



Ewald Hennig. Foto: Max Greve

*Dieser Beitrag zeigt an Hand eigener Erfahrungen und Arbeiten in den Sport- und Bewegungswissenschaften auf, welche Anwendungsmöglichkeiten sich aus biomechanischer Forschung ergeben können. Oft gehen sie weit über den Sportbereich hinaus.*

# Angewandte Biomechanik für den Sport und die Industrie

Universitäre Forschung zur Produktoptimierung

Von Ewald Hennig

## Biomechanik: Definition und Anwendungsgebiete

Vom griechischen Wortursprung her ist die Biomechanik eine Disziplin, die sich mit der Mechanik des Lebens beschäftigt. Mechanische Phänomene beziehen sich auf die gesamte Natur – von der Bewegung des einfachen Grashalms im Wind über die Tierwelt bis zu komplexen menschlichen Bewegungen. Die Eigenschaften blutführender Gefäße, Elastizitätseigenschaften von Knochen, Bändern und Sehnen sowie die Kräfte, die innerhalb und außerhalb des Körpers auftreten, gehören zum breiten Spektrum der Biomechanik. Bei höheren Lebewesen sind es Muskeln, die die Kräfte erzeugen, um Bewegungen zu ermöglichen. Als Quelle der Bewegung sind Muskeln und ihre Funktionsweise wichtiger Bestandteil im Verständnis von Bewegungen und für das Muskeltraining. Beschränkt man sich auf den Menschen, so finden biomechanische Prinzipien und Erkenntnisse Anwendung in der

Orthopädie, im Rehabilitationsbereich, bei den Arbeitswissenschaften und im Sport. Während vor 40 Jahren eine eher anatomisch-physikalische Betrachtungsweise der Biomechanik vorherrschte, so sind heute physiologische und neurophysiologische Erkenntnisse integrale und unverzichtbare Bestandteile dieser Wissenschaftsdisziplin. Ich möchte in diesem Beitrag an Hand eigener Erfahrungen und Arbeiten in den Sport- und Bewegungswissenschaften aufzeigen, welche Anwendungsmöglichkeiten sich aus biomechanischer Forschung ergeben können. Oft gehen sie weit über den Sportbereich hinaus.

## Messverfahren für Kräfte und Druckverteilungen

Im Vorfeld zur Olympiade von 1972 in München wurde im Sportinstitut der Universität Frankfurt eine biomechanische Abteilung eröffnet, die neben der akademischen Ausbildung eine Unterstützung des Spitzensports bieten sollte. Über die

Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten sollten die individuellen Leistungen von Athleten durch Bewegungsanalysen und daraus resultierenden Trainingsanweisungen optimiert werden. Für eine neu gegründete Elektronik-Abteilung des Biomechaniklabors wurden studentische Hilfskräfte gesucht. Ich war zu dieser Zeit Student der Physik in Frankfurt. Aufgrund elektronischer Bastelerfahrungen und meinem Interesse am Sport war dies eine gute Gelegenheit, Geld für das Studium zu verdienen. Im Rahmen meiner studentischen Hilfskrafttätigkeit eröffnete mir mein damaliger Betreuer, Dr. Klaus Nicol in Absprache mit der physikalischen Fakultät die Möglichkeit, meine Diplomarbeit im Bereich der Sportbiomechanik zu schreiben. Zu diesem Zeitpunkt gab es am Sportinstitut Interesse, einen großflächigen Kraftaufnehmer zu bauen, der über eine Distanz von 20 Metern den Bodenkontakt von Sprintern erfassen sollte. Auf der Suche nach geeigneten kostengünstigen Sensoren kamen wir auf die

Idee, über Metallfolien und Gummimaterialien einen überdimensionalen elektrischen Kondensator zu bauen, der beim Bodenkontakt der Sprinter seine Kapazität veränderte. Der großflächige Sensor war eine einfache Sandwichkonstruktion mit leitenden Folien, zwischen die eine Schaumgummimatte als Dielektrikum platziert wurde. Beim weiteren Experimentieren mit kapazitiven Sensoren auf der Basis von Gummimaterialien als Dielektrikum wuchs die Erkenntnis, dass bei geeigneter Wahl des Materials durchaus zufriedenstellende Messgenauigkeiten für Kräfte erzielt werden können. Darüber hinaus hatten diese Sensoren eine wichtige Eigenschaft, die technische Kraftaufnehmer nicht aufweisen. Über geeignete und mechanisch flexible elektrisch leitende Folien (z.B. Kupfergaze) und das Gummimaterial konnten Sensoren hergestellt werden, die sich Körperkonturen anpassen. Ein weiterer Vorteil dieser kapazitiven Sensoren waren die verschwindend geringen Materialkosten. Auch der elektronische Aufwand zum Bau eines Kapazitäts-Spannungswandlers war im Vergleich zu Verstärkern für piezoelektrische Sensoren oder Dehnungsmessstreifen eher gering. Da sich diese Sensortechnik als sehr kostengünstig erwies, hatten wir die Idee zum Bau von Druckverteilungsmessaufnehmern, die mehrere hundert bis mehrere tausend Einzelsensoren beinhalten. Die kapazitive Messtechnik für flexible Kraftaufnehmer und die Anwendung dieser Sensoren für Druckverteilungsmessverfahren wurde zum Thema meiner Physik-Diplomarbeit<sup>1</sup>. In einem Prototyp wurden 16 leitende Metallstreifen parallel unter das Gummiträgermaterial aufgeklebt. Mit 16 vertikal dazu angeordneten Metallstreifen auf der oberen Seite des Gummi-Dielektrikums entstehen 256 kapazitive Sensoren (Patent DE3025362)<sup>2</sup>. Je nach Breite und Anzahl der Metallstreifen wurden von uns in der Folge Druckmessmatten mit unterschiedlicher örtlicher Auflösung und mit

bis zu 4096 Einzelsensoren gebaut<sup>3,4</sup> (Abb. 1). Über ein Kreuzschienenverfahren und Multiplextechnik wird die Vielzahl der Kraftsensoren in einer Matrixanordnung zeitsequentiell abgefragt (Patent DE25294745)<sup>5</sup>. Als Folge erster Veröffentlichungen unseres Druckverteilungsmessverfahrens erhielten wir zahlreiche Anfragen aus Universitäten und Firmen. Dabei waren es primär technische und außerhalb des Sports liegende Anwendungsfelder, in denen



(1) Kapazitive Druckverteilungsmessmatte mit 2048 Sensoren.  
Quelle: eigenes Foto

man diese Technologie einsetzen wollte. Erst langsam wuchs bei uns die Erkenntnis, dass bisher weder für starre noch für flexible Untergründe technische Druckverteilungsmessverfahren existierten. Zahlreiche technische Anwendungen wurden entwickelt und werden bis heute mit dem damals entwickelten kapazitiven Druckverteilungsmessverfahren durchgeführt.

### Erste Erfahrungen mit Patenten und unternehmerische Tätigkeit

Basierend auf dem regen Interesse der Industrie wurden die Möglichkeiten von Patentanmeldungen unseres Messverfahrens überprüft. Nach eigenen Recherchen in der Patentamtsfiliale Darmstadt wurde ein Patentanwalt hinzugezogen, der im Jahr 1975 zwei Patente anmeldete, die in den Jahren 1977 (DE 25294745) und 1982 (DE 3025362) erteilt wurden. Eine weitere Patentanmeldung betraf die zeitabhängige

Erfassung des Blutstromvolumens im Halsbereich durch einen kapazitiven Sensor. Dieses Patent wurde im Jahr 1980 erteilt (DE 2829269)<sup>6</sup>. Alle obigen Patente wurden ebenfalls in den USA angemeldet und dort auch erteilt. Die Anmeldung der Patente und die damit im Zusammenhang stehenden Verwaltungsaktivitäten mussten eigenständig unternommen werden, da es zu diesem Zeitpunkt in Deutschland noch keine Hilfestellung durch die Universitäten gab.

Die finanzielle Belastung für die Patentanmeldungen waren für mich als studentische Hilfskraft erheblich und konnten lediglich durch familiäre Unterstützung bewältigt werden. Nach meinem Diplomabschluss im Jahr 1975 und ersten internationalen Veröffentlichungen, in denen das neue Messverfahren im Rahmen biomechanischer Projekte vorgestellt wurde, entwickelte sich ein reges Interesse am Thema „Druckverteilungsanalysen“. Universitäre wie auch industrielle Institutionen meldeten sich, um unterschiedliche Druckverteilungsprojekte zu verwirklichen. Da eine kommerzielle Fertigung von Druckmesssystemen innerhalb der Universität nicht möglich war, gründete ich 1976 eine Firma. Aus den Erträgen dieser Firma erfolgte die Weiterentwicklung der Messverfahren und eine Anstellung studentischer Mitarbeiter. Der Prozess des Transfers einer Idee aus dem akademischen Bereich bis zur eige-

nen Anfertigung von industriellen Produkten war prägend für meinen späteren akademischen Werdegang. Im Jahr 1981 wurde ein Lizenzvertrag mit der Firma Novel (München), in dem die Rechte zur Verwendung der kapazitiven Druckverteilungstechnologie übertragen wurden, abgeschlossen. Die Firma Novel ist nun seit über 30 Jahren Marktführer für die Produktion und den Einsatz von Druckverteilungsmessaufnehmern für orthopädische, ergonomische und industrielle Anwendungsgebiete.

### **Aufenthalt in den USA und ein neues Druckverteilungsmessverfahren**

Die Veröffentlichungen zum Einsatz von Druckverteilungsmessverfahren führten im Jahr 1979 dazu, dass Professor Peter R. Cavanagh an der Pennsylvania State University eine kapazitive Druckmessplattform bestellte. Bei der Auslieferung des Messsystems in die USA wurde ich von ihm eingeladen, an seinem Institut eine neue Messtechnologie zu entwickeln. Im Rahmen von Studien im Sportschuhbereich und für Laufschuhtests im Auftrag der Zeitschrift „Runners World“ wollte er einen Messaufnehmer konzipieren, der als Einlegesohle Druckverteilungen im Schuh messen kann. Prof. Cavanaghs Ziel war ein „piezoelectric sock“, mit dem die Eigenschaften von Schuhen überprüft werden sollten. So kam ich als „Visiting Scientist“ im Jahr 1980 an die Pennsylvania State University und führte Untersuchungen zur Verwendung piezoelektrischer Sensoren für die Verwendung als flexible Druckverteilungsaufnehmer in Schuhen durch. In Zusammenarbeit mit dem „Material Research Laboratory“ der Pennsylvania State University wurden verschiedene piezoelektrische Materialien in Form von Folien, Gummi- und Keramikmaterialien gefertigt und auf ihre Eigenschaften überprüft.

Da die Folien- und Gummimaterialien ihre Messeigenschaften bei Dehnung veränderten und erhebliche

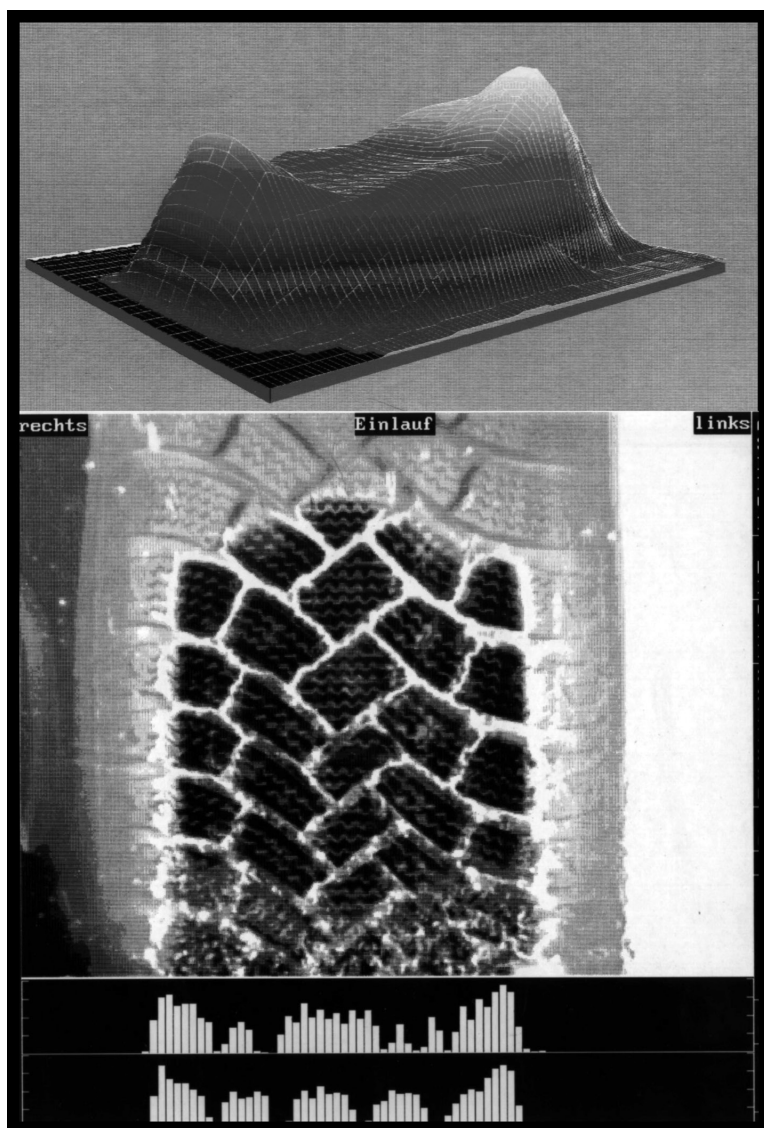
Hysteresen aufwiesen, entschieden wir uns für piezokeramische Sensoren, die in Silikongummi eingelassen wurden. Im Vergleich zu piezoelektrischen Quarzaufnehmern werden an den Oberflächen piezokeramischer Materialien bei gleicher Kraftereinwirkung sehr viel höhere Ladungen erzeugt. Dies ermöglichte eine kostengünstige Konstruktion von Ladungsverstärkern, die für die elektronische Weiterverarbeitung der Sensorsignale notwendig ist. Unser erster Druckverteilungsaufnehmer mit piezokeramischen Messelementen war eine Einlegesohle aus Silikongummi, in die 499 Einzelsensoren der Abmessungen 2,2 mal 2,2 Millimeter eingegossen waren. In einer Veröffentlichung von 1982 wurden die Sensoren und deren elektronische Weiterverarbeitung beschrieben<sup>7</sup>.

### **Studium und Unternehmertätigkeit in den USA**

Während meiner Tätigkeit als „Visiting Scientist“ bot mir Prof. Cavanagh an, ein Promotionsstudium an seinem Institut zu absolvieren. Im Gegensatz zu deutschen Universitäten war die Fächervielfalt an amerikanischen Universitäten in den 1980er Jahren erheblich größer. In Deutschland war es nicht möglich, im Fach „Biomechanik“ zu promovieren, da keine Studiengänge für diesen Bereich existierten. Die Möglichkeit, in den USA ein Studium in einem Gebiet zu absolvieren, das mir sehr am Herzen lag, die MitarbeiterInnen, das Forschungsumfeld und die aufgeschlossene Atmosphäre einer amerikanischen Universität waren der Grund, das Angebot von Prof. Cavanagh anzunehmen. So begann ich im Herbst 1981 ein Promotionsstudium an der Pennsylvania State University, das ich im Sommer 1984 abschließen konnte. Neu war für mich, dass in den USA für jeden Doktoranden ein individuelles Studienprogramm erstellt wird. Da ich bereits ein Physikstudium in Deutschland absolviert hatte, sollte ich Kurse in Anatomie,

Physiologie und Statistik belegen, um weitere Voraussetzungen für den interdisziplinären Wissenschaftsbereich der Biomechanik zu erhalten. Meine Aufgaben im Labor war die Teilnahme an Forschungsprojekten und die Weiterentwicklung der piezoelektrischen Druckverteilungsmesstechnologie.

Ähnlich wie bereits in Deutschland kam es nach ersten Veröffentlichungen zu einem regen industriellen Interesse, unser neues Messverfahren zu nutzen. Zum Vertrieb und zur Vermarktung von Druckverteilungseinheiten gründeten Prof. Cavanagh und ich die Firma „Piezopress Incorporation“, durch die ich mein Studium in den USA zusätzlich finanzieren konnte. Die Reifenfirmen „General Tire“ und „Goodyear“ wurden unsere Kunden. Ihr Interesse war, die Druckverteilung unter Reifen auf geraden und gekrümmten Strecken in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit zu erfassen. Je nach Konstruktionsart und Gummimischung wollte man über die Kenntnis der dynamischen Druckverteilung die Traktionseigenschaften von Reifen auf trockenen und nassen Straßen optimieren. In der Folge wurde dieses Projekt auch von der deutschen Reifenfirma „Continental“ aufgegriffen. Unter Lizenz (Know-how Vertrag mit Piezopress Inc.) fertigte die Firma „Halm GmbH“ (Frankfurt) für „Continental“ eine Testanlage, mit der Druckverteilungsmessungen bei gleichzeitigem Einsatz von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Auflagefläche des Reifens verwirklicht wurden. Ein unterirdischer Testraum mit Glasdecke wurde in die Fahrbahn des „Contidroms“ (Wietze-Jeverson) eingebracht. Damit war eine Simultanerfassung der Druckverteilung unter dem Reifen mit einer Abbildung der Auflagefläche des Reifens möglich (Abb. 2). Hier schließt sich der Kreis, da die Geschäftsleitung der Firma Halm in der Hand von zwei ehemaligen Mitarbeitern des Frankfurter Sportinstituts, die damals über meine Firma angestellt waren, lag.



(2) Druckverteilung unter dem Reifen mit Darstellung der Auflagefläche.  
Quelle: Fa. Halm GmbH, Frankfurt

### Erste Laufschuhtests und Kontakte mit der Sportschuh-industrie

Das Labor an der Pennsylvania State University hatte sich zu Beginn meines Promotionsstudiums (1981) auf die Biomechanik des Laufens und den Einfluss von Sportschuhen auf die Beanspruchung des Bewegungsapparates spezialisiert. Dieser Forschungsschwerpunkt war Folge des „Running Booms“ der 1970er Jahre in den USA. Viele Amerikaner begannen, regelmäßig mittlere bis größere Distanzen zu laufen. Dieser „Running Boom“ führte zu einem deutlichen Anstieg von Überlastungsverletzungen

im Knie- und Fußbereich. Zu den häufigsten Beschwerden zählten im Kniebereich das „Runners Knee“ und beim Unterschenkel die „Shin Splints“. Im Fußbereich häuften sich mehrere Überlastungsbeschwerden (Achillodynie, Plantarfasziitis, Metatarsalfrakturen). Damit kam der Sportschuh als wichtigstes Sportgerät für den Läufer auf den Prüfstand. Biomechaniker und Sportmediziner waren sich einig, dass Sportschuhe einen Einfluss auf die Entstehung von Verletzungen haben können. In den Jahren zwischen 1970 und 1990 wurden über intensive Forschung und zahlreiche Publikationen die Grundlagen für Konstruktionsmerkmale von biomechanisch kon-

zipierten Laufschuhen geschaffen, die Überlastungsbeschwerden von Läufern vorbeugen. Die Forschungsergebnisse belegen, dass beim Bodenkontakt ein übermäßiges Kippen des Fersenbeins nach außen (Überpronation) die häufigste Ursache von Läuferbeschwerden ist. Die Kippbewegung des Fersenbeins verursacht eine asymmetrische Belastung der Achillessehne und führt zu einer Innenrotation des Unterschenkels, die wiederum erhöhte Torsionsbeanspruchungen von Kniegelenkstrukturen verursacht. Das Vermeiden einer Überpronation gilt als wichtigste schuhtechnische Maßnahme zur Vermeidung von Läuferbeschwerden. Das Anbringen von Stützelementen auf der Schuhinnenseite zwischen Ferse und Mittelfuß ist eine der technischen Möglichkeiten zur Stabilisierung des Fußes. Diese Maßnahme wird von allen Laufschuhherstellern verwendet, um den Fuß vor einer Überpronation zu bewahren. Eine gute Dämpfung durch den Schuh schützt Gelenke vor hohen Stoßbelastungen, die für das Entstehen von Arthrosen verantwortlich gemacht werden. Vermeidung einer Überpronation des Fußes beim Aufkommen und eine gute Stoßdämpfung sind deshalb bis heute Garantien für Laufschuhe zur Vermeidung von Überlastungsbeschwerden. Auch wenn Trends, wie das in den letzten Jahren propagierte „Natural Running“ und/oder „Barefoot Running“, der Industrie helfen, neue Produkte zu vermarkten, so zeigt der in dieser Zeit beobachtete Anstieg an Läuferverletzungen durch den Gebrauch von „Minimalschuhen“, dass man sich besser wieder auf die bewährten Grundsätze von Dämpfung und Stützen des Fußes besinnen sollte. In der Schuhindustrie geht der Trend zu Minimalschuhen dem Ende zu, und es gibt Anzeichen für eine gegenläufige Entwicklung mit sehr stark dämpfenden Schuhen durch besonders dicke Sohlen im Fersenbereich.

Das Biomechanik-Labor der Pennsylvania State University führte

in den 1970er bis Anfang der 1980er Jahre Laufschuhtests für die größte amerikanische Läuferzeitschrift „Runners World“ durch. Durch diese Tätigkeit wurden Sportschuhfirmen auf das Labor aufmerksam. Sie kontaktierten die Universität mit dem Wunsch, ihre Produkte nach biomechanischen Kriterien gestalten und überprüfen zu lassen. Die Firma Puma unterschrieb einen mehrjährigen Vertrag zur Entwicklung von Laufschuhen und sicherte dem Labor damit die Finanzen für zwei Doktorandenstellen. Weitere Entwicklungen des Biomechanik-Labors betrafen den Bau von Golfschuhen mit besonders guten Traktionseigenschaften für einen stabilen Stand beim Abschlag sowie das Design von Fahrradschuhen zur effektiveren Übertragung von Kräften auf das Pedal.

### **Forschung für die Industrie in den USA und in Deutschland**

Die Zusammenarbeit mit Universitäten inklusive der Nutzung von Forschungsergebnissen durch die Industrie war in den USA während meiner Promotionszeit in den 1980er Jahren selbstverständlich und erwünscht. Die Einwerbung außeruniversitärer Finanzmittel gehörte neben dem Nachweis anerkannter Veröffentlichungen zum wichtigsten Evaluationskriterium der Tätigkeit von Professoren, nach denen sie von einer befristeten Stelle (assistant professorship) auf eine Dauerstelle (associate oder full professorship) befördert wurden. Dabei war es unwichtig, ob die Gelder auf Grund von Forschungsanträgen bei Förderinstitutionen oder aus industriellen Quellen stammten. Für die akademische Reputation war allein die Güte der Veröffentlichungen (peer review, impact factor) und nicht die Herkunft der Forschungsmittel wichtig. In der deutschen Universitätslandschaft wurde zu diesem Zeitpunkt eine praxisnahe Forschung mit der Industrie eher argwöhnisch betrachtet und häufig als Forschung zweiter Klasse angesehen. In den letzten Jahren hat

jedoch ein Umdenken stattgefunden, sodass es zu einer engeren Verflechtung universitärer Forschung mit der Herstellung und Überprüfung industrieller Produkte kommt. Aufgrund knapper staatlicher Ressourcen ist das Überleben vieler universitärer Arbeitsgruppen und die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf solche Drittmittel angewiesen.

### **Rückkehr nach Deutschland – Tätigkeit für die Stiftung Warentest**

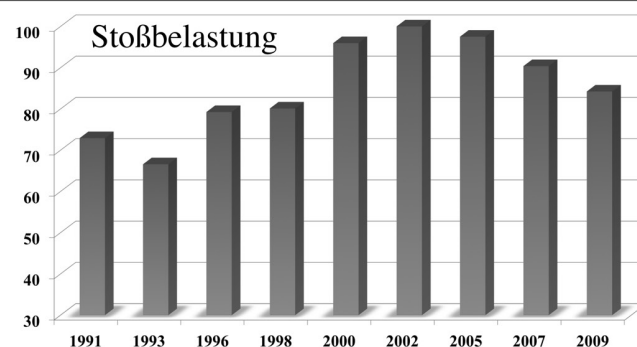
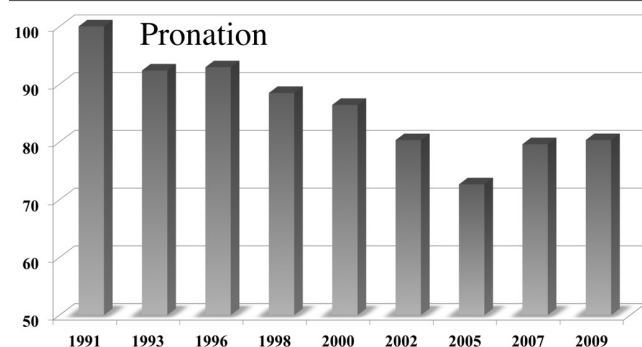
Im Jahr 1984 bewarb ich mich noch während meines Promotionsstudiums in den USA auf eine akademische Ratsstelle an der Universität Konstanz, die ich von Herbst 1984 bis zum Frühjahr 1987 wahrnahm. In diesem Zeitraum ergaben sich erste Kontakte mit europäischen Firmen, die Interesse an einer biomechanischen Untersuchung ihrer Produkte hatten. So wurde für die im benachbarten Kreuzlingen (Schweiz) angesiedelte Firma „Raichle“ eine Druckverteilungsuntersuchung bei Skischuhen zur Verbesserung des Tragekomforts durchgeführt. Weitere Studien betrafen Traktionsmessungen der Sohlen von Wander- und Kletterschuhen auf unterschiedlichen Boden- und Gesteinsarten. Im Jahr 1987 erhielt ich den Ruf auf eine Professur für Biomechanik und Bewegungslehre an die damalige Universität-GH Essen. Dort entstand ein erster Kontakt mit der Stiftung Warentest in Berlin. Die Stiftung Warentest hatte in der Vergangenheit Laufschuhtests durchgeführt, die sich an einem Praxistest und technischen Tests zum Alterungsverhalten der Schuhe orientierten. Damit konnten jedoch keine Aussagen über die gesundheitlichen Auswirkungen im Sinne verletzungsprophylaktischer Eigenschaften der Laufschuhe gemacht werden. Im Rahmen einer gerichtlichen Auseinandersetzung im Anschluss an die Veröffentlichung eines Tests wiesen die Richter darauf hin, dass die Prüfverfahren der Stiftung Warentest nicht mehr dem

internationalen Standard entsprechen. Sie empfahlen die Hinzunahme biomechanischer Messungen zur quantitativen Erfassung der Körperbeanspruchung. Meine Erfahrungen mit Laufschuhuntersuchungen aus den USA führten dazu, dass mich die Stiftung Warentest im Jahr 1990 beauftragte, ihr bisheriges Prüfverfahren durch biomechanische Tests zu ergänzen. Das von uns vorgeschlagene Konzept wurde erstmals in einem Laufschuhtest (1991) verwendet und wird bis heute von der Stiftung Warentest beibehalten. Das Testdesign beinhaltet einen Praxistest, in dem 20 bis 30 Läufer in allen Testschuhen eine vorgegebene Laufstrecke von 10 km absolvieren und sie dann im Anschluss auf einem Fragebogen beurteilen. In den 15 bis 20 unterschiedlichen Schuhmodellen läuft jeder Sportler 150 bis 200 Kilometer in einem vorgegebenen Zeitraum von vier bis sechs Wochen. Danach werden die Schuhe im Labor mit Hilfe von Sensoren am Körper und einer im Boden eingelassenen Kraftmessplattform biomechanisch untersucht. Es werden unter anderem die Stoßdämpfung, die Pronationskontrolle (Stabilität) und die Druckverteilung bei einer vorgegebenen Laufgeschwindigkeit ermittelt. Zusätzlich wird ein technischer „Impacter Test“ durchgeführt, der die neuen und gebrauchten Schuhe auf ihre Materialdämpfungseigenschaften untersucht. Damit sind Rückschlüsse auf die Alterungseigenschaften des Sohlenmaterials durch Gebrauch möglich. Insgesamt wurden in neun Laufschuhtests über einen Zeitraum von 20 Jahren 156 Laufschuhmodelle mit der gleichen Untersuchungsmethodik getestet. Durch das gleichbleibende Untersuchungsdesign konnten Trends im Schuhbau der Industrie über die Jahre nachvollzogen werden. Abbildung (3) zeigt die Mittelwerte des Pronations- und Stoßdämpfungsverhaltens der jeweiligen Schuhmodelle aus neun Laufschuhtests von 1991 bis 2009. Die Prozentdarstellungen sind bezüglich der Maximalwerte über die neun Tests normiert.

Es ist klar zu erkennen, dass die Stützfunktion der Schuhe von 1991 bis 2002 kontinuierlich verbessert wurde. Ab 2002 bleibt das Stützverhalten der Schuhe zum Schutz vor Überpronation etwa konstant. Der Laufschuhtest von 2005 enthielt einen überproportionalen Anteil an Stabilitätsschuhen, weshalb die Stützfunktion der Schuhe in diesem Test besonders gut ausfällt. Die Stoßbe-

besser gedämpfte Schuhe bevorzugen und der Wunsch der Konsumenten dadurch den Trend zu härteren Schuhen umkehrte. Für eine schwedische Warentestorganisation (Testakta) wurden in unserem Institut nach Vorbild des Untersuchungsdesigns für die Stiftung Warentest ebenfalls fünf Laufschuhtests im Zeitraum von 2004 bis 2012 durchgeführt. Weitere Projekte für die Stiftung Warentest

untersucht. Für den Laufschuhbereich sind dies Schuhe der Firmen Adidas, Asics und Nike. Alle Schuhmodelle werden dann über Praxistests und biomechanische Messverfahren untersucht. Ausgehend von den Ergebnissen und im Vergleich zum Abschneiden der Schuhe der Marktführer schlagen wir die Modellvariante mit den besten Ergebnissen vor. Zusätzliche Empfehlungen dienen dazu, das



(3) Bezüglich des Maximalwerts (100%) normalisierte Mittelwerte der Pronations- und Dämpfungseigenschaften von Laufschuhen im Zeitraum von 1991 bis 2009.

Quelle: eigene Darstellung

lastung des Körpers kann durch eine Beschleunigungsmessung am Unterschenkel und durch die Kraftanstiegsrate der vertikalen Bodenreaktionskraft beurteilt werden. Abbildung (3) zeigt, dass Laufschuhe bis zum Jahr 1998 gute Stoßdämpfungswerte aufwiesen. Zwischen den Jahren 2000 bis 2005 wurden die stoßabsorbierenden Eigenschaften der Schuhe deutlich schlechter. Führende Biomechaniker postulierten Ende der 1990er Jahre, dass sehr gut dämpfende Laufschuhe die sensorische Belastungswahrnehmung durch die Hautsensorik unter dem Fuß zu stark vermindern. Sie nahmen an, dass ein reduziertes sensorisches Feedback die motorische Kontrolle von Läufern negativ beeinflusst und sich die Verletzungsgefahr dadurch erhöht. Auch wenn diese Vermutung nie belegt wurde, schloss sich die Industrie dieser Hypothese an und produzierte Schuhe mit reduzierter Dämpfung. Erst in den vergangenen Jahren wurden die Dämpfungseigenschaften der Schuhe wieder besser. Dies liegt daran, dass Läufer

betrafen Hallen- und Wanderschuhe sowie die Überprüfung von Tennisschlägern. Jede der obigen Untersuchungen für die Stiftung Warentest wurde durch Forschungsprojekte ergänzt, die der Grundlagenforschung dienten. Aus der Zusammenarbeit mit der Stiftung Warentest erwachsen so zahlreiche studentische Qualifizierungsarbeiten und wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Durch das Testen von Sportschuhen für die Stiftung Warentest entstanden Kooperationen mit mehreren Schuhfirmen, die ihre Produkte überprüfen und verbessern lassen wollten. So entwickelte sich eine enge Zusammenarbeit mit der Firma Deichmann (Essen) und dem Unternehmen Isa Traesko GmbH (Neumünster), das im Auftrag von namhaften Discounter-Marken produziert. Typischerweise erhalten wir von den Firmen mehrere Modellvariationen eines geplanten Produkts (z.B. Trekkingschuhe). Routinemäßig werden Spitzenmodelle der Marktführer im entsprechenden Produktsegment mit

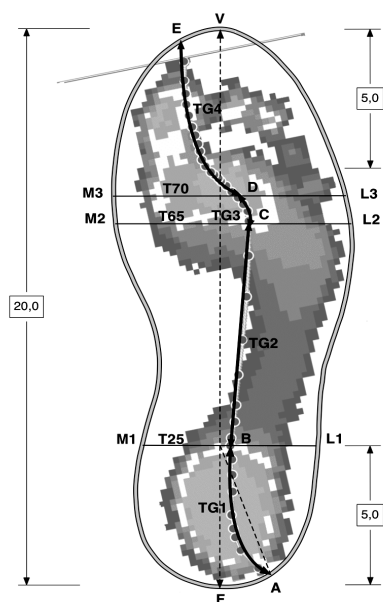
ausgewählte Modell weiter zu verbessern. Typischerweise werden zwei bis drei solcher Testzyklen durchlaufen, bevor das Endprodukt in den Verkauf kommt.

#### Patentierung einer Schuhinnovation an der Universität Duisburg-Essen

Stürze gehören zu den häufigsten Beeinträchtigungen des Körpers im Alter und können schwerwiegende medizinische Komplikationen verursachen. Feder et al. (2000)<sup>8</sup> [8] berichten, dass ein Drittel aller Personen über 65 Jahre und die Hälfte der über 80-jährigen Senioren mindestens einmal im Jahr stürzen. Die Angst vor einem neuen Sturz führt oft zur Bewegungseinschränkung und beeinträchtigt damit die Lebensqualität älterer Menschen. Hauptverantwortlich für den rapiden Anstieg der Sturzgefährdung im fortgeschrittenen Lebensalter sind neurodegenerative Vorgänge im Körper. Die neuromotorischen und -sensiblen Veränderungen

führen zu Einbußen der Maximal- und Schnellkraftfähigkeit sowie zu einer reduzierten sensorischen Wahrnehmung von Umweltreizen. Zahlreiche Studien belegen, dass trotz fortschreitender neurologischer Einbußen ein Bewegungstraining das Sturzrisiko älterer Menschen reduzieren kann. Koordinations- und Krafttrainingsübungen haben sich als präventive und rehabilitative Maßnahmen bewährt. Allerdings ist der Wille älterer Menschen, Bewegungsübungen in Studios, Rehabilitationszentren oder unter Anleitung durchzuführen, häufig eingeschränkt. Bewegungsvariabilität im Alltag zu provozieren, um damit koordinative Fähigkeiten zu schulen, ist ein neuer Interventionsansatz zur Sturzprophylaxe, den wir in unserem Labor untersuchen wollten. Schuhe, die Instabilität beim Gehen erzeugen, erfordern einen variablen Einsatz der Körpermuskulatur zum Erhalt des Gleichgewichts. Während des Gehens existiert beim Abrollen des Fußes eine Ganglinie, die den Verlauf des Druckverteilungszentrums (Center of Pressure) repräsentiert. Um diese Linie muss balanciert werden, um beim Gehen ein dynamisches Gleichgewicht aufrechtzuerhalten. Die von uns zum Patent angemeldete Schuhinnovation (EP 2547226) sollte die motorische Anforderung zur Gleichgewichtskontrolle dadurch erhöhen, dass der Sohlenaufbau im Bereich der Ganglinie materialtechnisch verändert wird (Abb. 4). Die Zusammenarbeit mit der Firma Isa Traesko GmbH hatte den Vorteil, dass uns speziell gefertigte Experimentalschuhe in kurzer Zeit und größerer Anzahl zur Verfügung gestellt werden konnten. So war es möglich, für ein Promotionsvorhaben der Doktorandin Ann-Kathrin Hömme je 50 Paare zweier Schuhmodifikationen produzieren zu lassen. Bei identischem Schuhschaft unterschieden sich die Experimental- und Kontrollschuhe lediglich im Aufbau der Sohle. Beim Experimentalschuh wurde durch Materialkomponenten und eine variierende Sohlenstärke (von der Mitte zum Rand hin abfallend) eine Instabilität bezüg-

lich der Ganglinie (Center of Pressure) erzeugt. Dagegen entsprach der Kontrollschuh in seinen Konstruktionsmerkmalen einem klassischen Joggingsschuh. Das Ziel der Dissertation von Frau Hömme war, die Auswirkungen eines täglichen Trainings mit einem neu konzipierten Schuhmodell, das eine geringe bis moderate Körperinstabilität im Stand und beim Gehen provoziert, auf die Schulung des Gleichgewichts zu überprüfen. In einer prospektiv randomisierten Doppelblindstudie erhielten 70 Frauen im fortgeschrittenen Lebensalter



(4) Die Ganglinie (Center of Pressure) als Grundlage der Patentanmeldung (EP 2547226) für Instabilitätsschuhe zur Schulung der motorischen Kontrolle im Alter.  
Quelle: eigene Darstellung

(über 65 Jahre) die unterschiedlichen Schuhe, die über einen Zeitraum von zwölf Wochen täglich benutzt wurden. Frau Hömme konnte über klinische und biomechanische Tests vor und nach dem Interventionszeitraum den positiven Einfluss von Instabilitätsschuhen zur Schulung der Gleichgewichtskontrolle nachweisen und schloss ihre Promotion im Jahr 2014 erfolgreich ab. Anders als bei meinen frühen Patentanmeldungen der 1970er Jahre in Frankfurt stand mir an der Uni-

versität Duisburg-Essen mit dem Science Support Centre (SSC) ein kompetentes Team zur Seite. Nach Bekanntgabe der Idee des innovativen Schuhkonzepts zur Gleichgewichtsschulung wurde ich in jedem Schritt des Patentanmeldungsverfahrens unterstützt. Sowohl die Finanzierung als auch der Verwaltungsaufwand wurden von universitärer Seite übernommen. Meine Tätigkeit bestand in der Beschreibung des Patentgegenstands sowie des zu erwartenden Nutzens der Erfindung. Ein Gespräch mit dem beauftragten Anwalt genügte, die Patentansprüche zu formulieren. Alle weiteren Recherche- und Anmeldungsschritte wurden dann vom Patentanwaltsbüro in Absprache mit dem SSC übernommen. Dieses Verfahren stellt eine wesentliche Entlastung des Erfinders dar und senkt die Schwelle zur Anmeldung einer Idee, die eventuell rechtsschutzfähig ist. Dabei ist es nicht unerheblich, dass das finanzielle Risiko von der Universität übernommen wird. Die Firma Isa Traesko GmbH hatte Interesse daran, das von uns zum Patent angemeldete Schuhkonzept für große Discountanbieter zu nutzen. Auch hier half das SSC bei der Formulierung und beim Abschluss eines Lizenzvertrages. Aus diesem Vertrag sind bis heute nennenswerte Lizenzgebühren erwirtschaftet worden, die sowohl der Universität als auch meinem Arbeitsbereich zugeflossen sind.

### Entwicklung von Fußballschuhen für die Firmen Nike (USA) und Pele Sports (Schweiz)

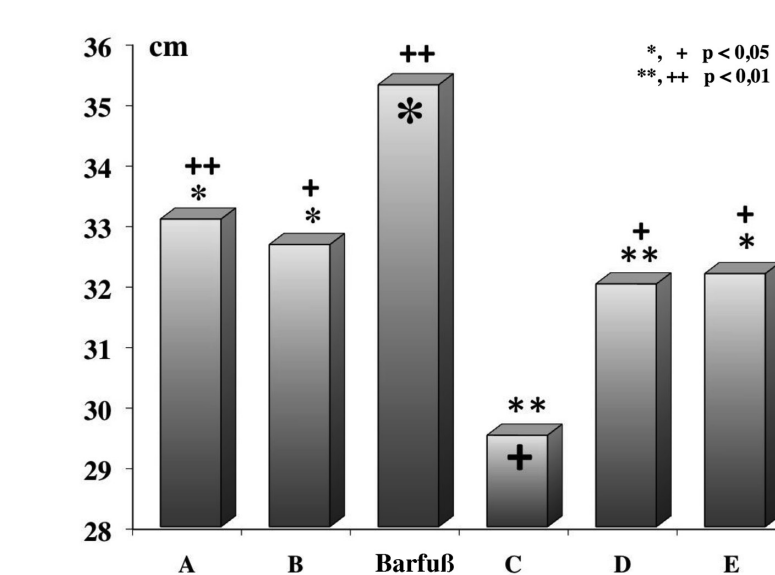
Mein erstes Forschungsfreisemester (WS 1991/92) an der Universität-GH Essen nutzte ich dazu, den Einsatz biomechanischer Forschung für Produktentwicklungen bei der Firma Nike Inc. (USA) kennenzulernen. Über einen Zeitraum von drei Monaten arbeitete ich im Team des Nike Sport Research Laboratory (NSRL) am Firmenhauptsitz in Portland (Oregon/USA). Im Jahr 1997 entschied sich Nike (USA), ihre



hauseigene Forschung durch internationale Partner ergänzen zu lassen. Man hatte erkannt, dass im Umfeld der eigenen Firma die Durchführung von Grundlagenforschungsprojekten schwierig zu verwirklichen ist. Im Rahmen der Globalisierung der Nike Forschung wurde ich als möglicher Partner zur Entwicklung von Fußballschuhen kontaktiert. Im Zeitraum von 1998 bis 2008 führten wir im Rahmen eines Kooperationsvertrags der Universität mit der Firma Nike (USA) Forschungsprojekte für den Bereich „Fußballschuhe“ aus. Unsere Forschungsergebnisse spiegeln sich in den Schuhmodellen wieder, die im Zweijahresrhythmus zu den Welt- und Europameisterschaften auf dem Markt erschienen. Im Folgenden sind die Projekte aufgelistet, die in diesem Zeitraum von unserem Labor durchgeführt wurden:

- Prioritätenliste wünschenswerter Schuheigenschaften – Fragebogenanalysen bei Männern und Frauen in den Jahren 1998 und 2006
- Verbesserung des Schuhkomforts durch Druckverteilungsanalysen
- Stollenkonfiguration und Traktionseigenschaften auf unterschiedlichen Spieluntergründen
- Halt und Stabilität in Schuhen bei schnellen Richtungswechseln
- Der Einfluss der Schuhkonstruktion auf die maximale Schussgeschwindigkeit
- Der Einfluss der Schaftgestaltung auf die Schusspräzision
- Das Spiel der Frauen und Männer – Konsequenzen für geschlechtsspezifische Schuhe – basierend auf Spielanalysen der Welt- und Europameisterschaften der Männer und Frauen
- Ballgefühl – Einfluss des Schuhobermaterials auf die Wahrnehmungsschwellen der Hautsensorik bei äußeren Vibrationsreizen.

Das wohl überraschendste Ergebnis unserer Forschung war, dass die Gestaltung des Schuhschafts im Vorfußbereich einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Schusspräzision hat. In einer ersten Studie hatten 20 Fuß-



(5) Genauigkeit (absoluter Abstand in cm) von Schüssen aus einer Entfernung von 10 Metern auf ein Ziel barfuß und mit fünf unterschiedlichen Schuhmodellen (A–D). Statistische Signifikanzen bezüglich der Barfußbedingung (\*) und dem Schuh C (+) mit der besten Präzision.

Quelle: eigene Darstellung

ballspieler die Aufgabe, eine elektronische Zielscheibe in einer Höhe von 115 cm über dem Boden aus zehn Metern Entfernung möglichst genau zu treffen. Bei Barfußschüssen und in unterschiedlichen Schuhmodellen ergaben sich deutliche Unterschiede in der Schusspräzision (Abb. 5). Mit Hilfe von Druckverteilungsanalysen stellten wir in einer Folgestudie fest, dass eine möglichst homogene Druckverteilung zwischen dem Ball und seiner Kontaktfläche auf dem Schuh die Schusspräzision begünstigt. Bei barfußigem Ballkontakt erzeugen die knöchernen Fußstrukturen inhomogene Druckmuster, die zu Einbußen in der Schussgenauigkeit führen. Das Obermaterial der Fußballschuhe verteilt den hohen Druck oberhalb der Knochenprominenz über eine größere Fläche und führt damit zu einer homogeneren Druckverteilung zwischen Ball und Schuh. So wurde die Schusspräzision durch das Tragen aller Schuhmodellen verbessert. Besonders interessant für die Hersteller von Fußballschuhen ist die Tatsache, dass man durch geeignete Konstruktionsmerkmale die Schussgenauigkeit von Spielern positiv beeinflussen kann (s. Abb. 5). Unerwartet war auch das Ergeb-

nis, dass man bei Maximalschüssen barfuß höhere Ballgeschwindigkeiten erreicht als mit Schuhen. Ergebnisse dieser Studien sind in Übersichtsartikeln beschrieben<sup>9,10</sup>.

Nach Auslaufen des Kooperationsvertrags mit der Firma Nike wurden wir von der neu gegründeten Firma „Pele Sports“, die Produkte für den Fußballbereich herstellt, kontaktiert. Man wollte einen besonders leistungsfähigen Schuh produzieren, der trotz geringem Schuhgewicht einen guten Tragekomfort und hohe Geschwindigkeiten auf dem Spielfeld gewährleistet. Nach Abschluss eines Kooperationsvertrages erfolgten in den Jahren 2010 und 2011 unsere biomechanischen Analysen des geplanten Schuhs. Mit Hilfe von Druckverteilungsmessungen im Schuh und Traktionsmessungen auf dem Spielfeld waren wir in der Lage, Optimierungskriterien zu erarbeiten, nach denen der Schuh produziert wurde. Das Endprodukt, der „Trinity 3E“, hatte durch die Nutzung neuartiger Sohlen- und Schaftmaterialien nur eine Masse von 170 Gramm. Eine Besonderheit der Sohle war die Stollenkonfiguration im Fersenbereich mit zwei Stollen auf der Außen- und nur einem Stollen auf

der Innenseite des Schuhs. Im Vergleich zu Spitzenmodellen der Firmen Adidas, Nike und Puma war der Trinity 3E das Schuhmodell, mit dem ein vorgegebener Testparcours von unseren Fußballspielern am schnellsten durchlaufen werden konnte.

### Rückblick auf 40 Jahre anwendungsorientierte Forschungstätigkeit

Die Universitätslandschaft hat sich seit den 1970er Jahren, als meine akademische Laufbahn begann, erheblich verändert. Eine Zusammenarbeit der Universitäten mit Wirtschaftsunternehmen wurde zu Beginn meiner Universitätstätigkeit argwöhnisch betrachtet. Man sah die Unabhängigkeit universitärer Forschung gefährdet. Die Anmeldung von Schutzrechten war mit erheblichem privaten Kostenaufwand verbunden und in der Durchführung sehr aufwendig. Heute orientieren sich deutsche Hochschulen an Verwaltungs- und Vermarktungsstrategien, die in den Universitäten der USA seit langer Zeit etabliert sind. Dies bedeutet für ForscherInnen an deutschen Universitäten, dass es einfacher geworden ist, neue Ideen schützen zu lassen und einen Zugang zur Vermarktung dieser Ideen zu bekommen. Die Kostenübernahme von Schutzrechtsanmeldungen durch die Universitäten senkt deutlich die Schwelle, Ideen auf ihre Schutzrechtsfähigkeit überprüfen zu lassen. Zusätzlich helfen Vermarktungsinstitutionen, deren Aufgabe es ist, universitäre Forschungsergebnisse interessierten Wirtschaftsunternehmen nahe zu bringen. Meine Erfahrungen aus den vergangenen 40 Jahre lehren mich allerdings, dass es die beste Strategie ist, selbst aktiv zu werden und in eigener Regie Wirtschaftskontakte zu suchen. Wissenschaftliche Veröffentlichungen und die Teilnahme an Konferenzen helfen, die Forschungsaktivitäten im akademischen Umfeld zu verbreiten und zu dokumentieren. Unverzichtbar für die Vermarktung von Forschungserkenntnissen sind

jedoch heute allgemeinverständliche Auftritte in den Medien sowie eine ansprechende und auch dem Laien verständliche Internetpräsenz. Hier sollten Universitäten ihr bestehendes Serviceangebot ausbauen und intensivieren. Im Vergleich zu meinen Erfahrungen an amerikanischen Universitäten sehe ich auch ein Defizit in der Ausbildung unserer Studierenden. Persönlichkeitsbildende Kurse, in denen das eigene Auftreten geschult sowie die Vermarktung der eigenen Tätigkeit für die Öffentlichkeit vermittelt werden, sollten Bestandteil eines jeden Studiums werden. Was nutzen die besten Forschungsergebnisse und Ideen, wenn sie das Labor nie verlassen und einer größeren Öffentlichkeit vorenthalten werden?

### Summary

The value of biomechanical research for industrial applications is presented here. Based on his academic and employment history the author describes his research, patent experiences, funding resources and the interaction with industry for testing and developing commercial products. From his work in the field of biomechanics, new capacitive and piezoelectric pressure distribution measuring systems were developed for sports and technical application. Based on the experiences as a physics student in Frankfurt and his doctoral studies in the USA, the author compares industrial research funding approaches at German and American universities. The testing of sports equipment led to several industry contacts for the improvement of their products, also providing valuable financial support for fundamental research and the employment of students. The university's Science Support Centre was helpful in the management of patent applications and license contracts, generating valuable revenues for the university and the biomechanics laboratory.

### Anmerkungen/Literatur

- 1) Hennig, E.M., Kapazitives Kraftmeßverfahren und akustisches Geschwindigkeitsmeßverfahren zur Erfassung von Bewegungsmerkmalen in der äußeren Biomechanik. 1975, Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt.
- 2) Nicol, K. and E.M. Hennig, Kraftaufnehmer – Patent DE3025362. 1982, Deutsches Patentamt: München.
- 3) Nicol, K. and E.M. Hennig, Time-dependent method for measuring force distribution using a flexible mat as a capacitor, in In, Komi, P.V. (ed.), Biomechanics V-B, Baltimore, Md., University Park Press, 1976, 433–40.
- 4) Hennig, E.M. and K. Nicol, Registration methods for time-dependent pressure distribution measurements with mats working as capacitors, in In Asmussen, E. and Jorgensen, K. (ed.), Biomechanics VI-A, Baltimore, Md., University Park Press, 1978, 361–367.
- 5) Nicol, K. and E.M. Hennig, Elektrische Schaltungsanordnung zum zeitabhängigen Messen von physikalischen Größen – Patent DE2529475. 1977, Deutsches Patentamt: München.
- 6) Hennig, E.M. and K. Nicol, Verfahren zur Bestimmung von kardiologischen Messgrößen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens – Patent DE2829269. 1980, Deutsches Patentamt: München.
- 7) Hennig, E.M., et al., A piezoelectric method of measuring the vertical contact stress beneath the human foot. J Biomed Eng, 1982. 4(3): 213–22.
- 8) Feder, G., et al., Guidelines for the prevention of falls in people over 65. BMJ, 2000. 321: 1007–1011.
- 9) Althoff, K. and E.M. Hennig, Criteria for gender-specific soccer shoe development. Footwear Science, 2014. 6(2): 89–96.
- 10) Hennig, E.M., The influence of soccer shoe design on player performance and injuries. Res Sports Med, 2011. 19(3): 186–201.

### Der Autor

Ewald Hennig studierte von 1968 bis 1975 Physik an der Universität in Frankfurt. Dort war er nach seinem Diplom in den Jahren 1975 bis 1980 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Sport und Sportwissenschaften. Nach einem Aufenthalt als Gastwissenschaftler an der Pennsylvania State University war er dort bis 1984 Graduate Assistant im Biomechanics Department, wo er 1984 auch promovierte. Von 1984 bis 1987 war er akademischer Rat in der Abteilung für Sportwissenschaften an der Universität Konstanz, bevor er 1987 Professor für Biomechanik und Bewegungslehre an der damaligen Gesamthochschule Essen, heute Universität Duisburg-Essen, wurde.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/70480

**URN:** urn:nbn:de:hbz:464-20190822-141754-3

Erschienen in: UNIKATE 46 (2014), S. 32-41

Alle Rechte vorbehalten.