders an einer wissenschaftlichen Veröffentlichung?

Die Besonderheit eines echten, wissenschaftlichen Papers ist, dass es *peer reviewed* ist. Der Begriff setzt sich zusammen aus den englischen Wörtern *peer* für „Kolleg*in“ und *reviewed* für „überprüft“ (*review* = die Überprüfung). Die Arbeit wird also von einem / einer meist anonymen Fachkolleg*in, der oder dem *referee*, auf Schlüssigkeit überprüft. Die Arbeit ist somit gecheckt und kann als Basis für weitere Forschungsvorhaben genutzt werden.

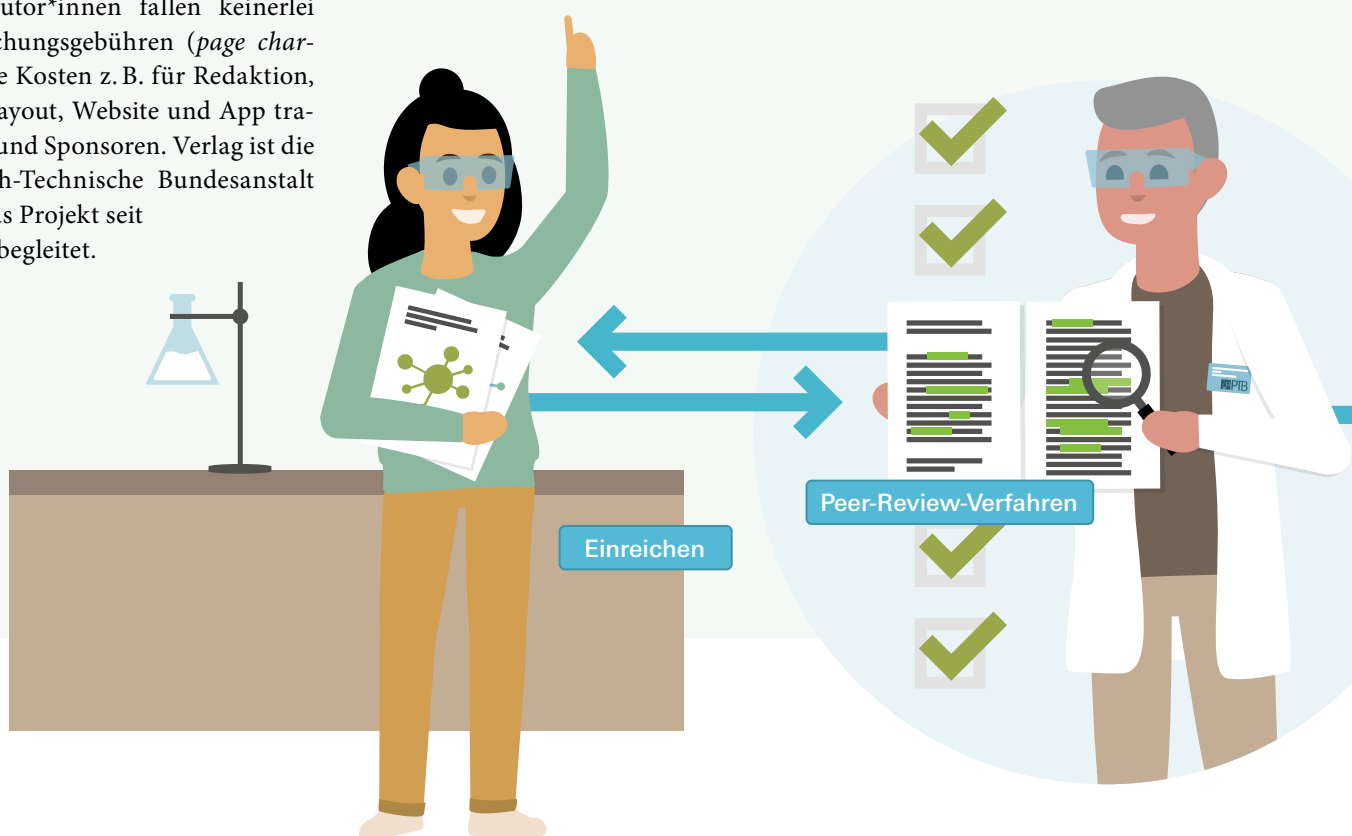


Hast du Fragen? In den FAQs auf der Seite „Für Autor*innen“ findest du Antworten.

www.junge-wissenschaft.ptb.de/fuer-autorinnen

Wieso wissenschaftlich publizieren?

Diese Papers dienen nicht nur dem fachlichen Austausch, sondern auch als Nachweis der erbrachten Leistungen im jeweiligen Spezialgebiet. Wie ein Lebenslauf informiert die Veröffentlichungsliste über den beruflichen Werdegang und wissenschaftlichen Erfolg.



Wie geht das und wie viel Arbeit muss ich investieren?

Die Junge Wissenschaft (JuWi) ist die einzige Plattform, auf der bereits Schüler*innen ein erstes Paper, *peer reviewed*, veröffentlichen können. Das von der JuWi-Chefredaktion eingeleitete und begleitete Peer-Review-Verfahren macht aus deinem Wettbewerbsbeitrag eine zitiertfähige Veröffentlichung. Ein JuWi-Paper ist der Startschuss für deine persönliche Veröffentlichungsliste. Und als erfolgreiche Teilnehmer*in eines Forschungswettbewerbs hast du den Löwenanteil der Arbeit bereits erledigt.

Sende deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft

Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg

Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de



Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter*in, der bzw. die, die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird dir zugeschickt und du erhältst die Möglichkeit, Hinweise des oder der Fachgutachter*in oder eigene Änderungen einzuarbeiten. Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie Jugend forscht die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen. Bis hierhin hast du keinerlei Arbeit investiert.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und nach der Freigabe als Open-Access-Beitrag, also für jedermann zugänglich, veröffentlicht.

Was bringt es mir?

JuWi-Autor*innen erwerben in der engen Zusammenarbeit mit der Redaktion Kenntnis über den Aufbau einer wissenschaftlichen Arbeit, über wissenschaftlichen Schreibstil, worauf zu achten ist und welche Schritte wann notwendig sind. Autor*innen eines JuWi-Papers haben so sehr früh einen bedeutenden Teil wissenschaftlichen Publizierens erlernt, noch bevor sie an die Hochschule gehen.

Impressum

Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr.-Ing. Sabine Walter,
Chefredaktion Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508



Sabine Siems, Verlag
E-Mail: sabine.siems@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 8202



Design & Satz

Sebastian Baumeister
Art Director / stilsicher.design
E-Mail: baumeister@stilsicher.design
Tel.: 05142 / 302 99 04



Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)



Dein Ticket zur Wissenschaft

Jungforscher*innen publizieren
online | *peer reviewed* | original



Die PTB ist jetzt auch bei Instagram. Auf dem Kanal @ptb.bund findest du auch unsere JuWi-Beiträge.

