

# Update Muskelphysiologie: Exzentrik

Ein Beitrag von Frank Diemer

Seit den 1990er-Jahren sind exzentrische Trainingsmethoden in der Rehabilitation verschiedener Krankheitsbilder fest verankert. Der große Nutzen des Trainings ist heutzutage unumstritten – das exzentrische Training bietet sogar einige Vorteile gegenüber anderen Methoden. Allerdings sind viele Prozesse während des Kontraktionsvorgangs und der Adaptionen nach wie vor völlig unklar.



## Exzentrisches Training

Haben Sie schon einmal versucht, bei einem Liegestütz nur die nachlassende Phase (Exzentrik) auszuführen? Und haben Sie dabei gespürt, dass es sich anders anfühlt als das Drücken nach oben (Konzentrik)? Erklärt wird dieses Phänomen durch eine geringere Muskelinnervation, einen reduzierten Energieverbrauch und eine divergente neuromuskuläre Anforderung. Dennoch ist der Trainingsreiz im Vergleich zur konzentrischen Phase mindestens gleichwertig und in manchen Parametern sogar überlegen. Das exzentrische Training ist daher bei vielen Indikationen eine gute Wahl.

## Definition

Der Physiologe Archibald Hill und seine Studenten teilten 1922 die Kontraktionsformen in isometrisch (konstante Länge) und isotonisch (konstante Kraft) ein (1). Wenngleich schon früher Anatomen wie Adolf Fick (2) das Phänomen einer größeren

Kraftgeneration unter aktiver Dehnung beschrieben hatten, blieb es Erling Asmussen vorbehalten, 1953 den Begriff „Exzentrik“ einzuführen (3). Heute werden überwiegend die Bezeichnungen Isometrie, Konzentrik und Exzentrik verwendet und gelten als anerkannte Nomenklatur der Muskelkontraktionsformen. Für diesen Beitrag wird die Muskelarbeit unter konstanter Länge als isometrisch, Arbeit unter Verkürzung der Muskellänge als konzentrisch und eine Kontraktion bei gleichzeitiger Verlängerung der Muskel-Sehnen-Einheit als exzentrisch bezeichnet.

## Klassischer Querbrückenzyklus

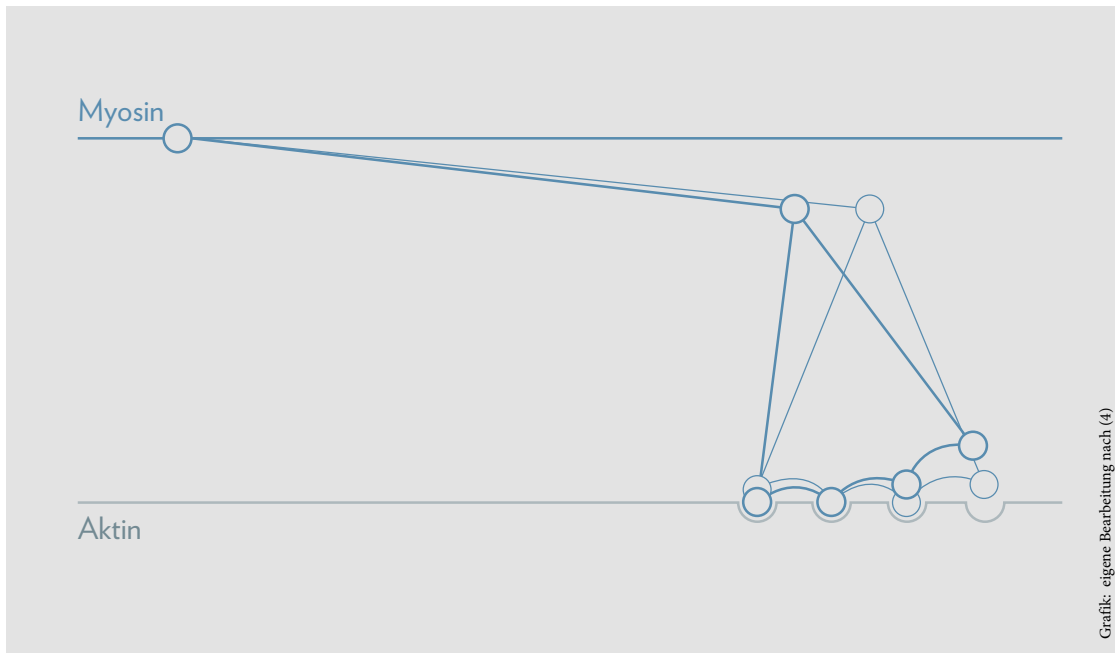
Beim sogenannten Querbrückenzyklus lagert sich der Myosinkopf an das Aktinfilament an, kippt und bewirkt den Kraftschlag. Myosin- und Aktinfilamente schieben sich dabei ineinander und es entsteht die charakteristische Verkürzung des Muskels (Abb. 1) (4).

## Muskelphysiologie bei exzentrischer Arbeit

Die genauen Vorgänge bei einer exzentrischen Kontraktion sind nicht geklärt. In der Literatur gibt es aber eine Reihe von Erklärungsversuchen. Nach Douglas et al. (5) findet bei exzentrischer

### Für Eilige

Exzentrisches Training ist ein Bestandteil der Physiotherapie. Doch wie funktionieren die Kontraktionen unter Verlängerung der Muskel-Sehnen-Einheit? In diesem Beitrag stehen die aktuellen Erkenntnisse zu muskelphysiologischen Prozessen und Adaptionen sowie die Wirkungsnachweise im Mittelpunkt. Denn sie bilden die Grundlage für ein effektives exzentrisches Training in der Rehabilitation.



Grafik: eigene Bearbeitung nach (4)

**Abb. 1** Klassischer Querbrückenzyklus zwischen Aktin und Myosin (4)

Kontraktion kein vollständiger Zyklus statt. Die Querbrücke verbleibt in einem gebundenen Zustand und wird durch das externe Kraftmoment gelöst, um sich dann mit der nächsten Bindungsstelle wieder zu verbinden. Eine andere Möglichkeit stellt der schnelle, kontrollierte Wechsel von Bindung und Lösung einzelner Querbrücken dar. Dieser Vorgang wird von Herzog (4) als stochastisch beschrieben und ermöglicht die Verlängerung einzelner Sarkomere bei gleichzeitiger Verkürzung angrenzender Sarkomere. Zuletzt könnte der sehnige Anteil zur Dehnung beitragen. Selbst bei isometrischen Kontraktionen verkürzen sich die einzelnen Faszikel des Muskels um bis zu 30 Prozent. Die scheinbar fehlende Längenveränderung wird offensichtlich durch eine Elongation der Sehne kompensiert. Die beschriebenen Mechanismen sind bis heute nur eine Annäherung an die exzentrische Kontraktionsform geblieben und werden dementsprechend kritisch diskutiert (4, 6, 7). Unabhängig davon weist die exzentrische Muskelarbeit einzigartige Phänomene auf (8–10):

- höheres Drehmoment
- geringere EMG-Aktivität
- geringerer Energieverbrauch
- geringere hämodynamische Belastung (zum Beispiel Blutdruck)
- frühere und intensivere kortikale Aktivierung
- größere Energieabsorption bei höheren Kontraktionsgeschwindigkeiten
- höhere Stiffness der Muskel-Sehnen-Einheit nach der Kontraktion

Diese Aspekte werden in unterschiedlichen Teilbereichen des sportlichen oder rehabilitativen Trainings diskutiert. Das höhere Drehmoment bei geringerer EMG-Aktivität sowie die größere Steifheit nach einer Kontraktion sind im Leistungssport und in der Rehabilitation von muskuloskelettalen Beschwerden von besonderer Bedeutung (4, 7). Der geringere Energieverbrauch beziehungsweise >>

Exzentrisches Training wird in der Rehabilitation geschätzt.

LIFE IS A RIDE
S Sensospports®  
life is a ride

**INNOVATIVE THERAPIEGERÄTE SEIT 2010**

# SENSOBOARD

Patentiertes System made in Germany.

Das vielseitigste und effektivste Koordinationstrainingsgerät auf dem Markt.

Bekannt aus Leistungssport und ambulanten Rehazentren.

SCHONENDE BEWEGUNGEN OHNE VIBRATION – SCHWIERIGKEITSLABEL EINFACH ZU JUSTIEREN

SENSOSPSPORTS.COM
FOLLOW US ON FACEBOOK / INSTAGRAM

SENSOSPSPORTS GmbH / An der Wann 2 / 63589 Linsengericht / 06051 9773520 / WWW.SENSOSPSPORTS.COM

AUTORENABDRUCK

die geringere EMG-Aktivität wird beim Training mit älteren Menschen geschätzt (11). Zuletzt könnte die moderate hämodynamische Belastung in der Inneren Medizin eine gewichtige Rolle spielen. Mit der Erklärung dieser Phänomene beschäftigen sich diverse Autoren. Nach Hessel et al. (6), Herzog (4), Roberts (12), Nishikawa (14), Lindstedt (10) und Rassier (13) kommen unter anderem folgende Thesen in Betracht:

1. Energiespeicherung im Hals des Myosinmoleküls bei Verlängerung des Sarkomers unter Beibehaltung des Querbrückenzyklus
2. Eine größere Anzahl von Myosinköpfen nimmt Kontakt mit dem Aktinmolekül auf und verstärkt die Bindung durch eine größere Anzahl von gebildeten Querbrücken.
3. Variable Sarkomerlängen: Schon seit geraumer Zeit ist bekannt, dass die in Serie geschalteten Sarkomere nicht die gleiche Länge aufweisen. Diese Tatsache wird auch als „sarcomer non-uniformity“ bezeichnet. Kürzere Sarkomere könnten dadurch auf eine größere Dehnspannung kommen, längere Sarkomere eventuell sogar eine optimalere Überlappung unter größerer Vordehnung erreichen.

Keine dieser Thesen ist in der Lage, alle genannten Phänomene zu erklären. In vielen Arbeiten werden aus diesem Grund passive Elemente des Zytoskeletts in die Erklärung miteinbezogen. Mittlerweile herrscht eine große Akzeptanz in Bezug auf deren Beitrag zur exzentrischen Muskelarbeit.

## Anatomie und Funktion des Zytoskeletts – Titin

Das größte Strukturprotein in unserem Körper ist Titin. Es verbindet die Z-Scheibe des Aktinmoleküls mit dem Myosinmolekül und besteht aus der Ig-Domäne, dem PEVK-Segment und der N2A-Sequenz (Abb. 2) (15–17). Damit verläuft es in gleicher Ebene wie die kontraktile Proteine und wird insbesondere bei einer Verlängerung des Sarkomers beeinflusst. Die Ig-Domäne ist sehr elastisch und besitzt einen geringen Dehnungswiderstand, das PEVK-Segment ist deutlich steifer. Die N2A-Sequenz kann als verbindendes Element der beiden angrenzenden Strukturen gesehen werden. Bei jeder muskulären Arbeit unter Verlängerung der Muskel-Sehnen-Einheit kommt es zu einer Dehnung des Titinmoleküls und es entsteht ein

signifikanter Beitrag zum Querbrückenzyklus (Abb. 3a) (6, 17). Dieser Effekt kann durch weitere Mechanismen zielgerichtet verstärkt werden:

- Bindung des freigesetzten Kalziums entweder an die Ig-Domäne oder an das PEVK-Segment
- Bindung der N2A-Sequenz an das Aktinmolekül
- Verdrehung des Titinmoleküls um das Aktinmolekül

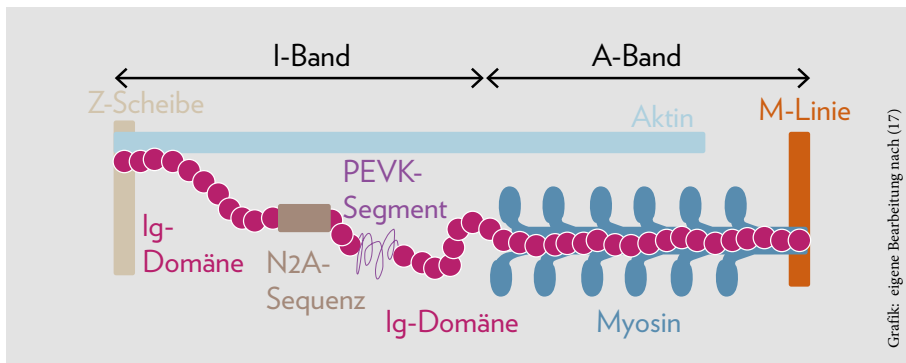
In den ersten beiden Fällen wird der bloßen Dehnung des Titinmoleküls ein größerer Dehnungswiderstand entgegengesetzt, das heißt, die „Feder“ Titin wird durch die Kalziumbindung oder den Kontakt mit dem Aktinmolekül steifer. Potenziert werden könnte dieser Effekt durch eine Verdrehung beider Moleküle: Hierbei verschrauben sich Aktin und Titin fest miteinander. Der zuletzt genannte Vorgang wird in der Literatur unter dem Begriff „winding filament hypothesis“ diskutiert (Abb. 3b) (6, 17). Beeindruckend ist in diesem Zusammenhang, dass die beschriebenen Mechanismen schon vor der eigentlichen Kontraktion anforderungsspezifisch eingestellt werden können und auch der Turnover der zellulären Verbindungen nur wenige Sekunden benötigt. Es kann hier also von einem intelligenten und zielgerichteten System ausgegangen werden, das den Dehnungswiderstand und damit die Rückstellkraft der Sarkomere massiv anpassen kann (6, 14).

Die hier dargestellte Funktion des Titinfilaments erklärt einerseits, auf welchem Wege eine größere Kraftgeneration bei Exzentrik entsteht und selbst eine schlechtere Überlappung von Aktin und Myosin bei extremer Vordehnung kompensiert werden kann. Sie verdeutlicht andererseits, warum trotz reduzierter EMG-Aktivität und einem geringeren Energieverbrauch das produzierte Drehmoment höher sein kann. Eine reduzierte aktive Spannung wird durch einen größeren Beitrag „passiver“ Proteine in der Muskelzelle kompensiert. Neben diesem eher muskulären Modell für exzentrische Arbeit gibt es weitere interessante Eigenheiten. Normalerweise werden Muskelfasern nach dem sogenannten Größenordnungsprinzip aktiviert (Tab. 1). Typ-1-Fasern (Slow Twitch) besitzen demnach eine geringe Reizschwelle und werden schon bei niederintensiven Anforderungen und langsamen Geschwindigkeiten aktiviert. >>

Tab. 1 Merkmale unterschiedlicher Muskelfasertypen

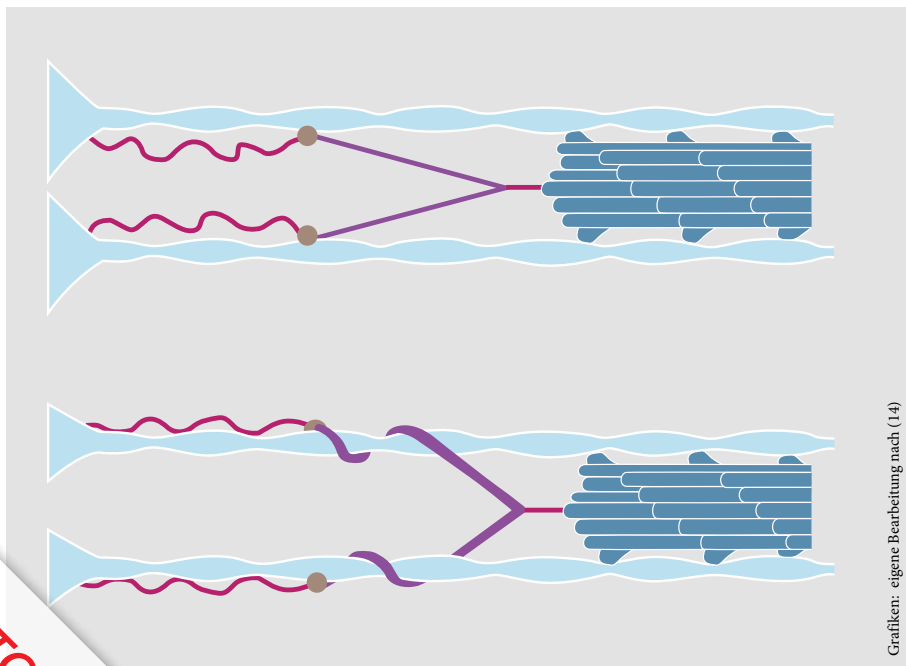
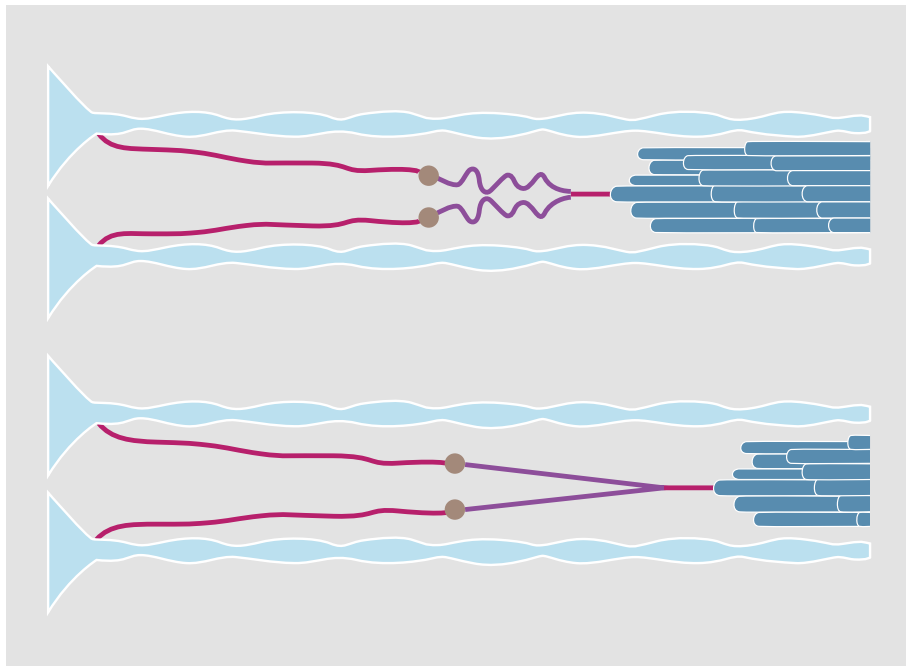
Merkmale / Fasertypus	Typ-1-Fasern – Slow Twitch	Typ-2a-Fasern – Fast Twitch	Typ-2b-Fasern – Fast Twitch
Kontraktionsgeschwindigkeit	langsam	schnell	schnell
Kontraktionskraft	gering	hoch	hoch
Energiebereitstellung	aerob	aerob / anaerob	anaerob

Titin erklärt die große Kraftgeneration der Exzentrik.



Grafik: eigene Bearbeitung nach (17)

Abb. 2 Anatomie des Titinfilaments (16)



Grafiken: eigene Bearbeitung nach (14)

**Aktive Funktion des Titinmoleküls – Dehnung und aktive Kontraktion:** (a) Eine Verlängerung des Sarkomers verursacht eine Dehnung des Titinmoleküls; (b) „Winding filament hypothesis“: Die Verbindung der N2A-Sequenz führt zu einer stabilen Bindung von Titin mit dem Aktinmolekül und verstärkt die Rückstellkraft (Beziehungen wie in Abb. 2).

**AUTORENABDRUCK**



Markenprodukte direkt vom Hersteller und führendem Fachhandel.



**PRAXIS- UND THERAPIEBEDARF**  
Von A-Z | Aus einer Hand!

-  THERAPIELIEGEN & ZUBEHÖR
-  PRAXISZUBEHÖR – HYGIENE – LEHRMITTEL
-  WÄRME- UND KÄLTETHERAPIE
-  GYMNASTIK – BALANCE – ERGO
-  MEDIZINISCHE TRAININGSTHERAPIE
-  SCHLINGENTHERAPIE
-  ELEKTROTHERAPIE HYDROTHERAPIE
-  BERATUNG, PLANUNG, MONTAGE & LEASING

Hier geht's direkt zum Online-Shop  
[www.villinger.de](http://www.villinger.de)



Viele attraktive Angebote unter der Rubrik „Aktuelle Empfehlungen“!

-  +49 (0) 7663 99082
-  [info@villinger.de](mailto:info@villinger.de)
-  [www.villinger.de](http://www.villinger.de)
-  [www.facebook.com/villinger.de](https://www.facebook.com/villinger.de)



Fasern vom Typ 2a / b (Fast Twitch) haben einen höheren Schwellenwert und werden daher eher bei intensiveren Reizen aktiviert. Nach Duchateau et al. (18, 19) wird dieses Prinzip bei exzentrischen Kontraktionen außer Kraft gesetzt und es kommt schon bei geringerer Anforderung zu einer Aktivierung schneller Muskelfasern. Offensichtlich bestehen grundsätzlich divergente kortikale Strategien für exzentrische Muskelarbeit. Dies würde auch erklären, warum die Rekrutierungsfähigkeit beim gleichen Individuum große Unterschiede bei den verschiedenen Kontraktionsformen aufweist:

## 63

## Literatur

- Hill AV. 1922. The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed. *J. Physiol.* 56:19–41
- Fick A. 1882. *Mechanische Arbeit und Wärmeentwicklung bei der Muskelstätigkeit.* Leipzig: Brockhaus
- Asmussen E. 1953. Positive and negative muscular work. *Acta Physiol. Scand.* 28:364–82
- Herzog W. 2017. Skeletal muscle mechanics: questions, problems and possible solutions. *J. Neuroeng. Rehabil.* 15:98
- Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. 2017. Eccentric exercise: physiological characteristics and acute responses. *Sports Med.* 47:663–75
- Hessel AL, Lindstedt SL, Nishikawa KC. 2017. Physiological mechanisms of eccentric contraction and its applications: a role for the giant titin protein. *Front. Physiol.* 8:70
- Lieber RL, Roberts TJ, Blemker SS, Lee SSM, Herzog W. 2017. Skeletal muscle mechanics, energetics and plasticity. *J. Neuroeng. Rehabil.* 14:108
- LaStayo P, Marcus R, Dibble L, Frajacomo F, Lindstedt S. 2014. Eccentric exercise in rehabilitation: safety, feasibility, and application. *J. Appl. Physiol.* 116:1426–34
- Hoppeler H. 2016. Moderate load eccentric exercise: a distinct novel training modality. *Front. Physiol.* 7:483
- Lindstedt SL. 2016. Skeletal muscle tissue in movement and health: positives and negatives. *J. Exp. Biol.* 219:183–8
- LaStayo P, Marcus R, Dibble L, Wong B, Pepper G. 2017. *BMC Geriatr.* 17:149
- Roberts TJ. 2016. Contribution of elastic tissues to the mechanics and energetic of muscle function during movement. *J. Exp. Biol.* 219:266–75
- Rassier DE. 2012. The mechanisms of the residual force enhancement after stretch of skeletal muscle: non-uniformity in half-sarcomeres and stiffness of titin. *Proc. Biol. Sci.* 279, 1739:2705–13
- Nishikawa K. 2016. Eccentric contraction: unraveling mechanisms of force enhancement and energy conservation. *J. Exp. Biol.* 219:189–96
- Gautel M, Djinovic-Carugo K. 2016. The sarcomeric cytoskeleton: from molecules to motion. *J. Exp. Biol.* 219:135–45
- Krüger M, Kötter S. 2016. Titin, a central mediator for hypertrophic signaling, exercise-induced mechanosignaling and skeletal muscle remodeling. *Front. Physiol.* 7:76
- Colombini B, Nocella M, Bagni MA. 2016. Non-crossbridge stiffness in active muscle fibres. *J. Exp. Biol.* 219:153–60
- Duchateau J, Baudry S. 2014. Insights into the neural control of eccentric contractions. *J. Appl. Physiol.* 116:1418–25
- Duchateau J, Enoka R. 2016. Neural control of lengthening contractions. *J. Exp. Biol.* 219:197–204

So kann bei isometrischem Kontraktionsmodus häufig eine höhere Rekrutierung ermittelt werden als bei exzentrischer Muskelarbeit (19). ●

## i

## Es folgt in der nächsten Ausgabe ...

**Dohm-Acker M. 2018. Exzentrisches Training in der Rehabilitation. Postoperativer Kraftaufbau nach VKB-Plastik. Z. f. Physiotherapeuten 70, 11**



## Frank Diemer

Physiotherapeut, Sport- und Gymnastiklehrer; 2011 M. Sc. *Muskuloskelettale Physiotherapie; Weiterbildungen in Manueller Therapie (IAOM, DGMM, McKenzie, Mulligan), Osteopathischer Medizin (DFO), Sportphysiotherapie (IAS); seit 15 Jahren eigene Praxis; betreibt mit Kollegen die Weiterbildungsakademie FOMT; als Dozent und Honorarlehrkraft im In- und Ausland tätig; zahlreiche Publikationen. Kontakt: frank\_diemer@web.de*



# DIE TOPTHEMEN IM NOVEMBER

## Supinationstrauma effektiv therapieren Kriterienbasierte Rehabilitation im Basketball

Ein Beitrag von Lukas Lai

## Durchblick im App-Dschungel

Im Gespräch mit Veronika Strotbaum

## Update Ultraschall

Anwendung in der evidenzbasierten  
Physiotherapie

Ein Beitrag von Michael Seubert

Erscheint am  
**7.11.2018**

LEVEL FÜR  
LEVEL: WIEDER  
AUF DEM  
SPRUNG



Foto: Maximilian Laschon / Shutterstock.com

## Impressum

www.physiotherapeuten.de  
ISSN 1614-0397

**Verlag**  
Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG  
Postanschrift: Postfach 190737, 80607 München  
Paketanschrift: Lazarettstraße 4, 80636 München

**Komplementär**  
PFB Verwaltungs-GmbH

**Kommanditistin**  
Edith Laubner, Verlegerin

**Geschäftsführerinnen**  
Agnes Hey, Edith Laubner

**Chefredakteurin (V.i.S.d.P.)**  
Dr. Tanja Boßmann  
tanja.boßmann@pflaum.de

**Redaktion**  
Sabrina Harper, Doreen Richter, Jörg Stanko  
Daniela Horas, Anna Palisi  
pt.redaktion@pflaum.de



**Mediavertrieb pt**  
Karla Köhler  
karla.koehler@pflaum.de

**Kundenerlebnis**  
kundenservice@pflaum.de  
T +49 89 126 07 - 0

**Druck**  
pva, Druck und Medien Dienstleistungen GmbH  
Industriestraße 15  
76829 Landau in der Pfalz

**Titelfoto:** MANTHANA PHOTO / shutterstock.com

Die Rubrik „Marktplatz“ enthält Beiträge, die auf Unternehmensinformationen basieren.

## Bezugspreise 2018

Einzelheft Inland 11,10 €, Ausland 12,10 €  
Profisabo Inland 121,20 €, Ausland 133,20 €

Versand jeweils inklusive  
12 Ausgaben pro Jahr

Weitere Publikationen des Pflaum Verlags

