

Sensorsystem zur automatisierten Bewertung des Verhaltens beim Sportklettersturz zur Unfallprävention

Michael Munz, Thomas Engleder, Anna Hoffmann, Sebastian Maile

Forschungsgruppe Biomechatronik
Hochschule Ulm, Albert-Einstein-Allee 55, 89081 Ulm, michael.munz@hs-ulm.de

Kurzfassung — In dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, die Vorgänge beim Sportklettersturz zu analysieren und zu bewerten. Dabei werden Kletterer und Sicherer mit Sensoren ausgestattet. Erfasst werden sowohl Kräfte, die auf den Menschen wirken, als auch die mehrdimensionalen Bewegungen von Rumpf und Beinen. Es kann gezeigt werden, dass Kräfte durch Inertialsensoren ermittelt werden können, wodurch eine aufwändige Kraftmessung in der Sicherungskette entfällt. Das Analysesystem kann daher ohne Einwirkung auf die Sicherungskette einfach an Kletterer und Sicherer angebracht werden. Die Sensordaten sollen später automatisch ausgewertet und bewertet werden, um fehlerhaftes Verhalten bei Kletterer und Sicherer (z.B. falsches Absprungsverhalten, zu harte Sicherung) objektiv zu messen und im Sturztraining als Feedback zu berücksichtigen.

Schlagnworte — Unfallprävention beim Sportklettern, Sturzanalyse, Sicherungstraining, Wireless Body Sensor Networks, Inertialsensorik

I. EINLEITUNG

Klettern hat sich von der Besteigung von Gipfeln über das Technische Klettern mit Hilfsmitteln wie Strickleitern zum Freiklettern entwickelt. Sportklettern wird heute nicht nur am Fels sondern auch in Kletterhallen ausgeübt und gewann in den letzten Jahren enorm an Popularität. Studien belegen eine große Anzahl von Sicherheitsfehlern, welche die Hauptursache von Unfällen in Kletterhallen darstellen (Hummel & Hellberg:62, Schöffl et al. 2013:191). Viele Verletzungen durch Anprall an der Wand werden am wahrscheinlichsten durch zu harte Sicherung verursacht (Radelzhofer 2014).

Die DAV-Kletterhallenstudie 2012 erfasste insgesamt 161 Unfälle mit schweren Verletzungen (Rettungswageneinsatz) in 31 Kletterhallen.

In dieser Studie wurde auch das Sicherungsverhalten untersucht und durchschnittlich 1,4 Sicherheitsfehler pro Vorstieg und 0,7 Fehler pro Toprope-Vorgang (Hummel & Hellberg:62) erfasst. Dies bedeutet, dass nicht jeder Sicherheitsfehler automatisch zu einem Unfall führt. Meist ist eine Kombination von Fehlern und unglücklichen Umständen notwendig, wie beispielsweise das

Loslassen des Sicherungsseils bei gleichzeitigem Sturz des Vorsteigers, das zu weite Abspringen beim Sturz und das anschließende Anschlagen an einem Volume, etc. Fehlerhaftes Sicherungsverhalten führt also in vergleichsweise wenigen (Un-)Fällen zu einem Feedback für den Sichernden, was zu einer gefährliche Adaption führen kann.

Unfallprävention kann durch Training und Schulungen der Kletterer realisiert werden, wodurch individuell die Technik verbessert und die Häufigkeit von Fehlern reduziert wird. Sicherheitsfehler sind jedoch unabhängig vom Kletterkönnen: die Klettererfahrung bzw. der Schwierigkeitsgrad beim Klettern korreliert nicht mit der Qualität der Sicherung. Daher sind insbesondere auch erfahrene Kletterer nicht vor Sicherheitsfehlern geschützt. Sturz- und Sicherungstraining sollte daher regelmäßig nicht nur von Kletteranfängern, sondern auch von erfahrenen Kletterern durchgeführt werden.

Die Motivation ein Sturz- und Sicherungstraining zu absolvieren soll durch das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Messsystem gesteigert werden.

II. PRINZIP DES SICHERUNGS- UND STURZINSTRUKTORS

Der in dieser Arbeit vorgestellte Prototyp eines Sturz- und Sicherungs-Instruktor (SuSI) bildet die Basis für die Auswertung eines Trainings, welche eine objektive Rückmeldung der Güte des Trainings an die Seilschaft erlaubt. Die Erfassung der dynamischen Kräfte beim Sturz beim Klettern wird durch die Messung von Beschleunigungen am Körper umgesetzt. Die Übertragung der Messdaten erfolgt mit Bluetooth, die Auswertung ist am Notebook, Tablet oder gar Smartphone möglich. Das System ist universell in jeder Route und mit jedem Sicherungsgerät einsetzbar. Das Trainingsfeedback kann direkt während des Trainings umgesetzt werden und so eine kontinuierliche Verbesserung überwacht werden. Ein wichtiger Nebeneffekt, der durch diese Art von Training gleichfalls erreicht wird, ist die Beschäftigung mit der Sicherungstechnik für den Sichernden und das Üben der korrekten Sicherung durch Halten von Stürzen.

Die im System zu erfassenden Größen sind:

- Kräfte auf den Stürzenden (am Anseilpunkt),
- Sturzdauer, Sturzweite
- Beschleunigungen an den Beinen des Stürzenden

- Bewegung des Stürzenden, Flugbahn (Pendeln, etc.)
- Bewegung des Sichernden (aufwärts, wandwärts, etc.)

Diese Größen lassen sich durch Sensoren messtechnisch ermitteln. Aus den Messdaten sollen in einem nächsten Schritt Qualitätskriterien für Sturz- und Sicherungsvorgang berechnet und bewertet werden (Scores). Dies sind u.a.:

- Sturzhärte, Dynamik der Sicherung
- Angemessenheit der Schlappseilmenge
- Absprungverhalten des Stürzenden (zu weit weg von der Wand, Pendeln, etc.)
- Anprall an der Wand und Kraftabbau
- Standposition des Sichernden
- Reaktion des Sichernden (passiv/aktiv, etc.)

Die Scores sollen ein objektives Maß über die Qualität des Sturzverlaufs liefern, aufgeschlüsselt nach Kletterer und Sicherer.

III. MESSTECHNISCHER AUFBAU

Messtechnisch zu erfassen sind die Größen Kraft, Beschleunigung, Position (kurzzeitig) und deren zeitliche Verläufe. Zur Erfassung von Kräften werden üblicherweise Kraftmessdosen verwendet, die möglichst ohne Kraftverlust in die Sicherungskette eingebracht werden. Dies bringt jedoch zum einen ein zusätzliches Risiko in der Sicherungskette mit sich (Bruch, falsches Einbinden, etc.). Zum anderen beeinflusst es Sicherer und Kletterer, da das Equipment nicht gewohnt ist. Daher wurde in dieser Arbeit versucht, die Kräfte aus den Beschleunigungen zu rekonstruieren. Zur Validierung dieses Verfahrens wurde eine Kraftmessdose mit Messbereich ± 10 kN eingesetzt, der durch ein System aus Dyneema-Schlingen redundant überbrückt wurde (s. Abbildung 1). Eine Dyneema-Schlinge wurde auf der einen Seite mittels Ankerstich in die Anseilschleife des Klettergurts eingebunden. Auf der oberen Seite wurde das Sicherungsseil direkt in eine weitere Dyneema-Schlinge eingebunden. Zusätzlich erfolgte eine redundante Sicherung durch ein weiteres, direkt am Klettergurt eingebundenes Sicherungsseil.



Abbildung 1: Kraftmesssensor mit redundanten Dyneema-Schlingen

Zur Messung der Bewegung und Beschleunigungen wurden am Kletterer 3 Inertialsensoren (engl. inertial measurement unit, IMU) vom Typ MPU-9150™ (InvenSense) eingesetzt. Diese bestehen aus jeweils dreiachsigen Beschleunigungs-, Drehraten und Magnetfeldsensoren. Alle Daten werden durch einen

Microcontroller digital erfasst und kabellos per Bluetooth-Verbindung an einen Computer übertragen. Dadurch ist es möglich, die Datenerfassung synchron für mehrere Messsysteme durchzuführen.

Das System ist so aufgebaut, dass es an drei verschiedenen Stellen angewendet werden kann, um Kräfte zu erfassen: am Sichernden, am Kletterer und an der Umlenkung. Gemessen wurde mit einer Abtastrate von 100 Hz.

IV. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Fokus dieser Arbeit ist zunächst die grundlegende Machbarkeit der messtechnischen Erfassung der benötigten Größen anhand von IMUs zu verifizieren. Kräfte werden dabei mittels Kraftmesssensorik evaluiert. Diese soll später jedoch durch IMU-Messungen vollständig ersetzt werden.

Zur Evaluierung wurden einige Sturzversuche in einer künstlichen Kletteranlage durchgeführt. Alle Versuche wurden in der Kletterhalle „sparkassendome“ des DAV Neu-Ulm durchgeführt. Bei der in dieser Arbeit vorgestellten Messreihe wurden die IMU-Sensoren an Körperschwerpunkt (KSP) und an den Knöcheln des Kletterers befestigt. Die Befestigung des Sensors mittig auf der Rückseite am Hüftgurt ist günstig, um das Angreifen der Gravitationskraft am Massenmittelpunkt abzubilden. Die Beschleunigungssensoren an den Knöcheln sollen zusätzliche Erkenntnisse über die Anprallenergie an der Wand ermöglichen. Zusätzlich wurde die Kraftmessdose in die Sicherungskette am Kletterer (Anseilpunkt) eingebracht. Gesichert wurde mit dem Sicherungsgerät GriGri von Petzl. Die Messreihe umfasst die Durchführung von 16 Messungen bei Toprope- und Vorstiegsstürzen. Im Toprope wurde ein Teil der Stürze bewusst weich bzw. sehr dynamisch, ein Teil passiv und somit hart gesichert. Die Sturzhöhen lagen im Toprope bei jeweils ca. 2 m Dies entspricht der Menge des vom Sichernden bewusst ausgegebene Schlappseils. Im Vorstieg wurde der letzte Sicherungspunkt um 0,7 m bis 1,5 m überstiegen, was zu Sturzweiten von etwa 1,5 m bis 3 m führt. Alle Versuche sind in Tabelle 1 abgebildet.

In einer künstlichen Kletteranlage ist der Abstand der Sicherungspunkte nach DIN 2015/2015-07-00 vorgegeben: Ist ein Sicherungspunkt mindestens 8 m oberhalb des Bodens, so ist der Abstand zwischen zwei Sicherungspunkten mit maximal 1,50 m vorzusehen. Die durchgeführten Sturzversuche bilden somit die maximal zu erwartende Sturzhöhe in Kletterhallen bei einem Sturz im Moment des Clippens ab. Dabei wird angenommen, dass alle Zwischensicherungen geclippt sind, das Clippen hüftnah erfolgt und kein unnötiges Schlappseil im System vorliegt.

Tabelle 1: Durchgeführte Versuche

Nr	Art	Ausgegebene Seillänge [m]	Zusätzliches Schlappseil [m]	Höhe über letzter Zwischen-sicherung [m]
1	Weiche	15,0	2,0	-
2	Sicherung	15,0	2,0	-
3	Harte	15,0	2,0	-
4	Sicherung	15,0	2,0	-
5	Weiter	15,0	2,0	-
6	Absprung	15,0	2,0	-
7	„Gewöhnlicher“ Vorstieg	12,0	2,0	1,0
8		12,0	-	1,0
9		12,0	-	1,0
10	Vorstieg Sturzkette	6,5	-	0,7
11		8,0	-	0,7
12		9,0	-	1,5
13		10,0	-	0,7
14		11,0	-	1,5
15		11,0	-	0,7
16		12,0	-	1,5

V. DATENVERARBEITUNG

Aus den Daten der Inertialsensoren lässt sich mit Hilfe eines Algorithmus (MADGWICK 2011) zu jeder Zeit die genaue dreidimensionale räumliche Lage des Sensors berechnen. Hieraus lassen sich neben den Beschleunigungen und Kräften auch die Körperbewegungen und Körperlage ermitteln, die für die späteren Scores wesentliche Informationen liefern.

Die ca. 0,1 s bis 0,2 s andauernde Fangstoßspitze kann bei der verwendeten Messfrequenz von 100 Hz durch ca. 10 bis 20 Messwerten mit ausreichender Auflösung detektiert werden.

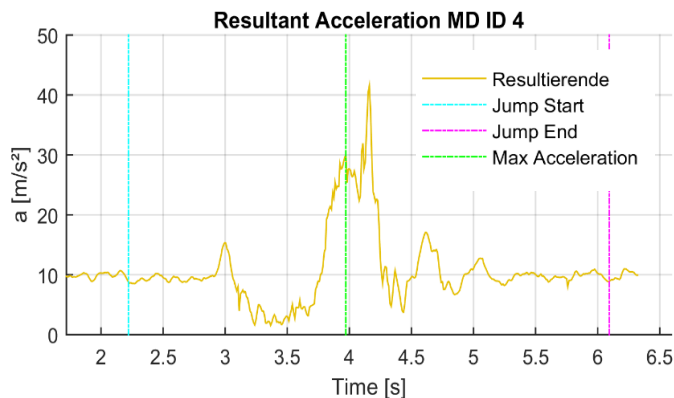


Abbildung 2: Resultierende Beschleunigung gemessen am Körperschwerpunkt während eines Sturzversuchs

Die Auswertung der Messergebnisse konzentriert sich vorwiegend auf die Messdaten des Kraftsensors und die Beschleunigungswerte am Körperschwerpunkt. Ergänzende Informationen werden durch die ermittelten Beschleunigungswerte an den Knöcheln gewonnen. Die Koordinatenachsen der Beschleunigungssensoren spannen ein kartesisches Koordinatensystem auf. Mit folgender Formel (1) wird aus den Beschleunigungen entlang der x-, y- und z-Achse die resultierende Beschleunigung a_{Res} berechnet.

$$a_{Res} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

Aus dem Verlaufsgraphen der Beschleunigungsdaten lassen sich verschiedene Phasen des Sturzes herauslesen. Abbildung 2 zeigt die resultierende Beschleunigung am KSP. Der Sturzbeginn, das Sturzende und der maximale Fangstoß sind über vertikale Linien markiert. Diese sowie die Phase des freien Falls, welche mit dem einsetzenden Bremsvorgang endet, lassen sich am dem Graphen ablesen.

Zur Analyse der Daten werden Beginn und Ende des Sturzes, Zeitpunkt und Höhe des maximalen Fangstoßes mit Hilfe eines Algorithmus automatisch detektiert. Dazu werden verschiedene Filter und Techniken der Mustererkennung auf die Messdaten angewandt.

Zunächst werden die Daten des Beschleunigungssensors tiefpassgefiltert, um vorhandenes Sensorrauschen zu unterdrücken. Anschließend wird aus den Beschleunigungsdaten der Impuls geschätzt:

$$\vec{p} = m \int \vec{a} \quad (2)$$

Der Anfangsimpuls des Sturzes wird mit Hilfe einer Regressionsgeraden gefittet, was einem ungebremsten Sturz entspricht. Der mittels (2) aus den Messdaten berechnete Impuls besitzt zum Zeitpunkt des Fangstoßes die größte Abweichung von der Regressionsgeraden, was den Bremszeitpunkt liefert.

Anschließend werden um diesen Zeitpunkt herum Anfang und Ende des Sturzes detektiert. Dazu wird für das Ende des Sturzes nach einer Ruhelage gesucht. Hierzu muss für eine bestimmte Zeitspanne lediglich die reine Erdbeschleunigung gemessen werden (nach der Ausschwingphase). Der Start des Sturzes wird über eine sehr geringe gemessene Beschleunigung (freier Fall) detektiert.

Mit dem bekannten Körpergewicht m des Kletterers kann die geschätzte Kraft aus der Beschleunigung berechnet werden:

$$F_B = m \cdot a_{Res} \quad (3)$$

Für diesen geschätzten Kraftverlauf und den real gemessenen Kraftverlauf mittels Kraftsensor werden die Zeitpunkte der Maxima während des Abbremsvorgangs (Fangstoß) ermittelt.

Der zeitliche Versatz und die Differenz der Maximalwerte dienen als Maß für die Übereinstimmung zwischen Schätzwert F_B und realer Kraftmessung.

VI. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Auswertung der Messungen ergaben eine zeitliche Abweichung von 0.01 s (Median) mit einer Streuung von -0.04 bis +0.03 s (1. bzw. 3. Quartil) über alle Messungen. Die Dauer der Fangstoßspitze liegt bei 0,1 s bis 0,2 s (FIMML & LARCHER 2000). Die vorliegenden Ergebnisse liegen daher innerhalb des Zeitfensters der Fangstoßspitze. Es wurde also stets der maximale Fangstoß detektiert.

Für die Abweichung der Größe des Fangstoßes zwischen skaliertes Vergleichskraft und Kraftmesssensor ergaben sich folgende Werte über alle Versuche: Abweichung -112 N (Median) und Streuung -512 N bzw. -102 N (1. bzw. 3. Quartil).

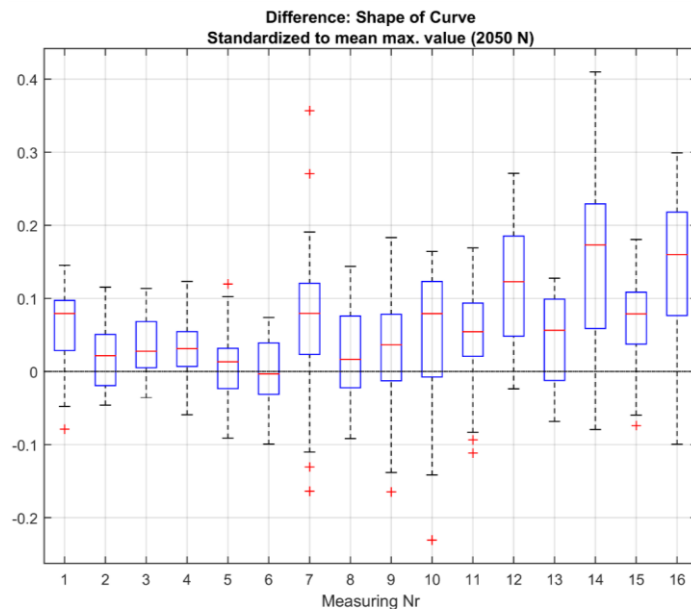


Abbildung 3: Kongruenzbetrachtung der Kraft F und F_B für alle Versuche. Auf der Y-Achse ist die auf 2050 N normierte Abweichung zwischen F und F_B an.

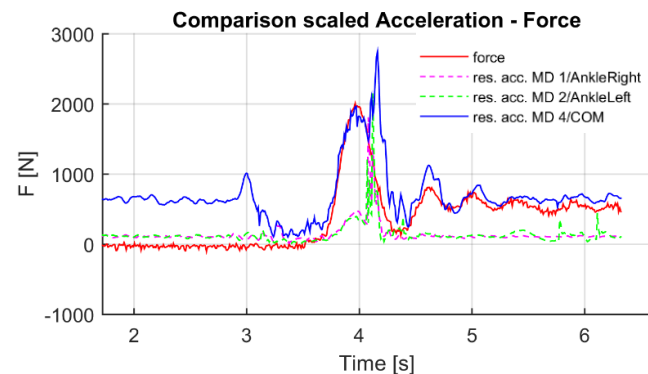


Abbildung 4: Geschätzte (KSP blau durchgezogen, rechter und linker Fuß grün und lila gestrichelt) und gemessene Kraft (rot, durchgezogen) im Vergleich

Neben den Kraftspitzen wurde auch der Verlauf der geschätzter und gemessener Kraft untersucht. Hierzu wurde der Verlauf von Beginn des Abbremsvorgangs bis zum Fangstoß einer Kongruenzbetrachtung unterzogen. Die Ergebnisse der Abweichungen für die einzelnen Versuche sind in Abbildung 3 als Boxplots dargestellt. Die maximale ermittelte Kraft bei den Stürzen betrug 2050 K, daher sind alle Werte auf diese Kraft normiert.

Tendenziell ist erkennbar, dass die größeren Abweichungen in Messungen mit größerer Fallweite aufgetreten sind. Die Abweichungen der Beschleunigungswerte während der Phase des freien Falls können auf die Seilreibung in der Umlenkung und eingehängte Zwischensicherungen sowie durch die redundante Sicherung mit einem zweiten Seil zurückgeführt werden. Ein beispielhafter Vergleich aus einer Messung ist in Abbildung 4: Geschätzte (KSP blau durchgezogen, rechter und linker Fuß grün und lila gestrichelt) und gemessene Kraft (rot, durchgezogen) im Vergleich Abbildung 4 zu sehen.

Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Messung der Kraft durch die IMU-Sensorik für die Zwecke des Sturztrainings ausreichend genau möglich ist.

Die genaue Untersuchung der Messdaten lässt noch weitere Schlussfolgerungen zu. Die Beschleunigungsdaten bieten gegenüber der reinen Kraftmessung der Seilkraft zusätzliche Informationen. So können verschiedene Szenarien zum Beispiel Toprope oder Vorstieg anhand des Kurvenverlaufs identifiziert und unterschieden werden. Zudem ist der Beginn des Sprungs klar erkennbar. Bis zu diesem Zeitpunkt ist der Kletternde in Ruhe und es wird die einfache Erdbeschleunigung gemessen. Mit Beginn des freien Falls geht die gemessene Beschleunigung am Stürzenden gegen Null (zusätzliche Beschleunigungen durch die an der Umlenkung und an eingehängten Zwischensicherungen wirkende Seilreibung und die redundante Sicherung). So kann auch die Dauer des freien Falls klar detektiert werden. Auch der Anprall der Füße an der Wand kann mit Hilfe der IMU-Messdaten detektiert werden. Dies ermöglicht sowohl Erkenntnisse über den Zeitpunkt als auch die Härte des Anpralls. Mit der Messung der Beschleunigungen an den Knöcheln kann auch ein zeitlich versetzter Anprall der Füße ermittelt werden, was ein Hinweis auf eine instabile Körperhaltung oder einen rotatorischen Absprung und somit eine schlechte Kontrolle des Sturzes sein kann. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel mit einem unnötig starken initialen Absprung des Kletterers, was ebenfalls anhand der Messdaten der IMU-Sensorik detektiert werden kann.

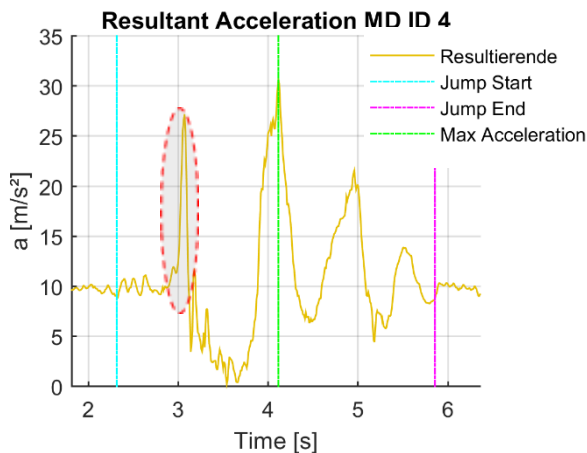


Abbildung 5: Resultierende Beschleunigung (KSP) mit auffällig hoher Beschleunigung zu Beginn des Sturzes bei zu starkem Absprung des Kletterers von der Wand.

VII. ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

Mit dem Sturz- und Sicherungs-Instuktor (SuSI) ist ein kompaktes System zur quantitativen Erfassung von Kräften und Bewegungen beim Sportklettersturz entwickelt worden.

Im Rahmen von Validierungsmessungen wurde gezeigt, dass die Seilkraft am Anseilpunkt des Kletterers durch IMU-Messdaten rekonstruiert werden kann. Dadurch entfällt die Verwendung eines Kraftmessensors. Die Messungen haben ebenfalls gezeigt, dass anhand der IMU-Messdaten verschiedene Vorgänge und Effekte differenziert werden können, die es erlauben, Aussagen über die Sicherungs- und Sturzqualität zu treffen.

Das vorgestellte System dient als Grundlage für die Bewertung der Vorgänge beim Sturz und beim Sichern. Mit der analytischen Auswertung der Messdaten, stellt SuSI den Prototyp eines auf physikalische Messungen beruhenden Trainings- und Bewertungssystems dar, welches eine objektive Beurteilung der Qualität von Sturz- und Sicherungstrainings ermöglicht.

Eine vielfach diskutierte, sehr wichtige Einflussgröße, die mit dem aktuellen System noch nicht gemessen und bewertet werden kann, ist die Menge des Schlappseils beim Sturz. Diese Größe muss im Verhältnis zur Kletterhöhe bewertet werden. Dazu sind sensorische Erweiterungen geplant, die in nachfolgenden Arbeiten evaluiert werden. Mit dieser weiteren Größe ist dann eine Sturzweitenprädiktion möglich, die zu jedem Zeitpunkt, insbesondere im bodennahen Bereich, eine mögliche Sturzsituation bewerten kann.

Derzeit laufen weitere Arbeiten, die viele relevanten Qualitätskriterien für Sicherer und Kletterer bei einem Kletterstutz automatisch bestimmen und bewerten (Scoring). Dieses Scoring wird anschließend im Rahmen einer Messreihe mit unabhängigen Klettertrainern evaluiert.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde durch den sparkassendome Neu-Ulm und dem DAV Neu-Ulm unterstützt. Der sparkassendome stellte die notwendige Sicherheits- und Kletterausrüstung und die Kletterrouten für die Durchführung der Versuche zur Verfügung.

LITERATUR

FIMML, W. & LARCHER, M. (2000): Energie ist Kraft mal Weg: Sicherungstheoretische Grundlagen, Teil 2. In: ALPENVEREIN SÜDTIROL, DEUTSCHER ALPENVEREIN, OESTER-REICHISCHER ALPENVEREIN & SCHWEIZER ALPEN-CLUB SAC (Hrsg.). bergundsteigen: Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport 4/00, 14–20.

HUMMEL, C. & HELLBERG, F. Unfälle an künstlichen Kletterhallen: Kampf dem Eisberg! In: DEUTSCHER ALPENVEREIN E.V. (Hrsg.). DAV Panorama: Magazin des Deutschen Alpenvereins 6/2014, 62–65.

MADGWICK, S. O., HARRISON, A. J., & VAIDYANATHAN, R. (2011): Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on (pp. 1-7). IEEE.

RADELZHOFFER, P. (2014500): Bergunfallstatistik 2012-2013. München.

SCHÖFFL, V., SEMMEL, C. & HELLBERG, F. Das Seil als Gefahrenquelle. In: DEUTSCHER ALPENVEREIN E.V. (Hrsg.). DAV Panorama: Magazin des Deutschen Alpenvereins 5/2008, 67–69.

SCHÖFFL, V.R., HOFFMANN, G. & KÜPPER, T. (2013): Acute injury risk and severity in indoor climbing—a prospective analysis of 515,337 indoor climbing wall visits in 5 years. – Wilderness & environmental medicine 24, 3, 187–194.

ÜBER DIE AUTOREN

Prof. Dr. Thomas Engleder und **Prof. Dr. Michael Munz** sind Teil der Forschungsgruppe Biomechatronik an der Hochschule Ulm, Fakultät für Mechatronik und Medizintechnik.

Sebastian Maile, M.Eng., promoviert derzeit an der Hochschule Ulm im Forschungsbereich Biomechatronik.

Anna Hoffmann, M. Eng., ist Absolventin der Hochschule Ulm im Studiengang Medizintechnik und hat im Rahmen ihrer Masterarbeit die Grundlagen für diese Forschungsarbeit geschaffen.