

Leistungsdiagnostik im Recurve-Bogenschießen: Weiterentwicklung eines Druckmesssystems zur Analyse der Dynamik der Schützen-Bogen-Interaktion

AZ: 072020/21-22

Cagla Fadillioglu, Marian Hoffmann, Bernd Hermann & Thorsten Stein (Projektleitung)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Sport und Sportwissenschaft (IfSS), BioMotion Center

1 Problemstellung

Das olympische Bogenschießen erfordert ein hohes Maß an Präzision, um Spitzenleistungen zu erzielen. Um die Maximalpunktzahl zu erreichen, müssen die Athletinnen und Athleten aus einer Entfernung von 70 m den Innenkreis der Zielscheibe mit einem Durchmesser von 12,2 cm in einer Höhe von $130\text{ cm} \pm 5\text{ cm}$ treffen (Sportordnung des Deutschen Bogensportverbandes, Teil 6, S. 2).

Der Bewegungsablauf eines Schusses beinhaltet die folgenden Grundschritte: Der Bogen wird gespannt, der Pfeil wird bis zum Klicker gezogen, in dieser Position fixiert und gezielt. Vor dem Abschuss wird der Pfeil über den Klicker gezogen, sodass ein metallenes Geräusch entsteht. Kurz nach diesem Geräusch wird der Pfeil abgeschossen. Unmittelbar vor dem Abschuss ändert sich die Aktivität der Schulter- und Rückenmuskulatur. Aus biomechanischer Sicht muss das neuromuskuläre System der Athletinnen und Athleten in der Lage sein, die Auflösung des Kräftegleichgewichts zwischen den äußeren Spannkräften und den muskulären Kräften unmittelbar nach Abschuss des Pfeils zu koordinieren. Die Qualität der Auflösung des Kräftegleichgewichts wirkt sich entscheidend auf die Leistung aus, denn nach dem Loslassen der Zughand von der Bogensehne, also nach der Auflösung des statischen Kräftegleichgewichts, hat der Pfeil noch Kontakt zur Bogensehne, und somit wird jede Bewegung des Bogens auf den Pfeil übertragen (Edelmann-Nusser et al., 1999). Jede Veränderung der übertragenen Kraft auf den Bogen kann die Flugbahn des Pfeils beeinflussen und damit auch die Stelle, an der der Pfeil auf die

Zielscheibe trifft (Leroyer et al., 1993). Folglich muss es das Ziel der Athletinnen und Athleten sein, den Druckpunkt der Bogenhand stabil am Drehpunkt des Griffes zu platzieren und diese Position bis zum Abschuss zu halten (Haidn & Weineck, 2001). Die Erfassung des Druckverlaufs am Bogengriff während des Schussvorgangs ist nach Ansicht des Bundestrainers ein wichtiger Baustein für die Leistungsdiagnostik, um die Qualität der Schusstechnik umfassend analysieren zu können.

In der Leistungsdiagnostik des A- und Perspektiv-Bogenkaders werden aktuell unterschiedliche Messverfahren wie z.B. Videoanalysen eingesetzt. Ein Messsystem, das die Druckverteilung am Bogengriff erfassen kann, steht dem DSB nicht zur Verfügung. Ein aktuelles systematisches Review zur Leistungsdiagnostik im Bogenschießen (Vendrame et al., 2022) enthält nur eine Studie, die die Dynamik am Bogengriff analysiert hat. D.h., es handelt sich um ein bisher kaum bearbeitetes Thema. Vor diesem Hintergrund besteht die Problemstellung darin, ein System (Hardware und Software) zu entwickeln, das eine Erfassung der Druckverteilung am Bogengriff ermöglicht und in der Leistungsdiagnostik des A- und Perspektiv-Bogenkaders eingesetzt werden kann.

2 Entwicklungsstand zu Beginn des Serviceforschungsprojekts

Um den Druckverlauf am Bogengriff zu erfassen, können die Sensoren entweder an der Hand der

Athletinnen und Athleten oder am Bogengriff angebracht werden. Untersuchungen in einem ersten Forschungsprojekt (ZMVI4-071505/17-18) mit einem kommerziell angeschafften mit Druckmesssensoren ausgestatteten Handschuh erbrachten einerseits wichtige Erkenntnisse für den Entwicklungsprozess, zeigten andererseits aber auch, dass die Positionierung der Sensoren am Handschuh über mehrere Messungen hinweg schwer reproduzierbar ist und die Haptik von den Athletinnen und Athleten als verändert wahrgenommen wurde. Daher wurde gemeinsam mit den Bundestrainern die Entscheidung getroffen, ein vollständig neues Messsystem zu entwickeln, bei dem Druckmesssensoren in den Bogengriff eingebracht werden. Die Herausforderung hierbei ist, dass der Bogengriff individuell für Athletinnen und Athleten gefertigt wird und der Bauraum für das Einbringen von Sensoren, Kabeln, Verstärker usw. sehr klein ist und das Messsystem Athletinnen und Athleten im Bewegungsablauf nicht stören darf (Haptik, Gewicht usw.). Demzufolge war die Idee, dass alle Athletinnen und Athleten des A- und Perspektiv-Kaders mit einem individuellen, instrumentierten Griffstück ausgestattet werden, das baugleich zu dem im Wettkampf genutzten individuellen Griffstück ist. Wenn an den wichtigsten Bogenstandorten in Deutschland jeweils ein AD-Wandler zur Verfügung steht, können Leistungsdiagnostiken an den verschiedenen Standorten parallelisiert werden. Da 10-15 Athletinnen und Athleten mit einem instrumentierten Griffstück ausgestattet werden sollen und eine gewisse Fluktuation in der Zusammensetzung des A- und Perspektiv-Kaders zu erwarten ist, muss das zu entwickelnde Messsystem möglichst kostengünstig sein. Auch für die zu entwickelnde Software zur automatisierten Datenaufnahme, -speicherung und -analyse sollten keine Lizenzgebühren anfallen.

In dem Forschungsprojekt ZMVI4-071505/17-18 wurde eine Recherche zu verfügbaren Sensorsorten technologien durchgeführt. Verschiedene Lösungen wurden iterativ untersucht, jeweils mit Bundestrainern und ausgewählten Athletinnen und Athleten getestet und die jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert. Als Projektergebnis wurden schließlich acht Drucksensoren der

Marke Honeywell – Typ ABPMJJT015PGAA50psi –, angeordnet als 2 x 4 Matrix, in einen Bogengriff eingebracht und als Prototyp produziert. Für die Herstellung der instrumentierten Bogengriffe wurden in die Griffstücke die notwendigen Auskerbungen gefräst und einseitig verschlossene, luftgefüllte Silikonschläuche (Außendurchmesser 2 mm) eingebaut. Im Anschluss wurden an das offene Ende die Honeywell-Drucksensoren angeschlossen (Abb. 1). Dies ermöglichte die Erfassung der Druckveränderung an jedem einzelnen Schlauch, die durch die Interaktion zwischen der Hand und dem Bogen entstehen. Die Sensorik zur Messung der Druckveränderung sowie die Kabelführung konnten platzsparend seitlich am Griffstück angebracht werden, um eine geringstmögliche Beeinflussung der Athletinnen und Athleten zu erreichen (Abb. 1). Die gemessenen Signale werden kabelgebunden an einen neu entwickelten A/D-Wandler weitergegeben, mittels USB-Anschluss an einen PC transferiert und dort mit der in diesem Projekt vollständig neu entwickelten Software „DSB Analyzer“ weiterverarbeitet.

Die Software „DSB Analyzer“ wurde mit C-Sharp und Python entwickelt, ist für Windows optimiert und verfügt über eine Aufnahme- und Analysefunktionalität. Nach dem Neuanlegen oder der Auswahl einer Athletin oder eines Athleten kann die Messung gestartet werden. Alle Informationen werden in einer SQLite-Datenbank gespeichert mit dem jeweiligen Verweis auf die absolvierten Messungen, die in einer eindeutigen Ordnerstruktur abgelegt sind. Diese Datenaufteilung ermöglicht ein einfaches Transferieren der Daten zwischen Bundestrainern sowie Athletinnen und Athleten, eine Fusion von Datensätzen und gleichzeitig den schnellen Zugriff auf die Messdaten, um weitere Auswertungen, bspw. im Rahmen von Forschungs- oder Abschlussarbeiten, problemlos zu ermöglichen. Im Bereich der Analyse können sowohl einzelne Schüsse von Athletinnen und Athleten im Nachgang analysiert als auch Vergleiche zwischen Schüssen vorgenommen werden, sowohl intra- als auch inter-individuell. Die Funktionalitäten der Software wurden ebenfalls iterativ mit Bundestrainern sowie Athletinnen und Athleten entwickelt. Der Einsatz von C-Sharp, Python und SQLite als kos-

tenlose Programmiersprachen bzw. Programmbibliothek ermöglicht perspektivisch die Weiterentwicklung der Software ohne Lizenzkosten und ggf. in Eigenregie durch den DSB.

Mit Abschluss des Forschungsprojekts ZMVI4-071505/17-18 stand dem DSB ein Prototyp eines vollständig neuen Messsystems (Hardware und Software) zur Erfassung der Druckverteilung am Bogengriff zur Verfügung, das in enger Kooperation mit dem Praxispartner entwickelt wurde und von ausgewählten Athletinnen und Athleten weiterführend getestet werden konnte.

3 Zielsetzung des Serviceforschungsprojekts

Die weiterführenden Tests des Prototyps durch ausgewählte Athletinnen und Athleten des A-Kaders führten in Rücksprache mit den Bundestrainern zu den Entwicklungszielen für das vorliegende Serviceforschungsprojekt:

- › Hardware: (1) Prüfen, ob die Anzahl und Anordnung der Sensoren erhöht bzw. verändert werden kann, ob die Sensoranordnung sich auf allen individuellen Griffstücken der A- und Perspektiv-Kaderathletinnen und -athleten umsetzen lässt und ob das Greifmuster aller Athletinnen und Athleten vollständig erfasst werden kann. (2) Prüfen, ob die Messbox am Griff verkleinert und das Gewicht reduziert werden kann.
- › Software: Neben den erforderlichen Anpassungen in der Software, die sich aus den Änderungen an der Hardware ergeben, soll (1) für die neue Sensoranordnung ein neuer, robusterer Algorithmus zur Bestimmung des Druckschwerpunkts entwickelt und implementiert werden und (2) die Ergebnisdarstellung nach Wünschen der Athletinnen und Athleten optimiert werden, um eine noch intuitivere Interpretation der Ergebnisse im Feld zu ermöglichen.
- › Evaluation: Alle Weiterentwicklungen sollen im Rahmen enger Absprachen und

Tests mit den Bundestrainern sowie Athletinnen und Athleten erfolgen.

4 Ergebnisse des Serviceforschungsprojekts

Zum Projektstart wurden die geplanten Weiterentwicklungen zunächst noch einmal mit dem Praxispartner ausführlich besprochen und protokolliert, dann folgte eine Entwicklungsphase und ein erster Feldtest mit drei A-Kaderathletinnen und -athleten, gefolgt von einer weiteren Entwicklungsphase und einem zweiten Feldtest mit wiederum drei A-Kaderathletinnen und -athleten sowie einer finalen Optimierung des Messsystems. Die folgenden Ergebnisse dokumentieren den finalen Entwicklungsstand des Messsystems.

Weiterentwicklung der Hardware

Nach Rücksprache mit dem DSB werden die instrumentierten Griffstücke nicht mehr manuell bearbeitet, sondern die Aussparungen für Sensoren, Kabel sowie die Messbox werden mithilfe eines 3D-Drucks gefertigt. Hierfür stellte der Schützenbund dem IfSS die 3D-Druckdaten der Griffstücke von drei A-Kaderathletinnen und -athleten sowie die markierten Kontaktflächen der Hand aller Athletinnen und Athleten des A- und Perspektiv-Kaders auf den individuellen Griffstücken zur Verfügung, um im Rahmen der Fertigung zu prüfen, ob die Kontaktflächen aller Athletinnen und Athleten durch die neue Sensoranordnung abgedeckt werden. Die 3D-Druckdaten wurden in ein CAD-System überführt, die erforderlichen Anpassungen für die Einbringung des Druckmesssystems (Auskerbungen für Sensoren, Kabelkanäle und Messbox) wurden vorgenommen und schließlich wieder in 3D-Druckdaten rücktransformiert. Nach den Tests und Absprachen mit dem DSB wurde die Anzahl der Sensoren in den Griffstücken final von acht auf neun erhöht und in Form einer 3x3-Matrix angeordnet (Abb. 1). Verbaut wurden die gleichen Drucksensoren, wie in Kapitel 2 beschrieben. Im Rahmen des Fertigungsprozesses wurde außerdem versucht, Material zu reduzieren, um eine Gewichtsoptimierung zu erreichen. Die Position der Messbox wurde nach Rücksprache mit den drei A-Kaderathletinnen und -athleten, die



Abb. 1: Prototyp des vorherigen Projekts mit 8 Sensoren (links), erster Prototyp (Mitte) und finaler Prototyp (rechts) mit 9 Sensoren unterschiedlicher Anordnung des vorliegenden Serviceforschungsprojekts.

von Seiten des DSB in den Entwicklungsprozess eingebunden waren, auf der rechten Griffseite belassen. Die Messbox ist soweit wie möglich verkleinert worden. Sie wird im Rahmen des 3D-Drucks mitgedruckt und ist in das Griffstück integriert (Abb. 1).

Weiterentwicklung der Software

Parallel zur Hardwareentwicklung wurde die Software „DSB Analyzer“ weiterentwickelt. Die Software gliedert sich grundlegend in ein Aufnahme-, ein Analyse- und ein Einstellungsfenster.

- Aufnahmefenster: Hier können neue Athletinnen und Athleten mit allen erforderlichen Informationen neu angelegt oder aus der Datenbank ausgewählt werden. Dann kann die Messung unmittelbar gestartet werden.
- Analysefenster: Sobald die Messung gestoppt wird, öffnet sich automatisch ein Fenster mit einer Zielscheibe, in die der Score unmittelbar nach dem Schuss durch Klicken auf die Schussposition auf der Zielscheibe eingetragen werden kann. Zudem können weitere Notizen in ein Textfeld eingegeben werden (Abb. 2, links) sowie drei unterschiedliche Analysen, die in Form von drei Tabs angeordnet sind: Der erste Tab enthält ein Liniendiagramm, in dem die Zeitreihen der Druckdaten der einzelnen Sensoren angezeigt werden (Abb. 2, Mitte). Dargestellt werden können alle aufgezeichneten Daten, oder die Zeitreihen

können automatisch auf die letzten zwei Sekunden vor Schussabgabe zugeschnitten werden. Im zweiten Tab wird schließlich der Druckschwerpunkt angezeigt, der mit den Daten aus den neun Sensoren durch einen neu entwickelten Algorithmus auf Basis des Superpositionsprinzips (Popescu, 2018) berechnet und in Bezug auf die Position der Sensoren angezeigt wird (Abb. 2, rechts). Der dritte Tab enthält Druckdaten einzelner Sensoren mit einer Farbkodierung. Die gemessenen bzw. eingegebenen Daten werden automatisch in der Datenbank gespeichert. Darüber hinaus können im Analysefenster sowohl einzelne als auch mehrere Schüsse von Athletinnen und Athleten im Nachgang analysiert werden. Bei der Analyse mehrerer Schüsse können die Schüsse einer Athletin oder eines Athleten aus allen gespeicherten Schüssen in der Datenbank ausgewählt werden. Hier besteht die Möglichkeit, sowohl Druckschwerpunkt als auch Score von mehreren Schüssen mit den jeweiligen 95%-Vertrauensellipsen auf einmal auszugeben. Zusätzlich kann die Häufigkeit der Scores von ausgewählten Schüssen in einem Score-Verteilungs-Tab angezeigt werden.

- Einstellungsfenster: Hier ist es möglich, die Standard-Schusslänge einzustellen, sowie darüber hinaus eine neue Datenbank anzulegen, eine vorhandene Datenbank auszuwählen oder zu löschen.

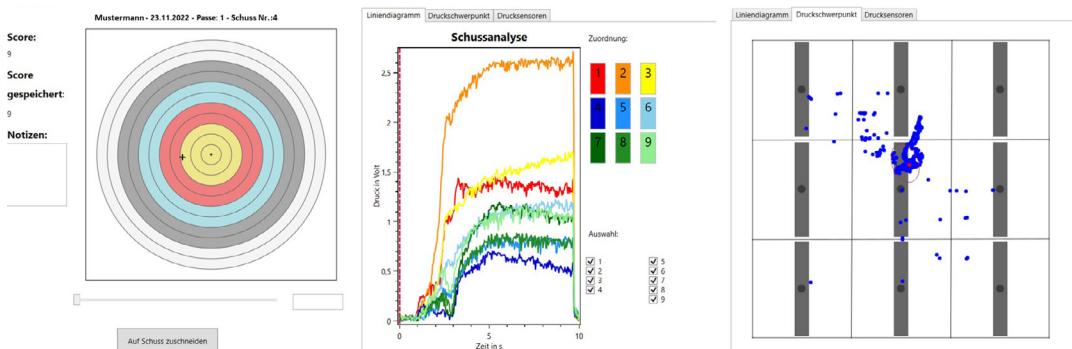


Abb. 2: Zielscheibe für Eintragung des Scores und Notizen unmittelbar nach dem Schuss (links), Liniendiagramm mit Druckdaten aus einzelnen Sensoren im linken Tab (Mitte) und Druckschwerpunktverlauf von einem Schuss auf dem Griff im mittleren Tab (rechts).

Ergebnisse der Evaluationen im Feld

Im Rahmen des Serviceforschungsprojekts wurden die Weiterentwicklungen zweimal von jeweils drei A-Kaderathletinnen und -athleten getestet, für die in jeder Iteration jeweils drei individuell instrumentierte Griffe gefertigt wurden. Die Ergebnisse der finalen Testmessung können wie folgt zusammengefasst werden: (1) Die weiterentwickelten instrumentierten Griffstücke ließen sich problemlos an den Wettkampfbogen der drei A-Kaderathletinnen und -athleten anbringen. (2) Das gesamte System (Hardware und Software) hat stabil funktioniert, sodass problemlos mehrere Passen aufgezeichnet werden konnten. (3) Die grundlegenden Softwarefunktionalitäten entsprechen den zum Projektstart definierten Anforderungen. (4) Das subjektive Feedback der Athletinnen und Athleten war, dass die instrumentierten Griffstücke bezüglich Haptik, Gewicht und Kabelführung als nicht störend empfunden wurden und dass sie die Schussleistung nicht negativ beeinflussen. (5) Es konnte ein Zusammenhang zwischen dem Trefferbild auf der Scheibe und dem Druckbild am Griff hergestellt werden. Die Diskussionen mit Athletinnen und Athleten sowie den Bundestrainern zeigten aber, dass diese Zusammenhänge höchstwahrscheinlich individuell ausgeprägt sind, aufgrund individueller Technikausprägungen und Kompensationsstrategien während des Bewegungsablaufs.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung dieses Serviceforschungsprojekts war die Weiterentwicklung eines Messsystems zur Erfassung und Analyse der Druckverteilung

am Bogengriff nach den Vorgaben des Praxispartners DSB. Durch die sehr gute und enge Kooperation ist es gelungen, die definierten Zielsetzungen zu erreichen. Dem DSB steht jetzt ein überarbeiteter Prototyp zur Verfügung, der entsprechend für alle Athletinnen und Athleten des A- und Perspektiv-Kaders individuell vervielfältigt werden kann. Dementsprechend sind die nächsten Arbeitsschritte: (1) Aufbauend auf den mit Projektende bereits vorliegenden drei individuell instrumentierten Griffen können nun durch den DSB individuell instrumentierte Griffe für die restlichen zehn Athletinnen und Athleten des A- und Perspektiv-Kaders gefertigt werden. (2) Für die Implementierung des Messsystems im Trainingsalltag müssen Bundestrainer sowie Athletinnen und Athleten des A- und Perspektiv-Kaders im Umgang mit dem System geschult werden, um eine objektive Datenerhebung sicherzustellen. (3) In den bisherigen Tests lag der Fokus auf der Entwicklung des Messsystems, und es wurden bisher auch nur mit einigen wenigen Athletinnen und Athleten, für die Prototypen gefertigt wurden, Daten erhoben. In einem nächsten Schritt ist für Athletinnen und Athleten des A- und Perspektiv-Kaders ein umfangreicher Datensatz zu erheben, um untersuchen zu können, ob personenübergreifende Zusammenhänge zwischen dem Trefferbild auf der Scheibe und dem Druckverlauf am Griff aus den Daten extrahiert werden können oder ob die Zusammenhänge jeweils personenspezifisch zu bewerten sind. Diese Auswertungen sollten wiederum in enger Kooperation zwischen Sportwissenschaft und Sportpraxis erfolgen und bilden eine wichtige Wissensbasis für die Implementierung des entwickelten Messsystems in der Praxis des Spitzensports.

6 Literatur

- Edelmann-Nusser, J., Gruber, M., Gollhofer, A. & Gros, H.-J. (1999). Komplexe Leistungsdiagnostik im Bogenschießen. *Leistungssport*, 29 (2), 47-54.
- Haidn, O. C., & Weineck, J. (2001). Bogenschießen: Trainingswissenschaftliche Grundlagen. Balingen: Spitta Verlag.
- Leroyer, P., Van Hoecke, J., & Helal, J. N. (1993). Biomechanical study of the final push-pull in archery. *Journal of Sports Sciences*, 11 (1), 63-69.
- Popescu, G. (2018). Principles of Biophotonics: Linear systems and the Fourier transform in optics. Bristol: IOP Publishing.
- Sportordnung des Deutschen Schützenbundes (2018). Abgerufen von: www.dsbb.de/der-verband/ueber-uns/statuten/sportordnung-national/
- Vendrame, E., Belluscio, V., Truppa, L., Rum, L., Bergamini, E. & Mannini, A. (2022). Performance assessment in archery: a systematic review. *Sports Biomechanics*, 00, 1-23. DOI: 10.1080/14763141.2022.2049357.