

Erkrankungen der Wirbelsäule unter ergonomischen und biomechanischen Gesichtspunkten – Bericht aus einem Forschungssemester

Johannes BROMBACH

*Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen,
Arbeitswissenschaft und angewandte Ergonomie
Hochschule für Angewandte Wissenschaften München
Lothstraße 64, D-80335 München*

Kurzfassung: Belastungen der Wirbelsäule werden in der Ergonomie und der Biomechanik beschrieben und untersucht. Der Beitrag beschäftigt sich mit der Analyse von Ergebnissen, die mit Tierpräparaten gewonnen wurden und es nahelegen, dass hohe Wiederholraten und geringe Belastungen die Wirbelsäule stärker als bisher vermutet beanspruchen. Dabei wird die im Versuch beschriebene Situation (Frequenz und Belastungsart) analysiert und mit anderen Studien verglichen. Eine unmittelbare Übertragung der Ergebnisse auf betriebliche Arbeitssituationen und ergonomische Risikobewertungen fällt im Ergebnis nicht leicht. Schließlich wird vorgeschlagen, einen möglichen Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen darauf auszurichten, welchen Einfluss Pausen auf die Regeneration haben.

Schlüsselwörter: Skelett-Erkrankungen, Wirbelsäule, biomechanische Ex-vivo-Modelle, ergonomische Risikobewertung, Dosis-Wirkungsbeziehung

1. Einleitung

Die Beurteilung und Gestaltung menschlicher Arbeit erfordert eine ständige Überprüfung und Verbesserung des Methodeninventars der Ergonomie. Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) und vor allem Erkrankungen der Wirbelsäule kommen so häufig vor, dass sie neben dem persönlichen Schicksal der Betroffenen auch ein wirtschaftliches Problem für die Gesellschaft darstellen. Das zeigt sich in diesem Zusammenhang u. a. durch einen hohen Anteil von 22,1% an den Arbeitsunfähigkeitstagen sowie durch Produktionsausfälle von ca. 13 Milliarden Euro (vgl. Liebers et al., 2016). Dieser Beitrag untersucht aktuelle Forschungsthemen in der Biomechanik in Bezug auf deren praktische Relevanz zur ergonomischen Risikobewertung.

2. Risikobeurteilung in der Ergonomie und Biomechanik

Bei ergonomischen Methoden zur Beurteilung von Arbeitsbelastungen liegt im Allgemeinen die nachvollziehbare Auffassung zugrunde, dass höhere Belastungen und eine höhere Frequenz ein höheres Risiko begründen. Einfache Dosis-Wirkungs-Beziehungen gehen davon aus, dass z.B. die Belastung und deren Häufigkeit austauschbar wären. Um das erfahrungsgemäß höhere Risiko bei größeren Lasten besser beschreiben zu können, wurde u.a. vorgeschlagen das Quadrat der Belastung für die Risikobeurteilung zu Grunde zu legen (vgl. Jäger et al., 1999).

Bei den biomechanischen Grundlagenversuchen an der Universität Clarkson werden sog. Ex-vivo-Modelle in Bezug auf das Schädigungsverhalten bei wechselnden Lastfällen (vgl. Corbiere et al., 2016) untersucht. Dazu werden Tier-Präparate der Wirbelsäule von Weißwedelhirschen (*Odocoileus virginianus*) eingesetzt. Interessanterweise werden dabei für geringe Lasten und hohe Wiederholbedingungen degenerative Veränderung untersucht. In den zwei nun kurz beschriebenen Studien wurden verschiedene Parameter (u.a. die Oberflächenspannung und die Lage der neutralen Zone in den Segmenten) untersucht (vgl. Corbiere et al., 2016 und Gale et al., 2018). Der Fokus liegt im Folgenden jedoch auf den Ergebnissen, die in Bezug auf die zunehmende Flexibilität (bzw. die abnehmende Widerstandsfähigkeit gegen Verformung) des Modells herausgestellt wurden und auf dem Auftreten sog. Ringapophysenfrakturen. Dabei handelt es sich um den ringförmigen Teil benachbarter Wirbelknochen zwischen denen sich die Bandscheiben befinden. Durch ihre geringe Größe können diese Frakturen (gegenüber traumatischen Veränderungen) weithin nicht früh genug erkannt werden und können mit üblichen Verfahren kaum ausreichend genau bei Patienten diagnostiziert werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Sechs verschiedene 5-Wirbelknochen Bewegungssegmente (Lendenwirbel L1-L5) wurden in der ersten Studie (vgl. Corbiere et al., 2016) zyklisch bewegt. Dabei wurden wie in Abb. 1 dargestellt bis zu 15° Flexion vorgegeben und eine Spitzenbelastung von $230 \pm 50\text{N}$ ermittelt. Die Wiederholrate der Versuche lag bei 2 Hz und es wurden Untersuchungen bei 1000, 3000, 6000, 10.000, 20.000, 30.000 und 39.995 Zyklen durchgeführt. Im Ergebnis wurden tatsächlich Ringapophysenfrakturen unter relativ niedrigen Lasten bei zuvor gesunden Wirbeln erzeugt und mit bildgebenden Verfahren (sog. μCT) sichtbar gemacht. Alle Proben entwickelten Ringapophysenfrakturen, einige bereits nach 1400 Zyklen.

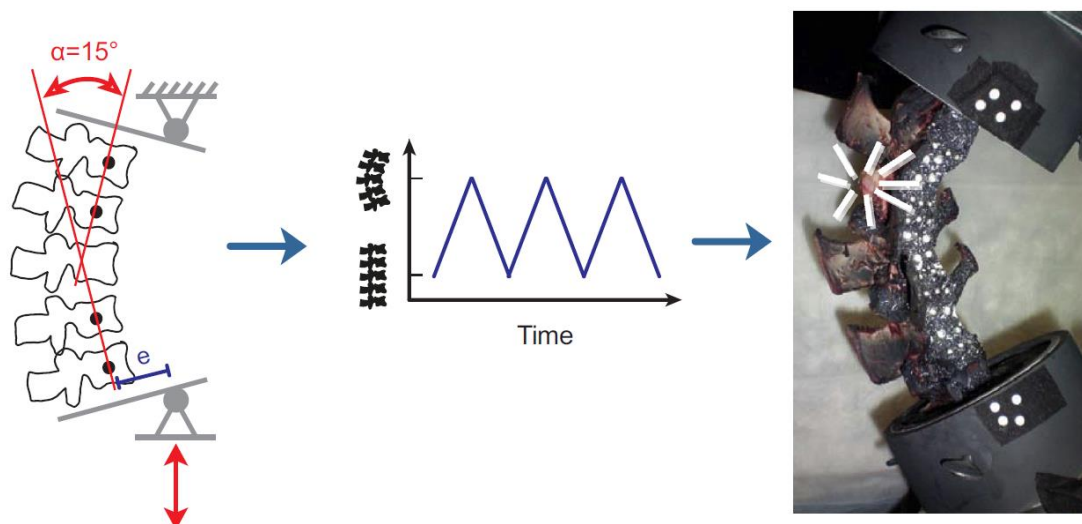


Abbildung 1: Darstellung des Versuchsaufbaus (entnommen aus Corbiere et al., 2016) und der Belastungssituation der 5 Wirbelkörper in einer exzentrisch gelagerten Aufnahme unter zyklisch wechselnder Belastung.

Bei der zweiten Studie (Gale et al., 2018) wurde der Fokus der Betrachtung auf die zunehmende Flexibilität gelegt. Es wurde in vergleichbarer Weise ein Zyklus von 20.000 Auslenkungen bei 0,5 Hz gewählt und wieder eine Bewegung von 15° an den

5 Wirbelsäulenelementen durchgeführt. Es wurden 7 Versuchselemente vom Hirsch und 5 menschliche Proben verwendet. Die zum Vergleich der unterschiedlichen Modelle normalisierten Ergebnisse in Abb. 2 zeigen jeweils eine Zunahme der Flexibilität (bzw. abnehmende Widerstandsfähigkeit gegen Verformung). Dies wurde als Indiz für die Gefahr der Belastungssituation mit hoher Frequenz und geringer Belastung angesehen (vgl. Gale et al., 2018). In Abb. 2 ist außerdem zu erkennen, dass sich eine Probe aus der Halterung löste und wieder befestigt wurde. Interessanterweise entspricht der weitere Verlauf nach der Wiederbefestigung dem charakteristischen Verlauf der anderen Proben.

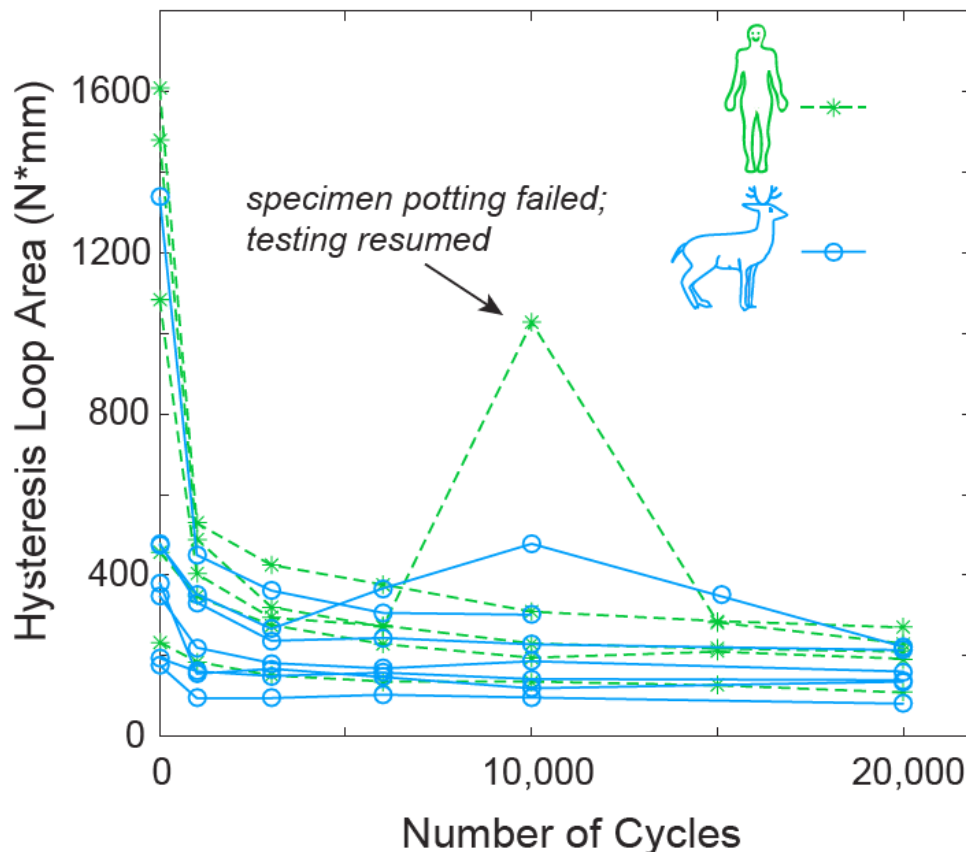


Abbildung 2: Verlauf der Hysterese-Kurven (d.h. der Flächen im Kraft-Weg-Diagramm) entnommen aus Gale et al., 2018.

Aus Sicht der Autoren wurde das Versuchsdesign auf Basis von repräsentativen Bewegungen entwickelt, die typisch für tägliche Aktivitäten für die menschliche Wirbelsäule und die Hirsch-Lendenwirbelsäule sind (vgl. Gale et al., 2018).

3. Fragestellung und Ergebnisse

Die Fragestellungen des hier beschriebenen Projektes wurden an der Universität Clarkson in einem Forschungssemester behandelt. Ziel war es den biomechanischen Ansatz vor dem Hintergrund ergonomischer Risikobetrachtungen zu untersuchen. Dazu wurden die 4 wesentlichen Fragestellungen thematisiert.

- 1) Wie sicher sind die Ergebnisse?

- 2) Welche Arbeitsstationen in der Industrie würden zu einer vergleichbaren Belastung mit geringer Last und hoher Wiederholrate führen?
- 3) Wie stellen sich die Ergebnisse gegenüber ergonomischen Ansätzen dar?
- 4) Welche möglichen Folgerungen lassen sich aus dem Versuch für die ergonomische Gefährdungsbeurteilung oder zukünftige Studien ableiten?

Die Untersuchungen wurden unter hohen wissenschaftlichen Qualitätsanforderungen durchgeführt. Mit den beiden beschriebenen Studien gelingt es wiederholbar und nachvollziehbar die mechanischen Hintergründe der beschriebenen Situation besser zu verstehen.

Im direkten Vergleich zu den in der Industrie vorkommenden Situationen, die mit ergonomischen Methoden untersucht werden, sind die Belastungen vergleichsweise gering und die Frequenz (mit z.B. 2 Hz und bis zu 40.000 Zyklen) ist sehr hoch. Realistisch für das Arbeitsleben sind wenige hundert Belastungszustände (bzw. Belastungszyklen) der Wirbelsäule während einer typischen Schicht und tausende von Tagen ohne schwere Strukturschäden (vgl. Jäger, 2018). Zuletzt wurden in diesem Zusammenhang (vgl. Projekt MEGAPHYS 2019) zwar aufgezeigt, dass z.B. manuelles Heben, Halten und Tragen von Lasten (≥ 3 kg) mit mehr als 3.500 Umsetzungsvorgänge pro 8h-Schicht durchaus vorkommen können (z.B. Kommissionierung im Trockensortiment). Dem Autor sind aber selbst bei repetitiven Tätigkeiten wie z.B. beim Andrücken von Klipsen oder Stopfen in der Automobilindustrie keine solchen Wiederholgrade bekannt. Ergonomische Untersuchungsmethoden sind entsprechend nicht für die Analyse solch hoher Wiederholungsbedingungen ausgelegt.

Bei einem anderen Versuch (vgl. Thoreson et al., 2017) mit Wirbelsäulensegmenten von Schweinen, der zum Vergleich herangezogen wird, traten ähnliche Ergebnisse auf. In dieser Studie wird mit 1 Hz und 20.000 Zyklen gearbeitet, wobei die Situation bewusst an Laufbelastungen im Sport ausgerichtet ist (vgl. Thoreson et al., 2017). Allerdings können diese alltäglichen und selbstgesteuerten Belastungen im Leben nicht ohne weiteres mit von außen zugeführten Belastungen bei einem invitro Modell gleichgesetzt werden (vgl. dazu Seidel et al., 2005).

Vergleicht man darüber hinaus mögliche Risiken mit berufsbedingten Erkrankungen, wie z.B. BK 2110 und BK 2108 fällt auf, dass Frequenzen von 2 Hz im Bereich der mechanischen Schwingungen liegen (bekanntermaßen besonders kritisch im Bereich von 3 bis 5 Hz). Das scheint insofern erwähnenswert, als dass bei den Schwingungsbelastungen die auftretenden Beurteilungsbeschleunigungen zur Risikobeurteilung herangezogen werden, allerdings vor dem Hintergrund einer jahrelangen Exposition im Berufsleben.

Geht man davon aus, dass die hohen Wiederholgrade gewählt wurden, weil auf diese Weise aus Gründen der Effizienz eine zeitliche Verdichtung erreicht werden kann, dann stellt sich die Frage, welchen Einfluss Pausen und Unterbrechungen haben würden. Hier ist eine Untersuchung von Johannessen (vgl. Johannessen et al., 2004) zu erwähnen. Bei dieser Studie wurden Tierproben (von erwachsenen Schafen) verwendet und es wurde nach 10.000 Zyklen (und 1 Hz) eine Pause von 18 h gemacht. Nach dieser Unterbrechung im Flüssigkeitsbad konnten die mechanischen Eigenschaften tatsächlich wiederhergestellt werden.

Die exzentrisch gelagerte Aufnahme der fünf Wirbelknochen mit einem kontrollierten Bewegungsweg erzeugt eine Stauchung und gleichzeitige Beugung von 15° und wird als typische Bewegung beschrieben (vgl. Gale et al., 2018) und während des Versuches durch die Lage der Segmente überwacht. Eine solche Belastungssituation ist im Detail durchaus komplex und die summarische Betrachtung des Verhaltens des Gesamtsystems im Belastungsfall ist mechanisch sehr anspruchsvoll, da sich die

Segmente nicht unbedingt vergleichbar verhalten. Eine differenzierte Analyse zu unterschiedlichen dynamische Kraftfällen und -richtungen bei verschiedenen Frequenzen liefern dagegen Huber et al. (vgl. Huber et al., 2005).

Schließlich wurde in Diskussionen mit den Autoren vor Ort in Clarkson deutlich, dass der beobachtete Verlust von Flüssigkeit in den Proben im Versuchsverlauf hier abschließend näher betrachtet werden muss und kurz erläutert werden soll. Während bei anderen Studien z.B. ein Flüssigkeitsbad (vgl. Johannessen et al., 2004) zum Einsatz kommt, sollten die Proben im Versuchsverlauf von außen beobachtet werden können und wurden nur mit Flüssigkeit besprüht. Betrachtet man weiterhin die (hier nicht dargestellten) Kraft-Weg-Diagramme der Auswertungen im Detail fällt auf, dass die Fläche der Hysteresekurven nicht nur kontinuierlich abnehmen, sondern auch in den negativen Bereich der Kraft beim „Wiederaufrichten“ der Proben verschoben werden. Damit verändert sich die Lastsituation im Versuchsablauf.

4. Diskussion und Ausblick

Im Ergebnis wird deutlich, dass eine unmittelbare Übertragung auf betriebliche Arbeitssituationen und mögliche Folgerungen nicht leichtfällt. Insbesondere weil die im Versuchsverlauf auftretende, komplette Entlastung (bis hin zu einer Zugbelastung) für normale Arbeitssituationen eher ungewöhnlich wäre. Der evtl. beabsichtigte Versuch mit den hohen Wiederholungsraten in zeitlich komprimierter Form eine längere Belastung mit geringerer Wiederholungsrate zu simulieren, ist - wie dargestellt - ebenfalls kritisch zu sehen. Inwiefern sich die kleinen Frakturen, die bei den Präparaten im Versuch beobachtet wurden, auf die - wie angesprochen - sehr schwer zu diagnostizierende Situation an lebenden Patienten übertragen lassen und wie diese mit der abnehmenden Widerstandskraft zusammenhängen, bleibt leider noch zu offen.

Die Autoren (vgl. Gale et al., 2018) sehen einen kritischen Zyklen-Bereich bereits nach ca. 10.000 Zyklen erreicht (vgl. Abb. 2 und insbesondere in Bezug auf die Probe, die sich gelöst hatte). Es wird gefolgert, dass eine Erholungszeit zwischen den Lastwechseln und einem ggf. danach folgenden Heben und Tragen eingeplant werden sollte. Wobei der ggf. notwendige Zeitraum offen bleibt.

Im Ergebnis fällt eine abschließende Interpretation und Übertragbarkeit der Ergebnisse damit schwer. Es stellte sich im Projektverlauf vielmehr heraus, dass ein möglicher Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen darauf ausgerichtet sein muss, welchen Einfluss Pausen auf die Regeneration haben. Eventuell könnten sich dadurch ergänzende Hinweise finden lassen, dass geringe Kräfte und hohe Wiederhol frequenzen tatsächlich problematischer als bisher vermutet sind.

5. Literatur

- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019) MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Band 1,1. Auflage. Dortmund. Projektnummer: F 2333.
- Corbiere, N. C.; Zeigler, S. L.; Issen, K. A.; Michalek, A. J. und L. Kuxhaus (2016) Ring apophysis fractures induced by low-load low-angle repetitive flexion in an ex-vivo cervine model. J Biomech.; 49: 1477-1481.

- Gale, N. C.; Zeigler, S. L.; Towler, C.; Mondal, S.; Issen, K. A.; Mesfin, A.; Michalek, A. J.; and L. Kuxhaus (2018) Increased lumbar spinal column laxity due to low-angle, low-load cyclic flexion may predispose to acute injury. *JOR Spine*
- Huber, G.; Paetzold, H.; Püschel, K. und M. M. Morlock (2005) Verhalten von Wirbelsäulensegmenten bei dynamischer Belastung. 1. Auflage. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht, Fb 1062)
- Jäger, M., Luttmann, A., Bolm-Audorff, U., Schäfer, K., Hartung, E., Kuhn, S., Paul, R. und H.-P. Francks, (1999) Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) zur Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule durch Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung bei Verdacht auf Berufskrankheit Nr. 2108. Teil 1: Retrospektive Belastungsermittlung für risikobehaftete Tätigkeitsfelder]. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 34, 101-111.
- Jäger, M. (2018) Extended compilation of autopsy-material measurements on lumbar ultimate compressive strength for deriving reference values in ergonomic work design: The Revised Dortmund Recommendations. *EXCLI Journal* 17:362-385
- Johannessen, W.; Vresilovic, E. J.; Wright, A. C and D. M. Elliott (2004) Intervertebral Disc Mechanics Are Restored following Cyclic Loading and Unloaded Recovery. *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 32, no. 1.
- Liebers, F., Brendler, C. und Latza, U. (2016) Berufsspezifisches Risiko für das Auftreten von Arbeitsunfähigkeit durch Muskel-Skelett-Erkrankungen und Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Thoreson, O.; Ekstrom, L.; Hansson H. A.; Todd, C.; Witwit, W.; Swärd Aminoff, A., Jonasson, P. and A. Baranto: Author information (2017) The effect of repetitive flexion and extension fatigue loading on the young porcine lumbar spine, a feasibility study of MRI and histological analyses. *J Exp Orthop.*

Danksagung: Ein ganz besonderer Dank gilt der deutsch-amerikanischen Fulbright Kommission, die das Forschungssemester in den USA gefördert hat.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.
Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**
Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de